

锅炉原理

华北电力大学
能源动力与机械工程学院

郭永红: 主楼F717, 13621392666, 61772811, guoyonghong@ncepu.edu.cn

教材: 樊泉桂主编《锅炉原理》

电力工业的发展状况

- 1752年, 本杰明·富兰克林, 捕捉到了电
- 1875年, 世界第一台火力发电机组, 巴黎北火车站, 直流发电机
- 1879年, 世界最早的出售电力电厂, 美国金山实验电厂
- 1980年, 全世界发电装机容量20.24亿kW
- 2003年, 全世界发电装机容量37.1亿kW

中国电力工业的发展状况

- 1882年, 英国人在上海创办了中国第一座发电厂, 容量11.76kW
- 1949年, 全国电力装机容量185万kW
- 1978年, 全国发电装机容量为5712万kW
- 1987年, 全国发电装机容量>1亿kW
- 1995年(8年后), 全国发电装机容量>2亿kW
- 2000年(5年后)>, 全国发电装机容量3亿kW
- 2004年全国发电装机容量4.407亿kW
- 2006年全国发电装机容量6.22亿kW, 年发电量突破28000亿度, 分别比1949年增长了336倍和651倍
- 2007年全国发电装机容量7.1329亿kW
- 2008年全国发电装机容量7.9253亿kW
- 2009年全国发电装机容量8.74亿kW
- 2010年9月20日, 中广核岭澳核电站二期工程1号机组建成投产, 全国电力装机容量达到9亿kW
- 2010年底, 全国装机容量达9.6219亿kW

建国以来我国电力的发展

	全国发电装机容量 (万kW)	发电量 (亿kwh)	人均用电量 (kw·h)
1949	185	43	9
1978	5712	2566	
1987	10000	4960	
1995.3	20000	10069.48	
2000.4	30000	13684.8	
2004	44000	21870	
2005	50000	24146	
2006	62200	28000	
2007	71329		
2008	79253	34334	

中国年发电量居世界的位次

时间	1950	1957	1965	1978	1980	1985	1990	1995	2006
世界排名	25	13	9	7	6	5	4	2	2

第二发电大国, 人均发电量不到世界平均水平的一半

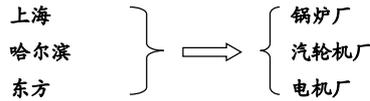
电力结构 (装机容量%)

	火电	水电	核电	风电
2004年	73.7	24.5	1.6	0.2
2008年	75.87	21.64	1.1	1.39
2009	74.60	22.51		2.95 (25805MW)

2010年8月, 水电装机容量达2亿KW

火电的发展

- 1882年上海第一台机组
- 建国初期，依靠苏联，中低压小机组（额定蒸汽压力 $<3.8\text{MPa}$ ）
- 1953年后，三大动力厂（高压 9.8MPa 、超高压 13.7MPa ）



81年以来，引进国外技术

- 美国CE公司300MW、600MW亚临界控制循环锅炉
- 美国FW公司燃烧无烟煤300MW、600MW双拱炉膛W火焰锅炉
- 美国FW公司大型循环流化床锅炉技术
- 1991年上海石洞口二厂引进 2台 600MW超临界机组（煤耗低，调峰能力好）1996年平均发电煤耗 $307\text{g/kw}\cdot\text{h}$ （2007年我国平均发电煤耗 $334\text{g/kw}\cdot\text{h}$ ）

上海石洞口二厂 1991年引进的第一个超临界机组



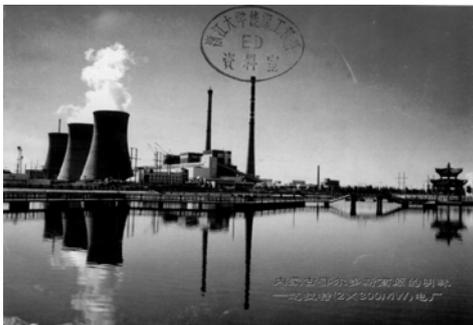
第一章 概述

● 第一节 锅炉机组的工作过程

两幅火力发电厂图片，问题：

1. 冒白烟的是烟囱吗？
2. 又细又高的建筑是什么？
3. 为什么建在水边？
4. 斜着的是什么？

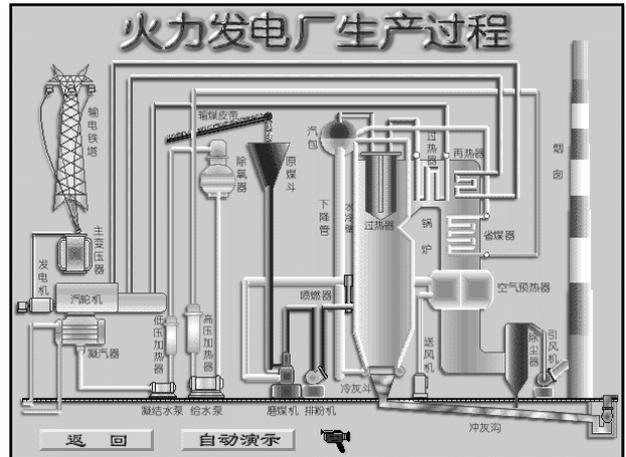
现代化的火电厂-达拉特电厂



现代化的火电厂-陡河电厂



火力发电厂



燃煤锅炉的工作过程:

1. 煤: 原煤破碎→干燥、制粉→输送煤粉→炉膛中组织燃烧
2. 空气: 冷空气→送风机→(空气预热器)加热→一次风、二次风→炉膛
3. 水: 省煤器→(汽包)→蒸发受热面(水冷壁)→过热器→(汽轮机→凝汽器→低压加热器→除氧器→给水泵→高压加热器→)省煤器
4. 排渣、清灰、除灰, 除尘、脱硫、脱硝→引风机→烟气排放。

图示的工作过程有错误吗?

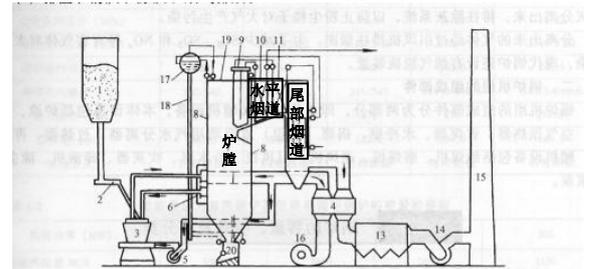


图 1-1 锅炉机组的工作过程示意
1—煤斗; 2—给煤机; 3—磨煤机; 4—空气预热器; 5—排粉风机; 6—燃烧器; 7—炉膛; 8—水冷壁; 9—屏式过热器; 10—高温过热器; 11—低温过热器; 12—省煤器; 13—除尘器; 14—引风机; 15—烟囱; 16—送风机; 17—钢筒; 18—下降管; 19—顶棚过热器; 20—排渣室

锅炉机组的工作过程

- 燃料 化学能 → 水和蒸汽的热能
- 水 加热、蒸发(汽化)、过热

锅炉: 利用燃料燃烧释放的热能或其它热能加热给水, 以获得规定参数(温度、压力)和品质的蒸汽的设备

第二节 锅炉机组的系统及组成部件

一、锅炉机组的系统

- 1, 制粉系统(原煤仓、给煤机、磨煤机、煤粉分离、炉膛)
- 2, 燃烧系统(冷空气、送风机、空气预热器、炉膛和制粉系统)
- 3, 汽水系统(省煤器、水冷壁、过热器、再热器)
- 4, 除渣、除灰和清灰系统(碎渣机、除尘器、吹灰器)
- 5, 烟气排放系统(除尘器、烟气脱硫装置、脱硝装置、引风机、烟囱)
- 6, 脱硫、脱硝系统

二、锅炉机组的组成部件

- 1, 本体: 炉膛、燃烧器、空气预热器、省煤器、水冷壁、汽包/启动汽水分离器、过热器、再热器
- 2, 辅机: 给煤机、磨煤机、送风机、引风机、给水泵、吹灰器、碎渣机、除尘器、灰泵。

第三节 锅炉的容量、参数及其分类

一、电站锅炉的蒸汽参数及容量

- 过热蒸汽温度、压力
- 再热蒸汽温度、压力
- 最大连续蒸发量MCR

表1-1 中国电站锅炉的蒸汽参数及容量

蒸汽压力 MPa	蒸汽温度 ℃	给水温度 ℃	MCR t/h	发电功率 MW
9.9	540	205~225	220,410	50,100
13.8	540/540	220~250	420,670	125,200
16.8~18.6	540/540	250~280	1025~2008	300,600
25~27.6	545/545~605/603	267~302	1900~3033	600,1000
25.4	541/546	286	1900	600
25	545/545	267~277	1650~2650	500,800

表1-2 亚临界压力自然、控制循环锅炉参数

机组功率 MW	300 MW	300 MW	300 MW	600 MW	600 MW
循环方式	自然循环	控制循环	自然循环	自然循环	控制循环
过热蒸汽流量 MCR	1025	1025	1025	2026.8	2008
再热蒸汽流量, t/h	860	834.8	823.8	1704.2	1634
过热蒸汽压力, MPa	18.2	18.3	18.3	18.19	18.22
再热蒸汽压力, MPa	4/3.79	3.83/3.62	3.82/3.66	4.176/4.3	3.49/3.31

续表1-2 亚临界压力
自然循环及控制循环锅炉的容量和参数

机组功率 MW	300 MW	300 MW	300 MW	600 MW	600 MW
过热蒸汽温度, ℃	540	541	540	540.6	540.6
再热蒸汽温度, ℃	330/540	322/541	316/540	313/540	313.3/540.6
给水温度, ℃	276	281	278	276	278.33
燃煤量, t/h	136.61	139.89	122.6	264.4	269.9
燃烧方式	四角燃烧	四角燃烧	对冲燃烧	对冲燃烧	四角燃烧

表1-3 超临界和超超临界参数锅炉的容量和参数

机组功率, MW	500	600	800	1000
过热蒸汽流量 MCR	1650	1900	2650	2953
再热蒸汽流量, t/h	1481	1607	2151.5	2457
过热蒸汽压力, MPa	25	25.4	25	27.56
再热蒸汽压力, MPa	4.15/3.92	4.714.52	3.86/3.62	6/5.8
过热蒸汽温度, ℃	541	543	545	605

续表1-3 超临界和超超临界参数锅炉的容量和参数

机组功率, MW	500	600	800	1000
再热蒸汽温度, °C	295/545	297/569	283/545	359/603
给水温度, °C	284	283	277	302
燃烧方式	对冲燃烧	对冲燃烧	对冲燃烧	双四角燃烧
水冷壁型式	垂直管屏 光管	螺旋管圈 垂直管屏 内螺纹管	垂直管屏 光管	垂直管屏

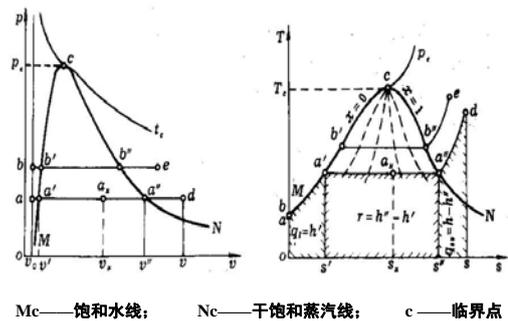
表1-4 国外超临界参数机组的发展方向

主蒸汽压力, MPa	29	30.5	33.5	40
主蒸汽温度, °C	582	582	610	700
再热蒸汽压力, MPa	8	7.4	9.3	11.2
再热蒸汽温度, °C	580	600	630	720
循环热效率, %	47	49	>50	52~55

二、锅炉的分类

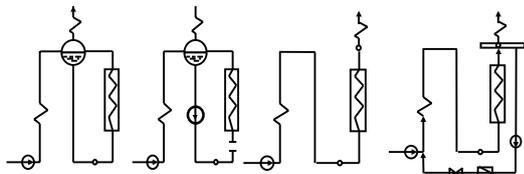
- 按用途: 电站锅炉、工业锅炉、热水锅炉
- 按锅炉容量: 大、中、小
- 按蒸汽压力:
 - 低压锅炉: $p < 2.5 \text{ MPa}$
 - 中压锅炉: $p \approx 3.9 \text{ MPa}$
 - 高压锅炉: $p \approx 10.8 \text{ MPa}$
 - 超高压锅炉: $p \approx 14.7 \text{ MPa}$
 - 亚临界压力锅炉: $p = 16.8 \sim 18.6 \text{ MPa}$
 - 超临界及超超临界压力: $p = 25 \sim 40 \text{ MPa}$

临界点 (374.15°C, 22.129Mpa)

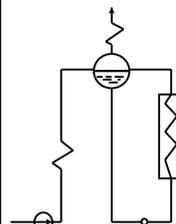


- 按燃烧方式: 火床炉、煤粉炉(四角、对冲、W火焰)、旋风炉、流化床锅炉
- 按蒸发受热面循环方式: 自然循环、控制循环、直流锅炉、低倍率复合循环锅炉

自然循环锅炉 控制循环锅炉 直流锅炉 低倍率复合循环锅炉

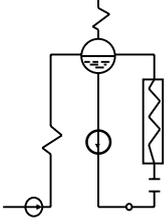


自然循环锅炉



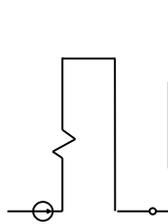
- 蒸发受热面内的工质, 依靠下降管中的水与上升管中的汽水混合物之间的密度差所产生的压力差进行循环的锅炉
- 特点: ① 大汽包 ② 水容量大 ③ 预热、蒸发、过热三个阶段的分隔容器 ④ 汽水密度差小 水冷壁垂直布置 ⑤ 可以排污

控制循环锅炉



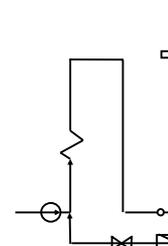
- 蒸发受热面内的工质除了依靠水与汽水混合物的密度差之外,主要依靠锅水循环泵的压头进行循环的锅炉
- 特点: ①强制循环泵②循环推动力大,水循环更加可靠,水冷壁管径减小,受热面布置方式灵活③汽包直径、壁厚减小,减少金属消耗量④提升了机组升降负荷速度,缩短了启、停时间⑤增加了电厂的初投资及运行费用⑥强制循环泵工作于高温、高压下→昂贵

直流锅炉



- 只依靠给水泵的压头,一次通过锅炉各受热面产生蒸汽的锅炉
- 特点: ①无汽包②各受热面没有固定分界,蓄热能力小,负荷变化敏感,控制要求高③蒸发受热面工质不循环,高压、高含汽率,防止膜态沸腾④超临界压力⑤启停快⑥对给水质要求高⑦受热面布置方式灵活,节省钢材 ⑧消耗较多给水泵功率

低倍率复合循环锅炉

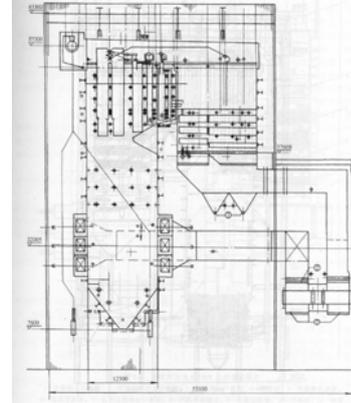


- 直流锅炉+强制循环锅炉
- 汽水分离器
- 强制循环泵
- 止回阀
- 调节阀

第四节 亚临界参数锅炉的主要型式

- 一、采用对冲燃烧方式的300MW自然循环锅炉
- 二、采用四角燃烧方式的300MW自然循环锅炉
- 三、FW亚临界压力600MW自然循环锅炉
- 四、FW660MW级和300MW级W型火焰锅炉
- 五、B&W360MW级W型火焰锅炉
- 六、600MW控制循环锅炉

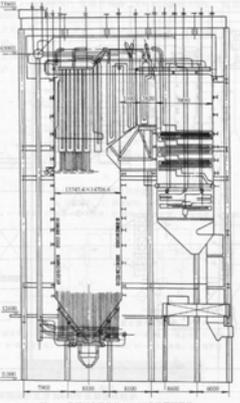
采用对冲燃烧的300MW自然循环锅炉



- 北京巴威B&W
- 双调风旋流燃烧器
- 亚临界自然循环锅炉
- 中间再热
- II型布置
- 烟气挡板调温
- 膜式水冷壁
- 回转式空气预热器

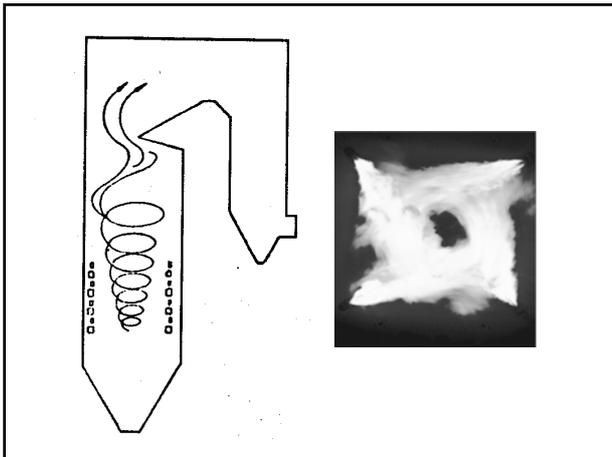
图 1-4 采用对冲燃烧的 300MW 锅炉

采用四角切圆燃烧的300MW自然循环锅炉



- 东方锅炉厂CE技术
- 膜式水冷壁
- 亚临界自然循环
- 四角切圆燃烧方式
- 摆动式燃烧器
- 两个切圆
- 三分仓空气预热器

图 1-4 采用四角切圆燃烧的 300MW 自然循环锅炉



FW亚临界对冲燃烧的600MW自然循环锅炉

- 最大连续蒸发量2020
- 低NO旋流燃烧器
- 对冲燃烧
- 双进双出球磨机直吹式制粉系统
- 一次风机：离心式
- 二次风机：轴流式
- 再热汽温调节：烟气挡板
- 过热汽温调节：喷水减温

FW 660MW等级W火焰锅炉

- 亚临界自然循环
- 50%无烟煤+50%贫煤
- 前后拱18只双旋风筒燃烧器
- 卫燃带

B&W公司 360MW级W火焰锅炉

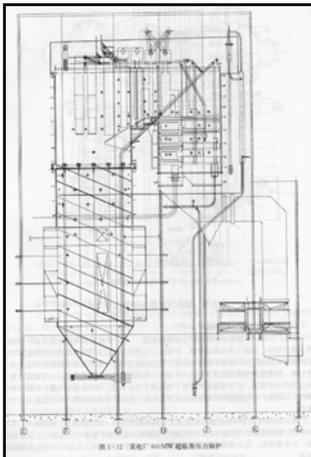
- 亚临界自然循环
- 50%无烟煤+50%贫煤
- 过热汽温调节：喷水减温
- 再热汽温调节：炉底供热风

600MW亚临界压力控制循环锅炉

- 控制循动
- 循环泵(高温、高压)
- 国产引进型已投入运行

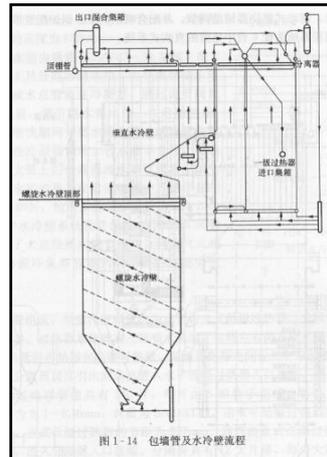
第五节 超临界参数锅炉的主要型式

- 一、600MW超临界参数直流锅炉
- 二、HBC-1000MW超超临界参数机组锅炉炉型
- 三、800MW超临界压力锅炉



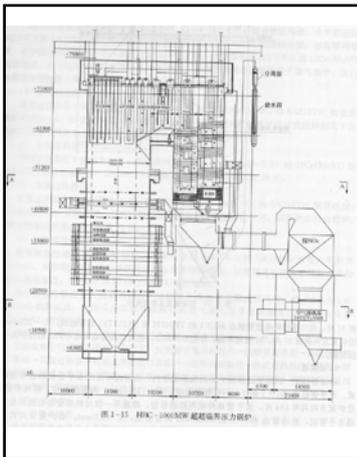
600MW超临界锅炉

- 36只B&W超低NO_x双调风旋流燃烧器
- 三层对冲
- OFA喷口
- 膜式水冷壁(垂直管屏+螺旋管圈)
- 中速磨冷一次风机正压直吹制粉系统
- 再热汽温调节: 烟道挡板



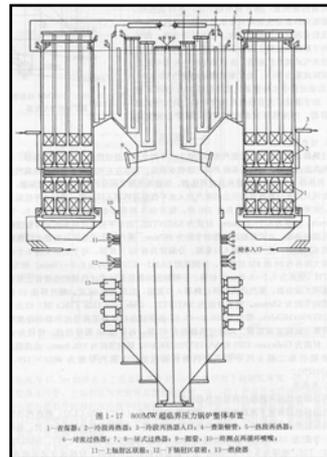
包墙管和水冷壁流程

- 炉膛前后墙、两侧墙→出口混合集箱→顶棚管→汽水分离器→入口联箱→①尾部烟道包墙管(→出口联箱→)+②水平烟道包墙管(→出口联箱+汽水分离器)



HBC-1000MW超临界压力锅炉

- 哈尔滨锅炉+三菱合作生产
- 浙江玉环电厂
- 反向双切圆
- PM型燃烧器+MACT配风
- 再热汽温调节: 烟气挡板+摆动式燃烧器
- 启动系统: 循环泵、扩容器
- 垂直管屏



800MW超临界锅炉

- T型布置, 全悬吊结构
- 膜式水冷壁
- 四层双蜗壳旋流燃烧器对冲燃烧
- 煤种: 烟煤
- 三台空气预热器: 1台一次风+2台二次风

本章重点

- 1, 锅炉
- 2, 燃料、空气、烟气流程
- 3, 水、水蒸汽流程
- 4, 锅炉容量
- 5, 锅炉按蒸汽压力分类
- 6, 锅炉按燃烧方式分类
- 7, 锅炉按蒸发受热面流动方式分类
- 8, 亚临界与超临界锅炉

第二章 燃料及其燃烧特性

●第一节 电站锅炉燃料

燃料: 通过燃烧释放热能的可燃物质

- 固体燃料: 煤
- 液体燃料: 原油、重油、渣油
- 气体燃料: 煤气、天然气

● 动力燃料

第二节 煤的元素分析的工业分析

- 元素分析Ultimate Analysis：全面测定煤中所含全部化学成分的分析，煤的元素分析成分包括碳、氢、氧、氮、硫、灰分和水分。

$$C+H+O+N+S+M+A=100\%$$

碳 (C)

- 可燃质
- 含量最多(50-90%)，随煤化程度而增加
- 是发热量的主要来源 (32.7MJ/kg→CO₂
9.27MJ/kg→CO)
- 碳一部分与氢、氧、氮、硫结合成挥发性有机化合物，其余为单质状态的固定碳
 - 存在于挥发分中：→易燃，燃点低
 - 固定碳：单质状态→难燃，燃点高

氢 (H)

- 可燃质
- 含量少 (3-6%)，随煤化程度加深而减少
- 主要存在于挥发分 (C_mH_n) 中
- 发热量最大 (120MJ/kg)，影响整个煤的发热量，并影响着火
- 燃点低，容易着火

氧 (O) 和氮 (N)

- 不可燃成分
- 含量较少，随煤化程度加深而减少
- 氧可以助燃
- 氮是有害物质
- 氮在高温条件下生成NO_x，是煤粉锅炉NO_x的主要来源
- 低污染燃烧技术

硫 (S)

- 可燃质
- 含量少 (0.5-3%)
- 发热量低9.04MJ/kg
- 有害物质(低温腐蚀、高温腐蚀)
- 燃烧产物为SO₂和SO₃，腐蚀金属，污染大气(酸雨)
- 三种存在形式：有机硫、硫化铁→可燃硫；硫酸盐→固定硫(灰分)

灰分、水分

- 不可燃质
- 减少单位燃料量的发热量，影响着火和燃尽
- 灰分造成受热面积灰、结渣、磨损
- 水分使炉内温度降低，影响燃料着火，加剧尾部受热面的腐蚀和堵灰

- 工业分析Proximate Analysis：在一定的实验室条件下的煤样，通过分析得出水分、挥发分、固定碳和灰分四种成分的质量百分数。

$$M+A+V+FC=100\%$$

- 按照煤的着火、燃烧过程中各成分的变化，分析煤中水分、挥发分、固定碳、灰分这四种成分

- 自然干燥→外部水分↑
- 加热干燥至 $145\pm 5^\circ\text{C}$ →内部水分↑
- 隔绝空气加热至 920°C →挥发分↑



- 焦炭→燃烧
 - {
 - 灰分 余下的
 - 固定碳 燃烧掉的

水分 (M)

$$\text{外部水分}(M_p) + \text{内部水分}(M_{ad}) = \text{全水分}(M_{ar})$$

- 外部水分：自然干燥失去 (free moisture)
- 内部水分：须加热干燥失去 (空气干燥基水分)

外部水分容易受季节、湿度的影响

- 内在水分 M_{ad} 的测定：

自然干燥后的煤样1g放入预先加热至 $(145\pm 5)^\circ\text{C}$ 的干燥箱中1h后，试样的减重即为内在水分

挥发分 (V)

将失去外在水分的煤，隔绝空气，放入 920°C 电炉加热7min，放入干燥器内冷却至室温称重，可得空气干燥基挥发分：

主要成份： C_mH_n 、 H_2 、 CO 、 H_2S 等可燃气体
 O_2 、 CO_2 、 N_2 等不可燃气体

挥发分一般用干燥无灰基表示 V_{daf} ，煤的分类依据

失去水分、挥发分后所余即焦炭 (固定碳+灰分) →加热燃烧

灰分 (A)

失去水分和挥发分的煤样放在高温炉中，按规定方法升温至 $(815\pm 10)^\circ\text{C}$ ，并加热1h，冷却至室温称重，剩余质量占原煤样质量百分数为空气干燥基灰分

成分	含量 (%)	成分	含量 (%)
SiO_2	20-60	MgO	0.3-4
Al_2O_3	10-35	TiO_2	0.5-2.5
Fe_2O_3	5-35	$\text{Na}_2\text{O}, \text{K}_2\text{O}$	1-4
CaO	1-20	SO_3	0.1-12

灰分来源于形成煤的植物本身的矿物质，成煤过程中进入的外来矿物质，开采、运输过程中掺杂进来的杂质

灰分

降低发热量，灰熔融吸热由排渣带走

影响着火、燃尽

影响炉膛结渣、受热面积灰、磨损

造成大气和环境的污染

固定碳 (FC)

挥发分逸出后残留下来的固体物质称为焦炭，焦炭的主要成分是可燃烧的固定碳和灰分。

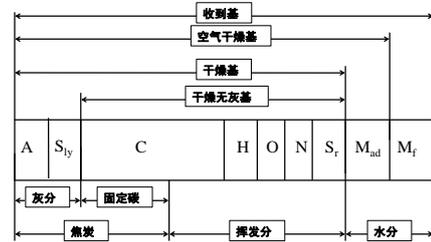
将原煤样中水分、灰分、挥发分去除后即空气干燥基固定碳的质量百分数

第三节 煤的成分的计算基准

● 灰分、水分受外界条件的影响变化

- 1, 收到基 (旧称应用基), 下标: ar
- 2, 空气干燥基 (旧称分析基)
下标: ad
- 3, 干燥基, 下标: d
- 4, 干燥无灰基, 下标: daf

煤的成分计算基准



收到基 (应用基)

空气干燥基(分析基)

干燥基

干燥无灰基 (可燃基)

收到基

空气干燥基

干燥基

干燥无灰基

基准间的换算



水分的换算???

● 收到基: 内在水分 = $M_{ar} - M_f$

第四节 煤的发热量及相关概念

- 煤的发热量：单位质量的煤在完全燃烧时放出的全部热量，kJ/kg
- 高位发热量 Q_{gr} ：包括煤燃烧后所产生的水蒸汽凝结放出的汽化潜热时，称为高位发热量，kJ/kg
- 低位发热量 Q_{net} ：发热量中不包括水蒸汽凝结放出的汽化潜热时，称为低位发热量。

$$Q_{ar,net} = Q_{ar,gr} - 206H_{ar} - 23M_{ar}$$

发热量测定

- 氧弹式量热计(1g煤样充满氧气燃烧)
- 弹筒发热量=①煤燃烧放出的热量+②产生水蒸汽凝结放出的汽化潜热+③燃烧产生的 SO_3 和 NO_x 溶解在水中形成酸放出的热量
- 空气干燥基高位发热量

$$Q_{ad,gr} = Q_{ad,b} - (95S_{ad,b} + \alpha Q_{ad,b})$$

- 收到基高位发热量

$$Q_{ar,gr} = Q_{ad,gr} (100 - M_{ar}) / (100 - M_{ad})$$

煤的折算成分

- 每送入锅炉4182kJ/kg热量，带入锅炉的水分、灰分、硫分(相对于每4182kJ/kg收到基低位发热量的煤所含的收到基水分、灰分、硫分)

>8% 高水分煤

>4% 高灰分煤

>0.2% 高硫分煤

标准煤

- 定义收到基低位发热量为29270kJ/kg的煤为标准煤

$$Q_{ar,net} = 29270 \text{ kJ/kg} \approx 7000 \text{ kcal/kg}$$

29310

煤灰的熔融性

灰不是纯净物，没有固定的熔融温度，受热时，由固态逐渐向液态转化，没有明显的界限温度，考查灰形态变化过程中的温度间隔

灰熔融性的表征方法：角锥法

高20mm，底边7mm的等边三角形锥体

温度可调、半还原性气体的硅碳高温炉(或灰熔点测定仪)，升温，自重作用下开始变形，软化到液态

目测

煤灰的熔融性

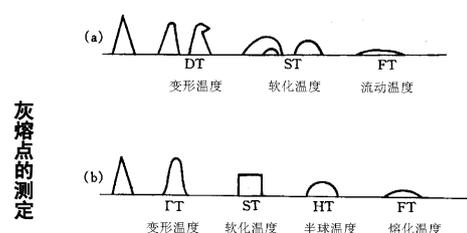


图 3-1 灰锥变形温度

(a) 中国及前苏联所用的角锥法；(b) 美国使用的角锥法

特征温度

- 变形温度DT: 灰锥顶端开始变圆或弯曲
- 软化温度ST: 锥顶变至锥底、球形、高度小于等于底长的半球
- 流动温度FT: 熔化成液体、展开为 <1.5mm 厚的薄层、逐渐缩小接近消失

- 长渣: 温度间隔大, 固相、液相共存温度区间很宽, 灰的粘度随温度变化很慢, 冷却时可长时间保持一定的粘度, 易于结渣。200~400℃
- 短渣: 温度间隔小, 灰渣的粘度随温度急剧变化, 冷却时粘度增加很快, 只在短时间内造成结渣。100~200℃
- 酸性氧化物、碱性氧化物纯净状态下熔点高
- 煤灰化学组成: 多种复合化合物的混合物, 燃烧时将结合为熔点更低的共晶体

熔融温度

表 2-2 一些氧化物单质、复合物、共溶体的熔融温度

名称	熔点 (°C)	名称	熔点 (°C)
SiO ₂	1728	Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂ + 2FeO·SiO ₂ - SiO ₂	1000 - 1100
Al ₂ O ₃	2050	低 熔 点	
CaO	2570	2FeO·SiO ₂ + FeO	1175
MgO	2800	2FeO·SiO ₂ + SiO ₂	1180
Fe ₂ O ₃	1540	共 熔 体	
Fe ₃ O ₄	1550	CaO·FeO + CaO·Al ₂ O ₃	1200
FeO	1420	CaO·FeO·SiO ₂ + CaSiO ₃	1093
多 晶 红 柱 石 3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	1850	CaO·Al ₂ O ₃ + SiO ₂ + CaSiO ₃ ·SiO ₂	1170
硅 酸 钙 CaO·Al ₂ O ₃	1500		
硅 酸 钙 CaO·SiO ₂	1540		
钙 铁 磷 灰 石 CaO·FeO·SiO ₂	1100		
铁 磷 灰 石 2FeO·SiO ₂	1065		

煤灰的结渣和积灰特性

- 对于固态排渣煤粉炉来说, 在运行中, 应使灰粒在接触水冷壁、炉膛出口受热面以及落入冷灰斗之前得到充分冷却, 并形成固态或基本上没有黏性, 以避免结渣、沾污问题
- 结渣: 炉内软化或熔化的灰粒碰撞并粘附在水冷壁和主要受热面上生成渣层
- 沾污: 煤灰中挥发物质在受热面表面凝结并粘结灰粒形成的沉积灰层。

结渣: 发生在烟气高温区域

ST>1390℃ 轻微结渣, 1260~1390℃ 中等结渣, <1260℃ 严重结渣

煤灰结渣的辅助判别准则-煤灰成分比例

(1) 碱酸比B/A:

<0.5: 低结渣倾向; 0.5~1.0: 中等结渣倾向; >1.0~1.75: 严重结渣倾向

(2) 硅铝比SiO₂/Al₂O₃:

2.65~1.87: 中等结渣煤; >2.65: 严重结渣煤

(3) 硅比G:

G>78.8: 轻微结渣煤; G=66.1~78.8: 中等结渣煤; G<66.1: 严重结渣煤

(4) 铁钙比Fe₂O₃/CaO:

<0.3: 不结渣煤; 0.3~3.0: 中等结渣煤; >3.0: 严重结渣煤

积灰: 发生在烟气温度较低的区域

煤灰粘污性常规判别准则

(1) 煤灰成分粘污指数

(Na₂O)_{ws}——煤灰中水溶性钠含量, %

表 2-3 煤灰成分粘污指数 F_1 和 F_1' 的分级界限

F_1	<0.2	0.2~0.5	0.5~1.0	>1.0
F_1'	<0.1	0.1~0.25	0.25~0.7	>0.7
锅炉运行程度	低	中	高	严重

(2) 煤灰和飞灰的烧结强度

高铁型灰:

高钙型灰

第六节 煤的分类

分类法: 采用表征煤化程度的干燥无灰基挥发分 V_{daf} 作为分类指标, 分为三大类:

- $V_{daf} \leq 10\%$ 无烟煤
- $10\% < V_{daf} < 37\%$ 烟煤
- $V_{daf} \geq 37\%$ 褐煤

附加其它指标细分

无烟煤

辅助指标: 干燥无灰基 H_{daf}

无烟煤1号: $V_{daf} \leq 3.5, H_{daf} \leq 2.0\%$

无烟煤2号: $6.5\% > V_{daf} > 3.5\%, 3.0\% > H_{daf} > 2.0\%$

无烟煤3号: $6.5\% > V_{daf} > 10\%, H_{daf} > 3.0\%$

- 煤化程度最深, 含碳量最多, C_{ar} : 50~95%
- 灰分不多, A_{ar} : 6~25%
- 水分较少, M_{ar} : 1~5%
- 挥发分含量少, $V_{daf} \leq 10\%$
- 发热量很高, 21000~25000kJ/kg

- 明亮的黑色光泽 硬度高不易研磨
- 挥发分析出温度较高, 含量少, 着火燃尽较难, 燃烧特性差
- 贮存时不易自燃
- 含碳量很高, 杂质少而发热量较高
- 燃烧时无烟, 火焰呈表蓝色, 火焰较短
- 焦炭没有粘结性
- 为保证着火和稳燃, 在锅炉设计中常需要采取一些特殊措施(W型炉), 对低灰熔点的无烟煤还须同时解决着火稳定性和结渣之间的矛盾

烟煤

辅助指标: 表征工艺性能的指标 (粘结指数、胶质层最大厚度、奥亚膨胀度、透光率)

贫煤、瘦煤、焦煤、肥煤、气煤、黏煤、长焰煤等

表 2-5 烟煤分类

类别	符号	分类指标				
		V_{daf} (%)	粘结指数 G	胶质层最大厚度 Y (mm)	奥亚膨胀度 b (%)	透光率 P_{10} (%)
贫煤	PM	10.0 - 20.0	≤ 5			
瘦煤	PS	10.0 - 20.0	5 - 20			
瘦煤	SM	10.0 - 20.0	20 - 65			
焦煤	JM	20.0 - 28.0	50 - 65			
		10.0 - 28.0	≥ 65	≤ 25.0	(≤ 150)	
肥煤	FM	10.0 - 37.0	(≥ 85)	> 25.0		
1/3 焦煤	1/3JM	28.0 - 37.0	≥ 85	≤ 25.0	(≤ 220)	
气煤	QM	> 37.0	(≥ 85)	> 25.0	(≤ 220)	
气煤	QM	28.0 - 37.0	50 - 65			
		> 37.0	≥ 35	≤ 25.0	(≤ 220)	
1/2 气煤	1/2QM	30.0 - 37.0	30 - 50			
黏煤	NM	20.0 - 37.0	5 - 50			
不黏煤	NM	20.0 - 37.0	≤ 5			
长焰煤	LM	> 37.0	≤ 35			> 50

- 煤化程度低于无烟煤, C_{ar} : 40~60%
- 灰分不多, A_{ar} : 7~30%
- 水分较少, M_{ar} : 3~18%
- 挥发分含量少, $V_{daf} > 10\%$
- 发热量一般, 20000~30000kJ/kg
- 贫煤的挥发量含量稍高于无烟煤, 其着火、燃尽特性优于无烟煤, 但仍属于燃烧特性差的煤种。
- 其余烟煤中等的煤化程度, 挥发分含量较高, 水分和灰分也较少, 发热量高, 燃点低, 容易着火和燃尽
- 对挥发分超过25%的烟煤, 贮存时应防止其自燃; 制粉系统应考虑防爆措施

褐煤

辅助招标：透光率 P_M 、含最高内在水分的无灰高位发热量 Q'_{gr}

褐煤1号： $P_M < 30\%$

褐煤2号： $P_M > 30\%$ ， $Q'_{gr} \leq 24000$

- 煤化程度较低， C_{ar} ：40~50%
- 灰分较多， A_{ar} ：6~50%
- 水分较多， M_{ar} ：20~50%
- 挥发分含量多， V_{daf} ：40~50%
- 发热量较低， $< 16750 \text{ kJ/kg}$

- 外观呈褐色，少数为黑褐色甚至黑色
- 挥发分含量较高，有利于着火燃烧
- 含水分较高的年轻褐煤燃烧性能较差，而且灰熔点较低
- 褐煤的化学反应性强，在空气中存放易风化成碎块，容易发生自燃。

发电厂用煤的质量标准

根据对锅炉设计、运行有较大影响的煤质特性制定

常规特性：干燥无灰基 V_{daf} ，干燥基灰分 A_d ，收到基水分 M_{ar} ，干燥基硫分 S_d ，灰的软化温度 ST

煤的低位发热量与挥发分相关，影响锅炉燃烧的温度，用低位发热量作 V_{daf} 、 ST 的辅助指标

GB 7562-87
GB 7562-98

如某电厂用煤标号为 $V_4A_1M_1S_2ST_1$

表 2-6 发电煤粉锅炉用煤质量标准 (GB 7562-87)

分类指标	煤种名称	等级	代号	主分类指标界限值	辅助分类指标界限值
挥发分 V_{daf}	(低挥发分无烟煤)		(V_d)	$V_{daf} \leq 6.5\%$	$Q_{net,ar} > 23.0 \text{ MJ/kg}^D$
	无烟煤	1级	V_1	$6.5\% < V_{daf} \leq 9\%$	$Q_{net,ar} > 21.0 \text{ MJ/kg}$
	贫煤	2级	V_2	$9\% < V_{daf} \leq 19\%$	$Q_{net,ar} > 18.5 \text{ MJ/kg}$
	中挥发分烟煤	3级	V_3	$19\% < V_{daf} \leq 27\%$	$Q_{net,ar} > 16.5 \text{ MJ/kg}$
	中高挥发分烟煤	4级	V_4	$27\% < V_{daf} \leq 40\%$	$Q_{net,ar} > 15.5 \text{ MJ/kg}$
	高挥发分烟煤	5级	V_5	$V_{daf} > 40\%$	$Q_{net,ar} > 11.5 \text{ MJ/kg}$
灰分 A_d	常灰分煤	1级	A_1	$A_d \leq 24\%$	
	中灰分煤	2级	A_2	$24\% < A_d \leq 34\%$	
	高灰分煤	3级	A_3	$34\% < A_d \leq 46\%$	
	(超高灰分煤)		(A_4)	$A_d > 46\%$	
水分 M_1	常水分煤	1级	M_1	$M_1 \leq 8\%$	
	高水分煤	2级	M_2	$8\% < M_1 \leq 12\%$	$V_{daf} \leq 40\%$
水分 M_2	常水分高挥发分煤	1级	M_1	$M_1 \leq 22\%$	
	高水分高挥发分煤 (超水分煤)	2级	M_2	$22\% < M_1 \leq 40\%$ $M_2 > 40\%$	$V_{daf} > 40\%$
硫分 S_d	低硫煤	1级	S_1	$S_d \leq 1\%$	
	中高硫煤	2级	S_2	$1\% < S_d \leq 3\%$	
	(特高硫煤)		(S_3)	$S_d > 3\%$	
灰熔融性 ST	不易结渣煤	1级	ST_1	$ST > 1350^\circ\text{C}$	$Q_{net,ar} > 12.5 \text{ MJ/kg}$
	(易结渣煤)		(ST_2)	$ST \leq 1350^\circ\text{C}$	$Q_{net,ar} \leq 12.5 \text{ MJ/kg}$

表 9-1 发电煤粉锅炉用煤技术要求

分类指标	符号	分类界限	辅助分类指标界限	测定方法	备注
挥发分 V_{daf} , %	V_1	6.5~10.0	$Q_{net,ar} > 21.0 \text{ MJ/kg}$	GB/T 212	不注单独限制
	V_2	10.01~20.00	$Q_{net,ar} > 18.5 \text{ MJ/kg}$	GB/T 212	
	V_3	20.01~28.00	$Q_{net,ar} > 16.5 \text{ MJ/kg}$		
	V_4	> 28.00	$Q_{net,ar} > 15.5 \text{ MJ/kg}$		
	V_5	> 37.00	$Q_{net,ar} > 12.0 \text{ MJ/kg}$		适用于褐煤
发热量 $Q_{net,ar}$, MJ/kg	Q_1	> 24.00		GB/T 213	
	Q_2	21.01~24.00			
	Q_3	17.01~21.00			
	Q_4	15.51~17.00			
	Q_5	> 12.00			适用于褐煤
灰分 A_d (A_1), %	A_1	≤ 20.00		GB/T 212	
	A_2	20.01~30.00			
	A_3	30.00~40.00			
	A_4	> 40.00			
全水分 M_{ar} , %	M_1	≤ 8.00	$V_{daf} \leq 37.00\%$	GB/T 211	
	M_2	8.1~12.0	$V_{daf} \leq 37.00\%$	GB/T 212	
	M_3	12.1~20.0	$V_{daf} > 37.00\%$		
	M_4	> 20.0			适用于褐煤
硫分 S_d (S_1), %	S_1	≤ 0.50		GB/T 214	
	S_2	0.51~1.00			
	S_3	1.01~2.00			
	S_4	2.01~3.00			
煤灰熔融性软化温度 ST , °C	ST_1	> 1350		GB/T 219	
	ST_2	1290~1350			
	ST_3	1260~1290			
	ST_4	> 1450			
	ST_5	> 1450			
煤的哈氏可磨性 HGI	HGI ₁	> 40 ~60		GB/T 2565	
	HGI ₂	> 60 ~80			
	HGI ₃	> 80			

发电厂煤的分类及燃烧特性

无烟煤
贫煤
烟煤
褐煤

发电厂常用煤种

表 2-8 我国主要动力用煤的有关数据

煤种	元素成分 (%)					灰分 (%)	挥发分 (%)	发热量 (kJ/kg)	硫分 (%)	磷分 (%)	氯分 (%)	氮分 (%)	氧分 (%)	氢分 (%)	碳分 (%)	灰熔点 (°C)	备注
	A _d	C _d	H _d	N _d	O _d												
山西无烟煤	5.0	72.8	6.7	1.7	2.0	0.2	23000	0.8	6.0	1.1	1200	1370	1430				
晋北无烟煤	5.0	72.8	6.7	1.7	2.0	0.2	23000	0.8	6.0	1.1	1200	1370	1430				
晋中无烟煤	5.0	72.8	6.7	1.7	2.0	0.2	23000	0.8	6.0	1.1	1200	1370	1430				
晋东无烟煤	5.0	72.8	6.7	1.7	2.0	0.2	23000	0.8	6.0	1.1	1200	1370	1430				
晋西无烟煤	5.0	72.8	6.7	1.7	2.0	0.2	23000	0.8	6.0	1.1	1200	1370	1430				
晋南无烟煤	5.0	72.8	6.7	1.7	2.0	0.2	23000	0.8	6.0	1.1	1200	1370	1430				
晋北烟煤	10.0	68.0	5.0	2.0	2.0	0.5	21000	1.0	9.0	1.0	1400	1300	1400				
晋中烟煤	10.0	68.0	5.0	2.0	2.0	0.5	21000	1.0	9.0	1.0	1400	1300	1400				
晋东烟煤	10.0	68.0	5.0	2.0	2.0	0.5	21000	1.0	9.0	1.0	1400	1300	1400				
晋西烟煤	10.0	68.0	5.0	2.0	2.0	0.5	21000	1.0	9.0	1.0	1400	1300	1400				
晋南烟煤	10.0	68.0	5.0	2.0	2.0	0.5	21000	1.0	9.0	1.0	1400	1300	1400				
晋北褐煤	15.0	60.0	4.0	3.0	2.0	0.8	18000	1.5	10.0	1.5	1600	1200	1300				
晋中褐煤	15.0	60.0	4.0	3.0	2.0	0.8	18000	1.5	10.0	1.5	1600	1200	1300				
晋东褐煤	15.0	60.0	4.0	3.0	2.0	0.8	18000	1.5	10.0	1.5	1600	1200	1300				
晋西褐煤	15.0	60.0	4.0	3.0	2.0	0.8	18000	1.5	10.0	1.5	1600	1200	1300				
晋南褐煤	15.0	60.0	4.0	3.0	2.0	0.8	18000	1.5	10.0	1.5	1600	1200	1300				
晋北长焰煤	18.0	55.0	3.0	3.0	2.0	1.0	16000	2.0	11.0	2.0	1800	1100	1200				
晋中长焰煤	18.0	55.0	3.0	3.0	2.0	1.0	16000	2.0	11.0	2.0	1800	1100	1200				
晋东长焰煤	18.0	55.0	3.0	3.0	2.0	1.0	16000	2.0	11.0	2.0	1800	1100	1200				
晋西长焰煤	18.0	55.0	3.0	3.0	2.0	1.0	16000	2.0	11.0	2.0	1800	1100	1200				
晋南长焰煤	18.0	55.0	3.0	3.0	2.0	1.0	16000	2.0	11.0	2.0	1800	1100	1200				
晋北弱粘煤	20.0	50.0	2.0	4.0	2.0	1.2	14000	2.5	12.0	2.5	2000	1000	1100				
晋中弱粘煤	20.0	50.0	2.0	4.0	2.0	1.2	14000	2.5	12.0	2.5	2000	1000	1100				
晋东弱粘煤	20.0	50.0	2.0	4.0	2.0	1.2	14000	2.5	12.0	2.5	2000	1000	1100				
晋西弱粘煤	20.0	50.0	2.0	4.0	2.0	1.2	14000	2.5	12.0	2.5	2000	1000	1100				
晋南弱粘煤	20.0	50.0	2.0	4.0	2.0	1.2	14000	2.5	12.0	2.5	2000	1000	1100				
晋北不粘煤	22.0	45.0	1.0	5.0	2.0	1.5	12000	3.0	13.0	3.0	2500	900	1000				
晋中不粘煤	22.0	45.0	1.0	5.0	2.0	1.5	12000	3.0	13.0	3.0	2500	900	1000				
晋东不粘煤	22.0	45.0	1.0	5.0	2.0	1.5	12000	3.0	13.0	3.0	2500	900	1000				
晋西不粘煤	22.0	45.0	1.0	5.0	2.0	1.5	12000	3.0	13.0	3.0	2500	900	1000				
晋南不粘煤	22.0	45.0	1.0	5.0	2.0	1.5	12000	3.0	13.0	3.0	2500	900	1000				

煤的热分解机理

煤粒被加热到一定温度后，进入热分解阶段，放出挥发分并形成焦炭

- $T \leq 105^\circ\text{C}$: 析出水分和部分气体
- $105^\circ\text{C} < T \leq 300^\circ\text{C}$: 水分完全析出
 $200^\circ\text{C} < T \leq 300^\circ\text{C}$, 热解水, 伴有气态物质 CO 、 CO_2 及少量焦油
- $300^\circ\text{C} < T \leq 500^\circ\text{C}$: 煤焦油和气体析出, 初次挥发物
- $500^\circ\text{C} < T \leq 700^\circ\text{C}$: 半焦分解, 析出含氢较多气体
- $759^\circ\text{C} < T \leq 1000^\circ\text{C}$: 形成焦炭

煤的热重分析

- 失重率: 单位时间内试样损失的质量, dw/dt
- 燃烧/挥发分热解失重曲线: 记录失重率随温度的变化曲线
- B 水分析出峰
- D 燃烧峰

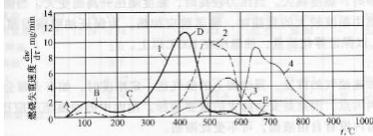


图 2-4 一些煤种的燃烧分布曲线
 煤种: 1—褐煤; 2—烟煤; 3—劣质烟煤; 4—无烟煤
 特征点意义: A—水分开始析出; B—水分最大失重率处; C—挥发分开始析出; D—挥发分最大失重率处; E—燃尽
 测定条件: 升温速度— $20^\circ\text{C}/\text{s}$; 煤粒粒度— $40\ \mu\text{m}$ (即 0.425mm 以下); 煤样质量— 100mg ; 通入空气量— $280\text{L}/\text{h}$

第八节 燃油、燃气的特性

燃料油: 重油(裂化、减压、常压)、轻柴油

- 碳(84~87%)、氢(11~14%)、氧、氮、硫、灰分和水分。
- 发热量: $37700\sim 44000\text{kJ}/\text{kg}$

表 2-9 锅炉燃用的重油的质量指标

质量指标	单位	20号	60号	100号	200号
恩氏黏度不大于	$^\circ\text{E}_{50}$	5.0	11.0	15.5	—
恩氏黏度不大于	$^\circ\text{E}_{100}$	—	—	—	5.5~9.5
闪点(开口)不低于	$^\circ\text{C}$	80	100	120	130
凝固点不高于	$^\circ\text{C}$	15	20	25	36
灰分不大于	%	0.3	0.3	0.3	0.3
水分不大于	%	1.0	1.5	2.0	2.0
含硫不大于	%	1.0	1.5	2.0	3.0
机械杂质不大于	%	1.5	2.0	2.5	2.5

- 凝固点: 试管倾斜 45° , 试管中油面在1 min内保持不变时对应的油温
- 黏度: 反应燃油的流动性, 黏度小, 流动性好。恩氏黏度
- 闪点: 油面上的油气达一定浓度时, 有火源会发出短暂的闪光, 此时的油温
- 燃点: 油面上的油气与空气混合物遇明火能着火连续燃烧不少于5s, 此时的最低油温
- 静电特性: 油摩擦产生静电, 电荷在油面积聚产生很高的电压
- 含硫量: 低硫油($<0.5\%$); 中硫油($0.5\sim 2\%$); 高硫油($>2\%$), 低温受热面腐蚀
- 灰分: 钒酸钠熔点 600°C , 高温腐蚀

气体燃料

天然气(CH_4)、高炉煤气、焦炉煤气(H_2)、发生炉煤气、液化石油气

- 碳、氢、氧、氮、硫、灰分和水分
- 可燃成分: H_2 , CO , H_2S , CH_4 , C_mH_n

表 2-11 我国部分煤气特性

煤气种类	煤气平均成分(体积%)										定压发热量(kJ/m^3)		
	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	其他	H_2	CO	CO_2	H_2S	N_2	O_2	高位	低位
气田煤气	97.42	0.94	0.16	0.03	0.06	0.08	—	0.52	0.03	0.76	—	39600	35600
油田煤气	83.18	—	3.25	2.19	6.74	—	—	0.83	3.84	—	—	44300	38270
液化石油气	—	50	50	—	—	—	—	—	—	—	—	113000	104670
高炉煤气	—	—	—	—	—	2	27	11	—	60	—	3718	3678
发生炉煤气	1.8	—	—	—	0.4	8.4	30.4	2.2	—	56.4	0.2	5950	5650

本章重点

1. 元素分析、工业分析
2. 高位、低位发热量
3. 收到基、空气干燥基、干燥基、干燥无灰基之间换算
4. 无烟煤、贫煤、烟煤、褐煤的分类方法及每一种煤的特点
5. DT, ST, FT

第三章 燃料燃烧计算和锅炉机组热平衡

- 燃料燃烧计算：空气量、烟气量
- 空气、烟气、水蒸气均为理想气体
- 0℃, 1标准大气压(101325Pa)状态下的立方米

3.1 燃烧过程的化学反应

1, 碳的完全燃烧

碳的不完全燃烧

2, 氢的燃烧

3, 硫的燃烧

3.2 燃烧所需要的空气量

1, 1.0kg煤燃烧需要的理论空气量

其中： V^0 干空气； $R+O_2 \rightarrow RO_2$

2, 实际空气量和过量空气系数

实际空气量

过量空气量

3, 漏风系数和空气平衡

漏风系数

任意烟道截面

空气预热器

炉膛漏风、制粉系统漏风

3.3 燃烧产生的烟气量

1, 理论烟气量: 实际参加燃烧的湿空气中的干空气量等于理论空气量, 且使1kg 的燃料完全燃烧时产生的烟气量 V_y^0

烟气成分: CO_2 , SO_2 , N_2 , H_2O

理论烟气量的计算

(1) 二氧化碳和二氧化硫的体积

(2) 理论氮气体积

(3) 理论水蒸汽体积

0.0161:1m³干空气中水蒸气含量 W_{wh} : kg/kg

理论烟气量:

2, 完全燃烧时的实际烟气量

烟气成分: N_2 , CO_2 , O_2 , H_2O , SO_2

完全燃烧时的实际烟气量计算:

(1) 二氧化碳和二氧化硫的体积

(2) 氮气体积

(3) 氧气体积

(4) 水蒸汽体积

烟气体积

干烟气体积

3, 不完全燃烧时的烟气量

(N_2 , CO_2 , CO , O_2 , H_2O , SO_2)

(1) 一氧化碳和二氧化碳的体积:

(2) 不完全燃烧时烟气中的氧体积

(3) 干烟气体积(为不完全燃烧方程式准备)

4, 烟气中三原子气体的容积份额和飞灰浓度

p ——烟气总压力, MPa; 一般取 $p=0.098$ MPa

飞灰浓度:

a_{fh} ——飞灰占总灰分的质量份额, 一般取 0.9~0.95

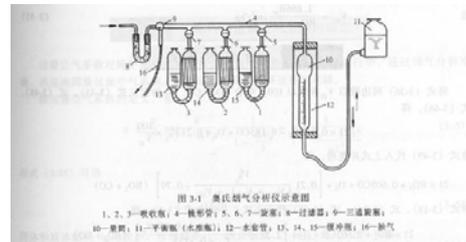
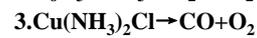
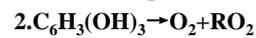
m_y ——1kg燃料燃烧得到的烟气质量, kg/kg

$1.306 \alpha V^0$ ——1kg燃料燃烧所需空气及所含水分转入烟气的质量, kg/kg

3.4 烟气分析

1, 干烟气的容积成分

2, 奥氏烟气分析仪



根据烟气分析结果计算干烟气体积

3.5 燃烧方程式

不完全燃烧干烟气体积



不完全燃烧方程式:



完全燃烧时，CO=0



完全燃烧方程式：



3.6 运行中过量空气系数的确定

运行中

运行中，不完全燃烧的过量空气系数

运行中，完全燃烧的过量空气系数

运行中，过量空气系数的近似公式

3.7 空气和烟气的焓

1, 空气焓：定压条件下，1kg燃料所需空气量从0加热到t℃时所需的热量，kJ/kg

理论空气焓

实际空气焓

2, 烟气焓

当 $4187a_{\text{m}}A_{\text{ar}}/Q_{\text{ar.net}} \geq 6$ 时，才计算飞灰焓

表 3-1 1m³ 空气、烟气和 1kg 灰的焓 kJ/m³, kJ/kg

θ (°C)	$(\theta)_{\text{CO}_2}$	$(\theta)_{\text{H}_2\text{O}}$	$(\theta)_{\text{O}_2}$	$(\theta)_{\text{N}_2}$	$(\theta)_{\text{H}_2\text{O}}$	$(\theta)_{\text{H}_2}$	$(\theta)_{\text{H}_2}$
100	170	130	132	151	132	80	
200	358	260	267	305	266	168	
300	559	392	407	463	403	260	
400	772	527	551	626	542	357	
500	994	664	699	795	684	461	
600	1225	804	850	969	830	554	
700	1462	948	1004	1149	978	665	
800	1705	1094	1160	1334	1129	770	
900	1952	1242	1318	1526	1282	812	
1000	2204	1392	1478	1723	1435	1005	
1100	2458	1544	1638	1925	1595	1128	
1200	2717	1697	1801	2132	1753	1261	
1300	2977	1853	1964	2344	1914	1426	
1400	3239	2009	2128	2559	2076	1583	
1500	3503	2166	2294	2779	2239	1777	
1600	3769	2325	2461	3002	2403	1957	
1700	4036	2484	2629	3229	2567	2206	
1800	4305	2644	2797	3458	2732	2412	
1900	4574	2804	2967	3690	2899	2625	
2000	4844	2965	3138	3926	3066	2847	
2100	5115	3128	3309	4163	3234		
2200	5387	3289	3483	4402	3402		

§ 3.8 锅炉机组热平衡

1, 热平衡方程

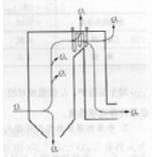


图 3-3 输入、输出
锅炉的热量
Q—有效利用热; Q—输入锅炉热量;
Q₁—排烟热损失; Q₂—散热损失;
Q₃—未燃尽损失; Q₄—固体不完全
燃烧热损失; Q₅—汽化热;
Q₆—汽化潜热损失

反平衡法

2, 锅炉输入热量 Q_r

低位发热量, 燃料的物理显热, 外热源加热空气时带入的热量, 雾化燃油所用蒸汽带入的热量。

2.1 燃料的物理显热

燃料	温度 ($^{\circ}C$)				
	0	100	200	300	400
无烟基和贫煤	0.92	0.96	1.05	1.13	1.17
烟煤	0.96	1.09	1.26	1.42	
褐煤	1.09	1.26	1.49		

2.2 外热源加热空气带入的热量

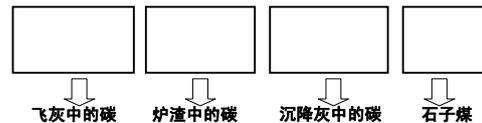
2.3 雾化燃油所用蒸汽带入的热量

雾化 1 kg 燃油消耗的蒸汽量, kg/kg; 雾化蒸汽在入口参数下的焓, 运行基准温度下饱和蒸汽的焓 $\approx 2510 kJ/kg$ 。

燃煤锅炉: 燃料、空气没有外界热量预热, 水分
 $M_{ar} < Q_{ar,net}/630\%$, 输入热量 $Q_r = Q_{ar,net}$

3, 固体不完全燃烧损失 Q_4

3.1 运行试验时



3.2 设计锅炉时 q_4 的选择

无烟煤 $q_4=4\% \sim 6\%$; 贫煤 $q_4=2\% \sim 3\%$;

烟煤 $q_4=1\% \sim 2\%$; 褐煤 $q_4=0.5\% \sim 1.0\%$

影响 q_4 的因素

- 1) 燃料性质 (灰分、水分、挥发分、煤粉细度);
- 2) 燃烧方式;
- 3) 炉膛形式和结构;
- 4) 燃烧器结构与布置方式;
- 5) 炉膛温度;
- 6) 锅炉负荷 (过高、过低);
- 7) 运行水平;
- 8) 燃料在炉膛内的停留时间;
- 9) 煤粉、空气混合速度、均匀程度。

4, 排烟损失 Q_2

4.1 运行试验时

干烟气带走的热量

烟气中的水蒸汽带走的显热

4.2 设计时

锅炉最大损失: $q_2=4\sim 8\%$

影响因素: 排烟温度、排烟容积

- 燃料性质 (水分、硫分);
- 受热面积灰、结渣或结垢;
- 炉膛出口过量空气系数及烟道各处的漏风。

5, 可燃气体不完全燃烧损失 Q_3

5.1 运行试验时

5.2 设计时

煤粉炉 $q_3=0$, 燃油燃气炉 $q_3=0.5\%$

影响因素:

燃料的挥发分;

炉膛过量空气系数 (过大、过小);

燃料器结构与布置;

炉膛温度和炉内空气动力场。

最佳过量空气系数的确定

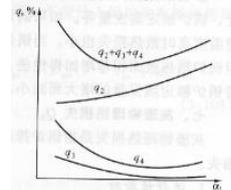


图 3-3 最佳过量空气系数

$q_2+q_3+q_4$ 最小

6, 散热损失 Q_5

6.1 运行试验时

D_{ed} : 额定蒸发量, D : 实际蒸发量

6.2 设计时: 根据图 3-4 选取。

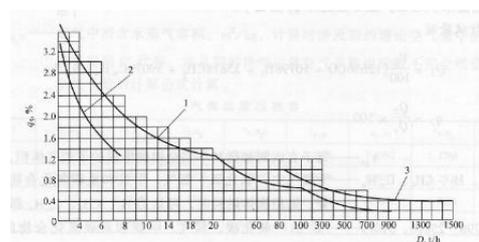


图 3-4 锅炉散热损失 q_5

1—有尾部受热面的锅炉机组; 2—无尾部受热面的锅炉机组;
3—我国电站锅炉性能验收规程中有尾部受热面的锅炉机组的散热曲线

- 0.2~0.6%
- 锅炉本体、管道、附件温度>环境温度
- 对流及辐射
- 影响 q_5 的因素
 - 1) 锅炉外表面积大小;
 - 2) 炉墙结构;
 - 3) 保温层隔热性能;
 - 4) 环境温度;
 - 5) 锅炉额定蒸发量;

7, 灰渣物理热损失 Q_6

7.1 运行试验时:

7.2 设计时:

折算灰分<10%时, 固态排渣煤粉炉忽略 q_6 , 液态排渣炉: 忽略飞灰的物理热损失;

燃油燃气炉, $q_6=0$

影响因素:

燃料中的灰分含量;

炉渣、飞灰、沉降灰的相对含量和灰渣温度

表 3-4 固体燃料灰分的比热容

t (°C)	c_k [kJ/(kg·°C)]						
300	0.888	600	0.934	1100	1.001	1600	1.183
200	0.846	700	0.946	1200	1.03	1700	1.204
300	0.879	800	0.959	1300	1.08	1800	1.223
400	0.9	900	0.971	1400	1.124	1900	1.239
500	0.917	1000	0.984	1500	1.158	2000	1.256

8, 锅炉有效利用热, 热效率, 燃料消耗量

1 锅炉有效利用热

2 锅炉热效率(正平衡法)

3 燃料消耗量

计算燃料消耗量

3.9 锅炉机组的热平衡试验

1, 目的

- (1) 确定锅炉机组热效率;
- (2) 确定锅炉机组各项热损失的大小;
- (3) 确定过量空气系数、排烟温度、过热蒸汽温度等参数与锅炉负荷的关系。

2, 方法

- (1) 正平衡法; (2) 反平衡法

3, 换算到保证条件下的热效率

3.1 输入热量的修正(保证的进风温度)

3.2 热损失的修正

3.2.1 进风温度偏差换算

- (1) 不带暖风器的送风系统。

- (2) 带有暖风器的送风系统。

a, t_0 变化

b, t'_k 变化

c, t_0 变化, t'_k 变化, 用 t_0^b 代替 t_0 。

3.2.2 给水温度偏差的换算

4, 锅炉机组热效率: 去除锅炉机组自身需要的热耗和电耗

ΣQ_{fy} —外来蒸汽热耗(驱动辅助设备, 吹灰)
 ΣP —制粉系统、送引风机、烟气再循环风机、强制循环泵、除渣除灰系统、电除尘等电动机功率

第三章 重点

- 1, 过量空气系数
- 2, 理论空气量
- 3, 锅炉效率
- 4, 排烟损失
- 5, 气体不完全燃烧损失
- 6, 固体不完全燃烧损失
- 7, 散热损失
- 8, 灰渣(底灰)物理热损失

第四章 煤粉制备及系统

第一节 煤粉的一般特性

1, 流动性 → 气力输送、易泄漏

2, 自燃与爆炸性

● 堆积, 缓慢氧化, 温度上升 → 自燃

● 煤粉空气混合物, 浓度温度适当 → 爆炸

3, 堆积特性: 压紧的煤粉表现密度 700 kg/m^3

表 4-1 煤的爆炸特性

着火指数 R_i	爆炸指数 B_i	爆炸性	着火性
≤ 3.5	< 20	极难爆炸	极难着火
$> 3.5 - 4.65$	$20 - 30$	难爆炸	难着火
$> 4.65 - 5.7$	$> 30 - 45$	中等易爆炸	中等易着火
> 5.7	$> 45 - 70$	易爆炸	极易着火
> 5.7	> 70	极易爆炸	极易着火

● V_{daf}

表 4-2 煤的挥发分与煤的爆炸性

干燥无灰基挥发分 V_{daf} (%)	爆炸性
< 6.5	极难爆炸
$> 6.5 - 10$	难爆炸
$> 10 - 25$	中等爆炸性
$> 25 - 35$	易爆炸
> 35	极易爆炸

水分多 → 结块、堵塞、磨出力;
 水分少 → 自燃、爆炸。

① 磨煤机出口工质温度(表4-3)、② 出口煤粉水分、③ 出口煤粉细度

磨煤机出口煤粉水分:

烟煤: $0.5 \sim 1.0 M_{ad}$; 无烟煤: $\leq M_{ad}$; 褐煤: $8.0 + M_{ad}$

磨煤机出口最高允许温度

表 4-3 磨煤机出口最高允许温度 $t_{K1,2}$ °C

制粉系统形式	干燥介质的		用烟气空气混合干燥
	干燥介质的	用空气干燥	
风箱磨煤机直吹式 系统无分离器后	贫煤	-150	-180
	烟煤	-130	
	褐煤、页岩	-100	
圆球磨煤机直吹式 制粉系统	贫煤	-130	褐煤 -90
	烟煤、褐煤	-70	烟煤 -120
双进双出圆球磨直吹式 制粉系统分离器后	烟煤	85	
	褐煤	75	
	$V_{daf} \leq 15\%$ 的煤	-100	
中速磨煤机直吹式 制粉系统分离器后	$V_{daf} < 40\%$	$\frac{5}{3}(82 - V_{daf}) + 5$	
	$V_{daf} \geq 40\%$	$< 70^\circ\text{C}$	
HP、RP 中速磨煤机直吹式 制粉系统分离器后	高热值烟煤 < 82 ; 低热值烟煤 < 71 ; 次烟煤、褐煤 < 66		

4.2 煤粉细度和煤粉颗粒分布特性

1, 煤粉细度(筛子上剩余质量占原煤粉样质量百分数)

a——筛子上余质量; b——过筛质量;

筛号 (每厘米长的孔数)	6	8	12	30	40	60	70	80
孔径 (筛孔的内边长) (μm)	1000	750	500	200	150	100	90	75
煤粉细度表示	R ₁	R ₂₀	R ₅₀	R ₁₀₀	R ₁₅₀	R ₂₀₀	R ₃₀₀	R ₄₀₀

经济煤粉细度: q_4 与制粉电耗、金属消耗之和最小的煤粉细度

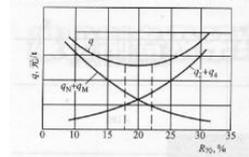


图 4-1 煤粉的经济细度的确定
 q_2 —排粉热损失; q_a —机械不完全燃烧损失;
 q_s —磨煤电耗; q_m —制粉设备金属消耗;
 $\Sigma q = q_2 + q_a + q_s + q_m$ 的总和

2, 煤粉颗粒分布特性

利用全筛分得到煤粉颗粒组成特性曲线, 也称全筛分特性曲线
 破碎公式:

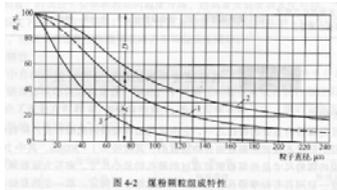


图 4-2 煤粉颗粒组成特性

b—煤粉细度的系数; n—煤粉均匀性指数

n——煤粉均匀性指数, n值越大, 煤粉越均匀。

- $n > 1$, 煤粉粒度均匀;
- $n = 1$, 煤粉中大部分颗粒尺寸接近于零, 细煤粉多, 煤粉不均匀;
- $n < 1$, 煤粉如细粉过多, 粗粉也较多, 严重不均匀

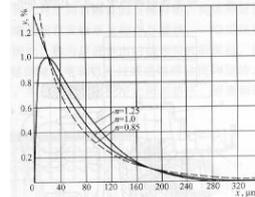


图 4-3 煤粉颗粒粒径大小的分布

4.3 煤的可磨性系数和磨损指数

1, 煤的可磨性指数-哈氏可磨性系数

D_{74} ——通过孔径为74微米的筛子的煤粉量

2, 煤的磨损指数-冲刷磨损指数

δ ——纯铁试样从开始到 $R_{90}=25\%$ 的磨损量, mg

表4-5 煤的磨损性和冲刷磨损指数的关系

K_e	<1.0	1~2	2~3.5	3.5~5	>5.0
磨损性	轻微	不强	较强	很强	极强
磨煤机	中、高速磨煤机		高速磨	低速磨	

4.4 磨煤机

磨煤机种类

1, 低速磨煤机, 15~25 r/min

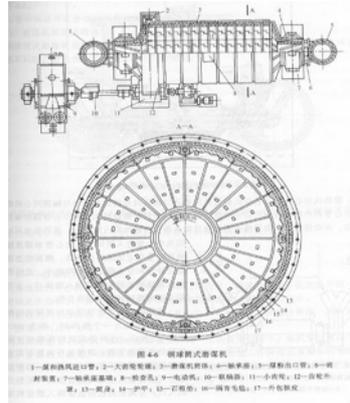
钢球磨煤机

2, 中速磨煤机, 50~300 r/min

MPS、RP(HP)、E

3, 高速磨煤机, 750~1500 r/min

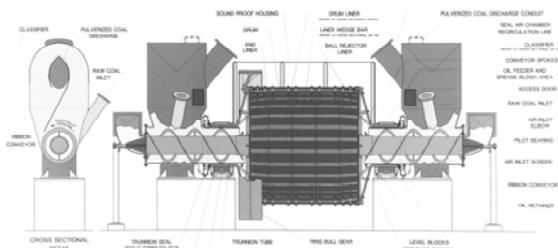
风扇式磨煤机



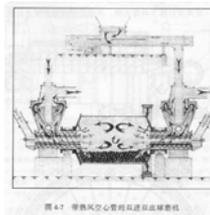
1, 钢球磨煤机
锰钢护甲; 一端进原煤与热空气; 一端出气粉混合物

三个作用力: 撞击、挤压、研磨

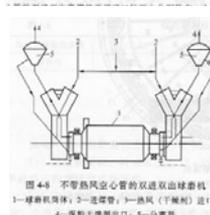
2, 双进双出钢球磨煤机



带热风空心管



不带热风空心管



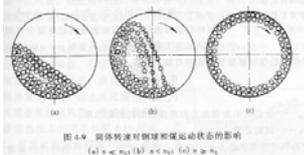
与轴颈同心的热风空心管; 螺旋输送机; 固定外壳与空心筒间隙进煤、出煤粉; 粗粉分离器; 回粉管; 落煤管段的下行干燥(水分大)

影响钢球磨煤机工作的主要因素

(1) 筒体转速

临界转速

最佳转速: 筒体内钢球有最大提升高度时的转速



引进的欧美型磨煤机, $n_j/n_j=0.72\sim 0.9$

(2) 护甲结构

摩擦力

(3) 钢球充满系数

钢球容积占筒体容积的百分数



磨煤出力:

磨煤电耗:

最佳钢球充满系数:

(4) 磨煤机的筒体通风量

大：煤粉分布均匀，磨煤出力↑，磨煤粗粉量↑，回粉量↑，磨煤电耗↑

小：出口煤粉量↓，细粉，磨煤出力↓

- 最佳通风量：保证磨煤出力，煤粉细度合理条件下，磨煤电耗和通风电耗最小的通风量

钢球筒式磨煤机的优缺点

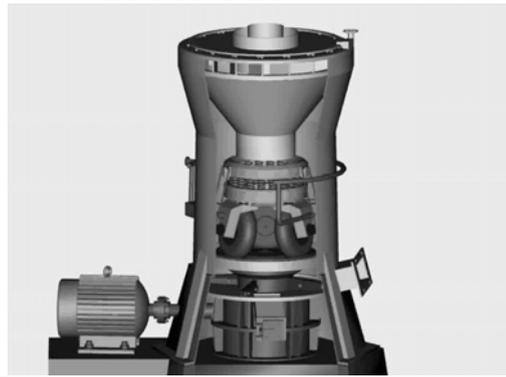
(1) 单进单出磨煤机

- 1) 煤种适应性强；
- 2) 单机容量大；
- 3) 对原煤中的杂质不敏感；
- 4) 金属消耗量大；
- 5) 噪音大，煤粉均匀性差
- 6) 多用于中间储仓式制粉系统，可一直在最大出力下工作

(2) 双进双出磨煤机

- 1) 煤种适应性强；
- 2) 对原煤中的杂质不敏感；
- 3) 维护费用低；
- 4) 占地面积小、电耗小、噪音小；
- 5) 锅炉负荷变化时响应速度快；
- 6) 储粉量大，运行灵活性好；
- 7) 多用于直吹式制粉系统，降低负荷时一次风管中气粉混合物流速小，易沉积煤粉，补充旁路风

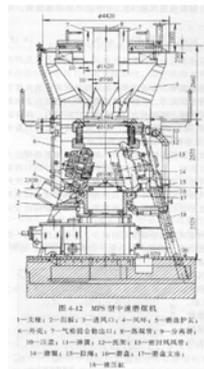
中速磨煤机：MPS



磨辊、磨盘、风环

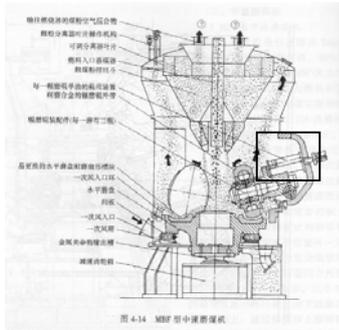


磨煤机：MPS



- 辊-环式、摆辊型
- 磨辊、碗形磨盘
- 下部基座和减速机
- 中部磨煤机本体
- 上部分离器
- 作用力：挤压、研磨

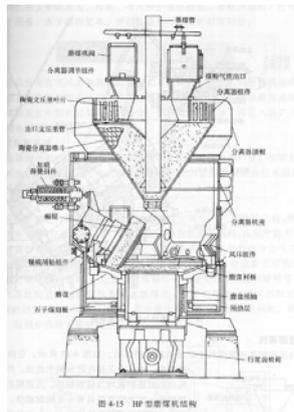
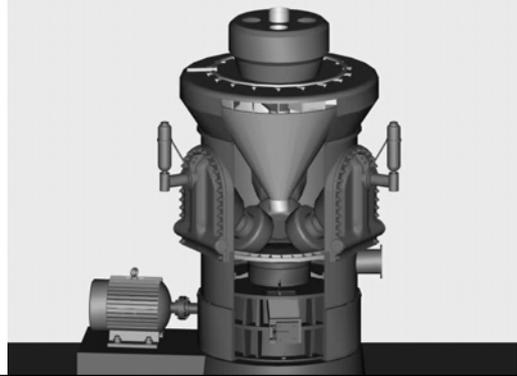
磨煤机：MBF



无压力托架、弹簧和
加载弹簧架
单独的加荷载荷装置

图 4-14 MBF 型中速磨煤机

中速磨煤机：HP碗型磨煤机



下部基座和减速机
中部磨煤机本体
上部分离器
独立的弹簧加载装置
磨辊、磨碗的间隙

图 4-15 HP 型磨煤机结构

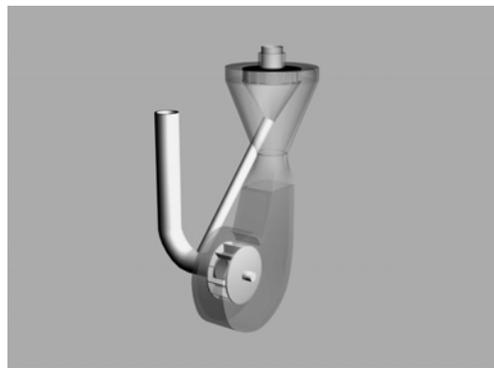
影响中速磨煤机工作的因素

- (1) 转速：过高、过低磨煤电耗增加
- (2) 通风量：风煤比不变
- (3) 风环气流速度：过高通风电耗增大，过低磨煤电耗增加，石子煤排放增加
- (4) 研磨压力：过小磨煤出力小，过大磨损大
- (5) 燃料性质：水分过大、过小降低磨煤出力；

中速磨煤机特点

- 1) 结构紧凑 占地小 投资少 耗电少 金属消耗小 噪音小
- 2) 煤种适应性 没有钢球磨好 适合烟煤
- 3) 干燥作用小，受水分影响较大：水分大会→压成饼状
- 4) 对“石子煤”的敏感性大
- 5) 不能磨磨损指数高的煤种
- 6) 结构复杂，运行和检修的技术要求高
- 7) 启动迅速，调节灵活

磨煤机：高速风扇式磨煤机



磨煤机：高速风扇式磨煤机

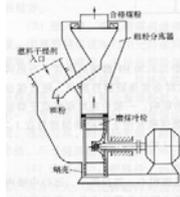
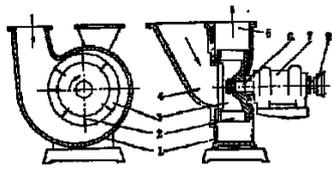


图 4-17 风扇式磨煤机简图

1-机壳 2-冲击板 3-叶轮 4-燃料进口 5-出口 6-轴 7-轴承箱 8-联轴器

- 适用于 $K_c < 3.5$, $M_{ar} > 35\%$ 的软褐煤与木质褐煤
- 风扇磨具有磨煤、干燥、干燥介质吸入、煤粉输送功能，煤粉分离器与磨煤机一体，制粉系统简单，设备少，投资省
- 风扇磨对煤粉干燥能力强，能磨制高水分煤
- 叶轮、叶片磨损快，检修周期短。

4.5 制粉系统

1, 直吹式制粉系统

负压直吹

正压直吹热一次风机

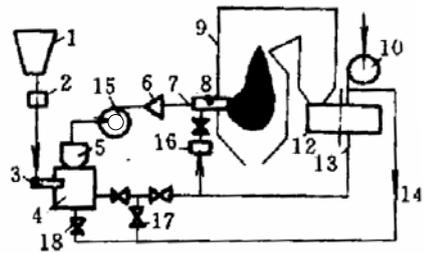
正压直吹冷一次风机

2, 中间储仓式制粉系统

乏气送粉

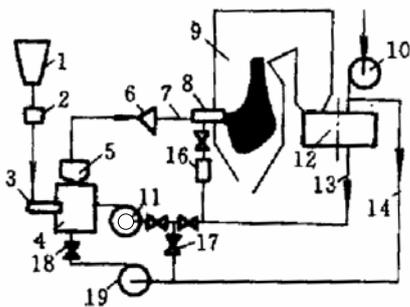
热风送粉

附：负压直吹：排粉机磨损严重



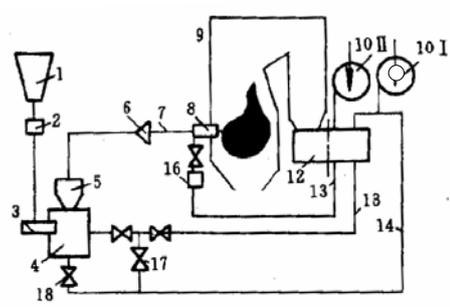
(a)

附：正压直吹（热一次风机）



(b)

附：正压直吹（冷一次风机、三分仓式空预器）



(c)

1, 直吹式制粉系统--中速磨直吹式制粉系统

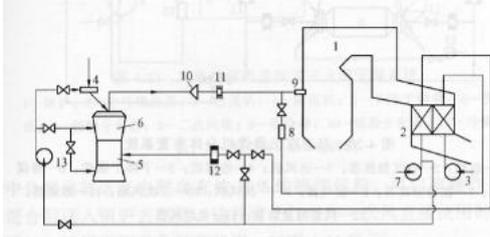


图 4-18 中速磨煤机正压直吹式系统

注：图中送风机和一次风机为并联，也有采用串联布置方式，图中未画。
1—锅炉；2—空气预热器；3—送风机；4—给煤机；5—磨煤机；6—粗粉分离器；7—一次风机；8—二次风箱；9—燃烧器；10—煤粉分配器；11—隔绝门；12—风量测量装置；13—密封风机

1, 直吹式制粉系统--双进双出磨煤机直吹式制粉系统

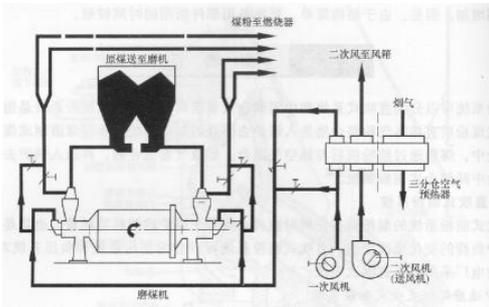
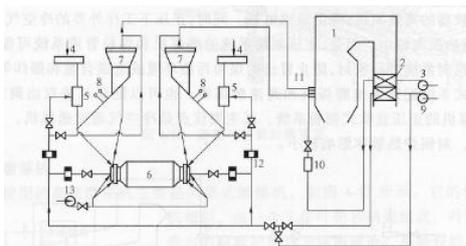


图 4-19 双进双出磨煤机整体布置系统

整体布置

1, 直吹式制粉系统--双进双出磨煤机直吹式制粉系统



分体布置

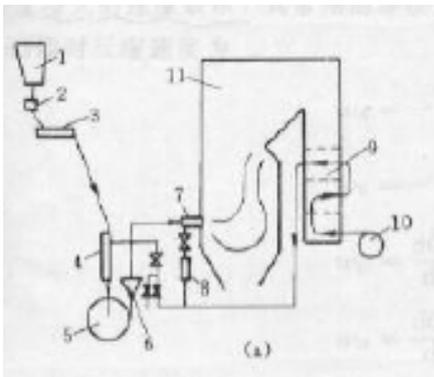
图 4-20 双进双出磨煤机分体布置系统

1—锅炉；2—空气预热器；3—送风机；4—给煤机；5—下降干燥管；6—磨煤机；7—粗粉分离器；8—调气器；9—一次风机；10—二次风箱；11—燃烧器；12—风量测量装置；13—密封风机

双进双出钢球磨煤机正压直吹制粉系统的优点（比中速磨直吹制粉系统）

- 煤种适应性广，特别适用于高灰分、强磨损性煤，或低挥发分、要求煤粉细的无烟煤，对杂质不敏感
- 备用容量小，可不停机添加钢球，不需中速磨的20%裕量
- 响应锅炉负荷变化性能好，调节通风量
- 负荷调节范围大，一路
- 煤粉细度稳定，不受负荷变化影响，低负荷煤粉更细，改善煤粉的着火和燃烧性能，更低负荷调节范围
- 双进双出钢球磨煤机具有较低的风煤比，一次风浓度高，有利于低挥发分煤的着火燃烧

1, 直吹式制粉系统--风扇磨直吹式制粉系统



单介质干燥

1, 直吹式制粉系统--风扇磨直吹式制粉系统

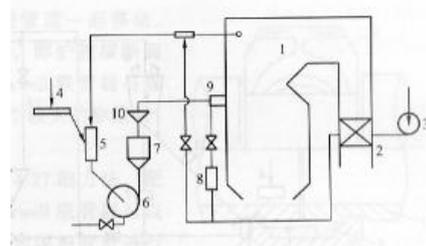


图 4-21 风扇磨煤机直吹式二介质干燥系统

1—锅炉；2—空气预热器；3—送风机；4—给煤机；5—下降干燥管；6—磨煤机；7—粗粉分离器；8—二次风箱；9—燃烧器；10—煤粉分配器

二介质干燥

1, 直吹式制粉系统--风扇磨直吹式制粉系统

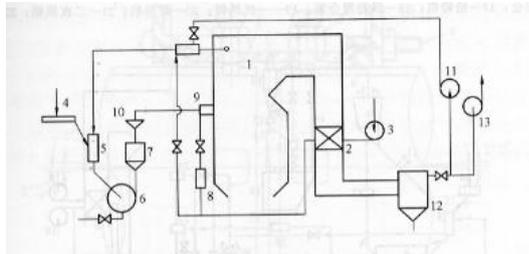


图 4-22 风扇磨煤机直吹式三介质干燥系统
1—锅炉；2—空气预热器；3—送风机；4—给煤机；5—下降干燥管；6—磨煤机；7—粗粉分离器；8—二次风箱；9—燃烧器；10—煤粉分配器；11—冷烟风；12—除尘器；13—吸风机

三介质干燥

热风和高、低温炉烟混合干燥剂

- 干燥剂氧浓度低，防止高挥发分褐煤发生爆炸
- 含氧量低一次风进入炉膛可降低炉膛燃煤器区域温度水平，燃用低灰熔点褐煤时避免炉内结渣，减少NO_x生成
- 燃煤水分变化幅度较大时，改变比例即可满足煤粉干燥的要求，一次风温度和一次风煤比不变，减轻水分变化对炉内燃烧的影响

2, 中间储仓式制粉系统--乏气送粉

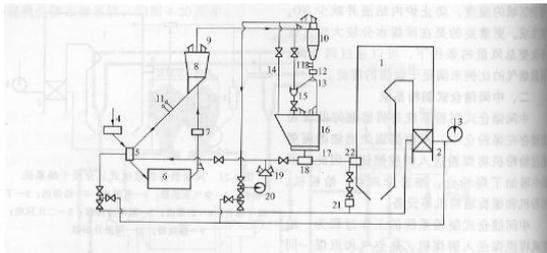


图 4-23 钢球磨煤机储仓式乏气送粉系统
1—锅炉；2—空气预热器；3—送风机；4—给煤机；5—下降干燥管；6—磨煤机；7—木块分离器；8—粗粉分离器；9—防磨门；10—细粉分离器；11—供气器；12—木屑分离器；13—换向器；14—吸潮管；15—输粉机；16—煤粉仓；17—给粉机；18—风粉混合器；19—一次风箱；20—二次风箱；21—排粉机；22—燃烧器

2, 中间储仓式制粉系统--热风送粉

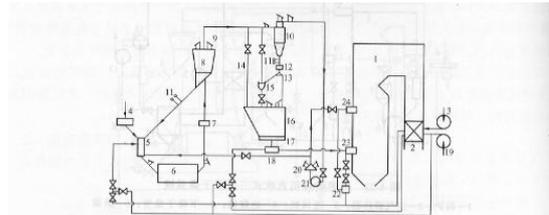


图 4-24 钢球磨煤机储仓式热风送粉系统
1—锅炉；2—空气预热器；3—送风机；4—给煤机；5—下降干燥管；6—磨煤机；7—木块分离器；8—粗粉分离器；9—防磨门；10—细粉分离器；11—供气器；12—木屑分离器；13—换向器；14—吸潮管；15—输粉机；16—煤粉仓；17—给粉机；18—风粉混合器；19—一次风箱；20—二次风箱；21—排粉机；22—燃烧器

3, 联管器和“肘节”结构

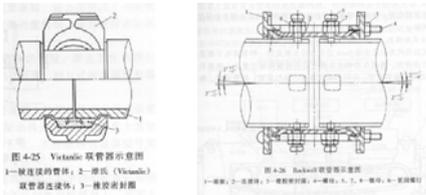


图 4-25 Vortalisco 联管器示意图
1—被连接管管头；2—弹性 (Vortalisco) 联管器连接体；3—橡胶密封圈

图 4-26 Rockwell 联管器示意图
1—螺栓；2—连接套；3—橡胶密封圈；4—螺栓；5、7、8—螺母；6—密封圈

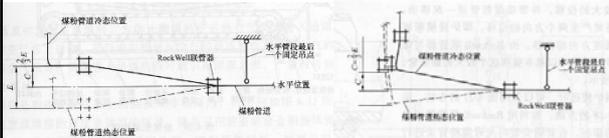
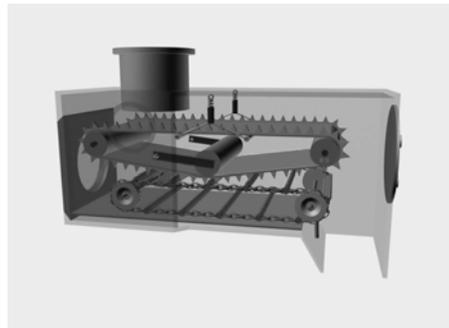


图 4-27 设置于水平管段上的肘节结构吸收垂直的膨胀示意图
E—燃烧器随炉膛 (水冷壁) 向下膨胀量；C—煤粉管安装冷拉量

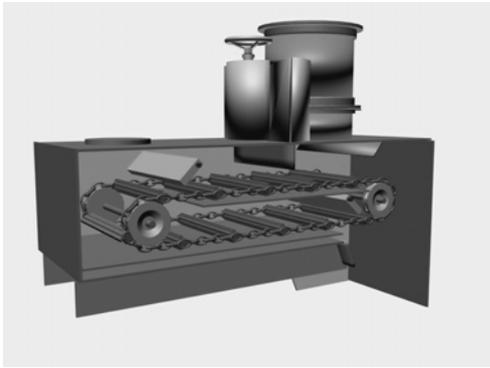
图 4-28 肘节结构吸收垂直方向的膨胀示意图
(一个联管器设置于水平管段，另一个设置于垂直管段)
E—燃烧器随炉膛向下膨胀量；C—煤粉管安装冷拉量

4.6 给煤机和给粉机

1, 电子称重式给煤机-皮带式给煤机



刮板式给煤机



2, 叶轮给粉机



§ 4.7 煤粉分离器

1, 粗粉分离器

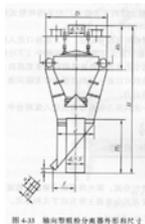
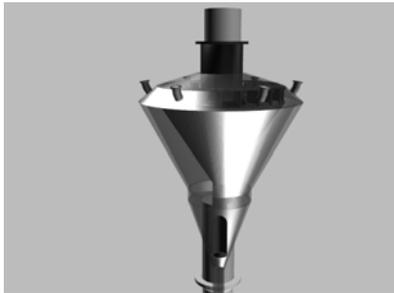


图 4-23 轴流粗粉分离器外形尺寸



2, 细粉分离器

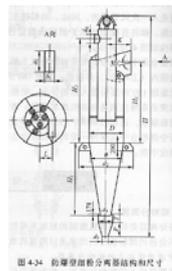


图 4-24 轴流细粉分离器外形尺寸



第四章 重点

- 1, 最佳煤粉细度
- 2, 破碎公式
- 3, 临界转速
- 4, 最佳通风量
- 5, 低速磨煤机, 单进单出、双进双出钢球磨煤机
- 6, 中速磨煤机, MPS磨、HP磨
- 7, 高速磨煤机, 风扇磨
- 8, 制粉系统(直吹式、中间储仓式)
- 9, 三次风

第五章 燃烧理论基础

电站锅炉的燃烧理论, 解决如下问题:

- 判断燃料的着火可能性, 分析影响着火的因素, 保证入炉燃料稳定着火、燃烧;
- 提高燃料燃烧速度, 分析影响燃烧速度的因素, 保证燃尽;
- 降低燃烧产物中污染物排放。

燃烧: 一种发光发热化学反应, 燃烧速度即化学反应速度

5.1 化学反应速度

一、质量作用定律

1, 质量作用定律

对于化学反应 $aA+bB=gG+hH$

2, 质量作用定律的意义

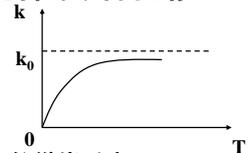
反应物浓度对化学反应速度的影响：均相反应，一定温度下，化学反应速度与参加反应的各反应物浓度乘积成正比，各反应物浓度的方次等于化学反应式中相应的反应系数。

二、多相燃烧的化学反应速度

- 燃烧反应在固体表面进行，反应速度取决于燃料表面附近氧化剂浓度和固相物质表面积。

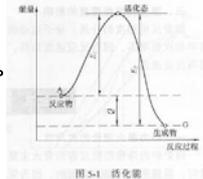
三、阿累尼乌斯定律及活化能

1, 阿累尼乌斯定律



注：反应物质浓度不变的条件下的燃烧反应

- ### 2, 活化能 E: 具有平均能量的分子转变为活化分子所需的最低能量。
- 活化分子：能够发生有效碰撞的分子



画出吸热、放热反应的活化能

图 5-1 活化能

化学反应中能量的变化

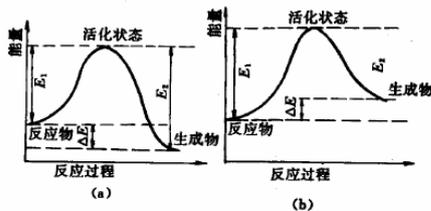


图 6-1 化学反应中能量的变化
(a) 放热反应；(b) 吸热反应

5.2 影响化学反应速度的主要因素

- 一、反应物浓度的影响
- 二、活化能对燃烧速度的影响

煤种	V_{rel} %	频率因子	
		k_0 $g / (cm^2 \cdot s \cdot MPa)$	活化能 kJ/mol
无烟煤	5.15	96.83	85.212
贫煤	15.18	12.61	55.098
烟煤	33.40	7.89	45.452
褐煤	41.02	5.31	38.911

- 三、温度对燃烧速度的影响

5.3 热力着火

一、热力着火理论的实用性

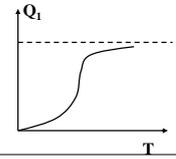
- 1, 能否着火?
- 2, 燃烧是否稳定?

二、实现稳定着火两个条件

- 1, 放热量等于散热量 $Q_1=Q_2$
- 2, 放热量对温度的导数大于散热量对温度的导数

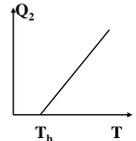
燃烧时的放热量 Q_1

根据有关化学反应速度的原理:

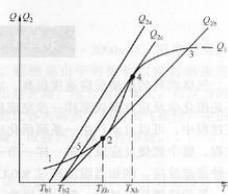


向周围介质散热量 Q_2

考虑一个综合辐射、对流的换热过程



三、着火温度与熄火温度



环境温度 T_{b1}
 环境温度 T_{b2}
 散热条件变化

图 5-2 热力着火曲线
 点 1: 缓慢氧化状态;
 点 2: 着火点;
 点 3: 高温燃烧状态;
 点 4: 熄火点;
 点 5: 氧化状态。

- ① 环境温度较低时: 会达到一个稳定的放热、散热平衡点 → 交点 1: 所以: 低温下, 只会缓慢氧化, 不会着火
- ② 提高环境温度, 会交于 2、3 两点。反应初期, 向 2 点靠近; 达到 2 点 (不稳定) 后只要稍加提高系统温度, 反应将自动加速而转变到高速燃烧状态 (着火), 最后稳定于高温燃烧状态点 3。
 2 点对应温度即着火温度 T_{zh}
 着火热力条件: 在一定的放热、散热下, 只要系统温度大于着火温度, 燃烧反应会自动加速进行
- ③ 对于高温燃烧下的反应, 若散热加大 (斜率) 到一定程度, 交于 4、5 点, 系统温度随之下降达到不稳定的 4 点, 只要温度稍微下降, 反应温度会急剧自动下降, 直到 5 点 (缓慢氧化状态) 稳定。
 4 点对应温度即熄火温度 T_{xh}
 熄火热力条件: 在一定的放热、散热下, 只要系统温度小于熄火温度, 燃烧反应即会自动中断

燃料挥发分与着火温度的关系

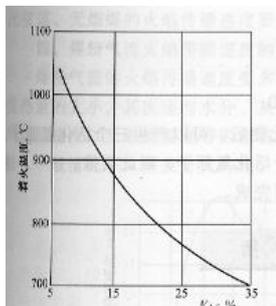


图 5-3 燃料挥发分与着火温度的关系

三、着火温度与熄火温度

煤种	无烟煤	烟煤	褐煤
着火温度 (°C)	700 - 800	400 - 500	250 - 450

煤种	无烟煤	贫煤 ($V_{daf}=14\%$)	烟煤	褐煤
着火温度 (°C)	1000	900	650 - 840	550

燃料	高炉煤气 (焦炭+木材)	发生炉煤气 (煤)	炼焦煤气 (煤)	天然气	石油
着火温度 (°C)	530	530	300 - 500	530	360 - 400

5.4 链锁反应

链锁反应：气体燃料燃烧过程中，自动产生一系列活化中心，活化中心不断再生，使反应进行一系列中间过程，整个燃烧反应就象链一样一节一节传递下去。

链锁反应三个阶段：

- 1、链的开始形成过程，反应物分子由于热力活化作用、光子作用或其它激发作用，开始形成活化分子（活化中心）
- 2、链的传递过程，活化分子与反应物相互化合，产生反应物的同时又生成新的活化分子，反应加速
- 3、链的断裂过程，活化分子与器壁或与惰性分子相撞后失去能量，使活化分子消失的过程

链锁反应：

- ①分支链锁反应—再生活化分子数目大于消耗活化分子数
- ②不分支链锁反应
气体燃料的燃烧过程以及煤粉气流的爆燃过程是链式反应。

分支链锁反应

氢的燃烧反应 $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$

- 链的激发 $H_2 + M \rightarrow 2H + M$
- 链的传递 $H + O_2 \rightarrow OH + O$
 $H_2 + O \rightarrow OH + H$
 $OH + H_2 \rightarrow H_2O + H$
- 链的中断 $2H + M \rightarrow H_2 + M$
 $OH + H + M \rightarrow H_2O + M$
- 总平衡式 $H + 3H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + 3H$

5.5 火焰传播

一、火焰传播形式

1, 层流火焰传播

静止可燃气体混合物中，缓慢燃烧的火焰传播依靠导热或扩散使未燃气体混合物温度升高，火焰是一层一层传播，20-100cm/s

2, 湍流火焰传播

火焰短，燃烧室尺寸小，易产生噪音，炉膛内火焰传播，>200 cm/s

二、炉膛内的火焰传播

- 1, 正常的火焰传播（缓慢燃烧）1~3m/s
- 2, 反应速度失去控制的高速爆炸性燃烧
1000~3000m/s, 6000℃, 2.065MPa
- 3, 正常燃烧向爆炸性燃烧的转变

三、不同燃料的火焰传播速度(气、液、固)

可燃混合物着火时的火焰传播速度即为着火速度

四、煤粉气流火焰传播速度的影响因素

- 1, 挥发分；
- 2, 发热量；
- 3, 水分；
- 4, 灰分；
- 5, 煤粉细度；
- 6, 煤粉气流混合物的初温；
- 7, 燃烧温度；

煤粉气流火焰传播速度的影响因素

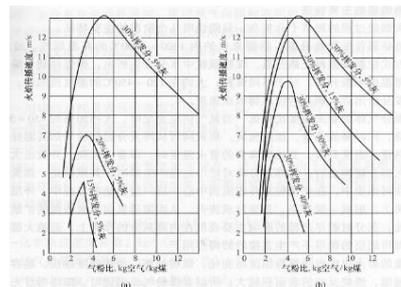


图 5-4 挥发分和灰分对煤粉气流火焰传播速度的影响

(a) 挥发分与火焰传播速度的关系；(b) 灰分与火焰传播速度的关系

5.6 煤粉的燃烧

一、煤粉的燃烧过程

- 预热、干燥(吸热)
- 挥发分析出(热解), 并着火
- 燃烧(挥发分、焦炭)(保证 O_2 、足够温度)
- 燃尽(残余焦炭 \rightarrow 灰渣) $\rightarrow q_4$

二、煤粉的燃烧时间

挥发分析出着火燃尽, 0.2~0.5s
焦炭燃尽80%, 1~2.8s

三、煤粉燃烧的主要特征

- 1, 煤粉吸热升温, 1300~1600 $^{\circ}C$ 高温烟气水分析出, 挥发分析出, 焦炭, 灰分
- 2, 煤粉温升速率快: 5000~10000 $^{\circ}C/s$; 0.1~0.2s即可达到炉内温度水平
- 3, 挥发分、小颗粒首先燃烧;

挥发分大的煤, 挥发分析出后增大焦炭粒子与氧气接触表面积; 挥发分着火放出的热量多, 焦炭充分加热, 燃烧稳定。

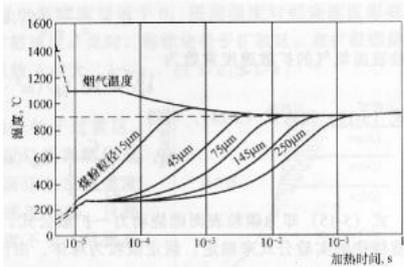


图 5-5 煤粉粒子的升温速度

5.7 碳粒燃烧动力区、扩散区、过渡区

碳的多相燃烧反应

研究对象: 固相表面上进行的多相反应(内、外表面)

- (1) 氧分子扩散到反应表面;
- (2) 氧分子吸附于表面上;
- (3) 在表面上发生燃烧反应, 放出 CO_2 等燃烧产物;
- (4) 燃烧产物解吸附;
- (5) 产物扩散到周围。

这些过程中哪些是瓶颈?

- | | |
|--------------|---------------------------|
| (2)、(4)、(5)快 | (1)较慢 \rightarrow 扩散燃烧区 |
| (1)、(3)慢 | (3)较慢 \rightarrow 动力燃烧区 |

一、碳粒表面的燃烧过程

碳粒的燃烧速度(表面反应速度): 单位时间内单位碳粒外表面积上所消耗碳的质量, 或所消耗氧的质量

用化学反应速度和氧气扩散速度表示的燃烧速度:

碳粒表面氧气浓度:

碳粒表面氧气扩散速度常数

碳粒表面燃烧动力-扩散公式
氧气扩散速度系数推导:

传质
煤粉炉: $w=0, Re=0$

氧气扩散速度系数



二、碳粒燃烧的动力区、扩散区、过渡区

1, 动力区

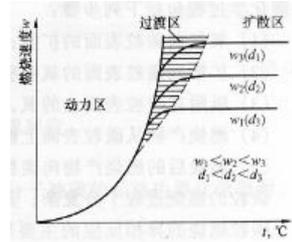
<900~1000℃, 氧气供应充足, 提高温度

2, 扩散区

>1400℃, 化学反应速度大于氧气向碳粒表面的扩散速度, 增强混合

3, 过渡区: 介于动力区与扩散区之间

碳粒燃烧的动力区、扩散区、过渡区



$C/C_0 \approx 0$, 扩散区

$C/C_0 \approx 1$, 动力区

谢苗诺夫准则: 化学反应速度常数与氧气扩散速度系数之比

图 5-6 碳粒燃烧的动力区、扩散区和过渡区

5.8 碳粒的一次、二次反应机理

一、碳粒的一次反应机理

Mayer理论: 生成不稳定的碳氧络合物

高能氧分子撞击下的离解, 或受热分解

1, 1300℃以下的反应

被碳粒所吸附的氧分子溶入碳粒晶格中

高能氧分子撞击下的离解

总反应:

2, 1600℃以上的反应

氧分子被碳的晶格边界化学吸附

高温下分解

总反应

3, 1300~1600℃的反应

CO/CO_2 比例决定于上述两个反应的比例, 可按照一级反应处理。

二、碳粒的二次反应机理

1, 800~1200℃的反应

温度低, CO_2 与C的还原反应速度低, 可忽略

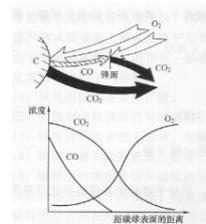
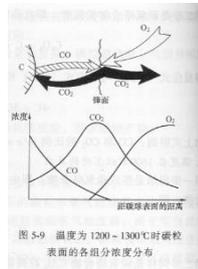


图 5-8 温度为 800~1200℃时碳粒表面的各组分浓度分布

2, 1200~1300℃的反应



第五章 重点

质量作用定律	扩散燃烧
阿累尼乌斯定律	火焰传播速度
着火温度	碳粒燃烧过程
着火条件	柴油燃烧过程
熄火条件	一次、二次反应

第六章 燃烧设备和煤粉燃烧技术

第一节 概述

一、炉内过程的关键环节

- 1, 燃料的干燥与加热
- 2, 挥发分受热分解
- 3, 挥发物的着火与燃烧
- 4, 焦炭的形成和着火燃烧
- 5, 灰渣的形成

二、与炉内燃烧过程相关的问题

- 1, 受热面积灰、结渣
- 2, 受热面金属表面的高温腐蚀
- 3, 蒸发受热面中水动力和传热的安全性
- 4, 氮氧化物的生成
- 5, 火焰在炉膛中的充满程度

第二节 直流煤粉燃烧器

一、煤粉燃烧器的作用

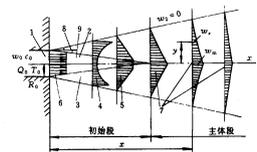
- 1, 向炉膛内输送燃料和空气
- 2, 组织燃料和空气及时、充分的混合
- 3, 保证燃料进入炉膛后尽快、稳定地着火, 迅速、完全燃尽。

直流射流

1、卷吸

卷吸: 射流带动周围介质一起流动, 使射流质量增加

分界面上卷吸周围烟气, 发生热量、质量交换, 最终射流横截面扩大、速度降低



煤粉气流卷吸的高温烟气是着火热量的主要来源 (70—90%), 另 10—30% 来源于炉膛四壁及高温火焰的辐射

喷口面积不变, 分为几个小喷口加强卷吸作用, 射程减小

2、射程：

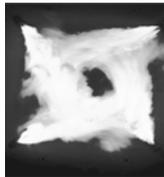
轴向速度降到初速的0.05倍时；穿透能力

射程太大：使邻角射流发生偏斜

射程太小：对邻角射流的加热作用差

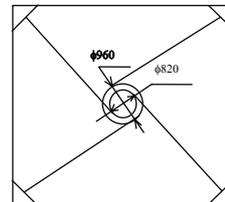
影响射程大小的因素：

- 1) 喷口面积一定,速度越高越远
- 2) 速度一定, 喷口越大, 射程越大

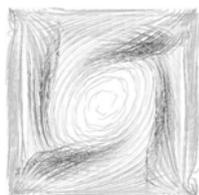


四角布置切圆燃烧方式

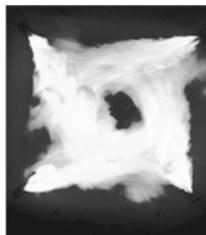
每一层的四个角喷口中
心线相切于一个或两个
假想切圆，直径
800mm左右



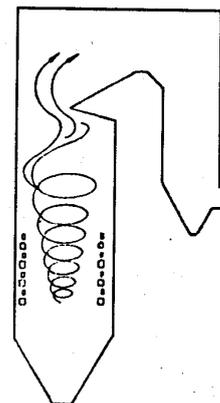
- 1、上游邻角气流的加热作用(自点燃)，加之本身卷吸，着火条件优越，着火稳定性好
向火侧 背火侧



- 2、在整个炉内形成强烈的旋转，扰动混合好，利于燃烧及燃尽
- 3、强烈的湍流扩散和良好的炉内空气动力结构，烟气在炉内充满程度好，炉内热负荷分布均匀

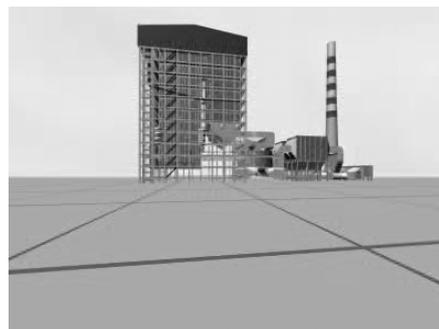


整个炉内形成
一个强烈的
旋转



- 4、负荷的调节灵活，对煤种的适应性强，控制和调节的手段也较多
- 5、炉膛结构简单，便于大容量锅炉的布置
- 6、采用摆动式燃烧器时，可通过上下摆动调节汽温
- 7、便于实现分段送风，组织分级燃烧，从而抑制NO_x生成
第一阶段低过量空气系数，还原性气氛→抑制NO_x生成
第二阶段高过量空气系数，保证燃烧的完全燃尽
- 8、炉膛出口处的残余旋转→ 烟温左右偏差
- 9、如何确保四个角的风粉均匀性也是一个重要问题
若管长不同，可用节流孔板来调，或在线监测风粉流量

四角切圆炉膛



二、直流煤粉燃烧器的类型

1, 均等配风直流燃烧器



一、二次风相邻，易于较早的混合，适应煤种：烟煤、褐煤；CE公司则更广($V_{daf} > 13\%$)

1)上下相隔布置(烟煤)：

有利于一、二次风较早混合，补充氧气

最上层二次风：给未燃尽的煤粉供氧

最下层二次风：把粗煤粉浮托起来

2)侧二次风(贫煤、烟煤)：

一次风→向火侧 卷吸高温烟气

邻角气流的加热

炉中间的热辐射

二次风→背火侧 防止火炬刷墙

氧化性气氛防止结渣、高温腐蚀

2、一次风集中布置分级配风

二次风分段、分级送入(布置于上方)

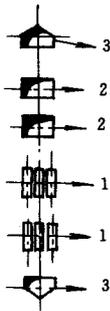
一次风集中布置，燃烧放热集中，利于着火燃烧；高煤粉浓度→着火热小

一、二次风离得远，混合晚

由上可知，适用于无烟煤、贫煤、劣质烟煤

问题：

着火区供氧不足；烧喷口→周界风



均等配风、分级配风、四角切圆

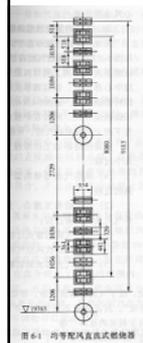


图 6-1 均等配风直流式燃烧器

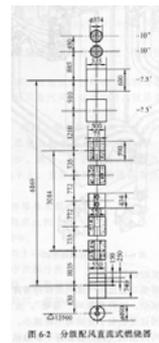


图 6-2 分级配风直流式燃烧器

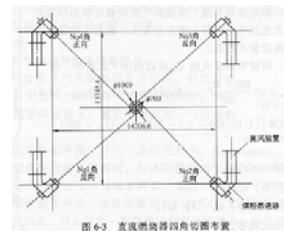
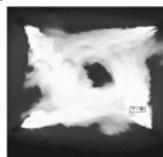


图 6-3 直流燃烧器四角切圆布置

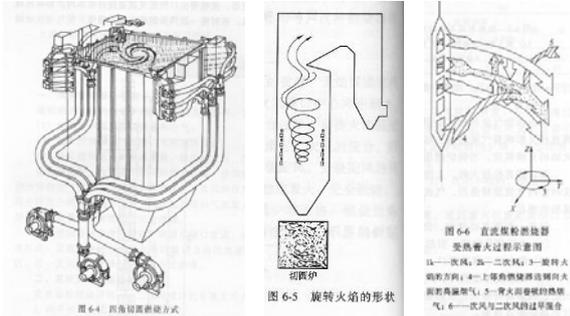
三、四角布置直流燃烧器的工作原理

- 1, 煤粉气流卷吸高温烟气被加热；
- 2, 射流两侧补气，射流的相互撞击；
- 3, 煤粉气流的着火过程；
- 4, 煤粉与二次风的混合过程；
- 5, 四股气流形成切圆旋转流动过程；
- 6, 焦炭燃尽过程



着火热：

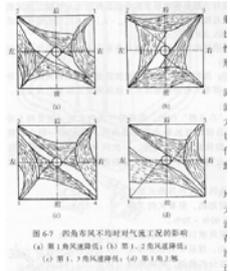
四角切圆燃烧方式



四、四角切圆燃烧气流偏斜及切圆直径

1, 气流偏斜问题

- (1) 上游邻角气流的撞击;
- (2) 射流两侧“补气”条件的
影响;
- (3) 燃烧器的宽高比。
- (4) 实际切圆直径增加。



2, 切圆直径

切圆直径过大

- (1) 火焰易贴壁
- (2) 容易烧坏喷口
- (3) 过热器、再热器热偏差

五、一次风与二次风

1, 一次风量; 2, 一次风速

煤种	无烟煤	贫煤	烟煤		劣质烟煤		褐煤
			20% 时 $V_{daf} < 30\%$	$V_{daf} > 30\%$	$V_{daf} < 30\%$	$V_{daf} > 30\%$	
总风量	—	20~25	25~30	25~35	—	25	20~45
总风量	15~20	20~25	25~40	25~45	20~25	25~30	40~45

煤种	无烟煤	贫煤	烟煤	褐煤
一次风出口速度	20~25	20~30	25~35	25~40
二次风出口速度	40~55	45~55	40~60	40~60
三次风出口速度	50~60	55~60	35~45	35~45

一次风

1、一次风层数: 300MW → 5-7层

随着锅炉容量增大, 若只增大单个一次风喷口的热负荷, 会导致结渣、 NO_x 增加, 增加喷口数量

随着锅炉容量增大, 需要增大一次风的射程, 增加喷口热负荷

2、一次风率: 决定于煤种的 V_{daf} 值, 和着火条件、制粉系统情况

3、一次风速

一次风速过高 → 燃烧不稳, 甚至熄火 ($>$ 火焰的传播速度)
对面墙结渣

一次风速过低 → 刚性、扰动、卷吸、回火、堵管、浓度不均
一次风速取决于着火性能, 直吹式、乏气送粉取下限; 热风送粉取上限。

4、一次风温

与煤种有关, 风温高:

优点 → 易着火, 燃烧稳定: 无烟煤 → 近 300 度

缺点 → 制粉系统的安全性

二次风

- 二次风穿透火焰的能力、高速→着火后的稳定性、混合良好、燃尽
- 喷口面积不变，风速由风量决定

表 6-3 热风温度的推荐数值

燃料	无烟煤	贫煤 劣质烟煤	烟煤		烟煤 洗中煤
			热风干燥	烟气干燥	
热风温度 (°C)	380 - 430	330 - 380	350 - 380	300 - 350	280 - 350

1、二次风的配风方式

在炉膛高度方向各层二次风风量的配置

- 正塔型** 对粗煤粉的浮托能力 → 减少灰渣含碳量
燃用烟煤时，比倒塔型炉膛出口烟温低
- 倒塔型** 适用于无烟煤、贫煤→着火稳定、燃烧效率高
- 腰鼓型** 降低污染物NO_x、有时使燃烧效率提高

总之，可以通过各层二次风的风量配置，实现→燃烧的优化

2、二次风温

风温高→利于燃烧，但受空预器传热面积的限制
故：煤质差时，设计较高的热风温度

六、三次风、周界风、夹心风

- 1, 三次风 $w_3=50\sim60\text{m/s}$
- 2, 周界风 $V_{\text{周界}}=10\%V_{\text{二次风}}$
- 3, 夹心风
- 4, 十字风

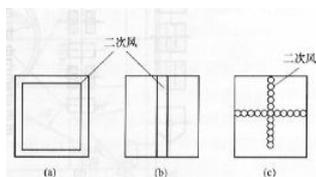


图 6-8 一次风口中周界风、夹心风、十字风的布置
(a) 周界风；(b) 夹心风；(c) 十字风

三次风

风速较高、较大的穿透深度、与火焰混合良好、燃尽

- 中储式制粉系统、热风送粉
- 乏气直接送入炉内 10%的细煤粉
- 特点：风温低（100°C）、水分大、煤粉细、风速大（50~60m/s）
- 远离二次风、下倾角，不影响煤粉主气流的燃烧，压火

不利影响：

1. 降低火焰温度，燃烧不稳
2. 炉膛出口烟温升高→过热、再热汽温升高
3. 加大残余旋转
4. 飞灰可燃物增加
5. 影响空气动力场，火焰贴墙

合理布置：

- 向下压火→下倾角
- 上下两段

周界风

风层薄(15~20mm)、风量小(10%)、风速高(30~45m/s)

冷却作用, 防止烧喷口

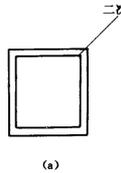
改善着火条件, 加强卷吸、加强湍流脉动

增加刚性 → 防止刷墙

停运时冷却风

煤质差时, 减少周界风量

缺点: 妨碍一次风直接与高温烟气接触



夹心风

风速高于一次风, 风量10~15%

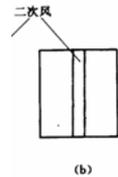
补充燃烧中心的氧气

提高一次风刚性, 一次风射流减少偏斜

强化气流内部扰动、混合

减小射流扩散角, 防止贴壁, 结渣

变煤种、变负荷时的调节手段

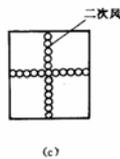


十字风

● 减少火焰对大尺寸一次风喷口内壁面的辐射传热, 保护一次风喷口

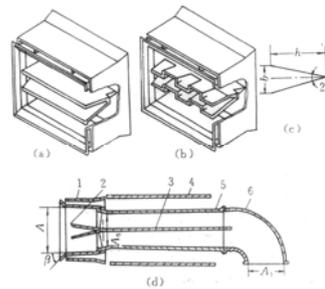
● 高速十字风增强一次风射流刚性, 一次风不易偏斜

● 一次风停用时, 冷却作用



七、摆动式燃烧器

直流式宽调节比摆动燃烧器



- 1、浓淡分离
- 2、扩流锥
- V型、波浪形

摆动式燃烧器特点

1、各喷口同步上、下摆动20~30度, 改变火焰中心位置 → 调节再热汽温

大容量锅炉常用, 角度-20~+30度, 汽温幅度40~50度

→ 控制炉膛出口烟温, 避免炉后受热面结渣

2、一次风固定, 二、三次风摆动

→ 适应煤质的变化, 调节混合的早晚

→ 容易被烧变形, 而不能摆动

不适用于难着火的煤: 上摆时, 自点燃作用减弱

八、大容量锅炉的典型燃烧器结构

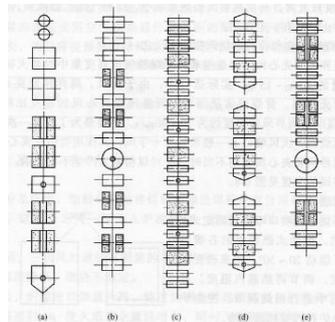


图 6-10 典型燃烧器结构
(a) 无烟煤型; (b) 贫煤、劣质煤型; (c) 烟煤型; (d); (e) 褐煤型

九、直流燃烧器布置方式

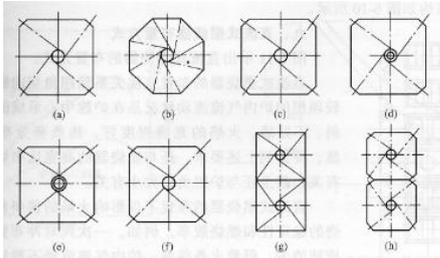


图 6-11 直流式燃烧器的布置方式

(a) 正四角布置; (b) 正八角布置; (c) 大切角正四角布置;
(d) 同向大小双切圆方式; (e) 正反双切圆方式;
(f) 两角相切, 两角对冲方式; (g) 双室炉膛切圆方式; (h) 大切角双室炉膛方式

- 1, 一、二次风不等切圆布置;
- 2, 一次风正切, 二次风反切布置;
- 3, 一次风对冲、二次风切圆布置

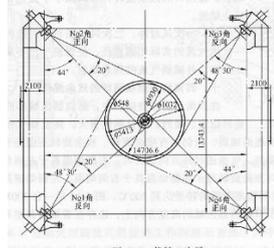


图 6-12 偏转二次风

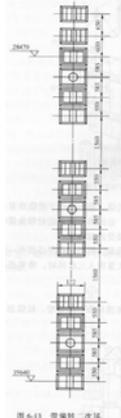


图 6-13 带偏转二次风的燃烧器结构

十、四角切圆燃烧锅炉的残余旋转

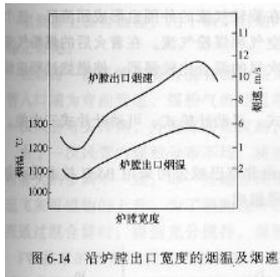


图 6-14 沿炉膛出口宽度的烟温及烟速

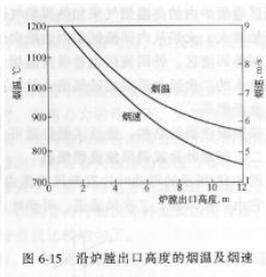
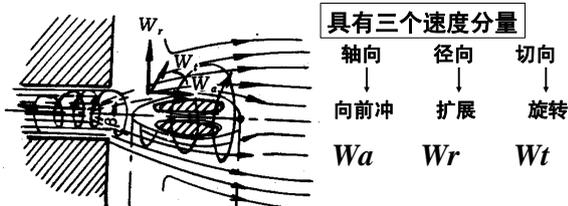


图 6-15 沿炉膛出口高度的烟温及烟速

第三节 旋流煤粉燃烧器

- 出口气流是旋转的(二次风旋转射流)
 - 一般是圆口→圆形燃烧器
 - 前后墙对冲、单墙
- 空气动力学特性:
- 速度分布(轴向、径向、切向)、射程、卷吸、回流区

1、旋流射流



切向速度、轴向速度衰减快 → 初期扰动强烈, 后期扰动不足, 射程较短

卷吸量多: 射流外边界、回流区(加热火炬根部煤粉)比直流燃烧器的扩散角大, 旋转越强, 扩散越大

回流区

- 由于旋转, 在射流中心产生低压区, 造成在燃烧器出口附近与主气流方向相反的回流运动
- 能将高温烟气卷吸回来, 加热根部煤粉气流, 对着火、稳燃有利

旋流燃烧器同直流燃烧器一样, 外边界也有卷吸作用, 旋流射流着火从内、外边界开始

2、旋流强度及射流

● 旋流强度

M -旋转动量矩
 K -轴向动量

$M \uparrow \rightarrow n \uparrow$; $K \uparrow \rightarrow n \downarrow$;

影响因素1-气流型式

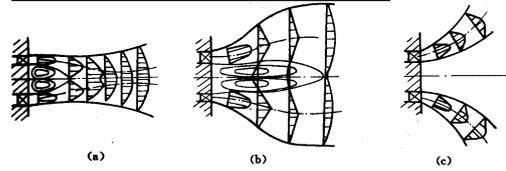


图 7-1 旋转射流的气流型式

(a) 弱旋转气流 (封闭气流); (b) 开放气流; (c) 全扩散气流

当 n 很小时, 如(a)所示, 弱旋转, 不能产生回流区或很小, 呈封闭状态, 不具有旋转的重要特性, 类似于直流。

当 n 增大到一定值时, 如(b)所示, 出现回流区, 适当的回流区长度及回流量, 开放式气流。

当 n 太大时, 如(c)所示, 形成扩散状, 俗称“飞边”, 飞边会使火焰贴墙 → 烧喷口、结渣。

影响因素2-回流区

- 在开放式气流这一区间, n 过大或过小均不利
 - n 过小: 长度及回流量均小, 只能卷吸少量低温烟气。
 - n 过大: 回流量 \uparrow , 但长度 \downarrow , 回流大量低温烟气。
- 最终目的: 回流大量高温烟气到火炬根部

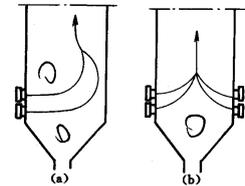
影响因素3-扩散角

$n \uparrow$ 扩散角 \uparrow , 外边界面积 \uparrow , 卷吸 \uparrow

影响因素4-射程

$n \uparrow$ 射程 \downarrow

前后墙对冲 $\left\{ \begin{array}{l} \text{充满度;} \\ \text{对面的墙结渣。} \end{array} \right.$



一、旋流煤粉燃烧器工作原理

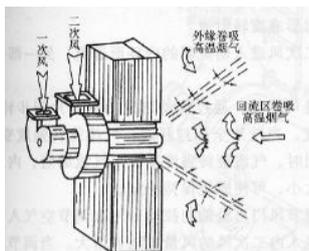


图 6-16 旋流式燃烧器工作原理

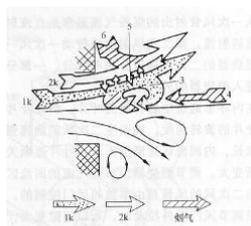
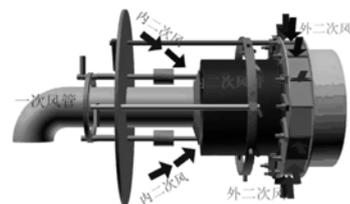
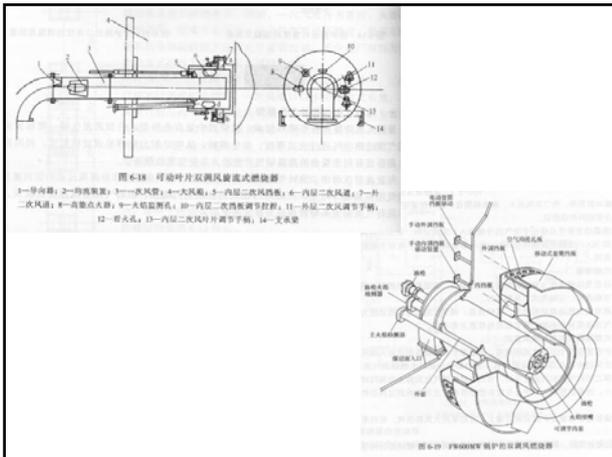


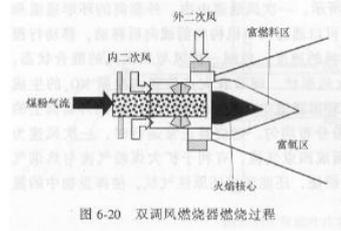
图 6-17 旋流式燃烧器的煤粉着火过程
 1k—一次风, 2k—二次风, 3—回流区中的回流烟气;
 4—从炉膛深处聚集的浓烟烟气, 5—二次风
 混合, 6—外缘卷吸的烟气

二、可动叶片双调风旋流燃烧器



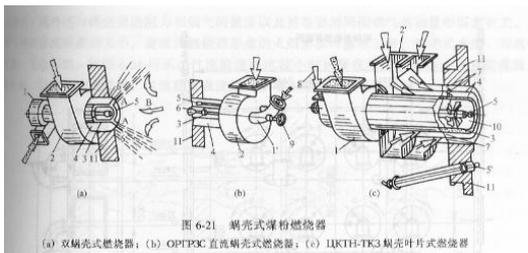


三、双调风旋流燃烧器的燃烧过程

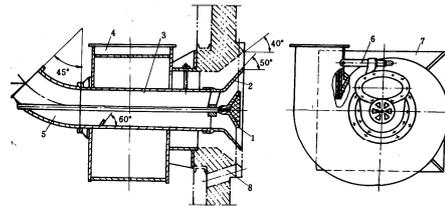


低氧燃烧
空气分级技术
降低NO_x

四、蜗壳式燃烧器



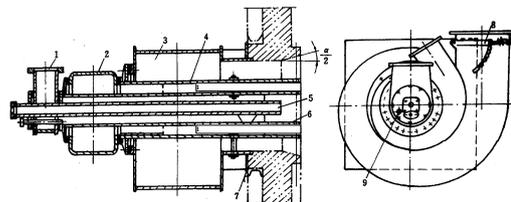
1) 单蜗壳 扩锥型



1—扩流锥；2—次风扩管口；3—次风管；4—二次风喇叭；5—次风连接管；6—二次风舌形挡板；7—连接法兰；8—点火喷嘴装设孔

- (1) 一次风不旋转，二次风 → 蜗壳；
- (2) 扩锥作用：使一次风扩散，促进回流区产生
- (3) 可调节扩流锥的位置(前后移动)，改变气流的扩散角 → 回流区的大小；
- (4) 二次风动量大，带动一次风一起旋转；
- (5) 与双蜗壳相比：一次风阻力小，射程远；
混合相对较晚 → 适合燃用较差的煤。

2) 双蜗壳式



1—中心风管；2—次风喇叭；3—二次风喇叭；4—次风通道；5—油嘴喷管；6—次风内套管；7—连接法兰；8—舌形挡板；9—火焰检测器安装管

- ① 一、二次风通过各自蜗壳形成旋转射流
- ② 一、二次风旋转方向相同，混合早且强烈→适于烟煤、褐煤
- ③ 燃烧器中心的中心管装置重油喷嘴
- ④ 一、二次风蜗壳入口舌形挡板，调节旋流强度，调节性能差，煤种适应性差
- ⑤ 一次风阻力大，不宜于直吹式制粉系统

前两种目前应用很少

附：轴向叶片式

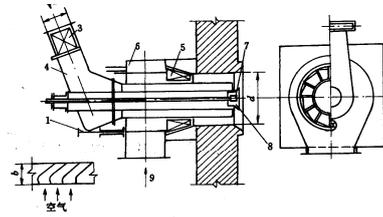
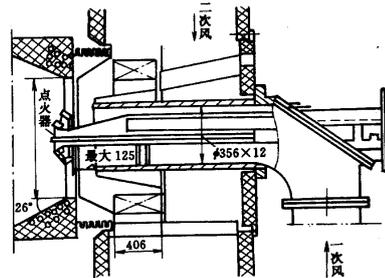


图 7-4 一次风不旋转的轴向可动叶轮旋流燃烧器
1—拉杆；2—一次风进口；3—一次风舌形挡板；4—一次风管；5—二次风叶轮；
6—二次风壳；7—喷嘴嘴；8—扩流锥；9—二次风进口

叶片展开图

- ① 利用轴向叶片使气流旋转，叶片垂直于柱面，与轴成一定角度(参见展开图)，风从轴向流入
- ② 一次风可旋，可不旋，扩流锥
- ③ 二次风通过轴向叶片的导向形成旋流进入炉膛
- ④ 轴向叶片可固定，可移动可调，通过叶轮的前后移动可调节旋转强度 n (与直流二次风混合)
- ⑤ 回流区较小、长，适于高挥发分煤

附：切向叶片式



五、旋流燃烧器的布置与供风方式

一次风可旋，可不旋，二次风通过可动切向叶片，形成旋流进入炉膛

- (1) 叶片切于柱面，平行于轴；风从切向流入
- (2) 叶片可动 → 改变角度 → 旋转强度 → 回流式；
- (3) 阻力小，多层盘式稳焰器形成一次风回流区，可移动。
- (4) 适用于 $V_{daf} \geq 25\%$ 的烟煤。

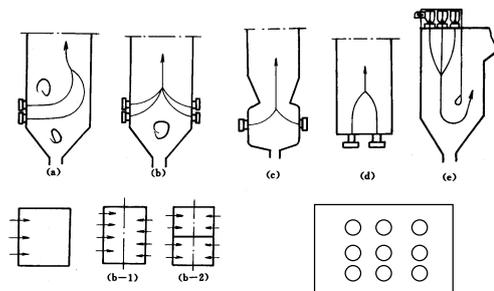
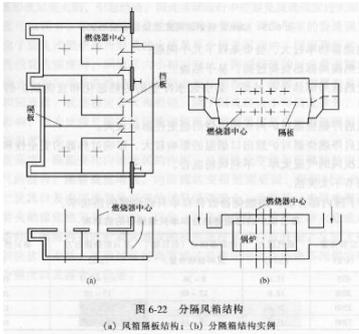
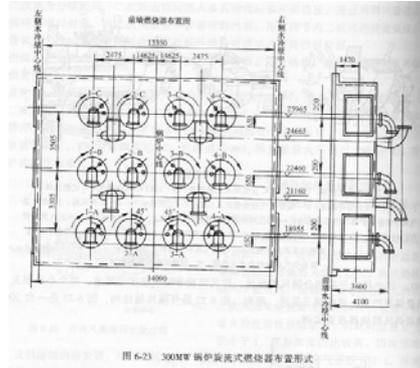


图 7-7 旋流燃烧器的布置方式
(a) 前墙布置；(b) 两面墙对冲交错布置；(b-1) 两面墙交错布置；(b-2) 两面墙对冲布置；
(c) 半开式炉膛对冲布置；(d) 炉底布置；(e) 炉顶布置

风箱结构



300MW锅炉旋流燃烧器布置形式



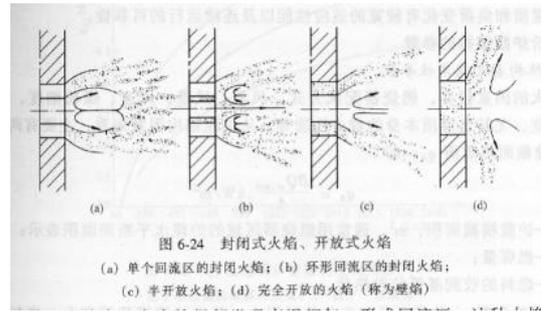
六、单只燃烧器的热功率

- 1, 功率太大, 易引起结渣;
- 2, 局部热负荷太高, 使水循环恶化;
- 3, 切换或启停燃烧器对炉内火焰稳定性影响大
- 4, 切换或启停燃烧器对炉膛出口烟温影响较大
- 5, 一、二次风气流太厚, 不利于风粉混合
- 6, 燃烧调节不太灵活

表 6-4 部分锅炉的燃烧器数目和单只燃烧器的热功率

机组功率 (MW)	额定蒸发量 (t/h)	蒸汽压力 (MPa)	燃烧器数目 (前后墙或再热炉布置)	单只燃烧器出力 (t/h)	单只燃烧器热功率 (MW)
300	935	18.6	8~36	1.5~3.7	100~25
600	2008	18.6	12~48	15~10	100~44
800	2500	25.0	16~48	18.6~10	126~44
1000	3200	25.0	16~48	22.3~10	160~44

七、旋转火焰的特性



第四节 煤粉炉炉膛

一、燃烧煤粉对炉膛的要求

- 1, 有利于着火、稳燃;
- 2, $\theta_1 < ST-100^\circ C$, 炉膛受热面不结渣
- 3, 水冷壁不发生传热恶化
- 4, 降低NOx生成量
- 5, 对煤质和负荷变化有较好的适应性

二、评价炉膛结构的参数

炉膛截面热负荷

燃烧器区域壁面热负荷

炉膛容积热负荷

1、炉膛容积热负荷

炉膛容积热负荷 q_v

单位时间、单位容积中的平均热量

目的：计算炉膛容积

q_v 与着火、结渣的关系

- $q_v \uparrow \rightarrow V_l \downarrow$ ，炉内温度水平高 \rightarrow 易着火，炉内受热面结渣，但烟气流程短，出口烟温高 \rightarrow 炉后对流受热面易结渣；容积小 \rightarrow 锅炉投资小
- $q_v \downarrow \rightarrow V_l \uparrow$ ，不易着火；容积过大 \rightarrow 造价高

q_v 与完全燃烧的关系

- q_v 太大 \rightarrow 不易完全燃烧 (q_4)
单位炉膛容积在单位时间内燃煤量大，炉内烟气量大，烟气流速快，燃料在炉内的停留时间缩短
- q_v 太小 \rightarrow 温度水平低 (q_3)
燃烧不完全 (q_4)

大容量锅炉 q_v 的选取

- q_v 要适当大，使烟温冷却到目标值
- q_v 要适当大，使燃料完全燃烧
- 大容量锅炉水冷壁面积的增加慢于容积的增加，其 q_v 小于中、小容量锅炉
炉膛容积的增加小于锅炉容量的增加，使烟气冷却到一定温度的 q_v 比使燃料完全燃烧的 q_v 小

q_v 与燃料的关系

- 无烟煤 $q_v \downarrow \rightarrow$ 降低 q_4 ，用热风送粉等保证着火
- 烟煤 q_v 可大
- 褐煤 q_v 小一些，灰多，若 q_v 大，易结渣

范围：烟煤，140—200kW/m²

无烟煤及贫煤，110—140kW/m²

褐煤，90—150kW/m²

q_v 与容量、煤种的变化关系

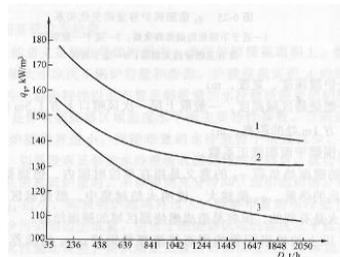


图 6-26 q_v 随锅炉容量的变化关系

1—适于不结焦的烟煤和贫煤；

2—适于一般烟煤及炉膛有卫燃带的无烟煤；3—适于褐煤

2、炉膛截面热负荷

炉膛截面热负荷 q_a

单位时间、燃烧器区域炉膛单位截面折算的平均热量

目的：决定宽度、深度

q_a 与着火、结渣的关系

- $q_a \uparrow \rightarrow$ 瘦高形 \rightarrow 燃烧器区域温度高，易着火，燃烧器处受热面易结渣、膜态沸腾
- $q_a \downarrow \rightarrow$ 矮胖形 \rightarrow 不利着火，烟气没有足够的冷却，炉膛出口后受热面易结渣

q_a 与水动力的关系

- 防止膜态沸腾

各层燃烧器截面热负荷

各层燃烧器的截面热负荷 q_{ac}

考核各层燃烧器局部地区的温度水平

q_a 与燃料的关系

- 无烟煤 q_a 要大 \rightarrow 保证着火 \rightarrow 瘦高形
- 灰熔点高 $\rightarrow q_a$ 可大
($ST > 1350^\circ\text{C}$ ，结渣可能性小)
- q_a 范围：
100MW以上固态排渣，3~4.5MW/m²
多层燃烧器各层 q_{ac} ，0.93~1.74MW/m²

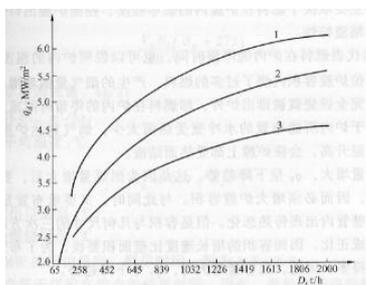


图 6-25 q_a 值随锅炉容量的变化关系
1—适于不结焦的烟煤和贫煤；2—适于一般烟煤
及有卫燃带的无烟煤；3—适于褐煤

3、燃烧器区域壁面热负荷

燃烧器区域壁面热负荷 q_r

u -燃烧器区域炉膛周长
 H_r -燃烧器区域高度

单位时间、燃烧器区域壁面单位面积的热功率

目的：火焰在高度方向的分布、燃烧器区域温度水平
 \rightarrow NO_x的生成 \downarrow

q_r 与燃烧器布置的关系

锅炉容量 \uparrow ，多层布置(4, 6, 8)，使局部温度水平 \downarrow ， NO_x \downarrow

● q_r \uparrow \rightarrow 集中 \rightarrow 有利着火 \rightarrow 无烟煤

● q_r \downarrow \rightarrow 分散 \rightarrow 不易结渣 \rightarrow NO_x \downarrow

范围：褐煤，0.93—1.16MW/m²

无烟煤及贫煤，1.4—2.1MW/m²

烟煤，1.28—1.40MW/m²

附：4、炉膛壁面热负荷

炉膛壁面热负荷 q_f

单位时间、单位炉膛壁面面积的热功率

整个水冷壁辐射热流密度

目的：结渣、膜态沸腾

q_f 对水冷壁的影响

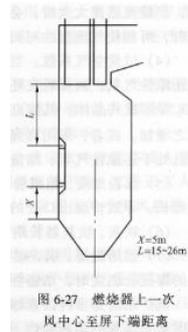
● q_f \uparrow \rightarrow 单位壁面吸收热量 \uparrow \rightarrow 烟气温度 \uparrow \rightarrow 水冷壁结渣

● 判断膜态沸腾指标

● q_f 范围：褐煤，100KW/m²

烟煤、无烟煤，140 KW/m²

燃料在炉内的停留时间



燃尽时间：1.5~2.8s

三、炉膛受热面结渣的影响因素

1, 受热面结渣的形成过程

熔融灰渣接近受热面时，未被冷却，与受热面相碰，大块渣积聚在受热面外壁上，形成“结渣”。

2, 受热面积灰或结渣的危害

- (1) 炉侧传热恶化，加剧结渣；
- (2) 炉膛出口受热面结渣、超温；
- (3) 未结渣的受热面金属表面温度升高，腐蚀性气体增加，引起高温腐蚀；
- (4) 排烟温度升高，锅炉效率降低；
- (5) 严重结渣时，大块渣落下，可能造成灭火、水冷壁破裂等事故

3, 影响受热面结渣的主要因素

结渣两个基本构成条件：

火焰贴近炉墙时，烟气中的灰呈熔化状态；火焰直接冲刷受热面

影响因素：

- (1) 煤灰特性和化学组成(灰熔点、黏性、组成成分)；
- (2) 炉膛的温度水平(燃料发热量、水分、锅炉负荷)；
- (3) 火焰贴墙(直流扩散、旋流飞边、弱旋流冲刷对面)；
- (4) 过量空气系数(还原性氛围氧化不充分形成共晶体、高浓度煤粉燃烧方式)；
- (5) 煤粉细度(粗煤粉火焰延长)；
- (6) 吹灰；
- (7) 混煤比例。

4, 防止受热面结渣的基本条件

- (1) 受热面足够多, 冷却烟气;
- (2) 良好的一次、二次风气流结构; 不冲刷受热面。

四、火焰充满度

- 1, 炉膛容积没有得到充分利用;
- 2, 水冷壁吸热不均匀, 炉膛出口烟温不正常, 造成过热器、再热器热偏差。

五、炉膛负压

比大气压低20~60Pa, 大容量能达100Pa

- 1, 负压偏高, 关小引风机开度。
- 2, 气流上翘, 造成不完全燃烧。
- 3, 四角切圆燃烧锅炉, 气流上翘, 燃烧不稳定
- 4, 漏风量大, 烟气体积增加, 烟速加快, q_2 增大、受热面磨损增大、汽温升高;
- 5, 炉膛负压急剧升高, 造成内爆。
- 6, 燃烧不稳定造成炉膛负压脉动。
- 7, 炉膛负压突然变成正压, 外爆。

第五节 煤粉气流的燃烧

一、影响煤粉气流着火的因素

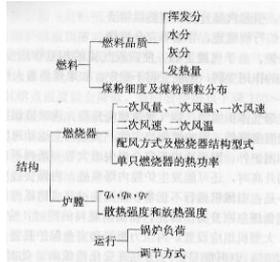
燃料、结构、运行三方面

1, 燃料性质的影响

2, 锅炉低负荷时煤粉

气流的着火

投油助燃、新的燃烧器、技术



二、混煤的燃烧特性

1, 混煤的着火特性: 着火不稳定

V=5%无烟煤、V=40%长焰煤 混合后 着火温度

57% 43% V=20% 380℃

V=11%单一煤种, 着火温度380℃

2, 混煤的燃烧效率: 下降

第六节 低负荷稳燃及低NO_x煤粉燃烧技术

一、低负荷稳燃技术

- 1, 提高一次风中煤粉浓度; 浓淡燃烧器、火焰稳定器、钝体燃烧器
- 2, 提高煤粉气流的初温; 热风送粉
- 3, 降低煤粉颗粒粒径。
- 4, 在难燃的煤中混入易燃的煤。

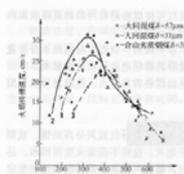


图 6-28 着火距离与煤粉浓度的关系

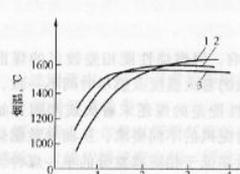


图 6-29 热风温度对炉内温度的影响
1—热风温度为 300~310℃; 2—330~350℃;
3—380~400℃

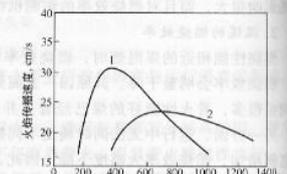


图 6-30 煤粉颗粒度对火焰传播速度的影响
1—平均粒径为 10μm;
2—平均粒径为 27μm

二、低NO_x燃烧技术

1, NO_x生成机理

(1) 热力型NO_x

温度超过1500℃, 空气中氮氧化所得

(2) 燃料型NO_x

主要是挥发分中氮化合物生成, 挥发分在30~50s内析出, 挥发分行程为1m, 减少燃烧初期过量空气系数

(3) 快速型NO_x

空气中的氮和碳氢燃料高温下反应生成中间产物N、HCN、CN等, 然后快速氧化所得

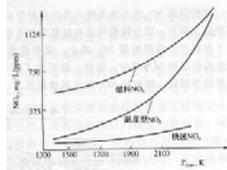


图 6-31 NO_x 的生成量与炉膛温度的关系

2, 低NO_x燃烧器

(1) PM燃烧器

- 它由靠近燃烧器一次风管的一个弯头及两个喷口组成。煤粉气流流过分离器时进行简单的惯性分离, 浓煤粉进入上喷口, 淡煤粉进入下喷口, 实行垂直浓淡分离
- 燃烧器还包括再循环烟气及燃尽风喷口

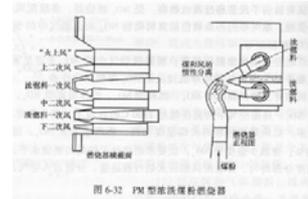


图 6-32 PM型浓淡煤粉燃烧器

PM燃烧器实际上是集烟气再循环、分级燃烧和浓淡燃烧于一体的低NO_x燃烧系统

再循环烟气→ 推迟二次风与一次风的混合

推迟富粉流与贫粉流的混合

浓侧: 还原性气氛→燃料型NO_x生成的少

淡侧: 空气量多, 温度低→热力型NO_x生成的少

可以达到比一般的空气分级燃烧器更低的排放值

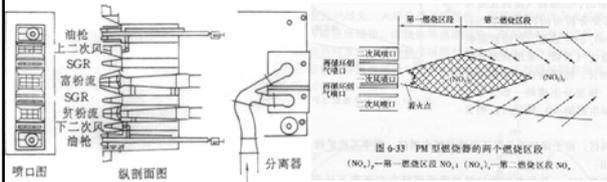
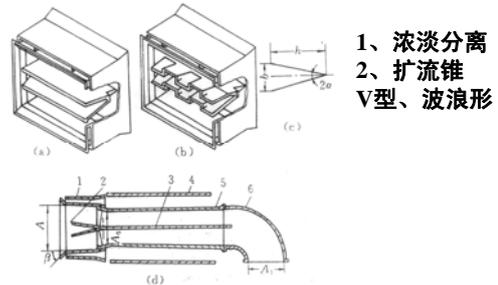


图 6-33 PM型燃烧器的两个燃烧区
(NO_x)₁—第一燃烧区 NO_x; (NO_x)₂—第二燃烧区 NO_x

(2) WR燃烧器

直流式宽调节比摆动燃烧器—浓淡型燃烧器

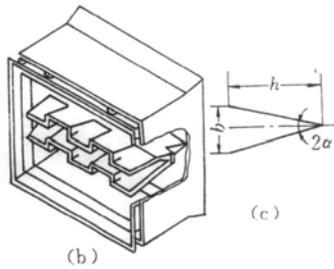


WR燃烧器是Wide range tip 燃烧器的简称。它是美国CE公司于70年代后期研制出来的。经不断改进, 锅炉不投油助燃的最低负荷可达到额定负荷的20%。当然, 这与煤质有关, 随着煤质变差最低负荷也会相应提高

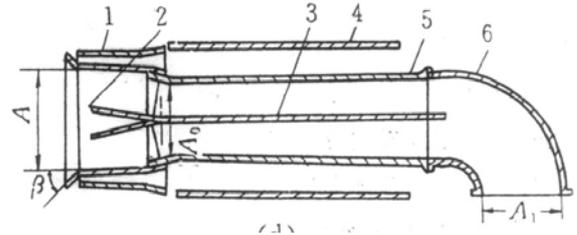
WR燃烧器的喷口可以做成整体摆动的形式, 也可以做成上、下分别摆动的两部分

稳定燃烧的目的

- 1) 上部煤粉浓度高, 利于着火, 还可降低NO_x生成
- 2) 扩流锥形成回流区: 回流高温烟气, 加热煤粉根部
- 3) 可以降低不投油稳燃负荷
- 4) 若采用水平方向浓淡分离, 效果更佳



扩流锥的尺寸如图，锥角 $2\alpha=20^\circ\sim 25^\circ$ ，挥发分低的煤种取上限，相对高度 $h/b=2$ 。由于扩流锥受到煤粉的冲刷磨蚀和炉内高温辐射的作用，应该采用耐高温氧化的金属材料或陶瓷制造。



一次风喷嘴是一个锥形的气流加速管，采用渐缩管段是使煤粉气流加速，防止煤粉在水平管中沉积，让煤粉颗粒向中间集中，提高扩流锥后回流区边缘的煤粉浓度，有利于煤粉着火。

扩大出口截面的目的是降低一次风速，使着火较为稳定。

喷嘴端板向外扩张角 $\beta=30^\circ\sim 60^\circ$ ，低挥发分煤种取上限。这是为了推迟周界风与煤粉气流的混合，有利于贫煤和无烟煤的稳定燃烧。

- 这种燃烧器由于改善了着火条件，故可提高锅炉的燃烧效率。
- 与普通的直流燃烧器相比，当过量空气系数为1.15~1.40时，锅炉在最大负荷下的燃烧效率可提高约1%；
- 当过量空气系数降到1.10以下时，普通直流燃烧器的燃烧效率降低较多，而WR燃烧器的燃烧效率几乎不发生变化；
- 锅炉负荷降到50%额定负荷时，WR燃烧器的燃烧效率要比普通直流煤粉燃烧器高5%左右。

(3) A-PM燃烧器

浓、淡、浓燃烧器

单个喷嘴的火焰形成同轴对称火焰

中心淡煤粉，外围浓煤粉

降低局部高热强度，火焰中心区NO的还原反应；火焰外围浓煤粉维持火焰稳定

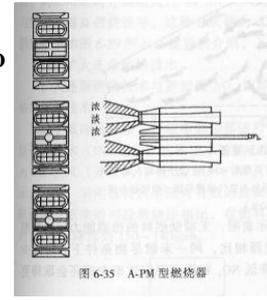
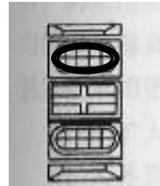


图 6-35 A-PM 型燃烧器

(4) 新型低NO_x燃烧器

一次风管设有轴向调节杆；控制火焰位置

一次风出口有环形稳燃器；回流高温烟气，保证着火

环形二次风管内设有隔板；将二次风分割为2股，推迟外二次风与火焰的混合，形成还原性氛围

还原区后燃尽区

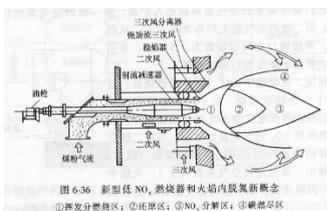


图 6-36 新型低 NO_x 燃烧器和火焰内脱氮新概念
①挥发分燃燃区；②还原区；③NO_x分解区

稳焰器→在一次风出口处形成回流区，前后移动调节回流区大小；按不同方向将已着火一次风送到的二次风中，加速混合；可轴向调节油喷嘴

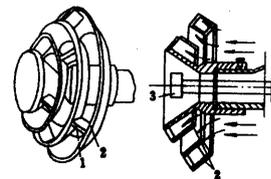


图 5-22 稳焰器

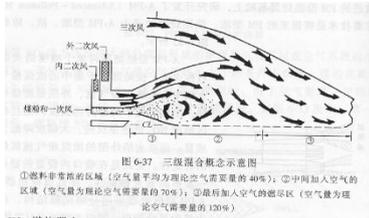
1—定位板（每隔120°装置一片，相邻锥形圈的定位板错开布置）；2—锥形圈；3—油喷嘴

三级混合:

双调风旋流燃烧器+燃尽风

燃料与空气混合三个阶段

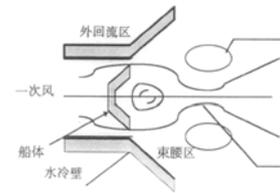
内、外二次风均 $\alpha < 1$



无辅助燃料稳燃能力达额定负荷(汽轮机侧)15%

附：火焰稳定船式直流燃烧器

● 清华大学



□ 回流区小，一半在喷口内，中心回流区温度 100~300℃

□ 回流区后零速度边界上的束腰处，三高区

高温：邻角高温烟气、射流卷吸

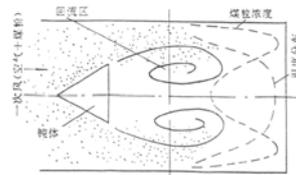
高煤粉浓度：稳定船、邻角气流冲刷
较高的氧浓度

优点

- 分级配风
- 燃用贫煤、无烟煤
- 较低负荷下不投油助燃
- 节约点火用油
- 火焰稳定船在一次风喷口内，不易烧坏，磨损小，使用寿命长

附：钝体燃烧器

● (华中理工)



较大回流区

高温：回流区卷吸高温烟气、钝体导流一次风扩展角

增大外边界卷吸

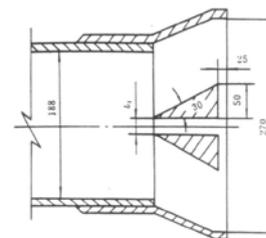
高煤粉浓度：钝体
回流区边缘处煤粉浓度是一次风的1.5倍

带稳燃腔的钝体燃烧器

- 钝体后回流区大小、回流量多少决定稳燃效果
- 钝体在稳燃腔内，消除原钝体上下两端气流被卷吸到回流区的可能，保证高温
- 回流区在稳燃腔内、出口外一段较长范围内，回流量增大
- 稳燃腔使回流区长度、回流量增加一倍；稳燃腔长度、出口截面较大，回流区长度、回流量较大

开缝钝体燃烧器

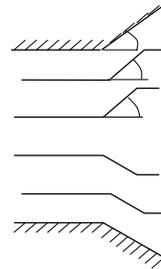
钝体燃烧器存在的问题是易磨损、烧坏或燃烧器喷口及钝体上结渣



钝体燃烧器特点

- 钝体燃烧器制造方便，安装简单，一般锅炉小修即可完成
- 假想切圆为无钝体的68%~70%，防止火焰冲刷墙壁，防止结渣
- 一次风速、一次风率增大，提高钝体尾迹区湍流换热能力
- 耐热、耐磨材料制成

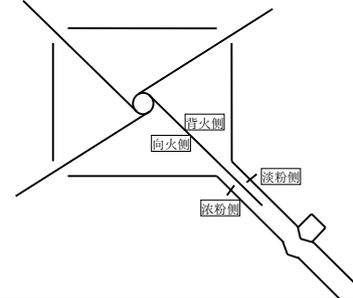
附：旋流燃烧器扩口的改进



- 用于高挥发分的旋流燃烧器，在燃用低挥发分煤时，增大一、二次风出口的扩展角，可增大高温烟气的回流；推迟空气与煤粉气流的混合
- 配合措施：燃烧带、热风送粉、减小煤粉细度、降低一次风量风速

附：水平浓淡燃烧器

- 哈尔滨工业大学



- 水平浓淡
- 风包粉，防止冲刷水冷壁，防止结渣
- 高温：邻角高温烟气、射流卷吸、辐射
- 高煤粉浓度：浓相
- 改进型：水平浓淡风

3, 炉内脱氮技术

(1) 两级燃烧与MACT

两级燃烧：

第一级：80%Vk，缺氧燃烧，火焰温度低，温度型NO少，缺氧燃料型NO少

第二级：空气送入，炉膛冷却作用温度较低，燃料型、热力型NO均较少，但要保证空气与燃尽区火焰的混合良好，否则会增大 d_4

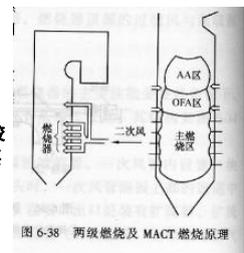


图 6-38 两级燃烧及 MACT 燃烧原理

MACT：

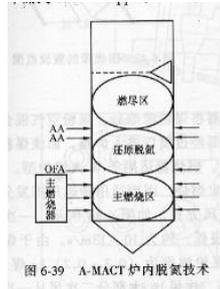
主燃区 α ：0.8-0.9

燃尽风 OFAR：还原区，接近理论空气量，主燃区生成的NO还原为N₂

增量风AA：燃尽

(2) A-MACT

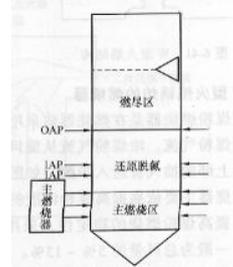
- MACT的AA风进一步分为上下两层
- 促进未燃物与空气均匀混合, 提高燃烧效率
- 与PM型直流燃烧器配合



(3) 扩大还原燃烧技术

IAP供风方式(分级风)

主燃烧区与燃尽区之间有较大空间, 注入分级风, 形成还原性氛围, 还原 NO_x



附: 燃烧分级 (再燃)

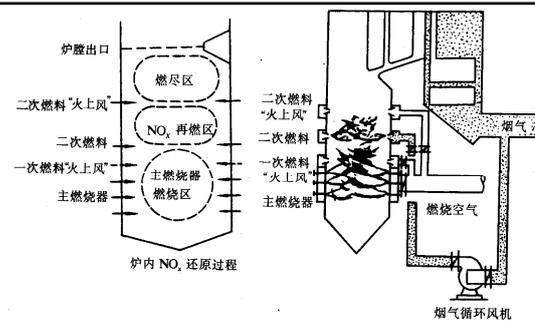
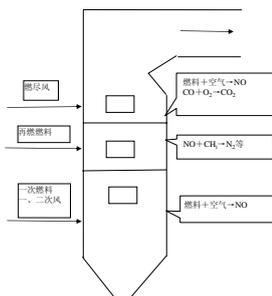
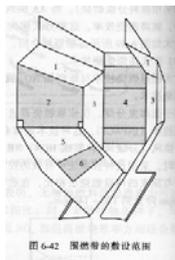
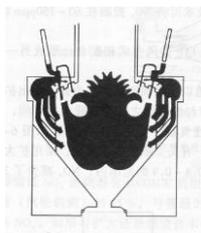


图 5-97 日本三菱公司的 MACT 低 NO_x 燃烧系统

总体上为燃料分级。一次燃料: 80~85%
二次燃料15~20%(烟气输送); 系统过于复杂

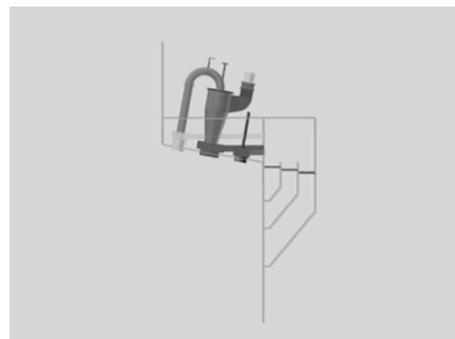
§ 6.7 W火焰燃烧技术

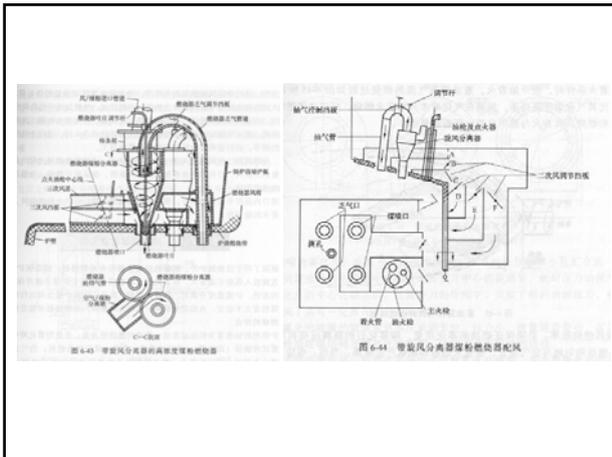
一、W型火焰锅炉的炉膛形状



- 敷设卫燃带+煤粉浓缩燃烧器+多级配风

二、W型火焰锅炉的燃烧器--带旋风分离器的高浓度煤粉燃烧器





结构：燃烧室+冷却室

- 浓淡分离
- 通风燃烧器(直流)
- 主燃烧器(旋流)
- 一次风率：5~15%
- 一次风速：10~13m/s

W形火焰燃烧方式的主要特点

- 着火区的高温烟气、燃烧带→着火
- 空气的分级送入(NO_x)→着火、燃烧
- 1. 着火，空气低速、少量送入，
- 2. 燃烧，与二、三次风强烈混合，猛烈燃烧
- 3. 辐射换热和燃尽
- 火焰行程长，煤粉有足够的停留时间→燃尽
- 火焰180度转弯处可分离飞灰
- 可采用多种燃烧器
- 良好的负荷调节性能，低负荷不投油助燃

§ 6.8 油燃烧器与点火器

一、油燃烧的特点

- 雾化
- 蒸发
- 燃烧

气体燃烧

①液滴均匀，②气化后均匀与空气混合，③低氧燃烧，减少 SO_3 ，减轻低温腐蚀

二、油喷嘴

油喷嘴：把燃油雾化为细小的油雾群，保持一定的雾化角与空气相交混合，油雾中心形成回流区，卷吸高温烟气，加热油雾

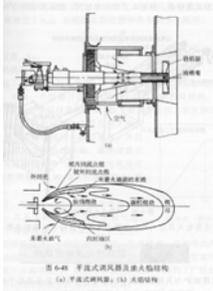
1, 压力雾化油喷嘴

压力油经分油嘴小孔汇合环形槽，均匀分配到旋流片的切向槽，进入旋流片的旋涡室，从雾化片中心孔喷出，撕碎成细小油滴

2, 蒸汽雾化油喷嘴

高速蒸汽气流的喷射使燃油雾化。油与蒸汽在混合孔内相互撞击，形成乳化状态汽液混合物，喷入炉内雾化成细小油滴

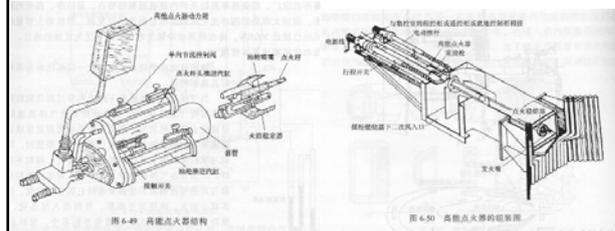
三、平流式调风器



调风器：组织油燃烧时的空气供给，并使空气与油雾充分混合，常用旋流叶片使一次风产生强烈的旋转，促进混合。

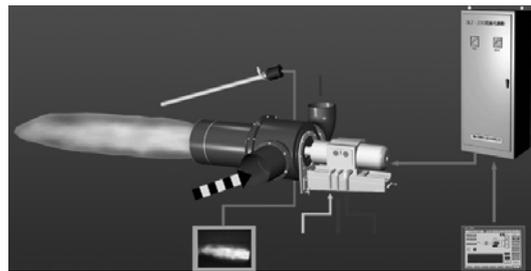
四、高能点火器

半导体火花塞置于能量峰值很高的脉冲电压下，电嘴表面产生电火花，点燃油火焰



附：等离子无油点火技术

等离子体：指物质被电离后生成的由原子、电子、离子和分子等粒子组成的正负电荷数相等、对内为良导体、对外为中性体的粒子集合体。利用空气等离子体内的高温，使通过空气等离子体的煤粉气流深度裂解，产生出比工业分析多20%~80%的挥发分，并使这些挥发分迅速点燃，进而点燃固态碳。这样，就达到了煤粉气流连续燃烧，形成稳定的煤粉火炬的目的。



该装置解决了阴极和阳极的寿命短、小功率电弧直接点燃煤粉、煤粉点火燃烧器结焦及烧损、等离子体电弧不稳、大功率特种电源长时间运行可靠性差等多项技术关键，于2000年2月在烟台电厂#1炉实现了完全用等离子点火装置启动、稳燃锅炉。

第九节 循环流化床燃煤锅炉

- 流化状态下的燃烧
- 煤种适应性广、燃烧效率高、炉内脱硫脱氮的特点
- 洁净、高效的新一代燃煤技术

一、流态化的描述及其性质

固态床→流态化

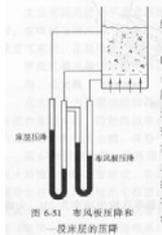


图 6-51 非风阻压降和一段床层的压降

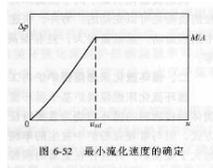


图 6-52 最小流化速度的确定

床层压降=单位截面上床层颗粒质量
最小流化速度，临界流化速度

鼓泡流化床（气泡扰动强烈，混合好）→湍流流化床（床顶携带颗粒量增加，无床层上表面）→快速流化床（全部颗粒被带走）→气力输送状态（两相滑移为零）

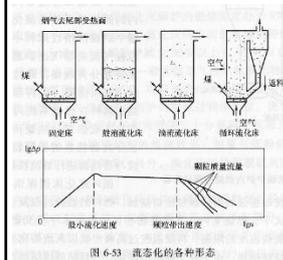


图 6-53 流态化的各种形态

流化→气力运输(气流速度增大10~90倍)

流化床燃烧方式和流化床锅炉

流化床燃烧方式的气体动力学基础是固体燃料的流态化。

流化床燃烧方式就是煤颗粒在大于临界风速的空气流速作用下,在流化床上呈流化状态的燃烧方式,采用流化床燃烧方式的锅炉称为流化床锅炉。

第一代：鼓泡床（沸腾锅炉）

优点：燃料适应性广； NO_x 、 SO_2 ；负荷调节性好、范围大；燃烧强度大减小炉膛体积；传热能力强，节省金属受热面

缺点：燃烧效率低；床内埋管易磨损，无法大型化；石灰石脱硫效率低

第二代：循环流化床

加大流化速度，输运床，分离器

1995年，世界第一台250MW循环流化床，法国普罗旺斯电站

2006年6月3日，我国第一台国产300MW循环流化床通过168，云南大唐国际红河发电有限责任公司

二者区别：流化速度不同

燃烧和脱硫时间不同

截面热负荷不同，大型化？

二、循环流化床锅炉炉内工作原理

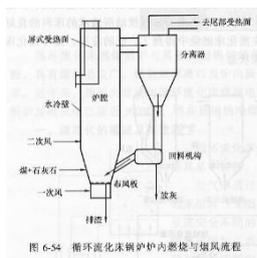


图 6-54 循环流化床锅炉炉内燃烧与烟风流程

重要特征：携带燃料的大量高温固体颗粒物料的循环

固体颗粒悬浮并强烈掺混
燃烧室密相区：850℃

不结渣；

最佳脱硫温度

三、循环流化床CFBB的主要特点

- 1, 煤种适应性好，有效利用劣质燃料；
- 2, 燃烧效率与煤粉炉相当（流态化优越的湍流气固混合）；
- 3, 传热强烈，磨损强，CFBB的高效传热没有体现（密相区不布置受热面，对流受热面烟速低）；
- 4, 低温燃烧、 NO_x 排放量低，床层内添加石灰石脱硫；
- 5, 锅炉占地面积小，不需要单独的脱硫脱氮装置、制粉系统；
- 6, 负荷调节性能良好（水循环、汽温、燃烧特性）；
 - (1) 炉膛温度均匀，水循环安全；
 - (2) 负荷变化时，具有良好的汽温特性；
 - (3) 可以实现低负荷稳燃（床温不变、改变煤量、送风量、飞灰循环量、床层厚度等）；
- 7, 灰渣可以综合利用；
- 8, 厂用电率高于煤粉炉(风机)；

第二节 过热器和再热器的结构型式

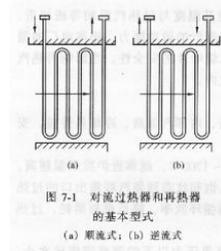
按传热方式:

- 1, 对流过热器和再热器
- 2, 辐射式与半辐射式过热器和再热器
- 3, 包覆过热器

按位置与结构:

- 1, 墙式过热器;
- 2, 分隔屏和后屏;
- 3, 对流烟道内的垂直式、水平式过热器;
- 4, 构成水平烟道和尾部烟道的包覆过热器。

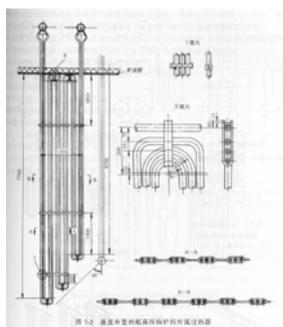
1, 对流过热器和再热器



逆流
顺流
混合流

图 7-1 对流过热器和再热器的基本型式

(a) 顺流式; (b) 逆流式



垂直式, 水平烟道
水平式, 尾部烟道

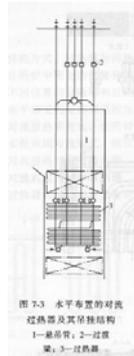


图 7-3 水平布置的对流过热器及其结构

1—最外层; 2—过热器; 3—过热器

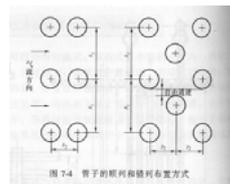


图 7-4 管子的顺列和错列布置方式

蛇形管排列
顺列
错列

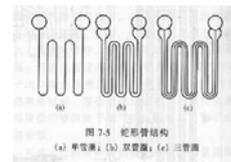


图 7-5 蛇形管结构

(a) 单管圈; (b) 双管圈; (c) 多管圈

蛇形管排列
单管圈
双管圈
多管圈

2, 辐射式与半辐射式过热器和再热器

炉膛壁面、炉膛上方

大容量锅炉, 蒸发吸热量比例减小, 布置足够的辐射式过、再热器降低炉膛出口烟温

防止辐射式过、再热器爆管事故的技术措施

- (1) 布置在负荷较低的炉膛上部;
- (2) 辐射式过、再热器作为低温受热面, 冷却好;
- (3) 采用较高的质量流速 $1000\sim 1500\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$

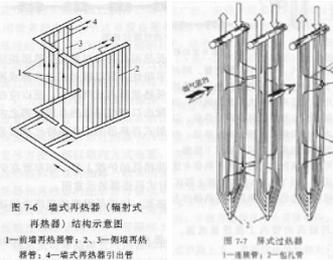


图 7-6 墙式再热器(辐射式再热器)结构示意图

1—前墙再热器管; 2、3—侧墙再热器管; 4—墙式再热器引出管

图 7-7 屏式过热器

1—直管管; 2—包孔管

图 7-8 屏式受热面的布置

墙式再热器

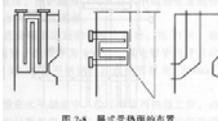


图 7-8 屏式受热面的布置

屏式过热器
U型管排列管
辐射、半辐射式
垂直式、水平式
外圈管子特点

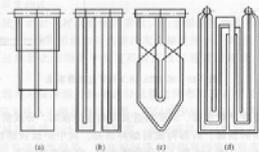


图 7-9 屏式过热器防止外圈管子超温的改进措施

(a) 外圈再热器管子短; (b) 外圈一圈管子死端; (c) 再热器管子交叉; (d) 外圈管子短, 内圈管子交叉

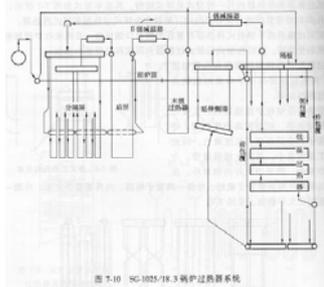
3, 包覆过热器

- (1) 布置在水平烟道、尾部竖井烟道内壁。
- (2) 密封性好、重量轻，结构简单、便于悬吊，蒸汽首先流过包覆过热器再流过低温过热器。
- (3) 烟气流速低、温度低，对流辐射换热量均较小

第三节 典型过热器和再热器系统及其材料选择

一、典型过热器系统

1, 300MW亚临界锅炉过热器系统组成与结构



- 顶棚
- 包覆过热器
- 低温过热器
- 分隔屏
- 后屏
- 末级高温过热器

图 7-10 SG-1025/18.3 锅炉过热器系统

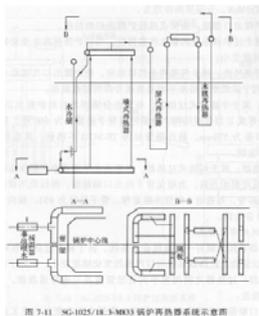
过热器系统及材料

- (1) 顶棚过热器; 15CrMo, 20G
- (2) 包覆过热器; 20G
- (3) 低温过热器; 20G, 12Cr1MoV, 15Cr1MoV
- (4) 分隔屏过热器; A213-TP91, 12Cr1MoV, 15CrMoV
降低炉膛出口烟温; 改善过热器系统汽温特性; 减少烟气残余旋转。
- (5) 后屏过热器; TP-347H, 12CrMoV, 12Cr2MoWVTiB
- (6) 末级高温过热器。 12Cr2MoWVTiB

2, 过热器系统的布置特点

- (1) 辐射-对流受热面的组合;
- (2) 各级过热器之间用大直径管道连接, 减少了热偏差;
- (3) 后屏与末过之间布置左右交叉管;
- (4) 两级喷水减温器调节汽温; 分隔屏前和末级过热器前。

二、典型再热器系统



1, 系统组成与结构

- (1) 墙式再热器;
15CrMo
- (2) 屏式再热器;
15CrMo, 12CrMoV, A213-T91
- (3) 末级高温再热器;
15CrMo, 12CrMoV, A213-T91

图 7-11 SG-1025/18.3-300MW 锅炉再热器系统示意图

2, 再热器系统的布置特点

- (1) 辐射-对流受热面组合系统;
- (2) 屏再、末再之间用中间联箱、三通、两根大口径管道连接, 左右交叉, 减少热偏差;
- (3) 墙再入口布置事故喷水, 燃烧器摆动调节汽温;
- (4) 三级再热器布置降低了每一级再热器的焓增, 热偏差小;

三、过热器和再热器材料的选择

钢种	用途	允许壁温 (°C)	钢种	用途	允许壁温 (°C)
20G	受热面管子	≤480	X20CrMnV121 (F12)	过热器	≤650
	联箱、导管	≤430		主蒸汽管	≤600
12CrMo 或 15CrMo	受热面管子	≤560	12CrMoWVTiB (钢 102)	过热器、导管	≤600 - 620
	联箱、导管	≤510			
15CrMo 或 12CrMoV	受热面管子	≤560	12CrMoVSTiB (II 11)	过热器、导管、联箱	≤600 - 620
	联箱、导管	≤550			
12Cr1MoV	过热器、再热器	≤580	14MoV93	过热器、导管	≤540
	联箱、导管	≤540			
12Cr1MoVSiB6 (无氧 8 号)	过热器、再热器	≤540	1Cr9W9	受热面管子	≤650
			1Cr9Ni1Nb	受热面管子	≤650
Mn17CrMoVNbD9	过热器、再热器、联箱、导管	≤620 - 680	G5Mo	吊挂、定距元件	≤650
10CrMo910	过热器、主蒸汽管	≤540	G18Mo15SiN	吊挂、定距元件	≤900
X20CrMo1 (H17)	受热面管子	≤560			
X20CrMoWV121 (F11)	过热器	≤650	1Cr20Ni14Si2, 2Cr20Ni69Ni2Si2N	吊挂、定距元件	≤1100

● 过热器、再热器高温承压部件

选材：蠕变强度、持久强度、持久断裂塑性、组织稳定性、抗氧化性、可焊性。

● 联箱、蒸汽连接导管长期高温

选材：组织稳定性

第四节 热偏差

一、热偏差的概念

过热器、再热器高温，蒸汽放热系数小，管壁温度高~许用温度，热偏差使管子超温甚至爆管。

过热器、再热器管组中因各根管子结构尺寸、内部阻力系数和热负荷可能不同而引起的每根管子中的蒸汽焓增不同的现象。

热偏差系数：

二、引起热偏差的原因



q-管外壁面热负荷；
F-受热面积；
G-工质流量

吸热不均匀系数
结构不均匀系数
流量不均匀系数

1, 吸热不均匀

影响因素：管外烟气与管内蒸汽的传热温差、管外烟气对流热阻、灰层热阻、管内蒸汽对流热阻
吸热不均的主要原因(温度、烟气速度、积灰结渣不均匀)

- (1) 炉膛内的温度场、速度场不均匀；
- (2) 四角燃烧在炉膛出口处造成残余扭转；
- (3) 火焰中心的偏移与水冷壁结渣；
- (4) 过热器、再热器的积灰与结渣；
- (5) 烟气走廊；

2, 流量不均匀

一根管子的压差

忽略重位压头



过、再热器常用连接方式

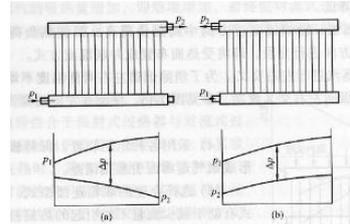


图 7-13 常见的连接方式
(a) Z型连接; (b) U型连接

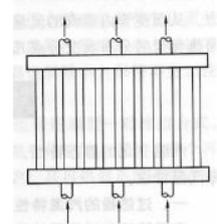


图 7-14 多管连接方式

反映结构不同(d 、 f 、 l 、 ξ 、 λ)对流量不均的影响

反映吸热不均对流量不均的影响(吸热不均, 蒸汽比体积不同)

反映过热器、再热器并列管圈连接方式(并列管圈进出口端静压差不同)对流量不均的影响

三、减小热偏差的措施

1, 运行措施

- (1) 调整四角燃烧, 煤粉量, 一、二次风量配平, 避免火焰中心倾斜;
- (2) 及时吹灰, 避免结渣积灰引起的受热不均

2, 结构措施

- (1) 受热面分级布置
- (2) 沿着炉膛宽度方向布置成并联混流方式;
- (3) 沿着炉膛宽度两侧的蒸汽进行左右交叉。
- (4) 用定距装置保持横向节距
- (5) 选择合理的联箱连接方式
- (6) 加装节流圈;
- (7) 受热较强的外圈管子, 可以采用较大的管径或较短的管圈长度。辐射受热面按照炉膛宽度热负荷分布规律分为几组。

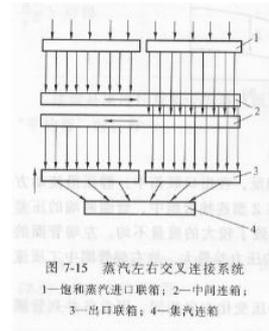


图 7-15 蒸汽左右交叉连接系统
1—饱和蒸汽进口联箱; 2—中间连箱;
3—出口联箱; 4—集汽连箱

第五节 汽温变化的静态特性

一、过热器的汽温特性

- 1, 辐射式过热器的汽温特性
- 2, 对流过热器的汽温特性
- 3, 半辐射式过热器的汽温特性
- 4, 过热器系统的汽温特性

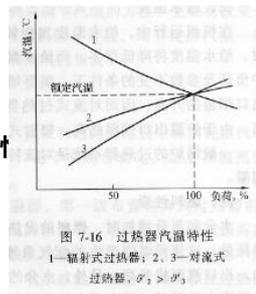


图 7-16 过热器汽温特性
1—辐射式过热器; 2、3—对流式
过热器, $\sigma_2 > \sigma_3$

二、再热器的汽温特性

- (1) 定压运行
锅炉负荷降低, 出口汽温下降较快;
- (2) 变压运行
锅炉负荷降低, 出口汽温基本不变;

第六节 影响汽温变化的因素

一、锅炉负荷

二、过量空气系数

炉膛空气量大，炉膛温度水平低，辐射传热减弱，辐射受热面出口汽温减小；燃烧生成烟气量多，流速大，对流传热增强，对流受热面出口汽温增大。

三、给水温度

给水温度小，锅炉受热面总吸热量增加，增加燃料量，烟气量和烟温增大，对流受热面出口汽温增大。

四、燃料特性

水分、灰分增大，燃料量增大，烟气量烟温增大，对流受热面出口汽温增大；水分、灰分吸热增大，炉膛温度水平低，辐射受热面出口汽温减小。

五、受热面污染情况

六、火焰中心的位置

改变播角，不同层燃烧器，煤粉细度变化，炉底漏风

第七节 过热汽温和再热汽温的调节

汽温调节基本要求：

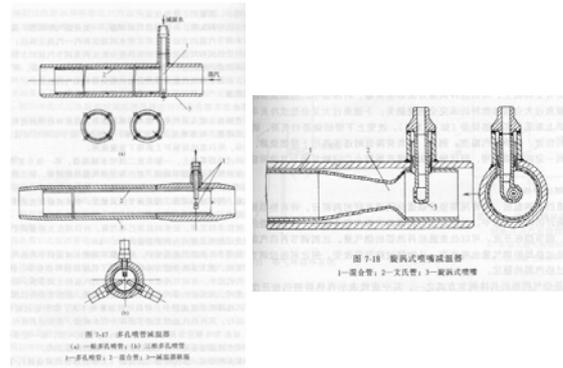
- (1) 在一定负荷范围内保持额定温度；
- (2) 调节后蒸汽温度稳定，波动小；
- (3) 蒸汽温度调节均匀，偏差小；
- (4) 电厂热效率影响小；
- (5) 设备结构简单、运行可靠；
- (6) 调节灵敏，过程连续，便于自动控制；
- (7) 体积小，质量轻，价格便宜。

一、蒸汽侧调节温度

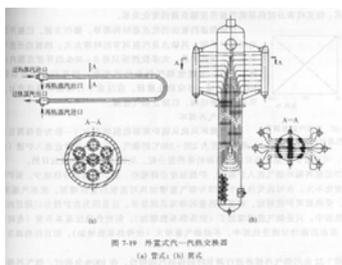
1, 喷水减温

直接将水喷入蒸汽中，喷入的水在加热、蒸发、过热过程中消耗蒸汽的部分热量，使汽温降低。

- (1) 多孔喷管式减温器
- (2) 旋涡式喷嘴减温器

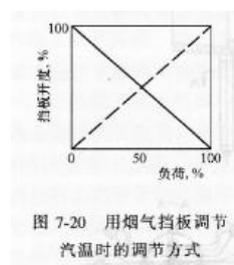


2, 汽-汽热交换器法



二、烟气侧调温

- 1, 改变火焰中心位置
 $\pm 20 \sim 30^\circ \rightarrow 40 \sim 60^\circ \text{C}$
- 2, 分隔烟道挡板



3. 烟气再循环

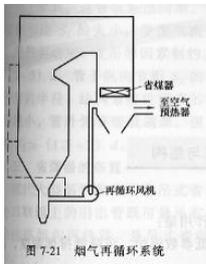


图 7-21 烟气再循环系统

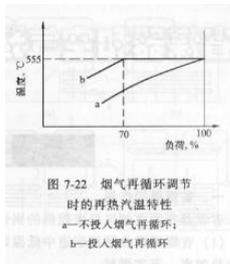


图 7-22 烟气再循环调节时的再热汽温特性
a—不投入烟气再循环；
b—投入烟气再循环

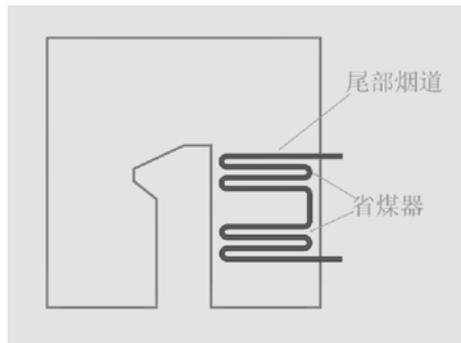
第七章 重点

- 1, 掌握辐射式受热面的汽温特性
- 2, 掌握对流式受热面的汽温特性
- 3, 掌握影响汽温特性的因素
- 4, 过热蒸汽与再热蒸汽温度调节方法的区别
- 5, 热偏差, 及其影响因素
- 6, 过热、再热器工作流程

第八章 省煤器和空气预热器

- 第一节 省煤器的作用与结构
- 第二节 省煤器的主要参数和启动保护
- 第三节 空气预热器的形式
- 第四节 回转式空气预热器的漏风和热变形
- 第五节 尾部受热面的磨损、积灰和腐蚀

第一节 省煤器的作用与结构



一、省煤器的作用

- (1) 吸收低温烟气热量, 降低排烟温度, 提高锅炉效率, 节省燃料;
- (2) 提高给水温度, 减少汽包与给水之间的温差, 降低热应力, 提高汽包寿命。

二、省煤器的结构

钢管式省煤器

外径28~51mm的无缝钢管, 20G, 水平放置, 水由下而上流动, 逆流式。

管组: 顺列、错列
悬吊式省煤器

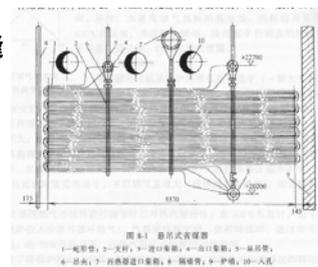


图 8-1 悬吊式省煤器

三、省煤器的布置

- (1) 便于悬吊
- (2) 烟道漏风量小
- (3) 磨损小
- (4) 换热效果好。

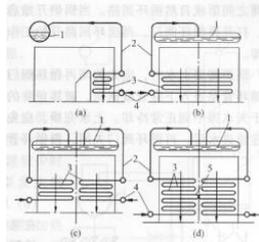


图 8-2 省煤器蛇形管布置
(a) 垂直前墙布置; (b) 平行前墙布置;
(c) 和 (d) 双面水平前墙布置;
1—锅炉; 2—水进水管; 3—省煤器蛇形管;
4—进口集箱; 5—交混进水管

第二节 省煤器的主要参数和启动保护

一、省煤器的水流速度

水流速 $>0.5\text{m/s}$, 避免金属腐蚀;
沸腾式省煤器汽水混合物的分界面交变热应力, 蒸汽空间冷却差, $\geq 1.0\text{ m/s}$

二、省煤器的启动保护

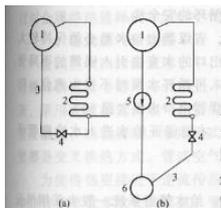


图 8-3 省煤器再循环系统
(a) 自然循环锅炉; (b) 控制循环锅炉;
1—锅炉; 2—省煤器; 3—再循环管;
4—再循环阀; 5—锅水循环泵; 6—水箱

1, 自然循环锅炉的省煤器再循环管

汽包→下降管→再循环管→省煤器→汽包

关闭进水管, 打开再循环管
关闭再循环阀, 再上水

2, 控制循环锅炉的省煤器再循环管

汽包→下降管→再循环泵→下水包→再循环管→省煤器→汽包

三、省煤器出口水温的选择

非沸腾式

1, 低于汽包饱和温度 60°C

控制循环锅炉要求较大的欠焓

2, 直流锅炉: 欠焓 380kJ/kg

四、锅炉给水系统

单元制给水系统;
汽动泵
电动泵
减负荷阀
高压加热器旁路
冷水供水管道

省煤器流程

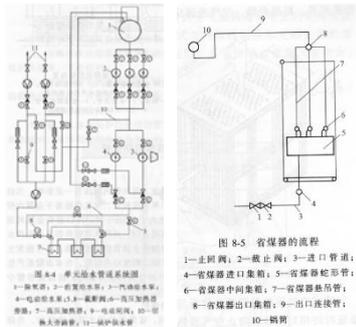


图 8-5 省煤器的流程
1—止回阀; 2—截止阀; 3—进口管道;
4—省煤器进口集箱; 5—省煤器蛇形管;
6—省煤器出口集箱; 7—省煤器热风管;
8—省煤器出口集箱; 9—出口连接管;
10—锅炉

第三节 空气预热器的型式

空气预热器: 利用烟气余热加热燃烧所需空气。

利用烟气余热, 降低排烟温度, 提高效率;
加热空气强化着火和燃烧。

分类: 传热式、蓄热式

一、管式空气预热器

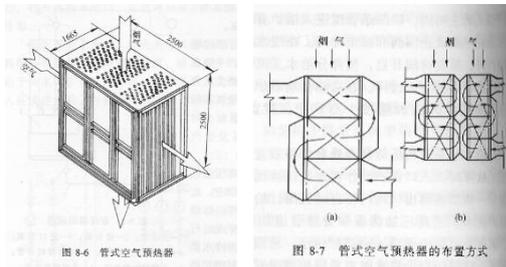


图 8-6 管式空气预热器

图 8-7 管式空气预热器的布置方式

立式布置：烟气管内纵向流动，空气横向流动
 卧式布置：空气管内纵向流动，烟气横向流动
 纵向流动烟气速度：10~14m/s
 横向冲刷管子空气流速<空气速度

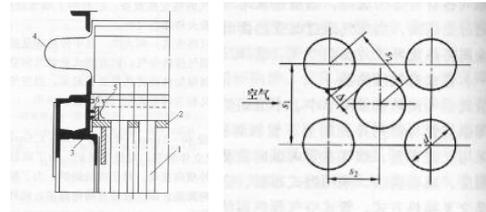


图 8-8 补偿器装置
 1—管子；2—上管板；3—外壳；4—侧架与外壳间的补偿器；5—上管板与外壳间的补偿器；6—右箱壁

图 8-9 空气预热器管子的节距

管板与锅炉钢架间用膨胀补偿器联结
 错列布置： $\Delta > 10\text{mm}$ ， Δ 过大，管箱体积大，过小，流动阻力大

二、回转式空气预热器

- 蓄热式
- 结构紧凑、节省钢材、耐腐蚀性好、受热面磨损腐蚀不增加漏风量
- 相同体积内，回转式空气预热器受热面面积是管式空气预热器的6~8倍
- 波形受热元件厚度大，壁温高，可采用耐腐蚀材料
- 漏风量大，密封要求高

回转式空气预热器结构
 受热面波形板，0.5~1.25mm厚
 圆形筒体分隔成扇形仓格
 风罩旋转、受热面旋转两种

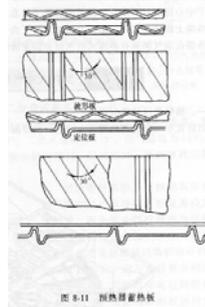


图 8-11 蓄热器蓄热板

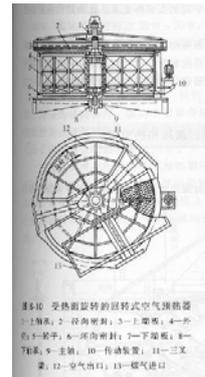
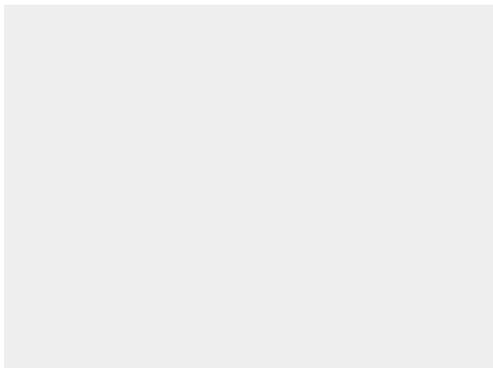
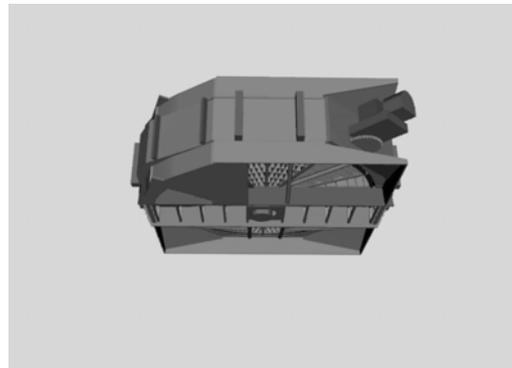


图 8-10 受热面旋转的回转式空气预热器
 1—箱盖；2—径向密封；3—上管架；4—外壳；5—管架；6—径向密封；7—下管架；8—7和壳；9—主轴；10—传动装置；11—三叉架；12—空气出口；13—烟气进口

风罩旋转回转式空气预热器



三分仓空气预热器



应用范围:

- 1, 管式空气预热器: 小型锅炉
- 2, 回转式空气预热器: 1000t/h以上锅炉

第四节 回转式空气预热器的漏风和热变形

一、携带漏风和密封漏风

携带漏风: 转动部件与静止部件间存在间隙, 转动过程不可避免将部分空气带入烟气。
($<1\%$)

密封漏风: 空气侧正压, 烟气侧负压, 压差作用下空气通过密封装置间隙漏入烟气中。
($8\sim 10\%$)

漏风: 排烟热损失增大, 通风电耗增大, 炉膛内助燃空气量不足, 送引风机出力不够。

二、空气预热器密封装置

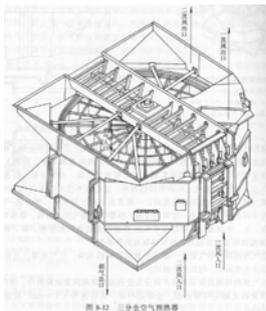


图 8-12 三分仓空气预热器

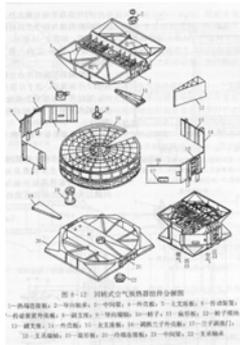


图 8-13 回转式空气预热器密封分解图

三分仓空气预热器

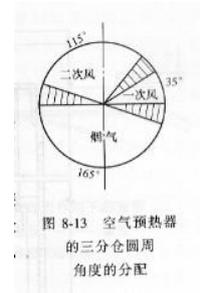


图 8-13 空气预热器
的三分仓圆周
角度的分配

径向密封-冷热端扇形板、径向密封片

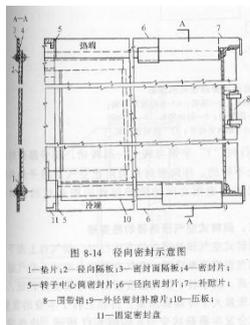


图 8-14 径向密封示意图
1—垫片; 2—径向隔板; 3—密封圆板; 4—密封片;
5—转子中心筒密封片; 6—径向密封片; 7—补胶片;
8—圆筒轴; 9—外经密封衬套; 10—压板;
11—固定密封盘

- 径向密封片: 螺栓固定在受热面径向隔板的冷热端部
- 调整径向密封片高度, 使之与扇形板保持合理间隙

轴向密封-轴向密封片、轴向密封板

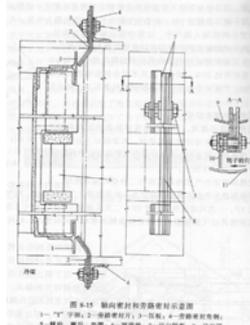


图 8-15 轴向密封和密封示意图

轴向密封: 防止空气从密封区转子外侧漏入烟气中

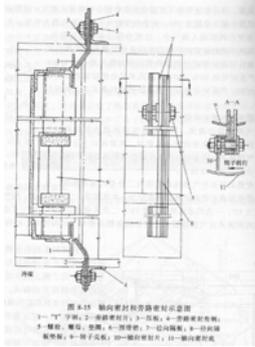
轴向密封片: 沿转子轴向高度布置, 由螺栓固定在扇形板格径向隔板和轴向外缘, 与转子一起转动

轴向密封板: 三块弧形板和调整装置组成



图 8-16 轴向密封
1—转子; 2—轴向密封片; 3—外
壳; 4—轴向弧形密封板

环向(旁路)密封-旁路密封片、T型钢



- 环向密封, 防止空气沿转子外表面和主壳体内部之间的动静部件间隙通过。
- 布置在转子冷热端面的整个外侧圆周上
- 旁路密封片: 螺栓固定在转子外围的静止部位
- T型钢: 连接在转子外围角钢上, 随转子转动

三、回转式空预器的热变形

蘑菇状变形

转子与扇形密封板间间隙增大, 漏风量增大
密封自动控制系统: 可弯曲扇形板、传感器机械传动、电器控制等

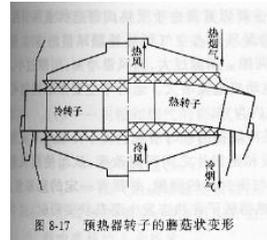


图 8-17 预热器转子的蘑菇状变形

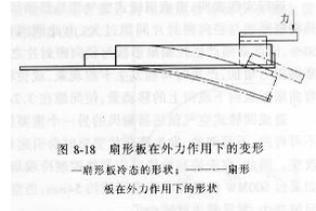


图 8-18 扇形板在外力作用下的变形
—扇形板冷态的形状; ———扇形板在外力作用下的形状

新型密封

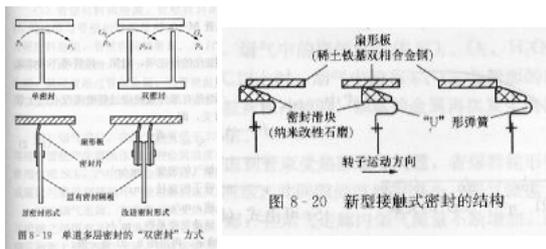


图 8-20 新型接触式密封的结构

单密封与双密封

第五节 尾部受热面的磨损、积灰和腐蚀

一、省煤器的磨损

1, 飞灰磨损机理

磨损: 固体粒子对受热面的每次撞击都会剥离开极微小的金属屑, 使受热面管壁变薄

撞击磨损: 垂直撞击使管壁表面产生微小的塑性变形或显微裂纹

摩擦磨损: 切向撞击引起颗粒对管壁表面产生微小的切削作用

冲击角 30-50°

磨损与煤灰磨损特性、管束结构, 烟速、飞灰浓度场不均性, 最窄截面平均烟气流速, 锅炉运行时间, 管材抗磨系数, 管束间距等有关

管壁最大磨损厚度

- 与煤灰磨损特性及管束结构有关的磨损系数
- 灰粒碰撞管壁的频率因子
- 管材的抗磨系数
- 管束计算断面处烟气的飞灰浓度
- 飞灰浓度不均匀系数
- 锅炉运行时间
- 烟气速度场不均匀系数
- 管束间最窄截面处烟气速度
- 锅炉额定负荷时烟速与平均运行负荷时烟速的比值
- 管束节距变化的修正项

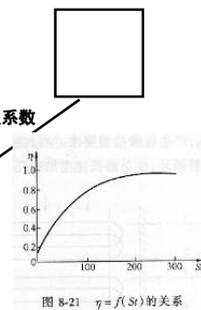


图 8-21 $\eta = f(Sv)$ 的关系

2, 影响磨损的主要因素

(1) 烟气流速;

- 磨损量与飞灰冲击速度成3次方的关系
- 飞灰冲击速度 \approx 烟气流动速度
- 综合考虑磨损、积灰和传热三方面因素

(2) 灰粒的特性和飞灰浓度;

- 飞灰粒径 $\downarrow \rightarrow$ 磨损 \downarrow , 飞灰粒径 $\uparrow \rightarrow$ 磨损 \uparrow (临界值后变化较小)
- 形状 \rightarrow 锐利棱角
- 飞灰浓度 $\uparrow \rightarrow$ 磨损 \uparrow

(3)、管子排列方式

错列管束第二排最大
顺列管束第一排最大

管壁周界最大磨损位置

- 错或顺列第一排 $45\sim 60^\circ$ ，错列第二排 $30\sim 45^\circ$

(4) 烟气流动方向

- 气流走向，重力的影响

(5) 管壁材料和壁温；

- 壁温 \uparrow →氧化膜硬度 \uparrow (过高时氧化膜与金属不同的膨胀系数，磨损增加)

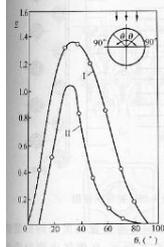


图 8-22 磨损量随圆心角 θ 的变化
I—计算结果；II—实验数据

(6) 烟气成分；

- 烟气成分→腐蚀与磨损交替作用

- 烟温 $<250^\circ\text{C}$ ，烟气中 SO_2 、 O_2 、 H_2O 、 H_2S 等对管壁腐蚀，
- 金属温度 $>300^\circ\text{C}$ ，烟气中 SO_2 、 O_2 与壁面氧化铁作用生成 SO_3 ，硫酸盐型腐蚀

(7) 烟气走廊

- 蛇形管弯头与炉墙间隙处阻力小，烟气流速远大于截面平均值

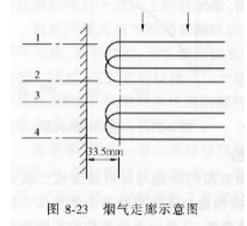


图 8-23 烟气走廊示意图

3, 减轻磨损的措施

- (1) 选择合理的烟气流速($<9\text{m/s}$)；

磨损、积灰、传热

- (2) 采用防腐装置；

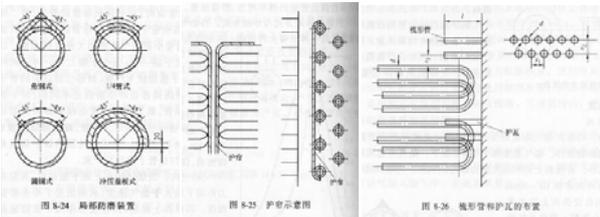
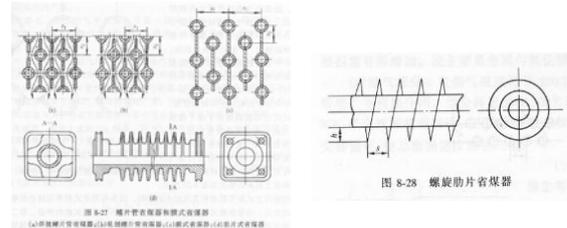


图 8-24 局部防腐装置

图 8-25 护罩示意图

图 8-26 蛇形管护罩的形状

- (3) 采用扩展受热面；



换热好，受热面积减小，烟气流速减小，易积灰

- (4) 其他措施：沉降灰斗除尘器；冲击式粉尘除尘器；百叶窗式除尘器

二、省煤器的积灰

1, 积灰的原因

烟气进入尾部烟道，温度 $<700^\circ\text{C}$ ，无熔化的灰粒，碱金属氧化物蒸汽已凝结完毕，疏松的积灰

2, 防止和减轻积灰的措施

- (1) 选择合理的烟气流速
- (2) 吹灰
- (3) 错列、减小纵向节距；膜式、鳍片式省煤器

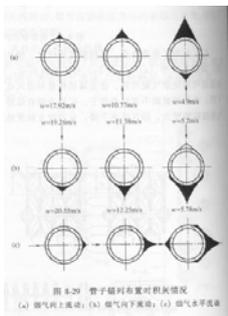


图 8-29 管子错列布置时积灰情况
(a) 烟气向上流动；(b) 烟气向下流动；(c) 烟气水平流动

三、空气预热器的低温腐蚀及对策

低温腐蚀：烟气中的水蒸汽与硫酸蒸汽进入低温受热面时，与温度较低的金属接触，并发生凝结而对金属壁面造成腐蚀

1, 影响低温腐蚀的主要因素

- (1) SO_3 的形成；
- (2) 烟气露点；
水蒸汽露点： $45\sim 54^\circ\text{C}$
酸露点(烟气露点)： $140\sim 160^\circ\text{C}$

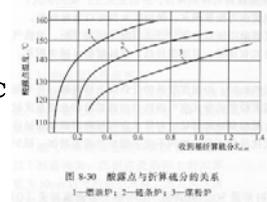
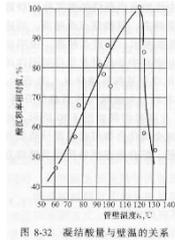
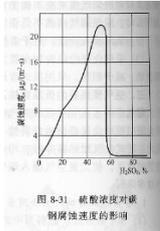


图 8-30 酸露点与折算硫分的关系
1—一回程炉；2—二回程炉；3—三回程炉

(3) 硫酸浓度和凝结酸量

开始凝结时，凝结液中酸浓度最大，一部分硫酸蒸汽凝结后，烟气中硫酸蒸汽浓度减小，烟气露点降低，凝结的硫酸浓度降低，至56%浓度腐蚀速度最高。

凝结酸量增大，腐蚀速度加快。金属温度影响凝结酸量，同时影响化学反应速度。



(4) 受热面金属温度的影响

硫酸蒸汽的凝结浓度、数量与金属壁温有关

A: 受热面金属壁温达烟气露点时，硫酸蒸汽开始凝结，酸量少且浓度高，虽然壁温高但腐蚀速度较轻；

B: 壁温降低，硫酸量增多浓度降低，腐蚀速度达最大的强烈腐蚀浓度区；

C: 凝结量少浓度低至弱腐蚀浓度区，腐蚀速度达最低

水露点时，水膜与烟气中SO₂生成H₂SO₃，烟气中HCl也溶于水，对金属造成腐蚀，速度加快。

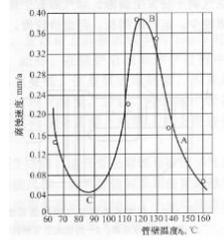


图 8-33 腐蚀速度与管壁温度的关系

2, 减轻和防止低温腐蚀的措施

(1) 提高空气预热器金属壁面温度

提高入口空气温度，三个方法

A: 空气预热器出口入口，使冷空气

B: 空气预热器与设

C: 热管式空气预热器前置式

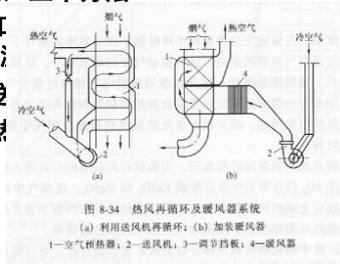


图 8-34 热风再循环及暖风器系统
(a) 利用送风机再循环；(b) 加装暖风器
1—空气预热器；2—送风机；3—调节阀；4—暖风器

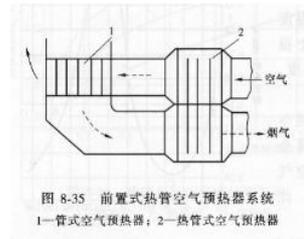


图 8-35 前置式热管空气预热器系统
1—管式空气预热器；2—热管式空气预热器

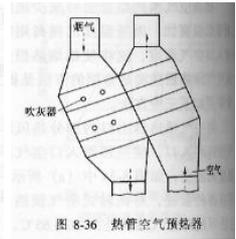


图 8-36 热管空气预热器

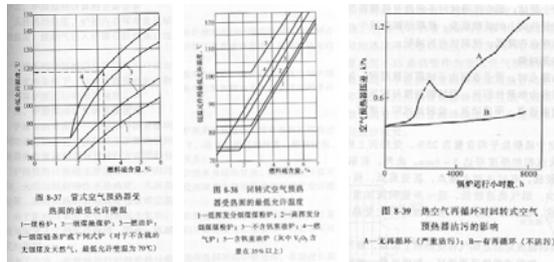
- (2) 采用耐腐蚀材料(低温段)
- (3) 采用低氧燃烧技术
- (4) 采用低露点或抑制腐蚀的添加剂
- (5) 燃料脱硫(黄铁矿)
- (6) 选用回转式空气预热器

四、空气预热器的堵灰及对策

- 1, 提高空气预热器壁面温度；
- 2, 适当提高烟气流速；
- 3, 10%热风再循环；
- 4, 加暖风器；
- 5, 燃料脱硫；
- 6, 前置式空气预热器。

第八章 重点

- 1, 省煤器的作用、出口水温的选择
- 2, 锅炉给水系统
- 3, 管道式空预器与回转式空预器的结构及应用范围
- 4, 磨损、积灰、低温腐蚀、烟气露点
- 5, 省煤器的结构和工作特点
- 6, 空气预热器的结构和工作特点
- 7, 低温腐蚀的原因和减轻低温腐蚀的技术措施
- 8, 空气预热器漏风



第九章 锅炉炉膛换热计算

- 第一节 锅炉炉膛内传热的特点
- 第二节 炉膛辐射换热的基本方程式和有效辐射热计算方法
- 第三节 炉内传热的相似理论计算方法
- 第四节 炉膛受热面的辐射特性
- 第五节 炉膛火焰黑度
- 第六节 火焰中心位置修正系数M
- 第七节 炉膛结构特征及其他参数
- 第八节 炉膛换热计算的修正方法
- 第九节 炉膛换热的其他计算方法

第一节 锅炉炉膛内传热的特点

- 一、炉膛换热的主要特点
辐射换热为主
- 二、炉膛换热计算的主要任务
炉膛内布置足够多的受热面，使炉膛出口高温烟气冷却到合适温度
- 1, 设计计算：已知 T''_1 ，计算受热面数量
- 2, 校核计算：已知受热面数量，计算 T''_1
- 三、炉膛换热计算的主要困难
燃烧过程与换热过程同时进行，复杂。

四、炉膛内工作过程的简化

- 1, 分别考虑燃烧与换热过程
- 2, 炉膛传热以辐射换热为主
- 3, 火焰平均温度
- 4, 炉膛受热面、火焰面按照灰体处理

受热面 — 具有固体的连续辐射光谱

火焰面 — 烟气中固体颗粒有连续辐射光谱；烟气中 N_2 、 O_2 辐射透明体；三原子气体 CO_2 、 SO_2 、 H_2O 对辐射有选择性，与波长有关（温度低于2000K，波长红外线范围内，吸收系数随波长变化较小）

五、炉膛换热的基本物理模型

双灰体模型：炉膛火焰与壁面换热简化为两个无限接近的灰体表面（温度、黑度不同）间的辐射换热

- 1, 火焰面：
火焰平均温度 T_{hy}
黑度 a_{hy} ；面积 F_{I_1}
- 2, 水冷壁投影面
 $T_b, a_b F_1$

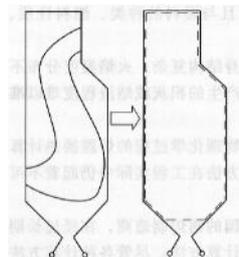


图 9-1 炉膛换热模型

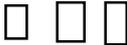
第二节 炉膛辐射换热基本方程和有效辐射热计算方法

1, 高温烟气与辐射受热面之间的换热方程

炉膛系统黑度

2, 高温烟气在炉内放热的热平衡方程

3, 炉膛换热基本方程



该方程已知受热面结构可计算炉膛出口烟温，或已知出口烟温计算所需炉膛受热面积

理论燃烧温度

- T_a : 燃料产物的绝热燃烧温度, K
- 在绝热条件下, 1kg燃料完全燃烧后燃烧产物能达到的温度

4, 水冷壁热有效系数

5, 有效辐射

火焰的有效辐射

水冷壁热有效系数: 水冷壁受热面的实际吸热量与火焰有效辐射热量的比值

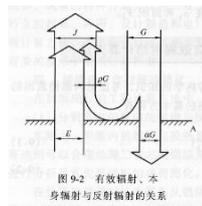
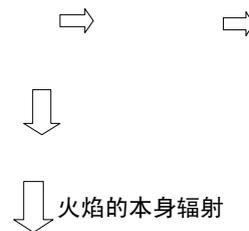


图 9-2 有效辐射、本身辐射与反射辐射的关系

火焰与水冷壁间的辐射换热量: 火焰与水冷壁的有效辐射差值



炉膛黑度: 相当于火焰的有效辐射在数值上等于某一表面的本身辐射, 该表面温度仍为火焰平均温度, 该表面的黑度为一假想黑度

炉膛的辐射换热量

炉膛换热基本方程变化为



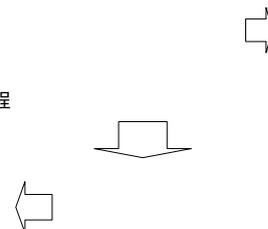
引入炉膛黑度, 直接避免了 T_b 与 a_b 的确定

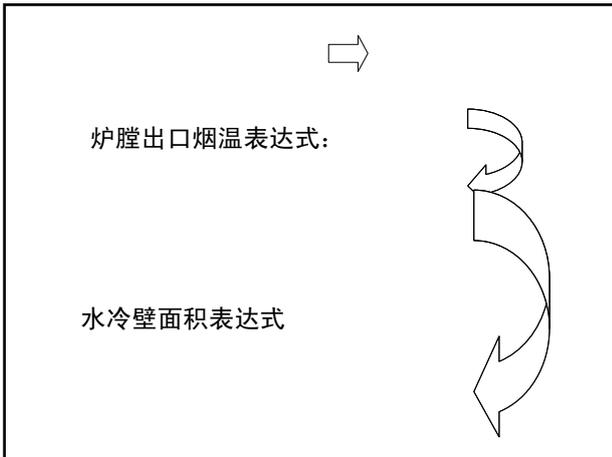
影响炉膛换热的主要因素: 炉膛黑度 a_1 , 辐射受热面平均吸热能力 ψ , 辐射受热面面积 F_1 , 火焰平均温度 T_{hy}

第三节 炉内传热的相似理论计算方法 (1973年原苏联“锅炉机组热力计算标准方法”) 修正的古乐维奇方法

无量纲温度

换热基本方程





第四节 炉膛受热面的辐射特性

炉膛壁面的有效辐射

假设 $a_b = \alpha$

受热面为洁净金属表面, T_b 不高, $a_b \approx 1$, $J_b \ll J_{by}$, 热有效系数 $\psi \approx 1$

沾污系数: 火焰辐射到水冷壁受热面上的热量中最终为水冷壁受热面所获得的份额, 表示水冷壁的污染程度

水冷壁形式	燃料种类	沾污系数
光管水冷壁或膜式水冷壁	气体燃料	0.55
	煤油	0.55
	无烟煤 (飞灰可燃物含量 $\geq 12\%$)	0.40
	烟煤 (飞灰可燃物含量 $\geq 8\%$)	
无烟煤 (飞灰可燃物含量 $< 12\%$)	0.35	
烟煤 (飞灰可燃物含量 $< 8\%$)		
固态排渣炉膛水冷壁	所有燃料	0.20
液态排渣炉膛水冷壁	所有燃料	0.30

注: 如水冷壁有积灰时, 基本不相适用, ζ 值可提高 0.03 ~ 0.05。

水冷壁角系数: 火焰辐射到炉膛的热量中投射到水冷壁管上的份额

与几何形状、相对位置有关, 可用几何方法求得。

炉膛有效辐射中有多少辐射到水冷壁受热面上, 水冷壁受热面上的热量有多少被水冷壁吸收 ζ

第五节 炉膛火焰黑度

一、火焰黑度——贝尔定律

□

二、气体与液体燃料火焰黑度的计算

m: 发光火焰充满炉膛的份额

发光火焰黑度

其中碳粒辐射减弱系数

三原子气体辐射减弱系数

不发光火焰 (三原子气体) 黑度

三、煤粉火焰黑度的计算

煤粉火焰的总辐射减弱系数

- 1, 三原子气体及水蒸汽的辐射减弱系数 k_g
- 2, 灰粒的减弱系数 k_h
- 3, 焦炭颗粒的减弱系数 k_c

$K_p=10.0$;

$x_1=1.0$ 无烟煤、贫煤; 0.5 烟煤、褐煤

$x_2=0.1$ 煤粉炉; 0.03 层燃炉

四、炉膛火焰辐射层厚度

V_f : 炉膛容积

F_f : 炉膛包覆面积

第六节 火焰中心修正系数

M : 炉内传热的相似理论计算式中的经验系数, 反映沿炉膛高度方向温度最高处的相对位置对炉内换热的影响。

燃烧器相对高度

燃烧器布置高度

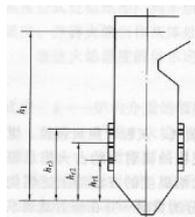


图 9-3 燃烧器标高计算说明

表 9-2 M 计算关联式中的 A 、 B 值

燃料	开式炉膛		半开式炉膛	
	A	B	A	B
气体、重油	0.54	0.2	0.48	0
高反应性能固体燃料	0.59	0.5	0.48	0
无烟煤、贫煤和多灰燃料	0.56	0.5	0.46	0

表 9-3 M 计算关联式中的 Δx 值

燃烧器型式	Δx 值
水平、四角切向布置燃烧器	0
前墙对冲布置煤粉燃烧器	
$D > 420/h$	0.05
$D \leq 420/h$	0.1
摆动式燃烧器向上下摆动 $\pm 20^\circ$	± 0.1

第七节 炉膛结构特征及其它参数

一、炉膛容积

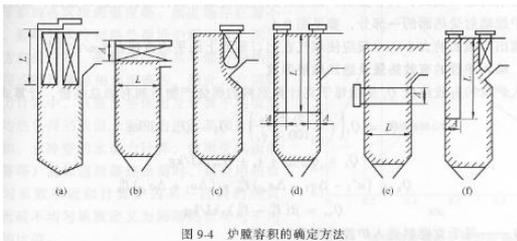


图 9-4 炉膛容积的确定方法

二、炉壁面积: 包覆炉膛容积的表面积 F

三、炉壁的有效辐射面积

炉膛总的有效辐射面积

整个炉壁的平均角系数 (>0.95)

四、炉膛的出口截面 (烟气流速 $\approx 6\text{m/s}$)

五、输入炉膛的有效热量及绝热燃烧温度

每千克燃料送入炉膛的可利用热量

每千克燃料所需空气带入炉膛的热量

锅炉烟气热源以外的加热空气的热量

六、燃烧产物的平均比热容

烟气在绝热燃烧温度和炉膛出口温度间烟气比热容的平均值

七、炉膛受热面的平均热负荷及热负荷不均匀系数

炉膛受热面的辐射吸热量

炉膛高度某一个区段受热面的热负荷

炉膛高度某一个区段受热面的吸热量

热负荷不均匀系数 η_1 : 局部热负荷/平均热负荷

前、后、左、右侧炉壁的平均热负荷

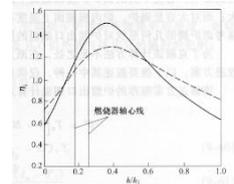


图 9-5 固态排渣煤粉炉炉膛高度热负荷分布不均匀系数

实线—无烟煤、贫煤和烟煤；虚线—褐煤

第八节 炉膛换热计算的修正方法

计算炉膛出口烟气温度比实测值小100~130℃

原因：①双灰体模型，尤其是火焰作为灰体带来的误差；②炉内温度不均匀性只考虑了沿炉膛高度的，而没有计及炉膛横截面上的温度不均匀性；③没有考虑炉膛几何形状对炉膛出口烟温的影响。

炉膛出口烟气温度计算公式（修正）：

第九节 炉膛换热的其它计算方法

一、美国CE公司的炉膛换热计算方法

二、瑞士Sulzer公司的炉膛换热计算方法

第九章 重点

- 1, 火焰黑度
- 2, 火焰有效辐射、炉膛有效辐射
- 3, 保热系数
- 4, 理论燃烧温度
- 5, 热有效系数、角系数、污染系数及其关系

第十章 对流受热面的换热计算

第一节 概述

第二节 对流受热面换热计算的基本方程

第三节 受热面传热系数的计算方法

第四节 对流受热面的污染对换热的影响

第五节 传热温压的计算

第六节 对流受热面积和流速的计算

第七节 主要对流受热面的计算特点

第八节 锅炉热力计算程序和方法

第一节 概述

- 1, 计算对象: 对流过热器、再热器、空预器、直流锅炉的过渡区。
- 2, 对于半辐射式受热面, 要将辐射换热折算成对流换热。
- 3, 计算方法:
 - (1) 设计计算
 - (2) 校核计算

第二节 对流受热面换热计算的基本方程

1, 对流传热方程

以对流方式由烟气传递给受热面内工质的热量

传热系数; 传热温压; 对流换热面积; 锅炉计算燃料量

2, 烟气侧热平衡方程

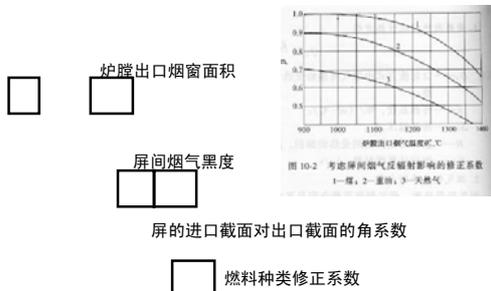
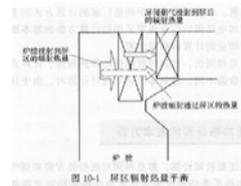
3, 工质侧热平衡方程

不同位置、不同受热面, 热平衡方程不同

(1) 炉膛出口处屏式或对流过热器

- 两部分吸热, 工质对流换热量为

- 来自炉膛烟气的辐射热量 Q_r 中, Q_{r1} 部分被屏吸收, Q_{r2} 部分透射到屏后受热面, Q_{r3} 部分为屏间烟气辐射热量投射到屏后受热面上



(2) 水平烟道、尾部烟道中的受热面

(3) 空气预热器中空气吸收的热量

第三节 受热面传热系数K的计算方法

一、传热系数的一般表达式



烟气对灰污层，灰污层、金属、内壁水垢，工质对管内壁

(1) 灰污系数 考虑烟气中含灰及管壁灰污层引起的热阻
对不含灰气流冲刷干净管壁的烟气侧放热系数 α_1 进行修正



(2) 热有效系数
被污染受热面管传热系数K与清洁管的传热系数 K_0 之比



(3) 利用系数 ζ 考虑烟气对受热面冲刷不均匀程度
折算辐射放热系数



二、不同受热面的传热系数实用表达式

1, 对流过热器和再热器

燃用固体燃料，错列，
灰污系数

燃用固体燃料，顺列；或者燃用气体、液体燃料
热有效系数

2, 省煤器、直流锅炉过渡区、蒸发受热面以及超临界锅炉受热面

管内工质对内壁表面放热系数 α_2 大

固体燃料，错列

固体燃料，顺列

3, 屏式过热器（半辐射式屏式过热器）

吸热量=炉膛辐射热量 Q_f + 屏间烟气的对流和辐射热量 Q_d
计算对流传热量的传热系数K，考虑屏过吸收炉膛辐射

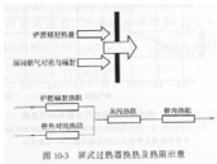


图 10-3 屏式过热器换热及热阻示意

按屏的平壁面积计算的换热量



按屏过全部管子外表面积计算换热量



对流传热系数

对流传热系数之间的关系

屏过烟气侧对流传热系数

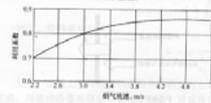
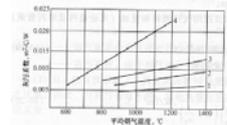


图 10-4 屏式过热器的热有效系数和利用系数
1—不结渣煤；2—带收尘灰的中等结渣煤；3—无收尘灰的中等结渣煤及带收尘灰的低结渣煤；4—无烟煤

ζ : 利用系数

4, 管式空气预热器

利用系数修正受热面灰污及不完全冲刷的影响

5, 回转式空气预热器

传热系数是以蓄热板两侧的传热面积之和为基准的

表 10-1 回转空气预热器修正系数 C

转数 n (r/min)	0.5	1.0	> 1.5
系数 C	0.85	0.97	1.0

x: 烟气、空气冲刷转子的份额

三、对流热量系数

稳态强制对流换热准则方程

1, 气流横向冲刷顺列光滑管束

2, 气流横向冲刷错列光滑管束

3, 流体管内纵向冲刷光滑管束(无相变)

4, 回转式空预器烟气与空气的对流换热系数

四、燃烧产物的辐射换热系数

燃烧产物的辐射换热系数计算式

含灰气流(灰粒辐射)

不含灰气流

a_n, a_q 的计算公式

有效辐射层厚度

屏过所在烟气空间的有效辐射层厚度

光管管束

鳍片管束, 有效辐射层厚度*0.4; 肋片管束, 有效辐射层厚度很小, 可忽略燃烧产物辐射传热

●气室

受热面内有烟气的空间或受热面前有烟气的空间时，可对有效辐射层厚度进行修正

修正系数

气室对过热器的辐射， $A=0.5$ ；
气室对下游受热面的辐射， $A=0.2$

修正管束的辐射放热系数考虑管束间的气室辐射

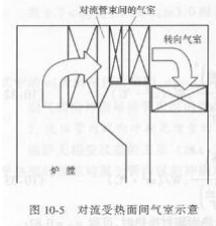


图 10-5 对流受热面间气室示意

烟煤和无烟煤， $A=0.4$ ；
褐煤， $A=0.5$

第四节 对流受热面的污染对换热的影响

一、灰污系数 考虑燃用固体燃料横向冲刷错列布置光管管束时灰垢对传热系数的影响

管子直径修正系数；灰分颗粒组成的修正系数；灰污系数基本值，取决于烟气速度与管子布置；灰污系数附加值

顺列和错列混合布置加权平均

屏过—灰污系数

二、受热面的热有效系数

顺列对流过热器、凝渣管、再热器、过渡区

贫煤、无烟煤、油页岩 $\psi=0.6$

烟煤、褐煤、洗中煤， $\psi=0.65$

三、受热面的利用系数

回转式空气预热器

漏风系数 $\Delta \alpha=0.2-0.25$ 时， $\zeta=0.8$

$\Delta \alpha=0.15$ 时， $\zeta=0.9$

燃料	管式空气预热器	板式空气预热器	回转式管式空气预热器
基于烟煤和油页岩	0.75	0.85	0.80
无烟煤	0.65	0.75	0.70
天然气、木材	0.70	0.80	0.70

屏过计算烟气侧放热系数时，采用利用系数考虑烟气对屏冲刷不均匀对传热的影响

四、受热面表面灰污层温度

受热面管外壁温度=沉积在管子外部灰渣层温度

α_2 ：仅在计算过热器时使用

进口烟温低于400℃的省煤器

进口烟温高于400℃的省煤器，直流锅炉过渡区，燃用固体、液体燃料

第五节 传热温压的计算

一、顺流和逆流时传热温压的计算

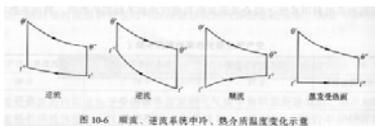


图 10-6 顺流、逆流系统中，热介质温度变化示意图

一、顺流和逆流时传热温压的计算

当 $\Delta t_{sl} / \Delta t_{nl} \geq 0.92$ 时

二、混合流系统传热温压的计算

1, 串联混合流系统

2, 并联混合流系统

3, 交叉流系统

温压转换系数

第六节 对流换热面积和流速的计算

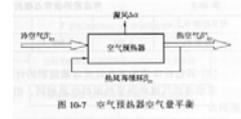
一、对流换热面积

- 1, 过热器、再热器、省煤器、凝渣管按照烟气侧表面积计算; (放热系数小的一侧)
- 2, 管式空气预热器: 按照管子内外表面积的平均值计算; (放热系数接近)
- 3, 回转式空气预热器为蓄热板两侧面积之和;
- 4, 屏式过热器: 半辐射式受热面, 按平壁表面积计算。

二、对流受热面流体速度

1, 流体的平均体积流量

烟气:



空气:

再循环份额

水和水蒸汽:

2, 流体的平均通流截面积

- (1) 计算原则: 最小截面积
- (2) 横向冲刷光管
- (3) 纵向冲刷光管

流体管内流动:

流体管外流动:

- (4) 冲刷带有环肋管束

(5) 回转式空气预热器

烟气流通截面积

空气流通截面积

表 10-3 考虑蓄热板所占面积的修正系数 K_A

转子内径 D_r , m	4	5	6	7	8	10
系数 K_A	0.865	0.886	0.903	0.915	0.922	0.932

(6) 其它情况有效流通截面积

烟道面积变化时:

管束进口、出口截面渐变时:

管束中有烟气走廊或者并联烟道时:

3, 流体速度

流体流速: 定性温度下所规定的流通截面上的平均流速

定性温度: 流体进出口截面上的温度的算术平均值

第七节 主要对流受热面的计算特点

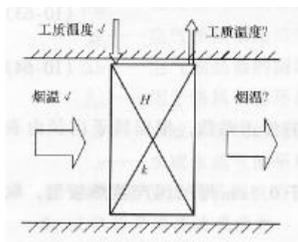


图 10-8 对流受热面计算示意图

烟气侧、工质侧热平衡方程

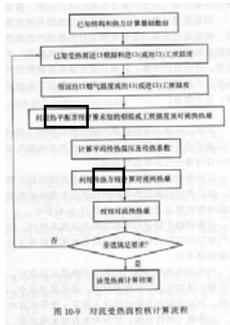


图 10-9 对流受热面积计算流程图

一、屏式过热器计算

(一) 大屏过热器

作为炉膛辐射受热面的一部分进行辐射换热计算，出口烟温和烟气焓即炉膛出口烟温和烟气焓

(二) 半大屏过热器

布置在炉膛出口截面、具有较大的横向节距，呈独立片状的半辐射过热器
屏高 < 炉膛出口窗高度，传热系数按横向冲刷顺列管束计算；
屏高 > 炉膛出口窗高度，传热系数按纵向混合冲刷计算。
屏过入口烟温度已知，屏过工质入口、出口温度均未知，需假设，至烟气流经低温过热器后对假设屏入口温度进行校核

二、对流过热器和再热器计算

烟气横向冲刷（顺、错列），按平均烟气温度（进、出口截面算术平均值）计算平均烟气流速，计算烟气量时的过量空气系数取进、出口截面平均值

喷水减温器：

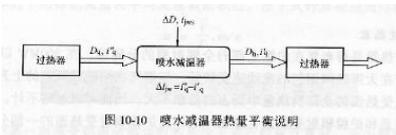


图 10-10 喷水减温器热量平衡说明

三、蒸发管束及附加受热面的计算

- (一) 凝渣管束（管内汽水混合物，错列）
- (二) 直流锅炉过渡区
- (三) 转向气室（辐射换热）

灰污系数近似取法：固体燃料：0.0086m²·°C/W；液体燃料：0.007m²·°C/W；气体燃料：0.0055m²·°C/W

(四) 过热器、再热器的附加受热面及悬吊管

主受热面区段内布置有另一种介质状态的附加受热面，或虽属同一介质状态，但属于单独计算的受热面，其吸热量包括在主受热面烟气放热中。

顶棚管、包覆管、悬吊管、引出管等

悬吊管面积修正系数：0.5

主受热面传热系数



四、省煤器的计算

省煤器计算吸热量（汽水吸热平衡方程）

五、空气预热器的计算——管式

第二级

第一级

烟气再循环

第八节 锅炉热力计算程序和方法

- 1, 设计计算与校核计算
- 2, 假设与迭代
- 3, 辐射换热与对流换热
- 4, 燃料与工质
- 5, 图表查询
- 6, 流程

空气预热器、省煤器双级布置、再热系统

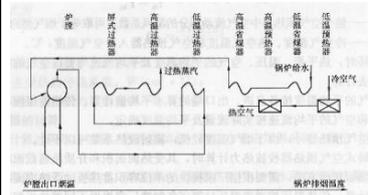


图 10-11 某高压锅炉沿烟气流向的受热面布置流程

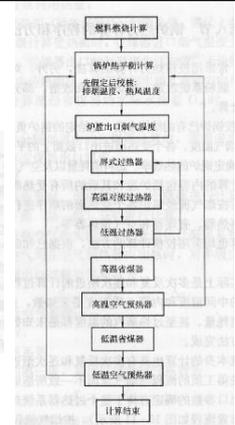


图 10-12 某高压锅炉热力计算流程示意

第十章 重点

- 1, 传热系数计算
- 2, 灰污系数
- 3, 热有效系数
- 4, 利用系数
- 5, 有效辐射层厚度
- 6, 温差计算

第十一章 电站锅炉的受热面布置和优化设计

- 第一节 影响锅炉炉型结构和受热面布置的因素
- 第二节 锅炉主要参数的优化设计

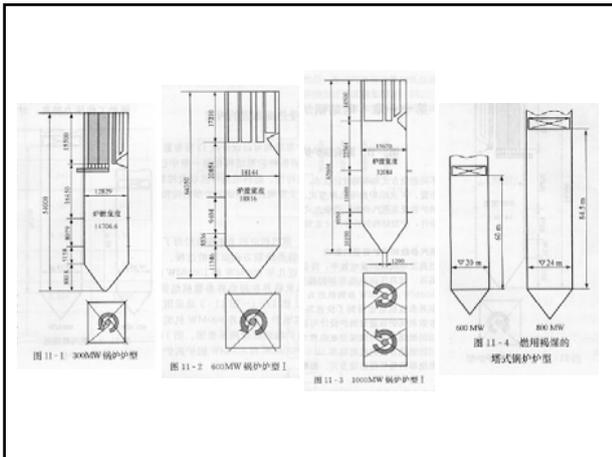
第一节 影响锅炉炉型结构和受热面布置的因素

- 一、蒸汽参数和锅炉容量的影响
- 二、燃料特性的影响
- 三、受热面传热方式的影响
- 四、燃烧方式的影响
- 五、汽温调节方式的影响

一、蒸汽参数和锅炉容量的影响

提高水蒸汽动力循环效率要求:

- 1, 提高蒸汽压力;
- 2, 提高蒸汽温度;
- 3, 一部分省煤器受热面移动到水冷壁
- 4, 一部分过热器、再热器向炉膛方向移动
- 5, 自然循环向控制循环、直流锅炉方向变化



二、燃料特性的影响

挥发分、发热量越高的煤，炉膛高度越低、炉膛截面积越大

600MW，褐煤， $q_v=66.1\text{kW/m}^2$

600MW，烟煤， $q_v=96.1\text{kW/m}^2$

图 11-4 燃用褐煤的塔式锅炉炉型

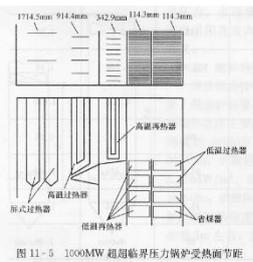
表 11-1 国内部分大容量锅炉的炉膛容积热强度与炉膛断面热强度

机组功率 MW	燃烧器形式与布置方式	循环方式	煤种	炉膛容积热强度 kW/m^3	炉膛断面热强度 MW/m^2	燃烧器区壁面热强度 MW/m^2
200	直流式燃烧器 四角布置	亚临界压力 自然循环	无烟煤	120.35	4.12	4.95
300	直流式燃烧器 四角布置	亚临界压力 控制循环	烟煤	115.56	4.65	2.52
350	直流式燃烧器 四角布置	亚临界压力 自然循环	烟煤	103.49	4.395	1.86
360	直流式燃烧器 对冲布置	亚临界压力 自然循环	烟煤	122.278	5.162	
390	直流式燃烧器 四角布置	亚临界压力 自然循环	褐煤、洗中煤	158.654	4.758	
500	直流式燃烧器 四角布置	亚临界压力 控制循环	烟煤	101.0	5.19	2.109
500	直流式燃烧器 四角布置	亚临界压力 控制循环	烟煤	116	5.15	1.49
600	直流式燃烧器 四角布置	亚临界压力 控制循环	烟煤	112	5.4	1.25
600	直流式燃烧器 四角布置	超临界压力 直流锅炉	烟煤	103.000	5.340	1.48
600	直流式燃烧器 四角布置	超临界压力 直流锅炉	褐煤	87.7	4.325	1.420
600	直流式燃烧器 对冲布置	超临界压力 直流锅炉	烟煤	90	4.35	0.93
600	直流式燃烧器 对冲布置	超临界压力 直流锅炉	烟煤	86.8	4.479	1.400
600	直流式燃烧器 对冲布置	超临界压力 直流锅炉	烟煤	85.0	4.474	1.600
600	直流式燃烧器 对冲布置	超临界压力 直流锅炉	烟煤	89	5.0	1.08

续表11-1

机组功率 MW	燃烧器形式与布置方式	循环方式	燃用煤种	炉膛容积热强度 kW/m^3	炉膛断面热强度 MW/m^2	燃烧器区壁面热强度 MW/m^2
600	旋流式燃烧器 对冲布置	超临界压力 直流锅炉	贫煤	81.5	4.2	1.60
600	旋流式燃烧器 对冲布置	超临界压力 直流锅炉	烟煤	86.8	4.476	1.459
800	旋流式燃烧器 对冲布置	超临界压力 直流锅炉	烟煤	84.900	4.187	0.9
1000	直流式燃烧器 双切圆布置	超临界压力 直流锅炉	烟煤	83	4.6	1.67
1000	旋流式燃烧器 对冲布置	超临界压力 直流锅炉	烟煤	79	4.5	1.6

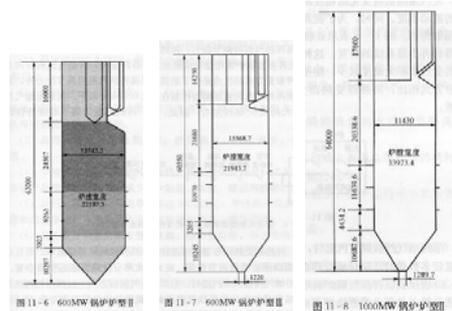
三、受热面传热方式的影响



辐射受热面：采用大节距，减少管屏间热辐射的遮盖度，提高受热面利用率，防止屏间搭渣桥

对流受热面：采用小节距，提高受热面对流传热效果

四、燃烧方式的影响



1, 四角切圆

为减小残余旋转, 采用接近正方形的炉膛结构, 适当增大炉膛高度, 同时减小炉膛出口烟温偏差和速度偏差

2, 对冲燃烧

适当降低炉膛高度, 采用扁矩形炉膛结构, 增大旋流燃烧器中心线之间的距离, 配合降低单只燃烧器功率, 降低燃烧器区域的壁面热负荷, 以此减轻结渣、降低NO生成量, 减小热偏差, 避免水冷壁高温腐蚀

3, 低NO_x燃烧技术使炉膛高度进一步提高

4, 炉膛高度提高, 有利于燃料燃尽, 提高燃烧效率; 有利于控制炉膛出口温度, 防止过热器超温; 有利于控制烟气温度水平, 降低水冷壁负荷, 避免结渣

五、汽温调节方式的影响

1, 摆动燃烧器调节再热汽温

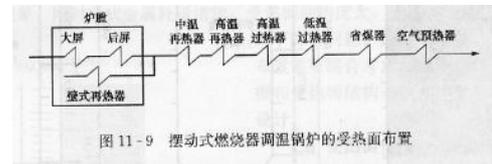


图 11-9 摆动式燃烧器调温锅炉的受热面布置

过热器向炉内高温区和尾部对流烟道扩展, 对流+辐射过热器系统, 有利于获得平缓的汽温变化特性

再热器向炉膛内靠管, 增强辐射传热, 提高再热汽温调节能力, 再热器面积大幅减少, 再热器调节灵敏

2, 烟气挡板调节再热汽温

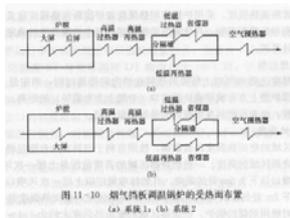


图 11-10 烟气挡板调温锅炉的受热面布置

过热器受热面大部分靠近炉膛布置, 面积减少 25%(与摆动燃烧器调温方式相比)

再热器受热面数量多且处于低温烟道中, 再热汽温调节灵敏性差

3, 超临界锅炉: 煤水比调节过热汽温 减温器喷水作为辅助调节手段。

第二节 锅炉主要参数的优化设计

目标:

- 1, 保证锅炉安全运行;
- 2, 运行经济性;
- 3, 调节性能良好;
- 4, 节省投资;
- 5, 可靠性高;
- 6, 良好的负荷跟踪性;
- 7, 受热面磨损轻微、积灰少、防腐蚀、污染物排放量达到环保标准。

主要参数:

- 一、炉膛尺寸的确定
- 二、炉膛出口烟气温度
- 三、排烟温度的优化设计
- 四、给水温度的优化设计
- 五、热风温度的优化设计
- 六、烟气流速和工质质量流速的优化设计

一、炉膛尺寸的确定:

- 1, 炉膛容积和高度;
 - 2, 火焰的最短行程;
 - 3, 燃烧器区域高度;
 - 1) 上一次风喷口1.5m至下依次风喷口1.5m
 - 2) 燃烧器区域的壁面热负荷: 1.4~1.7MW/m²
 - 4, 冷灰斗部位至燃烧器区域高度;
- 300~1000MW锅炉机组:
- 四角切圆: 5~7m
 - 前后墙对冲: 3.2m



5, 折焰角、冷灰斗、排渣口的形状和尺寸

折焰角上下不挂灰，避免烟气短路进入水平烟道，保证良好的火焰充满度

- 1) 折焰角倾斜角：上30~50°，下30°
- 2) 冷灰斗倾角 50~55°
- 3) 排渣口宽度：0.6~1.4m

图 11-11 炉膛的几何尺寸

二、炉膛出口烟气温度

1, 水冷壁和炉膛出口不结渣

分隔屏：

前屏：弱结渣煤

一般结渣煤

强结渣煤

2, 炉膛出口受热面不超温(烟温偏差)

3, 着火、燃烧稳定

4, 辐射和对流受热面比例恰当

三、排烟温度的优化设计

- 1, 降低排烟热损失
- 2, 降低低温受热面的金属消耗量
- 3, 避免受热面的低温腐蚀和严重积灰

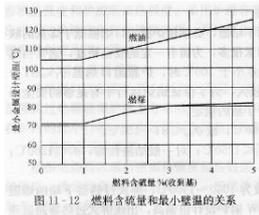


图 11-12 燃料含碳量和最小壁温的关系

四、给水温度的优化设计

- 1, 高压机组： $t_{gs}=210\sim 215^{\circ}\text{C}$
- 2, 超高压机组： $t_{gs}=235\sim 240^{\circ}\text{C}$
- 3, 亚临界机组： $t_{gs}=275\sim 280^{\circ}\text{C}$
- 4, 超临界机组： $t_{gs}=280\sim 290^{\circ}\text{C}$
- 5, 超超临界机组： $t_{gs}=295\sim 305^{\circ}\text{C}$

五、热风温度的优化设计

烟煤： $t_{rk}=330\sim 350^{\circ}\text{C}$ ； $t_1=320\sim 340^{\circ}\text{C}$ ；

无烟煤： $t_{rk}=380\sim 400^{\circ}\text{C}$ ；

六、烟气流速和工质质量流速的优化设计

1, 烟气速度：10~15m/s

金属磨损；传热效果；金属消耗量；烟气流动阻力；受热面紧凑性

2, 工质质量流速：辐射受热面高

传热效果、流动阻力、水流壁安全性

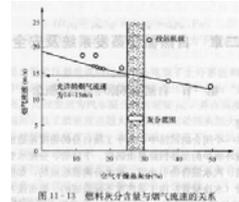


图 11-11 燃料含碳量与烟气流速的关系

表 11-2 超临界参数燃煤锅炉各受热面的烟气平均流速 m/s

受热面	1000MW 级锅炉炉膛		600MW 级锅炉炉膛	
	屏式过热器	末级高温过热器	末级高温再热器	水平低阻再热器
屏式过热器	10	9.1	10.2	9.48
末级高温过热器	8	8.6	12.2	12.16
末级高温再热器	11	11.7	12.2	10.31
水平低阻过热器	9	9.8	10.8	
水平低阻再热器	10	9.0	10.5	11.00
省煤器	8	8.1~10	9.0	9.85
锅炉供应商	DBC	HBC	B&W	SBW1

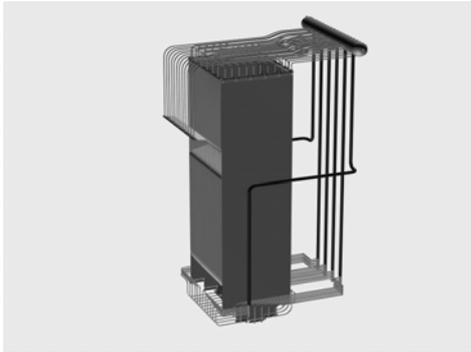
工质质量流速

受热面	600MW 锅炉-1	600MW 锅炉-2
高温过热器	1068	1314
后屏过热器	1483	1015
分隔屏	1687	1072
低温过热器		579
螺旋水冷壁	3085~1074 (光管)	2412~723.6 (内螺旋管)
垂直水冷壁	1074~342	2001~600.3

第十一章 重点

- 1, 锅炉的主要布置方式
- 2, 受热面的布置与蒸汽压力、温度的关系。
- 3, 空气、烟气(含漏风系数)的温度、流速的选择方法。工质质量流速、温度的选择方法。

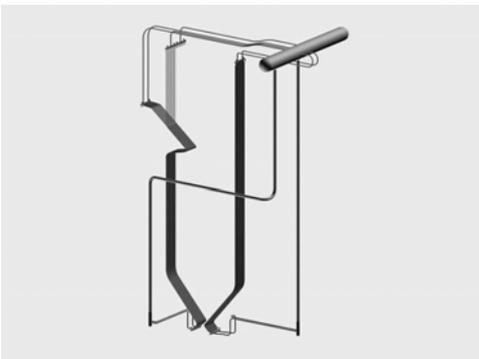
第十二章 自然循环蒸发系统及安全运行



为什么采用这么多循环回路?

- ✓ 并列管屏的受热不均常是造成自然循环锅炉的循环故障或传热恶化的基本原因。
- ✓ 受热弱的管子有可能出现循环停滞或倒流;
- ✓ 受热强的管子又可能会出现传热恶化而导致超温。
- ✓ 由于炉内热负荷沿着锅炉宽度和深度的分布是不均匀的, 故水冷壁各部位的吸热量也就有大有小。
- ✓ 为减少水冷壁受热不均而导致水冷壁管的不安全, 采用把水冷壁受热面按其受热情况不同而划分若干个循环回路, 以提高循环回路的工作可靠性。

水冷壁流程



第一节 自然循环原理与基本概念

一、自然循环原理

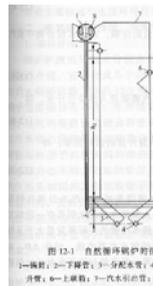


图 12-1 自然循环锅炉的循环回路
1—锅筒; 2—下降管; 3—分配集管; 4—下降管; 5—上升管; 6—上联箱; 7—汽水引出管; 8—旋风分离器

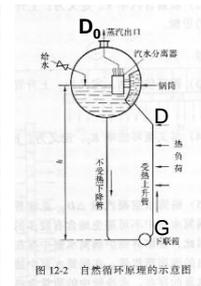


图 12-2 自然循环原理的示意图

一、自然循环原理

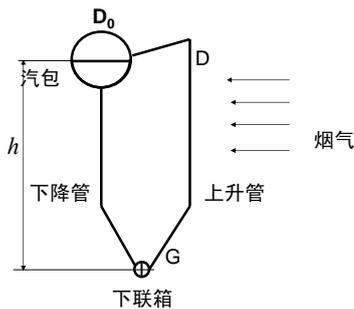
Y_{xj} --下降管系统在汽包和下联箱两截面间的压差

Y_{ss} --上升管系统在汽包和下联箱两截面间的压差

上升管、下降管压差：

运动压头:即循环推动力,用于克服上升系统和下降系统的阻力

自然循环工作原理示意图



二、自然循环的基本概念

(1) 循环流速

饱和状态下进入上升管入口的水的流速

(2) 质量含汽率

上升管汽水混合物中蒸汽所占的份额

(3) 循环倍率

上升管实际产生1kg蒸汽需要进入多少kg水

(4) 名义循环倍率

按汽包引出的饱和蒸汽量计算的循环倍率

(5) 锅筒水室凝汽量(凝汽率)

锅筒水室中被凝结的蒸汽量

第二节 自然循环锅炉水冷壁的安全运行

一、影响水冷壁安全运行的主要因素

- 1, 水质恶化;
- 2, 水冷壁热偏差;
- 3, 管内流动阻力;
- 4, 热负荷过大(膜态沸腾);
- 5, 汽包水位太低;
- 6, 高温腐蚀;
- 7, 结渣、积灰;
- 8, 磨损

二、蒸发管内停滞、倒流、膜态沸腾

1, 停滞:

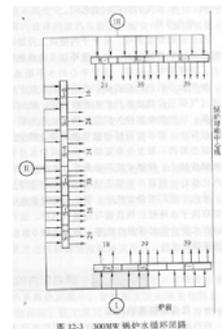


图 12-3 300MW 锅炉水循环回路

1、循环停滞

- 炉膛中温度场分布不均
- 水冷壁管屏之间或管子之间的吸热强度存在偏差
- 上升系统的结构偏差和流量分配偏差
- 每根管子和管屏间的受热强度不同，阻力不同，循环推动力就不同
- 受热弱的管子中，工质密度大，当这根管子的重位压头接近于管屏的压差时，管屏的压差只能托住液柱，而不能推动液柱的运动。这时，管内就出现了流体的停滞现象。

蒸汽塞→管子局部超温

2、倒流

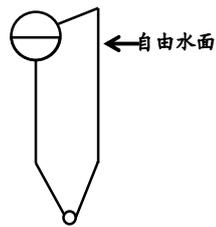
- 在并联工作的水冷壁管子之间，由于受热不均，上升管之间形成了自然循环回路
- 本来应该是工质向上流的上升管，变成了工质向下流的下降管
- 循环特性：倒流管的压差大于同一片管屏或同一回路的平均压差，从而迫使工质向下流动
- 当倒流速度较慢 → 引起汽塞（水的倒流速度=汽泡上浮速度，汽泡处于不上不下状态），烧坏管子
- 当倒流速度很快时，良好的冷却，不会超温
- 当汽水混合物引出管从汽包汽空间引入时，不会出现倒流，而是自由水面

自由水面

当汽水混合物从汽包汽空间引入时，出现自由水面

上半部超温

自由水面波动→疲劳应力



3、膜态沸腾

(1) 核态沸腾：气体“趋中效应”；

(2) 膜态沸腾：汽泡在管内壁聚集，形成完整稳定的气膜，热量通过气膜层传到液体再产生沸腾蒸发，管内壁得不到水膜直接冷却，管壁超温。

◆核态沸腾传热，放热系数很大，约为 $11 \times 10^3 \sim 16 \times 10^3 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{C})$ ，管壁金属温度与工质温度很接近，略高于工质温度

◆膜态沸腾传热，放热系数大幅度下降，壁温迅速升高，称为沸腾传热恶化

第三节 蒸发管内的汽液两相流型及传热

一、汽液两相流的流型

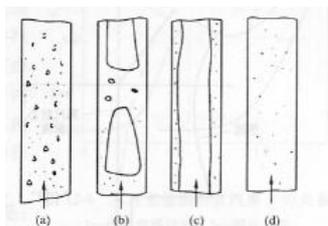


图 12-4 蒸发管内的流型

(a) 泡状；(b) 弹状；(c) 环状；(d) 液雾状

- 泡状流型：汽水混合物中质量含汽率较小时，汽泡分散在水里
- 弹状流型：汽水混合物中质量含汽率增大，汽泡趋中效应使汽泡合并成大汽泡，小汽泡以阻力最小的弹状型式向上运动
- 柱状流型：汽水混合物中质量含汽率进一步增大，两个弹状间水膜消失，形成柱状流型
- 液雾流型：汽水混合物中质量含汽率进一步增大，水膜被撕破，水滴分散到蒸汽中形成液雾流型

二、蒸发管内的传热

- 1, 蒸发管内的流型与传热的关系;
- 2, 蒸发管内的传热恶化, 膜态沸腾

壁温

工质温度

流型

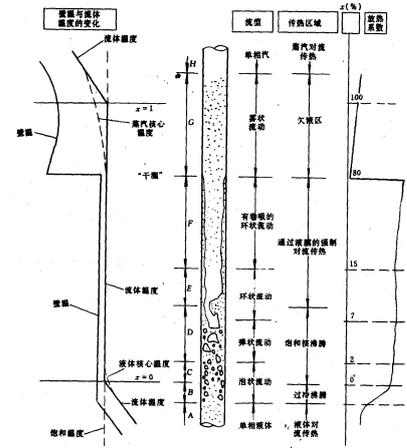
传热区域

质量含汽率

放热系数

雾状流→蒸干

放热系数急剧减小



传热恶化

第二类传热恶化

当质量含汽率很大时, 出现了液雾状流动结构, 这时管中连续的水膜被撕破, 对流放热系数 a_2 大大下降, 管壁温度大大升高, 这个现象称为第二类传热恶化现象。

蒸干传热恶化(DO), 沸腾传热恶化发生在环状流动后期含水不足区液膜蒸干或破裂处

特点: 管壁温度发生周期性波动, 波动值可达60~150度

- ① 恶化开始处部分水膜已消失, 部分以分散小水流形式存在于壁面, 壁面同一点时而与蒸汽接触, 时而与小水流接触;
- ② 流量的微小波动使液膜与蒸汽界面发生变化

自然循环锅炉一般不出现“蒸干”的第二类传热恶化
直流锅炉一定会出现

第一类传热恶化

当热负荷很高时, 管子内壁汽化核心数积聚增加, 汽泡形成速度超过汽泡脱离速度, 使管子壁面形成一个连续的蒸汽膜, a_2 急剧下降, 壁温积聚上升, 这种由核态沸腾转化为膜态沸腾的传热恶化称为第一类传热恶化。

三、内螺纹管抑制传热恶化的作用

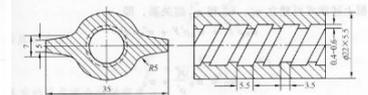
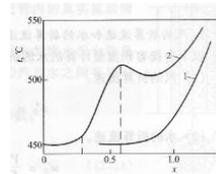


图 12-7 内螺纹管水冷壁结构

图 12-6 水冷壁壁温与含汽率 x 的关系
1—螺片内螺纹管; 2—螺片光管

表 12-1 内螺纹管与光管中质量含汽率的允许变动范围

	内 螺 纹 管	光 管
筒内压力 (MPa)	16.6/18.1/19.3/20.7	16.6/18.1/19.3/20.7
最大允许的 x	0.940/0.915/0.875/0.780	0.485/0.385/0.185/0.185
燃烧器区域 x	0.155/0.165/0.185/0.233	0.155/0.165/0.185/—
Δx 允许范围	0.785/0.750/0.690/0.540	0.330/0.220/0.0/—

内螺纹管抵抗膜态沸腾、推迟传热恶化的机理

- 由于工质受到螺纹的作用产生旋转，增强了管子内壁面附近的扰动，使水冷壁管内壁上产生的汽泡可以被旋转向上运动的液体及时带走，
- 水流受到旋转力的作用，紧贴内螺纹槽壁面流动，从而避免了汽泡在管子内壁面上的积聚所形成的"汽膜"，保证了管子内壁击上有连续的水流冷却。

第四节 汽液两相流体的流动参数

一、汽液两相流体流动的均相模型

- 1, 均相模型(均匀混合; 无相对速度)
- 2, 蒸汽和水的折算流速(上升管)

蒸汽

水

- 3, 汽水混合物的流速

3, 汽水混合物的流速

下降管流量G=上升管水流量+上升管汽流量

$$G=(G-D)+D$$



循环倍率:

汽水混合物流速:

4, 容积含汽率

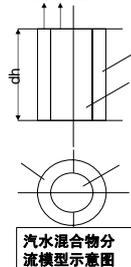
二、汽液两相流体流动的分流模型

蒸发管内流型泡状流、环状流。环状水膜内是蒸汽。

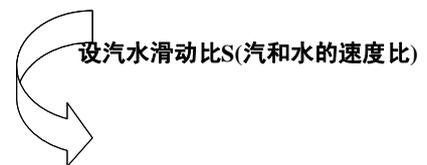
- 1, 截面含汽率
- 2, 蒸汽和水的真实速度

蒸汽真实速度
水真实速度

- 3, 汽水混合物的近似真实密度



三、两相流动参数与均相流动参数的关系



垂直上升管的滑动比 S

$S > 1$, 汽水混合物向上流动, $S < 1$, 汽水混合物向下流动, $S = 1$, 均相流动

第五节 汽液两相流体的流动阻力、重位压降

一、两相流体的流动阻力

蒸发管(泡状流、弹状流、环状流)内两相流体流动阻力：液相水与管壁摩擦阻力+汽液两相相对速度引起的摩擦阻力
两相流体摩擦阻力修正系数 ψ

ψ 的取值方法

(1) $\rho_w = 1000 \text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$

(2) $\rho_w < 1000 \text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$

(3) $\rho_w > 1000 \text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$



沿上升管，吸热量不断增加， $x(w_{hu})$ 也不断变化，工程上可将上升管分段计算

二、两相流体的重位压降

上升管汽水混合物密度是变化的，按其密度分段计算两相液体重位压降

第六节 简单回路的水循环计算和水循环特性曲线

一、简单回路和回路区段的划分

1, 简单回路：一根下降管与一个水冷壁管屏连接而成的回路

2, 上升管区段的划分

(1) 热水段

(2) 含汽段

(3) 热后段

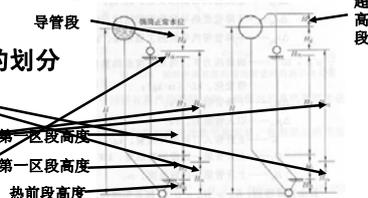
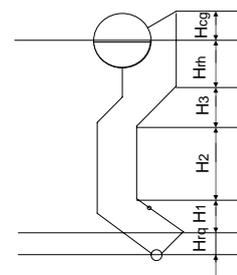


图 12-9 上升管区段的划分
(a) 带有上联箱的简单回路；(b) 汽水导管通过锅筒正常水位时的简单回路

例：含汽段分段

- 根据吸热强度、管子直径、管子倾斜度将含汽段分为若干段分别计算



二、描写循环特性的方程组

压差方程、流量方程、水冷壁吸热方程

汽化潜热、上升管入口水欠焓

三、热水段高度的计算



如果计算结果 $H_{rs} > H_{rq} + H_l$



四、水冷壁各区段蒸发量的计算

第一区段

第二区段

第 i 区段

五、锅水欠焓的计算

锅筒中蒸汽凝结使进入下降管的水欠焓减小
清洗装置上部的热平衡

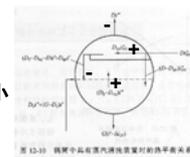


图 12-10 锅筒中蒸汽清洗装置上部的热平衡关系

清洗装置下部的热平衡关系

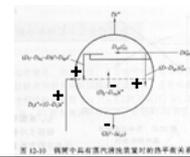
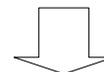


图 12-11 锅筒中蒸汽清洗装置下部的热平衡关系

有蒸汽清洗装置的锅水欠焓的计算

$$x_{nq} = D_{nq}/G, \quad \eta_{qx} = D_{qx}/D, \quad K = G/D_0 \text{ (实际循环倍率)}$$

无蒸汽清洗装置的锅水欠焓的计算

六、下降管带汽导致的工质焓增

下降管中蒸汽凝结量为 D_{xj} , 下降管水流量 G_{xj}

七、水循环特性曲线和循环回路的工作点

根据水冷壁吸热方程求解上升系统与下降系统的压差方程和流量方程, 两个总压差曲线交点即水循环回路的工作点

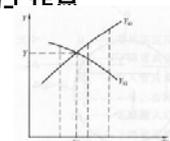


图 12-11 简单回路的水循环特性曲线

简单回路水循环计算

- 1) 假定循环流速;
- 2) 求出下降系统压差 Y_{xj} ;
- 3) 假定 K , 计算出锅水欠焓, 热水段高度 H_{rs} , 上升系统压差 Y_{ss} ;
- 4) 比较 Y_{xj} 和 Y_{ss} , 调整直到合格;
- 5) 计算 K 及计算合格问题;
- 6) 作循环安全性检查。

第七节 复杂回路的水循环计算

一、复杂回路

一根下降管与2个或2个以上水冷壁管组相连接的循环回路称为复杂回路

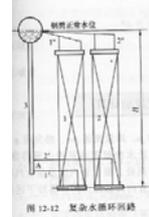


图 12-12 复杂水循环回路

简化复杂回路的两个原则:

- 1) 串联系统: 流量相同, 压差相加;
- 2) 并联系统: 压差相同, 流量相加。

二、复杂回路的水循环特性曲线

$1', 1''$, 1表示上升系统 $1'-1-1''$ 的特性曲线(包括分配管、上升管、汽水引出管、汽水分离器), 流量相同的几个压差相加, 即得到上升系统的压差曲线-流量曲线

同一压差下流量相加, 即得并联管路压差曲线, 与下降管压差曲线相交点即为循环回路工作点

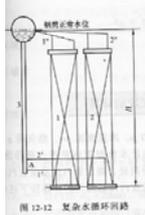


图 12-12 复杂水循环回路

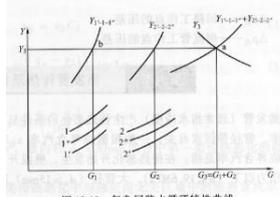


图 12-13 复杂回路水循环特性曲线

第八节 水循环特性曲线和循环安全性检查

一、水循环全特性曲线

水循环特性曲线只反映工质向上流动情况

全特性曲线包括上升流动、停滞、倒流的特性曲线

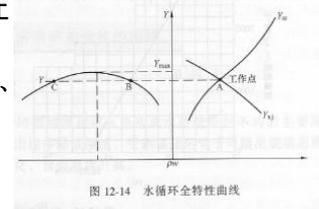


图 12-14 水循环全特性曲线

二、循环安全性检查

1, 不停滞条件: 回路工作点的压差大于受热最差管在停滞点的压差

2, 不倒流条件: 回路工作点压差大于受热最差管在倒流点的压差

第九节 蒸发管传热恶化工况的计算

蒸发管传热恶化判别指标: 临界含汽率 x_{lj} (传热恶化开始处, 壁温开始升高处, 蒸发管内质量含汽率)

一、沿周向均匀受热的垂直管计算

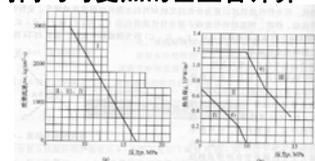


图 12-15 传热恶化区域图

(a) 第一、二种传热恶化区域图
 1—第一类传热恶化(膜态沸腾)发生区; 2—第二类传热恶化(流干)区。
 第二、三类传热恶化判别指标是在管内壁面温度达到规定值时。
 (b) 第三类传热恶化区域图
 第一类传热恶化判别指标, 是指壁面温度开始升高与传热恶化。
 第二、三类传热恶化判别指标, 是指管内壁面温度达到规定值。

区域 I

区域 II

区域 III

区域 IV

x_1 -热负荷 $q=465\text{kW/m}^2$ ，管内径 $d_n=20\text{mm}$ 的管中第一类传热恶化的临界含汽率
 x_2 -管内径 $d_n=20\text{mm}$ ，第二类传热恶化与热负荷无关区域的临界含汽率

二、单面受热水冷壁管的计算

沿周向内壁热负荷不均匀，临界含汽率按最高值计算，向火面内壁热负荷带入前述的 q_n 受热面沿周向受热不均，将产生汽水周向环流，传热恶化推迟，上式计算结果放大

区域 I $x_{ij} \times 1.5$

区域 II III IV $x_{ij}+0.1$

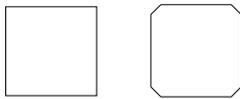
第十节 提高循环安全性的措施

一、影响循环安全性的主要因素

1, 水冷壁受热不均或受热强度过高

一面炉墙水冷壁按热负荷分为几个循环回路

四角切圆炉膛截面为八角形



水冷壁管积灰结渣

2, 下降管带汽或自汽化 (Y_{xj} 减小)

降低汽水导管和下降管中的流动阻力，可提高 w_0 和循环倍率

大直径下降管可减小流动阻力

下降管带汽或汽化，下降管实际水流量减小，循环流速减小， Y_{xj} 减小

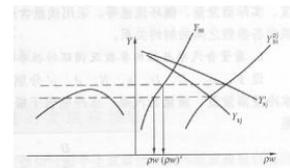


图 12-16 下降管压差 Y_{xj} 对停滞、倒流的影响

3, 水冷壁管内结垢(换热变差、流动阻力增大)

4, 上升管系统流动阻力

5, 变负荷速度过快或低负荷运行

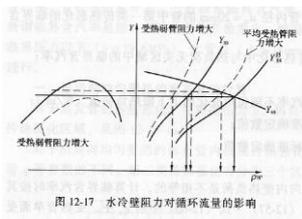


图 12-17 水冷壁阻力对循环流量的影响

二、亚临界自然循环锅炉的循环特性

循环流速 $>0.4\text{m/s}$ 水冷壁管内水循环良好

1, 质量含汽率与结构参数与循环特性参数的关系

2, 水冷壁热负荷与结构参数、循环特性参数的关系

3, 炉膛周界与循环特性、结构参数的关系

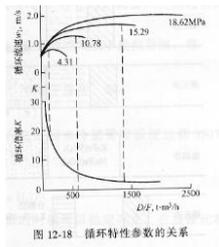


图 12-18 循环特性参数的关系

三、提高循环安全性的措施

- 1, 足够高的质量流速;
- 2, 减小水冷壁流量、结构、热偏差;
- 3, 水冷壁各循环回路具有合适热负荷;
- 4, 合适的质量含汽率;
- 5, 锅炉水位正常, 减少下降管带汽或汽化;
- 6, 减小循环流动阻力;
- 7, 变负荷时, 压力变化速度正常;
- 8, 保证给水品质合格;
- 9, 减轻高温腐蚀和磨损;

第十一节 水冷壁的高温腐蚀

内因: 燃料中硫; 外因: 高温烟气+还原性气氛

- 硫酸盐型高温腐蚀
- 硫化物型高温腐蚀
- SO₂、SO₃气体的生成及腐蚀
- H₂S气体高温腐蚀
- HCL气体高温腐蚀

1、硫酸盐型高温腐蚀

- 两种途径: ①灰渣层中碱金属硫酸盐与SO₃共同作用; ②碱金属焦硫酸熔盐腐蚀(碱金属焦硫酸熔点低, 通常壁温下熔融状态, 灰渣中的焦硫酸盐会形成反应速度更快的熔盐型腐蚀)

氧化层保护膜→形成硫酸盐→硫酸盐熔化
SO₃↑→对氧化层的破坏(复合硫酸盐)→对金属的腐蚀

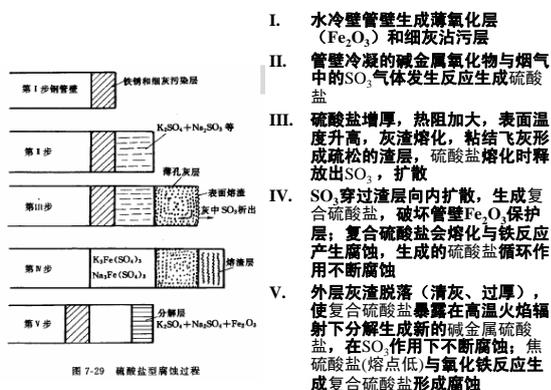


图 7-29 硫酸盐型腐蚀过程

熔融硫酸盐的腐蚀速度

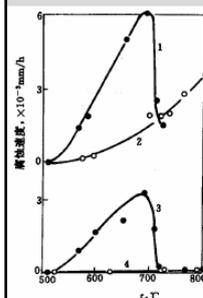


图 7-30 熔融硫酸盐的腐蚀速度

- 熔融硫酸盐积灰层对金属的腐蚀速度远大于气态硫酸盐
- 600°C, 熔融硫酸盐腐蚀速度为气态的4倍
- 高参数锅炉水冷壁管壁温度高, 高温腐蚀速度快, 易爆管

2、硫化物型腐蚀

- 管壁附近还原性氛围有 H_2S 存在时产生
- 烟气中水蒸汽对硫化物形成有抑制作用，使这一腐蚀减慢

腐蚀过程

- I. 黄铁矿 (FeS_2) 粉末随高温烟气流到管壁上，还原性气氛受热分解放出 FeS 和自由原子 S ；管壁处有一定浓度 H_2S 和 SO_2 时也生成自由原子 S
- II. 还原性氛围缺氧，自由原子 S 可单独存在，管壁温度 $>350^\circ C$ 时发生硫化反应生成 FeS
- III. H_2S 与磁性氧化铁中复合的 FeO 反应生成 FeS
- IV. FeS 缓慢氧化生成黑色磁性氧化铁，使管壁腐蚀 (FeS 熔点 $1195^\circ C$ ，温度高时将被氧化为 Fe_3O_4 进一步腐蚀)

3、 SO_2 、 SO_3 气体的生成及腐蚀

- SO_2 、 SO_3 的存在除了促使硫酸盐型和硫化物型高温腐蚀发生，本身也直接对水冷壁产生腐蚀
- SO_3 气体穿过灰层直接与壁面氧化铁膜反应生成硫酸铁，硫酸铁与氧化铁的混合体结构疏松，为进一步腐蚀创造条件

SO_2 的生成——

煤中黄铁矿 FeS_2 和有机硫化物 RS 燃烧生成 SO_2

SO_3 的生成——

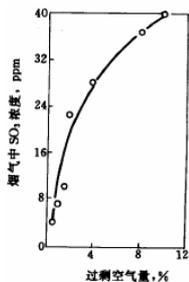


图 7-31 SO_3 浓度与过量空气的函数关系

1. 高温下，生成的 SO_2 与自由氧原子反应生成 SO_3 （氧原子：氧气在炉内高温分解、 $CO+O_2 \rightarrow CO_2+O$ 、 $H_2+O_2 \rightarrow H_2O+O$ ）炉内温度越高，过量空气越大，自由氧原子分解越多， SO_3 越多

2. 催化反应生成

高温烟气流过水冷壁积灰层时，灰中 V_2O_5 和氧化铁的催化作用下，烟气中 SO_2 转化成 SO_3 （催化作用温度范围 $425\sim 625^\circ C$ ）

3. 煤中碱金属硫酸盐 ($CaSO_4$ 、 $MgSO_4$) 热解产生 SO_3 ，量较少

开始于 $1000^\circ C$ ， $1400\sim 1500^\circ C$ 以上反应强烈激升

4、H₂S气体高温腐蚀

炉内燃烧组织不好，局部供氧不足时会产生大量H₂S气体，它除了促使硫化物型高温腐蚀外，还会对管壁直接产生腐蚀作用，是水冷壁腐蚀的另一主因

- H₂S与Fe/FeO反应生成FeS，FeS进一步氧化为FeO。
- FeS与FeO的混合物是多孔性的，不起保护作用，使腐蚀继续进行

5、HCL气体高温腐蚀

- 煤灰中的NaCl是产生HCl的根源
- 燃用高氯化物含量燃料时产生HCl气体，在炉内造成HCl腐蚀
- 腐蚀反应（Fe/FeO/Fe₂O₃/Fe₃O₄与HCl反应生成FeCl₂）在400~600℃是活跃，恰好是高参数锅炉水冷壁温度范围

防止水冷壁高温腐蚀的措施

1. 低氧燃烧

过量空气系数小，生成的自由氧原子少，烟气中SO₃浓度小，发生高温腐蚀的机会小

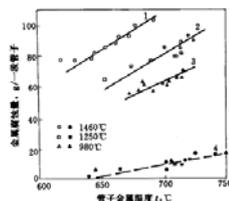


图 7-33 不同过量空气对管壁腐蚀的影响
1、2、3—15%过量空气；4—1%过量空气

2. 采用烟气再循环，降低炉内火焰温度和烟气中SO₃含量，降低高温腐蚀作用
3. 合理配风和强化炉内湍流混合，避免局部还原性氛围，减少H₂S和硫化物型腐蚀
4. 加强一次风煤粉输送的调整，尽可能各喷口煤粉量相等，燃烧器截面均匀，避免局部还原性氛围、着火困难、燃烧不稳、及局部结渣现象
5. 合理控制煤粉细度，煤粉粗时燃尽困难，火焰延长冲刷水冷壁，造成管壁磨损和结渣，引起腐蚀

6. 过高壁温是引起水冷壁结渣和高温腐蚀的重要原因之一，应避免局部高温（燃烧器区域、火焰偏斜；流量不均超温）
7. 结渣壁面喷空气保护膜，受腐蚀区域小孔漏入空气，氧化性气氛，缓解硫化物型、硫酸盐型腐蚀
8. 燃料中添加剂改变灰渣特性，重油中加氧化镁、白云石等；煤中添加陶土、硅藻土和氧化镁不生成复合硫酸盐

9. 提高水冷壁抗腐蚀能力（易腐蚀区域采用好管材；氧乙炔粉末喷涂、线材火焰喷涂、电弧喷涂、等离子喷涂抗金属材料；采用具有抗温度腐蚀的渗铝管）
10. 对出现高温腐蚀管子及时更换，避免爆管（管壁减薄厚度>30%；碳钢管胀粗>3.5d（外径），合金管>2.5d；腐蚀点深度>30%壁厚；石墨化>四级；表面裂纹可见；常温机械性能低，现有壁厚不满足要求）

第十二章 重点

- 1, 自然循环锅炉的原理与自补偿特性
- 2, 循环流速
- 3, 质量含汽率
- 4, 循环倍率
- 5, 锅筒水室凝汽率
- 6, 循环停滞、倒流
- 7, 蒸发管内流型
- 8, 传热恶化
- 9, 截面含汽率
- 10, 高温腐蚀的成因与减轻高温腐蚀的措施
- 11, 简单回路的计算方法

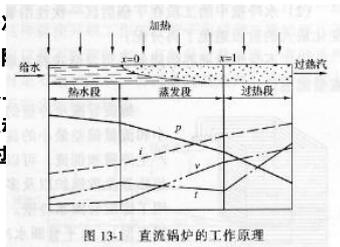
第十三章 强制流动锅炉

- 第一节 直流锅炉的主要特点和水冷壁型式
- 第二节 直流锅炉的水动力特性
- 第三节 亚临界压力下蒸发管的脉动性流动
- 第四节 直流锅炉的热偏差
- 第五节 超临界压力下水冷壁管内传热
- 第六节 低倍率和符合循环锅炉
- 第七节 控制循环锅炉
- 第八节 直流锅炉的启动系统

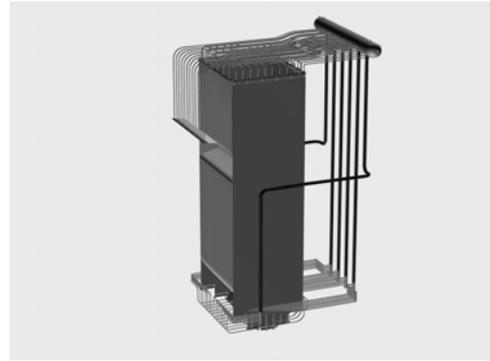
第一节 直流锅炉的主要特点和水冷壁型式

一、直流锅炉的主要特点

- 1, 没有汽包, 工质一
- 2, 蒸发段为何温度下
- 3, 主要用于25MPa以
- 4, 水冷壁管内工质流; 壁压降1.84MPa, 过



水冷壁的分类



二、直流锅炉水冷壁型式

●本生型、苏尔寿型、拉姆辛式

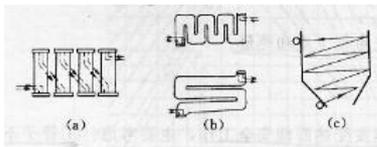


图 11-28 早期直流锅炉水冷壁的基本型式
(a) 本生炉多次串联垂直上升管屏；(b) 苏尔寿炉多弯道垂直升降管带及多弯道水平上升管道；
(c) 拉姆辛炉水平围绕上升管圈

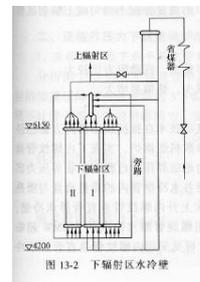
直流锅炉水冷壁结构两种型式

1、垂直管屏光管水冷壁

造价低, 抗膜态沸腾能力差

下辐射区: 二次垂直上升, 两个流路间用下降管连接

采用2~3次垂直上升水冷壁锅炉称为UP型



2, 螺旋管圈水冷壁

内螺旋管螺旋管圈水冷壁, 热、流量偏差最小

- (1) 炉膛下辐射区水冷壁同步经过受热最强、最弱区域
- (2) 不受炉膛周界限制, 灵活选择并联水冷壁管数目和管径

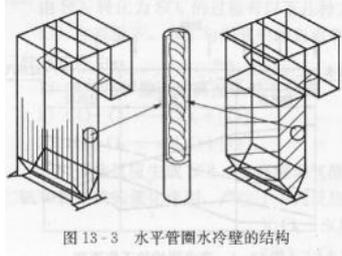


图 13-3 水平管圈水冷壁的结构

螺旋管圈水冷壁优缺点

悬吊结构复杂, 流动阻力大

管带宽度随锅炉容量提高而增大, 管带盘旋次数少, 热偏差增大

3, 内螺旋管垂直管屏水冷壁

特点:

- (1) 提高传热性能, 防止亚临界压力下膜态沸腾
- (2) 可降低质量流速, 减小流动阻力
- (3) 下辐射区采用一次垂直上升内螺旋管屏和低质量流速, 克服了传统UP型锅炉的主要缺点
- (4) 垂直管屏结构简单, 膜式壁, 积灰结渣减少
- (5) 减小水冷壁阻力损失, 降低给水泵功率消耗

第二节 直流锅炉的水动力特性

一、直流锅炉的水动力不稳定性

低负荷变压运行, 水冷壁管内汽水两相流

汽相增多, 汽水混合物流速增大, 流动阻力增大;

汽水混合物密度小, 流动阻力减小;

综合: 流量与压降成三次方曲线

水冷壁不安全运行状态

流量与压差: 多值性关系

自然循环锅炉良好的水循环

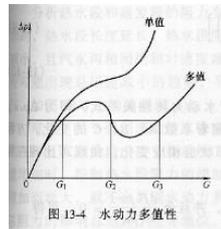


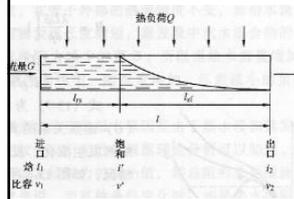
图 13-4 水动力多值性

二、亚临界压力下直流锅炉的水动力特性

1, 水平蒸发管的水动力特性

重力压降=0, 加速压降 $\approx 3.5\% \Delta P$, 管子进出口局部阻力 ≈ 0

管子出口压降



蒸发段的平均质量含汽量 x_p

热水段长度

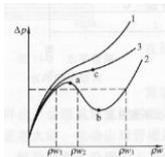
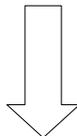


图 13-6 水平蒸发管水动力特性

1、3—单值特性曲线;
2—多值特性曲线

$B^2-3AC > 0$, 两个实根, 多值性

$B^2-3AC \leq 0$, 一个实根, 单值性

给水流量增大, 热水段增大, 阻力增大;

蒸发段减小, 汽水混合物比体积减小, 汽水相对速度减小, 阻力减小

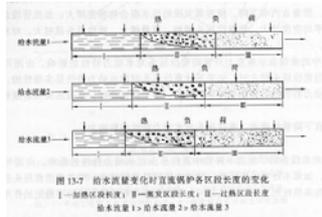
a-b: 流量增大, 总压差减小, 多值性

强制流动水冷壁

流动多值性的根本原因：热水段、蒸发段共存，蒸发段中扰动使工质比体积变化较大

流量增加时，热水段阻力增加 > 蒸发段阻力减小，总阻力随流量增加而增加，不出现水动力多值性

汽液两相流出现水动力多值性的主要原因是系统内发生微小扰动（水泵压头、介质温度升高），系统工作压头略高（低）于流动阻力，流量会增加（减小）



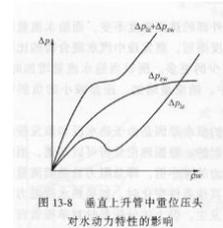
2, 亚临界压力垂直蒸发管的水动力特性

加速压降 $\approx 3.5\% \Delta P$, 管子进出口局部阻力 ≈ 0

垂直蒸发管压差

流量增加，热水段增大，蒸发段减小，工质平均密度增大，重位压头增大

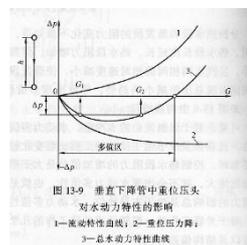
不计重位压头，水动力特性是多值的，考虑重位压头后，水动力特性有可能是单值的，重位压头具有减弱水动力不稳定作用



2, 亚临界压力垂直蒸发管的水动力特性

垂直下降管

不计重位压头，水动力特性是单值的，考虑重位压头后，水动力特性有可能是多值的，重位压头具有增强水动力不稳定作用



并联蒸发管屏

停滞、倒流

三、影响直流锅炉水动力多值性的因素

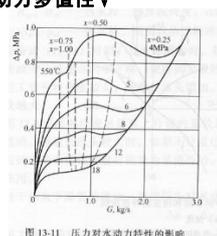
1, 工质压力

压力 ↓, 汽水密度差增大, 水动力多值性 ↑

压力 ↓, 工质汽化潜热 ↑, 吸热量不变时蒸发量 ↓

压力 ↓, 受热面进口水欠焓 ↓, 水动力多值性 ↓

压力 ↓, 水动力多值性 ↑



2, 质量流速

负荷越低，质量流速越低，工质流量分配越不均匀；各系数影响越大，越容易发生水动力多值性；

3, 蒸发管进口水欠焓

热水段存在即工质进口水欠焓

欠焓 \uparrow , $L_{rs} \uparrow + L_{zf} \downarrow$, 热水段阻力 \uparrow , 蒸发段阻力 $\downarrow \downarrow$, 压降 $\Delta P \downarrow$

高压加热器解列

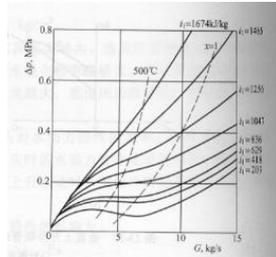


图 13-12 工质进口水焓值对水动力特性的影响

4, 热负荷 q

水冷壁热负荷变化, 影响蒸发点位置

$q \downarrow, L_{rs} \uparrow + L_{zf} \downarrow$, 工质欠焓 \uparrow

高负荷(高压力、高热负荷)有较高稳定性

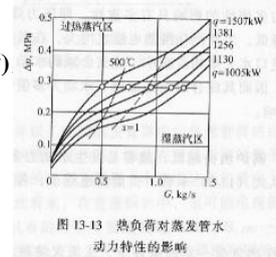


图 13-13 热负荷对蒸发管水动力特性的影响

5, 锅炉负荷

低负荷时, 压力 \downarrow , 质量流速 \downarrow , 工质进口欠焓 \uparrow , 热负荷 \downarrow , 热偏差 \uparrow

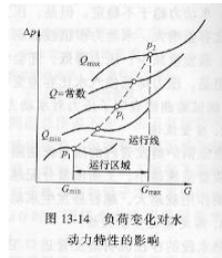


图 13-14 负荷变化对水动力特性的影响

6, 重位压头

垂直管屏: 水动力不稳定现象, 停滞、倒流

7, 工质的热物理特性

超临界压力锅炉水冷壁, 吸热 \uparrow , 工质温度 \uparrow , 温度在大比热区时, 工质温度变化较小, 比体积剧烈变化, 工质膨胀量急剧增大, 可能产生水动力不稳定现象

四、提高水动力稳定性的方法

- 1, 提高质量流速;
- 2, 提高压力;
- 3, 安装节流圈(热水段流动阻力大);
- 4, 适当减小工质欠焓($\neq 0$);
- 5, 减小受热偏差;
- 6, 控制下辐射区工质出口温度; (<拟临界温度)
- 7, 控制水冷壁热负荷。

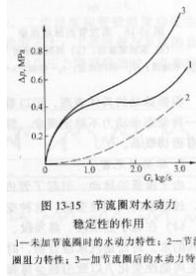


图 13-15 节流圈对水动力稳定性的作用
1—未加节流圈时的水动力特性; 2—节流圈阻力特性; 3—加节流圈后的水动力特性

第三节 亚临界蒸发管的脉动流动

一、脉动的现象及危害

1, 脉动现象

动态不稳定现象, 进入蒸发管的水流量与流出蒸发管的蒸汽流量周期性波动

管间脉动

- (1) 并联管子(管间脉动);
- (2) 某一根管子;
- (3) 管组;

管屏脉动、整体脉动

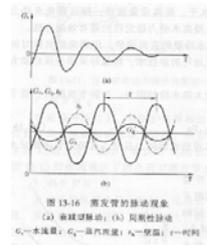


图 13-16 蒸发管的脉动现象
(a) 脉动现象; (b) 脉动现象; (c) 脉动现象
 G_s —水流量; G —蒸汽流量; t —时间

2, 脉动的危害

- (1) 热水段、蒸发段、过热段界面频繁波动, 管壁温度周期性变化;
- (2) 过热段长度变化引起中间点(出口)温度波动;
- (3) 蒸发段界面波动引起局部压力波动, 进而引起机械应力破坏;

二、造成脉动流动的原因

1, 一般解释

水平管: 汽泡流动速度<水速, 汽泡变大, 局部压力↑, 排挤水流进, 管子出入口加速流出: ①入口流量↓, 汽泡流动速度更慢, 蒸发管附近形成压力峰; ②工质流出速度↑, 工质排出后压力↓, 汽泡排走。

压力↑时, 饱和温度、管壁温度↑, 一部分热量用来加热工质和金属, 压力↓时, 饱和温度↓, 原储存于工质和金属中的热量释放, 产生附加蒸发量, 压力再次↑

垂直管: 重力压头为管屏压差的重要部分, 热水段高度随流量脉动而脉动, 重力压头脉动幅度大, 滞后于流量一个相位, 脉动更敏感

2, 压力降型脉动、密度型脉动、热力波型脉动

压力降型: 流量增加, 系统总压差降低, 水动力特性曲线负斜率区

密度型: 两相流中含汽率较大时, 热负荷扰动, 管子进口工质质量、压力、总压降、温度出现持续脉动, 水动力特性曲线正斜率区

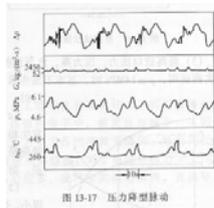


图 13-17 压力降型脉动

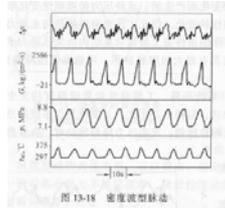


图 13-18 密度型脉动

三、防止脉动的措施

1, 提高质量流速;

2, 安装节流圈

(局部压力小于进口压力, 流量波动小; 热水段阻力增大, 进口水稳定);

3, 提高(水冷壁)进口压

4, 降低蒸发点的热负荷和

5, 避免脉动性燃烧;

6, 给水泵的特性

(陡曲线, 相同压差, 流量波动小)

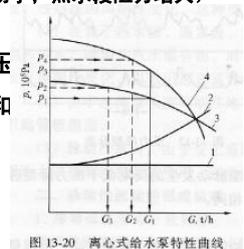


图 13-20 离心式给水泵特性曲线

第四节 直流锅炉的热偏差

一、热偏差对直流锅炉工作安全性的影响

威胁蒸发管安全;

蒸发管内流量不均匀性增大;

蒸发管内停滞、倒流、传热恶化

二、直流锅炉的流量偏差

1, 受热偏差对流量偏差的影响

流量不均匀系数

受热强管子, 流量减小。

亚临界压力, 热负荷大的管子易出现膜态沸腾或蒸干, 金属管壁超温

超临界压力, 热负荷大的管子温度升高较多, 类膜态沸腾, 金属管壁超温

2, 重位压头对流量偏差的影响

上升流动(重位压头减小流量偏差):

下降流动(重位压头增大流量偏差):

3, 加装节流圈对流量偏差的影响

选择节流圈阻力, 使流量不均匀系数 ≈ 1

热负荷较大管子, 增大流量, 节流圈阻力小些

三、热偏差与流量偏差实例分析

偏差管中质量流速 \uparrow , 热偏差、流量偏差 \downarrow

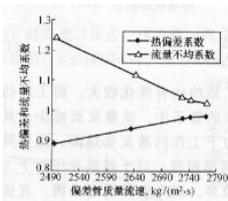


图 13-21 螺旋管水冷壁的热偏差及流量偏差

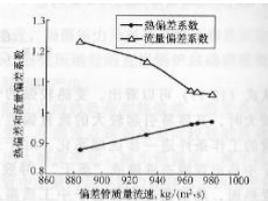


图 13-22 垂直管水冷壁的热偏差及流量偏差

偏差管工质焓增 \uparrow , 工质温度偏差 \uparrow

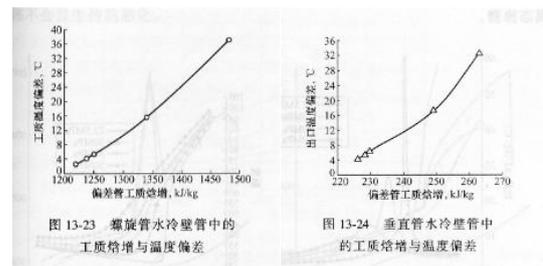


图 13-23 螺旋管水冷壁管中的工质焓增与温度偏差

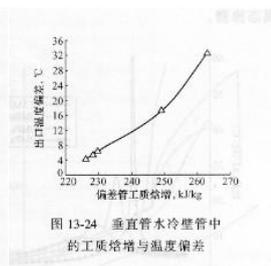


图 13-24 垂直管水冷壁管中的工质焓增与温度偏差

第五节 超临界水冷壁内传热

一、超临界水和水蒸汽的热物理性质

(1) 管内温度不断提高;

25MPa, 540/540, 水冷壁管内工质升温 210°C

(2) 超临界区域, 水冷壁管内传热与工质热物理性质密切相关

大比热特性

拟临界温度: 比定压热容最大位置处的工质温度

拟临界温度附近大比热区, 工质体积急剧变化, 但温度变化较小;

压力越高, 拟临界温度越高, 大比热特性减弱

超临界压力工质的热物理特性与温度和压力的关系

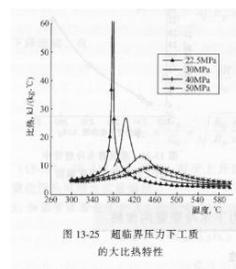


图 13-25 超临界压力下工质的大比热特性

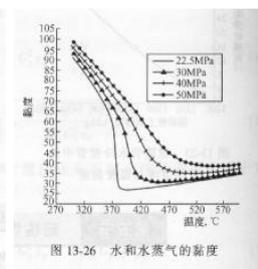


图 13-26 水和水蒸气的黏度

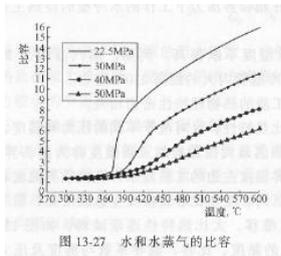


图 13-27 水和水蒸气的比容

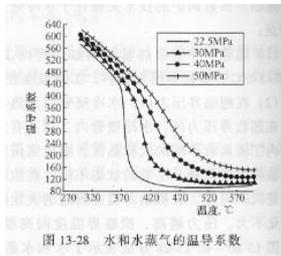


图 13-28 水和水蒸气的导热系数

工质比热容急剧变化引起膨胀量急剧增大，引起水动力不稳定或类膜态沸腾；大比热区避开受热最强区域

二、超临界水冷壁管内传热

类膜态沸腾：工质在物性参数发生显著变化时，边界层中流体导热系数降低，导热较差流体与管壁接触，壁面处流速小于管中心，热负荷较大时可能导致传热恶化，发生在相变区

超临界压力传热恶化与热负荷、质量流速有关

推迟、抑制传热恶化方法：

- ①工质比热最大管段不布置在热负荷最高的燃烧器区域；
- ②任何负荷下较高的质量流速

不同压力、不同质量流速、不同热负荷下管壁温度与工质焓的关系(传热恶化点)

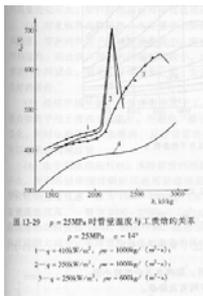


图 13-29 $p = 25 \text{ MPa}$ 时管壁温度与工质焓的关系

$p = 25 \text{ MPa}$, $\alpha = 14^\circ$
 1— $q = 400 \text{ W/m}^2$, $G = 1000 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$;
 2— $q = 2000 \text{ W/m}^2$, $G = 1000 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$;
 3— $q = 2000 \text{ W/m}^2$, $G = 600 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$;
 4— $q = 2000 \text{ W/m}^2$, $G = 600 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$

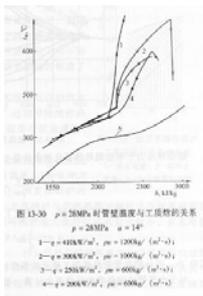


图 13-30 $p = 28.3 \text{ MPa}$ 时管壁温度与工质焓的关系

$p = 28.3 \text{ MPa}$, $\alpha = 14^\circ$
 1— $q = 400 \text{ W/m}^2$, $G = 1000 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$;
 2— $q = 2000 \text{ W/m}^2$, $G = 1000 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$;
 3— $q = 2000 \text{ W/m}^2$, $G = 600 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$;
 4— $q = 2000 \text{ W/m}^2$, $G = 600 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$

第六节 低倍率和复合循环锅炉

● 直流锅炉

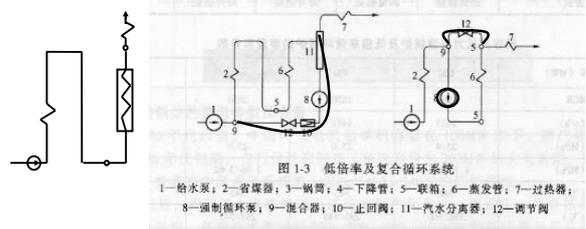


图 1-3 低倍率及复合循环系统
 1—给水泵；2—省煤器；3—锅炉；4—下降管；5—联箱；6—蒸发管；7—过热器；
 8—强制循环泵；9—混合器；10—止回阀；11—汽水分离器；12—调节阀

一、低倍率循环锅炉的工作原理

增大启动、低负荷时水冷壁流量，水冷壁出口设汽水分离器，再循环泵将分离得到的水与省煤器来水混合后送入水冷壁

循环倍率
全负荷范围内水冷壁内均有再循环流量通过

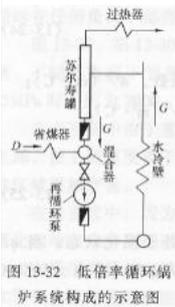


图 13-32 低倍率循环锅炉系统构成的示意图

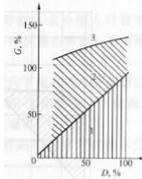


图 13-33 低倍率循环锅炉工质流量与负荷的关系
 1—给水流量；2—循环水流量；3—水冷壁管中流量

二、低倍率循环锅炉的技术特点

(1) 直流锅炉+再循环泵

解决低负荷时水冷壁流量小导致管子冷却不足和水动力不稳定的问题

(2) 汽水分离器代替汽包

增大水冷壁流量，提高进口工质焓；
负荷降低，再循环流量增加

(3) 负荷变化时，水冷壁内工质流量稳定

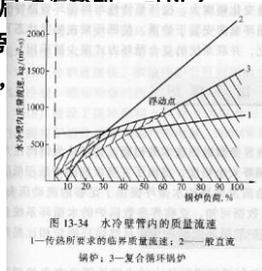
启动过程和低负荷工况工作的可靠性提高

负荷变化时，循环泵流量变化不大

(4) 亚临界锅炉水冷壁温度稳定，有利于降低水冷壁的热应力。

(5) $K > 1$, 出口 $x_c = 0.6$, 避免“蒸干”。

- (6) 选用较小质量流速，流动阻力小。
- (7) 启动系统容量小，可减小启动过程的热损失(仅为直流锅炉的15~25%)。
- (8) 锅炉出力很低时即可启动，可设置保护再热器的低压旁路。
- (9) 再循环泵工作温度高，入口水汽化(汽水分离器水位、



第七节 控制循环锅炉

一、控制循环锅炉的水动力特性

(1) 控制循环锅炉出现的原因

压力增大后，为提高水循环安全性，提出低压头循环泵+水冷壁内螺纹管

(2) 控制循环锅炉主要表现为强制流动特性

水冷壁入口节流圈

水冷壁循环可靠性高

二、控制循环锅炉的技术特点

- (1) 低压头循环泵+内螺纹水冷壁+水冷壁入口节流圈；
- (2) 汽包设有夹层，汽水混合物可以从汽包顶部引入，降低了汽包上下侧温差；
- (3) 循环压头足够大，可布置直径较小的汽水分离器，汽包直径小、壁薄。
- (4) 循环倍率小， $K=2\sim 2.5$ ，质量含汽率增大，水冷壁小管径增大循环流速
- (5) 与自然循环锅炉相比，水冷壁管径小，汽包直径小，热惯性小

(6) 循环流量与锅炉负荷关系不大，主要取决于投运的循环泵数量。

(7) 停炉速度比较快，快速冷却水冷壁。

(8) 循环泵及其入口调节阀、出口逆止阀增加了锅炉的成本；

(9) 循环泵高温高压循环水回路中工作，压力变动时，循环泵入口可能发生汽化。出现故障的可能性增加。

第八节 直流锅炉的启动系统

一、直流锅炉启动过程中的主要问题

- (1) 从启动开始，就必须向锅炉连续供水，浪费水资源、水处理费用、热量；
- (2) 单元机组启动时，锅炉送出的过热蒸汽参数按照汽轮机的要求逐步提高。
- (3) 直流锅炉启动过程的汽水膨胀可能导致蒸汽带水和水动力不稳定。
- (4) 中间再热机组启动时需要设置保护再热器的汽轮机旁路系统；

二、启动系统的作用

(1) 建立起动压力和流量；

(2) 实现工质、热量的回收；

(3) 实现锅炉各受热面以及锅炉与汽轮机之间的工质状态的配合。

第一节 电站锅炉的蒸汽品质

一、蒸汽品质标准

炉型	压力 (MPa)	钠 (μg/kg)		二氧化硅 (μg/kg)
		磷酸盐处理 ^①	无磷酸盐处理 ^②	
锅筒炉	3.82-5.78		≤15	≤20
	5.88-12.6	≤10	≤10 ³	
	12.7-18.3		≤10	
直流炉	5.88-12.6		ED	≤20
	12.7-18.3			

压力 (MPa)	铜 (μg/kg)		铁 (μg/kg)	
	锅筒炉	直流炉	锅筒炉	直流炉
12.7-18.3	≤20	≤10	≤5	≤5 [*]

防止钠盐、硅酸盐、金属氧化物在汽轮机中的沉淀

二、蒸汽带盐的危害

- 1, 气体杂质腐蚀金属;
- 2, 硅酸盐、钠盐沉积在过热器、汽轮机中;

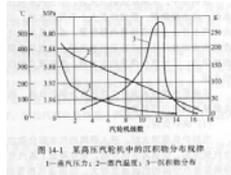
三、蒸汽带盐在过热器和汽轮机中的沉积规律

1, 在过热器中的沉积规律

- (1) 低压、中压锅炉: 主要是 Na_2SO_4 , Na_3PO_4 , Na_2CO_3 , NaCl . Na_2SO_4 约占50%。
- (2) 高压锅炉: Na_2SO_4 占90%以上。
- (3) 超高压锅炉中。蒸汽溶盐直接进入汽轮机。
- (4) 各种压力锅炉: 铁的氧化物主要沉积在过热器中。

2, 在汽轮机中的沉积规律

- (1) 中间各级沉积量较大。
- (2) 高压级沉淀: Na_2SO_4 , Na_3PO_4 , Na_2SiO_3 ; 中压级沉淀: NaCl , Na_2CO_3 , $\text{Na}(\text{OH})$; 低压级沉淀: SiO_2
- (3) 沉积物在各级隔板和叶轮上的分布不均匀;
- (4) 经常启停的汽轮机内沉积物较少。



第二节 蒸汽污染的原因及治理途径

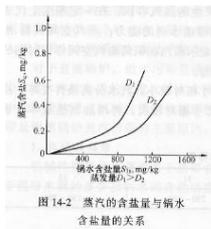
一、蒸汽污染的原因

- 1, 机械性携带: 蒸汽由于携带含盐的锅水水滴而带盐的现象

影响蒸汽机械携带的因素:

- (1) 锅炉负荷;
 - 蒸发面负荷
 - 蒸汽空间负荷

- (2) 工作压力;
- (3) 蒸汽空间高度;
- (4) 锅水含盐量



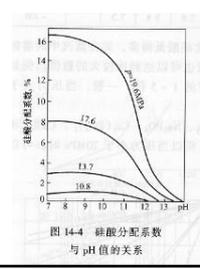
- 2, 溶解性携带: 由于蒸汽能够溶解盐类而带盐的现象。

分配系数 α : 溶解系数, 表示溶解于蒸汽中某中杂质的含量与此种杂质在锅水中的含量比值的百分比。

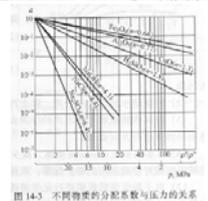
- (1) 杂质的种类
 - 硅酸: $\text{Na}(\text{OH})$, NaCl , CaCl_2 ; Na_2SO_4 , Na_3PO_4 , Na_2SiO_3 , $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, CaSO_4 , MgSO_4 。
- (2) 压力

表 14-4 不同压力下硅酸的分配系数

工作压力 (MPa)	4	6	8	10	11	14	15	16	18	20	22.5
pH=7 时的 α_{SiO_2} (%)			0.5-0.6	0.8	1.0	2.8			8.0	16.3	>100
pH=10 时的 α_{SiO_2} (%)	0.033	0.07	0.16	0.6	0.92	2.2	2.8	3.8	7.3		>100



(3) 锅水的含盐量与 pH 值



二、蒸汽污染的防治途径

- (1) 减少汽水损失量；
- (2) 降低补水中杂质的含量
- (3) 防止凝汽器泄露；
- (4) 对凝结水进行除盐；
- (5) 对疏水和热用户回水进行水质监督
- (6) 对汽水系统采取防腐蚀措施；
- (7) 对新安装的过路机组进行化学清洗
- (8) 对汽包锅炉：进行排污、汽水分离、蒸汽清洗、锅内加药。

第三节 给水净化

表 14-5 电站锅炉的给水水质

炉型	锅炉压力 (MPa)	硬度 (μmol/L)	溶解氧 (μg/L)	铁 (μg/L)	铜 (μg/L)	镍 (μg/L)	二氧化碳 (μg/L)
凝汽炉	3.8-5.8	≤3.0	≤15	≤50	≤10	—	应保持蒸汽中二氧化碳符合标准
	5.9-12.6	≤2.0	≤7	≤30	≤5	—	
	12.7-18.6	≤2.0	≤7	≤30	≤5	—	
汽包炉	18.7-18.3	—	≤7	≤30	≤5	—	—
直流炉	5.9-18.3	—	≤7	≤10	≤5	≤10 ⁻⁷	≤20

表 14-6 给水中 pH 值、铁和铜的含量

炉型	锅炉压力 (MPa)	pH 值 (25℃)	铁含量 (μg/L)	铜含量 (μg/L)
凝汽炉	3.8-5.8	8.5-9.2	—	≤1.0
	5.9-12.6	8.8-9.3	10-30	—
	12.7-18.6	—	—	≤30
汽包炉	18.7-18.3	9.0-9.5	10-30	—
直流炉	5.9-18.3	—	—	—

一、补给水处理

- 1, 锅炉补给水的预处理：除去悬浮物杂质
- 2, 离子交换处理

二、凝结水处理

- 1, 凝结水处理的作用
 - (1) 降低凝结水含盐量和铜等腐蚀性产物的含量。
 - (2) 当凝汽器轻微泄露时，保证机组正常运行；
 - (3) 缩短机组启停时的冲洗时间。
- 2, 凝结水处理系统的类型
 - (1) 有前置过滤器的系统。
 - (2) 不设置过滤器的系统；

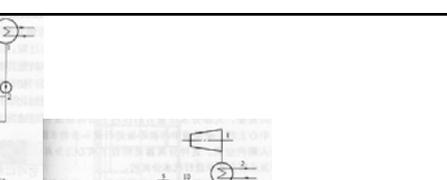


图 14-5 低压凝汽器水处理系统

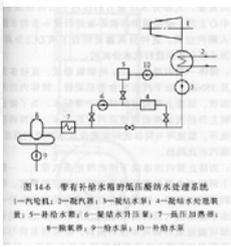


图 14-6 带有补给水箱的低压凝汽器水处理系统



图 14-7 中压凝汽器及再热器的热力系统

第四节 锅内蒸汽净化

一、汽水分离

1, 汽水分离原理

- (1) 重力分离；
- (2) 惯性力分离；
- (3) 离心力分离；
- (4) 水膜分离；

2, 汽水分离设备

- (1) 旋风分离器；
- (2) 百叶窗分离器
- (3) 顶部多孔板

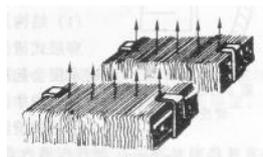


图 14-11 卧式布置的百叶窗分离器

二、蒸汽清洗

(一) 蒸汽与含盐浓度较低的清洗水接触，使溶解于蒸汽中的盐转移到清洗水中

(二) 清洗装置

- 1, 喷水式
- 2, 水膜式
- 3, 穿层式

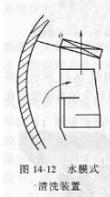


图 14-12 水膜式清洗装置

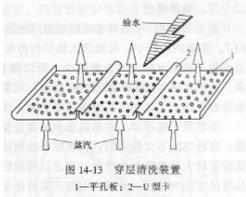


图 14-13 穿层清洗装置
1—穿孔板；2—U型卡

(三) 大型电站锅炉不使用蒸汽清洗的情况

- (1) 锅水品质较好；
- (2) 亚临界锅炉；

三、锅炉排污：从锅炉中排出一部分锅水以改善锅水品质的方法

排污率

表 14-7

锅炉出口压力 (MPa)	pH (25℃)	磷酸根 (mg/L)	含盐量 (mg/L)	含硅量 (mg/L)	氟离子 (mg/L)
3.8~5.8		5~15	—	—	—
5.9~12.6	9~10.5	2~10	≤100	≤2.0	≤4
12.7~15.6	9~10	2~8	≤50	≤0.45	≤4
15.7~18.6 (磷酸盐处理)	9~10	0.5~3	≤20	≤0.25	≤1
15.68~18.6 (挥发性处理)	9~9.5	—	≤2.0	≤0.2	≤0.5

四、典型锅筒及其内部装置（汽包）



第五节 超临界参数机组的水汽品质

一、超临界参数机组的水汽品质特性

1, 超临界条件下蒸汽的物理性质

层流、结垢、传热恶化

2, 超临界条件下常见的物质在蒸汽中的溶解性

溶解能力大大提高

钙镁离子、钠离子、硅化合物、强酸阴离子、金属腐蚀产物

3, 超临界压力条件下蒸汽对金属的高温氧化

二、超临界参数机组水汽系统的杂质沉积和结垢特点

- 1, 沉积在过热器中
- 2, 沉积在汽轮机高压缸中

三、超临界参数机组的水汽品质标准

表 14-8

项目	中国		美国 EPRI		德国 VGB		日本		苏联		某超临界参数机组的给水标准	
	AVT	OT	AVT	OT	AVT	OT	AVT	OT	AVT	OT	AVT	OT
pH (25℃)	8.8~8.9	8.8	8.8~8.9	8.8~8.9	8.8~8.9	8.8~8.9	8.8~8.9	8.8~8.9	8.8~8.9	8.8~8.9	8.8~8.9	8.8~8.9
电导率 (25℃) (μS/cm)	<0.2	<0.15	<0.2	<0.15	<0.2	<0.25	<0.2	<0.3	<0.3	<0.3	<0.2	<0.1
磷酸根 (μg/L)	<7	20~250	<3	30~150	<100	150	<7	20~200	<10	600	<3	20~200
全铁 (μg/L)	<10	<10	<5	<5	<20	<20	<10	<10	<10	<10	<10	<10
全铜 (μg/L)	<5	<5	<2	<2	<3	<3	<2	<2	<5	<2	<2	<2
氨氮 (μg/L)	20~50				>10				20~60			
SiO ₂ (μg/L)	<15	<15			<20	<20	<20	<20	<15	<15	<15	<15
Na ⁺ (μg/L)	<5	<5			<20	<20			<5	<5	<5	<5
Cl ⁻ (μg/L)											<2	<2
SO ₄ ²⁻ (μg/L)											<2	<2

表 14-9 凝结水精处理的出水控制指标 (建议值)

主要控制项目	控制指标 (单位)	主要控制项目	控制指标 (单位)
电导率(25℃, $\mu\text{S/cm}$)	<0.08	SiO_2 ($\mu\text{g/L}$)	<2
Na^+ ($\mu\text{g/L}$)	<0.5	Fe^2+ ($\mu\text{g/L}$)	<3
Cl^- ($\mu\text{g/L}$)	<0.5	Cu^2+ ($\mu\text{g/L}$)	<3
NO_3^- ($\mu\text{g/L}$)	<0.5	总硬度($\mu\text{mol/L}$)	<5

表 14-10 国内汽轮机生产厂家对蒸汽品质的建议值

指标	汽轮机生产厂家		
	上海汽轮机厂	哈尔滨汽轮机厂	东方汽轮机厂
硬度(25℃, $\mu\text{g/L}$)	<0.30	<0.30	<0.30
Na^+ ($\mu\text{g/L}$)	<0.5	<0.5	<0.5
Cl^- ($\mu\text{g/L}$)	<0.5	<0.5	<0.5
SiO_2 ($\mu\text{g/L}$)	<0.5	<0.5	<0.5
Fe^2+ ($\mu\text{g/L}$)	<20	<20	<20
Cu^2+ ($\mu\text{g/L}$)	<3	<3	<3
NO_3^- ($\mu\text{g/L}$)	<3	<3	<3
有机碳的质量分数			<10 ⁻⁴

四、保证超临界参数机组水汽品质的基本原则

- (1) 选择合适的补给水处理系统的型式
- (2) 凝汽器管材选用非铜管
- (3) 凝结水经处理考虑到硫酸盐和钠盐的漏出
- (4) 严格控制机组停用期间产生的腐蚀产物;
- (5) 在线测量、监督。

第十四章 重点

- 1, 机械性携带
- 2, 溶解性携带
- 3, 分配系数
- 3, 排污率