



21世纪

高等学校精品规划教材

锅炉原理基础

主 编 王世昌

副主编 李文艳 刘 彤



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



21世纪

高等学校精品规划教材

锅炉原理基础

主 编 王世昌

副主编 李文艳 刘 彤



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书主要包括理论基础、锅炉本体、锅炉辅机三部分。理论基础主要包括与锅炉原理相关的理论简介。锅炉本体部分分为炉内过程和锅内过程。炉内过程包括直流燃烧器、旋流燃烧器、W型火焰锅炉燃烧器、CFB锅炉燃烧设备的结构、原理、性能和少量计算。锅内过程包括亚临界自然循环锅炉、控制循环锅炉、超临界直流锅炉的结构、原理、性能和少量热力计算。锅炉辅机部分包括制粉系统设备和烟风道阻力计算。

本书可作为热能动力工程专业大专、函授专升本学生36~40学时《锅炉原理》课程教材，也可作为热能动力工程领域工程技术人员的速查手册。

图书在版编目(CIP)数据

锅炉原理基础 / 王世昌主编. —北京: 中国水利水电出版社, 2009

21世纪高等学校精品规划教材

ISBN 978-7-5084-6634-7

I. 锅… II. 王… III. 锅炉-高等学校-教材 IV. TK22

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第117544号

书 名	21世纪高等学校精品规划教材 锅炉原理基础
作 者	主编 王世昌 副主编 李文艳 刘彤
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 10.5印张 249千字
版 次	2009年7月第1版 2009年7月第1次印刷
印 数	0001—4000册
定 价	20.00元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

本书编委会

主 编 王世昌 华北电力大学能源与动力工程学院

副主编 李文艳 华北电力大学能源与动力工程学院

刘 彤 华北电力大学能源与动力工程学院

参 编 范晓明 华电潍坊发电有限责任公司生技部

董文成 华电邹县发电厂发电部

前言

目前国内使用的《锅炉原理》教材，大部分是为热能动力工程专业72~80学时的全日制在校本科生编写。为了满足专科生或者函授专升本《锅炉原理》以及非热能动力工程专业本科生选修课教学工作的需要，作者编写了本教材。

本教材内容包括锅炉本体及主要辅机的结构、原理、性能和少量计算。本教材的编写思路：①传热学、工程热力学、工程流体力学基础；②燃料、燃烧理论、制粉系统、燃烧设备；③水冷壁的工质蒸发、汽化过程、自然循环锅炉、强制循环锅炉、控制循环锅炉、超临界直流锅炉、复合循环锅炉；④蒸发受热面的水循环理论简介；⑤热力计算方法简介；⑥烟风道阻力计算和金属强度计算；⑦锅炉运行性能简介。

全书分为九章，每一章的内容包括本章导读（要求、重点、难点、关键词）、正文、例题、思考题与习题等部分。本教材各章内容之间存在一定联系，各章内容形成的知识体系具有系统性和完整性。在学习过程中学生可以根据每一章的提示，进行预习、复习，并结合授课教师的讲课内容进行必要的练习，从而强化学习效果。

李文艳、刘彤合编了第七章，王世昌编写了其余内容。由于篇幅所限，本教材没有涉及送风机、引风机、磨煤机、给水泵、除尘器、除渣装置、脱硫装置、脱硝装置、二氧化硫吸收装置、烟囱等锅炉辅机的选型计算与校核计算。相关内容，请查阅有关参考文献。

建议的学习方法：课前预习、有针对性地听讲、课后复习。课前预习：在阅读的基础上，将没有理解的概念、理论、知识体系的衔接部分作简要记录，向任课教师提问，通过课堂讨论澄清问题。在阅读和学习过程中，学生如果遇到新概念、新理论或者前面章节出现过的符号、概念、理论，可以到相关章节去查阅。课后复习：将模糊的概念、理论、知识体系整理清楚，并做适量练习题。计算结果的客观性和计算结果表达的热能动力工程领域学科含义，学生要仔细分析、认真体会。

本教材的特点：

(1) 具有理论基础、炉内过程、锅内过程、热力计算、烟风道阻力计算及金属强度计算、水动力计算的模块与思路，教材结构接近于国外同类教材。学时数：36~40 学时。

(2) 以亚临界压力、超临界压力电站煤粉锅炉机组技术为主。

(3) 每一章编写了本章导读（要求、重点、难点、关键词）、正文、例题、思考题与习题，便于自学。

(4) 编写了全文符号检索表、名词检索表、常数表、数量级简写表，便于自学。

(5) 本教材是在校本科生 72~80 学时《锅炉原理》的缩编版，全文篇幅较短、内容浅显易懂、系统性和完整性较好，可作为热能动力工程专业大专升本科学生的《锅炉原理》教材，也可作为热能动力工程领域锅炉侧工程技术人员的简化速查手册。

王世昌

2009 年 3 月于北京

目录

前言

第一章 理论基础概述	1
第一节 传热学概述	1
第二节 水和水蒸气的热力性质	2
第三节 伯努利方程	3
第四节 气固两相反应动力学基础	4
第五节 亨利定律	7
第六节 CFB 锅炉气固两相流动理论基础	7
第七节 电站锅炉工作原理与锅炉机组	9
例题	10
思考题与习题	13
第二章 燃料特性与锅炉本体热平衡	14
第一节 气体燃料与液体燃料的性质	14
第二节 动力煤的特性	16
第三节 空气焓与烟气焓	20
第四节 锅炉本体热平衡方程	23
例题	24
思考题与习题	28
第三章 制粉系统与燃烧设备	29
第一节 煤的破碎与磨损特性参数	29
第二节 磨煤机的分类与结构	30
第三节 制粉系统	33
第四节 直流燃烧器	36
第五节 旋流燃烧器	40
第六节 W 型火焰燃烧器与循环流化床燃烧	43
第七节 油燃烧器与点火器	45
第八节 水冷壁的高温腐蚀及其防治措施	46
例题	47

思考题与习题	52
第四章 锅炉受热面、汽包和启动分离器	53
第一节 水冷壁	53
第二节 过热器及其调温方法	54
第三节 再热器及其调温方法	56
第四节 省煤器与磨损	57
第五节 空气预热器与低温腐蚀	58
第六节 汽包与启动分离器	61
例题	64
思考题与习题	69
第五章 锅炉机组整体布置	70
第一节 自然循环锅炉的工作原理	70
第二节 锅炉机组的系统组成与作用	73
第三节 电站锅炉的分类	74
第四节 电站锅炉本体的主要参数的确定方法	77
例题	85
思考题与习题	90
第六章 辐射与对流受热面热力计算	91
第一节 辐射换热计算方法	91
第二节 对流换热计算方法	92
第三节 煤粉锅炉热力计算中关键参数的确定	93
例题	98
思考题与习题	102
第七章 烟风道阻力和受压件强度计算	103
第一节 烟风道阻力计算原理	103
第二节 烟道阻力计算	106
第三节 风道阻力计算	107
第四节 圆筒形受压件强度计算	107
例题	110
思考题与习题	113
第八章 水冷壁的水动力特性	115
第一节 汽包锅炉水冷壁的水动力特性	115
第二节 直流锅炉水冷壁的水动力特性	122
例题	128
思考题与习题	131

第九章 电站锅炉运行特性	133
第一节 汽包锅炉的启停特性	133
第二节 直流锅炉的启停特性	134
第三节 锅炉的运行方式	135
第四节 锅炉运行调节的主要内容	136
例题	139
思考题与习题	146
附录 1 名词检索表	147
附录 2 符号检索表	149
附录 3 数量级的简写符号表	153
附录 4 物理常数与化学常数表	154
参考文献	155
作者简介	156
致谢	157

第一章 理论基础知识

本章导读

《传热学》、《工程热力学》、《工程流体力学》以及气固两相流动理论是学习《锅炉原理》的基础。锅炉原理的内容从横向可分为四块：炉内过程；锅内过程；热力计算、水循环计算、烟风道阻力计算和金属强度计算；运行特性。锅炉原理的内容从纵向可分为原理、结构、性能、计算四个层次。

要求：预习第五章“锅炉机组整体布置”的内容，掌握锅炉机组的构成及工作原理。

重点：对流与辐射换热理论、伯努利方程、气固两相流型、亨利定律。

难点：气固两相流型、亨利定律。

关键词：煤粉锅炉、CFB 锅炉、蒸汽净化、流体的压力分布特性。

第一节 传热学概述

锅炉本体的受热面及其主要换热方式见表 1-1。

表 1-1 锅炉的主要受热面及其主要传热方式

序号	受热面	换热方式
1	水冷壁	辐射换热
2	分隔屏过热器、壁式再热器	辐射换热
3	后屏过热器、高温过热器、高温再热器	辐射换热、对流换热
4	尾部烟道中：低温过热器、低温再热器	对流换热
5	空气预热器、省煤器	对流换热

受热面是锅炉各种换热器的总称。实际上，导热、对流、辐射三种传热方式普遍存在于锅炉的受热面中。由于导热热阻很小，可以近似忽略不计。因此锅炉本体受热面的传热方式主要考虑对流换热和辐射换热。

1. 导热

根据傅立叶定律，热流密度：

$$q = \frac{\Delta t}{\delta/\lambda} \quad \text{W/m}^2 \quad (1-1)$$

式中： Δt 为受热面管子或者回转式空气预热器波纹蓄热板两侧的温差； δ 为壁厚； λ 为导热系数； δ/λ 为单位面积上的受热面管子或者回转式空气预热器蓄热板的导热热阻。

注意：回转式空气预热器的蓄热板的放热过程是两侧同时放热 [图 1-1 (b)]，吸热过程是两侧同时吸热。

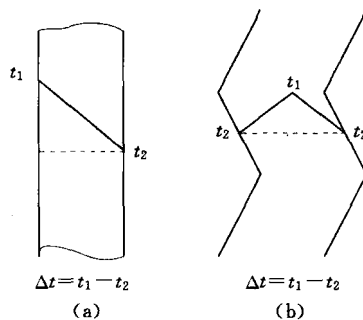


图 1-1 导热热阻温差 (温差) 示意图
(a) 管壁；(b) 波纹蓄热板

这与管壁的定向放热或定向吸热过程 [图 1-1 (a)] 有所不同。

锅炉的导热热阻主要出现在受热面的烟气侧积灰层。导热系数随温度的变化呈非线性的变化规律。

2. 对流换热

根据牛顿冷却公式，热流密度：

$$q = \frac{\Delta t}{1/\alpha} \quad \text{W/m}^2 \quad (1-2)$$

式中： α 为工质（水或者水蒸气）侧或者烟气侧的对流换热系数； $1/\alpha$ 为单位面积上的对流换热热阻； Δt 为工质侧或者烟气侧的流体与壁面之间的温差的绝对值。对流换热系数与流体的压力、温度之间呈非线性关系。

3. 辐射换热

根据斯蒂芬-波尔兹曼定律，热流密度：

$$q = \sigma_0 \epsilon (T_1^4 - T_2^4) \quad \text{W/m}^2 \quad (1-3)$$

式中： ϵ 为黑度； $\sigma_0 = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ，为斯蒂芬-波尔兹曼常数； T_1 ， T_2 分别为参与辐射换热的高温介质和低温介质的温度，K。黑度与温度呈非线性关系。

第二节 水和水蒸气的热力性质

水和水蒸气是蒸汽动力循环——朗肯循环的介质，简称工质。临界压力以下的水和水蒸气的加热过程大部分是在汽包锅炉中完成的。只要少数亚临界压力锅炉采用直流锅炉的形式。超临界压力锅炉都是直流锅炉。

欠焓是饱和水焓与未饱和水焓之差。汽包锅炉中工质的主要加热过程是：在省煤器中将液态水加热成有一定欠焓的水。在水冷壁中将液态的具有欠焓的水加热成饱和水和饱和蒸汽的混合物。汽水混合物在汽包中分离，饱和蒸汽进入过热器继续加热成额定参数（压力、温度、流量达到设计值）的过热蒸汽。饱和水和来自省煤器的未饱和水混合后经过下降管继续在水冷壁中被加热成饱和状态的汽水混合物。来自过热器的蒸汽经过高压缸做功、抽汽之后，进入锅炉的再热器。低压、低温的再热蒸汽经过加热变成低压高温的再热蒸汽送入汽轮机中压缸。

直流锅炉中工质被加热的过程是：水经过省煤器和水冷壁被加热成蒸汽，蒸汽在过热器中继续被加热成额定参数的蒸汽。过热度是过热蒸汽温度与对应压力下的饱和温度之差。临界压力以下的锅炉，水冷壁出口的蒸汽是具有一定过热度的微过热蒸汽。超临界压力锅炉水冷壁的出口蒸汽是超临界蒸汽。工质在再热器中的加热过程类似于临界压力以下锅炉。

水在加热过程中逐渐膨胀，其热物理性质也呈现出不同特点。

从图 1-2 (a) 可知：工质在汽包锅炉中的加热过程被分为 4 部分：省煤器提高给水温度；水冷壁将具有一定欠焓的给水加热成饱和水和饱和蒸汽的混合物；过热器将饱和蒸汽加热到额定温度；再热器将低压、低温蒸汽加热成低压高温（额定值）蒸汽。

从图 1-2 (b) 可知，工质在超临界直流锅炉中的加热过程被分为两部分：省煤器、水冷壁、过热器将超临界水加热成温度达到额定值的超临界蒸汽；再热器将低压、低温蒸汽加热成低压高温（额定值）蒸汽。这种特点决定了超临界直流锅炉的运行特性与汽包锅

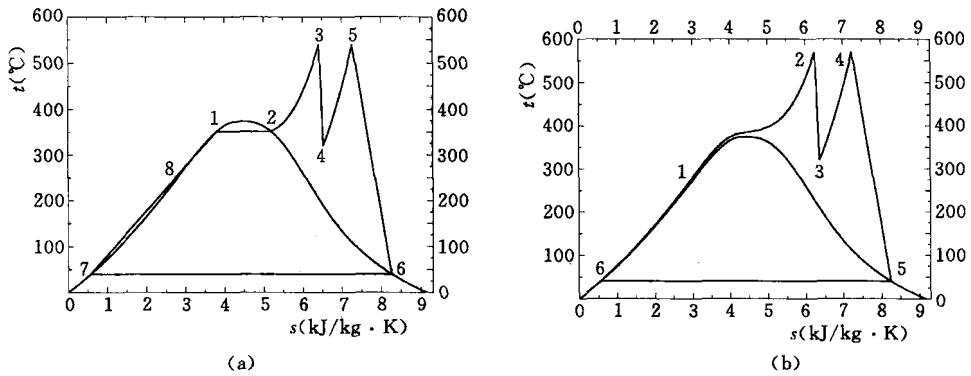


图 1-2 亚临界与超临界压力朗肯循环
(a) 亚临界压力-16.8MPa; (b) 超临界压力-25.4MPa

炉有本质区别。

第三节 伯努利方程

根据流体力学理论，单相不可压缩流体总流的能量方程可以用伯努利方程描述：

$$p + \frac{1}{2}\rho w^2 + \rho gh = \text{const} \quad (1-4)$$

式中： p 为静压； ρ 为流体密度，在锅炉机组中流体是指烟气、空气、水、水蒸气； w 为流体的速度； $g=9.80665\text{m/s}^2$ ，为重力加速度； h 为高度。

伯努利方程的主要用途是：

- (1) 过热器、再热器流量热偏差分析。

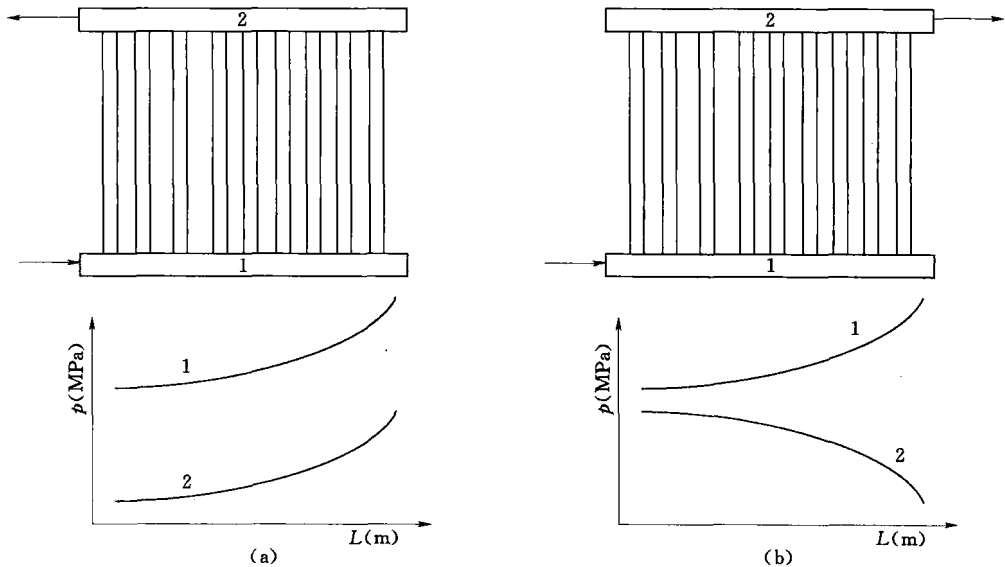


图 1-3 过热器、再热器流量偏差分析示意图
(a) U型连接，集箱 1、2 之间的静压差分布均匀；(b) Z型连接，集箱 1、2 之间的静压差分布不均匀

(2) 烟道、风道、煤粉管道阻力计算与分析。

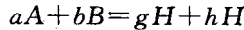
(3) 水冷壁、下降管阻力特性分析。

举例：对于过热器而言，当蒸汽流进集箱入口时，流速较高，根据伯努利方程，静压较低；当蒸汽流进集箱末端时，流速较低，根据伯努利方程，静压较高；如图 1-3 (a) 曲线 1 所示。当蒸汽流出集箱时，流速逐渐提高，根据伯努利方程，静压逐渐降低，如图 1-3 (a) 曲线 2 所示。因此，U 型连接方式可以是沿着集箱轴线方向使蒸汽流量均匀地分布在每一屏受热面上。而 Z 型连接方式则相反，因此，大型锅炉屏式过热器、高温过热器、高温再热器等受热面都采用了 U 型连接方式。其他例子见相关章节内容。

第四节 气固两相反应动力学基础

一、质量作用定律

对于化学反应



化学反应速度

$$w_A = -\frac{dC_A}{dt} = k_A C_A^a C_B^b \quad \text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}) \quad (1-5)$$

$$w_B = -\frac{dC_B}{dt} = k_B C_A^a C_B^b \quad \text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}) \quad (1-6)$$

式中： C_A 、 C_B 为反应物 A、B 的浓度，对于固体，假设为 1.0； k_A 、 k_B 为化学反应速率常数。

二、阿累尼乌斯定律

多相燃烧化学反应速率

$$w_B = -\frac{dC_B}{dt} = k_B f_A C_B^b \quad \text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}) \quad (1-7)$$

式中： f_A 为反应面积， m^2 。

化学反应速率常数用 Arrhenius 关系表达

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad \text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}) \quad (1-8)$$

动力煤的活化能 E 和指前因子 k_0 见表 1-2。

表 1-2 燃煤的活化能 E 与指前因子 (频率因子) k_0

煤种	V_{daf} (%)	k_0 [$\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{MPa})$]	E (kJ/mol)	煤种	V_{daf} (%)	k_0 [$\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{MPa})$]	E (kJ/mol)
无烟煤	5.15	96.83	85.212	烟煤	33.4	7.89	45.452
贫煤	15.18	12.61	55.098	褐煤	41.02	5.31	38.911

三、气体燃料火焰特性

根据气体燃料与空气混合的时间分类，气体燃料火焰可以是扩散火焰、半预混火焰、预混火焰，见图 1-4。

空燃比：燃烧中空气质量流量与燃料的质量流量之比。空气流量与燃料流量达到化学反应的当量的空燃比称为当量空燃比。

(1) 预混火焰：燃料和足量空气在燃烧前进行充分混合，燃烧过程中，燃烧速度快，固体不完全燃烧损失小，火焰温度高，火焰呈淡蓝色或者无色。例子：金属焊接使用的乙炔焰。工业纯氧（氧气浓度大约为 95%~98%）与乙炔气体按照理论空燃比进行混合，然后再燃烧，形成淡蓝色预混火焰，火焰温度可达 3100℃ 左右。

(2) 半预混火焰：燃料和不足量空气在燃烧前进行充分混合（空燃比小于当量空燃比），燃烧过程中燃烧速度较慢，固体不完全燃烧损失小，火焰温度较高，火焰呈淡黄色。例如：家用煤气炉火焰。空气与燃气进行一定比例的混合，然后再燃烧，形成淡蓝色半预混火焰。

(3) 扩散火焰：燃料与空气不进行预先混合，火焰呈亮黄色，反应速度慢，火焰温度最低。

着火温度：高炉煤气、发生炉煤气、天然气，530℃；焦炉煤气，300~500℃。

扩散火焰的例子：①奥运会传递的火炬以及奥运主会场的大型火炬。燃气与空气没有进行预先混合，火焰的颜色为亮黄色。火焰的颜色非常耀眼，根据传热学中的辐射换热部分的韦恩位移定律，火焰的波长与火焰温度的乘积等于常数，由于火焰的颜色肉眼可辨，因此火焰的波长比较长，即火焰的温度不高；②气体打火机的火焰；③蜡烛火焰；④火柴燃烧形成的火焰；⑤火灾现场的火焰；⑥燃烧器油枪火焰，见图 1-5。

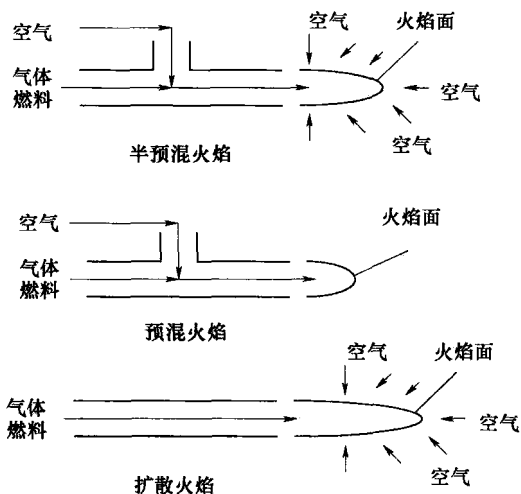


图 1-4 气体燃料的火焰

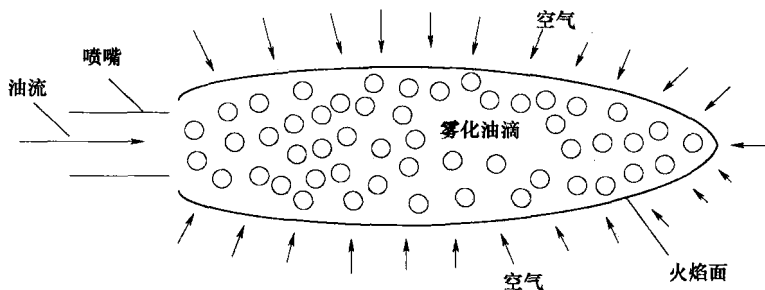


图 1-5 油燃烧器（油枪）火焰示意图

四、液体燃料火焰特性

液体燃料的火焰是扩散火焰。比如，轻油火焰经过以下过程：①雾化：将油柱雾化为小液滴；②蒸发：小液滴表面在高温作用下，蒸发形成油的蒸汽；③燃烧：油蒸气与空气中的氧气混合燃烧，放热，形成高温烟气。

液体燃料燃烧过程:

(1) 油柱变成油雾(空间中的很多小液滴);雾化方法包括:压力雾化、空气雾化、蒸汽雾化。

(2) 油滴蒸发,形成油蒸气。

(3) 油蒸气与空气混合、燃烧,油雾燃烧形成的火焰是扩散火焰。

石油、重油的着火温度:360~400℃。

五、固体燃料火焰特性

1. 热力着火条件

(1) 燃料的放热量等于散热量。

(2) 放热量随着系统温度的变化速率大于散热量随着系统温度的变化速率。

(3) 使 1.0kg 燃料着火,燃料所需要吸收的热量称为着火热。着火热小于燃料的放热量。

2. 动力燃烧、过渡燃烧、扩散燃烧

温度很低(400~500℃)的时候发生的燃烧,氧气的扩散速度大于碳的燃烧速度。此时,制约燃烧反应速度的因素是碳的燃烧速度,为化学反应动力学燃烧,简称动力燃烧。

温度较高(800~1200℃)的时候发生的燃烧,氧气的扩散速度大致相当于碳的燃烧速度。此时,制约燃烧反应速度的因素是碳的燃烧速度和氧气的扩散速度,称为过渡燃烧。

温度很高(1300~1900℃)的时候发生的燃烧,氧气的扩散速度小于碳的燃烧速度。此时,制约燃烧反应速度的因素是氧气的扩散速度,成为扩散燃烧。

煤粉气流在炉膛内的燃烧为扩散燃烧。手烧炉、链条炉、循环流化床锅炉布风板上中煤块、煤粒的燃烧过程为过渡燃烧。循环流化床锅炉的压火燃烧过程为动力燃烧。

3. 煤块的燃烧特性

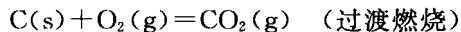
煤块的直径一般在40~60mm,主要用于小容量的手烧炉和链条炉(固定床)。燃烧过程明显地分为四个阶段:①干燥加热,水分析出;②继续加热,挥发分析出并燃烧;③焦炭中碳的燃尽;④灰渣的形成。

煤块火焰的特点是燃烧速度慢,燃烧温度低,属于扩散火焰,温度大约1100℃。

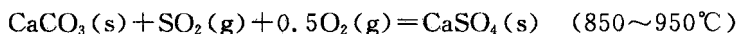
4. 煤粒的燃烧特性

煤粒的直径一般在1~13mm,主要用于循环流化床锅炉。燃烧过程也分为水分析出、挥发分析出着火、固定碳燃尽、灰渣形成4个阶段,但是界限不明显。

煤粒的比表面积大于煤块,燃烧速度较快。煤粒火焰的温度可以更高。循环流化床锅炉采用的运行温度为850~950℃,其原因是保证煤粒着火的稳定性和床层密相区不发生结渣现象。此外,这个温度范围适合于碳酸钙(石灰石的主要成分)脱硫反应的快速进行。



CFB 锅炉脱硫反应



煤粒燃烧形成的火焰也是扩散火焰。

5. 煤粉的燃烧特性

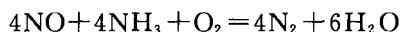
煤粉颗粒的粒径为 $50\sim 90\mu\text{m}$ 。煤粉颗粒的燃烧过程为悬浮燃烧（气力输送过程中的快速燃烧），即煤粉颗粒在炉膛内飞行过程中燃烧、燃尽。煤粉气流的燃烧过程界限不明显：水分、挥发分的析出以及挥发分的燃烧大约在 $1/1000\text{s}$ 之内完，其余 $1.8\sim 2.5\text{s}$ 为焦炭中的固定碳的燃尽过程和飞灰粒子的形成过程。

挥发分的燃烧过程以及焦炭燃烧过程形成的火焰为扩散火焰，因此煤粉颗粒的燃烧过程形成的火焰为扩散火焰。煤粉火焰的燃烧温度在 $1300\sim 1900^\circ\text{C}$ 之间。国内生产的煤粉锅炉绝大部分为固态排渣锅炉，炉膛燃烧温度为 $1400\sim 1500^\circ\text{C}$ 。液态排渣炉的炉膛温度为 $1700\sim 1900^\circ\text{C}$ 。

六、煤粉燃烧反应与烟气脱硫反应、脱硝反应的关系

(1) 煤粉颗粒的燃烧过程中，煤粉颗粒的粒径逐渐降低。石灰石-石膏湿法脱硫过程则是脱硫剂颗粒粒径逐渐增大。脱硝反应为气相反应，其特点不同于气固两相反应。

(2) 燃烧反应的目的是将动力煤的化学能转化为烟气的热能。烟气脱硫、脱硝反应的目的是净化烟气，减少硫氧化物和氮氧化物的排放量。脱硝装置安装在省煤器后，脱硫装置安装在静电除尘器之后。选择性催化还原法（SCR）主要脱硝反应



第五节 亨利定律

一、亨利定律

挥发性溶质的稀溶液中，溶质在气体中的分压与溶质在溶液中的浓度成正比。水蒸气中携带的盐可以近似认为是挥发性溶质，水和水蒸气可以认为是溶剂。汽包中的水可以近似认为是盐的稀溶液。

二、分配定律及其在蒸汽净化中的应用

盐在蒸汽中的溶解度与饱和水中的溶解度之比等于常数。

由于盐在蒸汽中的溶解度很小，因此通过汽水分离过程可以实现蒸汽净化。对于汽包锅炉，来自省煤器的给水的含盐量很低，用省煤器来的给水清洗蒸汽可以净化蒸汽。

蒸汽对盐的溶解度随着压力和温度的提高而提高。因此，对于亚临界压力汽包锅炉，往往不再设置蒸汽清洗装置。

直流锅炉的蒸汽品质主要决定于给水品质，因此给水软化和精处理工艺要求很高。

第六节 CFB 锅炉气固两相流动理论基础

一、基本概念

床料：布风板上的固体颗粒层。其主要成分为循环灰、固体燃料、脱硫剂等。床料粒径为 $1\sim 13\text{mm}$ ，床料厚度为 $350\sim 600\text{mm}$ 。

堆积密度：单位体积内的自然堆放的固体颗粒的质量。

颗粒密度：颗粒的质量与颗粒体积的比值。

空隙率：颗粒之间的间隙所占的容积占颗粒群总容积的份额。

颗粒的球形度：与颗粒体积相同的球体表面积与颗粒表面积的比值。

表观风速：气流通过没有颗粒的通道速度。

颗粒终端速度：颗粒的重力等于气体对颗粒的浮力和摩擦力之和时的颗粒下降速度。

气固分离器：将粒径较大的、含有未燃尽碳的灰颗粒分离下来，是净化烟气的装置。安装在 CFB 锅炉（循环流化床锅炉）炉膛出口。

立管：气固分离器下面的垂直管道，用于将分离下来的固体物料送至回料装置（回料阀）。

回料装置：将物料回送至炉膛的装置，是一个小型的鼓泡流态化装置。由于需要克服 CFB 锅炉炉膛的压力以及立管中料腿高度造成的静压，所以 CFB 锅炉的风压要求很高。

物料：经过气固分离器、立管、灰料装置参与循环的固体颗粒。

物料循环倍率：循环物料流量与固体燃料流量的比值。

夹带：烟气或气流对固体颗粒的携带过程。随着流动过程的进行，一些粒径较大的颗粒在重力作用下回到密相区。

扬析：夹带基础上的完全携带，粒径较小的颗粒在烟气或气流携带下流出 CFB 锅炉炉膛。

颗粒的 Geldart 分类：A 类颗粒：粒径 $20\sim 90\mu\text{m}$ ，易于实现流态化；B 类颗粒：粒径 $90\sim 650\mu\text{m}$ ，易于实现流态化；C 类颗粒：粒径小于 $20\mu\text{m}$ ，不易实现流态化；D 类颗粒粒径大于 $650\mu\text{m}$ ，易于实现流态化。

临界流化速度：从固定床转化为鼓泡床的表观风速。

相：物质的聚集状态。比如固相、液相、气相。当固体颗粒分布在空间中时，这种聚集状态也称为颗粒相。固体、液体的表面和实体也是相，表面是一种相，实体也是一种相。

二、气固两相流动的流型

固体颗粒布置在静止的水平床面上，固体颗粒随着通过床层气体流速（表观风速）的提高逐渐呈现出不同的流动特点。

(1) 气体流速很低时，床层的固体颗粒静止不动：固定床。

(2) 气体流速逐渐提高到一定水平时，床上的固体颗粒层逐渐膨胀，并开始出现“沸腾”现象，此时连续相是固体颗粒，分散相是气泡：鼓泡床。

(3) 当气体流速继续提高到新的水平时，出现颗粒相和气泡并存的现象：湍流流态化。其特点是，颗粒相与气泡并存，是乳化状态的流态化。

(4) 当气体速度进一步提高到新水平时，颗粒相演变成分散相、气泡演变为连续相，流态化呈现出新的特点：床层以上是密相区，密相区以上是稀相区，稀相区以上是气力输送和夹带区。快速流态化：循环流化床锅炉炉膛的流化状态。

(5) 当气体流速足够高时，颗粒随着气流顺畅地流动，整个床层以上的空间成为一个均匀的流动区域，这就是气力输送。煤粉锅炉的炉膛就处在气力输送区。实际上固体颗粒