

DIANL

电力行业继续教育培训教材

火电厂锅炉 运行及事故处理

姚文达 姜凡 编著

HUODIANCHANG GUOLU
YUNXING JI SHIGU CHULI



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

电力行业继续教育培训教材

光纤通信技术及其在电力系统中的应用

电力系统继电保护原理与实用技术

火电厂汽轮机运行与事故处理

- 火电厂锅炉运行及事故处理



ISBN 978-7-5083-4835-3



9 787508 348353 >

定价：47.00 元

销售分类建议：动力工程

电力行业继续教育培训教材

火电厂锅炉 运行及事故处理

姚文达 姜凡 编著

HUODIANCHANG GUOLU
YUNXING JI SHIGU CHULI



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是电力行业继续培训教材,涵盖了现代大型火力发电厂锅炉运行技术各个方面的问题。在运行技术方面的内容有锅炉运行特性,锅炉的启动、正常运行和停炉,负荷调节和调峰运行,并包括了循环流化床锅炉运行和辅助设备的运行。本书另设专题章节,包括燃烧调整、炉内结渣和防治、过热器及再热器的超温、炉内高温腐蚀和低温腐蚀、受热面磨损和故障诊断。理论方面包括汽包热应力及低周疲劳寿命、钢材的高温特性。

本书注重于理论的提高,新知识和新技术的拓宽。本书适合大型火力发电厂中,具有大本或专科水平的锅炉技术工作人员。

图书在版编目(CIP)数据

火电厂锅炉运行及事故处理/姚文达,姜凡编著. 北京:
中国电力出版社, 2007

电力行业继续教育培训教材

ISBN 978-7-5083-4835-3

I. 火... II. ①姚... ②姜... III. ①火电厂-锅炉
运行-技术培训-教材②火电厂-锅炉事故-处理-技术
培训-教材 IV. TM621.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 114365 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 2 月第一版 2007 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 30.25 印张 688 千字

印数 0001—3000 册 定价 47.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

前言

本书是电力行业继续教育培训教材中的一本，是为适应现代大型火力发电厂技术人员再培训的需要而编写的，本书注重于理论知识的提高，新知识和新技术的拓宽，以帮助读者解决锅炉运行中的各种技术问题。

现代大型火力发电厂锅炉运行技术涉及面广，新技术多，而且理论深度较深。在本书的编写过程中，注意到知识的系统性、全面性。为了不增加读者阅读负担，大部分理论知识涵盖在本书范围内。

在锅炉运行技术方面的内容有：锅炉运行特性，锅炉的启动、正常运行和停炉，负荷调节及调峰运行，并包括了循环流化床锅炉及其辅属设备的运行。另设几个专题章节：燃烧调整，炉内结渣和防治，过热器和再热器的超温，炉内的高温腐蚀和低温腐蚀，受热面磨损，故障诊断。在基本理论方面包括：汽包热应力和低周疲劳寿命，钢材的高温特性。为了叙述方便起见，理论方面的内容安排在第三章和第四章。

在本书的编写过程中，注意到定性分析和定量分析相结合，所以在本书第一章、第三章及第九章的第十节中，涉及数学公式较多。对多数读者仅需要注意到其中定性分析，同时知道有定量分析公式存在即可，当实际工作需要定量计算时，再详细阅读。本书在介绍一些定量分析软件时，为了说明软件基本原理，介绍一些微分方程名称，这些方程是理论力学和流体力学的基础知识。

本书主要由华北电力大学（北京）姚文达和中国科学院工程热物理研究所姜凡共同编写完成。其中第十一章和第十二章由华北电力大学（北京）刘彤编写，第三章和第七章由华北电力大学（北京）程金明编写。还有一些内容也是编著者委托他们两人完成。

虽然本书经过多次修改，但由于编著者水平限制，难免有疏漏之处，敬请读者指正。

编著者于华北电力大学

2006年8月

目 录

前言

第一章 锅炉运行特性	1
第一节 锅炉运行参数的变化.....	1
第二节 汽包锅炉运行的静态特性.....	2
第三节 汽包锅炉运行的动态特性	12
第四节 汽包锅炉运行特性模型的建立	17
第五节 直流锅炉运行的静态特性	30
第六节 直流锅炉运行的动态特性	32
第七节 直流锅炉运行特性模型的建立	36
第二章 锅炉正常运行	42
第一节 锅炉运行参数的监控	42
第二节 汽包锅炉运行参数调节	49
第三节 直流锅炉运行参数调节	63
第三章 汽包热应力及低周疲劳寿命	69
第一节 汽包的温度场分布	69
第二节 汽包热应力	71
第三节 汽包低周疲劳寿命	80
第四节 疲劳裂纹扩展	87
第五节 应力腐蚀疲劳	90
第四章 钢材的高温特性	93
第一节 金属的高温蠕变	93
第二节 高温钢材的其他力学性能	97
第三节 蠕变寿命计算.....	100
第四节 高温钢材金相组织、成分的变化和钢材的高温氧化、腐蚀.....	108
第五章 汽包锅炉的启动和停运	114
第一节 单元机组的启动和停运.....	114

第二节	汽包锅炉的启动系统	124
第三节	锅炉启、停过程中受热面的保护	127
第四节	汽包锅炉启、停过程中压力和温度变化速度控制	131
第五节	汽包锅炉启、停过程中的水位	136
第六节	汽包锅炉启动过程中的汽水工况和洗硅	137
第七节	汽包锅炉启动和停运的基本程序	138
第六章	直流锅炉的启动和停运	141
第一节	直流锅炉启动旁路系统	141
第二节	直流锅炉的启动工况	147
第三节	直流锅炉启动过程的控制	150
第四节	外置式启动分离器的切除	153
第五节	直流锅炉启动和停运的基本程序	155
第七章	单元机组的负荷调节及调峰运行	159
第一节	单元机组负荷调节方式和控制方式	159
第二节	单元机组调峰滑压运行	164
第三节	锅炉特性对滑压运行的影响	169
第八章	循环流化床锅炉的运行	174
第一节	概述	174
第二节	循环流化床锅炉的点火、启动与停运	183
第三节	循环流化床锅炉运行特性	201
第四节	循环流化床锅炉的运行调节	212
第五节	循环流化床锅炉运行问题的处理	218
第六节	循环流化床锅炉磨损的防治	221
第九章	制粉系统的运行	225
第一节	制粉系统的启动和停运	225
第二节	制粉系统的运行调节	232
第三节	中速磨煤机运行中的一些问题	246
第十章	泵与风机的运行	250
第一节	炉水循环泵的启动和运行	250
第二节	泵和风机的运行和调节	255
第三节	泵和风机的故障处理	268

第十一章	煤粉锅炉燃烧调整、燃烧监控和调节	277
第一节	燃煤特性对锅炉燃烧的影响	277
第二节	四角切圆燃烧锅炉的燃烧调整	290
第三节	旋流燃烧器锅炉的燃烧调整	306
第四节	W 型火焰锅炉的燃烧调整	316
第五节	低 NO_x 燃烧控制技术	320
第六节	炉膛爆燃和预防	327
第七节	炉膛燃烧的安全监控	331
第八节	煤粉燃烧器的点火、熄火和灭火判断	334
第九节	锅炉燃烧的自动调节	343
第十节	数值模拟计算在锅炉燃烧调整中的应用	348
第十二章	炉内结渣及防治措施	353
第一节	煤灰特性对炉内结渣的影响	353
第二节	炉内结渣的预测	356
第三节	炉内结渣的监控	362
第四节	炉内结渣的防治措施	366
第十三章	过热器和再热器受热面的超温	369
第一节	受热面的热偏差	369
第二节	管壁温度的计算方法	380
第三节	炉膛出口烟温偏差和气流偏斜的防治	386
第四节	联箱之间平行工作管屏流量不均的防治	396
第五节	炉膛和其出口处受热面结渣防治	402
第十四章	炉内的高、低温腐蚀	404
第一节	煤的成分对炉内高、低温腐蚀的影响	404
第二节	高温腐蚀机理和类型	406
第三节	高温腐蚀的防治	416
第四节	低温腐蚀的原理	418
第五节	低温腐蚀的防治	422
第十五章	受热面的磨损	426
第一节	对流受热面飞灰磨损的原理及计算	426
第二节	影响对流受热面飞灰磨损的因素	428
第三节	受热面磨损的防治	434

第十六章 故障诊断与处理 438

 第一节 故障诊断简述 438

 第二节 锅炉故障特征的提取 439

 第三节 锅炉燃烧的故障诊断技术 446

 第四节 锅炉过热器、再热器和高温部件的故障诊断技术 456

 第五节 专家系统简述 466

 第六节 在线监测和故障诊断在锅炉运行中的应用 471

 第七节 离线监测和故障诊断在锅炉运行中的应用 472

参考文献 475

第一章 锅炉运行特性

第一节 锅炉运行参数的变化

锅炉正常运行是指机组启动后锅炉的运行过程。锅炉的运行状态是通过一系列仪表所测试的运行参数来反映的,其中主要监视或控制的运行参数有主蒸汽流量、主蒸汽压力、主蒸汽温度、再热蒸汽温度、锅炉汽包水位、炉膛出口过量空气系数(含氧量)、炉膛负压等。锅炉正常运行工作就是监视和调整各种运行参数,以满足汽轮发电机组对锅炉运行参数的要求,并保持锅炉能长期连续的安全、经济运行。

随着时间的变化,锅炉运行中各种参数一直保持不变的工况,称为稳定工况。但实际上,绝对稳定工况是不存在的,只要运行参数在很小范围内波动,都可以认为运行参数基本稳定。由一个稳定工况到另一个稳定工况的运行过程,称为过渡过程。在过渡过程中,锅炉的运行参数随着时间的变化而变化,称为不稳定工况。

在运行过程中,常有各种因素干扰锅炉稳定运行。来自锅炉机组输入条件或参数变化因素的干扰,称为内扰,如燃料性质的改变以及燃料量、空气量、给水流量、给水温度等因素的变化。来自锅炉机组输出参数变化因素的干扰,称为外扰,如主蒸汽流量、主蒸汽压力、主蒸汽温度、锅炉排污量等因素的变化。

锅炉运行中各种参数之间的关系和变化规律,称为锅炉的运行特性。运行特性可分为静态特性和动态特性。在各种稳定工况的条件下,某些参数之间确定的变化规律,即为静态特性。在过渡过程中,各种运行参数随着时间变化的方向、历程和速度,即为动态特性。

锅炉在运行过程中由于各种干扰,运行参数会发生变化。为了保证汽轮发电机组能满足外界负荷的需要,并保证机组连续、安全、经济运行,需对锅炉运行参数进行调整、控制和连续监视。无论是静态过程或是动态过程,锅炉正常运行的任务就是必须保证各种参数都在允许的范围内波动。除此以外,锅炉正常运行必须保证炉内燃烧稳定,防止受热面积渣、积灰,防止高温和低温腐蚀,防止受热面金属管壁超温,维持锅炉正常水位,维持正常炉水含盐量和蒸汽品质等工作。

第二节 汽包锅炉运行的静态特性

汽包锅炉包括两种类型：自然循环锅炉和控制循环锅炉。对锅炉运行静态特性的了解是运行人员必须熟悉最基本常识。汽包锅炉运行的静态特性可以从以下几个方面来分析。

一、锅炉负荷的变化

锅炉机组的负荷必须适应外界负荷的要求。锅炉在不同负荷下所造成的影响，以及对各种参数的影响可作如下分析。

(一) 对燃料消耗量的影响

为了分析锅炉负荷大小对燃料消耗量的影响，不考虑中间再热和锅炉排污，从锅炉热平衡可得到式 (1-1)

$$B = \frac{D_{gr}(h_{gr} - h_{gs})}{Q_{sr}\eta_r} \quad (1-1)$$

式中 B —— 锅炉燃料消耗量, kg/s;

D_{gr} —— 过热蒸汽流量, kg/s;

h_{gr} —— 过热蒸汽的比焓, kJ/kg;

h_{gs} —— 给水的比焓, kJ/kg;

Q_{sr} —— 燃料的输入热, kJ/kg;

η_r —— 锅炉热效率, %。

当锅炉负荷变化时, 假定 η_r 不变, 而且 Q_{sr} 、 h_{gr} 、 h_{gs} 都不变化, 由式 (1-1) 可知, 燃料消耗量与过热蒸汽流量 (负荷) 成正比增加

$$\frac{B_2}{B_1} = \frac{D_{gr,2}}{D_{gr,1}} \quad (1-2)$$

式中 B_1 —— 对应小负荷 $D_{gr,1}$ 下锅炉实际燃料消耗量, kg/s;

B_2 —— 对应大负荷 $D_{gr,2}$ 下锅炉实际燃料消耗量, kg/s。

但随着负荷的变化, 锅炉热效率会稍有变化。当负荷小于锅炉的经济负荷时, 比值

B_2/B_1 略小于 $D_{gr,2}/D_{gr,1}$; 反之, 当负荷大于锅炉的经济负荷时, 比值 B_2/B_1 略大于 $D_{gr,2}/D_{gr,1}$ 。由于负荷对热效率的影响较小, 在一般的分析中, 可认为式 (1-2) 是正确的。

(二) 对锅炉对流烟道内烟气温度分布的影响

锅炉负荷对锅炉对流烟道内烟气温度分布的影响如图 1-1 所示。图中 $D_{gr,2} > D_{gr,1}$, 高负荷和低负荷时炉膛出口烟温差值 ΔT_{lt} 大于锅炉出口排烟温度差值 ΔT_{py} 。炉膛出口烟温变化幅度较大, 而随着烟气流过各个对流受热面后, 烟气温度变化缓慢。对每一

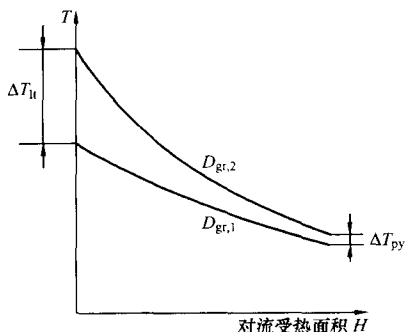


图 1-1 锅炉负荷对锅炉对流烟道内烟气温度分布的影响

组对流受热面, 进口烟温变化值 $\Delta T'$ 大于出口烟温变化值 $\Delta T''$, 这是负荷变化另一个特性。

(三) 对辐射传热量的影响

锅炉负荷对炉内辐射传热量的影响, 对于定性分析, 可根据炉内烟气热平衡公式和古尔维奇炉内传热公式来进行。在定性分析中, 通常用相对微增量来表示。通过对烟气热平衡公式和古尔维奇公式进一步推导, 可得式 (1-3)

$$\frac{\Delta Q_f}{Q_f} = -0.6 \left(\frac{T_{lt}''}{T_a} \right) \left(\frac{\Delta D_{gr}}{D_{gr}} \right) \quad (1-3)$$

式中 ΔQ_f ——相对 1kg 燃料炉膛辐射传热量的微增量, kJ/kg;

Q_f ——相对 1kg 燃料炉内辐射传热量, kJ/kg;

T_{lt}'' ——炉膛出口烟气温度, K;

T_a ——理论 (绝热) 燃烧温度, K;

ΔD_{gr} ——锅炉负荷微增量, kg/s。

进一步求得相对单位时间辐射传热量的变化

$$\frac{\Delta(B_j Q_f)}{B_j Q_f} = (1 - 0.6) \left(\frac{T_{lt}''}{T_a} \right) \left(\frac{\Delta D_{gr}}{D_{gr}} \right) \quad (1-4)$$

也可得到炉膛出口温度微增量的计算公式

$$\frac{\Delta T_{lt}''}{T_{lt}''} = 0.6 \left(\frac{T_a - T_{lt}''}{T_a} \right) \frac{\Delta D_{gr}}{D_{gr}} = K_D \frac{\Delta D_{gr}}{D_{gr}} \quad (1-5)$$

$$K_D = 0.6(T_a - T_{lt}'')/T_a$$

式中 K_D ——有关系数, 其物理意义为燃料完全燃烧所释放的热量中炉内辐射传热所占的份额, 由锅炉热力计算表明, 对于一般固态煤粉炉, K_D 可视为常数, 取 $K_D = 0.2$ 。

T_a 取决于燃料的性质、过量空气系数、热空气温度等。当负荷下降时, 燃料的性质和过量空气系数不变, 而热空气温度略有下降。图 1-2 所示为锅炉负荷对各种因素的影响。

根据图 1-2 可知, 随着负荷的增加, 理论燃烧温度变化很小, 可忽略不计。由式 (1-5) 可知, 随着负荷的增加, 炉膛出口烟温增高, 再由式 (1-4) 可知, 随着负荷的增加, 相对单位时间辐射传热量虽然增加, 但由式 (1-3) 可知相对 1kg 燃料辐射传热量却是减少的。对锅炉静态特性作定性分析时, 上述结论是重要依据, 被称为辐射特性。

从式 (1-5) 可知, 在燃料完全燃烧所释放的热量中, 炉内辐射传热所占的份额越大, 负荷变化对炉膛出口烟温的影响也越大。因此, 当锅炉负荷增加时, 对相对单位时间辐射传热量的升高幅度越大, 但相对 1kg 燃料辐射传热量的降低幅度也越大。

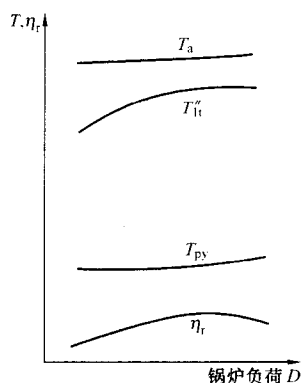


图 1-2 锅炉负荷对各种因素的影响

(四) 对锅炉对流传热量的影响

根据对流受热面传热基本公式, 相对 1kg 燃料, 对流受热面的传热量可通过式(1-6)来分析

$$\frac{\Delta Q_d}{Q_d} = \frac{\Delta K}{K} + \frac{\Delta(\Delta t)}{\Delta t} - \frac{\Delta D_{gr}}{D_{gr}} \quad (1-6)$$

式中 ΔQ_d ——相对 1kg 燃料对流受热面传热量的微增量, kJ/kg;

Q_d ——相对 1kg 燃料对流受热面的传热量, kJ/kg;

ΔK ——对流传热系数微增量, kJ/(m²·s·℃);

K ——对流传热系数, kJ/(m²·s·℃);

$\Delta(\Delta t)$ ——对流传热温压微增量, ℃;

Δt ——对流传热温压, ℃。

相对每小时对流受热面的传热量可通过式(1-7)来分析

$$\frac{\Delta(B_j Q_d)}{B_j Q_d} = \frac{\Delta K}{K} + \frac{\Delta(\Delta t)}{\Delta t} \quad (1-7)$$

当锅炉负荷变化时, 在对流受热面中, 可以认为其内部工质温度的变动远小于烟气温度的变动, 因此有

$$\frac{\Delta(\Delta t)}{\Delta t} = \frac{\Delta t_{y,av}}{t_{y,av}} \quad (1-8)$$

式中 $t_{y,av}$ ——对流受热面中平均烟气温度, ℃;

$\Delta t_{y,av}$ ——负荷变化时烟气温度的变动量, ℃。

根据对流传热系数基本公式, 同时, 对于过热器和再热器, 其烟气侧热阻远大于工质侧热阻, 工质侧热阻可以忽略, 只考虑烟气侧热阻。对流传热系数相对微增量可写成

$$\frac{\Delta K}{K} = \frac{\Delta \alpha_d + \Delta \alpha_f}{\alpha_d + \alpha_f} \quad (1-9)$$

式中 α_d ——对流表面传热系数, kJ/(m²·s·℃);

α_f ——辐射表面传热系数, kJ/(m²·s·℃);

$\Delta \alpha_d$ ——对流表面传热系数微增量, kJ/(m²·s·℃);

$\Delta \alpha_f$ ——辐射表面传热系数微增量, kJ/(m²·s·℃)。

由锅炉热力计算可知: α_d 应与 $Re^{0.65}$ 成正比, 即与烟气流速 $w^{0.65}$ 成正比, 而烟气流速又与烟气平均温度成正比, 因此有

$$\frac{\Delta \alpha_d}{\alpha_d} = 0.65 \left(\frac{\Delta D_{gr}}{D_{gr}} + \frac{\Delta t_{y,av}}{t_{y,av}} \right) \quad (1-10)$$

对于燃煤锅炉, 由锅炉热力计算可知, α_f 应与 $t_{y,av}^4$ 成正比, 因此可得

$$\frac{\Delta \alpha_f}{\alpha_f} = 4.0 \left(\frac{\Delta t_{y,av}}{t_{y,av}} \right) \quad (1-11)$$

根据式(1-5), 随着锅炉负荷增高, 炉膛出口烟温上升, 对流受热面中烟气温度水平提高, 由式(1-8)可知, 传热温压也随之提高, 同时, 随着锅炉负荷的增高, 由式

(1-10) 和式 (1-11) 可知, 对流表面传热系数和辐射表面传热系数都随之增高, 也即对流传热系数增大。因此随着锅炉负荷增高, 由于 $\Delta(\Delta t)/\Delta t$ 以及 $\Delta K/K$ 的增大, 由式 (1-7) 可知, 促使相对每小时的对流受热面传热量上升。

由式 (1-6) 可知, 相对于 1kg 燃料的对流受热面传热量对锅炉负荷的影响应当从两方面来分析。一方面, 随着锅炉负荷的增高, 相对每小时的对流受热面传热量上升, 对相对 1kg 燃料的对流受热面传热量也应上升, 这方面因素占主导地位。另一方面, 随着锅炉负荷的增高, 燃料消耗量增大, 由式 (1-6) 可知, 促使相对 1kg 燃料的对流受热面传热量下降, 这方面因素占次要地位。综合以上两个方面的因素, 随着锅炉负荷的增高, 促使相对 1kg 燃料的对流受热面传热量上升。对锅炉静态特性作定性分析时, 此结论是重要依据, 被称为对流特性。

(五) 对锅炉的辐射传热量与对流传热量份额的影响

锅炉的受热面主要是由管子组成的, 因管壁金属材料导热系数很大, 管壁很薄, 管壁的热阻相对很小, 可以忽略不计。因此, 在锅炉内, 受热面传热方式有两种: 辐射传热和对流传热。布置在炉膛内的受热面以辐射传热为主, 称为辐射受热面; 布置在对流烟道内的受热面对流传热为主, 称为对流受热面。可以以炉膛出口为界, 布置在炉膛内受热面所吸收的热量为辐射传热量, 布置在对流烟道内各个受热面所吸收的热量为对流传热量。

根据锅炉热力计算烟气热平衡公式可知, 辐射传热量与对流传热量各占有份额, 份额的多少主要取决于炉膛出口烟气温度。

辐射传热量占锅炉总传热量的份额为

$$\frac{Q_{fs}}{Q_{fs} + Q_{dl}} = \frac{(\overline{Vc_p})_{fs}(T_a - T''_h)}{(\overline{Vc_p})_{fs}(T_a - T''_h) + (\overline{Vc_p})_{dl}(T''_h - T_{py})} \quad (1-12)$$

对流传热量占锅炉总传热量的份额为

$$\frac{Q_{dl}}{Q_{fs} + Q_{dl}} = \frac{(\overline{Vc_p})_{dl}(T''_h - T_{py})}{(\overline{Vc_p})_{fs}(T_a - T''_h) + (\overline{Vc_p})_{dl}(T''_h - T_{py})} \quad (1-13)$$

式中 Q_{fs} ——1kg 燃料炉膛辐射传热量, kJ/kg;

Q_{dl} ——1kg 燃料对流烟道内各个受热面的对流传热量, kJ/kg;

$(\overline{Vc_p})_{fs}$ ——1kg 燃料炉膛内烟气的平均热容量, kJ/(kg·K);

$(\overline{Vc_p})_{dl}$ ——1kg 燃料对流烟道内烟气的平均热容量, kJ/(kg·K)。

由式 (1-12) 和式 (1-13) 可知, 当锅炉负荷增加时, 理论燃烧温度几乎不变, 而炉膛出口烟气温度上升, 辐射传热量占锅炉总传热量的份额降低。由图 1-1 可知, 当锅炉负荷增加时, 炉膛出口烟气温度上升剧烈, 而锅炉排烟温度上升缓慢, 对流传热量占锅炉总传热量的份额升高。

(六) 对锅炉热效率的影响

锅炉负荷变化, 热效率也随之变化。当锅炉热效率达到最高值时, 所对应的锅炉负荷称为经济负荷。在高于经济负荷时, 负荷降低, 由于锅炉排烟热损失减少, 热效率提高; 在低于经济负荷时, 负荷继续降低, 由于炉膛温度水平下降, 未完全燃烧热损失增加, 锅

炉热效率反而减低。

综合以上五个因素，当锅炉负荷变化时，静态特性曲线如图 1-2 所示。第一条曲线为理论燃烧温度变化曲线，随着锅炉负荷的增加，理论燃烧温度增大得比较少，变化较平坦，这是由于负荷增高，热空气温度增加很小的缘故。第二条曲线为炉膛出口烟气温度的变化曲线，随着锅炉负荷的增加，炉膛出口烟温随之增高，有较为明显的变化。第三条曲线为锅炉排烟温度曲线，随着锅炉负荷的增加，锅炉排烟温度随之增大，但变化比较缓慢。

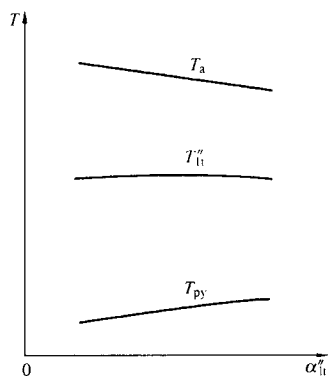


图 1-3 炉膛出口过量空气系数对炉内烟气温度分布的影响

当锅炉负荷变化时，对布置在炉膛内的辐射受热面或布置在对流烟道内的对流受热面的吸热量都有影响。随着锅炉负荷的增加，对于辐射受热面，相对每小时的吸热量变增加，而相对 1kg 燃料的吸热量减少；对于对流受热面，相对每小时的吸热量变增加，而相对 1kg 燃料的吸热量也是增加的。

二、炉膛出口过量空气系数的变化

炉膛出口过量空气系数的变化意味着锅炉送风量的变化，也会改变辐射传热量和对流传热量。

(一) 对炉内烟气温度分布的影响

炉膛出口过量空气系数对理论燃烧温度、炉膛出口烟气温度以及锅炉的排烟温度的影响，如图 1-3 所示。

炉膛出口过量空气系数 α_h'' 的增加使理论燃烧温度略有降低，可以由下列公式分析得到。

首先，采用近似公式 $V_y = \alpha_h'' V_y^0$ ，根据理论燃烧温度的定义和近似公式，随着炉膛出口过量空气系数的增加，理论燃烧温度下降，可近似写成

$$\Delta T_a = - J_a \frac{1}{(\Delta \alpha_h'')^2} \quad (1-14)$$

式中 J_a ——与燃煤性质和热空气温度有关的系数，对具体锅炉和固定煤种可视为常数；

$\Delta \alpha_h''$ ——炉膛出口过量空气系数微增量。

由于随着炉膛出口过量空气系数增加，理论燃烧温度下降，炉膛温度水平随之下降，相对 1kg 燃料的炉膛辐射吸热量降低，所以，虽然理论燃烧温度下降，但炉膛出口烟气温度几乎不变。如图 1-3 中第二条曲线所示，因为 $\Delta T_h'' < \Delta T_a$ ，锅炉正常运行时，可以认为炉膛出口烟气温度不变，即 $\Delta T_h'' = 0$ 。

(二) 对炉膛内辐射传热量的影响

根据炉膛烟气热平衡公式并考虑到式 (1-14)，可以得到

$$\Delta Q_f = \varphi V_y^0 c_{y,av} (T_a - T_h'') \cdot \Delta \alpha_h'' - \varphi \alpha_h'' V_y^0 c_{y,av} J_a \frac{1}{(\Delta \alpha_h'')^2} \quad (1-15)$$

$$\varphi = 1 - q_5 / (\eta_r + q_5)$$

式中 φ ——保热系数；

q_5 ——锅炉散热损失，%。

又由于 $\Delta\alpha''_{lt} < 1$ ，在式 (1-15) 等号右侧，第二项远大于第一项，即

$$\varphi V_y^0 c_{y,av} (T_a - T''_{lt}) \cdot \Delta\alpha''_{lt} \ll \varphi \alpha''_{lt} V_y^0 c_{y,av} J \frac{1}{(\Delta\alpha''_{lt})^2} \quad (1-16)$$

所以 ΔQ_l 和 $\Delta\alpha''_{lt}$ 前的正负号恰恰相反，即当炉膛出口过量空气系数增加，而相对 1kg 燃料的炉膛辐射吸热量降低。

炉膛和制粉系统的漏风风温很低。漏风增加，同样是炉膛出口过量空气系数加大，但漏风增加影响幅度，比送风量增加影响幅度大。

(三) 对对流传热量的影响

炉膛出口过量空气系数的变化对锅炉对流烟道内受热面吸热量的影响，仍可应用式 (1-6) 来分析。进入对流烟道的烟温，即为炉膛出口烟气温度。当炉膛出口过量空气系数变化时，炉膛出口烟气温度基本不变。首先粗略分析时，可以认为传热温压不变，锅炉燃料消耗量不变。

当炉膛出口过量空气系数增加时，相对 1kg 燃料烟气体积 V_y 增大，锅炉对流烟道内受热面的烟气流速 $\Delta w_y/w_y$ 上升。对流表面传热系数 $\Delta\alpha_d/\alpha_d$ 提高，则对流受热面传热系数 $\Delta K/K$ 增大，对流传热量 $\Delta Q_d/Q_d$ 增加。

不仅如此，炉膛出口过量空气系数增加，由于在对流烟道内烟气的平均热容量 $V_y c_{y,av}$ 加大，虽然受热面的对流传热量增加，但其出口烟气温度增高。所以，如图 1-3 所示，排烟温度增大。因此，在对流烟道内，每一组受热面的温度水平上升，对流传热温压 $\Delta(\Delta t)/\Delta t$ 也略有提高，也会使对流传热量 $\Delta Q_d/Q_d$ 增加。

锅炉对流烟道的漏风对对流传热量的影响，取决于漏风的位置。漏风点的位置对烟道烟气温度分布的影响如图 1-4 所示。图中横坐标为沿烟气流程的长度，曲线 1 为无漏风时，对流烟道中烟气温度分布，曲线 2 为 a 点处发生漏风时，对流烟道中烟气温度分布改变曲线。若漏风的位置接近于炉膛出口，由于漏风使该处的烟气温度降低， a 点处温度降低 Δt ，则使对流传热量减少，随着烟气的流动，烟气温度降低的幅度逐渐减少，当到达 b 点时，烟气温度恢复到无漏风时烟气的温度分布点。在 b 点之后，由于漏风使该处的烟气温度升高，则使对流传热量增加。

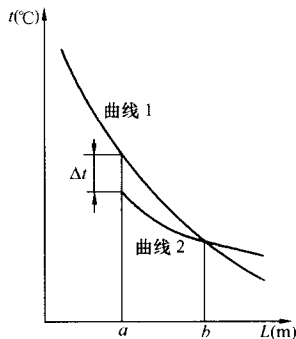


图 1-4 漏风点的位置对烟道烟气温度分布的影响

炉膛出口过量空气系数的变化对锅炉热效率也有影响。当炉膛出口过量空气系数小于最佳炉膛出口过量空气系数时，炉膛出口过量空气系数的增加是有利的，否则是不利的。

三、锅炉给水温度的变化

在蒸汽轮机的辅助系统中，由于高压加热器运行状态的变化，可能引起锅炉给水温度发生很大变化，汽轮机负荷的变化也会引起给水温度的波动。锅炉给水温度的变化会影响其他参数的变化。

(一) 对锅炉燃料消耗量的影响

由式(1-1)可知,当锅炉给水温度降低,给水焓下降。相对1kg燃料输入热量不变,假定锅炉热效率也不变。相对1kg蒸汽的燃料消耗量 $B/D_{\text{汽}}$ 增加。锅炉负荷不变时,锅炉燃煤量增大。

(二) 对辐射受热面和对流受热面吸热量的影响

锅炉给水温度降低,锅炉燃煤量增大。炉膛内烟气温度水平提高,炉内辐射传热量增大,同时,炉膛出口烟气温度上升,烟气流量加大,锅炉对流烟道内受热面的烟气流速 $\Delta w_y/w_y$ 上升。对流表面传热系数 $\Delta \alpha_d/\alpha_d$ 提高,则对流受热面传热系数 $\Delta K/K$ 增大,对流传热量 $\Delta Q_d/Q_d$ 增加。同时,每一组受热面的温度水平上升,对流传热温压 $\Delta(\Delta t)/\Delta t$ 也有提高,也会使对流传热量 $\Delta Q_d/Q_d$ 增加。

(三) 对锅炉热效率的影响

当锅炉给水温度降低时,省煤器对流传热温压提高,省煤器对流吸热量加大。锅炉排烟温度降低,热效率提高,但锅炉热效率提高缓慢。

四、燃料特性的变化

燃煤特性对锅炉运行的影响很大。首先是燃煤的挥发物含量的影响,当挥发物含量减小,锅炉燃烧效率降低,锅炉在低负荷运行时容易造成燃烧不稳定,甚至发生锅炉灭火事故。

当挥发物含量大小发生变化时,也会引起炉膛火焰中心位置的改变,从而引起过热蒸汽温度和再热蒸汽温度的变化。

当燃用容易结渣的煤种时,将会给锅炉正常运行造成很大的困难。当燃用灰分很高的劣质煤时,锅炉受热面磨损严重,容易发生锅炉爆管事故。

当燃煤水分含量发生变化时,不但影响锅炉的着火和燃烧,还直接影响锅炉热效率,而且还会改变锅炉各处烟气温度的分布。如图1-5所示,燃煤水分含量的变化,对锅炉各处烟气温度的分布的影响,与炉膛出口过量空气系数变化的影响相类似。但由于水蒸气的比热容远大于空气的比热容,燃煤水分含量的变化对锅炉各处的烟气温度的分布的影响更加显著。

由图1-5可知,燃煤水分增加,理论燃烧温度下降得更剧烈,如图1-5中 T_a 曲线。由于温度水平的下降,炉内辐射传热量减少,炉膛出口烟气温度也会有所降低,如图1-5中 T_1' 曲线。对于辐射式过热器或辐射式再热器,辐射传热量降低,出口蒸汽温度下降。

对流烟道内的对流受热面,燃煤水分增加,烟气容积加大,锅炉对流烟道内受热面的烟气流速 $\Delta w_y/w_y$ 上升。对流表面传热系数 $\Delta \alpha_d/\alpha_d$ 提高,则对流受热面传热系数 $\Delta K/K$ 增大,对流传热量 $\Delta Q_d/Q_d$ 增加。对于对流式过热器或对流式再热器,出口蒸汽温度上升。

当燃煤水分变化时,对锅炉热效率影响很大。当燃煤水分增加,一方面,由于炉膛温度水平下降,固体和气体未完全燃烧热损失增加,如图1-5中 q_{3+4} 曲线;另一方面,由

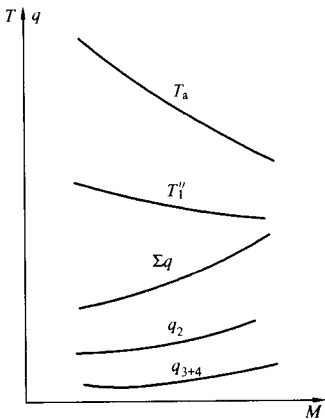


图1-5 燃煤中水分含量的影响