

TK233.2
758Q

高等学校教材

锅炉燃烧试验研究方法 及测量技术

浙江大学 岑可法 主编

水利电力出版社

Tk223.2
758Q

高等学校教材

锅炉燃烧试验研究方法
及测量技术

浙江大学 岑可法 主编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书是作者根据国内外丰富的研究资料, 结合自己多年从事锅炉燃烧试验研究的成果和教学实践的经验编写而成的一本教材, 同时又是指导锅炉燃烧试验研究和生产运行的一本很好的科技图书。本书内容着重介绍锅炉燃烧试验研究的各种方法和有关的测量技术及数据处理。

本书既可作高等学校热能动力专业高年级学生教材, 又可供研究生、从事锅炉试验研究的人员和广大工程技术人员阅读参考。

高等学校教材

锅炉燃烧试验研究方法及测量技术

浙江大学 李可洪 主编

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行, 各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 20.5印张, 458千字

1987年10月第一版 1987年10月北京第一次印刷

印数0001—7100册

前 言

我国有几十万台电站锅炉和工业锅炉。为了节约燃料，适应煤种、负荷的变化，以及提高燃烧过程的经济性和稳定性，都需对锅炉燃烧过程进行专门测量和试验研究，以便发现问题，寻求解决措施，提出合理的设计方案和较佳的运行方式，这将对我国能源事业的发展有重要意义。为此，我们根据国内外积累的资料，结合近年来锅炉燃烧试验研究的实践，编写了这本书，主要供高年级大学生、研究生和从事锅炉试验研究及运行的广大工程技术人员参考。

限于篇幅，本书内容只包括燃煤锅炉的燃烧试验研究，前五章主要探讨锅炉燃烧的试验研究方法，后七章着重讨论有关锅炉燃烧的测量技术及测量数据处理。本书的初稿曾先后三次在全国性锅炉试验方法及测量技术研讨班上作为教材使用；国内电力部门，有关厂、研究所和高等院校曾对本书初稿提出过很多宝贵意见；同时，对本书的编写，水利电力部热动力类教材编审委员会锅炉教材编审组曾多次讨论和指导，使本书内容进一步充实和完善。在此，表示深切的谢意。此外，本书在编写过程中得到了浙江大学燃烧与传热工程教研室全体老师的支持，在不少地方引用了他们的科研成果，有些成果还是初次发表的，没有他们的合作是很难完成本书的。

本书由岑可法主编，其中第一、九章及§ 11-4和§ 11-5由曹源泉同志编写，第六、七、十章及§ 12-1至§ 12-4由袁镇福同志编写，第八章和§ 11-1至§ 11-3由曹欣玉同志编写，第二、三、四、五章由岑可法同志编写，§ 12-5由岑可法、严建华同志编写。全书承重庆大学王致均教授主审，并提出了很多宝贵意见，在此深表感谢。

尽管我们力图把燃烧理论和锅炉试验研究相结合，但限于水平，只能作些定性分析，错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编著者

1985年11月于浙江大学

目 录

前言

主要符号

第一章 锅炉热平衡试验	1
§ 1-1 热平衡试验的目的与任务.....	1
§ 1-2 热平衡试验的准备工作.....	1
一、试验的组织与准备工作的内容.....	1
二、试验大纲的一般内容.....	1
三、测量项目、测量方法及测点位置.....	2
§ 1-3 热平衡试验的技术条件.....	4
一、试验负荷的选择.....	4
二、煤质与主要参数的允许波动范围.....	4
三、试验前的稳定阶段与试验持续时间.....	4
§ 1-4 试验数据的整理与试验报告.....	5
一、数据的整理.....	5
二、试验报告.....	5
§ 1-5 锅炉的热平衡计算.....	6
一、输入热量 Q_1	7
二、锅炉的有效利用热 Q_2	7
三、排烟热损失 q_2	8
四、化学不完全燃烧热损失 q_3	9
五、机械不完全燃烧热损失 q_4	9
六、散热损失 q_5	10
七、灰渣物理热损失 q_6	11
八、锅炉效率.....	11
§ 1-6 国外锅炉热效率计算方法概述.....	15
一、锅炉热效率计算的基准.....	15
二、ASME标准的热效率计算方法.....	15
第二章 炉内模化技术及冷炉试验方法	25
§ 2-1 炉内模化的目的及自模化区的确定.....	25
§ 2-2 炉内冷态模化原理.....	27
§ 2-3 炉内热态模化原理.....	30
一、燃烧器畸形模化方法(或称Thring-Newby法).....	31
二、燃烧器放大后移加炉底风的热态模化法.....	32

三、冷炉试验时的近似热态模化法	37
§ 2-4 气固两相模化理论基础	38
一、燃料颗粒在气流中的受力分析	38
二、两相流动的相似准则	41
三、两相模化技术	43
§ 2-5 模化试验中的若干观测技术	46
§ 2-6 研究混合过程的热平衡方法	47
第三章 旋流式燃烧器的试验研究方法	49
§ 3-1 旋流式燃烧器的试验特性参数及旋流强度的决定	49
一、旋流式燃烧器调试的要求及有关试验特性参数	49
二、燃烧器旋流强度的确定	49
§ 3-2 旋流强度对燃料着火过程影响的试验	58
一、煤粉的着火温度 t_f	58
二、着火与煤粉中挥发分的关系	60
三、加热煤粉至着火的主要热源分析	61
四、稳定着火所必需的最小烟气回流量计算	62
五、燃烧器旋流强度和烟气回流量的关系	63
§ 3-3 旋流式燃烧器的空气动力特性对燃料燃烧影响试验	66
§ 3-4 旋流式燃烧器热态试验的总结方法	69
一、烟量平衡	70
二、碳量平衡	70
三、过量空气系数	71
四、各测量截面的未燃尽程度	72
五、局部容积热负荷及局部截面热负荷	72
六、测量截面处燃料的放热量和吸热量	73
七、沿测量截面几个平均参数的计算	73
第四章 四角布置直流燃烧器的调试	74
§ 4-1 四角布置直流燃烧器调试的一般原理	74
一、四角布置直流燃烧器炉膛的形式	74
二、四角布置直流燃烧器的空气动力结构	74
三、关于直流燃烧器射流的刚性	77
四、四角布置直流燃烧器冷热态炉内空气动力特性的差异	80
五、四角布置直流燃烧器的着火特性	83
§ 4-2 四角布置直流燃烧器调试的方法	84
一、投产前或大修后的冷态调整试验	84
二、四角配风均匀性试验	85
三、煤粉分布均匀性试验	86
四、煤粉细度对燃烧影响的试验	91
五、炉内过量空气系数的调整	91

六、四角布置直流燃烧器的停投方式试验	91
七、单个直流燃烧器的热态试验调整	91
八、过热汽温的调节	91
§ 4-3 燃烧劣质煤时的调试问题	92
一、劣质煤燃烧的特点	92
二、一、二次风布置形式和风量分配的调整	92
三、关于周界风和夹心风的调试	94
四、关于切圆直径 d_0 的调试	96
五、钝体燃烧器在劣质煤燃烧中的应用	97
六、关于三次风的调试	99
七、关于炉内卫燃带的装置问题	100
八、关于过热汽温的调试	100
九、燃用劣质煤时防止结焦的调试	100
第五章 炉内沾污、结渣、积灰的试验研究方法	102
§ 5-1 炉内辐射受热面的沾污、结渣及腐蚀过程	102
一、研究炉内辐射受热面结渣、沾污的意义	102
二、炉内水冷壁沾污、结渣及腐蚀过程的机理	105
§ 5-2 结渣、沾污对炉内传热和运行影响的各种参数	111
§ 5-3 结渣、沾污对炉内传热和运行影响的工业试验方法	114
一、测量炉膛出口烟温 T'_g 的近似总结法	114
二、综合系数的总结法	117
三、测量炉内温度场及炉膛出口烟温的总结方法	117
四、测量炉膛出口烟温及水冷壁热有效系数 ψ	117
§ 5-4 沾污、结渣的专门性试验方法	117
一、灰渣熔点及粘度试验	118
二、试验室结渣、沾污专门试验台架	118
三、在锅炉中装设小型旁通烟道的试验方法	119
四、根据煤灰烧结强度来衡量煤灰沾污特性	119
五、根据煤灰成分来判断其结渣及沾污特性	119
六、利用热流计来试验沾污和积灰过程	121
§ 5-5 尾部对流受热面的沾污、积灰试验方法	122
§ 5-6 受热面沾污、积灰的动态特性试验方法	124
§ 5-7 减轻炉内受热面沾污、积灰的可能措施	128
第六章 气流速度测量技术	131
§ 6-1 气力式速度测量方法	131
一、毕托管测速	131
二、放大测速装置	138
三、均速管	140
四、翼形测速装置	141

五、含尘气流测速装置	142
六、平面气流的测量	144
七、空间气流测速装置	144
八、炉内高温气流的测量	150
§ 6-2 热电式速度测量方法	151
一、热电测速原理	151
二、气流温度、压力变化对测量的影响	156
三、气流方向的测量	158
§ 6-3 气流脉动速度的测量原理	161
§ 6-4 激光测速原理	164
一、激光多普勒测速	164
二、激光双焦点测速	166
第七章 气固两相浓度测量	169
§ 7-1 等速取样原理	169
一、不等速取样误差	169
二、简单等速取样	175
三、静压零位等速取样	177
§ 7-2 两相浓度的表示方法及适用范围	181
§ 7-3 煤粉及飞灰浓度的测定方法	183
§ 7-4 用燃烧法快速测定碳量	186
第八章 高温测量技术	188
§ 8-1 热电偶测量高温烟气时的误差	188
§ 8-2 抽气热电偶	192
§ 8-3 抽气热电偶的效率	197
一、用简化物理模型分析抽气热电偶的效率	197
二、用试验方法确定抽气热电偶的效率	201
§ 8-4 高温测量用的组合热电偶	206
一、零直径外推法	207
二、双热电偶法	208
三、三热电偶法	209
第九章 烟气成分的分析方法	211
§ 9-1 烟气成分的化学分析方法	211
一、奥氏分析器的原理和构造	211
二、药剂的配制与仪器的使用方法	212
§ 9-2 烟气成分的色谱分析法	214
一、气相色谱分析的原理	214
二、色谱仪的使用	216
§ 9-3 烟气中有害气体成分的测量	217
一、烟气中SO ₂ 的测量	217

二、烟气SO ₃ 含量的冷凝测量法	219
三、烟气中NO _x 的测量	220
第十章 炉内热流的测量	224
§ 10-1 导热式热流计	224
一、圆柱形导热元件	224
二、圆筒形导热元件	226
三、圆盘形导热元件	227
四、平板导热元件	229
五、管壁形导热元件	230
§ 10-2 热流计热平衡及反向辐射测量	234
一、导热式热流计的热量平衡	234
二、反向辐射的测量	241
§ 10-3 其它型式的热流计	242
一、热量计式热流计	242
二、热容式热流计	243
三、测温式热流计	244
四、辐射式热流计	245
§ 10-4 热流计的标定	247
第十一章 低温受热面腐蚀磨损及烟气露点的测量	249
§ 11-1 影响低温受热面腐蚀磨损的因素	249
一、SO ₃ 的形成	249
二、硫酸的生成及其对金属的腐蚀	250
三、灰磨损	251
§ 11-2 短期腐蚀磨损速度的测量	252
§ 11-3 长期腐蚀磨损速度的测量	258
§ 11-4 酸沉积和露点测量的热质交换原理	260
一、硫酸蒸汽的冷凝相图及热力学露点	260
二、露点探头的传热传质过程	261
三、影响探头表面酸沉积量的主要因素	266
§ 11-5 炉烟露点的测量方法	267
一、露点测量的总结方法	267
二、YL型烟气露点测量仪及其使用	272
第十二章 燃烧试验数据微机处理	274
§ 12-1 常用燃烧参数插值处理	274
一、一元三点插值方法	274
二、三次自然样条函数插值方法	278
三、二元三点插值方法	285
§ 12-2 试验数据准则方程多元回归分析	289
§ 12-3 常用物性参数多项式求值	298

§ 12-4 炉内燃烧气流速度场测量数据处理	303
§ 12-5 锅炉燃烧过程中随机信号的数据处理	308
一、燃烧参数的随机性	308
二、信号分析	309
三、其它的数字特征	315
四、随机信号处理的实施	317

第一章 锅炉热平衡试验

§1-1 热平衡试验的目的与任务

锅炉设备的作用在于借助燃料燃烧发出的热量，产生一定压力、一定温度和一定清洁度的饱和蒸汽或过热蒸汽。锅炉设备的热平衡是指输入锅炉设备的燃料拥有热量与锅炉设备输出热量之间的平衡。输出热量包括锅内水和蒸汽吸收的有效热量以及各项热损失。热平衡试验是锅炉设备热工试验中最基本的一项试验。热平衡试验可以用来作为：

(1) 锅炉新产品的鉴定试验。鉴定新产品的技术经济指标是否与设计值相符，确定设备的运行方式，肯定设备的运行效果及指出存在问题。

(2) 锅炉设备的运行调整试验。确定锅炉设备最有利的运行方式，规定设备的技术经济指标，作为判定或修改运行规程和进行技术管理的依据，并查明运行中的缺陷。

(3) 运行比较性试验。比较设备改进或检修前后的经济效果。当燃料特性、操作技术有较大改变时，需确定合理的运行参数，了解设备运行的经济性。

热平衡试验的任务是：

(1) 确定锅炉的热效率；

(2) 确定锅炉的各项热损失；

(3) 确定不同运行工况下的各项经济指标，制订合理的运行操作守则。

§1-2 热平衡试验的准备工作

一、试验的组织与准备工作的内容

(1) 熟悉锅炉设备的技术条件、运行特性，注意额定负荷下送风和引风的能力，以及所需的煤粉细度等。

(2) 全面检查锅炉设备及辅机设备，了解其完好状态和调节机构、自动装置及检测仪表的情况，对所发现的缺陷，应予以消除。

(3) 制订试验大纲，确定测量项目、测量方法、测点布置和分析化验项目，以便编制所需的试验记录表格。

(4) 根据锅炉设备的具体结构和试验大纲的要求，列出试验所需补充装置的仪表器材清单。

(5) 对试验需用仪表器材的安装进行技术监督，做好试验用仪表及测量设备的检验工作，并培训试验观测人员。

二、试验大纲的一般内容

1. 预备性测试

(1) 确定给煤机转速；

(2) 测定烟道、煤粉空气道和风道的截面;

(3) 测定燃烧器和风道的风速;

(4) 测定锅炉设备及制粉系统的漏风。

2. 调整试验

(1) 确定燃烧器在不同的一、二次风速下火炬的最佳位置; 对机械炉排层燃炉确定其最合理的燃料层厚度等。

(2) 确定在几个典型负荷下最合理的过量空气系数。

(3) 确定在锅炉设备可调范围内的几个典型负荷下最合理的煤粉细度。

(4) 选定在技术上允许的最低负荷下所投运燃烧器的最佳配合方式。

3. 热平衡试验

(1) 查明在额定负荷、最低负荷以及2~3个中间负荷下锅炉设备的经济指标。

(2) 求出试验期间内最高的不结渣负荷。

(3) 在改变辅助设备投入方式和有辅助火炬(技术上的最低限)条件下, 求出煤粉炉的最低负荷及其允许持续时间。

三、测量项目、测量方法及测点位置

锅炉设备热工试验中, 根据试验任务的不同, 对测量项目有不同的要求。表征锅炉设备主要运行技术经济特性的测量项目, 称为基本测量项目。它们主要是为计算锅炉经济指标(热效率及各项热损失)及对锅炉有重要影响的各可调参数相关的测量项目。

按反平衡法进行热平衡试验时, 基本测量项目为:

(1) 燃料的元素分析;

(2) 入炉燃料采样与工业分析;

(3) 煤粉细度(煤粉炉)或燃煤的块度分析(链条炉及抛煤炉);

(4) 飞灰和炉渣采样及其可燃物含量的测定;

(5) 排烟温度;

(6) 炉膛出口(或过热器后)的过剩空气系数(O_2 和 CO_2);

(7) 排烟成分(O_2 、 CO_2 、 CO 、 H_2 、 CH_4 等)的分析。

如同时按正平衡法进行试验时, 尚应增加如下的基本测量项目:

(1) 锅炉的蒸汽流量或给水流量, 连续排污量及减温水流量;

(2) 给水和蒸汽温度;

(3) 入炉燃料量;

(4) 蒸汽压力。

如有再热蒸汽, 则应增加有关的基本测量项目。基本测量项目随锅炉设备的型式及试验的要求而增减。

为取得其它较次要的运行参数的其余测量项目, 称为参考测量项目。试验前对基本测量项目及参考测量项目分别制订适宜的测量方法和采用相应的仪器仪表, 确定测点位置和数量。煤粉炉热平衡试验的测量项目明细表示例见表1-1。

表 1-1

煤粉炉热平衡试验测量项目明细表举例(用反平衡法测定效率)

序号	测量项目	符号	测点位置	测点数目	所需仪表名称	读数间隔时间(min)
一、汽水系统						
1	蒸汽流量	D	过热器出口主蒸汽管	1	表盘监督仪表	10
2	过热蒸汽温度	$t_{s,}$	过热器出口主蒸汽管	1	表盘监督仪表	10
3	过热蒸汽压力	$p_{s,}$	过热器出口主蒸汽管	1	表盘监督仪表	10
4	汽包压力	$p_{s,0}$	主汽包	1	表盘监督仪表	10
5	给水流量	$D_{s,}$	给水管路	1	表盘监督仪表	10
6	给水温度	$t_{s,}$	给水管路	1	表盘监督仪表	10
7	给水压力	$p_{s,}$	给水管路	1	表盘监督仪表	10
8	减温水流量	$D_{j,}$	减水管路	1	表盘监督仪表	10
9	减温水进/出口温度	$t_{j,}^i/t_{j,}^e$	减水管路(对表式)	各1		10
10	排污流量	$D_{p,}$	排污总管	1		10
二、送风系统						
11	送风温度	$t_{f,}$	送风机入口风道	1	水银或热电阻温度计	10
12	热风温度	$t_{r,}$	空气预热器出口风道	2	表盘监督仪表	10
三、烟气系统						
13*	炉膛出口(或过热器后)烟气分析	RO_2, O_2, CO	炉膛出口(或过热器后)烟道	2	带有冷却装置的取样管奥氏(或色谱)分析仪	10
14	炉膛出口(或过热器后)烟温	$\theta_{f,}^i$	炉膛出口(或过热器后)烟道	2	表盘控制仪表	10
15	各级过热器后烟温	$\theta_{f,}^j$	各级过热器后烟道内	2	表盘控制仪表	10
16	各级省煤器后烟温	$\theta_{f,}^m$	各级省煤器后烟道内	4	表盘控制仪表	10
17	各级空气预热器后烟温	$\theta_{f,}^y$	各级空气预热器后烟道	4	表盘控制仪表	10
18*	排烟温度	$\theta_{p,}$	低温空气预热器后烟道内	2	热电偶高温计	10
19*	排烟烟气分析	RO_2, O_2, CO	低温空气预热器后烟道	2	取样管与奥氏分析仪	10
四、煤、灰系统						
20*	原煤取样,元素分析	C H O N S	原煤给煤机		铲子、密闭容器等	10
21*	原煤取样,分析水分	W^a	原煤给煤机		铲子、密闭容器等	
22*	煤粉取样,工业分析		给粉机下	给粉机数	煤粉取样器密闭容器	连续
23*	细灰及飞灰取样,分析可燃物含量	$C_{y,}$ $C_{f,}$	高温段省煤器后烟道	2	飞灰取样器、容器	连续
24	炉渣取样,分析可燃物含量	$C_{z,}$	灰斗处		铲子、密闭容器	试验结束后

带*号的为基本测量项目。

§ 1-3 热平衡试验的技术条件

一、试验负荷的选择

为了求得锅炉在负荷变化范围内的运行特性，各项试验应在锅炉的四种负荷下进行：

(1) 锅炉的额定负荷；

(2) 锅炉的最低负荷；

(3) 在额定与最低负荷之间选择适当的两个中间值，其中一个最好在经济负荷范围内。

如有必要和可能，还可进行锅炉设备短时的最大负荷（超额定负荷5%~10%）试验。

每改变一种工况，原则上应重复进行两次测试，如两次测试的结果相差过大时，需再重做一次或多次。

二、煤质与主要参数的允许波动范围

试验期间所用的煤种，必须是试验大纲所规定的煤种。在进行同一项目的试验时，每次测试中燃煤的各项工业分析数据与全组测试该项目中的平均值之间的允许偏差，一般为：

应用基水分 (W^y)：煤粉炉 $\Delta W^y \geq \pm 2\%$ ；链条炉与抛煤机炉 $\Delta W^y \geq \pm 1\%$ ；如 $W^y > 15\%$ ，允许偏差 (ΔW^y) 可适当放宽。应用基灰分 (A^y)：当 $A^y < 15\%$ 时， $\Delta A^y \geq \pm 1\%$ ；当 $A^y = 15\% \sim 30\%$ 时， $\Delta A^y \geq \pm 2\%$ ，当 $A^y > 30\%$ 时， $\Delta A^y \geq \pm 3\%$ 。应用基低位发热量 (Q_{Dw}^y)： $\Delta Q_{Dw}^y \geq \pm 629 \text{kJ/kg}$ 。

试验期间，锅炉蒸汽参数及过剩空气系数等应尽可能地维持稳定；其允许波动范围一般为：

锅炉负荷	$\pm 5\%$ ；
汽压	中、低压锅炉 $\pm 0.05 \text{MPa}$ ； 高压锅炉 $\pm 0.1 \text{MPa}$ ；
汽温	$\pm 5^\circ\text{C}$ ；
过剩空气系数	± 0.05 。

此外，试验期间的给水温度不应有较大波动。

三、试验前的稳定阶段与试验持续时间

各类试验一般都应在锅炉带负荷连续运行72h以后进行，以保证全部锅炉设备的热工况完全稳定。检查锅炉热工况是否稳定，最常用而方便的方法是观察烟道各部位的温度指示或记录值是否已达稳定。在试验前的稳定阶段内，应将负荷调整到试验规定的负荷，经1~2h后，在燃料量和空气量已稳定的情况下，等待烟道各部位的烟温稳定后，方可开始试验。受热面吹灰，炉膛清灰及定期排污等工作都应在试验前的负荷稳定阶段内完成。在试验进行过程中，凡有可能扰动工况的操作都应避免。如因测试时间过长，必须进行此类操作时，应将受操作干扰的一段时间及测试结果在试验记录中扣除并予以说明。每次测试

所需持续时间的长短，主要取决于热平衡计算中各基本测量项目的准确程度。

一般试验所需持续时间可参考表1-2。

表 1-2 试验所需持续时间 (h)

煤 粉 炉	链 条 炉 及 抛 煤 炉	
反 平 衡 3~4	反 平 衡 4~6	正 平 衡 ≥ 6

当锅炉进行正平衡试验时，燃料量测量的准确度受到试验开始和结束时给煤系统中贮存量的影响。对于链条炉常用空仓法控制入炉煤量的测量。此时应使炉排上的煤层厚度保持试验结束时与开始时相同。试验持续时间愈长，则由于燃料贮存量误差引起的相对误差就愈小。所以，试验所需持续时间随锅炉的燃烧方式和试验方法而异。

§ 1-4 试验数据的整理与试验报告

一、数据的整理

每次试验结束后，要进行数据的整理工作。对测试中重复多次测取的测量参数，一般取其算术平均值作为其直接测值。在计算平均值时，须先审查观测记录，遇有与正常读数相差较大的记录值，应加以分析，根据误差范围的要求决定取舍。

在测试过程中，如规定的工况受到短期破坏，参数的变化超过允许范围时，则在观测记录上应取消受到影响的那些测量读数。重复多次测取的测量参数，如果被取消的及舍弃的读数个数超过测试期间内应该测取的总数的1/3时，则该测量项目无效。如一次测试中有几个项目无效，而且影响到测试结果时，则整个这次测试无效。

各测量参数的观测值，通常仅取最末一位有效数字是不准确的，即估读的存疑数字。各测量参数的平均测值只取有效数字位数，其末位为不准确数字。如果参加平均的读数等于或超过4个，则其平均值的有效数字可较读数增加一位。求得平均测值后，按系统误差的处理方法进行更正及修正，然后记入测试数据计算表格中（有关误差理论及数学处理方法，请参看有关书籍）。对于一般试验，各项热损失的计算值取到小数点后两位，而锅炉热效率数值，则只保留到小数点后一位（均以百分数表示）。

二、试验报告

锅炉设备热平衡试验技术报告内容与所做工作的特点和内容有关。其编写程序一般包括：

- (1) 试验的目的与方法；
- (2) 锅炉设备的结构特性与运行情况；
- (3) 测量方法与试验工作的特点；
- (4) 试验结果及分析；
- (5) 结论与建议；

- (6) 数据综合表及线图;
- (7) 测量技术及仪表的说明附件;
- (8) 其它附件.

§ 1-5 锅炉的热平衡计算

锅炉热平衡是在锅炉设备稳定热力工况下, 以1kg固体或液体燃料或标准状态下1m³气体燃料为基准来计算的。相应于1kg燃料, 可列出如下热平衡方程:

$$Q_r = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \quad \text{kJ/kg} \quad (1-1)$$

或用输入热量的百分数表示:

$$100\% = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 \quad (1-2)$$

其中 $q_1 = \frac{Q_1}{Q_r} \times 100\%; q_2 = \frac{Q_2}{Q_r} \times 100\%; \dots\dots$

上列诸式中 Q_r ——相应于每公斤燃料输入锅炉的热量, kJ/kg;

Q_1 ——锅炉的有效利用热量, kJ/kg;

Q_2 ——排烟热损失, kJ/kg;

Q_3 ——化学不完全燃烧热损失, kJ/kg;

Q_4 ——机械不完全燃烧热损失, kJ/kg;

Q_5 ——散热损失, kJ/kg;

Q_6 ——灰渣的物理热损失, kJ/kg.

锅炉的热效率是锅炉的有效利用热量占输入热量的百分数, 即:

$$\eta_{rl} = q_1 = \frac{Q_1}{Q_r} \times 100 \quad \% \quad (1-3)$$

亦可写成

$$\eta_{rl} = q_1 = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6) \quad \% \quad (1-4)$$

锅炉热平衡试验中, 按式(1-3)计算热效率需要通过测量求得有效利用热量 Q_1 和输入热量 Q_r 。这种方法称为正平衡法或直接法。利用此法求得的热效率称为正平衡热效率。按式(1-4)确定热效率需要通过测量求得各项热损失, 故称此为热损失法, 或称反平衡法。利用此法求得的热效率称为反平衡热效率。

测定和计算锅炉的热效率是采用正平衡法, 还是采用反平衡法, 应根据锅炉设备的具体条件而定。对于燃煤电厂锅炉, 由于确定输入热量时燃料量的测量相当困难, 而且在输入及有效利用热量的测量上常会引入较大的误差; 另外, 正平衡法只求出锅炉的热效率, 未测出锅炉的各项热损失, 也就难以分析造成各项热损失的原因和找出降低热损失的方法, 所以对高效率的电厂锅炉, 实践中均采用反平衡法。

对于工业锅炉一般采用正平衡法进行热效率测定, 并应同时进行反平衡法测定, 以利校核和分析比较。当同时用正、反平衡法测定热效率时, 两种方法所得热效率偏差不得大于5%。

一、输入热量 Q_1

相应于1kg燃料输入锅炉设备的热量 Q_1 ，在一般情况下包括以下几项：

$$Q_1 = Q_{Dw}^y + H_r + Q_{a,r} + Q_{a,h} \quad \text{kJ/kg} \quad (1-5)$$

式中 Q_{Dw}^y ——燃料应用基低位发热量，kJ/kg。由于燃烧产物离开锅炉时的温度通常都不低于110~120℃，在此温度下，烟气中的水蒸汽不可能凝结而放出汽化潜热，因而锅炉设备中所能利用的燃料化学热量只是燃料的低位发热量 Q_{Dw}^y ；

H_r ——燃料带入的物理热，kJ/kg；按下式计算：

$$H_r = c_r t_r \quad \text{kJ/kg} \quad (1-6)$$

其中 t_r ——入炉前燃料的温度，℃；

c_r ——燃料的比热，kJ/(kg·℃)，对于燃料油，按下式计算：

$$c_r = 1.738 + 0.0025t_r \quad \text{kJ/(kg·℃)} \quad (1-7)$$

对于固体燃料，按下式计算：

$$c_r = 4.19 \frac{W^y}{100} + \frac{100 - W^y}{100} c_r^d \quad \text{kJ/(kg·℃)} \quad (1-8)$$

其中 c_r^d ——燃料干燥基比热，kJ/(kg·℃)。对于无烟煤、贫煤， $c_r^d = 0.92$ ；烟煤 $c_r^d = 1.1$ ；褐煤 $c_r^d = 1.13$ ；

对于燃煤锅炉，如果没有外界热量加热燃料，只是对水分 $W^y \geq \frac{Q_{Dw}^y}{630}$ (Q_{Dw}^y 的单位为kJ/kg)的燃料才考虑其物理显热，计算时燃料温度取为20℃；

$Q_{a,r}$ ——用外来热量加热空气，如在前置式预热器（暖风器）中利用汽机抽汽加热空气时，空气所带入的热量。按下式计算：

$$Q_{a,r} = \beta (H_{r,h}^0 - H_{r,h}^1) \quad \text{kJ/kg} \quad (1-9)$$

其中 β ——锅炉空气预热器入口的空气量与理论空气量的比值；

$H_{r,h}^0$ ——进入空气预热器前的热空气焓，kJ/kg， $H_{r,h}^0 = V^0 c_a t_{r,h}$ ， c_a 为空气比热，kJ/(m³·℃)； $t_{r,h}$ 为暖风器后的热空气温度，℃；

$H_{r,h}^1$ ——冷空气焓，kJ/kg， $H_{r,h}^1 = V^0 c_a t_{r,h}$ ， $t_{r,h}$ 为进入暖风器的空气温度，℃；

$Q_{a,h}$ ——利用蒸汽雾化重油时，蒸汽带入锅炉中的热量，按下式计算：

$$Q_{a,h} = G_{a,h} (H_{a,h} - 2510) \quad \text{kJ/kg} \quad (1-10)$$

其中 $G_{a,h}$ ——雾化重油所用的蒸汽量，kg/kg；

$H_{a,h}$ ——雾化蒸汽的焓，kJ/kg。

二、锅炉的有效利用热 Q_2

送入锅炉的热量，大部分被工质所吸收，将给水加热成饱和蒸汽或过热蒸汽，这部分热量称为锅炉的有效利用热。

对于过热蒸汽锅炉

$$Q = \frac{1}{B} [D_{s,r} (h_{s,r} - h_{s,i}) + D_{s,e} (h_{s,e}^0 - h_{s,e}^1) + D_{j,w}^0 (h_{j,w}^0 - h_{j,w}^1) + D_{b,e} (h_{b,e} - h_{b,i}) + D_{p,w} (h_{p,w} - h_{p,i})] \quad \text{kJ/kg} \quad (1-11)$$