

谢文国 等 编



GONG YE
GUOLU
REGONG
SHI YAN

工业锅炉热工试验

大连工学院出版社

内 容 提 要

本书是根据《工业锅炉热工试验》JB2829—80中的要求及工业锅炉热工试验的经验编写的。

书中较详细地介绍了工业锅炉热工试验方法和测试技术。全书共分十一章，阐述了锅炉热平衡；试验资料的整理和计算；基本参数（温度、压力、流量等）的测量方法；烟气成分分析方法；烟气浓度测量方法及试样的采集、制备和计量方法。为了便于运行人员的日常监测，最后一章阐述了烟气中CO含量、空气过剩系数 α 及各项热损失的简易计算方法。

本书可供从事工业锅炉热工试验和运行人员使用或作为培训教材，也可供动力设备和热能管理人员学习及大、中专有关专业师生参考。

工 业 锅 炉 热 工 试 验

Gongye Cuolu Regong Shiyan

谢文国 编 崔 峨 李正华 校

大连工学院出版社出版发行 辽宁省新华书店经销
(大连甘井子区凌水桥) 大连市甘井子区凌山印刷厂 印刷

开本：787×1092 1/32 印张 9 3/4 字数 2 27 千字

1987年2月第一版

1987年2月第一次印刷

印数 0001—5000

责任编辑 晓 品

封面设计 羊 戈

责任校对 王佳玉

统一书号 15400·6

ISBN 7-5611-0001-9/TB·2

定价：1.62元

序 言

我国有各种类型的工业锅炉几十万台。据不完全统计，仅工业锅炉的耗煤量，就占全国煤的总消耗量的三分之一左右。因此，必须做好工业锅炉热工试验、日常运行的调整及监测工作，实现科学管理和科学操作，提高锅炉的热效率，节约能源。

作者根据几年来从事工业锅炉热工试验工作中的体会，遵照《工业锅炉热工试验》JB2829—80中的要求，针对我国目前工业锅炉的现状，在广泛收集了有关技术资料的基础上，编写了《工业锅炉热工试验》这本书。

大连工学院热能工程教研室主任崔峨副教授，大连市锅炉压力容器检验研究所副所长李正华工程师担任这本书的主审工作。这是对工业锅炉热工试验技术工作的普及提高的关怀和支持。希望今后有更多的专家关心这项工作。

本书内容与现行标准和规范如有不符之处应以后者为准。

劳动人事部锅炉压力容器安全监察局

李 毅

一九八七年元月 北 京

前 言

做好工业锅炉热工试验和日常运行的监测工作，提高其运行的经济性和安全性，是节约燃料的一个重要途径。当前，这方面工作还有相当大的潜力可挖。为了适应我国工业锅炉运行和发展的需要，本书根据多年来积累的锅炉热工试验的资料和经验，编写了这本书，以供从事工业锅炉热工试验和运行的同志学习及使用。

由于我国正处于由工程单位制向国际单位制过渡阶段，为了使读者在实际工作中阅读本书和其它有关参考文献，本书采用两种单位制并存编写的形式。

遵照《工业锅炉热工试验》JB2829—80中的要求，针对我国工业锅炉的特点，在力求做到内容通俗易懂、简明扼要、结合实际，详细阐述了工业锅炉热工试验方法和技术。为了方便运行人员对工业锅炉日常监测，最后一章给出了烟气分析中CO含量、空气过剩系数 α 、锅炉热损失 q_2 、 q_3 、 q_4 的简易计算方法，有助于司炉和管理人员作好锅炉日常监测工作。

由于编著者水平有限，在本书的取材和内容的按排上可能有欠妥和错误之处，本人竭诚欢迎广大读者给予帮助和指正，对此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中，得到大连市锅炉分会、大连旅顺华源节能设备厂，大连市燃料监测站的领导和有关同志的大力支持、关心和帮助；得到大连旅顺华源节能设备厂提供的部分资料；

大连工学院热能工程教研室主任崔峨副教授、大连市锅炉压力容器检验研究所副所长李正华工程师主审全部书稿；劳动人事部压力容器安全监察局高级工程师李毅为此书作序，谨此一并致谢。

编 者

一九八七年二月 大连

目 录

序

前 言

第一章 锅炉热工试验.....	1
1-1 试验的分类和目的.....	1
1-2 试验中确定锅炉热效率的方法.....	3
1-3 试验前的准备工作.....	4
1-4 试验参加人员的职责.....	6
1-5 锅炉试验应具备的条件.....	7
1-6 测量项目及仪表.....	8
1-7 试验技术要求.....	15
1-8 锅炉试验结果分析.....	18
1-9 试验资料整理及计算.....	24
第二章 温度测量.....	48
2-1 玻璃水银温度计.....	48
2-2 热电阻温度计.....	53
2-3 热电偶温度计.....	57
2-4 热电偶自由端(冷端)温度补偿.....	65
2-5 热电势测量仪表.....	70
2-6 热电偶测温线路.....	76
2-7 高温介质的温度测量.....	79
2-8 灯丝隐天式光学高温计.....	83

2-9 半导体点温计.....	86
2-10 烟、风道温度场测定.....	88
第三章 压力测量.....	90
3-1 压力的基本概念.....	90
3-2 锅炉给水和蒸气压力的测量.....	92
3-3 烟气和空气压力的测量.....	95
3-4 测压管及其安装.....	102
第四章 流量及流速测量.....	109
4-1 概述.....	109
4-2 计量水箱.....	111
4-3 涡轮流量计.....	114
4-4 测速管.....	119
4-5 测定管道中的速度场.....	123
第五章 烟气分析.....	129
5-1 概述.....	129
5-2 烟气取样.....	131
5-3 烟气试样的抽取及保存.....	133
5-4 奥氏气体分析仪.....	137
5-5 减少分析误差的途径.....	145
5-6 烟气分析结果计算.....	146
5-7 CO测定方法.....	149
第六章 蒸汽湿度的测量.....	151
6-1 概述.....	151
6-2 氟离子法.....	152
6-3 热平衡法.....	158
6-4 节流法.....	163
第七章 燃料、燃烧产物的计量及取样.....	169

7-1	灰平衡计算	169
7-2	灰平衡测量	171
7-3	燃煤量测量	173
7-4	燃煤取样	174
7-5	煤粉采样	176
7-6	原煤试样的加工制备	180
7-7	液体燃料测量及取样	184
7-8	燃烧产物的测量、取样及制备	185
第八章 燃料成分及燃烧特性计算		188
8-1	燃料成分	188
8-2	燃煤基质及换算	191
8-3	煤的发热量计算	195
8-4	利用工业分析计算煤的低位发热量	198
8-5	液体和气体燃料	201
8-6	气体燃料成分换算	205
8-7	燃料特性系数 β 和 RO_2^{ax}	207
8-8	理论空气量及理论烟气量	209
8-9	排烟总容积计算	215
第九章 锅炉热平衡计算		221
9-1	锅炉热平衡及热效率	221
9-2	锅炉输入热量	224
9-3	锅炉输出热量	227
9-4	锅炉排烟热损失	228
9-5	气体不完全燃烧热损失	231
9-6	固体不完全燃烧热损失	232
9-7	灰渣物理热损失	234
9-8	锅炉散热损失	236

9-9	锅炉热效率	237
9-10	锅炉标准单耗	241
第十章	锅炉烟尘浓度测定	245
10-1	概述	245
10-2	烟尘浓度计算	246
10-3	烟气平均流速计算	248
10-4	湿烟气含水量测定方法	252
10-5	等速取样	254
10-6	测量截面及测点的选择	261
10-7	BLC—II 锅炉烟尘浓度测定仪	262
10-8	烟尘浓度测定过程	268
10-9	烟尘浓度测定计算举例	274
第十一章	锅炉热损失简易计算方法	277
11-1	燃煤锅炉燃烧三角形	277
11-2	CO 含量线算图	281
11-3	空气过剩系数 α 线算图	280
11-4	气体不完全燃烧热损失线算图	291
11-5	排烟热损失线算图	292
11-6	固体不完全燃烧热损失线算图	297

第一章 锅炉热工试验

1-1 试验的分类和目的

锅炉热工试验按其任务和目的可分为两大类。第一类试验是确定或认可锅炉的全部热工性能或部分热工性能。例如：热效率、蒸发量、蒸汽压力、热水进出口温度及各项热损失等。第二类试验是为了研制新锅炉炉型结构、炉膛结构、燃烧方法及燃烧装置，以及为了确定水循环流速等优选最佳参数或数据。这类试验一般都是专题性和探索新规律的试验，本书在此不予讨论。

第一类试验按其试验的目的又分为三级。

一、锅炉一级试验

锅炉一级试验是指锅炉出厂时的移交验收或制造厂批量生产前的鉴定试验。试验的目的是校核制造厂对用户提供的产品，其技术条件是否达到要求。试验中所涉及到的产品技术条件有：锅炉在设计工作压力下的额定出力、锅炉的热效率、介质有关参数及品质、超负荷能力及配套辅机与附件质量等。一级试验，必须严格按《工业锅炉热工试验》JB2829—80的要求进行热工测定。在试验的全过程中完全符合标准中的规定和技术要求。

二、锅炉的二级试验

锅炉二级试验是锅炉投入运行后，日常进行的热平衡及热效率试验。一般在锅炉改造之后，或在锅炉某些参数偏离额定

值过大的情况下，或是定期对锅炉经济运行考核，都需要进行这级试验。

锅炉进行二级试验的主要目的是：

(1) 求出锅炉的出力和热效率，判断锅炉经济运行水平。

(2) 查明各项热损失，分析热损失增加的原因。从而找出降低热损失、提高热效率、节约燃料的方法。

这级试验可以在锅炉额定参数下进行，也可在满足生产需要的锅炉参数下进行，试验中所需要的测量项目应根据实验目的来确定。对所有的测量项目都应尽可能做得准确。

三、锅炉三级试验

锅炉三级试验是锅炉日常运行工况的燃烧调整试验。例如，飞灰平衡试验、漏风试验、风煤比试验及蒸汽品质试验等。

锅炉进行三级试验的目的是：

(1) 使运行人员更好地了解锅炉运行特征，掌握燃烧规律，确定锅炉的最佳运行方式；

(2) 及时查明锅炉运行当中存在的问题。例如漏风、各风室配风及串风、飞灰比增加、炉渣含碳量增加及蒸汽品质变坏等；

(3) 为制订或修改锅炉运行操作规程提供依据；

(4) 确定合理的空气过剩系数、煤层厚度、炉排速度及煤粉细度等。

这级试验不仅在锅炉大修或改造后，为了考核其效果应进行。而且在锅炉用煤品种变动很大时；锅炉负荷因生产需要而变动过大时；锅炉某些单项指标偏离正常值过大等；都需要进行这级试验。

锅炉三级试验属于比较简单的试验。只要能够得到被测参

数或数据的变化规律，确定或保持最佳运行工况，就可以达到试验目的。

值得注意的是，以上所述的三级试验，在试验中都必须要求锅炉在给定负荷下，保持恒定工况，这样才能准确地得到被测量值。试验中还要求所用煤种的工业分析值（灰分、水分、挥发分、固定碳、低位应用基热值）与设计选用煤种的计算值或锅炉日常运行所用煤种的平均值相一致。

1-2 试验中确定锅炉热效率的方法

锅炉热效率计算方法是建立在热平衡基础之上的。锅炉热力系统的热平衡方程式为

输出热量 = 输入热量 - 各项损失之和

$$\text{即} \quad Q_1 = Q_r - \sum Q_i$$

通过热平衡方程式可得到确定热效率的两种方法。

一、正平衡法（直接法）

正平衡法是通过直接测量锅炉的输入热量和输出（有效）热量，来确定锅炉的热效率。用下式进行计算

$$\text{锅炉正平衡热效率} = \frac{\text{输出热量}}{\text{输入热量}} \times 100\%$$

$$\text{即} \quad \eta_1 = \frac{Q_1}{Q_r} \times 100\% \quad (1-1)$$

二、反平衡法（间接法）

反平衡法是通过测量锅炉的各项热损失来确定锅炉的热效率。并按下式计算

锅炉反平衡热效率 = (100 - 各项热损失之和) %

$$\text{即} \quad \eta_2 = 100 - \sum q_i (\%) \quad (1-2)$$

在具体试验中采用哪种方法，主要取决于锅炉容量及主要

测量项目所能达到的精度。在目前试验技术水平下，就锅炉容量而言，容量很小的锅炉，一般采用正平衡法确定其热效率。对于中、小容量的工业锅炉，一般是采用正平衡法确定其热效率，并同时进行反平衡法确定其热效率，以便校核和对产品性能的分析。在采用正平衡法有困难时，可以只用反平衡法确定其热效率。对于大容量工业锅炉，由于正平衡法中精确地测量燃料量有困难，因此要用反平衡法确定其热效率。

在可以按正平衡法求得热效率的情况下，用正平衡法确定热效率较为简单。但是，在测出锅炉的所有各项热损失的条件下，用理论公式，而不是用简化公式进行计算时，反平衡法的精确度比正平衡法更高一些。

《工业锅炉热工试验》JB2829—80中规定：对于工业锅炉一般用正平衡法进行热效率测定，并同时进行反平衡法测定，以利校核和对产品性能的分析。对于手烧锅炉可只进行正平衡测定。在使用正平衡法有困难时，可用反平衡法进行热效率测定。

1-3 试验前的准备工作

试验前，试验负责单位应组织有关参加单位作好试验的各项准备工作。

一、组织工作

(1)成立试验工作组，由试验负责单位、用户及有关参加单位组成。

(2)试验工作组内的工作人员，要有明确的分工，并指定试验负责人。

(3)要使用户负责人及运行班组明确试验的目的和要求，以求得他们在试验中对运行操作的配合。

二、锅炉状况的检查

(1)熟悉并掌握锅炉的技术文件。如：设计资料、锅炉出厂质量证明书、修理记录、定期检验报告及运行记录。

(2)全面检查锅炉、辅机及安全附件完好情况，并将检查出来的缺陷列出清单，交给用户排除。

(3)经检查无法确认能否达到试验工况要求的部件，应通过试验进行确定。

三、技术文件准备

(1)编制好试验中所需要的记录图表。

(2)编写试验准备任务书。任务书主要内容是试验所需器具的制造加工；燃料的准备；对锅炉清灰、除垢、测点开孔或加工及应清除的锅炉缺陷等。这些工作通常由用户完成。

(3)编写试验大纲。试验大纲主要包括试验的目的、内容、方法及技术要求、测点布置图、测试用仪表及工具和工作人员的分工。

(4)根据锅炉的技术文件，抄录锅炉设计数据。这方面内容有锅炉的一般特性、受热面布置情况、燃烧设备情况、除尘器及通风装置有关情况，详见表1—9。

四、仪表安装

(1)根据试验大纲的要求，列出试验所需要的仪表及工具的名细，分别由观测人员去准备。

(2)对各测点的开孔及配件的安装，试验负责人要进行技术监督，确保符合技术要求。

(3)观测仪表安装结束后，要调试合格。

五、预备性试验

(1)正式试验前，应进行燃料成分化验和发热量测量；如果用混煤，应分别进行化验成分和测量发热量，然后按一定比

例称重，掺合均匀。

(2) 做好预备性试验。其目的是使运行人员和测试人员熟悉情况；检查各测点和仪表有无问题；锅炉运行工况能否达到试验要求。

1-4 试验参加人员的职责

试验工作组在完成试验的各项准备工作后，试验现场的正确指挥、各岗位严格执行分工和各守其责是保证试验顺利进行的重要条件。因此，试验工作组的试验负责人和观测人员要有明确的观测岗位和任务。

一、试验负责人的职责

(1) 试验负责人要明确规定参加试验人员的分工。使试验人员各施其职，各尽其责，消除试验中的忙乱现象。

(2) 在分配试验观测人员时，应考虑从测试人员中挑选一名对各项试验操作都较熟悉，并且有相当经验的备用人员，以便随时替换任一试验观测岗位。

(3) 编写试验准备任务书和制订试验大纲。

(4) 提出和监督锅炉运行必须保持的稳定工况。

(5) 确定和宣布试验开始和终止时间；以及在试验中，由于某种原因而中止试验的时间。

(6) 巡视每个观测岗位的工作情况及锅炉运行情况，检查主要观测数据，发现问题及时处理。

(7) 做好试验记录，不得纠缠于某些具体仪表的测量工作。试验记录应从试验准备开始，直至试验结束。记录内容主要包括运行工况资料、测试仪器仪表运行情况、试验中出现的异常现象及处理结果。

(8) 试验结束后及时收集各岗位上的观测记录。

(9)负责试验数据的整理及计算工作,最后编制热工试验报告。

二、观测人员的岗位职责

(1)服从指挥,严格遵守试验分工,完成规定的观测任务。

(2)认真做好记录。记录内容包括:设备名称及型号、试验编号、记录表格编号、试验日期、记录开始及结束时间、按规定的间隔时间观测的数据等。试验结束后,观测人员应在记录表格上签字,以示负责。

(3)观测人员仅需在记录表格上用钢笔填写从仪表上观测的数据,不得从事任何计算,更不得任意更改。

(4)观测记录应保证数据的准确性、同时性及严肃性。

准确性:真实记下观测数据,决不可主观臆造。在观测中发现问题,立即检查原因,及时处理。

同时性:根据试验的开始时间和规定的观测间隔时间进行记录。在记录数据时要同时记录时间。

严肃性:对记录表格上记下来的数据要清楚,不能随意增减或涂改。如果需要可增写附加说明。

(5)在遇到既影响观测又无法解决的问题时,应立即与试验负责人联系。

(6)试验期间,观测人员应坚守岗位。没有取得负责人同意,不能中途随意调换或离岗。

1-5 锅炉试验应具备的条件

为了保证试验顺利进行,达到预期的目的,锅炉及其辅助设备、安全附件应具备下列条件才能投入正式试验。

(1)锅炉、辅助设备(引风机、鼓风机、烟风道闸门、上

煤、除渣、除尘、水处理等)、安全附件(安全阀、水位表、水位报警器、水温报警器、压力表等)经检查或试验后,确保正常运行,且达到试验要求。

(2)消除漏风及各风室串风现象。常见的漏风有烟箱、尾部受热面、炉门、灰门、煤斗及炉排两侧处。

(3)消除汽、水管道及运行水箱、计量水箱、排污阀泄漏现象。

(4)锅炉范围内与试验无关的汽、水管道应与锅炉完全隔绝,并确保无泄漏。

(5)锅炉所有受热面内外应处于清洁状态。

(6)对于没有进行年检的锅炉还要经内部检验,确认在试验期间能保证设备及人身安全。

(7)按试验大纲规定测量项目中所用仪器仪表安装完毕,并经检验、标定、检查试用合格;安放好各种试验工作台,装设好取样装置;准备好燃料试样及燃烧产物试样的制备场地及取样工具。

(8)试验用的煤种已确定和落实,并符合试验要求。

(9)试验人员都已明确和胜任自己所分担的工作。

(10)必要的单项预备性试验已经完成。例如:风机、水泵特性测定,烟道速度场、温度场、烟气的成分场、给煤及给粉量的标定等,并确认锅炉运行工况能达到试验的要求和目的。

(11)要注意将测量同一参数的运行仪表与试验中观测仪表读数进行对照。若对比读数差超出仪表的精度范围,这两种仪表都应进行重新检验。

1-6 测量项目及仪表

一、测量仪表的分类