

28/1

燃煤工业锅炉 热工测试方法

庄德安 刘烈英 编

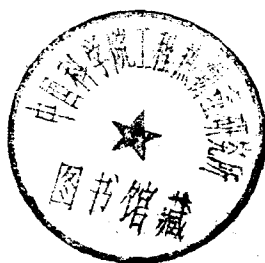
56

机械工业出版社

72.56
198

燃煤工业锅炉热工测试方法

庄德安 刘烈英 编



机械工业出版社

✓ 160801

本书是在多年来对大量工业锅炉热工测试的实践经验的
基础上总结编写的。书中较为系统地介绍了有关工业锅炉热
工测试的基本概念和原理，锅炉热效率、热平衡、灰平衡以
及各项燃烧热损失的测定和计算；阐述了测定工业锅炉各项
性能参数（温度、压力、蒸发量、蒸汽温度、燃煤量等）所
需仪器设备的结构原理、使用方法及注意事项；对煤、灰
渣、烟气的采样、分析的操作步骤和锅炉烟尘排放浓度的测
定方法等，也都作了较为详细的介绍。

本书可供各级劳动、环保、节煤部门从事锅炉技术管理
的人员，工业锅炉制造厂和锅炉使用单位的工程技术人员阅
读，也可作为对操作运行人员的技术培训教材。

燃煤工业锅炉热工测试方法

庄德安 刘烈英 编

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 $\frac{1}{32}$ 印张 5 $\frac{1}{4}$ 字数 115千字

1980年6月沈阳第一版·1982年11月北京第二次印刷

印数 11,601—19,800 定价 0.44 元

统一书号：15033·4796

ZF61/25
前言

在我国实现“四个现代化”的征途中，工业锅炉的新产品不断涌现，锅炉水处理技术的应用日益广泛，对旧有工业锅炉技术改造的群众运动蓬勃发展，从而推动了我国工业锅炉技术管理工作，迫切要求广大锅炉技术管理干部和司炉工人，掌握锅炉热工测试技术，以满足工农业生产发展的需要。

实践经验证明，搞好锅炉热工测试是提高锅炉运行的经济性和安全性，降低煤耗、节约燃料的一个重要手段。

为此，遵照国家劳动总局锅炉安全监察局的意见，在该局举办的锅炉热工测试学习班讲课内容的基础上，编写了本书。

参加本书编写工作的还有张佩琳、王汝凭、曾德馨同志。

在编写过程中还得到了北京市劳动保护科学研究所等单位许多同志的关心和帮助，并请一机部第一设计院邓锡全工程师对全书进行了校正，特此致谢。但由于我们水平有限，难免有错误之处，请读者给予指正。

1979年2月

目 录

第一章 概论	1
1—1 热工试验的目的和任务	1
1—2 试验的组织和准备工作	2
1—3 试验的技术要求	3
第二章 工质的基本状态参数	6
2—1 温度	6
2—2 压力	7
2—3 比容与重度	8
2—4 热量与比热	8
2—5 理想气体状态方程式	11
2—6 焓	15
第三章 水蒸汽	16
3—1 液态的汽化	16
3—2 水蒸汽的定压发生过程	18
3—3 水蒸汽的P—V图	20
3—4 水蒸汽表的应用	22
第四章 锅炉的热平衡	27
第五章 锅炉热效率计算	33
5—1 锅炉正平衡热效率的计算	33
5—2 锅炉反平衡热效率的计算	35
5—3 锅炉的毛效率和净效率计算	54
5—4 试验技术报告	55
第六章 锅炉工质参数的测量	62
6—1 蒸发量的测量	62
6—2 燃煤量的测量	66
6—3 蒸汽压力的测量	68

6—4	蒸汽湿度的测量	71
6—5	温度的测量	78
第七章 烟气成分分析		90
7—1	概述	90
7—2	奥氏分析器的结构	91
7—3	基本原理	92
7—4	试剂的配制	94
7—5	分析前的准备	95
7—6	烟气的取样	95
7—7	奥氏分析器的使用方法及注意事项	96
第八章 煤和灰渣的分析		99
8—1	概述	99
8—2	煤样的采取和制备	100
8—3	煤的工业分析	104
8—4	煤的元素分析	108
8—5	煤的发热量测定	120
8—6	各种基准的换算	133
8—7	灰渣含碳量的测定	134
第九章 锅炉烟尘浓度的测定		135
9—1	锅炉烟尘的特性	135
9—2	锅炉烟尘浓度测定中的问题及其解决途径	137
9—3	烟气状态参数的测定	139
9—4	BLC—I型锅炉烟尘浓度测定仪	155
9—5	测尘的操作步骤及注意事项	157
9—6	烟气体积的换算及其应用举例	161
主要参考文献		164

第一章 概 论

锅炉的燃烧工况在很大程度上影响着锅炉设备运行的经济性和安全性。因此对燃烧工况做全面的测量，然后将取得的结果进行科学分析，从经济性、安全性诸方面加以比较，才能确定出最佳的运行方式。这样的试验、测量和分析研究工作，就是我们通常所称的锅炉热工试验。另外，对新的炉型或新改造的锅炉，其实际的性能究竟怎样？也必须根据热工试验的结果来评定。

通过热工试验，还可以使运行人员更好地了解设备运行性能，掌握燃烧过程的内在规律，使实践和理论知识更紧密地联系起来，从而在技术革新、安全运行方面发挥更大的作用。

1-1 热工试验的目的和任务

1. 锅炉制造厂对锅炉新产品进行热工技术性能的鉴定试验，以确定锅炉的蒸发量、煤耗量、热效率以及各项热损失。

2. 对技术改造后的锅炉，在节煤、提高出力等方面的性能进行专题试验，以改进缺陷，总结经验，确定其效果好坏。

3. 锅炉使用单位对新锅炉的验收试验，总结出合理、正确的运行方法，制订运行操作规程。

1—2 试验的组织 and 准备工作

锅炉热工试验的成败，取决于有无严密的组织工作，因此试验必须有组织有领导并在统一思想，统一认识之下，按照一定的计划和步骤进行。

1. 锅炉试验前应制订试验大纲。试验大纲的内容一般包括：试验的任务和要求，试验程序，测量项目和测点布置，安全措施，人员分工和总进度等。

2. 组织参加试验的全体人员，对试验大纲进行充分讨论，明确试验原理和方法，确定试验工作的总负责人，指挥整个试验工作，并按照制订的测试项目，明确分工，分头准备。

3. 准备好测试锅炉蒸发量、蒸汽湿度、压力、烟气成分，粉尘浓度等所需仪器设备和装取煤、灰渣试样的贮存容器等。

4. 检查测点的布置是否合理，安装测量仪器设备，作单项检查试验，检查仪器设备的灵敏度是否符合要求。

5. 全面检查并记录各设备部件及有关辅助设备的状态，进行必要的核证，消除设备存在的缺陷。

消除设备缺陷是锅炉热工试验很重要的前题和条件，因为整个试验是在锅炉满负荷情况下进行，其存在的缺陷消除的彻底与否，不仅直接影响试验的质量，而且关系到人身和设备的安全运行，必须引起重视。当设备存在较大缺陷而不能保证锅炉正常可靠运行时，一般不应进行试验。

6. 预备性试验。为了确保正式试验的顺利进行，在正式试验前必须做预备性试验（即调整试验），作为对锅炉运行情况和仪器设备的可靠性的全面检查，并使试验人员熟练

地掌握仪器设备的使用。

预备性试验时，应和正式试验一样，记录全部测量数据，以便和正式试验对比。

1—3 试验的技术要求

为了保证试验具有一定的准确性，应遵守如下技术要求：

1. 正式试验应在锅炉热工况稳定后进行。所谓热工况稳定是指炉墙、钢结构等吸热达到饱和和稳定状态。热工况稳定时间参照如下：

对无砖砌的火管锅炉

燃气或燃油 不少于2小时（自冷态点火开始）

燃煤 不少于4小时（自冷态点火开始）

对轻型炉墙 不少于8小时（自冷态点火开始）

对重型炉墙 不少于24小时（自冷态点火开始）

2. 正式试验应在锅炉调整到试验工况一小时后开始进行。

3. 试验所需的持续时间不得小于表1-1规定：

表1-1 锅炉试验的持续时间

试验方法	锅 炉 类 型	时 间 （小时）
正 平 衡	手烧炉	5（至少包括一个清灰周期）
	机械层燃炉、抛煤机炉、沸腾炉	4
	煤粉炉、油炉、气炉	4
反 平 衡	机械层燃炉、抛煤机炉、沸腾炉	4
	煤粉炉、油炉、气炉	3

4. 试验开始前应先进行清炉、吹灰、排污、冲洗水位

表等，在试验期间不应再进行这些工作（炉烧炉的清炉除外）。

5. 试验结束后的水位高度、压力大小、煤层厚度，都与开始时基本上保持一样。

6. 整个试验期间，蒸汽流量应该保持稳定，其波动范围应控制在 $\pm 10\%$ 以内。

7. 作为新产品鉴定的热工试验，蒸汽参数必须符合设计参数，在试验期间内的压力波动应不超过下列规定：

工作压力 $P < 16 \text{ kgf/cm}^2$ 试验压力为 $P \begin{matrix} +4\% \\ -15\% \end{matrix}$

工作压力 $P \geq 16 \text{ kgf/cm}^2$ 试验压力为 $P \begin{matrix} +4\% \\ -10\% \end{matrix}$

8. 试验进行时，司炉工人应固定不变。

9. 各种测量仪表，应事先进行校正。各测量项目数据应及时、正确的记录读数，一般可10分钟或15分钟记录一次，并记录在统一形式的表格内。

锅炉热工试验数据记录表

单位 _____ 试验日期 _____

锅炉型式 _____ 记录人 _____

时 间	项 目	蒸汽压力	蒸发量	给水温度	排烟温度	备 注

10. 试验中，总负责人应经常进行巡回检查各测量岗位情况，随时分析测量数据，以便随时发现问题，及时调整改

进。

11. 在额定负荷下，应重复进行二次试验，如两次试验的结果相差过大时需再重做一次，必要时还需进行超负荷和低负荷试验。

12. 额定负荷下两次试验的热效率偏差，对于正平衡法不得大于4%，对于反平衡法不得大于6%。锅炉热效率取两次试验所得的平均值。对于工业锅炉宜用正平衡法进行热效率测定。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%，而锅炉热效率以正平衡法测定值为主。对于容量较大的锅炉，在使用正平衡法有困难时，也可用反平衡进行热效率测定。

第二章 工质的基本状态参数

众所周知锅炉是生产热量（蒸汽或热水）的一种机械设备，它使燃料在炉膛中与氧发生剧烈的化学作用，产生高温的烟气，用来加热锅炉中的水，或者使它转变成水蒸汽。此时的烟气、空气、水蒸汽、热水等都是携带热能的工作物质，统称为工质。它们是由大量分子组成的，由于分子之间存在着作用力，使分子以一定的方式排列聚集在一起，且分子又在不停地作热运动，温度愈高，分子的运动愈剧烈，这就决定了物体的性质和状态。工质表现在热力现象方面的状况是通过各种物理量来表示的，这些物理量称为状态参数。锅炉热工测试中常用的状态参数有温度、压力、比容（或重度）、焓等。

2—1 温 度

温度是标志物体冷热程度的参数，温度高显示较热的状态，温度低显示较冷的状态。

目前对温度的高低主要有两种表示方法：

1. 摄氏温度：以 $^{\circ}\text{C}$ 表示，在1标准大气压下，纯水开始结冰时的温度（冰点）定为 0°C ；纯水沸腾时的温度（沸点）定为 100°C 。在 0°C 与 100°C 之间划分为100等分，每一等分就是摄氏温度 1°C 。

2. 绝对温度：以 $^{\circ}\text{K}$ 表示，每 $^{\circ}\text{K}$ 与摄氏温度每 $^{\circ}\text{C}$ 在数值上完全相等。在1标准大气压下，纯水的冰点为 273°K ，

沸点为 373°K 。

摄氏温度和绝对温度之间的换算关系为：

$$T = 273 + t \quad ^{\circ}\text{K} \quad (2\equiv 1)$$

式中 T —— 绝对温度($^{\circ}\text{K}$)；

t —— 摄氏温度($^{\circ}\text{C}$)。

2—2 压 力

压力是指垂直作用于物体单位面积上力的大小，物理上称为压强，用下式表示：

$$P = \frac{Q}{f} \quad (\text{kgf}/\text{cm}^2) \quad (2\equiv 2)$$

式中 P —— 压力(kgf/cm^2)；

Q —— 作用于物体上的力(kgf)；

f —— 物体受力面积(cm^2)。

由于在锅炉中，工质的压力往往很高，通常采用工程上规定的每平方厘米面积上受到一公斤力，称为一个气压，以 P 表示。在锅炉烟道和风道中的压力较小，通常用水柱的高度表示。

为何用水柱高度也能表示压力的大小呢？这可以根据作用力平衡的原理来分析。从图 2-1 中可知，水柱作用在容器底面积 f 上的力 Q 等于水柱的重量。即

$$Q = hf\gamma$$

$$\text{而压力 } P = \frac{Q}{f}$$

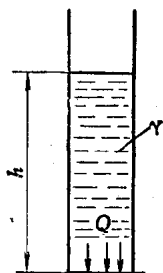


图2-1 用水柱高度表示压力

$$\text{所以 } P = \frac{Q}{f} = \frac{hf\gamma}{f} = h\gamma \quad (2\equiv3)$$

式中 h ——水柱高度；

γ ——水的重度，即单位体积水柱的重量。

因为水的重度为 1000kg/m^3 ，如当 $P = 1\text{kg/cm}^2$ 时，则

$$h = \frac{P}{\gamma} = \frac{10000}{1000} = 10\text{mH}_2\text{O} = 10000\text{mmH}_2\text{O}$$

由此得出， $1\text{mmH}_2\text{O} = 0.0001\text{kgf/cm}^2 = 1\text{kgf/m}^2$

另外，锅炉中的工质压力，通常用测压仪表（压力表）直接测定，一般称为表压力，以 P_b 表示，而在热工计算中，常常需要知道工作的实际压力，把它称为绝对压力，以 P_j 表示。它们之间的关系是：

$$P_j = P_b + 1 \text{ (大气压力) (kgf/cm}^2\text{)} \quad (2\equiv4)$$

2—3 比 容 与 重 度

工质的容积通常因所处的温度和压力不同而不同，反映定量工质容积大小的状态参数就是比容，以 v 表示，单位是 $\text{米}^3/\text{公斤}(\text{m}^3/\text{kg})$ 。设容器中有 $G\text{kg}$ 工质，所占容积为 $V\text{m}^3$ ，则其比容为：

$$v = \frac{V}{G} \text{ (m}^3/\text{kg)} \quad (2\equiv5)$$

比容的倒数称为重度。它是指单位容积工质所具有的重量，以 γ 表示，单位为 kg/m^3 。

$$\text{即 } \gamma = \frac{1}{v} = \frac{G}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)} \text{ 或 } \gamma v = 1 \quad (2\equiv6)$$

2—4 热 量 与 比 热

热量是表示物体吸热或放热多少的物理量。热量的单位

通常用卡或千卡也叫大卡。

1 大卡是使 1 公斤的纯水，在 1 个标准大气压力下(760 毫米汞柱)，温度由 19.5°C 升高到 20.5°C 时所吸收的热量。

实践证明，一定量的同一物体，升高（或降低）不同的温度，其所吸收（或放出）的热量不同。例如锅炉的空气预热器，当其通过的空气量保持不变时，空气温度从 15°C 升高到 50°C ，要比从 15°C 升高到 70°C 所吸收的热量少。同一种材料的物体在加热（或冷却）时，变化相同的温度，其所吸收（或放出）的热量，则因物量的不同而不同。物量大，吸收（或放出）的热量就多。实验还证明，不同材料的物体，即使物量一样，升高（或降低）相同的温度，所吸收（或放出）的热量也不同。上面谈到的物量单位，对固体和液体来说用重量（kg）表示，对气体除用重量表示外，还常用容积（ Nm^3 ）表示。

由此可见，物体温度变化时，所吸收（或放出）的热量，与很多因素有关，为了便于说明物体吸热（或放热）能力的大小，我们把单位物量的某种物体，温度变化 1°C 时所吸收（或放出）的热量，叫做这种物体的比热。比热因物量表示单位的不同可分为重量比热，容积比热等。

重量比热是表示 1 公斤物体，温度升高（或降低） 1°C 时所吸收（或放出）的热量，以 C 表示，单位是 $\text{Kcal/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$ 。

容积比热是表示 1 标准立方米（ Nm^3 ）的气体，温度升高（或降低） 1°C 时所吸收（或放出）的热量，以 c 表示，单位是 $\text{Kcal/Nm}^3\cdot^{\circ}\text{C}$ 。

另外，需要说明的是，气体比热与过程的特性有关，除了定压比热之外，还有定容比热，这是相应于定容加热（或冷却）过程和定压加热（或冷却）过程来说的。

定容加热是保持气体容积不变的加热过程。例如氧气瓶在烈日下曝晒时受热的情形。在定容加热过程中，气体吸收热量，温度升高，压力也随之加大。

定压加热是保持气体压力不变的加热过程，例如锅炉内烟气的加热（或冷却）一般可近似地看作定压加热（或冷却），这时气体吸收的热量，

一方面使自身温度升高，另一方面还要克服外力而膨胀做功。所以定压加热过程时，要比定容加热吸收更多的热量，定压比热要比定容比热大。

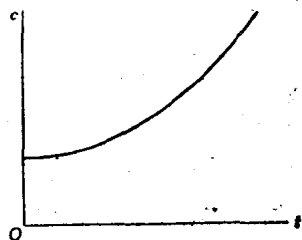


图2-2 温度与比热的关系

气体的比热还与温度有关，比热与温度的变化关系，

在 c_p-t 图上（图2-2）表示为一条曲线，所以对某种气体，温度在一定范围内变化时，比热也随之变化，故我们采用某一温度范围烟气比热的平均值，作为这一温度范围内烟气的平均比热。

在锅炉热效率计算中，我们遇到的是气体的平均定压比热，以 c_p 表示，单位是 $\text{Kcal}/\text{Nm}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ ，由于 c_p 值随温度而变化，为使用方便，在不同温度(t)下的焓值，可直接从表2-1中查得。

表2-1 1标米³空气、气体和1公斤灰粒的焓值表

t (℃)	(cpt) CO ₂ (Kcal/ Nm ³)	(cpt) N ₂ (Kcal/ Nm ³)	(cpt) O ₂ (Kcal/ Nm ³)	(cpt) H ₂ O (Kcal/ Nm ³)	(cpt) K (空气) (Kcal/ Nm ³)	(cpt) fh (飞灰) (Kcal/kg)
100	40.6	31.0	31.5	36.0	31.6	19.3
200	85.4	62.1	63.8	72.7	63.6	40.4
300	133.5	93.6	97.2	110.5	96.2	63.0
400	184.4	125.8	131.6	149.6	129.4	86.0
500	238	158.6	167	189.8	163.4	109.5
600	292	192	203	231	198.2	133.8
700	349	226	240	274	234	158.2
800	407	261	277	319	270	183.2
900	466	297	315	364	306	209

上表中的各项数值除以对应的温度值，可得各气体的平均比热。不同的气体其比热值也不同。例如锅炉烟气中的CO₂、N₂、O₂……等，由于它们的分子量、分子结构特性不同，因此比热的数值也不同。

2-5 理想气体状态方程式

所谓理想气体是一种假想的气体，这种气体分子之间不存在吸引力，而分子本身是一种不占容积的质点。虽然理想气体在自然界中并不存在，但在工程上，当气体分子间的吸引力及分子本身容积很小可以忽略，不致在计算时造成过大的误差，我们就可以把它当作理想气体，如锅炉的烟气、空气等。

上面我们已经谈到了温度、压力、比容这三个基本状态