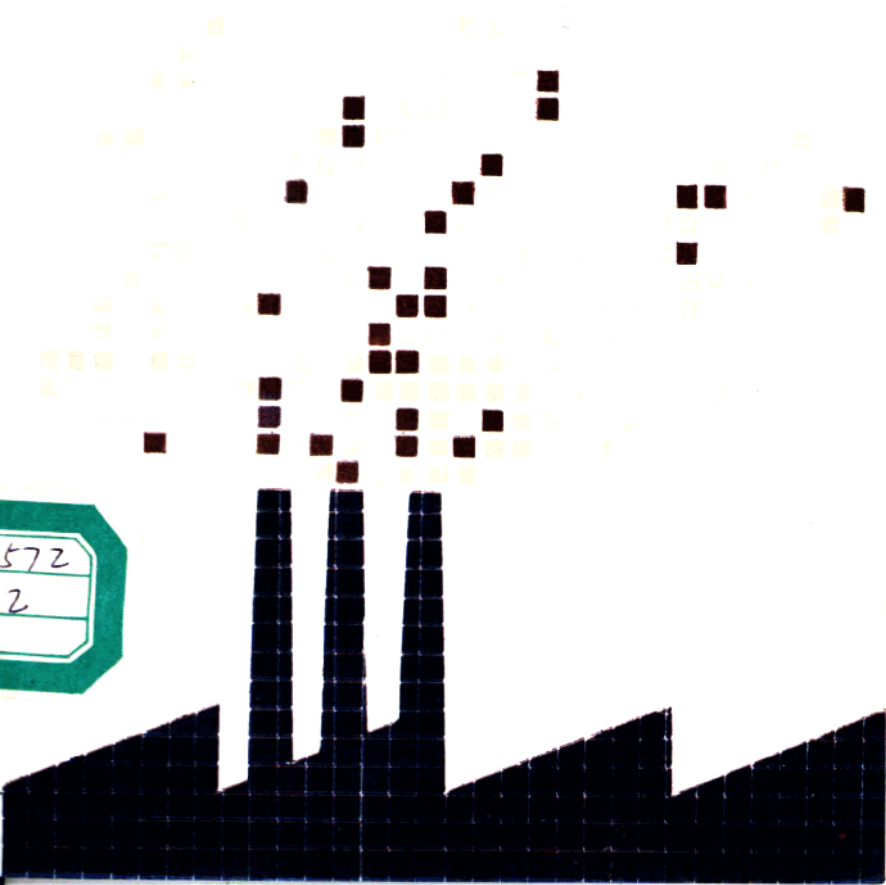


烟尘烟气测试 实用技术

于正然 刘光铨
单嫣娜 常德华

编著



前 言

目前,我国面临环境污染蔓延和生态环境恶化的形势是严峻的。由各种工业炉窑和民用锅炉排放的大量烟尘和有害气体污染着环境,危害着人类的生命和健康。为配合防治大气污染,改善环境,加强环境监测管理,我们编著了这本“烟尘烟气测试实用技术”。

本书从实用出发,总结了多年的工作经验。简明扼要地阐述了烟尘烟气测试的基本原理,详细地叙述了测量方法和操作步骤,同时列举了应用实例。为了使读者使用方便,我们还编辑了有关国家标准和所需要查阅的各种换算表。

本书适用于各工矿企业、环境保护、劳动保护、卫生防护、科学研究等部门从事环境监测、污染治理、工业管理、科研等工程技术人员阅读,也可供高等院校师生参考。

胡狱威、宋慰祖、刘烈英、胡更新同志参加了本书部分章节的编写工作。在本书编写过程中得到了陈子久、王汉臣、刘全义、程秉柯等同志的指导和支持,在此一并表示感谢。

编 者

1989年8月

目 录

第一章 锅炉运行工况的控制	(1)
第一节 锅炉烟尘的排放特性	(1)
第二节 锅炉运行负荷的控制方法	(3)
第三节 锅炉负荷的调试	(9)
第二章 烟尘测试方法	(13)
第一节 概述	(13)
第二节 烟气状态参数、成分和流量的测定	(20)
第三节 烟尘采样方法	(43)
第三章 尘粒分散度和除尘器性能的测试	(61)
第一节 尘粒直径及尘粒大小分布的表示方法	(61)
第二节 尘粒分散度的测定方法	(68)
第三节 除尘器性能的测试	(107)
第四章 监测烟气排放的视觉方法 ——林格曼烟气浓度图	(118)
第一节 林格曼图的规格	(118)
第二节 林格曼烟气浓度图的使用方法	(121)
第三节 应用林格曼烟气浓度图控制烟气排放的一些标准	(122)
第四节 林格曼烟气浓度图应用中所存在的问题	(124)
第五章 烟气采样方法	(127)
第一节 烟气采样位置和采集方式	(127)
第二节 烟气采样方法	(129)
第三节 采样注意事项	(144)
第四节 采样应用举例	(145)
第六章 烟气中有害气体分析方法	(147)

第一节	二氧化硫	(148)
第二节	氮氧化物	(155)
第三节	烟气成分及空气过剩系数	(172)
第四节	硫化氢	(177)
第五节	氟化物	(186)
第六节	硫酸雾	(192)
第七节	应用实例	(200)
参考文献		(204)
附 录		(205)
1.	原子量表	(205)
2.	主要试剂分子量及当量表	(208)
3.	ppm 与 mg/m^3 的换算关系	(211)
4.	不同温度下气体的摩尔体积	(214)
5.	几种常用单位换算表	(214)
6.	在 760mmHg 压力下空气饱和时水蒸气压力和 含湿量	(220)
7.	烟气中水汽体积百分数 X_{sw} 计算图	(223)
8.	烟气流速 v_s 计算表和等速采样流量读数 Q_s 计算表	(224)
9.	百分比与几率单位对照表	(242)
10.	符号与单位一览表	(250)
11.	大气环境质量标准	(252)
12.	锅炉烟尘排放标准 (GB3841-83)	(257)
13.	几个主要国家固定污染源排风或排气中 各种污染物的排放标准	(259)
14.	记录表	(265)

第一章 锅炉运行工况的控制

根据 GB5468-85《锅炉烟尘测试方法》的要求，锅炉烟尘排放浓度的测试应在锅炉热工况稳定后进行。所谓热工况稳定是指炉墙、钢结构等部件的吸热达到饱和稳定状态。达到热工况稳定状态，不同的炉型需要不同的时间。具体时间（自冷态点火开始）参照如下：

对无砖砌的火管锅炉

燃气或燃油 不少于 2h

燃煤 不少于 4h

对轻型炉墙 不少于 8h

对重型炉墙 不少于 24h

根据《方法》的要求：

（1）锅炉新产品烟尘排放浓度的测定应在额定负荷工况下进行。额定负荷即设计负荷，铭牌负荷。又称额定出力。

（2）现有运行锅炉烟尘排放浓度的测定，要求使用单位积极创造条件，满足 GB3841-83《锅炉烟尘排放标准》3.2 条的要求。若现场条件受限制，难于达到上述要求时，至少应保证在该锅炉最大运行负荷条件下进行测定，并需注明测定时的负荷率。即实际运行负荷与额定负荷之比的百分数。

第一节 锅炉烟尘的排放特性

影响锅炉出口烟尘浓度的因素很多，其中燃烧设备对排

尘浓度影响最大。采用不同的燃烧设备，其相应的排尘浓度相差可达几十倍，甚至几百倍，见表 1-1。在正常运行时，简易煤气炉、反烧炉等的排尘浓度均很低，一般在 $0.1\text{g}/\text{m}^3$ (标) 以下；链条炉相应为 $2\sim 5\text{g}/\text{m}^3$ (标)；沸腾炉最大，其排尘浓度为 $40\sim 60\text{g}/\text{m}^3$ (标)。不仅如此，这些不同类型的燃烧设备所排出烟尘的粒度分布也不一样。抛煤机炉子烟尘的颗粒较大，其次是沸腾炉，而煤粉炉燃用 $100\mu\text{m}$ 以下的粉煤，故烟尘中含细颗粒较多。

表 1-1 不同燃烧方式锅炉的排尘浓度

燃烧方式	排尘浓度 (g/m^3 (标))	飞灰占总灰量的百分比(%)
简易煤气炉	0.1~0.2	—
反烧炉	0.15~0.25	—
链条炉	2~5	15~25
振动炉	4~8	25~30
倾斜式往复炉	0.5~2.5	—
抛煤机炉	5~13	25~40
煤粉炉	15~30	75~80
半沸腾炉	6~15	40~60
全沸腾炉	40~60	~

煤的成分及颗粒度对排尘浓度也有很大影响。一般情况下，粉煤比例越大，煤中灰分越多、水分越少或挥发分越多，由此会导致烟尘浓度的增加。

此外，锅炉负荷高低，炉子结构型式以及运行管理水平，烟气的流速等因素对排尘浓度均有影响。

应特别提出，锅炉负荷对排尘浓度的影响很大。图 1-1 为层燃炉的烟尘排放浓度与负荷率的关系曲线，从图中可明显地看出，排尘浓度是随负荷率的增加直线上升的。当负荷

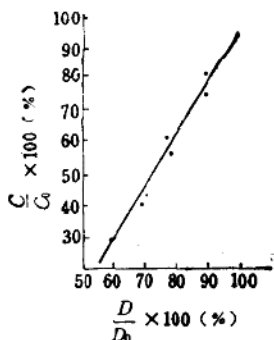


图 1-1 排尘浓度与负荷率的关系曲线图

D_0 ——额定负荷 (t/h) ;
 D ——运行负荷 (t/h) ;
 C_0 ——额定负荷时烟尘浓度 (mg/m³ (标)) ,
 C ——运行负荷时烟尘浓度 (mg/m³ (标))

率为 60%，烟尘排放浓度仅为额定负荷时的 30%；负荷率为 80% 时，烟尘排放浓度上升到额定负荷时的 65%。当超负荷时，烟尘排放浓度便急骤上升。这也说明，为什么在测试烟尘浓度时，必需同时测定负荷率。否则，只提出烟尘浓度一项指标时，便没什么可比性，监察部门也无从鉴别其准确性、可靠性。同时也说明了为什么验收锅炉新产品时，要求负荷率为 100%。

第二节 锅炉运行负荷的控制方法

运行负荷的控制，理论上讲很简单，但在实际工作中却很难做到准确。这是因为仪表的准备，测量系统的准备工作很繁杂。所以，烟尘浓度的测试最好与锅炉热工测试同时进

行。这时，各项热工参数都为已知，而且平稳，所以测得的烟尘浓度具有较高的准确性和代表性。

一、蒸汽锅炉的负荷控制

蒸汽锅炉的负荷是指锅炉的蒸发量，即锅炉每小时能产生多少千克的蒸汽。单位为 t/h。

1. 蒸汽流量表法

容量较大的锅炉，如 10t/h 以上的，锅炉房里都配有流量测量设备。这时可通过蒸汽流量表，测出锅炉每小时送出多少蒸汽，这样就能测出锅炉当时的负荷是多少。

这里要特别注意，所使用的蒸汽流量表给出的读数必须是准确的。一般应事先对所使用的蒸汽流量表进行校准，因蒸汽流量表使用较长时间后，其读数与实际值往往有很大误差。

2. 量水箱法

小容量的工业锅炉采用本方法最为常见。此法是利用测量水箱中水位的变化，从而测出锅炉的给水量，从而也就测出了锅炉的蒸发量。即：

$$\text{给水量} = \text{水位差} \times \text{水箱面积}$$

利用水箱测量给水量方法，一般应用两只水箱，一只为量水箱，一只为耗水箱。量水箱应位于耗水箱的上面，其容量不应小于 0.5m^3 。耗水箱的容量应比量水箱大 25%。量水箱装好后应进行校准。校准的方法可用重量法。即把秤过的水一份份倒入水箱，或者从量水箱中取出一份份水，依次加以称重。每份水可选取水箱容量的 10~20%。对水箱的校准应进行两次，两次校准之间的误差应小于 $\pm 0.2\%$ 。量水

箱的进水管和排水管应具有足够大的口径，以保证量水箱放满和排空所需时间比耗水箱相应所需时间小得多。

另外需要指出的是，在测定给水量时，给水管路，特别是水泵不能有泄漏。

此法不需专门的仪表，简便、准确，是测量小容量工业锅炉负荷（蒸发量）最常用的一种方法。

3. 水表法

给水量测定，也可用自来水表。由于锅炉给水往往是间断的，加上水表本身误差较大，所以精度较差。这时可连续几小时记录水表读数，然后平均算出锅炉的蒸发量。

要特别注意的是，在测量锅炉的给水量时，锅炉绝对不能排污，连续排污也要关掉。否则给水量不等于蒸发量。

二、热水锅炉的负荷控制

热水锅炉的负荷，即锅炉每小时产生多少 MJ 的热量，单位为 MJ/h。按国际单位，热水锅炉的负荷是以兆瓦（MW）表示的。所以，原来的 60，120，240，360 万大卡/小时的锅炉相应地表示为 0.7，1.4，2.8，4.2 MW。以 60 万大卡/小时为例，其换算关系如下：

$$\begin{aligned} 60 \text{ 万大卡/小时} &= 600000 \text{ kcal/h} \\ &= 4.186 \times 600000 = 2512000 \text{ kJ/h} \\ &= \frac{2512000}{3600} \times 10^{-3} = 0.6978 \text{ MW} \\ &\approx 0.7 \text{ MW} \end{aligned}$$

大卡 = 千卡

由于新老单位都在用，所以要特别注意单位之间的换算关系。

热水锅炉的负荷按下式计算：

$$Q = \frac{G(i_e - i_f) \times 10^{-3}}{3600} \quad (1-1)$$

式中：

Q ——锅炉的发热量， MW；

i_e ——出水热焓， kJ/kg；

i_f ——回水热焓， kJ/kg；

G ——锅炉的循环水流量 kg/h。

i_e, i_f 值可按锅炉的出水、回水温度查《未饱和表与过热蒸汽表》得出。根据水的热力学性质，在常用的温度范围内， $(i_e - i_f)$ 值与 $[4.186(t_e - t_f)]$ 值之间的误差在 0.1% 内。所以，在查表有困难时，锅炉的发热量也可按下式计算：

$$Q = \frac{4.186G(t_e - t_f)}{3600} \times 10^{-1} \quad (1-2)$$

式中：

t_e ——出水温度 (°C)；

t_f ——回水温度 (°C)。

由此可见，要想测出热水锅炉的发热量，只要测出 G 、 t_e 、 t_f 三个参数便可。

1. 循环水流量

要测出锅炉的循环水流量，就必需在回水管道上（出水管内水温太高）安装热水流量计。常用的主要是速度式流量计，一般称之为水表，有带垂直旋转叶轮或带螺旋形叶轮的流量计，还有一种较先进的新型轻便式涡流热水流量计。

较大容量的锅炉其本身带有流量表，只要考核一下仪表的可靠性便可。

2. 进出水温差的测量。

这要求在锅炉的出水管、回水管上分别装上温度计。温度计应选用较精密的水银温度计，最好能精确到 0.1°C 。

三、间接控制的方法

锅炉负荷的间接控制即燃煤量的控制法。燃煤量就是试验期间平均每小时用去多少 kg 的煤，即：

$$\text{燃煤量}(B) = \frac{\text{试验期间用去的总煤量}}{\text{试验时间}} \quad (\text{kg/h}) \quad (1-3)$$

这是一个很重要的热工参数。知道燃煤量后，通过煤质低位发热值和锅炉运行热效率的估算，就能求得锅炉的有效利用热量，也就能估算出锅炉的负荷水平了。估算的具体方法如下：

首先根据锅炉额定负荷下的有效利用热 Q_0 ，求出额定负荷下的燃煤量 B_0 。

$$B_0 = \frac{Q_0}{\eta \cdot Q_{bw}} \quad (1-4)$$

式中，

B_0 ——额定负荷下的燃煤量， kg/h ；

Q_0 ——锅炉额定负荷下的有效利用热， kJ/h ；

η ——锅炉的热效率%，一般为 $60 \sim 70\%$ ；

Q_{bw} ——燃煤的低位发热值， kJ/kg ，一般为 $19000 \sim 21800 \text{ kJ/kg}$ 。

求得 B_0 值后，根据测得实际的燃煤量 B 。便可估算出

锅炉的负荷率。

$$\text{负荷率} = \frac{B}{B_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

例：某台 1.4MW 的热水锅炉，其额定负荷下的有效利用热 $Q_0 = 1.4\text{MW} = 5040000\text{kJ/h}$ ，锅炉的热效率 $\eta = 70\%$ （容量大的估上限，小的估下限），燃煤的低位发热值 $Q_{hw} = 20900\text{kJ/kg}$ 。

解：代入 (1-1) 式

$$B_0 = \frac{5040000}{0.7 \times 20900} = 344.5\text{kg/h}$$

若实测 $B = 335\text{kg/h}$ ，则：

$$\text{负荷率} = \frac{B}{B_0} \times 100\% = \frac{335}{344.5} \times 100\% = 97.2\%$$

若是蒸汽锅炉，其有效利用热 Q_0 约为其额定蒸发量与 2500 的乘积。如蒸发量为 1t/h 的锅炉其 Q_0 约为：

$$Q_0 = 1000 \times 2500 = 25 \times 10^5\text{kJ/h}$$

其他数值的估算同热水锅炉。

最可靠的燃煤量的测量方法就是用磅秤一车一车地称出试验期间用去的总耗煤量，然后按时间平均，求出每小时的燃煤量。方法虽然简单，但要做到测量准确，还须注意以下几点：

(1) 尽量保持试验工况始末一致。就是说，要求试验开始和结束时炉子的燃烧情况尽量相同，即要求锅炉在试验开始和结束时，煤层厚度、炉子的燃烧面积及燃烧程度相同。对于链条炉排、往复炉排、震动炉排等，要求着火区域一致。对于手烧锅炉，试验结束前最后一次清炉或加煤至试验结束的时间长短，应与试验前最后一次清炉或加煤至试验

开始的时间长短相同。由此可见，试验的时间越长，数据的误差就越小。

(2) 称煤工作要认真，皮重要称准，数字要记清，称的次数要尽量少。

(3) 磅秤必须经过校验，方可使用。

第三节 锅炉负荷的调试

锅炉运行负荷的高低要在试验结束之后才能最后确定。为了试验能顺利进行，保证试验能满足试验要求，使测试的数据有效，事先调节好负荷是十分重要的。

负荷的调试首先是燃烧的调试。其中包括：火床的燃烧面积大小，即常说的是否是满膛火；煤层厚度是否合适；炉排速度是否合适；着火线是否合适等问题。应根据经验与司炉人员商量好，使上述诸条件处于最佳状态。为了使锅炉负荷稳定，尽量减少调试工作量，试验期间煤质应保持一定，变化不能大。尤其是煤耗大的锅炉应事先准备好足够的煤供试验用。

其次是风量与过剩空气系数的调节。在负荷的调节过程中，这是两个很重要的因素。虽然在实际运行中，这两个参数很难控制在设计参数之内，往往都偏大，但应尽量使其接近设计值。应根据测量的结果找出锅炉运行的主要问题，以便消除不利于燃烧的因素。

一、风量的调试

锅炉的鼓引风机系统是锅炉的重要附属设备。烟风匹配

是否合理，直接关系到锅炉燃烧工况的良好与否。所以，通过烟气量和排烟温度的测量也可间接地判断锅炉运行负荷的高低。但由于很难准确地估算出其具体数值，只能用来作调节负荷的指导。

蒸发量为 1t/h 或发热量为 0.7MW 锅炉所需的鼓风量可按表 1-2 估算。

表 1-2 风量估算表

燃烧设备	层 燃 炉	沸 腾 炉	煤粉炉或油炉
鼓风量 (m ³ /h)	1250	1100	1000

蒸发量为 1t/h 或发热量为 0.7MW 锅炉所产生的烟气量可按表 1-3 估算。

表 1-3 烟气量估算表 (m³/h)

燃 烧 方 式		α_s	排 烟 温 度 (°C)		
			150	200	250
层 燃 炉		1.80	3508	3923	4328
沸 腾 炉	一般煤种	1.55	2685	3002	3320
	矸石、石煤	1.45	2511	2809	3106
煤 粉 炉		1.55	2461	2735	3044
油 炉		1.45	2303	2575	2848

按一般运行情况，锅炉每 1t/h 蒸发量或 0.7MW 发热量产生的烟气量为 2700~3300m³/h (烟气温度为 200°C)。

若实际烟气温度为 t_r 时，可按式换算出相当烟温为 200°C 时的烟气体积 Q_{200}

$$Q_{200} = Q_r \frac{273 + 200}{273 + t_r} \quad (1-6)$$

式中：

Q_{200} ——烟温为 200°C 时的烟气体积 (m^3/h)，

Q_r ——烟温为 t_r 时的烟气体积 (m^3/h)，

t_r ——实测烟温 ($^\circ\text{C}$)。

二、过剩空气系数 α 值的调试

燃烧是一种化学反应。理论上燃料燃烧所需的空气量为燃料中各元素成分在燃烧时所需的空气量之和。各元素燃烧时理论上所需的空气量称为理论空气量。

锅炉在实际运行中，仅供给理论空气量不能使燃料达到完全燃烧。这是因为在实际燃烧时，不能做到空气与燃料的完全混合。因此，实际上供给的空气量总是比理论空气量大，使燃料尽可能完全燃烧。

实际供给的空气量与理论空气量之比称之为过剩空气系数，用符号“ α ”表示：

$$\alpha = \frac{V_r}{V_0} \quad (1-7)$$

式中：

V_r ——实际空气量 ($\text{m}^3(\text{标})/\text{kg}$)，

V_0 ——理论空气量 ($\text{m}^3(\text{标})/\text{kg}$)。

过剩空气系数愈大，表示实际供给的空气量比燃料燃烧所需的理论空气量愈大，炉膛里的氧气就愈充足。但是，过

剩空气系数过大，则因大量冷空气进入炉膛，炉膛温度就会下降，对燃烧反而不利；排烟热损失也会增加，使锅炉的热效率降低；烟气量增加，烟气所携带的烟尘量也随之增加。

所以，在实际运行中总希望排烟处的过剩空气系数在1.8以下。当然，由于设备状况不佳、运行水平低，实测时， α 往往大于1.8，而且有的大得惊人。这是因为负荷低，炉排燃烧面小，大量冷空气从炉排窜入炉膛；再就是由锅炉尾部烟道或除尘器本身大量漏风所至。这都是不正常的，应在试验之前加以消除。

第二章 烟尘测试方法

第一节 概 述

一、管道烟尘特性

烟尘通常是指从烟道、烟囱和一般排气筒等固定污染源中排放的烟尘和粉尘。烟尘是由燃料燃烧,以及冶炼、锻造、烘干等生产过程中产生的。粉尘大多是由物料的机械粉碎、筛选、包装和输送等生产过程中产生的。携带粉尘的气体多是车间的空气,气体成分不发生变化;气体的温度、湿度和车间的空气差不多,变化不大。而从烟道、烟囱排放的含尘气体,有些不但温度高、含湿量大,而且气体成分也发生变化,且伴有二氧化硫、氮氧化物和氟等有害气体,有较强的腐蚀性。因此,在选用测定方法和测试装置时,应考虑这些因素。

此外不同行业不同生产方式排出的烟尘浓度差别很大,即使是同一行业同一类型的生产方式,由于生产工艺、原料、控制措施和管理水平的不同也有很大差异。就以燃煤工业锅炉排尘来说,由于燃烧方式、煤质、锅炉负荷不同,粉尘浓度就有很大区别,浓度范围从 $110\sim 75162\text{mg}/\text{dm}^3(\text{标})$,高低相差几十倍甚至数百倍。经除尘器净化后的烟尘浓度要低得多,根据一些实测资料,经电除尘器、布袋除尘器净化后的烟尘浓度一般在 $30\sim 400\text{mg}/\text{dm}^3(\text{标})$ 之间。旋风除尘器净化后的烟尘浓度一般在 $150\sim 1000\text{mg}/\text{dm}^3(\text{标})$ 之间。