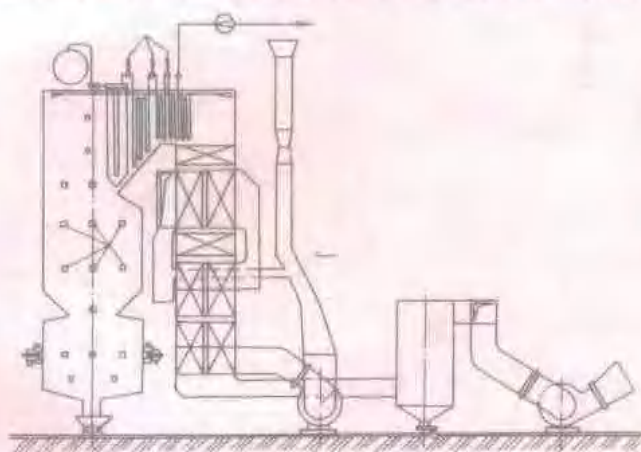


锅炉测试

林宗虎 编著



中国计量出版社

TK226
L61

390268

锅 炉 测 试

林宗虎 编著



中国计量出版社

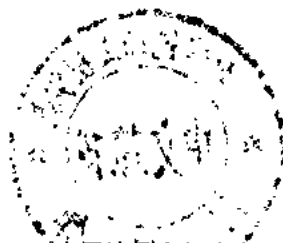
(京)新登字 024 号

图书在版编目 (CIP) 数据

锅炉测试/林宗虎编著. —北京: 中国计量出版社, 1996. 4
ISBN 7-5026-0759-5/TB · 476

I. 锅… I. 林… II. 锅炉-试验 IV. TK226

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 03224 号



中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

北京市蓝地公司激光照排

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

850×1168 毫米 32 开本 印张 13.25 字数 348 千字

1996 年 4 月第 1 版 1996 年 4 月第 1 次印刷

*

印数 1—2500 定价: 16.00 元

前 言

锅炉是电力工业火力发电三大设备之一，同时也是工矿企业生产的重要热力设备。随着改革开放后国民经济的高速增长，锅炉工业得到飞速的发展。至今我国火力发电装机容量已达1.6亿kW，并以每年1500万kW速度增长。因此电站锅炉随之得到高速发展。我国现有数十万台工业锅炉在运行，每年还有数万蒸吨的新造工业锅炉投入运行。因此无论是新锅炉的研究、开发、投运、调试，还是已运行锅炉的大修、改造、运行和监督，均需进行大量锅炉测试工作。

锅炉测试是一项十分复杂的工作，涉及的被测工质有固体燃料、液体燃料、气体燃料、烟气、空气、灰渣、蒸汽、水、汽水混合物和空气煤粉混合物等。测试压力自负压到数十MPa，测试的温度可达近2000℃，测试的质量流量可达每小时数千吨。需要测定一元气流的流速，也需测定二元气流的流速。此外，还需用一些专门方法进行一系列锅炉专用试验。为了便于从事锅炉测试的工程技术人员进行工作，特编此书，以供参考。

本书共分十六章，主要论述锅炉的温度、压力、差压、流量、流速的测量方法，各种工质的取样方法，烟气分析方法，锅炉热效率测试，锅炉过量空气和漏风测试，炉膛空气动力场测试，锅炉水动力特性试验，锅炉过热器测试，锅炉积灰、磨损和腐蚀的测试，锅炉启动和停炉特性测试以及锅炉热化学测试等方法。此外，还有专门章节论述了锅炉的一些特殊参数，诸如散热损失、露点温度等的测量方法和误差分析。本书所叙内容理论与实际操作相结合，技术实用可靠，可供从事锅炉测试、运行和研究设计工作的科技人员参考，也可作为大专院校有关专业师生的参考书及

教材。

由于编者水平有限，书中欠妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

林 宗 虎

于西安交通大学锅炉教研室

1994 年 9 月

目 录

第一章 概论	(1)
第一节 锅炉及其分类	(1)
第二节 锅炉工作原理	(5)
第三节 锅炉热工试验的类别、要求和内容	(9)
第四节 锅炉主要测量参数	(14)
第二章 锅炉的温度测量	(18)
第一节 概述	(18)
第二节 水银玻璃温度计	(18)
第三节 电阻温度计	(20)
第四节 热电偶温度计	(25)
第五节 辐射高温计	(36)
第六节 文丘利高温计	(38)
第七节 锅炉温度测点的选择和温度场的标定	(40)
第三章 锅炉的压力及差压测量	(43)
第一节 概述	(43)
第二节 弹簧管式压力计	(43)
第三节 液柱式压力计与微压计	(45)
第四节 液柱式差压计	(47)
第五节 膜式压力计及差压计	(52)
第六节 气动式差压传感器	(54)
第七节 电动式差压传感器	(56)
第四章 锅炉的流量和流速测量	(59)
第一节 概述	(59)
第二节 差压式流量计	(60)

第三节	分流旋翼式流量计	(81)
第四节	涡轮流量计	(83)
第五节	测速管	(85)
第六节	汽水混合物的流量和干度测量	(96)
第七节	空气煤粉混合物的流量和浓度测量	(104)
第八节	锅炉燃料量测量	(107)
第五章	燃料、灰渣、烟气及工质的取样方法	(110)
第一节	概述	(110)
第二节	燃料的取样及试样制备	(110)
第三节	灰渣取样方法	(117)
第四节	烟气取样方法	(120)
第五节	工质取样方法	(124)
第六章	烟气成分分析方法	(125)
第一节	概述	(125)
第二节	奥氏烟气分析器	(125)
第三节	烟气全分析器	(129)
第四节	烟气色谱分析法	(132)
第五节	烟气中氧化硫和氧化氮的测量方法	(137)
第六节	烟气测氧仪	(142)
第七章	特殊参数的测量方法	(145)
第一节	概述	(145)
第二节	锅炉散热损失的测量	(145)
第三节	烟气露点温度的测量	(150)
第四节	水冷壁热流密度及热有效系数的测量	(152)
第五节	烟气和空气湿度的测量	(163)
第六节	锅炉水位的测量	(165)
第七节	锅炉燃料燃烧生成的灰分测量	(171)
第八章	锅炉热效率测试方法	(176)
第一节	概述	(176)
第二节	锅炉的热平衡和热效率测试方法	(177)

第三节	锅炉热效率测试时的测点布置	(182)
第四节	锅炉的输入热量	(184)
第五节	锅炉的输出热量	(191)
第六节	锅炉的各项热损失	(193)
第七节	锅炉热效率的确定	(204)
第九章	锅炉的过量空气系数和漏风系数测试方法	(206)
第一节	概述	(206)
第二节	过量空气系数及其计算式	(209)
第三节	漏风系数及其计算式	(218)
第四节	炉膛及其出口水平烟道漏风常用测试方法	(220)
第五节	应用示踪法测量锅炉漏风	(229)
第六节	最佳炉膛过量空气系数的确定方法	(232)
第十章	炉膛空气动力场的测试方法	(236)
第一节	概述	(236)
第二节	火室炉冷态空气动力场测试方法	(239)
第三节	火床炉冷态空气动力场测试方法	(244)
第四节	炉膛热态空气动力场测试	(249)
第十一章	锅炉蒸发受热面水动力特性测试方法	(263)
第一节	概述	(263)
第二节	自然循环锅炉蒸发受热面水动力特性 及其影响因素	(264)
第三节	自然循环回路水循环试验内容	(275)
第四节	自然循环回路水循环试验的测试方法	(277)
第五节	自然循环回路水循环试验的数据整理 及改进措施	(281)
第六节	直流锅炉蒸发受热面的水动力特性 及其影响因素	(284)
第七节	直流锅炉蒸发受热面水动力试验 及其改进措施	(302)

第十二章 锅炉过热器测试方法	(315)
第一节 概述.....	(315)
第二节 过热器试验前的准备工作.....	(315)
第三节 过热器的试验内容及方法.....	(318)
第四节 过热器试验的数据整理及分析.....	(329)
第十三章 锅炉受热面的积灰、磨损和腐蚀测试方法	(338)
第一节 概述.....	(338)
第二节 锅炉受热面的积灰及其测试.....	(339)
第三节 锅炉受热面的磨损及其测试.....	(346)
第四节 锅炉受热面的腐蚀及其测试.....	(352)
第五节 锅炉受热面积灰、磨损和腐蚀的防止.....	(357)
第十四章 锅炉启动和停炉特性测试方法	(364)
第一节 概述.....	(364)
第二节 锅炉启动和停炉特性的测试.....	(365)
第三节 单元机组启动时的燃料和电能损失计算.....	(376)
第十五章 锅炉的热化学测试方法	(379)
第一节 概述.....	(379)
第二节 锅炉热化学试验的目的及准备工作.....	(385)
第三节 锅炉热化学试验测试项目及方法.....	(386)
第十六章 误差分析	(396)
第一节 概述.....	(396)
第二节 粗大误差及坏值的剔除.....	(401)
第三节 系统误差及其消除方法.....	(403)
第四节 随机误差及误差合成.....	(404)
第五节 间接测量中的误差传递和计算.....	(405)
第六节 锅炉测试中的误差分析示例.....	(409)
参考文献	(414)

第一章 概 论

第一节 锅 炉 及 其 分 类

一、锅炉及其部件

锅炉是利用燃料等能源的热能或工业生产中的余热，将工质加热到一定温度和压力的换热设备，也称为蒸汽发生器。

锅炉由主要部件和辅助装置构成。表 1-1 所列是现代大型自然循环高压锅炉所必备的主要部件和辅助装置的名称及主要作用。

表 1-1 锅炉主要部件和辅助装置的名称及作用

名 称		主 要 作 用
主 要 部 件	炉膛	保证燃料燃尽并使出口烟气温度冷却到对流受热面能安全工作的数值
	燃烧设备	将燃料和燃烧所需空气送入炉膛并使燃料着火稳定，燃烧良好
	锅筒	是自然循环锅炉各受热面的闭合并件，将锅炉各受热面联接在一起并和水冷壁、下降管等组成水循环回路。锅筒储存汽水，可适应负荷变化，内部设有汽水分离装置等以保证水汽品质。直流锅炉无锅筒
	水冷壁	是锅炉的主要辐射受热面，吸收炉膛辐射热加热工质，并用以保护炉墙
	过热器	将饱和蒸汽加热到额定过热蒸汽温度，生产饱和蒸汽的蒸汽锅炉和热水锅炉无过热器
	再热器	将汽轮机高压缸排汽加热到较高温度，然后再送到汽轮机中压缸膨胀做功。用于大型电站锅炉以提高电站热效率

续表

名 称		主 要 作 用
主 要 部 件	省煤器	利用锅炉尾部烟气的热量加热给水，以降低排烟温度，节约燃料
	空气预热器	加热燃烧用的空气，以加强着火和燃烧；吸收烟气余热，降低排烟温度，提高锅炉效率；为煤粉锅炉制粉系统提供干燥剂
	炉墙构架	是锅炉的保护外壳，起密封和保温作用，支承和固定锅炉各部件，并保持其相对位置
辅 助 装 置	燃料供应装置	储存和运输燃料
	磨煤装置	将煤磨成煤粉并输入燃用煤粉的锅炉燃烧
	送风装置	由送风机将空气送入空气预热器加热后输往炉膛及磨煤装置应用
	引风装置	由引风机和烟囱将锅炉排出的烟气送往大气
	给水装置	由给水泵将经过水处理设备处理后的给水送入锅炉
	除灰除渣装置	从锅炉中除去灰渣并运走
	除尘装置	除去锅炉烟气中的飞灰，改善环境卫生
	自动控制装置	自动检测、程序控制、自动保护和自动调节

二、锅炉分类

锅炉的品种及分类方式众多，其一般分类概况可参见表 1-2。

表 1-2 锅 炉 分 类

分类方法	锅炉类型	简 要 说 明
按用途分类	电站锅炉	用于发电，大多为大容量高参数锅炉，火室燃烧，热效率较高
	工业锅炉	用于工业生产和采暖，大多为低参数，小容量锅炉，火床燃烧，热效率较低，出口工质为蒸汽的称为蒸汽锅炉，出口工质为热水的称为热水锅炉
	船用锅炉	用作船舶动力，一般采用低、中参数，大多燃油，要求锅炉体积小，重量轻
	机车锅炉	用作机车动力，一般为小容量低参数，火床燃烧，以燃煤为主，锅炉设计紧凑

续表

分类方法	锅炉类型	简要说明
按结构分类	火管锅炉	烟气在火管内流过,一般为小容量低参数锅炉,热效率较低但构造简单,水质要求低,运行维修方便
	水管锅炉	汽水在管内流过,可以制成小容量、低参数锅炉,也可制成大容量、高参数锅炉,电站锅炉一般均为水管锅炉,热效率较高,但对水质要求和运行水平的要求也较高
按循环方式分类	自然循环锅筒锅炉	具有锅筒,利用下降管和上升管中工质密度差产生工质循环,只能在临界压力以下应用
	多次强制循环锅筒锅炉也称辅助循环锅筒锅炉	具有锅筒和循环泵,利用循环回路中的工质密度差和循环泵压头建立工质循环,只能在临界压力以下应用
	低倍率循环锅炉	具有汽水分离器和循环泵,主要靠循环泵建立工质循环,可应用于亚临界压力和超临界压力,循环倍率较低,一般为1.25~2.0
	直流锅炉	无锅筒,给水靠水泵压头一次通过受热面产生蒸汽,适用于高压和超临界压力锅炉
	复合循环锅炉	具有再循环泵,锅炉负荷低时按再循环方式运行,负荷高时按直流方式运行,可应用于亚临界压力和超临界压力
按锅炉出口工质压力分类	低压锅炉	一般压力小于1.274MPa (13kgf·cm ⁻²)
	中压锅炉	一般压力为3.822MPa (39kgf·cm ⁻²)
	高压锅炉	一般压力为9.8MPa (100kgf·cm ⁻²)
	超高压锅炉	一般压力为13.72MPa (140kgf·cm ⁻²)
	亚临界压力锅 炉	一般压力为16.66MPa (170kgf·cm ⁻²)
	超临界压力锅 炉	压力大于22.11MPa (225.65kgf·cm ⁻²)

分类方法	锅炉类型	简要说明
按燃烧方式分类	火床燃烧锅炉	主要用于工业锅炉,其中包括固定炉排炉、活动手摇炉排炉、倒转炉排抛煤机炉、振动炉排炉、下饲式炉排炉和往复推饲炉排炉等。燃料主要在炉排上燃烧
	火室燃烧锅炉	主要用于电站锅炉,燃烧液体燃料,气体燃料和煤粉的锅炉都是火室燃烧锅炉。火室燃烧时,燃料主要在炉膛空间悬浮燃烧
	旋风炉	有卧式和立式两种,燃用粗煤粉或煤屑。微粒燃料在旋风筒中央悬浮燃烧,较大煤粒粘在筒壁燃烧,液态排渣
	沸腾燃烧锅炉	送入炉排的空气流速较高,使大粒燃煤在炉排上面的沸腾床中翻腾燃烧,小粒燃煤随空气上升并燃烧。宜用于燃用劣质燃料,目前只用于工业锅炉。最近在开发大型循环沸腾燃烧锅炉
按所用燃料或能源分类	固体燃料锅炉	燃用煤等固体燃料
	液体燃料锅炉	燃用重油等液体燃料
	气体燃料锅炉	燃用天然气等气体燃料
	余热锅炉	利用冶金、石油化工等工业的余热作热源
	原子能锅炉	利用核反应堆所释放热能作为热源的蒸汽发生器
	废料锅炉	利用垃圾、树皮、废液等废料作为燃料的锅炉
按排渣方式分类	其它能源锅炉	利用地热、太阳能等能源的蒸汽发生器
	固态排渣锅炉	燃料燃烧后生成的灰渣呈固态排出,是燃煤锅炉的主要排渣方式
	液态排渣锅炉	燃料燃烧后生成的灰渣呈液态从渣口流出,在裂化箱的冷却水中裂化成小颗粒后排入水沟冲走

续表

分类方法	锅炉类型	简要说明
按炉膛烟气压力分类	负压锅炉	炉膛压力保持负压,有送、引风机,是燃煤锅炉主要型式
	微正压锅炉	炉膛表压力为 $1.0 \times 10^{-2} \sim 5.000 \text{ Pa}$,不需引风机,宜于低氧燃烧
	增压锅炉	炉膛表压力大于 0.3 MPa ,用于配蒸汽—燃气联合循环
按锅筒布置分类	单锅筒纵置式、单锅筒横置式、双锅筒纵置式等	现代锅筒型电站锅炉都应用单锅筒型式,工业锅炉采用单锅筒或双锅筒型式
按炉型分类	倒U型、塔型、箱型、T型、U型、N型、L型、H型、A型等	D型、A型用于工业锅炉,其它炉型一般用于电站锅炉
按锅炉房型式分类	露天、半露天、室内、地下、洞内	工业锅炉一般采用室内布置,电站锅炉主要采用室内或露天布置
按锅炉出厂型式分类	快装锅炉、组装锅炉、散装锅炉	小型锅炉可采用快装型式

第二节 锅炉工作原理

一、自然循环锅筒锅炉工作原理

在众多的锅炉类型中,如按循环方式或工作原理来区分,则主要可分为自然循环的锅筒锅炉和强制循环的直流锅炉两类。表1-2中按循环方式分类所列的其它类型锅炉都是这两种锅炉的衍生或改进型式。因而在本节扼要论述锅炉工作原理时就以这两种锅炉为主。

图1-1为燃用煤粉的自然循环锅筒锅炉简图,其工作流程大致如下。

燃料煤运到煤场后经煤斗和给煤机入磨煤机磨成煤粉,并由一次空气携往燃烧器。燃烧器喷出的煤粉与二次空气混合后

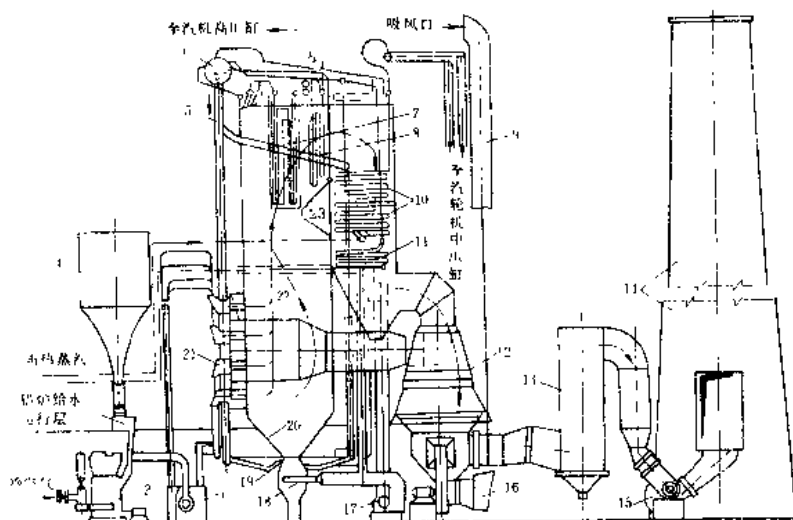


图 1-1 燃用煤粉的自然循环锅炉简图

- 1—排粉机；2—磨煤机；3—给煤机；4—煤斗；5—下降管；6—锅筒；
7—半辐射式过热器；8—对流过热器；9—送风机吸风管；10—再热器；
11—省煤器；12—空气预热器；13—除尘器；14—烟囱；15—引风机；
16—送风机；17—烟气再循环风机；18—灰渣斗；19—下集箱；20—水冷壁；
21—燃烧器；22—炉膛；23—折烟角

在炉膛燃烧并释出大量热量。燃烧产生的高温烟气由炉膛经过过热器、再热器、省煤器和空气预热器进入除尘器，再由引风机送往烟囱排入大气。

给水由给水泵经给水管道送入省煤器。给水在省煤器中吸热后进入锅筒，并沿下降管经下集箱流入水冷壁。水在水冷壁中吸收炉膛辐射热而形成汽水混合物。由于下降管中水的平均密度大于水冷壁上升管中工质的平均密度，因能上升管中的汽水混合物在此密度差的作用下能不断流入锅筒。汽水混合物在锅筒中经汽水分离装置后，蒸汽由锅筒上部送入半辐射式过热器和对流过热器等吸热并形成过热蒸汽。随后，过热蒸汽由过热器出口集箱输往汽轮机。

自汽机高压缸出口引来的蒸汽在再热器中吸收烟气热量后再送回到汽机中压缸做功。

冷空气自送风机吸风管吸入后，由送风机送往锅炉的空气预热器。空气在空气预热器中吸收烟气热量后形成热空气，并分为一次空气和二次空气分别送往磨煤机和燃烧器。

锅炉的灰渣经灰渣斗落入排灰槽道后用水力排除，另一部分飞灰随烟气逸出空气预热器并在除尘器中收集后除去。

二、强制循环直流锅炉工作原理

图 1-2 所示为燃用煤粉的强制循环直流锅炉简图，其结构和工作流程大致如下述。

锅炉炉膛由水平或微倾斜的管圈绕成。炉膛受热面分为上、中、下三个辐射区。上辐射区包括水平烟道两侧和转弯烟室，其管子出口蒸汽已有 $5\sim 8^{\circ}\text{C}$ 的微过热度。炉膛上部布置有前屏过热器和后屏过热器。第二级对流过热器和第二级对流再热器布置在水平烟道内。后竖井上部分隔为两部分，一部分中布置第一级对流过热器，另一部分中布置第一级对流再热器。省煤器布置在这两者之下。空气预热器采用两台回转式空气预热器，设在省煤器下部。

直流锅炉的特点是无锅筒，工质靠给水泵压头一次流过锅炉各承压受热面而产生蒸汽输出的。图 1-2 所示直流锅炉的工质流程顺序如下：给水泵将给水压入省煤器再经省煤器悬吊管至省煤器炉顶集箱，然后分两路引至下辐射区进口集箱，使水均匀分配到下辐射区各并联管圈。工质吸热后蒸发，在下辐射区出口集箱处工质干度已达 $50\%\sim 60\%$ 左右。随后，工质进入分配器并均匀分配到中辐射区各并联管圈，经继续吸热蒸发，在中辐射区出口处工质干度上升到 90% 左右。工质再分两路进入上辐射区进口集箱并继续在上辐射区管圈中吸热，在上辐射区出口处，工质已有 $5\sim 8^{\circ}\text{C}$ 的过热度。此后，工质再顺次流过炉顶过热器，第一级对流过热器、前屏过热器、后屏过热器及第二级对流过热器后输出。

再热蒸汽的流程顺序为：汽轮机高压缸排汽先进入第一级对

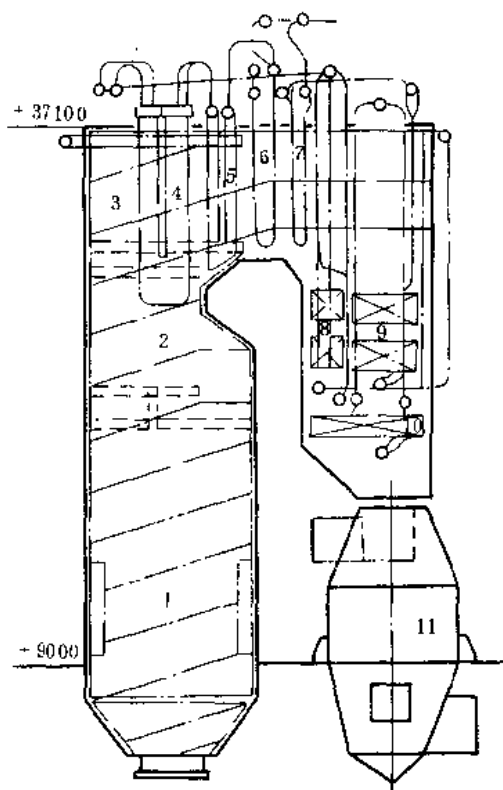


图 1-2 燃用煤粉的直流锅炉简图

- 1—下辐射区；2—中辐射区；3—上辐射区；4—前屏过热器；5—后屏过热器；
6—第二级对流过热器；7—第二级对流再热器；8—第一级对流过热器；
9—第一级对流再热器；10—省煤器；11—回转式空气预热器

流再热器、再经第二级对流再热器吸热后输入汽轮机中压缸做功。

直流锅炉的燃煤及烟、空气流程与自然循环锅筒锅炉的类似，因而对其论述从略。