

SHI YONG GUO LU SHOU CE

实用 锅炉 手册

林宗虎 徐通模 主编

化学工业出版社

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

实用锅炉手册/林宗虎,徐通模主编. —北京:化学工业出版社,1999.4

ISBN 7-5025-2433-9

I. 实… I. ①林… ②徐 III. 锅炉-手册 IV. TK22-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 00295 号

实用锅炉手册

林宗虎 徐通模 主编

责任编辑:陈 丽

责任校对:凌亚男

封面设计:郑小红

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

新华书店北京发行所经销

北京市昌平振南印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 64 $\frac{3}{4}$ 字数 2605 千字

1999 年 6 月第 1 版 1999 年 6 月北京第 1 次印刷

印 数:1—4000

ISBN 7-5025-2433-9/TK·1

定 价:120.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换

前 言

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。锅炉的一个主要用途为发电，是火力发电厂的三大主机之一。中国火力发电量约占总发电量的 75%，即使到 2050 年，火力发电量预计仍将占总发电量的 60% 以上。由此可见锅炉对中国电力工业的重要意义。在各种工业企业的动力设备乃至人民的日常生活中，锅炉都是不可缺少的组成部门。因此，锅炉工业的发展对于中国国民经济的进展和人民生活水平的提高具有十分重要的作用。

虽然锅炉工业对于国计民生具有重要作用，但是，至今国内外有关锅炉的手册为数不多。至于全面涉及锅炉设计、制造、运行等方面的锅炉手册更是少见。

这本手册的特点为全面反映各种锅炉的有关设计、制造、运行、结构、安装、自控和改造等方面的资料，并附有一系列锅炉计算示例，供读者查阅参考。本手册取材面广，内容充实，力求反映中国锅炉工业的新成就和国外锅炉的先进技术且计算公式和图表齐全，便于查阅。本手册可供从事锅炉设计、制造、使用、运行监察及科研等工作的工程技术人员和锅炉专业及热能动力类其他专业师生参考。

本手册共分二十二章，内容包括小型工业锅炉、大型电站锅炉等的锅炉本体结构、燃烧设备结构、锅炉整体的设计布置、锅炉受热面的换热计算、水动力学计算和传热问题、锅筒及其内部装置、锅炉的炉墙和构架、锅炉的给水、通风和水处理设备、锅炉的烟风道阻力计算、锅炉钢及强度计算、锅炉运行及维护、锅炉事故及环保、锅炉制造、锅炉安装、锅炉试验、锅炉仪表和附件以及锅炉改造等。

本书由西安交通大学锅炉教研室林宗虎院士（编写第一、五、九、十一、十五章）和徐通模教授（编写第二、六章）主编。特请上海交通大学锅炉教研室黄祥新教授编写第三、七、十三和二十二章。其他章节分别由西安交通大学热能工程系贾鸿祥教授（编写第十六、二十和二十一章）、郭烈锦教授和张西民副教授（编写第八、十二章）、惠世恩研究员（编写第十七章）、车得福副教授（编写第四、十、十四、十九章）和赵钦新副教授（编写第十八章）完成。

由于编者水平有限，书中可能存在一些缺点和错误，敬请读者批评指正。

林宗虎，徐通模

1999 年 1 月

目 录

第一章 锅炉的类别、参数及型号..... 1	二、燃烧所需空气量的计算 45
第一节 锅炉及其分类..... 1	三、燃料燃烧产物（烟气量）的计算 47
一、按用途分类..... 1	四、燃烧产物焓的计算 50
二、按结构分类..... 1	五、燃烧计算表格（汇总） 51
三、按循环方式分类..... 1	六、运行状态下，燃烧工况的监测 53
四、按锅炉出口工质压力分类..... 1	第七节 锅炉机组的热平衡 55
五、按燃烧方式分类..... 1	一、锅炉机组热平衡计算的任务和规则 55
六、按所用燃料或能源分类..... 1	二、锅炉效率及各项热损失的计算 56
七、按排渣方式分类..... 2	三、锅炉燃烧所需燃料消耗量的计算 60
八、按炉膛烟气压力分类..... 2	第八节 锅炉燃烧及热平衡计算示例 60
九、按锅筒布置分类..... 2	一、沸腾燃烧锅炉燃烧产物的焓及热平衡
十、按炉型分类..... 2	计算示例 60
十一、按锅炉房型式分类..... 2	二、煤粉燃烧锅炉燃烧产物的焓及热平衡
十二、按锅炉出厂型式分类..... 2	计算示例 63
第二节 锅炉设备及其工作过程..... 2	第三章 工业锅炉和特种锅炉的结构 66
一、锅炉设备..... 2	第一节 火管锅炉结构 66
二、锅炉设备的工作过程..... 2	一、外燃烟管锅炉 66
第三节 锅炉的参数与技术经济指标..... 3	二、卧式内燃烟火管锅炉 66
一、锅炉参数..... 3	三、立式小横水管火管锅炉 67
二、锅炉技术经济指标..... 4	四、立式直水管火管锅炉 68
第四节 锅炉型号..... 5	五、立式弯水管火管锅炉 68
一、工业锅炉型号..... 5	第二节 水火管锅炉结构 69
二、电站锅炉型号..... 6	第三节 水管锅炉结构 70
第二章 燃料、燃烧产物及热平衡计算..... 7	一、单锅筒纵置式锅炉 70
第一节 锅炉燃料..... 7	二、单锅筒横置式锅炉 71
一、燃料分类..... 7	三、双锅筒纵置式锅炉 71
二、燃料的成分组成..... 7	四、双锅筒横置式锅炉 72
三、各种“基”的表示方法及“基”的	第四节 热水锅炉结构 73
换算..... 8	一、强制循环热水锅炉 74
四、燃料的发热量及折算成分..... 9	二、自然循环热水锅炉 74
第二节 煤的特性和分类 12	三、铸铁锅炉 75
一、煤的工业分析 12	第五节 间接加热锅炉 75
二、煤灰的熔融特性（煤灰熔点）及测定	一、相变锅炉 75
..... 15	二、间接加热锅炉 76
三、煤的可磨性和磨损性 17	第六节 余热锅炉 76
四、煤粉的主要特性 18	一、管壳式余热锅炉 76
五、煤的分类 19	二、烟道式余热锅炉 76
第三节 煤的着火及燃烧特性判别指标 24	第七节 废料锅炉 77
一、煤的着火稳燃特性 24	一、燃烧造纸废液的废料锅炉 77
二、煤的燃尽特性 26	二、燃用垃圾的废料锅炉 78
第四节 液体燃料的燃烧特性 27	第八节 特种工质锅炉 79
一、液体燃料的燃烧特性 27	第四章 电站锅炉结构 81
二、燃料油的分类 32	第一节 自然循环电站锅炉结构 81
第五节 气体燃料的燃烧特性 34	一、中压自然循环电站锅炉 81
一、气体燃料的主要燃烧特性 34	二、高压自然循环电站锅炉 83
二、气体燃料的种类 42	三、超高压自然循环电站锅炉 84
第六节 燃料燃烧计算 45	四、亚临界压力自然循环电站锅炉 86
一、燃料燃烧计算的任务和基本规则 45	第二节 多次强制循环电站锅炉结构 88

第三节 电站直流锅炉结构	90	六、抛煤机炉排炉	180
第四节 复合循环锅炉结构	98	七、其他型式的火床炉	182
第五章 锅炉主要受热面的结构	108	八、火床炉的炉拱设计	184
第一节 锅炉蒸发受热面结构	108	九、火床炉的二次风设计	186
一、自然循环锅炉的水冷壁结构	108	第三节 流化床燃烧	187
二、强制循环锅炉的水冷壁结构	110	一、流态化的一般特性	187
三、倾斜围绕式水冷壁与垂直上升管屏式水冷壁的连接方式	115	二、流化床的特征速度	189
四、多次垂直上升管屏式水冷壁与位于上部的一次垂直上升管屏式水冷壁的连接方法	115	三、快速床的特征速度	191
五、锅炉管束与凝渣管束结构	115	四、流化床的结构	191
六、锅筒和集箱的支承结构	116	五、循环流化床锅炉的基本结构型式及特性	193
七、水冷壁管的高温腐蚀及防止	117	六、流化床的热力特性数据	197
第二节 锅炉的过热器结构	117	七、流化床锅炉中的烟气排放	198
一、对流式过热器结构	117	第四节 煤粉燃烧	199
二、屏式过热器结构	119	一、炉膛	199
三、辐射式过热器结构	121	二、燃烧器的分类	200
四、炉顶过热器与包墙管过热器结构	122	三、旋流燃烧器	201
五、过热器的支持结构	122	四、旋流式煤粉预燃室	214
六、过热器管的高温腐蚀及防止	122	五、直流式燃烧器	218
第三节 锅炉的再热器结构	123	六、W型火焰锅炉设计特点	245
一、再热器的结构	124	七、煤粉制备系统及设备	245
二、再热器的支持结构	124	第五节 油、气燃烧	282
第四节 锅炉过热器和再热器的汽温调节	124	一、油的燃烧特点	282
一、汽温变化及汽温调节方法分类	124	二、油燃烧器	283
二、面式减温器法	125	三、气体燃料燃烧特点	295
三、喷水减温器法	126	四、气体燃烧器	297
四、汽-汽热交换器法	129	第七章 锅炉热力系统及设计布置	312
五、烟气再循环法	130	第一节 锅炉参数、容量和燃料对受热面布置的影响	312
六、烟气挡板法	130	一、锅炉参数对受热面布置的影响	312
七、改变火焰位置法	130	二、容量对锅炉受热面布置的影响	313
第五节 锅炉的省煤器结构	131	三、燃料对锅炉受热面布置的影响	314
一、省煤器的结构	131	第二节 锅炉热力系统	314
二、省煤器的支持结构	134	一、低压小容量工业锅炉的热力系统	314
三、省煤器的磨损与腐蚀	135	二、中压中容量电站锅炉的热力系统	314
第六节 锅炉的空气预热器结构	136	三、高压大容量电站锅筒锅炉的热力系统	314
一、空气预热器的结构	136	四、超高压大容量电站锅筒锅炉的热力系统	314
二、空气预热器的磨损与腐蚀	142	五、亚临界压力大容量直流锅炉的热力系统	316
第六章 锅炉燃烧设备	144	六、超临界压力容量锅炉的热力系统	316
第一节 燃烧基本特性	145	第三节 锅炉炉膛及对流受热面设计布置	317
一、温度、压力和浓度对燃烧化学反应速度的影响	145	一、炉膛设计布置	317
二、燃烧反应热力特性参数	146	二、炉膛出口温度的选择	317
三、碳燃烧反应的控制及燃烧速度	153	三、水冷壁布置	317
四、影响碳球燃烧速度的其他因素	155	四、对流受热面的设计布置	319
五、煤粒燃烧的一些实验结果	157	第八章 锅炉热力计算	326
第二节 火床燃烧	158	第一节 综述	326
一、火床燃烧空气动力学特性	158	一、目的	326
二、固定炉排炉	162	二、计算顺序	326
三、链条炉排炉	164	第二节 炉膛辐射受热面的换热计算	326
四、振动炉排炉	174	一、概述	326
五、往复式炉排炉	178		

二、基本原理	326	一、管内传热恶化现象	467
三、炉膛几何计算	335	二、垂直上升管中的传热恶化计算	467
四、炉膛换热计算	337	三、水平管和倾斜管的传热恶化计算	468
第三节 半辐射和对流受热面的换热计算	348	四、传热恶化后的管内放热系数及 $x_{\max}$ 计算	469
一、传热基本方程式	348	五、超临界压力时的管内传热恶化	469
二、对流传热系数的计算	351	六、传热恶化的防止措施	469
三、辐射放热系数的计算	369	第六节 管壁温度计算	471
四、受热面污染系数、热有效系数和利用系数	371	一、管子正面内壁温度、外壁温度和平均壁温计算	471
五、平均温压	373	二、鳍片管的鳍根和鳍端温度计算	472
六、对流受热面传热计算方法	377	三、管内工质温度和管内放热系数的计算	474
第四节 锅炉热力计算机计算	379	第七节 计算示例	475
一、概述	379	第十章 蒸汽品质及锅筒内件	490
二、锅炉热力计算的计算机计算的基本方法及步骤	379	第一节 锅炉蒸汽品质及其污染原因	490
三、图表的处理	381	一、蒸汽净化的必要性	490
四、锅炉热力计算的计算机程序框图	383	二、蒸汽品质标准	490
第五节 锅炉机组热力计算示例	386	三、蒸汽被污染的原因及提高蒸汽品质的途径	490
一、某 1000t/h 大型电站锅炉机组部分受热面热力计算示例	386	四、机械性携带及其影响因素	491
二、某 130t/h 中参数燃煤锅炉机组全部受热面热力计算示例	402	五、选择性携带及其影响因素	493
第九章 锅炉水动力学和管内传热	426	第二节 锅筒内件	496
第一节 强制流动并联管组的水动力学	426	一、锅筒的作用及结构	496
一、概述	426	二、锅筒内件的任务	496
二、热偏差、流量偏差及其对策	426	三、汽水分离装置	498
三、水平蒸发管组的水动力学	435	四、蒸汽清洗装置	512
四、垂直蒸发管组的水动力学	439	五、分段蒸发	515
五、蒸发管的脉动性流动	442	六、排污装置	516
第二节 自然循环锅炉的水动力学	444	七、锅筒内部的辅助装置	517
一、自然循环的基本方程式及水循环计算方法	444	第三节 锅筒内件典型布置方式	518
二、上升管含汽段高度和汽水混合物密度的计算	445	第十一章 锅炉水处理与给水设备	522
三、循环回路中的阻力计算	448	第一节 水中杂质	522
四、循环回路计算方法	449	第二节 锅炉水质标准	523
五、水循环可靠性校核	452	第三节 锅炉受热面的结垢与腐蚀	525
第三节 直流锅炉与多次强制循环锅炉的水动力学	455	一、锅炉受热面的结垢	525
一、直流锅炉及其改进型式	455	二、锅内水垢的防止方法	526
二、直流锅炉的水动力计算特点	456	三、锅炉受热面和管路的内部腐蚀	526
三、直流锅炉的水动力可靠性校验	456	第四节 锅炉水处理及其系统	528
四、直流锅炉并联管的工质分配和混合	457	一、水的净化处理	528
五、多次强制循环锅炉的水动力计算特点	459	二、水的软化	531
第四节 热水锅炉的水动力学	461	三、水的除盐	537
一、循环倍率与下降管进口水温	461	四、水的除气	539
二、自然循环热水锅炉的水循环计算方法	461	五、锅炉水处理系统选择	543
三、强制循环热水锅炉的水动力计算	462	第五节 锅炉给水设备及其选用	544
四、热水锅炉过冷沸腾防止及受热管内平均水速选用	463	一、蒸汽注水器	544
第五节 传热恶化及其防止措施	467	二、蒸汽活塞式水泵	545
		三、离心式水泵	545
		四、强制循环锅炉用的循环泵	548
		五、泵的选用	549
		第十二章 锅炉通风阻力计算及通风设备	550
		第一节 锅炉通风阻力计算概述与原理	550
		一、通风过程与通风方式	550

二、锅炉通风阻力计算原理	550	五、测速管	659
第二节 锅炉烟道阻力计算	563	第二节 锅炉的压力及差压测量	663
一、烟道总阻力	563	一、概述	663
二、自生通风力 h_{zs}	565	二、弹簧管式压力计	663
三、烟道总压降	566	三、液柱式压力计与微压计	663
第三节 锅炉风道阻力计算	566	四、液柱式差压计	664
第四节 锅炉通风设备及其选用	568	五、膜式压力计及差压计	666
第五节 烟囱的计算	569	六、气动式差压传感器	668
一、烟囱的作用与自然抽力	569	七、电动式差压传感器	668
二、烟囱高度的计算	570	第三节 锅炉的温度测量	669
第六节 锅炉通风阻力计算示例	571	一、概述	669
第十三章 锅炉炉墙和构架	579	二、水银玻璃温度计	670
第一节 锅炉炉墙及其结构	579	三、电阻温度计	670
一、对锅炉炉墙结构的基本要求及炉墙型式	579	四、热电偶温度计	672
二、重型炉墙的结构	579	五、辐射高温计	676
三、轻型炉墙的结构	581	第四节 烟气成分分析方法	677
四、敷管炉墙	583	一、概述	677
第二节 锅炉炉墙材料	586	二、奥氏烟气分析器	677
一、炉墙材料的分类和性能	586	三、烟气全分析器	678
二、耐火材料	587	四、烟气色谱分析法	679
三、保温绝热材料	589	五、烟气中二氧化硫和氧化氮的测量方法	680
四、密封涂料	589	六、烟气测氧仪	682
第三节 炉墙的传热计算	590	第五节 锅炉的热平衡和热效率试验	682
一、炉墙内壁最高温度和平均温度的计算	590	一、正平衡法热效率和反平衡法热效率	682
二、炉墙的传热计算	592	二、锅炉热平衡试验的要求和测量项目	682
第四节 锅炉构架的分类与结构	593	三、锅炉热效率测试时的测点布置	684
一、锅炉构架及其类型	593	四、燃料、灰渣、烟气及工质的取样方法	686
二、框架式构架	593	第六节 锅炉蒸发受热面水动力测试	691
三、桁架式构架	595	一、自然循环回路水循环试验	691
第十四章 锅炉管件及吹灰、排渣装置	597	二、直流锅炉蒸发受热面水动力试验	693
第一节 锅炉管道及阀门	597	第七节 锅炉过热器测试	695
一、锅炉管道	597	一、过热器试验内容	695
二、阀门	613	二、过热器试验方法	695
第二节 锅炉吹灰及防爆装置	627	三、过热器试验的数据整理	697
一、蒸汽吹灰装置	627	第八节 锅炉水位测量	698
二、水吹灰器	630	一、玻璃水位计法	698
三、压缩空气吹灰器	631	二、差压式低地位水位计法	699
四、振动除灰器	631	三、用电测法测量水位	700
五、声波除灰器	633	四、用热电法测量水位	700
六、钢珠除灰器	634	第九节 锅炉炉膛空气动力场测试	700
七、防爆门	637	一、炉膛空气动力场的测试目的和类别	700
第三节 锅炉排渣装置	638	二、保持冷、热态测试结果近似相似的条件	700
一、机械排渣装置	638	三、火室炉冷态空气动力场测试方法	701
二、水力排渣装置	639	四、火床炉冷态空气动力场测试方法	703
三、气力排渣装置	643	五、炉膛热态空气动力场测试方法	703
第十五章 锅炉测试	647	第十六章 锅炉环境保护	707
第一节 锅炉的流量和流速测量	647	第一节 锅炉污染物排放标准	707
一、概述	647	一、中国环境质量标准	707
二、差压式流量计	647	二、锅炉烟尘排放标准	710
三、分流旋翼式流量计	658	三、火电厂锅炉 SO_2 排放标准	714
四、涡轮流量计	658		

四、火电厂锅炉 NO_x 排放标准	717	第十八章 锅炉主要部件的制造工艺	867
第二节 锅炉除尘技术	722	第一节 锅筒的制造工艺	867
一、中国工业锅炉和电站锅炉烟尘排放		一、锅筒筒节的制造工艺	867
概况	722	二、封头的制造工艺	872
二、锅炉的初始排尘浓度和分散度	723	三、锅筒和管件的焊接与胀接	877
三、除尘器的类型及其性能	726	四、锅筒的组焊和总装工艺	879
四、工业锅炉的烟气除尘	731	五、锅筒制造中的热处理	880
五、电厂锅炉烟气除尘	752	六、锅筒制造中的检验	881
第三节 火电厂锅炉脱硫技术	761	第二节 锅炉受压管件的制造工艺	883
一、中国火电厂燃煤含硫分及 SO_2 排放 ..	761	一、管件的划线与下料	883
二、二氧化硫的危害	762	二、管件的弯制工艺	883
三、燃烧前脱硫——煤脱硫	763	三、管件的对焊拼接工艺	887
四、燃烧中脱硫——炉内喷吸收剂脱硫	764	四、蛇形管受热面的制造工艺	888
五、烟气脱硫	769	五、膜式水冷壁管排制造工艺	888
六、火电厂锅炉脱硫工艺的选择	782	六、管件制造中的质量检验	889
第四节 火电厂锅炉脱 NO_x 技术	784	第三节 锅炉集箱的制造工艺	891
一、燃料燃烧时 NO_x 的生成机理	784	一、集箱的对接拼焊	892
二、锅炉结构特性对 NO_x 生成的影响	787	二、集箱管座坡口结构	893
三、降低 NO_x 排放量的措施	788	三、集箱端盖制造工艺	893
四、从燃烧角度控制 NO_x 的排放	789	四、集箱的焊后热处理	894
五、烟气脱硝技术 (FGT)	813	第四节 空气预热器的制造工艺	894
六、控制 NO_x 排放技术的应用	817	一、钢管式空气预热器制造工艺	894
第十七章 锅炉钢材及强度计算	819	二、回转式空气预热器制造工艺	896
第一节 锅炉钢材	819	第十九章 锅炉安装	898
一、锅炉受压部件制造用钢的基本性能	819	第一节 综述	898
二、主要锅炉用钢的化学成分	827	第二节 施工组织 and 准备工作	898
三、主要锅炉用钢的适用范围	830	一、施工计划的编制	898
第二节 锅炉受压部件强度计算的参数	832	二、机具选择与布置	899
一、许用应力的确定原则	832	三、组件划分、组合场地和组合支架	899
二、计算压力的确定原则	834	四、其他准备工作	901
三、计算壁温的确定原则	835	第三节 锅炉本体部件的安装	902
第三节 承受内压力的圆筒形元件的强度		一、安装工艺的基本要求	902
计算	836	二、钢架安装	903
一、强度未减弱的圆筒形元件强度计算的		三、水冷壁安装	905
基本公式	836	四、锅筒安装	908
二、圆筒形元件强度计算基本公式	837	五、过热器安装	911
三、焊缝减弱系数的推荐值	838	六、再热器安装	914
四、孔桥减弱系数的确定	839	七、省煤器安装	916
五、强度计算中附加壁厚的确定及对壁厚		八、水压试验	917
的限制	841	九、回转式空气预热器安装	918
六、重力载荷引起的弯曲应力校核	842	第四节 锅炉主要辅助设备的安装	920
第四节 受内压封头的强度计算	843	一、钢球磨煤机安装	920
一、凸形封头的强度计算及开孔结构要求		二、离心式风机安装	925
.....	843	三、轴流式风机安装	926
二、平端盖、平堵头及盖板壁厚的确定	846	四、水泵安装	929
三、带有拉撑件的平板强度计算	848	第二十章 锅炉运行及调整	931
第五节 孔的加强计算	851	第一节 锅炉启动和停运	931
一、未加强孔的最大允许直径	851	一、锅炉启动方式	931
二、孔的加强结构	851	二、锅炉机组启动必须具备的条件	932
三、孔的加强计算	851	三、锅筒锅炉的冷态启动	933
四、孔桥的加强计算	854	四、直流锅炉的冷态启动	935
五、焊缝强度的校核计算	855	五、热态启动	940
第六节 计算示例	855	六、启动过程中的汽、水品质	941

七、锅炉启动、停运曲线.....	942	第三节 锅筒锅炉燃烧过程自动调节系统.....	982
八、锅炉停运.....	945	一、燃烧过程自动调节的任务.....	982
九、旁路系统.....	947	二、中间粉仓式锅筒锅炉燃烧过程自动 调节系统.....	983
十、锅炉承压部件寿命管理.....	950	第四节 直流锅炉自动调节系统.....	988
十一、锅炉制粉系统的启动和停运.....	953	一、调节特点.....	988
第二节 锅炉机组的运行调整.....	959	二、动态特性.....	989
一、锅炉运行调整的主要任务.....	959	三、自动调节系统.....	990
二、燃烧调整.....	960	第五节 工业锅炉的自动调节.....	990
三、蒸汽压力调整.....	961	第六节 锅炉机组的热工保护.....	992
四、蒸汽温度的调整.....	961	一、锅炉主汽压力高保护.....	992
五、煤粉锅炉燃烧设备在运行中的常见故障 及其处理措施.....	962	二、锅炉水位保护.....	993
第三节 锅炉变压运行.....	969	三、直流锅炉断水保护.....	994
一、变压运行的分类.....	970	四、再热器保护.....	994
二、变压运行的特点.....	971	五、炉膛安全监控系统.....	995
三、变压运行对锅炉的影响.....	972	第二十二章 锅炉改造.....	1000
第二十一章 锅炉自动控制.....	974	第一节 工业锅炉改造.....	1000
第一节 锅筒锅炉给水自动调节系统.....	974	一、工业锅炉改造的原则和方法.....	1000
一、给水自动调节的任务和调节对象的动态 特性.....	974	二、工业锅炉燃烧设备的改造.....	1001
二、锅筒锅炉给水自动调节系统.....	976	三、锅炉本体的改造.....	1007
第二节 蒸汽温度自动调节系统.....	980	四、尾部受热面与辅助设备的加装及改造	1012
一、过热汽温调节的任务和调节对象特性	980	第二节 电站锅炉改造.....	1014
二、过热汽温串级调节系统.....	981	一、电站锅炉改造的特点.....	1014
三、具有导前汽温微分信号的双回路汽温 调节系统.....	981	二、燃烧系统的改造.....	1015
四、过热汽温分段调节系统.....	981	三、过热器、再热器及相关系统的改造.....	1017
五、再热汽温调节系统.....	982	四、尾部受热面的改造.....	1018
		基本参考文献.....	1023

第一章 锅炉的类别、参数及型号

第一节 锅炉及其分类

锅炉也称蒸汽发生器,是一种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。

锅炉用途广泛,型式众多,一般可按下列方法分类。

一、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,热效率高,出口工质为过热蒸汽。

工业锅炉 用于工业生产和采暖,大多为低压、低温、小容量锅炉,火床燃烧居多,热效率较低,出口工质为蒸汽的称为蒸汽工业锅炉,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,锅炉结构紧凑,现已少用。

注汽锅炉 用于油田对稠油的注汽热采,出口工质一般为高压湿蒸汽。

二、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,但结构简单,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,但对水质和运行水平的要求也较高。

三、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。

四、按锅炉出口工质压力分类

低压锅炉 一般压力小于1.275MPa (13kgf/cm²)。

中压锅炉 一般压力为3.825MPa (39kgf/cm²)。

高压锅炉 一般压力为9.8MPa (100kgf/cm²)。

超高压锅炉 一般压力为13.73MPa (140kgf/cm²)。

亚临界压力锅炉 一般压力为16.67MPa (170kgf/cm²)。

超临界压力锅炉 压力大于22.13MPa (225.65kgf/cm²)。

五、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,燃用液体燃料、气体燃料和煤粉的锅炉均为火室燃烧锅炉。火室燃烧时,燃料主要在炉膛空间悬浮燃烧。

旋风炉 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。目前多用于工业锅炉,大型循环沸腾燃烧锅炉可用作电站锅炉。

六、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。

其他能源锅炉 利用地热、太阳能等能源的蒸汽发生器或热水器。

七、按排渣方式分类

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中冲走。

八、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 $2\sim 5\text{kPa}$ ，不需引风机，宜于低氧燃烧。

增压锅炉 炉膛表压力大于 0.3MPa ，用于配蒸汽-燃气联合循环。

九、按锅筒布置分类

锅炉锅筒数一般为一个或两个，锅筒可纵置或横置布置。现代锅筒型电站锅炉都采用单锅筒型式，工业锅炉采用单锅筒或双锅筒型式。

十、按炉型分类

锅炉炉型很多，有倒 U 型、塔型、箱型、T 型、U 型、N 型、L 型、D 型、A 型等。D 型、A 型用于工业锅炉，其他炉型一般用于电站锅炉。

十一、按锅炉房型式分类

锅炉可作露天、半露天、室内、地下或洞内布置。工业锅炉一般采用室内布置，电站锅炉主要采用室内半露天或露天布置。

十二、按锅炉出厂型式分类

可分为快装锅炉、组装锅炉和散装锅炉，小型锅炉可采用快装型式，电站锅炉一般为组装或散装。

第二节 锅炉设备及其工作过程

一、锅炉设备

锅炉由一系列设备构成，这些设备可分为主要部件和辅助设备两类。现代大型自然循环高压锅炉所具有的主要部件及其作用如下。

1. 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。
2. 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。
3. 锅筒 是自然循环锅炉各受热面的闭合件，将锅炉各受热面联结在一起并和水冷壁，下降管等组成水循环回路。锅筒内储存汽水，可适应负荷变化，内部设有汽水分离装置等以保证汽水品质，直流锅炉无锅筒。
4. 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，后水冷壁管的拉稀部分称为凝渣管用以防止过热器结渣。
5. 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。
6. 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作功。用于大型电站锅炉以提高电站热效率。
7. 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。
8. 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。
9. 炉墙 是锅炉的保护外壳，起密封和保温作用。小型锅炉中的重型炉墙也可起支承锅炉部件的作用。
10. 构架 支承和固定锅炉各部件，并保持其相对位置。

这种锅炉的辅助设备及其作用如下。

- (1) 燃料供应设备 贮存和运输燃料。
- (2) 磨煤及制粉设备 将煤磨制成煤粉并输入燃用煤粉的锅炉燃烧设备燃烧。
- (3) 送风设备 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。
- (4) 引风设备 由引风机和烟囷将锅炉排出的烟气送往大气。
- (5) 给水设备 由给水泵将经过水处理设备处理后的给水送入锅炉。
- (6) 除灰除渣设备 从锅炉中除去灰渣并运走。
- (7) 除尘设备 除去锅炉烟气中的飞灰，改善环境卫生。
- (8) 自动控制设备 自动检测、程序控制、自动保护和自动调节。

二、锅炉设备的工作过程

锅炉设备的工作过程可用图 1-1 所示的燃用煤粉的自然循环锅炉来加以阐明。燃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供燃烧。燃烧器喷出的煤粉与二次空气混合后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凝渣管、过热器、省煤器和空气预热器后进入除尘器，再由引风机送往烟囷排入大气。

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后形成汽水混合物并流入锅筒。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过热器吸热形成过热蒸汽。最后，过热蒸汽由过热器出口集箱输往汽轮机。

冷空气自送风机吸入后,由送风机送往空气预热器。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并送往灰场。

这台锅炉为中压锅炉，未装再热器。如为高压或超高压的装有再热器的锅炉，则再热器一般布置在过热器与省煤器之间。自汽轮机高压缸出口引来的蒸汽输入再热器，吸收烟气热量后再送入汽轮机中压缸做功，以提高电站热效率。

第三节 锅炉的参数与技术经济指标

一、锅炉参数

锅炉参数一般指锅炉容量、蒸汽压力、蒸汽温度和给水温度。

工业蒸汽锅炉的容量用额定蒸发量表示。额定蒸发量表明锅炉在额定蒸汽压力、蒸汽温度、规定的锅炉效率和给水温度下，连续运行时所必须保证的最大蒸发量，常以每小时能供应的以吨计的蒸汽量来表示，单位为t/h。

热水锅炉的容量用额定供热量表示,单位为kW(kcal/h)。

电站锅炉的容量也用额定蒸发量表示，单位为 t/h。

锅炉蒸汽压力和温度是指过热器主汽阀出口处的过热蒸汽压力和过热蒸汽温度。对于无过热器的锅炉,用主汽阀出口处的饱和蒸汽压力和温度表示。压力的单位为 MPa(kgf/cm²), 温度的单位为 K 或 C。

锅炉给水温度是指进省煤器的给水温度，对无省煤器的锅炉指进锅炉锅筒的水的温度，单位为 K 或 C。

中国工业蒸汽锅炉的参数系列见表 1-1。工业热水锅炉的参数系列见表 1-2。电站锅炉的参数系列见表 1-3。

表 1-1 中国工业蒸汽锅炉参数系列

[illegible]

表 1-2 中国热水锅炉参数系列

[illegible]

表 1-3 中国电站锅炉参数系列

额定蒸发量 / (t/h)	额定蒸汽压力/MPa(kgf/cm ²)				配凝汽式汽轮 发电机组功率/MW
	3.82 (39)	9.80 (100)	13.72 (140)	16.66 (170)	
	额定蒸汽温度/℃				
	450	540	540/540 ^①		
35	△				6
65	△				12
130	△				25
220		△			50
410		△			100
400			△ ^②		125
670			△		200
1000				△ ^③	300
2050				△	600

① 分子为过热蒸汽温度，分母为再热蒸汽温度。
② 现行产品采用 400t/h，555/555℃。
③ 现行产品采用 1000t/h，555/555℃。

在上述这些表格中未列出给水温度。工业蒸汽锅炉的给水温度分 20℃、60℃或 105℃三档，由制造厂在设计时结合具体情况确定。热水锅炉的给水温度由热水用户来的进入锅炉的回水温度确定。电站锅炉的给水温度对 中压锅炉为 150℃或 170℃，对高压锅炉为 215℃，对亚临界压力锅炉为 260℃。

二、锅炉技术经济指标

锅炉的技术经济指标通常用锅炉热效率、锅炉成本及锅炉可靠性 3 项来表示。优质锅炉应保证热效率高，成本 低及运行可靠。

1. 锅炉热效率

锅炉热效率是指送入锅炉的全部热量中被有效利用的百分数。现代电站锅炉的热效率都在 90%以上。中国 工业锅炉的热效率（包括热水锅炉）应不低于表 1-4 所列的规定值。

表 1-4 中国工业锅炉应保证的最低热效率/%

锅炉容量/(t/h)或 MW			<0.5 或 <0.35	0.5~1 或 0.35~0.7	2 或 1.4	4~8 或 2.8~5.6	10~20 或 7~14	>20 或 >14
燃料品种	低位发热量/ (kJ/kg)							
劣质煤	I	6500~11500	55	60	62	66	68	70
	II	>11500~14400	57	62	64	68	70	72
烟煤	I	>14400~17700	61	68	70	72	74	75
	II	>17700~21000	63	70	72	74	76	78
	III	>21000	65	72	74	76	78	80
贫煤		≥17700	62	68	70	73	76	77
无烟煤	I	<21000, V _{daf} =5%~10%	54	59	61	64	69	72
	II	≥21000, V _{daf} <5%	52	57	59	62	65	68
	III	>21000, V _{daf} =5%~10%	58	63	66	70	73	75
褐煤		≥11500	62	67	69	74	76	79
重油			80	80	81	82	84	85
天然气			82	82	83	84	86	87

注：1. 燃用煤矸石的锅炉热效率按 I 类劣质煤考核。
2. 燃用油页岩和低位发热量<11500kJ/kg 褐煤的锅炉热效率按 II 类劣质煤考核。
3. 0.5t/h 或 0.35MW 燃煤手烧锅炉的热效率允许比表中相应规定值低 3%；机械化燃煤锅炉的热效率允许比表中 相应值低 1%。
4. 煤粉燃烧锅炉的热效率应比表中相应规定值增加 3%。
5. 表中未列之燃料，锅炉热效率由供需双方商定。

由于锅炉热效率是一项重要的节能指标，因而在中国制订的《工业锅炉质量分等标准》中明确规定，一等品 锅炉应具有较好的节能效果，锅炉热效率应比表 1-4 规定的效率增加 2%。优等品锅炉应有显著的节能效果，其 热效率应比表 1-4 中规定的效率增加 4%。

2. 锅炉成本

锅炉成本一般用成本中的一个重要经济指标钢材消耗率来表示。钢材消耗率的定义为锅炉单位蒸发量所用

的钢材重量，单位为 t·h/t。锅炉参数、循环方式、燃料种类及锅炉部件结构对钢材消耗率均有影响。锅炉蒸汽参数高、容量小、燃煤、采用自然循环、采用管式空气预热器及钢柱构架可使钢材消耗率增大。蒸汽参数低、容量大、采用直流锅炉、燃油或燃气、采用回转式空气预热器及钢筋混凝土柱构架可使钢材消耗率减小。

工业锅炉的钢材消耗率在 5~6t 钢材·h/t 左右；电站锅炉的钢材消耗率一般在 2.5~5t 钢材·h/t 范围内。在保证锅炉安全、可靠、经济运行的基础上应合理降低钢材消耗率，尤其是耐热合金钢材的消耗率。

3. 锅炉可靠性

锅炉可靠性常用下列 3 种指标来衡量。

(1) 连续运行时间=两次检修之间的运行时间（用小时表示）。

(2) 事故率= $\frac{\text{事故停用时间}}{\text{运行总时间}+\text{事故停用时间}} \times 100\%$

(3) 可用率= $\frac{\text{运行总时间}+\text{备用总时间}}{\text{统计时间总时间}} \times 100\%$

目前中国电站锅炉的较好指标是：连续运行时间在 4000h 以上；事故率约为 90%。中国电力部要求电站锅炉的年运行时间≥6000h。

第四节 锅炉型号

一、工业锅炉型号

中国工业锅炉型号按机械部部标 JB 1626—81 的规定进行编制。

工业锅炉产品型号由三部分组成，各部分用短横线相连。

第一部分分三段，分别表示锅炉型号（用汉语拼音字母代号，见表 1-5）、燃烧方式（用汉语拼音字母代号，见表 1-6）和蒸发量（用阿拉伯数字表示，单位为 t/h；热水锅炉为供热量，单位为 MW；余热锅炉以受热面表示，单位为 m²）。

表 1-5 工业锅炉型式代号

锅炉型式	代 号	锅炉型式	代 号
立式水管	LS（立，水）	单锅筒横置式	DH（单，横）
立式火管	LH（立，火）	双锅筒纵置式	SZ（双，纵）
卧式内燃	WN（卧，内）	双锅筒横置式	SH（双，横）
单锅筒立式	DL（单，立）	纵横锅筒式	ZH（纵，横）
单锅筒纵置式	DZ（单，纵）	强制循环式	QX（强，循）

表 1-6 燃烧方式代号

燃烧方式	代 号	燃烧方式	代 号	燃烧方式	代 号
固定炉排	G（固）	倒转炉排加抛煤机	D（倒）	沸腾炉	F（沸）
活动手摇炉排	H（活）	振动炉排	Z（振）	半沸腾炉	B（半）
链条炉排	L（链）	下饲炉排	A（下）	室燃炉	S（室）
抛煤机	P（抛）	往复推饲炉排	W（往）	旋风炉	X（旋）

快装式水管锅炉在型号第一部分用 K（快）代替表 1-4 中的锅筒数量代号。快装纵横锅筒式锅炉用 KZ（快，纵）代号；快装强制循环式锅炉用 KQ（快，强）代号。

第二部分表示工质参数，对工业蒸汽锅炉，分额定蒸汽压力和额定蒸汽温度两段，中间以斜线相隔，常用单位分别为 MPa 和 ℃、蒸汽温度为饱和温度时，型号第二部分无斜线和第二段。对热水锅炉，第二部分由三段组成，分别为额定压力、出水温度和进水温度，段与段之间用斜线隔开。

第三部分表示燃料种类及设计次序，共两段：第一段表示燃料种类（用汉语拼音字母代号，见表 1-7），第二段表示设计次序（用阿拉伯数字表示），原型设计无第二段。

表 1-7 燃料种类代号

燃烧种类	代 号	燃烧种类	代 号	燃烧种类	代 号
无烟煤	W（无）	褐煤	H（褐）	稻壳	D（稻）
贫煤	P（贫）	油	Y（油）	甘蔗渣	G（甘）
烟煤	A（烟）	气	Q（气）	煤矸石	S（石）
劣质烟煤	L（劣）	木柴	M（木）	油页岩	YM（油母）

注：1. 如同时燃用几种燃料，主要燃料放在前面。

2. 余热锅炉无燃料代号。

工业蒸汽锅炉的型号表示形式见图 1-1。例如：DZL4-1.25-W 表示单锅筒纵置式链条炉排炉，蒸发量 4t/h，压力 1.25MPa，饱和温度，燃用无烟煤，原型设计。又如：SHS10-1.25/250-A2 表示双锅筒横置式室燃锅炉，蒸发量 10t/h，压力 1.25MPa，过热蒸汽温度 250℃，燃用烟煤，第二次设计。

热水锅炉的型号表示形式见图 1-2。

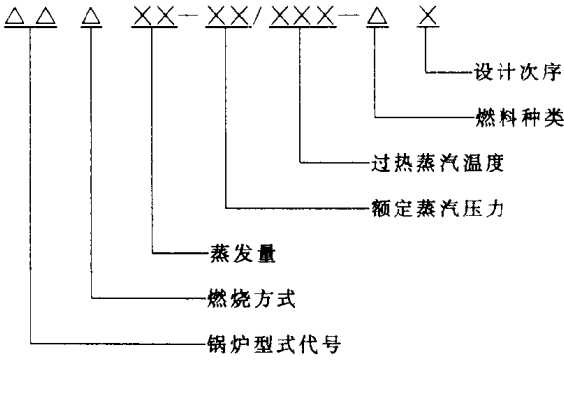


图 1-1 工业蒸汽锅炉型号形式

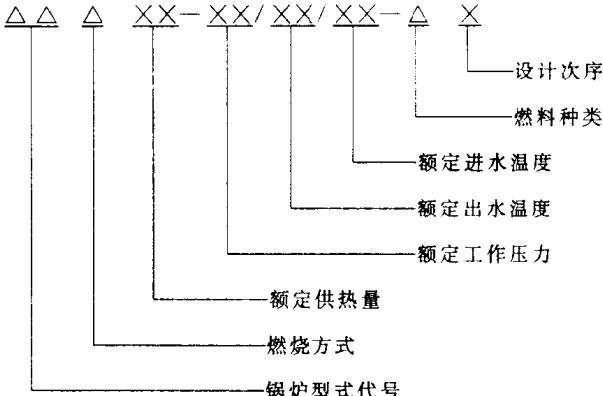


图 1-2 热水锅炉型号形式

例如：QXW2.8-0.7/95/70-A2 表示强制循环式往复炉排热水锅炉，额定供热量 2.8MW，额定工作压力 0.7MPa，额定出水温度 95℃，额定进水温度 70℃，燃用烟煤，第二次设计。

二、电站锅炉型号

中国电站锅炉型号也由三部分组成。第一部分表示锅炉制造厂代号（表 1-8）；第二部分表示锅炉参数；第三部分表示设计燃料代号（表 1-9）及设计次序。

表 1-8 电站锅炉制造厂代号

锅炉制造厂名	代 号	锅炉制造厂名	代 号	锅炉制造厂名	代 号
北京锅炉厂	BG	杭州锅炉厂	NG	武汉锅炉厂	WG
东方锅炉厂	DG	上海锅炉厂	SG	济南锅炉厂	YG
哈尔滨锅炉厂	HG	无锡锅炉厂	UG		

表 1-9 设计燃料代号

设计燃料	代 号	设计燃料	代 号	设计燃料	代 号
燃煤	M	燃气	Q	可燃煤和油	MY
燃油	Y	燃其他燃料	T	可燃油和气	YQ

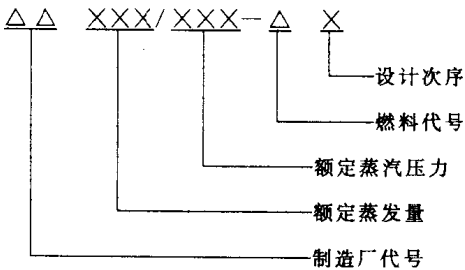


图 1-3 电站锅炉型号形式

使用联合设计图样制造的电站锅炉型号，可在型号第一部分工厂代号后再加 L 表示。

电站锅炉型号表示型式见图 1-3。例如：HG-670/13.72-M 表示哈尔滨锅炉厂制造的 670t/h，13.72MPa 工作压力的电站锅炉，设计燃料为煤，原型设计。又如：SG-1000/16.66-YM2 表示上海锅炉厂制造的 1000t/h，16.66MPa 工作压力的电站锅炉，设计燃料为油煤两用，第二次变型设计。

第二章 燃料、燃烧产物及热平衡计算

第一节 锅炉燃料

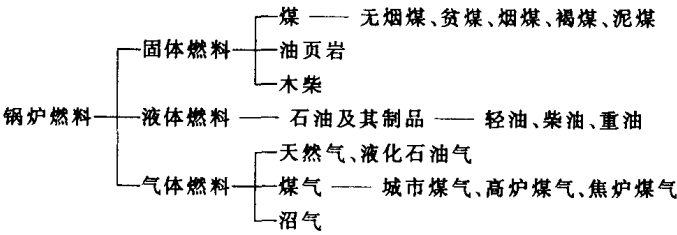
中国锅炉设备（包括电站锅炉和工业锅炉）燃烧所用燃料主要是化石燃料，如煤（炭）、石油制品及天然气等。根据中国化石燃料的储量及开采利用的情况，在相当长的时间内，煤不仅是中国，也是世界上最重要的一次能源，如表 2-1 所示。

表 2-1 中国化石燃料储量及消费结构

项 目	煤/100Mt	石油/100Mt	天然气/10 ⁸ m ³
截止 1994 年底化石燃料探明可采储量（ $\frac{\text{中国}}{\text{世界总量}}$ ）	$\frac{1145}{10438.6}$	$\frac{33}{1373}$	$\frac{1700}{141000}$
探明可采储量在世界的排位	3	10	11
1994 年一次能源中化石燃料的消费结构/%	75.0	15.7	1.9

一、燃料分类

按照燃料的物理状态可分为固体燃料、液体燃料和气体燃料 3 大类。具体表示如下。



二、燃料的成分组成

燃料是由可燃成分和不可燃成分两大部分组成的复杂组合物，特别是煤的组成和结构非常复杂。对固（液）体燃料，其可燃成分用元素分析的有机成分来表示，对气体燃料则用各种可燃气体成分来表示。不可燃成分主要是灰分（各种矿物盐）、水分（包括外在水分 M_f 和内在水分 M_{int} ）及一些气体（ CO_2 、 SO_2 等），具体说明如表 2-2 所示。

表 2-2 燃料的组成成分

燃 料	可 燃（有 机）成 分	不 可 燃 成 分	
固（液）体燃料	C（碳） H（氢） O（氧） N（氮） S（硫） 以上成分加热时析出可燃气体，称挥发分，剩余物称固定碳或残焦	A（灰分） $\left[\begin{matrix} Al \\ Fe \\ Ca \\ Mg \\ K \\ Na \end{matrix} \right]$ 的 $\left[\begin{matrix} \text{碳酸盐} \\ \text{硫酸盐} \\ \text{硅酸盐} \\ \text{磷酸盐} \end{matrix} \right]$ 硫化物	M（水分） $\left\{ \begin{matrix} M_f(\text{湿分或外在水分}) \\ M_{int}(\text{内在水分}) \end{matrix} \right.$
气体燃料	CH₄（甲烷） CO（一氧化碳） H₂（氢） C₂H₄（乙烯等不饱和烃） C_mH_n（各类烃） H₂S（硫化氢）	O₂（氧） N₂（氮） CO₂（二氧化碳） SO₂（二氧化硫） A 少量 M 少量	

为便于燃料计算和燃烧机理分析，对固（液）体燃料的各成分用相应的质量占燃料总质量的百分数表示，各成分质量百分数的总和为 100%。

即
$$C+H+O+N+S+A+M=100\% \tag{2-1}$$

对气体燃料的各组成成分，则用相应组成气体成分的容积占燃料总容积的百分数表示，各成分容积百分数的总和为 100%

即
$$C_nH_{2n+2} + CO + H_2 + C_2H_4 + \cdots + O_2 + N_2 + H_2S + CO_2 = 100\%$$
 (2-2)

三、各种“基”的表示方法及“基”的换算

1. 固（液）体燃料各种“基”的表示方法

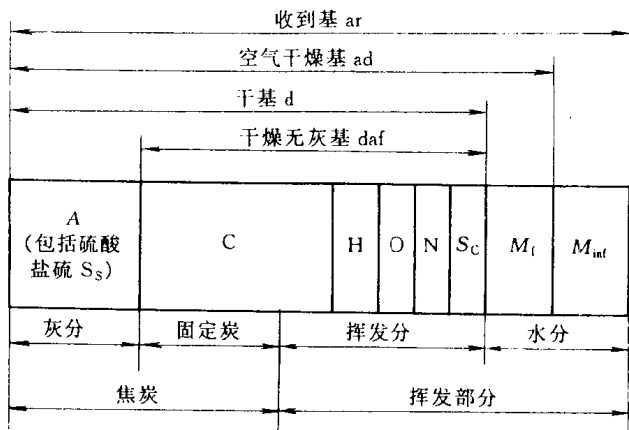


图 2-1 燃料成分及各种“基”的关系

考虑到固（液）体燃料中水分和灰分所占质量较大，且随外界条件（运输、淋雨……）而有较大波动，必然对其他可燃成分的质量百分数造成很大影响，为有利于应用和分析，采用四种不同“基”准的质量成分表示方法（参见图 2-1），即

收到基（下标符号 ar）表示燃料中全部成分的质量百分数总和。是锅炉燃料燃烧计算的原始依据

$$C_{ar} + H_{ar} + O_{ar} + N_{ar} + S_{ar} + A_{ar} + M_{ar} = 100\% \quad (2-3)$$

空气干燥基（下标符号 ad）表示不含外在水分条件下，燃料各组成成分的质量百分数总和。是实验室煤质分析所用煤样的成分组成。

$$C_{ad} + H_{ad} + O_{ad} + N_{ad} + S_{ad} + A_{ad} + M_{ad} = 100\% \quad (2-4)$$

干基（下标符号 d）是不含水分条件下干燥燃料各组成成分的质量百分数总和。干基中各成分不受水分变化的影响。

$$C_d + H_d + O_d + N_d + S_d + A_d = 100\% \quad (2-5)$$

干燥无灰基（下标符号 daf）是不含水分和灰分条件下，干燥无灰燃料各组成成分质量百分数的总和、干燥无灰基中只包含燃料的可燃成分，各成分不受水分和灰分变化的影响。

$$C_{daf} + H_{daf} + O_{daf} + N_{daf} + S_{daf} = 100\% \quad (2-6)$$

2. 各种“基”的换算

各种“基”可以相互换算，按式（2-7）进行

$$B = K \cdot A \quad (2-7)$$

式中 A——已知“基”的相应成分；
B——换算“基”的相应成分；
K——换算系数，如表 2-3 所示。

表 2-3 各种“基”的换算系数 K^(%)

已知“基”	换 算 “基”			
	收到基	空气干燥基	干基	干燥无灰基
收到基	1	$\frac{100 - M_{ad}}{100 - M_{ar}}$	$\frac{100}{100 - M_{ar}}$	$\frac{100}{100 - M_{ar} - A_{ar}}$
空气干燥基	$\frac{100 - M_{ar}}{100 - M_{ad}}$	1	$\frac{100}{100 - M_{ad}}$	$\frac{100}{100 - M_{ad} - A_{ad}}$
干基	$\frac{100 - M_{ar}}{100}$	$\frac{100 - M_{ad}}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A_d}$
干燥无灰基	$\frac{100 - M_{ar} - A_{ar}}{100}$	$\frac{100 - M_{ad} - A_{ad}}{100}$	$\frac{100 - A_d}{100}$	1

① 表中换算系数可用于除水分以外的其余成分、挥发分和高位发热量的换算。

3. 水分之间的换算公式

$$M_t = M_f + M_{inf} \cdot \frac{100 - M_f}{100} \quad (2-8)$$

或
$$M_{ar} = M_f + M_{ad} \cdot \frac{100 - M_f}{100} \quad (2-9)$$

式中 M_t ——燃料的全水分，亦就是收到基水分 M_{ar} ；
 M_f ——燃料的外在水分（湿分），以收到基为基准；
 M_{inf} ——燃料的内在水分，亦就是空气干燥基水分 M_{ad} 。

4. 同种燃料因外在水分变化引起收到基成分各值的变化

$$a' = k \cdot a \quad (2-10)$$