



火力发电厂

高压锅炉设备及运行

上册

西安电力学校

电力工业出版社

火 力 发 电 厂

高 压 锅 炉 设 备 及 运 行

上 册

西 安 电 力 学 校

电 力 工 业 出 版 社

内 容 提 要

全书共有三篇二十六章，分上、下两册出版。上册内容为高压、超高压锅炉机组各主要设备的结构和工作原理，下册内容为锅炉的计算方法和运行操作知识。本书从运行的实际需要出发，着重介绍国产设备和国内的运行实践经验，也适当地引用一些国外机组的结构和资料。全书文字通俗，插图较多。本书的读者对象是火力发电厂锅炉专业工人及技术人员，也可供中等专业学校热机专业师生参考。

火 力 发 电 厂 高压锅炉设备及运行 上 册

西安电力学校

(根据水利电力出版社纸型重印)

*

电力工业出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 20.75印张 469千字 1插图

1978年9月北京第一版

1980年6月新一版 1980年6月北京第一次印刷

印数 22401—44000册 定价 1.70元

书号 15036·4089

前 言

建国以来，在毛主席革命路线指引下，我国的电力工业得到了蓬勃发展。在我国的火力发电厂中，高压锅炉所占比重越来越大，我国自己设计和制造的高参数和超高参数大容量火力发电机组也已经成批投入了运行。搞好高压锅炉的运行，对保证火力发电厂的安全经济生产具有十分重要的意义。为了适应发电厂培训工作的需要和提高高压锅炉运行工人的技术业务水平，我们在调查研究和深入现场学习的基础上编写了本书。本书主要供具有初中以上文化并有一定专业知识的高压锅炉运行工人阅读，也可供中等专业学校热机专业的师生教学参考。

全书分为锅炉本体结构及工作原理、锅炉计算、锅炉运行三篇，共二十六章。着重介绍了高压锅炉机组各主要设备的结构及工作原理、锅炉计算和锅炉运行的基本知识。内容尽量从锅炉运行的角度进行叙述和分析，注意了通俗实用。

本书的取材和图例，主要以国产设备和国内的实践经验为主，也适当地引用了一些国外的机组和有关资料。在编写时，我们主观上虽然尽力想把学习到的生产实践经验总结出来，并力图反映我国高压锅炉的技术现状和成果，但是由于我们水平有限，不一定能达到预期的效果，甚至还会存在不少缺点和错误，诚恳地希望读者批评指正。

本书初稿的编写和初审，是先后在西固热电厂和闵行发电厂蹲点学习和参加现场培训工作的过程中进行的；经过几次修改，最后又邀请了水利电力部热工研究所，上海闵行发电厂，辽宁朝阳发电厂，甘肃西固热电厂，湖北青山热电厂，陕西户县热电厂、宝鸡发电厂、坝桥热电厂等单位开了审稿会，并请西安交通大学锅炉教研室对本书第二篇进行了审阅。此外，在本书收集资料和编写的过程中，还得到了上海锅炉研究所、上海锅炉厂、哈尔滨锅炉厂、南京工学院、水利电力部东北电力设计院等单位的热情帮助。对上述各单位的大力支持和认真审稿，我们表示衷心的感谢。

西安电力学校锅炉教研组

1977年12月

目 录

前 言

第一篇 锅炉本体结构及工作原理

第 一 章 绪 论	1
1-1 锅炉的作用	1
1-2 锅炉的组成及工作过程	2
1-3 锅炉的分类和型号	3
第 二 章 燃 料	5
2-1 燃料概述	5
2-2 煤	6
一、煤的组成及其性质；二、煤的分类；三、煤的成分的分析标准及其换算；四、煤的发热量及其计算	
2-3 燃油	13
2-4 气体燃料	16
第 三 章 制粉系统及燃油系统	18
3-1 煤粉的性质与品质	18
一、煤粉的一般性质；二、煤粉的自燃性与爆炸性；三、煤粉的细度和均匀度；四、煤粉的经济细度	
3-2 磨煤机	21
一、概述；二、筒型球磨机；三、中速磨煤机；四、风扇磨煤机	
3-3 制粉系统	28
一、直吹式制粉系统；二、仓储式制粉系统；三、小结	
3-4 制粉系统的其他部件	31
一、粗粉分离器；二、给煤机；三、细粉分离器；四、给粉机；五、螺旋输粉机；六、锁气器	
3-5 制粉系统的出力	39
一、磨煤出力；二、制粉系统的干燥出力；三、制粉系统的通风出力	
3-6 制粉系统的风量配合	45
一、燃用无烟煤或贫煤；二、燃用烟煤；三、燃用褐煤；四、燃用洗中煤	
3-7 磨煤功率与单位电耗	46
一、筒型磨煤机的磨煤功率及单位电耗；二、中速磨煤机的磨煤功率及单位电耗	
3-8 制粉系统的经济性分析	49
一、筒型球磨机配仓储式制粉系统的经济性；二、中速磨煤机配直吹式制粉系统的经济性	
3-9 油 系 统	53
一、供油系统；二、锅炉房油系统；三、锅炉房油系统举例	
第 四 章 锅炉的燃烧设备及燃烧原理	59
4-1 煤粉燃烧的概念	60

一、煤粉的燃烧阶段；二、煤粉的燃烧条件	
4-2 煤粉的燃烧过程	61
一、煤粉气流的着火；二、煤粉气流着火后的燃烧；三、影响煤粉气流着火与燃烧的因素	
4-3 煤粉喷燃器	66
一、直流喷燃器；二、旋流喷燃器	
4-4 炉内空气动力场冷态试验简介	77
一、冷态空气动力场试验的模化条件；二、炉内空气动力场的观测方法	
4-5 煤粉炉的炉膛结构	82
一、概述；二、固态排渣炉；三、液态排渣炉；四、旋风炉	
4-6 油的燃烧	92
一、油燃烧的概念；二、油的燃烧过程	
4-7 油炉的燃烧设备	94
一、雾化器；二、配风器；三、油炉的炉膛结构；四、微正压锅炉的特点	
第五章 自然循环原理及蒸发设备	110
5-1 概述	110
一、蒸发设备的组成；二、高参数、大容量锅炉蒸发设备的特点；三、沸腾管中的汽水流动状态；四、沸腾管的传热恶化问题	
5-2 自然循环的基本原理	112
一、自然循环的形成及压差基本公式；二、运动压头与流动阻力；三、水循环压差法计算概述	
5-3 自然循环的安全性检查	116
一、停滞、倒流及汽水分层；二、下降管含汽；三、高参数大容量锅炉的水循环安全性问题	
5-4 循环倍率	124
一、界限循环倍率；二、影响循环倍率的因素	
5-5 蒸发设备各部件的结构	127
一、汽包；二、下降管；三、水冷壁	
第六章 蒸汽的净化	133
6-1 概述	133
6-2 对蒸汽品质的要求	133
6-3 蒸汽中杂质的来源	133
一、蒸汽的机械携带；二、蒸汽的溶盐	
6-4 提高蒸汽品质的途径	137
一、提高给水品质；二、汽水分离；三、蒸汽清洗；四、锅炉排污；五、分段蒸发	
第七章 过热器与再热器	146
7-1 概述	146
7-2 过热器与再热器的结构	148
一、对流过热器；二、半辐射过热器；三、辐射过热器；四、包覆管过热器；五、再热器	
7-3 调温设备	152
一、表面式减温器；二、喷水式减温器；三、减温点的选择；四、汽-汽热交换器	
7-4 热偏差及其消除	157
一、热偏差的概念；二、热力不均匀；三、水力不均匀；四、减小热偏差的方法	
第八章 省煤器与空气预热器	161
8-1 概述	161

8-2 省煤器	161
8-3 空气预热器	165
一、管式空气预热器；二、回转式空气预热器；三、两种空气预热器的比较	
第九章 构架与炉墙	178
9-1 锅炉构架	178
一、支承式构架；二、悬吊式构架	
9-2 炉墙	181
一、轻型炉墙；二、敷管式炉墙	
第十章 直流锅炉的基本结构与工作原理	183
10-1 强制循环和直流锅炉概述	183
10-2 直流锅炉的分类	185
10-3 直流锅炉的水动力学问题	186
一、水动力特性；二、脉动现象	
10-4 直流锅炉的热偏差	193
一、热偏差的产生；二、减轻热偏差的方法	
10-5 直流锅炉的膜态沸腾	197
一、影响膜态沸腾的因素；二、防止膜态沸腾的措施	
10-6 直流锅炉的热化学问题	199
一、概述；二、各种盐分在过热蒸汽中的溶解特性；三、直流锅炉中的盐分沉淀特性	
10-7 复合循环锅炉简介	201
一、亚临界压力复合循环锅炉；二、超临界压力复合循环锅炉；三、亚临界压力低循环倍率锅炉	
第十一章 典型锅炉简介	205
11-1 HG-220/100-1型高压锅炉	205
一、参数；二、结构特点	
11-2 HG-410/100-1型高压锅炉	207
一、参数；二、结构特点	
11-3 SG-400/140-2型超高压再热锅炉	209
一、参数；二、结构特点	
11-4 HG-670/140-1型超高压再热锅炉	212
一、参数；二、结构特点	
11-5 SG-400/140型超高压直流锅炉	215
一、参数；二、汽水系统；三、结构特点；四、水平围绕管圈的优缺点	
11-6 SG-1000/170型亚临界压力直流锅炉	218
一、参数；二、汽水系统；三、结构特点；四、垂直一次上升管屏的优缺点	
11-7 日本日立公司 850 吨/时锅炉	224
一、参数；二、结构特点	
11-8 瑞士苏尔寿公司 947 吨/时低循环倍率锅炉	226
一、参数；二、结构特点	
11-9 意大利Tosi厂 1050 吨/时锅炉	229
一、参数；二、结构特点	
11-10 苏联 EI-670/140 型锅炉	232

一、参数；二、结构特点	
第十二章 风机的基本构造及工作原理	235
12-1 概述	235
一、电厂常用风机；二、风机的分类	
12-2 离心式风机的结构及工作原理	236
一、离心式风机的主要部件；二、离心式风机的工作原理	
12-3 离心式风机的基本参数	239
一、型号；二、流量；三、风压；四、轴功率、有效功率和电机容量；五、效率；六、转速	
12-4 离心式风机全风压的确定	242
一、气体在叶轮中的流动；二、理论全风压方程式；三、对理论全风压方程式的讨论；四、实际全风压方程式；五、风机在运行状态下全风压的计算；六、选择风机时全风压的确定	
12-5 离心式风机的特性曲线	246
一、离心式风机的特性曲线；二、管路特性曲线；三、工作点	
12-6 离心式风机的相似定律和无因次特性曲线	249
一、风机的相似定律；二、无因次特性曲线	
12-7 电厂常用风机的型式及构造	253
一、4-73型锅炉送、引风机；二、9-35型锅炉送、引风机；三、7-29型排粉风机	
12-8 轴流式风机	256
一、概述；二、轴流式风机的结构及各部件的作用；三、轴流式风机的调节机构	
12-9 风机的运行	260
一、风机工作的稳定性；二、离心式风机的运行调节；三、轴流式风机的运行调节；四、风机的联合运行；五、风机运行中的几个问题	
12-10 风机的改造	266
一、风机改造的意义；二、风机运行经济性低的原因及改进措施；三、高效风机防磨、防震、防积灰的措施；四、改变风机规范的方法；五、离心式高效风机选型计算	
第十三章 除尘及除灰	272
13-1 除尘器	272
一、旋风除尘器；二、离心式水膜除尘器；三、文丘里湿式除尘器；四、电除尘器	
13-2 除灰	283
一、气力除灰；二、水力除灰	
13-3 灰渣的综合利用	295
一、制砖；二、制水泥；三、制磷肥；四、制矿渣棉；五、改良土壤；六、提取稀有金属	
第十四章 锅炉附件	301
14-1 阀门	301
一、阀门的一般知识；二、阀门的基本结构；三、高压锅炉常用阀门	
14-2 安全阀	313
一、重锤式安全阀；二、弹簧式安全阀；三、脉冲式安全阀；四、活塞式盘形弹簧安全阀	
14-3 吹灰器	316
一、枪式吹灰器；二、排污水吹灰器；三、振动式除灰器；四、钢珠除灰器	
14-4 水位计	321
一、云母片水位计；二、电接点水位计	

第一篇 锅炉本体结构及工作原理

第一章 绪 论

1-1 锅炉的作用

锅炉是火力发电厂主要设备之一。

火力发电厂的生产过程可以简单地用图 1-1 表示。在锅炉中，燃料燃烧所放出的热量将水加热成一定压力和温度的蒸汽；通过管道将蒸汽引入汽轮机中膨胀做功，使汽轮机的转子转动并带动发电机的转子旋转，利用导体切割磁力线的原理发出电来。在汽轮机中作完功的蒸汽进入凝汽器凝结成水，再由凝结水泵打入除氧器。在除氧器中水被汽轮机来的抽汽加热并除去水中的氧，然后由给水泵打回锅炉。通过这样的循环过程，发电厂将电力源源不断地输送给用户。

这个过程是能量转换的过程：在锅炉中将燃料的化学能转换成蒸汽的热能，在汽轮机中将蒸汽的热能转换成机械能，在发电机中将机械能转换成电能。

电力一般是不能储存的。发电设备的出力要随着外界负荷的变化而变化。这是发电厂生产的一个很重要的特点。因此，锅炉也必须根据外界负荷的变化，输送一定质量（汽压、汽温）和相应数量的蒸汽给汽轮机，以满足用户的用电要求。

发电厂运行的安全性对社会主义革命和社会主义建设事业的影响很大。现代高压锅炉的设备较复杂，又承受高温、高压，操作不当易引起事故。所以，对高压锅炉的安全运行要求是很高的。

锅炉在运行时要消耗大量燃料。一台蒸发量为400吨/时的锅炉，每小时约消耗原煤60吨左右。如果我们能把锅炉效率提高1%，每年这样一台锅炉就可以为国家节省原煤约4000多吨，如果全国都搞好锅炉的经济运行，就能为国家节省很多的煤。

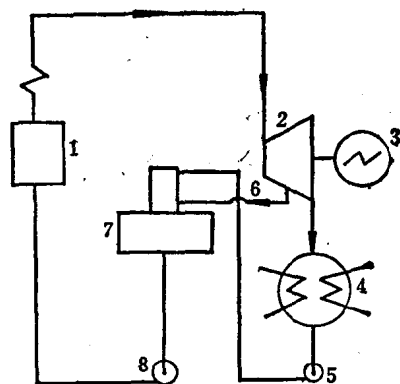


图 1-1 火力发电厂生产过程简图
1—锅炉；2—汽轮机；3—发电机；4—凝汽器；5—凝结水泵；6—汽轮机抽汽；7—除氧器；8—给水泵

1-2 锅炉的组成及工作过程

锅炉是由“锅”和“炉”两大部分组成的。可参看图1-2。

“锅”就是锅炉的水汽系统，由省煤器、汽包、下降管、水冷壁、过热器及再热器等设备组成。它的任务是使水吸热蒸发，最后变成一定参数的过热蒸汽。其过程是：给水由给水泵打入省煤器以后，逐渐吸热，温度升高到汽包工作压力下的沸点，成为饱和水；饱和水在蒸发设备中继续吸热，在温度不变的情况下蒸发成饱和蒸汽；饱和蒸汽从汽包引入过热器以后，逐渐过热到规定的温度，成为合格的过热蒸汽，然后送往汽轮机；过热蒸汽在汽轮机高压缸中膨胀做功后，汽压、汽温均下降，在高压缸出口由导管将蒸汽引入锅炉再热器中第二次再过热成为高温再热蒸汽，然后再送往汽轮机中、低压缸中继续膨胀做功。

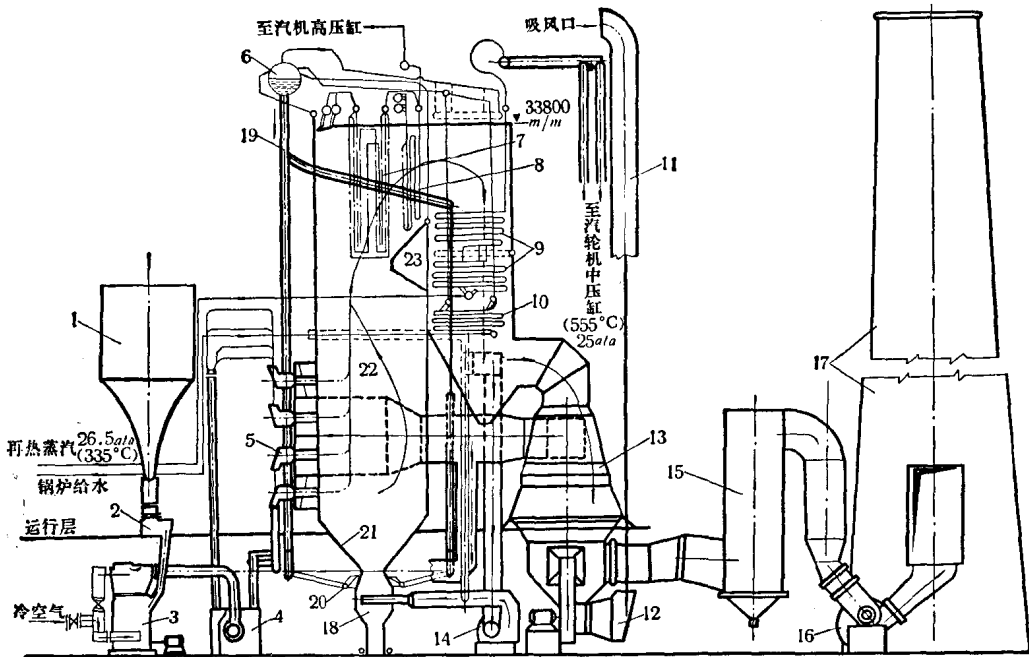


图 1-2 SG-400/140-555/555-1 型超高压锅炉

1—煤斗；2—给煤机；3—磨煤机；4—排粉机；5—喷燃器；6—汽包；7—屏式过热器；8—对流过热器；9—再热器；10—省煤器；11—送风机的进风道；12—送风机；13—空气预热器；14—烟气再循环风机；15—除尘器；16—引风机；17—烟囱；18—灰渣斗；19—下降管；20—下联箱；21—冷灰斗；22—燃烧室；23—折焰角

“炉”就是锅炉的燃烧系统，由炉膛、烟道、喷燃器及空气预热器等组成。其工作过程是：送风机将空气送入空气预热器中吸收烟气的热量并送进热风道，然后分成两股：一股送给制粉系统作为一次风携带煤粉送入喷燃器，另一股作为二次风直接送往喷燃器。煤粉与一、二次风经喷燃器喷入炉膛进行燃烧放热，并将热量以辐射方式传给炉膛四周的水冷壁等辐射受热面；燃烧产生的高温烟气则沿烟道流经过热器、再热器、省煤器和空气预热器等

设备，将热量主要以对流方式传给它们。在传热过程中，烟气温度不断降低，最后由引风机送入烟囱，排入大气。

锅炉设备可以分为锅炉本体和辅助设备两个部分。锅炉本体，就是前边提到的组成“锅”和“炉”的全部设备。锅炉本体以外的给水泵、送风机、引风机、烟囱以及除灰设备（用以清除炉底落下的灰渣）、除尘设备（用以清除烟气中带走的细灰）、制粉设备和输煤设备等都是辅助设备。

1-3 锅炉的分类和型号

锅炉分类的方法很多，主要有：

- （1）按燃烧方式，可分为层燃炉、室燃炉和旋风炉；
- （2）按燃用的燃料，可分为燃煤炉、燃油炉和燃气炉；
- （3）按工质的流动特性，可分为自然循环锅炉、强制循环锅炉、复合循环锅炉及低循环倍率锅炉等；
- （4）按锅炉容量，可分为小容量、中容量和大容量锅炉，或称为小型、中型和大型锅炉；
- （5）按蒸汽参数，可分为低压、中压、高压、超高压、亚临界压力和超临界压力的锅炉；
- （6）按布置方式，可分为屋内式、半露天式和露天式锅炉；
- （7）按排渣方式，可分为固态排渣炉和液态排渣炉。

在表示锅炉类型时，一般只要说明锅炉的蒸发量（容量），过热蒸汽压力和温度，燃烧方式，工质流动特性等即可；必要时再另说明其它特点，如燃煤，燃油或煤、油两用，固态排渣或液态排渣，以及是否具有中间再热等。

目前我国系列生产的高压以上的锅炉见表1-1所列。

表 1-1 目前我国系列生产的高压以上锅炉

蒸发量 (吨/时)	过热蒸汽 压 力 (表大气压)	过热蒸汽 温 度 (°C)	配汽轮发 电机容量 (万千瓦)	炉 型
220	100	540	5	高压自然循环汽包炉。燃用煤粉或残渣油
410	100	540	10	高压自然循环汽包炉。燃烧煤粉
400	140	555/555*	12.5	超高压自然循环汽包炉或直流炉。燃煤、燃油或煤、油两用。具有中间再热
670	140	540/540	20	超高压自然循环汽包炉。燃烧煤粉的室燃方式或旋风燃烧方式。具有中间再热
935	170	570/570	30	亚临界压力直流炉。燃烧煤粉。具有中间再热
1000	170	555/555	30	亚临界压力直流锅炉。燃油。具有中间再热

* 过热蒸汽温度为555°C，中间再热至555°C。

我国锅炉型号目前用三组字码表示，如HG-410/100-1型锅炉。型号中第一组字码是锅炉制造厂名称的汉语拼音字母缩写，HG表示哈尔滨锅炉厂，SG表示上海锅炉厂，WG表示武汉锅炉厂，DG表示东方锅炉厂，BG表示北京锅炉厂等；第二组字码表示蒸发量（容量）和蒸汽压力，写成分数形式，分子表示锅炉蒸发量，分母表示过热蒸汽压力（表压力）；第三组字码表示产品生产序号。

例如上述的HG-410/100-1型锅炉，表示是哈尔滨锅炉厂生产的蒸发量为410吨/时，过热蒸汽压力为100表大气压，第一种类型的锅炉。

对于具有中间再热的锅炉，则用四组字码表示，即在上述第二组与第三组之间再增加一组字码，也写成分数形式，分子表示过热蒸汽温度，分母表示再热蒸汽温度。例如SG-400/140-555/555-2型锅炉，表示是上海锅炉厂生产的，蒸发量为400吨/时，过热蒸汽压力为140表大气压，过热蒸汽温度为555℃，再热蒸汽温度为555℃，第二种类型的锅炉。

关于产品生产序号，序号数字小的是先设计的，序号数字大的是后设计的。当锅炉容量、蒸汽参数等主要技术特性相同而生产序号不同时，它们仍属于同一大类型锅炉，但是在结构上仍有某些差别。例如HG-670/140-1型与HG-670/140-2型锅炉的主要区别为：
（1）在燃烧方式上，1型为一般的室燃方式，2型则采用立式旋风炉；（2）在汽包内部装置上，1型为两段蒸发，2型则为一段蒸发；（3）在再热汽温的调节上，1型采用汽-汽热交换器，2型则以烟气再循环作为主要的调节手段等。

第二章 燃 料

2-1 燃 料 概 述

燃料，是指能用来燃烧以取得热量的物质。

锅炉在运行中，必须不间断地把燃料送入炉膛燃烧放热，才能保证生产过程的连续进行。

燃料按其物态及获得方法的分类见表2-1。

表 2-1

燃 料 的 分 类

按 物 态 分 按 获 得 方 法 分	天 然 燃 料	人 工 燃 料
固 体 燃 料	木柴、煤、页岩	木炭、焦炭、煤粉等
液 体 燃 料	石 油	汽油、煤油、柴油、重油等
气 体 燃 料	天然气	高炉煤气、发生炉煤气、炼焦炉煤气、地下气化煤气等

燃料的种类很多，其性质和用途也各不相同。冶金、化学、医药、铁道等工业部门对燃料都有一定的要求，如冶金工业中的炼焦用煤，就必须具有好的结焦性以及含硫量要少等。所以火力发电厂一般是燃用其它部门不用的劣质燃料，特别是当地的劣质燃料，以充分利用能源资源和减轻运输负担。

我国是燃料资源极为丰富的国家，以煤来说，不但蕴藏量丰富，而且质量优良。解放后我国的煤炭工业飞速发展，开采技术不断提高，煤炭产量迅速增加，彻底改变了旧中国的落后面貌。

我国的石油蕴藏量也十分丰富。在毛主席“独立自主，自力更生”的伟大战略方针指引下，广大石油工人怀着为社会主义祖国争光、为伟大的中国人民争气的雄心壮志，高举大庆红旗，坚决顶住“四人帮”的干扰和破坏，头顶蓝天，脚踩荒原，发扬了“一不怕苦，二不怕死”的革命精神，使老油田稳产高产，新油田不断出现。在一九六三年，我国就已宣告石油基本自给，冲垮了帝、修、反对我国石油的封锁。从此，中国使用洋油的日子一去不复返了。

我国燃料工业的迅猛发展，对进一步落实毛主席关于“备战、备荒、为人民”的伟大方针，对实现我国社会主义建设的四个现代化，改变我国的工业布局，满足城乡人民的生活需要，具有深远的政治意义和经济意义。

2-2 煤

一、煤的组成及其性质

1. 煤的元素分析成分

煤的元素分析成分包括碳(C)、氢(H)、氧(O)、氮(N)、硫(S)、灰分(A)和水分(W)。其中碳、氢、硫是可燃的,其余都是不可燃的。这些成分一般是呈复杂的化合物存在于煤中。

煤中各种成分的性质如下:

(1) 碳(C) 碳是煤中最主要的可燃元素,是煤中最基本的成分,其含量约占40~85%。

一公斤碳完全燃烧变成二氧化碳(CO_2)时,能放出大约7850大卡热量。

一公斤碳不完全燃烧变成一氧化碳(CO)时,只能放出2214大卡的热量。

碳燃烧时不易着火,燃烧缓慢,火焰短。煤的碳化程度越深,即含碳量越高,越不易着火和燃烧。

(2) 氢(H) 氢是煤中单位发热量最高的元素,但含量不多。

一公斤氢燃烧后,能放出34180大卡的热量。但是氢在燃烧后要生成水,水要吸收热量蒸发成水蒸汽。所以在锅炉机组中氢燃烧所放出来的可利用的热量要比上述数值低。已知一公斤氢燃烧后生成九公斤水,每公斤水在一般情况下达到汽化约需热量600大卡/公斤,所以一公斤氢在锅炉中燃烧实际能放出的热量只有 $34180 - 9 \times 600 = 28780$ 大卡/公斤。

氢易着火,燃烧迅速。

(3) 氧(O) 氧是煤中的杂质。由于氧的存在,就使煤中的可燃元素含量相对减少,而且氧会使煤中的可燃元素氧化,使煤燃烧时放出的热量减少。

(4) 氮(N) 氮也是煤中的杂质。其含量不多,对锅炉的影响也不大。

(5) 硫(S) 煤中的硫由有机硫(S_{yf})、硫化铁中的硫(S_{if})和硫酸盐中的硫(S_{iy})三部分组成。前两种可以燃烧,称为挥发硫,或称可燃硫(S_R),后一种不能燃烧而并入灰分。

硫是煤中的有害元素。尽管挥发硫可以燃烧并放出一定的热量(约2160大卡/公斤),但其燃烧产物二氧化硫(SO_2)及三氧化硫(SO_3)会与水化合生成亚硫酸(H_2SO_3)和硫酸(H_2SO_4);烟气中的水蒸汽由于锅炉排烟温度过低等原因,又常在锅炉尾部受热面凝结成水,由于硫的存在会使烟气的露点温度升高,从而造成锅炉尾部受热面的酸性腐蚀。另外,硫的存在也会引起炉子的高温腐蚀(见26章)。

(6) 水分(W) 水分也是煤中的杂质。煤中的水分由表面水分和固有水分组成。表面水分也叫外在水分(W_{wz}),是由雨露冰雪造成的,或在开采过程中进入煤中的,可以用自然干燥法除掉。固有水分也叫内在水分(W_{nz}),是煤中水蒸汽的压力与空气中水蒸汽的压力达到平衡时煤中所具有的水分。固有水分不能依靠自然干燥法除掉,一般把煤加热到102~105℃,并保持1~3小时,方可除掉。

水分的存在, 不仅使煤中的可燃元素含量相对减少, 而且煤燃烧时水分蒸发还要吸收热量, 使煤的实际发热量降低。

(7) 灰分(A) 煤中含有的不能燃烧的矿物杂质, 在煤燃烧后形成灰分。灰分是煤的主要杂质。

煤的含灰量多时, 发热量就较低, 这是因为灰多必然导致煤中的可燃成分降低; 同时, 在燃烧中部分灰分包围了可燃成分, 影响了可燃质的正常燃烧。另外, 由于灰分的存在, 锅炉运行中排除灰渣也带出较多的热量, 使热损失增加。

煤燃烧后的灰粒在随着烟气流动时, 较大的灰粒有冲刷作用, 会造成锅炉受热面的磨损; 而较细的灰粒则易粘结在锅炉受热面上, 使传热恶化, 烟气流动阻力增大和锅炉效率降低。

灰粒在高温下熔化而具有粘性。当冲向受热面的熔渣得不到及时冷却时, 就会在锅炉受热面上造成结渣(或称结焦), 使传热恶化, 严重时威胁锅炉的安全经济运行。

显然, 灰熔点(软化温度)的高低对炉膛结渣的严重程度有重要影响, 同时它又是影响炉膛结构设计的重要依据。灰熔点测定是采用灰锥加热的方法。用模子将细灰压制



图 2-1 测定灰熔点时灰锥的各种状态

(参看图 2-1);

变形温度 t_1 ——灰锥顶端开始变圆或开始弯曲时的温度;

软化温度 t_2 ——灰锥顶端由于弯曲而触及锥底平面或整个灰锥变成半圆球形时的温度;

熔化温度 t_3 ——灰锥完全熔融成液态时的温度;

流动温度 t_4 ——一般将熔化温度 t_3 增加 100°C , 称为灰的流动温度。

各种煤的灰熔点一般在 $1100\sim 1600^{\circ}\text{C}$ 之间。一般 $t_2 > 1400^{\circ}\text{C}$ 的煤称为难熔灰分的煤;
 $t_2 = 1200\sim 1400^{\circ}\text{C}$ 的煤, 为中熔灰分的煤; $t_2 < 1200^{\circ}\text{C}$ 的煤, 为易熔灰分的煤。

不同的煤具有不同的灰熔点, 它决定于灰的成分和测定灰熔点时采用的介质。

1) 灰的成分因素 影响灰熔点的因素首先是成分。灰中一般含有氧化硅(SiO_2), 氧化铝(Al_2O_3), 各种氧化铁(FeO , Fe_2O_3 和 Fe_3O_4), 钙镁氧化物(CaO , MgO)及硷金属氧化物(K_2O , Na_2O)等, 但主要成分有四种: SiO_2 , Al_2O_3 , ΣFeO 和 CaO , 其它成分甚微。不同成分具有不同的熔点, 有的难熔(即熔点高), 有的易熔(即熔点低)。灰中各种成分的熔点已列于表 2-2 中。当各种成分混合存在时, 又会使熔点改变(见表中后几项)。由此可知, 灰中各种成分的含量及比例不同时, 灰的熔点就不同。但是, 灰的熔点并不是各种成分的熔点的算术平均值。当灰分中含有本身熔点高的物质(如 SiO_2 , Al_2O_3 , MgO 等)越多时, 灰的熔点就越高; 相反, 若含有本身熔点较低的物质, 如氧化亚铁和硷金属的氧化物(FeO , Na_2O , K_2O 等)的含量越多时, 则灰的熔点也越

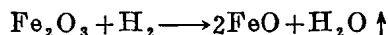
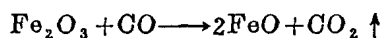
表 2-2

灰 中 成 分 的 熔 点

名 称	熔 点 (°C)	名 称	熔 点 (°C)
SiO ₂	2230	FeS ₂	1170
Al ₂ O ₃	2050	K ₂ O, Na ₂ O	800~1000
MgO	2800	3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	1850
CaO	2570	CaO·Al ₂ O ₃	1500
Fe ₃ O ₄	1540	Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	1000~1100
Fe ₂ O ₃	1550	+ 2FeO·SiO ₂ + SiO ₂	
FeO	1420	CaO·FeO + CaO·Al ₂ O ₃	1200

低。煤中的黄铁矿 (FeS₂) 等含量多时, 也会使灰的熔点降低。但是, 也有本身是难熔的物质在混合物中反而会使灰的熔点降低, 例如 CaO 的熔点是 2570℃, 但它与 FeO 和 Al₂O₃ 组成混合物时, 灰熔点降到 1200℃, 这是由于 CaO 具有助熔作用的缘故。

2) 介质因素 实践证明, 当周围的介质因素改变时, 会使灰分的熔点发生变化。例如, 当有 CO, H₂ 等还原性气体存在时, 会使灰的熔点降低。因为还原性气体能使灰分中的高熔点铁氧化物 (Fe₂O₃) 还原, 产生低熔点氧化铁 (FeO), 即:



所以, 在还原性介质中测得灰熔点总要低于在氧化性介质中测得的灰熔点。在锅炉运行中, 炉内总免不了要出现一些还原性气体, 因此在实验室电炉内测得的灰熔点, 往往比炉内实际灰熔点高。以 t_3 为例, 两者可能相差 200~300℃。为了减少这一误差, 在实验室测定灰熔点时常在电炉内充入少量的还原性气体, 使电炉内的介质保持所谓“半还原性气氛”。

2. 煤的工业分析成分

在发电厂中, 常根据煤的燃烧过程, 采用将煤加热的办法, 对煤进行工业分析。通过工业分析可测出煤中的水分、挥发分、固定碳和灰分等对锅炉燃烧调整有重要影响的几个数据。

(1) 水分 将试样放在烘箱中保持 102~105℃, 烘至重量不再变化时止, 试样所失去的重量占原试样重的百分比, 为这种煤的水分。

(2) 挥发分 试样中水分蒸发后, 继续升温, 某些物质会挥发成气体; 随着温度的不断升高和时间的延长, 挥发的速度先是不断地增加, 而后又逐渐降低。煤试样由于气体的挥发所失去的重量占原试样 (未烘干加热前) 重量的百分比, 称为这种煤的挥发分。

由于挥发分析出时没有一个明显的开始点和停止点, 为了便于比较, 规定了各种煤在测挥发分时的统一温度为 850℃, 加热时间为七分钟。为防止试样烧掉, 加热时应将试样加盖, 以隔绝空气。

挥发分的组成中除了少量不可燃气体如 O₂、CO₂、N₂ 等外, 主要是可燃气体如 CO、

H_2 、 H_2S 以及某些碳氢化合物等。因此挥发分很容易着火燃烧。挥发分着火后会对煤的未挥发部分进行强烈加热，可促使它迅速着火燃烧。挥发分析出后，煤会变得比较松散，孔隙较多，这就增大了煤的燃烧面积，加速了煤的燃烧过程。所以，挥发分含量高的煤，容易着火，燃烧速度较快；挥发分含量低的煤，不易着火，燃烧速度较慢。挥发分含量是对煤进行分类的重要依据。

(3) 固定碳和灰分 去掉水分和挥发分后，煤的剩余部分称为焦炭，焦炭是由固定碳（未挥发的碳）和灰分组成的。将焦炭放在 $800 \pm 20^\circ\text{C}$ 下灼烧（不要出现火焰），到重量不再变化时取出来冷却，这时焦炭失去的重量是固定碳重量，剩余部分是灰的重量。这两个重量各占煤试样原重量的百分比，就是固定碳和灰在煤中的成分。

煤的元素分析成分和工业分析成分之间的关系可参阅图2-2。

二、煤 的 分 类

锅炉用煤常以煤的可燃基挥发分 (V^r) 含量为主要依据来进行分类，大体可分为无烟煤、贫煤、烟煤和褐煤等。

(1) 无烟煤 无烟煤的碳化程度高（即含碳量高），挥发分含量低 (V^r 低于10%)，呈黑色而有光泽，质硬性脆，不易点燃，耐烧而火焰短，发热量高。

(2) 贫煤 贫煤的碳化程度比无烟煤低，挥发分含量 V^r 为10~20%，不易点燃，火焰短，发热量较高。

(3) 烟煤 烟煤的碳化程度又次于贫煤，挥发分含量范围较广 (V^r 约为20~40%)，一般容易点燃，火焰长，发热量高。

(4) 褐煤 褐煤的碳化程度较低，挥发分含量较高 (V^r 在40%以上)，常呈棕褐色，易于点燃，火焰长，灰分和水份含量高，发热量低。

表2-3 列出了几种代表性锅炉用煤的特性。

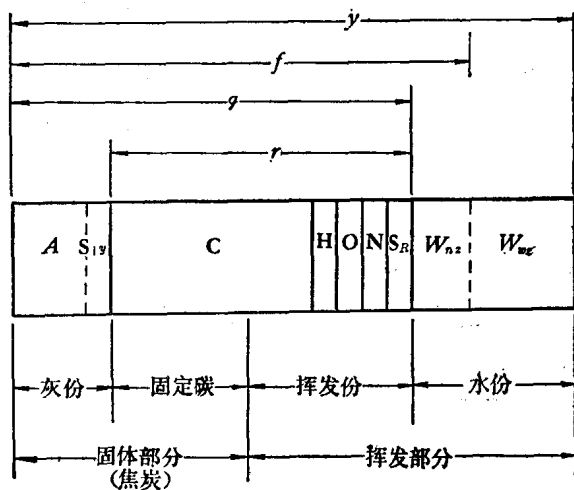


图 2-2 煤的成分

三、煤的成分的分析标准及其换算

1. 煤成分的分析标准

如前所述，煤是由碳、氢、氧、氮、硫、灰分及水分组成的。为了更清楚地了解煤的特性，不但要知道煤的成分，还要知道分析煤中各种成分时煤所处的状态。显然，同一种煤其所处的状态不同时，分析出的成分数据是不同的。

为了实际应用和理论研究的不同需要，通常把煤分为应用基、分析基、干燥基和可燃基四种状态进行成分分析，并分别用上角码 y 、 f 、 g 和 r 来表示。