

高等学校教材

---

# 电厂锅炉原理

南京工学院  
西安交通大学 热能动力教研室

水利电力出版社

## 内 容 简 介

本书从电厂使用的观点来阐述锅炉的工作原理和计算方法。内容包括：燃料和煤粉系统；燃烧的基本理论和设备；自然循环和强制流动锅炉的汽水系统、受热面布置、工作特性、运行调节和起停方法；锅炉热力计算和水动力计算等。

本书是高等学校电厂热能动力专业的教材，也可供电厂工作者及有关专业人员自学、参考。

水利电力出版社出版  
(北京三里河路6号)

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 28印张 635千字

1980年12月第一版

1984年11月新一版 1984年11月北京第一次印刷

印数 0001—6220册 定价 3.00元

书号 15143·5539

## 编写说明

根据1978年原水利电力部召开的教学计划和教材规划会议决定，本书由南京工学院和西安交通大学合写，并由南京工学院主编。

参加本书审稿的除编写单位外，还有：华中工学院(主审)、重庆大学、浙江大学、山东工学院、华北电力学院、东北电力学院和上海电力专科学校等单位。

全书共十五章，编者为南京工学院范从振(第六、七、十一、十二章)、章臣樾(第一、十四、十五章)、撒应禄(第二、十三章)和西安交通大学贾鸿祥(第三、四、五章)、朱兆雪(第八、九、十章)等同志。南京工学院周强泰同志也参加了部分编写工作。

由于水平限制和时间仓促，书中缺点和错误在所不免，希读者指正。

南京工学院  
西安交通大学 热能动力教研室

1979年12月

# 目 录

## 编写说明

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 第一章 概述 .....                      | 1   |
| § 1-1 锅炉设备的构成及工作概况 .....          | 1   |
| § 1-2 锅炉的主要类型 .....               | 3   |
| § 1-3 锅炉的安全和经济指标 .....            | 6   |
| 第二章 燃料 .....                      | 8   |
| § 2-1 煤的化学成分 .....                | 8   |
| § 2-2 燃料的某些特性 .....               | 12  |
| § 2-3 煤的类别 .....                  | 14  |
| § 2-4 重油 .....                    | 15  |
| § 2-5 气体燃料 .....                  | 17  |
| 第三章 燃烧产物和热平衡计算 .....              | 19  |
| § 3-1 空气量和过量空气系数 .....            | 19  |
| § 3-2 燃烧产物的成分和数量 .....            | 21  |
| § 3-3 完全燃烧方程式 .....               | 25  |
| § 3-4 根据烟气分析确定过量空气系数 .....        | 27  |
| § 3-5 燃烧产物的焓 .....                | 29  |
| § 3-6 锅炉机组的热平衡 .....              | 31  |
| 第四章 煤粉制备 .....                    | 40  |
| § 4-1 磨煤方法和煤的可磨性系数 .....          | 40  |
| § 4-2 煤粉的性质 .....                 | 42  |
| § 4-3 磨煤机 .....                   | 47  |
| § 4-4 制粉系统 .....                  | 63  |
| § 4-5 制粉系统的热力计算 .....             | 67  |
| § 4-6 煤粉分离器 .....                 | 74  |
| 第五章 炉内过程和燃烧设备 .....               | 79  |
| § 5-1 燃烧反应的理论基础 .....             | 79  |
| § 5-2 煤粉燃烧器及其流体动力学特性 .....        | 86  |
| § 5-3 煤粉空气气流的着火和燃烧 .....          | 102 |
| § 5-4 燃烧器的布置及炉内空气动力工况 .....       | 108 |
| § 5-5 固体燃料的其它燃烧设备 .....           | 116 |
| § 5-6 固态排渣煤粉炉运行的几个问题及燃烧调整试验 ..... | 124 |
| § 5-7 燃油炉 .....                   | 130 |

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| § 5-8 燃气炉 .....                 | 137        |
| § 5-9 点火装置 .....                | 141        |
| <b>第六章 过热器和再热器 .....</b>        | <b>144</b> |
| § 6-1 过热器的的工作原理 .....           | 144        |
| § 6-2 热偏差 .....                 | 151        |
| § 6-3 再热器 .....                 | 156        |
| § 6-4 运行中影响汽温的因素 .....          | 158        |
| § 6-5 蒸汽温度的调节方法 .....           | 159        |
| § 6-6 过热器和再热器的运行 .....          | 165        |
| <b>第七章 省煤器和空气预热器 .....</b>      | <b>170</b> |
| § 7-1 尾部受热面概述 .....             | 170        |
| § 7-2 省煤器 .....                 | 171        |
| § 7-3 空气预热器 .....               | 174        |
| § 7-4 尾部受热面积灰 .....             | 180        |
| § 7-5 低温受热面烟气侧的腐蚀 .....         | 181        |
| § 7-6 受热面的飞灰磨损 .....            | 184        |
| <b>第八章 炉内换热计算 .....</b>         | <b>187</b> |
| § 8-1 炉内换热计算的基本概念 .....         | 187        |
| § 8-2 炉内的换热计算 .....             | 189        |
| § 8-3 炉膛辐射受热面 .....             | 193        |
| § 8-4 系数 $M$ .....              | 196        |
| § 8-5 假想沾污系数与热有效系数 .....        | 197        |
| § 8-6 炉膛黑度 .....                | 199        |
| § 8-7 炉膛辐射换热量的分布规律 .....        | 201        |
| <b>第九章 半辐射和对流受热面的换热计算 .....</b> | <b>204</b> |
| § 9-1 计算的目的是基本公式 .....          | 204        |
| § 9-2 对流受热面面积的确定 .....          | 206        |
| § 9-3 对流换热的温压 .....             | 207        |
| § 9-4 对流换热的传热系数 .....           | 211        |
| § 9-5 各对流受热面的计算方法 .....         | 227        |
| <b>第十章 锅炉整体的设计布置 .....</b>      | <b>237</b> |
| § 10-1 影响锅炉布置的因素 .....          | 237        |
| § 10-2 锅炉整体的各种典型布置 .....        | 242        |
| § 10-3 炉膛的设计布置 .....            | 245        |
| § 10-4 对流受热面的设计布置 .....         | 252        |
| <b>第十一章 自然循环 .....</b>          | <b>256</b> |
| § 11-1 自然循环的基本概念 .....          | 256        |
| § 11-2 汽水混合物在上升管内的流动和传热恶化 ..... | 257        |
| § 11-3 两相流动的参数 .....            | 263        |

|             |                   |            |
|-------------|-------------------|------------|
| § 11-4      | 管内流体压力降和流动阻力的计算   | 268        |
| § 11-5      | 简单回路的水循环计算        | 277        |
| § 11-6      | 复杂回路循环特性的绘制       | 287        |
| § 11-7      | 循环安全性检查和分析        | 289        |
| § 11-8      | 自然循环系统的设计和运行      | 299        |
| <b>第十二章</b> | <b>蒸汽净化</b>       | <b>303</b> |
| § 12-1      | 蒸汽品质和蒸汽污染的原因      | 303        |
| § 12-2      | 饱和蒸汽的机械携带         | 304        |
| § 12-3      | 蒸汽的选择性携带          | 308        |
| § 12-4      | 汽水分离装置            | 312        |
| § 12-5      | 蒸汽清洗              | 317        |
| § 12-6      | 锅炉的排污和分段蒸发        | 319        |
| <b>第十三章</b> | <b>强制流动锅炉</b>     | <b>325</b> |
| § 13-1      | 直流锅炉的工作原理和特点      | 325        |
| § 13-2      | 直流锅炉              | 327        |
| § 13-3      | 复合循环锅炉            | 336        |
| § 13-4      | 多次强制循环锅炉          | 347        |
| § 13-5      | 强制流动锅炉蒸发受热面的水动力特性 | 350        |
| § 13-6      | 直流锅炉防止传热恶化的措施     | 371        |
| <b>第十四章</b> | <b>锅炉运行特性和调节</b>  | <b>374</b> |
| § 14-1      | 锅炉的传热特性           | 374        |
| § 14-2      | 汽包锅炉的动态特性         | 387        |
| § 14-3      | 自然循环锅炉的调节         | 399        |
| § 14-4      | 直流锅炉的运行特性         | 402        |
| § 14-5      | 直流锅炉的调节           | 407        |
| § 14-6      | 低循环倍率锅炉运行调节的特点    | 411        |
| § 14-7      | 单元机组的变压运行         | 413        |
| <b>第十五章</b> | <b>锅炉的起动和停运</b>   | <b>416</b> |
| § 15-1      | 母管系统中自然循环锅炉的起停    | 416        |
| § 15-2      | 自然循环锅炉的滑参数起停      | 423        |
| § 15-3      | 直流锅炉的起停           | 427        |
| § 15-4      | 复合循环锅炉的起动         | 437        |

# 第一章 概 述

## § 1-1 锅炉设备的构成及工作概况

锅炉的作用是使燃料燃烧放热，并将热量传给工质，以产生一定压力和温度的蒸汽。在电厂里，锅炉产生的蒸汽被引入汽轮机膨胀做功，推动汽轮机的转子旋转，进而带动发电机发出电能。图 1-1 为一台锅炉及其主要辅助设备的简要示意，以下将按该图示例分两个系统来说明其构成和工作概况。

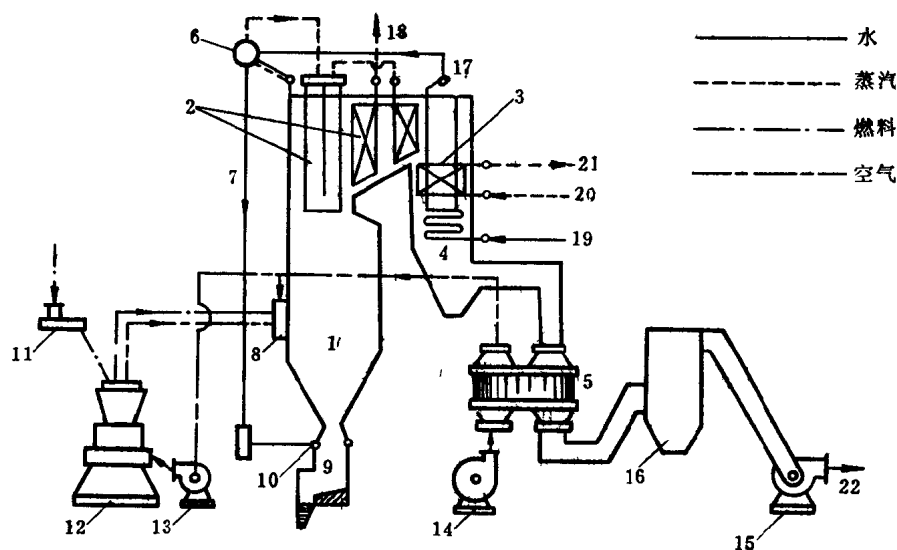


图 1-1 煤粉锅炉及辅助设备示意

- 1—炉膛水冷壁；2—过热器；3—再热器；4—省煤器；5—空气预热器；  
6—汽包；7—下降管；8—燃烧器；9—排渣装置；10—联箱；11—给煤机；  
12—磨煤机；13—排粉机；14—送风机；15—引风机；16—除尘器；17—省煤器出口联箱；  
18—出口过热蒸汽；19—给水；20—进口再热蒸汽；21—出口再热蒸汽；22—排烟

### 一、燃料、空气和烟气系统

目前我国电厂锅炉所用燃料主要是煤，而送入炉膛燃烧的燃料一般为煤粉，把原煤制成煤粉的设备称为制粉设备或制粉系统。如图 1-1 所示，从煤仓下落的煤经过给煤机 11 进入磨煤机 12 磨碎。煤在磨碎过程中还必须同时进行干燥，常用的干燥介质是热空气。送风机 14 将冷空气送入锅炉尾部的空气预热器 5，空气流经它时吸收烟气的热量成为热空气。此热空气的一部分进入磨煤机内，对煤加热和干燥，并把已磨碎的煤粉带出磨煤机，所以这一部分热空气既有干燥作用，又有输粉作用。在本示例中，为提高干燥介质压头而装的排粉机 13 布置在磨煤机之前，从磨煤机排出的气粉混合物经煤粉管道直接引向燃烧器 8，并由此进入炉膛。由图看出，从空气预热器出来的另一部分热空气是直接通过燃烧器进入

炉膛的，它在炉膛内与已经着火的气粉混合物混合，并参与燃烧反应。

煤粉在炉膛空间内悬浮燃烧。炉膛的横截面一般呈矩形，炉壁内侧通常都布置着密集排列的管子，管内有水和蒸汽流过，这就是图中所示的水冷壁1，它既作为工质的辐射受热面，又能保护炉墙，使其不致烧毁。煤粉在炉内燃烧时，虽然向水冷壁辐射放热，但在燃烧反应最剧烈的火焰中心，温度仍可达 $1500\sim 1800^{\circ}\text{C}$ ，故燃料中的灰分将被熔化。有些较大的灰粒不能随烟气上升而逐渐沉降，并逐渐冷却和凝固，最后落进炉子下部的排渣装置9时，已呈固态，这种炉子称为固态排渣煤粉炉。大量较细的灰粒则随烟气上升，在上升过程中也逐渐冷却，到达炉膛出口时已经凝固或者成为不太粘的灰粒，这些随烟气流动的细灰称为飞灰。

炉膛出口处烟气的温度还是很高的，通常总在 $1000^{\circ}\text{C}$ 以上。因此，在锅炉本体的烟道内还布置着由很多管子组成的受热面，管内有水或蒸汽流过。当烟气流经这些受热面时，就以对流传热的方式将热量传给工质，这些受热面统称为对流受热面，布置这些受热面的烟道则称为对流烟道。在现代锅炉的烟气出口端都装有空气预热器，由此出来的烟气即锅炉排烟，其温度已相当低，通常约在 $100\sim 150^{\circ}\text{C}$ 之间。如前所述，煤粉炉的烟气携带着大量飞灰。为了防止环境污染，锅炉的排烟首先要经过除尘器16，使绝大部分的飞灰被捕捉下来，再由引风机15将比较清洁的烟气通过烟囱排入大气。

## 二、锅炉的汽水系统

从蒸汽动力厂的回热循环来看，工质在锅炉内要经历三个加热阶段：来自高压加热器的锅炉给水加热到饱和水；饱和水蒸发为饱和蒸汽；由饱和蒸汽加热到一定温度的过热蒸汽。在锅炉内，前两个阶段基本上由省煤器和蒸发受热面来完成；后一个阶段则由过热器完成。这些受热面一般都由很多并联的管子组成，它们的两端分别与进出口联箱相连。

省煤器通常布置在对流烟道的较低烟温区，如图1-1之4。过热器内的工质温度比省煤器和蒸发受热面里的都高，而且蒸汽冷却管壁金属的作用比水和汽水混合物都差，所以为了安全起见，一般不把它作为辐射受热面，而是布置在温度较高的对流烟道内，即在炉膛出口附近。然而对于压力较高（例如压力 $\geq 10\text{MPa}$ ）的锅炉，工质在过热阶段要吸收更多的热量，因此，常将部分蒸汽温度较低的过热器移至炉膛上部，作为半辐射（和半对流）传热的受热面，而将蒸汽温度最高的过热器仍布置在烟温较高的对流烟道内（图1-1之2）。有的锅炉，还把部分过热器布置在炉膛内作为辐射式过热器。如前所述，水冷壁是布置在炉膛四周的辐射受热面，当锅炉容量很大时，炉膛截面也很大，故在炉膛中央也布置水冷壁，把整个炉膛分成左右两个。这个位于炉膛中间的水冷壁，能从两边吸收辐射热，故称为双面（曝光）水冷壁。现代锅炉的饱和蒸汽全部或大部是在水冷壁内蒸发出来的，所以水冷壁是锅炉的主要蒸发受热面。

从热力循环来看，新汽的压力和温度愈高，则循环效率愈高，但由于金属材料性能的限制，锅炉的压力虽然可以提得很高，而过热蒸汽的温度一般只能在 $500\sim 600^{\circ}\text{C}$ 之间。当锅炉压力超过大约 $14\text{MPa}$ 时，这样温度的蒸汽如在汽轮机内一次膨胀做功降低到冷凝器压力，则在汽轮机的后部，蒸汽湿度将过大，从而影响汽轮机的安全工作。为了提高安全性和循环效率，常采用再热循环，也就是新汽在汽轮机的高压缸内做功后，再回到锅炉的再热器内吸热升温，然后又进入汽轮机，在中低压缸内继续做功。在少数机组的热力循环



中，甚至采用两次再热。在图1-1示例中，再热器3布置在过热器之后的对流烟道内。

根据图1-1所示和上述说明可知，锅炉的汽水系统是由各种受热面、汽包、联箱和若干连接管道所组成。它们都要承受一定的压力和温度，尤其是受热面，它们所承受的温度还要比它们内部工质的温度高些。因此，作为汽水系统的部件或管子，其材料既要具有一定的强度，又要有耐热的性能。工作温度低于500℃的部件可用优质低碳钢，当工作温度更高时，则要根据不同的温度，选用不同的耐热合金钢，其中常含有少量铬、钼等元素，有时还含有钒、锰、镍、钛等元素。

## §1-2 锅炉的主要类型

锅炉可根据其工作条件、工作方式和结构型式不同，分为许多种类型，现简单说明如下。

### 一、容量和参数

锅炉的容量或额定蒸发量是指锅炉的最大长期连续蒸发量，常以每小时能供应蒸汽的吨数来表示；锅炉的参数主要是指锅炉出口蒸汽的压力和温度。一般说来，设计时规定的和运行时要求的出口蒸汽压力和温度就称为锅炉的额定汽压和额定汽温。对于具有再热器的锅炉，蒸汽参数中还包括出口再热汽温。

按照容量的大小，锅炉有小型、中型和大型之分，但它们之间没有固定的分界。由于锅炉工业的发展，锅炉的容量日益增大，若干年前的大型锅炉目前只能算中型了。按照压力的高低，锅炉可分为低压、中压、高压、超高压、亚临界和超临界压力等类型。

从五十年代开始，我国逐步建立和发展了自己的锅炉制造业，生产了各种类型的锅炉。在七十年代初，我国投运了第一台国产1000t/h、亚临界压力的大型锅炉。表1-1列出了主要国产锅炉的一些数据。

在工业发达的国家里，多年来已普遍采用1000t/h以上的亚临界压力或超临界压力锅炉，最大的容量在4000t/h以上，配1300MW的汽轮发电机组。

表 1-1 主要国产锅炉的容量和参数

| 压力类别  | 蒸汽压力<br>(MPa) | 蒸汽温度<br>(℃) | 给水温度<br>(℃) | 额定蒸发量<br>(t/h) | 配套机组容量<br>(MW) |
|-------|---------------|-------------|-------------|----------------|----------------|
| 中 压   | 3.8 (39)      | 450         | 150,172     | 35             | 6              |
|       |               |             |             | 65,75          | 12             |
|       |               |             |             | 120,130        | 25             |
| 高 压   | 9.8 (100)     | 510,540     | 215         | 220,230        | 50             |
|       |               | 540         |             | 410            | 100            |
| 超 高 压 | 13.7 (140)    | 565/665     | 240         | 400            | 125            |
|       |               |             |             | 670            | 200            |
| 亚临界压力 | 16.7 (170)    | 570/570     | 260         | 935            | 300            |
|       |               | 555/555     |             | 1000           |                |

注 1. 蒸汽压力的兆帕数均为约数，而括号中的数值为表大气压 (at)，是准确数；  
2. 在以分数形式表示蒸汽温度时，分子为过热汽温，分母为再热汽温。

## 二、锅炉常用的燃料

电厂锅炉常用的固态燃料是煤；液态燃料是油，一般是炼油厂的残余物，即渣油或重油；气态燃料主要是天然气和少量高炉煤气与焦炉煤气。相应于各种燃料，锅炉可分为燃煤炉、燃油炉和燃气炉。

我国电厂历来以燃煤为主，近年来由于国际市场油价的高涨，有的燃油炉也已改为燃煤。在某些过去以燃油为主的国家里，例如日本和美国，亦有增加燃煤和减少燃油的趋势。我国燃用天然气的锅炉为数甚少，在钢铁基地一般都有燃用高炉煤气或焦炉煤气的锅炉。

## 三、燃烧和排渣的方式

按照燃料燃烧和排出灰渣的方式，锅炉可分为很多类型，现择主要的几种说明如下。

### 1. 层燃炉

层燃炉都有炉篦，通常又称篦炉，燃料主要在炉篦上的燃料层内燃烧；只有在燃料加热和燃烧反应时放出的可燃气体和极少量的微细颗粒在炉篦以上的炉膛空间内燃烧。这种燃烧方式主要用于工业锅炉，也就是低参数、小容量的锅炉。

### 2. 室燃炉

室燃炉简称室炉，没有炉篦(极少数例外)，燃料全部或主要在炉膛空间内悬浮燃烧。这是电厂锅炉的主要燃烧方式，液体和气体燃料的燃烧都用这种方式，燃烧煤粉一般也用这种方式。

燃烧煤粉的室炉常称为煤粉炉。按照排渣的方式，它又可分为固态排渣炉和液态排渣炉两种。固态排渣煤粉炉已如前述(图1-1)，不需再作说明。至于液态排渣煤粉炉，则与它不同。在液态排渣煤粉炉内，火焰中心位置较低，部分水冷壁上有耐火保温的涂料，所以炉膛下部的温度很高，落到炉底的灰渣呈液态。炉底稍微倾斜或为水平，正常运行时，炉底积有一层液态的灰渣，它可通过出渣孔不断地流到炉外，故称为液态排渣。这种炉子适用于灰分熔化温度较低的燃料，目前国内用得较少。

### 3. 旋风炉

旋风炉一般是指以圆柱形旋风筒作为主要燃烧室的炉子，旋风筒由蒸发管绕成，内壁敷以耐火涂料。旋风筒有立式和卧式两种，可以燃用粗煤粉或煤屑。燃料和空气进入旋风筒的位置和方式有好几种，原则上要使气流在旋风筒内产生高速的旋转运动，微粒燃料在旋风筒中央悬浮燃烧；较大的煤粒则贴在筒壁上燃烧。由于筒壁上敷有耐火涂料，同时燃烧又十分强烈，所以筒内温度很高，筒壁上附有液态渣膜。旋风筒最低处设有渣孔，以供液态排渣。卧式旋风筒的烟气出口设在筒的端面上；立式的，设在下部筒壁上。视锅炉容量的大小，一台锅炉可以带有一个或数个旋风筒。还有一种立式旋风炉，它的烟气是由顶端出去的。旋风炉在国内用得很少，而在美国和西德则用得较多。

### 4. 火炬-层燃炉

用空气吹送或用机械播撒把煤块和煤粒抛入炉膛空间，然后落在炉篦上的燃烧方式称为火炬-层燃。实际上，有些微小的煤屑完全在空间内进行燃烧；较大的颗粒可能在空间内着火后再落到炉篦上；更大的煤粒则落在炉篦上后才着火燃烧。这种炉子往往配以链条炉篦，使煤层一面燃烧，一面随炉篦移动，灰渣在炉篦末端自动落进渣斗。1960年前后，我国生产过一批这种小型锅炉，在一些老电厂内，有的至今仍在运行。

## 5. 沸腾（燃烧）炉

沸腾炉也有炉篦，而空气通过炉篦时的速度较高，能使煤粒和煤块在炉篦以上的一段距离内上下翻腾，并进行燃烧，而较小颗粒的燃料则可能随空气一路上升，一路燃烧。这种炉子的优点是可以燃用劣质燃料，故对国民经济有重大的意义，国内已有一些制造和运行的经验，目前只用于少量的中小型锅炉。

### 四、工质在锅炉内的流动方式

锅炉的受热面通常都是一面吸收烟气的放热，另一面则受到工质的冷却。为保证受热面金属不致超温或烧坏，工质在受热面（管）内必须维持一定的流速。在所有锅炉的省煤器和过热器内，工质都是一次通过，并由它们进口和出口之间的压力差来克服工质的流动阻力，这属于强制流动。工质在蒸发受热面中的流动则有多种不同的方式，并可按此将锅炉分为以下几种类型：

#### 1. 自然循环锅炉

如图1-1所示，位于锅炉上的汽包6可通过下降管7不断地向水冷壁进口联箱10供水。水冷壁内的水吸热后产生蒸汽，成为汽水混合物，然后上升进入汽包。在汽包内，借助于分离装置的作用，使汽与水分开，故汽包的上部为汽下部为水。上部的饱和蒸汽被引至过热器继续加热，下部的水（包括经省煤器进入汽包的给水）则由下降管再进入水冷壁内加热，水冷壁出口汽水混合物的含汽率（按重量）大致在5~25%范围内（低参数、小容量的锅炉较小；高参数、大容量的锅炉大些）。由此可知，对于一定量的水，必须在汽包、下降管和水冷壁等所组成的回路内循环很多次才能全部蒸发。这种循环流动的推力来自下降管中的水与水冷壁管内汽水混合物的重量压差，因此，以这种方式工作的锅炉称为自然循环锅炉。由于它具有横卧着的汽包作为贮水和汽水分离的容器，故通常又称之为汽包锅炉。自然循环汽包锅炉在国内外应用得极为普遍。

#### 2. 多次强制循环汽包锅炉

在自然循环锅炉的蒸发受热面中，推动工质流动的是工质柱重的压差。为减小流动阻力，蒸发管的形状必须简单，尤其是水冷壁管，必须基本直立。即使如此，水冷壁管有时仍有超温的危险。如在下降管与水冷壁进口联箱之间装设循环水泵，则可进一步提高水冷壁管工作的安全性，同时，水冷壁管的布置方式也可以比较自由。在这种锅炉中，水冷壁出口工质的含汽量可达20~30%以上。显然，一定量的水仍需在汽包、下降管和水冷壁内循环多次，才能完全蒸发，故称之为多次强制循环汽包锅炉。它在英、法等国用得普遍。我国最近也装了这种从国外引进的锅炉。

#### 3. 直流锅炉

与自然循环锅炉成鲜明对比的是（纯）直流锅炉。它不用汽包，给水进入锅炉后，顺序地一次通过加热、蒸发和过热受热面，工质在锅炉内部不进行循环。直流锅炉的蒸发受热面仍然是水冷壁，其进口通常是水，出口通常为蒸汽。

工质流过直流锅炉蒸发受热面的推力，同工质流过省煤器和过热器时一样，也是给水泵的动力，故亦属强制流动。直流锅炉的水冷壁管可以是直立、螺旋上升，甚至是上下曲折的。

无论是自然循环或多次强制循环汽包锅炉都只能用于临界压力以下，而直流锅炉内的

工质压力既可低于临界，又可超临界。此外，在其它条件相同时，直流锅炉的金属耗量比自然循环锅炉少得多，这些都是直流锅炉的优点。目前国产最大机组（300 MW）所用的锅炉就属于这种型式。

#### 4. 复合循环锅炉

复合循环锅炉不用汽包。为了增大水冷壁内的工质流量以加强受热面的冷却，它能使水冷壁出口的部分工质通过再循环泵与从省煤器来的给水混合后再进入水冷壁，或者先与给水混合后再通过循环泵而进入水冷壁。在亚临界压力复合循环锅炉的水冷壁出口须有汽水分离器，使分离出来的水进行再循环；超临界压力的工质无需分离器就能实现部分工质的再循环。有的复合循环锅炉在低负荷时按再循环方式运行，高负荷时则按纯直流方式运行；有的复合循环锅炉在全负荷范围内，都以再循环方式运行。

#### 五、通风方式

为了防止高温烟气或火焰从炉墙缝隙或门孔中向外泄漏，通常使炉膛内的压力略低于大气压。进入炉内的空气必须克服通过空气预热器、风道和燃烧器等处的流动阻力，所以要用送风机来提高空气的压头；炉内生成的烟气也必须克服通过各种受热面、烟道和除尘器等处的流动阻力才能从烟囱排入大气，所以要用引风机。这种使炉膛压力略低于大气压的通风方式称为平衡通风。这种锅炉称为负压（燃烧）锅炉，采用得比较普遍。

有些锅炉采用严密性很好的炉墙和孔门，而且在打开孔门时用压缩空气来防止烟气的外泄。这样就可以无需引风机，而只用送风机来克服从空气预热器至烟囱整个流程的流动阻力。这种锅炉的炉内压力高于外界的大气压，大致相当于几百毫米水柱的高度，故称之为微正压（燃烧）锅炉。它的主要优点是炉膛和烟道内的压力处处高于大气压，使外界空气不会渗漏进去，但在平衡通风的锅炉中这种渗漏是难以避免的。漏入的冷空气必然会带走一些热量，从而增加锅炉的热损失。对微正压燃烧锅炉，要保证所有炉墙和孔门的严密性，常使结构复杂化，所以用得较少。

### §1-3 锅炉的安全和经济指标

无论从工农业生产或人民生活来说，电厂的长期安全运行都是十分重要的，所以要求锅炉能尽量不发生事故和长时间运行而无需检修。锅炉的安全性常用以下几种指标来衡量：

(1) 连续运行小时数 = 两次检修之间运行的小时数；

(2) 事故率 =  $\frac{\text{事故停用小时数}}{\text{运行总时数} + \text{事故停用小时数}} \times 100\%$ ；

(3) 可用率 =  $\frac{\text{运行总时数} + \text{备用总时数}}{\text{统计期间总时数}} \times 100\%$ 。

所谓事故率和可用率原则上应按一个适当长的周期来计算。我国电厂锅炉在正常情况下都是一年安排一次大修和几次小修，所以通常以一年为一个周期。目前国内比较先进的指标是：事故率约为1%；可用率约为90%；连续运行小时数在4000以上。

锅炉运行中不免要有一些能（热）量的损失，例如部分燃料没有燃烧或燃尽、排烟带走的热量等。表征这种运行经济性的指标是锅炉热效率，其定义为锅炉每小时的有效利用

热（即工质在锅炉内吸取的热量）占消耗燃料的全部发热量的百分数。现代锅炉的热效率通常都在90%以上。

钢材消耗率是锅炉成本的一个重要经济指标，定义为锅炉单位容量所用的钢材重量。锅炉的容量越小、蒸汽参数越高，则钢材消耗率越大。因为锅炉的发展趋势是增大容量和提高参数，所以这两种影响钢材消耗量的因素，对一般锅炉来说可以部分地相互补偿。燃料性质和锅炉类型对锅炉钢材的耗量也有很大的影响，气体燃料最为有利，其次为油，煤最差，劣质煤比优质煤更差些。在其它条件相同时，燃油锅炉所需钢材量大致只有燃用最差煤种锅炉的70%上下；直流锅炉所用钢材可能只有同容量、同参数自然循环锅炉的70%左右。总的来说，各类电厂锅炉的钢材消耗率一般在2.5~5 t·h/t范围内。

显然，只用钢材消耗率来衡量锅炉生产成本的高低是不全面的，因为锅炉钢材中除碳钢外，还有各种合金钢，它们的价格差别很大。此外，各种锅炉制造工艺的复杂程度也不一样，这方面的费用可能差得更多。

## 第二章 燃 料

燃料是指在燃烧过程中能够发出热量的物质。电厂锅炉是耗用大量燃料的动力设备，锅炉工作的安全性和经济性与燃料的性质有密切的关系，不同类别的燃料要采用不同的燃烧方式和燃烧装置。因此，对于锅炉设计和运行人员来说，了解燃料的成分和性质是很重要的。

燃料，按它的状态可分为三类：固体、液体和气体。通常说的固体燃料是指煤，它是我国电厂锅炉的主要燃料。某些优质煤往往具有其他工业生产中所需的某些特性，故可作为工艺燃料。如果把它们作为动力燃料，只取其热量，就是未能物尽其用。因此，对于锅炉来说，应该极力提倡和尽量设法应用劣质燃料。所谓劣质燃料一般是指燃烧比较困难，对锅炉工作比较不利，除了其燃烧放热可供利用外，在其他方面没有更大经济价值的燃料。在国外，有的锅炉将垃圾作为燃料，既利用热量，又处理了废物。

液体燃料就是油。气体燃料主要是天然气。油和天然气都是宝贵的化工原料。按照我国燃料政策，不应作为动力燃料。目前我国只有很少的电厂锅炉用石油炼制后的残余物——重油或油渣作为燃料。高炉煤气是炼铁炉的副产品，除了燃烧放热之外已无其它用处，所以钢铁厂内或邻近的锅炉可用它作为燃料。焦炉煤气有时也作为锅炉的燃料。然而燃烧这些煤气的锅炉毕竟为数很少，故本章介绍的内容以煤的成分和性质为主。

### §2-1 煤的化学成分

#### 一、元素分析成分

燃料的可燃质是高分子的有机物，其分子结构十分复杂，至今尚不完全清楚。燃料燃尽后残余的灰分是多种矿物质的混合物，其成分也很复杂。为了进行燃烧计算和了解燃料的某些特性，可通过化学分析（或称元素分析）把燃料成分分为：水分( $W$ )、灰分( $A$ )和若干种元素——碳( $C$ )、氢( $H$ )、氧( $O$ )、氮( $N$ )和硫( $S$ )，并以质量百分数来表明各种成分含量多少。

##### 1. 碳

碳是煤中含量最多的可燃元素。地质年龄很长的无烟煤中，碳的含量约可高达90%；而年代较浅的煤，碳只占其可燃质的50%左右。每千克碳完全燃烧时可放出32700 kJ (7800 kcal) 的热量。煤中的碳一部分与氢、氧、硫等结合成挥发性的有机化合物，其余成分则呈游离状态，称之为固定碳。固定碳要在较高温度下才能燃烧。煤中固定碳的含量愈高，就愈难燃烧。

##### 2. 氢

煤中氢的含量大多在3~6%范围内。随着煤的地质年龄的增长，氢的含量逐渐减少。煤中的氢，一部分与氧结合成稳定的化合物，不能燃烧；另一部分则存在于有机物中，在

加热时挥发成氢气或者作为各种碳氢化合物 ( $C_nH_m$ ) 的组成部分挥发出来。这些挥发性气体很易于着火和燃烧。燃烧每千克的氢可放出约  $120 \times 10^3 \text{ kJ}$  ( $28600 \text{ kcal}$ ) 的热量。因此, 氢是燃料中最有利的元素。

### 3. 氧和氮

氧和氮是有机物中不可燃的成分。氧常与燃料中的氢或碳处于化合状态, 是一种不利的元素。氧在各种煤里的含量差别很大。煤的地质年龄愈短, 其含氧量愈高, 最高可达40%左右。煤中氮的含量一般只有0.5~2.0%。氮在燃烧时或多或少会转换为氧化氮( $\text{NO}_x$ ), 污染大气。

### 4. 硫

煤中的硫以三种形态存在: 有机硫(与C、H、O等结合成复杂的化合物)、黄铁矿硫( $\text{FeS}_2$ )和硫酸盐硫(如 $\text{CaSO}_4$ 、 $\text{MgSO}_4$ 、 $\text{FeSO}_4$ 等)。硫酸盐一般不再氧化, 故并入灰分。硫化铁较坚硬, 不易磨碎, 会加剧磨煤机部件的磨损, 故通常利用它比重较大的特点, 在燃料制备过程中设法从煤中分离出来。硫化铁进入锅炉后, 与有机硫一样也能参与燃烧。每烧1kg硫可放出热量9040kJ ( $2160 \text{ kcal}$ )。然而其燃烧产物 $\text{SO}_2$ 会有一部分再氧化成 $\text{SO}_3$ ;  $\text{SO}_3$ 对金属有腐蚀作用, 特别在低温烟道内它会与水结合成硫酸, 腐蚀低温受热面。此外, 含有氧化硫的烟气对人和动植物都是有害的。煤中硫的含量一般不超过1~2%。当煤的含硫量在1.5%以上时, 应该设法预先去除或采取适当措施以防锅炉受热面的腐蚀和大气的污染。

### 5. 水分

不同煤里的水分含量差别很大, 最少的仅有2%上下, 最多可达50~60%。一般说来, 随着地质年龄的增长, 煤中的水分逐渐减少。即使是一种煤, 由于采矿方法、运输和贮存等条件的不同, 其所含水分亦不一样。

如果煤里水蒸汽的分压力大于周围空气中水蒸汽的分压力, 则从煤中逸出的水蒸汽分子就要比从空气进入煤里的多, 煤的水分将逐渐减少, 直到上述两种分压力相等为止, 亦即达到平衡状态。这样, 燃料由于自然干燥所失去的水分称为外部水分或表面水分, 其余的水分则称为内部水分或固有水分。在实验室里作煤分析前, 首先要把煤样在规定的温度和相对湿度下进行自然干燥。这种特定条件下干燥后的煤样所含的固有水分称为分析水分。

一般说来, 燃料中的水分是不利于燃烧的, 它使着火困难并降低燃烧温度。烟气中的水分还要带走热量, 并且会引起低温受热面的积灰和腐蚀。此外, 原煤中水分也会增加煤粉制备的困难。

### 6. 灰分

灰分是燃料完全燃烧后形成的固态残余物的统称。其主要成分除粘土( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )外, 还包括少量的氧化物( $\text{FeO}$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )和一些金属(Ca、Mg、Na、K)的化合物。灰分非但不能燃烧, 而且会妨碍可燃质与氧的接触。灰分还将磨损受热面和增加受热面结渣和积灰的可能性, 同时还造成环境污染。显然, 灰分是燃料中的有害成分。各种煤的灰分含量差别很大, 较少时, 在10%上下, 最多可达50%左右。此外, 灰分的多少还与采矿、运输和贮存等条件有关。

7968 2B

## 二、工业分析成分

燃料元素分析的手续是相当复杂的。电厂里通常采用的是工业分析。在工业分析时只要按照规定的条件把煤样进行干燥、加热和燃烧，就能确定煤中几种主要成分的含量，从而了解煤种在燃烧方面的某些特性。

### 1. 水分

把煤样置于102~105℃的温度下保持约2小时后，失去的重量就是水分。

### 2. 挥发分

它不是以现成的状态存在于燃料中的，而是燃料在加热时形成的。失去水分的煤样在隔绝空气下加热，使燃料中有机质分解而析出的气体产物，即为挥发分。挥发分主要是由各种碳氢化合物、氢、一氧化碳、硫化氢等可燃气体所组成，此外还有少量的氧、二氧化碳、氮等不可燃气体的成分(参见图2-1)。

不同燃料开始放出挥发分的温度是不同的。碳化程度较浅、地质年龄较短的燃料，如褐煤，在较低的温度下(< 200℃)就迅速放出挥发分；碳化程度较褐煤深些的烟煤，开始放出挥发分的温度就要高些；碳化程度较深、地质年龄较长的贫煤和无烟煤要在400℃左右才开始放出挥发分。

燃料挥发分的多少与燃料性质有关。一般说来，挥发分的数量随煤的碳化程度的加深而减少。褐煤挥发分 $V_r$ 很多，可达40%以上；而地质年龄最长的无烟煤挥发分很少， $V_r$ 只有4~8%。应当指出，燃料析出挥发分的数量除决定于燃料本身性质外，还受到燃料加热条件的影响。加热温度愈高，析出挥发分愈多。挥发分终止析出的温度不低于1100~1200℃。由于挥发分的析出没有明显的始停点，为了实用，确定挥发分数量的方法是：将失去水分的试样在隔绝空气情况下加热到 $850 \pm 20$ ℃，约7分钟后，所失去的重量，即为该燃料的挥发分。

挥发分燃烧时放出的热量取决于挥发分的成分。不同燃料的挥发分发热量差别很大，低的只有17000kJ/kg(4000kcal/kg)，而高的可达71000kJ/kg(17000kcal/kg)左右，它与挥发分中氧的含量有关。含氧量少质量高的无烟煤和贫煤的挥发分，其发热量高，而褐煤的挥发分发热量则很低。

挥发分是燃料的重要特性，它对锅炉的工作有很大影响。挥发分多的煤易于着火燃烧，反之，挥发分少的煤燃烧时着火困难也不容易燃烧完全。挥发分含量是对煤进行分类的重要依据。

### 3. 固定碳和灰分

煤在失去水分和挥发分之后就是焦炭。它包括固定碳和灰分。焦炭可分为强焦结性、弱焦结性和不焦结性三种。具有强焦结性的煤用于层燃炉时相当困难；用于室燃时亦容易引起炉内结渣。不焦结性的煤燃烧时呈松散粉状，层燃时易从炉篦缝隙下落，损失较大。

将焦炭在空气中加热到 $800 \pm 25$ ℃灼烧约2小时，固定碳基本烧尽，剩下的就是灰分。

## 三、成分百分数的基准

由于煤中水分和灰分的含量受到外界条件的影响，其它成分的百分量亦将随之变更，所以不能简单地用成分百分量来表明煤的种类和某些特性，而必须同时指明百分数的基准是什么，或者说，必须用某种基准的百分数才能确切反映煤的性质。常用的基准有以下几种：



### 1. 应用基

应用基就是以进入锅炉设备的工作燃料为基准。它通常用各种成分的符号加以上标“y”来代表各该成分的质量百分数，故得

$$C^y + H^y + O^y + N^y + S^y + W^y + A^y = 100\% \quad (2-1)$$

由于应用基成分是以实际工作燃料为基准的，所以在燃料计算中均采用应用基成分。燃煤的水分也常用它来表示，并称之为全水分。

### 2. 分析基

分析基是用实验室内经过自然干燥后的煤分析试样作为基准的，并用各种成分的符号加以上标“f”来表示。即

$$C^f + H^f + O^f + N^f + S^f + W^f + A^f = 100\% \quad (2-2)$$

### 3. 干燥基

以去掉外部和内部水分后的煤样作为基准的，称为干燥基。干燥基用上标“g”来表示，故

$$C^g + H^g + N^g + S^g + A^g + O^g = 100\% \quad (2-3)$$

对于灰分的含量常用干燥基来表示，因为不管煤中的水分如何变更，干燥基灰分的含量总可以反映出煤中这种有害物质的多少。

### 4. 可燃基

从煤中除掉含量很不稳定的水分和灰分后，剩下的成分虽然还含有不可燃的元素，但通常仍称之为可燃基，以此为基准的成分含量称为可燃基成分，可燃基用上标“r”来表示。与前面一样，可燃基中各种成分的质量百分数之和亦为100%，即

$$C^r + H^r + O^r + N^r + S^r = 100\% \quad (2-4)$$

煤中挥发分的多少通常以可燃基（V<sub>r</sub>）来表示，它能确切地反映燃料燃烧难易的程度。

对于上述有关各种成分百分数基准的关系可用图 2-1 来表明。此外，不同基准的百分量，还可用表 2-1 中的系数进行换算。表中的换算系数是根据质量不变的原则推导出来的，亦即：对于一定量的某种燃料，不论用何种基准来计算任何一种成分的百分量，各个成分的质量总是不变的。

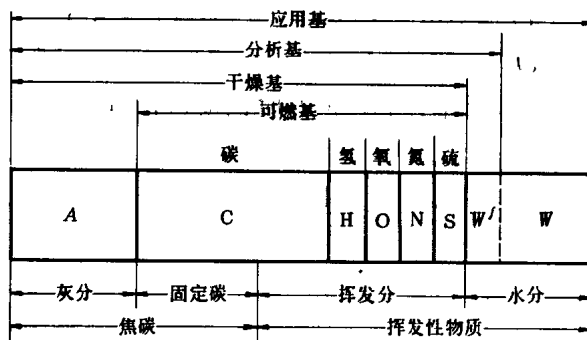


图 2-1 煤中各种成分及其含量百分数的基准之间的关系