

锅炉是将可燃烧的物质(燃料)通过高温氧化的化学过程,把燃料的化学能转化为工作介质热能的设备。燃料包括传统的化石能源中的煤炭、石油、天然气等,以及可再生能源中的生物质等。在学习锅炉的原理、应用之前,我们可以从了解目前世界的能源现状开始,了解锅炉的发展史、分类以及典型应用,从而了解通过本书的学习,最终我们能掌握什么?带着这个“问号”,让我们一起开始吧!

### 1.1 能源及其消耗现状

#### 1.1.1 全球化石能源的储量

我们所说的化石能源包括石油、天然气、煤炭等,是地球上古生物历经亿万年的变化过程转化而来的,在地球上储量是有限的。据报道,2012年全球石油探明储量为2358亿t,储采比52.9年。天然气探明储量187.3万亿 $\text{m}^3$ ,储采比55.7年。世界煤炭探明储量8609.38亿t,储采比109年。表1-1列出了2012年煤炭探明储量世界前10排行榜,居前三位的分别为美国、俄罗斯、中国,可见,在相当长的一段时期内,煤炭仍然是满足能源需求的现实主力来源。

表 1-1 2012 年世界煤炭探明储量排行前 10<sup>[21]</sup>

| 排 名 | 国 家   | 探明储量/ $10^6\text{t}$ | 所占份额/% | 储采比(R/P) |
|-----|-------|----------------------|--------|----------|
| 1   | 美国    | 237295               | 27.6   | 257      |
| 2   | 俄罗斯   | 157010               | 18.2   | 443      |
| 3   | 中国    | 114500               | 13.3   | 31       |
| 4   | 澳大利亚  | 76400                | 8.9    | 177      |
| 5   | 印度    | 60600                | 7.0    | 100      |
| 6   | 捷克共和国 | 40699                | 4.7    | 207      |
| 7   | 乌克兰   | 33873                | 3.9    | 384      |
| 8   | 哈萨克斯坦 | 33600                | 3.9    | 289      |
| 9   | 南非    | 30156                | 3.5    | 116      |
| 10  | 哥伦比亚  | 6746                 | 0.8    | 76       |

注:储采比(reserve and production ratio, R/P)又称回采率或回采比,用任何一年年底所剩余的储量除以该年度的产量。储采比表明如果产量持续保持在该年度水平,这些剩余储量可供开采的年限。

### 1.1.2 化石能源消耗状况

2002 年世界石油消费总量为 36.402 亿 t,2012 年则攀升到 41.305 亿 t,10 年内增加了 13%。我国的石油消费总量则从 2002 年的 2.475 亿 t 增加到 2012 年的 4.837 亿 t,10 年内增加了几近 1 倍。刺激我国石油消费增长的主要因素是交通运输,由于国内石油生产无法满足需求,因而只能依赖国际石油市场,2012 年原油进口量达 2.713 亿 t,石油对外依存度高达 56%以上。

2002 年全球天然气消费量 2.5221 万亿  $\text{m}^3$ ,2012 年增加到 3.3144 万亿  $\text{m}^3$ 。与之对比,我国天然气消费量由 2002 年 292 亿  $\text{m}^3$  增加到 2012 年 1438 亿  $\text{m}^3$ ,增加了将近 4 倍,使我国位居天然气消费国第 4 位(前 3 位依次为美国、俄罗斯和伊朗)。2012 年国内天然气产量仅 1072 亿  $\text{m}^3$ ,天然气进口量达 414 亿  $\text{m}^3$ ,天然气对外依存度为 28.8%。

2002 年世界煤炭消费量 24.11 亿 t 油当量,煤炭消费量前 3 位国家分别为:中国 7.284 亿 t 油当量,美国 5.52 亿 t 油当量,印度 1.518 亿 t 油当量。时隔 10 年,2012 年前 3 名排位格局虽然没有变化,但美国煤炭消费量却降低了 20.7%,印度升高了 96.5%,而我国则升高了 157.2%,我国年消费煤炭已达 18.733 亿 t 油当量,占世界煤炭消费量的 50.2%,成了名副其实的煤炭消费和碳排放大国。

在我国众多的工业行业中,冶金、石化、建材、电力等将能源转化为工业产品或者电能,都是典型的能源需求行业。各行业的发展必然促进对电力需求的增加,2006 年底我国的发电能力达到 622GWe,2012 年底则超过了 1147GWe,6 年时间内几乎翻倍。新增发电能力大部分来自燃煤电厂。2011 年全国产煤  $3.52 \times 10^9 \text{ t}$ ,火电厂耗煤超过  $1.75 \times 10^9 \text{ t}$ ,比例达到 50%。我国的燃煤发电比例在全世界属于最高,2012 年底我国的火电总装机容量 820GWe,占总发电装机容量的 71.5%。由此可见,在众多能源消耗行业中,电力行业在从一次能源(煤、石油、天然气等)向二次能源(电力)加工的过程中,事实上成为我国能源需求的“大户”(电力行业是能源需求大户,但并非终端消费大户),电力消费是我国能源消费的主要形式之一。

火力发电厂将化石能源转化为电能,各行业以及人们的日常生活将消费这些电能,最终导致化石能源的消失。另外,一些工业行业在消费电力的同时,也会以蒸汽、热水等形式消耗化石能源,这些蒸汽、热水等是通过工业锅炉燃用化石燃料或可再生燃料生产的,2011 年我国工业锅炉年耗煤量约 5 亿 t,加上火电厂耗煤量 17.5 亿 t,直接由锅炉吞噬的煤炭量达 22.5 亿 t,人均每年由锅炉消耗的煤炭量近 2t。

### 1.1.3 我国面临的能源挑战

煤炭是传统化石能源,开发利用已有几百年的历史,但仍没摆脱污染排放严重、能源利用效率低的问题。针对化石能源,探索其清洁高效、近零排放之路还很漫长和曲折。

在 1750—1850 年的第一次工业革命时期,烟囱林立是经济、工业繁荣发展的象征。在 2012 伦敦奥运会开幕式上升起的七座烟囱(图 1.1),给人们敲响了警钟,值得我们借鉴和反思。“工业革命的狂飙突进,让英国从孤悬海外的岛国崛起为‘日不落帝国’。然而,那矗立在田园上的高耸烟囱,不单单代表改变全世界生活方式的工业革命,更是过度、过快的工业化带来的‘黑色撒旦’,人类心灵失去了滋养的田园,蜕化成干涸的荒漠,无以慰藉。奥运会

开幕式,国际化都市伦敦向世界展示的,不是英国人引以为豪的现代化进程,而是他们对田园的眷恋,对人类非理性工业化的反思。”<sup>[17]</sup>能源是一把双刃剑,人类在消耗能源的同时也带来了严重的环境污染问题,进而伤害了人类自身。人类在开发和利用能源的同时,要避免对环境造成的不可逆伤害!



图 1.1 2012 年伦敦奥运会开幕式现场升起的七座烟囱

能源是发展国民经济的基础,是人类生长和生活必需的基本物质保障。我国自然资源条件和经济发展水平决定了我国能源结构的特点是以煤为主,2012 年我国煤炭在一次能源消费中所占的比例约 68.5%,远远高于 29.9%的世界平均水平。

表 1-2 是 2011 和 2012 年我国发电指标的对比,可见火力发电的比例占绝对优势,我国电力工业短时间内难以改变以燃煤发电为主的格局,在一定时期里燃煤机组仍将继续发展。在发展燃煤机组时须以发展大型高效机组为重点,积极建设 600MWe 和 1000MWe 级大容量、高效率、高调节性机组,优化火电机组能源利用效率。

表 1-2 我国 2011 和 2012 年发电指标<sup>[23]</sup>

|              | 2011 年     |           | 2012 年     |           |
|--------------|------------|-----------|------------|-----------|
|              | 发电量/亿 kW·h | 占总发电量比例/% | 发电量/亿 kW·h | 占总发电量比例/% |
| 水电           | 8556       | 17.16     | 6681       | 14.12     |
| 火电           | 39255      | 78.72     | 39003      | 82.45     |
| 6MWe 以上机组发电量 | 39160      | 78.53     | 38893      | 82.22     |
| 燃煤发电量        | 37104      | 74.41     | 36961      | 78.13     |
| 核电           | 983        | 1.97      | 872        | 1.84      |
| 风电           | 1030       | 2.07      | 741        | 1.57      |
| 太阳能发电        | 36         | 0.07      | 6          | 0.01      |
| 其他           | 5          | 0.01      | 2          | 0.004     |

锅炉或者炉窑是电力、石化、冶金等行业中消耗能源的主要设备,作为国民经济各产业的基础热能设备,具有量大面广、耗能巨大的特点,低效浪费的问题也十分突出。锅炉普遍存在热效率低、污染排放严重等问题。

## 1.2 锅炉发展简史

### 1.2.1 早期锅炉

任何事物的发展都不是一蹴而就的,锅炉也不例外。锅炉的炉膛作为燃烧设备最初是从烧陶器(公元前 4000 年)和炼铜(公元前 3000 年)工艺开始发展的,和炉膛结合在一起发展形成了蒸汽锅炉。人类关于蒸汽应用的最早的文字记载始于公元前 150 年亚历山大大帝(古希腊)时期,海罗(Hero)描述水经过加热后会变成气体、蒸发会使粗糙的物质变得稀薄这一现象。当时,海罗已经意识到水加热后可以产生气体,气体受热会膨胀,可以对膨胀的气体进行利用,并提出了两种利用蒸汽压力产生运动的方法。一种方法是在通有蒸汽的导管一端接一个半球,将轻一些的小球放在这个半球里,小球就会在蒸汽射流的作用下跳动。另一种方法是利用蒸汽射流产生旋转运动(图 1.2),应该说利用蒸汽产生旋转运动是第一代蒸汽机,但海罗并没有给出这种装置的实际用途。第一台投入商业运行的实用蒸汽机由托马斯(Thomas)发明,在 1698 年获得了专利,主要利用蒸汽进行矿井排水。



图 1.2 海罗的锅炉和汽机  
(公元前 150 年<sup>[8]</sup>)

最早应用水管原理的热水锅炉发现于庞贝(Pompeii)古城<sup>①</sup>,在古城的遗迹中发现了几个可以用于烧水或煮饭的小型铜制锅炉。值得关注的是两个含有内火室的锅炉,在锅炉内布置有圆管形的炉算(图 1.3),可以使火室空间两侧的水相联通。据猜测,这种锅炉使用的燃料是木炭,内火室和中空的炉算设计实现了对热量的高效利用,并且可以保证较好的水循环,这体现了那个时期人们的高度智慧。图 1.3 所示的锅炉特点是一侧有炉门,另一侧有排烟孔。它们的用途很显然仅仅是为了烹饪而非生产蒸汽。

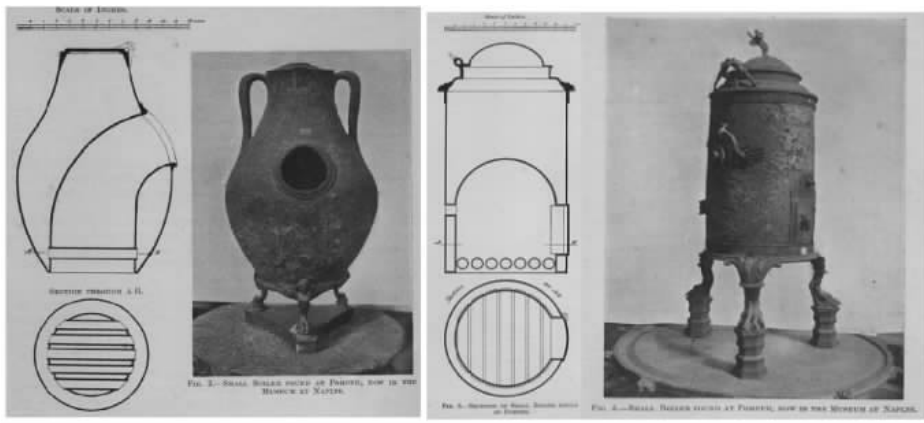


图 1.3 庞贝城的锅炉

<sup>①</sup> 庞贝城位于意大利南部那不勒斯附近,维苏威火山西南脚下 10km 处。始建于公元前 6 世纪,公元 79 年毁于维苏威火山大爆发。但由于被火山灰掩埋,街道房屋保存比较完整,为了解古罗马社会生活和文化艺术提供了重要资料。

锅炉技术的发展是与工业生产的需要紧密相关的。在 17 世纪末期英国人开始探索和研究锅炉,用它来产生动力及生产用蒸汽,比如用在伐木和从矿井中提水。当时的锅炉是圆筒形,锅炉的构造极为笨重简单,生产的蒸汽量有限,压力不高,燃烧方法简单,热效率低。随着工业生产的发展,要求增大锅炉容量<sup>①</sup>、提高蒸汽压力和温度,锅炉的型式和构造相应也得到了发展。从发展历程看,锅炉的型式主要有两个发展方向,分别为:

(1) 火管锅炉方向。在圆筒形锅炉的基础上,在圆筒内部增加受热面积。首先是在一个大圆筒内增加一个火筒,在火筒中燃烧燃料;后来增加到两个火筒;再后来从火筒发展到很多小直径的烟管,在烟管内燃烧燃料(即纯烟管式)或仍在火筒中燃烧燃料(即火筒-火管式)。在这一类型锅炉中,燃烧后的烟气在管中流过,因而称为火管锅炉。

(2) 水管锅炉方向。在圆筒形锅炉的基础上,在圆筒外部增加受热面积,即增加水管的数目,燃料在圆筒外燃烧。和火管锅炉的发展相似,水管的数目不断增加,发展成为很多小直径的水管。在这一类型锅炉中,水在管中流过,因而称为水管锅炉。

在发展初期,锅炉主要是沿着增加圆筒内部受热面积的火管锅炉方向发展,火管锅炉发展简况如图 1.4 所示。

火管锅炉受热面积少、容量小、工作压力低、金属耗量大、锅炉效率低。由于水容积大,如果发生受热面金属损裂、爆破等情况则易发生爆炸危险。这种型式的锅炉,显然不能适应后来单台容量加大,汽压、汽温日益增长的电站动力的要求,目前在电站中已不应用。因它的构造(包括燃烧设备)较简单,水及蒸汽容积大,对负荷变动适应性较好,对水质的要求比水管锅炉低,维修较方便,目前仍大量制造,多用于一些小型企业生产、交通运输及生活取暖用汽。

火管锅炉限制了锅炉蒸汽参数及容量的继续提高。19 世纪中叶,锅炉开始向水管锅炉发展,水管结构为继续提高锅炉容量和参数创造了条件。

水管锅炉发展的初期为直水管式,如图 1.5 所示。

直水管锅炉汽水系统缺乏弹性,管子集箱等受热部件膨胀受限制时易损坏受压部件;沸腾管束倾斜度小,汽水循环不良,工作不可靠;集箱上手孔多,制造费时,金属耗量大,易发生泄漏。直水管锅炉的工作压力不宜过高,容量亦受限制,现时已很少应用。由于这种锅炉易于制造,易于清理水垢,在中小容量锅炉中还有采用。

在 20 世纪初,西方工业化国家的蒸汽动力发电机组开始向中参数发展,直水管锅炉已不能很好满足机组参数发展的要求,弯水管锅炉应时而生,弯水管锅炉的发展简况如图 1.6 所示。开始时弯水管锅炉采用多锅筒式,以保证有足够多的受热面和较大的蓄水容积,金属

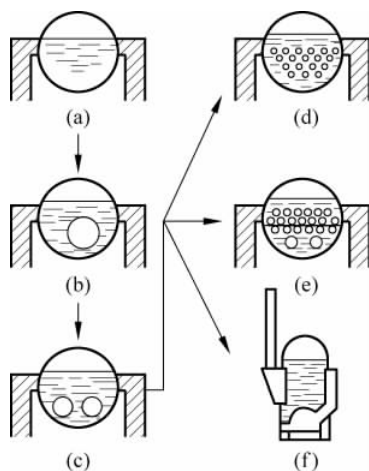
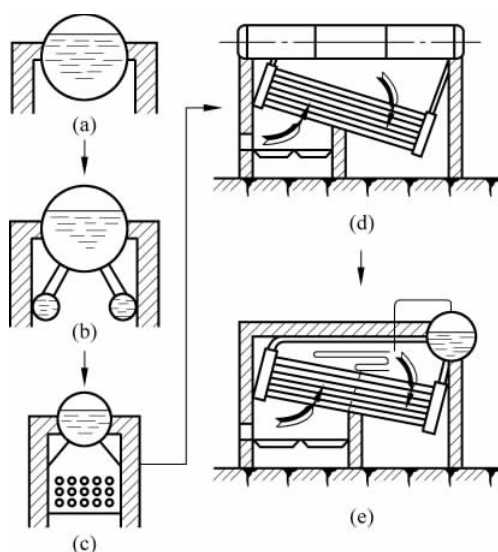


图 1.4 火管锅炉发展历程<sup>[4]</sup>

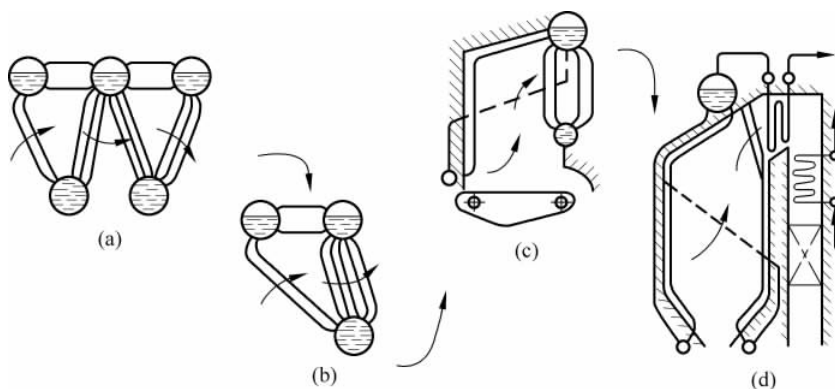
(a) 圆筒锅炉; (b) 单火筒锅炉; (c) 双火筒锅炉; (d) 火管锅炉; (e) 火筒-火管锅炉; (f) 立式火管锅炉

<sup>①</sup> 容量是说明锅炉产汽能力大小的特性数据,对大型锅炉分为额定蒸发量 BRL 和最大连续蒸发量 BMCR, BRL 是指在额定参数、额定给水温度和燃用设计燃料并保证热效率时的蒸发量, BMCR 是在额定参数、额定给水温度和燃用设计燃料长期连续运行所能达到的蒸发量。

图 1.5 直水管锅炉发展历程<sup>[4]</sup>

(a) 圆筒锅炉；(b) 多水筒锅炉；(c) 整集箱式锅炉；(d) 纵锅筒分集箱式锅炉；(e) 横锅筒分集箱式锅炉

耗量大,优点并不显著。尽管如此,弯水管锅炉却是锅炉发展史上一大进步。随着生产发展的需要,材料、制造工艺、水处理技术以及热工控制技术等方面的发展,锅炉技术水平也得到了快速提高。特别是水冷壁锅炉的出现、过热器及省煤器的应用以及锅筒内部分离元件的改进,这些进步可以降低锅筒数目、节约金属、提高锅炉热效率,并可提高锅炉的容量和参数。到 20 世纪 30 年代,中参数(表压  $2 \sim 4\text{MPaG}$ ,  $385 \sim 450^\circ\text{C}$ )、中等容量( $6 \sim 25\text{MW}_e$ )的水冷壁式弯水管锅炉已得到了广泛的应用。

图 1.6 弯水管锅炉发展演化<sup>[4]</sup>

(a) 多锅筒锅炉；(b) 三锅筒锅炉；(c) 双锅筒锅炉；(d) 单锅筒锅炉

### 1.2.2 现代锅炉

第二次世界大战以后,锅炉工业发展很快,20 世纪 40 年代开始应用高参数、大容量电站锅炉(如压力  $10\text{MPaG}$ 、温度  $\geq 510^\circ\text{C}$ 、功率  $500\text{MW}_e$ ),50 年代开始采用超高参数(如压力

$\geq 14\text{MPaG}$ 、温度  $540\sim 570^{\circ}\text{C}$ )大容量(功率  $100\sim 200\text{MWe}$ )锅炉,60 年代开始采用配  $200\sim 600\text{MWe}$  汽轮发电机组的亚临界参数(压力  $17\sim 18\text{MPaG}$ ,温度  $540\sim 570^{\circ}\text{C}$ )锅炉,目前最大的单台自然循环锅炉的容量已达  $850\text{MWe}$  以上。

值得指出的是,水管锅炉的直水管式和弯水管式锅炉,以及火管锅炉都是自然循环锅炉,即蒸发部分的水循环是靠水、汽的密度差产生的压头来保证的。在发展自然循环锅炉的同时,20 世纪 30 年代,德国和苏联开始应用直流锅炉(图 1.7),40 年代美国又开始应用强制循环锅炉(图 1.8)。

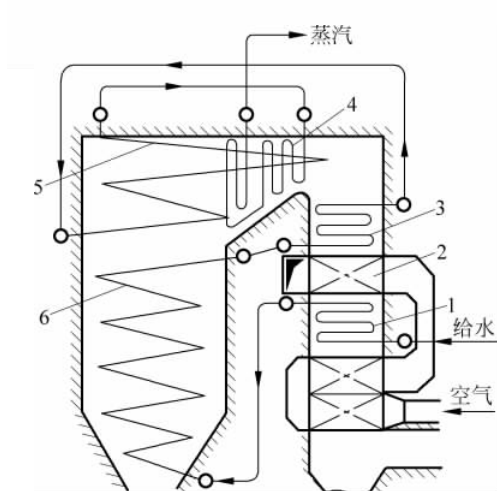


图 1.7 直流锅炉简图<sup>[4]</sup>

1—省煤器；2—空气预热器；3—过渡区；4—对流过热器；5—炉膛过热受热面(上辐射区)；6—炉膛蒸发受热面(下辐射区)

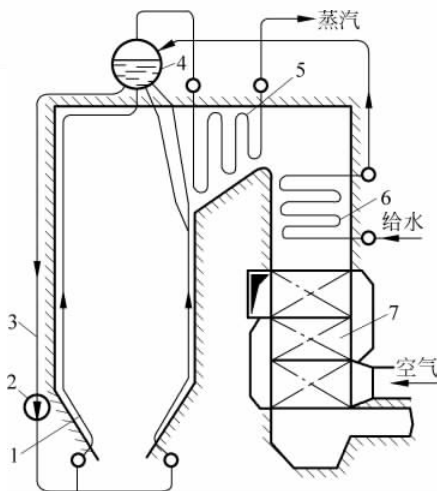


图 1.8 强制循环锅炉简图<sup>[4]</sup>

1—炉膛蒸发受热面；2—循环泵；3—下降管；4—锅筒；5—过热器；6—省煤器；7—空气预热器

在直流锅炉中,锅炉给水由给水泵进入省煤器,经炉膛蒸发受热面、过热器后,送往汽轮机,各部分流动水阻力全由给水泵克服。在强制循环锅炉系统中,外表看来和自然循环锅炉相似,但实际上在下降管系统中,装有循环泵,用以保证蒸发受热面可靠的水循环。

这两种型式锅炉的发展时代正值锅炉向高参数、大容量过渡的时期,自然循环锅炉在高参数、大容量方面遇到了以下几个主要困难:

- (1) 由于工质工作压力的提高,对自然循环锅炉的水循环流动是否能可靠工作没有把握;
- (2) 锅炉给水处理技术落后及内部锈蚀问题较严重;
- (3) 用于锅筒的厚锅炉钢板的供应和锅筒的制造工艺较困难。

鉴于上述困难,各国曾先后提出多种型式的锅炉。后来的实践表明,当时这些型式锅炉同样不能解决上述存在的困难,有的甚至远不及自然循环锅炉简单可靠。在自然循环锅炉中,虽未能全部解决上述困难,但并不比其他型式锅炉更差。例如,内部锈蚀随着水处理技术的进步是可以解决的。当时出现和试验研究过的很多型式锅炉,大都未能获得推广应用。这些情况也表明技术进步是曲折的,峰回路转亦非罕事。

直流锅炉和多次强制循环锅炉,虽也未能全部解决上述问题,还带来一些自然循环锅炉没有的困难,但也有比自然循环锅炉优越之处。因为它们是强制流动或强制循环的,可以不用或缩小锅筒,采用小直径受热管,可任意布置受热面。这些都使锅炉具备了金属耗量低、制造工艺简单、启停炉快等优点,压力越高越显出它们的优越性。目前,对超高压参数,自然循环锅炉占优势;对于亚临界参数,自然循环锅炉、强制循环锅炉和直流锅炉还难绝对分出优劣,应根据具体条件决定使用。单台最大的强制循环锅炉容量是 1000MWe。对于超临界参数锅炉,直流锅炉是唯一可以采用的型式,最大的单台容量已达 1300MWe。

### 1.2.3 我国锅炉发展历程

从锅炉发展历史可知,促使锅炉发展的主要原因在于生产的发展和需要。具有实用意义的锅炉虽已出现近 200 年,但向现代化发展却是近 50 多年的事情。新中国成立前,我国没有电站锅炉制造业,仅引进瑞士技术合作试制了两台与 2000kW<sub>e</sub> 汽轮机配套的 12t/h 锅炉。1949 年全国火电装机容量仅 1.686GW<sub>e</sub><sup>①</sup>,装机容量居世界第 21 位,发电量居世界第 25 位。新中国成立后,我国在短短的 20 余年时间内,由只能手工生产一些小型生活用和工业用的双火筒锅炉和火管锅炉,到建立了制造现代化大型锅炉的工业基地。

我国在 1955 年生产投运了第一台中参数 6MWe 电站锅炉。到“文化大革命”前,我国已能生产 50MWe 的中高压参数锅炉,并试制了高压、高温(14MPaG, 540℃)的 100MWe 锅炉(蒸发量 410t/h)。1969 年制造和投运了一台超高参数(14MPaG, 555/550℃)125MWe 中间再热的锅炉,并于 1972 年投运了同参数同容量的直流锅炉。1974 年,配 200MWe 机组(蒸发量 670t/h)的超高压(14MPaG, 540/540℃)自然循环锅炉投产。1975 年配 300MWe 机组的亚临界参数(17MPaG, 570/570℃)直流锅炉投入运行,进入 80 年代,亚临界参数 300MWe 自然循环锅炉与强制循环锅炉投产,1986 年亚临界参数 600MWe 锅炉也投入运行。2013 年世界上首台 600MWe 超临界循环流化床锅炉在我国白马投入运行。

## 1.3 锅炉的分类与系列

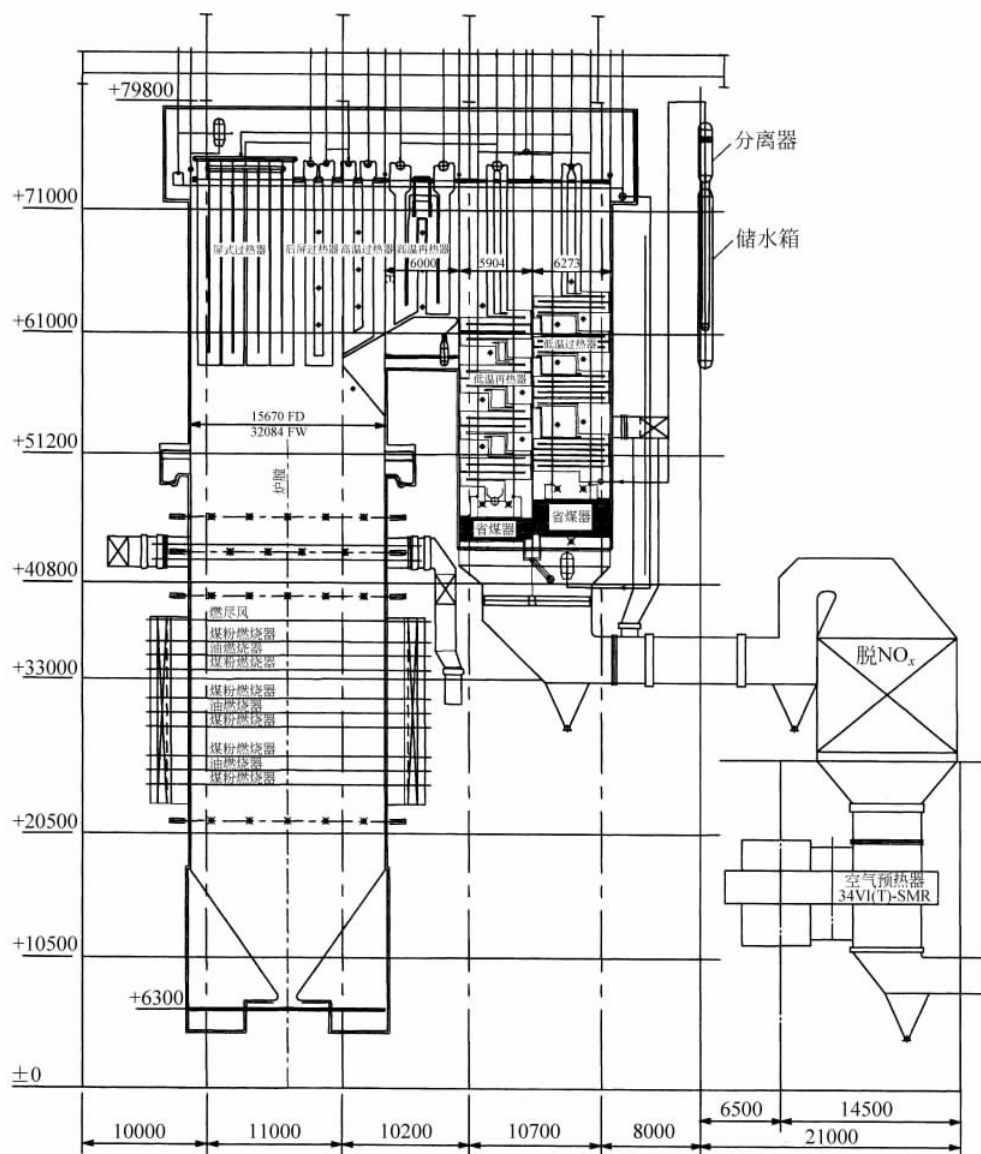
### 1.3.1 锅炉的分类

前面已经提到一些锅炉的名称分类,锅炉分类的方法很多,可以按照结构、用途、循环方式、工作压力等进行区分。

按结构分,锅炉可分为火管锅炉和水管锅炉,在前面介绍锅炉发展史中已阐述,不再详述。

按照用途分,锅炉可分为电站锅炉、工业锅炉(提供蒸汽或热水)、船用锅炉。电站锅炉主要用于发电(图 1.9),多为大容量、高参数锅炉,热效率较高。工业锅炉主要用于工业生产和采暖(图 1.10),多为低参数、小容量锅炉,热效率较低。船用锅炉大多燃油,要求锅炉体积小、重量轻。历史上还有一类锅炉,是用于火车动力的机车锅炉,一般为小容量、低参数、火床燃烧,以燃煤为主,锅炉设计紧凑,现在已全面淘汰,被内燃机和电动机代替了。

<sup>①</sup> 1GW<sub>e</sub>=10<sup>3</sup>MWe,现在 2 台 1000MWe 机组总容量就是 2GW<sub>e</sub>。

图 1.9 HBC-1000MWe 超临界电站煤粉锅炉<sup>[20]</sup> (单位: mm)

按蒸汽压力分,锅炉一般可分为低压锅炉、中压锅炉、高压锅炉、超高压锅炉、亚临界压力锅炉、超临界压力锅炉。低压锅炉压力小于  $1.274\text{MPaG}$  ( $13\text{kgf/cm}^2$ ),中压锅炉一般压力为  $3.82\text{MPaG}$  ( $39\text{kgf/cm}^2$ ),高压锅炉压力为  $9.8\text{MPaG}$  ( $100\text{kgf/cm}^2$ ),超高压锅炉压力为  $13.7\text{MPaG}$  ( $140\text{kgf/cm}^2$ ),亚临界压力锅炉一般压力为  $16.7\text{MPaG}$  ( $170\text{kgf/cm}^2$ ),超临界压力锅炉压力大于  $22.1\text{MPaG}$  ( $225.7\text{kgf/cm}^2$ )。超超临界锅炉是一个相对主观的概念,它实际上也是超临界锅炉。国内也有将超超临界锅炉称为高效超临界锅炉,超超临界锅炉的英文名称是 Ultra Super Critical Boiler(USC)。目前,国内外较为通用的超超临界锅炉的标准是,当锅炉的过热器出口压力大于  $28\text{MPaG}$  或者过、再热器出口(二者之一)的蒸汽温度大于  $580^\circ\text{C}$  即称之为超超临界锅炉。《蒸汽锅炉安全技术监察规程》按照锅炉的等级、温度、压力以及工质种类等给出了分类,见表 1-3。

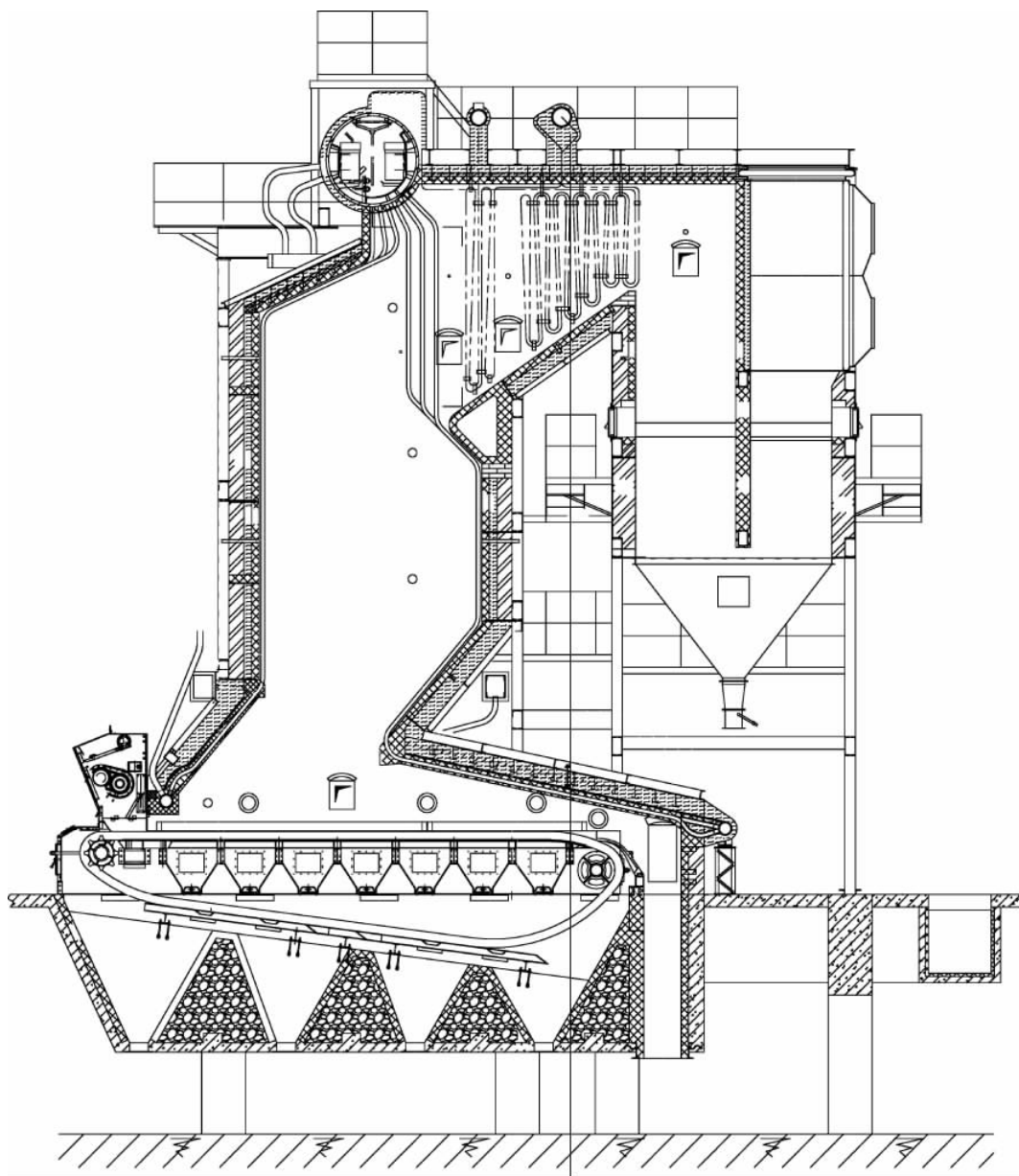


图 1.10 工业层燃锅炉