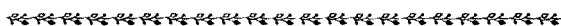


工业锅炉司炉读本

钟史明 柳志倩 主编

中国电力出版社



锅炉是利用燃料（化石燃料：煤、石油或天然气；有机燃料：如木屑、稻壳和甘蔗渣等）和其他能源的热量，将工质（水或蒸汽）加热到一定参数（温度、压力）的换热设备。它所生产的蒸汽可用来将热能转变为机械能以产生动力，另外蒸汽（或热水）还广泛用作工业生产、采暖通风和生活用热的载热质。通常，用于发电方面的锅炉叫电站锅炉，用于工业生产和生活的锅炉叫工业锅炉。

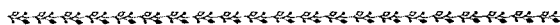
据统计，我国一次能源总产量中约有40%的能源被锅炉所烧掉。全国有工业锅炉（含热电联产的锅炉）40多万台，一般容量小、参数低、分布广，每年烧掉的原煤占全国产煤量的1/3左右。我国目前工业锅炉的现状是：不少锅炉设备陈旧，并且存在不少缺陷，仪表不全，自动化水平低，运行水平不高，热效率较低，烟尘污染严重。虽然我国是能源生产和消费大国，但能源利用率较低，能源资源人均占有量不多（人均拥有的煤、石油、天然气探明储量仅为世界平均值的一半，人均石油储量远低于世界平均水平），要保证国民经济持续高速向前发展，能源短缺和能源利用率低已成为我国经济发展的一个重要制约因素。我国的能源政策是开发与节约并举，近期把节约放在首位。工业锅炉是节能的重点对象。除了制造单位要提供高效节能的锅炉外，依靠科技进步，提高运行人员的技术素质和运行水平是工业锅炉节能的关键，也是编写本书的宗旨。

本书第一章由范仲元教授编写，第二、六章由朱建宁副教授编写，第三、四章由汤增欣高级讲师和朱建宁副教授编写，第五章由胡达讲师编写，第七、九、十章由钟史明教授编写，第八章由郑光华副教授编写。全书由范仲元教授统稿。柳志倩副教授生前为组织规划本书的编写做了大量工作。

限于作者的水平，本书的缺点和差错在所难免，恳请读者批评指正。

钟史明

1998年1月



目 录

前 言

第一章	基础知识	1
第一节	热工基础.....	1
第二节	电工基础.....	9
第三节	金属材料	18
第二章	工业锅炉简介	29
第一节	工业锅炉的工作过程	29
第二节	工业锅炉的本体结构	36
第三节	工业锅炉特性	57
第四节	对工业锅炉的基本要求	66
第三章	燃料	68
第一节	煤的组成	68
第二节	煤的特性对燃烧的影响	75
第三节	燃料油的组成及特性	84
第四章	燃烧	90
第一节	燃料燃烧的基本概念	90
第二节	锅炉热效率	96
第三节	怎样组织良好的燃烧.....	102
第五章	锅炉本体设备	117
第一节	汽包锅炉的蒸发设备.....	118

第二节	蒸汽品质与汽包内部装置·····	134
第三节	锅炉管束·····	150
第四节	过热器·····	152
第五节	尾部受热面·····	158
第六章	锅炉的安全经济运行 ·····	173
第一节	锅炉的启停和正常运行控制·····	173
第二节	新安装的锅炉启动前应做的工作·····	193
第三节	锅炉运行中常见事故及其处理·····	197
第七章	锅炉安全附件与辅机 ·····	207
第一节	锅炉安全附件·····	207
第二节	泵与风机·····	235
第八章	工业锅炉自动调节 ·····	251
第一节	工业锅炉自动调节的任务·····	251
第二节	汽包锅炉给水自动调节·····	253
第三节	锅炉过热蒸汽温度自动调节·····	259
第四节	锅炉燃烧系统自动调节·····	265
第五节	工业锅炉微机控制·····	276
第六节	自动调节系统的投运·····	283
第九章	水处理和消烟除尘 ·····	290
第一节	锅炉的给水处理·····	290
第二节	水垢·····	297
第三节	金属的腐蚀·····	313
第四节	锅内水处理·····	319
第五节	除尘器·····	326
第六节	烟气脱硫·····	339
第十章	工业锅炉的节能 ·····	341

第一节	工业锅炉节能的方向和指标·····	341
第二节	热管换热器在节能中的应用·····	354
第三节	热电联产·····	357
第四节	流化（沸腾）燃烧锅炉·····	362
参考文献	·····	374

第一章 基础知识

工业锅炉是综合多门学科知识而制成的一个动力装置。为使读者能全面地掌握该类装置，在本章简要地介绍与它有关的一些基础知识，其中有热工基础、电工基础和金属材料。

第一节 热 工 基 础

一、工质的三种状态

所有的工质都有三种状态：固态、液态和气（汽）态。固态是由许多刚性的分子晶格紧密地吸引在一起而形成的一种工质状态，在日常生活中所能见到的固体工质均属于这一状态。当工质在外界特定环境下（例如加热），分子晶格间的吸引力削弱，造成分子晶格可以在固定的容器内自由滑动，这样状态的工质称为液态。例如在 0°C 下的冰是水的固态，受热后融化成 0°C 的可流动的水，该水是水的液态。在特定条件下进一步削弱分子晶格间的吸引力，使分子能在空间内自由地运动，这种工质状态称为气（或汽）态。例如煮沸的水，在锅炉出口处冒出的蒸汽，它是水的汽态。又如空气中的氧和二氧化碳等均属于气态。

由于水是无毒液体，且在地球上到处都有，该工质的三种状态在人类日常生活中易于实现，所以人类将水作为理想的热能机械的工质。

在制冷工程中进行能量转换，选用氨或氟里昂等做工质。

二、热工状态参数

任何一种工质都可用一组特定的参数来描述某状态下的工况。在热能工程中，描述工质的热工状态参数有压力、温度、比容、密度、内能、焓等。

1. 压力

工质的压力是表征工质内部分子在紊流的热运动中，对包围该工质的容器壁面总的碰撞结果，可以写成：

$$p = \frac{2}{3} n \frac{mc^2}{2} \quad (1-1)$$

式中 p ——压力；

n ——单位容积内分子数；

m ——分子的平均质量；

c ——分子的均方根运动速度。

宏观地解释压力，它是工质对器壁单位面积上的垂直作用力，即

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-2)$$

式中 F ——垂直于壁面的作用力，N；

A ——面积， m^2 。

工程中压力的单位采用 Pa，简称帕，1Pa 等于 $1N/m^2$ ，因为帕的单位太小，一般采用兆帕 (MPa)，即 $1MPa = 10^6Pa$ 。帕是我国目前的法定使用单位，以往我国曾采用过巴 (bar)、工程大气压 (at 或 kgf/cm^2)、液柱高度 (mmH_2O 或 $mmHg$) 等计量单位。表 1-1 给出了它们间的换算关系。

表 1-1

各压力单位的换算

单位名称	符 号	与帕之间的关系
巴	bar	1bar = 10^5 Pa
标准大气压	atm	1atm = 101325Pa
工程大气压	at	1at = 9.80665×10^4 Pa
毫米水柱	mmH ₂ O	1mmH ₂ O ≈ 9.80665Pa
毫米汞柱	mmHg	1mmHg = 133.3224Pa

以上所提及的压力是绝对压力，在工业上工质的压力是由压力表来测量的，用压力表所测得的压力称为“表压力”或“相对压力”。要将它转换成绝对大气压力，就要加上当时当地的大气压力，在无特殊说明条件下，一般将表压力加 0.098MPa 就等于绝对压力。若工质的压力低于当时当地的大气压力，我们将它称为负压或真空。在工业锅炉中，炉膛、烟道中的压力一般都呈负压。

2. 温度

温度是表示物体的冷热程度，它是物体内部大量分子平均运动动能的量度，即

$$\frac{mc^2}{2} = \frac{3}{2}kT \quad (1-3)$$

式中 k ——玻耳兹曼常量， $k = 1.380662 \times 10^{-23}$ J/K；

T ——热力学温度，K。

上面 J 是表示能量的单位 [焦耳]。在热力学中温度的标量是用开尔文 K，注意不能写成 °K。在日常生活中用摄氏温标来表示，它们之间的关系式为

$$T = t + 273.15 \quad (1-4)$$

式中 t ——摄氏温度，°C。

“1968 年国际实用温标”规定纯水的三相点热力学温度为 273.16K，开尔文等于水的三相点热力学温度的 $\frac{1}{273.16}^{\circ}$ 。由式 (1-4) 可知，水的三相点温度为 0.01℃。

3. 比体积与密度

单位工质所占有的容积称为比体积；比体积的倒数是该工质的密度，即

$$\left. \begin{aligned} v &= \frac{V}{m} \quad , \quad V = mv \\ \rho &= \frac{m}{V} \quad , \quad \rho = \frac{1}{v} \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

式中 m ——质量，kg；
 V ——容积， m^3 ；
 v ——比体积， m^3/kg ；
 ρ ——密度， kg/m^3 。

4. 内能与焓

工质内部分子运动的动能和分子间相互吸引力的总和称为该工质的内能 U ，其单位为焦 (J)。焓是一个热能的综合参数，其单位亦为焦，它的表达式为：

$$H = U + pV \quad (1-6)$$

单位质量工质的焓称为比焓 h ，单位为 J/kg。若以 0℃ 的工质比焓为零，在等压条件下进行能量转换，该过程的内能变化就等于焓的变化。为此可以简单地认为某工质在特定状态下的焓值是该工质在该状态下所具有的热量。

5. 热能的品位

焓仅仅是表示某工质在某状态下所具有的热量，这仅仅是表征热的数量，其中无质的涵义。若两个系统的总热量相等，但其中一个系统的温度高而另一个系统温度低，则显然

前一系统的热能品位高。在热工中采用“焓”参数来表示其内涵。顾名思义，焓是可利用的热能。若读者要深入地了解其概念，可查阅有关的热工学书籍。

三、热量与比热

当两种温度不同的物体相互接触时，热能必然从高温物体向低温物体传递，在该过程中所传递的能量称为热量，单位为焦(J)或千焦(kJ)。对于化石燃料，它与空气中的氧进行氧化反应(即燃烧)后会释放出燃料的化学能，该放热反应所释放出来的能量称为燃料的热值。

将物体温度升高 1°C 所需的热量称为热容，单位质量物体的热容称为比热容(简称比热)。若以单位容积(或摩尔)来表示，则称为容积(或摩尔)比热。在升温过程中维持压力不变的称为定压比热；维持容积不变的称为定体比热。用符号 c 来表示比热，单位为 $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，[或 $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ 、 $\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$]，下标标以 p 来表示定压比热、以 v 来表示定体比热。在工程上为了与焓的定义相一致，大部分采用定压比热。

四、功与功率

热力系统对外界进行机械能的转换称为做功(或称为做机械功)，功的单位用焦或千焦表示。假定系统对外界做功为正值，外界对系统做功就为负值。在单位时间内所完成的功称为功率，单位为瓦(W)或兆瓦(MW)， $1\text{W}=1\text{J}/\text{s}$ 。

1997年1月1日起执行的《蒸汽锅炉安全技术监察规程》第九条中规定，以额定蒸发量(t/h)或额定功率(MW)以及额定蒸汽压力(MPa)和额定蒸汽温度($^{\circ}\text{C}$)来表示锅炉的铭牌。在热水锅炉中，我国曾采用额定供热量($10^4\text{kcal}/\text{h}$)作为热水锅炉的铭牌，若要将它转换成MW

值，将额定供热量乘以 0.01163 即可。例如某热水锅炉的额定供热量为 $8.6 \times 10^4 \text{ kcal/h}$ ，与此对应的额定输出功率应为 $8.6 \times 0.01163 = 0.1 \text{ MW}$ 。对于以额定蒸发量 (t/h)、额定蒸汽参数 [即汽压 (MPa) 和汽温 ($^{\circ}\text{C}$)] 表示的锅炉铭牌，与输出热功率间的关系可以根据汽温和汽压去查《具有焓参数的水和水蒸汽参数手册》，取得相应的焓 (h) 值，将它乘以额定蒸发量再除以 3600000 就等于锅炉的铭牌输出热功率 (MW)。例如有一台额定蒸发量为 20 t/h 的锅炉，额定参数为：汽压为 2.45 MPa (25 kgf/cm^2)，汽温为 400°C ，由《具有焓参数的水和水蒸汽性质参数手册》查得 2.45 MPa 汽压和 400°C 汽温参数下的焓等于 3241.4 kJ/kg ，这样该锅炉的输出热功率 = $\frac{3241.4 \times 20000}{3600000} = 18 \text{ MW}$ 。

五、水和水蒸汽的性质

由于水较为容易取得，所以人们将水作为工业锅炉的能量转换工质。为此对水和水蒸汽的热力性质应有所了解。前面已说明焓是等压过程中的热量，因此介绍水和水蒸汽热力特性时亦用等压过程来描述。

水在 0°C 以下为固态 (即冰)，在 0°C 时对冰加热，所加入的热量消耗于固体晶格间的吸引力，使分子晶格呈流化状态，冰就开始融化但温度仍为 0°C ，这一相变称为融化。在相变过程中将冰全部融成水所需的热量称为融解热。当冰全部融成水后，继续在等压下加热，水就开始升温。在一个物理大气压力下将水加热到 100°C 时水开始沸腾，此时水进入第二个相变点，即由液相转化为汽相，这一相变称为汽化。在汽化过程中水吸收热量后温度不升高，所吸收的热量消耗于分子间的吸引力，使水逐渐地转化成水蒸气，将水完全相

变成汽所需的热量称为汽化潜热。刚开始进入相变时的水，在热工中称它为饱和水；相变完成时的一瞬间，在热工中称它为干饱和汽；在相变过程中的工质称为湿蒸汽，其状态可用干度 x 来表示。例如蒸汽干度为 95% 的湿蒸汽，其含义是在 1kg 湿蒸汽中含有 0.05kg 的饱和水，0.95kg 的干饱和汽。

应该指出，不同工质在不同压力下的沸点（即相变点）是各不相同的，沸点的温度称为某工质在特定压力下的饱和温度，该特定的压力称为饱和压力。不同的工质将有不同的热力特性表供热工人员进行查阅。关于水和水蒸汽的热力参数可查阅有关的水和水蒸气性质参数手册。

汽化又可分为蒸发和沸腾。蒸发是在液相表面进行的汽化过程，它在任何温度下都会发生。例如一杯水放在大气中，经过一段时间后，该杯水将被蒸发掉一部分。沸腾则是在液相表面和内部同时进行的汽化过程。

综上所述，在工业锅炉中水在等压下的加热过程可分成下述三个阶段：

1. 预热阶段（在锅炉中称为升温阶段）

将低温水不断地加热，使温度升到工作压力下的饱和温度，使水进入饱和水状态。这一阶段称为预热阶段，该阶段在工业锅炉中一般由省煤器来完成。对于没有省煤器的锅炉，本阶段与下一阶段均在蒸发受热面内完成。

2. 蒸发阶段

当水呈饱和水状态后继续加热，使水逐渐汽化一直到所有的饱和水完全转变成干饱和汽为止。这一阶段就是相变阶段。相变所需的热量称为汽化潜热或蒸发热。不同压力的汽化潜热是不相同的，其数值可查《具有焓参数的水和水蒸汽

性质参数手册》。这一阶段在工业锅炉中是由蒸发受热面来完成的。

3. 过热蒸汽阶段

将干饱和蒸汽继续加热，汽温由饱和温度开始升高，这时工质由饱和蒸汽转化为过热蒸汽，一直加热到要求的工作温度为止。在工业锅炉中该阶段是由过热器来完成。

在工业锅炉中仅生产热水者，只有第一阶段；如只生产饱和蒸汽者，将有前两个阶段；如生产过热汽者，那么上述三个阶段全部具有。

六、传热过程

将热量从一个物体传到另一个物体，或者在一个物体内部从高温区向低温区传递，这一过程称为传热过程。传热过程有热传导、对流传热和辐射传热三种形式。

1. 热传导

某物体在不同部位之间存在温度差时，高温区的热量向低温区传递。物体传导热量的能力称为热导率（或称为导热系数） λ ，单位为 $W/(m \cdot K)$ 。一般气体的 λ 是 $0.006 \sim 0.6 W/(m \cdot K)$ ；液体的 λ 是 $0.07 \sim 0.7 W/(m \cdot K)$ ；金属为 $6 \sim 470 W/(m \cdot K)$ ；保温材料的 λ 小于 $0.25 W/(m \cdot K)$ 。

2. 对流传热

流体与固体壁面直接接触过程（冲刷过程）中的换热称为对流传热。该传热过程的热量大小与流体的流速、物性参数和固体壁面的形状、位置和大小有关。综合起来用对流放热系数 α 来表达其传热能力，单位为 $W/(m^2 \cdot K)$ ，即：

$$Q = \alpha A (t_1 - t_2) \quad (1-7)$$

式中 Q ——传递热量， W ；

A ——传热表面积, m^2 ;

α ——对流放热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;

t_1, t_2 ——高温工质与低温工质的定性温度, K 。

3. 辐射传热

上述两种传热必须在冷热物体的直接接触过程中进行, 称为“接触传热”。辐射传热的原理是: 具有一定温度的物体能向空间放射出各种波长的电磁波, 在波长为 $0.1 \sim 40\mu\text{m}$ 的电磁波段内, 该电磁波投射到另一物体的表面后, 能使该物体吸收热量而升温。这种传热方式称为“不接触传热”。例如人们在窥视熊熊燃烧的火焰时会感到有灼热感, 这是人们接受到火焰的辐射能量的结果。

一般来说, 物体的辐射强度与其热力学温度的四次方成正比。

在工业锅炉的炉膛内高温火焰与蒸发受热面之间的传热绝大部分是辐射传热方式, 一小部分是对流传热; 在锅内(汽包内部、锅筒内部、水冷壁中的水循环等)的传热过程是对流传热加热传导; 蒸发受热面中的对流管束、过热器、省煤器和空气预热器等对流受热面都属于对流传热的方式。

第二节 电 工 基 础

一、电流、电压与电阻

1. 电流

带电粒子(电子、空穴等)有规则地移动形成电流, 电流的大小以单位时间内通过导体横截面的电荷量来衡量, 称为电流强度, 简称电流。大小和方向不随时间变化的电流称

为恒定电流，简称直流，其电流强度用符号 I 表示，如图 1-1 (a) 所示。大小和方向随时间变化的电流称为交变电流，简称交流，用符号 $i(t)$ 表示。若在一次交变中的最大电流值为 I_m ，则交变电流可写成

$$i = I_m \sin \omega t \quad (1-8)$$

式中 ω ——角频率，rad/s；

t ——时间，s。

由上式可知，交流电流是按正弦规律变化，如图 1-1 (b) 所示。在我国法定计量单位中，电流的单位是安培 (A)。

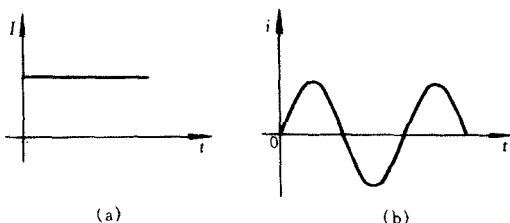


图 1-1 直流电流和交流电流

(a) 直流电流；(b) 交流电流

2. 电压

电路是由电源、负载和连接导线所组成。电路中 a、b 两点之间的电压 U_{ab} 是表示单位正电荷从 a 点移到 b 点时失去能量（电场力做功）或获得的能量（外力做功）。如果失去能量，则 a 点的电位 V_a 高，b 点的电位 V_b 低；如果获得能量，则 V_a 低而 V_b 高。电压又称为电位差，例如电压 U_{ab} 是 a 点电位 V_a 与 b 点电位 V_b 之差，即

$$U_{ab} = V_a - V_b \quad (1-9)$$

电源的电动势 E_{ab} 是外力把单位正电荷从电源的低电位端（负极）b 经电源内部移到高电位端（正极）a 所做的功。

大小和极性都不随时间变化的电压（或电动势）称为恒定电压（或恒定电动势），又称为直流电压（或直流电动势），用符号 U （或 E ）表示。大小和极性都随时间变化的电压或电动势称为交变电压或交变电动势，用符号 $u(t)$ 或 $e(t)$ 表示。在法定计量单位中，电压或电动势的单位是伏特，符号为 V。

习惯上规定电压的方向从高电位端指向低电位端，即电位降低的方向；而电动势的方向是从低电位端指向高电位端，即电位升高的方向。

3. 电阻

实现电能转换成热能或其他能量的电路元件称为电阻，其特性是以加在电阻两端的电压为横坐标，通过电阻的电流由纵坐标的伏安特性来表示。线性电阻上的电压与电流间的关系是遵守欧姆定律的，即

$$\left. \begin{array}{l} \text{在交流电路中} \quad u(t) = Ri(t) \\ \text{在直流电路中} \quad U = RI \end{array} \right\} \quad (1-10)$$

式中 R 为电阻值，它与通过电阻的电流无关，是一个物性参数，法定单位用欧姆表示，单位符号为 Ω ； U 与 $u(t)$ 为电压， U 表示直流电压， $u(t)$ 表示交变电压； I 与 $i(t)$ 为电流， I 表示直流电流， $i(t)$ 表示交变电压。

电阻的倒数称为电导 G ，即

$$G = \frac{1}{R} \quad (1-11)$$