

GONG RE GONG



燃气热力行业职业技能岗位培训用书

# 供 热 工

丁崇功 主编



化学工业出版社

燃气热力行业职业技能岗位培训用书

# 供 热 工

丁崇功 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书全面、系统地介绍了供热工的知识要求（应知）和操作要求（应会），内容包括：供热工基础知识，常用钢管、阀门、集中供热概述，室内供暖系统的运行维护，室外供热管网的运行维护，热力站、中继泵站、热源、水处理、集中供热系统的调节与控制等。

本书是热源（热电厂、工业锅炉房及其他热源）、热力网、热力站、中继泵站及供暖空调系统供热工技能等级考试的培训用书，也可作为中等专业学校和技工学校热能专业及供热通风空调工程专业师生的教学参考书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

供热工/丁崇功主编. —北京：化学工业出版社，2007.8  
燃气热力行业职业技能岗位培训用书  
ISBN 978-7-122-00964-7

I. 供… II. 丁… III. 供热系统-技术培训-教材  
IV. TU833

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2007）第 123148 号

---

责任编辑：董 琳  
责任校对：李 林

文字编辑：刘莉珺  
装帧设计：关 飞

---

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）  
印 装：北京市彩桥印刷有限责任公司  
787mm×1092mm 1/16 印张 20 字数 526 千字 2007 年 10 月北京第 1 版第 1 次印刷

---

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899  
网 址：<http://www.cip.com.cn>  
凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

---

定 价：48.00 元

版权所有 违者必究

## 编者的话

燃气化和热化是城市的基础设施，是现代化城市的重要标志。自从改革开放以来，随着社会进步和人民生活水平的不断提高，我国城市燃气、热力事业获得了前所未有的高速发展，取得了显著的社会效益、经济效益和环境效益。

随着燃气、热力事业的发展，燃气、热力行业职工队伍愈来愈庞大，而且主要是新职工，他们的专业技术水平和实际操作能力一般都不是很高；即使是老职工，也存在知识和技术更新的问题。因此，要大力加强燃气、热力行业职工的培训教育工作，不断提高他们的业务素质，以满足燃气、热力行业职工开展职业技能岗位鉴定工作的需要。

燃气是易燃、易爆、有毒的物质，在制造、储存、运输、经营和使用过程中，稍有不慎，则很容易发生火灾、爆炸和中毒事故，那就会给人民生命和国家财产造成不可弥补的损失；热力设备和管道在使用过程中也时刻存在爆炸的危险，因此，燃气、热力设备属于特种设备，燃气、热力行业属于特种行业。从事燃气、热力行业的职工，必须具备良好的职业道德和熟练的技术业务素质。为达到此目的，对燃气、热力行业的职工应先培训考试，取得资格证书后再上岗，这就需要有一套既系统地阐述燃气、热力行业各工种基础理论、专业知识和操作技能，又符合教学规律的培训用书。

本套系列培训用书是根据 2002 年 4 月建设部颁发的燃气行业 27 个工种的《职业技能岗位标准》、《职业技能岗位鉴定规范》、《职业技能鉴定题库》的基本内容和要求编写，将性质相近、基础理论基本相同、专业联系比较紧密的工种合编成一册，这样既减少了培训用书的总册数，又减少了各册相互重复的内容，同时便于相近工种之间的学习和渗透。液化石油气、天然气、工业锅炉和供热等工种是目前国内燃气、热力行业中量大、面广的工种，也是最急需进行职业技能岗位鉴定的工种。

本套系列培训用书共分 6 册，各册的书名和特别适用的工种（建设部规定的工种名称）如下：

1. 液化石油气站操作工  
（特别适用于液化石油气罐区运行工、液化石油气灌瓶工）
2. 液化石油气站设备检修工  
（特别适用于液化石油气机械修理工、液化石油气钢瓶检修工）
3. 工业锅炉司炉工  
（特别适用于热力司炉工）
4. 供热工  
（特别适用于热力运行工）
5. 燃气输配工  
（特别适用于燃气输送工、燃气调压工）
6. 燃气管道工  
（特别适用于燃气管道工）

我深信，这套系列培训用书的出版，将对我国燃气、热力行业职工技能的提高产生积极的作用，为燃气、热力事业的发展做出一定的贡献。

丁崇功

# 前 言

集中供热是城市的重要基础设施之一，集中供热的普及率是现代化城市的重要标志。集中供热是改善城市环境、改善大气质量、实现可持续发展的重要措施；是落实“节能、降耗”基本国策的重要手段。集中供热具有良好的经济效益、环境效益和社会效益，是国家产业政策重点支持发展的行业。

能源的合理利用及利用效率的提高，不仅关系到资源节约和经济发展，而且影响到生态环境和人类前途，热电联产是达到上述目的的技术措施之一，为此，国家已将热电联产列为“十一五”十大重点节能工程项目之一。

近年来，我国集中供热事业有了突飞猛进的发展，为数众多的大型供热汽轮发电机组和大量的大容量、高参数热水锅炉不断投入运行使用，大管径、远距离、高参数供热管网大量敷设和使用，直埋供热管道技术不断发展并得到大规模应用，新型热交换设备被研制、开发和应用，供热计量技术得到推广和应用，电子计算机在集中供热系统调节、控制和管理等方面被推广和应用，各种新材料、新设备、新工艺、新施工安装技术得到应用。所有这一切，标志着我国集中供热事业已经进入现代化阶段。

随着集中供热事业的发展及其技术的进步，供热行业职工队伍的技术业务素质亟待提高，这就需要编写反映最新科技水平的供热工职业技能岗位培训用书，以满足供热行业广大职工的迫切希望。

本书是根据国家建设部于2002年4月颁发的燃气行业管道工等27个职业技能岗位中的“热力运行工”《职业技能岗位标准、职业技能岗位鉴定规范和职业技能岗位鉴定题库》的要求，为从事城市集中供热的高级供热工、中级供热工、初级供热工编写的职业技能等级考试与鉴定培训教材，教材基本上覆盖了“岗位鉴定规范”和“岗位鉴定题库”的全部应知、应会内容。为了保持教材的科学性、系统性、完整性和避免不必要的重复，本书不采用将高级工、中级工和初级工分开撰写的做法，而是将每章的复习思考题按高级工、中级工和初级工的不同要求分别编写，以便于分层次培训和自学。复习思考题全部来自“题库”，其答案寓于正文之中；“题库”中的计算题分别编排在各有关章节作为计算例题，并与书中内容衔接、吻合。复习思考题的内容和计算例题也就是各章的教学重点和必须掌握的基本内容。

本书引用了热能工程行业的国家最新规程、规范和标准，反映了该行业国内外的先进技术。编者在指导思想上注重理论与实践相结合，着重于实践，力求使本书成为一本具有一定的理论基础和较高实用价值的教材。本书内容包括供热工基础知识、常用钢管、阀门、集中供热概述、室内供暖系统的运行维护、室外供热管网的运行维护、热力站、中继泵站、热源、水处理、集中供热系统的调节与控制等。

全书共分10章，由丁崇功（第1章、第2章、第3章、第7章、第8章、第9章、第10章），贺红伟（第4章），丁华峥（第5章、第6章）编写。丁崇功任主编并统稿。

本书的编写得到了陕西省燃气热力办公室何清堂主任、李直副主任、刘志义总工程师的大力支持和帮助，谨致诚挚的谢意。

本书编写过程中，参阅了许多教授、专家、学者的论著，并引用了其中许多资料（数据、图、表等），在此表示衷心的感谢。

由于编写时间仓促，书中疏漏和不妥之处敬请读者批评指正。

编者

2007年3月于西安

# 目 录

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| <b>第 1 章 供热工基础知识</b> .....     | 1   |
| 1.1 流体基本知识 .....               | 1   |
| 1.2 热工基本知识 .....               | 3   |
| 1.3 热传递基本知识 .....              | 8   |
| 1.4 机械基本知识 .....               | 15  |
| 1.5 电工基本知识 .....               | 22  |
| 复习思考题 .....                    | 28  |
| <b>第 2 章 常用钢管、阀门</b> .....     | 32  |
| 2.1 钢管 .....                   | 32  |
| 2.2 阀门 .....                   | 35  |
| 复习思考题 .....                    | 49  |
| <b>第 3 章 集中供热概述</b> .....      | 54  |
| 3.1 集中供热中常用的几个基本概念 .....       | 54  |
| 3.2 热负荷 .....                  | 55  |
| 3.3 热介质 .....                  | 59  |
| 3.4 集中供热系统的类型 .....            | 60  |
| 3.5 热水供热系统的补水与定压 .....         | 66  |
| 3.6 凝结水的回收与利用 .....            | 71  |
| 复习思考题 .....                    | 74  |
| <b>第 4 章 室内供暖系统的运行维护</b> ..... | 76  |
| 4.1 建筑物的热损失及对供暖的要求 .....       | 76  |
| 4.2 热水供暖系统 .....               | 77  |
| 4.3 分户热计量集中热水供暖系统 .....        | 82  |
| 4.4 地板辐射供暖系统 .....             | 85  |
| 4.5 蒸汽供暖系统 .....               | 87  |
| 4.6 室内供暖系统的验收、运行、调节与故障排除 ..... | 90  |
| 复习思考题 .....                    | 92  |
| <b>第 5 章 室外供热管网的运行维护</b> ..... | 94  |
| 5.1 室外供热管网的布置与敷设 .....         | 94  |
| 5.2 集中供热管道水力计算 .....           | 100 |
| 5.3 热水管网的水力工况 .....            | 111 |
| 5.4 供热管道的热膨胀 .....             | 113 |
| 5.5 管道支座 .....                 | 118 |
| 5.6 供热管道的排水、放气与疏水装置 .....      | 122 |
| 5.7 供热管道的保温 .....              | 123 |
| 5.8 热力网的运行维护 .....             | 130 |
| 复习思考题 .....                    | 134 |
| <b>第 6 章 热力站</b> .....         | 136 |

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 6.1 热力站的布置 .....                     | 136 |
| 6.2 热网与热力站的连接方式 .....                | 138 |
| 6.3 组合式热力站 .....                     | 141 |
| 6.4 热交换器 .....                       | 142 |
| 复习思考题 .....                          | 153 |
| <b>第7章 中继泵站</b> .....                | 156 |
| 7.1 中继泵站的设置原则 .....                  | 156 |
| 7.2 中继泵站的类型 .....                    | 157 |
| 7.3 泵 .....                          | 158 |
| 复习思考题 .....                          | 179 |
| <b>第8章 热源</b> .....                  | 184 |
| 8.1 热电厂集中供热 .....                    | 184 |
| 8.2 工业锅炉房 .....                      | 188 |
| 8.3 其他集中供热热源 .....                   | 226 |
| 复习思考题 .....                          | 232 |
| <b>第9章 水处理</b> .....                 | 238 |
| 9.1 水中杂质及其危害 .....                   | 238 |
| 9.2 水质指标与水质标准 .....                  | 240 |
| 9.3 离子交换水处理 .....                    | 244 |
| 9.4 锅内水处理 .....                      | 252 |
| 9.5 水垢的清除 .....                      | 254 |
| 9.6 锅炉给水除氧 .....                     | 257 |
| 9.7 锅炉排污 .....                       | 260 |
| 复习思考题 .....                          | 261 |
| <b>第10章 集中供热系统的调节与控制</b> .....       | 270 |
| 10.1 集中供热系统的调节 .....                 | 270 |
| 10.2 集中供热系统的检测与检测仪表 .....            | 274 |
| 10.3 集中供热系统的监控 .....                 | 283 |
| 复习思考题 .....                          | 290 |
| <b>附录1 饱和蒸汽热力性质表 (按绝对压力排列)</b> ..... | 294 |
| <b>附录2 过热蒸汽热力性质表 (按绝对压力排列)</b> ..... | 297 |
| <b>附录3 饱和水物理常数表</b> .....            | 299 |
| <b>附录4 室外热水网路水力计算表</b> .....         | 300 |
| <b>附录5 热水管道通过能力表</b> .....           | 302 |
| <b>附录6 室外热水网路局部阻力当量长度表</b> .....     | 303 |
| <b>附录7 室外蒸汽管道水力计算表</b> .....         | 305 |
| <b>附录8 蒸汽管道通过能力表</b> .....           | 306 |
| <b>附录9 余压凝结水管水力计算表</b> .....         | 307 |
| <b>附录10 压力凝结水管通过能力表</b> .....        | 308 |
| <b>附录11 常用管道涂色标记</b> .....           | 309 |
| <b>附录12 部分复习思考题答案</b> .....          | 310 |
| <b>参考文献</b> .....                    | 313 |

# 第 1 章 供热工基础知识

## 1.1 流体基本知识

### 1.1.1 概述

流体是易于流动的物体，“水向低处流，气往上方漂”，这反映了流体的一般运动规律。

流体在一定的条件下能承受很大的压力，然而几乎不能承受拉力，同时抵抗剪切力的能力很弱，任何微小的剪切力，只要持续施加，都能使流体发生连续变形。

流体包括液体和气体。气体总是要充满盛装它的整个容器。当气体受到外力作用或温度变化时，分子间的距离很容易改变，体积能发生很大变化，表现出可压缩性和可膨胀性，通常把气体称为可压缩流体。液体分子的排列较气体要紧密得多，分子间的相互作用力也比气体强得多，液体有确定的体积，并能在容器内形成一定的自由表面。当液体受到外力作用或温度变化时，分子间的距离不容易改变，其体积变化是很微小的，通常把液体称为不可压缩流体。

### 1.1.2 流体的静压力及其特性

(1) 流体静压力 流体的静压力有两个重要性质：

- a. 流体静压力的方向总是沿着作用面的垂直方向，并指向作用面；
- b. 在静止流体内部任意点处的静压力大小与其作用面在空间的方位无关，任意一点各个方向的流体静压力均相等。

(2) 流体静压力的表示方法 流体静压力的大小，根据不同的计量基准可以分为大气压力、绝对压力、相对压力和真空度。

a. 大气压力 地球周围的空气受到地球引力的作用，所产生的压力称为大气压力，用符号  $P_a$  表示。由于气候的影响及海拔高度的不同，各地的大气压力也不相同。在标准状态下，海平面上的大气所产生的压力称为标准大气压，用符号 atm 表示，一个标准大气压是 101325Pa。工程上以  $1\text{kgf/cm}^2$  为工程大气压，用符号 at 表示。 $1\text{kgf/cm}^2 = 9.806 \times 10^4 \text{Pa}$ ， $1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$ 。

b. 绝对压力 以没有气体存在的绝对真空时压力为零作为计算起点，算出的压力称为绝对压力，以符号  $P$  表示。

当液面上作用的就是大气压力时，则液体内任一点的绝对压力为

$$P = P_a + \rho gh \quad (1-1)$$

式中， $P_a$  为大气压力，Pa； $\rho$  为液体密度， $\text{kg/m}^3$ ； $g$  为重力加速度， $\text{m/s}^2$ ； $h$  为液柱高度，m。

绝对压力表示了压力的真实大小，它始终是正值。

c. 相对压力 以大气压力为零起算的压力称为相对压力。

测量压力的仪表本身也受到大气压力的作用，在大气中，它的读数都为零，因此，在压力表中测得的压力都是相对压力，它和绝对压力之间有如下关系：

$$\text{绝对压力} = \text{相对压力} + \text{大气压力}$$

$$\text{相对压力} = \text{绝对压力} - \text{大气压力}$$

可见，相对压力可为正值，也可为负值。

d. 真空度 若流体某处的绝对压力小于当地的大气压力, 即表压力为负值, 则该处处于真空状态, 其真空程度用真空度  $p_v$  表示。真空度与绝对压力的关系为:

$$\text{真空度} = \text{大气压力} - \text{绝对压力}$$

显然, 绝对压力为零时, 真空度最大, 叫做完全真空。理论上的最大真空 (完全真空) 为一个大气压力, 但实际上要把容器中抽成完全真空是很难做到的, 特别是当容器中盛有液体时, 只要压力降到液体的饱和蒸气压, 液体就开始沸腾而产生蒸气, 压力不再降低。

e. 绝对压力、相对压力和真空度之间的相互关系 图 1-1 所示为绝对压力、相对压力和真空度三者之间的关系。

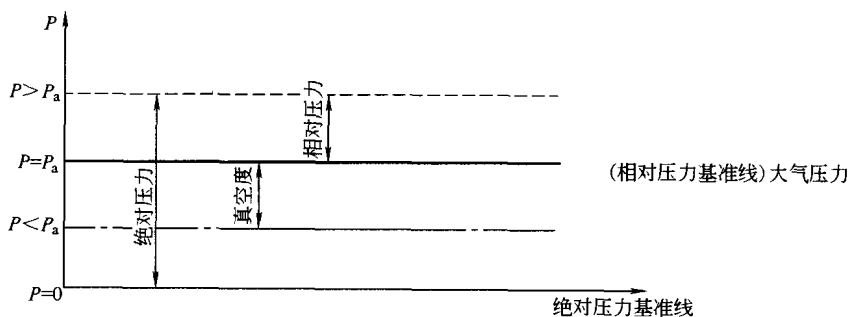


图 1-1 绝对压力、相对压力和真空度的相互关系

f. 压强单位 在工程中常将压强称为压力, 压强单位即为压力单位。国际单位制中, 压强用 Pa (帕斯卡) 表示, 也可用 kPa、MPa 表示。

由式 (1-1) 可得

$$\frac{P - P_a}{\rho g} = h$$

可见压力的大小也可用液柱高度  $h$  表示。

若用水柱高度表示工程大气压力值  $P_a$ , 则

$$\frac{P_a}{\rho g} = \frac{9.806 \times 10^4}{9.806 \times 10^3} = 10 \text{mH}_2\text{O}$$

各种压强单位的换算见表 1-1。

表 1-1 压强单位换算表

| 名称    | Pa                    | bar                     | kPa              | kgf/cm <sup>2</sup>    | 标准大气压                   | mH <sub>2</sub> O      | mmHg                 |
|-------|-----------------------|-------------------------|------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|----------------------|
| 帕     | 1                     | 10 <sup>-5</sup>        | 10 <sup>-3</sup> | 0.102×10 <sup>-4</sup> | 0.9869×10 <sup>-5</sup> | 0.102×10 <sup>-3</sup> | 7.5×10 <sup>-3</sup> |
| 巴     | 10 <sup>5</sup>       | 1                       | 100              | 1.02                   | 0.9869                  | 10.2                   | 7.5×10 <sup>2</sup>  |
| 千帕    | 10 <sup>3</sup>       | 10 <sup>-2</sup>        | 1                | 0.102×10 <sup>-1</sup> | 0.9869×10 <sup>-2</sup> | 0.102                  | 7.5                  |
| 工程大气压 | 9.807×10 <sup>4</sup> | 0.9807                  | 98.07            | 1                      | 0.968                   | 10                     | 735.5                |
| 标准大气压 | 101325                | 1.0133                  | 101.325          | 1.0333                 | 1                       | 10.333                 | 760                  |
| 米水柱   | 9807                  | 0.09807                 | 9.807            | 0.1                    | 0.968×10 <sup>-1</sup>  | 1                      | 73.55                |
| 毫米汞柱  | 133.32                | 1.3332×10 <sup>-3</sup> | 0.133332         | 1.36×10 <sup>-3</sup>  | 1.316×10 <sup>-3</sup>  | 1.36×10 <sup>-2</sup>  | 1                    |

**计算例题 1** 压力表指出压力  $P_n = 1.27 \text{MPa}$ , 若当时当地大气压力  $P_b = 0.1 \text{MPa}$ 。试求绝对压力  $P$ 。(初级工)

**【解】**  $P = P_n + P_b = 0.1 + 1.27 = 1.37 \text{MPa}$

答: 绝对压力  $P$  为  $1.37 \text{MPa}$ 。

### 1.1.3 流速和流量

流速是指流体在单位时间内所移动的距离。

流量是指在单位时间内流过某截面的流体的数量。

### 1.1.4 流动阻力和能量损失

(1) 能量损失的两种形式

a. 沿程损失 在管径和边壁沿程不变的管段上, 流速沿程不变, 由于黏性而产生的切应力不变, 流动阻力只有沿程不变的切应力, 称为沿程阻力。克服沿程阻力引起的能量损失, 称为沿程损失。因其大小与管段的长度成正比, 故也称为长度损失, 用  $h_f$  表示。

b. 局部损失 在流体流动边界急剧变化的区域, 由于出现了旋涡区和速度分布的变化, 流动阻力大大增加, 形成了比较集中的能量损失。这种阻力称为局部阻力, 其相应的能量损失称为局部损失, 用符号  $h_m$  表示。

整个管段的能量损失等于各管段的沿程损失和所有局部损失的总和, 即:

$$h_l = \sum h_f + \sum h_m \quad (1-2)$$

(2) 影响能量损失的因素

a. 流体黏性 流体的种类不同, 其黏度也不同, 从而产生的阻力也不同, 因此流体的黏性是影响能量损失的因素之一。

b. 速度 流体在管内流动时, 在过流断面上各点的流速是不一样的, 如图 1-2 所示。管中心流速最大, 而向管边流速逐渐减少, 在边壁处流速为 0, 即从管壁到管中心流体速度逐渐增大, 产生了速度不同的流层, 流层间产生相对运动, 因此产生了阻力。平均速度大的, 流层间的速度差也就大, 产生的阻力也大。因此, 速度大小是影响能量损失的又一因素。

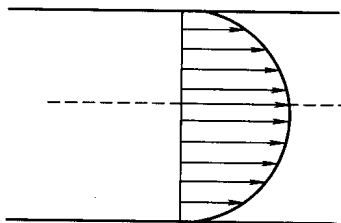


图 1-2 流速分布图

c. 管道断面的几何形状 相同的管道断面面积, 圆的周边长度比其他形状的周边长度要小, 所以它与流体接触的面积要小, 相互之间的摩擦力也小。因此, 管道断面的几何形状对能量损失产生影响。

d. 管道内壁粗糙度 在其他条件都相同的情况下, 管道内壁愈光滑, 则阻力也愈小。因此, 管道内壁粗糙度也是影响能量损失的因素。

## 1.2 热工基本知识

### 1.2.1 物质的状态

#### 1.2.1.1 物质的三种状态

自然界的所有物质, 按其存在的状态分为三种: 固态 (也称固体)、液态 (也称液体) 和气态 (也称气体)。

(1) 固体 具有一定形状和体积的物质称为固体。如钢、煤、玻璃、混凝土、木材等。

(2) 液体 无固定形状, 但有一定体积且可以流动的物质称为液体。如在常温常压下, 水、油、汞等都属于液体。

由于液体分子的排列非常紧密, 在通常压力下, 它的体积几乎不发生变化, 因此, 通常认为液体是不可压缩的。

(3) 气体 无固定形状和体积且可以流动的物质称为气体。

由于气体分子排列稀疏, 分子间的距离比较大, 分子间的作用力很小, 它们在空间做无规则运动, 因此, 气体不论其质量多少, 总是均匀地充满存放它的容器, 并且能被压缩成很

小的体积。

### 1.2.1.2 物质状态的相互转变

同一种物质的三种状态（固态、液态、气态），在一定的条件下，能够由一种状态转变为另一种状态，这种变化称为物态变化。例如，在通常情况下，铁是固体，水是液体，空气是气体。如果将铁放在熔炉中加热到一定温度，铁就会熔化成铁水（液体）；锅内的水加热到一定温度，就会汽化成水蒸气（气体）；而空气深度冷冻到一定的低温时，就会液化成液态空气（液体）。

### 1.2.2 温度

温度是表示物体冷热程度的物理量。它反映了物质分子热运动的强弱程度。常用的有摄氏温度、热力学温度和华氏温度。

(1) 摄氏温度 在一个标准大气压下，把水结冰时的温度（即冰点）定为  $0^{\circ}\text{C}$ ，把水沸腾时的温度（即沸点）定为  $100^{\circ}\text{C}$ ，两者之间平均分成 100 等份，每 1 等份为  $1^{\circ}\text{C}$ 。

摄氏温度简便实用，为国内各行各业普遍采用。

(2) 热力学温度 以摄氏温度的  $-273.15^{\circ}\text{C}$  作为起点，每 1 度的间隔与摄氏温度相等。则水的冰点温度为  $273.15\text{K}$ ；沸点温度为  $373.15\text{K}$ 。

(3) 华氏温度 在一个标准大气压下，把水的冰点温度定为  $32^{\circ}\text{F}$ 。沸点温度定为  $212^{\circ}\text{F}$ 。两者之间平均分为 180 等份，每 1 等份为  $1^{\circ}\text{F}$ 。

(4) 三种温度之间的换算关系

a. 摄氏温度与热力学温度的关系为

$$T = t + 273.15 \quad (1-3)$$

式中， $T$  为热力学温度， $\text{K}$ ； $t$  为摄氏温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

b. 摄氏温度与华氏温度之间的关系

$$t_{\text{F}} = \frac{9}{5}t + 32 \quad (1-4)$$

式中， $t_{\text{F}}$  为华氏温度， $^{\circ}\text{F}$ ； $t$  为摄氏温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

**计算例题 2** 已知华氏温度  $t_{\text{F}} = 122^{\circ}\text{F}$ ，求折算成摄氏温度  $t$ 。（初级工）

**【解】**  $t = 5/9(t_{\text{F}} - 32) = 5/9(122 - 32) = 50^{\circ}\text{C}$

答：折算成摄氏温度是  $50^{\circ}\text{C}$ 。

**计算例题 3** 已知摄氏温度  $t = 50^{\circ}\text{C}$ ，求折算成热力学温度  $T$ 。（初级工）

**【解】**  $T = t + 273.15 = 50 + 273.15 = 323.15\text{K}$

答：折算成热力学温度是  $323.15\text{K}$ 。

### 1.2.3 功和能

(1) 功 当用手举起重物时，物体在压力的方向上产生了位移，我们说，力对物体做了功。

根据牛顿第一定律，功的大小等于力与物体在力的作用方向上的位移的乘积，即

$$\text{功} = \text{力} \times \text{力作用方向上的位移}$$

或

$$W = FS \quad (1-5)$$

式中， $W$  为功， $\text{J}$ （焦）； $F$  为力， $\text{N}$ （牛）； $S$  为位移， $\text{m}$ 。

(2) 功率 单位时间内所做的功称为功率，即

$$\text{功率} = \text{功} / \text{完成功所用的时间}$$

或

$$P = \frac{W}{t} \quad (1-6)$$

式中,  $P$  为功率,  $W$  (瓦);  $t$  为时间,  $s$  (秒)。

(3) 能 能是物质做功的本领, 它是物质储存的功。

如水库中的水经水闸放出后, 以一定的速度和重力加速度推动水轮机转动, 我们说水对水轮机做了功, 水位愈高, 推动水轮机的力量愈大, 它所做的功也愈大。由于高位的水具有做功的本领, 它所具有的能量称为位能。

又如煤是以碳氢化合物为主要成分的矿物燃料, 它在锅炉中燃烧后产生高温烟气加热水, 生产高温高压蒸汽, 推动汽轮发电机发电。这说明煤具有做功的本领, 它所具有的能量是化学能。

能的单位与功的单位相同, 用  $J$ 、 $kJ$  (千焦) 表示。

(4) 热量 热量是物体内部所含热能的数量。

热可使物体的温度、体积及形态发生变化, 热量的单位常用  $J$  或  $kJ$  表示。

$1kg$  的纯水温度升高  $1^{\circ}C$  所吸收的热量为  $4.1868kJ$ 。

(5) 单位换算 各国所使用的功、能、热量及功率单位不完全相同, 国内也有国际单位制和工程单位制之分。通用的功、能及热量单位换算见表 1-2; 功率单位换算见表 1-3。

表 1-2 功、能及热量单位换算表

| 名 称    | $kJ$                   | $kW \cdot h$           | $kcal$                 | $kgf \cdot m$       | $Btu$                  | 马力小时                   | $hp \cdot h$           |
|--------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 千焦     | 1                      | $2.778 \times 10^{-4}$ | 0.2388                 | 101.97              | 0.9478                 | $3.777 \times 10^{-4}$ | $3.723 \times 10^{-4}$ |
| 千瓦小时   | 3600                   | 1                      | 859.8                  | 367098              | 3412.14                | 1.36                   | 1.341                  |
| 国际千卡   | 4.1868                 | $1.163 \times 10^{-3}$ | 1                      | 427.2               | 3.968                  | $1.581 \times 10^{-3}$ | $1.558 \times 10^{-3}$ |
| 千克力米   | $9.807 \times 10^{-3}$ | $2.724 \times 10^{-6}$ | $2.341 \times 10^{-3}$ | 1                   | $9.291 \times 10^{-3}$ | $3.701 \times 10^{-6}$ | $3.653 \times 10^{-6}$ |
| 英热单位   | 1.055                  | $2.931 \times 10^{-4}$ | 0.252                  | 107.6               | 1                      | $3.984 \times 10^{-4}$ | $3.98 \times 10^{-4}$  |
| 马力小时   | $2.648 \times 10^3$    | 0.7353                 | 632.5                  | $2.702 \times 10^5$ | 2510                   | 1                      | 0.9863                 |
| 英制马力小时 | $2.685 \times 10^3$    | 0.7457                 | 641.2                  | $2.737 \times 10^5$ | 2544.4                 | 1.0139                 | 1                      |

表 1-3 功率单位换算表

| 名称      | $W$    | $kcal/h$ | $kgf \cdot m/s$        | 马力                     | $hp$                   | $lbf \cdot ft/s$ | $Btu/h$ |
|---------|--------|----------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------|---------|
| 瓦       | 1      | 0.8598   | 0.102                  | $1.36 \times 10^{-3}$  | $1.341 \times 10^{-3}$ | 0.7376           | 3.412   |
| 千卡/时    | 1.163  | 1        | 0.1186                 | $1.531 \times 10^{-3}$ | $1.56 \times 10^{-3}$  | 0.8578           | 3.968   |
| 千克力·米/秒 | 9.8067 | 8.432    | 1                      | 0.01333                | 0.01315                | 7.233            | 33.46   |
| 马力      | 735.5  | 632.4    | 75                     | 1                      | 0.9863                 | 542.5            | 2509.6  |
| 英制马力    | 745.7  | 641.2    | 76.04                  | 1.0139                 | 1                      | 550              | 2544.4  |
| 磅力·英尺/秒 | 1.3558 | 1.1685   | 0.1383                 | $1.843 \times 10^{-3}$ | $1.818 \times 10^{-3}$ | 1                | 4.626   |
| 英热单位/时  | 0.293  | 0.252    | $2.988 \times 10^{-2}$ | $3.985 \times 10^{-4}$ | $3.930 \times 10^{-4}$ | 0.2162           | 1       |

#### 1.2.4 比热容

由经验可知, 具有相同质量的不同物质, 温度升高  $1^{\circ}C$  需要不同的能量, 例如, 质量为  $1kg$  的铁块从  $20^{\circ}C$  升温到  $30^{\circ}C$  需要的能量约  $4.5kJ$ , 而  $1kg$  水处于这种情况就需要约  $41.8kJ$  的能量, 约是铁块的 9 倍。因此, 就需要有一个能够比较各种物质能量储存能力的参数, 这个参数就是比热容。

比热容的定义为单位质量物质温度升高 (或降低)  $1K$  (或  $1^{\circ}C$ ) 所吸收 (或放出) 的热量, 常用符号  $c$  表示, 单位为  $kJ/(kg \cdot K)$ 。

水的比热容为  $4.1868\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

**计算例题 4** 某浴池长  $4\text{m}$ ，宽  $3\text{m}$ ，深  $1\text{m}$ ，容水  $80\%$ ，用  $0.7\text{MPa}$  饱和蒸汽加温，进水温度  $20^\circ\text{C}$ ，加温至  $45^\circ\text{C}$ ，求耗气最多少？( $i_q=2768.4\text{kJ/kg}$   $i_s=189\text{kJ/kg}$ ) (中级工)

**【解】**  $Q=4 \times 3 \times 1 \times 80\% \times 10^3 \times 4.187 \times (45-20)=1004880\text{kJ}$

则耗气量为  $D=Q/(i_q-i_s)=1004880/(2768.4-189)=389.6\text{kg}$

答：耗气量为  $389.6\text{kg}$ 。

**计算例题 5** 某浴池  $10\text{m}^3$  水温从  $20^\circ\text{C}$  加热到  $45^\circ\text{C}$ ，需要多少热量？(高级工)

**【解】** 需要的热量  $Q=G(t_2-t_1) \times c=10 \times 10^3\text{kg}(45^\circ\text{C}-20^\circ\text{C}) \times 1\text{kcal}/(^\circ\text{C} \cdot \text{kg})$   
 $=25 \times 10^4\text{kcal} \approx 105 \times 10^4\text{kJ}$

答：需要  $105 \times 10^4\text{kJ}$  热量。

### 1.2.5 比焓

在一个热力系统中，流动工质流进系统而带入的总能量（内能和流动功之和），称为比焓。用符号  $h$  表示，单位为  $\text{J/kg}$ 。

### 1.2.6 能的转换与能量守恒定律

(1) 能的转换 在自然界中，随着物质的运动和变化，能可以由一种形式转换成另一种形式，如前述的水推动水轮机做功的过程是水的位能转换为动能，再转换为机械能的过程；煤燃烧产生高压蒸汽，推动汽轮机做功，再由汽轮机带动发电机发电，就是将煤的化学能转换为汽轮机的机械能，再转为电能的过程。

(2) 能量守恒定律 实践证明，在能的转换过程中，任何形式的能量既不能创造，也不能消灭，只能从一种形式转换为另一种形式，转换前后的能量相等，这就是能量守恒定律。

在实际过程中常常发现，转换后可以利用的能量比转换前的总能量少，这是不是违反了能量守恒定律呢？如煤的化学能转换为热能的过程中，一部分煤未完全燃烧而进入灰渣中，这部分煤的化学能未能转换成热能利用，因而所得到的总热量小于燃料的化学能，这并不违反能量守恒定律。因为进入灰渣中的煤的化学能并没有消灭，只是未被利用，而作为过程的能量损失保存在灰渣中。

(3) 热能与机械能的转换 热能与机械能的转换是能量转换的一种形式，实现这种转换的设备称为热机，如蒸汽轮机、燃气轮机。无论是蒸汽轮机，还是燃气轮机，它们都需要某种工作物质从热源吸收热量，在热机中膨胀做功，实现热能与机械能的转换，这种工作物质称为工质。蒸汽轮机的工质为蒸汽；燃气轮机的工质为燃气燃烧产生的气体。为了获得更多的功，要求工质有良好的膨胀性和流动性。因此常用的工质为气态物质——蒸汽、气体。除蒸汽、燃气为常用工质外，在制冷装置中常用氟里昂、氨气、溴化锂等工质。

### 1.2.7 热力循环

工质由某一初态出发，经历一系列热力状态变化后，又回到原来初态的封闭热力过程称为热力循环，简称循环。热力循环是热力学第二定律论述的主要内容之一。

(1) 按照热力循环的性质分为可逆循环（全部由可逆过程组成的循环）和不可逆循环（含有不可逆过程的循环）。

a. 可逆循环：当系统经历某一正方向的热力循环后，再经过与此正向循环相反的逆向热力循环，整个系统（包括工质、热源及冷源）都回复到原来的状态，而不留任何变化的痕迹。

可逆循环可以是正循环（如卡诺循环），也可以是逆循环（如逆卡诺循环）。

卡诺循环是一种理想的可逆循环，实际上是无法实现的。

b. 不可逆循环：当系统经历某一正向的不可逆循环后，无论采用任何逆向循环或采用

任何方法,都不能使参与循环的整个系统(工质、热源或冷源)在不留任何变化痕迹的情况下,回复到初始状态。

c. 在可逆循环过程中除了功和热能的转换外,无任何耗散效应(通过摩擦、电阻、磁阻等使功变成热的效应);而在不可逆循环过程中,有耗散效应发生。因此,不可逆循环的热效率小于相同温度界限的可逆循环的热效率。

(2) 按照热力循环的目的分为正向循环(即动力循环)和逆向循环(即制冷循环和热泵循环)。

### 1.2.8 熵

熵是状态参数,熵的变化只取决于给定的初、终状态,与变化过程所经历的路径无关。熵用符号  $s$  表示,单位为  $\text{kJ/K}$ 。

在孤立系统内,一切实际过程(不可逆过程)都朝着使系统熵增加的方向进行,在极限情况下(可逆过程)维持系统的熵不变,而任何使系统熵减少的过程是不可能发生的。这一原理即为孤立系统熵增原理。

### 1.2.9 比体积和密度

(1) 密度 密度是指单位体积中物质的质量,用符号  $\rho$  表示,单位为  $\text{kg/m}^3$ 。

(2) 比体积 比体积是指单位质量的物质所占有的体积,用符号  $v$  表示,单位为  $\text{m}^3/\text{kg}$ 。

(3) 比体积与密度的关系 比体积与密度的关系可用下列公式表示:

$$v=1/\rho \quad (1-7)$$

式中,  $v$  为比体积,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;  $\rho$  为密度,  $\text{kg/m}^3$ 。

**计算例题 6** 一水管的水流量  $D=10\text{t/h}$ , 水的流通截面积  $F=0.00565\text{m}^2$ , 水的平均比体积  $v_{\text{pj}}=0.001\text{m}^3/\text{kg}$ 。试求管中的水流速  $w$ ? (高级工)

$$\begin{aligned} \text{【解】 } w &= (D \times 10^3 \times v_{\text{pj}}) / 3600F = (10 \times 10^3 \times 0.001) / (3600 \times 0.00565) \\ &= 0.516\text{m/s} \end{aligned}$$

答: 管中的水流速为  $0.516\text{m/s}$ 。

### 1.2.10 水和水蒸气

由于水蒸气具有适宜的热力参数、不会污染环境、容易获得等优点,是工业上广泛使用的工质,例如,在供热工程中常用水蒸气作为热源来加热热网中的供暖用水。

(1) 水的物理性质 纯净的水是无色、无臭、无味、透明的液体,它由氢和氧化化合而成,其化学分子式为  $\text{H}_2\text{O}$ , 水具有一定的体积,但没有固定的形状。随着温度的变化,水在自然界中呈固体、液体和气体三种不同的状态,通过加热和冷却它们之间的状态可以相互转化。水在  $4^\circ\text{C}$  时,体积最小,密度最大;超过或低于  $4^\circ\text{C}$  时,密度就减小,其体积要发生膨胀。所以锅炉在冬季停用后管道内不要存水,以防止水结冰后体积膨胀,冻坏设备和管道。水在  $120^\circ\text{C}$  时热导率最大。

水在连通器内,当水面压力相同时,有保持水面高度相等的性质。锅炉和水箱的水位计就是根据这个原理制成的。

水的比热容为  $4.1868\text{kJ}$ , 与其他液体相比较,即一定数量的水升高同样的温度时吸收的热量最多,因此水适合作为换热介质。

水的压缩性很小,受压时对容器各方向均产生相同的压力。锅炉和供热系统的水压试验就是根据这一原理检验结构的完整性和是否发生泄漏。饱和蒸汽热力性质见附录 1; 过热蒸汽热力性质见附录 2; 饱和水物理常数见附录 3。

(2) 水的汽化 水由液相转变为气相的过程叫做汽化,相反的过程叫凝结。汽化有蒸发

和沸腾两种形式。

a. 蒸发 水分子在其自由表面进行汽化的过程叫做蒸发。温度升高，蒸发速度加快，若液面上为自由空间，液体可以全部蒸发掉。

b. 沸腾 在一定的压力下，对水加热，温度逐渐升高，到一定温度时，液体内部汽化，气泡升至液面而破裂，蒸汽进入汽空间，此时的汽化过程叫做沸腾。

水沸腾时的温度，叫做沸点。沸点状态下的水称为饱和水。沸点也叫饱和温度。

水达到饱和温度后继续加热，水便开始汽化，水温不再升高，所加入的热量使部分水转化为蒸汽。这种蒸汽称为饱和蒸汽。使 1kg 饱和水完全汽化为饱和蒸汽所需要的热量称为汽化潜热。

(3) 水蒸气的过热 在等压下继续加热饱和蒸汽，蒸汽温度逐渐升高，这种温度高于饱和温度的蒸汽称为过热蒸汽。超出饱和温度的度数称为过热度。蒸汽过热所吸收的热量称为过热热量。过热蒸汽具有较高的做功能力和做功能力，用来推动汽轮发电机发电，过热蒸汽温度愈高，压力愈大，发电效率就愈高。

上述水蒸气的定压发生过程如图 1-3 所示。

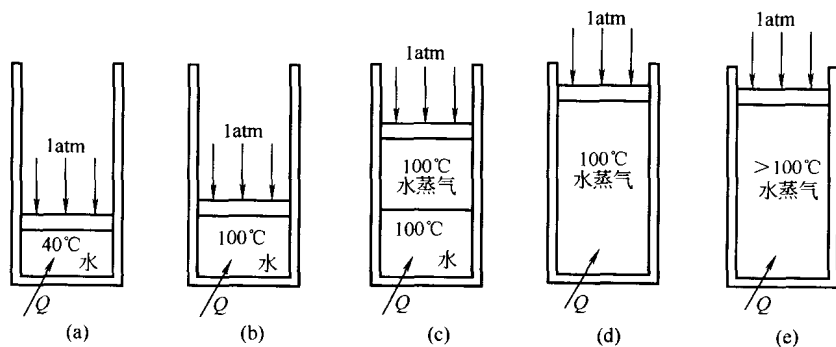


图 1-3 水蒸气的定压发生过程

热量在等压 1atm (101325Pa) 下加给初温为 40°C 的液态水。处于未开始蒸发的未饱和

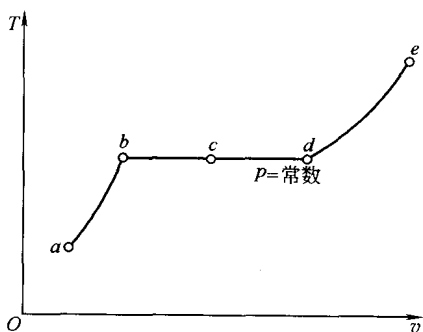


图 1-4 水在等压下加热过程的  $T-v$  图

水称为过冷水，见图 1-3 (a)。再加热使水温上升到 100°C，这时水仍然呈液态，但再加入热量就会引起部分水汽化，这种正要汽化的水称为饱和水。这时的温度是在该压力下液体能持续的最高温度，称为饱和温度，见图 1-3 (b)。如再继续加热，部分液体变成蒸汽，但温度不变，出现液体和蒸汽的混合物，处于湿蒸汽状态，如图 1-3 (c)。随着加热，所有液体全部汽化，成了饱和蒸汽状态，见图 1-3 (d)。此时，再继续加热，就会使蒸汽温度上升成为过热蒸汽，见图 1-3 (e)。

图 1-4 所示是水在等压下加热过程的  $T-v$  图。

### 1.3 热传递基本知识

为了认识热传递的规律，不妨先来分析常见的传热过程。例如在冬季，热由室内通过墙壁向室外传递，整个传热过程可分为三个阶段。

(1) 热由室内空气以对流换热和物体间的辐射换热方式传给墙内表面。

(2) 由墙内表面以固体导热方式传递到墙外表面。

(3) 由墙外表面以空气对流换热和物体间的辐射换热方式把热传给室外环境。显然,在其他条件不变时,室内外温差愈大,传热量也愈大。又如热水散热器的传热过程,热水的热量先以对流换热的方式传到器壁内侧,再以导热方式通过壁,然后由器壁外侧空气以对流换热和物体间辐射换热方式传给室内。从以上例子可见,整个热传递过程实际是由热传导(导热)、对流、辐射三种基本传热方式组成。

### 1.3.1 热传导

把金属棒的一端插入炉内加热,不久,棒的另一端也会变热,这说明热量从热端向冷端传递,但金属棒的各部分物质之间并没有发生相对位移,那么热量是如何传递的呢?物体各部分之间不发生相对位移时,依靠物体内部分子、原子和自由电子等微观粒子的热运动所引起的热量传递的过程称为热传导,或称导热。如热量从物体内部的高温部分传向低温部分,或从高温物体传向与它直接接触的低温物体的过程称为热传导过程。它在气体、液体和固体中均可进行。

(1) 热导率 物体传导热量的能力称为热导率,或称导热系数,用符号 $\lambda$ 表示,单位为 $W/(m \cdot K)$  [或 $W/(m \cdot ^\circ C)$ ]。各种物质具有不同的热导率,金属的热导率很高,故称为导热体。热导率愈大,传热能力愈强。气体的热导率很小,特别是空气的热导率更小;液体的热导率介于金属与气体之间,非金属固体的热导率在很大范围内变化,数值高的与液体接近,数值低的接近甚至低于空气的热导率数值。一般水垢的热导率仅是钢的 $1/50 \sim 1/30$ ,烟垢的热导率还要小。因此,锅炉受热面上结有水垢和烟垢后将使传热量大大减少。

常用物质的热导率见表1-4。

表1-4 常用物质在常温下( $20^\circ C$ )的热导率/ $[W/(m \cdot K)]$

| 物质名称 | 热 导 率     | 物质名称    | 热 导 率       |
|------|-----------|---------|-------------|
| 纯铜   | 399       | 耐火黏土砖   | 0.71~0.85   |
| 碳钢   | 40        | 岩棉玻璃布缝毡 | 0.031       |
| 合金钢  | 38        | 石棉      | 0.95        |
| 水    | 0.599     | 蛭石砖     | 0.093~0.116 |
| 轻质油  | 0.14      | 玻璃纤维    | 0.035~0.046 |
| 空气   | 0.023     | 锅炉烟灰    | 0.058~0.116 |
| 混凝土  | 0.81~1.28 | 锅炉水垢    | 0.58~2.3    |
| 铝    | 204       | 软木      | 0.047       |
| 银    | 419       | 玻璃      | 0.7~0.8     |

(2) 保温材料 一般把热导率小的材料称为保温材料,又称为隔热材料或绝热材料。国家标准规定:凡平均温度不高于 $350^\circ C$ 时的热导率不大于 $0.12 W/(m \cdot K)$ 的材料称为保温材料。如矿渣棉、玻璃棉、硅藻土、岩棉板、岩板玻璃布缝毡、膨胀珍珠岩、聚氨酯硬质泡沫塑料及中孔微珠等保温材料,它们都具有容重轻、保温性能好、价格便宜、施工方便等优点。

(3) 导热的基本定律 导热的基本定律又称傅里叶定律,它是从实践中总结出来的规律。

a. 单层平壁导热 图1-5所示为单层平壁导热,平壁厚度为 $\delta$ ,表面积为 $F$ ,壁面两侧的温度分别为 $t_{w_1}$ 和 $t_{w_2}$ ,且 $t_{w_1} > t_{w_2}$ 。

实践表明,单位时间内通过壁面 $F$ 传导的热量与热导率成正比,与壁面面积成正比,

与壁面面积成正比, 与壁两侧温度差成正比, 与壁厚成反比, 即

$$Q = \lambda F \frac{t_{w_1} - t_{w_2}}{\delta} = \lambda F \frac{\Delta t}{\delta} \quad (1-8)$$

或

$$q = \lambda \frac{t_{w_1} - t_{w_2}}{\delta} = \lambda \frac{\Delta t}{\delta} \quad (1-9)$$

式中,  $Q$  为单位时间内通过壁面的导热量,  $W$ ;  $q$  为单位时间内通过单位面积的导热量,  $W/m^2$ ;  $\delta$  为壁厚,  $m$ ;  $\Delta t = t_{w_1} - t_{w_2}$ , 为导热温度差,  $^{\circ}C$ ;  $F$  为导热面积,  $m^2$ ;  $\lambda$  为热导率,  $W/(m \cdot ^{\circ}C)$ 。

b. 多层平壁导热 在工程中常见到的是多层平壁, 如锅炉炉墙有耐火砖层和保温层; 房屋的墙壁有砖层和内、外抹灰层等。

图 1-6 所示为双层平壁, 设两层平壁接触紧密, 接触处为同一温度  $t_{w_2}$ 。平壁厚度分别为  $\delta_1$ 、 $\delta_2$ , 表面积为  $F$ , 壁面两外侧的温度分别为  $t_{w_1}$  和  $t_{w_3}$ , 且  $t_{w_1} > t_{w_2} > t_{w_3}$ 。

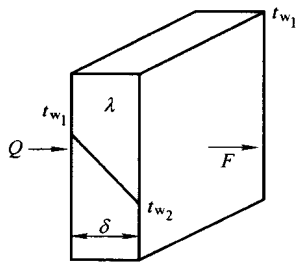


图 1-5 单层平壁导热

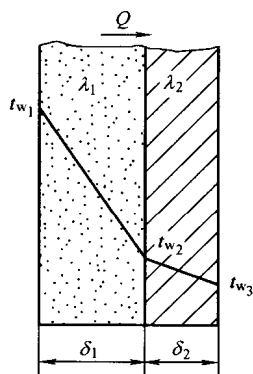


图 1-6 双层平壁导热

对于稳定导热, 进入壁面的热量应等于流出的热量, 才能保证壁面温度不变化, 即:

$$Q_1 = Q_2 = Q \quad (1-10)$$

式中,  $Q_1$  为通过第 1 层平壁的热量,  $W$ ;  $Q_2$  为通过第 2 层平壁的热量,  $W$ 。

$$Q_1 = \lambda_1 F \frac{t_{w_1} - t_{w_2}}{\delta_1}$$

或

$$t_{w_1} - t_{w_2} = \frac{\delta_1}{\lambda_1 F} Q_1 = \frac{\delta_1}{\lambda_1 F} Q \quad (1-11)$$

$$Q_2 = \lambda_2 F \frac{t_{w_2} - t_{w_3}}{\delta_2}$$

或

$$t_{w_2} - t_{w_3} = \frac{\delta_2}{\lambda_2 F} Q_2 = \frac{\delta_2}{\lambda_2 F} Q \quad (1-12)$$

由式 (1-11)+式 (1-12) 得

$$t_{w_1} - t_{w_3} = \left( \frac{\delta_1}{\lambda_1 F} + \frac{\delta_2}{\lambda_2 F} \right) Q$$

所以

$$Q = \frac{t_{w_1} - t_{w_3}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1 F} + \frac{\delta_2}{\lambda_2 F}} \quad (1-13)$$

或

$$q = \frac{t_{w_1} - t_{w_3}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}} \quad (1-14)$$