

GONGYE GUOLU SILUGONG



燃气热力行业职业技能岗位培训用书

# 工业锅炉司炉工

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

# 工业锅炉司炉工

丁崇功 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书全面系统地阐述了工业锅炉司炉工的知识要求(应知)和操作要求(应会),内容包括:基础知识、锅炉概述、锅炉机组热平衡、工业锅炉炉型、工业锅炉本体结构、锅炉辅机及附件、锅炉微机控制、锅炉水处理、锅炉运行与调节、锅炉运行事故分析与处理等。

本书是燃煤工业锅炉、燃油工业锅炉、燃气工业锅炉司炉工人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师生的教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

工业锅炉司炉工/丁崇功主编. —北京:化学工业出版社, 2006. 8

燃气热力行业职业技能岗位培训用书

ISBN 978-7-5025-9367-4

I. 工… II. 丁… III. 工业锅炉-司炉-技术培训-教材 IV. TK229

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 106132 号

---

燃气热力行业职业技能岗位培训用书

**工业锅炉司炉工**

丁崇功 主编

责任编辑:董琳

文字编辑:余纪军

责任校对:顾淑云

封面设计:史利平

\*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询:(010)64982530

(010)64918013

购书传真:(010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 16 $\frac{1}{4}$  字数 422 千字

2007 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-5025-9367-4

定 价: 38.00 元

---

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

## 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

本书是根据国家建设部 2002 年 4 月颁发的燃气行业燃气管道工等 27 个工种中的“热力司炉工”《职业技能岗位标准、鉴定规范、鉴定题库》的要求编写的。

从改革开放以来,随着我国科学技术进步和城乡供热事业的发展,作为主要热能设备之一的锅炉,增长速度很快,到目前为止,全国在用的工业锅炉约 54 万台。锅炉是一种承受压力、高温、磨损,且具有爆炸危险的特种设备,锅炉运行中排放的废渣、废液、废气对生态环境造成污染。为了贯彻“安全第一,预防为主”的生产方针,搞好锅炉安全管理,确保锅炉安全经济运行,我们必须普及锅炉安全知识,对司炉工人加强培训和考核定级,使司炉工人了解锅炉基本知识和基础理论,并对锅炉的结构、燃烧设备、锅炉辅机、附件、仪表、微机控制、环境保护、水质处理、锅炉安全操作技术和维护保养、锅炉事故分析与处理等知识有较深的理解,同时熟练掌握应会的操作技能。

本书是为燃煤工业锅炉、燃油工业锅炉、燃气工业锅炉的高级、中级和初级司炉工人编写的培训教材,教材基本覆盖了“岗位鉴定规范”和“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编写的做法,而是在每章的复习思考题里按高级工、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。

本书引用国家最新的锅炉规程、规范和标准,反映了中国工业锅炉的新成就和国内、外工业锅炉的先进技术。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的实用价值的教材。本书内容包括基础知识、锅炉概述、锅炉机组热平衡、工业锅炉炉型、工业锅炉本体结构、锅炉辅机及附件、锅炉微机控制、锅炉水处理、锅炉运行与调节、锅炉运行事故分析与处理等。

全书共分 10 章,由刘岗(第 1 章),丁崇功(第 2 章、第 3 章、第 4 章、第 5 章、第 6 章、第 10 章),李巨旺(第 7 章),丁华崢(第 8 章、第 9 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。

在本书编写过程中,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

2006 年 4 月于西安

# 目 录

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| <b>第 1 章 基础知识</b> .....     | 1   |
| 1.1 流体力学基础 .....            | 1   |
| 1.2 热工基础 .....              | 6   |
| 1.3 金属工艺学基础 .....           | 13  |
| 1.4 机械基础 .....              | 18  |
| 复习思考题 .....                 | 25  |
| <b>第 2 章 锅炉概述</b> .....     | 31  |
| 2.1 锅炉的定义、用途和分类 .....       | 31  |
| 2.2 锅炉设备的构成 .....           | 33  |
| 2.3 锅炉的工作过程 .....           | 34  |
| 2.4 工业锅炉参数系列和技术经济指标 .....   | 38  |
| 2.5 工业锅炉产品型号 .....          | 41  |
| 复习思考题 .....                 | 43  |
| <b>第 3 章 锅炉机组热平衡</b> .....  | 45  |
| 3.1 锅炉燃料 .....              | 45  |
| 3.2 燃烧 .....                | 54  |
| 3.3 热平衡与热效率 .....           | 60  |
| 复习思考题 .....                 | 65  |
| <b>第 4 章 工业锅炉炉型</b> .....   | 68  |
| 4.1 锅壳锅炉 .....              | 68  |
| 4.2 水管锅炉 .....              | 74  |
| 4.3 热水锅炉 .....              | 79  |
| 复习思考题 .....                 | 84  |
| <b>第 5 章 工业锅炉本体结构</b> ..... | 86  |
| 5.1 燃烧设备 .....              | 86  |
| 5.2 受热面部件 .....             | 108 |
| 复习思考题 .....                 | 121 |
| <b>第 6 章 锅炉辅机及附件</b> .....  | 128 |
| 6.1 锅炉通风设备 .....            | 128 |
| 6.2 锅炉给水设备 .....            | 132 |
| 6.3 锅炉烟气净化设备 .....          | 137 |
| 6.4 上煤设备 .....              | 140 |
| 6.5 除灰渣设备 .....             | 142 |
| 6.6 锅炉附件 .....              | 144 |
| 复习思考题 .....                 | 157 |
| <b>第 7 章 锅炉微机控制</b> .....   | 164 |
| 7.1 微机基本知识 .....            | 164 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 7.2 工业锅炉微机控制 .....            | 167 |
| 复习思考题 .....                   | 178 |
| <b>第8章 锅炉水处理</b> .....        | 179 |
| 8.1 水质指标和水质标准 .....           | 179 |
| 8.2 锅外化学水处理 .....             | 182 |
| 8.3 锅内加药水处理 .....             | 190 |
| 8.4 锅炉给水除氧 .....              | 191 |
| 8.5 锅炉化学清洗 .....              | 196 |
| 复习思考题 .....                   | 198 |
| <b>第9章 锅炉运行与调节</b> .....      | 201 |
| 9.1 锅炉启动前的检查和准备 .....         | 201 |
| 9.2 锅炉的启动 .....               | 202 |
| 9.3 蒸汽锅炉运行与调节 .....           | 208 |
| 9.4 热水锅炉运行与调节 .....           | 211 |
| 9.5 锅炉燃烧调节 .....              | 213 |
| 9.6 锅炉运行操作与维护 .....           | 216 |
| 9.7 锅炉运行状态检验 .....            | 219 |
| 9.8 锅炉停炉 .....                | 220 |
| 9.9 锅炉停炉保养 .....              | 223 |
| 复习思考题 .....                   | 224 |
| <b>第10章 锅炉运行事故分析与处理</b> ..... | 228 |
| 10.1 锅炉事故分类及处理时应注意事项 .....    | 228 |
| 10.2 蒸汽锅炉超压事故 .....           | 230 |
| 10.3 蒸汽锅炉缺水事故 .....           | 230 |
| 10.4 蒸汽锅炉满水事故 .....           | 231 |
| 10.5 蒸汽锅炉汽水共腾事故 .....         | 232 |
| 10.6 蒸汽锅炉炉管爆破事故 .....         | 232 |
| 10.7 过热器损坏事故 .....            | 233 |
| 10.8 省煤器损坏事故 .....            | 234 |
| 10.9 蒸汽锅炉水击事故 .....           | 235 |
| 10.10 空气预热器损坏事故 .....         | 236 |
| 10.11 热水锅炉汽化事故 .....          | 236 |
| 10.12 热水锅炉水击事故 .....          | 238 |
| 10.13 燃油锅炉炉膛灭火事故 .....        | 239 |
| 10.14 锅炉炉膛爆炸事故 .....          | 239 |
| 10.15 尾部烟道二次燃烧及爆炸事故 .....     | 240 |
| 复习思考题 .....                   | 240 |
| <b>附录 部分复习思考题答案</b> .....     | 246 |
| <b>参考文献</b> .....             | 251 |

# 第 1 章 基础知识

## 1.1 流体力学基础

流体是易于流动物体的总称，流体包括液体和气体，人们在日常生活中接触最多的流体是水和空气。

液体没有固定的形状，但有一定的体积，在重力（地球引力）作用下，液体具有自由表面；气体没有固定的形状和体积，在重力作用下也没有自由表面，总是充满所在的空间。

### 1.1.1 流体的力学性质

#### 1.1.1.1 质量与重力

所有流体都具有一定的质量，因此，它也像固体物质一样受到地心的吸引力，称为重力。不同质量的物体，其重力是不相同的。物体的质量大，其重力也大；反之，物体质量小，其重力也小。相同质量的物体，随着其位于地球上的位置不同，重力也不同：在赤道位置的重力要小一些，因为赤道处的地面距地心较远，受地心吸引力较小所致；而在南、北极位置的重力要大一些，因为南、北极处的地面距地心较近，受地心吸引力较大所致。地球上所有物体所受重力均具有方向性，重力总是垂直于地面而指向地心。

#### 1.1.1.2 流体的密度和相对密度

(1) 密度 密度是指单位体积流体所具有的质量，常用符号  $\rho$  表示，单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ 、 $\text{t}/\text{m}^3$ 。如  $4^\circ\text{C}$  纯水的密度  $\rho_{\text{水}} = 1000 \text{kg}/\text{m}^3$ ；标准状态下空气的密度  $\rho_{\text{空}} = 1.293 \text{kg}/\text{m}^3$ 。

##### (2) 相对密度

① 液体的相对密度 液体的相对密度是指液体的密度与  $4^\circ\text{C}$  时水的密度之比值，相对密度是一个没有单位的数值。

② 气体的相对密度 气体的相对密度是指气体的密度与标准状态下空气的密度的比值，相对密度是一个没有单位的数值。

#### 1.1.1.3 流体的黏滞性

流体的黏滞性是指流体内部质点之间或流层之间因相对运动而产生的摩擦力，流体的黏滞性只有在流体流动时才能显示出来。

流体的层与层之间发生相对运动时，速度高的一层会带动速度低的一层运动，使其产生加速度，而速度低的一层又会阻止速度高的一层运动，使其产生减速度。带动力和阻力是大小相等、方向相反的一对力，称为流体的内摩擦力或黏滞力。为了克服内摩擦力，维持流体运动，就必须供给一定的能量。因此流体运动时，内摩擦力是造成阻力损失的原因。

流体的黏滞性与流体的种类和温度有关。不同种类的流体具有不同的黏滞性，如油的黏滞性比水大。

温度变化，流体黏滞性跟着变化，对于液体来说，温度升高时，黏滞性减小，温度降低时，黏滞性增大；而对气体与此相反，温度升高时，黏滞性增大，温度降低时，黏滞性减小。

#### 1.1.1.4 流体的可压缩性

流体在密闭状态下，随着压强的增加，体积减小而密度增加的性质，称为流体的可压缩性。

液体的可压缩性非常小,如纯水在常温下,当压力从 0.1MPa 增加到 10MPa 时,体积缩小不到 0.5%,因此,在工程应用中可忽略不计。而气体则具有明显的可压缩性,气体的可压缩性主要是根据理想气体状态方程而定。在等温状态下,气体的绝对压力与密度成正比,因此,气体视为可压缩性流体。

#### 1.1.1.5 流体的热胀性

流体随着温度的升高,密度减小而体积增大的性质称为流体的热胀性。只有纯水从 0℃ 加热到 4℃ 时,体积不但不增加反而缩小,而大于 4℃ 后其体积随温度的增加而增大。当温度变化不大时,水的膨胀性不太明显,但若温度变化大时,其热胀性是不能忽视的。如热水锅炉与热水供热系统,其水容积很大,在常温下充满水后,锅炉才能点火、升压,水在系统中循环流动,水温不断升高,水的体积明显膨胀,并在系统中产生很高的压力,直接威胁热水锅炉及供热管道的安全运行。因此,在系统的最高点应设置膨胀水箱来容纳系统中多余的水量,或设置安全阀,当由于体积膨胀而使系统的压力超过允许承受的压力时,以排除部分热水,使压力降低,确保安全运行。

气体的热膨胀性非常显著,气体的密度、体积随着温度的变化发生较大的变化。气体的热胀性主要是依据理想气体状态方程而定。在等压状态下,气体的密度与绝对温度成反比,即气体的绝对温度升高,其密度成比例减小,而体积则成比例增加。

#### 1.1.1.6 流体的浮力

放置在流体中的物体所受到的向上的托力称为浮力。根据阿基米德定律,浸在流体中的物体所受到的浮力的大小,等于被物体所排开的流体的重力。当物体只有一部分浸在液体中时,它所受到的浮力就等于浸在液体中的那一部分物体所排开的液体的重力。

如果设物体的重力为  $G$ ,物体在液体中受到的浮力为  $P$ ,会出现下列三种情况:

- (1) 当  $G > P$  时,物体会下沉到液体的底部;
- (2) 当  $G = P$  时,物体可悬浮在液体中的任意位置;
- (3) 当  $G < P$  时,物体浮在液体表面。此时物体浸在液体中的那部分体积所排开液体的重力等于物体的自重,物体处于平衡状态,其位置保持不变。

流体的浮力现象在工程上是经常加以利用的,如除氧水箱上的浮球控制阀,就是利用浮力原理控制阀门开度来调节待除氧水量,以保持除氧水箱的水位恒定;浮球式锅炉水位报警器就是利用报警器内浮球随锅炉水位升降而移动位置,当水位达到最高和最低危险水位时,浮球推动传动杆,使汽笛阀门开启,蒸汽通过汽笛,鸣笛报警。

### 1.1.2 流体的静压力和静压强 (习惯上常将压强称为压力)

#### 1.1.2.1 液体的静压力和静压强

液体之所以能处于静止状态,是由于它受到了外界条件的约束,例如水箱中的水能静止不动,是因为受到了水箱底面和侧壁面的约束力,根据作用力和反作用力的原理,水对水箱底部和侧壁也有反作用力,这就是水的静压力。

作用在单位面积上的静压力,称为静压强,用符号  $p$  表示,单位为: Pa, 即  $\text{N/m}^2$ ; kPa; MPa。

液体静压强的基本特性有: ①液体静压强的方向与作用面垂直,并指向作用面; ②在液体内部同一深度的不同位置、不同方向的静压强都是相等的; ③液体的静压强随着液体深度的增减而增减。

#### 1.1.2.2 气体的静压力和静压强

(1) 大气压强 包围在地球周围的大气,因受地球引力的作用,对处与其中的一切物体均产生压强,称为大气压强。以符号  $p_a$  表示。

大气压强随着地球的纬度、标高、温度的不同而变化。经测定在纬度  $45^\circ$  处的海平面上全年平均大气压强为 760mmHg (毫米汞柱), 称为 1atm (标准大气压强)。1atm 等于 101325Pa。

(2) 绝对压强 绝对压强是指以没有气体存在的绝对真空时的压强为零点起算的压强值。以符号  $p'$  表示。

(3) 相对压强 相对压强是指以当地大气压强  $p_a$  为零点起算的压强值。以符号  $p$  表示。压力表测量出来的压强为相对压强, 又称表压。

相对压强和绝对压强的关系为:

$$p' = p_a + p \quad (1-1)$$

式中,  $p'$  为绝对压强, Pa;  $p_a$  为当地大气压强, Pa;  $p$  为相对压强, Pa。

(4) 真空度 流体某处的绝对压强小于当地大气压强, 称为负压或真空, 其差值称为真空度。以符号  $p_v$  表示。

真空度与绝对压强的关系为

$$p_v = p_a - p' \quad (1-2)$$

式中,  $p_v$  为真空度, Pa;  $p_a$  为当地大气压强, Pa;  $p'$  为绝对压强, Pa。

真空度总是正值, 绝对压强愈小, 则真空度愈大。

(5) 绝对压强、相对压强与真空度的关系 绝对压强、相对压强与真空度的关系如图 1-1 所示。

当绝对压强大于当地大气压强时, 相对压强 (表压) = 绝对压强 - 当地大气压强。

当绝对压强小于当地大气压强时, 真空度 = 当地大气压强 - 绝对压强。

**计算例题 1.** 已测量出水泵入口管道中流体的真空度为 1500Pa, 当地大气压强为 98000Pa。求此处流体的绝对压强和相对压强。

**【解】** 由公式 (1-2) 演变可得:

$$p' = p_a - p_v = 98000 - 1500 = 96500 \text{ Pa}$$

由公式 (1-1) 演变可得:

$$p = p' - p_a = 96500 - 98000 = -1500 \text{ Pa}$$

答: 流体的绝对压强为 96500Pa; 相对压强为 -1500Pa。

从以上计算可知, 对于绝对压强比大气压强低的流体, 其相对压强为负值, 而真空度为正值, 二者数值上相等。绝对压强愈小, 其真空度愈大。

### 1.1.2.3 压强单位

国际单位制中, 压强单位用 Pa (帕斯卡)、kPa (千帕)、MPa (兆帕) 表示。1Pa = 1N/m<sup>2</sup>。

工程上常以 1kgf/cm<sup>2</sup> 为 1 个工程大气压, 用符号 at 表示。

$$1 \text{ at} = 1 \text{ kgf/cm}^2 = 9.807 \times 10^4 \text{ Pa}$$

在实际应用中, 经常用“液柱高”表示压强单位。例如, 某点的压强为 1mH<sub>2</sub>O, 其含义为该点压强等于 1m 深的水对 1m<sup>2</sup> 底面积的压强。即:

$$1 \text{ mH}_2\text{O} = \rho_{\text{水}} g h = 1000 \times 9.807 \times 1 = 9807 \text{ N/m}^2 = 9807 \text{ Pa} = 9.807 \text{ kPa}$$

同理, 若某点压强为 1mHg, 则其含义为该点压强等于 1m 深的水银对 1m<sup>2</sup> 底面积的压

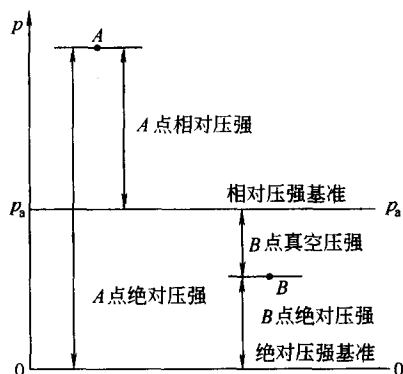


图 1-1 压强关系图

强, 即:

$$1\text{mHg}=\rho_{\text{汞}}gh=13.6\times10^3\times9.807\times1=1.333\times10^5\text{Pa}=133.3\text{kPa}$$

各种压强单位之间的换算见表 1-1。

表 1-1 压强单位换算表

| 项 目   | 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                    |

### 1.1.3 流量和流速

#### 1.1.3.1 流量

在存在介质流动的管道上取一与流体流动方向垂直的断面(过流断面),单位时间内通过该断面的流体体积或质量,称为流量。前者称为体积流量,用符号  $Q$  表示,单位为 L/s 或 m<sup>3</sup>/h;后者称为质量流量,用符号  $G$  表示,单位为 kg/s 或 t/h。

#### 1.1.3.2 流速

流体在管道中单位时间内所流过的距离,称为流速,用符号  $v$  表示,单位为 m/s。

由于流体在管道中流动时,过流断面上各点的流速是不相同的,为方便起见,取断面上各点流速的平均值,称为管道中流体的平均流速。在工程应用上所指的流速,即为流体在过流断面上的平均流速。

当管道的断面面积(或直径)不变时,流速与流量成正比,即流速提高几倍,流量也随之增大几倍。

#### 1.1.3.3 流速和流量的测量

目前工业上常用的流量的测量方法大致可分为容积式和速度式两类,速度式测量方法中又以差压式流量测量方法使用历史最久和应用最为广泛。

差压式测量方法的原理是根据伯努利方程,通过测量流体流动过程中产生的差压来测量流速或流量。属于这种测量方法的流量计有:毕托管、均速管、节流变压降流量计等。

(1) 毕托管流量计 毕托管流量计是测量流体的全压和静压之差  $\Delta P$ (即动压),再通过公式计算流速。

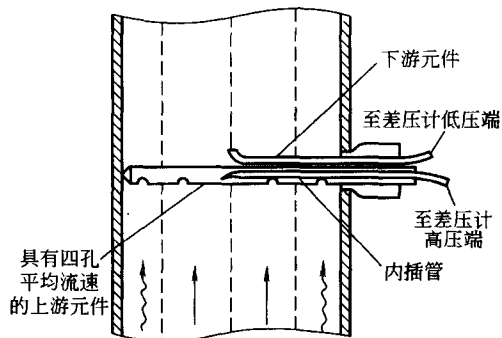


图 1-2 均速管流量计

(2) 均速管流量计 流体在管内流动时,在过流断面上各点的流速是不一样的。其中管中心流速最大,由中心向管边流速愈来愈小,到管边壁面处流速为 0。要测量流经管内的流体的体积流量,就必须测量过流断面上的平均流速。

工业上采用均速管测定过流断面上有代表性的各点的流速,并自动取各点速度的平均值,从而求取容积流量。图 1-2 所示为均速管结构示意图。在测量管道的直径方向插

入圆截面均速管, 均速管的迎流面上有4个测压孔, 测取4点的全压, 并在均速管内腔中平均后由内插管引出; 另一压力由均速管背流面管道中心处测量, 此为静压, 两压力差即为动压, 从而计算出平均流速和体积流量。

#### 1.1.4 流体的阻力损失

流体的阻力损失分为两类: 沿程阻力损失和局部阻力损失。

沿程阻力损失与局部阻力损失之和即为管网总阻力损失。

##### 1.1.4.1 沿程阻力损失

流体在运动时由于克服流体与管壁及流速不同的各相邻层之间的摩擦, 造成流体本身能量的逐渐减少 (表现为压力不断降低), 称为沿程阻力损失, 以符号  $h_f$  表示。其计算公式为:

$$h_f = \frac{\lambda l}{d} \times \frac{v^2}{2g} \quad (1-3)$$

式中,  $h_f$  为沿程阻力损失,  $\text{mH}_2\text{O}$ ;  $\lambda$  为沿程阻力系数;  $l$  为管段的长度,  $\text{m}$ ;  $d$  为管道的直径,  $\text{m}$ ;  $v$  为断面的平均流速,  $\text{m/s}$ ;  $g$  为重力加速度, 取  $g=9.81\text{m/s}^2$ 。

沿程阻力系数, 与流体的黏性、流速及管壁粗糙度有关。

式 (1-3) 中, 除  $\lambda$  外, 其余各物理量都很容易测量。因此, 计算沿程阻力损失的关键在于如何确定沿程阻力系数  $\lambda$ 。由于  $\lambda$  受很多因素影响, 难以用理论公式准确的推导出来。

尼古拉兹在均匀砂砾粗糙的管道中, 通过大量的试验, 综合成计算阻力系数  $\lambda$  的纯经验公式和半经验公式。

为了探索沿程阻力系数  $\lambda$  的变化规律, 尼古拉兹根据流体的流动状况, 将流体分成五个阻力区进行试验。

第一区为层流区, 其雷诺数  $Re < 2000$ 。

第二区为临界区  $2000 \leq Re \leq 4000$ 。

第三区为紊流光滑区  $Re > 4000$ 。

第四区为紊流过渡区  $Re > 4000$ 。

第五区为紊流粗糙区 (阻力平方区)  $Re > 4000$ 。

##### 1.1.4.2 局部阻力损失

局部阻力损失是指流体运动时, 由于边界条件的改变 (如三通、弯头、变径、阀门等) 造成流速改变和产生的涡流所造成的能量损失, 称为局部阻力损失, 用符号  $h_j$  表示。

局部阻力损失的计算公式为:

$$h_j = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (1-4)$$

式中,  $h_j$  为局部阻力损失,  $\text{mH}_2\text{O}$ ;  $\zeta$  为局部阻力系数;  $v$  为与产生局部阻力相对应的断面平均流速,  $\text{m/s}$ 。

由式 (1-3)、式 (1-4) 可知, 沿程阻力的大小与管道长度成正比, 与管径成反比, 与流速的平方成正比; 局部阻力的大小与流速的平方及局部阻力系数成正比, 而局部阻力系数取决于管道附件的数量和边界条件的变化, 附件愈多, 边界条件的变化愈剧烈, 局部阻力系数也愈大。

流速是影响阻力的最重要的因素, 如果其他条件都不变, 若流速提高到原来流速的2倍, 则总阻力将是原来的4倍。因此, 采用过高的流速对长期运行来说是很不经济的。在选用输送管道的管径时, 既要考虑到长期运行的经济性, 又要考虑到节省建设资金, 应通过技术经济比较后确定。

## 1.2 热工基础

热工学是研究物质的热力学性质、热量传递过程的规律和特点、热能转换成机械能的规律和方法以及如何有效而合理地利用能源的一门应用科学。

### 1.2.1 物质的组成及状态

#### 1.2.1.1 物质的组成

一切物体都是由物质组成的。如锅炉和汽轮机都是由钢制成的，钢就是物质；铜、铝、水泥、石灰、砖、玻璃、油、水、空气等都是物质。物质是由分子组成的，分子是保持物质性质的最小微粒，它非常微小，在标准状况下， $1\text{cm}^3$  的气体中就含有  $2.7 \times 10^{19}$  个气体分子。分子是由原子组成的。有些物质的分子是由同一种化学元素的原子组成，称为单质，如氧气是由两个氧原子组成，用分子式  $\text{O}_2$  表示；有些物质是由两个以上化学元素的原子组成，称为化合物，如水分子是由两个氢原子一个氧原子组成，用分子式  $\text{H}_2\text{O}$  表示。单质和化合物都是只由一种分子组成；如果某一种物质内含有两种或两种以上的分子时，则称为混合物，如煤是由碳、水、灰及各种挥发分组成。

#### 1.2.1.2 物质的状态

##### (1) 物质的三种状态

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。

(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，就会汽化成蒸汽（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）。

在自然界中物质状态变化有下列几种形式：①物质由固体变为液体的现象，称为溶解；②物质由液体变为固体的现象，称为凝固；③物质由液体变为气体的现象，称为汽化；④物质由气体变为液体的现象，称为液化（冷凝）；⑤物质由固体变为气体的现象，称为升华；⑥物质由气体变为固体的现象，称为凝华。

#### 1.2.1.3 物质的状态参数

(1) 温度 温度是标志物体冷热程度的物理量，温度概念的建立是以热平衡为基础的。它反映了物质分子热运动的强弱程度，分子热运动愈激烈的物质，其温度也愈高。常用的温度有摄氏温度、热力学温度，有时也采用华氏温度。

① 摄氏温度 在  $101325\text{Pa}$  绝对压力下，将水结冰时（冰点）的温度定为零摄氏度，沸腾时的温度（沸点）定为摄氏  $100$  度，两者之间平均分成  $100$  等分，每一等分为  $1$  个摄氏度。用符号  $t$  表示，单位为  $^{\circ}\text{C}$ （摄氏度）。例如： $80$  摄氏度可以写成  $80^{\circ}\text{C}$ ；零下  $15$  摄氏度可写成  $-15^{\circ}\text{C}$ 。摄氏温度非常实用，各行各业普遍采用。锅炉铭牌上所标示的蒸汽温度或热

水温度都是以摄氏温度表示的。

② 热力学温度 热力学温度的间隔和摄氏温度相等，只是它们的起始点不同，热力学温度是将标准大气压力下，摄氏温度的 $-273.15^{\circ}\text{C}$ ，规定为 $0\text{K}$ ，则水的冰点的热力学温度为 $273.15\text{K}$ ，水的沸点热力学温度为 $373.15\text{K}$ 。热力学温度（也称绝对温度）用符号 $T$ 表示，单位为 $\text{K}$ （开）。例如：热力学温度 $280$ 开可写成 $280\text{K}$ 。

热力学温度与摄氏温度之间的换算关系为

$$T=t+273.15 \quad (1-5)$$

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

③ 华氏温度 华氏温度是英、美等国较通用的一种温度，华氏温度是把标准大气压下水凝固成冰时的温度（冰点）规定为 $32$ 华氏度，水沸腾时的温度（沸点）规定为 $212$ 华氏度，在 $32$ 华氏度与 $212$ 华氏度之间平均分为 $180$ 个等分，每一个等分就是 $1$ 华氏度。华氏温度用符号 $t_{\text{F}}$ 表示，单位为 $^{\circ}\text{F}$ 。

摄氏温度与华氏温度之间的换算关系为：

$$t_{\text{F}}=\frac{9}{5}t+32 \quad (1-6)$$

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

## (2) 功和功率

① 功 当人举起重物时，物体在力的方向上发生了位移，这说明力对物体做了功。

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位移的乘积。用符号 $W$ 表示，单位为 $\text{J}$ （焦）、 $\text{kJ}$ （千焦）。

② 功率 单位时间内所做的功称为功率。用符号 $P$ 表示，单位为 $\text{W}$ （瓦）、 $\text{kW}$ （千瓦）、 $\text{MW}$ （兆瓦）。

## (3) 热量和热功率

① 热量 热量是物体内部所含热能的数量。热量可以使物体本身的温度、体积及形态发生变化。物体具有热能的大小，与其本身质量和性质有关。如果两种质量相同的同种物体，则温度高的物体含热量多，反之，温度低的物体含热量就少，热量的单位与功的单位相同。

$1\text{kg}$ 纯水温度升高或降低 $1^{\circ}\text{C}$ ，所吸收或放出的热量为 $4.1868\text{kJ}$ ，相当于工程单位 $1\text{kcal}$ （千卡），即 $1\text{kcal}=4.1868\text{kJ}$ 。

② 热功率 在日常生活和工业生产中，对物体进行热加工，不仅需要知道物体吸收或放出了多少热量，而且需要知道加热（或冷却）时间的长短，这就需要应用热功率的概念。所谓热功率是指单位时间内物体吸收或放出的热量。国际单位制中常用 $\text{kW}$ 表示，工程单位制常用 $\text{kcal/h}$ 表示，两者之间的关系为： $1\text{kW}=860\text{kcal/h}$ 。

(4) 比热容 比热容是指单位质量的物质，温度升高（或降低） $1^{\circ}\text{C}$ 时，所吸收（或放出）的热量。用符号 $C$ 表示，单位为 $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。比热容不是一个恒定的值，它与物质的种类、温度和所处的过程有关。比热容有两种形式：

① 比定压热容（ $C_p$ ）是指物质吸收热量或放出热量是在定压过程下进行的。

② 比定容热容（ $C_v$ ）是指物质吸收热量或放出热量是在定容过程下进行的。

## (5) 内能和比焓

① 内能 内能是气体内部所具有的分子动能与分子位能的总和。用符号 $u$ 表示，单位为 $\text{J/kg}$ 。

气体分子的动能包括：分子直线运动的动能；分子旋转动的动能；分子内部原子的振动

能和原子内部电子的振动能。

气体分子动能的大小与温度高低密切相关，气体温度愈高，动能愈大；反之，则动能愈小。

气体分子的位能是气体内部所具有的用于克服分子间作用力所形成的一种内能。分子位能的大小与分子间距离有关，分子间距离愈小，位能愈大；反之，则位能愈小。

② 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  $\text{J/kg}$ 。

### 1.2.2 能量守恒原理

能量守恒原理也称热力学第一定律。热力学第一定律表明，能既不能被创造，也不能被销毁，只能由一种形式改变为另一种形式。

理想气体在闭口系统（即没有质量流动）的能量平衡属于多变过程。等压过程、等容过程、等温过程、绝热过程等都是多变过程的特殊情况。

### 1.2.3 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）。

① 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。

② 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。

③ 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）。

### 1.2.4 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。

### 1.2.5 水和水蒸气

#### 1.2.5.1 水的沸腾

在一定压力下，水被加热以后，水温就会逐渐升高，蒸发速度也会相应加快，到一定温度时，水便开始沸腾。沸腾是水体内部和表面同时进行的剧烈汽化过程。水沸腾时的温度，称为沸点。沸腾状态下的水称为饱和水，沸点也叫饱和温度，其对应的压力称为饱和压力。1kg 的水由  $0^\circ\text{C}$  加热至饱和温度，所吸的热量称为水的液体热，即饱和水的比焓，单位为

kJ/kg。沸腾现象不仅用加热的方法可以实现,而且用减压的方法也可以实现,对热水进行减压,也会产生大量蒸汽。如将 70℃ 热水的压力降至 0.02MPa (绝对压力),此时水就会沸腾、汽化,真空除氧器就是利用这个原理制造的。

### 1.2.5.2 水的汽化

在一定压力下水达到饱和温度后,继续加热,水便开始汽化,此时水温不再升高,所加入的热量使部分水转化为蒸汽,这种蒸气称为饱和蒸汽。继续加热会不断地产生饱和蒸汽,容器中饱和蒸气不断增多,而饱和水则不断减少,直至完全汽化成蒸汽。在整个汽化阶段,虽然不断加热,但温度始终保持不变。使 1kg 饱和水完全汽化为干饱和蒸汽所需的热量称为汽化潜热。

汽化潜热随饱和压力的变化而变化,饱和压力愈高,则汽化潜热愈小。从表 1-2 中可以查得饱和压力为 1.0MPa 时,汽化潜热为 2016.36kJ/kg;饱和压力为 2.0MPa 时,汽化潜热为 1892.85kJ/kg;饱和压力 3.0MPa 时,汽化潜热为 1799.07kJ/kg。

当饱和压力升高到 22.104MPa 时,汽化潜热为 0,相应的温度为 374.15℃。此时的状态称为临界状态,其压力称为临界压力,其温度称为临界温度。

饱和蒸汽有湿饱和蒸汽和干饱和蒸汽之分。

通常从锅筒中出来的饱和蒸汽中含有一定的水分,这样的饱和蒸汽实际上是蒸汽和水的混合物,称为湿饱和蒸汽。经过汽水分离后,不含有水分的饱和蒸汽和称为干饱和蒸汽。

湿饱和蒸汽中所含水量占湿饱和蒸汽总质量的质量分数,称为蒸汽的湿度。湿饱和蒸汽中蒸汽的质量占湿饱和蒸汽总质量的质量分数,称为蒸汽的干度。很显然,对于同一饱和蒸汽,其干度和湿度之和等于 1。

湿度是衡量蒸汽品质优劣的一个重要指标,工业水管锅炉的蒸汽湿度应控制在 3% 以内;锅壳式锅炉的蒸汽湿度应控制在 5% 以内;带过热器锅炉的蒸汽湿度应控制在 1% 以内。

综上所述,水的饱和压力和饱和温度是密切相关的。对应于一定的压力,就有一个确定的饱和温度。反之,对应一定的温度,就有一个确定的饱和压力。而且饱和温度随着压力的升高而升高,见表 1-2。

### 1.2.5.3 蒸汽的过热

在等压下继续加热干饱和蒸汽,蒸汽温度会逐渐升高,这种高于饱和温度的蒸汽称为过热蒸汽。过热蒸汽的温度超出同等压力下饱和温度的数值称为过热度。从干饱和蒸汽到过热蒸汽的加热过程中,被过热蒸汽所吸收的热量称为过热热量。

过热蒸汽具有较高的能量和做功能力,过热蒸汽的过热度愈大,所吸收的过热热量愈多,其做功能力也愈大。过热蒸汽压力愈高、过热度愈大,则热机效率愈高。

### 1.2.6 热量传递

热量的传递是工程技术中经常遇到的问题,在自然界和人们日常生活中也经常遇到热量的传递问题。热量总是由温度高的物体向温度低的物体传递;在同一物体中,如果各部分温度不同,热量也会由高温部分向低温部分传递。

应用热量传递理论来解决工程技术问题,有两条途径:一是设法增强热量传递能力,如锅炉的工作过程,就是要将燃料燃烧产生的热量最大限度地传递给汽、水工质,以提高锅炉热效率,二是设法减弱热量的传递能力,如锅炉炉墙的绝热层,其作用是阻止炉内热量向外传递,绝热层的热量传递能力愈弱,锅炉散热损失愈小,锅炉热效率愈高。

在热量传递过程中,物体任意点的温度不随时间而变化,这种传热称为稳定传热。反之,温度随时间而变化,则称为不稳定传热。

表 1-2 饱和水和干饱和蒸汽热力性质表

| $p$   | $t_s$   | $v'$                   | $v''$   | $h'$           | $h''$   | $r$     |
|-------|---------|------------------------|---------|----------------|---------|---------|
| MPa   | ℃       | $\text{m}^3/\text{kg}$ |         | $\text{kJ/kg}$ |         |         |
| 0.001 | 6.669   | 0.0010001              | 131.6   | 28.14          | 2513.75 | 2485.70 |
| 0.01  | 45.451  | 0.0010101              | 14.95   | 190.25         | 2584.09 | 2394.01 |
| 0.05  | 80.860  | 0.0010298              | 3.300   | 338.54         | 2645.22 | 2306.5  |
| 0.10  | 99.087  | 0.0010430              | 1.725   | 415.29         | 2674.52 | 2259.19 |
| 0.15  | 110.788 | 0.0010525              | 1.180   | 464.65         | 2692.53 | 2227.79 |
| 0.20  | 119.615 | 0.0010603              | 0.9018  | 502.08         | 2705.51 | 2203.51 |
| 0.25  | 126.788 | 0.0010669              | 0.7317  | 532.56         | 2715.56 | 2182.99 |
| 0.30  | 132.875 | 0.0010728              | 0.6168  | 558.52         | 2723.93 | 2164.99 |
| 0.35  | 138.189 | 0.0010782              | 0.5337  | 581.13         | 2730.63 | 2149.50 |
| 0.40  | 142.921 | 0.0010831              | 0.4708  | 601.64         | 2736.91 | 2135.27 |
| 0.45  | 147.198 | 0.0010877              | 0.4214  | 620.06         | 2741.93 | 2121.87 |
| 0.50  | 151.110 | 0.0010920              | 0.3816  | 636.81         | 2746.54 | 2109.72 |
| 0.60  | 158.076 | 0.0011000              | 0.3213  | 666.96         | 2754.49 | 2087.53 |
| 0.70  | 164.170 | 0.0011072              | 0.2778  | 693.75         | 2761.19 | 2067.44 |
| 0.80  | 169.607 | 0.0011140              | 0.2448  | 717.20         | 2766.63 | 2049.43 |
| 0.90  | 174.530 | 0.0011203              | 0.2188  | 738.97         | 2771.24 | 2032.27 |
| 1.00  | 179.038 | 0.0011262              | 0.1979  | 759.06         | 2775.42 | 2016.36 |
| 1.20  | 187.081 | 0.0011373              | 0.1663  | 794.65         | 2782.12 | 1987.47 |
| 1.40  | 194.132 | 0.0011476              | 0.1434  | 826.06         | 2787.15 | 1961.09 |
| 1.60  | 200.434 | 0.0011572              | 0.1260  | 854.53         | 2791.33 | 1936.81 |
| 1.80  | 206.149 | 0.0011663              | 0.1124  | 880.06         | 2794.27 | 1914.20 |
| 2.00  | 211.390 | 0.0011749              | 0.1015  | 903.93         | 2796.78 | 1892.85 |
| 2.20  | 216.238 | 0.0011833              | 0.09241 | 926.12         | 2798.87 | 1872.33 |
| 2.40  | 220.757 | 0.0011913              | 0.08482 | 947.05         | 2800.13 | 1853.07 |
| 2.60  | 224.992 | 0.0011991              | 0.07836 | 966.73         | 2800.96 | 1834.23 |
| 2.80  | 228.984 | 0.0012067              | 0.07279 | 985.57         | 2801.80 | 1816.23 |
| 3.00  | 232.761 | 0.0012142              | 0.06794 | 1003.16        | 2802.22 | 1799.07 |

注：使用符号说明  $p$ —压力； $t_s$ —饱和温度； $v'$ 、 $v''$ —饱和状态下水、干蒸汽的比体积； $h'$ 、 $h''$ —饱和状态下水、干蒸汽的比焓； $r$ —水的汽化潜热。

热量的传递有三种基本形式：热传导、对流换热、辐射换热。在锅炉实际的热量传递过程中，往往是这三种基本形式同时存在，只是由于不同的受热面部件所处的环境条件不同，总是由某一种或某两种形式起主导作用。

#### 1.2.6.1 热传导

热传导是指直接接触的物体各部分之间不发生相对位移时的热量传递过程，也称导热。如在锅炉打焦时，司炉将金属打焦棒一端插入炉内，不久，手握的这一端也变热、烫手，这说明高温炉膛或灼热的焦渣块的热量通过金属棒传递到司炉手掌，但金属各部分物质之间并没有发生相对位移。

从微观分析，固体金属导热，主要靠金属的自由电子运动进行的；非金属固体和液体的导热，主要靠分子、原子在平衡位置附近的振动进行的；气体的导热，主要靠分子热运动时相互碰撞进行的。

工程中常用导热系数评价材料的导热性能。所谓导热系数，即当壁厚为 1m，温度差为 1℃时，单位时间内通过导热所传递的热量。用符号  $\lambda$  表示，单位为  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。各种物质的导热系数各不相同，导热系数高，则传热能力强。金属的导热系数很高，称为导热体；气体导热系数很低；液体的导热系数介于金属与气体之间；非金属固体的导热系数在很大范围