

高等学校试用教材

# 传 热 学

山东工学院 俞佐平编

高等教育出版社

高等学校试用教材

# 传 热 学

山东工学院 俞佐平编

高等教育出版社

高等学校试用教材

# 传 热 学

山东工学院 俞佐平 编

\*

高等教育出版社 出版

新华书店北京发行所发行

北京通县觅子店印刷厂印装

\*

开本 787×1092 1/32 印张 9.5 字数 225,000

1979年9月第1版 1985年5月第6次印刷

印数 41,311—46,310

书号 15010·0203 定价 1.55 元

## 前 言

在 1977 年 10 月教育部召开的高等学校工科基础课教材座谈会上,决定由山东工学院编写本书,并由上海交通大学主审。

本书是根据青岛教材会议(1977 年 12 月)制订的编写大纲编写的,适用于动力机械及相近专业。使用时,可按专业性质和学时情况,酌减某些标有 \* 号的内容。

在编写过程中,注意加强了基础理论和适当地联系专业实际,并保持了本学科的系统性。编写时,还注意吸取了以往的教学经验,同时也参考了国外的新教材,力求使本书便于学生自学和培养学生分析问题、解决问题的能力,适应四个现代化的需要。

为有助于理解和巩固所学内容,本书编入了较多的例题,每章之后附有复习思考题和习题及其答案。全书采用国际单位制(SI)。

本书由山东工学院俞佐平编写,周光华同志协助,裘烈钧、孙云凤、陆煜、解焕民等同志对初稿的修改提供了宝贵的意见,肖筑芝、尹薇同志也为本书的编写做了一定的工作。

上海交通大学沈维道、郑佩芝、蒋智敏等同志,为提高本书的质量做了认真的审阅和修改。同时,还得到有关兄弟院校的大力支持和帮助。在此,一并致以衷心的感谢。

一是水平所限,二是时间仓促,书中肯定有不妥和谬误之处,殷切地希望使用本书的同志批评指正。

编 者

1979.7.

## 主要符号表

- $A$  面积  $\text{m}^2$
- $a$  热扩散率(导温系数)  $\text{m}^2/\text{s}$
- $b$  宽度  $\text{m}$
- $C$  热容比
- $c$  比热容  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
- $D$  直径  $\text{m}$
- $E$  辐射力  $\text{W}/\text{m}^2$
- $F$  力  $\text{N}$ ; 角系数; 换热器的校正系数
- $f$  截面积  $\text{m}^2$
- $G$  投射辐射  $\text{W}/\text{m}^2$
- $g$  重力加速度  $\text{m}/\text{s}^2$
- $I$  定向辐射强度  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr})$
- $k$  传热系数  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
- $L$  长度、高度  $\text{m}$
- $m$  质量  $\text{kg}$
- $\dot{m}$  质量流量  $\text{kg}/\text{s}$
- $p$  压力  $\text{N}/\text{m}^2$
- $Q$  热量  $\text{J}$ ; 热流量  $\text{W}$
- $\dot{Q}$  内热源强度  $\text{W}/\text{m}^3$
- $q$  热流密度  $\text{W}/\text{m}^2$
- $R$  半径  $\text{m}$ ; 热阻  $\text{K}/\text{W}$
- $r$  半径  $\text{m}$ ; 热阻  $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ ; 气化潜热  $\text{J}/\text{kg}$
- $S$  形状因数  $\mathbf{m}$
- $T$  温度  $\text{K}, ^\circ\text{C}$
- $T_f$  流体温度  $\text{K}, ^\circ\text{C}$
- $T_w$  壁面温度  $\text{K}, ^\circ\text{C}$
- $U$  周长  $\text{m}$
- $V$  体积  $\text{m}^3$
- $v$  速度  $\text{m}/\text{s}$
- $\alpha$  对流换热系数  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ; 吸收率

- $\beta$  体胀系数  $1/\text{K}$   
 $\delta$  厚度  $\text{m}$   
 $\varepsilon$  黑度; 效率  
 $\eta_f$  肋片效率  
 $\eta_T$  肋壁效率  
 $\theta$  过剩温度  $\text{K}, ^\circ\text{C}$   
 $\lambda$  导热系数  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ; 波长  $\mu$   
 $\mu$  动力粘度  $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$   
 $\nu$  运动粘度  $\text{m}^2/\text{s}$   
 $\rho$  密度  $\text{kg}/\text{m}^3$ ; 反射率  
 $\sigma$  表面张力  $\text{N}/\text{m}$   
 $\sigma_s$  斯蒂芬-玻尔茨曼常数  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$   
 $\tau$  时间  $\text{s}$ ; 透射率  
 $\omega$  立体角  $\text{sr}$

### 相似准则

$$\text{Bi} = \frac{\alpha\delta}{\lambda} \text{——毕渥(Biot)准则}$$

$$\text{Eu} = \frac{p}{\rho v^2} \text{——欧勒(Euler)准则}$$

$$\text{Fo} = \frac{\alpha\tau}{(V/A)^2} \text{——傅立叶(Fourier)准则}$$

$$\text{Gr} = \frac{\beta g L^3 \Delta T}{\nu^2} \text{——葛拉晓夫(Grashof)准则}$$

$$\text{Gz} = \text{Re} \cdot \text{Pr} \cdot \frac{D}{L} \text{——格莱兹(Graetz)准则}$$

$$\text{Nu} = \frac{\alpha L}{\lambda} \text{——努谢尔特(Nusselt)准则}$$

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a} \text{——普朗特(Prandtl)准则}$$

$$\text{Re} = \frac{vL}{\nu} \text{——雷诺(Reynolds)准则}$$

$$\text{Ra} = \text{Gr} \cdot \text{Pr} = \frac{\rho^2 \beta g L^3 \Delta T c_p}{\mu \lambda} \text{——雷利(Rayleigh)准则}$$

$$\text{St} = \frac{\text{Nu}}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} = \frac{\alpha}{\rho v c_p} \text{——斯坦顿(Stanton)准则}$$

# 目 录

主要符号表	1
第一章 绪言	1
§ 1-1 概述	1
§ 1-2 热传递的基本方式	2
一、热传导	3
二、热对流	4
三、热辐射	5
§ 1-3 传热过程简介	6
§ 1-4 量纲和单位	9
第二章 稳态导热	14
§ 2-1 导热的基本概念和定律	14
一、温度场和温度梯度	14
二、导热的基本定律	16
三、导热系数	17
§ 2-2 导热微分方程式	19
一、直角坐标中的导热微分方程式	19
*二、圆柱坐标中的导热微分方程式	23
§ 2-3 一维稳态导热	24
一、平壁	24
二、圆筒壁	30
三、接触热阻	35
§ 2-4 伸展体的稳态导热	37
一、伸展体稳态导热的能量方程式	39
二、等截面直肋稳态导热的分析和计算	40
*三、环肋的简化计算法	46
四、肋片和肋壁效率	48
§ 2-5 二维稳态导热的近似解法	52
*一、热流线图解法	52

二、数值解法	56
第三章 对流换热及相似理论的应用	67
§ 3-1 对流换热过程简介	67
§ 3-2 边界层概念	68
一、速度边界层	68
二、热边界层	72
三、速度边界层与热边界层的关系	72
§ 3-3 影响对流换热的因素	74
一、流体流动产生的原因	74
二、流体的流动情况	75
三、流体有无相变发生	75
四、流体的物理性质	75
五、换热面的几何因素	76
§ 3-4 对流换热系数 $\alpha$ 的确定方法	77
一、相似理论指导下的实验法	78
二、边界层微分方程式的数学解法	78
三、热量和动量(或质量)传递间的比拟法	79
§ 3-5 对流换热过程的数学描述	79
一、对流换热过程的微分方程组	79
二、对流换热过程的单值性条件	85
§ 3-6 相似和相似原则	85
一、相似的概念	86
二、相似原则	89
三、相似原则指导实验的优越性	92
§ 3-7 对流换热的准则方程式	93
一、流体受迫流动时的换热	93
二、流体自由流动时的换热	98
§ 3-8 模型试验和数据的综合法	101
一、试验应遵循的原则	101
二、定性温度和定形尺度	102
三、准则方程式函数关系的确定	103
第四章 流体无相变时对流换热的分析和计算	107
§ 4-1 流体在管道内作受迫流动时的换热	107



一、流动和换热特征	107
二、紊流 ( $Re > 10^4$ ) 时的换热计算	114
三、层流 ( $Re < 2200$ ) 时的换热计算	118
四、过渡状态时的换热计算	120
§ 4-2 流体外绕壁面作受迫流动时的换热	122
一、流体沿平板流动时的换热	122
二、流体横向外绕单管时的换热	124
三、流体横向外绕管束时的换热	131
§ 4-3 流体自由流动时的换热	136
一、概述	136
二、大空间自由流动换热	139
*三、小空间自由流动换热	143
四、自由流动和受迫流动的混合换热	147
第五章 流体有相变时对流换热的分析计算	155
§ 5-1 蒸气凝结时的换热	155
一、凝结换热现象	155
二、膜状凝结换热的分析计算	156
三、影响凝结换热的因素	161
§ 5-2 液体沸腾时的换热	163
一、概述	163
二、大容器内沸腾换热的分析计算	165
三、水在沸腾换热时的简化计算式	169
第六章 辐射换热	173
§ 6-1 热辐射的基本概念	173
一、热辐射的本质	173
二、物体对投射辐射能的反应	175
§ 6-2 物体表面的辐射特性	176
一、理想辐射表面	176
二、实际辐射表面	183
§ 6-3 物体表面间的辐射换热	188
一、黑体表面间的辐射换热	188
二、角系数的确定	191
三、灰体表面间的辐射换热	197

§ 6-4 遮热板的效用 .....	202
§ 6-5 气体和火焰辐射 .....	204
一、气体的辐射和吸收特性 .....	204
二、气体( $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ )的黑度 $\epsilon_g$ .....	207
三、气体与外壳间的辐射换热 .....	211
*四、火焰辐射的概念 .....	213
§ 6-6 辐射表面的总换热系数 .....	215
第七章 换热器 .....	221
§ 7-1 概述 .....	221
§ 7-2 传热过程 .....	222
一、传热方程式和传热系数 .....	222
二、传热的增强和减弱 .....	226
§ 7-3 间壁式换热器的分类 .....	228
§ 7-4 间壁式换热器的热计算 .....	231
一、换热器中流体的温度分布 .....	231
二、利用对数平均温差的热计算法 .....	232
三、效率( $\epsilon$ )-传热单元数( $NTU$ )热计算法 .....	241
§ 7-5 换热器的局部热阻和污垢系数 .....	251
一、局部热阻的测定——威尔逊(Wilson)法 .....	251
二、污垢系数 .....	253
第八章 非稳态导热 .....	258
§ 8-1 概述 .....	258
§ 8-2 数学分析解法 .....	260
一、毕渥数 $Bi < 0.1$ 时物体的非稳态导热 .....	260
二、毕渥数 $Bi > 0.1$ 时物体的非稳态导热 .....	262
*§ 8-3 数值解法 .....	269
一、有限差分法 .....	269
二、施密特(Schmidt)图解法 .....	271
附录 .....	276
附录 I 单位换算表格 .....	276
附录 II 几种导热系统的形状因数 $S$ .....	278
附录 III 气体的物性参数 .....	280

附录 IV	液体的物性参数 .....	282
附录 V	各种不同材料的密度、导热系数、比热容和热扩散率 .....	283
附录 VI	双曲线函数 .....	284
附录 VII	饱和水的物性参数 .....	286
附录 VIII	各种不同材料在表面法线方向上的辐射黑度 .....	287
附录 IX	水蒸气在饱和线上的物性参数 .....	288
参考文献	.....	290

# 第一章 绪 言

## § 1-1 概 述

世界上的物体,不论是固体、液体或气体,由于自然或人为的原因,普遍地存在温度差。热力学第二定律指出,作为能量之一的热,总是自发地从高温处传向低温处。热传递过程属于一种普遍的自然现象。

传热学研究有关热传递的客观规律和计算方法,它是工程热物理的一个分支。在动力、化工、制冷、建筑、新能源、宇航等工程中,涉及到能量转换和传递时,热传递理论知识和测试技术具有特殊的重要地位。因此,传热学逐步地形成为一门单独的学科。

热力学和传热学都是以热现象的客观规律作为研究的对象。热力学着重研究不同形式能量之间相互转换的规律,而传热学则是研究热量传递的科学。在传热学中不仅探求热传递过程的物理本质,还对有关热流率(即单位时间所传递的热量)的规律进行理论分析和实验。

学习和掌握了热传递过程的理论知识和实验技能,就能更有效地使用增强或减弱传热的措施来解决工程实际问题。例如,在风冷内燃机中需要利用空气冷却高温的气缸壁,在热力设备中所广泛采用的换热器等也要求增强传热。相反地,在室外的蒸汽管道上外敷绝热材料,以及为了保存低温的液化气体而采用保温作用良好的容器壁等,都是利用热绝缘以减弱传热的措施。

热传递理论是人们在生产斗争和科学实验中逐步总结和积累所形成的。常用的研究方法是在许可的范围内,对热传递现象进

行科学的简化,并作一些必要的假定,以求得合理的剖析和足够精确的计算。例如,反映物体导热能力的导热系数是随温度而变的,为了简化计算而又不致出现明显的误差,往往把它取作定值或合适的平均值。又如锅炉设计中作传热计算时,考虑到连续运行,换热表面会因积垢而降低流体与壁面间的换热量。为保证满意地运行,往往引入一个安全系数,以照顾积垢层的影响。要能在实际工作中作到恰当地简化和假定,必须对各种物理现象作详细的观察,而有深刻的理解。这要求我们具有丰富的理论知识和实践经验。在处理工程传热问题时,不仅需要熟悉热传递机理、有关定律和分析计算的方法,而且也需要具备坚实的数学、物理、热力学和流体力学等基础知识。

现在,热传递理论正在随着试验研究和生产实践的发展而飞速地发展,许多传热问题目前已可通过理论分析予以解决。例如,过去长期依靠试验研究的对流换热过程,由于对边界层机理的逐渐明确,理论求解的范围正在日益扩大。电子计算机作为一种先进的计算工具,已应用于热传递领域,使传热问题的数值解法变得更具有实用意义,这对传热学这门学科的发展具有很大的促进作用。理论的基础是实践,它又在不断实践中得到发展。所以,科学试验和生产实践的经验,对于加深理论分析,进而解决生产技术中有关热传递的问题,依然是十分重要和不可缺少的。

理解各类热传递现象的机理,对典型传热现象具备建立和求解方程式的能力,以及掌握有关传热试验的技能,将是本课程学习的目的和要求。

## § 1-2 热传递的基本方式

如果在不同物体或物体的不同部分之间发生热量传递,则必

然是由于它们之间存在温度差。犹如导电现象中电位差是产生电流的动力一样，温度差可认为是产生热流的动力。热传递有三种基本方式，即热传导、热对流和热辐射。实际的工程应用中，所遇到的热传递现象，常常是由几种基本方式共同作用的结果。不同的组合确定了不同现象的特点。

## 一、热传导

热传导简称导热，其机理是不同温度的物体或物体不同温度的各部分之间，分子动能的相互传递，即动能较大(温度较高)的分子把能量传给邻近动能较小(温度较低)的分子，此外，还依靠自由电子运动而传递能量。宏观地说：热量从高温部分传给低温部分。

固体中的热传递完全取决于导热。液体和气体因具有流动的特性，在它们中的热传递，导热也同样发生，但在某种情况下，例如在紊流区内，流体内部的导热通常不起主导作用。

远在1822年，法国数学家傅立叶(Joseph Fourier)总结固体导热的实践经验，提出了平壁中的导热公式：

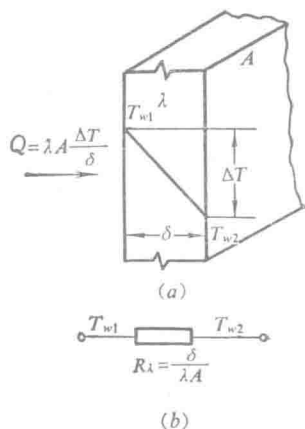
$$Q = \lambda A \frac{\Delta T}{\delta} \quad \text{W} \quad (1-1)$$

式中  $A$ ——垂直于导热方向的截面积  $\text{m}^2$ ；

$\delta$ ——平壁厚度  $\text{m}$ ；

$\lambda$ ——物体材料的导热系数  
 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ；

$\Delta T$ ——平壁两边的温度差  
 $\text{K}$ 。



由公式可知，单位时间内的导热量与导热系数、截面积和温度差成正比，而

图 1-1 傅立叶导热公式图示

与导热距离成反比。公式(1-1)如图 1-1a 所示。

公式(1-1)又可表示为

$$Q = \lambda A \frac{\Delta T}{\delta} = \frac{\Delta T}{\frac{\delta}{\lambda A}} = \frac{\Delta T}{R_{\lambda}} \quad \text{W} \quad (1-1a)$$

上式和直流电路的欧姆定律  $I = \frac{U}{R}$  相类似,能逐一对应。 $\Delta T$  与电压  $U$  相对应,可称为温压;  $\frac{\delta}{\lambda A}$  与电阻  $R$  相对应,可称为导热面积为  $A$  时的导热热阻  $R_{\lambda}$  K/W,如图 1-1b 所示。

单位导热面积的热流量称为热流密度,即

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{\Delta T}{\frac{\delta}{\lambda}} = \frac{\Delta T}{r_{\lambda}} \quad \text{W/m}^2 \quad (1-1b)$$

上式中的  $r_{\lambda}$  表示单位导热面积的导热热阻  $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$ 。

## 二、热对流

随着流体不同部分的相对位移,把热量从一处带到另一处的现象,称为热对流,所以热对流与流体的流动有关。流体内部存在温度差时,由于流体密度随温度改变的特性,而促使流体作自由流动,或称自然对流。工业设备中的流体,多数依赖外力而作受迫流动,相应地可称为强迫对流。

实际上,常会遇到导热和热对流两种基本方式同时出现,而形成一种较复杂的热传递过程,例如对流换热。如流体在管道内流动,当流体和管道内壁温度不同时,它们之间必然会发生热量传递。紧贴管壁处总有一薄层流体作层流流动,其中垂直于壁面的方向上仅有分子能量的传递,即只存在导热,而层流薄层以外的区域,热量的传递主要依靠对流。

对流换热的计算,目前依然沿用 1701 年牛顿 (Isaac Newton) 的冷却定律公式:

$$Q = \alpha A (T_w - T_f) \quad W \quad (1-2)$$

式中  $A$ ——与流体接触的壁面面积  $m^2$ ;

$\alpha$ ——对流换热系数  $W/(m^2 \cdot K)$ ;

$T_w$ ——壁面温度  $K, ^\circ C$ ;

$T_f$ ——流体平均温度  $K, ^\circ C$ 。

不管流动状态如何,紧贴壁面、只存在导热的层流薄层,对热流起着主要的控制作用,所以,有时也称  $\alpha$  为膜系数。

如果,  $T_f > T_w$ , 则热量从流体传向壁面, 上式可写为

$$Q = \alpha A (T_f - T_w) \quad W \quad (1-2a)$$

图 1-2a 为牛顿公式(1-2)的示意图。如同公式(1-1a)和(1-1b)一样, 由对流换热公式(1-2)可导得对流热阻  $R_\alpha = \frac{1}{\alpha A}$

$K/W$  和  $r_\alpha = \frac{1}{\alpha} \quad m^2 \cdot K/W$ , 前者见图 1-2b。

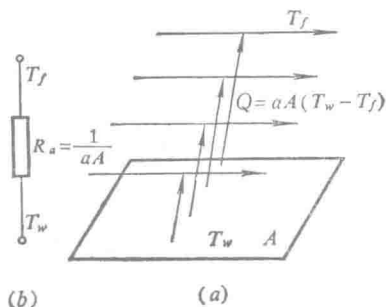


图 1-2 牛顿对流换热公式图示

### 三、热辐射

凡物体都有放射辐射粒子(光子)的能力, 辐射粒子所具有的能量称为辐射能。换句话说, 凡物体都有放射辐射能的能力。物体转化本身的内能而产生的辐射称为热辐射(以下简称辐射)。物体的温度愈高, 辐射的能力愈强。温度相同而物体性质和表面情况不同, 辐射能力也不同。

理想的辐射体, 或称黑体, 在单位时间内所放射的辐射能为

$$Q = \sigma_b A T^4 \quad W \quad (1-3)$$

式中  $A$ ——物体的辐射表面积  $m^2$ ;



$T$ ——表面的绝对温度 K;

$\sigma_b$ ——斯蒂芬-玻尔茨曼常数, 其值为  $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

上式为斯蒂芬-玻尔茨曼定律, 1879年斯蒂芬(Stefan)由实验得出, 玻尔茨曼(Boltzmann)于1884年又从热力学原理导出。

处于一定相对位置的二物体, 表面具有不同的温度  $T_1$  和  $T_2$ , 它们之间由于辐射而发生热量传递, 这种现象称为辐射换热。对于表面积  $A$  相同的二平行黑体表面, 当其相隔距离与表面的宽和高相比为甚小, 以致通过两表面边缘外射的能量可以忽略时, 利用公式(1-3)可计算它们间的辐射换热量, 即

$$Q = \sigma_b A (T_1^4 - T_2^4) \quad \text{W} \quad (1-3a)$$

上面仅把热传递的三种基本方式作简略的介绍, 但必须理解, 工程实际中的热传递过程总是比较复杂的, 常常是几种基本方式同时作用的结果。

### § 1-3 传热过程简介

热工领域内经常遇到的是高温流体通过固体壁把热量传给低温流体, 这种过程称为传热过程。如内燃机气缸中的高温燃气经气缸壁传热给外套中的冷却水; 暖气设备内水蒸气通过器壁散热至周围空气中; 冷凝器中的冷却水通过管壁从低压水蒸气吸收热量等。传热过程往往包括两种或三种热传递的基本方式。下面以板式滑

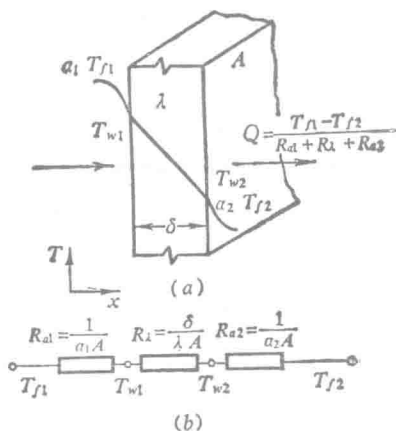


图 1-3 通过平壁的传热过程