

内 容 提 要

本书是按照 1987 年国家教委审定的《传热学课程教学基本要求》(55~70学时)编写的,并由传热学课程教学指导小组审阅同意作为传热学教材。

全书共 13 章,分别介绍了导热的数学描述,强制对流换热的分析解,对流换热实验关联式,凝结和沸腾换热,辐射换热的基本知识,也介绍了传热过程及换热器的一些基本的计算方法。书中附有大量例题和习题。

本书既有一定的科学性和系统性,又兼顾了大多数学校教学的实际情况。

全书使用国家法定计量单位。

本书可作为热工类各专业及有关专业的传热学教材,也可供有关工程技术人员参考。

程尚模 黄素逸 白彩云 魏秉武 编

机械工业出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

四川省金堂新华印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 14.375 字数 346 000

1990年4月第1版 1991年3月第2次印刷

印数 1 891—3 216

ISBN 7-04-002883-2/TH·225

定价 4.65 元

序

本书是按照 1987 年国家教委审定的《传热学课程教学基本要求》编写的一本适用于 55~70 学时的传热学教材。

在内容的取舍上,首先以基本要求为基准,同时根据我们教学实践的经验,尽量使本书既有学科上的科学性、系统性,又有教学上的灵活性、适用性;既有内容上的先进性,又兼顾大多数学校教学的实际情况。

本书在第二、三、四、五章讨论了导热的基本问题,从导热的数学描述入手,着重讲解了一维、二维稳态导热,对非稳态导热也进行了比较详细的介绍。在第六、七、八、九章中较深入地论述了对流换热的数学描述,强制对流换热的分析解,介绍了一些对流换热的实验关联式,以及凝结和沸腾换热的基本知识。在第十、十一章讲述了热辐射的基础知识,讨论了辐射换热的简单问题。最后,在第十二、十三两章中论述了传热过程与换热器的一些计算方法。本书的基本内容是按照基本要求所规定的必学内容编写的,但也有少量内容超出了基本要求的范围(有“*”号的章节),这些章节在选用本书作为教材时可根据情况选讲或省略。为帮助读者学习,本书中收有大量例题和习题。

本书由华中理工大学程尚模教授主编,并编写了第九、十三两章,参加编写的还有黄素逸(第十、十一章),白彩云(第六、七、八章),魏秉武(第一、二、三、四、五、十二章)。

在初稿完成后,浙江大学屠传经教授审阅了本书,提出了许多有益的意见;清华大学任泽滢教授也对本书进行了审阅。此后,书

稿又经传热学课程教学指导小组组织的审稿会审订，参加审稿会的有清华大学、上海交通大学、西安交通大学、天津大学、浙江大学、北京航空航天大学、同济大学、重庆大学的同志，他们对初稿提出了不少宝贵意见。对此，编者谨表示衷心的感谢。

编写时，虽然我们尽了最大努力，但由于水平有限，难免有错误与不妥之处，欢迎读者批评指正。

编 者

1989年3月

目 录

主要符号表	1
第一章 绪论	1
1-1 引言	1
1-2 热传导	2
1-3 热对流	7
1-4 热辐射	9
1-5 传热过程	11
1-6 量纲及单位	14
参考文献	17
习题	17
第二章 导热的数学描述	19
2-1 导热微分方程	19
2-2 导热微分方程的无量纲化	23
习题	25
第三章 一维稳态导热	26
3-1 平壁导热	26
3-2 圆筒壁导热	32
3-3 球壁导热	34
3-4 肋片导热	37
3-5 接触热阻	46
3-6 具有内热源时的导热	49
参考文献	52
习题	53
第四章 二维稳态导热	56
4-1 二维稳态导热的分析解	56
4-2 二维稳态导热的数值解	60

*4-3 二维稳态导热的图解法	85
4-4 导热的形状因数	89
参考文献	93
习题	93
第五章 非稳态导热	96
5-1 非稳态导热过程及其特点	96
5-2 非稳态导热的分析解	98
5-3 二维及三维的非稳态导热	114
5-4 内热阻可以忽略的非稳态导热	120
5-5 非稳态导热的数值解	126
参考文献	138
习题	139
第六章 对流换热的数学描述	141
6-1 对流换热微分方程组	141
6-2 对流换热微分方程组的无量纲化	151
6-3 边界层的概念和边界层微分方程组	154
参考文献	161
第七章 强制对流换热的分析解	162
7-1 流体流过平板层流强制对流换热的积分解	162
7-2 湍流换热	175
7-3 流体掠过平板形成混合边界层时的换热	187
参考文献	191
第八章 对流换热实验关联式	192
8-1 相似原理	192
8-2 管内强制对流换热	200
8-3 流体横向掠过单管和管束时的换热	212
8-4 流体掠过球体时的换热	221
8-5 自然对流换热	221
参考文献	238
习题	238
第九章 凝结和沸腾换热	244

9-1 凝结换热概述	244
9-2 膜状凝结换热	245
9-3 珠状凝结换热	257
9-4 大容器中沸腾换热	258
9-5 强制对流沸腾简介	275
参考文献	277
习题	278
第十章 热辐射基础	283
10-1 热辐射的基本概念	283
10-2 黑体辐射和吸收的基本性质	285
10-3 实际物体的辐射和吸收	295
10-4 气体的辐射和吸收	306
*10-5 火焰辐射	314
*10-6 太阳辐射	315
参考文献	318
习题	319
第十一章 辐射换热	321
11-1 被透明介质隔开的黑体表面间的辐射换热	321
11-2 被透明介质隔开的灰体表面间的辐射换热	331
11-3 气体与外壳间的辐射换热	348
11-4 辐射换热系数	349
参考文献	351
习题	352
第十二章 传热过程	357
12-1 通过平壁的传热	357
12-2 通过圆筒壁的传热	359
12-3 通过肋壁的传热	364
12-4 隔热保温技术	369
参考文献	373
习题	374
第十三章 换热器	376

13-1 换热器概述	376
13-2 换热器的热计算——对数平均温差法	382
13-3 换热器的热计算——效能-传热单元数法	392
13-4 影响换热器性能的因素	406
13-5 换热器传热过程的强化	410
参考文献	413
习题	414

附录421

附录 1 金属的性质	421
附录 2 非金属的性质	425
附录 3 几种保温、耐火材料的导热系数与温度的关系	427
附录 4 干空气的热物理性质 ($p=1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$)	428
附录 5 在大气压力 ($p=1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$) 下烟气的热物理性质	430
附录 6 饱和水的热物理性质	431
附录 7 干饱和水蒸气的热物理性质	433
附录 8 大气压力 ($p=1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$) 下过热水蒸气的热物理性质	435
附录 9 油类的物性参数	436
附录 10 常压下几种气体的热物理性质	437
附录 11 液态金属的热物理性质	439
附录 12 各种表面的法向发射率	440
附录 13 普朗克辐射函数	444
附录 14 双曲函数值	448
附录 15 修正贝塞尔函数值	449

主要符号表

A ——吸收率	s ——管间距, m; 射线平均行程, m
α ——热扩散率(导温系数), m^2/s	T ——绝对温度, K
c ——比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$	t ——温度, $^\circ\text{C}$
C_f ——摩擦系数	U ——周长, m
D ——透射率	u, v, w ——速度, m/s
d ——直径, m	V ——体积, m^3
d_e ——当量直径, m	X ——角系数; 无量纲坐标
E ——辐射力, W/m^2	α ——换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$
F ——面积, m^2	β ——体膨胀系数, $^\circ\text{C}^{-1}$
G ——质量流率, kg/s	δ ——厚度, m
g ——重力加速度, m/s^2	ε ——换热器的效能; 发射率(黑度)
H, h ——高度, m	Θ ——无量纲温度
I ——辐射强度	θ ——过余温度, $^\circ\text{C}$; 润湿角
J ——有效辐射, W/m^2	λ ——导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$; 波长, μm
k ——传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$	μ ——动力粘度, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$
L, l ——长度, m	ν ——运动粘度, m^2/s
p ——压力, Pa	ρ ——密度, kg/m^3
Q ——热量, J; 热流率, W	σ ——表面张力, N/m
q ——热流密度, W/m^2	σ_0 ——黑体辐射常数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$
R ——热阻, $\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{W}$; 吸收率; 无量纲半径	τ ——时间, s; 切应力, N/m^2
r ——半径, m; 汽化潜热, J/kg	ω ——立体角 sr

下 标

b ——汽泡的, 黑体的

s ——饱和的

c——临界的,对流的,

f——流体的

g——气体的

i——初始的,节点的

l——长度的,液体的

m——平均的

o——原点的,理想的

r——辐射的

t——总的,热边界的,湍流的

v——蒸汽的

w——壁面的

δ ——液膜厚度的

λ ——单色的

ϕ ——方向的

∞ ——参考的,环境的,来流体的

相 似 准 则

$$Fo = \frac{\alpha \tau}{l^2} \text{——傅里叶准则}$$

$$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda} \text{——毕渥准则}$$

$$Re = \frac{ul}{\nu} \text{——雷诺准则}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \text{——普朗特准则}$$

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} \text{——努谢尔特准则}$$

$$St = \frac{Nu}{Re \cdot Pr} \text{——斯坦顿准则}$$

$$Pe = Re \cdot Pr = \frac{ul}{a} \text{——贝克来准则}$$

$$Gr = \frac{gl^3}{\nu^2} \beta \Delta t \text{——格拉晓夫准则}$$

第一章 绪 论

1-1 引 言

传热学是工程热物理的一个分支, 是研究热量传递规律的一门学科。它与研究热功转换规律的工程热力学共同构成热工学的理论基础。

人类对热的正确认识和利用经历了一个相当长的时期, 直至19世纪才从热素说转到能量说。从18世纪资本主义发展初期至今, 随着生产的发展, 将热转换为机械功的要求日益迫切, 人类对热的认识也逐步深入, 产生了与生产实践紧密结合的热力学和传热学。

热力学第二定律指出, 只要有温差存在, 热量总是自发地从高温物体传向低温物体。由于温差是普遍存在的一种自然现象, 因此, 传热现象也是一种普遍存在的自然现象。

传热知识在工程技术中得到广泛的应用, 例如: 在动力、冶金、化工、机械、矿山、石油、船舶、制冷、航空、电力、轻纺、食品、建筑等工业领域的生产技术中都涉及传热问题; 热力发电厂中的锅炉、汽轮机、冷凝器、高低压加热器、除氧器等设备的设计和运行, 内燃机气缸和燃气轮机叶片的冷却等都需要应用传热学的知识。又如, 制冷设备中工质的冷凝和蒸发、铸造工艺中铁的熔化和铁水在型腔内的凝固、钢板的焊接、机加工工件的冷却、工业炉中钢锭的加热、建筑物的采暖与空调、核反应堆中铀棒的释热、航天飞机重返大气层时的壁面热防护技术等都需要应用传热学的知识。

传热学所研究的问题归纳起来可以分为两大类: 一类是研究

增强或削弱传热的技术,以满足各种换热设备的需要;另一类是确定温度分布和控制所需温度,以满足生产工艺的需要。传热学的发展表明:生产的发展不断地提出各种各样的传热问题,而这些问题的解决又促进了传热学的发展。

热量传递有热传导、热对流、热辐射三种基本方式,它们可以单独存在,但往往以复合的传热方式出现。下面将分别阐述。

1-2 热 传 导

物体内部存在温度差时,热量会从高温部分传递到低温部分;不同温度的物体相互接触时热量也会由高温物体传递到低温物体。这种热量传递过程称为热传导或导热过程。解释导热现象的微观机理目前还不太完善,但从宏观的现象看,它是因物质直接接触,能量从高温部分传递到低温部分,中间没有明显的物质转移,或没有物质的相对位移。

导热现象是与物体内部的温度分布密切相关的。物体内部的温度可以随空间坐标和时间变化,即

$$t=f(x, y, z, \tau) \quad (1-1)$$

式中 x, y, z 为空间坐标变量, τ 为时间变量。上式描述的温度分布称为温度场,因此温度场是任一瞬间空间所有点上的温度值的总称。温度场就时间而言可分为稳态温度场和非稳态温度场。温度场就坐标而言可分为一维温度场、二维温度场和三维温度场。式(1-1)为三维非稳态温度场的表达式。三维稳态温度场可表示为:

$$t=f(x, y, z)$$

一维非稳态温度场可写成

$$t=f(x, \tau)$$

如果将某瞬间温度相同的各点连接起来就可形成一个温度相

同的面,称为等温面。将一个平面与等温面相交,其交线称为等温线,如图1-1所示。由于物体内的任何一点不可能同时具有两个不同的温度,因此等温面或等温线绝不会彼此相交。显然,只有穿过等温面才有温度变化,而且沿着等温面的法线方向温度变化最显著。温度沿等温面法线方向的变化率为

$$n \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta n} = \text{grad } t = n \frac{\partial t}{\partial n} \quad (1-2)$$

$\text{grad } t$ 称为温度梯度。温度梯度是一个向量,方向为 n 。 n 为等温面法向的单位向量,指向温度增加的方向。因此,热流的方向正好与温度梯度方向相反。 $\partial t / \partial n$ 为温度沿等温面法线方向的导数,它是一个标量,为方便起见,有时也把它称为温度梯度。

确定物体内的温度场是研究导热问题的一个内容,另一个研究内容是求导热热量。现在以一个最简单、最理想的导热情况为例来说明导热量的大小,如图1-2所示。一块平板,面积为 F , 厚度为 Δx , 两个表面的温度分别维持 t_1 和 t_2 不变。如果忽略平板端部的散热,实验表明,通过平板的热量可以用下式表示

$$Q = \lambda F \frac{t_1 - t_2}{\Delta x} \quad \text{W} \quad (1-3)$$

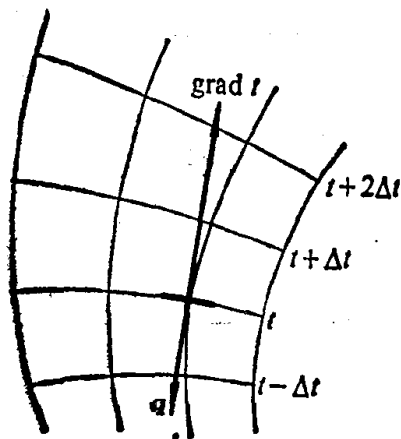


图1-1 等温线与热流

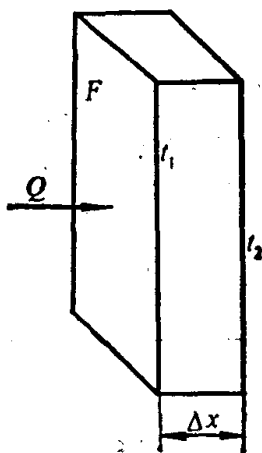


图1-2 导热示意图

式中 Q 为单位时间的导热量, 又称热流量, 单位为 W 。1822 年, 法国数学家傅里叶首先以式 (1-3) 的微分形式来描述导热的宏观现象, 即

$$Q = -\lambda F \frac{\partial t}{\partial x} \quad W \quad (1-4)$$

或

$$q = \frac{Q}{F} = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \quad W/m^2 \quad (1-5)$$

上两式称为傅里叶定律的表示式。傅里叶定律可表述为单位时间内物体单位面积的导热量与温度梯度成正比。式 (1-4) 及 (1-5) 中的负号表示热流方向与温度梯度反向, 如图 1-3 所示, 图 a 表示温度 t 随 x 的增加而降低, dt/dx 为负值, 而热流 q 的方向为 x 轴的正向; 图 b 表示温度 t 随 x 的增加而增高, dt/dx 为正值, 而热流 q 的方向为 x 轴的反向。热流 q 表示单位时间通过物体单位面积的导热量, 称为热流密度, 单位是 W/m^2 。式 (1-3)、(1-4) 及 (1-5) 中的比例系数 λ 称为导热系数, 表示物质导热能力的大小。

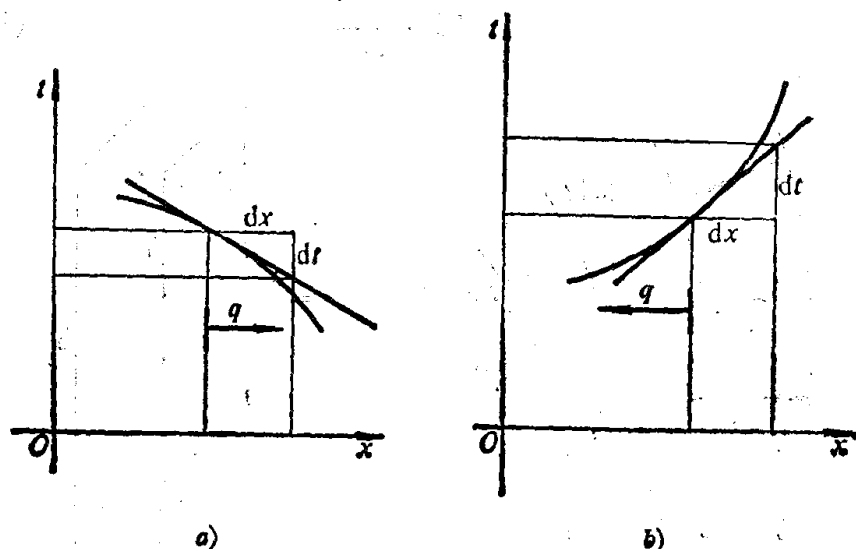


图 1-3 热流方向与温度梯度的示意图

$$\lambda = \frac{q}{\frac{\partial t}{\partial x}} \quad \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) \quad (1-6)$$

各种物质的导热系数不同,即使是同一种物质,在不同的条件与状态下其导热系数也不相同。各种物质的导热系数在数值上的差异可达几百倍,有时甚至达几百万倍。例如三氯甲烷蒸气的导热系数为 $0.0066 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$,而铜的天然晶体在温度为 20.8 K 时导热系数为 $12200 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$,后者比前者高出两百万倍。这还不包括目前研制出的高温超导材料。表 1-1 列出了部分材料在 273 K 时的导热系数值。各种物质的导热系数多半是用实验方法测定,文献[3]详细综述了各种物质导热系数的测定方法。

表 1-1 273 K 时部分材料的导热系数^[2]

材 料	λ $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$	材 料	λ $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$
金属固体:		液体:	
银(最纯的)	418	水银	8.21
铜(纯的)	387	水	0.552
铝(纯的)	203	二氧化硫(SO_2)	0.211
锌(纯的)	112.7	氯代甲烷(CH_3Cl)	0.178
铁(纯的)	73	二氧化碳(CO_2)	0.105
锡(纯的)	66	氟利昂(CCl_2F_2)	0.0728
铅(纯的)	34.7	气体:	
非金属固体:		氢	0.175
方镁石, MgO	41.6	氦	0.141
石英(平行于轴)	19.1	空气	0.0243
刚玉石, Al_2O_3	10.4	戊烷	0.0128
大理石	2.78	三氯甲烷	0.0066
冰, H_2O	2.22		
熔凝石英	1.91		
硼硅酸耐热玻璃	1.05		

从表 1-1 中可以看出,金属材料的导热系数高于非金属材料的导热系数,固体的导热系数高于液体的导热系数,气体的导热系

数比较小。在金属导体中，热量主要通过材料晶格的热振动波及自由电子进行传播。常温下，纯金属中自由电子所起的作用比热振动波大得多，所以纯金属的导热系数一般都比较大大。物质的晶格排列及杂质都会影响热振动波及自由电子的传播，所以合金的导热系数都小于纯金属的导热系数。非导电体固体材料的热量主要通过热振动波传播，所以晶体材料的导热系数远大于无定形材料的导热系数。

对于气体，分子的自由程比固体大很多，每个分子都可以无规则地自由运动。根据气体分子运动理论导出的气体导热系数的表示式为

$$\lambda = \frac{1}{3} \rho v l c_v$$

式中 ρ 为气体的密度， v 为分子平均速度， l 为分子平均自由程， c_v 为定容比热容。因此，气体的导热系数与压力和温度有关，且导热系数随温度升高而增大。

液体的分子自由度没有气体大，但比固体大得多。液体的导热机理比较复杂，它既有气体那样分子间的碰撞作用，又有固体的热振动波的作用。液体的导热系数值除液态金属以外，都在非金属材料与气体之间。

建筑工程材料导热系数的机理更复杂，影响因素更多，除温度以外还与材料的结构、密度、湿度等有关。通常把导热系数小于 $0.23 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 的材料称为隔热材料或保温材料。现在，随着材料科学的发展，各种新型隔热材料不断出现，如有些泡沫塑料的导热系数已接近空气的导热系数，超细玻璃棉及硅藻土制品的导热系数在常温时可达 $0.03 \sim 0.04 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

导热系数是一个重要的热物性参数，工程上常用材料的导热系数都可以从有关资料与相应的手册中查得^[4, 6]。本书附录中列出

了常用材料的导热系数,可供读者参考选用。

1-3 热 对 流

温度不同的各部分流体之间发生宏观相对运动而引起的热量传递过程,称为热对流。因为微观粒子的热运动总是存在的,所以热对流的同时必定伴随着热传导。热对流发生在流体内部,而工程上常遇到的情况是流动着的流体和与其温度不同的固体壁面接触时交换热量,这种热量传递过程称为对流换热。

对流换热过程可以分为两大类:一类是有相变的对流换热,如液体沸腾和蒸气凝结;另一类是没有相变的单相介质对流换热。

对流换热是一个极复杂的热交换过程,影响对流换热的因素也很多。对于单相流体对流换热,首先是流体运动的动力对换热有影响。如果流体是在外力如水泵、风机的作用下而运动,这时的对流换热称为强制对流换热。如果流体无外力的作用,仅仅由于部分流体受热后膨胀、密度变小产生浮升力,在浮升力的作用下流体运动,这种对流换热称为自然对流换热或自由运动换热,流体在对流换热时,流体的流动状态不同,其换热也不相同,流体呈层流时的换热一般都小于流体呈湍流时的换热。另外,换热的强弱还与受热面的几何形状、大小及相对位置有关。以相对位置为例,如图 1-4 所示,当流体横向和纵向掠过一根管子时,它们的换热是不同的。流体的物性也是影响对流换热的重要因素。

对于各种不同的对流换热,换热量的计算公式目前仍采用 1702 年牛顿提出的计算式

$$Q = \alpha F \Delta t = \alpha F (t_w - t_f) \quad \text{W} \quad (1-7)$$

式中: t_w 表示物体的表面温度, $^{\circ}\text{C}$; t_f 表示流体的温度, $^{\circ}\text{C}$; F 表示物体参与换热的表面积, m^2 ; Δt 表示物体表面温度与流体的温度

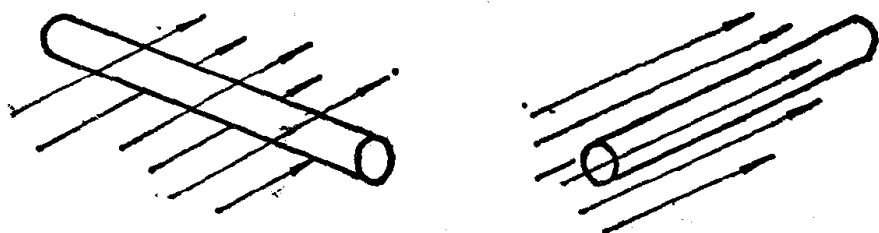


图 1-4 物体在流体中间的相对位置

差, $^{\circ}\text{C}$ 。当 $t_w > t_f$ 时, $\Delta t = t_w - t_f$; 当 $t_w < t_f$ 时 $\Delta t = t_f - t_w$ 。比例系数 α 称为换热系数或放热系数, 单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。它表明换热的强度, 数量上等于流体与换热表面间温度相差一度时, 在单位时间内每单位面积所传递的热量。

牛顿换热公式并没有揭示出对流换热的实质, 它只不过将问题的所有矛盾即影响对流换热的所有因素全部集中到换热系数中去了, 因此解决对流换热问题也就归结为解决换热系数的问题。从前面所讨论的影响因素可知, 单相流体对流换热的换热系数与很多物理量之间将组成一个复杂的函数关系, 即

$$\alpha = f(u, t_w, t_f, \lambda, c_p, \rho, \mu, L, \dots) \quad (1-8)$$

式中 u 为流体运动的速度, λ, c_p, ρ, μ 分别为流体的导热系数、比热容、密度、动力粘度等物理性质, L 为几何尺寸。本书将在后面有关章节中用理论和实验的方法探讨式 (1-8) 的具体关系式。表 1-2 对几种常见的对流换热现象给出了换热系数的大致范围。

表 1-2 几种换热系数的大致范围

换 热 情 况	换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$
空气自然对流	2~10
气体强制对流	5~300
水强制对流	100~18000
水沸腾	2500~25000
水蒸气膜状凝结	3000~15000