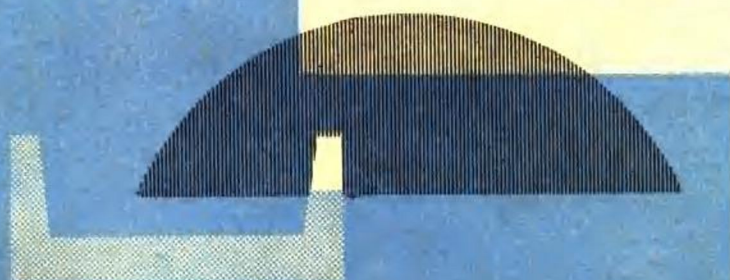


31159102

高等学校推荐教材



传热学

(新 一 版)

章熙民 任泽霈 梅飞鸣 编著
陈钟頔 主审

中国轻工业出版社

(京)新登字 035 号

本书是在第二版的基础上,按照供热通风空调及燃气专业“传热学”的基本要求编著的。全书除绪论外共分十一章:导热理论基础;稳态导热;非稳态导热;导热问题数值解法基础;对流换热分析;单相流体换热及准则关联式;凝结与沸腾换热;热辐射的基本定律;辐射换热计算;传热和换热器;质交换。本版对原版部分章节的内容进行了增删,在内容上也考虑了传热学在燃气工程领域的应用,适当地增加了习题量、习题难度和广度,使之更符合教学要求。

本书除作为高等学校供热通风空调及燃气专业教材外,也可供其他有关专业的“传热学”的教学参考,并可供有关的工程技术人员参考。

高等学校推荐教材

传 热 学

(新一版)

章熙民 任泽霈 梅飞鸣 编著

陈钟頔 主审

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京顺义燕华印刷厂印刷

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 19¹/₂ 字数: 472千字

1993年6月新一版 1993年6月第一次印刷

印数: 1—7,400册 定价: 5.05元

ISBN7—112—01870—6/TU·1418

(6895)

新 一 版 前 言

本版是在第二版的基础上,按照供热通风空调及燃气专业“传热学”的基本要求编著的。在改编过程中广泛听取了使用本书的有关教师和学生的意见。本版所作的改进要点如下:

对全书的基本概念、基本定义和基本表达式的叙述力求重点突出,层次清晰,深入浅出,概念准确;既注意数学表达式的推演分析,又注意把数学描述和传热的物理机制结合起来;既利用已有的知识(如流力、电学)分析传热,又努力引导从传热的特点去思考,避免简单套用其他学科的定律,形成本版特色,使教材成为教学的有力工具。

从学生学习《传热学》的实际需要出发,更好贯彻“教学基本要求”,同时又使本书能反映传热学科科研和教学的新进展,本版对原版部分章节的内容进行了增删,在内容上也考虑了传热学在燃气工程领域的应用。

本版更新了40%左右的插图,某些重要的插图是按实际计算绘制的,使之较准确地表达出传热现象变化的规律,图表与文字结合更好。

加强与教学各环节的配合亦是本版的主旨。为此,针对专业工程实际问题编写了一些启发性例题,对重要例题增写解题思路及结论评述,并通过例题启发读者思考更深一层的问题,从而使读者能结合实际深入理解各章节的内容,掌握解题方法,提高计算能力;适当增加了习题量(约15%)、习题难度和广度;修订和增加了附录的内容,方便学生作业和工程计算参考;每章小结都简要提示对学习的基本要求,读者可按这些基本要求进行教学和自学效果的检验。

根据本版工作的要求,本书由章熙民、任泽霈、梅飞鸣等担任编著工作。由章熙民主编,陈钟頔主审。

在本书的编写中,得到全国各有关院校热工教师的热情帮助,提出了许多宝贵的意见。河北建筑工程学院和同济大学热工教研室为本书改版召开的热工教学研讨会和审稿会给予了热情支持。在此,谨向帮助过我们的同志们表示衷心的感谢。

虽经努力,但由于编者的学识水平所限,仍不免有一些错误和不足之处,恳请读者批评指正。

基本符号表

符号	物 理 量	国际单位制、符号	符号	物 理 量	国际单位制、符号
<i>A</i>	温度振幅	度(°C)	<i>r</i>	半 径	米, 毫米(m, mm)
<i>A</i>	肋片导热截面积	米 ² (m ²)	<i>r</i>	汽化潜热	焦耳/千克(J/kg)
<i>a</i>	导温系数 (热扩散系数)	米 ² /秒(m ² /s)	<i>S</i>	距 离	米(m)
<i>B</i>	大气压强	巴(bar)	<i>T</i>	热力学温度	开尔文(K)
		牛顿/米 ² (N/m ²)	<i>t</i>	摄氏温度	度(°C)
		公斤/米·秒 ² (kg/m·s ²)	<i>U</i>	周边长度	米(m)
<i>C</i>	辐射系数	瓦/米 ² ·开 ⁴ (W/m ² ·K ⁴)	<i>u</i>	速 度	米/秒(m/s)
		(J/m ² ·s·K ⁴)	<i>V</i>	容 积	米 ³ (m ³)
<i>C</i>	质量浓度	公斤/米 ³ (kg/m ³)	<i>v</i>	速 度	米/秒(m/s)
<i>c</i>	比 热	焦耳/千克·度(J/kg·°C)	<i>W</i>	功 率	瓦, 焦耳/秒(W)
<i>c'</i>	容积比热	焦耳/标米 ³ ·度(J/Nm ³ ·°C)	<i>w</i>	速 度	米/秒(m/s)
<i>d</i>	直 径	米(m)	<i>z</i>	周 期	秒, 时(s, h)
		毫米(mm)	<i>α</i>	吸 收 率	
<i>D</i>	质扩散系数	米 ² /秒(m ² /s)	<i>α</i>	对流换热系数	瓦/米 ² ·度(W/m ² ·°C)
<i>E</i>	辐 射 力	瓦/米 ² (W/m ²)	<i>β</i>	肋化系数	
<i>F</i>	表 面 积	米 ² (m ²)	<i>β</i>	容积膨胀系数	1/开(1/K)
<i>f</i>	断 面 积	米 ² (m ²)	<i>δ</i>	厚 度	米(m)
<i>f</i>	摩擦系数		<i>Δ</i>	差 值	
<i>G</i>	投射辐射	瓦/米 ² (W/m ²)	<i>e</i>	发 射 率	
<i>g</i>	重力加速度	米/秒 ² (m/s ²)	<i>e</i>	换热器效能	
<i>I</i>	辐射强度	瓦/米 ² ·球面度(W/m ² ·sr)	<i>η</i>	效 率	
<i>i</i>	焓	焦耳/千克(J/kg)	Θ	无量纲过余温度	
<i>H</i>	高 度	米, 毫米(m, mm)	<i>θ</i>	过余温度	度(°C)
<i>J</i>	有效辐射	瓦/米 ² (W/m ²)	<i>λ</i>	导热系数	瓦/米·度(W/m·°C)
<i>K</i>	传热系数	瓦/米 ² ·度(W/m ² ·°C)	<i>μ</i>	分 子 量	
<i>l</i>	长 度	米(m)	<i>μ</i>	动力粘度	牛顿·秒/米 ² (N·s/m ²)
<i>M</i>	质 流 量	千克/秒(kg/s)			千克/秒·米(kg/s·m)
<i>M</i>	质 量	千克(kg)	<i>ν</i>	运动粘度	米 ² /秒(m ² /s)
<i>m</i>	质流通量	千克/米 ² ·秒(kg/m ² ·s)	<i>ξ</i>	延迟时间	秒, 时(s, h)
NTU	传热单元数		<i>ρ</i>	密 度	千克/米 ³ (kg/m ³)
<i>p</i>	压 强	帕(Pa)	<i>ρ</i>	反 射 率	
		巴(bar)	<i>τ</i>	透 射 率	
		牛顿/米 ² (N/m ² 或 kg/m·s ²)	<i>τ</i>	时 间	秒, 时(s, h)
<i>Q</i>	热 流 量	焦耳/秒(J/s, W)	<i>τ</i>	剪 应 力	巴(bar)
<i>q</i>	热流通量	瓦/米 ² (W/m ²)			牛顿/米 ² (N/m ²)
<i>R</i>	热 阻	米 ² 度/瓦(m ² ·°C/W)	<i>φ</i>	角 系 数	
			<i>ω</i>	角 速 度	弧度/秒(rad/s)

相似准则名称

$$Bi = \frac{al}{\lambda_w} \text{——毕渥(Biot) 准则}$$

$$Co = \alpha \left[\frac{\lambda^3 \rho^2 g}{\mu^2} \right]^{-1/3} \text{——凝结 (Condensation) 准则}$$

$$Fo = \frac{a\tau}{l^2} \text{——傅里叶 (Fourier) 准则}$$

$$Ga = \frac{gl^3}{\nu^2} \text{——伽利略 (Galileo) 准则}$$

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

$$Le = \frac{a}{D} \text{——刘伊斯 (Lewis) 准则}$$

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

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

$$Pe = Re \cdot Pr = \frac{ul}{a} \text{——贝克利 (Peclet) 准则}$$

$$Ra = Gr \cdot Pr \text{——瑞利 (Rayleigh) 准则}$$

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

$$Sc = \frac{\nu}{D} \text{——施米特 (Schmidt) 准则}$$

$$Sh = \frac{\alpha_D l}{D} \text{——宜乌特 (Sherwood) 准则}$$

$$St = \frac{Nu}{Re \cdot Pr} = \frac{a}{uc_p \rho} \text{——斯坦登 (Stanton) 准则}$$

$$St_D = \frac{Sh}{Re \cdot Sc} = \frac{\alpha_D}{u} \text{——质交换斯坦登准则}$$

主要注角符号

f——液体 (Fluid)

w——壁面 (Wall)

c——临界 (Critical)

e——当量, 等效 (Equivalent)

s——饱和 (Saturation)

m——平均 (Mean)

min——最小 (Minimum)

max——最大 (Maximum)

其他英文注角在各章中指明。本书还使用基本符号作注角, 如对流换热热阻 R_a 等。

目 录

基本符号表	
绪 论	1
第一章 导热理论基础	7
第一节 基本概念及傅里叶定律	7
第二节 导热系数	9
第三节 导热微分方程式	13
第四节 导热过程的单值性条件	16
第二章 稳态导热	21
第一节 通过平壁的导热	21
第二节 通过复合平壁的导热	27
第三节 通过圆筒壁的导热	29
第四节 通过肋壁的导热	35
第五节 通过接触面的导热	41
第六节 二维稳态导热问题	42
第三章 非稳态导热	49
第一节 非稳态导热的基本概念	49
第二节 对流换热边界条件下非稳态导热	50
第三节 常热流密度边界条件下非稳态导热	65
第四节 周期性变化边界条件下非稳态导热	66
第四章 导热问题数值解法基础	75
第一节 有限差分法	75
第二节 稳态导热问题的数值计算	77
第三节 非稳态导热问题的数值计算	86
第五章 对流换热分析	99
第一节 对流换热概述	99
第二节 对流换热微分方程组	102
第三节 边界层换热微分方程组的解	105
第四节 边界层换热积分方程组及求解	113
第五节 动量传递和热量传递的类比	120
第六节 相似理论基础	125
第六章 单相流体对流换热及准则关联式	138
第一节 管内受迫流动换热	138
第二节 外掠圆管流动换热	149
第三节 自然对流换热	155
第七章 凝结与沸腾换热	169

第一节	凝结换热	169
第二节	沸腾换热	178
第三节	热管	180
第八章	热辐射的基本定律	189
第一节	基本概念	189
第二节	热辐射的基本定律	192
第九章	辐射换热计算	203
第一节	黑表面间的辐射换热	203
第二节	灰表面间的辐射换热	207
第三节	角系数的确定方法	215
第四节	气体辐射	220
第五节	太阳辐射	228
第十章	传热和换热器	237
第一节	通过肋壁的传热	237
第二节	有复合换热时的传热计算	239
第三节	传热的增强和削弱	241
第四节	换热器的型式和基本构造	246
第五节	平均温度差	250
第六节	换热器计算	255
*第七节	换热器性能评价简述	263
第十一章	质交换	268
第一节	质扩散及其基本定律	269
第二节	动量、热量、质量传递的类比	275
第三节	对流质交换的准则关联式	279
第四节	液体蒸发时的热质交换	281
附 录		288

绪 论

传热学是研究热量传递过程规律的一门科学。

凡有温度差,就有热量自发地由高温物体传到低温物体。由于自然界和生产过程中,到处存在温度差,因此,传热是自然界和生产领域中非常普遍的现象,传热学的应用领域也就十分广泛。诸如,热力发电厂为强化换热和节能而改进电厂锅炉及其他换热设备的结构;化学工业生产为维持化学工艺流程的温度而研制特殊要求的加热或冷却技术以及余热的回收;电子工业中为解决超大规模集成电路或电子仪器而需研究散热方法;机械制造业测算和控制冷加工或热加工中机件的温度场;核能、火箭等尖端技术中也存在大量传热问题需要解决;太阳能、地热能和工业余热利用工程中高效能换热器的开发和设计,以及应用传热学知识指导强化传热或削弱传热达到节能目的;其他如农业、生物、医学、地质、气象、环境保护等部门,无一不需要传热学。因此,传热学已是现代技术科学的主要技术基础学科之一。近几十年来,传热学的成果对各部门技术进步起了很大的促进作用,而传热学向各技术领域的渗透,又推动了学科的迅速发展。

在供热通风空调及燃气工程专业领域中更是不乏传热问题。例如热源和冷源设备的选择、配套和合理有效利用;供热通风空调及燃气产品的开发、设计和实验研究;各种供热设备管道的保温材料及建筑围护结构材料等的研制及其热物理性质的测试、热损失的分析计算;各类换热器的设计、选择和性能评价;建筑物的热工计算和环境保护等等,都要求具备一定的传热学理论知识。传热学是本专业的一门重要技术基础课程。

必须指出,一些传热过程还伴随着由于物质浓度差引起的质量传递,即传质过程。例如,空调系统中,冷的喷淋水与空气的热质交换过程;湿空气参数的测量;蒸发式冷凝器中冷却水蒸发时的传热和传质;建筑围护结构中水分的转移过程;水果蔬菜等农产品的气调保鲜等等,都与传质密切相关。为此,本书在着重阐述传热问题之后,还以专门的一章,讨论传质的基本规律和计算。

0-1 传热的基本方式

为了由浅入深地认识和掌握传热的规律,先来分析一些常见的传热现象。例如房屋墙壁在冬季的散热,整个过程如图0-1所示可分为三段,首先热由室内空气以对流换热和墙与物体间的辐射方式传给墙内表面;再由墙内表面以固体导热方式传递到墙外表面;最后由墙外表面以空气对流换热和墙与物体间的辐射方式把热传给室外环境。显然,在其他条件不变时,室内外温度差越大,传热量也越大。又如,热水暖气片的传热过程,热水的热量先以对流换热方式传给壁内侧,再由导热方式通过壁,然后壁外侧空气以对流换热和壁与周围物体间的辐射换热方式将热量传给室内。从实例不难了解,传热过程是由导热、热对流、热辐射三种基本传热方式组合形成的。要了解传热过程的规律,就必须首先分别分析三种基本传热方式。绪论将对这三种基本传热方式作扼要解释,并给出它们的最基本的表

达式，使读者对传热学的全貌和学习目的有一梗概认识。

一、导热

导热又称热传导，是指物体各部分无相对位移或不同物体直接接触时依靠分子、原子

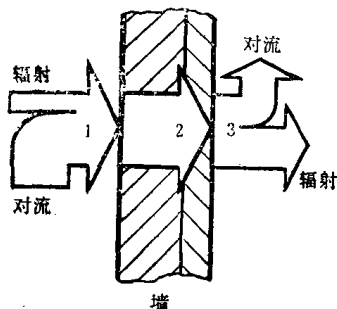


图 0-1 墙壁的散热

及自由电子等微观粒子热运动而进行的热量传递现象，导热是物质的属性，导热过程可以在固体、液体及气体中发生。但在引力场下，单纯的导热一般只发生在密实的固体中，因为，在有温差时，液体和气体中难以维持单纯的导热。

大平壁导热是导热的典型问题。由前述墙壁的导热过程看出，平壁导热与壁两侧表面的温度差成正比；与壁厚成反比；并与材料的导热性能有关。因此，通过平壁的导热量的计算式是：

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t F \quad \text{W} \quad (0-1a)$$

或热流量

$$q = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t \quad \text{W/m}^2 \quad (0-1b)$$

式中 F ——壁面积， m^2 ；

δ ——壁厚， m ；

Δt ——壁两侧表面的温差， $\Delta t = t_{w1} - t_{w2}$ ， $^{\circ}\text{C}$ ；

λ ——比例系数，称为导热系数或热导率，其意义是指具有单位温度差的单位厚度物体，在它的单位面积上每单位时间的导热热量，它的国际单位是 $\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ 。

它表示材料导热能力的大小。导热系数一般由实验测定，例如，普通混凝土 $\lambda = 0.75 \sim 0.8 \text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ ，纯铜的 λ 将近 $400 \text{ W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ 。

在传热学中，常用电学欧姆定律的形式——电流 = 电位差/电阻来分析热量传递过程中热量与温度差的关系。即把热流量的计算式改写为欧姆定律的形式

$$\text{热流量 } q = \frac{\text{温度差 } \Delta t}{\text{热阻 } R_t} \quad \text{W/m}^2 \quad (0-2)$$

与欧姆定律对照，可以看出热流相当于电流；温度差相当于电位差；而热阻相当于电阻。如是，得到一个在传热学非常重要且适用的概念——热阻。对不同的传热方式，热阻 R_t 的具体表达式将是不一样的。以平壁为例，改写式 (0-1b)，得

$$q = \frac{\Delta t}{\delta/\lambda} = \frac{\Delta t}{R_\lambda} \quad \text{W/m}^2 \quad (0-1c)$$

用 R_λ 表示导热热阻，则平壁导热热阻为 $R_\lambda = \delta/\lambda$ ， $\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。可见平壁导热热阻与壁厚成正比，而与导热系数成反比。 R_λ 大，则 q 小。对于 $F \text{ m}^2$ 面积 of 平壁，则热阻为 $\delta/(\lambda F)$ ， $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。热阻的倒数称为热导，它相当于电导。不同情况下的导热过程，导热热阻的表达式亦各异。本书将就几种典型情况下导热的宏观规律及其计算方法分章论述。

二、热对流

依靠流体的运动，把热量由一处传递到另一处的现象，称为热对流，它是传热的另一种基本方式。若热对流过程中单位时间通过单位面积有质量 m ($\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$) 的流体由温

度 t_1 的地方流到 t_2 处, 则此热对流传递的热量^①应为:

$$q = mc_p(t_2 - t_1) \quad \text{W/m}^2 \quad (0-3)$$

因为有温度差, 热对流又必然同时伴随热传导。而且工程上遇到的实际传热问题, 都是流体与固体壁直接接触时的换热, 故传热学把流体与固体壁间的换热称为对流换热(也称放热)。与热对流不同的是, 对流换热过程既有热对流作用, 亦有导热作用, 故已不再是基本传热方式。对流换热的基本计算式是牛顿1701年提出的, 即

$$q = \alpha(t_w - t_f) = \alpha \Delta t \quad \text{W/m}^2 \quad (0-4a)$$

式中 t_w ——固体壁表面温度, $^{\circ}\text{C}$;

t_f ——流体温度, $^{\circ}\text{C}$;

α ——换热系数, 其意义是指单位面积上, 当流体同壁之间为单位温差, 在单位时间内所能传递的热量。常用的换热系数单位是 $\text{J/m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C}$ 或 $\text{W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ 。 α 的大小表达了该对流换热过程的强弱。例如热水暖气片外壁面和空气间的换热系数约为 $6 \text{W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$, 而它的内壁面和热水之间的 α 则可达数千 $\text{W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ 。附录11列有一些典型条件下 α 的概略范围, 供读者在学习中参考。由于 α 受制于多项影响因素, 故研究对流换热问题的关键是如何确定换热系数。本书将对一些典型情况下的对流换热过程进行分析, 并提供理论解或实验解。

式(0-4)称为牛顿冷却公式。利用热阻概念, 按式(0-2)改写式(0-4a)得

$$q = \frac{\Delta t}{1/\alpha} = \frac{\Delta t}{R_a} \quad (0-4b)$$

式中 $R_a = 1/\alpha$ 即为单位壁表面积上的对流换热热阻, $\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C/W}$, 则 F 面积的对流换热热阻为 $1/(\alpha \cdot F) \cdot ^{\circ}\text{C/W}$ 。

三、热辐射

导热或对流都是以冷、热物体的直接接触来传递热量, 热辐射则不同, 它依靠物体表面对外发射可见和不可见的射线(电磁波, 或者说光子)传递热量。物体表面每单位时间、单位面积对外辐射的热量称为辐射力, 用 E 表示, 它的常用单位是 $\text{J/m}^2 \cdot \text{s}$ 或 W/m^2 , 其大小与物体表面性质及温度有关。对于绝对黑体(一种理想的热辐射表面), 理论和实验证实, 它的辐射力 E_b 与表面热力学温度的4次方成比例, 即斯蒂芬-玻尔茨曼定律:

$$E_b = C_b \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad \text{W/m}^2 \quad (0-5a)$$

式中 E_b ——绝对黑体辐射力, W/m^2 ;

C_b ——绝对黑体辐射系数, $C_b = 5.67 \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$;

T ——热力学温度, K 。

一切实际物体的辐射力都低于同温度下绝对黑体的辐射力, 等于

$$E = \varepsilon_b C_b \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad \text{W/m}^2 \quad (0-5b)$$

式中 ε 为实际物体表面的发射率, 也称黑度, 其值处于0~1之间。

物体间靠热辐射进行的热量传递称为辐射换热, 它的特点是: 在热辐射过程中伴随着

^① 热对流传递的能量还应包括两处流体的动能差, $\Delta u^2/2$, 但对一般工程问题, $\Delta u^2/2$ 一项可能为0(等速流动)或者远小于 $c_p t$ 项, 可略去。

能量形式的转换（物体内能→电磁波能→物体内能）；不需要冷热物体直接接触；不论温度高低，物体都在不停地相互发射电磁波能，相互辐射能量，高温物体辐射给低温物体的能量大于低温物体向高温物体辐射的能量，总的结果是热由高温传到低温。

两个无限大的平行平面间的热辐射是最简单的辐射换热问题，设它的两表面热力学温度分别为 T_1 和 T_2 ，且 $T_1 > T_2$ ，则两表面间单位面积、单位时间辐射换热量的计算式是：

$$q = C_{1,2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad \text{W/m}^2 \quad (0-5c)$$

式中 $C_{1,2}$ 称1和2两表面间的相当辐射系数，它取决于辐射表面材料性质及状态，其值在0~5.67之间。关于辐射换热热阻的表述，将在第八章讨论。本书的辐射换热部分将论述热辐射的宏观规律及若干典型条件下的辐射换热计算方法。

0-2 传热过程

在工程中经常遇到两流体间的换热。热量从壁一侧的流体通过壁传递给另一侧的流体，

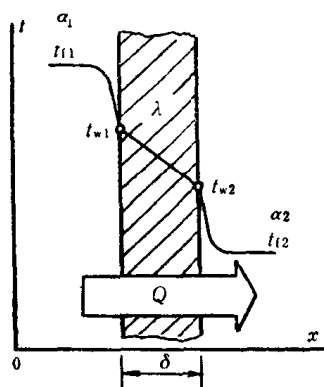


图 0-2 两流体间的传热过程

称为传热过程。在初步了解前述换热方式后，即可导出传热过程的基本计算式。设有一大平壁，面积为 $F\text{m}^2$ ，两侧分别为温度 t_{f1} 的热流体和 t_{f2} 的冷流体，两侧换热系数分别为 α_1 及 α_2 ，两侧壁面温度则分别为 t_{w1} 和 t_{w2} ，壁的材料导热系数为 λ ，厚度为 δ ，如图0-2所示。若传热工况不随时间变化，即各处温度及传热量不随时间改变，传热过程处于稳态。又设壁的长和宽均远大于它的厚度，可认为热流方向与壁面垂直。若将该平壁在传热过程中的各处温度描绘在 $t \sim x$ 坐标图上，将如图中的曲线所示，即该传热过程的温度分布。按图0-1的分析方法，整个传热过程分三段分别用下列三式表达：

热量由热流体以对流换热传给壁左侧，按式（0-4），对单位时间和单位面积

$$q = \alpha_1(t_{f1} - t_{w1})$$

热量以导热方式通过壁，按式（0-1）

$$q = \frac{\lambda}{\delta}(t_{w1} - t_{w2})$$

热量由壁右侧以对流换热传给冷流体，即

$$q = \alpha_2(t_{w2} - t_{f2})$$

在稳态情况下，以上三式的热流量 q 相等，把它们改写为

$$t_{f1} - t_{w1} = q/\alpha_1$$

$$t_{w1} - t_{w2} = q/\left(\frac{\lambda}{\delta}\right)$$

$$t_{w2} - t_{f2} = q/\alpha_2$$

三式相加，消去未知的 t_{w1} 及 t_{w2} ，整理后得

$$q = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} (t_{f1} - t_{f2})$$

$$= K(t_{f1} - t_{f2}) \quad \text{W/m}^2 \quad (0-6a)$$

对 $F \text{ m}^2$ 的平壁, 传热量为: $Q = K(t_{f1} - t_{f2})F \quad \text{W} \quad (0-6b)$

式中 $K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad \text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \quad (0-7)$

K 称为传热系数, 它表明单位时间、单位壁面积上, 冷热流体间每单位温度差可传递的热量, K 的国际单位是 $\text{J/m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$ 或 $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, 故 K 能反映传热过程的强弱。按热阻形式改写式 (0-6a), 得

$$q = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{1/K} = \frac{\Delta t}{R_k} \quad (0-6c)$$

R_k 为平壁单位面积传热热阻, 即

$$R_k = \frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \quad \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W} \quad (0-8)$$

可见传热过程的热阻等于热流体、冷流体的换热热阻及壁的导热热阻之和, 相当于串联电阻的计算方法, 掌握这一点对于分析和计算传热过程十分方便。由传热热阻的组成不难认识, 传热阻力的大小与流体的性质、流动情况、壁的材料以及形状等许多因素有关, 所以它的数值变化范围很大。例如, 一砖厚 (240mm) 的房屋外墙的 K 值约为 $2 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, 而在蒸汽热水器中, K 值可达 $5000 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 。对于换热器, K 值越大, 说明传热越好。但对建筑物围护结构和热力管道的保温层等, 它们的作用是减少热损失, 当然 K 值越小越好。附录11列有 K 值的概略范围, 可供参考。

综上所述, 学习传热学的目的概括起来就是: 认识传热规律; 计算各种情况下的传热量或传热过程中的温度; 学习增强或减弱热量传递过程的方法以及对传热现象进行实验研究的方法。

本书采用国际单位制, 为方便起见, 附录1列出传热计算中常用的国际单位制与工程单位制的换算表。

本书各章均有小结, 它将指出该章的中心内容, 学习思路及对学习该章的基本要求。

小 结

绪论概述了传热学应用的实例及其广泛性。介绍了本书的主要内容, 即导热、对流换热、热辐射、传热等部分最基本的计算式。学习绪论的基本要求是:

(1) 掌握一些基本概念, 如导热、热对流、对流换热、热辐射、辐射换热、传热、传质、热阻等。

(2) 熟练掌握式 (0-1) 至式 (0-8) 各式的意义及各物理量的单位。

(3) 结合本专业特点初步了解学习传热学的目的。

【例】 混凝土板厚 $\delta = 100 \text{ mm}$, 导热系数 $\lambda = 1.54 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, 两侧空气温度分别为 $t_{f1} = 5^\circ\text{C}$ 和 $t_{f2} = 30^\circ\text{C}$, 换热系数 $\alpha_1 = 25 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, $\alpha_2 = 8 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, 求单位面积上传热过程的各项热阻、传热热阻、传热系数及热流量。

【解】 单位面积各项热阻

$$R_{a1} = \frac{1}{\alpha_1} = \frac{1}{25} = 0.04 \quad \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$$

$$R_{\lambda} = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{0.1}{1.54} = 0.065$$

$$R_{a2} = \frac{1}{\alpha_2} = \frac{1}{8} = 0.125$$

∴ 传热热阻 (单位面积)

$$R_K = R_{a1} + R_{\lambda} + R_{a2} = 0.04 + 0.065 + 0.125 = 0.23 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$$

如是传热系数

$$K = \frac{1}{R_K} = \frac{1}{0.23} = 4.35 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

热流通量为

$$q = K \Delta t = 4.35(30 - 5) = 109 \text{ W/m}^2$$

本题 α_2 一侧的热阻较大一些,但三项热阻相差并不悬殊。请注意 K 值比最小的 α_2 还小。

复 习 题

1. 试以生活和生产实践中的例子说明导热、对流换热、辐射换热现象?
2. 夏季在维持 20°C 的室内,穿单衣感到舒适,而冬季在保持同样温度的室内却必须穿绒衣,试从传热的观点分析其原因?冬季挂上窗帘布后顿觉暖和,原因又何在?
3. 热对流和对流换热是否同一现象?试以实例说明。对流换热是不是基本传热方式?
4. 试述暖水瓶从热水到室内的散热过程(一般瓶胆为镀银真空夹层玻璃)?
5. 面积为 12m^2 的壁的总导热热阻与它单位面积上的热阻 R_{λ} 之比是多少?
6. 利用式(0-1)分析,在什么条件下图0-2中平壁内的温度呈直线关系变化?
7. 一燃气加热炉,炉子内壁为耐火砖,外壁为普通红砖,两种砖之间有的填充保温材料,而有的则为空气夹层,试分析这两种情况下由炉内到炉外环境的散热过程?
8. 求房屋外墙的散热量 q 以及它的内外表面温度 t_{w1} 和 t_{w2} 。已知: $\delta = 360\text{mm}$, 室外温度 $t_{t2} = -10^\circ\text{C}$, 室内温度 $t_{t1} = 18^\circ\text{C}$, 墙的 $\lambda = 0.61\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, 内表面换热系数 $\alpha_1 = 8.7\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, 外表面 $\alpha_2 = 24.5\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 。
9. 一大平板,高 3m ,宽 2m ,厚 0.02m ,导热系数为 $45\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$,两侧表面温度分别为 $t_1 = 150^\circ\text{C}$ 及 $t_2 = 285^\circ\text{C}$,试求该板的热阻、单位面积热阻、热流通量及热流量。
10. 空气在一根内径 50mm ,长 2.5m 的管子内流动并被加热,已知空气平均温度为 85°C ,管壁对空气的 $\alpha = 73\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$,热流通量 $q = 5110\text{W/m}^2$,试确定管壁温度及热流量。
11. 已知两平行平壁,壁温分别为 $t_1 = 50^\circ\text{C}$, $t_2 = 20^\circ\text{C}$,辐射系数 $C_{1,2} = 3.96$,求每平方米的辐射换热量 W/m^2 。若 t_1 增加到 200°C ,辐射换热量变化了多少?
12. 燃气热水加热器传热面积为 24m^2 ,管内热水 $\alpha_1 = 5000\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$,管外燃气 $\alpha_2 = 85\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$,已知燃气平均温度 $t_{t2} = 500^\circ\text{C}$,热水 $t_{t1} = 45^\circ\text{C}$,求此加热器的传热系数 $\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$,传热量 W 。分析本题的计算结果,若直接把燃气的换热系数作为传热系数,即 $K = 45$ 计算,误差多大?为什么?又本题中管子为厚度 1mm 的铜管,是否需要考虑管壁的热阻?为什么?

第一章 导热理论基础

导热是指温度不同的物体各部分或温度不同的两物体之间直接接触而发生的热传递现象。从微观角度来看,热是一种联系到分子、原子、自由电子等的移动、转动和振动的能量。因此,物质的导热本质或机理就必然与组成物质的微观粒子的运动有密切的关系。在气体中,导热是气体分子不规则热运动时相互作用或碰撞的结果。在介电体中,导热是通过晶格的振动来实现的。由于晶格振动的能量是量子化的,我们把晶格振动的量子称为声子。这样,介电物质的导热可以看成是声子相互作用和碰撞的结果。在金属中,导热主要是通过自由电子的相互作用和碰撞来实现的,声子的相互作用和碰撞只起微小的作用。至于液体中的导热机理,相对于气体和固体而言,则还不十分清楚。但近年来的研究结果表明,液体的导热机理类似于介电体,即主要依靠晶格的振动来实现^[1]。应该指出,在液体和气体中,只有在消除对热流传递的条件下,才能实现纯导热过程。

导热理论是从宏观角度进行现象分析的,它并不研究物质的微观结构,而把物质看作是连续介质。当研究对象的几何尺寸比分子的直径和分子间的距离大得多时,这种看法无疑是正确的。在一般情况下,大多数的固体、液体及气体,可以认为是连续的介质。但在某些情形下,例如稀薄的气体,就不能认为是连续的介质。

导热理论的任务就是要找出任何时刻物体中各处的温度。为此,本章将从温度分布的基本概念出发,讨论导热过程的基本规律以及描述物体内部温度分布的导热微分方程。此外,对求解导热微分方程所需要的条件进行简要的说明。

第一节 基本概念及傅里叶定律

1-1 基本概念

一、温度场

温度场是指某一时刻空间所有各点温度分布的总称。一般地说,它是时间和空间的函数,即

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

式中 t —— 温度;

x, y, z —— 空间坐标^①;

τ —— 时间。

式(1-1)表示物体的温度在 x 、 y 、 z 三个方向和在时间上都发生变化的三维非稳

^① 这是对直角坐标系而言;对于圆柱坐标系,空间坐标为 (r, φ, z) ;对于球坐标系为 (r, θ, φ) 。

态温度场。如果温度场不随时间而变化, 即 $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$, 则为稳态温度场, 这时, $t = f(x, y, z)$ 。如果稳态温度场仅和二一个或一个坐标有关, 则称为二维或一维稳态温度场。一维稳态温度场, 可表示为

$$t = f(x) \quad (1-2)$$

它是温度场中最简单的一种情况。具有稳态温度场的导热过程叫做稳态导热。温度场随时间变化的导热过程叫做非稳态导热。

二、等温面与等温线

同一时刻, 温度场中所有温度相同的点连接所构成的面叫做等温面。不同的等温面与同一平面相交, 则在此平面上构成一簇曲线, 称为等温线。在同一时刻任何给定地点的温度不可能具有一个以上的不同值, 所以两个不同温度的等温面或两条不同温度的等温线绝不会彼此相交。它们或者是物体中完全封闭的曲面(线), 或者就终止于物体的边界上。

在任何时刻, 标绘出物体中的所有等温面(线), 就给出了物体内的温度分布情形, 亦即给出了物体的温度场。所以, 习惯上物体的温度场用等温面图或等温线图来表示。图 1-1 是用等温线图表示温度场的示例。

三、温度梯度

在等温面上, 不存在温度差异, 不可能有热量的传递。热量传递只发生在不同的等温面之间。自等温面上的某点出发, 沿不同方向到达另一等温面时, 将发现单位距离的温度变化, 即温度的变化率, 具有不同的数值。自等温面上某点到另一个等温面, 以该点法线方向的温度变化率为最大。以该点法线方向为方向, 数值也正好等于这个最大温度变化率的向量称为温度梯度, 用 $\text{grad } t$ 表示, 正向是朝着温度增加的方向, 如图 1-2 所示。

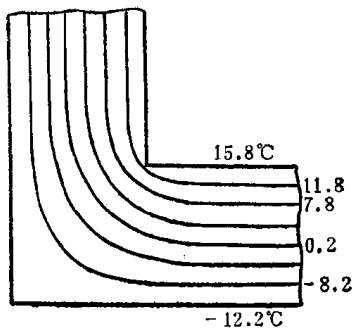


图 1-1 房屋墙角内的温度场

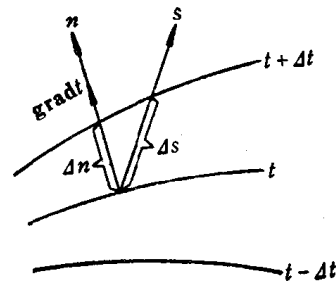


图 1-2 温度梯度

$$\text{grad } t = \frac{\partial t}{\partial n} n \quad (1-3)$$

式中 n 表示法线方向上的单位向量, $\frac{\partial t}{\partial n}$ 表示沿法线方向温度的方向导数。温度梯度在直角坐标系中的三个分量等于其相应的方向导数, 即

$$\text{grad } t = \frac{\partial t}{\partial x} i + \frac{\partial t}{\partial y} j + \frac{\partial t}{\partial z} k \quad (1-4)$$

式中 i 、 j 和 k 分别表示三个坐标轴方向的单位向量。温度梯度的负值, $-\text{grad } t$ 叫温度降度, 它是与温度梯度数值相等而方向相反的向量。

四、热流向量

单位时间单位面积上所传递的热量称为热流通量,或称热流密度。在不同方向上,热流通量的大小是不同的。等温面上某点,以通过该点最大热流通量的方向为方向,数值上也正好等于沿该方向热流通量的向量称为热流通量向量,简称热流向量。其他方向的热流通量都是热流向量在该方向的分量。热流向量在直角坐标系中的三个分量可以表示为:

$$q = q_x i + q_y j + q_z k \quad (1-5)$$

1-2 傅里叶定律

傅里叶(J. Fourier)在实验研究导热过程的基础上,把热流向量和温度梯度联系起来,得到

$$q = -\lambda \text{grad} t \quad \text{W/m}^2 \quad (1-6)$$

上式就是1822年由傅里叶提出的导热基本定律的数学表达式,亦称傅里叶定律。式中的比例系数 λ 称为导热系数。

式(1-6)说明,热流向量和温度梯度位于等温面的同一法线上,但指向温度降低的方向,参看图1-3,式中的负号就是表示热流向量的方向与温度梯度的方向相反,永远顺着温度降低的方向。

按照傅里叶定律和式(1-4)、式(1-5),可以看到,热流通量向量沿 x 、 y 和 z 轴的分量应为

$$\left. \begin{aligned} q_x &= -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \\ q_y &= -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \\ q_z &= -\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

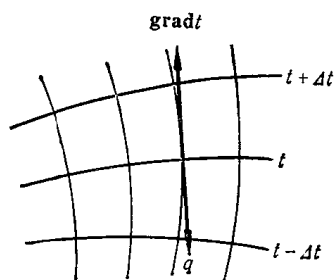


图 1-3 热流向量和温度梯度

值得指出的是,式(1-6)和式(1-7)中隐含着一个条件,就是导热系数在各个不同方向是相同的。这种导热系数与方向无关的材料称为各向同性材料。换句话说,傅里叶定律,即式(1-6)和式(1-7),只适用于均匀的各向同性材料。

傅里叶定律确定了热流向量和温度梯度的关系。因此要确定热流向量的大小,就必须知道温度梯度,亦即知道物体内的温度场。

第二节 导热系数

导热系数是物质的一个重要热物性参数,可以认为,式(1-6)就是导热系数的定义式,即

$$\lambda = \frac{q}{-\text{grad} t} \quad (1-8)$$

可见,导热系数的数值就是物体中单位温度降度单位时间通过单位面积的导热热量,它的单位是 $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ 。导热系数的数值表征物质导热能力的大小。

工程计算采用的各种物质的导热系数数值一般都由实验测定。一些典型物质的导热系数的数值列于表1-1及附录2至8中。一般而言,金属比非金属(介电体)具有较高的导

热系数：物质的固相比它们相应的液相具有较高的导热性能，液相比气相具有较高的导热系数。更详细的资料可以查阅文献[2]、[3]。各类物质导热系数的数值范围示于图1-4中。

273K时物质的导热系数 表 1-1

物 质 名 称	W/m·°C	物 质 名 称	W/m·°C
金属固体:		硼硅酸耐热玻璃液体:	1.05
银(最纯的)	418	水银	8.21
铜(纯的)	387	水	0.552
铅(纯的)	203	二氧化硫SO ₂	0.211
锌(纯的)	112.7	氟代甲烷CH ₃ Cl	0.178
铁(纯的)	73	二氧化碳CO ₂	0.105
锡(纯的)	66	氟利昂CCl ₂ F ₂	0.0728
铅(纯的)	34.7	气体:	
非金属固体:		氢	0.175
方镁石MgO	41.6	氮	0.141
石英(平行于轴)	19.1	空气	0.0243
刚玉石, Al ₂ O ₃	10.4	戊烷	0.0128
大理石	2.78	三氯甲烷	0.0068
冰, H ₂ O	2.22		
熔凝石英	1.91		

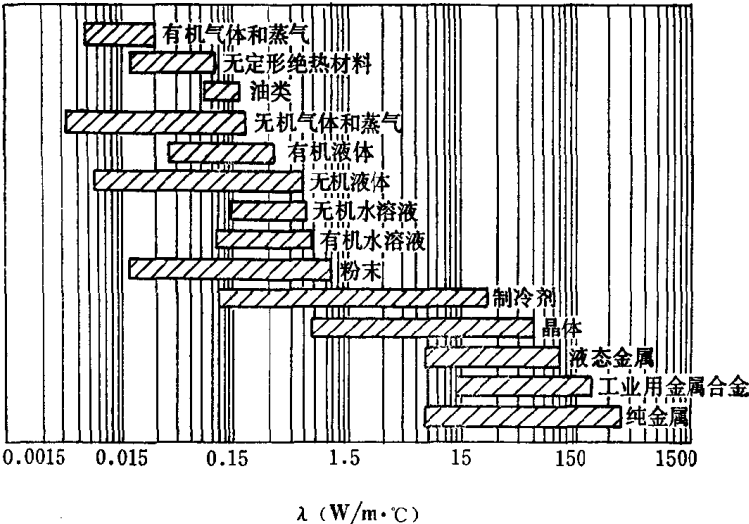


图 1-4 各类物质导热系数的范围

物质的导热系数不但因物质的种类而异，而且还和物质的温度、湿度、压力和密度等因素有关。导热既然是在温度不同的物体各部分之间进行的，所以温度的影响尤为重要。许多工程材料，在一定温度范围内，导热系数可以认为是温度的线性函数，即

$$\lambda = \lambda_0 (1 + bt) \tag{1-9}$$

式中 λ_0 是某个参考温度时的导热系数， b 是由实验确定的常数。

不同物质导热系数的差异是由于物质构造上的差别以及导热的机理不同所致。为了更全面地了解各种因素，下面分别研究气体、液体和固体的导热系数。