

CHUANYANR
XUE

传热学

张兴中 黄文 刘庆国 编著
李强 主审



国防工业出版社

National Defense Industry Press

传 热 学

张兴中 黄 文 刘庆国 编著
李 强 主审

国防工业出版社

· 北京 ·

前 言

传热知识是高等学校工科类学生应该掌握的、必不可少的知识内容,但由于各专业对传热学知识应用的侧重点不同,所以不同专业所讲授的传热学课程内容也有所不同。根据面向 21 世纪课程教材和教育部热工课程规划精神,结合多年的教学科研经验,针对非热能类工科专业少学时的传热学课程教学的实际情况,在我们过去编写的传热学教材及以往使用的传热学讲义的基础上,对部分内容进行了增减,编写了此书。本书的特点是不但注重传热学基本理论阐述,而且注重传热学应用方面的介绍,编写中对原书中部分内容进行了调整,适当增加了习题量,增加了热传导理论部分的深度,减少了应用部分比较复杂的理论推导,注重应用性内容的介绍;减少了对流换热部分边界层微分方程组的推导,注重对流换热的实验研究方法的介绍,去掉了沸腾与凝结换热的内容;去掉了辐射换热部分气体辐射的内容。近年来,随着计算机技术的进步,传热问题的数值方法发展迅速,已经形成了一个新的学科方向,应用方面也获得了广泛的普及,出现了很多方便应用的软件。鉴于此,本书增加了导热问题有限元分析的内容,结合作者的科研成果,增加了导热的有限元分析算例,增加了差分法求解平面稳态和非稳态问题的 VB 语言程序,以增强学生应用计算机求解传热问题的能力。考虑到学时的限制和内容的完整性,本书中的有限元分析内容只介绍了基于伽辽金法推导求解二维导热问题温度场基本方程的有限元方法,对综合传热和换热器进行了简单的介绍。本书适合于高等学校机械类各专业作为少学时传热学的教材或参考书,也可供相关专业学生和技术人员参考。

本书由张兴中、黄文、刘庆国、金昕编著,张兴中编写第 1 章、第 2 章、第 3 章及附录 2 中的第 2 节,黄文编写第 4 章、第 5 章及附录 2 中的第 1 节,刘庆国编写第 6 章、第 7 章,金昕编写第 8 章、附录 1,全书由张兴中统稿。河北科技大学李强教授任主审,对本书进行了审核。

在编著及修订工作中得到了孙蓟泉教授、盛义平教授的指导,他们提出了极为宝贵的意见,温崇哲教授给予了极大的关心,在此表示衷心的感谢。

由于水平有限,本书错误和不妥之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编著者
2011 年 8 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 热量传递的三种基本方式	1
1.2.1 热传导	2
1.2.2 热对流	3
1.2.3 热辐射	4
1.3 传热过程	5
习题	7
第 2 章 导热基本方程和稳态导热理论	9
2.1 导热基本定律及导热系数	9
2.1.1 基本概念	9
2.1.2 导热基本定律	11
2.1.3 导热系数	11
2.2 导热微分方程式及定解条件	13
2.2.1 导热微分方程式	13
2.2.2 定解条件	16
2.3 单层及多层平壁的稳态导热	17
2.3.1 单层平壁的稳态导热	17
2.3.2 变导热系数时单层平壁的稳态导热	18
2.3.3 多层平壁的稳态导热	20
2.4 无限长圆筒壁的稳态导热	22
2.5 球壁的稳态导热	25
2.6 通过肋片的导热及散热量的计算	27
2.6.1 通过等截面棒的稳态导热	28
2.6.2 通过肋片散热量的计算	31
习题	33
第 3 章 非稳态导热	36
3.1 非稳态导热过程的特点	36
3.2 集总参数法	39

3.3	无限大平板的加热或冷却	43
3.4	半无限大物体的非稳态导热	52
3.5	有限大物体的非稳态导热	53
	习题	56
第4章	导热问题的数值解法	58
4.1	有限差分法的基本原理	58
4.2	稳态导热问题的差分表达式	60
4.2.1	内部节点的差分方程式	60
4.2.2	边界上节点的差分方程式	61
4.3	线性代数方程组的求解	64
4.3.1	直接法	64
4.3.2	迭代法	66
4.4	非稳态导热问题的有限差分法	67
4.5	导热问题温度场的有限元解法	70
4.5.1	稳态导热问题	70
4.5.2	非稳态导热问题	75
	习题	77
第5章	对流换热	78
5.1	对流换热概述	78
5.1.1	牛顿冷却公式	78
5.1.2	影响对流换热的因素分析	78
5.2	边界层分析	80
5.2.1	流动边界层	80
5.2.2	热边界层	81
5.3	边界层对流换热微分方程组	82
5.4	相似原理在对流换热中的应用	83
5.4.1	相似物理现象的性质	84
5.4.2	相似准则间的关系	86
5.4.3	判别相似的条件	86
5.4.4	实验数据的整理	87
5.5	管槽内强迫对流换热	89
5.5.1	紊流强迫换热	89
5.5.2	层流强迫换热	93
5.5.3	过渡区强迫对流换热	94
5.6	外掠圆管强迫对流换热	95
5.6.1	外掠单管	95
5.6.2	外掠管束换热	96

5.7	自然对流换热	99
5.7.1	大空间自然对流换热	99
5.7.2	有限空间自然对流换热	101
习题		102
第6章	辐射换热	105
6.1	热辐射的基本概念	105
6.1.1	热辐射的本质	105
6.1.2	辐射能的吸收、反射和透过	106
6.2	黑体辐射的基本性质	107
6.2.1	辐射力	107
6.2.2	普朗克定律	108
6.2.3	维恩定律	109
6.2.4	斯蒂芬—玻耳兹曼定律	109
6.2.5	兰贝特定律	111
6.3	实际物体的辐射和吸收	112
6.3.1	实际物体的辐射	112
6.3.2	实际物体的吸收	114
6.3.3	基尔霍夫定律	114
6.4	黑体间的辐射换热及角系数	115
6.5	灰体表面间的辐射换热	119
6.5.1	有效辐射	119
6.5.2	辐射热阻	119
6.5.3	特殊放置的两灰体表面间的辐射换热	121
6.5.4	辐射屏	122
6.5.5	复杂系统的辐射换热	123
习题		126
第7章	传热	128
7.1	复合传热	128
7.2	传热过程的分析与计算	129
7.2.1	通过平壁的传热	129
7.2.2	通过圆筒壁的传热	130
7.2.3	通过肋壁的传热	133
7.3	传热的强化和削弱	136
7.3.1	增强传热的基本途径	137
7.3.2	增强传热的方法	138
7.3.3	削弱传热的方法	140
习题		141

第 8 章 换热器	143
8.1 换热器的种类	143
8.1.1 间壁式换热器	143
8.1.2 回热式换热器	143
8.1.3 混合式换热器	143
8.2 换热器的传热系数及平均温差	145
8.2.1 传热系数	145
8.2.2 平均温差	146
8.3 间壁式换热器的计算	151
8.3.1 平均温度差法	151
8.3.2 效能—传热单元数法	152
习题	155
附录	156
附录 1 物理性质参数表	156
附录 2 数值法求解导热问题实例	166
参考文献	179

第1章 绪 论

1.1 引 言

传热学是研究由温差引起的热量传递规律的一门科学,是工程热物理的一个分支。在现代科学技术领域里,传热学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。

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,或从物体的高温部分传向低温部分。由于自然界和生产技术中几乎到处都存在温度差,所以热量传递现象是一种普遍存在的现象。

传热学广泛应用于生产技术各个领域。在能源动力、化工制药、材料冶金、机械制造、电气电信、建筑工程、交通运输、航空航天、纺织印染、农业林业、生物工程、环境保护和气象预报等领域中存在大量的热量传递问题,而且常常还起着关键作用。例如,制冷设备中工作介质的冷凝和蒸发、铸造工艺中铁的熔化和铁水在型腔中的凝固、钢板的焊接、机械加工中工件的冷却、工业炉中钢锭的加热、建筑物的采暖与空调等都需要应用传热学的知识。在供暖通风领域中,解决热源与冷源设备的选择、配套和合理有效利用问题,各种建筑物围护结构热损失的分析 and 计算,供热通风、空调系统中各类换热器的设计、选择和寿命的评价,太阳能和地热的应用等,都需要传热学的知识。航天飞行器在重返地球时以当地声速的 15 倍 ~ 20 倍的极高速度进入大气层,在航天器表面附近发生剧烈的摩擦加热现象,致使气流局部温度高达 5000K ~ 15000K。为保证航天器安全飞行,有效的冷却及隔热方法的研究就成为其关键问题。又如,随着大规模集成电路集成密度的不断提高,电子器件的冷却问题越来越突出,其功率越来越高,产生的热量如果不及时散出,将使温度升高而影响到电子器件的寿命及工作的可靠性,因而电子器件的有效散热方式已成为获得新一代产品的关键问题之一。实际上,近 20 年来,现代科学技术的进步,推动了传热学学科的迅速发展,它的理论体系日趋完善,内容不断充实,已经成为现代科学技术中充满活力的主要基础学科之一。科学技术的飞速发展又给传热学提出了新的研究课题,提供了新的研究手段,使传热学的研究范围不断扩大、研究方法不断更新、理论分析不断完善。

传热学所研究的问题可分为两大类:一类是研究增强或削弱传热技术,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,以满足生产工艺的要求。传热学的发展表明:生产的不断发展提出了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。

1.2 热量传递的三种基本方式

热量传递的三种基本方式包括热传导、热对流、热辐射。它们可以同时存在,但更多的是以复合换热方式出现。

1.2.1 热传导

物体各部分之间不发生相对位移或不同物体直接接触时依靠物质分子、原子及自由电子等微观粒子热运动而进行的热量传递称为热传导(简称导热)。它是因物质直接接触产生的能量从高温部分传递到低温部分,期间没有明显的物质转移,或没有物质的相对位移。例如,固体内部热量从温度较高的部分传递到温度较低的部分,以及温度较高的固体把热量传递给与之接触的温度较低的另一固体都是导热现象。导热可以在固体、液体及气体中发生,但在地球引力场作用的范围内,单纯的导热只能发生在密实的固体中。因为,当有温度差时,液体和气体就会出现对流现象,难以维持单纯的导热。

从微观角度看,气体、液体、导电固体和非导电固体的导热机理是有所不同的。气体导热是气体分子不规则热运动时相互碰撞的结果。导电固体中有相当多的自由电子,它们在晶格之间像气体分子那样运动。自由电子的运动在导电固体的导热中起着主要作用。在非导电固体中,导热是通过晶格结构的振动,即原子、分子在其平衡位置附近的振动来实现的。液体中的导热机理,还存在着不同的观点。本书的论述仅限于导热现象的宏观规律。

在平壁中进行的导热过程最简单。图1-1所示为一块平板,两侧面温度不同,但每个侧面的温度均匀,这样热量就会由高温面传向低温面,假设表面1的温度高于表面2的温度,单位时间内从表面1传导到表面2的热量 Q 与两表面的温度差成正比,与两侧面的面积成正比,与平板的厚度成反比,则 Q 可按式(1-1)计算:

$$Q = \lambda \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} F \quad (1-1)$$

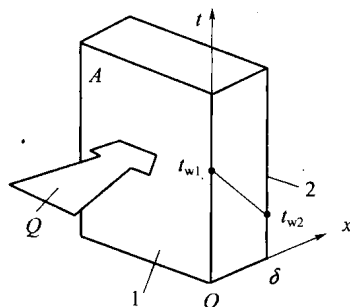


图1-1 通过平板的导热

式中: Q 为单位时间两表面间传递的热量(热流量), W ; t_{w1} 为表面1的温度, $^{\circ}C$; t_{w2} 为表面2的温度, $^{\circ}C$; F 为两侧表面1、表面2的面积, m^2 ; δ 为平板的厚度, m ; λ 为比例系数(导热系数), $W/(m \cdot K)$ 。

式(1-1)中比例系数(导热系数) λ 表征材料的导热能力。在数值上,导热系数等于当两侧面具有单位温差时,经由单位厚度的平板在单位时间内通过单位面积导热所传递的热量。各种材料的导热系数值一般由实验测定。

在传热问题的分析中,常常套用电学的欧姆定律的形式:

$$I = \frac{U}{R}$$

把式(1-1)改写为

$$Q = \frac{\Delta t}{\frac{\delta}{\lambda F}} = \frac{\Delta t}{R} \quad (1-2)$$

相比可知:热流量 Q 相当于电流 I ,温度差 $\Delta t = t_{w1} - t_{w2}$ 相当于电位差 U ,而 $R = \frac{\delta}{\lambda F}$ 相

当于电阻,称为平板导热的热阻,单位为 K/W。用模拟电路图表示如图 1-2 所示。

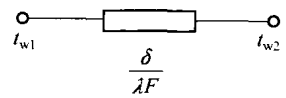


图 1-2 导热热阻的模拟电路

1.2.2 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热量传递过程称为热对流。在热对流过程中,流体各部分之间发生相对位移、冷热流体相互掺混,从而引起了热量传递。热对流仅能发生在流体中,而且由于流体中的分子同时在进行着不规则的热运动,因而对流必然伴随有导热现象。在工程技术上经常遇到的是流体流过与其温度不同的固体壁面时所发生的热交换过程,该过程称为对流换热,以区别于一般意义上的热对流。显然,对流换热是流体的热对流与热传导综合作用的结果。本书只讨论对流换热。

对流换热可以分为两大类:一类是有相变的对流换热,如液体在热表面上沸腾及蒸汽在冷表面上凝结的对流换热问题,分别简称为沸腾换热及凝结换热,它们是伴随有相变的对流换热;另一类是没有相变的单相介质对流换热。

对流换热是极复杂的热交换过程,影响因素很多。就引起流动的原因而论,单相介质对流换热可分为自然对流和强迫对流两类。自然对流是由于流体冷、热各部分的密度不同而引起的,例如暖气片表面附近受热空气的向上流动。如果流体的流动是由于泵、风机或其他压差作用所造成的,则称为强迫对流。冷凝器等管内冷却水的流动都由水泵驱动,它们都属于强迫对流。无论何类形式的对流换热,基本计算公式均采用牛顿冷却公式:

$$Q = \alpha F \Delta t \tag{1-3}$$

式中: Q 为单位时间通过固体表面的对流换热量, W; F 为固体表面的面积, m^2 ; α 为比例系数(对流换热系数), $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; Δt 为流体与固体表面间的温度差, $^{\circ}\text{C}$ 。

当流体温度 t_f 大于固体表面温度 t_w 时, $\Delta t = t_f - t_w$; 当固体表面温度 t_w 大于流体温度 t_f 时, $\Delta t = t_w - t_f$ 。对流换热系数表示换热的强度,在数值上等于流体与换热表面间温度相差 1K 时,在单位时间内单位面积所传递的热量。对流换热系数的大小与换热过程中的许多因素有关,它不仅取决于流体的物理性质、换热表面的形状与布置,而且还与流体的流动状态有关。牛顿冷却公式并没有揭示出对流换热的实质,而仅仅给出了换热系数的定义,将影响对流换热的全部因素都集中到对流换热系数中。研究对流换热的基本任务就在于从牛顿冷却公式出发,用理论分析或实验的方法来具体研究各种情况下对流换热系数 α 的计算关系式。

与导热计算相似,套用欧姆定律的形式,式(1-3)可以写成:

$$Q = \frac{\Delta t}{\frac{1}{\alpha F}} = \frac{\Delta t}{R} \tag{1-4}$$

$R = \frac{1}{\alpha F}$ 为对流换热的热阻,其模拟电路图如图 1-3 所示。

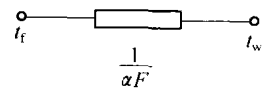


图 1-3 对流热阻的模拟电路

表 1-1 给出了几种对流换热过程中对流换热系数数值的大致范围。在传热学的学习中,掌握典型条件下对流换热系数

的数量级是很有必要的。由表 1-1 可见,就介质而言,水的对流换热比空气强烈;就换热方式而言,有相变的优于无相变的,强迫对流高于自然对流。

表 1-1 对流换热系数的数值范围

过 程	$\alpha/[W/(m^2 \cdot K)]$	
自然对流	空气	1 ~ 10
	水	200 ~ 1000
强迫对流	气体	20 ~ 100
	高压水蒸气	500 ~ 3500
	水	1000 ~ 15000
水的相变换热	沸腾	2500 ~ 35000
	蒸汽冷凝	5000 ~ 25000

1.2.3 热辐射

物体通过电磁波来传递能量的过程称为辐射。物体会因各种原因发射辐射能,其中因热的原因而发射辐射能的过程称为热辐射。不同的辐射过程有不同的规律,本书中后面所提到的辐射指的都为热辐射。

只要物体的温度高于绝对零度,物体将会不断地向空间发射辐射能,同时又不断地吸收其他物体发出的辐射能。辐射与吸收过程的综合结果造成了以辐射方式进行的物体间的热量传递,称为辐射换热。当物体与周围环境处于热平衡时,辐射换热量等于零,但这是动态平衡,辐射与吸收过程仍在不停地进行。

辐射能可以在真空中传播,而且实际上在真空中辐射能的传递最有效。而热传导与热对流只有当存在着气体、液体、固体介质时才能进行。因此,当两个温度不同的物体被真空隔开时,热传导与热对流均不能发生,而辐射换热照常进行,这是辐射换热区别于热传导和热对流的根本特点。例如地球与太阳之间,导热与对流都不会发生,只能进行辐射换热。辐射换热区别于热传导和热对流的另一个特点是,它不仅产生能量的转移,而且还伴随有能量形式的转换。即发射时从热能转换为辐射能,而被吸收时又从辐射能转换为热能。

物体的辐射能力不仅与温度有关,而且同一温度下不同物体的辐射与吸收的能力也大不一样。在探索热辐射规律的过程中,为分析方便,人们定义了一种理想的物体称为绝对黑体(简称黑体)。所谓黑体是指能够吸收投射到其表面上的全部热辐射能的物体。在同温度的物体中,黑体的吸收和辐射能力是最大的。

黑体在单位时间内发出的热辐射能量由式(1-5)计算:

$$Q = F\sigma_0 T^4 \quad (1-5)$$

式中: Q 为黑体表面单位时间发射出去的热辐射能量, W; F 为黑体的表面积, m^2 ; σ_0 为黑体的辐射常数, $\sigma_0 = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$; T 为黑体的热力学温度, K。

实际物体的辐射能力小于同温度下的黑体的辐射能力,实际物体单位时间的热辐射能量通常为式(1-6)的形式:

$$Q = \varepsilon F \sigma_0 T^4 \quad (1-6)$$

式中: ε 为实际物体的发射率(又称为黑度),其值与物体的种类和表面状态有关,介于0~1之间。它表示实际物体与黑体间的接近程度。

应该指出,式(1-5)和式(1-6)中的 Q 是物体自身向外发出的热辐射能量,而不是辐射换热量。要计算辐射换热量还必须考虑投射到物体表面上的辐射能量的吸收过程。在辐射换热的分析中,也要应用电比拟法,应用辐射热阻的概念,但其不能简单表述,关于这方面的内容将在辐射换热一章中进行详细讨论。

以上分别讨论了热传导、热对流和热辐射三种传递热量的基本方式。在实际问题中,这些方式往往不是单独出现的。在同一个换热环节中可能同时存在两种或三种换热方式,而且在一个换热过程中,可能有几个换热环节。例如,对于室内取暖的暖气片、锅炉中的省煤器及汽轮机装置或制冷装置中的冷凝器来说(如图1-4所示),热量传递过程中各个环节及各环节中的换热方式如下:

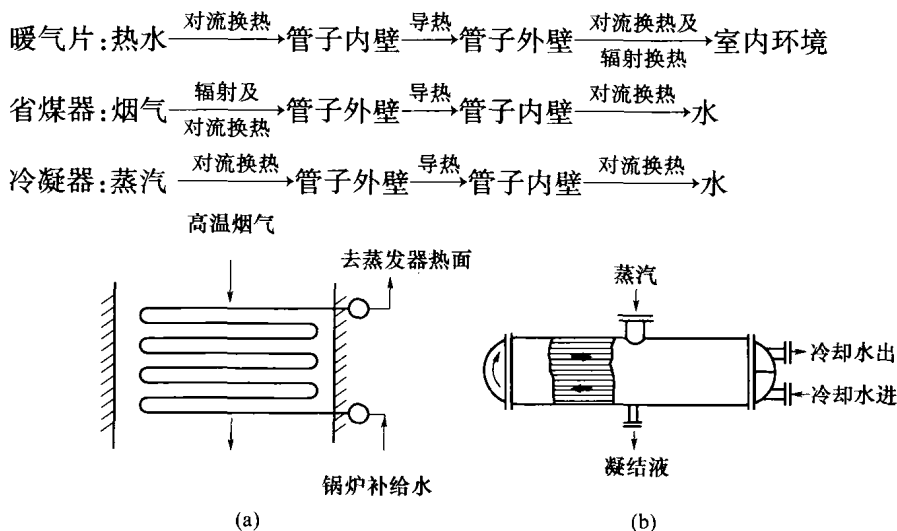


图1-4 省煤器、冷凝器示意图

(a) 省煤器; (b) 冷凝器。

当固体表面与外界既有对流换热,又有辐射换热时,为便于分析,当辐射换热不是主要因素时,一般把辐射换热量折算成对流换热量,相应地加大对流换热系数来考虑辐射的因素。例如,采暖设计中,取墙的内表面的对流换热系数约为 $8.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,这里就已经把辐射换热的成分包括进去了。

1.3 传热过程

一般室内外温度不相同,室内外空气通过墙壁要进行热量交换。在许多换热设备中的热量交换,也都是热流体将热量通过固体间壁传给冷流体,例如,上节中提到的室内采暖的暖气片的换热过程,就是热水通过暖气片将热量传给室内空气的过程。这种热量由壁面一侧的热流体通过间壁传给另一侧冷流体的过程称为传热过程。传热过程是工程技术中经常遇到的一种典型热量传递过程。

下面分析冷、热流体通过一大平壁的交换热量的传热过程。如图 1-5 所示,一平壁将冷、热流体隔开,平壁厚度为 δ ,导热系数为 λ ,平壁的两侧面温度分别为 t_{w1} 、 t_{w2} ,两侧面的面积为 F ,热流体的平均温度为 t_{fl} ,冷流体的平均温度为 t_{cl} ,热流体与壁面的对流换热系数为 α_1 ,冷流体与壁面的对流换热系数为 α_2 ,在稳态传热过程中,上述各温度值保持不变。这样,热流体与平壁的左侧面进行对流换热,此对流换热的换热量要通过平壁的左侧面以导热的方式传递到右侧面,然后通过冷流体与右侧面的对流换热传递给冷流体。由式(1-3)可知

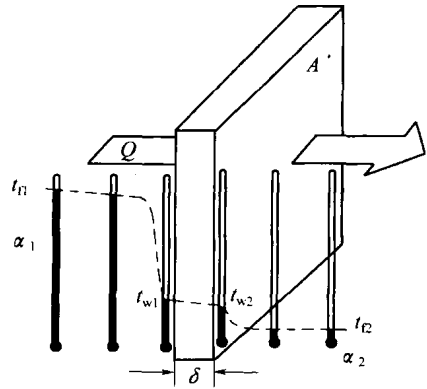


图 1-5 传热过程

单位时间热流体与平壁左侧面的对流换热量为

$$Q = \alpha_1 (t_{\text{fl}} - t_{w1}) F \quad (\text{a})$$

单位时间平壁的左侧面与右侧面之间的导热量为

$$Q = \lambda \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} F \quad (\text{b})$$

单位时间冷流体与平壁右侧面的对流换热量为

$$Q = \alpha_2 (t_{w2} - t_{\text{cl}}) F \quad (\text{c})$$

由于是稳态换热,各温度值保持不变,此三部分换热量是相等的,由以上三式消去 t_{w1} 和 t_{w2} 得

$$Q = \frac{(t_{\text{fl}} - t_{\text{cl}}) F}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (\text{1-7})$$

令

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (\text{1-8})$$

式中: k 为传热系数,单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,它表示了传热设备的传热能力,数值上等于冷、热流体在单位温度差下单位时间内单位换热面积所传递的热量。令 $\Delta t = t_{\text{fl}} - t_{\text{cl}}$,式(1-7)可以写成:

$$Q = \frac{\Delta t}{\frac{1}{kF}} = \frac{\Delta t}{R} \quad (\text{1-9})$$

式中: $R = \frac{1}{kF}$ 称为传热过程的热阻, K/W 。

$$R = \frac{1}{kF} = \frac{1}{\alpha_1 F} + \frac{\delta}{\lambda F} + \frac{1}{\alpha_2 F} \quad (\text{1-10})$$

式中： $\frac{1}{\alpha_1 F}$ 和 $\frac{1}{\alpha_2 F}$ 为对流换热的热阻； $\frac{\delta}{\lambda F}$ 为平壁导热的热阻。由式(1-10)可以看出，传热过程的总热阻等于各热阻的串联，这与电学中的欧姆定律是一致的，其模拟电路如图1-6所示。

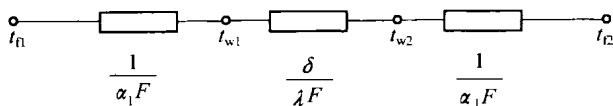


图1-6 传热热阻的模拟电路

例题1-1 面积为 0.8m^2 的换热器，冷热流体的平均温差为 33K ，热流体与壁面间的对流换热系数为 $1250\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，冷流体与壁面间的对流换热系数为 $3200\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，换热面间壁厚为 2mm ，导热系数为 $42\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，试计算该换热器单位时间的传热量。

解 已知 $F = 0.8\text{m}^2$, $\Delta t = 33\text{K}$, $\delta = 0.002\text{m}$, $\lambda = 42\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $\alpha_1 = 1250\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $\alpha_2 = 3200\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，根据式(1-7)有：

$$Q = \frac{(t_n - t_r)F}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{33 \times 0.8}{\frac{1}{1250} + \frac{0.002}{42} + \frac{1}{3200}} = 22756 (\text{W})$$

习 题

1. 冬天将被褥放在阳光下晒过之后，晚上盖在身上比未晒过暖和，试用传热学原理解释这一现象。

2. 在有空调的教室里，夏季温度维持 22°C ，学生听课时穿短袖衣衫感到舒适。同一教室冬季仍维持 22°C ，学生却要穿长袖衣衫才感到舒适。如果不考虑空气湿度的影响，试用传热学原理解释这一现象。

3. 为什么保温瓶胆的夹层要抽成真空，并且还要镀上银？

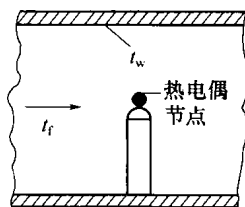
4. 面积为 1m^2 、厚度为 25mm 的聚氨酯泡沫塑料平板，其两表面的温差为 5°C ，导热系数为 $0.032\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，试计算单位时间通过该平板的热量。

5. 一砖墙的表面积为 12m^2 ，厚度为 260mm ，平均导热系数为 $1.5\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。设面向室内的表面温度为 25°C ，而外表面的温度为 -5°C ，试确定此砖墙向外界散失的热量。

6. 一炉子的炉墙厚度为 13cm ，总面积为 20m^2 ，平均导热系数为 $1.04\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，内外壁温分别为 520°C 及 50°C 。试计算通过炉墙的热损失。如果所燃用的煤的发热值为 $2.09 \times 10^2\text{kJ/kg}$ ，问每天因热损失要用掉多少千克煤？

7. 热电偶常用来测量气流温度。将热电偶放置于管道的高温气流中，气流的温度为 t_f ，管壁的温度为 t_w ， $t_w < t_f$ ，如图1-7所示，试分析热电偶节点的换热方式。

8. 面积为 $(3 \times 4)\text{m}^2$ 的一面墙壁，表面温度维持 60°C ，环境空气温度维持 20°C ，空气与壁面的对流换热系数为 $10\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，试计算这面墙壁的散热量。



习题1-7图

9. 一块黑度为 0.8 的钢板,温度为 27°C ,试计算单位面积上每小时内钢板所发射的辐射能。

10. 冬季室内空气温度 $t_{\text{н}} = 20^{\circ}\text{C}$,室外空气温度 $t_{\text{в}} = -25^{\circ}\text{C}$ 。室内外空气对墙壁的对流换热系数分别为 $\alpha_1 = 10\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 和 $\alpha_2 = 20\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,墙壁厚度为 $\delta = 360\text{mm}$,导热系数 $\lambda = 0.5\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,其面积 $F = 15\text{m}^2$,试计算通过墙壁的热量损失。

11. 一大平壁两侧面分别维持在 20°C 和 0°C ,且高温侧受到流体的加热,流体的温度为 $t_{\text{н}} = 100^{\circ}\text{C}$,流体与壁面的对流换热系数为 $\alpha_1 = 200\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,平壁厚度为 $\delta = 0.08\text{m}$,以上各温度值保持不变,试确定平壁材料的导热系数。

第2章 导热基本方程和稳态导热理论

绪论中简述了三种基本换热方式和传热过程,并给出了在一定条件下适用的计算公式。从本章开始,将深入讨论热量传递的三种基本方式。

导热是最容易采用数学手段进行分析和处理的一种热量传递方式,对传热学的学习应从导热开始。研究导热的任务和目的主要有两个:①准确地计算所研究问题中传递的热量;②准确地预测所研究系统中的温度分布。本章在讨论导热的基本定律和导热基本方程式的基础上,着重讨论稳态问题的分析解法,深入介绍工程中常见的典型几何形状物体(平板、圆柱体和球体)的一维稳态导热问题的热流量和温度分布的计算方法,同时对肋片的导热问题进行分析计算。

2.1 导热基本定律及导热系数

导热是物体之内或相互接触的物体之间的传热,传递热量的连续介质各部分之间没有宏观的相对位移。导热永远和温度分布不均匀联系在一起。首先介绍几个基本概念。

2.1.1 基本概念

1. 温度场

在所研究的换热系统中,一般地说,空间各点的温度不一定相同,而且同一点的温度在不同瞬时也不一定相同。为了描述这种情况,引入温度场的概念。所谓温度场,是指各时刻换热系统中空间各点温度的分布,温度场是坐标和时间的函数,它的数学表示式为

$$t = f(x, y, z, \tau) \quad (2-1)$$

式中: x, y, z 为坐标; τ 为时间。

从温度场与时间的关系方面划分可分为两类:一类是物体各点的温度不随时间变化,这类温度场称为稳态温度场(又称定常温度场);另一类是物体各点的温度随时间变化,这类温度场称为非稳态温度场(也称非定常温度场)。稳态温度场的数学表达式为

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

在稳态温度场中,若温度分布只与一个坐标有关,则称为一维稳态温度场;与两个坐标有关称为二维稳态温度场;与三个坐标有关则称为三维稳态温度场。在非稳态温度场中,同样可以分为一维非稳态温度场、二维非稳态温度场和三维非稳态温度场。

一维稳态温度场的形式最简单,例如第1章中图1-1所示的通过平板的导热就是一维稳态温度场的例子,一维稳态温度场的数学表达式为

$$t = f(x)$$

一维非稳态温度场的数学表达式为

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

2. 等温面和等温线

将温度场中某一时刻温度相同的点连接起来所形成的面或线称为等温面或等温线。当用图示法表示温度场时,习惯上采用等温线或等温面图来表示,如图 2-1 所示为某铸件在砂型中凝固时砂型的温度场分布。同一时刻,不同温度的等温面或等温线不能相交,否则就意味着同一个点在同一时刻可以具有不同的温度,这是不可能的。在同一个等温面上没有温度变化,因此没有热量传递。热量传递只能发生在不同的等温面之间。

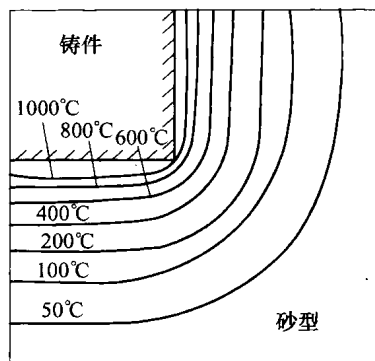


图 2-1 浇注 15min 后砂型中的温度场

3. 温度梯度

沿等温面不会有温度的变化,只有穿过等温面才会有温度的变化。在单位长度上最显著的温度变化是沿着等温面的法线方向。当相邻等温面间的距离趋于零时,其法线方向上的温度变化率称为温度梯度,用 $\frac{\partial t}{\partial n}$ 或 $\text{grad}t$ 表示,单位为 K/m。

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

温度梯度是矢量,位于等温面的法线方向上,沿温度增加方向为正。温度梯度值越大,说明温度场内该点处温度变化越激烈。温度梯度可以沿坐标轴方向分解,其在 x 方向的分量可由下式确定:

$$\text{grad}_x t = \frac{\partial t}{\partial n} \mathbf{n} \cos(n, x) = \frac{\partial t}{\partial x} \mathbf{i}$$

三维温度场的温度梯度可表示为

$$\text{grad}t = \frac{\partial t}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial t}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial t}{\partial z} \mathbf{k} \quad (2-3)$$

式中: $\mathbf{i}$ 、 $\mathbf{j}$ 、 $\mathbf{k}$ 为 x 、 y 、 z 方向的单位矢量。

温度梯度是时间和空间坐标的函数,对于一维稳态温度场,其温度梯度为

$$\text{grad}t = \frac{dt}{dx} \quad (2-4)$$

4. 热流密度

热流密度是指单位时间经过单位面积所传递的热量,用 q 表示,单位为 W/m^2 。如果在 $d\tau$ 时间内通过面积 dF 传递的热量为 dQ_τ ,则热流密度为

$$q = \frac{dQ_\tau}{dF d\tau}$$

热流量是指单位时间内通过面积 F 所传递的热量,用 Q 表示,单位为 W 。

$$Q = \frac{dQ_\tau}{d\tau} = \int_F q dF \quad (2-5)$$