

传热学

李友荣 吴双应 编



科学出版社

传 热 学

李友荣 吴双应 编



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是为满足高等学校工科大类系列课程改革而编写的教材。全书始终贯穿着“加强基础、拓宽口径、重视能力、趋向前沿”的指导思想,特别注意培养学生分析和解决实际传热问题的能力。全书共七章,包括导热、对流传热、辐射传热、传热过程和换热器等,每章都配有一定数量的思考题和习题。

本书按 32~48 学时编写,各部分内容相对独立,可按需要选择。本书可作为能源动力类、机械类、化工类、土建类、航空航天类等各专业的教材或教学参考书,也可供有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传热学/李友荣,吴双应编. —北京:科学出版社,2012

ISBN 978-7-03-034317-8

I. ①传… II. ①李… ②吴… III. ①传热学 IV. ①TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 095825 号

责任编辑:沈 建 / 责任校对:张怡君

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

装 订 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 5 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2012 年 5 月第一次印刷 印张: 14 1/4

字数: 278 000

定价: 45.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

传热现象是自然界中最普遍的物理现象之一,传热学是研究热量传递规律的科学。传热学的研究最早是包含在物理学和流体力学学科中,大约在 20 世纪 30 年代,传热学成为了一门独立的学科。随着生产和科学技术的发展,传热学的研究和应用深入到各个工业领域和科研领域,因此,传热学课程成为了工学类相关专业的重要技术基础课程。

为了满足我国高等工程教育人才培养模式改革和创新以及社会对人才培养的需求,在我国高等工程教育中的相关工科专业中实行传热学的分层次教学是非常必需的,即将传热学教学内容分为两个层次:一是基本层次,主要面向相关的工科专业学生讲授传热学的基本原理和基本计算方法;二是专门化层次,主要针对不同的专业方向剖析与专业密切相关的各种传热现象。为此,与之配套的传热学分层次教学教材的建设和发展也亟需加强。

在广泛调研和分析的基础上,结合多年来的教学经验,编写了这本适合传热学基本层次教学的教材。在内容的取舍上,十分注重加强基础理论,突出能力的培养。在导热部分,在介绍了傅里叶定律,并建立起导热微分方程后,主要讨论了各种一维稳态导热问题,非稳态导热的集总参数法,以及求解一维非稳态导热问题的诺谟图;在对流传热部分,首先分析了对流传热的物理机制及其影响因素,然后讨论了内部对流传热和外部对流传热的特点,最后介绍了对流传热计算的传热关联式及其工程应用;在辐射传热部分,重点阐述了基本概念和基本定律,同时,扼要介绍了简单辐射传热过程的计算。

在内容的表述上,力求严密准确、重点突出、层次清晰,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有机结合起来。在每一章最后都配备了一定量的思考题和习题,主要用于加强学生对基本概念和定律的理解,并训练学生分析实际传热问题的综合能力。

本书按 32~48 学时的教学要求编写,可作为能源动力类、机械类、化工类、土建类、航空航天类等各专业的教材或教学参考书。

全书共分七章,第 1~4 章以及附录由李友荣编写,第 5~7 章由吴双应编写,全书由李友荣统稿。鉴于编者知识和水平所限,虽经努力,缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 传热的三种基本方式	3
1.3 传热过程与热路分析法	9
本章小结	12
思考题	12
习题	13
第 2 章 导热基本定律与稳态导热	15
2.1 导热基本定律	15
2.2 导热微分方程与定解条件	19
2.3 一维稳态导热	23
2.4 通过肋片的导热	32
本章小结	39
思考题	40
习题	41
第 3 章 非稳态导热	44
3.1 基本概念	44
3.2 集总参数分析法	46
3.3 一维非稳态导热	52
本章小结	59
思考题	60
习题	61
第 4 章 单相介质对流传热	63
4.1 对流传热概述	63
4.2 对流传热的控制方程及定解条件	66
4.3 边界层理论	69
4.4 对流传热实验研究方法	74
4.5 管内强制对流传热计算	83
4.6 外部强制对流传热计算	91

4.7 自然对流传热	97
本章小结	99
思考题	100
习题	101
第5章 相变对流传热	103
5.1 概述	103
5.2 凝结传热	104
5.3 沸腾传热	114
本章小结	124
思考题	125
习题	126
第6章 热辐射及辐射传热	127
6.1 概述	127
6.2 黑体辐射基本定律	130
6.3 固体和液体的辐射和吸收特性	137
6.4 气体的辐射和吸收特性	146
6.5 辐射传热的计算	150
本章小结	174
思考题	174
习题	176
第7章 传热过程及换热器	179
7.1 传热过程及其控制	179
7.2 换热器中的传热过程	187
本章小结	200
思考题	201
习题	201
附录	203
附录1 常用单位换算关系	203
附录2 金属材料的密度、比热容和导热系数	204
附录3 常用非金属材料的密度和导热系数	207
附录4 常用保温及耐火材料的最高允许温度及其导热系数与温度的关系	209
附录5 标准大气压下干空气的热物理性质	210
附录6 标准大气压下烟气的热物理性质	211
附录7 标准大气压下过热水蒸气的热物理性质	211

附录 8 饱和水的热物理性质	212
附录 9 干饱和水蒸气的热物理性质	214
附录 10 几种饱和液体的热物理性质	216
参考文献	219

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

1.1.1 基本概念

在自然界和工业生产过程中,由于自然的或人为的原因,普遍地存在着温度差。热力学第二定律告诉我们,热量总是自发地从高温传向低温,因此,只要有温度差的存在,就会有热量的传递过程。

热量在温度差的作用下从一个物体传递至另一个物体、或者在同一物体内部的各个不同部分进行传递的过程称为传热,传热学就是一门研究由于温度差引起的热量传递规律的科学。

热量传递过程的驱动力是温度差,简称温差,用 Δt 表示,其单位为 $^{\circ}\text{C}$ 或 K 。一般而言,温差越大,传递的热量越多,因此,热量传递过程与温度分布紧密联系在一起。

传热量的大小通常用热流量来表示,记为 Φ ,单位为 W ,它表示单位时间内通过某一给定面积上的热量。

单位面积上通过的热流量称为热流密度,记为 q ,其单位为 W/m^2 。

传热问题大致可以分为两类:一类着眼于传热过程热流量的大小及其控制,或者增强传热,或者削弱传热。例如,在各类热交换器中,为了提高换热效率、减小换热器体积,使其结构更加紧凑,就必须增强传热,即提高传热过程热流密度;相反,为了使热力管道减小散热损失,就必须采取隔热保温措施,以削弱传热,即减小传热过程热流密度。另一类则着眼于温度分布及其控制。例如,在蒸汽轮机的启动和停车过程中,气缸壁内温度分布及温升(温降)速度的控制、内燃机内气缸活塞中的温度分布等。

1.1.2 传热过程的普遍性

在自然界和工业生产中,传热现象随处可见。特别是在能源动力、航空航天、材料冶金、机械制造、电气电信、交通运输、化工制药、生物工程等领域更是蕴藏着大量的传热问题,并且形成了如相变与多相流传热、微尺度传热、生物传热、超常传热等传热学的多个学科分支。在某些情况下,传热技术及其相关传热设备甚至成为某些行业或系统的关键技术,以下略举几例说明。

(1) 在现代化的大型火力发电站,锅炉和汽轮机组都是在高温高压下工作,其

传热性能的好坏和壁面温度的控制将对机组运行的经济性和安全性产生至关重要的影响。例如,在凝汽器内蒸汽凝结向冷却水的传热过程、高压和低压加热器内蒸汽凝结加热循环水的过程等直接影响循环效率的高低;在锅炉炉膛内高温火焰向水冷壁管内水的传热过程和过热器内高温烟气向过热蒸汽的传热过程中,如果壁面温度过高,很容易造成水冷壁和过热器爆管,产生安全事故。另外,大型发电机的转子和定子绕组的冷却技术也涉及大量的对流传热问题。

(2) 随着航空航天事业的飞速发展,传热问题显得越来越突出。通常航天飞行器在重返地球时,会以 $10\sim 36$ 倍当地声速的高速再入大气层,由于摩擦,会在航天器表面发生剧烈的气动加热现象,致使表面气流局部温度高达 $3000\sim 11000\text{K}$,因此,为了保证航天器的飞行安全,必须有效地解决冷却与隔热问题。

(3) 随着以计算机芯片为代表的微电子器件的飞速发展,电子器件的高效散热技术也需要不断地改进、提高。在芯片体积迅速微型化、线宽快速下降时,芯片表面的热流密度会迅速增大,目前已超过 $10^6\text{W}/\text{m}^2$,因而电子器件的有效散热方式已成为影响电子器件寿命及工作可靠性的关键技术之一。

(4) 随着人体器官及皮肤癌变的热诊断与高温治疗技术的不断进步,激光和超低温外科手术及其他临床康复技术均得到了不同程度的发展,其中涉及大量的传热过程,因此,形成了生物传热学分支。在生物传热研究中,主要的困难在于生物组织结构的复杂性。生物体内有很多血管,要确定因血液灌流导致的热量传递是非常困难的,它涉及非牛顿流体(如血液)和多孔介质(如肌肉)等问题。另一方面,几乎所有的动物都具备通过神经系统来感知和调节自身温度的能力,这是一套极其复杂的温度传感和控制系统,从而使得生物系统的传热规律成为自然界最复杂的传热现象之一。

(5) 在可再生能源的开发和利用中也处处涉及传热问题。例如,在太阳能的热利用过程中,涉及太阳辐射能的吸收、热能的储存和传递等;在生物质能的利用过程中,涉及生物质的加热、裂解、冷却等问题,其中存在着大量的传热过程。

1.1.3 研究方法

传热问题的研究方法大致可以分为三类,即实验研究、理论分析和数值模拟。

1. 实验研究

实验研究是传热学最基本的研究方法。传热实验研究主要分为两大类:一类是与传热过程有关的物性参数的测量,如导热系数、表面发射率等,采用理论分析方法来确定它们是非常困难的,有时甚至是不可能的,只能采用实验测定来获取;另一类是表面传热系数或温度分布的测定,在现阶段,对流传热表面传热系数的工程计算公式通常都是通过实验测定得到的。

在传热学的发展进程中,为了能有效地进行对流传热的实验研究,形成了相似原理和量纲分析的基本内容和方法,即在相似原理的指导下,建立起与实际传热问题相似的实验台,忽略次要影响因素,控制主要影响因素,进行大量的实验,得到足够多的实验数据,然后,根据量纲分析原理,以实验数据为基础整理得到可用于工程计算的传热关联式。

2. 理论分析

理论分析方法的基本原理是对实际的传热问题提出一些合理假设,并由此建立该传热问题的物理模型,结合自然界中的普遍规律并应用数学方法,建立起相应的数学模型,最后在给定的条件下对数学模型进行求解,得到该传热问题的温度分布和热流量的计算公式。理论分析解可作为检验各种数值模拟结果正确性的标准之一。

理论分析解法曾经对解决很多工程实际问题发挥过极其重要的作用,目前仍不失为解决传热问题的一个有效手段。但是,对于某些复杂的传热问题,理论分析解往往过于繁杂、有时甚至无法获得,为此,经过一定的简化,形成了各种近似解法,如积分近似法、参数摄动法等。

3. 数值模拟

对于大多数实际传热问题而言,所建立的物理数学模型都包含着复杂的偏微分方程,难以得到分析解。近几十年来,随着计算机技术的飞速发展,用数值计算的方法对传热问题进行分析求解取得了重大进展,并形成了一个传热学的新的分支学科——数值传热学,对传热与流动过程进行数值模拟的商业软件也如雨后春笋般地发展起来,如 PHOENICS、FLUENT、STAR-CD 和 CFX 等。

数值模拟的基本思想是将描述传热问题的微分方程在求解区域内离散为代数方程组,通过求解代数方程组来获得传热问题的解,这种方法在解决实际传热问题中显示出了巨大的活力。

1.2 传热的三种基本方式

按照传热机理的不同,热量的传递有三种基本形式,即热传导(导热)、热对流和热辐射。

1.2.1 热传导

当物体内部存在温度差或温度不同的两物体相互接触时,由于微观粒子(分子、原子或自由电子等)的热运动产生的热量传递过程称为热传导,简称导热。发

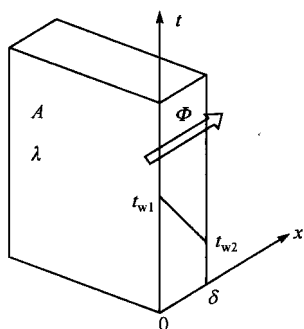


图 1-1 通过平壁的导热

生热传导过程时,物体各部分不存在宏观的相对位移运动。导热过程可以发生在固体内部或固体与固体之间,也可发生在静止的液体或气体内部。

考虑如图 1-1 所示的通过大平壁的导热过程,平壁的表面面积为 A ,壁厚为 δ ,两侧表面分别维持均匀恒定温度 t_{w1} 和 t_{w2} ,实验和实践结果都表明,单位时间内从表面 1 传递到表面 2 的热量 Φ 与导热面积 A 和导热温差 $(t_{w1} - t_{w2})$ 成正比,与壁的厚度 δ 成反比,即

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

或

$$\Phi = \lambda A \frac{\Delta t}{\delta} \quad (1-2)$$

通过平壁的热流密度可表示为

$$q = \frac{\Phi}{A} = \lambda \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} = \lambda \frac{\Delta t}{\delta} \quad (1-3)$$

式中, λ 为比例系数,称为热导率或导热系数,其单位为 $W/(m \cdot K)$; Δt 称为导热温差,其单位为 $^{\circ}C$ 或 K 。

导热系数是表征材料导热性能优劣的参数,其与物质的种类有关,是一个物性参数。不同的材料导热系数不同,即使同一种材料,导热系数还与温度等因素有关。一般而言,金属材料的导热系数最高,液体次之,气体最小。

1.2.2 热对流

热对流是指在温差的作用下由于流体的宏观运动所引起的热量传递过程。热对流只能发生在流体中,而且由于流体中的分子同时进行着不规则的热运动,因此,热对流必然伴随着热传导现象。工程上经常遇到流体流过某一固体表面时流体与固体表面间的热量传递过程,就是热对流和热传导联合作用的结果,通常称之为对流传热。

根据引起流体宏观运动的作用力的不同,对流传热可分为自然对流和强制对流两大类。自然对流是指由于流体密度差形成的浮力而驱动的流体运动,强制对流是指由于外部压差(通常由泵或风机提供)而驱动的流体运动。另外,在工程上,还会经常遇到液体在过热固体表面上的沸腾和蒸汽在过冷固体表面上的凝结,分别简称为沸腾传热和凝结传热,统称为伴随有相变的对流传热。

如图 1-2 所示,当温度为 t_f 的流体流过温度为 t_w ($t_w \neq t_f$)、表面积为 A 的固体表面时,流体与固体表面间的对流传热热流量 Φ 可根据牛顿冷却公式计算:

流体被加热时

$$\Phi = hA(t_w - t_f) = hA\Delta t \quad (1-4)$$

流体被冷却时

$$\Phi = hA(t_f - t_w) = hA\Delta t \quad (1-5)$$

对流传热过程热流密度 q 可表示为

流体被加热时

$$q = h(t_w - t_f) = h\Delta t \quad (1-6)$$

流体被冷却时

$$q = h(t_f - t_w) = h\Delta t \quad (1-7)$$

上述各式中,比例系数 h 称为表面传热系数或对流换热系数,其单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; Δt 称为对流传热温差,其单位为 $^{\circ}\text{C}$ 或 K 。

与导热系数不同,表面传热系数的大小不仅与流体的种类有关,还与流体流速、换热表面形状、大小及布置等因素有关。表面传热系数的大小直接反映了对流传热能力的强弱,表 1-1 给出了不同条件下表面对流传热系数的大致范围。

表 1-1 表面传热系数的大致范围

对流传热过程	流体种类	$h/[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$
自然对流传热	空气	1~10
	水	200~1000
	气体	20~100
强制对流传热	高压水蒸气	500~3500
	水	1000~1500
	液态金属	3000~110000
沸腾传热	水	2500~25000
凝结传热	水蒸气	5000~15000
	有机蒸汽	500~2000

1.2.3 热辐射

物体通过电磁波传递能量的过程称为辐射。物体会因为各种原因发出辐射能,如果是因为热的原因而发出的辐射能称为热辐射。

任何物体,只要温度高于 0K ,就会不停地向周围环境发出热辐射,同时又不断地吸收其他物体发出的热辐射。物体发出辐射和吸收辐射的综合结果就产生了物

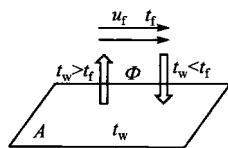


图 1-2 流体与固体表面间的对流传热

体之间的热量传递过程,这种传热过程就称之为辐射传热或辐射换热。当物体与周围环境处于热平衡时,辐射传热量为零,但物体发出辐射和吸收辐射的过程仍在进行,只不过发出辐射和吸收辐射量相等,处于一种动态平衡中。

热传导与热对流两种热量传递方式都和物体紧密联系在一起,只有在有物质存在的条件下才能进行,而热辐射则不同,它可以在真空中传递,而且在真空中传递最为有效,这是热辐射区别于热传导和热对流的基本特点。同时,在热辐射传递能量的过程中,伴随着能量形式的转换,即发射时从热能转变为辐射能,吸收时又从辐射能转变为热能,这是热辐射区别于热传导和热对流的另一个特点。

在辐射传热计算中,为了简化起见,引入了一种理想物体——黑体。所谓黑体是指能吸收所有投入到其表面上的辐射能的物体。在相同温度下,黑体的吸收能力和辐射能力在所有物体中最大。

黑体在单位时间、单位面积上所发射的辐射热量 E_b 可由斯特藩-玻耳兹曼定律计算:

$$E_b = \sigma T^4 \quad (1-8)$$

式中, T 为黑体的热力学温度, $T = t + 273.15$, 单位为 K; σ 为斯特藩-玻耳兹曼常数,即黑体辐射常数,其值为 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

对于同温度下的实际物体,单位时间、单位面积上所发射的辐射热量 E 可由斯特藩-玻耳兹曼定律的修正形式计算

$$E = \epsilon \sigma T^4 \quad (1-9)$$

式中, ϵ 称为物体的发射率,其值总小于 1,它与物体的种类和表面状态有关。

式(1-8)和式(1-9)又称为四次方定律,也可表述为

$$E_b = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (1-10)$$

$$E = \epsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (1-11)$$

式中, C_0 称为辐射系数,其值为 $C_0 = 5.67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

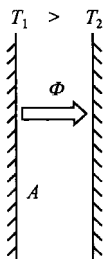


图 1-3 平行大平板间的辐射传热

物体不断向周围环境发出热辐射的同时,又不断地吸收其他物体发出的热辐射,因此,两物体表面间的辐射传热量除与物体温度和表面特性有关外,还与两物体的相对位置有关。如图 1-3 所示,假定有两块平行放置的大平板,其两相向表面均为黑体表面,温度分别为 T_1 和 T_2 ,表面积都为 A ,则其辐射传热量 Φ 为

$$\Phi = A\sigma(T_1^4 - T_2^4) = AC_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (1-12)$$

如果有某一表面积为 A 、温度为 T_1 、发射率为 ϵ 的物体

被置于温度为 T_2 的很大的环境中,则该物体与环境间的辐射传热量 Φ 为

$$\Phi = \epsilon A \sigma (T_1^4 - T_2^4) = \epsilon A C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (1-13)$$

1.2.4 复合传热

在实际传热问题中,导热、对流和热辐射有可能同时出现,通常将有两种及两种以上传热方式同时存在的过程称为复合传热。图 1-4 所示为锅炉省煤器示意图及其传热环节,首先,高温烟气以对流和辐射的方式将热量传至管子外壁,然后以导热方式传至内壁,最后以对流方式传给管内的水,从而达到利用高温烟气的热量加热管内给水的目的。显然,在高温烟气与管外壁的传热过程中,既有辐射传热,也有对流传热,因此是一种典型的复合传热过程。

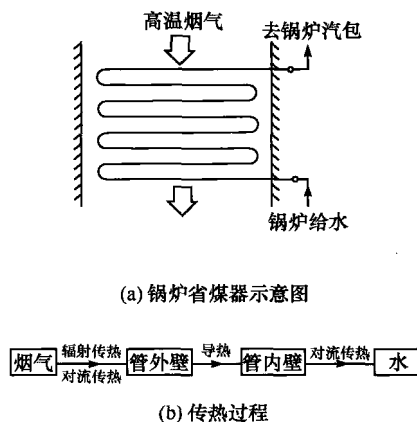


图 1-4 锅炉省煤器示意图及传热环节

当传热过程既有对流传热、又有辐射传热时,工程上常将它们综合在一起考虑。为方便起见,将式(1-12)写成牛顿冷却公式形式:

$$\Phi_r = A h_r (t_f - t_w) \quad (1-14)$$

式中, t_f 为高温烟气温度; t_w 为管壁温度; h_r 为表面辐射传热系数,其单位为 $W/(m^2 \cdot K)$,可按式计算:

$$h_r = \frac{\Phi_r}{A(t_f - t_w)} \quad (1-15)$$

对流传热量为

$$\Phi_c = A h_c (t_f - t_w) \quad (1-16)$$

因此,复合传热总传热量为

$$\Phi = A h_r (t_f - t_w) + A h_c (t_f - t_w) = A h (t_f - t_w) \quad (1-17)$$

式中, $h = h_r + h_c$ 称为复合表面传热系数, 其单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

例题 1-1 一根过热蒸汽管道水平通过车间, 其保温层外径为 $d = 580\text{mm}$, 外表面温度为 $t_w = 48^\circ\text{C}$, 表面发射率为 $\epsilon = 0.9$, 环境空气温度为 $t_f = 25^\circ\text{C}$, 空气与管道外表面自然对流传热的表面传热系数为 $h = 3.5\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 试求每米长度管道表面:

(1) 自然对流散热量。

(2) 辐射散热量。

(3) 总散热量。

解 由式(1-4)可得每米长度管道表面自然对流散热量为

$$\begin{aligned} q_{l,c} &= \pi d h (t_w - t_f) \\ &= 3.14 \times 0.58 \times 3.5 \times (48 - 25) = 146.6 (\text{W}/\text{m}) \end{aligned}$$

由式(1-13)可得每米长度管道表面辐射散热量为

$$\begin{aligned} q_{l,r} &= \pi d \epsilon C_0 \left[\left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_f}{100} \right)^4 \right] \\ &= 3.14 \times 0.58 \times 0.9 \times 5.67 \times \left[\left(\frac{48 + 273.15}{100} \right)^4 - \left(\frac{25 + 273.15}{100} \right)^4 \right] \\ &= 254.2 (\text{W}/\text{m}) \end{aligned}$$

每米长度管道表面总散热量为

$$q_l = q_{l,c} + q_{l,r} = 146.6 + 254.2 = 400.8 (\text{W}/\text{m})$$

上述计算结果表明, 即使在温度比较低的表面, 其自然对流散热量和辐射散热量都具有相同的数量级, 必须同时考虑。

例题 1-2 有一块水平放置在室外的金属平板, 其背面绝热, 正面吸收 $q_s = 650\text{W}/\text{m}^2$ 的太阳辐射。假定金属正面与空气对流传热的表面传热系数为 $h = 13\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 空气温度为 $t_f = 25^\circ\text{C}$, 试求金属平板的正面温度 t_w 。

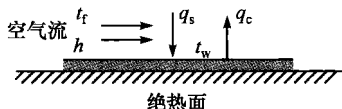


图 1-5 金属平板表面能量平衡

解 如图 1-5 所示, 由于金属平板背面绝热, 因此, 根据能量守恒原理, 金属平板正面吸收的太阳能全部以对流传热的方式传给

空气, 因此, 存在下述能量平衡关系:

$$A q_s = A h (t_w - t_f)$$

由此可得

$$t_w = t_f + q_s / h = 25 + 650 / 13 = 75 (^\circ\text{C})$$

1.3 传热过程与热路分析法

1.3.1 传热方程

热量从温度较高的流体通过固体壁传给另一侧温度较低的流体的过程称为传热过程。例如,在冬季,室内温度较高的空气将其热量通过墙壁传给室外温度较低的空气;在锅炉省煤器内,高温烟气将热量通过管壁传给管内的水等,都属于典型的传热过程。

在传热过程中,当两流体的温差一定时,传热面积越大,传递的热流量越多;当传热面积一定时,两流体的温差越大,传递的热量也越多。因此,传热过程的热流量可用下式计算:

$$\Phi = KA(t_{f1} - t_{f2}) = KA\Delta t \quad (1-18)$$

式(1-18)称为传热过程的传热方程。其中, A 为传热面积; Δt 称为热流体和冷流体间的传热温差,又称温压,单位为 $^{\circ}\text{C}$ 或 K ; 比例系数 K 称为传热系数,其单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

1.3.2 传热系数

为了得到传热系数的计算式,分析通过平壁的传热过程,如图 1-6 所示,该传热过程包括三个传热环节:①从热流体到壁面高温侧的对流传热;②从壁面高温侧到壁面低温侧的导热;③从壁面低温侧到冷流体的对流传热。在稳态传热条件下,上述三个串联环节的热流量 Φ 是相同的。

设平壁表面积为 A , 参照图 1-6 中的符号,上述三环节的热流量可分别表示为

$$\Phi = Ah_1(t_{f1} - t_{w1})$$

$$\Phi = \lambda A \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta}$$

$$\Phi = Ah_2(t_{w2} - t_{f2})$$

将上述三式改写成如下形式:

$$t_{f1} - t_{w1} = \frac{\Phi}{Ah_1}$$

$$t_{w1} - t_{w2} = \frac{\Phi}{\lambda A / \delta}$$

$$t_{w2} - t_{f2} = \frac{\Phi}{Ah_2}$$

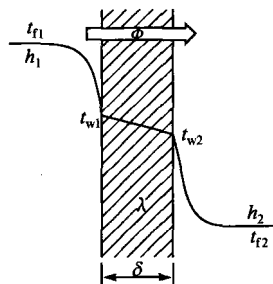


图 1-6 通过平壁的传热过程

将上面三式相加,消去壁面温度,整理后得

$$\Phi = \frac{A(t_{f1} - t_{f2})}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} \quad (1-19)$$

比较式(1-18)和式(1-19)可得传热系数计算式为

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} \quad (1-20)$$

式(1-20)表明,传热系数的大小不仅与传热间壁特性有关,还与两侧的对流传热系数大小有关,因此,传热系数是一个过程参数,是一个表征传热过程强度的指标。传热系数越大,传热过程越强,反之则越弱。表 1-2 给出了常见传热过程传热系数的大致范围。

表 1-2 常见传热过程传热系数的大致范围

传热过程	$K / [W/(m^2 \cdot K)]$
从气体到气体(常压)	10~30
从气体到高压水蒸气或水	10~100
从油到水	100~600
从凝结有机物蒸汽到水	500~1000
从水到水	1000~2500
从凝结水蒸气到水	2000~6000

1.3.3 传热热阻与热路分析法

在常规条件下,任何传递过程都存在阻力。例如,电量的传递存在电阻,动量的传递存在流阻,同样,热量的传递也存在热阻,它们都满足下述关系式:

$$\text{传递通量} = \frac{\text{传递推动力}}{\text{阻力}} \quad (1-21)$$

将描述导热过程热流量的式(1-2)改写为

$$\Phi = \frac{\Delta t}{\delta/(\lambda A)} = \frac{\Delta t}{R_d} \quad (1-22)$$

式中, Δt 为导热过程推动力; $R_d = \delta/(\lambda A)$ 称为导热过程总热阻,单位为 K/W ;单位面积上的导热热阻用 r_d 表示,即 $r_d = \delta/\lambda$,其单位为 $(m^2 \cdot K)/W$ 。

同样,将描述对流传热过程热流量的式(1-4)改写为