



普通高等学校
建筑环境与能源应用工程系列教材

Building Environment
and Energy Engineering

传热学 (第2版)

主 编 / 罗 庆

副主编 / 周根明 李新禹

主 审 / 王厚华



重庆大学出版社



普通高等学校
建筑环境与能源应用工程系列教材

Building Environment
and Energy Engineering

传热学 (第2版)

主 编 / 罗 庆
副主编 / 周根明 李新禹
主 审 / 王厚华



重庆大学出版社

内 容 提 要

本书在保持传统传热学体系的同时,将导热、对流和辐射部分各自分章讨论,内容包括:绪论、导热问题的数学描述、稳态导热、非稳态导热、导热问题数值解法、对流传热的基本方程、对流传热的求解方法、单相流体对流传热及其实验关联式、凝结传热与沸腾传热、热辐射的基本定律、辐射传热计算及传热和换热器。同时,书中配有大量且典型的例题、习题(答案),帮助读者掌握和理解所学的知识。章节习题配有详细解题步骤及答案;书后附有真题试题及详解(请扫二维码)。

本书可作为建筑环境与能源应用工程专业的本科教学用书,也可供相关专业师生及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传热学 / 罗庆主编. --2 版. --重庆:重庆大学出版社,2019.1

普通高等学校建筑环境与能源应用工程系列教材
ISBN 978-7-5689-1461-1

I. ①传… II. ①罗… III. ①传热学—高等学校—教材 IV. ①TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 001075 号

普通高等学校建筑环境与能源应用工程系列教材

传 热 学

(第 2 版)

主 编 罗 庆

副主编 周根明 李新禹

主 审 王厚华

责任编辑:张 婷 版式设计:张 婷

责任校对:刘 刚 责任印制:张 策

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:易树平

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023) 88617190 88617185(中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

重庆升光电力印务有限公司印刷

*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:22 字数:551千

2019 年 1 月第 2 版 2019 年 1 月第 6 次印刷

印数:7 131—9 100

ISBN 978-7-5689-1461-1 定价:49.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

特别鸣谢单位

(排名不分先后)

天津大学	重庆大学
广州大学	江苏大学
湖南大学	南华大学
东南大学	扬州大学
苏州大学	同济大学
西华大学	东华大学
江苏科技大学	上海理工大学
中国矿业大学	南京工业大学
华中科技大学	南京工程学院
武汉科技大学	南京林业大学
武汉理工大学	山东建筑大学
安徽工业大学	山东科技大学
合肥工业大学	天津工业大学
广东工业大学	河北工业大学
福建工程学院	重庆交通大学
伊犁师范学院	重庆科技学院
西安交通大学	中国人民解放军陆军勤务工程学院
西安建筑科技大学	江苏省制冷学会
安徽建筑工业学院	江苏省建设工程造价管理总站

前言 (第2版)

为了适应建筑环境与设备工程(现“建筑环境与能源应用工程”)专业课程体系改革的需要,重庆大学出版社出版了以专业课程为主的“建筑环境与设备工程系列教材”(现“建筑环境与能源应用工程系列教材”)。本书的第一版正是在此背景下应运而生的,作为系列教材中的专业基础课程教材之一于2006年出版。第一版出版时,考虑到新增的专业平台课程“热质交换原理与设备”将“传热学”的部分内容纳入其中,因此本书第一版中相应内容做了调整,从而避免了课程间的重复性,以提高不同课程的教学效率。

在十多年的教学过程中,本书第一版逐渐显现出了一些不足之处,也被发现一些学科名词与国家标准存在出入的现象,有必要对其内容进行全面地提升和改进。因此,第二版对本书存在的问题和一些学科名词一并进行了修改和调整,以适应新形势下的教学需求。第二版仍然维持了原版的整体框架,全书分为“导热”“对流”“辐射”三个主体内容。由于三个部分的内容相对独立,为了突显出三个部分的相互关系和综合过程,本书在末章的内容和习题上突出了三种传热方式的综合作用,以便加深读者对不同传热方式的综合理解。

本人负责全书的再版修订,在修订过程中得到了重庆大学王厚华教授、江苏大学周根明教授等老师的大力协助,全书最后由王厚华教授负责审定。

由于作者水平有限,书中的错误和不足之处在所难免,恳请广大读者批评并提出修改意见。

编者

2018年10月

前 言

进入新世纪以来,建筑环境与设备工程专业的课程体系发生了很大的改变,在专业课程与专业基础课程之间新增加了3门专业平台课程,“传热学”中的部分内容被纳入专业平台课程——“热质交换原理与设备”中。毫无疑问,课程体系的改革更加适应了专业的发展,减少了各课程间的相互重复,巩固了基本概念,提高了学习效率。为适应课程体系改革的需要,重庆大学出版社已出版了以专业课程为主的“建筑环境与设备工程系列教材”,本书即为系列教材中新增加的专业基础课教材之一。紧随教学改革不断发展的步伐,追踪传热学研究中不断取得的新成果,力求不断地满足建筑环境与设备工程专业对“传热学”教学的基本要求,是编写本书的基本目的。

本书的叙述遵循了传统的传热学体系,将导热、对流和辐射部分各自分章讨论。教学实践证明,分开讨论有助于对基本传热方式及其基本概念、基本理论和基本计算方法的掌握和理解,但对传热方式的综合作用往往容易脱节。因此,除绪论中已提出复合换热的概念外,第12章(传热和换热器)中以较多例题的形式分析了实际传热过程及其计算方法。随着计算机的普及应用,传热问题的数值计算方法起着越来越重要的作用,绝大部分工程传热问题在数学描述完整的情况下都可以获得数值解,但传热的数值计算已经超出了本书的范围。因此,本书中除导热问题给出了数值计算基础以外,更多地强调了数值解法的理论基础——详细地推演了导热和对流换热的各微分方程。学生在使用成熟软件进行数值计算时,对这些微分方程物理意义的理解是特别重要的。

正是由于数值解法的重要作用,本书中传统的对流换热微分方程分析解和积分方程组的建立与求解均加上了“*”号作为选修内容,毕竟分析解法只能局限于求解部分简单对流换热问题。由于质交换及换热器中的部分内容已编入了《热质交换原理与设备》,为避免重复,本书中没有保留这部分内容。

本书导热部分(2~5章)由江苏科技大学周根明编写;辐射部分(10章、11章)由天津工业大学李新禹负责编写,刘树森和苏文编写了其中的部分内容;其余各章由重庆大学王厚华编写,全书由王厚华修改定稿。重庆大学廖光亚教授详细地审核了全书并提出了宝贵的修改意见,在此向廖光亚教授表示衷心的感谢。

由于作者水平有限、经验欠缺,编写时间短促,书中的错误和不足之处在所难免,恳请广大读者批评并提出修改意见。

编 者

2006年9月

目 录

1 绪 论	1
1.1 传热的基本方式	2
1.2 传热过程	5
习 题	8
2 导热问题的数学描述	10
2.1 基本概念及傅里叶定律	10
2.2 导热系数	12
2.3 导热微分方程式及定解条件	16
习 题	22
3 稳态导热	24
3.1 通过平壁的导热	24
3.2 通过复合平壁的导热	30
3.3 通过圆筒壁的导热	32
3.4 通过肋壁的导热	37
3.5 通过接触面的导热	45
3.6 二维稳态导热	47
习 题	49
4 非稳态导热	53
4.1 非稳态导热的基本概念	53

4.2	无限大平壁的瞬态导热	56
4.3	半无限大物体的瞬态导热	65
4.4	其他形状物体的非稳态导热	67
4.5	集总参数法	69
4.6	周期性非稳态导热	72
	习题	75
5	导热问题数值解法	79
5.1	有限差分法	79
5.2	有限元法	81
5.3	稳态导热的数值计算	81
5.4	非稳态导热的数值计算	85
5.5	柱坐标系的有限差分方程	90
	习题	91
6	对流传热的基本方程	94
6.1	对流传热概述	94
6.2	对流传热微分方程组	98
6.3	定解条件	106
	习题	107
7	对流传热的求解方法	108
7.1	边界层分析	108
* 7.2	外掠平壁层流边界层微分方程组的分析解	117
* 7.3	外掠平壁层流边界层积分方程组及求解	127
7.4	动量传递与热量传递的类比	137
7.5	相似理论基础 ^[16]	144
	习题	154
8	单相流体对流传热及其实验关联式	157
8.1	管内受迫对流传热	157
8.2	外掠圆管对流传热	172
8.3	自然对流传热	178
	习题	188
9	凝结传热与沸腾传热	192
9.1	凝结传热	192
9.2	沸腾传热	205
	习题	213

10 热辐射的基本定律	215
10.1 热辐射的基本概念	215
10.2 热辐射的基本定律	219
10.3 实际物体的热辐射特性	224
习题	232
11 辐射传热计算	234
11.1 黑表面间的辐射传热	234
11.2 灰表面间的辐射传热	241
11.3 角系数的确定方法	252
11.4 气体辐射	259
11.5 太阳辐射	268
习题	271
12 传热和换热器	275
12.1 通过肋壁的传热	275
12.2 复合传热	277
12.3 换热器的形式和基本构造	283
12.4 平均温度差	288
12.5 换热器的传热计算 ^[2,10]	295
12.6 强化传热与削弱传热	304
习题	308
附录	311
附录 1 各种材料的密度、导热系数、比热容及蓄热系数	311
附录 2 几种保温、耐火材料的导热系数与温度的关系	313
附录 3 高斯误差补函数的一次积分值	314
附录 4 干空气的热物理性质	315
附录 5 饱和水的热物理性质	316
附录 6 干饱和水蒸气的热物理性质	317
附录 7 几种饱和液体的热物理性质	318
附录 8 几种油的热物理性质	319
附录 9 对流传热微分方程组各方程式在圆柱坐标系中的表达形式	320
附录 10 常用材料表面的法向发射率	321
附录 11 不同材料表面的绝对粗糙度	322
附录 12 换热设备的 h 及 k 概略值	323
附录 13 污垢系数的参考值	323
附录 14 第一类贝塞尔 (Bessel) 函数选择	324

附录 15 误差函数选摘	324
附录 16 长圆柱中心温度诺谟图	325
附录 17 长圆柱的 θ/θ_m 曲线	325
附录 18 长圆柱的 Q/Q_0 曲线	326
附录 19 球的中心温度诺谟图	326
附录 20 球的 θ/θ_m 曲线	327
附录 21 球的 Q/Q_0 曲线	327
基本符号表	328
参考文献	332

1

绪 论

传热学是研究热量传递规律的一门科学。热量是能量的一种形式,故广义地说,传热学又可称作能量传递学。

凡是有温度差存在的地方,就有热量自发地从温度较高的区域或物体传递到温度较低的区域或物体。由于在自然界和生产过程中,温度差几乎处处存在,因此传热现象是自然界最普遍且最为人熟知的基本现象。

传热学的应用领域非常广泛。例如:各种锅炉和换热设备的设计和强化传热研究;化学工艺生产中,为维持化学工艺流程的温度而研制满足某种特殊要求的加热或冷却设备及余热回收设备;电子工业中,为解决超大规模集成电路或电子仪器的发热而需研究散热方法;机械制造工业中,测算和控制冷加工或热加工机件的温度场;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,高效换热器的开发与设计,以及利用传热学知识指导强化传热和削弱传热达到节能目的;生物能源的开发与利用。另外,在农业、医学、地质、气象、环境保护等部门,无一不需要用到传热学。

近几十年来,传热学的研究成果对各领域的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进了该学科的迅速发展。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。

传热学在建筑环境与能源应用工程专业中的应用也是非常普遍的。例如,锅炉、制冷、空调、供热、热力输配、燃气燃烧等,无一不涉及传热问题。又如,空调系统的设计中需要计算建筑物围护结构的热(冷)负荷,必须知道其热(冷)负荷的大小,才能采取相应的措施,供给一定的冷量或者热量,以满足室内温、湿度的要求。至于锅炉炉膛的烟气与水冷壁之间的传热计算、供热工程中热力管道的热损失计算、冷库的冷负荷计算、燃气燃烧时的火焰辐射计算等,均需要传热学的知识。此外,各类换热器的设计、选择及评价,地下建筑及人工气候室的热工计算与工况调节,有关供热通风、燃气燃烧等科研课题的研究等,均要求具备一定的传热学理论知识;特别是进入 21 世纪后,建筑节能问题已引起世界各国的高度重视,这也涉及削弱传热的问题。

传热学与工程热力学、流体力学,是建筑环境与能源应用工程专业最为重要的技术基础课

程。在学习传热学时,应注意其与工程热力学的联系与区别。工程热力学研究能量传递及其转化规律,其传热量(Heat Transfer)与时间无关,记为 Q ;传热学研究的是单位时间内传递的热量(Heat Flow),称为热流量,记为 Φ 。需要引起注意的是,二者是不同的概念,本书对二者加以区别。

1.1 传热的基本方式

热量的传递过程是由导热、对流、辐射这 3 种基本方式组成的。例如,冬季房屋外墙的传热过程可分为以下几种,如图 1.1 所示。

- ①室内空气以对流传热(CV)的方式把热量传递到墙内壁面;同时,室内物体及其他壁面以辐射传热(R)的方式把热量传递到墙内壁面。
- ②墙内壁面以导热(CD)的方式把热量传递到墙外壁面。
- ③墙外壁面以对流传热和辐射传热的方式把热量传递到外界环境。

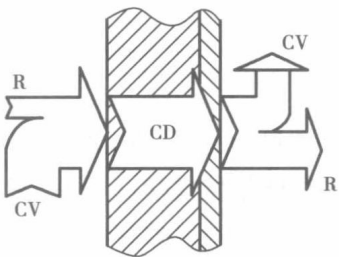


图 1.1 墙体的散热

再如,冬季人体热量的散发过程,仍然是以对流传热方式把热量散发给周围空气,以辐射传热方式把热量散发给周围环境。分析以上两个例子可知,传热过程是由以上三种基本方式组成,要了解物体整个传热过程的规律,必须首先分析三种基本传热方式。因此,本书将对三种基本方式做简单介绍,并给出它们最基本的表达式。

1.1.1 导 热

导热又称为热传导,是指温度不同的物体各部分无相对位移或不同温度的物体直接紧密接触时,依靠物质内部分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而进行热量传递的现象。导热是物质的固有属性,热量由固体壁面的高温部分传递到低温部分的现象就属于导热。

导热可以发生在固体、液体及气体中,但在地球引力场的范围内,只要有温差存在,液体和气体因密度差的原因不可避免地要产生热对流,因而难以维持单纯的导热。因此,单纯的导热现象仅发生在密实的固体材料中。

最简单的导热问题是通过大平壁的导热。如图 1.2 所示,设大平壁厚为 δ ,侧表面积为 A ,两壁面温度分别维持恒定的温度 t_{w1} 和 t_{w2} ,且 $t_{w1} > t_{w2}$,则通过该大平壁的导热热量 Φ 应为:

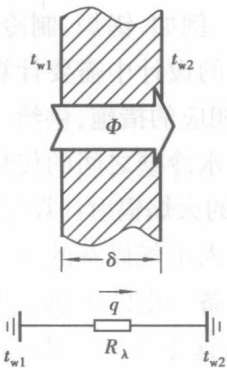


图 1.2 墙体导热

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

(1.1)

引入比例系数 λ 后,式(1.1)可以写为:

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

(1.2)

该式称为傅里叶公式。式中, λ 为比例系数, 称为导热系数或导热率, 单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, 其物理意义是指单位厚度的物体具有单位温度差时, 在单位时间内其通过单位面积上的导热热量。 λ 的大小反映了材料导热能力的强弱, 不同的材料具有不同的 λ , 因此 λ 是材料的物性之一, 通常由实验测定。

工程计算常常利用单位面积的导热热量。单位时间通过单位面积的导热热量称为热流密度 (也称为热流量), 记为 q , 即:

$$q = \frac{\Phi}{A} = \frac{\lambda}{\delta} (t_{w1} - t_{w2}) = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta/\lambda} = \frac{\Delta t}{R_\lambda} \quad (1.3)$$

式中 R_λ ——单层平壁单位面积的导热热阻, $R_\lambda = \delta/\lambda, \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ 。

与电路欧姆定律 $I = \Delta U/R$ 比较, 式(1.3)中 Δt 相当于电位差 ΔU ; q 相当于电流 I ; 热阻 R_λ 相当于电阻 R 。于是, 单层平壁的导热问题可类似于电路来考虑, 可做出模拟电路图 (图 1.2 中已在平壁下面画出了模拟电路图), 然后可仿照电路欧姆定律很方便地计算出 q 或 Φ 。

1.1.2 热对流

依靠流体的运动, 把热量从一处传递到另一处的现象称为热对流。传热学中常将热对流简称为对流, 它是热量传递的基本方式之一。

热对流过程中, 若单位时间内通过单位面积的流体质量流量为 M (单位为 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), 其温度由断面 1 处的 t_1 升高至断面 2 处的 t_2 , 则过程中两断面间传递的热量可由工程热力学中的稳定流动能量方程式确定:

$$q = M \left(\Delta h + \frac{1}{2} \Delta u^2 + g \Delta Z \right) \quad (1.4)$$

式中 u ——流体的速度, m/s ;

ΔZ ——断面 1, 2 间的位置高差, m 。大部分工程问题中, 比动能 $\frac{1}{2} \Delta u^2$ 和比位能 $g \Delta Z$

均远远小于比焓差 Δh , 所以式(1.4)可简化为:

$$q = M \Delta h = M c_p (t_2 - t_1) \quad (1.5)$$

式中 c_p ——比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

热对流仅发生在流体中, 由于流体在运动的同时存在温差, 流体微团之间或质点之间因直接接触而存在导热, 因此热对流也同时伴随着导热。

工程上所遇到的实际传热问题常常不是单纯的热对流, 而是流体与温度不同的固体壁面接触时所发生的传热过程, 这种传热过程称为对流传热。

应注意, 热对流与对流传热是两个完全不同的概念, 其区别为:

- ①热对流是传热的三种基本方式之一, 而对流传热不是传热的基本方式。
- ②对流传热是导热和热对流这两种基本方式的综合作用。
- ③对流传热必然具有流体与固体壁面间的相对运动。

传热学中, 重点讨论的是对流传热问题。

对流传热过程是一个受多种因素影响的复杂过程, 其基本计算公式是牛顿在 1701 年提出来的, 称为牛顿冷却公式, 表示为:

$$\Phi = h(t_w - t_f)A \quad (1.6)$$

$$q = h(t_w - t_f) \quad (1.7)$$

式中 h ——对流表面传热系数(也称对流传热系数), $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。

其意义为:流体与壁面温度差为 1°C 时,单位时间通过单位面积所传递的热量。 h 的大小表征了对流传热的强弱,一切影响对流传热的因素均是影响 h 的因素。通过牛顿冷却公式,一个受多种因素影响的非常复杂的过程就可以表达得非常简单。利用该公式,把解决复杂问题的矛盾转移到求解表面传热系数 h ,研究对流传热的问题因而转化为研究对流表面传热系数 h 的问题。

利用热阻概念,牛顿冷却公式可改写为:

$$q = \frac{t_w - t_f}{1/h} = \frac{\Delta t}{R_h} \quad (1.8)$$

式中 R_h ——单位壁表面积上的对流传热热阻, $R_h = 1/h, \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ 。

1.1.3 热辐射

物体表面通过电磁波(或光子)来传递热量的过程称为热辐射。热辐射现象在日常生活中是常常可以感受到的。例如,我们打开冰箱门可以感受到凉飕飕的,冰箱内没有风扇,凉的感觉来自冷辐射;走向灼热的铁板,感受到的热则来自热辐射。

辐射是物质固有的本质之一。物质由分子、原子、电子等微观粒子组成,这些微观粒子受到振动和激发时就会产生交替的电场和磁场,释放出电磁波(或光子),电磁波以直线传播(类似于光),直到遇到其他物体,被这些物体中的微观粒子吸收。需要说明的是,各种各样的原因均会使微观粒子受到振动或激发,因而热辐射现象是普遍存在的。

热辐射具有以下 3 个特点:

①辐射能可以通过真空自由地传播而无须任何中间介质(与导热、对流完全不同)。

②一切物体只要具有温度(高于 0 K),就能持续地发射出辐射能,同时也能持续地吸收来自其他物体的辐射能。

③热辐射不仅具有能量的传递,而且具有能量形式的转换,即热能—电磁能—热能。

由特点②可知,一切物体均具有发射辐射能和吸收辐射能的能力。工程上所关心的是某一物体与其他物体之间不断进行辐射和吸收的最终结果,它是高温物体支出多于收入,而低温物体收入多于支出。高温物体正是通过这种差额辐射把热量传递给了低温物体的。这种依靠辐射进行的热量传递过程,称为辐射传热。

同时,应注意热辐射与辐射传热的区别。

综上所述,辐射传热量实质上是一种差额辐射,即对某一物体而言:

$$\Phi = \Phi_{\text{支}} - \Phi_{\text{收}}$$

辐射传热量的计算需要引出许多重要的概念,其中辐射力 E 是重要概念之一。物体表面每单位面积在单位时间内对外辐射出去的全部能量,称为辐射力。根据斯蒂芬-玻尔茨曼定律,绝对黑体的辐射力为:

$$E_b = \sigma_b T^4 = C_b \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (1.9)$$

式中 σ_b ——斯蒂芬-玻尔茨曼常数,亦称黑体辐射常数, $\sigma_b = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$;

C_b ——黑体的辐射系数, $C_b = 5.67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$;

T ——热力学温度, K。

一切实际物体的辐射力均低于同温度下黑体的辐射力,对实际物体:

$$E = \varepsilon E_b = \varepsilon C_b \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (1.10)$$

式中 ε ——实际物体的发射率,或称黑度,其值为 $0 \sim 1$ 。

最简单的辐射传热问题是两无限大平行平板间的辐射传热,当两平板表面的温度分别为 T_1 和 T_2 ,且 $T_1 > T_2$ 时,其辐射传热量的计算公式为:

$$q = C_{1,2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (1.11)$$

$$\Phi = Aq = C_{1,2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] A \quad (1.12)$$

式中 $C_{1,2}$ ——两板 1,2 间的系统辐射系数,或称为相当辐射系数。它取决于辐射表面的性质及状态,其值为 $0 \sim 5.67$ 。

必须指出,在辐射传热的分析计算中也要用到辐射热阻的概念,但辐射热阻不能简单地表达,这将在第 11 章详细讨论。

1.2 传热过程

如前所述,导热、对流、辐射是传热的三种基本方式,实际传热过程是由这三种基本方式(有时也只有两种基本方式)组成的。为了对传热过程有一个基本认识,首先分析大平壁的传热过程。

设有一块由同种均质材料组成的大平壁,壁厚为 δ ,壁高度和宽度远大于其厚度,可认为热流方向与壁面垂直。壁体导热系数为 λ ,壁侧表面积为 A ,壁两侧分别具有温度为 t_{f1} 的热流体及温度为 t_{f2} 的冷流体。两侧对流表面传热系数分别为 h_1 和 h_2 ,且两侧壁表面温度未知,现分别假设为 t_{w1} 和 t_{w2} ,如图 1.3 所示。设各点温度恒定不变,传热过程处于稳态过程,现分析通过平壁传递的热量。按图 1.1 的分析方法,整个传热过程分 3 段,用下列三式表示:

壁左侧,热流体与壁面间对流传热,其热流密度按式(1.7)计算为:

$$q = h_1(t_{f1} - t_{w1}) = \frac{t_{f1} - t_{w1}}{R_{h1}}$$

该热量以导热方式从壁左侧传递到右侧,按式(1.3)计算:

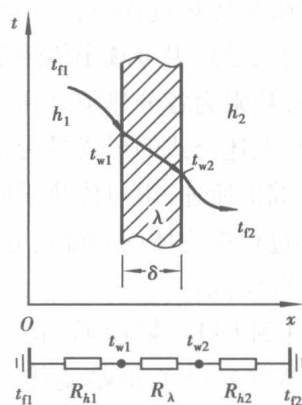


图 1.3 两流体间的传热过程

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

壁右侧,壁面与冷流体间对流传热,热流密度为:

$$q = h_2(t_{w2} - t_{f2}) = \frac{t_{w2} - t_{f2}}{R_{h2}}$$

稳态时,传进壁的热量=传出壁的热量;否则,壁温将随内能变化而发生变化,与稳态的假设不符合。因此,上述三式描述的是同一热量, q =常数。

改写上述三式为:

$$\begin{cases} t_{f1} - t_{w1} = qR_{h1} \\ t_{w1} - t_{w2} = qR_{\lambda} \\ t_{w2} - t_{f2} = qR_{h2} \end{cases}$$

三式相加,消去 t_{w1}, t_{w2} , 整理后得:

$$t_{f1} - t_{f2} = q(R_{h1} + R_{\lambda} + R_{h2})$$

则

$$q = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{R_{h1} + R_{\lambda} + R_{h2}} = \frac{\Delta t}{\sum R} \quad (1.13)$$

其中,总热阻 $\sum R = R_{h1} + R_{\lambda} + R_{h2} = \frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}$ 。

工程中,将式(1.13)常写为:

$$q = k(t_{f1} - t_{f2}) \quad (1.14)$$

或

$$\Phi = qA = k(t_{f1} - t_{f2})A \quad (1.15)$$

$$k = \frac{1}{\sum R} = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} \quad (1.16)$$

其中, k 称为传热系数,它表明冷热流体温差 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,单位时间通过单位面积所传递的热量。 k 是反映传热过程强弱的指标,从式(1.16)中可以看出 k 是总热阻($\sum R$)的倒数。由于总热阻是传热过程中各项分热阻之和,因此减小总热阻可增大传热系数 k ,达到强化传热的目的;增大总热阻可减小传热系数 k ,达到削弱传热的目的。式(1.13)已表示成了欧姆定律的形式,总热阻为各分热阻之和,完全符合电路欧姆定律关于串联电路电阻叠加的原理。在专业课程中,上述公式的形式最为常见。

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物体内的温度分布;学习强化传热和削弱传热的方法;能对传热现象进行理论分析及实验研究。

【例 1.1】 某冷藏库外墙保温材料厚 150 mm ,它所采用的保温材料导热系数为 $0.03\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,忽略墙体砌体层热阻,墙壁内、外两侧的对流表面传热系数分别为: $h_1 = 5\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $h_2 = 15\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,两侧空气的温度分别为 $t_{f1} = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $t_{f2} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。金属保护层设置在外表面上,并且忽略金属保护层的导热热阻,试计算该壁的各项热阻、传热系数以及热流密度。

【解】 单位壁面积各项热阻分别为：

$$R_{h1} = \frac{1}{h_1} = \frac{1}{5} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} = 0.2 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$R_\lambda = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{0.15}{0.03} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} = 5 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

$$R_{h2} = \frac{1}{h_2} = \frac{1}{15} \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} = 0.067 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

单位面积的传热总热阻为各分热阻之和：

$$\sum R = R_{h1} + R_\lambda + R_{h2} = (0.2 + 5 + 0.067) \text{ m}^2 \cdot \text{K/W} = 5.267 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$$

传热系数：

$$k = \frac{1}{\sum R} = \frac{1}{5.267} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} = 0.19 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

热流密度为：

$$q = k\Delta t = 0.19 \times (30 - 5) \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)} = 4.75 \text{ W/m}^2$$

本例的传热总热阻接近于保温材料的导热热阻，而墙壁的传热系数将主要由壁体保温材料的导热系数所决定，可见保温层导热热阻是主要热阻。因此，要提高保温性能，主要是要改进保温材料，采用低导热系数的保温材料可有效地减少热损失。单独计算各项热阻，有助于了解各热阻的差异和分析传热过程中的问题，这是传热计算常用的方法。

【例 1.2】 20℃ 的空气掠过宽为 0.5 m，长 1 m，外表面温度为 140℃ 的钢板，其对流表面传热系数为 25 W/(m²·℃)，此外有 500 W 的热流量通过辐射从表面散失。钢板厚 25 mm，其导热系数为 40 W/(m·℃)，试求钢板内表面温度。

【解】 热量以导热方式从钢板内表面传递到外表面，外表面以辐射传热的方式把 500 W 的热流量散发到周围环境，同时空气以对流传热的方式把另一部分热量带走。

钢板外表面散发的总热流密度为：

$$q = (\text{对流传热量 } q_c) + (\text{辐射传热量 } q_r)$$

$$\text{其中 } q_r = \frac{500 \text{ W}}{A} = \frac{500}{0.5 \times 1} \text{ W/m}^2 = 1000 \text{ W/m}^2$$

$$q_c = h(t_{w2} - t_f) = 25 \times (140 - 20) \text{ W/m}^2 = 3000 \text{ W/m}^2$$

$$q = (1000 + 3000) \text{ W/m}^2 = 4000 \text{ W/m}^2$$

导热量可从式(1.3)计算得出：

$$q = \frac{\Delta t}{R_\lambda} = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta/\lambda}$$

所分析的问题为稳态问题，因此导热量应等于从钢板外表面散发的总热量，由此可求出钢板内表面温度为：

$$t_{w1} = t_{w2} + qR_\lambda = 140^\circ\text{C} + \frac{4000 \times 25 \times 10^{-3}}{40}^\circ\text{C} = 142.5^\circ\text{C}$$

本例的传热过程在工程中是常见的，钢板外表面的散热量为对流传热量和辐射传热量之和。我们把既存在对流传热又存在辐射传热的传热现象称为复合传热，详细的分析见本书第 12 章。