



21世纪

高等学校精品规划教材

传 热 学

邓元望 袁茂强 刘长青 编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



高等学校精品规划教材

传 热 学

邓元望 袁茂强 刘长青 编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是一部以热能与动力工程专业本科生为教学主体的教材,在内容上既有广度,又有深度,力求精练、简明、扼要,做到理论与实际紧密联系,培养学生实际运用知识的能力。

本书共10章,主要包括绪论、热传导、热对流、热辐射、传热过程与换热器、工程应用实例及附录等。每章都有一定数量的例题,可帮助学生加深对知识的理解;除第10章外,每章后面都附有一定数量的思考题和习题,可供学生深入学习时参考。

本书可作为高等学校能源动力类、机械类、土建类、环境与安全类、交通运输类等的教材或教学参考书,也可供其他专业选用和有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传热学 / 邓元望, 袁茂强, 刘长青编. — 北京 :
中国水利水电出版社, 2010.4
21世纪高等学校精品规划教材
ISBN 978-7-5084-7447-2

I. ①传… II. ①邓… ②袁… ③刘… 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(2010)第074462号

书 名	21 世纪高等学校精品规划教材 传热学
作 者	邓元望 袁茂强 刘长青 编
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 15.25 印张 362 千字
版 次	2010 年 4 月第 1 版 2010 年 4 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	28.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

能源危机和环境污染使当今社会的发展面临严峻的挑战,节能减排已成为世界各国的共同目标,因此,作为讲述热能有效、合理利用、转换和传递技术的热物理基础课程,不仅应是大工程观下能源动力类专业高等工程教育中的重要理论基础课,而且也应是 21 世纪所有大工程观下工程专业学生的公共理论基础课。

传热是自然界最普遍的现象之一,在工农业生产和日常生活中都有着广泛的应用。认识传热的规律、掌握优化与控制热量传递的方法和技术是高等工程技术人才必备的基本知识与技能。传热学是研究热量传递规律的一门学科,传热学与其他学科领域,如机械工程、材料、石油化工、环境控制工程、电子技术、信息工程、航天、生物技术、医学和生命科学等科学技术的发展关系密切,不断深入到这些学科领域,形成边缘学科、交叉学科。传热工程技术是根据现代工业生产和科学实践的需要而蓬勃发展起来的先进科学技术,在能源、电力、冶金、动力机械、石油、化工、低温、建筑以及航空航天等许多工业领域发挥着极其重要的作用。在大工程观下高等工程技术人才的培养方案中,传热学课程是整个工程专业课程体系的重要的热工基础课程,应着力进行改革,为培养具有热物理工程技术的“大工程观”的高级工程技术人才打好传热学基础。

本书是湖南省教研教改项目“热能与动力工程专业以热动力设备排放污染及控制为特色的创新课程体系构建与实践”和湖南大学教研教改项目“大工程观背景下热物理基础课程改革与实践”中的部分研究成果,是由中国水利水电出版社组织出版的能源与动力工程专业本科系列 21 世纪高等学校精品规划教材之一。

本书是编者按照热能与动力工程专业传热学本科教学要求编写的,力求精练、系统,主要内容包括热传导、热对流、热辐射以及工程应用实例,共 10 章。第 1 章绪论,介绍了传热学的研究对象和主要内容;第 2 章、第 3 章、第 4 章讲述热传导的内容,其中,第 2 章导热基本定律及稳态热传导,第 3 章

非稳态热传导,第4章稳态热传导问题数值解法;第5章、第6章、第7章分别阐述无相变和有相变时的对流传热,其中第5章对流传热理论基础,第6章单相对流传热实验关联式,第7章相变对流传热,第8章热辐射与辐射传热计算,介绍了热辐射的基本定律和辐射传热的计算方法;第9章传热过程与换热器,重点讲述换热器的基本热设计方法;第10章工程应用实例,尽可能地从不同方面对传热学在工程实际中的应用作一些简单的介绍,这些典型工程应用所对应的热动力设备的节能减排对人类社会的发展及进步有着十分重要的意义。

为帮助学生掌握所学的理论知识,本书除第10章“工程应用实例”外,各章均有一定数量的思考题和习题。在编写这些例题、思考题和习题时,力求使其具有代表性、启发性和灵活性。

本书附录来源于所采用的参考书目。书中的名词术语、单位均符合国家标准。

本书第1章、第5章、第6章、第10章以及附录由邓元望编写,第7~第9章由袁茂强编写,第2~第4章由刘长青编写,全书由邓元望统稿。在编写过程中,得到了龚金科、鄂加强、朱浩等老师的支持和帮助,在此表示衷心的感谢。本书的编写吸取了兄弟院校同仁们丰富的教学经验与科研成果,并参考了已出版的一些国内外教材的内容,在此一并致谢。本书最后承中南大学博士生导师王汉青教授精心审阅,提出了许多宝贵意见,对于提高书稿质量帮助极大,在此表示衷心感谢。

限于编者学术水平和教学经验,书中错误和不妥之处在所难免,恳请使用本书的院校师生批评指正。

编者

2009年12月

主要符号对照表

物 理 量

a 热扩散率, m^2/s	r 半径, m
A 表面积, m^2	R 热阻, K/W ; 半径, m
A_c 横截面积, m^2	s 程长, m ; 管间距, m
b 宽度, m ;	S 形状因子, m
c 比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; 光速, m/s	S_c 太阳常数
c_p 定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	t 摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$
c_f 范宁摩擦系数	T 热力学温度, K
c_1 第一辐射常数, $\text{W} \cdot \text{m}^2$	u 比热力学能, J/kg ; 速度, m/s
c_2 第二辐射常数, $\text{m} \cdot \text{K}$	U 热力学能, J ; 周长, m
d 直径, m	v 速度, m/s
d_e 当量直径, m	V 体积, m^3
E 辐射力, W/m^2	w 速度, m/s
E_λ 光谱辐射力, W/m^3	W 功, J
f 达尔西阻力系数; 频率, Hz	x 笛卡尔坐标, m
F 力, N	X 角系数; 无量纲坐标
g 重力加速度, m^2/s	y 笛卡尔坐标, m
G 投入辐射, W/m^2	z 笛卡尔坐标, m
h 表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 流体的比焓, J/kg	α 体胀系数, K^{-1} ; 吸收比
H 焓, J ; 高度, m	α_λ 光谱吸收比
I 定向辐射强度, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$	β 肋化系数
j 传热因子	γ 汽化潜热, J/kg
J 有效辐射, W/m^2	δ 厚度, m
k 传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	ϵ 发射率; 换热器效能
l 长度, m	$\epsilon(\lambda)$ 光谱发射率
p 压力, Pa	η (动力) 黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; 效率
P 功率, W ; 周长, m	θ 过余温度, $^{\circ}\text{C}$ 或 K ; 平面角, rad
q 热流密度, W/m^2	Θ 无量纲过余温度
q_m 质量流量, kg/s	λ 波长, m 或 μm ; 导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
q_v 体积流量, m^3/s	ν 运动黏度, m^2/s
Q 热量, J	ρ 密度, kg/m^3 ; 反射比

σ 斯忒藩—波耳兹曼常量, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
 τ 时间, s; 穿透比
 τ_c 时间常数, s
 Φ 热流量, W

$\dot{\Phi}$ 内热源强度, W/m^3
 φ 平面角, rad
 ψ 对数平均温差修正系数
 Ω 立体角, sr

特 征 数

Bi 毕渥数, hl/λ (λ 为固体的导热系数)
 Fo 傅里叶数, $a\lambda/l^2$
 Gr 格拉晓夫数, $gl^3\alpha\Delta T/\nu^2$
 Nu 努塞尔数, hl/λ (λ 为固体的导热

系数)

Pe 贝克来数, vl/a

Pr 普朗特数, ν/a

Re 雷诺数, vl/ν

St 斯坦顿数, $h/(\rho v c_p)$

目录

前言

主要符号对照表

第 1 章 绪论	1
1.1 热量传递的基本方式和传热过程	1
1.1.1 热量传递的基本方式	2
1.1.2 传热过程	5
1.2 传热学的主要研究方法	7
本章小结	9
思考题	9
习题	9
第 2 章 导热基本定律及稳态热传导	11
2.1 导热的基本概念和定律	11
2.1.1 导热基本概念	11
2.1.2 导热基本定律	13
2.1.3 热导率	14
2.2 导热问题的数学描述	17
2.2.1 导热微分方程	17
2.2.2 单值性条件	21
2.3 典型一维稳态导热问题的分析解	23
2.3.1 平壁的稳态导热	23
2.3.2 圆筒壁的稳态导热	28
2.3.3 球壁的稳态导热	31
2.4 其他导热问题的求解	32
2.4.1 肋片的稳态导热	32
2.4.2 多维稳态导热的形状因子解法	39
2.4.3 接触热阻	40
本章小结	41
思考题	43

习题	43
第3章 非稳态热传导	46
3.1 非稳态导热问题的基本概念	46
3.2 零维问题的分析解法	47
3.3 典型一维物体非稳态导热的分析解	50
3.3.1 无限大平壁冷却或加热问题的分析解	50
3.3.2 关于分析解的讨论	51
3.3.3 诺模图	54
3.4 其他多维非稳态导热的分析解	58
本章小结	59
思考题	60
习题	60
第4章 稳态热传导问题数值解法	62
4.1 数值解法的基本思想	62
4.2 稳态热传导问题的数值解法	63
4.2.1 有限差分法的应用	63
4.2.2 节点温度差分方程组的求解方法	65
本章小结	68
思考题	68
习题	68
第5章 对流传热理论基础	70
5.1 对流传热概述	70
5.1.1 牛顿冷却公式与表面传热系数	70
5.1.2 对流传热的影响因素	71
5.1.3 对流传热的分类	72
5.2 对流传热问题的数学描述	73
5.2.1 对流传热过程中表面传热系数的计算	73
5.2.2 能量微分方程	74
5.2.3 对流传热问题的数学描述	75
5.3 边界层型对流传热问题的数学描述	77
5.3.1 流动边界层	77
5.3.2 热边界层	78
5.3.3 对流传热微分方程组的简化	79
5.4 流体外掠平板传热层流的分析解	80
5.4.1 速度场的求解结果	80
5.4.2 温度场的求解结果	81
本章小结	83
思考题	83

习题	84
第 6 章 单相对流传热实验关联式	85
6.1 相似原理与量纲分析	85
6.1.1 相似原理	85
6.1.2 量纲分析	88
6.1.3 相似原理指导下的实验研究方法	89
6.2 内部强制对流传热的实验关联式	94
6.2.1 管内流动问题	95
6.2.2 管内强制对流传热的特点	96
6.2.3 管内强制对流传热特征数关联式	99
6.3 外部强制对流传热——流体外掠平板、单管及管簇的实验关联式	106
6.3.1 外掠平板	106
6.3.2 横掠单管	108
6.3.3 横掠管簇	110
6.4 自然对流传热	112
6.4.1 自然对流传热的特点	112
6.4.2 自然对流传热的准则关联式	113
6.4.3 大空间自然对流传热实验关联式	114
6.4.4 有限空间自然对流传热实验关联式	115
本章小结	117
思考题	118
习题	118
第 7 章 相变对流传热	122
7.1 凝结传热	122
7.1.1 膜状凝结和珠状凝结	122
7.1.2 膜状凝结分析解及计算关联式	123
7.1.3 膜状凝结传热的影响因素	126
7.1.4 膜状凝结传热的强化	127
7.2 沸腾传热	128
7.2.1 大容器饱和沸腾曲线	129
7.2.2 核态沸腾传热的主要影响因素	130
7.2.3 大容器饱和和核态沸腾传热的实验关联式	131
本章小结	132
思考题	133
习题	134
第 8 章 热辐射与辐射传热计算	135
8.1 热辐射的基本概念	135
8.1.1 电磁波的波谱和热辐射的特点	135

8.1.2	物体表面对热辐射的作用	136
8.2	黑体辐射的基本定律	137
8.2.1	辐射力和辐射强度	137
8.2.2	斯忒藩-玻耳兹曼定律	139
8.2.3	普朗克定律和维恩位移定律	139
8.2.4	兰贝特定律	141
8.3	实际物体和灰体的辐射	143
8.3.1	实际物体的辐射特性	143
8.3.2	实际物体的吸收特性	146
8.3.3	吸收比与发射率的关系——基尔霍夫定律	148
8.4	辐射传热的角系数	150
8.4.1	角系数的定义	150
8.4.2	角系数的性质	151
8.4.3	角系数的计算方法	152
8.5	封闭系统中被热透介质隔开的灰体表面间的辐射传热	156
8.5.1	封闭腔模型	156
8.5.2	有效辐射	157
8.5.3	有效辐射与辐射传热量的关系	157
8.5.4	两个漫灰表面组成的封闭腔的辐射传热	157
8.5.5	多表面系统漫灰表面的辐射传热的网络求解法	159
8.6	气体辐射的概述	161
8.7	辐射传热的控制	162
8.7.1	覆盖光谱选择性涂层改变表面发射率	162
8.7.2	遮热板(辐射屏)削弱辐射传热	163
	本章小结	164
	思考题	165
	习题	166
第9章	传热过程与换热器	168
9.1	传热过程的分析与计算	168
9.1.1	通过平壁的传热过程计算	168
9.1.2	通过圆筒壁的传热过程计算	169
9.1.3	通过肋壁的传热过程计算	171
9.2	换热器的类型	172
9.3	换热器的传热计算	174
9.3.1	传热计算的基本方程式	175
9.3.2	对数平均温差法	175
9.3.3	效能-传热单元数法	179
9.4	换热器传热过程的强化和削弱	183
9.4.1	传热过程的强化	183

9.4.2 传热过程的削弱	184
本章小结	185
思考题	185
习题	185
第 10 章 工程应用实例	187
10.1 传热过程分热阻的测定——威尔逊图解法	187
10.2 热管及其应用	189
10.2.1 热管原理	189
10.2.2 热管的分类	190
10.2.3 热管的主要特点	190
10.2.4 热管的应用	191
10.3 新型空冷传热技术	193
10.4 电池组的热管理	197
10.4.1 电池热模型	197
10.4.2 确定电池组最优工作温度范围	198
10.4.3 电池热场计算及温度预测	198
10.4.4 传热介质的选择	199
10.4.5 热管理系统散热结构设计	200
10.4.6 风机与测温点的选择	200
10.5 太阳能的热利用	201
10.5.1 太阳常数	201
10.5.2 太阳能集热器	202
10.5.3 选择性涂层	203
10.5.4 应用实例	204
10.6 强化传热技术在锅炉设备中的应用	205
10.6.1 强化传热技术在大型电站锅炉再热器中的应用	205
10.6.2 强化传热技术在锅炉省煤器中的应用	205
10.6.3 强化传热技术在锅炉管式空气预热器中的应用	207
10.6.4 强化传热技术在锅炉炉膛受热面中的应用	210
10.6.5 强化传热技术在烟管锅炉中的应用	211
附录	213
参考文献	230

第 1 章 绪 论

通过本课程的学习，应使学生获得比较宽广和扎实的热量传递规律的基础知识，具备分析工程传热问题的基本能力，掌握计算工程传热问题的基本方法，并具有相应的计算能力及一定的实验技能。

本章首先简要介绍了传热学的研究对象及其在现代科学技术和工程应用中的地位，以使读者明确学习本课程的目的和意义；介绍了热量传递的基本方式：热传导、热对流和热辐射，并引入了热阻的概念，对传热过程作了简单的分析；最后介绍了传热学的基本研究方法。

1.1 热量传递的基本方式和传热过程

传热学是研究热量传递规律的一门学科。热力学第二定律指出：热量总是自发地、不可逆地从高温处传向低温处，即有温差存在的就有热量的传递。由于温差广泛存在于自然界和日常生活中，因此热量传递是一种普遍的自然现象。认识传热的规律、掌握控制与优化热量传递的方法和技术是传热学研究的基本内容。在传热学中不仅应用热力学第一定律和第二定律，而且还需引入能确定热量传递速率的有关定律，对这些定律的研究和应用，构成了传热学研究的基础。

传热学还与其他学科领域，如机械工程、材料、石油化工、环境控制工程、电子技术、信息工程、航天、生物技术、医学和生命科学等科学技术的发展关系密切，不断深入这些学科领域，形成边缘学科、交叉学科，如电子技术中为超大规模集成电路的冷却而产生的微尺度和毫微尺度传热问题、航天领域中为航天器、载人飞船的热控制而产生的微、零重力条件下的传热问题以及生物医学领域中的生物体内的传热问题等。由此可见，传热学的应用非常广泛，在许多高科技领域，传热学知识都发挥着极其重要的作用。

传热工程技术是根据现代工业生产和科学实践的需要而蓬勃发展起来的先进科学技术，在能源、电力、冶金、动力机械、石油、化工、低温、建筑以及航空航天等许多工业领域发挥着极其重要的作用。例如，能源开发与利用以及工业生产中高效换热设备的设计制造；随着航空、航天及核聚变等高新技术的发展，各种热工设备的工作温度不断提高，必须控制热量传递过程，保证热设备能够长时间、高效率的安全运行；随着计算机技术的发展，电子元器件的集成度愈来愈高，功率愈来愈大，尺寸愈来愈小，而其工作温度又不能太高，能否解决其散热问题成为制约计算机向大容量、小型化发展的重要因素；还有电力、冶金、石油、化工、低温以及建筑行业中的隔热保温技术也都属于传热工程技术的范畴。

1.1.1 热量传递的基本方式

热量传递有三种基本方式：热传导、热对流和热辐射。兹分别介绍如下。

1. 热传导

在物体内部或相互接触的物体表面之间，由于分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动而产生的热量传递现象称为热传导（简称导热）。例如，手握金属棒的一端，将另一端伸进灼热的火炉，就会有热量通过金属棒传到手掌，这种热量传递现象就是导热。导热现象既可以发生在固体内部、静止的流体中，也可发生在流动的流体中。

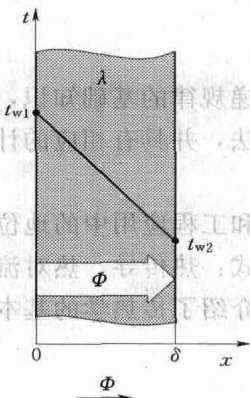


图 1-1 大平壁的稳态导热

在工业上和日常生活中，大平壁的导热是最常见的导热问题，例如通过炉墙以及房屋墙壁的导热等。当平壁表面温度均匀且保持不变时，可以近似地认为平壁的温度只沿着垂直于壁面的方向发生变化，并且不随时间而变化，热量也只沿着垂直于壁面的方向传递，如图 1-1 所示，这样的导热叫做一维稳态导热。

通过对大量实际导热问题的经验提炼，导热现象的规律已经总结为傅里叶（Fourier）定律。对如图 1-1 所示的大平壁，一维稳态导热的热流量与平壁的表面面积 A 及两侧表面的温差 $t_{w1} - t_{w2}$ 成正比，与平壁的厚度 δ 成反比，并与平壁材料的导热性能有关，可表示为

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

式中的比例系数 λ 称为材料的热导率，或称为导热系数，单位是 $W/(m \cdot K)$ ，其数值大小反映了材料的导热能力，热导率愈大，材料导热能力愈强。热导率将在第 2 章作进一步的讨论。

借鉴电学中欧姆定律表达式的形式（电流 = $\frac{\text{电位差}}{\text{电阻}}$ ），上式可改写成“热流 = $\frac{\text{温度差}}{\text{热阻}}$ ”的形式，即

$$\Phi = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\frac{\delta}{\lambda A}} = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{R_{\lambda}} \quad (1-2)$$

式中 $R_{\lambda} = \frac{\delta}{\lambda A}$ 称为平壁的导热热阻，单位为 K/W 。平壁的厚度愈大，导热热阻愈大；平壁材料的热导率愈大，导热热阻愈小。这样，平壁的导热就可以用图 1-1 所示下方的热阻网络来表示，可以用与电学中欧姆定律类似的方法来分析和求解传热问题。

与电阻在电学中所起的作用一样，热阻是传热学中的一个重要概念，它表示物体对热量传递的阻力，热阻愈小，传热愈强。

在传热学中，传递的热量均指单位时间内传递的热量，其单位都用 W 表示。单位时间通过单位面积的热流量称为热流密度，用 q 来表示，单位为 W/m^2 。

由式（1-1）可得，通过平壁一维稳态导热的热流密度为

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

【例题 1-1】 有三块分别由纯铜 [热导率为 $\lambda_1 = 398 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$]、黄铜 [热导率为 $\lambda_2 = 109 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$] 和碳钢 [热导率为 $\lambda_3 = 40 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$] 制成的大平板, 厚度都为 $\delta = 10 \text{ mm}$, 两侧表面的温差都维持在 $\Delta t = t_{w1} - t_{w2} = 50^\circ \text{C}$, 试求通过每块平板的导热热流密度。

解: 这是通过大平壁的一维稳态导热问题, 根据式 (1-3), 对于纯铜板,

$$q_1 = \lambda_1 \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} = 398 \times \frac{50}{0.01} = 1.99 \times 10^6 \text{ W}$$

对于黄铜板

$$q_2 = \lambda_2 \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} = 109 \times \frac{50}{0.01} = 0.545 \times 10^6 \text{ W}$$

对于碳钢板

$$q_3 = \lambda_3 \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} = 40 \times \frac{50}{0.01} = 0.2 \times 10^6 \text{ W}$$

2. 热对流

热对流是指由于流体的宏观运动而引起的流体各部分之间发生相对位移, 冷、热流体相互掺混所导致的热量传递过程。热对流只能发生在流体中, 而且由于流体中的分子同时在进行着不规则的热运动, 因而热对流必然伴随有热传导现象。

工程上特别感兴趣的是流体流过一个物体表面时流体与物体表面间的热量传递过程, 并称为对流传热, 以区别于一般意义上的热对流, 如图 1-2 所示。本书只讨论对流传热。

在日常生活和生产实践中, 经常遇到流体和它所接触的固体表面之间的热量交换, 如锅炉水管中的水和管壁之间、室内空气和暖气片表面及墙壁面之间的热量交换等。当流体流过物体表面时, 由于黏滞作用, 紧贴物体表面的流体是静止的, 热量传递只能按照导热的方式进行; 离开物体表面, 流体有宏观运动, 热对流方式发挥作用。

1701 年, 牛顿提出了对流传热的基本计算公式, 称为牛顿冷却公式, 形式为

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

$$q = h\Delta t \quad (1-5)$$

式中 Δt ——固体壁面与流体之间的温度差, 流体被加热时 $\Delta t = t_w - t_f$, 流体被冷却时 $\Delta t = t_f - t_w$;

t_w ——固体壁面温度, $^\circ\text{C}$;

t_f ——流体温度, $^\circ\text{C}$;

h ——表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

牛顿冷却公式也可以写成欧姆定律表达式的形式为

$$\Phi = \frac{\Delta t}{\frac{1}{Ah}} = \frac{\Delta t}{R_h} \quad (1-6)$$

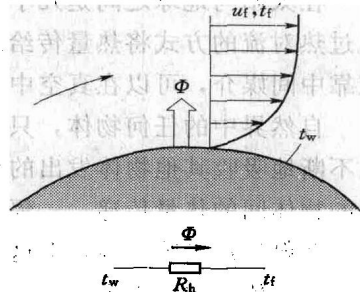


图 1-2 对流传热

式中, $R_h = \frac{1}{Ah}$ 称为对流传热热阻, 单位为 K/W。因此, 对流传热也可以用图 1-2 中下方的热阻网络来表示。

表面传热系数的大小反映对流传热的强弱, 它不仅取决于流体的物性、流动的状态、流动的原因、物体表面的几何形状、尺寸, 还与传热时流体有无相变等因素有关。不同情况下的表面传热系数 h 往往相差很大, 需要具体情况具体分析。用理论分析或实验方法获得各种情况下 h 的计算关系式是研究对流传热的基本任务, 在本书的热对流部分将进行详细的介绍。

【例题 1-2】 室内暖气片的散热面积为 $A=3\text{m}^2$, 表面温度为 $t_w=50^\circ\text{C}$, 与温度为 20°C 的室内空气之间自然对流传热, 表面传热系数为 $h=4\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。试求该暖气片相当于多大功率的电暖气。

解: 暖气片与室内空气之间是稳态的自然对流传热, 根据式 (1-4), 即

$$\Phi = hA(t_w - t_f) = 4 \times 3 \times (50 - 20) = 360\text{W} = 0.36\text{kW}$$

即相当于功率为 0.36kW 的电暖气。

3. 热辐射

物体通过电磁波传递能量的过程称为辐射。物体会因各种原因发射辐射能, 其中由于热的原因, 物体的内能转化成电磁波的能量而进行的辐射过程称为热辐射。

在太阳与地球之间是几乎没有任何物质的真空, 太阳既不能通过热传导的方式也不能通过热对流的方式将热量传给地球, 而是通过热辐射来传递热量的。由此可见, 热辐射不依靠中间媒介, 可以在真空中传播, 而热传导和热对流只有在物体直接接触时才能进行。

自然界中的任何物体, 只要温度高于 0K, 就会不停地向周围空间发出热辐射, 同时又不断地吸收其他物体发出的热辐射。辐射和吸收过程的综合结果就造成了以辐射方式进行的物体间的热量传递——辐射传热, 也常称为辐射换热。当物体与周围环境处于热平衡时, 辐射传热量等于零, 但这是动态平衡, 辐射和吸收过程仍在不停地进行。

辐射传热过程中不仅产生能量的转移, 而且还伴随着能量形式的转换, 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。

实验表明, 物体的辐射能力与温度有关, 在同一温度下不同物体的辐射和吸收本领也大不同。在探索热辐射规律的过程中, 提出了一种称作绝对黑体 (简称黑体) 的理想物体的概念, 对于热辐射的研究具有十分重要的意义。所谓黑体, 是指能吸收投入到其表面上的所有热辐射能量的物体。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热量由斯忒藩-玻耳兹曼 (Stefan - Boltzmann) 定律揭示

$$\Phi = A\sigma T^4 \quad (1-7)$$

式中 T ——黑体的热力学温度, K;

σ ——斯忒藩-玻耳兹曼常量, 即通常说的黑体辐射常数, 它是个自然常数, 其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;

A ——辐射表面积, m^2 。

一切实际物体的辐射能力都小于同温度下的黑体。实际物体辐射热流量的计算可以采用斯忒藩-玻耳兹曼定律的经验修正形式, 即

$$\Phi = \epsilon A \sigma T^4 \quad (1-8)$$

式中, ϵ 称为该物体的发射率 (习惯上又称黑度), 其值总小于 1, 它与物体的种类及表面状态有关, 将在第 8 章进一步讨论; 其余符号的意义同式 (1-7)。

斯忒藩-玻耳兹曼定律又称四次方定律, 是辐射传热计算的基础。辐射传热的分析和计算也可用热阻和热阻网络图, 关于热辐射的基本规律和辐射传热的计算方法将在第 8 章详细讨论。

【例题 1-3】 表面温度为 95°C 的蒸汽管道在厂房内通过, 若管道表面的发射率 $\epsilon = 0.85$, 试计算蒸汽管道发射出的热流密度。

解: 蒸汽管道发射出的热流密度即为单位面积发射出的辐射热流量, 按式 (1-8) 为

$$q = \frac{\Phi}{A} = \epsilon T^4 = 0.85 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (95 + 273)^4 = 883.9 \text{ W/m}^2$$

以上分别介绍了导热、热对流和热辐射三种热量传递的基本方式。实际上, 这三种方式往往不是单独出现的, 如前面所指出的, 对流传热就是导热和对流两种方式共同作用的结果, 再如暖气片的散热过程是三种方式同时存在: 暖气片内蒸汽或热水与内壁面的对流传热、暖气片壁的导热、外壁面与周围空气的对流传热以及与房间内墙壁、物体之间的辐射传热同时发生, 这样的例子数不胜数。在分析传热问题时首先就应该弄清楚有哪些传热方式在起作用, 然后再按照每一种传热方式的规律进行计算。有时, 某种传热方式虽然存在, 但与其他传热方式相比, 作用甚微, 往往可以忽略, 要具体问题具体分析。

1.1.2 传热过程

在工程上经常遇到固体壁面两侧流体之间的热量交换, 如锅炉中水冷壁、省煤器和空气预热器的传热, 蒸汽轮机装置的表面式冷凝器、内燃机散热器的传热, 以及热力设备和管道的散热等。在传热学中, 这种热量从固体壁面一侧的流体通过固体壁面传递到另一侧流体中去的过程称为传热过程。

注意: 这里定义的“传热过程”有其特定的含义, 它与一般性论述中把热量传递过程统称为传热过程不同, 本书中所出现的“传热过程”都是指这一特定的含义。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, 是本书讨论的重要内容之一。一般来说, 传热过程由三个相互串联的热量传递环节组成:

(1) 热量以对流传热的方式从高温流体传给壁面, 有时还存在高温流体与壁面之间的辐射传热, 如炉膛内高温烟气与水冷壁之间。

(2) 热量以导热的方式从高温流体侧壁面传递到低温流体侧壁面。

(3) 热量再以对流传热的方式从低温流体侧壁面传给低温流体, 有时还须考虑壁面与流体及周围环境之间的辐射传热。

这里先介绍最简单的通过平壁的稳态传热过程, 其他传热过程将在第 9 章进行讨论。

如图 1-3 所示, 一个热导率 λ 为常数、厚度为 δ 的大平壁。平壁左侧远离壁面处的流体温度为 t_{f1} , 表面传热系数为 h_1 , 平壁右侧远离壁面处的流体温度为 t_{f2} , 表

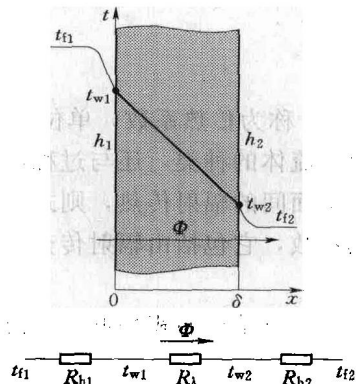


图 1-3 通过平壁的传热过程