

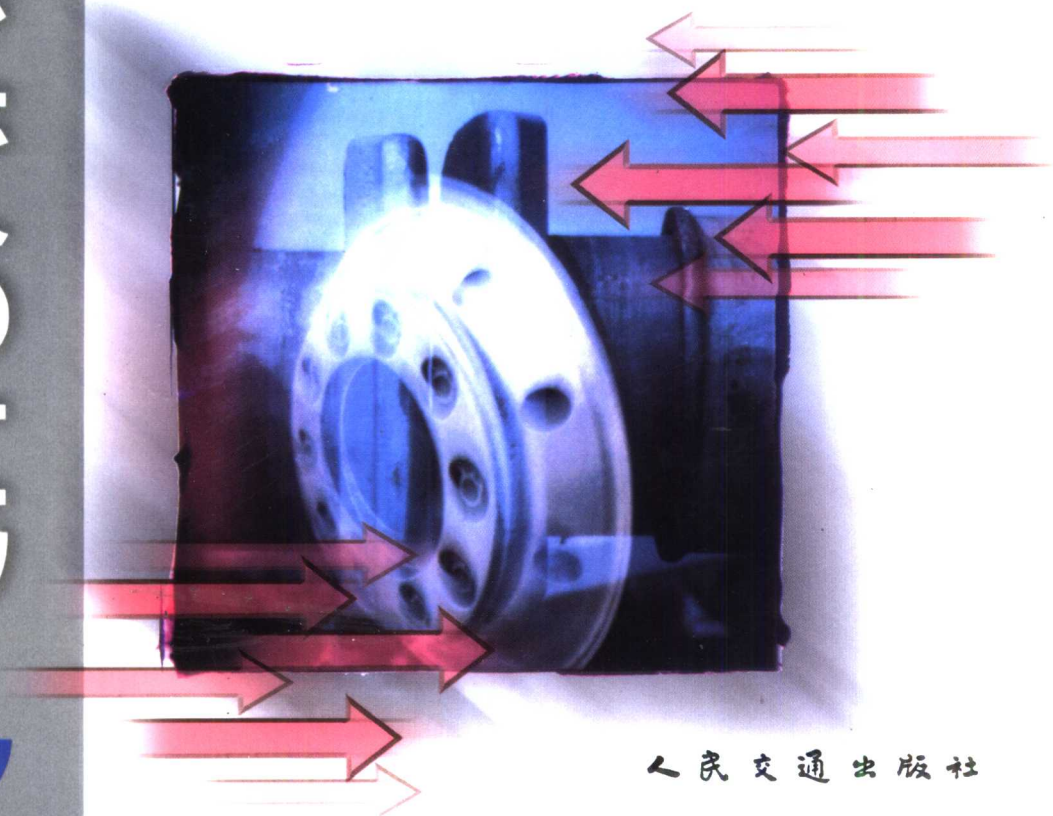
高等学校教材

CHUANREXUE

传热学

—理论基础及工程应用

■ 曹红奋 梅国梁 编



人民交通出版社

高等学校教材

Chuanre Xue

传 热 学

——理论基础及工程应用

曹红奋 梅国梁 编

人民交通出版社

内 容 简 介

本书是根据原国家教育委员会颁布的《传热学课程教学基本要求》和轮机工程专业特点,结合编者多年来的教学与教改实践编写而成的。

本书体系和编排符合 21 世纪热工系列课程的改革趋势;内容紧密结合工程实际,注重学生能力的培养;各章配以例题、小结、思考题和习题,书末附有附录和习题参考答案,便于读者自学。全书共九章,前八章构成了本课程的基本内容,包括导热、对流传热、辐射传热、总传热过程和换热器等,第九章旨在拓宽学生视野,介绍了几个传热专题。

本书属上海市普通高等学校“十五”重点教材,可作为高等院校轮机工程专业的教材,也可作为热能与动力工程等其他相关专业的教材或教学参考书,还可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传热学:理论基础及工程应用/曹红奋,梅国梁编
北京:人民交通出版社,2004.4
ISBN 7-114-05009-7

I.传... II.①曹... ②梅... III.传热学
IV.TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 020631 号

高等学校教材

传 热 学

——理论基础及工程应用

曹红奋 梅国梁 编

正文设计:孙立宁 责任校对:刘高彤 责任印制:张 恺

人民交通出版社出版

(100011 北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

北京鑫正大印刷有限公司印刷

开本:787×1092 1/16 印张:13.75 字数:334 千

2004 年 5 月 第 1 版

2004 年 5 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数:0001—2000 册 定价:26.00 元

ISBN 7-114-05009-7

前 言

在教育部制定的《面向 21 世纪高等教育教学内容和课程体系改革计划》指导下,本书按照原国家教育委员会 1996 年颁布的《传热学课程教学基本要求》,结合轮机工程专业特点,同时吸收航海类热工课程教改经验编写而成。

传热学是轮机工程专业的一门主要专业基础课程,轮机工程专业属于交通运输类范畴,主要培养海船高级工程技术人才。该专业的教学既要满足国家教育部学位教育的要求,又要适应 1995 年全面修正的《1978 年海员培训、发证和值班标准国际公约》(STCW 78/95 公约)的要求,还要符合中华人民共和国海事局 1998 年颁布的《海船船员适任考试和评估大纲》的要求,即必须学位教育和职业教育并重。针对传热学课程特点和轮机工程专业要求,本教材旨在适应 STCW 78/95 公约的有关规定,结合航海高等教育特点和传热技术的发展,力求做到系统、规范、新颖、实用,其主要特点是:

1. 体系完整,编排结构合理新颖。本书采用先概述(第一章)、后分述(第二章~第七章)、再综合与应用(第八章和第九章)的编排体系,全面系统地阐述了热量传递的理论基础及工程应用。

2. 精选内容以保证教材的先进性和实用性。本书删除了与先修课程重复的内容及部分繁琐的数学推导,增加了近年来传热学的最新技术进展及在各个领域(特别是轮机工程领域)中的工程应用,使理论与实际的结合更加紧密。

3. 注重学生思维与能力的培养。本书理论阐述力求简明扼要,强调思路分析,结合工程应用,采用准确实用的计算公式、图表和常用工程数据,注重培养学生分析和解决实际问题的能力。

4. 便于读者自学。本书在编写时力求深入浅出,通俗易懂,重点明确,并且各章都配以小结、较丰富的例题、思考题和习题,书末还附有附录和习题参考答案等。

本书按 40~60 学时编写,可作为航海高等院校轮机工程专业的教材,也可作为热能与动力工程等其他相关专业的教材或教学参考书,还可供有关工程技术人员参考。书中带“*”符号的为加深、拓宽的内容,任课教师可根据不同专业的具体要求选取讲授内容。

全书采用中华人民共和国法定计量单位,并附有常用单位换算表。

本书属上海市普通高等学校“十五”重点教材建设项目,由上海市教育委员会组织编写,其中第一章~第六章和第九章的第一、二节由曹红奋编写,第七章、第八章和第九章的第三、四节由梅国梁编写,全书由曹红奋统一定稿。本书承上海海运学院章学来教授主审,并得到上海海运学院有关部门领导和老师的大力支持,谨在此表示衷心的感谢。

限于编者水平,书中错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

主要符号表

一、物理量

A 传热面积,横截面积,表面积, m^2	S 导热形状因子
A_s 可见面积,球面面积, m^2	s 管间距, m
A_L 纵截面积, m^2	T 热力学温度, K
a 热扩散率, m^2/s	t 摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$
b 宽度, m	t_c 特征温度, $^{\circ}\text{C}$
c 比热容(或质量热容), $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	U 热力学能, J
c_p 比定压热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	u 比热力学能, J/kg ;速度, m/s
D 或 d 直径, m	V 体积, m^3
E 辐射力, W/m^2	v 比体积, m^3/kg ;速度, m/s
E_λ 光谱辐射力, W/m^3	v_c 特征流速, m/s
F 力, N ;辐射函数	W 功, J
G 投射辐射, W/m^2	w 速度, m/s
g 重力加速度, m/s^2	X 角系数;无量纲坐标
H 焓, J ;高度, m	x, y, z 笛卡尔坐标
h 表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$;比焓, J/kg	α 吸收比
h_c (表面)对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	$\alpha(\lambda)$ 光谱吸收比
h_r (表面)辐射传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	α_V 体胀系数, K^{-1}
J 有效辐射, W/m^2	β 肋化系数
K 总传热系数(简称传热系数), $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	γ 汽化潜热, J/kg ;相对误差
L 定向辐射强度, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr})$	Δ 差值
l 长度, m	δ 厚度, m
l_c 特征尺寸, m	ε 发射率;换热器效能;修正系数
m 质量, kg	$\varepsilon(\lambda)$ 光谱发射率
P 功率, W ;周长,湿周, m	$\varepsilon(\varphi)$ 定向发射率
p 压力, Pa	η (动力)粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$;效率, $\%$
Q 热量, J	Θ 无量纲过余温度
q 热流密度(或面积热流量), W/m^2	θ 过余温度, K 或 $^{\circ}\text{C}$;平面角, rad 或 $(^{\circ})$
q_m 质量流量, kg/s	λ 波长, m ;热导率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
q_V 体积流量, m^3/s	ν 运动粘度, m^2/s
R 半径, m ;热阻, K/W	ρ 密度, kg/m^3 ;反射比
r 半径, m ;面积热阻, $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$	$\rho(\lambda)$ 光谱反射比
r_f 污垢系数(或面积污垢热阻), $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$	σ 斯忒藩—玻耳兹曼常量, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$
	τ 时间, s ;透射比

$\tau(\lambda)$ 光谱透射比

τ_r 时间常数, s

Φ 热流量, W

Φ_l 线热流量, W/m

二、特征数

$Bi = \frac{hl}{\lambda_s}$ ——毕渥(Biot)数

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

$Gr = \frac{g\alpha_v\Delta t l^3}{\nu^2}$ ——格拉晓夫(Grashof)数

$Nu = \frac{hl}{\lambda_f}$ ——努塞尔(Nusselt)数

Φ 内热源强度, W/m³

φ 平面角, rad 或(°)

ψ 温差修正系数; 平面角, rad 或(°)

Ω 立体角, sr

$Pe = Re \cdot Pr = \frac{vl}{a}$ ——贝克来(Peclet)数

$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{T_p}{\lambda_f}$ ——普朗特(Prandtl)数

$Re = \frac{vl}{\nu}$ ——雷诺(Reynolds)数

$St = \frac{Nu}{Re \cdot Pr} = \frac{h}{\rho v c_p}$ ——斯坦顿(Stanton)数

目 录

主要符号表	1
第一章 绪论	1
第一节 传热学的研究对象和任务	1
第二节 热量传递的三种基本方式	1
第三节 总传热过程	5
第四节 热阻	7
小结	10
思考题	10
习题	11
第二章 导热理论基础	13
第一节 温度场和温度梯度	13
第二节 傅里叶定律	14
第三节 热导率	15
第四节 导热微分方程	18
第五节 定解条件	21
小结	23
思考题	23
第三章 稳态导热	24
第一节 一维稳态导热	24
第二节 延伸体的稳态导热	32
第三节 多维稳态导热	40
小结	48
思考题	48
习题	49
第四章 非稳态导热	53
第一节 概述	53
第二节 集总参数法	57
第三节 诺谟图算法	60
小结	69
思考题	70
习题	70
第五章 对流传热原理	73
第一节 概述	73
第二节 边界层概念	76

第三节 对流传热微分方程组	79
第四节 特征数方程	82
小结	86
思考题	86
第六章 各种对流传热过程	88
第一节 单相流体的强迫对流传热	88
第二节 自然对流传热	100
第三节 凝结与沸腾传热	104
小结	111
思考题	111
习题	112
第七章 辐射传热	114
第一节 基本概念	114
第二节 黑体辐射的基本定律	117
第三节 实际物体和灰体的辐射	121
第四节 物体表面间的辐射传热	126
第五节 气体辐射的特点	141
小结	144
思考题	145
习题	145
第八章 传热过程与换热器	148
第一节 传热过程	148
第二节 换热器的类型	155
第三节 间壁式换热器的热计算	164
小结	172
思考题	172
习题	172
第九章 传热专题	175
第一节 无量纲特征数的求取	175
第二节 对流传热的强化	179
第三节 太阳能的利用	182
第四节 热管和热管换热器	183
附录	186
附录 1 常用单位换算表	186
附录 2 金属材料的密度、比热容和热导率	187
附录 3 保温、建筑及其他材料的密度、最高允许温度和热导率	189
附录 4 干空气的热物理性质($p = 1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$)	190
附录 5 烟气的热物理性质($p = 1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$)	190
附录 6 几种气体的热物理性质($p = 1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$)	191
附录 7 饱和水的热物理性质	192

附录 8 干饱和水蒸汽的热物理性质	194
附录 9 过热水蒸汽的热物理性质($p = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$)	196
附录 10 几种饱和液体的热物理性质	196
附录 11 液态金属的热物理性质	198
附录 12 双曲函数值	199
附录 13 几种材料在表面法线方向上的发射率	200
附录 14 常用换热器传热系数的大致范围	201
习题参考答案	202
主要参考文献	207

第一章 绪 论

第一节 传热学的研究对象和任务

传热学是研究热量传递规律的科学,它和工程热力学同属工程热物理学科,都是研究热现象的理论基础。

按照热力学第二定律,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,凡是有温差的地方,就有热量的传递。因此,热量传递是自然界和工程技术中常见的现象。在能源动力、化工制药、材料冶金、机械制造、电子电气、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部门中都存在大量的传热问题,都必须应用热传递规律。

工程热力学和传热学从不同的角度研究了热物理现象的客观规律。工程热力学以热力学平衡态和可逆过程为基础,主要研究热能与机械能相互转换的规律,不考虑过程所需时间,所研究的热量传递过程通常是在温差趋于零(或无限小)的情况下进行的。传热学则专门研究温度不平衡时热量传递的规律,是典型的不可逆过程,此时所研究的热量传递过程都是在一定温差下进行的,传热的快慢和不同时刻的温度分布是主要的研究内容。例如,将一根灼热的钢棒放入水中冷却,工程热力学通常计算棒与水最后达到的平衡温度和水得到的热量,而传热学则要求出热量传递的速率、某瞬间钢棒的温度分布和过程所需时间。由此可见,传热学研究的中心课题是:传热速率、温度场和传热时间。

在船舶轮机工程中,许多热力设备的设计制造和运行管理都涉及到大量的传热学知识。如为了安全运行,柴油机的气缸壁、气缸盖和活塞顶等必须采取有效的冷却;再如为了保持一定的工作温度,燃油通过燃油加热器被蒸汽加热,滑油则通过滑油冷却器被冷却水冷却;此外,为了减少热量或冷量的损失,对高于或低于室温的设备或管道,如锅炉、冷库等,都要采用保温措施。总之,传热学是轮机工程的一门重要技术基础课程,轮机管理人员应该很好地掌握和应用热传递规律,有效地解决好增强传热和削弱传热两大类工程实际问题,改善设备运行,节约能源,保护环境。

根据物体温度分布随时间的依变关系,热量传递过程可分为稳态过程与非稳态过程两大类。凡是温度场不随时间而改变的热传递过程均称为稳态热传递过程,反之则称为非稳态热传递过程。各种热力设备在持续不变的工况下运行时的热传递过程属于稳态过程,而在起动、停机、变工况时所经历的热传递过程则为非稳态过程。本书除第四章介绍非稳态导热过程外,其他各章主要介绍稳态热传递过程。

第二节 热量传递的三种基本方式

热量传递有三种基本方式:热传导、热对流和热辐射。实际的热量传递过程都是这三种基

本方式的不同组合。

一、热 传 导

当物体内有温度差或两个不同温度的物体接触时,依靠分子、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。纯导热过程中,温度不同的各部分之间不发生宏观的相对位移,也没有能量形式的变化。导热可以在固体、液体和气体中发生。

从微观角度来看,气体、液体、导电固体和非导电固体的导热机理有所不同。气体导热是气体分子相互碰撞时的能量传递,温度高低表征分子动能的大小,分子不停地无规则运动,使得不同能量水平的分子碰撞并交换能量和动量,热量就由高温处传到低温处;固体导热有两种形式:自由电子的迁移和晶格结构的振动(即原子、分子在其平衡位置附近的振动),导电固体的导热主要靠自由电子运动,良好的导体往往都是良好的导热体,而非导电固体的导热则是通过晶格结构的振动来实现的;液体导热机理相当复杂,可以认为介于气体与固体之间,有待进一步研究。

传热学中通常把单位时间内通过某一给定面积 A 的热量称为热流量,记为 Φ ,单位为 W 。而单位时间内通过单位面积的热量称为热流密度(或称面积热流量),记为 q ,单位为 W/m^2 。显然:

$$q = \frac{\Phi}{A} \quad (1-1)$$

热流量和热流密度反映了热量传递的快慢程度。在稳态热传递过程中,它们的数值保持不变。

导热现象的规律可由傅里叶(Fourier)定律表述(详见第二章第二节),其最简单形式为一维稳态导热。设有如图 1-1 所示的一块大平壁,壁厚为 δ ,两侧表面积均为 A ,两侧表面分别维持均匀恒定温度 t_{w1} 和 t_{w2} ,且 $t_{w1} > t_{w2}$,则根据傅里叶定律有:

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

$$q = \lambda \frac{\Delta t}{\delta} = \lambda \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} \quad (1-2b)$$

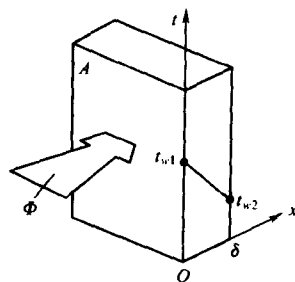


图 1-1 通过平壁的一维稳态导热

上式说明,平壁一维稳态导热时,热流量 Φ 与导热温差 $\Delta t = t_{w1} - t_{w2}$ 成正比,与垂直于热流方向的导热面积 A 成正比,而与壁厚 δ 成反比。式中比例系数 λ 称为热导率或导热系数,是表征材料导热能力大小的物性参数,单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ (详见第二章第三节)。

二、热 对 流

由于流体中温度不同的各部分之间发生相对位移而引起的热量传递现象称为热对流,简称对流。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,因而对流必然伴随有导热现象。

工程上经常遇到的是流动着的流体与所接触的物体表面之间由于存在温度差而引起热量传递现象,称为表面对流传热,简称对流传热(习惯上称为对流换热)。对流传热是流体宏观热运动(对流)与微观热运动(导热)联合作用的结果,因而必然同时受到热量传递规律和流体

流动规律的支配,是一种十分复杂的传热过程。本书只讨论稳态的对流传热过程。

对流传热的基本计算式是牛顿(Newton)冷却公式:

$$\text{流体被加热时,} \quad q_c = h_c(t_w - t_f) \quad (1-3a)$$

$$\text{流体被冷却时,} \quad q_c = h_c(t_f - t_w) \quad (1-3b)$$

式中, t_w 、 t_f 分别为壁面温度和流体温度, $^{\circ}\text{C}$; 脚标“c”表示对流传热; 比例系数 h_c 称为表面对流传热系数, 简称对流传热系数(习惯上称为对流换热系数), 是表征对流传热强弱的非物性参数, 单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

如果把温差记为 Δt , 并约定永远取正值, 则牛顿冷却公式可表示为:

$$\Phi_c = h_c A \Delta t \quad (1-4a)$$

$$q_c = h_c \Delta t \quad (1-4b)$$

式中, 对流传热面积 A 和温差 Δt 都易确定, 诸多复杂的影响因素都集中在对流传热系数 h_c 身上, 不同情况的 h_c 数值相差很大。因此, 研究对流传热, 计算热流量 Φ_c 或热流密度 q_c 的关键就在于分析对流传热系数 h_c 的影响因素, 确定 h_c 值, 详细介绍见第五章和第六章。

三、热 辐 射

物体通过电磁波传递能量的现象称为辐射, 被传递的能量称为辐射能。物体会因各种原因产生辐射, 其中由于温度或微观粒子热运动状态改变而产生的辐射称为热辐射。本书提到的辐射都是指热辐射。

热辐射是物质的固有特性, 任何物体 ($T > 0\text{K}$) 都在不断地向外发射辐射能, 同时又不断地吸收来自其他物体的辐射能, 物体之间相互发射和吸收的综合效果就造成了以热辐射方式进行的热量传递现象, 称为表面辐射传热, 简称辐射传热(习惯上称为辐射换热)。当物体与环境处于热平衡时, 辐射传热量等于零, 但发射和吸收仍在不停地进行, 处于动平衡状态。

与导热、对流传热相比, 辐射传热具有明显的特点。首先, 导热和对流传热都必须由冷、热物体直接接触或通过中间介质相接触才能进行, 而辐射传热则不依靠物质的接触并以光速进行热量传递, 既不需要直接接触, 也不一定需要中间媒介, 事实上, 在真空中辐射能的传递最为有效。其次, 辐射传热伴随有能量形式的转换, 即发射时物体的部分热力学能(热能)转化为辐射能, 而吸收时又从辐射能转化为物体的热力学能(热能)。另外, 导热和对流传热中, 热流量一般与温差的一次方成正比, 即 $\Phi \propto \Delta t$, 而辐射传热热流量通常与绝对温度的四次方之差成正比, 即 $\Phi \propto \Delta(T^4)$, 因此, 温差对辐射传热的影响更明显(详见后述)。

不同物体的辐射能力与吸收能力各不相同, 能够全部吸收外来辐射的理想物体称为绝对黑体, 简称黑体。在同一温度下, 黑体的热辐射能力也是所有物体中最强的(详见第七章)。黑体表面辐射的热流量可用斯忒藩—玻耳兹曼(Stefan-Boltzmann)定律计算:

$$\Phi_r = \sigma A T^4 \quad (1-5a)$$

式中, A 为黑体的辐射表面积, m^2 ; T 为黑体表面的热力学温度, K ; σ 称为斯忒藩—玻耳兹曼常数或黑体辐射常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

一切实际物体的辐射能力都小于同温度下的黑体, 其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:

$$\Phi_r = \epsilon \sigma A T^4 \quad (1-5b)$$

式中, ϵ 称为该物体的发射率(习惯上称为黑度), 其值总小于 1, 表示物体辐射能力接近黑体的

程度,将在第七章进一步介绍。

斯忒藩—玻耳兹曼定律表明黑体辐射热流量与其热力学温度的四次方成正比,所以又称四次方定律,是分析计算辐射传热的基础。

注意,式(1-5)中的 Φ_r 仅是物体自身向外辐射的热流量,并非辐射传热热流量。要计算辐射传热热流量还必须考虑物体对外来辐射的吸收情况,即要算收支总账(详见第七章)。例如,两个互相平行且十分接近的黑体表面(面积均为 A)间的辐射传热热流量可按式计算:

$$\Phi_r = \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (1-6)$$

而一非凹小物体(表面积为 A_1 、表面温度为 T_1 、发射率为 ε_1)与外围大空腔(内表面温度为 T_2)之间的辐射传热热流量计算式则为:

$$\Phi_r = \varepsilon_1 \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (1-7)$$

工程实际中,一个物体表面常常既有对流传热又有辐射传热,这种对流与辐射同时存在的复合传热现象统称为表面传热,为计算方便,通常把辐射传热热流量 Φ_r 折合成对流传热热流量,即先按有关辐射传热的公式算出辐射传热热流量 Φ_r ,然后将它表示成牛顿冷却公式的形式:

$$\Phi_r = h_r A \Delta t \quad (1-8)$$

式中, h_r 称为表面辐射传热系数,简称辐射传热系数(习惯上称为辐射换热系数),单位为 $W/(m^2 \cdot K)$ 。

$$h_r = \frac{\Phi_r}{A \Delta t} \quad (1-9)$$

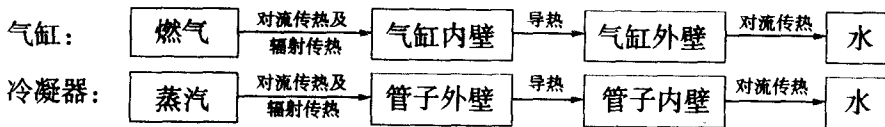
于是,对于对流传热与辐射传热互不干扰的表面传热,总热流量可表示为:

$$\Phi = \Phi_c + \Phi_r = h_c A \Delta t + h_r A \Delta t = (h_c + h_r) A \Delta t = h A \Delta t \quad (1-10)$$

式中, h 称为表面传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。表面传热系数 h 等于对流传热系数 h_c 与辐射传热系数 h_r 之和,即

$$h = h_c + h_r \quad (1-11)$$

以上简单地介绍了导热、对流和热辐射三种传递热量的基本方式,但工程实际问题是比较复杂的,常常是几种基本方式同时作用的结果。例如,水冷式柴油机气缸和冷凝器的热量传递过程各环节所包含的基本方式如下:



这两种热量传递过程相似,但实际计算时,高温燃气到气缸内壁的热量传递必须同时考虑对流传热与辐射传热,蒸汽到管子外壁的热量传递中辐射传热可以忽略不计,而壁面到水的热量传递只有对流传热。要进行传热计算首先要学会上述传热分析,分析一个复杂的实际热量传递过程由哪些串联环节组成,以及在同一环节中有哪些热量传递方式并联地起作用,并能分清主次,这是求解实际热量传递问题的基本功。

例 1-1 一块厚度 $\delta = 50\text{mm}$ 的大平板,两侧表面温度分别为 $t_{w1} = 200^\circ\text{C}$ 和 $t_{w2} = 100^\circ\text{C}$, 试求不同材料时的导热热流密度: (1) $\lambda = 389\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的铜材; (2) $\lambda = 46\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的钢材; (3) $\lambda = 0.13\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的石棉。

解:按式(1-2b)有

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

$$(1) q = 389 \times \frac{200 - 100}{0.05} = 7.78 \times 10^5 \text{ W/m}^2$$

$$(2) q = 46 \times \frac{200 - 100}{0.05} = 9.20 \times 10^4 \text{ W/m}^2$$

$$(3) q = 0.13 \times \frac{200 - 100}{0.05} = 2.60 \times 10^2 \text{ W/m}^2$$

讨论:由计算可见,由于铜与石棉的热导率相差悬殊,导致在相同的条件下通过铜板的导热热量比通过石棉板的导热热量约大三个数量级。因此,铜是热的良导体,而石棉则可起到一定的隔热保温作用。

例 1-2 直径为 150mm 的蒸汽管道有 12m 的长度通过机舱,机舱温度为 30℃,管道外壁面温度为 60℃,发射率为 0.9,与周围空气间的对流传热系数为 6W/(m²·K),试分别计算蒸汽管道在机舱内的对流散热量、辐射散热量和总散热量。

解:此蒸汽管道在机舱内的散热为对流与辐射并存的表面传热。按式(1-4a)可得对流传热量为:

$$\begin{aligned}\Phi_c &= h_c A \Delta t = h_c \pi d l (t_w - t_f) \\ &= 6 \times 3.14 \times 0.15 \times 12 \times (60 - 30) \\ &= 1017.4 \text{ W}\end{aligned}$$

管道周围物体为机舱墙壁、房顶和地面等,未加说明时,一般可近似地取这些物体的表面温度为室温或周围空气温度,于是按式(1-7)可得管道辐射散热量为:

$$\begin{aligned}\Phi_r &= \varepsilon_1 \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \\ &= \varepsilon_1 \sigma \pi d l (T_1^4 - T_2^4) \\ &= 0.9 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 3.14 \times 0.15 \times 12 \times [(60 + 273)^4 - (30 + 273)^4] \\ &= 1115.5 \text{ W}\end{aligned}$$

对流散热量与辐射散热量之和即为管道总散热量:

$$\begin{aligned}\Phi &= \Phi_c + \Phi_r \\ &= 1017.4 + 1115.5 \\ &= 2132.9 \text{ W}\end{aligned}$$

讨论:计算结果表明,对于表面温度不高的一类散热问题,其辐射散热量与对流散热量具有相同的数量级,必须同时予以考虑。

例 1-3 某钢板的发射率为 0.8,表面温度等于室温为 27℃,试计算钢板的辐射热流密度。此时,钢板与环境之间的辐射传热热流密度又为多少?

解:按式(1-5b)可得钢板的辐射热流密度为:

$$q_r = \frac{\Phi_r}{A} = \varepsilon \sigma T^4 = 0.8 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (27 + 273)^4 = 367.4 \text{ W/m}^2$$

此时钢板与环境温度相同,处于动态平衡,因而辐射传热热流密度为零。

第三节 总传热过程

总传热过程是指高温流体通过固体壁把热量传给另一侧低温流体的热量传递过程,简称

传热过程^①。总传热过程工程应用十分广泛,例如,上一节分析过的柴油机中高温燃气经缸壁传热给外侧的冷却介质、冷凝器中管内的冷却水通过管壁从管外低压蒸汽吸收热量等就是总传热过程。热量通过固体壁纯属导热,而流体与壁面之间则是对流传热(对于液体),或者是对流与辐射的复合表面传热(对于气体),因此,总传热过程通常包括两种或三种热传递的基本方式。

下面以通过单层大平壁的一维稳态传热过程为例来导出传热过程的计算公式。如图 1-2 所示,传热过程包括串联着的三个环节:(1)热流体把热量传给壁面高温侧;(2)从壁面高温侧到壁面低温侧的固体壁导热;(3)壁面低温侧把热量传给冷流体。由于稳态,通过串联各环节的热流量 Φ 相同,三个环节的热流量表达式依次可写成:

$$\Phi = h_1 A (t_{f1} - t_{w1}) \quad (a)$$

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

$$\Phi = h_2 A (t_{w2} - t_{f2}) \quad (c)$$

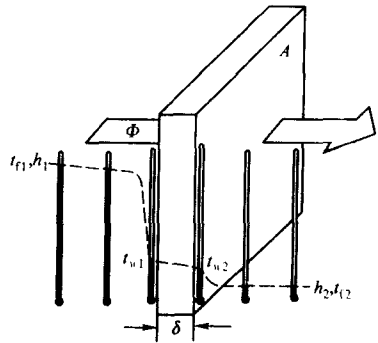


图 1-2 传热过程的剖析

将(a)、(b)、(c)三式改写成温差的形式:

$$t_{f1} - t_{w1} = \frac{\Phi}{h_1 A} \quad (d)$$

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

$$t_{w2} - t_{f2} = \frac{\Phi}{h_2 A} \quad (f)$$

(d)、(e)、(f)三式相加,消去壁温 t_{w1} 和 t_{w2} ,整理后得:

$$\Phi = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{\delta}{\lambda A} + \frac{1}{h_2 A}} \quad (1-12a)$$

式中, A 为固体壁传热面积, m^2 ; t_{f1} 、 t_{f2} 分别为热流体和冷流体的温度, $^{\circ}C$; h_1 、 h_2 分别为热流体侧和冷流体侧的表面传热系数^②, $W/(m^2 \cdot K)$ 。式(1-12a)也可以表示成:

$$\Phi = KA(t_{f1} - t_{f2}) = KA\Delta t \quad (1-12b)$$

上式称为传热方程式,是计算总传热过程的基本公式。式中, $\Delta t = t_{f1} - t_{f2}$ 为传热温差,又称温压, K 或 $^{\circ}C$; 比例系数 K 称为总传热系数,简称传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$,数值上表示传热温差为 $1K$ 时单位传热面积的热流量,总传热系数是表征传热过程强弱的非物性参数,也是衡量换热器性能优劣的重要参数(详见第八章)。由式(1-12)可得平壁一维稳态传热的传热系

① 在不至引起误解的场合,可将“总”字省略。此处“传热过程”这一术语有着明确的含义,它与一般性论述中把热量传递过程统称为传热过程不同。

② 当流体与壁面间只有对流传热时,表面传热系数 h 退化成对流传热系数 h_c 。

数为:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}} \tag{1-13}$$

最后想作一点说明,在稳态传热过程中,通过各环节的热流量是相同的,从原则上讲根据每一环节的传热方式均可计算传递的热流量,但工程实际中,壁面温度 t_{w1} 、 t_{w2} 往往是未知的,准确测量又非常困难,直接采用傅里叶公式(式(b))或牛顿冷却公式(式(a)、(c))计算有诸多不便;而传热方程式中不含壁温,只有冷、热两种流体的温度,工程上流体温度往往是已知的或可测量的,直接用传热方程式(式(1-12))计算传热热流量就比较方便,因此,本节推导介绍了专门的传热方程式。

例 1-4 某船润滑油冷却器的润滑油进出口平均温度为 50°C ,冷却海水的进出口平均温度为 30°C ,冷却器的传热面积为 30m^2 ,若已知传热系数 K 为 $150\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,求热流量 Φ 。

解:按式(1-12b)可得润滑油冷却器的传热热流量为:

$$\begin{aligned}\Phi &= KA(t_{f1} - t_{f2}) \\ &= 150 \times 30 \times (50 - 30) \\ &= 9 \times 10^4 \text{W}\end{aligned}$$

第四节 热 阻

一、概 念

许多物理现象都有类似之处,研究时可互相借鉴。热量传递与电量传递的类比如图 1-3 和表 1-1 所示,其共同规律为:

$$\text{过程中的转移量} = \frac{\text{过程的动力}}{\text{过程的阻力}}$$

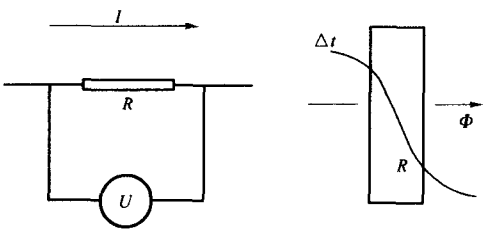


图 1-3 热传递与导电的类比

热传递与导电的类比 表 1-1

项 目	导 电	热 传 递
过程的动力	电位差 U	温差 Δt
过程的阻力	电阻 R	热阻 R
过程的转移量	电流 I	热流量 Φ

对于电系统有: $I = \frac{U}{R}$, 对于热系统则应有:

$$\Phi = \frac{\Delta t}{R} \text{ 或 } q = \frac{\Delta t}{r} \tag{1-14}$$

式中, R 称为热阻(按总面积计), K/W ; r 称为面积热阻(按单位面积计), $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$, 两者之间的关系为:

$$r = R \cdot A \tag{1-15}$$

可见,热阻是热量传递过程中的阻力,传热过程不同,热阻也就不同。对照式(1-14),由式

(1-2)、(1-4)、(1-8)、(1-10)和(1-12)可分别得到导热热阻、对流传热热阻、辐射传热热阻、表面传热热阻和总传热过程热阻,如表 1-2 所示。

各种热量传递过程的热阻和温差			表 1-2
项目 过程	计算公式	热阻, $R: \text{K/W}; r: \text{m}^2 \cdot \text{K/W}$	温差 Δt
平壁导热	$\Phi = \frac{\lambda A}{\delta} \Delta t$	$R_{\lambda} = \frac{\delta}{\lambda A}$	$t_{w1} - t_{w2}$
	$q = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t$	$r_{\lambda} = \frac{\delta}{\lambda}$	
对流传热	$\Phi = h_c A \Delta t$	$R_{h_c} = \frac{1}{h_c A}$	$t_w - t_f$
	$q = h_c \Delta t$	$r_{h_c} = \frac{1}{h_c}$	
辐射传热	$\Phi = h_r A \Delta t$	$R_{h_r} = \frac{1}{h_r A}$	$t_w - t_f$
	$q = h_r \Delta t$	$r_{h_r} = \frac{1}{h_r}$	
表面传热	$\Phi = hA \Delta t$	$R_h = \frac{1}{hA}$	$t_w - t_f$
	$q = h \Delta t$	$r_h = \frac{1}{h}$	
平壁总传热	$\Phi = KA \Delta t$	$R_K = \frac{1}{KA} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{\delta}{\lambda A} + \frac{1}{h_2 A}$	$t_{f1} - t_{f2}$
	$q = K \Delta t$	$r_K = \frac{1}{K} = \frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2}$	

二、热阻分析方法

1. 稳态时,可仿效电路,将热传递现象表示为“热路”(又称“热阻网络”),然后按照并串联电路电阻的计算公式求出热传递过程的总热阻,再代入式(1-14),即可得出热流量或热流密度。因此说,热阻概念的建立对热传递过程的分析计算带来很大的便利。

例如,平壁一维稳态传热包括串联着的三个环节,其“热路”如图 1-4 所示。

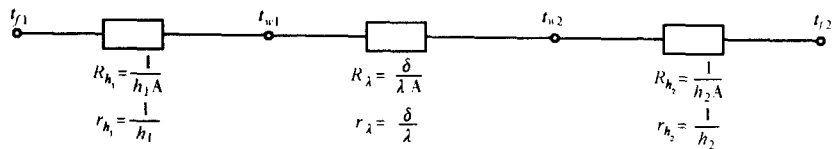


图 1-4 平壁传热的热阻网络

平壁传热总热阻即为三个串联环节分热阻叠加:

$$R_K = R_{h_1} + R_{\lambda} + R_{h_2} = \frac{1}{h_1 A} + \frac{\delta}{\lambda A} + \frac{1}{h_2 A} \tag{1-16a}$$

$$r_K = r_{h_1} + r_{\lambda} + r_{h_2} = \frac{1}{h_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_2} \tag{1-16b}$$

再将总热阻代入式(1-14)就可得到热流量或热流密度:

$$\Phi = \frac{\Delta t}{R_K} = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{\delta}{\lambda A} + \frac{1}{h_2 A}} \tag{1-17a}$$