

21 世纪能源与动力系列教材
Textbook Series of Energy & Power for 21st Century

传热学

Heat Transfer

◇ 主 编 / 张 奕
◇ 副主编 / 郭恩震



东南大学 出版社

21 世纪能源与动力系列教材

传 热 学

主 编 张 奕

副主编 郭恩震

主 审 张 辉

东南大学出版社

内 容 提 要

本书参照《传热学课程教学基本要求》编写而成。全书共 9 章,包括导热、对流传热、辐射传热、传热过程与换热器等内容,每一章都配有丰富的例题、习题和思考题,以满足教学需要。书末附有详细的参考文献和资料,可供解决传热问题和进一步研究选用。

本书可作为高等学校能源动力类、化工制药类、航空航天类、环境与安全类、交通运输类、武器类及土建类等大类专业的教材或教学参考书,亦可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传热学/张奕主编. —南京:东南大学出版社,2004. 2

(21 世纪能源与动力系列教材)

ISBN 7-81089-532-X

I. 传... II. 张... III. 传热学-高等学校-教材

IV. TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 007198 号

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

出版人:宋增民

江苏省新华书店经销 南京工大印务有限公司印刷

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:19.5 字数:496 千字

2004 年 2 月第 1 版 2004 年 2 月第 1 次印刷

印数:1~4000 册 定价:30.00 元

(凡因印装质量问题,可直接向发行科调换。电话:025-83795801)

21 世纪能源与动力系列教材编委会

主任 侯小刚

编委 侯小刚 赵孝保 丁轲轲

徐生荣 张 奕 周 欣

郭恩震 卢 平 余跃进

辛洪祥

序

热现象是自然界中最普遍的物理现象。工程热力学、传热学是以热现象为研究对象的学科,主要研究热能与机械能或其他形式能量之间的转换与传递规律,研究热能的合理、有效利用技术及方法。热能的转换、传输、控制、优化与利用的各环节都离不开对流体流动规律的认识与利用,离不开燃烧理论与技术的研究与运用。因此,工程流体力学、工程热力学、传热学、燃烧理论与技术等几门课程成为能源与动力类专业的主要技术基础课。

古人云:巧心、劳力、成器物者曰工。作为工程技术学科的教材,要体现探求规律,认识规律,运用规律,物化成果的要求。针对应用型工程技术专业的实际需要,南京师范大学等院校开展了对能源与动力学科系列课程的建设与改革,在此基础上组织编写了工程流体力学、工程热力学、传热学、燃烧理论与技术等课程教材,作为能源动力类系列教材推出。几本教材既相互联系,又各具特色。随着教育、教学改革的深入,将陆续出版能源动力类系列教材。

工程专业是关于科学知识的开发应用和关于技术的开发应用的,在物质、经济、人力、政治、法律和文化限制内满足社会需要的,一种有创造力的专业。因此,对于工程应用专业人才,需要他们具备宽广的专业面、全面的工程素质。上述几本教材,还可以作为大多数工程技术专业的公共技术基础课程用书,在培养全面发展的工程技术人才方面发挥作用。

侯小刚

2003年10月于南京师范大学

前 言

为适应新世纪高等教育不断深化改革的形势,满足培养高素质 21 世纪人才的要求,以原国家教委 1996 年颁布的《传热学课程教学基本要求》为基础,结合多年来的教学经验和研究成果,完成了本书的编写工作。

结合传热学课程内容及教学过程特点,编者在本书的编写过程中充分注意到以下一些问题的解决,力求使本教材呈现出一些自己的特点。

(1) 在教材体系及结构编排上,结合传热学自身内容的特点以及新世纪人才的特征,在教材内容的总体结构上按综述→分述→综述的结构安排教学内容。先由第 1 章综述传热学中的最基本知识,使读者能够比较容易地对传热学概貌有所了解。再由第 2~8 章对传热学中的各个重点问题进行详细分述,通过这 7 章内容的学习,读者应该能够对和热传导、对流传热及辐射传热有关的常见传热学问题有了详细的了解,最后通过第 9 章的再一次综述,讨论了将传热学知识应用于解决复杂的传热问题和工程问题的方法。在三种基本热量传递方式内容的叙述上,采用综述→分述的体系编排方式,其中热传导的综述部分没有单独成章,而是放于第 2 章的前面两节集中论述。在这一部分的综述中集中讨论和所要研究的传热现象有关的基本概念和基本方程,再由分述部分介绍进一步细分的各种传热现象的特点和求解方法。编者认为这样的教学内容体系结构编排方式符合传热学教学的自身规律,经过教学实践的证明,这种编排方式对提高教学效率、方便读者自主学习具有很好的效果。

(2) 在教学内容的选择上,既注重传热学经典理论的详细介绍,又吸收了传热学研究的一些最新成果,以使教材内容及时反映传热学研究的重要新进展。比如在热传导部分对通过组合平壁导热问题的阐述是编者近年的研究成果;从对流传热的新近研究成果中选用的特征数方程等。这些内容的引入既可以增加读者的学习兴趣,开拓读者分析和解决传热学问题的视野,同时也能让他们意识到传热学的内容是一个动态变化的研究对象。

(3) 强调基本概念和基本数学方法对解决传热学问题重要性的观念的培养。本书在绪论中就讲述了能量平衡原理在传热学中的形式,并且这一原理的应用贯穿于本书内容的始终。对传热学中的重要基本概念着重阐明它们所对应的物理意义,使得这些概念理解起来更直观明了。每章内容后面的思考题为读者提供了检阅自己对这些基本概念是否已有了比较深刻理解的机会。在某

些章节的内容中详细介绍了用高等数学中基本的微积分数学方法求解传热学问题的过程,通过对这些问题的仔细研究,读者应能够了解并初步掌握用基本的数学方法解决传热问题的过程。对于一些有典型意义的用数学方法求解的,但数学求解涉及的数学知识较为复杂的,或过程比较繁琐的传热学问题,将它们列于本书的附录中,以方便对这些问题的求解有兴趣的读者查阅。

(4) 书中的例题和习题是读者进一步巩固所学传热学知识,拓展解题思路的重要工具。本书在例题和习题的选取上力求数量少而题目所能反映的问题比较全面,尽量避免使用重复同类型的例题和习题。例题的解题过程一般包括问题分析、解题和讨论三个部分。通过这样的过程,使读者通过对一个例题的学习能起到举一反三的作用。习题部分不选用需要使用太多数学方法或问题的灵活性太大的题目。如果读者对这方面的问题感兴趣,可查阅有关参考教材。

本书中各物理量的名称、单位和符号按《中华人民共和国国家标准 量和单位》中的规定使用。

本书由南京师范大学动力学院老师编写,第1、4、5、6、7、8、9章由张奕编写,第2、3章由郭恩震编写。全书由东南大学动力工程系张辉审稿。

本书的出版受到南京师范大学动力学院侯小刚院长的关心和支持,同时也得到东南大学张小松和周强泰教授的帮助,南京师范大学动力学院的范云琼、刘英华、王亚青、金星、夏美红、盛莺莺、孙亮亮、王宁等同学对书中的例题进行了计算,在此一并表示感谢。

由于成书时间仓促,编者水平有限,书中的不足和错误在所难免,敬请广大读者和各位同行指正。

编者

2004年1月

目 录

1 绪 论	(1)
1.1 传热基本概念	(1)
1.2 传热的三种基本方式	(1)
1.2.1 热传导(导热)	(2)
1.2.2 热对流	(2)
1.2.3 热辐射	(3)
1.3 传热过程和热路图	(6)
1.4 传热学的研究方法	(9)
1.4.1 传热问题的研究方法	(9)
1.4.2 能量平衡方程	(10)
1.4.3 传热问题的解题步骤	(11)
1.5 传热学发展简史	(13)
本章小结	(14)
思考题	(15)
习 题	(16)
2 导热基本定律及稳态导热	(18)
2.1 导热的基本概念和定律	(18)
2.1.1 温度场和温度梯度	(18)
2.1.2 导热基本定律	(20)
2.1.3 热导率	(20)
2.2 导热微分方程和定解条件	(22)
2.2.1 直角坐标系中的导热微分方程式	(22)
2.2.2 导热微分方程的定解条件	(24)
2.3 一维稳态导热	(25)
2.3.1 平壁稳态导热	(25)
2.3.2 长圆筒稳态导热	(27)
2.3.3 球壳稳态导热	(29)
2.3.4 复合平壁稳态导热	(29)
2.3.5 其他	(31)
2.4 肋片稳态导热	(36)
2.4.1 等截面肋片的稳态导热	(37)
2.4.2 变截面肋片的稳态导热	(39)

2.4.3 肋片调节壁面温度的原理	(41)
2.4.4 使用肋片注意事项	(43)
2.5 二维、三维稳态导热	(47)
2.5.1 有限差分法	(47)
2.5.2 形状因子法	(50)
本章小结	(55)
思考题	(55)
习 题	(56)
3 非稳态导热	(62)
3.1 概述	(62)
3.2 集总参数分析法	(64)
3.3 一维非稳态导热的分析解和图解法	(68)
3.3.1 无限大平板的分析解和诺谟图	(68)
3.3.2 无限长圆柱体、球的诺谟图和热量计算图	(73)
3.3.3 特殊多维导热体非稳态导热	(76)
3.4 匀速加热的最大温差	(81)
本章小结	(83)
思考题	(83)
习 题	(83)
4 对流传热理论基础	(86)
4.1 概述	(86)
4.1.1 对流传热量公式	(86)
4.1.2 影响对流传热的主要因素	(86)
4.1.3 对流传热研究方法	(88)
4.2 边界层概念	(89)
4.2.1 速度边界层	(89)
4.2.2 温度边界层	(90)
4.2.3 Pr 数	(91)
4.3 对流传热的数学描述	(91)
4.3.1 局部对流传热系数和平均对流传热系数	(92)
4.3.2 对流传热微分方程	(92)
4.3.3 连续性方程	(93)
4.3.4 动量微分方程	(93)
4.3.5 能量微分方程	(93)
4.3.6 对流传热的数学描述	(94)
4.4 对流传热的实验研究	(95)
4.4.1 相似原理简介	(95)
4.4.2 特征数	(96)

4.5 特征数实验关联式的确定	(97)
4.5.1 实验求解特征数关联式步骤	(97)
4.5.2 特征数关联式的常见形式	(97)
4.5.3 作图法确定特征数关联式举例	(98)
本章小结	(103)
思考题	(103)
习 题	(104)
5 无相变对流传热	(107)
5.1 管内强迫对流传热	(107)
5.1.1 流动和传热特点	(107)
5.1.2 牛顿冷却公式	(108)
5.1.3 $Re_f > 10^4$ 时的特征数关联式	(109)
5.1.4 $Re_f > 10^4$ 时其他的特征数关联式	(112)
5.1.5 $Re_f < 2300$ 时的特征数关联式	(113)
5.1.6 $Re_f = 2300 \sim 10^4$ 时的特征数关联式	(113)
5.1.7 非圆管内对流传热的计算	(114)
5.2 纵掠平板对流传热	(122)
5.2.1 流动和传热特点	(122)
5.2.2 特征数关联式	(123)
5.3 横掠单管对流传热	(128)
5.3.1 流动和传热特点	(128)
5.3.2 特征数关联式	(129)
5.3.3 冲击角修正	(131)
5.4 横掠管束对流传热	(134)
5.4.1 流动和传热特点	(134)
5.4.2 几何参数和传热参数	(135)
5.4.3 特征数关联式	(136)
5.5 自然对流传热	(139)
5.5.1 流动和传热特点	(139)
5.5.2 大空间自然对流特征数关联式	(140)
5.5.3 有限空间自然对流传热简介	(143)
5.5.4 混合对流传热简介	(144)
本章小结	(147)
思考题	(147)
习 题	(148)
6 相变对流传热	(151)
6.1 凝结传热	(151)
6.1.1 概述	(151)

6.1.2 竖壁层流膜状凝结对流传热系数的理论解	(152)
6.1.3 竖壁紊流膜状凝结对流传热系数	(154)
6.1.4 水平管内膜状凝结对流传热系数	(155)
6.1.5 影响凝结传热的主要因素	(155)
6.2 沸腾传热	(159)
6.2.1 大容器饱和沸腾曲线	(159)
6.2.2 汽化核心对沸腾曲线的解释	(162)
6.2.3 沸腾传热的计算	(162)
6.2.4 管内强迫对流沸腾简介	(165)
6.2.5 影响沸腾传热的主要因素	(166)
本章小结	(169)
思考题	(170)
习 题	(171)
7 热辐射基础理论	(173)
7.1 热辐射基本概念	(173)
7.1.1 热辐射特点	(173)
7.1.2 吸收比、反射比和透射比	(174)
7.1.3 几个重要的辐射参数	(175)
7.2 黑体辐射基本定律	(178)
7.2.1 黑体及人工黑体	(178)
7.2.2 普朗克定律	(179)
7.2.3 斯蒂芬-波尔兹曼定律	(180)
7.2.4 兰贝特余弦定律	(180)
7.3 实际表面发射辐射的特性	(183)
7.3.1 实际物体的光谱辐射力曲线	(184)
7.3.2 实际物体辐射的方向特性	(184)
7.4 实际表面吸收辐射的特性 基尔霍夫定律	(187)
7.4.1 光谱吸收比	(187)
7.4.2 基尔霍夫定律	(188)
7.4.3 灰体	(188)
本章小结	(191)
思考题	(191)
习 题	(193)
8 辐射传热	(195)
8.1 角系数	(195)
8.1.1 角系数的定义	(195)
8.1.2 角系数的性质	(199)
8.1.3 代数法求解两种特殊情况的角度系数	(200)

8.2 表面间的辐射传热	(203)
8.2.1 两黑表面间的辐射传热	(203)
8.2.2 表面热阻	(203)
8.2.3 空间热阻	(204)
8.2.4 组成封闭空腔的灰表面间的辐射传热	(204)
8.3 辐射传热的强化和削弱	(211)
8.3.1 辐射传热的强化	(211)
8.3.2 辐射传热的削弱	(211)
8.4 气体辐射及其与包壁间的辐射传热	(216)
8.4.1 气体辐射的特点	(216)
8.4.2 气体的总发射率 ϵ_g	(219)
8.4.3 气体的总吸收比 α_g	(221)
8.4.4 气体与包壁间的辐射传热	(222)
本章小结	(224)
思考题	(224)
习 题	(225)
9 传热过程和换热器的热计算	(230)
9.1 传热过程的分析和计算	(230)
9.1.1 通过平壁的传热	(230)
9.1.2 通过圆筒壁的传热	(231)
9.1.3 通过肋壁的传热	(232)
9.1.4 固体壁面有污垢时的传热	(233)
9.2 换热器的主要型式	(238)
9.2.1 按工作原理的分类	(238)
9.2.2 间壁式换热器的主要型式	(239)
9.2.3 间壁式换热器中的流动形式	(242)
9.3 换热器的平均传热温差	(242)
9.3.1 顺流和逆流时两流体温度沿流程的变化	(243)
9.3.2 顺流和逆流换热器的对数平均传热温差	(244)
9.3.3 几种复杂流换热器的平均传热温差	(246)
9.4 换热器的热计算: Δt_m 法	(249)
9.5 换热器的热计算: ϵ -NTU 法	(255)
9.5.1 ϵ 、NTU 定义及其关系	(255)
9.5.2 用 ϵ -NTU 法进行换热器的热计算	(258)
本章小结	(263)
思考题	(263)
习 题	(265)
附录	(268)
附录 1 金属材料的密度、比热容和热导率	(268)

附录 2 保温、建筑及其他材料的密度和热导率	(269)
附录 3 几种保温、耐火材料的热导率与温度的关系	(270)
附录 4 干空气的热物理性质($p=1.013\,25\times 10^5\text{ Pa}$)	(271)
附录 5 大气压力($p=1.013\,25\times 10^5\text{ Pa}$)下烟气的热物理性质	(272)
附录 6 几种纯净气体的物性参数	(273)
附录 7 饱和水的热物理性质	(274)
附录 8 干饱和水蒸气的热物理性质	(275)
附录 9 大气压力($p=1.013\,25\times 10^5\text{ Pa}$)下过热水蒸气的热物理性质	(276)
附录 10 几种饱和液体的热物理性质	(277)
附录 11 液态金属的热物理性质	(280)
附录 12 常用材料的表面发射率	(281)
附录 13 常用换热器传热系数的大致范围	(283)
附录 14 大平壁在对称的第三类边界条件下的一维非稳态导热的分析解法	(284)
附录 15 流体外掠平板对流传热边界层积分方程求解过程	(286)
附录 16 竖壁层流膜状凝结对流传热系数的分析解	(289)
附录 17 边界层对流传热微分方程组的无量纲化	(291)
附录 18 常用特征数的定义式及其物理意义	(293)
参考文献	(295)

1 绪 论

1.1 传热基本概念

热量在温度差作用下从一个物体传递至另外一个物体,或者在同一物体的各个部分之间进行传递的过程称为传热。

传热学就是研究热量传递规律的学科。

只要有温度差,就会有传热现象。自然界和工业、农业生产及科学研究中普遍存在温度差,因此传热是自然界和生产技术中最普遍的现象之一。

正因为如此,传热学的理论和技术在生产、科学研究等领域得到广泛的应用。传热学的普适性不仅表现为在能源动力、冶金、化工、交通、建筑建材、机械、食品、轻工、纺织、医药等传统工业部门中,传热学理论的应用解决了决定这些部门生产过程的热工艺技术,而且在航空航天、微电子技术、激光加工工艺、新能源利用、生物医疗、环境污染、军事高科技等高新技术领域中,对一些关键技术的解决起了重要的甚至是决定性的作用。因此,作为一门传统学科,传热学不仅至今仍然在发挥着巨大的作用,而且随着其应用领域的不断拓展,也促进了本学科理论的发展,如计算传热理论、微尺度传热理论、微重力传热理论、非傅里叶导热理论等。

传热过程可以分为稳态传热过程和非稳态传热过程两大类。物体各点温度不会因传热而随时间变化的传热过程称为稳态传热过程,简称稳态传热;反之,则称为非稳态传热过程,简称非稳态传热。本书不作说明的传热可视为稳态传热。

传热学所研究的传热问题主要有两类:一类以求解研究对象的传热量为基本目标;另一类以求解研究对象内各点温度的变化规律为基本目标。很多实际的传热问题往往要同时求解这两类问题。

由于传热学要研究传热量的变化规律,因此必须对发生这一传热量所经历的时间作出规定。不作特别说明,传热学中的传热量是指在单位时间内的传热量。因此,传热量又可称为热流速率,其单位为瓦(W),符号为 Φ 。传热学中传热量一般取正值。

1.2 传热的三种基本方式

热量传递在作为最常见的物理现象之一的同时,也是一种非常复杂的物理现象。研究复杂问题的有效手段是将复杂问题按一定的原则分类,使其分解成多个简单的问题,在获得求解这些简单问题的方法后,原复杂问题的求解就变得容易了。

将传热进行分类的一个基本原则是按热量传递的不同机理,即热量以何种方式或何种运动形式进行传递。经过大量归纳总结,人们发现按传热的不同机理,可将传热划分成三种

基本方式:热传导、热对流和热辐射。一个复杂的传热问题可以采用这三种基本传热方式两两组合的形式传递热量,或者以三者同时都有的形式传递热量。

1.2.1 热传导(导热)

热传导简称导热。两个相互接触且温度不同的物体,或同一物体的各不同温度部分间,在不发生相对宏观位移的情况下所进行的热量传递过程称为导热。

从微观角度看,导热是依靠组成物质的微粒的热运动传递热量的。温度较高时,微粒具有较高的能量,这些微粒和低温物体部分较低能量的微粒相互作用(碰撞、扩散等),就形成了导热。

密实固体内部和静止流体中的热量传递都是纯导热在起作用。导热部分参与了在运动流体中的热量传递。

设有如图 1.1 所示的一块大平壁,左右两侧分别保持均匀恒定温度 t_{w1} 和 t_{w2} ,且 $t_{w1} > t_{w2}$,平壁厚度为 δ ,侧面积为 A ,则单位时间内从左向右的导热热量 Φ_λ 和平壁两侧温差及侧面积成正比,和平壁厚度 δ 成反比,还和平壁材料性质有关,用公式可表示为

$$\Phi_\lambda = \lambda A \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} = \lambda A \frac{\Delta t}{\delta} \quad (1.1)$$

式中: λ ——热导率或导热系数,反映材料本身导热能力大小的物性参数,数值可通过查取相应材料的物性参数表获得, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

Δt ——温差或温压,表示平壁中热量流动驱动力的大小, $^{\circ}\text{C}$ (或 K)。

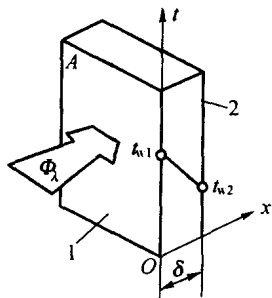


图 1.1 通过大平壁的导热

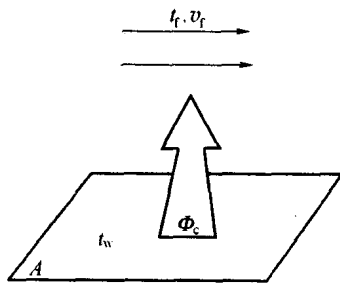


图 1.2 流体和表面的对流传热

1.2.2 热对流

热对流是由于液体、气体中温度不同的各部分之间发生宏观相对运动所引起的热量传递过程。热对流是在流体微团水平上进行的热量传递。在热对流传热量的同时,流体中也存在导热。

如果流体的对流运动是由于外力作用(如泵、风机等)而引起的,称为强迫(受迫)对流。如果对流运动是由于流体中的温度差所引起的密度不均匀而造成的,称为自然(自由)对流。

工程上经常遇到的是运动流体和温度不同的固体表面之间的热量传递过程,这种热量传递过程称为表面对流传热,简称对流传热,如图 1.2 所示。显然,对流传热是热对流和导热同时参与的热量传递过程。

当流体温度为 t_f , 固体表面温度为 t_w , 和流体的接触面积为 A 时, 则流体和固体表面间的对流传热量 Φ_c 与流体和表面间温差成正比, 和固体、流体间的传热面积成正比, 还和固体、流体间的对流传热状况有关, 用公式可表示为

$$\Phi_c = h_c A \Delta t \quad (1.2)$$

式(1.2)称为牛顿冷却公式。

式中: h_c ——对流传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。表示流体和固体表面间对流传热的强烈程度。流体和表面间的不同对流传热情况, 对流传热系数差别很大, 常见对流传热情况对流传热系数的粗略范围列于表 1.1。求解对流传热问题的关键是寻找计算各种对流传热情况对流传热系数的计算公式, 这是本书对流传热部分的主要内容。

Δt ——温差或温压, $^{\circ}C$ (或 K), 表示流体和表面间对流传热热流驱动力的大小。当 $t_f > t_w$ 时, $\Delta t = t_f - t_w$; 当 $t_f < t_w$ 时, $\Delta t = t_w - t_f$ 。即 Δt 总取正值, 热量流动的方向根据流体、表面温度的相对大小判断。

表 1.1 常见对流传热情况 h_c 的大致范围

对流传热种类	$h_c/[W/(m^2 \cdot K)]$
空气自然对流	1 ~ 10
水自然对流	200 ~ 1 000
气体强迫对流	20 ~ 100
高压水蒸气强迫对流	500 ~ 3 500
水强迫对流	1 000 ~ 15 000
饱和水沸腾传热	2 500 ~ 25 000
饱和水蒸气凝结传热	5 000 ~ 15 000

1.2.3 热辐射

凡温度高于绝对零度的物体都会向外界以电磁波的形式发射能量, 这种过程称为辐射。物体发射的电磁波所具有的能量称为辐射能。物体消耗热力学能, 向外发射辐射能, 其温度有下降的趋势。

一般物体发射辐射能的大小和物体表面温度有关, 温度越高, 发射辐射能就越多, 但并不是成正比例关系。物体辐射能力的大小还受到表面状况复杂的影响, 温度相同而表面状况(粗糙度、金属的氧化情况等)不同的物体, 其辐射能力可能存在很大的差别。

为了消除表面性质对辐射的影响, 传热学中提出了黑体模型的概念。黑体是一个理想辐射体, 在实际物体表面和黑体表面温度相等的情况下, 黑体发射的辐射能大于所有实际物体的辐射能。

当黑体表面温度为 T , 发射辐射面积为 A 时, 黑体发射的辐射能 Φ_r 为

$$\Phi_r = \sigma A T^4 \quad (1.3)$$

式中: σ ——斯蒂芬—玻尔兹曼常数, 或黑体辐射常数, $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$;

T ——黑体表面绝对温度, K 。

式(1.3)称为斯蒂芬—玻尔兹曼定律,表明黑体发射的辐射能大小和辐射面积成正比,和表面绝对温度的四次方成正比,因此也称为黑体辐射四次方定律。

某一实际物体发射的辐射能和同温度黑体所发射的辐射能的比值,称为该物体在该温度时的发射率,习惯上又称为黑度,表示实际物体辐射特性接近黑体的程度。对于常见材料的发射率可通过查附录表确定其发射率数值。因此,实际物体所发射的辐射能 Φ_r 为

$$\Phi_r = \varepsilon \sigma A T^4 \quad (1.4)$$

式中: ε ——物体表面的发射率。

任何物体,只要温度高于绝对零度,就能不断向外发射出辐射能。辐射能可以在真空中以光速进行传递而无需传递媒介的参与,这是导热和热对流所无法做到的。物体在消耗热力学能发射辐射的同时,也在不断地吸收外界投射到其表面的辐射能,这一辐射能又可转换成物体的热力学能,使其温度有上升的趋势。因此,在物体间通过热辐射传递热量时,伴随有能量形式的转换,这是导热和热对流所没有的另一个热量传递特点。

物体表面不断向外发射辐射能,被周围物体吸收。同时,该物体吸收来自周围物体所发射的辐射能。这样,当该物体和周围物体间存在温度差时,物体发射出去的辐射能和所吸收到的辐射能在数量上不等,就形成了物体间通过热辐射传递热量的过程,这一过程称为表面辐射传热,简称辐射传热。

当物体表面和流体接触进行对流传热,又和周围环境有辐射传热时,其表面总传热量 Φ 可表示为

$$\Phi = \Phi_c + \Phi_r \quad (1.5)$$

式中: Φ_r ——物体表面和周围物体间的辐射传热量。

工程上最常用的温度是物体表面温度 t_w 及与其进行对流传热的流体温度 t_f ,将 Φ_r 写成牛顿冷却公式的形式为

$$\Phi_r = h_r A |t_w - t_f| \quad (1.6)$$

式中: h_r ——由辐射传热量 Φ_r 所定义的系数,称为辐射传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。如果已知 h_r ,则按式(1.6)计算的传热量为辐射传热量。

如果将表面总传热量 Φ 也表示成牛顿冷却公式,则

$$\Phi = h A |t_w - t_f| \quad (1.7)$$

式中: h ——由表面总传热量 Φ 所定义的系数,称为表面传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。如果已知 h ,则按式(1.7)计算所得的传热量为表面的总传热量。

显然,一个物体表面的表面传热系数 h ,对流传热系数 h_c 和辐射传热系数 h_r 符合下式:

$$h = h_c + h_r \quad (1.8)$$

【例 1.1】 为了测量某种材料的热导率,用该材料制成厚 5 mm、直径 25 mm 的圆形平板试件。第一次试验时测得通过试件的导热量为 0.22 W,试件两侧温度分别为 20 °C 和 50 °C。第二次试验时测得通过试件的导热量为 0.32 W,试件两侧温度分别为 200 °C 和 220 °C。求两次试验中材料的热导率分别是多少?

解 第一次试验材料热导率为

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{\Phi \delta}{A \Delta t} = \frac{4 \Phi \delta}{\pi d^2 (t_{w1} - t_{w2})} \\ &= \frac{4 \times 0.22 \text{ W} \times 0.005 \text{ m}}{\pi \times 0.025^2 \text{ m}^2 \times (50 - 20) \text{ K}} \end{aligned}$$