



高等院校石油天然气类规划教材

传热与传质

(富媒体)

主 编 ◎ 申 洁

副主编 ◎ 叶 峰 李永杰

肖 东 贾 敏

石油工业出版社
Petroleum Industry Press

高等院校石油天然气类规划教材

传热与传质

(富媒体)

主 编 ◎ 申 洁

副主编 ◎ 叶 峰 李永杰

肖 东 贾 敏

石油工业出版社

内 容 提 要

本书以石油工程学科为背景,介绍了传热学与传质学的基本概念和基本理论。传热学包括第一章到第七章的内容,主要介绍导热、对流换热、热辐射以及换热器的基本理论及相关计算;传质学包括第八章到第十三章的内容,主要介绍分子扩散、对流传质及三传类比的基本理论及相关计算。

本书可作为高等学校石油工程、油气储运工程、化工制药工程、环境与安全工程等专业的教材或教学参考书,也可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传热与传质:富媒体/申洁主编. —北京:石油工业出版社,2018.8
高等院校石油天然气类规划教材

ISBN 978 - 7 - 5183 - 2722 - 1

I. ①传… II. ①申… III. ①传热传质学—高等学校—教材 IV.
①TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 137033 号

出版发行:石油工业出版社

(北京市朝阳区安外安华里 2 区 1 号楼 100011)

网 址:www. petropub. com

编辑部:(010)64256990 图书营销中心:(010)64523633

经 销:全国新华书店

排 版:北京市密东文创科技有限公司

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷

787 毫米×1092 毫米 开本:1/16 印张:13.25

字数:339 千字

定价:32.00 元

(如发现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

前言

Preface

传热学与传质学是石油与天然气工程、油气储运工程、化学工程与技术、建筑环境与能源应用、安全工程等专业本科生和研究生开展科学问题研究的专业基础课,是建立工程中传热与传质现象的数学模型和计算的重要依据,是相关专业学生学习基础课之后、将要学习专业课之前的一门非常重要的起着桥梁作用的专业基础课程。

目前,热工系列教材主要有三类:第一类是热工理论基础教材,包含工程热力学和传热学这两门课程;第二类是单独的工程热力学和传热学教材,主要适用于能源与动力工程或建筑环境与设备工程等专业,这类专业对热工系列课程基础知识要求高,一般将此类课程开设为独立的课程,学时也较多;第三类是独立的传质学教材。而涉及传热学和传质学这两门课程的综合性的教材极少,部分高校采用的是讲义授课,没有将传热学和传质学的基本理论、定理、计算以及应用拓展系统地联系起来。因此,需要一本完整系统的传热学与传质学教材,供相关所需专业学习和使用。为适应高等教育不断深化改革,配合石油工程教育发展形势,构建合理的学科体系,编者结合石油工程专业培养目标和多年来的教学经验以及研究成果,联合西南石油大学石油与天然气工程学院的其他教师完成了本书的编写工作。

本书以石油工程和化学工程领域内的传热和传质问题为应用背景,着重分析了传热与传质的基本概念、基本定律以及相应的分析计算的基本方法。全书分为两大部分,第一部分为第一章至第七章的传热学内容,第二部分为第八章至第十三章的传质学内容。传热学部分深入讨论了导热、对流换热、热辐射及传热过程与换热器的基本理论及计算;传质学部分着重介绍了分子扩散、对流传质及三传类比法的基本理论及计算。教材内容的总体结构表面上是先后分别撰写了传热学和传质学,但其实传热学和传质学的内容编排前后呼应,尤其是在编写传质学部分时,均和传热学的基本概念和公式做了对比分析,突出了两类现象的相似性,加强了传热学与传质学的相互联系,直观明了,物理意义清晰,帮助读者更好地掌握和理清传热与传质的内在联系和规律。

本书由西南石油大学申洁担任主编,西南石油大学叶峰、李永杰、肖东和贾敏担任副主编,西南石油大学陈小榆、张涛、刘恩斌、魏纳、朱红钧、张勇参与编写。具体分工为:第一、五、十二章由申洁、陈小榆编写,第二、三、八章由叶峰、张涛编写,

第四、十一、十三章由李永杰、刘恩斌、张勇编写,第七、十章由肖东、魏纳编写,第六、九章由贾敏、朱红钧编写。本书编写大纲由申洁拟订并经全体编写人员研讨完成,全书由申洁完成统稿工作。

本教材在编写过程中,也参考了杨世铭、陶文铨主编的《传热学》,张奕主编的《传热学》,张学学主编的《热工基础》,章熙民、任泽霈、梅飞鸣主编的《传热学》,李兆敏、黄善波主编的《石油工程传热学》,美国 J. P. 霍尔曼(J. P. Holman)主编的《传热学》,美国弗兰克·P. 英克鲁佩勒、大卫·P. 德维特、狄奥多尔·L. 伯格曼、艾德丽安·S. 拉维恩主编的《传热和传质基本原理》,李汝辉主编的《传质学基础》,夏雅君主编的《工程传质学》等教材,另外,西南石油大学石油与天然气工程学院的陈小凡教授、张勇教授和施雷霆教授在本书编写过程中给予了中肯的建议和指导,研究生刘志凯和李浩东为本书的文本和图形编辑也做了大量工作,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

申洁

2018.1

富媒体资源目录

序 号	名 称	页 码
1	动画 1-1	1
2	动画 1-2	3
3	彩图 1	13
4	彩图 2	27
5	动画 3-1	27
6	动画 3-2	28
7	彩图 3	33
8	动画 3-3	35
9	动画 3-4	36
10	动画 4-1	44
11	动画 4-2	47
12	动画 4-3	47
13	动画 4-4	51
14	动画 5-1	70
15	动画 6-1	77
16	动画 6-2	79
17	动画 6-3	83
18	动画 7-1	91
19	动画 7-2	91
20	动画 7-3	92
21	动画 7-4	92
22	动画 7-5	94
23	动画 8-1	113
24	动画 8-2	113
25	动画 8-3	113
26	彩图 4	124
27	动画 9-1	138
28	彩图 5	159
29	动画 11-1	160
30	动画 11-2	160

本书富媒体资源均由主编申洁提供,如教学需要,可向作者索取,联系邮箱为 200631010015@swpu.edu.cn。

目 录

第一章 传热学概述	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	3
第三节 复合换热和传热过程	7
思考题	11
习题	11
第二章 导热理论基础	13
第一节 基本概念	13
第二节 导热基本定律和导热系数	15
第三节 导热微分方程及其定解条件	18
思考题	23
习题	23
第三章 导热的分析计算	25
第一节 平壁的一维稳态导热	25
第二节 圆筒壁的一维稳态导热	29
第三节 接触热阻	33
第四节 非稳态导热的分析计算	35
思考题	38
习题	39
第四章 对流换热原理	41
第一节 速度边界层和热边界层	41
第二节 影响对流换热的因素	45
第三节 量纲分析在对流换热中的应用	47
思考题	52
第五章 对流换热特征数关联式	54
第一节 单相流体管内强迫对流换热	54
第二节 单相流体外掠壁面强迫对流换热	60
第三节 单相流体自然对流换热	67
思考题	72
习题	73

第六章 热辐射及其基本定律	75
第一节 热辐射的基本概念	75
第二节 黑体辐射的基本定律	78
第三节 实际物体的辐射和吸收	81
思考题	85
习题	85
第七章 传热过程和换热器	86
第一节 传热过程的分析与计算	86
第二节 换热器的基本型式和基本构造	91
第三节 壳管式换热器的热计算	94
第四节 传热的强化和削弱	107
思考题	109
习题	110
第八章 传质学概述	113
第一节 传质的基本原理	113
第二节 分子扩散概念	118
第三节 对流传质	124
思考题	125
习题	126
第九章 分子扩散理论基础	127
第一节 分子扩散系数	127
第二节 多孔介质中的扩散	139
第三节 传质微分方程	142
思考题	146
习题	146
第十章 一维稳态分子扩散	148
第一节 通量积分公式	148
第二节 单向扩散	150
第三节 等摩尔逆向扩散	155
思考题	157
习题	157
第十一章 对流传质理论基础	159
第一节 概述	159
第二节 层流和紊流浓度边界层	161

第三节 量纲分析在对流传质中的应用	166
思考题	169
第十二章 对流传质特征数关联式	170
第一节 管道内的对流传质	172
第二节 外掠壁面或相界面的对流传质	177
习题	178
第十三章 动量、热量和质量传递的三传类比	178
第一节 三传类比简介	180
第二节 动量、热量和质量传递的类比关系式	184
思考题	185
参考文献	186
附录	
附录1 金属材料的密度、比热容和热导率	187
附录2 保温、建筑及其他材料的密度和热导率	190
附录3 几种保温、耐火材料的导热系数与温度的关系	192
附录4 大气压力下干空气的热物理性质($p = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$)	193
附录5 大气压力($p = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$)下烟气的热物理性质	195
附录6 饱和水的热物理性质	196
附录7 干饱和水蒸气的热物理性质	198
附录8 几种饱和液体的热物理性质	200
附录9 大气压力($p = 1.1325 \times 10^5 \text{ Pa}$)下过热水蒸气的热物理性质	203

第一章 传热学概述

传热与传质是由传热学和传质学两部分内容组成的综合性技术基础课程。传热学是研究有温差存在情况下热量传递规律的一门学科,而传质学是研究存在浓度差时质量传递规律的一门学科。可见,温差是热量传递的推动力,而浓度差是质量传递的推动力。

在自然界以及人们日常生活和工程实践中,温差和浓度差几乎无处不在、无时不有,所以热量传递和质量传递是一种很普遍的物理现象,对人们的生活和生产有广泛而深刻的影响。

本章简要介绍传热学的研究对象和任务、热量传递的三种基本方式、传热过程以及热传递的基本计算关系式,使读者对传热学的基本内容有概括性的了解,为后面传热学部分的学习打下基础。

第一节 传热学的研究对象和任务

传热学是研究热传递规律的一门学科。所谓热传递,是指由温度差引起的热能传递过程,通常也简称为传热。自然界和工程领域中,由于自然或人为的原因,常常会出现温度差。因而,热传递是一种极为普遍的能量转移过程,是一种普遍的自然现象。

温差是传热的前提和推动力,热量会自发地从高温物体传向低温物体,这一理论基础的依据来源于热力学第二定律。而传热学补充和扩展了热力学对热现象的研究。例如,一根浸入水中进行冷却的灼热金属棒,热力学可以计算金属棒与水最终达到平衡时的温度、初态和终态之间的内能(热力学能)变化,但不能计算达到平衡温度所需要的时间以及金属棒温度与时间的函数关系;而传热学则能对金属棒的任何位置、任何时刻的温度,以及金属棒在水中所传热量随时间变化率等作出明确的答复。这个例子说明,经典热力学限于研究“平衡态”和保持平衡的“可逆过程”,并不涉及能量传递的机理和所需的时间;传热学所要研究的热传递过程,是温度不平衡引起的典型的不可逆过程,不仅要探索过程的物理本质,还要研究给定条件下热传递系统的温度分布和热传递的速率等问题。

传热学的应用范围非常广泛,无论是能源、动力、机械、化工、制冷、建筑、电子电工、航空航天等工业部门,还是农业、生物和环境保护等部门,都有大量的热传递问题。例如,热电厂中水蒸气的产生和冷凝、锻铸造过程中工件的温度控制、化工流程中最佳温度的保证、电气元件或设备的冷却、建筑物的隔热保温、食品储运过程中低温的产生和控制、暖房的育花种菜和气候的冷暖变化等等,都涉及传热学知识的应用(动画1-1)。



动画1-1

石油工业中也涉及大量的传热现象。不论是钻井、固井、采油,还是石油的储运和炼制加工,都会伴随着热量传递现象。

在钻井工程中,钻井液占有十分重要的地位。在钻进过程中,需要随时测量和调整钻井液性能,这样才能做到快速、优质、安全钻井。随着井眼的加深,井底的温度和压力也在不断升

高,在地面条件下测得的钻井液性能参数不能准确反映出钻井液在井下的真实情况。在井下高温条件下,钻井液中所使用的化学处理剂的化学性能可能会受到不良影响而使其性能失去稳定性,从而不能有效地保证其在井内所必需的性能。预测深井中的井温分布对钻井液的配方研制起着指导作用。同时井内温度情况对井壁的稳定性、岩石破碎及钻头工作性能都有一定影响。

在固井施工中,深井固井的关键在于严格控制水泥浆的性能。在注水泥期间,要保证水泥浆有良好的流动性;在注水泥结束后,则需要水泥环具有所期望的强度。温度是影响水泥浆稠化时间、流变性能、抗压强度的主要因素。为了保证固井质量,必须根据水泥浆在井内所处的温度条件选择适当的水泥及处理剂,并根据井内温度控制处理剂的用量。

在采油工程中同样涉及大量传热学的分析计算。例如,油层产液在从井底举升到地面时,井筒内的产液温度沿举升高度是逐渐变化的,部分油层产液甚至会转化为气体,此时井筒内流体的温度及相态变化对其流动规律的影响也十分明显,因此准确预测井筒内的温度分布、计算油层产液沿井筒举升高度的温度变化及相态变化十分重要。又如,水力压裂是油气井增产的重要措施之一。当压裂液沿井筒和裂缝流动时,会与地层发生热交换,所以压裂液在裂缝内流动时温度是变化的。而温度的变化会影响到压裂液的黏滞性、悬砂能力、造缝能力和滤失速度等。所以对压裂液沿井筒和井下裂缝内的复杂传热规律进行分析计算对深井压裂液的设计有十分重要的作用。再如,对稠油井用有杆泵进行干抽时,在对稠油井进行计算、设计、生产预测等工作前,要先证实所采用的计算公式及参数取值符合客观情况才有可能进行。稠油井的特点是油的黏度比较大,故抽汲中将会增加很大的附加载荷。而油的黏度对温度变化是非常敏感的,所以为了确定油的黏度在井下的情况,必须确定井下的温度情况。

在油气输送工艺中,也存在着大量传热问题。例如,在高黏度石油和高含蜡、高凝点石油的开采和储运过程中,为了改善原油在管道内的流动性,通常采用对原油加热的方式进行输送。蒸汽伴随油气集输工艺就是对原油的加热方式之一。原油受热温度上升,黏度下降,从而管输阻力减小。在加热过程中,蒸汽与管壁、土壤与输油管、原油之间存在着复杂的传热过程,因此,要分析计算输油管道的沿程温度分布从而为加热站的设计提供理论依据。当输油管道出现故障需要停输或者输油设备定期保养需要停输时,需要通过传热学理论计算安全停输时间,防止原油在管道内凝固造成凝管事故,使管道再启动困难。

在原油炼制加工中,通过装有若干塔盘的蒸馏塔和加热炉组成的原油蒸馏装置,利用原油中各组分物质沸点的不同,将原油分馏成汽油、煤油、柴油等“馏分”。这些馏分随着各组分的沸腾汽化逐个引出,并通过冷却使它们冷凝成产物馏分。在原油的蒸馏和分离过程中,涉及蒸发、冷凝等相变传热的计算。

从上面的叙述可以看出,井下温度分布及油气输送管道温度分布在石油开采与储运方面有着相当大的重要性。目前主要有两种方法得到被研究物体的温度分布情况:一种是直接测量,这种方法比较直观,但受到很多因素的影响,在一些复杂的条件下直接测量极不方便,成本也比较高,并且不能进行温度场的预测工作;另一种方法就是通过计算来获得被研究物体的温度分布,而怎样计算温度分布的问题就属于传热学的范畴。

应用传热学规律求解的实际热传递问题是多种多样的,归纳起来大致可以分为两大类型。第一大类是着眼于传热速率的大小及其控制问题,它或者是力求增强传热,以便缩小设备尺寸或提高生产能力,或者是力求削弱传热,以减小不必要的热损失或保持设备内部低于周围环境

温度。另一大类是着眼于温度分布及其控制问题,从而确定合理的工艺条件,保证设备的正常使用。

总之,传热学正随着科学技术和生产实践的进步而飞速发展,与工程技术越来越密切相关。应用传热学成功地解决工程技术中所遇到的热传递问题,对装备和设备的技术经济性和安全可靠、热能的有效利用、工艺和生产过程的优化、可用能的回收和综合利用等都有着重要的作用。它越来越受到众多科技工作者的重视,成为一门涉及如何合理用热、为生产服务造福人类的技术基础课程,是许多工程系列科学的必修课程。期望通过本课程的学习,使读者获得一定的热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。

第二节 热量传递的三种基本方式

热量传递过程是一种复杂的物理现象,除了遵循热力学第一定律和第二定律外,还有其特殊的规律。通常,按其物理本质的不同,把它分为热传导、热对流和热辐射三种基本方式进行分析研究。

一、热传导

热传导简称导热,它是温度不同的物体各部分之间或者温度不同的各物体之间直接接触,没有相对位移时所发生的热量传递现象,是一种依靠物质的分子、原子和自由电子等微观粒子的热运动而进行的能量传递过程(动画 1-2)。例如对金属棒的一端加热,另一端的温度也会逐渐升高,这就属于温度不同的物体各部分之间的热传导现象;而冬天用暖手宝取暖则属于温度不同的各物体之间发生直接接触而进行的热传导现象。

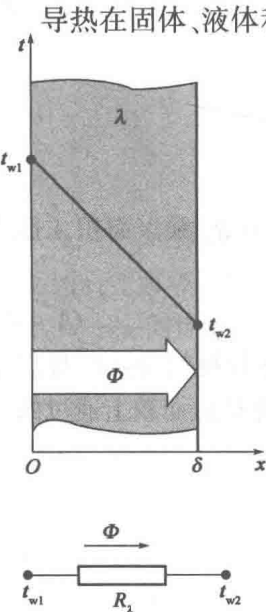


图 1-1 通过平壁的导热

导热在固体、液体和气体中均可发生。通常认为:纯导热只发生在密实的固体内。一些透明固体,如玻璃、石英等的热传递,除导热外,还伴随有热辐射现象。在液体和气体中也可以发生热传导现象。

这里我们考察一种最简单的情况,如图 1-1 所示。平壁厚度为 δ ,垂直于厚度方向的面积为 A ,两侧表面分别维持均匀的温度 t_{w1} 和 t_{w2} 。则在稳态情况下,单位时间从表面 1 传导到表面 2 的热量

$$\Phi = \lambda A \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} \tag{1-1}$$

式(1-1)常称为大平壁稳态导热公式,也称为平壁的一维稳态导热公式。

所谓“大平壁”,是指平壁的高度和宽度远大于厚度的情况。在工程中,一般高度和宽度大于 10 倍以上的厚度,就可以近似地当作“大平壁”处理。式(1-1)中, Φ 表示单位时间传递的热量,称为热流量,单位为 W。热流量表示传热的速率或者快慢。单位时间传递的热量多,则说明传热的速率快;单位时间传递的热量少,则说明传热的速率慢。 λ 称为材料的热导率,也称导热系数,单位为 $W/(m \cdot K)$,

表示材料导热能力的大小,导热系数越大,则说明材料的导热能力越强。比如金属在众多材料中导热系数就比较大,其导热能力也很强。材料的导热系数一般由实验测得,其具体性质将在第二章中详细讨论。

由物理学中直流电路的欧姆定律可知

$$\text{电流强度} = \frac{\text{电势差(电压)}}{\text{电阻}}$$

电路中有电势差就会有电流产生,而电阻是阻碍电流通过的物理量,当电势差一定时,电阻越大,则通过的电流越小。其实热现象和电现象有很强的相似性。传热学中热流量也可以写成温差除以热阻的形式,即

$$\text{热流量} = \frac{\text{温差}}{\text{热阻}}$$

根据热电现象的比拟,公式(1-1)可以写成

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

其中

$$R_{\lambda} = \frac{\delta}{\lambda A}$$

式中 R_{λ} ——平壁的导热热阻, K/W。

可以看出,平壁的厚度越厚,热量就越难通过,所以导热热阻越大;平壁的导热系数越大,说明平壁的导热能力越强,导热热阻就越小;垂直于导热方向的面积越大,单位时间通过的热量就会越多,所以导热热阻也越小。热阻是传热学中一个重要的概念,和电阻在电路中所起的作用一样,热阻表示物体对热量传递的阻力,热阻越小,传热越强。

传热学中也常常用热流密度 q 来表示传热的速率。热流密度 q 是指单位时间通过单位面积的热量,或者说表示单位面积通过的热流量,故单位为 W/m^2 。所以,由式(1-2)可得

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

其中

$$r_{\lambda} = \frac{\delta}{\lambda}$$

式中 r_{λ} ——平壁单位面积的导热热阻, $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$ 。

需要说明的是,虽然 r_{λ} 称为单位面积的导热热阻,但它是在导热热阻 R_{λ} 乘以面积 A 而不是除以 A 的基础上得到的:

$$r_{\lambda} = R_{\lambda} \cdot A \quad (1-4)$$

[例 1-1] 厚度为 0.1m 的大平板,两侧温度差保持 40℃ 不变。平板材料为:(1)导热系数 $\lambda = 50 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 的铸铁;(2) $\lambda = 0.13 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 的石棉。试计算单位面积上通过的热流量(即热流密度)。

解: 利用式(1-3),热流密度分别为

$$(1) \quad q = \frac{\Phi}{A} = \lambda \frac{\Delta t}{\delta} = 50 \times \frac{40}{0.1} = 2 \times 10^4 (\text{W}/\text{m}^2)$$

$$(2) \quad q = \frac{\Phi}{A} = \lambda \frac{\Delta t}{\delta} = 0.13 \times \frac{40}{0.1} = 52 (\text{W}/\text{m}^2)$$



讨论:

通过计算结果不难发现,相同厚度、相同温差的大平壁,材料的导热系数越大,通过的热流密度也越大,即对于相同厚度、相同温差的大平壁,导热系数越大的材料单位时间单位面积传递的热量也越多。

二、热对流与对流换热

热对流是指各流体微团温度不同的各部分之间发生宏观相对运动,将热量从一处传递到另一处的过程,简言之,热对流是依靠流体的运动进行热量传递的现象,也称为对流。

热对流只能发生在流动的流体中,对流时作为载热体的各流体微团不仅因其改变空间位置而进行热传递,同时不可避免地与周围流体微团或固体壁面接触而进行导热。也就是说,热对流的同时必然伴随着热传导现象。若热对流过程中,有质量流量为 q_m 的流体,从温度 t_n 的地方流到 t_{n2} 处,则热对流作用传递的热流量一般应为

$$\Phi = q_m c_p (t_{n2} - t_n) \quad (1-5)$$

式中 c_p ——流体的比定压热容, $J/(kg \cdot K)$ 。

但是,在工程技术领域中所遇到的传热问题,往往涉及流体与固体壁直接接触时的换热。这种流体与固体壁面之间的热量交换过程,称为对流换热。例如,室内空气与暖气片之间的热量交换、夏天室内开电风扇时流动空气与人体表面之间的热量交换都属于对流换热现象。它的特点是,在贴近壁面处总有一层流体薄层存在,薄层中的热传递依靠导热进行,而在流体薄层外的热传递主要是依靠对流进行,所以对流换热是导热和热对流共同作用的结果。对流换热过程是一个受到许多因素影响的复杂过程,它的基本计算式是牛顿 1701 年提出的:

$$\Phi = h_c A (t_w - t_f) = \frac{t_w - t_f}{\frac{1}{h_c A}} = \frac{\Delta t}{R_{h_c}} \quad (1-6)$$

$$q = h_c (t_w - t_f) = \frac{t_w - t_f}{\frac{1}{h_c}} = \frac{\Delta t}{r_{h_c}} \quad (1-7)$$

其中

$$R_{h_c} = \frac{1}{h_c A}, r_{h_c} = \frac{1}{h_c}$$

式中 t_w ——固体壁面温度, $^{\circ}C$;

t_f ——流体温度, $^{\circ}C$;

h_c ——对流换热系数, $W/(m^2 \cdot K)$;

A ——流体与壁面的接触面积, m^2 ;

R_{h_c} ——对流换热热阻, K/W ;

r_{h_c} ——单位面积的对流换热热阻, $(m^2 \cdot K)/W$ 。

式(1-6)和式(1-7)反映了对流换热的基本规律,常称为牛顿冷却公式,或者称为对流换热的基本计算公式。

需要指出,壁面与流体之间的温差永取正值。对流换热系数 h_c 与导热系数 λ 不同,它不是物性参数,而是与流体运动产生的原因、流动的状态、流体有无相变、流体的物性以及壁面的

形状和位置等许多因素有关,是表示对流换热强弱程度的一个物理量。牛顿冷却公式实际上也未提出影响对流换热系数的种种影响因素,它只能视为是对流换热系数的定义式,并不是表达对流换热现象本质的物理定律。解决对流换热的关键是确定对流换热系数 h_c ,有关它的具体计算将在第四章和第五章中详细介绍。

[例 1-2] 长度为 $l = 10\text{m}$ 、外径为 $d = 150\text{mm}$ 的蒸汽管道,外壁温度为 55°C ,水平地通过室温为 18°C 的车间。设管壁与空气间的对流换热系数 $h_c = 9\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,如不考虑辐射的影响,试计算管道外壁与空气的对流换热量。

解:管道外壁面积 $A = \pi dl$ 。由牛顿冷却公式(1-6)得

$$\Phi = h_c \pi dl(t_w - t_f) = 9 \times \pi \times 0.15 \times 10 \times (55 - 18) = 1.57 \times 10^3 (\text{W})$$

三、热辐射

以上两种热传递方式都必须通过物体的直接接触,但是,自然界中还存在着不依靠物体直接接触也能进行热传递的现象,例如太阳向地球的热传递、用红外线炉取暖等等。研究表明,这种热传递方式是靠物体自身发射和吸收辐射进行的,辐射射线具有能量,并以电磁波或量子的形式进行传播。

物理学告诉我们:由于受热、电子撞击、光辐射以及化学反应等,物质内部的分子、原子或电子会发生振动,向外发射能量。我们把这种物体以电磁波的形式向外发射辐射能的现象称为辐射,把物体由于自身温度的原因(或者说由于具有内能)而向外发射辐射能的现象称为热辐射。

能够全部吸收外来辐射的理想物体,称为黑体。黑体是一个理想辐射体,在实际物体和黑体表面温度相同的情况下,黑体的辐射能力最大。黑体在单位时间内发射的辐射能可按斯忒藩—玻耳兹曼定律计算:

$$\Phi = \sigma_b AT^4 \quad (1-8)$$

式中 T ——黑体表面热力学温度, K ;

A ——黑体的表面积, m^2 ;

σ_b ——斯忒藩—玻耳兹曼常数,或称黑体辐射常数,其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

斯忒藩—玻耳兹曼定律也称为黑体辐射的四次方定律,因为从式(1-8)可以看出,黑体在单位时间内发射的辐射能与其表面热力学温度的四次方成正比。

实际物体的辐射能力均小于相同温度下黑体的辐射能力,其辐射能的计算式为

$$\Phi = \varepsilon \sigma_b AT^4 \quad (1-9)$$

式中 ε ——物体表面的发射率,也称黑度,其值介于 $0 \sim 1$ 。

一切物体都能不停地将其内能转化为辐射能向外发射,同时又不断地吸收来自其他物体的辐射能,并将其转变成内能储存起来。不同物体发射和吸收辐射能的本领各不相同,就是同一物体也随温度不同而异。当物体之间存在温差时,以热辐射的方式进行能量交换,热量从高温物体传至低温物体,这种热量传递现象称为辐射换热。辐射换热具有以下特点:

(1) 不需要冷热物体的直接接触,也不需要介质的存在,在真空中就可以传递能量。

(2) 在辐射换热过程中伴随着能量形式的转换,即物体的热力学能—辐射能—物体的热力学能。例如太阳的辐射能传递至地球表面,太阳的辐射能在离开太阳表面之前属于太阳的内能(也叫热力学能),当离开太阳表面之后就以外太空传播,当这些电磁波能接触到地球表面后,又被地球表面吸收一部分,转化为地球的内能(热力学能)。

(3) 无论温度高低,物体都在不停地相互辐射能量;高温物体辐射给低温物体的能量大于低温物体辐射给高温物体的能量,总的效果是热量由高温物体传到低温物体。需要注意的是,即使是两个温度相同的物体,它们之间的辐射换热也在进行,只不过处于动态平衡而已,即物体吸收和辐射的热量相等,它们之间的辐射换热量为零。

对于两个互相平行且十分接近的黑体表面,如图 1-2 所示,它们之间的辐射换热量可按式计算:

$$\Phi = \sigma_b A (T_1^4 - T_2^4) \quad (1-10)$$

式中 T_1 ——高温黑体表面的热力学温度, K;

T_2 ——低温黑体表面的热力学温度, K。

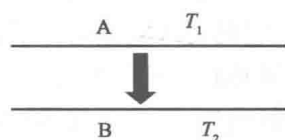


图 1-2 两平行黑体
平板间的辐射换热

[例 1-3] 日落后,人们站在砖墙附近可感到辐射能。若砖墙的表面温度为 43°C ,砖墙的发射率为 0.92。试求在此温度下每平方米砖墙发射的辐射能。

解:由公式(1-9)可得

$$q = \frac{\Phi}{A} = \varepsilon \sigma_b T^4 = 0.92 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (43 + 273)^4 = 520 (\text{W/m}^2)$$

第三节 复合换热和传热过程

以上我们简略地介绍了导热、热对流和热辐射三种基本热传递方式。实际的热传递过程往往是两种或三种基本方式组合而成的复杂过程。例如水在锅炉内加热汽化的过程,就是一个复杂的热传递过程,其中既有高温火焰和烟气对金属外壁面的辐射换热和对流换热,又有通过金属壁的导热和内壁面与水之间的对流换热。通常,把对流和辐射两种方式同时起作用的换热过程称为复合换热,把热流体通过固体间壁(将冷热流体隔开的壁)将热量传递给冷流体的过程称为传热过程。下面简要介绍它们的计算方法。

一、复合换热

复合换热现象在日常生活和工业生产中也很常见。例如,暖气片与室内空气的热量传递方式就是既有对流换热又有辐射换热的复合换热现象,油罐与大气的热交换也是复合换热现象。在稳定情况下,复合换热过程中气体与固体壁面间的复合换热量,应是对流换热量和辐射换热量之和,即

$$\Phi = \Phi_c + \Phi_r \quad (1-11)$$

欲求复合换热量 Φ ,可先按单独计算出对流换热量 Φ_c 和辐射换热量 Φ_r ,然后相加得到。

但是,工程上有时为了计算方便和计算形式的统一,常常将辐射换热的计算式改写成类似于对流换热的牛顿冷却公式:

$$\Phi_r = h_r A (t_w - t_f) \quad (1-12)$$

式中 h_r ——折算辐射换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

进行这样的变换后,若固体壁面温度为 t_w ,周围其他各固体表面与气体具有同样温度 t_f ,换热面积为 A ,则固体表面的总复合换热量为

$$\begin{aligned} \Phi &= \Phi_c + \Phi_r = h_c A (t_w - t_f) + h_r A (t_w - t_f) \\ &= (h_c + h_r) A (t_w - t_f) = h A (t_w - t_f) \end{aligned} \quad (1-13)$$

式中 h_c ——对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;

h_r ——折算辐射换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;

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

公式(1-13)习惯上也常称为牛顿冷却公式。这里需要指出: h_r 本身并没有什么物理意义, 它的引入完全是为了计算方便和统一, 是计算换热表面在发生对流换热时又伴随有辐射换热时经常要用到的一个概念。因为固体表面发生对流换热时, 辐射换热现象往往会同时出现, 尤其是气体与固体壁面之间的对流换热。因为除可见光之外的辐射能能穿透气体而不能在固体和液体内部传递, 所以实际的换热系数是指复合换热系数(表面传热系数), 今后如不特别声明, 都是指此而言。如果流过壁面的是液体, 因为没有辐射换热, 此时的 h 值则只是指对流换热系数, 也可以明确地用 h_c 表示。另外, 如果对流和辐射两种换热量相差甚大, 计算时可只考察起主导作用的一方。

[例1-4] 一外径为 0.3m、壁厚为 5mm、长为 20m 的圆管, 外表面平均温度为 80°C , 150°C 的空气从管外掠过, 空气与管壁的表面传热系数为 $70\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。流速为 0.3m/s 的水在圆管内流动, 水的进口温度为 20°C 。已知水的比定压热容为 $4184\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 密度为 $980\text{kg}/\text{m}^3$, 不考虑温度对其物性参数的影响, 求稳态情况下水的出口温度。

解: 管外空气与管外壁之间的复合换热量为

$$\Phi = hA(t_f - t_w) = 70 \times \pi \times 0.3 \times 20 \times (150 - 80) = 92316(\text{W})$$

由于过程处于稳态, 管外空气所加的热量由管内水带走, 其中 $A_c = \frac{\pi d^2}{4}$, 因此:

$$\Phi = q_m c_p (t_{t2} - t_{t1}) = \rho u A_c c_p (t_{t2} - t_{t1})$$

则
$$92316 = 980 \times 0.3 \times \frac{\pi}{4} \times (0.3 - 0.01)^2 \times 4184 \times (t_{t2} - 20)$$

解得
$$t_{t2} = 21.137(^{\circ}\text{C})$$



讨论:

(1) 圆管外壁与空气之间的换热是既有对流换热又有辐射换热的复合换热现象; 而圆管内壁与水之间的换热就是单纯的对流换热现象。可见, 一般固体壁面与气体之间发生的是复合换热, 而与液体之间发生的是对流换热。

(2) 本例用到了能量守恒定律, 即稳态时单位时间水的内能变化量等于管外壁与空气的对流换热量。

[例1-5] 某建筑外墙的外壁面温度为 45°C , 空气温度为 25°C , 外墙与空气的对流换热系数为 $7\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 与周围环境的折算辐射换热系数为 $11\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 求外墙与空气的复合换热系数及每平方米总的散热量。

解: 复合换热系数即表面传热系数:

$$h = h_c + h_r = 7 + 11 = 18[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$$

总的散热量为:

$$\Phi = hA(t_w - t_f) = 18 \times 1 \times (45 - 25) = 360(\text{W})$$