



TEACHING MATERIALS
FOR COLLEGE STUDENTS

高等学校教材

传热学

Heat Transfer
Theory

主 编 黄善波 副主编 张克舫



中国石油大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS



TEACHING MATERIALS
FOR COLLEGE STUDENTS
高等学校教材

传 热 学

主 编 黄善波

副主编 张克舫



中国石油大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS

图书在版编目(CIP)数据

传热学/黄善波主编. —东营:中国石油大学出版社, 2013. 5

ISBN 978-7-5636-4020-1

I. ①传… II. ①黄… III. ①传热学—教材 IV.
①TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 094040 号

中国石油大学(华东)规划教材

书 名: 传热学
主 编: 黄善波
副 主 编: 张克舫

责任编辑: 秦晓霞(电话 0532—86983567)

封面设计: 青岛友一广告传媒有限公司

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com

印 刷 者: 莱芜市凤城印务有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981532, 86983437)

开 本: 185 mm×260 mm 印张: 15.25 字数: 389 千字

版 次: 2014 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 25.00 元

前 言

PREFACE

传热现象是自然界和工程技术领域中最为常见的物理现象之一,在石油工业的油藏工程、钻井工程、采油工程、油气储运工程中都会遇到传热问题。近年来,在深层、超深层油气资源、海上油气资源以及稠油、超稠油油藏的开发利用中,传热理论的应用已成为具体工艺设计和计算的关键。因此,传热学是石油工程专业的一门重要的专业基础课程。

虽然目前国内已出版了大量传热学教材,但现有的教材都是面向热工类或机械类专业的,而对课程学时少又没有热工背景的石油工程专业学生来说,使用这些教材有一定的困难:一方面学生难于理解取自热工背景的例题,另一方面现有教材很少涉及石油工程专业所需内容。因此,有必要结合专业需要编写一本面向石油工程专业的传热学教材。

本教材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》,针对传热学课程的特点以及石油工程专业的需求,结合多年来课程教学和改革的经验编写而成。教材的主要特点是:

(1) 内容上保持了传热学体系的完整性。采用先概述、后分述、再综合的编排体系,全面系统地阐述了热量传递的理论基础及工程应用。

(2) 结合专业需要,精选教学内容。本书删除了在石油工程中极少遇到的内容,补充了若干石油工程中的典型传热问题,使课程内容与专业需要的结合更为紧密。

(3) 注重培养学生分析问题、解决问题的能力。强调能量守恒原理在分析传热问题中的应用,理论阐述按照工程背景、简化假设、建立模型和求解分析的思路展开。既注重与工程实际的结合,又注重分析和解决实际问题能力的培养。

(4) 便于自学。本书编写时力求深入浅出、通俗易懂,各章都配有例题、小结、思考题和习题等。

全书采用中华人民共和国法定计量单位。

本书按 32~48 学时编写,主要用作高等院校石油类专业本科传热学课程教材,也可作为石油工程专业的函授及继续教育教材或参考书,以及现场工程技术人员学习和参考用书。

本书由黄善波主编,其中第 4、第 5 章由张克舫编写,其余部分由黄善波编写。

教育部能源动力学科教学指导委员会热工基础课程教学指导分委员会委员、北京工业大学环境与能源工程学院刘中良教授、中国石油大学(华东)热能与动力工程系梁金国教授对本书进行了审阅,并提出了许多宝贵的意见和建议,在此深表谢意。另外,本书编写过程中得到了储运与建筑工程学院热能与动力工程系教师的大力支持和帮助,在此一并致谢。

限于编者水平,虽经努力,本书仍不免有错误和不足之处,恳请读者批评指正。

编 者

2013年6月

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪 论	1
1.1 传热学概述	1
1.2 传热学在石油工程中的应用	2
1.3 热能传递的基本方式	5
1.4 传热过程和热阻	9
1.5 传热学中的能量守恒原理	12
1.6 传热学的研究方法	14
本章小结	16
思考题	16
习 题	17
参考文献	18
第 2 章 导热的理论基础	19
2.1 基本概念和导热基本定律	19
2.2 物质的导热特性	22
2.3 导热问题的数学描述	26
本章小结	33
思考题	33
习 题	34
参考文献	35
第 3 章 导热问题的分析与计算	36
3.1 一维稳态导热	36
3.2 通过肋片的稳态导热	48
3.3 对流边界条件下的一维非稳态导热	53
3.4 集总参数分析法	58
3.5 半无限大物体的非稳态导热	62
3.6 井筒周围地层的非稳态导热	65
本章小结	69
思考题	70
习 题	71

参考文献	75
第4章 对流传热的理论基础与工程计算	77
4.1 概 述	77
4.2 对流传热问题的数学描述	81
4.3 边界层及边界层对流传热微分方程组	86
4.4 对流传热实验研究的理论基础	93
4.5 管槽内强迫对流传热的实验关联式	101
4.6 外部强迫对流传热的实验关联式	112
4.7 自然对流传热	116
4.8 凝结与沸腾传热	121
本章小结	129
思考题	130
习 题	131
参考文献	133
第5章 热辐射及辐射传热	135
5.1 热辐射的基本概念	135
5.2 黑体辐射的基本规律	140
5.3 黑体表面间辐射传热的计算	145
5.4 实际物体的辐射特性及对投入辐射的作用	153
5.5 灰体间辐射传热的计算	165
本章小结	176
思考题	177
习 题	179
参考文献	182
第6章 传热过程的分析与计算	183
6.1 复合传热过程	183
6.2 传热过程分析与计算	184
6.3 换热器与换热器的热计算	192
6.4 井筒内的传热过程分析	204
本章小结	211
思考题	212
习 题	213
参考文献	215
附 录	217
附录1 传热学中常用单位换算	217
附录2 金属材料的密度、比热容和导热系数	218
附录3 部分非金属材料的热物理性质	220
附录4 几种保温、耐火材料的导热系数和温度的关系	222

附录 5 我国典型稠油油藏地层岩石热物性参数的实测结果	223
附录 6 美国常用油藏岩石的热物性参数	223
附录 7 部分生物材料的热物理性质	224
附录 8 几种液体的热物理性质	225
附录 9 部分液态金属的热物理性质	227
附录 10 我国及世界上典型稠油的粘温关系	228
附录 11 大气压力($1.013\ 25 \times 10^5$ Pa)下部分气体的热物理性质	229
附录 12 大气压力下干空气的热物理性质	230
附录 13 饱和水的热物理性质	231
附录 14 干饱和蒸汽的热物理性质	232
附录 15 常用材料的表面发射率	233

第 1 章

绪 论

本章主要介绍传热学的概貌,包括什么是传热学、传热学的研究目的和对象,以及传热学在石油工程中的应用情况;扼要介绍三种基本的热能传递方式、传热过程的基本概念和计算方法,以及传热学中的能量守恒原理等。通过本章的学习,可从总体上初步了解传热学这门学科的研究内容,以及它对石油工程的重要性,从而为学好本课程打下坚实的基础。

1.1 传热学概述

1.1.1 什么是传热学

传热学(heat transfer)是研究由温度差异引起的热能传递规律的科学,是工程热物理的分支学科之一。

热力学第二定律指出,热能总是自发地、不可逆地从高温处传向低温处,在此过程中传递的热能的数量常称为热量。当物体内部存在温度差,或者温度不同的物体相互接触时,就有了相对“热”和“冷”的矛盾双方,就会发生热量从高温到低温的转移过程,这就是热能的传递,简称“传热”。传热学就是研究这种热能传递过程所遵循的规律及其应用的一门科学。

1.1.2 传热学与工程热力学的关系

工程热力学作为工程热物理的另一分支学科,虽然它和传热学同属于工程热物理学科,都以热物理现象为研究对象,以热力学第一定律和热力学第二定律为研究基础,但二者研究的侧重点不同。工程热力学主要研究热能和机械能之间相互转换的规律,研究的是处于平衡状态的系统,与环境之间不存在温度差或压力差^[1,2]。而传热学则是专门研究存在温度差时的热能传递规律,这样的过程是典型的不可逆过程。热能传递的快慢以及不同时刻物体内的温度分布是传热学所关心的主要问题。例如,放在桌子上的一杯热水,工程热力学能计算出热水冷却到室温时所放出的热量,但它不能给出这杯热水冷却到室温所需要的时间以及冷却过程中某一时刻的水温,而这些问题正是传热学所要解决的。因此,可以说传热学不仅要解释热能是

如何传递的问题,同时还要研究热能传递的多少及速率等问题。

1.1.3 热流量和热流密度

为了衡量热能传递过程中速率的大小,引入了热流量(heat transfer rate)和热流密度(heat flux)的概念。热流量定义为单位时间内通过某一给定面积 A 的热量,记为 Φ ,单位为 W 。通过单位面积的热流量则称为热流密度(或称面积热流量),记为 q ,单位是 W/m^2 。显然有:

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

只有存在温差,才会有热能传递过程的发生,反映物体中的热流量或热流密度与相应的温度差之间规律的第一层次的关系式称为热能传递的速率方程(rate equation)。给出各种情况下热能传递的速率方程是传热学的主要目标之一。

1.1.4 传热学的研究目的

人们在总结生产实践经验的基础上,发现热能传递可以分为热传导、热对流和热辐射三种基本方式。当然,在某个具体的热能传递过程中,究竟是哪一种或哪几种传热方式起作用,热流量或热流密度是多少,给定时刻物体的温度是多少,物体内的温度如何随时间变化等都是传热学所要研究的。

工程中的传热问题大致分为两类:一类着眼于传热速率的计算及控制。解决这类问题的目的是通过计算热流量或热流密度,以根据实际需要强化传热或者削弱传热。例如,供热工程中为了降低室外管线的热损失,通常采取隔热保温等措施以削弱传热;而在房间内为了提高传热速率又需要对暖气片采取强化传热措施。另一类则着眼于温度分布的计算及控制,通过温度分布来了解物体内的热应力或热变形。例如,在注蒸汽热力采油中采用隔热油管的目的除了降低热损失外,还有防止套管因温度升高而造成热应力破坏的作用;在精密机加工中为了控制工件内部的热应力、热变形,需要计算工件内部的温度分布。实际上,在很多工程应用中,这两类问题是交织在一起的。

为了解决这两类问题,必须具备热能传递规律的基础理论知识和分析传热问题的基本能力。因此,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和一定的实验技能,是学习传热学课程的目的和要求。

1.2 传热学在石油工程中的应用

由于温度差异(以下简称温差)广泛存在于自然界和科学与工程领域内,因而热能传递现象几乎无时无刻不在。人类的衣、食、住、行各环节都离不开传热学原理的应用,同时它的影响和应用也几乎遍及所有现代工业领域。不仅在传统的工业领域内,如能源动力、化工制药、冶金、建筑建材、轻工纺织、航空航天、核能、农业工程、安全工程等存在着大量的传热问题,而且在材料、生物、医学、电子、环境工程、新能源开发等高新技术领域内也在不同程度上依赖传热学的最新研究成果,同时还涌现了相变与多相流传热、微尺度传热、超高/超低温传热、生物传热等许多分支学科的交叉^[3,4],同样在石油工程领域也存在着大量的传热问题,因此传热学已

经成为现代科学的主要基础学科。下面简要介绍传热学在石油工程领域中的应用,以使读者了解传热学的应用背景,更好地学习传热学并将其应用于具体的石油工程实践中。

1.2.1 在渗流力学中的应用

渗流力学是研究流体在多孔介质内运动规律及应用的科学,它是流体力学的独立分支之一,是流体力学与岩石力学、多孔介质理论、表面物理和物理化学等多学科交叉渗透而成,其应用范围广泛,能够为科学、合理地开发石油和天然气资源提供理论基础^[8]。流体在油藏岩石中的渗流特性取决于岩石的孔隙结构、润湿性、流体的粘度、流体间的界面张力等多种因素。传统的渗流力学将发生在油藏岩石内的过程看做是等温的,不考虑温度对上述因素的影响。但是在采用热力法提高采收率的三次采油中以及采用注热流体、火烧油层及电加热等方法 and 手段开发高粘和高凝油藏时,油层内温度的变化必然会对上述各因素产生不同程度的影响。这时,除了考虑渗流过程的压力场和速度场外,还必须考虑温度场。另外,要计算热量在油藏内的影响和波及范围,同样需要温度场。为此必须借助于能量守恒原理和相关的传热学规律建立起描述油藏温度场的数学模型,并结合具体的渗流过程进行分析求解。

1.2.2 在钻井和固井工程中的应用

钻井是油气田开发的重要环节之一,作为石油钻井工程血液的钻井液有多种功能,其中最重要的两个是:① 冷却和润滑钻头以延长钻头的使用寿命;② 清洗井底,携带和悬浮岩屑,维持正常的钻井速度,保证钻井质量。常规钻井液是由粘土、水及各种化学药剂组成的溶胶和悬浮体系^[5]。对浅井和中等深度油井而言,常规钻井液已基本上能够满足工程需要。随着对油气资源需求量的增加,钻井范围和难度不断加大。一方面,油井深度不断增加,4 000~5 000 m 的深井已很普遍,和普通深度油井相比,深井的井底温度一般在 130~180 °C 范围内,有的甚至超过 200 °C,这就对钻井液的温度、压力适应性提出了更高的要求。另一方面,为适应低压、低渗、低产能油田、断块油气田等开发的需要,发展了低压低密度钻井流体技术^[6]。对深井和超深井,低压低密度钻井流体含有一定量的气体及其他化学药剂,这使它更容易受到压力和温度的影响。在这两种情况下,已经不能忽略温度变化对钻井液性能的影响。为了考虑温度变化对钻井液的影响,除了需要在实验室开展钻井液在高温高压下的性能研究外,还必须对钻井液在井筒内的流动和传热规律进行研究,确定钻井液的温度在井深范围内的变化规律,从而为钻井液体系的设计提供理论依据。

固井是油井建井过程中加固井眼、保持井眼稳定的重要环节,固井工程的好坏是衡量油井质量的重要指标。在固井施工中需要注入水泥浆,以使套管和地层胶结在一起。施工过程中井下温度是非常重要的参数,直接影响到水泥浆的稠化时间、流变性质、抗压强度及凝固时间等。随着油气井深度的增加,温度的影响也逐渐明显。计算表明^[7],若井下温度有 5 °C 左右的误差时,纤维素水泥浆的稠化时间就会有 60 min 左右的误差,并且随着温度、压力的增加,其流动特性将会发生根本性的变化。另外,井下温度还会影响井内压力平衡、井壁稳定、工作液体系的选择和套管强度等。因此,准确预测水泥浆的井内循环温度对高温高压深井的水泥浆体系设计有重要意义。

1.2.3 在采油工程中的应用

在油气田开发中,采油工程的任务是通过对油气藏采取一系列的工艺技术措施,使油藏流

体顺利流入井底,并高效地将其举升到地面进行分离和计量,其目标是经济有效地提高油井产量和油气采收率。在采油工程中存在着大量的传热学问题。

随着油藏深度的增加,油层温度也将逐渐升高。油层产液从井底举升到地面时,产液温度沿井筒是变化的。深井、超深井井筒内流体的温度变化对其流动规律的影响已不能忽略,因此在对深井、超深井进行举升工艺设计时,准确地预测井筒内的温度分布具有非常重要的作用。

水力压裂是油气井增产的重要措施,它不仅用于低渗透油气藏,而且在中、高渗透油气藏的增产改造中也有很好的效果^[9]。目前,随着油井压裂深度的增加,地层温度也逐渐升高。当压裂液沿井筒和裂缝流动时,会与地层发生热交换,使压裂液的温度发生变化。深井中这种温度变化是明显的。温度变化将会影响到压裂液的粘滞性、悬砂能力、造缝能力和滤失速度等。为提高深井压裂设计的合理性、可靠性,需要对压裂液沿井筒和裂缝内的复杂传热规律进行分析。

稠油、高凝油是我国重要的油气资源,分布广、储量大。开发稠油时的主要问题是粘度过高导致流动性变差^[10]。一方面,稠油渗流阻力大,难于从油层流入井底;另一方面,稠油在举升过程中,由于脱气和降温导致粘度进一步增加,使油井生产更加困难。高凝油是含蜡量高、凝固点高的原油,其特点是存在析蜡点和凝固点。当高凝油的温度低于析蜡点时,原油中的重质组分开始析出;当原油温度进一步降低至凝固点时,原油将失去流动性。

目前我国和世界其他国家的开采实践证明,热处理油层采油技术是开发稠油和高凝油的一种行之有效的方法。这种方法通过有计划地向油层注入热量,提高油层温度,降低油层流体的粘度,防止油层中的结蜡现象,增加油藏驱油能力,减小油层流动阻力,以达到更好地开采稠油和高凝油的目的。目前常用的热处理油层采油技术包括注热流体和火烧油层两类方法^[9]。

在注热流体工艺中,注入的热流体可以是蒸汽,也可以是热水。对高凝油通常采用注热水的方法,以维持原油温度,防止原油中的重质组分析出使流动性变差。注蒸汽工艺通常用于稠油开发,可分为蒸汽吞吐和蒸汽驱两种方法,注入的蒸汽通常是湿蒸汽,它充分利用稠油粘度对温度非常敏感这一特点,通过提高油藏温度来降低原油粘度以改善其流动性。另外,油藏岩石受热后的膨胀作用,也可以减小最后的残余油饱和度。

火烧油层又称就地燃烧^[11],它是将空气(或氧气、液氧)连续地注入油层中,通过自燃或点火使油层中的部分原油燃烧,利用燃烧释放出的热量来加热油层。按注入空气在油层内的流动方向与燃烧前缘的推进方向之间的关系,火烧油层可分为正向燃烧法和反向燃烧法。在正向燃烧中,若在注入空气的同时注入水,则称为湿式正向燃烧法,否则称为干式正向燃烧法。

需要指出的是,热处理油层采油技术除了开发稠油、高凝油的主要方法外,由于它不同油田的各种油藏条件下都可获得较高的原油采收率,因而它也是提高原油采收率的方法之一。

当稠油和高凝油由井底沿井筒被举升到地面时,由于存在井筒热损失,原油温度不断降低,使原油粘度升高或重质组分析出导致原油在井筒内的流动性变差。因此,为维持油井的正常生产,必须对井筒内流体采取降粘措施,其中热力降粘技术就是常用的一种。所谓热力降粘技术,就是通过提高井筒流体温度,降低其粘度的技术,它分为热流体循环加热降粘技术和电加热降粘技术^[10]。热流体循环加热降粘技术是在地面上产生高温流体(油或热水),然后通过特殊管柱注入到井筒中并建立循环通道,以加热井筒中生产流体的工艺技术。根据井下管(杆)柱结构的不同,主要有四种形式,分别是开式热流体循环工艺、闭式热流体循环工艺、空心抽油杆开式热流体循环工艺和空心抽油杆闭式热流体循环工艺。电加热降粘技术是利用电热

杆或伴热电缆,将电能转化为热能,提高井筒生产流体温度的工艺技术,目前常用的有电热杆采油工艺和伴热电缆采油工艺两种技术。

由此可见,对稠油和高凝油的开发,加热降粘或通过加热维持温度是热处理油层技术和井筒热力降粘技术的目的,其中对传热问题的分析和解决是相关工艺设计与实施的关键所在。

1.2.4 在油气储运工程中的应用

我国生产的原油80%以上为含蜡原油,其特点是随着温度的降低,溶解于原油中的蜡晶逐渐析出,使原油的流动性变差。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法进行输送,因此在输油工艺中也存在着大量的传热问题。这些问题包括:① 当新建埋地热油管线投产时,为防止原油在冷管中降温而过快发生胶凝,需要用热水对管线进行预热。在预热过程中,管内热水与地面和土壤深处进行复杂传热。② 各种不同的热油通过管线时温度沿管长的变化情况,是加热站设计的重要依据。③ 当输油系统出现故障需抢修或输油设备定期保养维修而必须停输时,管内原油温度下降,蜡晶将会逐渐析出;当油温进一步降低时,可能使原油凝固在管内造成凝管事故,使管道再启动困难,为此必须确定安全的停输时间。④ 管内介质输量、介质类型、管线埋深、管线所处的地理环境、气候条件变化等因素对管线传热和介质温度变化的影响等。全面、详实、准确地了解和分析这些传热问题对输油管道的合理设计和安全经济运行具有十分重要的意义。

石油化工领域内的传热过程具有如下特点:① 参与换热的介质成分多而复杂,一般都在三四种以上;② 常常与传质过程结合在一起;③ 经常涉及多相流和非牛顿流体的传热等。在许多石油化工的工艺流程中,传热是非常关键的因素。

石油工业既是产能大户,也是耗能大户,其中油气生产、炼油化工和长输管道的能耗费用在生产成本中约占20%~50%。管理粗放、工艺落后、设备陈旧是这种状况的根本原因。要实施可持续发展战略,必须降低成本、提高效益,为此应该狠抓节能降耗,其中许多问题都与传热学有着直接的关系。

1.3 热能传递的基本方式

和流体力学、渗流力学等其他学科一样,传热学中也采用连续介质假设,即在本书所讨论的范围内均假设所研究的物体为连续体,物体各点的温度等参数均为时间和空间的连续函数。同时,我们也只在宏观范畴内研究各类不同热能传递方式所遵循的基本规律,不涉及物质内部微观结构和粒子间能量传递的微观机理。

根据机理的不同,热能传递有三种基本方式:热传导、热对流和热辐射。绪论中仅对这三种热能传递方式作简单的描述,详细内容将在以后各章节中展开。

1.3.1 热传导

当物体内部存在温度差,或者温度不同的两个物体相互接触时,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能传递现象称为热传导(thermal/heat conduction),简称导热。例如,手持铁棒放入炉内加热时,过一会儿手持的一端会变热(温度升高),这是因为热能以导热的方式从炉内的高温端沿铁棒传向手握处的低温端;冬天用手触摸室外铁器感到凉,是

由于作为高温物体的手通过接触将热量传递给作为低温物体的铁器。

导热是物质的固有属性,它是与构成物体的微观粒子,如分子、原子、自由电子等的无规则热运动相联系的物理过程。所有物质,不论是固相、液相还是气相,均具有一定的导热能力。当然,物质的种类、物态甚至组成不同,其导热能力一般也不相同。一般来说,固体和静止流体中的热能传递依靠导热,但纯粹的热传导只发生在密实的固体中。

下面简要分析通过如图 1-1 所示的固体大平壁的稳态导热问题。设壁厚为 δ ,垂直于厚度方向的面积为 A ,平壁两侧分别维持均匀恒定的温度 t_{w1} 和 t_{w2} ,且 $t_{w1} > t_{w2}$ 。热力学第二定律指出,通过平壁的热流量是沿着壁厚度方向从平壁的高温面传向平壁的低温面。理论和实验分析表明,热流量与平壁两侧的温差($t_{w1} - t_{w2}$)和导热面积 A 成正比,与平壁厚度 δ 成反比,即

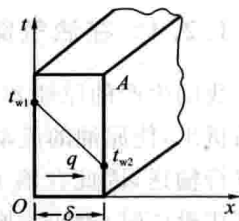


图 1-1 通过大平壁的导热

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

或

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

式中, λ 为比例系数,称为热导率(thermal conductivity),又称为导热系数,其单位是 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。导热系数是物质的热物理性质之一,它反映了物体导热能力的大小,一般由实验确定。

【例 1-1】 已知钢板及硅藻土板的导热系数各为 $46 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 和 $0.242 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。若两板两侧表面分别维持在 $t_{w1} = 300^\circ\text{C}$ 和 $t_{w2} = 100^\circ\text{C}$,试计算通过 10 mm 厚钢板及硅藻土板的热流密度。

解 钢板和硅藻土板两侧分别维持均匀不变的温度,热量只沿厚度方向传递,可简化为通过大平壁的稳态导热问题,按式(1-3)计算热流密度。

钢板的热流密度为:

$$q_1 = \lambda_1 \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} = 46 \times \frac{300 - 100}{0.01} = 9.2 \times 10^5 \text{ W/m}^2$$

硅藻土板的热流密度为:

$$q_2 = \lambda_2 \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} = 0.242 \times \frac{300 - 100}{0.01} = 4.84 \times 10^3 \text{ W/m}^2$$

讨论:结果表明,在其他条件完全相同的情况下,通过不同材料的热流密度差别巨大,导热系数越大,热流密度就越大。因此,导热系数大的钢是热的良导体,而硅藻土则是热的不良导体,在工程中可以起到隔热保温的作用。

1.3.2 热对流

流体(液体或气体)中温度不同的各部分之间发生相互混合的宏观运动而引起的热量传递现象称为热对流(thermal/heat advection)。显然,热对流是发生在流体内部的热量传递方式。由于流体内部温度不均匀时不可避免地产生热传导,因此热对流总是和热传导同时发生,它是流体宏观相对运动(对流)与微观粒子的微观热运动(导热)两种机理联合作用的结果,是一种十分复杂的热量传递现象。

工程中经常遇到的是流动着的流体与其所接触的固体表面之间由于温度不同而引起热量传递过程,称为表面对流传热(convection heat transfer),简称对流传热,习惯上又称为对流

换热。在工程实际中,普遍关心的是流体与固体壁面之间的热量传递,因此本书只讨论对流传热。

根据对流传热过程中流体是否存在相变,将其分为有相变和无相变两大类。而每一类又根据不同指标细分为若干子类。例如,按照流动起因的不同,无相变对流传热可分为强制对流(forced convection)和自然对流(natural convection)两类。在强制对流传热中,流体的流动是在泵、风机等外力作用下引起的,例如供热管线中热水与管内壁间的热量交换过程。自然对流中流体的流动则是由于密度差异产生的浮升力导致的,如暖气片加热壁面附近空气的过程。

1701年,英国科学家牛顿指出,当物体受到流体冷却时,表面温度随时间的变化率与流体和壁面之间的温差成正比。后来人们在此基础上,提出了计算对流传热的基本公式,称为牛顿冷却公式(Newton's law of cooling)。当流体被加热时,有:

$$\Phi = hA(t_w - t_f) \quad \text{或} \quad q = h(t_w - t_f) \quad (1-4)$$

当流体被冷却时,有:

$$\Phi = hA(t_f - t_w) \quad \text{或} \quad q = h(t_f - t_w) \quad (1-5)$$

式中, h 为表面传热系数(convective heat transfer coefficient)(以前又称为对流换热系数), $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; A 为流体和固体表面的接触面积, m^2 ; t_w 和 t_f 分别为固体壁面和流体的温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

牛顿冷却公式又被称为对流传热的热流速率方程,其中的表面传热系数 h 和平壁导热计算公式中的导热系数 λ 不同,它不是物性参数,而是与具体对流传热过程有关的过程量。虽然牛顿冷却公式形式简单,但这并不意味着对流传热过程也简单。实际上,牛顿冷却公式将除温差以外的众多影响对流传热的因素都集中在表面传热系数 h 上。对流传热研究的主要目的就是如何确定各种情形下的表面传热系数。表 1-1 给出了若干典型情况下表面传热系数的数值范围^[3],作为工程技术人员,建立和掌握典型条件下的表面传热系数的大概量值是非常重要的。

表 1-1 对流传热表面传热系数的大致范围

对流传热问题的类型	$h/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$
自然对流传热:气体	2~25
液体	50~1 000
强制对流传热:气体	25~250
液体	50~25 000
相变对流传热:凝结	2 000~100 000
沸腾	2 500~100 000

【例 1-2】 冬季供暖时,测得室内暖气片表面温度 $t_w = 50^{\circ}\text{C}$,室内空气温度 $t_f = 20^{\circ}\text{C}$,暖气片表面与空气之间自然对流的表面传热系数 $h = 5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。试求散热面积 $A = 4 \text{ m}^2$ 的暖气片的自然对流散热量。

解 根据牛顿冷却公式,暖气片和室内空气之间的自然对流散热量为:

$$\Phi = hA(t_w - t_f) = 5 \times 4 \times (50 - 20) = 600 \text{ W}$$

讨论: 暖气片是不是仅仅以对流的方式加热房间呢?

1.3.3 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,其中由于自身温度(热)的原因而发出辐射能的现象称为热辐射(thermal/heat radiation)。传热学只研究热辐射。

热辐射中物体向外界发射的能量来自于物体的热力学能。任何物体,只要温度高于 0 K,都具有一定的热力学能,都能不断地向外界发出热辐射。因此,热辐射也是物质的固有属性。

物体不断地向外界发射热辐射的同时,又不断地吸收其他物体发出的辐射能。物体之间相互发射、相互吸收的综合结果就造成了物体间以热辐射的方式进行热量的传递,这种热量传递过程称为辐射传热(radiative heat transfer)。当物体与周围环境处于热平衡(即温度相同)时,辐射传热量为零,但物体间辐射的发射和吸收仍在不停地进行,只是它们处于动态平衡状态。

理论和实验研究表明,物体向外界发射辐射能的能力大小与物体的温度和表面性质有关。物体的温度越高,它向外界发射辐射能的能力越强。温度相同而表面状况(如粗糙度、金属表面的氧化情况等)不同,其辐射和吸收能力也不同。为了研究方便,人们引入了一种称为绝对黑体的理想物体,简称黑体(black body)。它是指能够百分之百地吸收投射到其表面上的所有辐射能的物体。黑体在单位时间内发出的辐射能可按斯忒藩-玻耳兹曼(Stefan-Boltzmann)定律来计算:

$$\Phi = \sigma A T^4 \quad (1-6)$$

式中, Φ 为辐射热流量, W; A 为黑体的辐射表面积, m^2 ; T 为黑体的热力学温度(绝对温度), K; σ 为斯忒藩-玻耳兹曼常数,又称黑体辐射常数,其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

斯忒藩-玻耳兹曼定律表明黑体发射热辐射的能力与表面绝对温度的四次方成正比,因此也称为四次方定律,它是辐射传热计算的基本公式。

实际物体的辐射能力小于同温度下黑体的,实际物体发射辐射能的大小可用斯忒藩-玻耳兹曼定律的修正形式计算:

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

式中,系数 ϵ 称为物体的发射率(emissivity),习惯上也称为黑度,它表示物体接近黑体的程度,其值总小于 1。发射率取决于物体的种类和表面状况,是重要的辐射热物性参数之一。

应当指出,式(1-6)、式(1-7)中的 Φ 是物体自身向外界辐射的热流量,而不是辐射传热量,它不随环境条件变化。要计算物体与周围其他物体间的辐射传热量,还必须考虑周围物体投射到该物体上的辐射能的吸收情况,这种净辐射热量的计算是辐射传热研究的主要内容,将在后续章节中详细讨论。

【例 1-3】 暖气片表面的温度为 50°C , 表面发射率为 0.93, 散热面积为 4 m^2 。试计算该暖气片所发出的辐射能。

解 按式(1-7)计算暖气片表面发出的辐射能为:

$$\Phi = \epsilon A \sigma T^4 = 0.93 \times 5.67 \times 10^{-8} \times 4 \times (50 + 273.15)^4 = 2\,300.1 \text{ W}$$

讨论: 本题的计算结果是暖气片表面发射出去的热流量,并不是它给予房间的净热量。尽管环境温度较低,但也会以辐射的方式向暖气片发射辐射能。

以上简要介绍了热传导、热对流和热辐射三种传递热量的基本方式。然而,实际的热量传递过程往往是几种基本方式组合、共同作用的结果。例如暖气内的热水向房间内的散热过程应该由如下环节和方式构成:① 暖气片内的高温热水以对流传热的方式将热量传给暖气片内壁面;② 热量由暖气片内壁面以导热的方式传递到外壁面;③ 热量由外壁面传递到室内环境,其中包括外壁面与房间内空气间的自然对流传热过程和外壁面与房间墙壁间的辐射传热

过程。整个传递过程如图 1-2 所示。

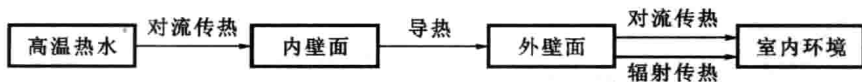


图 1-2 暖气片的散热过程

分析一个复杂的热量传递过程是由哪些热量传递环节和方式构成、各环节之间的关系如何，是对其进行定量计算的前提，也是传热学学习的基本要求。

最后指出，热量传递过程按照与时间的依变关系可分为稳态过程（又称定常过程）与非稳态过程（又称非定常过程）两大类。物体中各点温度不随时间而改变的热传递过程称为稳态过程，反之称为非稳态过程。通常热力设备在持续不变的工况下运行时所涉及的热传递过程可视为稳态过程，而在起动、停机或变工况时所经历的热传递过程称为非稳态过程。

1.4 传热过程和热阻

1.4.1 传热过程

生活和工程中的许多热量传递过程都发生在冷、热流体之间，而且一般情况下冷、热流体由固体壁面隔开。例如热水通过暖气片加热房间内空气的过程，房间内空气的热量通过墙壁向室外的散热过程，燃气通过壶壁加热水的过程等。这种高温流体将热量通过固体壁面传递给壁面另一侧低温流体的热量传递过程称为传热过程（overall heat transfer process）。

按照上面给出的传热过程定义，传热过程一般由三个热量传递环节构成：① 高温流体与固体壁面之间的对流传热；② 通过固体壁面的导热；③ 固体壁面与低温流体之间的对流传热。在稳态条件下，这三个环节的热流量是相等的。此外，传热过程中涉及的热量传递方式至少包括导热和对流传热两种。如果两侧流体有气体参与，由于热辐射可以透过气体，因此热量传递方式还应包括热辐射。

为了计算传热过程的热流量，人们仿照牛顿冷却公式提出了下面的传热方程式：

$$\Phi = kA(t_{f1} - t_{f2}) \quad (1-8)$$

式中， t_{f1} 、 t_{f2} 分别是高温流体和低温流体的温度， $^{\circ}\text{C}$ ； A 为传热面积， m^2 ； k 为传热系数（overall heat transfer coefficient）， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，在数值上它等于热、冷流体在单位温差、单位面积时的热流量。传热系数是和具体传热过程有关的过程量，它说明了传热过程的强弱程度。传热系数越大，传热过程越强。为了和对流传热过程的表面传热系数相区别，有时也将其称为总传热系数。

式(1-8)是计算传热过程的基本方程。研究传热过程的目的是确定传热系数和计算热流量。第 6 章将详细介绍一些典型的传热过程。

需要注意的是，这里的“传热过程”有其特定的含义，只有冷、热流体通过固体壁面的热量交换过程才能称为传热过程，而导热、对流和辐射中的任何一种虽然也传递了热量，但不能称为传热过程。

1.4.2 热阻

热量传递是在温差作用下热能的传递过程，自然界中还存在着其他类似的传递过程，如在