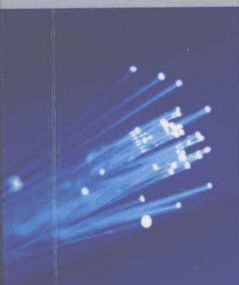


The Theoretical Foundation and Application of
Heat Transfer in Petroleum Engineering



石油工程传热学 ——理论基础与应用

■ 李兆敏 黄善波 编著

中国石油大学出版社

石油工程传热学 — 理论基础与应用

李兆敏 黄善波 编著

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

石油工程传热学:理论基础与应用/李兆敏,黄善波
编著. —东营:中国石油大学出版社,2008.7
ISBN 978-7-5636-2634-2

I. 石… II. ①李… ②黄… III. 石油工程—工程传热学
IV. TE

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 103526 号

书 名: 石油工程传热学——理论基础与应用
作 者: 李兆敏 黄善波

责任编辑: 高 颖 (电话 0546—8393394)
封面设计: 九天设计

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: 青岛星球印刷有限公司
发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0546—8392791, 8392563)
开 本: 180×235 印张: 22.5 字数: 454 千字
版 次: 2008 年 11 月第 1 版第 1 次印刷
定 价: 55.00 元

随着我国经济和社会的迅速发展,对能源特别是对石油资源的需求急剧增长。目前,在难于发现中浅层大型整装油田的情况下,迅猛增加的石油需求和不断攀升的油价使得深层、超深层油气田的开发成为可能。在深层、超深层油田的开发过程中,4 000~5 000 m 深井十分普遍,这些油井的井底温度一般在 130~180 °C 范围内,有的甚至超过了 200 °C。地面和井底上百摄氏度的温度差异对钻井、固井、采油、作业等诸多工艺过程的影响已不能再忽略。与此同时,稠油、超稠油及高含蜡原油资源也得到了进一步的重视。目前开发稠油、超稠油和高含蜡原油经济、有效的手段仍然是以注蒸汽为代表的热力采油工艺。无论是在地面还是在地下,该工艺都牵涉大量的传热问题,而且这些传热问题已成为具体工艺研究、设计和计算的关键。因此,传热学的理论与应用在石油工程中的作用越来越重要。

本书的目的在于以石油工程领域内的传热问题为应用背景,介绍传热学的基本概念和基本理论,揭示石油工程中诸多传热问题的传热机理,给出具体工艺的传热计算,这也是本书的特色。本书前五章按照传统的传热学教材模式依次介绍了传热学的基本知识、导热问题的理论与分析、对流传热的理论基础与工程计算、非牛顿流体管内流动与传热、热辐射及辐射换热。各章内容的选择和编排都紧密结合石油工程实际,如在导热中对埋地管线周围土壤内的温度场、井筒周围地层的温度场、半无限大和无限大物体内的导热等问题进行了分析;在对流传热中增加了多相流对流传热的计算、非牛顿流体对流传热的计算等。最后一章则针对石油工程中的若干具体传热问题,从传热学的角度给出了过程分析、机理阐述和计算方法。本书的针对性强,其内容的深度和广度适宜于石油工程专业的学生和现场技术人员学习和参考。

本书是作者在从事流体力学、传热学和石油工程等领域内的教学、科研活动中,在收集、查阅大量文献的基础上编写而成的。本书第四章和第六章的第六至九节由李兆敏编写,第一章、第二章、第三章、第五章和第六章的第一至五节由黄善波编写,全书由李兆敏统一定稿。本书承王弥康教授、李明忠教授审阅并提出了中肯的意见,在此表示衷心的感谢。

本书的出版得到了中国石油大学(华东)“211 工程”建设经费的资助,在此表示感谢。

限于编者水平,书中的错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2007 年 11 月

CONTENTS

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 传热学的研究对象和任务	1
1.2 传热学在石油工程中的应用	2
1.3 热量传递的基本方式	6
1.4 传热过程和热阻	8
1.5 能量守恒原理	10
第 2 章 导热问题的理论与分析	14
2.1 导热的基本概念和定律	14
2.2 导热问题的数学描述	18
2.3 一维稳态导热的分析与计算	22
2.4 温度计套管的测温分析	32
2.5 多维稳态导热及导热形状因子	35
2.6 集总参数分析法	39
2.7 一维非稳态导热分析	41
2.8 埋地热力管道周围地层的导热分析	45
2.9 半无限大物体内的非稳态导热分析	51
2.10 井筒周围地层内的导热分析	61
第 3 章 对流传热的理论基础与工程计算	79
3.1 概 述	79
3.2 对流传热问题的数学描述	84
3.3 管内一维流动和传热的基本方程式	90
3.4 边界层及边界层对流传热微分方程组	99
3.5 对流传热问题的实验研究	108
3.6 管内充分发展的层流对流传热分析	114
3.7 管内强迫对流传热的实验关联式	120
3.8 外部流动强制对流传热的实验关联式	125
3.9 管内气液两相对流传热	130
3.10 自然对流传热	137



第 4 章 非牛顿流体内流动与传热	144
4.1 非牛顿流体的物理性质	144
4.2 非牛顿流体在圆管内的流动规律	147
4.3 非牛顿流体管内层流对流传热的理论分析	162
4.4 非牛顿流体管内强制对流传热的实验关联式	168
第 5 章 热辐射及辐射传热	171
5.1 热辐射的基本概念	171
5.2 黑体辐射的基本规律	175
5.3 黑体表面间的辐射传热及角系数	180
5.4 实际物体表面的发射和吸收特性	186
5.5 基尔霍夫定律和灰体	192
5.6 灰体表面间辐射传热的计算	194
5.7 复合传热表面传热系数	202
第 6 章 综合应用专题	203
6.1 传热过程和传热方程式	203
6.2 通过大平壁的传热过程	204
6.3 换热器及换热器的热计算	213
6.4 通过圆筒壁的传热过程分析	224
6.5 地面或埋地管线的热力计算	236
6.6 石油工程中井筒内的传热分析与计算	252
6.7 油气层非等温渗流的能量方程式	295
6.8 注热流体加热油层时的传热分析	306
6.9 压裂工艺中裂缝温度场的数学模型	322
附录 1 部分金属和合金的热物理性质	330
附录 2 部分非金属材料的热物理性质	333
附录 3 部分保温材料的热物理性质	336
附录 4 部分液体的热物理性质	338
附录 5 大气压力 ($p=1.013\ 25\times 10^5\ \text{Pa}$) 下干空气的热物理性质	341
附录 6 部分材料的法向或半球向发射率 ε_n	343
附录 7 水和水蒸气的热物理性质	344
参考文献	349





第1章 绪论

1.1 传热学的研究对象和任务

传热学是研究由温度差异而引起的热量传递规律的科学。

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。当物体内部存在温度差异或温度不同的物体彼此相互接触时,就有了相对“热”和“冷”的矛盾双方,就会发生热量从温度较高地区传向温度较低地区的能量传递过程,通常称为“传热”。传递的热量虽然无法直接看到,但是传热所产生的效应是可以被观察和测定的。由于温度差广泛存在于自然界和工程领域内,因而热量传递成为自然界和工程领域内的普遍现象,传热学已经成为现代技术科学的主要基础学科之一。

虽然传热学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,但二者研究的角度是不同的。工程热力学以热力学平衡态和可逆过程为基础,主要研究热能和机械能之间相互转换的规律。它只在乎系统的初、终状态之间各参数发生了什么变化,同时认定系统与外界的热量交换是在无限小的温差下发生的一系列无限缓慢的平衡态过程。而传热学则专门研究存在温度差异时的热量传递规律,是典型的不可逆过程。传热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内容。例如,烧红的铁棒在空气中冷却时,工程热力学能计算出铁棒温度降到室温时放出的热量,但无法计算出这一过程所需要的时间,而传热学则能给出这一答案。这说明,虽然工程热力学和传热学都以热力学第一定律和热力学第二定律为基础,但在传热学中仅应用这两个定律还不够,必须引入能确定传热速率的相关规律。对这些规律的研究和应用,构成了传热学研究的基础。

众所周知,热传导、热对流和热辐射是热量传递的三种基本方式。但是在具体的传热问题中,对于究竟哪一种或哪几种传热方式起作用,热量传递的速率有多大,在给定的时间内能达到多少温度,在热量传递过程中物体的温度分布如何及温度分布如何随时间变化等诸多问题,则未必能够回答,而这些问题正是传热学所要研究的。

工程技术领域内的传热问题大致可以分为两类。一类问题是着眼于传热速率的大小及其控制。分析这类问题的目的就是计算过程的传热速率,根据实际需要强化





传热或者削弱传热。另一类问题则是着眼于温度分布及其控制。分析这类问题的目的是计算物体内的温度分布。实际上,在工程中的许多应用中,这两类问题是交织在一起的。要解决这两类问题,必须具备热传递规律的基础理论知识和分析传热问题的基本能力,掌握计算传热问题的基本方法。

和其他学科一样,在传热学的研究中也需引入一些对现象进行简化的假设。作为普遍性的假设,在本书的研究范围内始终将研究对象看做是连续介质,即物体各点的有关物理量,如温度、速度及各物性参数都是空间位置的连续函数。另外,总体而言,本书仅限于在宏观范畴内研究各类不同传热方式所遵循的基本规律。

1.2 传热学在石油工程中的应用

由于在自然界和工程技术领域内,热传递现象无时无刻不在,因而传热学在人类的生活、生产领域内的应用十分广泛。传热学原理的应用存在于人类的衣、食、住、行等各个环节,同时它的影响和应用也遍及几乎所有现代工业领域。不仅在传统的技术领域内如能源动力、化工、冶金、建筑、建材、轻工纺织、医药、航空航天、核能、农业工程存在着大量的传热问题,而且在材料、生物、医学、电子、环境工程等高新技术领域内也在不同程度上依赖于传热学的最新研究成果,因此传热学已经成为现代技术科学的主要基础学科之一^[1-3]。

作为绪论的一部分,本节扼要地介绍了石油工程中的一些典型传热问题。了解传热学在石油工程中的应用背景,有助于读者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 在钻井和固井工程中的应用

钻井是油气田开发的重要环节。被称为石油钻井工程血液的钻井液有多种功能,其中有两项重要功能: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。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。随着人们对油气资源需求量的扩大,钻井范围和难度也在不断加大。一方面,油井深度不断增加,4 000~5 000 m 深井已很普遍。这些油井的井底温度一般在 130~180 ℃ 范围内,有的甚至超过了 200 ℃,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、低产能油田和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。对深井和超深井,低压低密度钻井液流体中含有一定量的气体及其他化学药剂,这使得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。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一口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。在施工过程中,井下温度是非常重要的参数,而且随着油气井深度的增加,它的影响会日益突出。井下温度会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。计算表明^[4],当井下温度有 5℃ 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,其流变模式也将从宾汉模式向幂律模式转变。另外,井下温度还与井内压力平衡、井壁稳定、工作液体系的选择、套管强度等有关。因此,准确地预测水泥浆的井内循环温度及变化规律、影响因素,对高温高压深井的水泥浆体系设计有重要意义。要做到这些,就必须正确运用传热学原理。

1.2.2 在渗流力学中的应用

渗流力学是研究流体在多孔介质内的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的,它的应用范围广泛,能够为科学、合理地开发石油和天然气资源提供理论基础。流体在油藏岩石中的渗流特性取决于岩石的孔隙结构和润湿性、流体的粘度、流体间的界面张力等多种因素。传统的渗流力学把岩石看做是等温体,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、火烧油层及电加热方法和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,除了要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。

1.2.3 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油气藏采取一系列的工艺技术措施,使油藏流体顺利地流入井底,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^[5]。在采油工程中存在着大量的传热学问题。

如前所述,随着油藏深度的增加,油层温度也将逐渐升高。油层产液在从井底举升到地面时,产液温度沿井筒是逐渐变化的,此时井筒内流体的温度变化对其流动规律的影响已不能忽略,因此在对深井或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,它不仅应用于低渗透油气藏,而且在中、高





渗透油气藏的增产改造中也有很好的效果。随着油井压裂深度的增加,地层温度会逐渐升高。当压裂液沿井筒和裂缝流动时,会与地层发生热交换,所以压裂液在裂缝内流动时温度是变化的。在深井中,这种温度变化很明显。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,其分布广、储量大。稠油开发的主要问题是高粘度导致的流动性差。一方面,稠油的渗流阻力大,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会导致粘度进一步增加,使油井生产困难。高凝油是含蜡量高、凝固点高的原油,它的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^[5]。这种方法通过有计划地向油层注入热量,提高油层温度,从而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。

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而使流动性变差。注蒸汽工艺通常用于稠油开发,它充分利用了稠油粘度对温度非常敏感的这一特点,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少最后的残余油饱和度。注蒸汽工艺可以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。

火烧油层又称为就地燃烧,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的^[6]。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是开发稠油、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以获得较高的原油采收率,因而也是提高原油采收率的方法之一^[7]。

当稠油和高凝油由井底沿井筒被举升到地面时,由于存在着井筒热损失,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,必须对井筒采取降粘措施。其中,热力降粘技术就是常用的一种降粘措施。所谓热力降粘技术,是指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^[5,8]。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,热流体循环加热降粘工艺主要有四种形式,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等。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,以提高井筒生产流体温度的工艺技术。目前常用的电加热降粘工艺有电热杆采油工艺和伴热电缆采油工艺两种。

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,其中涉及的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 在输油工艺中的应用

我国生产的原油有 80% 以上为含蜡原油。含蜡原油的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^[9]。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,管内热水通过管壁、土壤与地面和土壤深处进行复杂的传热过程。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而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,可能会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、翔实、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。

在石油化工领域内,应用着大量的传热和传质设备。石油化工领域内的传热过程具有如下一些特点: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,传热都是非常关键的因素。

石油工业既是产能大户,又是耗能大户,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基本原因。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直接的关系。



1.3 热量传递的基本方式

根据机理的不同,热量传递有三种基本方式,即热传导、热对流和热辐射。在绪论中,首先对这三种热量传递方式进行简单的描述。

1.3.1 热传导

热传导简称导热,是指物体各部分之间不发生相对位移时,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,如将铁棒放入炉内加热时,热量从炉内一端沿铁棒传向炉外一端的过程。

导热是物质的本能。在纯导热过程中,温度不同的各部分之间不发生宏观的相对位移,也没有能量形式的转化。导热可以发生在固体、液体和气体中。通常,单纯的导热只发生在密实的固体和静止的流体中。

从微观角度看,导热是由物质的分子、原子和自由电子等微观粒子的热运动而产生的热量传递现象。气体、液体、导电固体和非导电固体的结构不同,导热机理也有所不同。气体中的导热是气体分子做不规则热运动时相互碰撞的结果。气体内部温度不同,气体分子的平均动能也就不同,不同能量水平的分子相互碰撞的结果使得热量由高温区传至低温区。类似于导电过程,导电固体内的导热依靠的是自由电子的定向运动,良导体往往是良导热体。非导电固体内的导热主要是依靠晶格结构的振动,即分子、原子在其平衡位置附近的振动实现的。晶格振动的传播通常称为弹性波。液体的导热机理比较复杂,目前还没有统一的认识。一种观点认为液体的导热同气体类似,但情况更复杂;另一种观点认为液体的导热主要依靠弹性波的作用,当前这一观点占优势。

通过如图 1-3-1 所示的固体大平壁的导热是最常见,也是最简单的一类导热问题。设平壁的厚度为 δ ,侧面积为 A ,平壁两侧的温度分别维持在 t_{w1} 和 t_{w2} ,且 $t_{w1} > t_{w2}$ 。经验表明,通过大平壁的热流量 Φ 与壁厚成反比,与侧面积和两侧温差成正比,即

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

式中, Φ 为热流量,W; λ 为比例系数,称为导热系数, $W/(m \cdot K)$,是反映物体导热能力大小的物性参数。

单位时间内通过单位面积的热流量称为热流密度。式(1-3-1)又可写为:

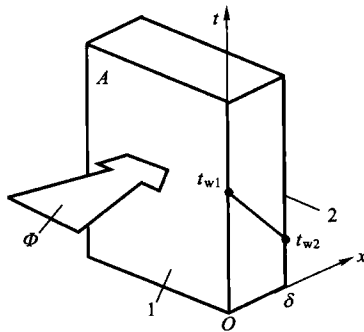


图 1-3-1 通过大平壁的导热



$$q = \frac{\Phi}{A} = \lambda \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} \quad (1-3-2)$$

式中, q 为热流密度, W/m^2 。

1.3.2 热对流

热对流是指流体(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。由于当流体中温度分布不均匀时,将本能地产生导热,因此热对流总是和流体的导热同时发生的。

如果流体的流动是由外力作用(如泵、风机等)引起的,则称为强迫(受迫)对流;如果流体的流动是由流体中的温度差所引起的密度不均匀而造成的,则称为自然(自由)对流。

在工程上,最具实际意义的是流动着的流体与所接触的物体表面之间由于温度不同而引起的热量传递过程,称为对流传热。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,因而必然受到热量传递、流体流动规律的支配,是一种十分复杂的传热现象。

对流传热过程中的热流量可以采用牛顿冷却公式计算。当流体被加热时:

$$\Phi = hA(t_w - t_f) \quad (1-3-3)$$

当流体被冷却时:

$$\Phi = hA(t_f - t_w) \quad (1-3-4)$$

式中, h 为表面传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; A 为流体和固体表面的接触面积, m^2 ; t_w , t_f 分别为固体壁面、流体的温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

由上式可见,对流传热计算的关键是确定表面传热系数。和平壁导热计算公式中的导热系数 λ 不同,表面传热系数 h 不是物性参数,而是与具体对流传热过程有关的过程量。牛顿冷却公式虽然简单,但并不意味着对流传热过程也简单。该公式将影响对流传热过程的诸多因素都集中在表面传热系数 h 上,因此对流传热研究的主要目的是确定表面传热系数。

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,物体由于自身温度的原因而产生的辐射称为热辐射。因此,热辐射是消耗物体内能的电磁辐射。

热辐射是物质的固有属性。由于自然界中所有物质的温度都大于 0 K ,因而它们都能不停地向空间发出热辐射,同时又能不断地吸收其他物体所发出的热辐射。物体之间相互发射、相互吸收热辐射的综合结果就造成了以热辐射的方式进行的能量传递,这种热量传递过程称为辐射传热。当物体与周围环境处于热平衡时,辐射传



热量为零,但物体间的发射和吸收仍在不停地进行,处于动态平衡状态。

研究表明,物体的辐射能力与物体的温度和表面性质有关。物体的温度越高,辐射能力越强。同一温度下的不同物体,其辐射和吸收能力也不同。将辐射能力最强的理想辐射体称为绝对黑体,简称黑体。黑体向周围空间发出的热辐射能量由如下的斯蒂芬-玻尔兹曼(Stefan-Boltzmann)定律计算:

$$\Phi = \sigma_b A T^4 \quad (1-3-5)$$

式中, Φ 为辐射热流量,W; A 为黑体的辐射面积, m^2 ; T 为黑体的热力学温度,K; σ_b 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数,又称黑体辐射常数,其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

斯蒂芬-玻尔兹曼定律表明,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。

实际物体的辐射能力都小于同温度下黑体的辐射能力。实际物体发射辐射能的大小可以用斯蒂芬-玻尔兹曼定律的经验修正形式计算:

$$\Phi = \epsilon A \sigma_b T^4 \quad (1-3-6)$$

式中, ϵ 为物体的发射率,习惯上也称为黑度,其值总小于1。发射率取决于物体的种类和表面状况,是最重要的辐射热物性参数之一。

式(1-3-5)和(1-3-6)计算的是物体自身向外界发射的热辐射能量,并非辐射传热量。要计算辐射传热量还必须考虑投射到物体上的辐射能量的吸收、反射情况。物体间辐射传热量的计算将在第5章详细讨论。这里介绍一种最简单的情形:一个面积为 A 、表面温度为 T_1 、发射率为 ϵ 的物体,放置于表面积极大、表面温度为 T_2 的空腔内,此时物体与空腔表面间的辐射传热量为:

$$\Phi = \epsilon A \sigma_b (T_1^4 - T_2^4) \quad (1-3-7)$$

1.4 传热过程和热阻

1.4.1 传热过程

在实际的传热问题中,常常涉及冷、热流体间的热量交换问题,而且在一般情况下冷、热流体不允许混合,因此进行热量交换的冷、热流体通常由固体壁面隔开,例如热水通过暖气片加热房间内的空气、房间内的热量通过墙壁向室外的散热过程等。这类过程的共同特点是热量由固体一侧的热流体通过固体壁面传给另一侧的冷流体。通常将这样的过程称为传热过程。

需要指出的是,在传热学中“传热过程”这一术语已被赋予了特定的内涵,只有上述热量传递过程才能称为传热过程,而导热、对流、辐射中的任一形式,虽然也传递了热量,但不能称为传热过程。

由传热过程的定义可以看出,一个传热过程至少包含导热和对流两种热量传递方

式。当固体壁面一侧的流体为气体时,除存在导热和对流以外,还有可能存在辐射。

传热过程中传递的热量采用传热方程式计算:

$$\Phi = kA(t_{f1} - t_{f2}) \quad (1-4-1)$$

式中, k 为传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。 k 在数值上等于冷热流体温差 1°C 时通过单位面积的热流量,它表征了传热过程的激烈程度,与具体的过程有关。

1.4.2 热阻

由于温差是普遍存在的,因此热量传递就成为自然界中非常普遍的传递现象。热量传递和自然界中的其他传递现象如电量的转移有类似之处,研究时可以互相借鉴。在这些过程中,遵循的共同规律是:

$$\text{过程中的转移量} = \frac{\text{过程的动力}}{\text{过程的阻力}} \quad (1-4-2)$$

这个规律在电学中的应用便是大家熟知的欧姆定律。在传热学中,热量传递过程写成上式的形式为:

$$\text{热流量 } \Phi = \frac{\text{温度差 } \Delta t}{\text{热阻 } R_t} \quad (1-4-3)$$

式中,热流量 Φ 可比作电流;温度差 Δt 可比作电位差;热阻 R_t 可比作电阻。

由式(1-4-3)可见,只要知道了热阻,就可以很容易地求出热流量。热阻是热量传递过程中的阻力,热量传递过程不同,热阻就不同。对于导热过程,前述的通过大平壁的导热热量计算公式可以改写为:

$$\Phi = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta/(\lambda A)} = \frac{\Delta t}{R_\lambda} \quad (1-4-4)$$

和

$$q = \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta/\lambda} = \frac{\Delta t}{r_\lambda} \quad (1-4-5)$$

式中, $R_\lambda = \delta/(\lambda A)$, 为通过面积 A 的导热热阻, K/W ; $r_\lambda = \delta/\lambda$, 为单位面积的导热热阻, $\text{K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$ 。

将对流传热的牛顿冷却公式改写为:

$$\Phi = \frac{t_w - t_f}{1/(hA)} = \frac{\Delta t}{R_h} \quad (1-4-6)$$

和

$$q = \frac{t_w - t_f}{1/h} = \frac{\Delta t}{r_h} \quad (1-4-7)$$

式中, $R_h = 1/(hA)$, 为表面传热热阻, K/W ; $r_h = 1/h$, 为单位面积的表面传热热阻, $\text{K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$ 。

将传热方程式改写为:

$$\Phi = \frac{t_{f1} - t_{f2}}{1/(kA)} = \frac{\Delta t}{R_k} \quad (1-4-8)$$

和

$$q = \frac{\Delta t}{1/k} = \frac{\Delta t}{r_k} \quad (1-4-9)$$

式中, $R_k = 1/(kA)$, 为传热过程的传热热阻, K/W ; $r_k = 1/k$, 为单位面积的传热热阻, $\text{K} \cdot \text{m}^2/\text{W}$ 。

从各热阻的表达式可以看出, 热阻和单位面积热阻间的关系为:

$$\left. \begin{aligned} r_\lambda &= AR_\lambda \\ r_h &= AR_h \\ r_k &= AR_k \end{aligned} \right\} \quad (1-4-10)$$

与电学中用电路图表示欧姆定律相似, 传热学中引入热路图表示传热体系中的热量传递与温差、热阻间的关系。最简单的热路图如图 1-4-1 所示。

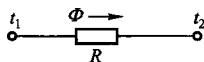


图 1-4-1 简单的热路图

在利用热路图分析传热问题时, 可以直接利用直流电路分析中的相关原则, 这会使问题大大简化。例如对前述的稳态传热过程, 热量从壁面一侧的高温流体传向另一侧的低温流体, 其传热过程为: 高温流体首先以对流传热的方式将热量传给固体壁面, 然后在固体壁内以导热的方式将热量传到壁面的另一侧, 另一侧壁面又以对流传热的方式将热量传给低温流体。这显然是一个串联的过程, 传热过程的总热阻等于三个串联环节的热阻之和。根据电路串联的原理, 可以画出传热过程的串联热路图, 如图 1-4-2 所示。

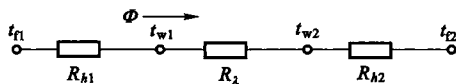


图 1-4-2 平壁传热过程的热路图

1.5 能量守恒原理

能量守恒原理是自然界中普遍遵循的基本原理之一, 也是分析传热问题、建立传热问题数学模型的基本依据。从某种意义上说, 一切传热问题所遵循的基本规律只有两个: 一是描述特定传热问题的特殊规律, 二是能量守恒原理, 也就是能量转化与守恒在传热学中的具体应用^[2]。

能量守恒原理在传热学中的应用依分析对象的不同而不同。传热学中常用的分