



高等学校建筑环境与能源应用工程专业
“十三五”规划·“互联网+”创新系列教材

Fundamental and Application of Heat and Mass Transfer

热质交换原理与设备

郝小礼 孔凡红 刘建龙 张振迎 主编

| 虚拟化 | 移动化 | 数据化 |
| 个性化 | 精准化 | 场景化 |



扫描书中的二维码，阅读丰富的工程图片，演示动画，
操作视频，工程案例，拓展知识，三维模型……



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

REZHI JIAOHUAN
YUANLI YU SHEBEI

高等学校建筑环境与能源应用工程专业
“十三五”规划·“互联网+”创新系列教材

热质交换原理与设备

郝小礼 孔凡红 刘建龙 张振迎 主编



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

长沙

图书在版编目 (C I P) 数据

热质交换原理与设备 / 郝小礼等主编. --长沙:

中南大学出版社, 2019. 1

ISBN 978 - 7 - 5487 - 3453 - 6

I. ①热… II. ①郝… III. ①传热传质学—高等学校—教材 ②换热器—高等学校—教材 IV. ①TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 239504 号

热质交换原理与设备

郝小礼 孔凡红 刘建龙 张振迎 主编

-
- 责任编辑 刘颖维
责任印制 易红卫
出版发行 中南大学出版社
社址: 长沙市麓山南路 邮编: 410083
发行科电话: 0731 - 88876770 传真: 0731 - 88710482
印 装 长沙雅鑫印务有限公司
-

- 开 本 787 × 1092 1/16 印张 14 字数 356 千字
版 次 2019 年 1 月第 1 版 2019 年 1 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 3453 - 6
定 价 49.00 元
-

图书出现印装问题, 请与经销商调换



高等学校建筑环境与能源应用工程专业
“十三五”规划·“互联网+”创新系列教材编委会

主 任

廖胜明 杨昌智 王汉青

副主任(按姓氏笔画排序)

王春青 周文和 郝小礼 曹小林 寇广孝

委 员(按姓氏笔画排序)

王志毅 方达宪 向立平 刘建龙 齐学军

江燕涛 孙志强 苏 华 杨秀峰 李 沙

李新禹 余克志 谷雅秀 邹声华 张振迎

陈 文 周乃君 周传辉 黄小美 隋学敏

喻李葵 傅俊萍 管延文 薛永飞

秘 书

刘颖维(中南大学出版社)



出版说明

Publisher's Note

遵照《国务院关于印发“十三五”国家战略性新兴产业发展规划的通知》(国发[2016]67号)提出的推进“互联网+”行动,拓展“互联网+”应用,促进教育事业服务智能化的发展战略,中南大学出版社理工出版中心、中南大学廖胜明教授,湖南大学杨昌智教授,南华大学王汉青教授等共同组织国内建筑环境与能源应用工程领域的一批专家、学者组成了“高等学校建筑环境与能源应用工程专业‘十三五’规划·‘互联网+’创新系列教材”编委会,以共同商讨、编写、审定、出版这套系列教材。

本套教材的编写原则与特色:

1. 新颖性

本套教材打破传统的教材出版模式,融入“互联网+”“虚拟化、移动化、数据化、个性化、精准化、场景化”的特色,最终建立多媒体教学资源服务平台,打造立体化教材。并采用“互联网+”的形式出版,其特点为:扫描书中的二维码,阅读丰富的工程图片,演示动画,操作视频,工程案例,拓展知识,三维模型等。

2. 严谨性

本套教材以《高等学校建筑环境与能源应用工程本科指导性专业规范》为指导,教材内容是在严格按照规范要求的基础上编写、展开和丰富的,精益求精,认真把好编写人员遴选关、教材大纲评审关、教材内容主审关。另外,关于本套教材的编辑出版,中南大学出版社将严格按照国家相关出版规范和标准执行,认真把好编辑出版关。

3. 实用性

本套教材主要针对21世纪学生的知识结构与素质特点,以应用型人才培养为目标,注重理论知识与案例分析相结合,传统教学方式与基于现代信息技术的教学手段相结合,重点培养学生的工程实践能力,提高学生的创新素质。

4. 先进性

本套教材既要能突出建筑环境与能源应用工程专业理论知识的传承,又要尽可能全面反映该领域的新理论、新技术和新方法。本着面向实践、面向未来、面向世界的教育理念,培养符合社会主义现代化建设需要,面向国家未来建设,适应未来科技发展,德智体美全面发展以及具有国际视野的建筑环境与能源应用工程专业高素质人才。

本套教材不仅仅是面向建筑环境与能源应用工程专业本科生的课程教材,还可以作为其他层次学历教育和短期培训教材,以及广大建筑环境与能源应用工程专业技术人员的专业参考书。由于我们的水平和经验有限,这套教材可能会存在不尽人意的地方,敬请读者朋友们不吝赐教。编审委员会将根据读者意见、建筑环境与能源应用工程专业的发展趋势和教学手段的提升,对教材进行认真的修订,以期保持这套教材的时代性和实用性。

编委会
2019年1月



前言

Preface

“热质交换原理与设备”是建筑环境与能源应用工程专业的一门重要的专业平台课，它比专业基础课(如流体力学、传热学、热力学等)更靠近专业知识，又比专业课(如空气调节、制冷技术、供热工程等)对理论知识有更深的要求。所以，它是专业基础课和专业课之间的一座桥梁，内容有一定的理论深度，要求学生将理论应用于分析专业中的具体问题。根据本课程的这种特殊要求，在现有教材基础上，结合多年的教学经验，组织编写了这本教材。

本教材共包括七章，其中第1章为绪论，概要性地讲述三种传递现象与传递机理。第2、3章分别讲述传质的两种方式——扩散传质与对流传质的基本原理与传递规律。第4章讲述热质同时传递规律及其相互影响。第5、6、7章结合建筑环境与能源应用工程专业的需要，将热质交换原理用于分析本专业的具体问题。其中，第5章讲述空气热湿处理的常用方法，以及空气处理过程中的热质传递问题。第6、7章分别介绍了本专业常见的直接和间接接触式热质交换设备的原理和热工计算方法。本书前四章是理论基础，后三章是热质传递理论在本专业的应用。

本书在的编写过程中，试图将各种新技术介绍给学生，以开拓学生的视野，同时注重文字表述上的通俗易懂、深入浅出。本书具有四个特点：①强调将热质传递理论用于分析生活和专业中的传递问题，书中给出了大量的发生在学生身边的传递现象，通过分析这些问题，可以帮助学生更好地理解传递理论。②增加了多种新技术，如间接蒸发冷水机组、能源塔、露点蒸发器、溶液除湿机等，在讲授热质传递理论的同时，帮助学生了解这些新技术。③每章均提供了大量的课后复习思考题，供学生课后复习思考，帮助学生更好地理解和掌握书本知识。④融入“互联网+”技术，将大量的相关信息放置在云平台上，既可缩小纸质教材的篇幅，又可帮助学生拓宽知识，加深理解。

本书可作为普通高校建筑环境与能源应用工程专业课程教材，亦可供函授、夜大同类专业使用。同时，也可作为相关专业工程技术人员设计、施工、运行管理时的参考用书。

本书由湖南科技大学郝小礼编写第1章、第4章和第7章，中南大学孔凡红编写第2章和第3章，湖南工业大学刘建龙编写第6章，华北理工大学张振迎编写第5章。全书由郝小礼负责统稿和校对。书中第1章、第4章、第6章、第7章二维码内容由郝小礼负责编写，第2章、第3章二维码内容由孔凡红负责编写，第5章二维码内容由张振迎、郝小礼共同编写。

由于编者水平有限，书中存在的错漏和不妥之处，恳请广大专家和读者予以指正，不胜感激！

作者

2018年12月

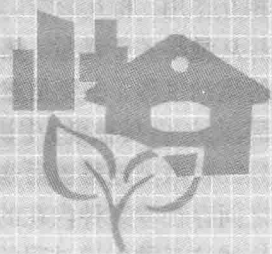


目录

Contents

第1章 传递现象与传递机理	(1)
1.1 传递现象	(1)
1.2 传递机理	(6)
本章小结	(13)
复习思考题	(13)
第2章 扩散传质	(14)
2.1 扩散传质现象与基本概念	(14)
2.2 传质通量	(17)
2.3 稳态扩散传质	(22)
2.4 建筑环境领域扩散问题分析	(32)
本章小结	(35)
复习思考题	(36)
第3章 对流传质	(38)
3.1 对流传质的基本理论	(38)
3.2 边界层理论及其意义	(43)
3.3 对流传质方程	(46)
3.4 对流传质微分方程在特定条件下的求解	(53)
3.5 三种传递现象之间的类比	(57)
3.6 对流传热传质准则关联式及其应用	(62)
3.7 相际间的传热传质模型	(68)
本章小结	(70)
复习思考题	(72)
第4章 热质同时传递	(76)
4.1 薄膜热质交换模型	(76)
4.2 热质同时传递时对流换热系数与对流传质系数之间的关系	(78)

4.3	热湿同时传递时的刘伊斯关系	(78)
4.4	表面上传质对传热的影响	(80)
4.5	热质同时传递问题分析	(84)
	本章小结	(92)
	复习思考题	(93)
第5章	空气热湿处理方法	(96)
5.1	空气热湿处理途径	(97)
5.2	空气与水直接接触式热湿处理	(101)
5.3	间接接触式热湿处理	(108)
5.4	用固体吸附剂对空气进行除湿处理	(112)
5.5	用液体吸湿剂对空气进行热湿处理	(120)
	本章小结	(125)
	复习思考题	(126)
第6章	直接接触式热质交换设备	(128)
6.1	喷水室	(128)
6.2	冷却塔	(133)
6.3	直接蒸发冷却器	(144)
6.4	固体除湿空调系统	(147)
6.5	吸附式空气净化器	(150)
6.6	溶液除湿机与液体除湿空调系统	(151)
	本章小结	(155)
	复习思考题	(155)
第7章	间接接触式热质交换设备	(157)
7.1	间壁式换热器	(157)
7.2	间接蒸发冷却器与间接蒸发冷却空调系统	(171)
7.3	间接蒸发冷水机组	(180)
7.4	蒸发式冷凝器	(189)
7.5	闭式能源塔	(196)
	本章小结	(200)
	复习思考题	(200)
附 录	(203)
参考文献	(215)



第 1 章 传递现象与传递机理

传递理论作为定量把握自然过程的方法,涉及很多工程领域,它是一门从统一的观点出发,解析现象变化和方向的重要应用理论学科。传递现象的理论可为已有设备的改良和新设备的开发提供理论基础,对过程设计开发、生产操作及控制优化、过程机理分析等都有着重要指导意义。

完全不同的传递现象,其在传递规律上却具有极大的相似性,之所以存在这种相似性,在本质上是由于其内在的微观传递机理是相同的,因此,表现出外在的相似性。本章将简要介绍传递现象的研究与分析方法,讲述传递现象的两种微观传递机理及其数学描述,使读者能够在微观机理上理解传递现象的本质。

1.1 传递现象

传递现象是自然界和工业生产中普遍存在的现象,考察的是物系内部某物理量从高强度区域自动地向低强度区域转移的过程。对于物系中每一个具有强度性质的物理量(如速度、温度、浓度)来说,都存在着相对平衡的状态。当物系偏离平衡状态时,就会发生物理量的转移过程,使物系趋向新的平衡状态,所传递的物理量可以是质量、能量、动量或电量等。不论是哪种传递现象,其始终遵从热力学第一定律和第二定律。现象传递的数量,遵从热力学第一定律,即保持传递过程中物理量数量上的守恒。现象变化的方向遵从热力学第二定律,换言之,也可以说现象总是向着熵增的方向进行。例如物系内温度不均匀,则热量将由高温区向低温区传递,从高温区传出的热量,在数量上等于低温区传入的热量,总量上保持不变。但在热量传递的过程中,总熵是增加的,也就是说热能品位发生了下降。

1.1.1 传递现象的研究发展历程

作为一门独立的学科,传递现象理论形成于 20 世纪中期。随着化工“单元操作”被了解得更加深入,人们发现不同单元操作之间存在着共性。如过滤显然只是流体流动的一个特例;蒸发只不过是传热的一种形式;萃取和吸收操作中都包含有物质的转移或传递过程;蒸馏和干燥则是热量和质量传递同时进行的过程。可以说,单元操作只不过是热量传递、质量传递和动量传递的特例或特定的组合。对单元操作的任何进一步研究,最终都归结为对动量、质量和热量传递的研究。

在自然界和工程技术领域中,广泛地存在着动量、热量和质量的传递,对于建筑环境与能源应用工程专业来说,关心更多的也是动量、热量和质量传递,我们把动量、热量和质量

传递简称为“三传”。在现实中,这些传递可能是发生在同一个物体内部,也可能发生在不同物体之间。有时可能只发生一种形式的传递,有时又可能是多种形式的传递同时发生,而且相互作用,相互影响。

最早关于动量、热量和质量这三种传递现象的讲授是分开进行的。动量的传递涉及流体的流动过程,主要是在《流体力学》中讲授。热量的传递与热传导、热对流等传热过程有关,因而是在《传热学》中讲授。而质量传递则主要是在《传质学》中进行讲授,主要关注的是物质的扩散与迁移。后来,随着研究的不断深入,人们发现,动量传递、热量传递和质量传递之间存在着某种内在的类似性,不同的传递过程不但可以用相似的数学模型进行描述,而且描述这三种传递过程的一些物理量之间还存在某些定量关系。美国人伯德(R. B. Bird)等首先在1958年出版了*Notes on Transport Phenomena*一书,主要目的是作为威斯康星大学化工系的必修课教材,后来又于1960年出版了经典的*Transport Phenomena*(《传递现象》)一书,系统阐述了传递现象的基本原理,研究了动量传递、热量传递和质量传递之间的类似性。伯德在其*Transport Phenomena*一书中,将这三种传递过程统称为传递现象,并对三种传递现象进行了归纳总结,系统地阐述了传递现象的基本原理,采用统一的方法对三种传递现象进行研究和描述,奠定了传递理论的基础。

1.1.2 生活中的传递现象

除了在工农业生产中广泛存在三传现象外,三传现象在我们的日常生活中也无处不在。例如:夏天天气炎热,吹电扇可以让我们感觉凉爽一些,在吹电扇的时候,我们发现,除了正对着电扇的地方有风之外,在正对电扇旁边一点,也同样有吹风的感觉,这是为什么呢?这是动量传递引起的。在电扇的驱动下,风流以一定的速度从风扇流出,这部分风流具有较高的动量,而旁边的风流处于静止状态,动量为零,这样,就存在动量不均匀,所以,动量就会从电扇中心的位置,向旁边动量低的地方扩散,使得旁边原本静止的流体,也具有一定的动量,从而具有一定的流动速度,所以,即使不是正对着电扇,在电扇旁边一点,同样会感到有一定风流。动量传递的实例还有:高速旋转的砂轮,其周边会产生一股旋转的诱导气流;高速奔驰的列车,旁边会有很高的气流流动;等等,这些都是动量传递的结果。

冬天,同学们坐在教室里会感觉手冷,有同学买来了暖手宝,握着暖手宝,感觉手暖和多了。这是一个热量传递的实例,由于暖手宝在充电之后,能量增加,温度升高,所以具有更高的热量,而我们的手温度较低,具有较低的热量,当手与暖手宝接触时,热量就会从热量高的暖手宝向热量低的我们的手传递,使得我们的手热量增加,温度增高,所以我们的手就感觉暖和一些。同样的实例还有:夏天在空调房间感觉凉快、冬天在空调房间感觉暖和;冬天洗个热水澡,感觉全身温暖;握着刚倒满开水的水杯感觉烫手;等等,这些例子都说明了热量的传递,热量会从热量高的地方自发地向热量低的地方传递。

也许不少同学喜欢吃腌菜,其实,腌菜的过程,是一个质量传递过程。腌制是最常用的食品加工技术,食品的腌制过程,实际上是物质扩散和渗透相结合的过程。当对食品进行腌制时,相当于将细胞浸入食盐溶液中,食品外部溶液和食品组织细胞内部溶液之间存在浓度差,借助溶剂的渗透过程及溶质的扩散过程而发生质量传递,逐渐趋向平衡,当浓度差逐渐降低直至消失时,扩散和渗透过程就达到平衡。食品的腌制过程主要包括了两个传质过程:一个是盐从溶液中扩散进入食品组织内,另外一个食品中的水渗透到溶液中去。这样,食

品中的盐浓度增加了,而食品动植物组织细胞内水分减少,食品变咸。盐溶液在向食品中传质的同时,也向食品包含的微生物细胞内渗透,因而腌渍不但阻止了微生物向食品吸收营养物质,也使微生物细胞脱水,正常生理活动被抑制,从而起到食品防腐的作用。

除了腌菜过程,现实生活中还有很多其他的质量传递过程发生。比如:春天,当我从花丛旁边经过时,感觉到花香扑鼻;妈妈在厨房炒菜时,忘了打开油烟机,满屋子都是炒菜的味道;在水杯中放入一勺子白糖,白糖慢慢地不见了,而整杯水都变甜了;把煤堆放在墙角,过一段时间,发现墙壁变黑了;还有,金属加工工艺中,对金属表面进行渗碳以提高零件强度、冲击韧性和耐磨性的过程,也是一种质量传递过程。传质过程可以发生气体中,也可发生在液体中,还可以发生在固体中。

除了单独发生动量传递、热量传递和质量传递之外,很多时候是两种、甚至是三种传递同时发生。例如,用电饭煲煮饭的过程,就是热量传递和质量传递同时发生的过程。电饭煲是具有自动断电功能的煮饭常用炊具,电饭锅的使用简单方便,只需要将生米和水加入内胆,按下开关,就完全不用管了。当米饭蒸熟的时候,电饭锅会自动断电,防止“焦饭”。米饭煮熟的过程中包括两类传递过程:①水传质进入米粒内部被淀粉组织吸收的质量传递过程;②电加热丝将热量通过内胆传给锅内的水和米,使得整体加热到 100°C 的热量传递过程。通常情况下,这两类传递过程是同时进行的。电饭煲煮饭包括以下四个过程:①加热阶段,锅内的温度在达到 100°C 前,基本随时间增加而温度上升,这时水分和被加热的内胆直接接触从而被加热。而生米是泡在水中的,所以米饭的热是通过水传递过来的,避免了局部过热导致的“焦饭”。同时,由于泡在水中,水分逐渐通过生米的表面向其内部渗透。这一阶段中,水分的传质系数随着温度的升高逐渐上升。②恒温阶段,随着加热的不断进行,锅内温度达到水沸点温度。此时锅内还有液态水存在,会发生沸腾现象,故温度不再上升。这一阶段,水分逐渐向气相传递,以蒸汽的形式喷出电饭锅。同时,在沸点温度下的传质系数达到最高,水分以较快的速度进入米粒内部,很快就可以使传质达到平衡,也就是米饭煮熟了。③随着内胆中的液态水减少直到消失,这时,温度可以继续上升,故锅内温度出现了上升。这个阶段中,外界的液态水消失,随着温度升高,米饭内部的水分会反向外传递,类似于干燥过程,米粒吸热,而水分传递到气相中。这时,电饭锅感应到温度上升,磁铁消磁,就会切断电源。如果不切断电源继续加热,底部受热不均匀的米粒将内部的水分蒸发完之后,就会出现“焦饭”的现象。④保温阶段,断电后,系统温度缓慢下降,电饭锅会将温度控制在 60°C 左右,对已经蒸熟的米饭进行保温。可见,简单的一个电饭煲煮饭过程,包含着复杂的热传、传质过程,两种传递现象同时发生。

除了以上介绍的几种传递知识之外,在我们生活中还存在着各种各样的三传现象,同学们在生活中,要注意发现这些问题,并用本门课程所讲述的理论知识来分析、解释这些身边发生的动量、热量、质量传递问题。

1.1.3 传递现象的分析和描述

传递现象可以从三种不同的尺度上进行分析和描述,即:分子尺度、微团尺度和设备尺度。在不同尺度上运用守恒原理对传递规律进行分析是传递现象研究的主要内容。

分子尺度上的传递:主要考察由于分子运动所引起的动量、热量和质量的传递。它以分子运动论为基础,借助统计学的方法,建立各物理量传递规律,比如流体力学中介绍的牛顿

黏性定律、传热学中介绍的傅立叶定律和传质学中介绍的斐克定律(Fick's law)。从宏观上描述物质分子传递特性的三个物性参数分别为动量扩散系数(流体力学中又称为运动黏度)、热量扩散系数(传热学中又称作导温系数)、质量扩散系数。这三个参数是物性参数,只与物质种类、所处的状态有关,与流动状态、空间结构形式无关。

微团尺度上的传递:主要考察由大量分子所构成的流体微团运动所造成的动量、热量和质量的传递。微团又称流体质点,其尺寸远小于运动空间。微团将流体视为连续介质,忽略流体分子间存在的间隙,从而可使用连续函数的数学工具,从守恒原理出发,以微分方程的形式,建立描述传递规律的连续性方程、运动方程、能量方程和扩散方程,通过求解这些微分方程得到速度分布、温度分布和浓度分布。当流体做湍流运动时,也可以用三个参数分别描述与流体微团运动有关的传递特性:涡流动量扩散系数(又称涡流黏度)、涡流热量扩散系数和涡流质量扩散系数。这些传递特性参数不仅与物质种类和状态有关,还与流动状况、设备结构等有关,不是物性参数。

设备尺度上的传递:主要考察流体在设备中的整体运动所导致的传递现象,它以守恒原理为基础,在一定范围内进行总体平衡。描述设备尺度上的传递特性也可以用三个参数来表述:分别为摩擦阻力系数、传热系数和传质系数。这些传递特性参数既与流体特性密切相关,又与流动条件直接有关,所以同样也不是物性参数。

以上三种尺度上的传递现象相互联系,彼此相关,一般小尺度上的传递规律是研究下一级更大尺度上的传递现象的基础。

实际求解传递过程,一般是从守恒定律出发,求出相应的速度分布、温度分布、浓度分布,然后由这些分布相应求出摩擦阻力系数、传热系数和传质系数。传递现象之所以采用这样的步骤求解,是由于既然有传递发生,就应该有相应的推动力,而要形成推动力就必然要有对应的物理量分布。

分析传递现象可通过以下步骤进行:对传递现象进行物理分析,建立并化简数学模型,给定初始条件和边界条件(对于稳态传递过程,由于被传递的物理量不随时间变化,因此无须给出初始条件),通过数学运算解决实际问题。可见,给定初始条件和边界条件,对于传递现象的研究,是必不可少的环节。为解决某一个具体传递过程,必须用定解条件对方程组加以限制或约束,从而使具有普遍意义的方程转化为针对某一个具体问题的方程。因此,一个完整的数学模型,除了数学模型本身以外,还应当包括与之相适应的定解条件(包括初始条件和边界条件)。通过求解这些模型方程得到解析解或数值解,用以分析和解释物理现象,得出结论,并用来指导实践。

1.1.4 传递现象的基本研究方法

归纳起来,传递现象的研究方法主要有三种,即理论分析方法、实验研究方法和数值计算方法。

1. 理论分析方法

理论分析方法一般包括三个步骤:

第一步:建立简化的物理模型。这是理论研究方法最关键也是最困难的一步。建立模型的关键,并不在于无所不包地把各种因素都考虑和罗列进去。这不仅会使问题复杂化而得不

到解决,而且也是不必要的。恰恰相反,应当尽可能合理地对问题进行简化,使之易于求解而又符合实际。当然要能正确地做出这种简化,需要对过程实质有深入的认识,而这一点正是问题的关键。模型的优劣也取决于对过程简化的合理性,要求做到简化而不失其真实性,使简化能满足应用要求,同时又能适应当前的实验条件,以便能进行模型鉴别和参数估计。另外,简化也要能适应现有计算能力。

第二步:建立数学模型。针对简化的物理模型,建立描写传递规律的微分方程组,并给出相应的初始条件和边界条件。数学模型建立之后,就将一个物理问题转变成了数学问题。

第三步:数学求解。利用各种数学工具(主要是偏微分方程、常微分方程、复变函数、近似计算等),求解数学模型的精确解析解或者近似解,并将结果和实验或观察资料相对照,确定解的准确程度及其适用范围。

2. 实验研究方法

实验研究方法在研究传递现象时也广泛使用。一方面,需要利用实验数据,对简化模型理论计算结果的正确性和可靠性进行检验。另一方面,当所研究的问题极其复杂,可靠的简化模型不容易建立,或者虽有模型,但因方程复杂,或者边界条件极其复杂,问题难于求解时,就只能依靠实验来确定过程变量之间的关系。一般是用因次分析和相似理论方法,通过实验来建立传递过程中各无因次准则数之间的函数关系,即建立过程的准则关联式,这是工程上经常采用的一种基本方法。

实验研究能够在与所研究的问题基本相同的条件下进行观测和实验,因此,通过实验所得出的结果一般来说是可靠的。但实验研究方法也存在以下缺点:实验方法往往受到模型尺寸的限制,实验过程中边界影响不能完全与实际过程相一致,实验研究往往需要消耗大量的人力、物力和财力。

3. 数值计算方法

数值计算方法是在20世纪60年代初发展起来的。由于数学发展水平的制约,理论研究方法往往只能局限于比较简单的物理模型。生产技术的日益提高,要求能研究更复杂、更符合实际的过程。高速电子计算机的出现,以及一系列有效的近似计算方法(如有限差分法、有限元法等)的发展,使数值计算在传递现象的研究中成为与理论研究和实验研究具有同等重要意义的研究方法,由此产生了计算流体力学、计算传热学等新的学科分支。数值方法的优点是能够解决理论研究无法解决的复杂流动、传热传质问题,和实验相比,所需费用和时间都较少,但有较高的精度。有些在实验室里无法实施的实验,却可采用数值方法来模拟。

综上所述,理论、计算和实验这三种方法各有利弊,互相依托,互相补充。实验用于检验计算结果的正确性和可靠性,提供建立物理模型的依据;而理论则能指导计算和实验,使之能够进行得富有成效,并且可以把部分实验结果推广到没有做过实验的一类问题中去;计算则可以弥补理论和实验的不足。理论、计算和实验这样不断相互补充,支撑着传递现象研究向前不断深入。

1.2 传递机理

当所研究的系统中存在速度梯度、温度梯度和浓度梯度时,会相应地发生动量、热量和质量的传递。传递的方式有两类,一类是分子传递,另一类是涡流传递。层流流动、导热和分子扩散都属于分子传递;湍流流动、湍流传热和湍流传质则属于涡流传递。下面将着重讨论分子传递的机理,分析三种分子传递现象的共性规律,建立分子传递规律的数学描述,最后简要介绍涡流传递机理与数学描述。

1.2.1 分子传递机理与数学描述

分子传递,广义地说,是由于分子不规则热运动的结果。例如对于流体,由于分子的不规则热运动,引起分子在各流层之间进行交换,如果各流层的速度、温度和浓度不同,就会在各流层之间产生动量、热量和质量传递。这三种传递现象有着共同的物理本质,都是由于分子热运动引起的传递现象。流体的黏性、分子热传导、分子质量扩散统称为分子传递。下面分别讨论分子动量传递、分子传热(导热)和分子传质的机理和数学描述。

1. 分子传递机理

分子动量传递机理可通过图 1-1 进行说明。如图 1-1 所示,假设沿 x 轴方向流动的相邻两层流体 1 和 2,其流速分别对应为 u_1 和 u_2 ,假设 $u_1 > u_2$ 。由于速度不同,两层流体在 x 轴方向上的动量也不同。由于流体分子无规律的热运动,流体层 2 中速度较慢的流体分子有一部分进入到速度较快的流体层 1 中,这些慢速运动的分子在 x 轴方向具有较小的动量,当它们与速度较快的流体层 1 内的分子相碰撞时,速度较快的流层 1 内的分子便把动量传递给由流层 2 进入的速度较慢的分子,并使流层 1 内的分子速度降低,动量减小。同时,速度较快的流体层 1 中也有同量的分子进入流速较慢的流体层 2 中,通过分子碰撞,使得流层 2 内的分子加速,动量增加。于是,由于流体层 1、2 之间的分子交换,使动量从高速流层向低速流层传递,实现了分子动量传递。分子动量传递的结果是产生阻碍流体相对运动的剪切力。这种传递一直达到固定的壁面,流体向壁面传递动量的结果,出现了壁面处的剪应力,成为壁面抑制流体运动的阻力。由此可见,动量传递是由于流体内部速度不均匀造成的,动量传递的方向是从流速大的区域传递到流速小的区域。

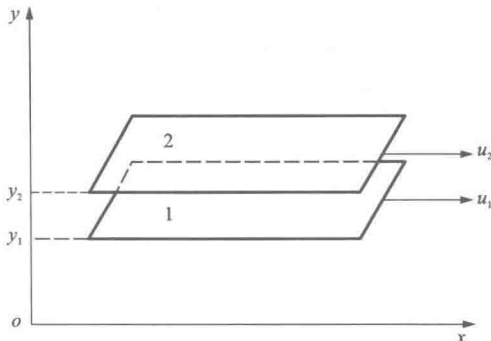


图 1-1 层流时分子动量传递机理

气体、液体和固体的导热机理不尽相同。

气体的导热是气体分子做不规则热运动时互相碰撞的结果。气体分子的动能与其温度有关，高温区的分子具有较大的动能，速度较大，当它们运动到低温区时，便与该区的分子发生碰撞，其结果是热量从高温区转移到低温区，从而实现以导热的方式进行热量传递。

液体的导热有两种理论。一种理论认为：液体的导热机理与气体的相同，差异在于液体分子间距较小，分子间的作用力对碰撞过程的影响较大，因而其机理变得更复杂。另一种理论则认为：液体的导热机理类似于非导电体的固体，即主要靠原子、分子在其平衡位置上振动，从而实现热量由高温区向低温区转移。



分子传递机理

固体的导热机理是晶格振动和自由电子的迁移。在非导电的固体中，导热是通过晶格振动(即原子、分子在其平衡位置附近振动)来实现的。对于良好的电导体，类似气体的分子运动，自由电子在晶格之间运动，将热量由高温区传向低温区。由于自由电子数目多，因而它所传递的热量多于晶格振动所传递的热量，这就是良好的电导体一般都是良好的导热体的原因。

浓度差、温度差、压力差、电场或磁场等都可能引起分子质量扩散。一般把由温度差引起的分子传质称为热扩散传质；由压力差引起的分子传质称为压力扩散传质；由电场或磁场等外力导致混合物组分受力不均所引起的扩散称为强制扩散传质。本书只介绍由浓度差引起的分子扩散传质。分子扩散在气相、液相和固相中均可发生。其扩散机理与导热类似，从本质上说，它们都是依靠分子的随机运动而引起的转移行为，不同的是前者为质量转移，而后者则是热量转移。研究质量传递的方法与研究热量传递的方法相似。在质量浓度梯度比较小，质量交换率比较小的场合，传质现象的数学描述与传热现象是类似的。在一定条件下，可以通过类比，把由传热所得到的结果直接用于传质。

2. 三种分子传递现象的数学描述

描述分子动量传递规律的定律是牛顿黏性定律。根据流体力学的知识，牛顿黏性定律为：

$$\tau = -\mu \frac{du}{dz} \quad (1-1)$$

式中： τ 为黏性切应力， N/m^2 ； μ 为流体的动力黏度系数， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ； u 为流体沿 x 轴方向的运动速度， m/s ，如图 1-2 所示； z 为垂直于运动方向的坐标， m ； $\frac{du}{dz}$ 为垂直于运动方向的速度梯度，或称为速度变化率， $1/\text{s}$ 。

从表面上看，牛顿黏性定律似乎与动量传递没有什么关系，然而，让我们分析一下黏性切应力 τ 的量纲。 τ 的单位是 N/m^2 ，其可进一步表示为：

$$\text{N/m}^2 = \frac{\text{kg} \cdot \text{m/s}^2}{\text{m}^2} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m/s}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

上式中，分子是质量乘以速度的单位，也就是动量的单位。因此，从量纲分析可以看出， τ 是单位时间内，通过单位面积传递的动量，所以， τ 又可以称为动量通量。可见，牛顿黏性定律的确与动量传递有关，这从下面的实验也能得到一些解释。

如图 1-2 所示，设有上下两块平行放置、面积很大而相距很近的平板，板间充满了黏性

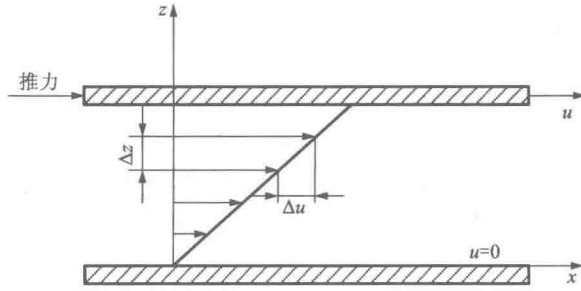


图 1-2 平板间的流体速度分布

流体。若将下板固定，而对上板施加一个恒定的外力，则上板会以恒定的速度 u 沿 x 轴方向运动。刚开始，紧贴在上板底面上的流体薄层将随上板一起以速度 u 运动，而下面的流体还处于静止状态。慢慢地，由于黏性作用，下面静止的流体也开始沿 x 轴方向运动，具有 x 轴方向的动量。就这样，动量由上平板沿 z 轴负方向，一直向下传递到下平板附近的流体，使下平板附近的流体层也具有一定的动量，当然两板之间的各流体层的速度由上而下依次降低，紧贴下板表面的流体层的速度为零。可见，正是由于黏性的作用，发生动量从速度高（或者说是动量高）的地方向速度低（或者说是动量低）的地方传递，这种传递正是由于分子作用引起的，所以说，牛顿黏性定律描述的是分子动量传递规律。

假设流体为不可压缩流体，即流体密度 ρ 为常数，则式(1-1)可以进一步写成如下形式：

$$\tau = -\frac{\mu}{\rho} \frac{d(\rho u)}{dz} = -\nu \frac{d(\rho u)}{dz} \quad (1-2)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-3)$$

式中： ν 为运动黏度，又称动量扩散系数， m^2/s 。让我们对式(1-2)中的 ρu 进行一下量纲分析，密度 ρ 的单位为 kg/m^3 ，速度 u 的单位为 m/s ，所以， ρu 的单位为：

$$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}}$$

上式右边的分子为动量单位，所以， ρu 是单位体积内所具有的动量，称为动量浓度， $d(\rho u)/dz$ 为动量浓度梯度。因此，式(1-2)的物理意义为：

$$\text{动量通量} = -\text{动量扩散系数} \times \text{动量浓度梯度}$$

上式说明：动量传递通量等于动量扩散系数乘以动量浓度梯度。动量分子扩散速度与一个物性参数——动量扩散系数 ν 有关，同时与动量浓度梯度有关，动量浓度梯度越大，也就是动量越不均匀，动量扩散速度就越快。式中的负号表示，动量传递的方向与动量浓度梯度的方向相反，即：动量朝着动量浓度低的方向传递。

描述分子热量传递规律的定律是傅立叶定律。傅立叶定律是用于确定在物系内各点间存在温度差时，因热传导而导致的热流量大小的定律。1822年，由法国数学物理学家傅立叶提出。根据傅立叶定律，在各向同性、均匀的一维温度场内，以导热方式传递的热通量可表示为：

$$q = -\lambda \frac{dT}{dz} \quad (1-4)$$

式中: q 为热流密度, 又称热量通量, $J/(m^2 \cdot s)$; λ 为热导率, $W/(m \cdot K)$; T 为温度, K ; $\frac{dT}{dz}$ 为温度梯度, K/m 。

式(1-4)中, 热流密度 q 为单位时间内通过单位面积所传递的热量, 所以又可以称为热量通量, 傅立叶定律描述的就是当存在温度梯度条件下, 分子热量传递的大小。式(1-4)中, λ 为热导率, 它表示的是物质的导热能力, 属于物质的物理性质。其大小和物质的组成、结构、密度、压力和温度等有关。对于同一物质, λ 主要受温度的影响, 压力的影响可以忽略。但在高压或真空下, 则不能忽略压力对气体热导率的影响。若 λ 与方向无关, 则称为各向同性导热, 否则为各向异性导热。式(1-4)中负号表示热通量方向与温度梯度方向相反, 即热量是沿着温度降低的方向传递。

对于导热系数 λ 、定压比热容 c_p 和密度 ρ 均为恒值的导热问题, 傅立叶定律可进一步改写为:

$$q = -\frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{d(\rho c_p T)}{dz} = -a \frac{d(\rho c_p T)}{dz} \quad (1-5)$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (1-6)$$

式中: a 在传热学中称为导温系数, 也可称为热量扩散系数, 其单位与动量扩散系数 ν 的单位是相同的, 都是 m^2/s 。同样, 让我们对式(1-5)中的 $\rho c_p T$ 进行一下量纲分析, 密度 ρ 的单位为 kg/m^3 , 定压比热 c_p 的单位为 $J/(kg \cdot K)$, 温度 T 的单位为 K 。所以, $\rho c_p T$ 的单位为:

$$\frac{kg}{m^3} \cdot \frac{J}{kg \cdot K} \cdot K = \frac{J}{m^3}$$

以上分析表明, $\rho c_p T$ 是单位体积内所具有的热量, 称为热量浓度, $d(\rho c_p T)/dz$ 为热量浓度梯度。因此, 式(1-5)的物理意义为:

$$\text{热量通量} = -\text{热量扩散系数} \times \text{热量浓度梯度}$$

上式说明: 与分子动量传递相似, 分子热量传递通量等于热量扩散系数乘以热量浓度梯度。同样的, 热量分子扩散速度与一个物性参数——热量扩散系数 a 有关, 同时与热量浓度梯度有关, 热量浓度梯度越大, 也就是热量越不均匀, 热量扩散速度就越快。式中的负号表示, 热量传递的方向与热量浓度梯度的方向相反, 即: 热量朝着热量浓度降低的方向传递。

描述分子质量传递规律的定律是斐克定律。混合物中各组分若存在浓度梯度时, 会产生分子扩散。对双组分系统, 斐克在 1855 年首先提出了描述物质扩散质量通量的基本关系式。认为分子扩散所产生的质量通量可用下式表示:

$$j_A = -D_{AB} \frac{d\rho_A}{dz} \quad (1-7)$$

式中: j_A 为组分 A 的扩散质量通量, $kg/(m^2 \cdot s)$; D_{AB} 为组分 A 在组分 B 中的质量扩散系数, m^2/s ; ρ_A 为组分 A 的质量浓度, kg/m^3 ; $\frac{d\rho_A}{dz}$ 为组分 A 的质量浓度梯度, kg/m^4 。

式(1-7)中, j_A 为单位时间内, 通过单位面积所传递的 A 物质的质量, 所以称为质量通量, 斐克定律描述的就是当存在浓度梯度条件下, 分子质量传递的大小。式(1-7)中, D_{AB}