

普通高等教育规划教材

传递现象导论

第二版

CHUANDI XIANXIANG
DAOLUN



戴干策 任德呈 范自晖 编



化学工业出版社

普通高等教育规划教材

传递现象导论

第二版

戴干策 任德呈 范自晖 编

T9021.3
D1



化学工业出版社

·北京·

本书在第一版基础上修订。全书共6章,包括分子传递现象、有限控制体分析、动量传递、能量传递、质量传递及传递现象基本方程及应用。

本书第3、4、5章以一维传递现象为基础,通过物理分析,进行薄壳衡算,建立微分方程,解析求得结果,不涉及繁复的数学,而是多次重复“简化过程,建立方程”,引导学生实践“从物理到数学”。在基本掌握传递现象主要理论、计算、应用的基础上,第6章建立传递现象微分方程组、边界条件、主要数学解法后,给出若干典型实例,结合实际学习方程简化、求解,从而掌握传递规律。本书新增模型法的原理与方法,对简单几何结构基础上建立的各类传递原理,通过模型法,与工程实际装置联通;强调模型法是解决问题的基本方法。

本书特点:以较小的篇幅,论述传递现象的基本理论、计算及其在诸多领域中的应用。作为一个台阶,引导读者进入更新、更高、更广的科学境界。

本书为高等学校化工及相关专业的本科生教材,也适用于化学、药学、生物、环境、材料等相关专业,也可供科研等相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传递现象导论/戴干策,任德呈,范自晖编. —2版,
北京:化学工业出版社,2008.5
普通高等教育规划教材
ISBN 978-7-122-02584-5

I. 传… II. ①戴…②任…③范… III. 传递-现象-高等学校-教材 IV. TQ012.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第053237号

责任编辑:何丽

文字编辑:张艳

责任校对:王素芹

装帧设计:韩飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张16¼ 字数418千字 2008年8月北京第2版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 29.00 元

版权所有 违者必究

第二版前言

“传递现象 (Transport Phenomena)”作为统一研究动量、热量、质量传递的工程科学,面世至今已近 50 年。该学科的创始人,美国威斯康星大学教授博德,在推出他的新版著作^[1]之后,就本学科半个世纪来研究和教学的发展作了较为系统的总结^[2]。也许是一种巧合,我国创办化学工程专业(1957 年华东化工学院首办)正是 50 周年。专业创办之初,开设相互衔接的“流体力学”、“传热学”和“物质传递”课程,总学时 120。多年来,在课程设置、教学方式、教材内容、课后习题、实验等各个环节进行了广泛深入的改革实践,目前形成两个层次:“传递现象导论”(30 学时)在数学、物理课程之后,化工原理课程之前开设;“高等传递过程”(30 学时),作为化工原理课程之后的选修课和研究生课程。本书一版作为化工原理课程之前的教材,自 1995 年使用,基本实现了预期的改革目标(参见第一版前言),今后还将继续这方面的实践。本书作为“传递现象”的入门书,内容简明、扼要,篇幅较小,在作为教材之外,也受到其他读者的认可和欢迎。

近年来,传递理论(计算)有了很大的发展^[2],需要着重指出的包括:数值传递(Numerical Transport Phenomena),多相与界面传递,复杂物系(含聚合液体悬浮体等非牛顿流体)传递,微尺度传递(Microscale Transport Phenomena)等。应用领域有了新的拓展:含生命科学、生物工程、环境科学、材料科学等领域,其中数值方法和计算机技术相关学科(计算流体力学)的发展,使得传递计算解决实际问题的能力有了极大的提高;特别是微过程工程(Microprocess Engineering)的兴起,对分子传递在传递现象中的作用和地位,需要新的理解。

随着我国经济、技术的发展,对人才的培养有了更新更高的要求,淡化专业,加强基础,着重培养学生分析问题、解决问题、创新实践的能力。教材对此需要有所体现。鉴于上述两方面的思考,我们在保持第一版教材的特点和“导论”性质的前提下,对一版教材进行修订。新版教材有以下特点。

(1) 调整体系

传递现象统一研究分子、微元体和设备三个不同尺度上的传递,三者构成传递现象的整体,相互关联,但又各有特点,运用不同的处理方法,分别适用于各自特定的范围。新版教材在保持微元体尺度上的传递作为核心的基础上,将分子传递和有限控制体分析构成独立的章节,而且三种分子传递汇总一并论述,更好地体现两者在传递现象研究中的作用及其在未来可能的发展。尽管对分子传递未能论述更多理论,但给出了符合学科发展应有的整体框架。

(2) 更新内容

- 分子质量传递,用实例加强对 knudsen 扩散的理解。
- 改写有限控制体总体衡算法及其应用。
- 动量传递部分,改写边界层理论,充实现代湍流理论,包括充分发展湍流模型、混合层、PIV(粒子图像测速技术)湍流测试等,加强数学模型概念及其应用。
- 热量传递,突出能量转化、节能概念,充实强化原理,增加一维非定常导热数值解,扩大传热理论在材料、生物质方面的应用。
- 质量传递,概述传质理论的发展,突出传质在分离和化学反应方面的应用。增加控制

释放。

• 基本方程部分，强调从一维处理过渡到三维处理，并增加传递现象与聚合物加工，借以连接传递现象与材料工程的相关性。

• 删除圆管进口段传递、撞击射流、热管等部分内容。

(3) 强化练习

为了便于理解一些重要理论及相关概念，增加或更新了部分示意图；大量增加例题，从原有实例 34 个，新增 43 个，现共有实例 77 个；各章均新给出思考题 87 个，习题 88 个，总数 175 个。大量增加的例题、思考题、习题是新版教材编写中的重点工作，也算是新一轮课程改革的尝试，相信对本课程的学习是有益的。尽管这些题目还远不够精选，但从无到有，有了很大进步。各章均给出主要参考书目，推荐给读者，可供进一步阅读。

使用建议：本书第 1~5 章以一维问题为主，教学中应参照第 6 章论述部分三维问题，防止以偏概全，并对简化、模型、应用之间的关系作必要讨论。

本书的修订大纲及充实、更新的全部内容由编者（主要是戴干策）完成，并负责全书修改、审定。新版教材编写过程中，孙志仁提供了他多年从事本课程教学及使用一版书的经验，同时，负责改写第 1 章、第 3 章（初稿）；陈剑佩负责改写第 2 章和第 4 章（初稿）；博士生黄娟、李光协助第 5 章、第 6 章的改写，并从事文字录入、插图、校对等工作。

化学工业出版社的编辑为本书的再版创造了有利条件，使得本书得以出版，在此一并表示感谢。

对本书存在的不足之处，欢迎批评、指正。

编者

2008 年 2 月于华东理工大学

[1] R. B. 博德, W. E. 斯蒂特, E. N. 拉特福特. 传递现象 (第二版). 戴干策, 戎顺熙, 石炎福译. 北京: 化学工业出版社, 2004.

[2] R. B. Bird. Five Decades of Transport Phenomena. AIChE Journal, 2004, 50 (2): 273-287.

第一版前言

“传递现象”在 20 世纪 60 年代初问世，作为课程最先仅为化工类学生开设，随后像热力学、电子学等课程一样，被机械、环境、电力及冶金类专业所接受，而成为工科院校的公共课程。为适应不同专业、不同层次教学的需要，国内外有多种“传递过程原理”或“传递现象”教材出版。

“传递现象”在被广泛接受的同时，又颇感教学内容难以处理，即数学推导繁杂，工程应用实例不足，因而时受非难，为解决上述问题，人们开始了新的探索。有的将传递原理与化工原理合并；有的在加强数学教学的基础上，扩充传递课程的内容，将两相过程和一些化工设备的操作原理并入。这些新的尝试，解决了某些方面的问题，但也带来了新的困扰，如篇幅过大，课程的教学时间拖长，甚至难以组织教学等。

传递过程理论和实践的发展，特别是其应用领域（包括高新技术领域）的不断扩大，以及它在培养现代工程技术人才中的重要作用，愈益为人们所认识。使得进一步改革这门课程教学的愿望更为迫切。在这种背景下，经化学工业部化学工程专业教学指导委员会多次酝酿讨论，形成了一种新的方案：将传递现象课程作为物理、数学课程的延伸，置于化工原理课程之前开设。这一方案的好处是：紧接在数学、物理课之后，学生的数理基础较好，“遗忘”较少，为传递课程的教学提供了较好的外部条件；同时，将传递课程作为物理类型的课程进行教学，有利于学生学会现象分析，掌握基本原理，避开冗长而繁杂的数学推演，使教学过程较为“简洁”，也便于学生巩固已学的数理知识；突出传递现象的基本理论，不强求与单元操作和设备结合，仅力求为化工原理的学习打下良好基础。为了进行这种教学试点需要相应的教材，这就是我们编写“传递现象导论”的来由。

本书共五章，主要内容是前四章。第一章介绍基本概念和研究传递现象所依据的基本原理和方法，二、三、四章主要以一维流动为基础，分别论述动量、热量、质量传递的基本原理和必要的计算以及若干应用实例，理解这些实例一般不需要很深的工程专业知识，可在一般科学知识的基础上探讨。为使学生不至于“以偏概全”，第五章则进一步以三维现象为基础，简要地介绍传递现象的一般化普遍方程的建立及其解析求解的数学方法。全书共约 20 万字，可在 30 学时内教完。

本书对华东理工大学二年级学生进行过 3 届教学实践，效果良好。但毕竟时间较短还需继续探索和完善。我们也热忱希望有更多的院校进行这类尝试，共同努力，把我国“传递过程原理”课程的教学提高到一个新的水平。

鉴于本书对传统的传递现象课程和教材作了较大幅度的变革，难免有失偏颇，加之作者水平和能力有限，对书中存在的缺点，敬请同志们、朋友们批评指正。

本书承蒙陈敏恒教授审阅全稿，作者对他的帮助表示衷心感谢。

编者
1995 年 3 月

目 录

第 1 章 分子传递现象	1
1.1 平衡过程与速率过程	1
1.2 速率过程的基本变量和基本概念	1
1.2.1 基本假定	2
1.2.2 传递现象特征量	2
1.2.3 流体运动的表示方法	5
1.2.4 作用力及其效应	6
1.2.5 传递机理	13
1.2.6 传递现象分类	13
1.3 分子传递现象 (一)	16
1.3.1 动量传递	16
1.3.2 能量传递	20
1.3.3 质量传递	21
1.3.4 类似现象	23
1.3.5 传递性质的分子理论	23
1.4 分子传递现象 (二)	24
1.4.1 分子能量传递	25
1.4.2 分子质量传递	34
1.4.3 分子动量传递	43
本章主要符号	43
思考题	44
习题	45
参考文献	46
第 2 章 有限控制体分析	47
2.1 控制体与控制面	47
2.2 质量守恒	48
2.3 机械能守恒	49
2.4 动量守恒	61
2.5 宏观衡算法的应用	65
本章主要符号	68
思考题	69
习题	69
参考文献	71
第 3 章 动量传递	72
3.1 流动状态——层流与湍流	72
3.1.1 雷诺试验	73
3.1.2 流动状态的判别——雷诺数 Re	74
3.2 层流动量传递	75
3.2.1 平行平板间流动	75
3.2.2 圆管内流动——泊谔叶流	78
3.2.3 重力驱动的液膜流动	83
3.2.4 转动柱面间的流动	85
3.2.5 平板振荡	86
3.3 动量传递的基本理论	87
3.3.1 边界层理论——理想流体与黏性流体模型	87
3.3.2 湍流理论	98
3.4 流动现象的实验观测	109
3.4.1 流场显示技术	109
3.4.2 湍流测试	110
3.5 量纲分析与相似原理	111
3.5.1 无量纲化的意义	111
3.5.2 基本量纲、导出量纲与无量纲数	112
3.5.3 无量纲化方法—— π 定理	112
3.5.4 无量纲数的物理意义	115
3.6 动量传递理论的应用	116
3.6.1 流动阻力	116
3.6.2 流体均布	134
3.6.3 流体混合	135
本章主要符号	136
思考题	138
习题	138
参考文献	139
第 4 章 能量传递	140
4.1 传热机理	140
4.1.1 对流传热	140
4.1.2 热辐射	142
4.1.3 热传导——一维非正常导热的数值解	143
4.2 层流热量传递	146
4.2.1 平行平板间层流传热	146
4.2.2 管内层流传热	148
4.3 对流传热的基本理论	150
4.3.1 传热边界层	150
4.3.2 湍流传热	159
4.3.3 含相变化的对流传热	164
4.4 自然对流	167
4.5 热量传递原理的应用	171
4.5.1 复合传热及其强化	171
4.5.2 对流传热简化模型应用	175
4.5.3 生物质冷冻	177

本章主要符号	179	方程)	227
思考题	180	6.2 定解条件	228
习题	180	6.2.1 初始条件和边界条件	228
参考文献	182	6.2.2 相界面上的边界条件	228
第5章 质量传递	183	6.3 传递微分方程解法	229
5.1 传递机理——对流扩散	183	6.3.1 变量置换法	229
5.1.1 层流扩散	183	6.3.2 分离变量法	231
5.1.2 湍流扩散	184	6.3.3 拉普拉斯变换法	232
5.1.3 对流传质的简化处理——传质系数	184	6.4 典型传递问题的简化处理	234
5.2 层流质量传递	187	6.4.1 低雷诺数下的绕流——爬流近似	234
5.2.1 液膜中的扩散	187	6.4.2 高雷诺数下的绕流——边界层近似	238
5.2.2 圆管内的传质	189	6.5 传递现象与聚合物加工	242
5.2.3 泰勒分散	193	本章主要符号	245
5.3 对流传质基本理论	197	参考文献	245
5.3.1 传质边界层	197	附录	246
5.3.2 湍流传质	204	附录一 常见物质黏度	246
5.3.3 相际传质	209	一、水及空气在常压下的黏度	246
5.4 质量传递原理的应用	213	二、某些气体及液体在常压下的黏度	246
5.4.1 分离与传质	213	附录二 压力单位换算表	246
5.4.2 反应与传质	215	附录三 常见物质的热导率	247
5.4.3 传热与传质	217	一、常用固体的热导率	247
本章主要符号	220	二、液体的热导率	247
思考题	220	三、几种气体的热导率	247
习题	221	附录四 常见物系扩散系数	248
参考文献	222	一、某些物系在大气压强下的气相扩散系数	248
第6章 传递现象基本方程及应用	223	二、稀溶液中扩散系数的实验值	248
6.1 传递现象基本方程	223	三、固体中的扩散系数	249
6.1.1 动量传递微分方程组(运动方程)	223	附录五 误差函数	249
6.1.2 能量传递微分方程(传热方程)	226	附录六 拉普拉斯变换表	249
6.1.3 质量传递微分方程(扩散			

第 1 章 分子传递现象

动量、能（热）量和质量的传递，普遍存在于自然界和工程领域。这三种传递现象既有各自的特点，又有许多共同的规律，这些规律可以在统一的基础上阐述，亦可分别讨论，本书采取统一和分论结合的方式。本章 1.1 节、1.2 节，先介绍一些必需的基本概念，然后重点讨论分子传递现象的基本定律及其应用。

1.1 平衡过程与速率过程

在大量的物理和化学现象中，同时存在着正反两个方向的变化，如固体的溶解和析出、升华与凝华、对峙（可逆）化学反应等。当过程变化达到极限，就构成平衡状态，如化学平衡、相平衡等。这时，正反两个方向上的变化速率相等，净速率为零。不平衡时，两个方向上的速率不等，描述过程的一个或几个变量将随时间变化。物系偏离平衡状态，就会发生某种物理量的转移，使物系趋于平衡。

热力学探讨平衡过程的规律：考察给定条件下过程能否自动进行，进行到什么程度，条件变化对过程有何影响等。

动力学探讨速率过程的规律：化学动力学研究化学变化的速率及浓度、温度、催化剂以及外场（光、电、磁）等因素对化学反应速率的影响；传递动力学研究物理变化的速率及有关影响因素，当然，还会涉及化学反应与传递的关系。

在物理学上，物体质量与速度的乘积被定义为动量。速度可认为是单位质量物体所具有的动量。因此，同一物质，速度不同，所具有的动量也就不同。处于不同速度流体层的分子或微团相互交换位置时，将发生由高速流体层向低速流体层的动量传递；当物系中各部分之间的温度存在差异时，则发生由高温区向低温区的热量传递；介质中的物质存在化学势差异时，则发生由高化学势区域向低化学势区域的质量传递。化学势的差异可以由浓度、温度、压力或电场力产生，而最为常见的是由于浓度差导致的质量传递，此时混合物中某个组分将由其浓度高处向低处扩散传递。

传递过程的速率正比于推动力，反比于阻力，即

$$\text{速率} = \frac{\text{推动力}}{\text{阻力}} \tag{1-1}$$

相对而言，各种传递的推动力较易确定，而不同传递的阻力则要复杂得多。本书主要讨论上述动量、能量、质量传递的速率，通过传递机理的探讨，寻求传递阻力之所在，为决定设备大小或生产能力提供必要的分析和计算基础。

1.2 速率过程的基本变量和基本概念

表征传递过程的变量主要是速度-动量、温度-热量、浓度-质量。影响传递过程的速率将涉及物质特性、设备几何结构、操作条件等一系列因素，研究传递现象正是寻求速度、温度和浓度随这些因素的变化规律。为了对这些规律进行定量表示，需要表示流体运动的方法。

传递现象研究的对象多数是流体（液体和气体）以及包含固体的流体，如固-液或气-液-固等各种多相体系。探讨传递现象机理、规律的基本前提是连续介质假定。

为此，本节内容首先阐述这一假定的含义，然后依次介绍传递现象的特征量、流体运动的表示方法、作用力及其效应、传递机理，最后对传递现象作基本分类，以便考察特定条件下的传递规律。

1.2.1 基本假定

流体由运动的分子组成，分子之间有着相当大的空隙，分子的随机运动导致流体在空间上不连续且具有随机性。研究流体运动规律，考察的是由大量分子组成的流体“微团”（或质点）的运动规律。微团尺度相对于分子尺度足够大，这样就可以忽略分子热运动带来的随机性，如图 1-1 所示，当微团尺度在 $\Delta V_0 \sim \Delta V_1$ 的区间内，密度值是常数；为了研究流体在

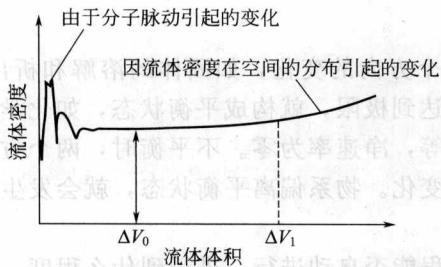


图 1-1 微团尺度对密度的影响

设备内的变化，微团尺度相对于设备尺度充分小，这样就能体现流体特性如密度、速度、温度等在设备内的分布；同时，假定流体微团无任何空隙，连续一片。因此，可以认为流体是由相对于分子尺度足够大、相对于设备尺度充分小且连续一片的微团组成，这就是连续介质假定^[1]。

有了这个假定，就能大大简化对于流体平衡及其运动的研究，并可利用基于连续函数的数学工具——微积分。当然，连续介质假定并不是到处都适用。例如，在高空或真空中，气体稀薄，分子间距已与考察流体微团尺度相当，这时的气体就不能再看作是连续介质。

连续介质受力将改变原有运动状态，产生加速度，发生变形。下面将在给出运动表示方法的基础上分别论述这些基本概念。

1.2.2 传递现象特征量

这一节给出传递现象特征量——速度、温度、浓度的定义，它们在某特定条件下的分布，作为表示传递现象规律的若干实例。

1.2.2.1 速度与速度分布

许多传递过程是在流体流动情况下进行的。单位时间内流体通过的量称流率。以体积计量称体积流率，用 V 表示，单位为 m^3/s ；以质量计量称质量流率，用 W 表示，单位为 kg/s 。两者关系为

$$W = \rho V \quad (1-2)$$

式中， ρ 为流体的密度，是单位体积流体具有的质量， kg/m^3 。

由于气体体积随温度、压力变化，对于气体的体积流率必须指明其所处的温度 T 和压力 p ；质量流率则不随 T 、 p 变化。

流动速度是单位时间内流体流动的距离。江河中的水流，中央快，近岸处慢。与此类似，流体在管道和设备中流动时，同一流动截面上各点的流速（称点速度 u ）通常也不相等，速度按一定规律随空间位置及时间变化，这就是速度分布。以倾斜壁面上依靠重力流动的液膜为例，壁面附近运动慢，液膜表面附近运动快，垂直于壁面的方向上速度不均匀，数学上表示为 $u_z(y)$ 或 $u_z(y, t)$ ，下标 z 为速度的方向， y 为离开壁面

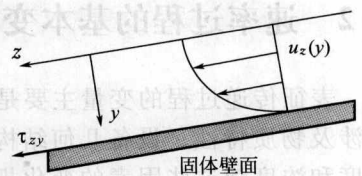


图 1-2 液膜内的速度分布

的距离。几何上如图 1-2 所示。

工程上为了简化计算,通常假定流体沿截面作均匀流动。并按照体积流率相等的原则,定义通过流动截面的平均速度为

$$U = \frac{\int_A u dA}{A} = \frac{V}{A} \quad (1-3)$$

式中, A 为流体通道截面积, m^2 。

单位时间内流体通过单位流动截面的质量称质量流速,以 G 表示,单位为 $kg/(m^2 \cdot s)$, 因此有

$$\begin{aligned} G &= \rho U \\ W &= \rho UA = GA \end{aligned} \quad (1-4)$$

需要指出的是,当应用流体以平均速度沿截面作均匀流动代替沿截面具有速度分布的实际流动时,对某些工程进行运算,如动量、动能等将会产生偏差,其大小与假想的均匀分布偏离实际分布的程度有关,若偏差较大则应进行修正。

了解速度分布是研究热量传递、质量传递以及工程上提高过程效率、促使设备内流动流体分布均匀的基础。依据速度分布计算速度梯度又是解析计算某些工程物理量如流动阻力等的主要途径。因此,速度分布将是以后所需讨论的一个重要内容。

例 1-1 容器小孔流速

流体自容器下方小孔流出,形成射流,如图 1-3 所示。已知:容器内液位高度 H 恒定,孔口内的速度分布为 $u_x = \sqrt{2g(H-z)}$ 。试确定:流体通过单位宽度 (y 方向) 孔口截面的体积流率 V 及平均流速 U 。

解 由式(1-3)得体积流率为

$$\begin{aligned} V &= \int_A u_x dA \\ &= \int_{-b}^b \sqrt{2g(H-z)} dz \times 1 \\ &= \frac{2}{3} \sqrt{2g} [(H+b)^{3/2} - (H-b)^{3/2}] \end{aligned}$$

孔口平均流速为

$$\begin{aligned} U &= \frac{V}{2b \times 1} \\ &= \frac{\sqrt{2g}}{3b} [(H+b)^{3/2} - (H-b)^{3/2}] \end{aligned}$$

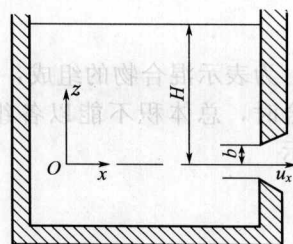


图 1-3 容器小孔流速

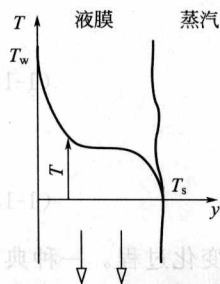


图 1-4 垂直壁面上降膜蒸发的温度分布

1.2.2.2 温度与温度分布

温度是分子热运动激烈程度的表现,许多流体性质受温度影响,如液体的表面张力、黏度、密度等通常随温度的升高而降低。因此,速率过程都与温度有关,是温度的函数,只有在不计或忽略温度效应作为常规物性处理时才不予考虑。温度又是表示传热过程特性的基本参数,研究传热过程通常就是考察温度随位置或时间的变化。传热过程中的温差或反应过程中的热效应,都会使设备中形成某种温度分布。例如垂直壁面上降膜蒸发的温度分布 $T(y)$, 如图 1-4 所示,壁面温度大于溶液饱和温度(即 $T_w > T_s$),蒸发从壁面发生。

了解各种因素对温度分布的影响, 寻求温度分布的规律用于确定合理的工艺条件或改善温度分布以适应工艺要求, 这些都是工程上十分关心的问题。

此外, 由温度分布计算温度梯度又是解析计算和分析传热速率大小的基础。因此, 温度分布是传热研究中的主要内容, 将在以后重点讨论。

1.2.2.3 浓度与浓度分布

浓度指的是单位体积混合物中某组分 i 的含量。浓度有多种表达形式。组分含量以质量表示, 称质量浓度 ρ_i , 单位为 kg/m^3 ; 组分含量以物质的量 (摩尔数) 表示, 称物质的量浓度 (简称摩尔浓度或浓度) C_i , 单位为 kmol/m^3 。摩尔浓度常用于化学反应或气体定律。两种浓度间的关系为

$$C_i = \frac{\rho_i}{M_i} \quad (1-5)$$

式中, M_i 为组分 i 的摩尔质量, kg/kmol 。

气体混合物浓度常以分压 p_i 表示, 对于理想气体

$$C_i = \frac{n_i}{V} = \frac{p_i}{RT} \quad (1-6)$$

式中, n_i 为组分 i 的物质的量, mol ; V 为气体体积, m^3 ; T 为绝对温度, K ; R 为气体常数。

单位体积混合物的总质量称总质量浓度, 亦即密度 ρ

$$\rho = \sum_1^n \rho_i \quad (1-7)$$

式中, n 为混合物组分数。

单位体积混合物的总物质的量 (摩尔数) 称总摩尔浓度 C

$$C = \sum_1^n C_i \quad (1-8)$$

为表示混合物的组成, 常用某组分含量占有混合物总量的百分数表示。气体或互溶液体混合时, 总体积不能以各组分的体积相加, 因此, 常用质量分数 w_i 和摩尔分数 x_i (y_i) 表示

$$w_i = \frac{\rho_i}{\sum \rho_i} = \frac{\rho_i}{\rho} \quad \sum_1^n w_i = 1 \quad (1-9)$$

$$x_i = \frac{C_i}{\sum C_i} = \frac{C_i}{C} \quad \sum_1^n x_i = 1 \quad (1-10)$$

对于服从理想气体定律的气体混合物, 有:

$$C = \frac{n}{V} = \frac{p}{RT} \quad (1-11)$$

式中, p 为总压力, 等于各组分分压之和, 即

$$p = \sum_1^n p_i \quad (1-12)$$

因此, 气相摩尔分数

$$y_i = \frac{C_i}{C} = \frac{p_i/RT}{p/RT} = \frac{p_i}{p} \quad \sum_1^n y_i = 1 \quad (1-13)$$

无论是质量传递的物理操作还是进行化学反应的场所都存在着浓度变化过程。一种典型的扩散过程如图 1-5 所示, 为高温下薄层中氢同位素氚在固体钚中扩散的浓度分布。在核反应堆设计中需要了解这种信息, 该分布曲线的数学表达式是 $C(x, t) = \frac{M}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)$ 。

式中, M 为膜中氚的起始量; D 为扩散系数; x 为距离; t 为时间。

研究给定时刻设备空间某区域内浓度随位置的变化即浓度分布规律, 是了解传质过程及计算物质传递速率大小的基础, 同样将是以后要讨论的主要内容。

上述速度、温度、浓度分布虽然不是传递现象特征量的唯一表示, 但用微元体衡算法计算这种分布, 是传递现象的核心内容。

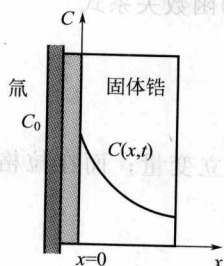


图 1-5 氚在固体锆中扩散的浓度分布

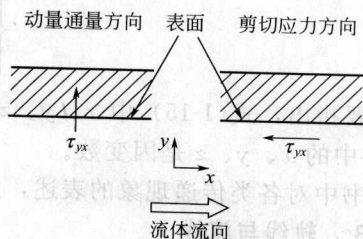


图 1-6 动量通量与剪切应力的方向

1.2.2.4 传递通量

单位时间、通过单位面积传递的特征量称为该特征量的通量。对于热量传递, 热量通量 q 为单位时间、单位面积传递的热量, 其单位为 $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 在质量传递中, i 组分质量通量 j_i 的单位为 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。质量与速度的乘积 Mu 为动量, 其单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}$ 。若将剪切应力 τ 的单位 N/m^2 改写成 $\frac{\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$, τ 则为动量通量。通量是表征传递速率的物理量, 是以后各章讨论的主要内容。

这里需要着重指出动量通量的一些特点: τ_{ij} 是单位面积上的剪切应力, 它表示垂直于 i 方向、作用在 j 方向的力; τ_{ij} 表示动量通量, 它表示 j 方向的动量, 在 i 方向传递。如图 1-6 所示^[2]。

在 1.3 节中, 式(1-30)、式(1-37)、式(1-40) 是传递现象中的通量表达式, 又称本构方程, 它们和在守恒原理基础上建立的变化方程共同构成传递现象理论计算的基本方程组, 详见第 6 章。

1.2.3 流体运动的表示方法

描述流体的运动有两种方法: 一是拉格朗日法, 与刚体力学中所用方法类似; 二是欧拉法, 与表示电磁场的方法类似。

1.2.3.1 拉格朗日法

这种方法着眼于流体个别质点的运动, 通过考察空间各个流体质点的位置、速度等随时间的变化了解整个流体质点运动的情况。应用这种方法时, 采用“流体坐标”识别各个流体质点。所谓流体坐标是指运动起始时刻(时间 $t=0$) 每个流体质点占有的空间位置 (a, b, c) 。对于给定的质点, 其值为常数, 而且在整个运动过程中它始终表示同一个流体质点; 对于不同质点, (a, b, c) 有不同值。在任意时刻 t , 到达新的位置 (x, y, z) , 它们将由 (a, b, c) 及时间 t 决定, 即

$$\begin{cases} x=f_1(a, b, c, t) \\ y=f_2(a, b, c, t) \\ z=f_3(a, b, c, t) \end{cases} \quad (1-14)$$

取不同 a, b, c 及 t 值, 可得不同时刻全部流体质点在流动空间的位置分布, 由这些函

数求一阶、二阶导数，可得流体质点运动的速度和加速度。

这种跟踪流体质点的方法对分析流体运动比较复杂，在本书中很少采用。

1.2.3.2 欧拉法

欧拉法不跟踪个别流体质点，而是注视空间点，考察速度以及其他物理量如密度、压力等在流体运动的全部空间范围（流场）内的分布，以及这种分布随时间的变化。为了完整地解流场在同一时刻通过空间各点的运动速度，应建立如下的函数关系式

$$\begin{cases} u_x = F_1(x, y, z, t) \\ u_y = F_2(x, y, z, t) \\ u_z = F_3(x, y, z, t) \end{cases} \quad (1-15)$$

需要指出，式(1-15)中 x 、 y 、 z 是空间点的坐标，为独立变量；而在拉格朗日法的式(1-14)中的 x 、 y 、 z 是因变数。

本书中对各类传递现象的表述，主要采用欧拉法。

1.2.3.3 轨线与流线

几何上描述流体运动，在拉格朗日法中，应用轨线给出流体质点在一段时间内的运动变化；欧拉法则利用流线，它是同一时刻不同流体质点组成的曲线，其特点是处于曲线上的流体质点的速度方向与该点切线方向相一致。

流线与轨线是两个意义不同的曲线，只有在特定条件即运动与时间无关的定常运动中两者重合。

轨线方程为

$$\frac{dx}{u_x} = \frac{dy}{u_y} = \frac{dz}{u_z} = dt \quad (1-16)$$

流线方程为

$$\frac{dx}{u_x} = \frac{dy}{u_y} = \frac{dz}{u_z} \quad (1-17)$$

注意：时间 t 在轨线方程中为独立变量，若在流线方程中出现则为参变量。速度场中流线如图 1-7 所示。

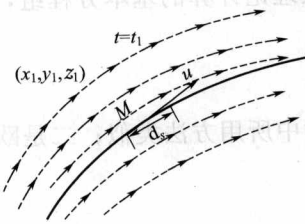


图 1-7 速度场中流线

1.2.4 作用力及其效应

流体无论处于静止还是运动状态，都承受着一定的作用力。了解作用力及其效应是建立传递理论的基础。

作用在流体上的外力有两种：通过直接接触而作用于表面上的力，即表面力，如压力、摩擦力；不与流体接触而施加于整个流体体积（或质量）上的力，即体积力或质量力，重力、离心力、惯性力都是体积力。外力对流体的作用导致

变形、加速等效应。下面阐述这种作用机制，并给出必要的数学表达式。

1.2.4.1 外力与内力

力是质量间的相互作用，力平衡的一般原理适用于流体。平衡状态下的体系，外力之和为零，外力形成的力矩亦为零。流体受外力作用后，为抵抗外力的影响，将产生内力。内力是流体内各部分之间互相作用的力，是连续分布于表面上的表面力。为了说明内力的存在，可利用一个想象的截面把内力变为外力，这在力学上称为截面原理，如图 1-8

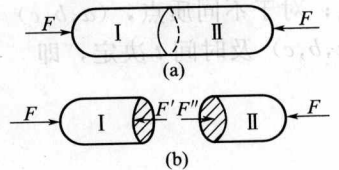


图 1-8 截面原理

所示。即从流体中取出由封闭表面包围的某一任意体积，如图 1-8(a) 所示，为简明起见，设该体积的流体被“刚化”，其上作用着一对平衡的外力 F 。设想由一任意截面将该“刚化”流体分成两块。这样，由外力 F 引起的内力 F' 就显现出来，如图 1-8(b) 所示。这是因为在切割处没有相对滑动和分离发生，因而就必须有一外力，它与分割前该处作用的内力大小相等、方向相反。这一力是由右边的流体 II 提供而作用在假想截面上的。同样，流体 I 也提供力 F'' 作用在假想截面上。内力是和假想截面相联系着的，脱离假想截面则无法讨论内力。显然，根据牛顿第三定律， $F' = F''$ ，这表明内力总是成对地出现，而方向相反。如果考虑整个体积 I + II，把其中的内力合成起来，则内力将完全抵消，只剩下外力作用于所考察的刚化流体上。

1.2.4.2 应力、压力与剪切应力

内力总是作用在一定大小的截面上，因此单纯的内力大小不足以说明流体内部的受力情况。为了描述流体内部各处内力的强度，需要引用应力概念，即单位面积上的内力这一物理量。如图 1-9 所示为流体微元体，在假想截面上任取一点 M ， ΔA 为包围该点的微元面积，其法线为 n ， Δp 为作用于该微元面上的内力（表面力），则该处的应力为

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta p}{\Delta A} \right) = \frac{dp}{dA} \quad (1-18)$$

它的大小和方向取决于 M 点的位置和 ΔA 的方向，是坐标和法线的函数

$$\sigma = \sigma(x, y, z, n) \quad (1-19)$$

应力的方向一般并不和法线方向一致，可将其分解，在微元面法线方向的投影 σ_n 称为法向应力，在微元面切平面上的投影称为切向应力（或剪切应力） τ_n 。

在一个固定点，用不同的截面分割流体块，则不同的截面上应力的大小和方向就是该点的应力状态。

当流体静止时，应力状态十分简单。这时，流体不承受切向应力，所有剪切应力均为零。应力与它所作用的面垂直，法向应力就是向着表面的压力，通常用 p 表示。静压力处处与它的作用面垂直，并指向作用面的内法线方向。另外，静压力在各个方向上相等，即静压力各向同性，无方向特征，是标量。但空间不同位置上可以有不同的静压力，构成一定的压力分布。

在同种静止流体内部，同一水平高度的静压力相等，距离流体自由表面 h 处的压力为

$$p = p_0 + \rho gh \quad (1-20)$$

式(1-20)即为流体静力学的平衡定律（例 1-2 给出证明）。式中， p_0 为作用于流体自由表面上的压力。

在运动流体中，应力分量具有方向特征。因为力是向量，截面也是向量，所以表达这种应力分量必须借助于两个下标 τ_{ij} ，第一个下标表明应力的作用面所垂直的坐标轴，第二个下标表明应力所指方向。运动流体中的应力分量是各向异性的，而且应力既是位置的函数又是所在表面方位的函数。

在运动流体中，任意点总应力由各向同性静压力和各向异性应力两部分组成。数学上表示这种复杂的应力分量需采用张量形式。在建立动量传递基本微分方程时，将导出这些表达式(第 6 章)。下面就简单形式下的两种应力作进一步解释。

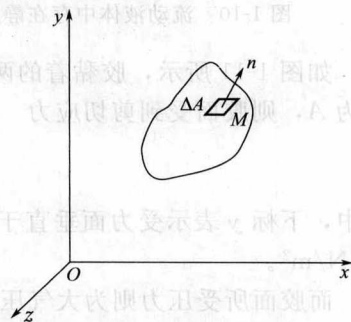


图 1-9 流体微元体

运动流体中剪切应力的产生，将在探讨传递机理时给予阐释。为初步理解，可借鉴两固体表面滑移，其间存在滑移摩擦，阻碍两表面的相对运动。流体层间有类似现象，即流体层的相对运动决定层间应力。

运动着的流体内部到处存在着静压力。若在管壁开孔并安装玻璃细管，管内流动流体将会在玻璃管内上升一定高度，这是静压力的表现，如图 1-10 所示。压力随距离的变化率称为压力梯度，它决定压力场对流体运动产生的效应。因此压力是一个重要的工程参数。

压力的法定单位为 N/m^2 ，也称为帕斯卡，符号为 Pa。

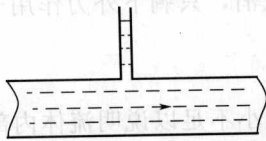


图 1-10 流动液体中存在静压力

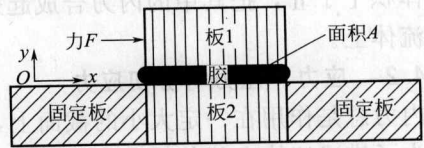


图 1-11 剪切应力

如图 1-11 所示，胶黏着的两块状物，下块被夹持固定着，对上块施加力 F ，设块的面积为 A ，则胶面受到剪切应力

$$\tau_{yx} = \frac{F}{A} \quad (1-21)$$

式中，下标 y 表示受力面垂直于 y 轴， x 表示受力方向。若 F 为 5N ， A 为 2m^2 ，则 τ_{yx} 为 $2.5\text{N}/\text{m}^2$ 。

而胶面所受压力则为大气压力与块重之和除以截面积 A 。

运动流体层间的剪切应力与此类似，均属单位截面上的切向力。不同点在于，流体中的剪切应力与流体抵抗变形率有关，而不是固体块之间的抵抗变形（参见 1.3.1）。

例 1-2 漏斗中液体的压力分布^[3]

密度为 ρ 的液体，装在下端为细直圆管的漏斗中，如图 1-12 所示。若堵住细管出口，没有流体流出，管内压力是否处处一致？如果不一致，其压力分布如何？

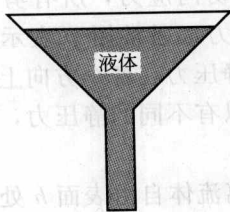


图 1-12 封闭漏斗中的流体

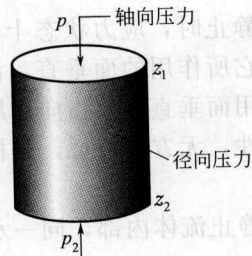


图 1-13 微元体上、下表面上的力

解 取如图 1-13 所示假设的微元体（后面将称其为控制体，参见第 2 章），它是 z_1 和 z_2 处的两个水平面间的直圆柱体，其高度为 $h = z_1 - z_2$ ，水平截面积为 A 。在重力作用下，若 z 方向没有发生运动，那么 z 方向所有作用在流体柱端面的力一定平衡。

流体柱的上表面（图 1-13 中的 z_1 面）受到 z 方向的压力为 p_1 。作用在圆柱侧表面的压力垂直于表面，在 z 方向没有分量，因此这些压力不影响 z 方向的力平衡。

z 方向的体积力为流体的重量

$$mg = \rho Ahg \quad (1)$$

式中， ρ 为流体的密度（假定为常数）； A 为垂直于 z 轴的面积。

因此下表面受到两个力的作用，一是压力 p_1 ，另一个是液体重量，这两者方向向下。为与其平衡，必有向上的力，这就是 z_2 处来自下表面的压力 p_2 。由此得到

$$p_2 A = p_1 A + \rho A h g \quad (2)$$

即 $p_2 = p_1 + \rho g h$

若 z_1 面固定不变， p_1 保持常数，可见 p_2 随 h 增大而增大。这是不可压缩流体的静力学基本定律。若漏斗中装满液体，底部无液体流出，其压力分布是一直线。如图 1-14 所示

若将漏斗下端管塞拔出，液体就会流出。首先考虑流率很小（管口敞开可能会没有流体流出吗？），漏斗中液体的上表面敞开在大气中，作用在表面上的压力为 p_{atm} 。问题是：漏斗出口处，水平截面上的流体压力是多少？

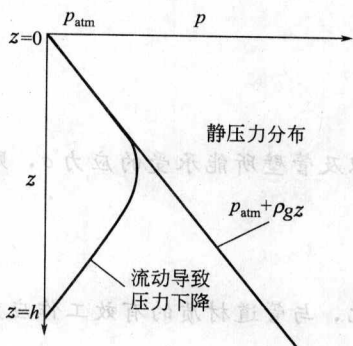


图 1-14 漏斗中有流动和无流动（静压）时的压力分布

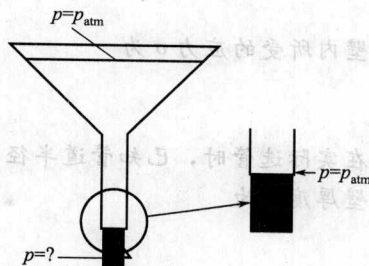


图 1-15 底部有流动时的敞开漏斗

图 1-15 为底部有流动时的敞开漏斗，观察管外的空气，大气压作用在漏斗出口处。液体离开管口，在液体和周围空气之间的横截面上压力是连续的。如果不是，径向作用力就不平衡，界面就会沿径向移动（事实上毛细管中液体表面张力将起到重要作用，对本题忽略表面张力的影响）。因此，可以断定，至少可以推测，下端口表面流体上的压力等于大气压，与上表面的压力相等。

漏斗上部锥形区有很大的截面（相对于下部圆管），液体向下流动的速度很低，靠近下部圆管进口时才有明显速度。基于上述分析，可以推知，漏斗上部锥形区，因为速度很小，其压力服从流体静力学定律。当流体流进下部圆管时，因流动而使压力损失，沿轴向压力下降，直至达到出口处的大气压。漏斗中有流动和无流动（静压）时的压力分布如图 1-14 所示。

例 1-3 固体边界上的作用力^[4]

圆管内充满流体，如图 1-16(a) 所示。流体的压力作用在管壁上，将对管道造成破坏作用，管壁的应力（也称有效工作应力）必须能承受流体的压力。当流体压力为 p （表压）时，长为 L 、半径为 R 、管壁厚度为 δ 的管壁内所受的应力多大？在实际选管时，管壁厚度如何确定？

解 取长为 L 的管道，沿轴线将管道一剖为二，取其中之一作为控制体，如图 1-16(b) 所示，控制体包括管道壁和其中的流体，轴向剖面由流体剖面 ($A_1 = 2RL$) 和管壁剖面 ($A_2 = 2\delta L$) 组成。管内流体压力均匀作用在各个

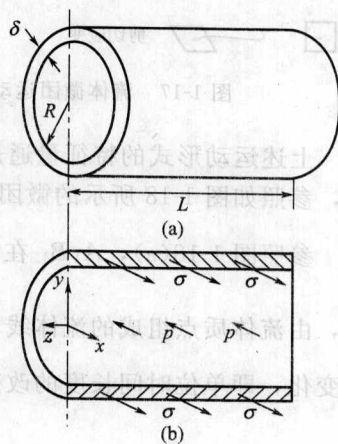


图 1-16 管内流体压力