

传递过程原理

邓颂九 李启恩 编著

华南理工大学出版社

传递过程原理

邓颂九 李启恩 编著

华南理工大学出版社

内 容 简 介

本书是为化工类研究生编写的教学用书或参考书。主要介绍牛顿型流体、非牛顿型流体及二相流体在层流及湍流条件下的动量、热量及质量传递问题的理论分析及实际应用。对化工生产中常用的搅拌槽、鼓泡塔及填料塔等设备中较复杂的二相流体传热与传质问题，也应用二相湍流传递理论进行了分析和讨论。对分子自由流情况下非连续性流体中的传递现象及过程，作了初步介绍。

本书也可供与传递现象有关专业的教师、研究生、科研或工程技术人员参考。

传递过程原理

邓颂九 李启恩 编著

责任编辑 林素华

华南理工大学出版社出版发行

(广州·五山)

各地新华书店经销

暨南大学印刷厂印装

开本850×1168 1/32 印张16.875 字数430千

1988年11月第一版 1990年6月第二次印刷

印数1000—1800

ISBN 7-5623-0053-4/TQ·2

定价：半精装4.35元

前 言

物体中或物体间的动量、热量和质量传递，既是自然界中的普遍现象，也是与生产实践密切相关的重要问题。为了使学生系统地掌握这方面理论知识，并将其用于指导科研与生产，国外许多大学有关专业的本科生及研究生教学计划中，均列有与此相关的各种初级及高级课程，并出版了一些教学用书及参考书。我国化学工程学科硕士研究生培养计划中也列入了“传递过程原理Ⅱ”这门课程，本书是为此门课程的开设而编写的教学用书。考虑到学生在学习本课程之前已学习过有关传递过程的初级课程，对质量、动量及能量微分衡算方程的推导及其应用，热传导，湍流基本概念，层流及湍流条件下动量、热量和质量传递等基本内容，有了初步基础；同时在化工生产中占主要地位的是连续性粘性流体在较低流速下的动量、热量和质量传递问题，因此本书的主要目的是希望使读者对连续性介质中的传递现象有进一步的认识，并引导读者更好地应用这些基本知识去分析和解决一些科研与生产中的实际问题。考虑到化工生产中有时也会遇到分子自由流范畴的问题，在本书最后一章也简要地介绍了这种非连续性流动中的动量、热量及质量传递的规律。

本书第一章简要地介绍了流体流动形态的分类，指出本书所讨论的流体流动范围主要是较低流速下连续性粘性流体的流动。在此范围中影响流体动量、热量及质量传递的主要矛盾是由流体分子运动产生的粘性力和由流体团块运动所产生的惯性力之间的矛盾，在湍流情况下，它表现为分子剪切力与涡流剪切力之间的

矛盾。在本书以后各章中均可看到，代表上述矛盾力量对比的雷诺数及点雷诺数，是推导和关联各种动量、热量及质量传递方程中不可缺少的重要准数。在此章中也介绍了流体粘度，导热系数及扩散系数的一些关联式和压强及温度对它们的影响。

第二章是用一个通用衡算方程来推导出流体中质量、动量及能量微分衡算方程，其意图是希望读者能更好地用一个统一概念来理解这些方程，并将这些方程引伸到其他力场影响下的传递过程中去。在推导过程中，采用了一些张量及矢量表达与分析方法，使读者对这些方法在传递过程中的应用有初步了解。

第三章主要介绍流体在平直管道中作湍流流动时，管道中各点分子剪切力与涡流剪切力这对矛盾力量的对比值，可用该点的点雷诺数来表达。在离管端较远处，点雷诺数是管径向距离的函数，从这些函数关系可以精确推导出管内流速分布，摩擦系数等重要流动特性。

第四章主要介绍自然对流与强制对流传热问题中动量及热量微分衡算方程的简化及求解方法。流体在平直管道中作湍流流动时，可以从点雷诺数与管径向距离的函数关系准确地推导出能适用于很广范围的传热与传质准数关联式。

第三章和第四章讨论了单相牛顿型流体在管道中或浸没体外流动时动量、热量或质量传递问题的理论分析及求解方法。由于在化工生产中经常会遇到一些非牛顿型流体，因此在第五章中对非牛顿型流体的流动特性及其在层流状态下动量及热量传递问题进行了分析与计算，对湍流状态下动量及热量传递问题则用类似牛顿型流体处理方法进行了讨论。

搅拌与混合是化工生产中经常遇到的一种操作过程，第六章利用了传递过程一些基本概念来说明搅拌和混合设备模拟与放大中一些基本原则。

第七、八、九 三 章 对二流体相界面处传热与传质理论模型、

(2)

实验关联式及其应用等进行了介绍和讨论。在二流体相界面处湍流传递现象中，仍存在分子作用力与涡流惯性力之间的矛盾，但分子作用力除了粘性力之外又增加了表面张力，这就增加了在二流体相界面处传质与传热现象的复杂性。目前关于这方面的理论分析还是不完备的，不同的作者实验关联结果也有差异。这三章介绍了一些作者应用现有二相界面传质理论模型，对所研究的传质问题先进行理论分析并得到初步关联式，再进行实验以确定关联式中待定系数或指数的方法，这种处理方法被称为半理论的研究方法。

由于分子自由流与连续性粘性流是二种性质不同的流动形式，第二至第九章中所介绍的有关粘性流各种结论与关联式，完全不适用于分子自由流。考虑到在化工科研与生产中有时也会遇到分子自由流的情况，在第十章中简要地介绍了分子自由流及过渡流条件下流体中动量、热量及质量传递基本规律及传递方程，使读者对这方面问题有一个初步的认识。

本书所采用的单位制度是国际单位制，下表列明本书所用基本单位及因次

本书所用基本单位及因次表

基本物理量	单位名称	英文代号	因次
长度	米	m	<i>L</i>
质量	千克(公斤)	kg	<i>M</i>
时间	秒	s	<i>T</i>
电流	安培	A	<i>I</i>
热力学温度	开尔文	K	Θ
物质的量	摩尔	mol	<i>N</i>

上表中摩尔是一系统的物质的量，该系统所包含的基本单元数与0.012千克碳—12原子数目相等。

在本书的极少数地方，因特殊情况也采用了少量非国际标准单位，其定义在该处说明。

本书涉及到的内容较广，可能出现错漏，希读者不吝指正，使本书在使用过程中不断得到改进。

编者

1986年9月

目 录

第一章 流体流动形态分类和流体传递性质	(1)
§1-1 流体流动形态的分类	(1)
§1-2 流体传递性质: 粘度、导热系数与扩散系数	(7)
1. 粘度	(7)
2. 导热系数	(18)
3. 扩散系数	(23)
附录1-1 液体粘度公式的理论推导	(28)
习题	(31)
第二章 质量、动量和能量衡算方程	(34)
§2-1 通用微元衡算方程	(34)
1. 对流传递	(34)
2. 分子传递	(35)
3. 体内产生量	(35)
§2-2 质量微元衡算方程	(36)
§2-3 动量微元衡算方程	(38)
§2-4 能量微元衡算方程	(47)
§2-5 电荷微元衡算方程	(66)
§2-6 迭加力场的影响	(67)
附录2-1 张量运算简介	(70)
1. 张量的定义及其表示法	(70)
2. 张量的加法和分解	(71)
3. 张量的乘法	(72)
4. 求张量的逆张量	(73)
5. 导数张量	(73)
6. 张量的散度	(76)

7. 交变单位张量	(76)
8. 曲线坐标中的张量	(78)
9. 曲线坐标中的算子 ∇	(83)
附录2-2 微分衡算方程式表	(86)
1. 多组分流体的通用微分衡算方程式表	(86)
2. 直角坐标系中的衡算方程	(88)
3. 圆柱坐标系中的衡算方程	(90)
4. 球坐标系中的衡算方程	(92)
附录2-3 传递过程的不可逆过程热力学	(95)
习题	(104)
第三章 不可压缩牛顿型流体在平直管道中的流动	(111)
§3-1 稳定平行流动基本方程	(111)
§3-2 流体在管道中流速分布	(117)
§3-3 平直管道中流体流动阻力	(124)
§3-4 管道中流体由层流状态到湍流状态的过渡	(133)
§3-5 减少流体流动阻力的方法	(143)
习题	(146)
第四章 单相牛顿型流体中对流传热与传质	(150)
§4-1 动量、热量与质量微分衡算方程	(150)
§4-2 自然对流传热	(152)
§4-3 流体对固体浸没体外表面的强制对流传热与传质	(162)
1. 流体平行流过水平平板时对平板表面的传热	(163)
2. 流体绕过圆柱体时的流动与传热	(171)
3. 流体对球体表面的对流传热与传质	(173)
4. 流体对填料床和管束的对流传热	(174)
§4-4 流体在管道中层流流动状态下的传热与传质	(176)
1. 常壁温条件下的传热	(176)
2. 常热流条件下的传热	(181)

§4-5 流体在管道中湍流流动状态下的传热与传质	(183)
1. 流体在二大平板间湍流流动时的传热与传质问题	(184)
2. 流体在水平圆管中湍流流动时传热与传质	(193)
3. 垂直管内的强制湍流传热问题	(205)
4. 粗糙管道内湍流传热问题	(207)
附录4-1 平板上边界层传热问题布拉修斯解法	(210)
附录4-2 圆管内流体进行湍流传热过程热量微分衡算方程的数学分析解	(216)
习题	(224)
第五章 非牛顿型流体的动量、热量和质量传递	(231)
§5-1 非牛顿型流体的流动特征	(231)
§5-2 指数型非牛顿型流体在管内层流流动	(239)
§5-3 非牛顿型流体在管内湍流流动	(250)
§5-4 粘弹性流体	(255)
§5-5 非牛顿型流体在管道中的传热与传质问题	(264)
1. 层流状态下的传热问题	(264)
2. 湍流状态下的传热问题	(271)
3. 非牛顿型流体在管道中对管壁的传质问题	(275)
习题	(275)
第六章 搅拌与混合	(280)
§6-1 概述	(280)
§6-2 搅拌槽中流速分布及搅拌功率	(281)
§6-3 搅拌桨结构形式及其搅拌混合作用	(290)
§6-4 搅拌槽模拟与放大基本法则	(293)
§6-5 对各种不同用途搅拌槽的讨论	(296)
1. 气液与液液二相分散	(296)
2. 维持固体颗粒均匀悬浮	(298)
3. 维持对搅拌槽壁或槽内盘管或立管的	

湍流传热膜系数相等·····	(302)
4. 促进均相液体中的宏观混合·····	(304)
5. 高粘度流体的搅拌·····	(309)
习题·····	(313)
第七章 两流体相界面间传质基本模型·····	(317)
§7-1 流体中分子扩散传质模型·····	(317)
§7-2 传质膜系数·····	(322)
1. 各种传质膜系表达形式·····	(322)
2. 流体对固定固体壁的传质膜系数·····	(326)
3. 在层流条件下流体对另一流体相的传质膜系数·····	(328)
4. 在湍流条件下流体对另一流体的传质膜系数·····	(332)
§7-3 两相界面间热量传递模型·····	(349)
习题·····	(360)
第八章 两连续相界面间的传质·····	(363)
§8-1 湿壁塔中二相界面的传质问题·····	(363)
§8-2 液体在河床, 浅槽或平板上流动时, 以及在容器中气 液二相界面上的传质问题·····	(371)
§8-3 液液二相水平界面上的传质·····	(379)
§8-4 表面活性剂对二相界面传质的影响·····	(381)
§8-5 二流体相间界面不稳定性与自发性界面扰动·····	(386)
1. 界面上界面张力差异引起的界面运动·····	(387)
2. 密度差引起的相界面不稳定·····	(393)
习题·····	(395)
第九章 分散二相系统中动量、热量与质量的传递·····	(397)
§9-1 球形液滴或气泡在爬流条件下对周围介质的动量、 热量及质量传递($Re_c = \frac{vd}{\nu_c} < 1$)·····	(398)
1. 分散相及连续相运动方程·····	(398)

2.	液滴或气泡对周围介质的传热与传质	(405)
3.	表面活性剂的影响	(418)
§9-2	液滴或气泡在快速运动中对周围介质的传递现象	(421)
§9-3	气泡与液滴的湍流分散和碰合	(434)
§9-4	两相传热与传质理论在气液与液液传质设备中的应用	(438)
1.	鼓泡塔中动量与质量传递过程的分析	(438)
2.	液液萃取搅拌槽中两相传质及萃取效率	(451)
3.	鼓泡搅拌槽中两相界面传质问题	(466)
4.	填料塔中的传质问题	(471)
	习题	(476)
第十章	分子自由流及过渡流	(481)
§10-1	气体在管道中的流动	(482)
1.	气体在管道中流动形态及分类	(482)
2.	气体在管道中的导流率(Conductance)及抽空速率	(484)
3.	连续性粘性流及滑动流	(486)
4.	自由分子流	(489)
5.	过渡流	(493)
§10-2	分子流及过渡流条件下的热量传递和温度跃变	(497)
§10-3	分子流及过渡流条件下的质量传递与气体分离	(502)
1.	用多孔隔膜分离气体混合物	(502)
2.	分子蒸馏	(505)
3.	多微孔固体中气体扩散系数	(507)
4.	微细颗粒或液滴对周围气体介质的动量、热量及质量传递	(509)
附录10-1	表面滑动现象	(510)
	习题	(512)
	本书主要符号及其因次说明	(514)

第一章 流体流动形态分类和流体传递性质

§ 1 - 1 流体流动形态的分类

在化工生产以及许多其他的工业实践中，经常遇到的是连续性粘性流体在较低速度运动中的动量、热量和质量的传递问题。本课程的重点也放在这个方面。在讨论这个问题之前，首先应该了解连续性粘性流的定义。目前，统计物理学的发展已经使得许多宏观的流体力学现象得到了微观的解释；而且还推动了宏观流体力学本身的发展。现在我们用分子运动论来对流体的连续性作一简单的讨论。以一般理想气体为例，在标准状态下，一 mol 气体体积为 22.4 L，其中包括了 6.023×10^{23} 个气体分子，在每 cm^3 气体中含有 2.7×10^{19} 个气体分子。当此种气体在管道或设备中流动时，人们可以将它看成是一种密集的介质流动，因为即使在空间很小的一个点内，也包含着难以计数的大量分子，这些分子群除了混乱的微观运动以外，又随主流体作整体运动，客观上就形成了连续性流体。反之，如果气体比较稀薄，相互之间的碰撞机会大大减少，分子的运动呈现出单个分子的自由运动，这样的流体就叫做自由分子流。

为了进行定量分析，我们应用分子运动的自由程的概念，分子的平均自由程(以下简称自由程) λ 是分子两次碰撞之间的平均直线路程。自由程可以用下式表示：

$$\lambda = \frac{KT}{\sqrt{2} p \pi d^2} = \frac{1}{\sqrt{2} n \pi d^2} \quad (1-1-1)$$

式中 K ——玻耳兹曼常数, $K = \frac{R}{N_0}$ 。
 $N_0 = 6.023 \times 10^{23}$;

R ——气体常数;

p ——压强;

T ——绝对温度;

d ——气体分子有效碰撞直径;

n ——单位体积中的分子数。

在常温常压下, 由(1-1-1)式计算出一般气体的 λ 值约为 1×10^{-4} mm 左右。在较低压强下, λ 值将变得较大, 有可能向自由分子流过渡。

例 1-1-1 试求氮在 15°C 时, 压强分别为 101325Pa (1 大气压) 和 0.1333Pa 时的分子自由程。

[解] 从文献〔4〕查出, $d_{N_2} = 3.798 \times 10^{-10}\text{m} = 3.798 \times 10^{-8}\text{dm}$

$$K = \frac{R}{N_0} = \frac{0.08205 \times 101325}{6.023 \times 10^{23}} = 1.38 \times 10^{-4} \frac{\text{L} \cdot \text{Pa}}{\text{K}}$$

$$T = 273 + 15 = 288\text{K}$$

$$(1) \quad p = 101325\text{Pa}$$

代入(1-1-1)式得

$$\lambda = \frac{1.38 \times 10^{-4} \times 288}{\sqrt{2} \pi \times 101325 \times 3.798^2 \times 10^{-16}} = 6.122 \times 10^{-7} \text{dm}$$

$$= 6.122 \times 10^{-4} \text{mm}$$

$$(2) \quad p = 0.1333\text{Pa}$$

$$\lambda = \frac{6.122 \times 10^{-7} \times 101325}{0.1333} = 46.52 \text{mm}$$

由上面的例子可以看出, 当氮的压强降低到很低数值如 0.1333Pa 时, 分子自由程将增大到 4.65cm , 如果此气体流过管内径远小于 4.65cm 的管子, 氮分子将以单个分子自由运动的形式通过管道, 分子之间将无碰撞, 只有对管壁的碰撞, 这种流动

状态就是自由分子流。^[1,2]

判别流动状态是否自由分子流或连续流的准数是克努生准数 (Knudsen 准数, 简称为 Kn)。

$$Kn = \lambda / L \quad (1-1-2)$$

式中 L 为流体流动中所遇到的物体的特性尺度。当流体在管内流动时, L 为管内径。当流体迎球体外流动时, L 为球的直径。对于边界层流动, 边界层厚度 δ 是一个很重要的特征尺寸, L 就应该是边界层厚度 δ 。如果 $\lambda / L \gg 1$, 流动称为完全的自由分子流, 如果 $\lambda / L \ll 1$, 流动称为连续流。通常取这样的界限:

$$Kn < 0.01 \quad \text{连续流}$$

$$Kn > 10 \quad \text{自由分子流}$$

在连续流中, 分子之间的碰撞占主导地位, 由于分子运动的传递作用, 在壁面处气体的速度和温度和壁面的速度和温度相同。在后面将看到, 气体的粘滞系数、导热系数等均有着明确的意义。

在自由分子流中, 分子之间的碰撞可以忽略, 分子和壁面之间的相互作用占主导地位。由于分子间相互碰撞机会消失, 粘性和导热性就失去意义。在这种场合, 气体和壁面之间的动量及能量交换需要根据分子与壁面碰撞的情况来计算。

在自由分子流和连续流之间还可以细分两个过渡区域。一个叫过渡流, 一个叫滑动流。在过渡流中, 克努生准数接近于 1, 分子之间的碰撞和分子对壁面的碰撞具有同等重要性。^[3] 在滑动流中, 虽然克努生数小于 1, 但在紧贴壁面的边界层中, 气体稀薄性的影响已经不能忽略。这时壁面处的气体不再具有和壁面相同的速度和温度。在表面处的气体应具有一个切向速度跃变, 它沿着表面滑过去。同样, 气体在表面处的温度也不等于壁面温度, 而是具有一个温度跃变。因此, 在根据纳维叶-斯托克斯方程来解答此类问题时还需作必要的修正^[4,5]。由于这类问题只是在边界上不同于连续流, 所以称之为近连续介质流。处理这类问

题的一个自然而有效的方法是在边界条件中把速度跃变和温度跃变反映出来。

在化工生产过程中，经常遇到的是连续粘性流，但在某些特殊情况下，也会遇到自由分子流或过渡流。例如冷冻干燥的压强一般为 $0.9 \sim 5.5 \text{ Pa}$ 。分子蒸馏压强因被蒸馏物质不同而变，其变化范围也基本上与冷冻干燥相似。在这些情况下，气相流动过程会达到过渡流或自由分子流条件，在计算时应根据这些特点来处理。^[4,5] 在气体扩散分离过程中，可用具有很小微孔的薄膜来分离混合气体，所用微孔大小比所分离气体的自由程小，气体通过微孔时是以分子自由运动状态通过的。由于不同分子量的气体通过微孔的速度不同，因此使它们得到分离。这种方法曾经被成功地用于铀同位素分离。

对连续性气体流动，流体运动可以视为由一群分子组成的流体团块运动和单个分子运动的两种本质不同的运动所组成。单个分子运动的特点是方向混乱，运动推动力量是分子本身的热能，在常温常压下分子间相互碰撞的频率约为 $5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ ，分子的自由程约为 $1 \times 10^{-4} \text{ mm}$ ，分子运动速度约为 $300 \sim 500 \text{ m/s}$ 。流体团块运动的特点是运动推动力是外压力或重力。在流体中有时也存在着方向混乱的团块运动(湍流)，但作为湍流中某一个小团块中各个分子，在某一瞬间是有共同运动方向的，这个方向就是小团块的瞬间脉动速度的方向，它是与该团块当时所受外力方向相一致的。在低流速下，湍流中团块互撞频率(或脉动频率)为 $1 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ 。涡流混合长度 $l \approx 1 \sim 10 \text{ mm}$ 。^[6] 团块脉动速度 $\bar{v} \approx 1 \sim 10^3 \text{ cm/s}$ 。对低速(小于 100 m/s)粘性流，两种运动的特点可列表比较如下：

表1-1-1 单个分子运动与团块运动的比较

	单个分子运动	团块运动(低速)
产生运动推动力 运动方向 速度	分子热能 混乱 300~500m/s	外加重力或压力 与团块受力方向一致 主流速度 $u < 100\text{m/s}$ 脉动速度
互撞频率 自由程	$\sim 5 \times 10^9 \text{s}^{-1}$ $\lambda \approx 1 \times 10^{-4} \text{mm}$	$\bar{v} = 0.01 \sim 10 \text{m/s}$ $1 \times 10^4 \text{s}^{-1}$ $l = 1 \sim 10 \text{mm}$

从以后的讨论可以看到, 对低速粘性流, 单个分子运动与流体团块运动构成了流体总的运动。但这两种运动又是互相矛盾的, 流体的运动形态实际上由这两种不同性质的运动所构成的矛盾来决定。体现这对矛盾力量对比的准数是雷诺准数(Re)。

如果气体流速增加, 达到或超过声速时, 流体运动中矛盾力量对比情况将产生变化。这问题的说明如下。

气体中声音传播的速度 C 可用下式表示:

$$C = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (1-1-3)$$

式中 $\gamma = C_p/C_v$ 。对单原子气体, $\gamma = 5/3$, 对双原子气体, $\gamma = 7/5$ 。

气体分子运动的最可几速度 v_m 可用下式表示:

$$v_m = \sqrt{\frac{2RT}{M}} \quad (1-1-4)$$

当气体主流速度 u 接近或超过声速 C 时, 主流速度的大小将对分子自由运动产生一定影响, 影响的大小由比值 u/C 决定。一般称 u/C 为马赫数(Mach 数, 简写为 Ma)。

$$Ma = \frac{u}{C} \quad (1-1-5)$$