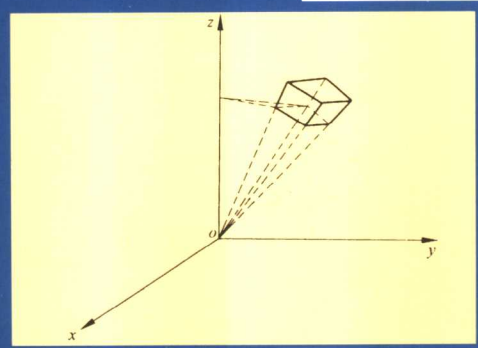
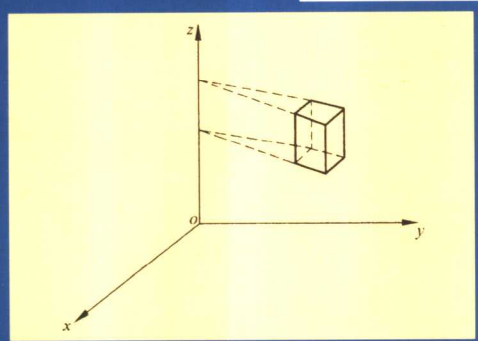
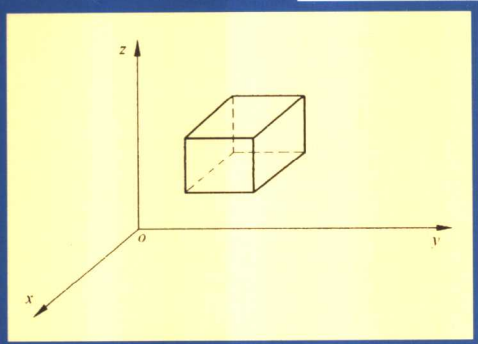


传递过程原理

王运东 骆广生 刘 谦 编著



清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

传递过程原理

王运东 骆广生 刘谦 编著

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书从研究动量传递、热量传递和质量传递 3 种传递过程的机理入手,阐明传递过程的基本规律、基本概念、基本物理现象以及处理问题的基本方法。内容包括传递过程微分方程、不可压缩流体运动、边界层理论、湍流、导热、对流换热、传质、分子扩散、对流扩散等方面的内容。

本书力图从物理和数学上阐述动量、热量和质量传递过程之间的相似性,用统一的和对照的方法研究这 3 种传递过程,加深读者对它们的理解。

全书共 11 章,书末有附录。

本书可作为高等学校化工、机械、热能、冶金、食品加工以及环境工程专业的本科生的教科书和教学参考书,亦可作为上述专业的研究人员、设计人员和其他工程技术人员的参考书。

书 名: 传递过程原理

作 者: 王运东 骆广生 刘谦 编著

责任编辑: 刘明华

出 版 者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印 刷 者: 北京牛山世兴印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 787×960 1/16 印张: 19 字数: 370 千字

版 次: 2002 年 3 月第 1 版 2002 年 3 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-05072-4/O·273

印 数: 0001~4000

定 价: 30.00 元

前 言

本书是清华大学化学工程系本科生的教材。在编写中注意了以下几点：

1. 遵循由浅入深的认识规律,加强阐述的系统性,便于自学。
2. 阐明正确的简化问题的思路与方法。结合书中介绍的一些重要模型,例如连续介质模型、理想流体模型、边界层模型等,讨论如何根据实践经验对所研究的具体现象进行分析;如何应用数量级分析这个工具来分析各种因素对于现象的影响,抓住主要因素,舍去次要因素,从而作出一些基本假设,提炼出简化的物理模型。这是培养学生的抽象思维概括能力的一个重要方面。
3. 努力从物理和数学上阐明动量、热量和质量传递过程之间的相似性。用统一的方法来研究这3种传递过程,并注意前后呼应;用对照的方法,将一种传递过程中得到的结果适当地应用到另一种传递过程中去,以加强读者对于上述3种传递过程共性的理解。
4. 介绍了数值解法的一些基本概念,以适应飞速发展的计算流体力学和计算传热学的需要。
5. 增加了大量的习题。

感谢清华大学出版社刘明华编审,由于她的辛勤劳动,大大地减少了书中的错误和疏漏。

由于作者学识有限,错误和不妥之处一定不少,恳请广大读者批评指正,以便再版时修改。

作 者

2001年4月10日

于清华大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1-1 3 种传递现象的类比	2
1-2 传递过程的研究方法	7
第 2 章 基本概念	10
2-1 连续介质模型	10
2-2 流体的不可压缩性	12
2-3 描述流体流动的两种方法	12
2-4 迹线与流线	17
2-5 系统与控制体	19
2-6 数学补充	20
习题	24
第 3 章 传递过程微分方程	28
3-1 连续性方程	28
3-2 运动方程	35
3-3 能量方程	49
3-4 运动方程、能量方程和组分 A 的质量传递方程之间的类比	56
3-5 定解条件	58
习题	61
第 4 章 不可压缩流体运动的若干解	64
4-1 流体在无限大平行平板间的等温稳态层流	64
4-2 圆管内的稳态层流流动——哈根-泊肃叶(Hagen-Poiseuille) 流动	70
4-3 流体在旋转的同轴双层圆筒之间的库特(Couette)流	72
4-4 具有自由界面的稳态流动	75
4-5 无限大平板在粘性流体中的突然运动	77
4-6 极慢粘性流动(爬流)	81

4-7 无粘性流动	88
习题	98
第5章 边界层理论	106
5-1 普朗特(Prandtl)边界层理论模型	107
5-2 粘性不可压缩流体的层流边界层方程	111
5-3 半无限长平板的层流边界层的精确解 ——布拉修斯(Blasius)解	116
5-4 卡门(Karman)动量积分关系式	124
习题	130
第6章 湍流	133
6-1 湍流的随机性	133
6-2 研究湍流的统计平均方法	134
6-3 湍动强度	136
6-4 湍流的基本方程	137
6-5 普朗特混合长度理论	140
6-6 圆管内的粘性不可压缩流体的稳态湍流运动	149
6-7 平板湍流边界层的近似解	153
6-8 平板混合边界层的近似计算	156
习题	156
第7章 导热	160
7-1 概述	160
7-2 导热的基本微分方程及定解条件	161
7-3 求解导热问题的方法	163
7-4 稳态导热的分析解	166
7-5 非稳态导热问题的分析解	174
7-6 导热问题的数值解	192
习题	200
第8章 对流换热	205
8-1 概述	205
8-2 对流换热的数学描述	206
8-3 温度边界层(热边界层)	207
8-4 圆管内的层流换热	209
8-5 纵向绕流平板的层流换热	214
8-6 绕流具有未加热起始段平板的层流换热	217

8-7 动量传递和热量传递的比拟理论	220
习题	226
第9章 传质的基本概念和传质的数学提法	229
9-1 概述	229
9-2 传质基本概念	230
9-3 质量传递微分方程	234
9-4 定解条件	237
习题	238
第10章 分子扩散	239
10-1 一维稳态分子扩散	239
10-2 二维稳态分子扩散	250
10-3 非稳态分子传质	251
10-4 二维、三维非稳态分子扩散	256
10-5 动量和质量的同时传递	256
习题	258
第11章 对流传质	261
11-1 概述	261
11-2 对流传质过程的数学描述	262
11-3 浓度边界层	264
11-4 纵向绕流无限大平板的层流传质	265
11-5 圆管内的层流对流传质	272
11-6 动量、热量和质量传递的比拟理论	273
习题	276
主要符号表	279
附录	283
附录1 误差函数表	283
附录2 双曲函数表	284
附录3 拉普拉斯(Laplace)变换表	285
附录4 空气的热物理性质($p=101.325\text{kPa}$)	286
附录5 饱和水的热物理性质	287
附录6 干饱和水蒸气的热物理性质	289
附录7 双组分气体混合物的热物理性质 ($p=101.325\text{kPa}, T=290\text{K}$)	291

附录 8 液体中的扩散系数	292
附录 9 溶质在稀生物凝胶水溶液中的扩散系数	293
附录 10 固体中的扩散系数	294
参考文献	295

第 1 章

绪 论

以过程工业为对象研究传递现象是在化工原理或单元操作的基础上,进一步综合其中有关动量、热量和质量传递的共同规律而发展起来的一门课程。它的形成和出现标志着化学工程学科发展到了一个新的高度。

20 世纪初,人们逐渐认识到各工艺过程中存在着通用的物理过程的共性。20 世纪 20 年代,美国麻省理工学院的一些学者提出不管化工生产的工艺如何千差万别,它们在很多典型设备中进行着原理相同的物理过程。这一新见解在 1922 年美国化学工程师学会年会上得到公认,从而引出了“单元操作”(unit operation)的概念。例如,无论在制糖还是在化肥工业中,从溶液中蒸发液体所遵循的原理是相同的,于是蒸发成为最早提出的单元操作之一。成为单元操作的还有流体流动、传热、干燥、吸收、萃取、结晶、过滤等。以这些单元操作作为研究和学习的主要内容,是化学工程学科在 20 世纪前半期发展的基本情况。化工单元操作的理论成为迅速发展化学工业的重要基石。可以认为单元操作是化学工程学科发展中的第一个概括。

当单元操作被了解得更加深入以后,人们发现各单元操作之间存在着共性。过滤只是流体流动的一个特例;蒸发是传热的一种形式;萃取、吸收都包含着质量的传递;干燥和蒸馏则是传热与传质同时进行的操作。于是,单元操作可以看成是传热、传质及流体流动的特殊情况或特定组合。作为单元操作的基础——流体流动同传热和传质一样,也被视为一种传递现象,这是因为在真实流体流动时,必然存在着动量传递。进一步又发现了动量传递、热量传递和质量传递之间具有类似性。因此,20 世纪中期以来,人们开始用统一的观点来研究上述 3 种传递现象,并求出其相互关系。1960 年美国威斯康辛大学的 R. B. Bird 等人出版了《Transport Phenomena》一书,首次把 3 种传递现象用统一的观点来处理,力图阐明这 3 种传递过程之间在定性和定量描述以及计算上的相似性。这对于学生更深入理解传递过程的机理是十分有意义的。它不仅对化学工程学科的发展起着重要

的作用,也成为许多工程专业必修的专业基础课。

1-1 3种传递现象的类比

当物系中存在速度、温度和浓度梯度时,则发生动量、热量和质量传递。动量、热量和质量的传递,既可以是由分子的微观运动引起的分子扩散,也可以是由旋涡混合造成的流体微团的宏观运动引起的湍流传递。

1-1-1 分子传递性质

流体的粘性、热传导性和质量扩散通称为流体的分子传递性质。从微观上来考虑,这些性质分别是非均匀流场中分子不规则运动这同一过程所引起的动量、热量和质量传递的结果。当流场中速度分布不均匀时,分子传递的结果产生剪切应力;而温度分布不均匀时,分子传递的结果产生热传导;在多组分的混合流体中,如果某种组分的浓度分布不均匀,分子传递的结果便引起该组分的质量扩散。描述上述3种传递过程的物理定律分别是牛顿粘性定律、傅里叶定律和费克定律。

1. 牛顿粘性定律

牛顿(Newton)在1687年第一个对最简单的剪切运动作了一个著名的实验,并建立了切向应力和剪切变形之间的关系。考虑两块面积均为 A 、板间距为 y 的平行平板间充满粘性流体的流体运动。设想该系统原先处于静止状态,但在时间 $t=0$ 时,让下面一块平板以恒定速度 u 在沿 x 方向运动。随着时间的推移,流体获得了动能,并最终建立起如图1-1所示的稳态速度分布。当达到这一最终的稳态时,欲使下板维持运动,必须有一恒定力 F 作用其上,如果流型为层流,这个力可以用下式表示:

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{u}{y} \quad (1-1)$$

这就是说,作用于单位面积上的力正比于在距离 y 内流体速度的减少值,该比例系数 μ 称为流体的粘度。如果相邻两层流体的间距为 dy ,速度 u 在 x 方向上的分量分别为 u_x 和 $u_x - du_x$,则式(1-1)可改写为

$$\tau_{yx} = -\mu \frac{du_x}{dy} \quad (1-2)$$

上式说明,单位面积上的剪切力与局部速度梯度的负值成正比,这就是著名的牛顿粘性定律(Newton's Viscosity Law)的数学表达式,它表明剪切应力和剪切变形速度之间的关系。凡服从牛顿粘性定律的流体称为牛顿型流体。所有的气体和大多数的低相对分子质量液体均属牛顿型流体。

式中, τ_{yx} ——剪应力或动量通量, N/m^2 ;

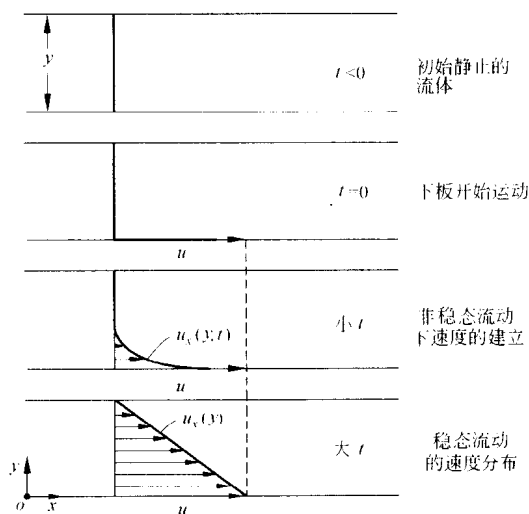


图 1-1 介于两平板间的流体稳态层流速度分布的建立

μ ——粘度或称动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

du_x/dy ——速度梯度或称剪切速率, $\frac{1}{\text{s}}$;

y ——垂直于运动方向的坐标, m 。

负号表示动量通量的方向与速度梯度的方向相反, 即动量通量是沿着速度降低的方向传递的。现定义粘度除以流体的密度 ρ 所得的量为运动粘度(或称动量扩散系数), 即

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

式中, ν ——流体的运动粘度(或称动量扩散系数), m^2/s ;

ρ ——流体的密度, kg/m^3 。

于是, 式(1-2)可以改写为

$$\tau_{yx} = -\nu \frac{d(\rho u_x)}{dy} \quad (1-4)$$

其物理意义为

x 方向上的动量在 y 方向上的通量 =

— (动量扩散系数) \times (y 方向上的动量浓度梯度)

式中 τ_{yx} 当它表示动量通量时, 第一个下标表示动量的传递方向(y), 第二个下标表示动量的方向(x); 当它表示剪切应力时, 第一个下标表示剪切应力作用面的外法线方向(y), 第二个下标表示剪切应力的作用方向(x)。显然, 动量的传递方向(动量通量的方向)与剪切应力的作用方向相互垂直。式中负号表示 u_x 随 y 的增加而

减少。

粘度是流体的物理性质,它与物系的温度、压力和组成有关。高密度气体的粘度随压力的升高而增加,低密度气体的粘度与压力无关;液体的粘度则随温度的升高而降低。在相同温度下,所有液体的粘度均比组成与之相同的气体的粘度大。

运动粘度用分子运动论导出。设两层相邻气体分别以 u_{x1} 和 u_{x2} 的速度运动,它们之间的距离等于分子平均自由程 λ ,如图 1-2 所示。若单位体积气体中的分子数为 n ,并近似地假定其中的 $1/3$ 垂直于气体层在 y 方向运动,分子平均速度为 v ,每个气体分子的质量为 m ,则单位时间内经过单位面积交换的分子数为 $\frac{1}{3}nv$ 。这些分子传递的动量为

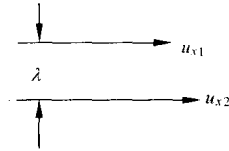


图 1-2 气体分子碰撞后发生动量交换

$$\tau_{xy} = \frac{n}{3}vm(u_{x2} - u_{x1}) \quad (1-5)$$

由于分子平均自由程 λ 很小,所以 $(u_{x2} - u_{x1})/\lambda$ 可以近似地用 du_x/dy 代替,即

$$u_{x2} - u_{x1} = \lambda \frac{du_x}{dy}$$

又因为密度 $\rho = nm$,将以上关系式代入式(1-5),得

$$\tau_{xy} = \frac{\rho}{3}v\lambda \frac{du_x}{dy} = \frac{1}{3}v\lambda \frac{d(\rho u_x)}{dy} \quad (1-6)$$

比较式(1-4)和式(1-6),不计负号,得

$$\nu = \frac{1}{3}v\lambda \quad (1-7)$$

2. 傅里叶定律

在均匀的各向同性材料的一维温度场中,通过导热方式传递的热量通量密度为

$$q = -k \frac{dT}{dy} \quad (1-8)$$

这一方程式 1822 年由法国数学-物理学家傅里叶(Fourier)首先提出。对于恒定 ρc_p 的流体,

$$q = -\frac{k}{\rho c_p} \frac{d(\rho c_p T)}{dy} = -\alpha \frac{d(\rho c_p T)}{dy} \quad (1-9)$$

式中, y ——温度变化方向的坐标, m ;

q ——热量通量密度或能量通量密度,表示单位时间内通过单位面积传递的热量, $J/(m^2 \cdot s)$;

k ——导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$;

α ——热扩散系数,又称导温系数, m^2/s ;

$d(\rho c_p T)/dy$ ——焓浓度梯度或称热量浓度梯度,表示单位体积内流体所具有的焓在 y 方向的变化率, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{m})$ 。

式(1-9)的物理意义为:

由于温度梯度引起 y 方向上的热量通量 =
— (热量扩散系数) \times (y 方向上的热量浓度梯度)。

式(1-9)中负号表示热量通量的方向与热量浓度梯度的方向相反,即热量朝着温度降低的方向传递。

3. 费克定律

在无总体流动或静止的双组分混合物中,若组分 A 的质量分数 w_A ($w_A = \rho_A/\rho$, 其中, ρ_A 为组分 A 的密度, ρ 为混合物的密度) 的分布为一维的,则通过分子扩散传递的组分 A 的质量通量密度为

$$j_A = -D_{AB}\rho \frac{dW_A}{dy} \quad (1-10)$$

对于混合物密度为常数的情况,上式可改写为

$$j_A = -D_{AB} \frac{d\rho_A}{dy} \quad (1-11)$$

式中,

y ——组分 A 的密度发生变化的方向的坐标, m ;

j_A ——组分 A 的质量通量密度,表示单位时间内,通过单位面积传递的组分 A 的质量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;

D_{AB} ——组分 A 在组分 B 中的扩散系数, m^2/s ;

$d\rho_A/dy$ ——组分 A 在 y 方向的质量浓度梯度, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{m})$ 。

式(1-11)是费克(Fick)1855年首先提出来的。整个式子表达的物理意义为:

由于浓度梯度引起组分 A 在 y 方向上的质量通量
= — (质量扩散系数) \times (y 方向上组分 A 的质量浓度梯度)

式(1-11)中负号表示质量通量的方向与质量浓度梯度的方向相反,即质量朝着其浓度降低的方向传递。

通过对上述 3 种传递现象的讨论,可以看到动量、热量和质量虽然是在 3 个完全不同领域中的物理量,但它们的通量却具有非常相似的数学表达式:

$$\left. \begin{array}{l} \text{动量} \\ \text{热量} \\ \text{质量} \end{array} \right\} \text{通量} = - \text{扩散系数} \times \left. \begin{array}{l} \text{动量} \\ \text{热量} \\ \text{质量} \end{array} \right\} \text{浓度梯度}$$

即通量分别和各自的扩散系数和浓度梯度成正比,负号则表示通量的方向。3 个方程的扩散系数 ν, α 和 D_{AB} 的单位均为 m^2/s 。通常,将通量等于扩散系数乘以浓

度梯度的方程称为现象方程。常见的现象方程列于表 1-1。

表 1-1 一维通量方程(现象方程)

扩散量	扩散过程	通量方程	扩散系数	通量方程中各项的单位	物理定律
动量	粘性剪切流	$\tau_{yx} = -\nu(d\rho u/dy)$	$\nu = \mu/\rho$	$(\text{kg} \cdot \text{m/s})/(\text{m}^2/\text{s}) =$ $-(\text{m}^2/\text{s})(\text{kg}/\text{m}^3)(\text{m/s})/\text{m}$	牛顿粘性定律
热量	热传导	$q/A =$ $-a[d(\rho c_p T)/dy]$	$\alpha = k/\rho c_p$	$\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) =$ $-(\text{m}^2/\text{s})(\text{J}/\text{m}^3)/\text{m}$	傅里叶定律
质量 (组分 A)	双组分混合 物中扩散	$J_{Ay} = -D_{AB}(d\rho_A/dy)$	D_{AB}	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) =$ $-(\text{m}^2/\text{s})(\text{kg}/\text{m}^3)/\text{m}$	费克定律
电量	电传导	$i = -\alpha_c[d(c''V)/dy]$	$\alpha_c = k_c/c''$	$\text{C}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) =$ $-(\text{m}^2/\text{s})(\text{C}/\text{m}^3)/\text{m}$	欧姆定律

注: i ——电荷通量, $\text{C}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;

k_c ——电导率, $\text{C}/(\text{V} \cdot \text{m} \cdot \text{s})$;

C ——电荷量, C ;

α_c ——电量扩散系数, m^2/s ;

c'' ——单位体积电容, $\text{C}/(\text{m}^3 \cdot \text{V})$;

V ——电势, V 。

以后将会看到,正是由于这 3 种基本传递公式的类似性导致这 3 种传递过程具有一系列的类似的特性。最后应当指出的是,上述类似只适用于一维系统,因为热量和质量都是标量,它的通量是矢量,在直角坐标系中有 3 个方向的分量;而动量是矢量,它的通量是张量,有 9 个分量。另一个不同点是质量传递是物质的移动需要占有空间;而动量和能量的传递不占有空间。热量可以通过间壁传递,而质量不能通过间壁传递。

1-1-2 湍流传递性质

在湍流流动中,除分子传递现象外,宏观流体微团的不规则混合运动也引起动量、热量和质量的传递,其结果从表象上看起来相当于在流体中产生了附加的“湍流切应力”、“湍流热传导”和“湍流质量扩散”。由于流体微团的质量比分子的质量大得多,湍流传递的强度自然要比分子传递的强度大得多。

尽管湍流混掺运动与分子运动之间有重要差别,早期半经验湍流理论的创立者还是仿照分子传递性质的定律来建立确定湍流传递性质的公式。在这种理论中定义的湍流动力粘度系数 μ_t 、湍流导热系数 k_t 和湍流质量扩散系数 D_{Abt} , 并认为对于只有一个速度分量的一维流动而言,湍流切应力 τ_t 、湍流热量通量密度 q_t 和湍流扩散引起的组分 A 的质量通量密度 j_{At} 分别与平均速度、平均温度和组分 A 的平均密度的变化率成正比,亦即

$$\tau_t = -\mu_t \frac{d\bar{u}}{dy} \quad (1-12)$$

$$q_t = -k_t \frac{d\bar{T}}{dy} \quad (1-13)$$

$$j_{At} = -D_{ABt} \frac{d\bar{\rho}_A}{dy} \quad (1-14)$$

因为在流体中同时存在湍流传递性质,所以总的切应力 τ_s 、总的热量通量密度 q_s 和组分 A 的总的质量通量密度 j_s 分别为

$$\tau_s = -(\mu + \mu_t) \frac{d\bar{u}}{dy} = -\mu_{\text{eff}} \frac{d\bar{u}}{dy} \quad (1-15)$$

$$q_s = -(k + k_t) \frac{d\bar{T}}{dy} = -k_{\text{eff}} \frac{d\bar{T}}{dy} \quad (1-16)$$

$$j_s = -(D_{AB} + D_{ABt}) \frac{d\bar{\rho}_A}{dy} = -D_{AB\text{eff}} \frac{d\bar{\rho}_A}{dy} \quad (1-17)$$

其中, μ_{eff} , k_{eff} 和 $D_{AB\text{eff}}$ 分别称为有效动力粘度、有效导热系数和组分 A 在双组分混合物中的有效质量扩散系数。

在充分发展的湍流中,湍流传递系数往往比分子传递系数大得多,因而有 $\mu_{\text{eff}} \approx \mu_t$, $k_{\text{eff}} \approx k_t$, $D_{AB\text{eff}} \approx D_{ABt}$, 故可以用式(1-12)、式(1-13)和式(1-14)分别代替式(1-15)、式(1-16)和式(1-17)。这样,湍流动量传递、湍流热量传递和湍流质量传递的 3 个数学关系式(1-12)、式(1-13)和式(1-14)也是类似的。

应当指出的是,有了类似于式(1-12)、式(1-13)和式(1-14)这样的从表象出发建立起来的公式,并没有根本解决湍流计算的问题。因为确定湍流传递系数 μ_t , k_t 和 D_{ABt} 比起确定分子传递系数 μ , k 和 D_{AB} 困难得多。首先,分子传递系数只取决于流体的热力学状态,不受流体宏观运动的影响,因此分子传递系数 μ , k 和 D_{AB} 均是与温度、压力有关的流体的固有属性,是物性。而湍流传递系数主要取决于流体的平均运动,故不是物性。其次,分子传递性质可以由逐点局部平衡的定律来确定,而对于湍流传递性质来说应该考虑其松弛效应,即历史和周围流场对某时刻、某空间点湍流传递性质的影响。除此之外,在一般条件下,分子传递性质 μ , k 和 D_{AB} 是各向同性的,但是在大多数情况下,湍流传递系数 μ_t , k_t 和 D_{ABt} 是各向异性的。

正是由于湍流传递性质的上述特点,使得湍流流动的理论分析至今仍未彻底解决,主要还是通过实验研究的方法来解决。

1-2 传递过程的研究方法

传递过程是物理过程,它的研究方法和物理学中其他领域的研究方法一样,有理论分析、实验研究和数值计算 3 种方法。它们彼此取长补短,互相促进,从而使学科得到不断的发展。

1. 理论分析

理论分析方法一般可分为 3 个阶段：

(1) 确定简化的物理模型

这是理论研究方法最关键也是最困难的一步，它要求人们对所研究的对象必须有深刻的了解。通常可以依靠实验、观察，对被研究的对象进行具体分析，分析哪些是主要影响因素，哪些是次要因素，然后抓住主要因素忽略次要因素进行合理的简化和近似，从而提出简化的物理模型。

(2) 建立数学模型

针对上述物理模型，根据物理上已经总结出来的普遍定律（如牛顿定律、热力学定律等等）建立普遍方程。普遍方程是对一大类问题的一般描述。它全然没有涉及过程的具体特点。为了惟一地确定所研究的某一过程，必须列出相应的定解条件，包括初始条件和边界条件。数学模型建立后，实际上已将一个物理问题变成了数学问题。

(3) 数学求解

利用各种数学工具准确地或近似地解出上述数学问题，并将结果和实验或观察资料进行比较，确定解的准确程度以及使用范围。

2. 数值计算

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局限，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，使数值计算在传递过程研究中成为与理论研究和实验研究并列的、具有同等重要意义的研究方法，由此产生了计算流体力学（computational fluid dynamics）、计算传热学（computational heat transfer）和计算流体混合（computational fluid mixing）等新的学科分支。

3. 实验研究

实验研究方法在传递过程中有着广泛的应用，它是研究问题不可缺少的一个方面。简化物理模型的提出，需要实验提供依据；计算结果的正确性和可靠性，需要实验来检验；当所研究的问题极其复杂，模型不易建立，或虽有模型但因方程复杂或边界条件复杂难于求解时，实验研究就显得特别重要。

实验研究方法的主要特点在于：实验能在所研究的问题完全相同或大体相同的条件下进行观测，因此通过实验得出的结果一般来说是可靠的。但是实验方法往往受到模型尺寸的限制。此外，还有边界影响不能全部满足等问题。

综上所述，理论、计算和实验这 3 种方法各有利弊，互相补充。实验用于检验计算结果的正确性和可靠性以及提供建立物理模型的依据，这样的作用不论理论

和计算发展得多么完善都是不可替代的；而理论则能指导计算和实验，使之进行得富有成效，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。可以减少一系列复杂的传递过程的研究工作量。理论、计算和实验这样不断地相互作用，正是学科得到飞速发展的原因之一。

在本书中主要介绍理论分析的方法，同时也扼要介绍了数值计算方法。