

# 传递过程原理

刘谦 编

高等学校教学参考书

高等教育出版社

高等学校教学参考书

# 传递过程原理

刘 谦 编

高等教育出版社

## 内 容 简 介

本书是在作者自编讲义“传递过程原理”基础上改写而成的。该讲义曾作为清华大学化工系本科生的教材多次使用。

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，传质的基本概念，分子扩散，对流传质等方面的基本内容。

本书力图从物理上和数学上阐明动量、热量和质量传递过程之间的相似性，用统一的和对照的方法研究三种传递过程，加深对三种传递过程的理解。

全书共11章，书末有附录。全书采用我国法定计量单位。

本书可作为热能工程、动力机械、化工、冶金轻工、食品加工以及环境工程等专业大学生的教科书或参考书。

高等学校教学参考书

传递过程原理

刘 谦 编

\*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷二厂印刷

\*

开本850×1168 1/32 印张12.5 字数300 000

1990年6月第1版 1990年6月北京第1次印刷

印数 0001—2 770

ISBN 7-04-001972-8/TH·40

定价 3.05 元

## 前 言

本书是在作者自编讲义“传递过程原理”基础上经过修订改写而成的。该讲义曾作为清华大学化工系本科生的教材多次被使用。

作为一本大学生的教材，本书在编写过程中注意了如下几点：

1. 遵循由浅入深的认识规律，加强阐述的系统性，以便于自学。

2. 力图阐明正确地简化问题的思路与方法。结合书中采用的一些重要模型，例如连续介质模型、理想流体模型、边界层模型等，阐明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该现象的影响，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. 努力从物理上和数学上阐明动量、热量和质量传递过程之间的类似性。用统一的方法来研究这三种传递过程，并注意前后呼应，用对照的方法将在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，以便加强学生对于上述三种传递过程的共性的理解。

4. 初步介绍了数值解法的一些基本概念，并以二维稳态温度场的计算为例说明数值计算在解决传递过程问题中的应用，以期适应当代计算机迅速发展的趋势。

在编写过程中深感自己水平有限，虽然认真参考了有关的教科书，但书中不足之处和错误仍在所难免，敬请广大读者批评指正。

作者

1988. 1. 15

## 主要符号表

<p><math>A</math> 面积, 表面积, <math>\text{m}^2</math></p> <p><math>a</math> 加速度, <math>\text{m}/\text{s}^2</math></p> <p><math>C</math> 摩尔浓度, <math>\text{kmol}/\text{m}^3</math></p> <p><math>C_d</math> 总阻力系数</p> <p><math>C_f</math> 局部阻力系数</p> <p><math>C_p</math> 无量纲压力系数</p> <p><math>c</math> 比热容, <math>\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})</math></p> <p><math>c_p</math> 等压比热容, <math>\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})</math></p> <p><math>c_v</math> 等容比热容, <math>\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})</math></p> <p><math>D_{AB}</math> 组分<math>A</math>通过组分<math>B</math>的分子扩散系数, <math>\text{m}^2/\text{s}</math></p> <p><math>d</math> 直径, <math>\text{m}</math></p> <p><math>e</math> 内能, <math>\text{J}/\text{kg}</math></p> <p><math>F_d</math> 总阻力, <math>\text{N}</math></p> <p><math>F_{df}</math> 形体阻力, <math>\text{N}</math></p> <p><math>F_{ds}</math> 摩擦阻力, <math>\text{N}</math></p> <p><math>F_M</math> 作用在单位质量流体上的质量力, <math>\text{N}/\text{kg}</math></p> <p><math>G_A</math> 组分<math>A</math>的摩尔通量, <math>\text{kmol}/\text{s}</math></p> <p><math>g</math> 重力加速度, <math>9.81\text{m}/\text{s}^2</math>,</p> <p><math>h</math> 比焓, <math>\text{J}/\text{kg}</math>; 对流换热系数, <math>\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})</math></p> <p><math>h_c</math> 局部对流换热系数, <math>\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})</math></p>	<p><math>h_m</math> 平均对流换热系数, <math>\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})</math></p> <p><math>I</math> 湍流强度</p> <p><math>J_A</math> 相对于摩尔平均速度的组分<math>A</math>的摩尔通量密度, <math>\text{kmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})</math></p> <p><math>j_A</math> 相对于质量平均速度的组分<math>A</math>的质量通量密度, <math>\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})</math></p> <p><math>j_D</math> 柯尔邦传质<math>j</math>因数</p> <p><math>j_H</math> 柯尔邦传热<math>j</math>因数</p> <p><math>k</math> 平衡分配系数</p> <p><math>k</math> 导热系数, <math>\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})</math></p> <p><math>k_c</math> 基于<math>\Delta c</math>的对流传质系数, <math>\text{m}/\text{s}</math></p> <p><math>k^0</math> 无总体流体的对流传质系数, <math>\text{m}/\text{s}</math></p> <p><math>L</math> 厚度, 特征尺度, <math>\text{m}</math></p> <p><math>L_c</math> 进口段长度, <math>\text{m}</math></p> <p><math>l</math> 混合长度, <math>\text{m}</math></p> <p><math>M</math> 分子量, 稳定性判据, 阻力矩, <math>\text{kg}/\text{kmol}</math></p> <p><math>m</math> 质量流量, <math>\text{kg}/\text{s}</math></p> <p><math>N</math> 相对于静止坐标的总摩尔通</p>
--	---

量密度,  $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

$n$  相对于静止坐标的总质量通量密度,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

$p$  压强,  $\text{N}/\text{m}^2$

$p_{xx}, p_{yy}, p_{zz}$  作用在与 $x, y, z$ 轴相垂直面上的 $x, y, z$ 方向上的法向应力分量,  $\text{N}/\text{m}^2$

$Q$  热流量,  $\text{W}$

$q$  热流密度,  $\text{W}/\text{m}^2$

$\dot{q}$  单位体积的发热率,  $\text{W}/\text{m}^3$

$R$  气体常数,  $8314.34\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$  圆柱和球体半径,  $\text{m}$

$R_A$  组分 $A$ 的生成摩尔速率,  $\text{kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$

$r_A$  组分 $A$ 的生成质量速率,  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$

$r_i$  半径,  $\text{m}$

$T$  温度,  $^\circ\text{C}, \text{K}$

$t$  时间,  $\text{s}$

$U$  内能,  $\text{J}/\text{kg}$

$u$  速度, 质量平均速度,  $\text{m}/\text{s}$

$u_M$  摩尔平均速度,  $\text{m}/\text{s}$

$u_{w}$  在壁面并与之垂直的速度,  $\text{m}/\text{s}$

$V$  体积

$W_A$  组分 $A$ 的质量分数

$X, Y, Z$  作用在单位质量流体上的质量力在 $x, y, z$ 方向上的分量

$x_A$  组分 $A$ 在液相和固相中的摩尔分数

$y_A$  组分 $A$ 在气相中的摩尔分数

$x, y, z$  直角坐标系三个方向上的长度,  $\text{m}$

$\alpha$  导热系数, 热量扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$

$\delta$  厚度, 速度边界层厚度,  $\text{m}$

$\delta_c$  浓度边界层厚度,  $\text{m}$

$\delta_T$  温度边界层厚度,  $\text{m}$

$\eta$  无量纲自变量 ( $\eta = y \sqrt{\frac{\mu_w}{\gamma X}}$ )

$\Theta$  无量纲温度 ( $\Theta = \frac{T - T_w}{T_\infty - T_w}$ )

$\theta$  柱坐标系中的方位角、球坐标系中的余纬度,  $\text{rad}$

$\lambda$  摩擦系数

$\mu$  粘度,  $\text{kg}'/(\text{m} \cdot \text{s})$

$\gamma$  运动粘度、动量扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$

$\xi'$  无量纲速度 ( $\xi' = \frac{u_x}{u_\infty}$ )

$\Pi$  无量纲浓度 ( $\Pi = \frac{C_A - C_{Aw}}{C_{A\infty} - C_{Aw}}$ )

$\rho$  密度, 浓度,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$\tau_{xy}$  作用在与  $x$  轴相垂直面上  $y$  方向上的切向应力分量,  $N/m^2$

$\tau_{xz}$  作用在与  $x$  轴相垂直面上  $z$  方向上的切向应力分量,  $N/m^2$

$\tau_{yx}$  作用在与  $y$  轴相垂直面上  $x$  方向上的切向应力分量,  $N/m^2$

$\tau_{yz}$  作用在与  $y$  轴相垂直面上  $z$  方向上的切向应力分量,  $N/m^2$

$\tau_{zx}$  作用在与  $z$  轴相垂直面上  $x$  方向上的切向应力分量,  $N/m^2$

$\tau_{zy}$  作用在与  $z$  轴相垂直面上  $y$  方向上的切向应力分量,  $N/m^2$

$\phi$  球坐标系中的方位角, rad, 势函数,  $m^2/s$

$\psi$  流函数,  $m^2/s$

上标:

— 时均量

, 脉动量

\* 无量纲量

下标:

A, B 组分A和组分B

l 层流状态

m 平均

t 湍流状态

w 壁面

$\infty$  来流状态

\* 特征量

$r, \theta, z$  柱坐标系中的径向、方位角、轴向分量

$r, \phi, z$  球坐标系中的径向、方位角、余纬度分量

$x, y, z$  直角坐标系中的三个方向上的分量

无量纲准数 (相似准数)

$$Bi = \frac{hL}{k}, \text{ 传热的毕渥准数}$$

$$Bi' = \frac{k_c^0 L}{D_{AB}} \text{ 传质的毕渥准数}$$

$$Fo = \frac{at}{L^2} \text{ 傅立叶准数}$$

$$Le = \frac{\alpha}{D_{AB}} \text{ 刘易斯准数}$$

$$Nu = \frac{hL}{k} \text{ 努塞尔特准数}$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \text{ 普朗特准数}$$

$$Re = \frac{uL}{\nu} \text{ 雷诺准数}$$

$$Sc = \frac{\nu}{D_{AB}} \text{ 施密特准数}$$

$$Sh = \frac{k_c^0 d}{D_{AB}} \text{ 修伍德准数}$$

$$St = \frac{h}{\rho c_p u_\infty} = \frac{Nu}{Re Pr} \quad \text{传热}$$

的斯坦顿准数

$$St' = \frac{k_s^0}{u_\infty} = \frac{Sh}{Re Sc} \quad \text{传质}$$

的斯坦顿准数

# 目 录

主要符号表.....	( 1 )
<b>第一章 绪论</b> .....	( 1 )
1-1 三种传递现象的类比 .....	( 1 )
1-2 传递过程的研究方法 .....	( 7 )
<b>第二章 基本概念</b> .....	( 10 )
2-1 连续介质模型 .....	( 10 )
2-2 描述流体运动的两种方法 .....	( 12 )
2-3 流线与迹线 .....	( 22 )
2-4 系统和控制体 .....	( 26 )
习 题.....	( 28 )
<b>第三章 传通过程微分形式的基本方程</b> .....	( 30 )
3-1 连续方程 .....	( 30 )
3-2 运动方程 .....	( 39 )
3-3 能量方程 .....	( 56 )
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 .....	( 65 )
3-5 定解条件 .....	( 67 )
习 题.....	( 70 )
<b>第四章 不可压缩流体运动的若干解</b> .....	( 71 )
4-1 粘性不可压缩流体运动的基本方程组 .....	( 71 )
4-2 粘性不可压缩流体运动的基本方程组的求解途径 .....	( 73 )
4-3 圆管内的定常层流流动——哈根-泊肃叶 (Hagen- Poiseuille) 流动.....	( 74 )

4-4	两平行平板间的定常流动 .....	(78)
4-5	具有自由界面的定常流动 .....	(83)
4-6	同轴环形空间中的层流流动 .....	(85)
4-7	无限大平板在粘性流体中的突然运动 .....	(88)
4-8	极慢粘性流动的近似解 .....	(92)
4-9	理想不可压缩流体的平面无旋流动 .....	(101)
	习 题 .....	(120)
<b>第五章</b>	<b>边界层理论 .....</b>	<b>(123)</b>
5-1	普朗特 (Prandtl) 边界层理论模型 .....	(124)
5-2	粘性不可压缩流体的层流边界层方程 .....	(129)
5-3	半无限长平板的层流边界层的精确解——布拉修斯 (Blasius) 解 .....	(138)
5-4	卡门 (Karman) 动量积分关系式 .....	(149)
	习 题 .....	(159)
<b>第六章</b>	<b>湍流 .....</b>	<b>(161)</b>
6-1	湍流的随机性 .....	(161)
6-2	研究湍流的统计平均方法 .....	(162)
6-3	湍流强度 .....	(166)
6-4	湍流的基本方程 .....	(166)
6-5	普朗特混合长度理论 .....	(172)
6-6	圆管内的粘性不可压缩流体的定常湍流流动 .....	(185)
6-7	平板湍流边界层的近似解 .....	(191)
6-8	平板混合边界层的近似计算 .....	(194)
	习 题 .....	(195)
<b>第七章</b>	<b>导热 .....</b>	<b>(197)</b>
7-1	导热的一般数学模型 .....	(197)
7-2	求解导热问题的方法 .....	(199)
7-3	定常导热的分析解 .....	(202)
7-4	非定常导热问题的分析解 .....	(212)

7-5 导热问题的数值解法 .....	(242)
习题 .....	(275)
<b>第八章 对流换热</b> .....	(279)
8-1 对流换热概述 .....	(279)
8-2 对流换热的数学描写 .....	(280)
8-3 求解对流换热的途径 .....	(281)
8-4 圆管内的层流换热 .....	(282)
8-5 纵向绕流平板的层流换热 .....	(289)
8-6 动量传递和热量传递的比拟理论 .....	(301)
习题 .....	(311)
<b>第九章 传质的基本概念和传质问题的数学提法</b> .....	(313)
9-1 浓度 .....	(314)
9-2 速度, 扩散通量密度 .....	(316)
9-3 质量传递微分方程 .....	(322)
9-4 定解条件 .....	(326)
习题 .....	(328)
<b>第十章 分子扩散</b> .....	(329)
10-1 一维定常分子扩散 .....	(329)
10-2 二维定常分子扩散 .....	(341)
10-3 非定常分子扩散 .....	(342)
10-4 动量和质量的同时传递 .....	(346)
习题 .....	(349)
<b>第十一章 对流传质</b> .....	(351)
11-1 对流传质概述 .....	(351)
11-2 对流传质的数学描写 .....	(352)
11-3 圆管内的层流对流传质 .....	(354)
11-4 纵向绕流平板的层流传质 .....	(356)
11-5 动量传递、热量传递和质量传递的比拟理论 .....	(366)
习题 .....	(369)



# 第一章 绪 论

动量、热量和质量的传递现象，在自然界和工程技术领域中是普遍存在的。

在历史上，大多数工程专业都开设动量传递（流体力学）和热量传递（传热学）课程，而质量传递课程的开设仅限于化工专业。但是近年来，许多工程领域，例如动力机械工程，制冷工程，冶金工程，生化工程，环境工程等对于气体，液体和固体的传质过程的研究兴趣也日益增大。因此目前许多工程专业都分别开设动量传递，热量传递和质量传递这三门课程。

对于学生来说，分别学习这三门课程时，往往难于理解上述三种传递过程之间的内在联系，应该说这是一个较大的缺陷。基于这样的考虑，于1960年R·伯德（R. B. Bird）等人首先在《传递现象》（Transport Phenomena）一书中对这三种传递现象用统一的方法进行讨论，力图阐明这三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益的。自此，传递过程原理这门课程越来越受到人们的重视，它已成为许多工程专业必修的专业基础课。

## 1-1 三种传递现象的类比

当物系中存在速度，温度和浓度梯度时，则分别发生动量、热量和质量的传递过程。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。

## 一、分子传递（传输）性质

流体的粘性，热传导性和质量扩散性通称为流体的分子传递性质。因为从微观上来考察，这些性质分别是非均匀流场中分子不规则运动这同一个过程所引起的动量、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。表示上述三种分子传递性质的数学关系分别为：

### 1. 牛顿粘性定律

两个作直线运动的流体层之间的切应力正比于垂直于运动方向的速度变化率，即

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

对于均质不可压缩流体，上式可改写为：

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

式中， $y$ ——垂直于运动方向的坐标，单位为  $m$ 。

$\tau$ ——切应力，单位为  $N/m^2 = (kg \cdot m/s^2)/m^2$ ，表示单位时间内通过单位面积传递的动量，又称动量通量密度。

$\mu$ ——流体的动力粘性系数，单位为  $Pa \cdot s = kg/m \cdot s$ ，

$\nu$ ——流体的运动粘性系数，又称动量扩散系数，单位为  $m^2/s$ 。

$\frac{d(\rho u)}{dy}$ ——动量浓度变化率，表示单位体积内流体的动量

在  $y$  方向的变化率，单位为  $(kg \cdot m/s)/(m^3 \cdot m) = kg/(m^2 \cdot s)$ 。

### 2. 傅立叶定律

在均匀的各向同性材料内的一维温度场中，通过导热方式传递的热量通量密度为：

$$q = -k \frac{dT}{dy} \quad (1-3)$$

对于恒定  $\rho c_p$  的流体，上式可改写为：

$$q = -\frac{k}{\rho c_p} \frac{d(\rho c_p T)}{dy} = -\alpha \frac{d(\rho c_p T)}{dy} \quad (1-4)$$

式中， $y$ ——温度发生变化方向的坐标，单位为  $m$ 。

$q$ ——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，单位为  $J/(m^2 \cdot s)$ 。

$k$ ——导热系数，单位为  $W/m \cdot ^\circ C$ 。

$\alpha$ ——热扩散系数，又称导温系数，单位为  $m^2/s$ 。

$\frac{d(\rho c_p T)}{dy}$ ——焓浓度变化率，或称能量浓度变化率，表示单

位体积内流体所具有的焓在  $y$  方向的变化率，单位为  $J/m^3 \cdot m$ 。

### 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  $\rho_A$  为组分  $A$  的密度，或称质量浓度， $\rho$  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：

$$j_A = -D_{AB} \rho \frac{dw_A}{dy} \quad (1-5)$$

对于混合物密度为常数的情况，上式可改写为：

$$j_A = -D_{AB} \frac{d\rho_A}{dy} \quad (1-6)$$

式中， $y$ ——组分  $A$  的密度发生变化的方向的坐标，单位为  $m$ ，

$j_A$ ——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, 单位为  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

$D_{AB}$ ——组分  $A$  在组分  $B$  中的扩散系数, 单位为  $\text{m}^2/\text{s}$ ;

$\frac{d\rho_A}{dy}$ ——组分  $A$  的质量浓度在  $y$  方向的变化率, 单位为  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{m})$ 。

在公式(1-3)至(1-6)中的负号分别表示传热和传质是向温度、浓度降低的方向进行的。

由此可见, 表示三种分子传递性质的数学关系式是类似的。今以式(1-2)、(1-4)和式(1-6)说明之。

动量传递公式(1-2)表明: 动量通量密度正比于动量浓度的变化率。

能量传递公式(1-4)表明: 能量通量密度正比于能量浓度的变化率。

质量传递公式(1-6)表明: 组分  $A$  的质量通量密度正比于组分  $A$  的质量浓度的变化率。

因而这三个传递公式可以用如下的统一公式来表示:

$$FD\Phi' = C \frac{d\Phi}{dy} \quad (1-7)$$

其中,  $FD\Phi'$  表示  $\Phi'$  的通量密度,  $d\Phi/dy$  表示  $\Phi$  的变化率,  $C$  为比例常数。 $\Phi'$  可分别表示质量、动量和热量, 而  $\Phi$  可分别表示质量浓度(单位体积的质量), 动量浓度(单位体积的动量)和能量浓度(单位体积的能量)。

若令式(1-7)中的  $FD\Phi' = j_A$ ,  $\Phi = \rho_A$ ,  $C = -D_{AB}$ , 则得质量传递公式(1-6)。

若令式(1-7)中的  $FD\Phi' = \tau$ ,  $\Phi = \rho u$ ,  $C = \nu$ , 则得动量传递公式(1-2)。

若令式(1-7)中的  $FD\Phi' = q$ ,  $\Phi = \rho c_p T$ ,  $C = -\alpha$ , 则得能