

M 高等学校“十一五”规划教材
材料科学与工程系列二

传输原理

Principle of Transmission

吉泽升 主编
朱荣凯
李丹
徐瑞 主审
辛明德

交叉性 前沿性 融合相关学科 代表材料领域的发展方向
先进性 科学性 院士专家著书 反映材料科学的最新成果
可读性 广交性 内容丰富翔实 促进材料工程的应用实践

哈尔滨工业大学出版社

高等学校“十一五”规划教材
材料科学与工程系列二

传 输 原 理

吉泽升 朱荣凯 李 丹 主编
徐 瑞 辛明德 主审

哈尔滨工业大学出版社
哈 尔 滨

内 容 提 要

本书将动量传输、热量传输和质量传输分为三篇共 13 章进行讲述,涵盖了流体力学、传热学和传质学的内容。本书将三种传输现象统一到一个通用表达式中,从物理学和数学的角度阐明动量传输、热量传输和质量传输之间的相似性;将每章的要点提炼出来,作为学习指导放于各章的前面;实验指导书、原始记录表、实验报告也都编排到书中;各章均附有例题和习题;书末附有大量附录可供查阅。

本书可作为高等学校材料成形与控制工程专业、材料科学与工程专业、化工工程专业及相关专业的传输原理课程教材,也可作为研究生和教师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

传输原理/吉泽升主编.—2 版.—哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2005.6(2008.2 重印)

ISBN 978-7-5603-1802-8

I. 传… II. 吉… III. 输运理论—高等学校—教材 IV. O369

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 050445 号

责任编辑 杨 桦

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 黑龙江省教育厅印刷厂

开 本 787 mm × 1092 mm 1/16 印张 17.25 字数 368 千字

版 次 2002 年 12 月第 1 版 2005 年 6 月第 2 版

2008 年 2 月第 3 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-1802-8

印 数 7 001 ~ 9 000

定 价 23.80 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

在教育部新的专业目录框架下,本着重视基础、淡化专业、加强实践的原则,我们编写了这部教材。本书将动量传输、热量传输和质量传输分为三篇共 13 章进行讲述,打破了原来流体力学、传热学和传质学的界限,将三种传输现象统一到一个通用表达式中,从物理学和数学的角度阐明动量传输、热量传输和质量传输之间的相似性,用对照的方法研究三种传递过程,以便于理解和自学;将每章的要点提炼出来,作为学习指导放于各章的前面,便于学生对主要内容的掌握;实验指导书、原始记录表、实验报告也都编排到了本书当中,可以节省学生画表、画图的时间,实验时填入数据即可;书后附有大量附录可供查阅。

本书可作为高等学校材料成形与控制工程专业、材料科学与工程专业、化工工程专业及相关专业的传输原理课程教材,也可作为研究生和教师的参考书。本书理论教学学时适合于 46 学时,实验为 8 学时。为扩大本书对不同专业、不同层次读者的适应性,采用某些章节加“*”的办法,各学校可根据各自的情况选用。

本书绪论、第 9 章~第 11 章由哈尔滨理工大学吉泽升编写,第 1 章~第 4 章由哈尔滨理工大学李丹编写,第 5 章、第 6 章由哈尔滨理工大学姚秀荣编写,第 7 章、第 8 章、实验由哈尔滨工程大学朱荣凯编写,第 12 章、第 13 章及附录由哈尔滨理工大学谷丰编写。全书由吉泽升统稿,由吉泽升、朱荣凯、李丹任主编,燕山大学徐瑞、哈尔滨理工大学辛明德任主审。

本书在编写过程中,参考了相关教材及专著,还得到了华中科技大学吴树森教授、哈尔滨理工大学柳玉明教授、哈尔滨理工大学姚奎毅高级工程师、哈尔滨工程大学黎亚明高级工程师、哈尔滨理工大学郭立伟讲师的支持与帮助,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中错误或不当之处在所难免,敬请读者和专家指正。

编 者

2002 年 5 月于哈尔滨

主要符号

a	加速度, m/s^2 热扩散率, m^2/s	$\bar{l}$	分子平均自由程, m
A	面积, m^2	L	厚度或特征长度, m
b	蓄热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{1/2})$ 宽度, m	m	质量, kg
c	质量热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 辐射系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$	M	摩尔质量, kg/mol 动量, $\text{N} \cdot \text{s}$
c	物质的量浓度, mol/m^3	n	质量通量密度(相对于静止坐标), $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
c_f	摩擦阻力系数	N	摩尔通量密度(相对于静止坐标), $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
c_p	质量定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	p	压强, Pa 或 N/m^2
c_v	质量定容热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	p_a	大气压强, Pa 或 N/m^2
d	直径, m	P	压力, N
d_e	当量直径, m	q	热流密度, W/m^2
D	直径, m 扩散系数, m^2/s	Q	热量, J 体积流量, m^3/s
D_{AA}	自扩散系数, m^2/s	r	半径, m
D_{AB}	互扩散系数, m^2/s	R	摩尔气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 水力半径, m
e	自然对数的底		冲击力, N
E	比能, J 辐射能量, W/m^2	R_T	热阻, $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$
F	力, N	t	时间, s
g	重力加速度, m/s^2	T	温度, K 或 $^\circ\text{C}$
G	重力, N 总辐照强度, W/m^2	u	瞬时速度, m/s
h	高度, m 对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	v	速度, m/s 质量体积, m^3/kg
h_w	摩擦阻力损失, J/m^3 或 J/kg	V	体积, m^3
h_l	沿程水头损失, m 流体柱或 J/m^3	w	质量分数
h_r	局部水头损失, J/m^3 或 m 流体柱	W	质量力, N
j	质量通量密度(相对于质量平均速度), $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	x	摩尔分数
J	摩尔通量密度(相对于摩尔平均速度), $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	X	单位质量力 x 轴分量, N
k_c	对流传质系数, m/s	Y	单位质量力 y 轴分量, N
l	长度, m	Z	单位质量力 z 轴分量, N
		z	高度(水头), m
		α	热辐射吸收比, % 角度 动能修正系数
		α_v	体积膨胀系数, K^{-1} 或 $^\circ\text{C}^{-1}$

γ	重度, N/m^3
κ_T	等温压缩率, Pa^{-1}
δ	厚度(或边界层厚度), m
Δ	绝对粗糙度, m
ϵ	热辐射, 发射率(黑度), %
ξ	局部阻力系数
μ	动力粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$
θ	角度
Θ	无量纲温度
λ	沿程阻力系数 热导率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 辐射波长, m

ν	运动粘度(动量扩散系数), m^2/s
ρ	密度, kg/m^3 热辐射反射比, %
σ	正应力(或表面张力), Pa 辐射常数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$
τ	剪应力, Pa 热辐射透射比, % 曲折因数
Φ	热流量, W
φ	角度 角系数 体积分数 孔隙度
ω	

特 征 数

$$Ar = \frac{gl^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho - \rho_0}{\rho}, \text{阿基米德数}$$

$$Bi = \frac{\alpha L}{\lambda}, \text{毕渥数}$$

$$Bi^* = \frac{k_c L}{D}, \text{传质毕渥数}$$

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho v^2}, \text{欧拉数}$$

$$Fo = \frac{at}{L^2}, \text{傅里叶数}$$

$$Fr = \frac{v^2}{\sqrt{gL}}, \text{传质傅里叶数}$$

$$Ca = \frac{gL^3}{\nu^2}, \text{伽利略数}$$

$$Ho = \frac{vt}{L}, \text{均时性数}$$

$$Le = \frac{a}{D}, \text{路易斯数}$$

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda}, \text{努塞尔数}$$

$$Pe = RePr = \frac{vL}{a}, \text{贝克来数}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \text{普朗特数}$$

$$Re = \frac{vL}{\nu}, \text{雷诺数}$$

$$Sc = \frac{\nu}{D}, \text{施密特数}$$

$$Sh = \frac{k_c L}{D}, \text{舍伍德数}$$

$$St = \frac{Nu}{RePr} = \frac{\alpha}{\rho v c_p}, \text{斯坦顿数}$$

$$St^* = \frac{Nu}{ReSc} = \frac{k_c}{v}, \text{传质斯坦顿数}$$

目 录

绪 论	(1)
0.1 牛顿粘性定律	(1)
0.2 傅里叶定律	(2)
0.3 费克定律	(3)
0.4 三种传输现象的普遍规律	(3)

第一篇 动量传输

第1章 流体的主要物理性质	(7)
1.1 流体的概念及连续介质假设	(8)
1.2 流体的密度、重度、质量体积	(9)
1.3 流体的压缩性和膨胀性	(10)
1.4 流体的粘性	(11)
习题	(13)
第2章 流体静力学	(15)
2.1 作用在流体上的力	(16)
2.2 流体静压强及其特性	(16)
2.3 静止流体的平衡微分方程及其积分	(18)
2.4 流体静力学基本方程	(20)
2.5 流体压强的测量	(23)
2.6 静止液体对壁面作用力的计算	(26)
2.7* 液体的相对平衡	(30)
习题	(32)
第3章 流体动力学	(36)
3.1 流体运动的基本概念	(37)
3.2 连续性方程	(41)
3.3 理想流体的运动微分方程——欧拉方程	(44)
3.4 实际流体的运动微分方程——纳维尔-斯托克斯方程	(45)

3.5 理想流体和实际流体的贝努利方程	(47)
3.6 贝努利方程的应用	(52)
3.7* 稳定流的动量方程及其应用	(57)
习题	(60)
第4章 流动状态及能量损失	(63)
4.1 流体运动的两种状态和能量损失的两种形式	(64)
4.2 圆管中的层流运动	(66)
4.3 圆管中的湍流运动	(70)
4.4 局部阻力系数的确定	(75)
习题	(79)

第二篇 热量传输

第5章 热量传输的基本概念及基本定律	(83)
5.1 基本概念	(84)
5.2 热量传递三种基本方式及其基本规律	(86)
习题	(89)
第6章 导 热	(91)
6.1 导热微分方程	(92)
6.2 一维稳态导热	(94)
6.3 非稳态导热	(101)
6.4 一维非稳态导热	(105)
6.5* 二维及三维非稳态导热	(112)
习题	(114)
第7章 对流换热	(117)
7.1 对流换热概述	(118)
7.2 对流换热的微分方程组	(120)
7.3* 热边界层概念与边界层换热微分方程组	(123)
7.4* 相似原理及其在对流换热问题中的应用	(127)
7.5* 相似模型分析应用	(129)
7.6 自然对流换热的计算	(131)
7.7 强制对流换热的计算	(133)
习题	(138)

第8章 辐射换热	(140)
8.1 热辐射基础	(141)
8.2 热辐射的工程应用	(144)
8.3 综合传热	(149)
8.4 辐射计算例题	(151)
习题	(153)

第三篇 质量传输

第9章 质量传输中的基本概念	(157)
9.1 质量传输的基本方式	(158)
9.2 浓度、速度、传质通量(扩散通量)	(158)
习题	(162)
第10章 传质微分方程	(163)
10.1 传质微分方程的推导	(164)
10.2 传质微分方程的几种不同形式	(165)
10.3 传质微分方程的简化形式	(166)
10.4 定解条件	(167)
习题	(168)
第11章 扩散传质	(169)
11.1 一维稳定态扩散	(170)
11.2* 非稳定态扩散	(174)
11.3 影响扩散的因素	(176)
11.4* 扩散的原子理论	(179)
习题	(180)
第12章 对流传质	(182)
12.1 对流传质的基本概念	(183)
12.2* 传质系数模型	(184)
12.3 圆管内稳态层流传质	(186)
12.4 动量、热量和质量传输的类比	(187)
12.5 对流传质系数的关联式	(191)
习题	(193)
第13章 相间传质	(195)
13.1 双重阻力传质理论(双膜理论)	(196)

13.2 气相 - 液相反应中的扩散	(198)
13.3 气相 - 固相反应中的扩散	(200)
13.4 相变扩散	(202)
13.5* 气体在多孔材料中的扩散系数	(203)
习题	(205)

实 验

实验一 贝努利方程实验	(207)
实验二 流速和流量的测定实验	(213)
实验三 雷诺实验	(221)
实验四 水头损失实验	(227)
实验五 传热实验	(235)
实验六 填料塔中液相传质系数测定	(243)

附 录

附录1 几种常见物质在标准大气压下的物理性质	(251)
附录2 几种对称平面图形的 A 、 y_c 、 J_c 之值	(251)
附录3 金属材料的密度、质量定压热容和热导率	(252)
附录4 几种保温、耐火材料的热导率与温度的关系	(253)
附录5 无限长圆柱与球的非稳态导热线算图	(254)
附录6 高斯误差函数表	(258)
附录7 干空气的热物理性质	(259)
附录8 某些常用材料的黑度	(260)
附录9 炉墙外表面对车间的综合换热系数 h_Σ	(260)
附录10 二元体系的质量扩散系数	(261)
附录11 在大气压下烟气的热物理性质	(262)
附录12 液态金属的热物理性质	(263)
附录13 饱和水的热物理性质	(264)
参考文献	(265)

绪 论

传输过程是物理量从非平衡状态向平衡状态转移的过程,是自然界和工程技术中普遍存在的现象。比如自然界中阳光的传播、空气的流动、衣服的晾干等就是自然界中的传输现象。在工程技术领域,如冶金、化工、能源、制冷、动力、环保等领域都普遍存在传输现象。

在传输过程中,所传输的物理量一般为动量、热量、质量等。动量传输是指在垂直于实际流体流动方向上,动量由高速度区向低速度区的转移;热量传输是指热量由高温区向低温区的转移;质量传输是指体系中一个或几个组分由高浓度区向低浓度区的转移。由此可知,正是由于体系内存在速度梯度、温度梯度和浓度梯度,才会发生动量传输、热量传输、质量传输现象,这种速度梯度、温度梯度、浓度梯度就是产生传输现象的驱动力。

动量、热量和质量传输是一门研究速率的科学,从传输的观点去理解,三者之间具有相当多的类似性和统一性,它们不但可以用类似的数学模型来描述,而且描述三者的一些物理量之间还存在着某些定量关系。这些类似关系和定量关系会使研究三类传输过程的规律性问题得以简化,并可揭示三种传输现象的深刻内涵。如物系中存在着速度、温度和浓度梯度,则分别发生动量、热量和质量的传递现象。

当体系内存在着速度梯度、温度梯度和浓度梯度时,则发生动量、热量和质量传输,既可由分子(原子、粒子)的微观运动引起,也可由旋涡混合造成的流体微团的宏观运动引起。由分子运动引起的动量传输,可采用牛顿粘性定律来描述;由分子运动引起的热量传输为热传导的一种形式,可采用傅里叶定律来描述;而由分子(原子、粒子)运动引起的质量传输称为质量扩散,则采用费克定律来描述。牛顿粘性定律、傅里叶定律和费克定律都是描述分子运动引起的传输现象的基本定律。

0.1 牛顿粘性定律

工程技术中所遇到的流体均为实际流体。实际流体与所谓理想流体的一个根本区别,在于前者具有粘性而后者无粘性。

牛顿于1686年阐述了流体在作层状运动时,单位面积上的内摩擦力(剪应力) τ 与两流层间垂直于运动方向的速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 成正比,即

$$\tau = -\mu \frac{du}{dy} \quad (0.1)$$

对于不可压缩流体,则有

$$\tau = -\frac{\mu}{\rho} \frac{d(\rho u)}{dy} = -\nu \frac{d(\rho u)}{dy} \quad (0.2)$$

式中 y ——垂直于运动方向的坐标(m);
 τ ——剪应力, 又称动量通量(Pa);
 μ ——动力粘度或动力粘度系数(Pa·s);
 ν ——运动粘度(m^2/s), $\nu = \mu/\rho$;
 ρ ——密度(kg/m^3);
 $\frac{du}{dy}$ ——速度梯度, 表示流体剪切变形角速度(s^{-1});
 $\frac{d(\rho u)}{dy}$ ——动量浓度变化率, 表示单位体积流体的动量在 y 方向的变化率
 $[\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})]$ 。

式中的负号表示动量通量的方向与速度梯度的方向相反, 即动量朝着速度降低的方向传输。

粘度是流体的一种物理性质, 它仅为流体的状态(压力、温度、组成)的函数, 与剪应力或速度梯度无关。气体的粘度随温度的升高而增加, 液体的粘度随温度的升高而降低。凡是遵循牛顿粘性定律的流体称为牛顿型流体。所有气体和大多数相对分子量小的液体均属于牛顿型流体。不遵循牛顿粘性定律的流体统称为非牛顿型流体, 某些泥浆、污水、聚合物溶液和油漆等, 均属于非牛顿型流体。研究非牛顿型流体的学科称为流变学。本书的研究对象仅为牛顿型流体。

0.2 傅里叶定律

傅里叶于 1822 年提出, 对于各向均匀同性的材料, 在一维温度场中, 单位时间通过单位面积的热量与垂直于该截面方向的温度梯度成正比, 即

$$q = -\lambda \frac{dT}{dy} \quad (0.3)$$

对于恒定的流体, 上式写为

$$q = -\frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{d(\rho c_p T)}{dy} = -a \frac{d(\rho c_p T)}{dy} \quad (0.4)$$

式中 y ——温度发生变化方向的坐标(m);
 q ——热流密度, 又称热量通量[W/m^2];
 λ ——热导率[$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$];
 a ——热扩散率(m^2/s);
 $\frac{dT}{dy}$ ——温度梯度($^{\circ}\text{C}/\text{m}$);
 $\frac{d(\rho c_p T)}{dy}$ ——热量浓度变化率($\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{m}^{-1}$);
 c_p ——质量定压热容[$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]。

式中的负号表示热量通量的方向与温度梯度的方向相反, 即热量朝着温度降低的方向传输。

0.3 费克定律

费克于 1855 年首先肯定了扩散过程与热传导过程的相似性,提出了各向同性物质中扩散过程的数学表达式,对于两组分系统,单位时间内通过单位面积的扩散物质的量(质量通量)与垂直于截面方向的浓度梯度成正比,即

$$j_A = -D_{AB} \frac{d\rho_A}{dy} \quad (0.5)$$

式中 j_A ——组分 A 的扩散质量通量 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$];

D_{AB} ——组分 A 在组分 B 中的扩散系数 (m^2/s);

ρ_A ——组分 A 的密度或质量浓度 (kg/m^3);

y ——组分 A 的密度发生变化的方向坐标 (m);

$\frac{d\rho_A}{dy}$ ——组分 A 的质量浓度(密度)梯度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{m}^{-1}$)。

式中负号表示质量通量的方向与浓度梯度的方向相反,即组分 A 朝着浓度降低的方向传输。

0.4 三种传输现象的普遍规律

由牛顿粘性定律、傅里叶定律和费克定律的数学表达式(0.1)、(0.3)、(0.5)可以看出,动量、热量和质量传输过程的规律存在着许多类似性,通过分析得出以下结论。

(1) 动量、热量和质量传输通量,均等于各自的扩散系数与各自量的浓度梯度乘积的负值,三种传输过程可用一个通式来表达,即

$$(\text{通量}) = -(\text{扩散系数}) \times (\text{浓度梯度})$$

(2) 动量、热量和质量扩散系数 ν 、 a 、 D_{AB} 具有相同的因次,其单位均为 m^2/s 。

(3) 通量为单位时间内通过与传输方向垂直的单位面积上的动量、热量或质量,各量的传输方向均与该量的浓度梯度方向相反,故通量的普遍表达式中有一“负”号。

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,它是一种关联所观察现象的经验方程。

第一篇 动量传输

在自然界中常见的物质状态有三种,即气态、液态和固态,通常把气态和液态称为流体,研究流体流动的学科称为流体力学。动量传输就是研究流体(气体和液体)在外界的作用下运动规律的一门学科,也就是流体力学。本篇就是要研究各种条件下,流动物体中的动量分布情况、动量的传输规律、流动物体的流速随空间和时间的变化规律。之所以在传输理论中称为动量传输,主要是因为从传输的观点出发,它与热量传输、质量传输有相当的类似性和统一性,用动量传输的观点来讨论流体流动,不仅有利于传输理论的和谐,同时还能揭示三种传输现象相类似的深刻内涵。

动量传输是自然界和工程技术中普遍存在的现象,如大气的流动、河流中水的流动、烟囱的烟气流动等。在材料加工和冶金过程中,钢液的流动、气泡的上浮等均与动量传输有关。研究动量传输,掌握其内在规律,不仅对于认识自然现象,改进工程设备,优化工艺过程非常重要,而且因为热量和质量多在流动介质中传输,所以学习动量传输原理也为理解整体的传输理论打下基础。

学习动量传输,必须先了解流体的特性、流体的流动状态、流体静止时的一些力学特点。

第 1 章 流体的主要物理性质

学习要点

流体包括液体和气体,没有固定的形状,易于流动。

$$\text{密度: } \rho = \frac{m}{V}$$

$$\text{重度: } \gamma = \frac{G}{V}$$

$$\text{质量体积: } v = \frac{1}{\rho} = \frac{V}{m}$$

压缩性 膨胀性 粘性

$$\text{牛顿粘性定律: } \tau = -\mu \frac{du}{dy}$$

$$\text{动力粘度: } \mu = -\frac{\tau}{\left(\frac{du}{dy}\right)}$$

$$\text{运动粘度: } \nu = \frac{\mu}{\rho}$$

$$\text{恩氏粘度: } ^{\circ}E = \frac{t_1}{t_2}$$

温度升高,液体粘度降低,气体粘度则升高。

理想流体:不具有粘度的流体。