

材料加工冶金传输基础

杨涤心 陈 跃 主编



本书从传输过程的机理出发,全面系统地阐述了材料加工冶金过程所涉及的动量、热量和质量传输的基本物理现象、规律、概念及问题处理的基本方法,并对传输理论在材料加工及制备、冶金工程方面的应用作了重点介绍。书中各章均附有例题及思考题,以帮助读者对内容的理解和应用。

本书可作为材料成形与控制工程、金属材料工程及冶金工程等专业的本科生教材,也可作为此类专业的研究生及工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

材料加工冶金传输基础/杨涤心,陈跃主编. —北京:机械工业出版社, 2012. 3

ISBN 978-7-111-37412-1

I. ①材… II. ①杨…②陈… III. ①金属材料-热加工②冶金-过程-传输 IV. ①TG15②TF01

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第019576号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:陈保华 责任编辑:陈保华 舒雯

版式设计:霍永明 责任校对:张媛

责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2012年5月第1版第1次印刷

169mm×239mm·20.75印张·425千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-37412-1

定价:43.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

策划编辑:(010) 88379734

社服务中心:(010) 88361066 网络服务

销售一部:(010) 68326294 门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

材料加工过程大多是在高温下完成的，加工过程中除了发生冶金化学反应外，同时伴随有热量传输和质量传输。在许多情况下，热量传输和质量传输是在物质流动过程进行的，而流动又涉及了动量传输，因此，动量传输、热量传输和质量传输构成了材料加工过程的三个联系密切的物理过程。

传热、流动和传质现象广泛存在于材料及材料加工、冶金、化工等工程领域。随着科学技术的发展，各类工程专业基础的不不断拓宽和兼容，原来描述三种传输现象的流体力学、传热学和传质学已逐渐合并、发展成为一门相对独立和较为系统的基础理论——传输理论，并正在成为大学理工科专业的一门重要技术基础课；而作为相关专业领域的一名合格的工程技术人员，有必要对传输原理（过程）有一个深刻的理解，并能熟练地分析、解决此类问题。本书正是针对上述需要而编写的，在传输原理的内容选取及工程应用方面更偏重于材料及材料加工过程。

本书在内容安排上分为三部分，即第1篇动量传输，包括第1章至第5章；第2篇热量传输，包括第6章至第10章；第3篇质量传输，包括第11章至第15章。

在本书编写过程中注意了以下几点：

1) 材料加工冶金过程的三种传输是相互关联、相互制约及相互影响的。因此，用既有区分又有统一的观点和对照方法对三种传输进行研究，以加深对三种传输过程的理解。

2) 考虑到工科学生的特点及“宽口径、厚基础”的需要，在对原课程知识的选取方面，既不过于简单，也不过于繁杂，力求控制到一个合适的程度。

3) 冶金传输理论的数理解析所占比例大，因此，在本书的内容阐述和解析分析中，对于给出的重要物理模型，对其数学模型的解析也给出了较为详尽的过程，力求在源头上做到物理概念和数学表达的统一。

4) 在论述动量传输、热量传输和质量传输各个部分主要内容的同时，还介绍了这些理论在材料加工中的一些典型应用（如第2章、第7章、第10章和第13章的部分章节），以求学习者能够对传输理论逐步加以应用，解决实际问题。

5) 借助于计算机模拟及计算，利用有限差分及有限元等数值计算方法，已成为解析传输过程偏微分方程（组）的主要手段。限于篇幅，对计算机模拟

及计算可参阅有关参考书。

本书由河南科技大学材料学院和洛阳理工学院材料学院的教师合作编写，其中第1章至第5章由陈跃编写，第6章、第7章和第10章由贾丽晓编写，第8章和第9章由张占领编写，第11章至第15章由杨涤心编写，全书由杨涤心、陈跃主编，并由任凤章教授主审。

在本书编写过程中，得到了郑州大学关绍康教授、河南城建学院杨留栓教授的帮助和支持，在此表示衷心的感谢！并向本书引用参考文献的原著者和编撰者表示诚挚的感谢！对所有为本书提供资料及建议的同志也表示诚挚的谢意！由于编写水平有限，书中不当之处在所难免，敬请读者指正。

编 者

本书主要符号

<p>A——面积(m^2)</p> <p>a——热扩散率(m^2/s); 加速度(m/s^2)</p> <p>b——蓄热系数 [$\text{J}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{1/2})$]</p> <p>$Bi$——毕渥数(无量纲)</p> <p>$Bi^*$——传质毕渥数(无量纲)</p> <p>$C$——辐射系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$]</p> <p>$C_D$——绕流阻力系数</p> <p>$C_f$——摩擦阻力系数</p> <p>$c$——比热容 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$]; 物质的量浓度 ($\text{mol}/\text{m}^3$)</p> <p>$c_p$——比定压热容 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$]</p> <p>$D$——直径($\text{m}$)</p> <p>$D_{AB}$——组分 A 在组分 B 中的扩散系数(m^2/s)</p> <p>d_e——当量直径(m)</p> <p>E——辐射力 (W/m^2)</p> <p>F——力 (N)</p> <p>Fo——傅里叶数(无量纲)</p> <p>Fo^*——传质傅里叶数(无量纲)</p> <p>F_D——绕流总阻力(N)</p> <p>G——重力 (N); 热辐射强度 (W/m^2)</p> <p>Gr——格拉晓夫数(无量纲)</p> <p>H——焓 (J); 高度 (m)</p> <p>h——表面传热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$]</p> <p>$h_l$——沿程水头损失 ($\text{m}$)</p> <p>$h_c$——局部水头损失 ($\text{m}$)</p> <p>$h_w$——总水头损失 ($\text{m}$)</p> <p>$J$——有效辐射强度 ($\text{W}/\text{m}^2$)</p> <p>$J_A$——组分 A 的扩散摩尔通量 [$\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]</p> <p>$j_A$——组分 A 的扩散质量通量 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]</p> <p>$K$——凝固系数 [$\text{m}/\text{s}^{1/2}$]</p> <p>$k$——(总)传热系数 [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$]; 反应速率常数</p>	<p>k_c——对流传质系数 (m/s)</p> <p>l——长度 (m)</p> <p>L——厚度或特征长度 (m); 凝固热 (J/kg)</p> <p>M——摩尔质量 (kg/mol)</p> <p>m——质量 (kg)</p> <p>N_A——组分 A 的摩尔通量 [$\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]</p> <p>$Nu$——努塞尔数(无量纲)</p> <p>$n_A$——组分 A 的质量通量 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]</p> <p>$p$——压强或压力[⊙] ($\text{Pa}$)</p> <p>$Pr$——普朗特准数(无量纲)</p> <p>$Q$——热量 ($\text{J}$); 流量 ($\text{m}^3/\text{s}$ 或 kg/s)</p> <p>q——热流密度 (W/m^2)</p> <p>R——热阻 ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$); 水力半径 ($\text{m}$); 冲击力 ($\text{N}$)</p> <p>$Re$——雷诺数(无量纲)</p> <p>$r$——半径 ($\text{m}$)</p> <p>$r_A$——反应速率</p> <p>$S$——总摩擦阻力 ($\text{N}$); 导热形状因子</p> <p>$Sc$——施密特数(无量纲)</p> <p>$Sh$——舍伍德数(无量纲)</p> <p>$St$——斯坦顿数(无量纲)</p> <p>$St_D$——传质斯坦顿数(无量纲)</p> <p>$T$——热力学温度 ($\text{K}$); 摄氏温度 ($^\circ\text{C}$)</p> <p>$t$——摄氏温度 ($^\circ\text{C}$); 时间 ($\text{s}$)</p> <p>$u$——速度 ($\text{m}/\text{s}$)</p> <p>$V$——体积 ($\text{m}^3$)</p> <p>$v$——速度 ($\text{m}/\text{s}$); 质量体积 ($\text{m}^3/\text{kg}$)</p> <p>$w$——速度 ($\text{m}/\text{s}$)</p> <p>$w_A$——组分 A 的质量分数</p> <p>w_B——组分 B 的质量分数</p> <p>X——角系数</p> <p>Z——高度(水头) (m)</p> <p>x_A——组分 A 的摩尔分数</p>
--	---

⊙ 在工程中, 压强习称压力, 本书第 1 篇动量传输中 p 称为压强, 第 2、3 篇中 p 称为压力。

x_B ——组分 B 的摩尔分数	λ ——沿程阻力系数; 热导率(导热系数) [$W/(m \cdot ^\circ C)$]; 辐射波长[m]
α ——吸收率	μ ——动力粘度($Pa \cdot s$)
α_v ——体胀系数(K^{-1})	ν ——运动粘度(动量扩散系数)(m^2/s)
γ ——重度(N/m^3)	ξ ——凝固层厚度(m)
δ ——厚度(或边界层厚度)(m)	ρ ——质量密度(或密度)(kg/m^3);
ε ——发射率(黑度); 孔隙率(m^2/m^3)	σ ——辐射常数[$W/(m^2 \cdot K^4)$]
ξ ——局部阻力系数	τ ——时间(s); 切应力(Pa); 透射率
Θ ——无量纲温度	Φ ——热流量(W)
θ ——过剩温度($^\circ C$ 或K)	Δ ——绝对粗糙度(m)
κ_T ——等温压缩率(Pa^{-1})	

目 录

前言

本书主要符号

绪论

0.1 牛顿粘性定律	1
0.2 傅里叶定律	2
0.3 菲克定律	3
0.4 三种传输现象的类比	3

第 1 篇 动量传输

第 1 章 流体性质

1.1 流体的概念及连续介质假设	5
1.2 流体的主要物理性质	7
1.3 流体的粘性	9
思考题	13

第 2 章 流体静力学

2.1 作用在流体上的力	14
2.2 流体静压强及其特性	15
2.3 静止流体的平衡微分方程及其积分	16
2.4 流体静力学基本方程	19
2.5 静止液体对壁面作用力的计算	23
思考题	29

第 3 章 流体动力学

3.1 流体运动的描述	31
3.2 连续性方程	37
3.3 理想流体的运动微分方程——欧拉方程	40
3.4 实际流体的运动微分方程——纳维-斯托克斯方程	42
3.5 理想流体和实际流体的伯努利方程	44
3.6 伯努利方程的应用	50
3.7 稳定流的动量方程及其应用	56
思考题	60

第 4 章 流动状态及能量损失

4.1 流体的流动状态	63
4.2 流体在圆管中的层流运动	69
4.3 流体在平行平板间的层流运动	72

4.4	流体在圆管中的湍流运动	76
4.5	沿程阻力系数 λ 值的确定	80
4.6	局部阻力系数的确定	83
	思考题	85
第5章	不可压缩流体二维边界层与绕流运动	86
5.1	边界层的基本概念	86
5.2	边界层动量积分方程	88
5.3	曲面边界层分离现象	95
5.4	绕流阻力和阻力系数	97
	思考题	101
第2篇	热量传输	
第6章	热量传输的基本概念	103
6.1	热量传输研究的对象和任务	103
6.2	热量传输的三种基本方式	104
	思考题	108
第7章	导热	109
7.1	导热基本定律和热导率	109
7.2	导热微分方程和定解条件	112
7.3	一维稳态导热	116
7.4	非稳态导热	126
7.5	不同形状物体加热或冷却速度的比较	145
7.6	集中热源作用下的非稳态导热	146
	思考题	149
第8章	对流换热	151
8.1	牛顿冷却公式和传热系数	151
8.2	影响表面传热系数的因素	151
8.3	边界层对流换热微分方程组	153
8.4	相似理论简介	159
8.5	准数实验关联式的确定	162
8.6	强制对流换热的计算	164
8.7	自然对流换热的计算	170
	思考题	174
第9章	辐射换热	176
9.1	热辐射的基本概念	176
9.2	黑体辐射的基本定律	179
9.3	实际物体和灰体的辐射	181
9.4	角系数	186
9.5	灰体表面间的辐射换热	191
9.6	气体辐射及其与包壁间的辐射换热	199

9.7 火焰辐射	208
思考题	211
第 10 章 复合传热与传热过程	214
10.1 复合传热	214
10.2 传热过程及其计算	217
10.3 热处理过程的传热计算	219
思考题	223
第 3 篇 质量传输	
第 11 章 质量传输基本概念	225
11.1 质量传输的基本方式	225
11.2 分子扩散的速度与通量	226
思考题	233
第 12 章 传质微分方程	234
12.1 质量守恒定律表达式	234
12.2 传质微分方程的推导	235
12.3 质量传输微分方程的特定形式	237
12.4 传质微分方程的定解条件	238
思考题	240
第 13 章 扩散传质	241
13.1 稳定态扩散传质	241
13.2 与固体结构无关的非稳态扩散传质	255
13.3 扩散系数	257
思考题	264
第 14 章 对流传质	266
14.1 对流传质的基本概念	266
14.2 对流传质的解析解——圆管内的稳态层流传质	269
14.3 量纲分析在对流传质中的应用	272
14.4 动量、热量与质量三种传输之间的类比	275
14.5 对流传质实验关联式	282
14.6 对流传质系数的理论模型	285
思考题	289
第 15 章 相际传质	291
15.1 双膜理论及相际稳态传质	291
15.2 气—固相间的综合扩散传质	295
15.3 碳粒的燃烧	296
15.4 气泡与液体之间的传质	299
15.5 合金凝固时的偏析	301
15.6 相变扩散	304
思考题	306

附录	307
附录 A 常用物理量单位换算	307
附录 B 几种对称平面图形 A 、 γ_c 、 J_c 之值	308
附录 C 干空气的物理性质	309
附录 D 在大气压下烟气的物理性质	310
附录 E 饱和水的物理性质	311
附录 F 金属材料的密度、比定压热容和热导率	313
附录 G 常用保温、耐火材料的热导率	315
附录 H 液态金属的热物理性质	315
附录 I 各种材料的表面发射率	316
附录 J 气体二元体系的扩散系数	318
附录 K 固体二元体系的扩散系数	319
附录 L 高斯误差函数	319
参考文献	320

绪 论

传输现象广泛存在于自然界及工程技术领域。在材料加工及冶金过程中，传输的物理量主要是热量和质量。在许多情况下，热量和质量的传输是在流体流动过程完成的，这时还涉及动量的传输。因此，动量、热量和质量传输就构成了材料、冶金、机械及化工等领域完整的传输现象。

传输过程可以看成是某物质体系内的物理量(如温度、速度、组分浓度等)从不平衡状态向平衡状态转移的过程。此处的平衡状态指的是体系内的物理量的梯度为零，即物理量在整个体系内均匀一致，反之就是物系处于不平衡状态(即梯度不为零)。如与热量传输有关的热平衡指的就是物系内各处的温度均匀一致。只有在不平衡状态下，才会发生物理量的转移过程。如冷、热两物体接触时，热量就会自发地从热物体向冷物体转移，直至两物体的温度均匀一致。显然，两物体的温差是热量传递的推动力。因此，热量传输是指热量由高温区向低温区的转移。类似地，质量传输是指物系中一个或几个组分由高浓度区向低浓度区的转移。动量传输是指在垂直于流体流动方向上，动量从高速区向低速区的转移。当物系中存在着温度、浓度与速度梯度时，则分别发生热量、质量和动量的传输过程。

传输原理主要研究传输过程的传递速率与传递推动力及阻力之间的关系。许多生产过程最终都可以归结为动量、热量和质量的传输或传递。动量、热量和质量的最初内容分别来之于流体力学、传热学和传质学三门不同的学科。随着对传输现象认识的深入，人们发现三类传输之间有许多相似之处，它们不但可以用类似的数学模型描述，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规律的问题得以简化。因此，自 20 世纪中叶以来，人们开始用统一的观点对三种传输现象进行研究。随着科学技术的发展，传输理论已成为应用于许多工程技术领域的一门独立的学科。

下面以描述三种传输的基本定律——牛顿粘性定律、傅里叶定律和非克定律为例，对动量、热量和质量传输的类似性予以进一步说明。

0.1 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

$$\tau = -\mu \frac{du}{dy} \quad (0-1a)$$

对于均质不可压缩流体，式(0-1a)可改写为

$$\tau = -\frac{\mu}{\rho} \frac{d(\rho u)}{dy} = -\nu \frac{d(\rho u)}{dy} \quad (0-1b)$$

式中 τ ——切应力(Pa)，又称动量通量，表示单位时间内通过单位面积传递的动

$$\text{量} \left[\frac{\text{kg} \cdot (\text{m/s})}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right];$$

μ ——流体的动力粘度或动力粘度系数(Pa·s)；

y ——垂直于运动方向的坐标(m)；

ν ——流体的运动粘度(m^2/s)， $\nu = \mu/\rho$ ；

ρ ——流体密度(kg/m^3)；

$\frac{d(\rho u)}{dy}$ ——动量浓度变化率[(N·s)/ m^4 或 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}/\text{s}$]，表示单位体积内流体的

动量在 y 方向的梯度。

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递。

0.2 傅里叶定律

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流密度为

$$q = -\lambda \frac{dt}{dy} \quad (0-2a)$$

对于恒定 ρc_p 的流体，式(0-2a)可改写为

$$q = -\frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{d(\rho c_p t)}{dy} = -a \frac{d(\rho c_p t)}{dy} \quad (0-2b)$$

式中 q ——热流密度，又称热量通量，表示单位时间内通过单位面积传递的热量
[J/($\text{m}^2 \cdot \text{s}$)]；

t ——温度(°C)；

y ——温度发生变化方向的坐标(m)；

λ ——热导率[W/($\text{m} \cdot \text{°C}$)]；

a ——热扩散率(m^2/s)；

$\frac{d(\rho c_p t)}{dy}$ ——焓浓度变化率或热量浓度梯度[J/($\text{m}^3 \cdot \text{m}$)]；

c_p ——比定压热容[J/($\text{kg} \cdot \text{°C}$)]。

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

0.3 菲克定律

在混合物中若各组分存在浓度梯度时,则发生分子扩散。对于两组分系统,通过分子扩散传递的组分 A 的质量通量密度为

$$j_A = -D_{AB} \frac{d\rho_A}{dy} \quad (0-3)$$

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

y ——组分 A 的密度发生变化方向的坐标 (m);

D_{AB} ——组分 A 在组分 B 中的扩散系数 (m^2/s);

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

式中的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递。

0.4 三种传输现象的类比

由式(0-1b)、式(0-2b)和式(0-3)可以看出,动量、热量和质量的传输过程存在以下类似的规律:

1) ν 、 a 、 D_{AB} 分别为动量、热量和质量扩散系数,它们具有相同的因次,即单位均为 m^2/s 。

2) 动量、热量和质量的传输通量,均等于各自量的扩散系数与各自量的浓度梯度的乘积的负值,三种分子传递可用一个通式来表达,即

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

3) 各量通量的传递方向均与该量的浓度梯度方向相反,故传递通式中有一负号。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。

从微观机理角度,动量、热量和质量的传递均靠两种基本方式实现,即由分子的微观运动引起的分子扩散传递,或由漩涡混合造成的流体微团的宏观运动引起的湍流传递。

动量、热量和质量传输是一门探讨速率过程的科学。由于在速率这个概念上,三种传输现象之间存在着许多相似性,因此将这三种传输现象归结为速率过程进行综合讨论,这是传输理论的一个鲜明特色。

传输过程是一个物理过程,研究该过程的方法通常有理论研究、实验研究和数值计算三种。

1. 理论研究方法

传输理论是以牛顿第二定律、热力学第一定律和质量守恒定律为基础,从宏观上研究传输问题的。采用的方法是微元体平衡法,得到描述传输体系的微分方程或积分方程,前者的解是在定解条件下的速度分布、温度分布及浓度分布,后者的解是在定解条件下的体系进、出口各物理量之间的关系。理论研究方法包括三个阶段:①确定简化的物理模型。通过对所研究对象的观察、实验研究及分析,获得对事物的全面、深刻了解,在此基础上找出影响事物的主要因素和次要因素,采取保留主要因素而忽略次要因素的方法对事物进行合理的简化和近似,提取出一个简化的物理模型。②建立数学模型。对简化的物理模型应用物理普遍定律,即可得到描述该模型的普遍数学模型(方程)。为了唯一地确定所研究的某一过程,还需要给出相应的定解条件(主要是初始条件和边界条件)。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,确定解的准确程度和适用范围。

2. 实验研究方法

实验研究方法在传输过程中有着广泛的应用,它是传输问题研究中不可或缺的一个方面。通过实验可以为简化物理模型的确立提供依据;计算结果的正确性与可靠性需要实验予以检验;尤其是当所研究的对象复杂而无法建立数学模型,或者虽有数学模型但因方程或边界条件过于复杂而难于求解时,实验研究或基于相似理论的模型实验研究就显得尤为重要。只要实验是在与所研究问题相同或相似条件下完成的,所得实验结果一般来说是可靠的。由于实验总是要受到实验条件的限制,因此所得实验结果的应用范围有一定的局限性。此外,实验要消耗一定的人力和物力。

3. 数值计算方法

数值计算方法是借助于计算机采用近似计算方法(有限差分法、有限元法等)求解传输方程得到数值解的方法。由于传输方程常常是二阶非线性偏微分方程(组),当研究对象是三维空间或复杂边界条件时,普通的数学解析方法就会显得无能为力。此时,采用数值计算方法往往可以获得满意的计算结果。数值计算方法的优点是能够解决理论研究所无法解决的复杂问题。和实验相比,所需的费用和时间均较少,且具有较高的精度。但是,数值计算方法所得的结果是散点,不容易看出各个物理参数对解的影响。另外,求解的前提必须有描述过程的精确的数学方程,这样才能获得满意的结果。

在传输问题的研究中,理论、实验和计算这三种研究方法各有长短,互相补充,相互作用。理论能够指导实验和计算,实验则用于检验计算结果的正确性和可靠性及提供建立物理模型的依据,而计算则可弥补理论和实验的不足,对各种复杂的传输过程进行既快又省的研究工作。

本书的内容主要介绍理论研究方法及部分实验研究方法。

第1篇 动量传输

动量传输理论属于流体动力学范畴，主要研究流体(液体和气体)处于流动状态时，作用在流体上的力和流动之间的关系。从传输的观点来看，动量、热量和质量三种传输现象在机理、过程及数学模型等方面具有类比性和统一性。从动量传输的角度讨论流体的流动问题，不仅有利于传输理论体系的和谐，而且可以揭示三传输现象类似的规律和内涵。

在材料加工与冶金过程中，存在着许多动量传输现象，例如，金属液充型过程的流动、金属液脱气过程的气泡运动、钢液的炉外精炼、焙烧时的气—固两相流动、焊接过程保护气体在熔池表面的流动、合金熔化时的液—固两相流动等。在动量传输过程中，往往还同时伴随着热量的传输和质量的传输，例如，热处理时工件与流体介质之间的传热、金属熔炼过程中熔融渣与金属液之间的传质等，都与流体的流动有关。所以，可以把动量传输看做是传输现象中基本的传输过程。研究动量传输，掌握其内在规律，对生产设备的设计与改进、生产工艺的优化及控制均有重要的作用。

本篇主要讲述动量传输。第1章介绍流体的性质，是后面各章的基础；第2章流体静力学既是学习流体动力学的基础，也是流体力学工程应用的拓展；第3章主要介绍了流体运动过程中的质量守恒、动量守恒和能量守恒及转换的基本规律，要注意把握流体流动过程中流速的变化即反映了动量的变化；第4、5章均是前面章节的应用，重点是动量传输的阻力损失。

第1章 流体性质

1.1 流体的概念及连续介质假设

1.1.1 流体的概念

液体和气体与固体相比，它们的分子间引力较小，分子运动较剧烈，因而分子分布松散。这就决定了液体和气体具有的共同特性是：不能保持一定形状，流动性很大。所以液体和气体统称为流体。

从力学性质来说，固体具有抵抗压力、拉力和切力的能力，在外力作用下，通常变形较小，而且在达到一定程度后变形就基本停止了。流体只能抵抗压力，而不

能抵抗拉力和切力，在它受到切力作用时，就会产生连续不断的变形，这就是流动。由于流体对缓慢变形不显示阻力，所以流体不存在静摩擦力。以上所述就是流体与固体在力学性质上的明显差别。正因为流体具有流动性，才能实现在外力作用下通过管道或孔隙连续不断地输送到指定地点。例如，熔融金属在静压头作用下，经浇注系统流入铸型中。

同为流体，液体和气体还存在以下不同特性。

液体分子间的距离比气体分子之间的距离小，分子之间的引力尚能使液体保持一定的体积，故在重力作用下有边界(自由)面，有比较固定的体积，而在受到压缩时因分子之间的斥力较大，故有一定抗力，因而在实用意义上具有不可压缩的特性。

气体由于其分子之间的距离很大，引力很弱，既不能保持一定的形状，也不能保持一定的体积，总是完全地充满所占容器的空间，没有自由面，表现出较大的膨胀性。同时由于气体分子之间的斥力很弱，很容易被压缩，因此，气体被认为是可压缩流体。

必须指出，在所研究的问题并未涉及压缩性时，所建立的流体力学规律，既适用于液体，也适用于气体。当计算压缩性时，气体和液体就必须分别处理。气体虽然是可压缩的，但在许多工程问题中，气体的压力和温度变化不大(如常温、常压气力输送)，气流速度远小于声速时，可以忽略气体的压缩性。此时气流与液流的运动规律，在本质上是相同的。因此，液体运动的基本理论，对于上述气流来说也是完全适用的。

1.1.2 连续介质假设

从物理学的观点来看，流体是由分子所组成的，而分子之间是存在空隙的。但是，在流体的动量传输以及在后面两篇将要讨论的热量和质量传输中所要研究的，并不是个别分子的微观运动，而是由大量分子组成的宏观流体在外力(如重力、压力差等)作用下引起的机械运动。宏观流体的物理量(如压力、速度、密度和粘度等)，均为大量分子的行为和作用的平均效果，均能从实验中直接测出。这样，在动量传输中，为了便于研究，常用宏观流体模型来代替微观有空隙的分子结构。

1753年，欧拉(Euler)首先采用了“连续介质”的概念作为宏观流体模型。他提出可以将真实的流体，看成是由无限多流体(或称为微团)所组成的稠密而无间隙的连续介质，也就是假定了流体具有连续性和稠密性。流体既被看成是连续介质，于是反映宏观流体的各种物理量，就都成了空间坐标的连续函数。这样就可引用连续函数的解析方法，来研究流体处于平衡和运动状态下的有关物理参数之间的数量关系。

1.2 流体的主要物理性质

1.2.1 流体的密度、重度、质量体积

流体具有质量和重量，流体的密度、重度和比体积是流体最基本的物理量。

单位体积的流体所具有的质量称为密度，以 ρ 表示。对于均质流体，各点密度相同，即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

式中 m ——流体的质量(kg)；

V ——质量为 m 的流体所占有的体积(m^3)。

单位体积的流体所受的重力称为重度，以 γ 表示。对于均质流体，各点重度相同，即有

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-2)$$

式中 G ——流体所受的重力(N)；

V ——重力为 G 的流体所占有的体积(m^3)。

流体的密度和重度有以下关系

$$\gamma = \rho g \quad \text{或} \quad \rho = \frac{\gamma}{g} \quad (1-3)$$

式中 g ——重力加速度，通常取 $g = 9.81 \text{m/s}^2$ 。

密度的倒数称为质量体积，以 v 表示，即

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{V}{m} \quad (1-4)$$

它表示单位质量流体所占有的体积(m^3/kg)。

对于非均质流体，因质量非均匀分布，各点密度不同。取包围空间某点 A 在内的微元体积 ΔV 。设其所包含的流体质量为 Δm ，重力为 ΔG ，则当 $\Delta V \rightarrow 0$ 时， A 点的密度、重度和质量体积分别为

$$\rho_A = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-5)$$

$$\gamma_A = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} = \frac{dG}{dV} \quad (1-6)$$

$$v_A = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta m} = \frac{dV}{dm} \quad (1-7)$$

1.2.2 流体的压缩性和膨胀性

流体和固体不同，其体积大小将随压强和温度的变化而变化。当温度不变时，