



普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12·5" GUIHUA JIAOCAI

传输现象

梁铎强 陈奇志 主编



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



普通高等教育“十二五”规划教材

传输现象

梁铎强 陈奇志 主编

北 京
冶金工业出版社
2015

内 容 提 要

本教材简要介绍了动量传输、热量传输、质量传输的基本概念和基本规律以及相似原理和量纲分析,重点介绍了动量传输规律在有压圆管流、边界层流动、一维气体动力学中的应用,热量传输在导热中的应用、质量传输在扩散传质和对流传质中的应用。

本教材可供热动、化工、冶金、能源、动力、建筑等理工科专业的高等院校学生使用。

图书在版编目(CIP)数据

传输现象/梁铎强,陈奇志主编. —北京:冶金工业出版社, 2015.5

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-6877-4

I. ①传… II. ①梁… ②陈… III. ①输运理论—高等学校—教材 IV. ①O369

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第062430号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷39号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjchs@cnmp.com.cn

责任编辑 杨秋奎 加工编辑 李维科 美术编辑 杨帆

版式设计 孙跃红 责任校对 禹蕊 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6877-4

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;中煤涿州制图印刷厂北京分厂印刷

2015年5月第1版,2015年5月第1次印刷

169mm×239mm;8印张;156千字;118页

22.00元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

传输现象是一门研究动量传输、热量传输和质量传输过程的课程。本教材根据编者多年的教学讲义《冶金传输原理》编写而成，旨在培养理工科学生建立物理和数学结合的意识 and 能力，加深学生对基本概念、基本定律和基本公式的理解，引导读者对宏观低速物理的学习，培养学生使用数学语言构建物理学框架的能力。

本教材的特点包括：

(1) 注重概念和思路的阐述。培养学生建立物理和数学结合的意识 and 能力，不纠缠于例题和计算；配备的电子版习题采用选择题、判断题的形式，引导学生对动量传输、热量传输和质量传输理论的理解和应用。

(2) 入门为先，兼顾兴趣。让学生快速入门，激励学生兴趣，从而自主加强基础的学习。

本教材简要介绍了动量传输、热量传输、质量传输的基本概念、基本规律以及相似原理和量纲分析，重点介绍了动量传输规律在有压圆管流、边界层流动、一维气体动力学中的应用，热量传输在导热中的应用，质量传输在扩散传质和对流传质中的应用。

本教材第1~7和10章由梁铎强负责编写，第8、9、11、12章由陈奇志负责编写，最后由梁铎强统稿。本教材部分图稿由广西工业职业技术学院建筑工程系的刘芳远绘制，校对由广西大学资源与冶金学院的经民富、唐中琴、杨译、胡广、郭春江、罗超、田兰、郭彬、简仪文、刘卓、孙铭、国强负责。在此一并表示感谢。

本教材配备有电子版习题集，读者可联系出版社和编者获取。

由于编者水平所限，教材中存在的错误和不足，请读者予以指正。
读者的建议和疑问也可以通过 QQ 群（号码：392846769）与编者沟通。

编 者

2015 年 1 月

目 录

0 绪论	1
0.1 关于传输现象的建立	1
0.2 传输过程的研究方法	2
1 动量传输的基本概念	4
1.1 流体的性质	4
1.1.1 流体、连续介质模型	4
1.1.2 黏性和牛顿内摩擦定律	5
1.2 静力学与流体	6
1.2.1 静压强	6
1.2.2 水静力学的基本方程	6
1.2.3 压强的表示方法及单位	7
1.2.4 作用在流体上的力	7
1.3 运动学与流体	8
1.3.1 流体运动的描述	8
1.3.2 与欧拉法有关的基本概念	11
1.3.3 流体微团运动的分析	13
思考题	16
2 动量传输的基本规律	17
2.1 连续性方程	17
2.1.1 连续性微分方程	17
2.1.2 连续性微分方程对总流的积分	18
2.2 黏性流体中的基本定律	19
2.2.1 牛顿内摩擦定律的实质	20
2.2.2 广义牛顿内摩擦定律	20
2.3 不可压缩黏性流体运动的基本方程	22

2.4 理性流体元流的伯努利方程	23
思考题	24
3 动量传输规律的应用 1——有压圆管流	25
3.1 水头损失及其分类	25
3.1.1 水头损失的计算公式	26
3.1.2 局部水头损失	26
3.2 黏性流体流动流态	27
3.2.1 黏性流体流动流态的概念	27
3.2.2 流态的判别准则	28
3.3 圆管中的层流运动	29
3.3.1 圆管中层流运动的流动特征	29
3.3.2 圆管层流的断面流动分布	29
3.4 紊流运动分析	30
3.4.1 紊流的特征与时均化	30
3.4.2 黏性底层	32
3.4.3 混合长度理论	33
思考题	35
4 动量传输规律的应用 2——边界层流动	36
4.1 边界层的基本概念	36
4.2 不可压缩层流边界层方程	37
4.3 边界层动量积分方程	39
4.3.1 边界层动量积分方程的提出	39
4.3.2 边界层的位移厚度和动量损失厚度	40
4.3.3 平板层流边界层的近似计算	42
4.4 边界层分离现象	44
4.5 物体的阻力	45
思考题	46
5 动量传输规律的应用 3——一维气体动力学	47
5.1 可压缩气流的基本概念	47
5.1.1 音速	47
5.1.2 马赫数	49
5.2 理想气体一维恒定流的基本方程	51

5.2.1 基本方程	51
5.2.2 滞止参数	52
5.2.3 气体按不可压缩流体处理的限度	53
5.2.4 流动参数与断面积的关系	53
5.3 喷管	54
5.3.1 收缩喷管	54
5.3.2 缩放喷管	56
思考题	58
6 相似原理和量纲分析	59
6.1 量纲分析的意义和量纲和谐原理	59
6.1.1 量纲的概念	59
6.1.2 无量纲量	60
6.1.3 量纲和谐原理	61
6.2 量纲分析方法	61
6.2.1 瑞利法	61
6.2.2 π 定理	62
6.3 相似理论基础	63
6.3.1 相似条件	63
6.3.2 相似准则	64
思考题	66
7 热量传输的基本概念和基本规律	67
7.1 热量传输的基本概念	67
7.1.1 热量传递的基本方式	67
7.1.2 传热过程与热阻	71
7.2 热量传输的基本方程	73
思考题	75
8 热量传输基本规律的应用 1——导热	76
8.1 稳态导热	76
8.1.1 平壁一维稳态导热	76
8.1.2 圆筒壁一维稳态导热	81
8.2 非稳态导热分析解法	85
8.2.1 一维非稳态导热过程分析	85

8.2.2 集总参数系统分析	88
思考题	89
9 热量传输基本规律的应用 2——对流换热	90
9.1 对流换热概述	90
9.2 温度边界层和对流换热微分方程组	90
9.3 边界层换热微分方程组的解	93
9.3.1 数量级分析与边界层微分方程	93
9.3.2 外掠平板层流换热边界层微分方程式分析解阐述	94
9.4 边界层换热积分方程组及求解	95
9.5 动量传递与热量传递的类比	97
9.5.1 紊流动量传递和热量传递	97
9.5.2 雷诺类比	98
9.5.3 外掠平板紊流换热	100
思考题	101
10 质量传输的基本概念和基本规律	102
10.1 质量传输的基本概念	102
10.1.1 浓度及其表示方法	102
10.1.2 浓度场及浓度梯度	102
10.1.3 菲克定律	102
10.2 质量传输的基本规律	103
10.2.1 定态的一维分子扩散	103
10.2.2 分子扩散系数	105
10.2.3 单相对流传质速率方程	105
10.2.4 对流运输	106
10.3 多组分体系的传质微分方程	106
思考题	108
11 质量传输基本规律的应用 1——扩散传质	109
11.1 稳态扩散	109
11.1.1 气体通过平壁的扩散	109
11.1.2 气体通过圆筒壁的扩散	110
11.2 非稳态扩散	111
11.2.1 一维无穷长系统	111

11.2.2 半无穷长系统	112
思考题	112
12 质量传输基本规律的应用 2——对流传质	113
12.1 对流传质	113
12.1.1 对流传质过程	113
12.1.2 对流扩散的有效膜模型	113
12.2 相间传质	114
12.2.1 相间传质的有效膜模型	115
12.2.2 相间传质速率方程	115
思考题	117
参考文献	118

0 绪 论

传输过程是动量传输、热量传输、质量传输过程的总称，简称“三传”或者“传递现象”。一般而言，动量传输是在垂直于流体流动的方向上，动量从高速区向低速区的转移。热量传输是热量从高温区向低温区的转移。质量传输是物系中一个或几个组分从高浓度区向低浓度区的转移。在“三传”中，热量传输（对应传热学）是线索，动量传输（对应流体力学）是难点，而相似原理和量纲分析把三者有机联系在一起。

0.1 关于传输现象的建立

热量传输是线索，可以通过回顾传热学的发展简史了解传热学、流体力学、相似原理和传质学之间的关系。

18 世纪以瓦特改良的蒸汽机为标志，首先从英国开始的工业革命促进了生产力的空前发展。以伽利略、培根、笛卡儿为代表的近代科学家为科技的发展在思想上扫平了障碍，力学、热力学、电学等学科相继建立。传热学也是这个时期建立起来的。导热和对流两种基本热量传递方式早已为人们所认识，第三种热量传递方式则是在 1803 年发现了红外线后才确认的，它就是热辐射方式。

流体流动的理论是对流换热理论的必要前提。1738 年瑞士数学家伯努利在其著作《流体动力学》中提出了伯努利方程。1755 年欧拉在其著作《流体运动的一般原理》中提出理想流体概念，并建立了理想流体基本方程和连续方程，从而提出了流体运动的解析方法，同时提出了速度势的概念。1781 年拉格朗日首先引进了流函数的概念。1823 年纳维提出的流动方程可适用于不可压缩性流体。该方程于 1845 年经斯托克斯改进为纳维-斯托克斯方程，完成了建立流体流动基本方程的任务。然而，由于方程式的复杂性，只能对极少数简单流动进行求解，发展遇到了困难。这种局面一直到 1880 年雷诺提出的对流动有决定性影响的无量纲物理量群之后才有所改观，这个物理量群后被称为雷诺数。在 1880~1883 年间雷诺进行了大量实验研究，发现在雷诺数的数值为 1800~2000 之间时，管内流动层流向湍流发生转变澄清了实验结果之间的混乱，对指导实验研究作出了重大贡献。但与此同时，对于比单纯流动更为复杂的对流换热问题的理论求解的进展却不大。

1881年洛伦兹提出自然对流的理论解,1885年格雷茨和1910年努塞尔特分别提出管内换热的理论解及1916年努塞尔特提出凝结换热理论解,虽然对对流换热问题的理论求解作出了贡献,但这些成果数量太少。具有突破意义的进展要首推1909年和1915年努塞尔特两篇论文所作的贡献。他对强制对流和自然对流的基本微分方程及边界条件进行量纲分析,并获得了有关无量纲数之间的原则关系,开辟了无量纲数原则关系的正确指导下,通过实验研究求解对流换热问题的一种基本方法,有力地促进了对流换热研究的发展。由于量纲分析法在1914年才由白金汉提出,相似理论则在1931年才由基尔皮切夫等发表,因此努塞尔特的成果有其独创性,使其成为发展对流换热理论的杰出先驱。

在微分方程的理论求解上,两个方面的进展发挥了重要作用。一方面是普朗特于1904年提出的边界层概念。他认为,低黏性流体只有在横向速度梯度很大的区域内才有必要考虑黏性的影响,这个范围主要处在与流体接触的壁面附近,而在其外的主流则可以当做无黏性流体处理。这是一个经过深思熟虑、切合实际的论断。在边界层概念的指导下,微分方程得到了合理的简化,有力地推动了理论求解的发展。1921年波尔豪森在流动边界层概念的启发下又引进了热边界层的概念,1930年他与施密特及贝克曼合作,成功地求解了竖壁附近空气的自然对流换热。数学家与传热学家合作,发挥各自的长处,成为科学研究史上成功合作的范例。另一方面是湍流计算模型的发展。1925年的普朗特比拟,1939年的卡门比拟以及1947年马丁纳利的引申记录着早期发展的轨迹。由于湍流问题在应用上的重要性,湍流计算模型的研究随着对湍流机理认识的不断深化而蓬勃发展,逐渐发展成为传热学研究中的一个令人瞩目的热点,它也有力地推动着理论求解向纵深发展。还应该提到,在对流换热理论的近代发展中,麦克亚当、贝尔特和埃克特先后作出了重要贡献。

20世纪60年代以后,计算流体力学得到了迅速的发展,流体力学内涵不断地得到了充实与提高。值得一提的是,亥姆霍兹在流体力学上也作出了非凡的贡献。1858年亥姆霍兹指出了理想流体中旋涡的许多基本性质及旋涡运动理论,并于1887年提出了脱体绕流理论。

0.2 传输过程的研究方法

传输过程的研究方法与物理学中其他领域的研究方法一样,主要有理论研究、实验研究和数值计算三种方法。

(1) 理论研究方法:传输理论以物理学的三个基本定律(质量守恒定律、牛顿第二定律、热力学第一定律)为依据。

理论研究方法一般分为三个阶段:1) 确定简化的物理模型;2) 建立数学

模型，即针对物理模型建立数学模型；3) 数学求解。

(2) 实验研究方法：1) 实验为简化物理模型提供依据；2) 检验计算结果；3) 数学模型不易建立时，可通过实验来进行研究。

(3) 数值计算方法：数学计算方法随着计算机技术的发展而得到普通应用。

1 动量传输的基本概念

理论力学是流体力学的基础，流体力学是理论力学在流体上的应用，因此拥有扎实的理论力学，特别是运动学基础是很有必要的。读者宜侧重理论力学在流体中应用的过程。

1.1 流体的性质

1.1.1 流体、连续介质模型

1.1.1.1 流体

流体是能够流动的物体，如液体和气体，不能保持一定的形状，而是有很大的流动性。其与固体比较有以下特点：

(1) 流体中，分子之间的空隙比在固体中的大，分子运动的范围也比在固体中的大，分子的移动与转动为其主要的运动形式，而固体中，分子绕固定位置振动是主要的运动形式。

(2) 流体仅能抵抗压力，不能抵抗拉力或切力。流体受到切力作用时，就发生连续不断的变形，表现为流动性。固体可以抵抗压力、拉力和切力，在外力作用下通常发生较小变形，变形到一定程度后停止，直到破坏。流体分为液体与气体。其中液体具有一定体积，与盛装液体的容器大小无关，可以有自由面。

液体通常可看成不可压缩的流体。当对液体加压时，由于分子间距稍有缩小而出现强大的分子斥力来抵抗外压力。液体的分子间距很难缩小，因而可认为液体具有一定的体积。由于分子间引力的作用，液体有力求使自身表面积收缩到最小的特性，所以一定量的液体在大容器内只能占据一定的容积，而在其上部形成自由分界面。

气体分子间距大，为可压缩流体。气体既没有一定形状也没有一定体积。一定量气体在较大容器内，由于分子的剧烈运动将均匀充满容器，而不能形成自由表面。

当所研究的问题不涉及压缩性时，所建立的流体力学规律对液体与气体都适用；当涉及压缩性时，就必须对它们分别进行处理。

1.1.1.2 连续介质模型

在动量传输的研究中，不研究流体中个别分子的微观运动和分子之间的相互

作用,如分子热运动、分子间的引力等,即使分子间的相互作用在流体中是存在的。动量传输研究的是由大量分子组成的宏观体积流体(流体质点)的运动,把研究对象视为占有空间由无限多个流体微团稠密无间隙地组成的连续介质。流体内的物理量如密度、速度、压力、黏度等也是连续分布的,是空间的连续函数,这样就可以用连续函数的解析方法来研究流体的动量传输了。

1.1.2 黏性和牛顿内摩擦定律

当流体运动时,流体内部各质点间或流层间会因相对运动而产生摩擦力以抵抗其相对运动,流体的这种性质称为黏性。黏性是流体的固有属性,是流体阻止自身发生剪切变形的一种特性。产生黏性的原因有:流体分子间的内聚力;流体分子和固体壁面之间的附着力;动量交换。

为了确定流体运动时黏滞力的大小及影响因素,牛顿经过大量实验研究提出了确定流体内部摩擦力的所谓“牛顿内摩擦定律”。

如图 1-1 所示, A、B 为长宽足够大的平板,互相平行,设 B 板以 u_0 运动, A 板不动。由于黏性流体将黏附于它所接触的表面(流体的边界无滑移条件), $u_{\text{上}}=u_0$, $u_{\text{下}}=0$ 。实验结果表明速度自上而下递减,呈直线分布,取出两层,即快层速度为 $u+du$;慢层速度为 u 。

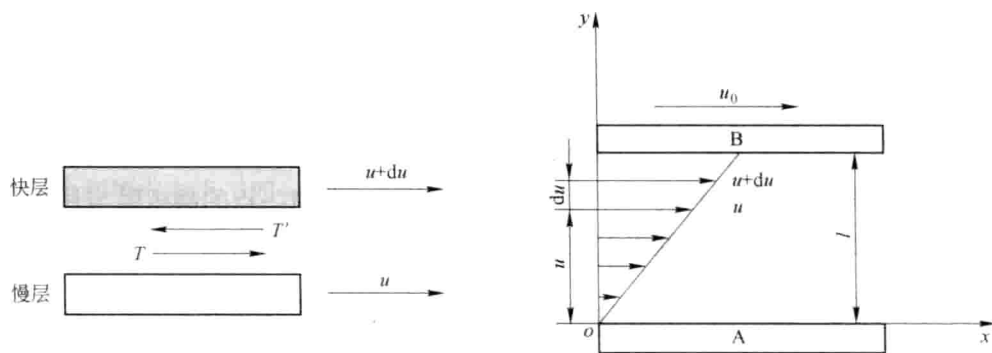


图 1-1 牛顿内摩擦实验示意图

相邻流层发生相对运动时,快层对慢层产生一个切力 T ,使慢层加速,方向与流向相同。慢层对快层有一个反作用力 T' ,使快层减速,方向与流向相反,这种阻止运动的力,称为阻力。 T 与 T' 是大小相等,方向相反的一对力,分别作用在两个流体层的接触面上,这对力是在流体内部产生的,称为内摩擦力。

牛顿发现 T 和 du 成正比例,并用微积分进行严谨化分析,得到内摩擦定律:流体相对运动时,层间内摩擦力 T 的大小与流体性质有关,并与速度梯度和接触面积成正比,而与接触面上的压力无关,即:

$$T = \pm \mu A \frac{du}{dy}$$

式中, T 为内摩擦力; μ 为动力黏性系数, 与流体性质、温度有关; A 为接触面积; $\frac{du}{dy}$ 为速度梯度。

黏性切应力是单位面积上的内摩擦力, 即:

$$\tau = \frac{T}{A} = \pm \mu \frac{du}{dy}$$

符合 $\tau = \pm \mu \frac{du}{dy}$ 的流体为牛顿流体, 不符合 $\tau = \pm \mu \frac{du}{dy}$ 的流体为非牛顿流体。在本书的其他章节中讨论流体运动或动量传输过程等问题时, 将只讨论牛顿流体。

1.2 静力学与流体

1.2.1 静压强

静压力是静止流体对受压面所作用的全部压力。静压强是受压面单位面积上所受的静压力。静压强的方向垂直指向受压面, 或者说静压强的方向沿着受压面的内法线方向。静压强的大小与作用面的方位无关, 即在仅受重力作用的静水中, 任意一点处各个方向的静压强均相等。

1.2.2 水静力学的基本方程

帕斯卡定律表明, 在同一种均质的静止液体中, 任意一点的静压强与其淹没深度成正比, 与液体的重度成正比, 且任意一点的静压强的变化, 将等值地传递到液体的其他各点。因为 $dp = -\gamma dz$, 所以静流体力学基本方程又可写为: $\frac{p}{\gamma} + z = c$

或 $z_1 + \frac{p_1}{\gamma} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma}$ 。静流体力学基本方程的意义在于:

(1) 位置水头 z : 任意一点在基准面以上的位置高度, 表示单位重量流体从某一基准面算起所具有的位置势能, 简称位置水头, 或单位位能, 或比位能。

(2) 测压管水头 p/γ : 表示单位重量流体从压强为大气压算起所具有的压强势能, 简称比压能, 或单位压能, 或压强水头。

(3) 测压管水头 $\left(z + \frac{p}{\gamma}\right)$: 单位重量流体的比势能, 或单位势能, 或测压管水头。仅受重力作用且处于静止状态的流体中, 任意点对同一基准面的单位势能为一个常数, 即各点测压管水头相等, 位头增高, 压头减低。在均质 ($\gamma = \text{常}$

数)、连通的液体中,水平面 ($z_1=z_2=\text{常数}$) 必然是等压面 ($p_1=p_2=\text{常数}$)。

1.2.3 压强的表示方法及单位

压强的表示方法分三种:(1)绝对压强,是以绝对真空状态下的压强(绝对零压强)为基准计量的压强,用 p_{abs} 表示, $p_{\text{abs}} \geq 0$; (2)相对压强,又称“表压强”,是以当地工程大气压 p_a 为基准计量的压强,用 p 表示, $p = p_{\text{abs}} - p_a$, 可正可负,也可为零; (3)真空,是指绝对压强小于一个大气压的受压状态, $p_{\text{abs}} \geq 0$, 相对压强出现负值时,真空值与相对压强大小相等,正负号相反。

1.2.4 作用在流体上的力

按照作用力的性质和作用方式,可分为质量力和表面力(面力)两类。

其中,质量力也叫体积力、彻体力,是外力场作用于流体微团质量中心,大小与微团质量成正比的非接触力。例如离心力、重力、惯性力和磁流体具有的电磁力等都属于彻体力。由于质量力按质量分布,故一般用单位质量的彻体力表示,并且往往写为分量形式:

$$f_V = \lim \frac{\Delta F_V}{\rho \Delta V} = f_x i + f_y j + f_z k$$

式中, ΔV 是微团体积; ρ 为密度; ΔF_V 为作用于微团的彻体力; i 、 j 、 k 分别是三个坐标方向的单位向量; f_x 、 f_y 、 f_z 分别是三个方向的单位质量的彻体力分量。

表面力指相邻流体或物体作用于所研究流体团块外表面,大小与流体团块表面积成正比的接触力。由于按面积分布,故用接触应力表示,并可将其分解为法向应力和切向应力,即:

$$p_n = \lim \frac{\Delta F_c}{\Delta A} = \lim \frac{\Delta P}{\Delta A} + \lim \frac{\Delta T}{\Delta A}$$

法向应力与切向应力(即摩擦应力)组成接触应力: $p_n = p + \tau$ 。图 1-2 中的表

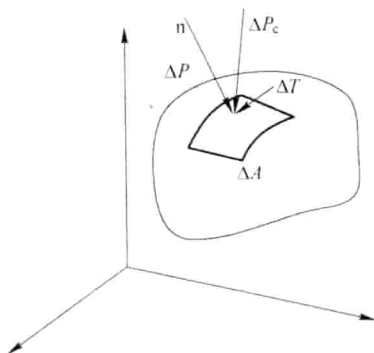


图 1-2 面力分解示意图