



江蘇大學
JIANGSU UNIVERSITY

传输原理

江苏大学材料科学与工程学院

www.ujs.edu.cn

- ❖ 冶金传输原理与冶金物理化学和金属材料学被称为钢铁冶金的三大重要的专业基础课；
- ❖ 冶金传输原理包括动量传递、热量传递和质量传递三部分组成；
- ❖ 物理学科的体系：普通物理学→力学→流体力学（动量传递）、传热学（热量传递）、传质（质量传递）；
- ❖ 进一步发展是不可逆过程热力学。

冶金生产中会涉及复杂的传输过程

- ❖ 冶金生产过程必然会涉及到以下现象：
- ❖ 流体的流动状态、速度和阻力(动量传输)
- ❖ 物料的加热过程和产品的冷却过程(传热传输)
- ❖ 渣、铁中物质扩散和迁移(传质传输)



在冶金生产中形成动量传输、热量传输和质量传输的原动力是什么？

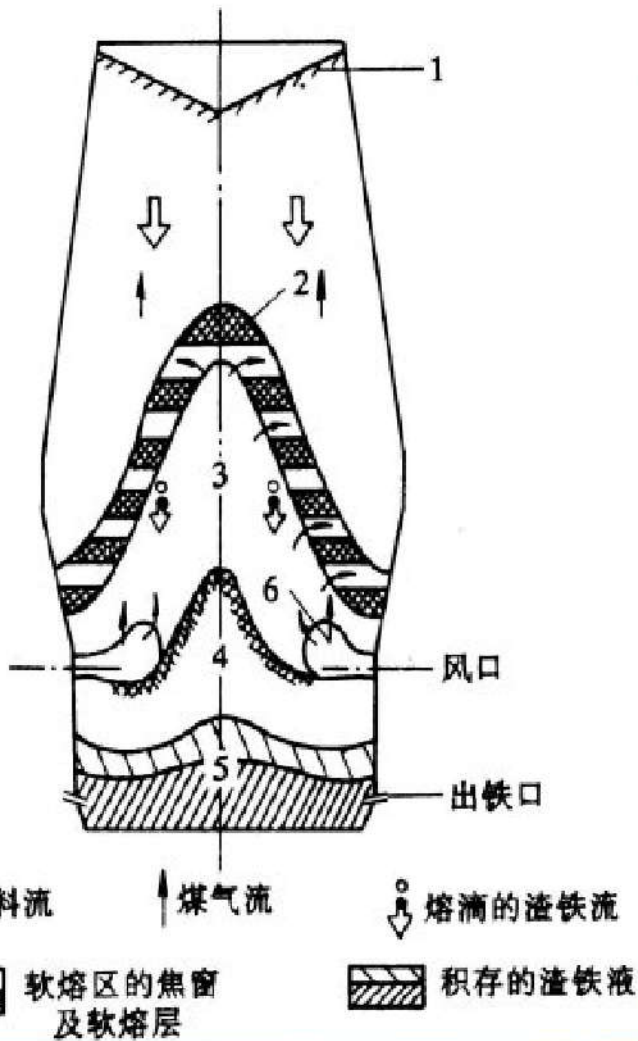
分别是速度差、温度差和浓度差

为什么把“三传”放在一起讲

- ❖ “三传”具有共同的物理本质——都是物理过程；
- ❖ “三传”具有类似的表述方程和定律，它们讨论与时间变化的规律；
- ❖ 在实际冶金过程中往往包括有两种或两种以上传输现象，它们会相互影响。研究相互之间的影响是采用不可逆过程热力学中“耦合”的原理来分析和讨论，而“三传”主要讨论单一的传递过程。

高炉炼铁学

- 炉内的气体流动和分布；
- 炉缸温度分布的计算；
- 炉渣脱硫效率；
- 含铁炉料的还原机理；
- 煤气和煤粉的利用率；
- 球团的干燥过程；
- 竖炉内热量分布。





炼钢学

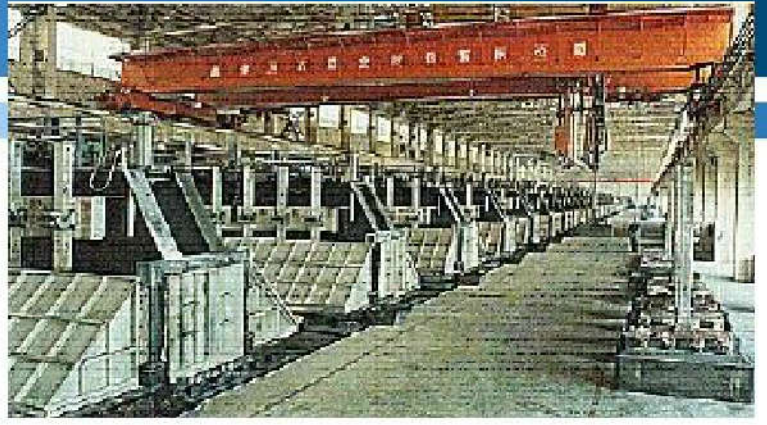
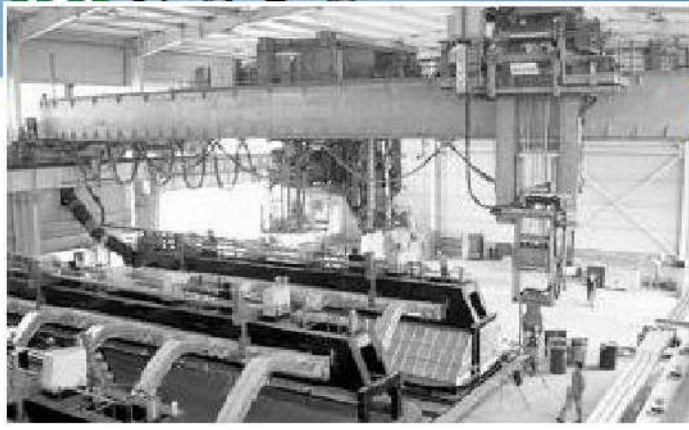
顶吹氧的射流及对转炉热量分布的影响

炼钢过程有害元素的脱出和有益元素的保护

炼钢和精炼过程钢水的流动场

连铸过程二冷段的最佳冷却速度和温度分布

连铸过程钢水温度与浇铸速度的匹配



有色冶金学

不同电解槽内物质的扩散

熔炼炉熔钨的温度对泡沫渣的影响

金属及其化合物浸出或萃取的条件和浸出液、萃取剂的选择

有价值元素提取、分离的限度，有毒、有害元素去除过程的反应机理

学习的目的和方法

一学习目的

扩大知识面，打好专业基础；培养独立思考和解决问题的能力；
掌握传输原理的计算和分析问题的方法

一学习方法

抓住每章重点(骨架和轮廓)，主次分明，条理清楚；
对公式要注重使用条件和物理意义，了解数学的推导过程，重在理解公式的意义和应用；
注意章节的联系，知道来龙去脉，把新学到的概念、公式和已经掌握的知识有机的联系起来；
重视习题，记好笔记；
注重思想方法、解决问题的手段和逻辑推理。

教材

冶金传输原理, 吴铿编 冶金工业出版社 2011

目录

第一篇 动量传输

- 第一章 传输原理中流体的基本概念
- 第二章 控制体法
- 第三章 描述流体运动的方法
- 第四章 动量传输的微分方程
- 第五章 管道中的流动
- 第六章 边界层理论
- 第七章 可压缩气体的流动和射流简介
- 第八章 相似原理与量纲分析

第二篇 热量传输

- 第九章 热量传输的基本方式
- 第十章 导热微分方程
- 第十一章 一维稳态和非稳态导热
- 第十二章 对流换热的基本方程和分析解
- 第十三章 对流换热的特征数及其关联式
- 第十四章 热辐射的基本定律
- 第十五章 辐射换热计算

第三篇 质量传输

- 第十六章 质量传输的基本概念
- 第十七章 质量传输的微分方程
- 第十八章 分子扩散传质
- 第十九章 对流传质
- 第二十章 对流传质的特征数及其关联式
- 第二十一章 相际传质
- 第二十二章 传输现象的类比特性
- 第二十三章 传输现象的耦合特性

参考书

- ❖ 冶金传输原理，张先棹主编，冶金工业出版社 1995
- ❖ 传递现象，R. B. 博德，W. E. 斯图沃特，E. N. 莱特富特著，化学工业出版社 2004
- ❖ 冶金传输原理基础，沈颐身，李保卫，吴懋林，著 冶金工业出版社 2000
- ❖ 传热和传质基本原理，弗兰克 P 英克鲁佩勒，大卫 P 德维特等著 化学工业出版社 2007
- ❖ 流体力学，张亮，李云波编，哈尔滨工业大学出版社 2001
- ❖ 传热学，周筠清 编，冶金工业出版社 1999



第一篇

动量传输

流体的动量传递包含流体的运动以及产生运动的力。

根据牛顿第二定律，体系的受力等于其动量的时间变化率。

作用在流体上的压力和剪切力，均可认为是微观（分子）动量传递所致，因此，本篇既可以称为流体力学，也可以称为动量传输。

- 流体力学是力学的一个分支，属于宏观力学。它的主要任务是研究流体所遵循的宏观运动规律以及流体和周围物体之间的相互作用。
- 以水为主要研究对象的力学称为水动力学(Hydrodynamics)，以空气为主要研究对象的力学称为空气动力学(Aerodynamics)；
- 水动力学和空气动力学两者结合起来统称为流体力学(Fluid Mechanics)

- 流体力学的发展演变过程经历了四个阶段。
- (1) 静力学(Hydrostatics): 这一阶段以公元两千多年前阿基米德(Archimedes) 和帕斯卡(Pascal)关于浮力和静水压力的研究为代表;
- (2) 理想流体力学(Ideal Fluid Mechanics): 从17世纪开始一些卓越的数学家从数学角度出发不计流体的粘性、压缩性和表面张力研究流体的运动, 形成了流体力学学科的雏形—理想流体力学(Hydrodylics), 以柏努利(Bernoulli)、欧拉(Euler)和拉格朗日(Largrange)的工作最具代表性, 但忽略粘性;

- (3) 流体力学(Fluid Dynamics): 这一阶段研究的特征是理论和实验相结合。18世纪突出的成就是由Navier、Hagen、Poiseuille、Stokes 等人创立了粘性流体力学。进入19世纪主要依赖于实验, 由Reynolds、Froude、Rayleigh等人创立了相似理论, 奠定了实验流体力学的基础。自20世纪初Prandtl创立了边界层理论以及随着湍流理论的出现。Prandtl和Von Karman也成为了近代流体力学的奠基人。我国著名的力学家周培源、钱学森和郭永怀等也先后在近代流体力学的发展中做出过重要的贡献。

- ❖ (4) 计算流体力学(Computational Fluid Dynamics): 进入20世纪60年代, 流体力学的一个新的分支——计算流体力学, 简称CFD。解决实际工程问题的能力和取得的巨大成果, 求解各类工程问题CFD商用计算软件, 较流行的有Fluent、CFX-4, Task-Flow, Phoenics。
- ❖ 流体力学这一学科发展至今, 不断派生出新的分支, 但从研究手段上可划分为理论流体力学、实验流体力学和计算流体力学。这三大分支构成了流体力学的完整体系, 他们相辅相成, 推动着这一学科不断向前进步。

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可为理解整体的传输理论打下基础。

学习动量传输有下列要求：

- (1) 对基本概念和原理理解得十分准确和透彻；
- (2) 要学会应用流体力学（动量传输）理论的基本方法。



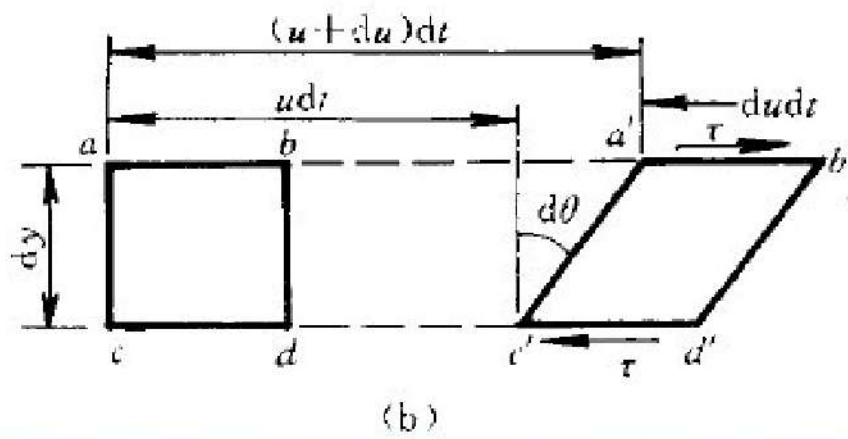
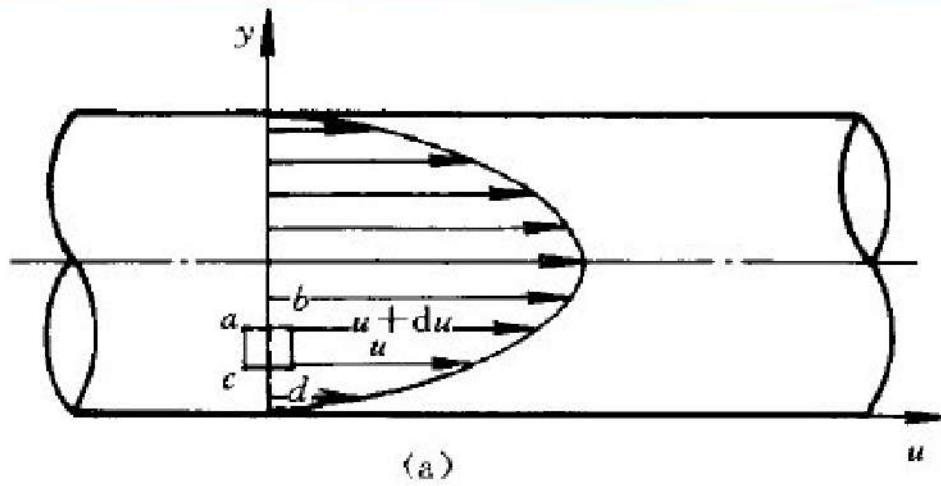
第一章

传输原理中流体的基本概念

1.1 流体及连续介质模型

1、流体：自然界中能够流动的物体，如液体和气体，一般统称为流体（Fluid）。

- ◆ **流动性：**在微小剪切力作用下在足够大的时间内，流体的变形都不会停止，即会发生连续变形的特性；
- ◆ **流体包括液体和气体，液体流动性小于气体；**
- ◆ **液体具有一定的体积，并取容器的形状；**
- ◆ **气体充满任何容器，而无一定体积。**



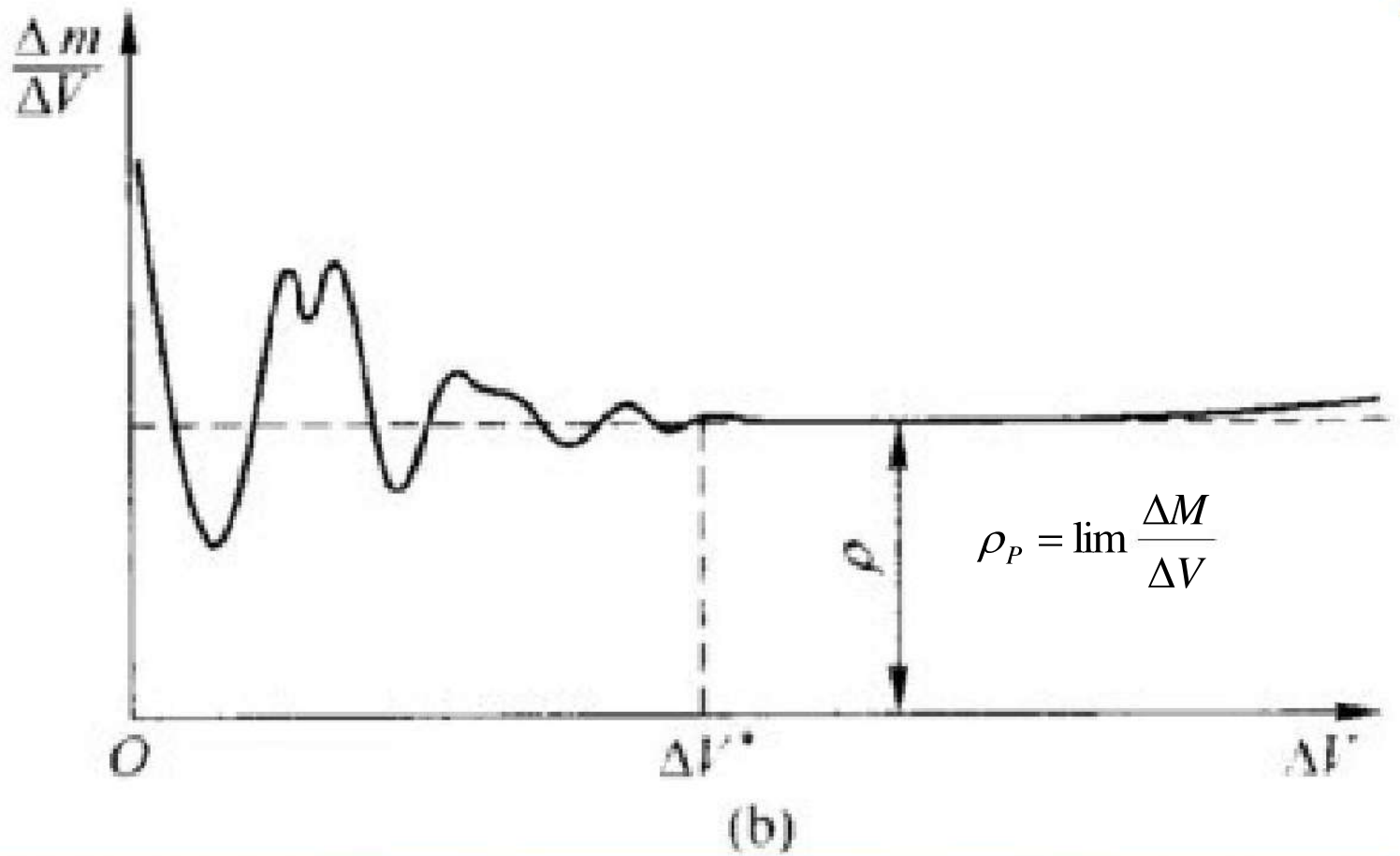
2、连续介质模型

微观：流体是由大量做无规则热运动的分子所组成，分子间存有空隙，在空间是不连续的。

宏观：一般工程中，所研究流体的空间尺度要比分子距离大得多。

定义：不考虑流体分子间的间隙，把流体视为由无数连续分布的流体微团组成的连续介质。

流体微团(又称流体质点)必须具备的两个条件：必须包含足够多的分子和体积必须很小。



采用连续介质模型，流体的一切属性，如速度、密度、压强、温度、浓度等都可以看作是坐标和时间的连续函数，从而可以利用连续函数来进行传输理论的分析研究。

◆ 选择题

按连续介质的概念，流体质点是指(?)

A 流体的分子； B 流体内的固体颗粒； C 几何的点； D 几何尺寸同流动空间相比是极小量，又含有大量分子的微元体。

1.2流体的密度和重度

均质流体的密度： $\rho = \Delta m / \Delta V$ (kg/ m³)

非均质流体的密度： $\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V}$ (kg/ m³)

比容： $v = 1 / \rho$ (m³/kg)

重度： $\gamma = G / V = mg / V = \rho g$ (N/ m³)

1.3 流体的压缩性和膨胀性

一、流体的压缩性

压缩系数 β_p

—— dp

需增加

解：由比容比热力学公式可得： $\beta_p = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T$
 由附录表查得在一个大气压，温度为20℃时水的弹性

模数为 $2.18 \times 10^9 \text{Pa}$ ，依题意 $-\Delta V/V=0.005$ ，将这些值代入上式得：
$$\Delta p = 0.005 \times 2.18 \times 10^9 = 10.9 \times 10^6 \text{ Pa}$$

一个大气压为 $1.013 \times 10^5 \text{Pa}$ ，所以：

$$\Delta p = \frac{10.9 \times 10^6}{1.013 \times 10^5} = 107.6 \text{ 大气压}$$

显然，在常温和常压下，将水的体积缩小5/1000，需要增加107.6大气压才能实现。

二、流体的膨胀性

• 流体体积随着温度的增大而增大的性质；

◆ 体胀系数：单位温度增加所

引起的体积相对变化量 α_{V_0}

$$\alpha_V = \frac{\delta V/V}{\delta T} \quad (1/K)$$

三、可压缩流体和不可压缩流体

- ◆ 不可压缩流体：不考虑可压缩性的流体，及流体的密度为常数；
 - ◆ $\rho = \text{常数}$ 。

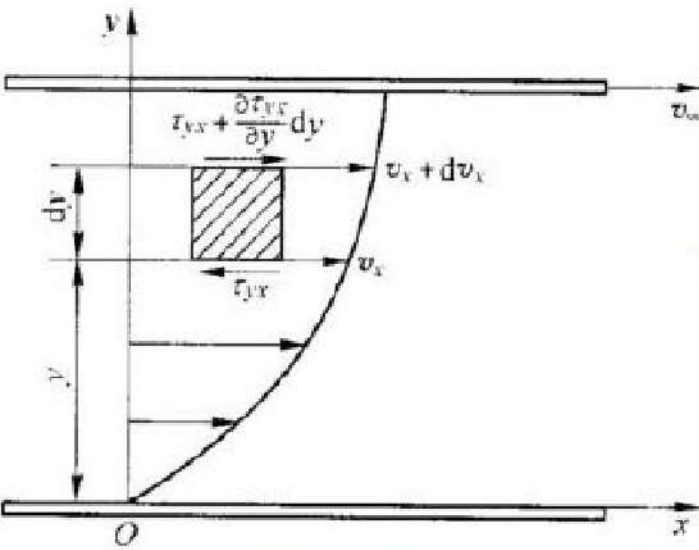
- ◆ 可压缩流体：考虑可压缩性的流体，即流体的密度不为常数；
 - ◆ $\rho \neq \text{常数}$ 。

1.4 流体的黏性

一、流体的粘性

- ◆ 粘性的定义：流体内部各流体微团之间发生相对运动时，流体内部会产生摩擦力(即粘性力)的性质；
- ◆ 流体粘性表现在：流体运动时，内部各流体微团之间会产生粘性力，由此在流体中产生速度梯度；
- ◆ 流体运动时，流体附着在壁面上，此处速度为零(无滑移边界条件)。

- ◆ 牛顿平板实验现象：
- ◆ 自上而下一层带动一层，运动快的流动层带动着运动慢的流动层向前运动；运动慢的流动层阻碍着运动快的流动层，层间有摩擦力，当 h 和 u 不大时，两平板间沿 y 方向的流速呈线性分布



- ◆ 该力存在于流体内部，故称为内摩擦力
- ◆ 当 h 和 u 不是很大时，板受到的摩擦力近似为“每层”流体间的内摩擦力。

- ◆ 牛顿内摩擦定律(或粘性定律)
- ◆ 牛顿于1686年提出, 后经过试验证明, 对于大多数流体内摩擦定律可表述为:
- ◆ 处于相对运动的两层流体之间的内摩擦力(或切力) F , 其大小与流体的物理性质有关, 并与流速梯度 dv/dy 和流层的接触面积 A 成正比, 而与接触面上的压力无关;
- ◆ 其数学表达式为:

$$F \propto A \frac{dv}{dy} \quad \longrightarrow \quad F = A\mu \frac{dv}{dy} \quad \longrightarrow \quad \tau = \mu \frac{dv}{dy}$$

二、粘度的表达式

- ◆ 公式中比例系数称动力粘度，简称粘度。
- ◆ 流体粘性大小的度量，由流体流动的内聚力和分子的动量交换引起。
- ◆ 有动力粘度 μ 和运动粘度 ν 两种表达式：

$$\mu \quad (\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})) \quad \Rightarrow \quad \tau = \mu \frac{dv}{dy}$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{m}^2 / \text{s}) \quad \Rightarrow \quad \tau = \nu \frac{d(\rho v)}{dy}$$

三、影响粘度的因素

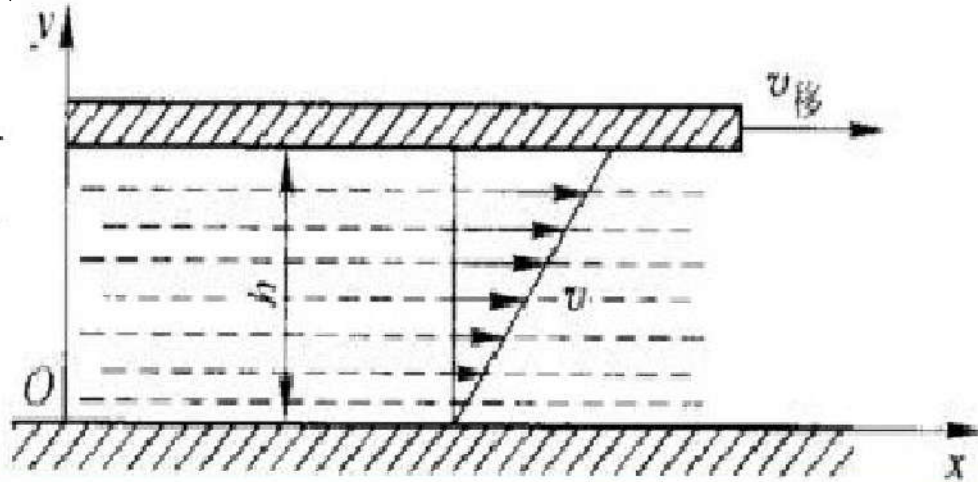
- ◆ 温度对流体粘度的影响很大，当温度升高时，液体的粘度减小，气体的粘度增大。
- ◆ 液体：分子内聚力是产生粘度的主要因素；
温度 \uparrow \rightarrow 分子间距 \uparrow \rightarrow 分子吸引力 \downarrow \rightarrow 内摩擦力 \downarrow \rightarrow 粘度 \downarrow 。
- ◆ 气体：分子热运动引起的动量交换是产生粘度的主要因素；
温度 \uparrow \rightarrow 分子热运动 \uparrow \rightarrow 动量交换 \uparrow \rightarrow 内摩擦力 \uparrow \rightarrow 粘度 \uparrow 。
- ◆ 压力对流体粘度的影响不大，一般忽略不计。

- ❖ 例题1 一块可动平板与另一块不动平板间充满某种液体，两板间的距离为0.5mm，可动平板以0.25m/s的速度运动。为了维持这一速度，需在可动平板上施加 2N/m^2 的切应力。求此间隙中的液体粘性系数。

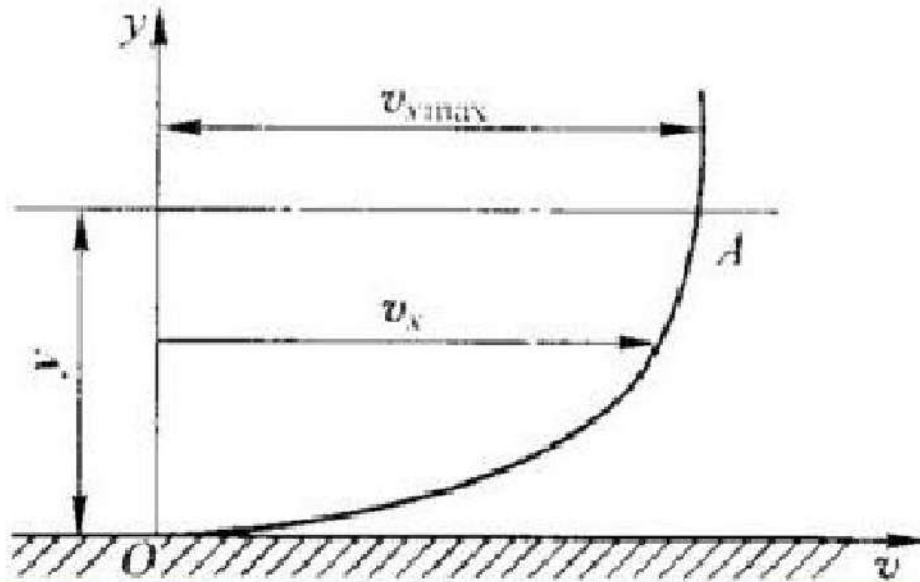
解：由式粘度公式可知：

$$\mu = \frac{\tau_{yz}}{\frac{dv_x}{dy}} = \frac{2}{\frac{0.25 - 0}{0.0005}}$$

$$= 0.004 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$



- 例题2 设有粘性系数 $\mu=0.05\text{Pa}\cdot\text{s}$ 的流体，沿壁面流动，其速度分布为抛物线型，在 $y=60\text{mm}$ 处， $v_{x\max}=1.08\text{m/s}$ 如下图。求 $y=20\text{mm}$ 、 40mm 、 60mm 处的切应力。



解：根据已知边界条件，即： $y=0$ 处 $v_x=0$ ； $y=60\text{mm}$ 处 $v_{max}=1.08\text{m/s}$ ，由此得出抛物线方程为：

$$v_x = 1.08 - 300(0.06 - y)^2 \quad \frac{dv_x}{dy} = 600(0.06 - y)$$

$$\tau = \mu \frac{dv_x}{dy} = 0.05 \times 600(0.06 - y)$$

将 $y=0$ 、 0.02 、 0.04 、 0.06 分别代入式(a)、(b)、(c)，即可求出各点处的 v_x 、 dv_x/dy 、 τ 值。其结果列表如下：

y (m)	0	0	0	0.06
v_x (m/s)	0	0.6	1	1.08
$d v_x/dy$ (s^{-1})	36	24	12	0
τ (Pa)	2	1.2	0.6	0

1.5 牛顿流体与理想流体

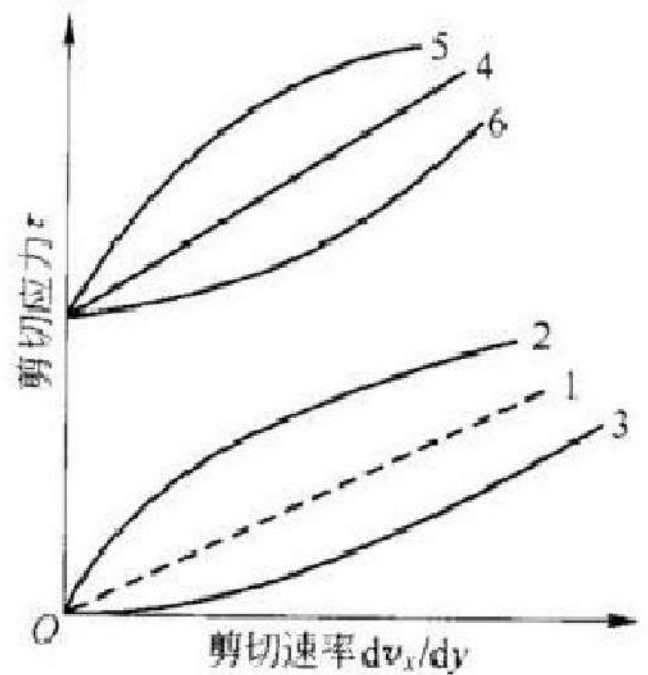
1、牛顿流体和非牛顿流体

◆ 牛顿流体：符合牛顿内摩擦定律的流体。

水、空气、汽油和水银等；

◆ 非牛顿流体：不符合牛顿内摩擦定律的流体。

泥浆、血浆、新拌水泥砂浆、新拌混凝土等。



1-牛顿流体； 2-假塑性流体； 3-膨胀性流体； 4-宾汉姆流体； 5-塑性假塑性流体； 6-塑性膨胀性流体。

2、粘性流体和理想流体

- ◆ 粘性流体：具有粘性的流体 ($\mu \neq 0$)。实际流体都是粘性流体
- ◆ 理想流体：忽略粘性的流体 ($\mu = 0$)。一种理想的流体模型
- ◆ 举例：
 - (1) 静止流体；
 - (2) 惯性力和粘性力相比很大时，可以忽略粘性的存在，认为是理想流体，简化计算。

1.6 黏性动量流密度

从黏性力的建立过程来看，由于流体黏性作用 \Rightarrow 流体流层间出现速度差。由于分子热运动、分子内聚力 \Rightarrow 流体流层间产生动量交换 \Rightarrow 流层间产生切应力（黏性力）。

动量交换过程是由流体的黏性构成的 \Rightarrow 黏性动量传输（物性动量传输）。

动量通量：单位时间通过单位面积所传递的动量，相当于单位面积上的作用力。

黏性动量通量：单位时间通过单位面积所传递的黏性动量，亦即单位面积上的黏性力（切应力）。

$$\tau_{yx} = -\mu \frac{dv_x}{dy} = -\frac{\mu}{\rho} \frac{d(\rho v_x)}{dy} = -\nu \frac{d(\rho v_x)}{dy}$$

式中 τ_{yx} —高速流层向低速流层传递;

$d(\rho v_x)/dy$ 动量梯度 (单位距离上的动量变化量)。

运动黏度 ν :
$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\text{kg/m} \cdot \text{s}}{\text{kg/m}^3} = \text{m}^2/\text{s}$$

运动黏度的物理意义:

$d(\rho v_x)/dy = 1$ 时, 单位面积上的黏性力, 阻滞流动的能力; 亦即黏性动量传输量, ν 亦称为黏性动量传输系数, 牛顿黏性定律也就是流体黏性动量传输基本定律。

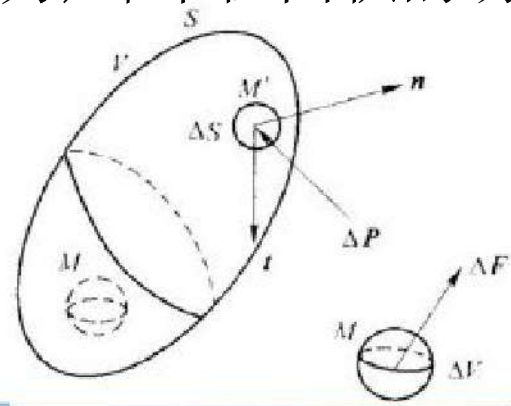
1.7 作用在流体上的力

一、表面力

面上的力，并与其作用的表面通常为压力)和切向力(全面提

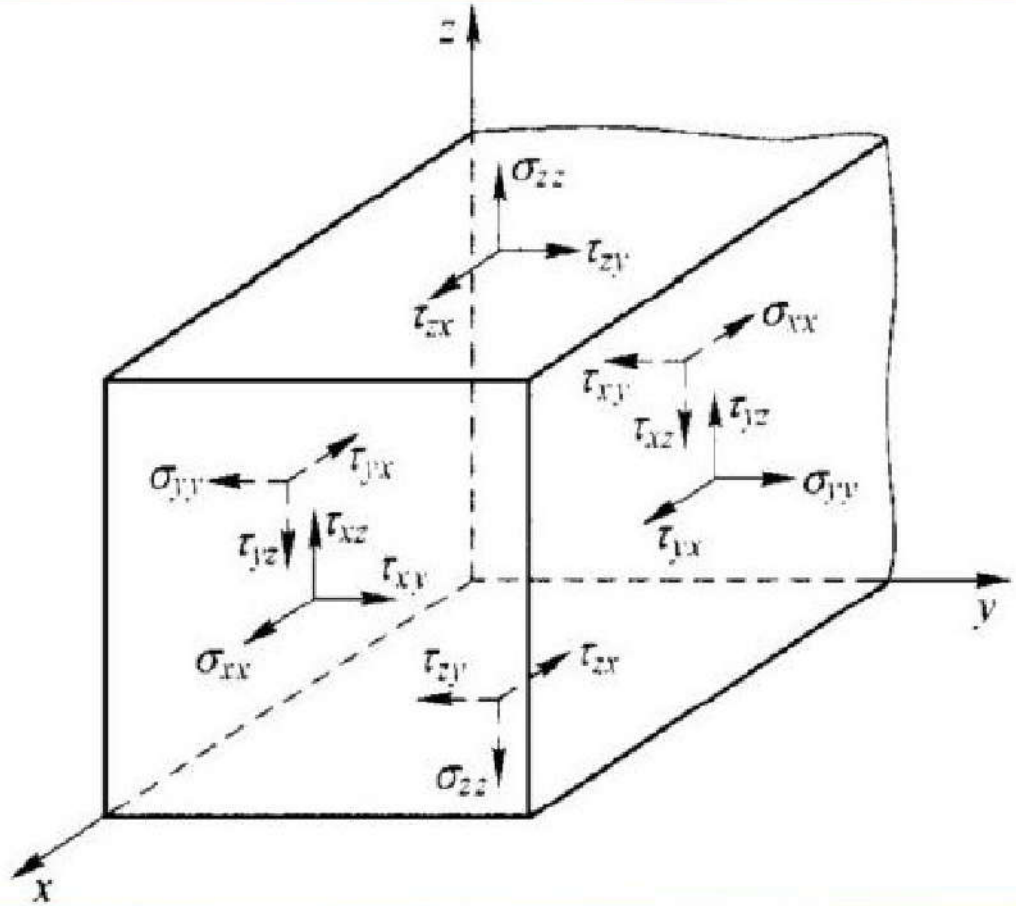
法应力(如压强 p)即单位面积切应力)即单位面积的切向力。

$$P_{nr} = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \frac{\mathbf{F}}{\delta A} = \frac{\mathbf{F}}{dA}$$



- 静止流体内部不存在剪切应力，而法向应力与方向无关，故法向压力是标量。通常情况下，黏性流体内部一点处的应力是一个二阶张量，应力场是一个张量场。

- 图为正方体的流体微团。



- 前图上表示出作用该流体微团表面上的九个应力分量，根据习惯，双下标的涵义是：
 - 第一个下标表示应力作用面的法线方向，而第二个下标表示应力的方向。
 - σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 σ_{zz} 表示法应力，
 - 而 τ_{xy} 、 τ_{xz} 、 τ_{yx} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx} 、 τ_{zy} 表示切应力。
- 九个应力分量可以表示为应力张量，且为对称张量，即：
 - $\tau_{xy}=\tau_{yx}$ ， $\tau_{yz}=\tau_{zy}$ ， $\tau_{zx}=\tau_{xz}$ 。

二、质量力

- ◆ 作用在每个流体微团上的力，大小与流体质量成正比。

例如：重力、电磁力、惯性力：

$$\vec{f} = X\vec{i} + Y\vec{j} + Z\vec{k}$$

静止液体所受的质量力：

$$X=0, Y=0, Z=-mg$$

1.8 体系和控制容积及单位和量纲

一、体系和控制容积

- ❖ 体系的定义就是一些具有特性固定不变的物质结合体。
- ❖ 流体力学的基本定律所给出的是体系和它周围环境之间的相互作用，应用时要严格按所选择的体系进行分析。
- ❖ 控制体就是流体在空间中通过其流动的一个区域。控制体可选有限的，也可以是微元的。

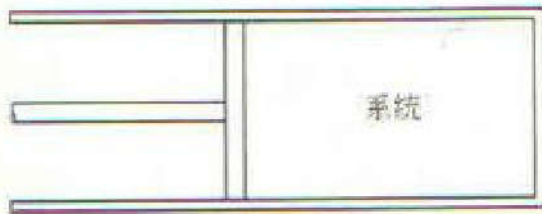


图 1-8 一个容易确定的系统



图 1-9 喷管流动的控制体

二、量纲和单位

◆国际单位制中有7个基本单位，通常用有4个，即长度、质量、时间和温度。见下表。

物理量	CGS单位	SI单位	量纲	工程单位	量纲
长度	cm	m	L	m	L
质量	g	kg	M	kgf·s ² /m	FL ⁻¹ T ²
时间	s	s	t	s	t
速度	cm/s	m/s	Lt ⁻¹	m/s	Lt ⁻¹
温度	°C	K	T	°C	T
力	dyn,(gcm/s ²)	N,(kg·m/s ²)	MLt ⁻²	kgf	F
粘性系数	P,(g/cm·s)	Pa·s	ML ⁻¹ t ⁻¹	kgf·s/m ²	FtL ⁻²
运动粘性系数	St,(cm ² /s)	m ² /s	L ² t ⁻¹	m ² /s	L ² t ⁻¹

- ◆ 一切物理量都可以用基本量的某种组合来表示，而表示某一物理量组合的式子称为量纲或因次。如用L、M和T分别表示长度、质量和时间三个基本量的量纲，可给出速度和力的量纲；
- ◆ 一个正确的物理方程，其各项量纲必须一致，即量纲和谐原理。应用这一原理可以对一些复杂的物理现象进行分析和研究，即非常有用的量纲分析方法；
- ◆ 对详细的物理量的SI单位和工程单位及它们的量纲可查相关表和手册。

➤ 小结

- 作为动量传输的基础，本章介绍了基本的流体力学概念，包括：流体的定义，连续介质模型，流体的流动性、黏性与压缩性等；给出了流体主要物理性质的定义；阐明了流体的分类：牛顿流体与非牛顿流体，均质流体与非均质流体，不可压缩流体与可压缩流体，黏性流体与理想流体。并指出，连续介质模型前提下的物理量定义有别于通常的定义。
- 特别是在直角坐标系中，给出了层状流层之间的剪应力，以及它与黏度、速度梯度之间的关系，介绍了黏性的物理意义，以及单位和量纲的重要性。这些对以后的学习非常重要。