

无机材料热工基础

主讲教师：连芳

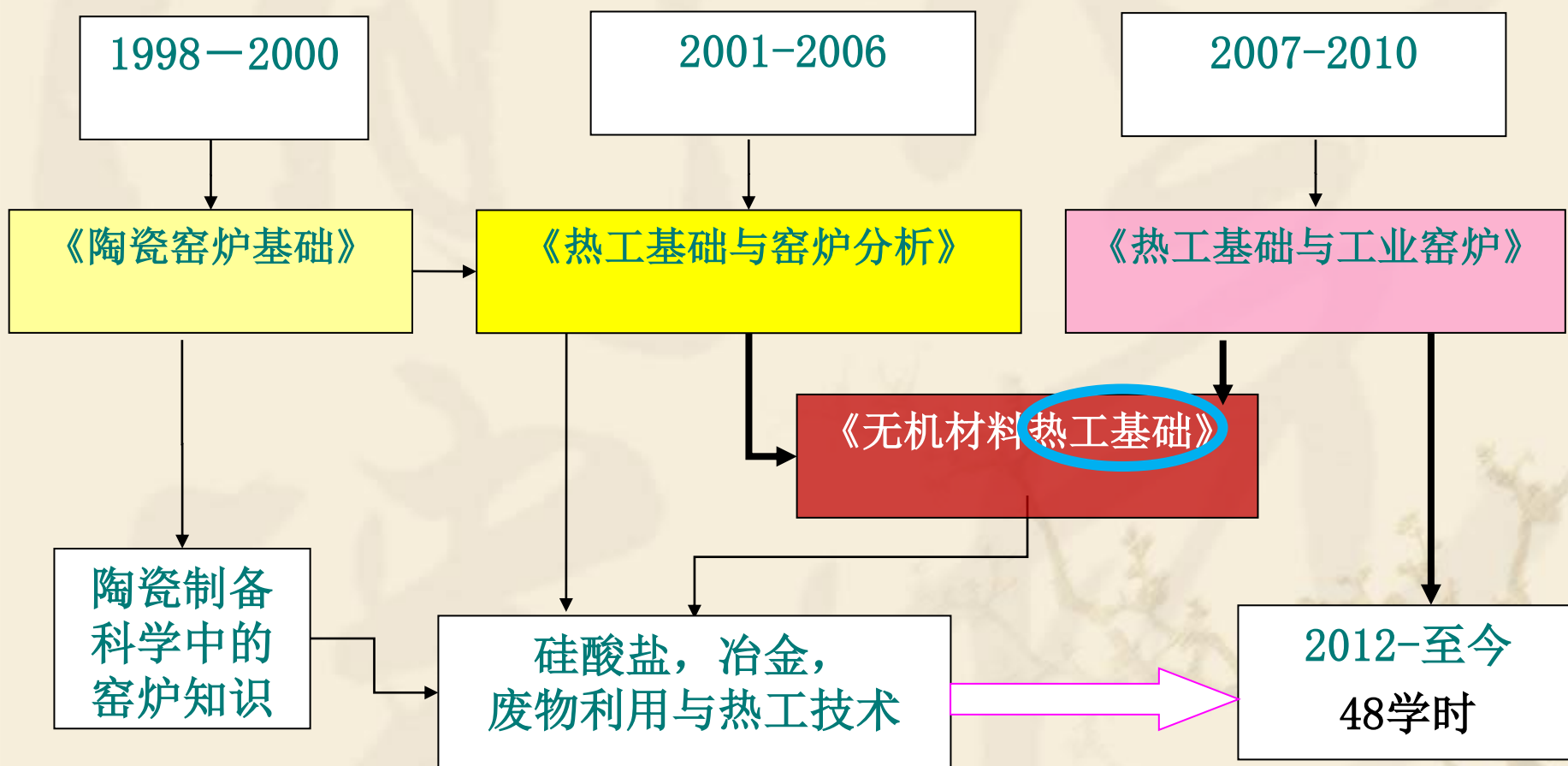
E-mail: lianfang@mater.ustb.edu.cn

办公地点：无机楼202

2020年4月

课程发展的主要历史沿革

无机非金属材料专业必修课程



传统体系按化学成分分类

材 料	无机材料	金属材料	黑色金属：钢、不锈钢、彩色涂层钢板、彩色不锈钢板等		
			有色金属：铝及铝合金、铜及铜合金等		
		非金属材料	天然石材、花岗石、大理石等		
			烧结与熔融制品：烧结砖、陶瓷、玻璃及制品、岩棉及制品		
			胶凝材料	水硬性胶凝材料： 水泥	
				气硬性胶凝材料： 石膏及其制品、水玻璃、菱苦土	
		混凝土及砂浆、及硅酸盐制品等			
	有机材料	植物材料：木材、竹材等			
		合成高分子材料；各种建筑塑料及其制品，涂料、胶粘剂、密封材料等			
	复合材料	无机材料基复合材料		玻璃纤维增强混凝土、砂浆等	
		有机材料基复合材料		树脂基人造石材、玻璃纤维增强塑料等	
				胶合板、竹胶板、纤维板、保丽板等	
		其它复合材料		涂塑钢板、钢塑复合门窗、涂塑铝合金板等	

无机非金属材料行业节能减排的作用举足轻重

- ❖ 在中国现有水泥生产技术水平条件下，每吨水泥生产的平均热耗为0.15吨标准煤，平均电耗为110kWh。每生产1吨水泥会产生0.815吨的CO₂，其中0.390吨是由于燃料燃烧产生的，而0.425吨是由于原料碳酸盐的分解产生的。2005年中国水泥工业的CO₂排放量达8.67亿吨，占当年中国CO₂总排放量的22.8%。
- ❖ 2000年中国能源消耗为11.5亿吨标准煤，CO₂排放量为30亿吨；2005年达14.0亿吨标准煤，CO₂排放量约为38亿吨。2013年能源消费总量37.5亿吨标准煤，2013年中国碳排放超过欧盟和美国的总和，达到100亿吨。2014年中国二氧化碳排放量13年来首次下降（2%）。

《**2018中国生态环境状况公报**》我国单位国内生产总值二氧化碳排放比**2005年下降45.8%**，提前达到**2020年**的目标。

课程指导思想及定位

□ 教学内容

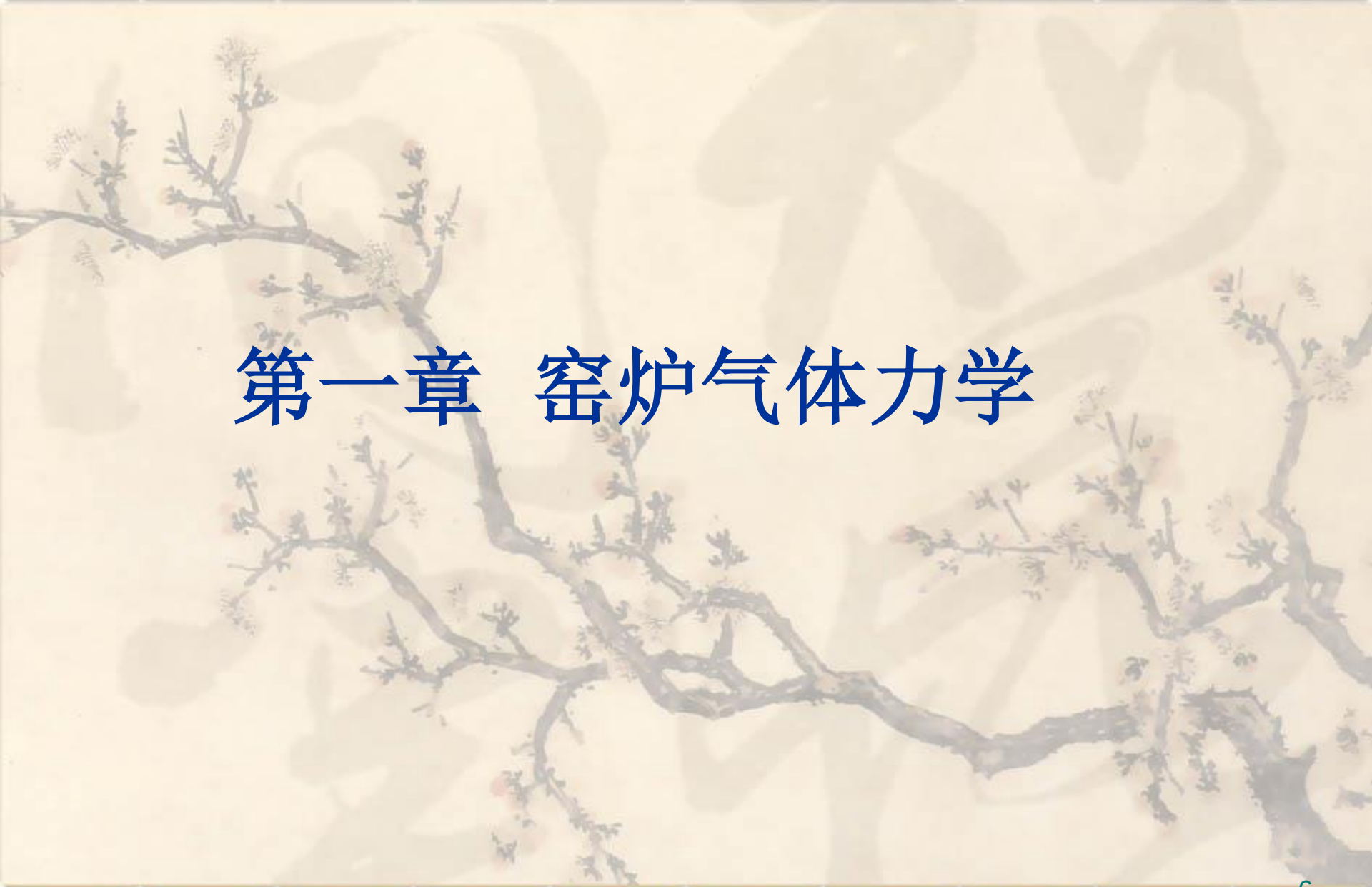
➤ 热工基础：气体力学、传热、干燥、燃料燃烧；

➤ 工业窑炉：热工基础理论应用、窑炉基本构造等。

□ 结合“节能减排”和“低碳工业”等发展趋势，增加无机材料领域热工前沿信息，理论与实践结合、拓宽视野。

使用教材

➤ 《热工基础与工业窑炉》(高等学校规划教材)，冶金工业出版社，2006年出版。



第一章 窑炉气体力学

本章要点：

气体力学是从宏观角度研究气体平衡及其流动规律的一门科学，而窑炉气体力学则研究窑炉工作过程中气体的宏观物理与化学行为（运动与静止，生成与消失）。

在硅酸盐工业以及冶金工业中所涉及的窑炉大多数以燃料燃烧产生的气体作为载热介质。窑炉气体有许多种，而主要的是烟气和空气。为此，气体的输送、气体在窑炉空间的运动、废气的排出等对窑炉操作都很重要。本章的研究中心问题是气体流动。只有了解了气体的特性，才能把流体力学的知识准确地应用于窑炉系统的气体力学研究中。

第一节 气体的主要特征

一、理想气体状态方程

对于理想气体，温度—压强—体积之间的关系可以用理想气体状态方程式表示：

$$pV=nRT$$

式中 p ：气体压强， N/m^2 ； V ：气体体积， m^3

n ：气体摩尔数， kmol ； R ：气体常数，
 $8314\text{J/kmol}\cdot\text{K}$ ；

T ：气体的热力学温度， K 。

由于 $n=m/M$ ，公式又可写成：

$$pV=(m/M)RT$$

❖ 恒温条件下，气体比容和密度随压强变化关系为：

$$T=\text{常数}, \quad pv=\text{常数}, \quad p/\rho=\text{常数},$$

$v=V/m$, 气体比体积, 气体比容 m^3/kg

$$\text{则有 } p_1/p_2 = v_2/v_1 = \rho_1/\rho_2。$$

❖ 恒压条件下，气体比容和密度随温度变化关系为：

$$p=\text{常数}, \quad v/T=\text{常数}, \quad \rho T=\text{常数},$$

$$\text{则有 } v_t/v_0 = T_t/T_0, \quad V_t/V_0 = T_t/T_0, \quad \rho_t/\rho_0 = T_0/T_t。$$

❖ 绝热条件下，气体体积随温度变化关系为：

$$T_2/T_1 = (V_1/V_2)^{\gamma-1}$$

比热容 $\gamma = C_p/C_v$,

将空气视为理想气体时 $= 1.40$

例1 将1000m³， 0℃空气送入加热器中加热， 标况下空气密度为1.293kg/m³， 求加热至250℃时气体的体积和密度。

解： $V_t = V_0 T_t / T_0 = 1000 \times 523 / 273 = 1916 \text{ m}^3$

$$\rho_t = \rho_0 T_0 / T_t = 1.293 \times 273 / 523 = 0.67 \text{ kg/m}^3$$

由此例题可以看出，空气经过加热后体积明显增加，而密度明显下降，因此在窑炉的热工计算中，不能忽略气体体积和气体密度随温度的变化，当气体压强接近于标准大气压时，必须根据气体所处温度进行换算。

二、气体粘度

凡具有流动性的物体就称为流体。

流动性——气体和液体内部的各个部分之间很容易产生相对移动的特性。

粘性流体：

自然界中的实际流体都是具有**粘性**（流体阻止其本身流动的性质），所以实际流体又称粘性流体。

可忽略粘性效应的流体称为**理想流体**。

1. 粘性力（内摩擦力）：

相邻两流层之间因流速不同而作相对运动时，在切线方向上存在着的相互作用力。

2. 牛顿粘性定律

流体任一点上的剪应力都同剪切变形速率呈线性函数关系

$$\tau = \frac{F}{S} \quad \text{—— 剪切力, 表示作用在流体层单位面积上的内摩擦力。}$$

S 垂直于流速方向的单位面积

若x方向上相距 dx 的两液层的速度差为 dv , 则 dv/dx 表示在垂直于流速方向单位距离的流层间的速度差叫做速度梯度, 或剪切变形速率。

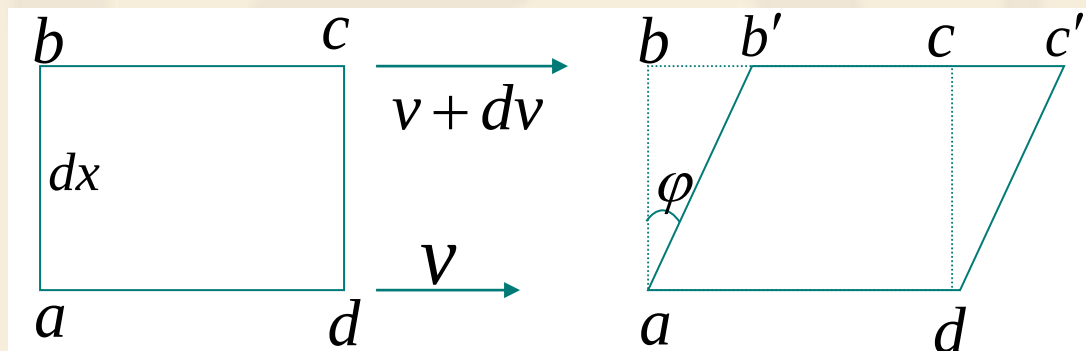
实验证明:

$$F = \eta \frac{dv}{dx} S \quad \text{—— 牛顿粘性定律}$$

遵循牛顿粘性定律的流体叫牛顿流体, 如: 水、血浆

取通过轴线的一个纵截面，如图，

abcd 表示 $t=0$ 时截面上的长方形的流体元，经时间 t ，产生切变，变为 $ab'c'd$



则 $bb' = t dv$

切应变—— $\gamma = \tan \varphi = \frac{bb'}{ab} = t \frac{dv}{dx}$

切变率—— $\frac{d\gamma}{dt} = \frac{dv}{dx}$

单位时间内角度的变化值

$\therefore F = \eta \frac{dv}{dx} S$ 对于牛顿流体， η 为一常量

粘性流体所产生的内摩擦力由牛顿粘性定律确定

$$\tau = \eta \, dv/dx \quad \text{N/m}^2$$

η ——粘度系数（粘度） $\text{Pa} \cdot \text{s}$

η 取决于流体的性质，并和温度有关。

$$\nu = \eta / \rho \quad \text{m}^2/\text{s}, \quad \nu \text{为运动粘度系数。}$$

气体粘度与温度之间的关系表示为：

$$\eta_t = \eta_0 [(273+C)/(T+C)](T/273)^{3/2} \quad \text{Pa} \cdot \text{s}$$

式中 η_t ：在 $t^\circ\text{C}$ 时气体的粘度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ；

η_0 ：在 0°C 时气体的粘度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ；

T ：气体的温度， K ；

C ：与气体性质有关的常数。几种气体的 η_0 和 C 值见表1.1（各种气体的 η_0 和 C 值）。

三、流体的可压缩性与不可压缩性

压缩性是流体的基本属性

- 任何流体都是可以压缩的，只不过可压缩的程度不同而已。
- 通常把**气体**看成是可压缩流体，即它的**密度不能作为常数**，而是随压强和温度的变化而变化的。我们把**密度随温度和压强变化**的流体称为可压缩流体。**液体**的压缩性都很小，随着压强和温度的变化，液体的密度仅有微小的变化，在大多数情况下，可以忽略压缩性的影响，认为液体的密度是一个常数。
- 把液体看作是**不可压缩流体**，气体看作是**可压缩流体**，都不是绝对的。在实际工程中，要不要考虑流体的压缩性，要视具体情况而定。

四、流体的连续性

流管——在稳定流动的流体中划出一个小截面 S_1 ，并且通过它的周边各点作出许多**流线**，由这些流线所组成的管状体就称为流管。

流量——单位时间内通过某一流管内任意横截面的**流体的体积**。

定常流动——流体（气体、液体）流动时，若流体中任何一点的**压力、速度和密度**等物理量都不**随时间**变化，则这种流动就称为定常流动，也可称之为“稳态流动”或者“恒定流动”

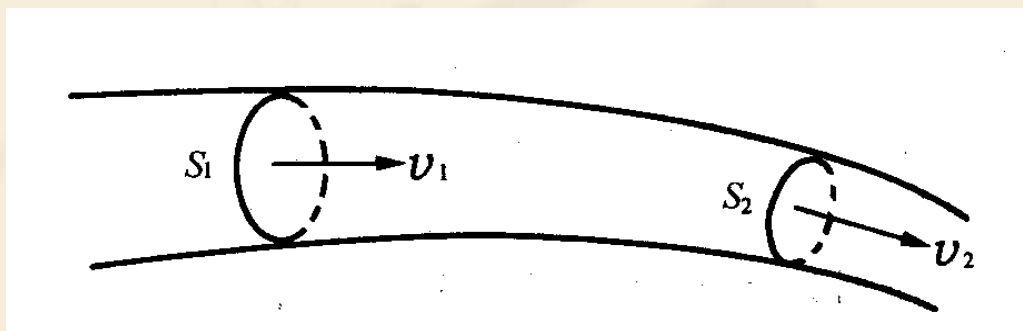
非定常流动——只要**压力、速度和密度**中任意一个物理量随时间而变化，液体就是作非定常流动或者说液体作时变流动。

流量用 Q 来表示,其单位为 $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ 。

若横截面面积为 s ，定义 $v = \frac{Q}{s}$ 为截面面积处的平均流速。

如图所示，对于不可压缩且作定常流动的流体，流过 S_1 和 S_2 的流量必然相等，即

$$S_1 v_1 = S_2 v_2$$



流体的连续性方程 —— 不可压缩流体做定常流动时，
流管的横截面积与该处平均流速的乘积成为一 常量。

Sv 是单位时间内通过任一截面 S 的流体体积，常称为体积流量。

所以 $S_1v_1=S_2v_2$ 又称体积流量守恒定律。

对于不可压缩的流体，各处的密度 ρ 相同，因此：

$$\rho Sv = \text{常量}$$

ρSv 是单位时间内通过任一截面 S 的流体质量，常称为质量流量。

连续性方程又称为质量流量守恒定律。

输送近似理想流体的刚性管道可视为流管，如管道有分支，不可压缩流体在各分支管的流量之和等于总流量。设总管道的横截面为 S_0 ，其中流速为 v_0 ，各分支管的截面积分别为 S_1 、 S_2 、…… S_n ，流速分别为 v_1 、 v_2 、… v_n ，

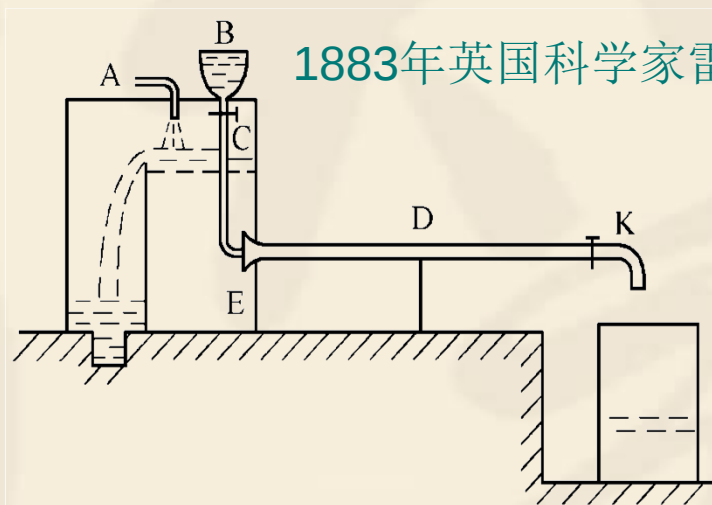
则连续性方程为：

$$S_0 v_0 = S_1 v_1 + S_2 v_2 + \dots S_n v_n$$

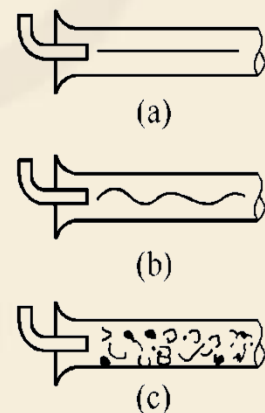
五、流体的流动状态

1. 两种流动状态

层流：所有流体质点只作沿同一方向的直线运动，各层之间互不干扰、互不掺混，流线互不相混。无横向运动。



1883年英国科学家雷诺 (Reynolds)



紊流：流速逐渐增大层流流动状态被破坏流体质点除了沿管道轴线方向的纵向流动外，还有流体质点的无规则横向运动。结果把各层流体搅混而形成了一系列小旋涡，流体处于毫无规则的混乱运动状态。

过渡状态：层流和湍流之间存在着一个过渡的流动状态。

很慢 ——— 层流
较大 ——— 过渡态
大 ——— 紊流 (湍流)

雷诺数（Reynolds number）用来表征流体流动情况的无量纲数，以Re表示判别流体流动状态的标准：

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta} = \frac{v d}{\nu} = \frac{\text{惯性力}}{\text{粘性力}}$$

其中 v 、 ρ 、 η 分别为流体的流速、密度与粘性系数， d 为一特征长度。例如流体流过圆形管道，则 d 为管道直径。

利用雷诺数可区分流体的流动是层流或湍流，也可用来确定物体在流体中流动所受到的阻力。

当 $Re < Re_c$ （下临界雷诺数）为层流， $Re_c = 2000 \sim 2320$ ；
当 $Re > Re'_c$ （上临界雷诺数）为紊流， $Re'_c = 4000 \sim 12000$ 之间

雷诺数是流体力学中表征粘性影响的相似准数。雷诺数表示作用于流体微团的惯性力与粘性力之比。两个几何相似流场的雷诺数相等，则对应微团的惯性力与粘性力之比相等。雷诺数越小意味着粘性力影响越显著，越大则惯性力影响越显著。

对外流问题， v 、 L 一般取远前方来流速度和物体主要尺寸；
对内流问题， v 、 L 则取通道内平均流速和通道直径。

雷诺通过实验发现液体在流动中存在两种内部结构完全不同的流态：层流和紊流。同时也发现，层流的沿程水头损失 h_f 与流速一次方成正比，紊流的 h_f 与流速的1.75~2.0次方成正比。

六、气体所受的浮力

对于 1m^3 的水，其质量为 1000kg ，在重力场作用下，其重力约 9810N ，在 20°C 大气中所受浮力约为 11.76N ，只占重力的 0.12% 。

对于 1m^3 密度为 $0.5\text{kg}/\text{m}^3$ 的热气体自重仅为 4.9N ，浮力则为 11.76N 。

因此，在液体计算中忽略浮力的影响在工程上是允许的。而计算在窑炉中所存在的热气体时，要考虑大气的浮力，不能忽略。