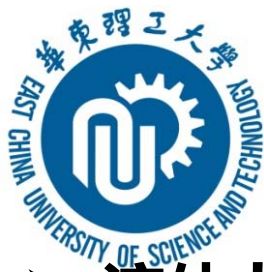


Fluid Mechanics

流体力学

华东理工大学资环学院





关于本课程

- 流体力学是**能源、航空航天、化工、环境、生工**等流程工业的基础
- 湍流是世界七大千禧难题之一(美国Clay Mathematics Institute, 2000)



能源



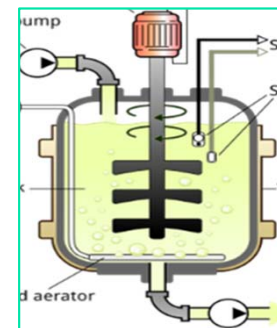
航空航天



化工



环境



生物发酵

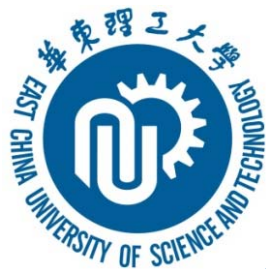
- 流体力学课程是**能源与动力工程**专业重要的基础课
- 是由基础课过渡到专业课重要的桥梁和纽带

高等数学，大学物理
物理化学，理论力学

流体力学



燃烧学，传热学，锅炉原理
燃气输配，空调与通风

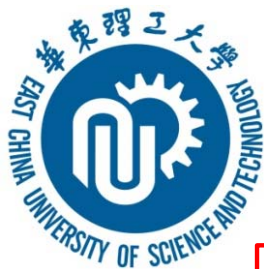


关于本课程

课程名称	流体力学
依托专业	资环学院能源与动力工程
课程性质	学科基础课，必修，40学时/2.5学分
开课历程	2005年至今，18届

课程建设历程





关于本课程

流体力学-必修

流体力学 (全英文)

多相流-选修

流体力学工程应用-选修

- 课程责任教授： 刘海峰 教授
- 主讲教师： 李伟锋 教授
- 联系方式： 13764556752, liweif@ecust.edu.cn



李伟锋 教授
课程负责人
课程主讲



刘海峰 教授
万人计划领军人才
责任教授



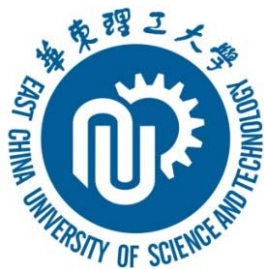
许建良 副教授
肯塔基大学访问学者
课程B角



赵辉 副教授
莫纳什大学访问学者
全英文授课



陆海峰 副教授
萨勒诺大学访问学者
助教



关于本课程

学习方式：线下教学

➤ 课时：40学时

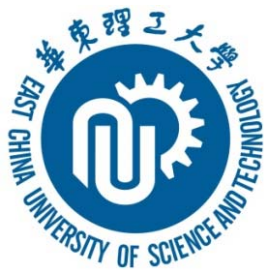
周二3-4节	1-18周全
周五3-4节	1-9双周

➤ 考核方式：考试

成绩评定：考试（60%）+ 平时（40%）

➤ 平时成绩：

作业（30%）+ 互动（30%）+ 课堂演讲和小论文（40%）



关于本课程

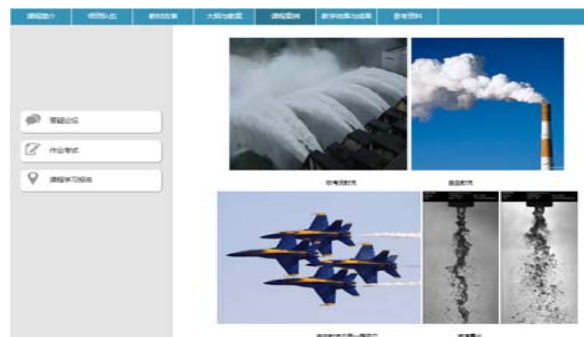
- 课程资源：
- 1、学习通课程平台
 - 2、流体力学课程网站
 - 3、课程学习通知群

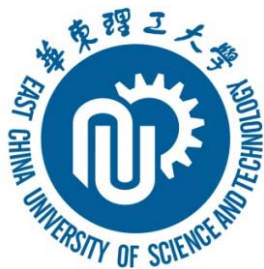


工程流体力学

“十三五”高校规划教材

华东理工大学出版社

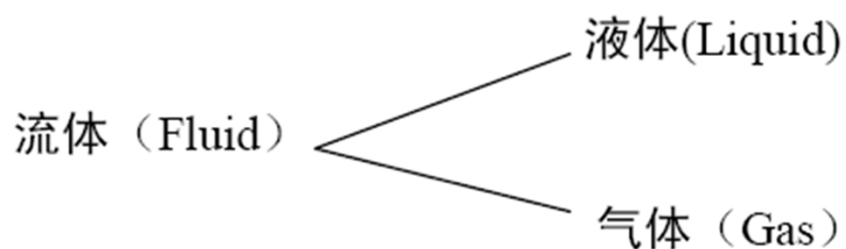




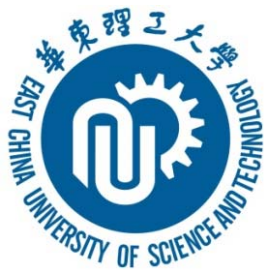
第一章 绪论

- **定义：**流体力学是研究**流体平衡和运动规律**及其在工程技术中应用的一门学科。
- **李家春院士：**流体力学是研究流体介质的对流、扩散，以及相伴的物理、化学、生物过程，导致质量、动量、能量输送的现象。
- **流体：**能够流动的物质。

流体与固体的对比



		体积	形状	抗压	抗拉	抗剪切
固体		√	√	√	√	√
流 体	液体	√	×	√	×	×
	气体	×	×	×	×	×

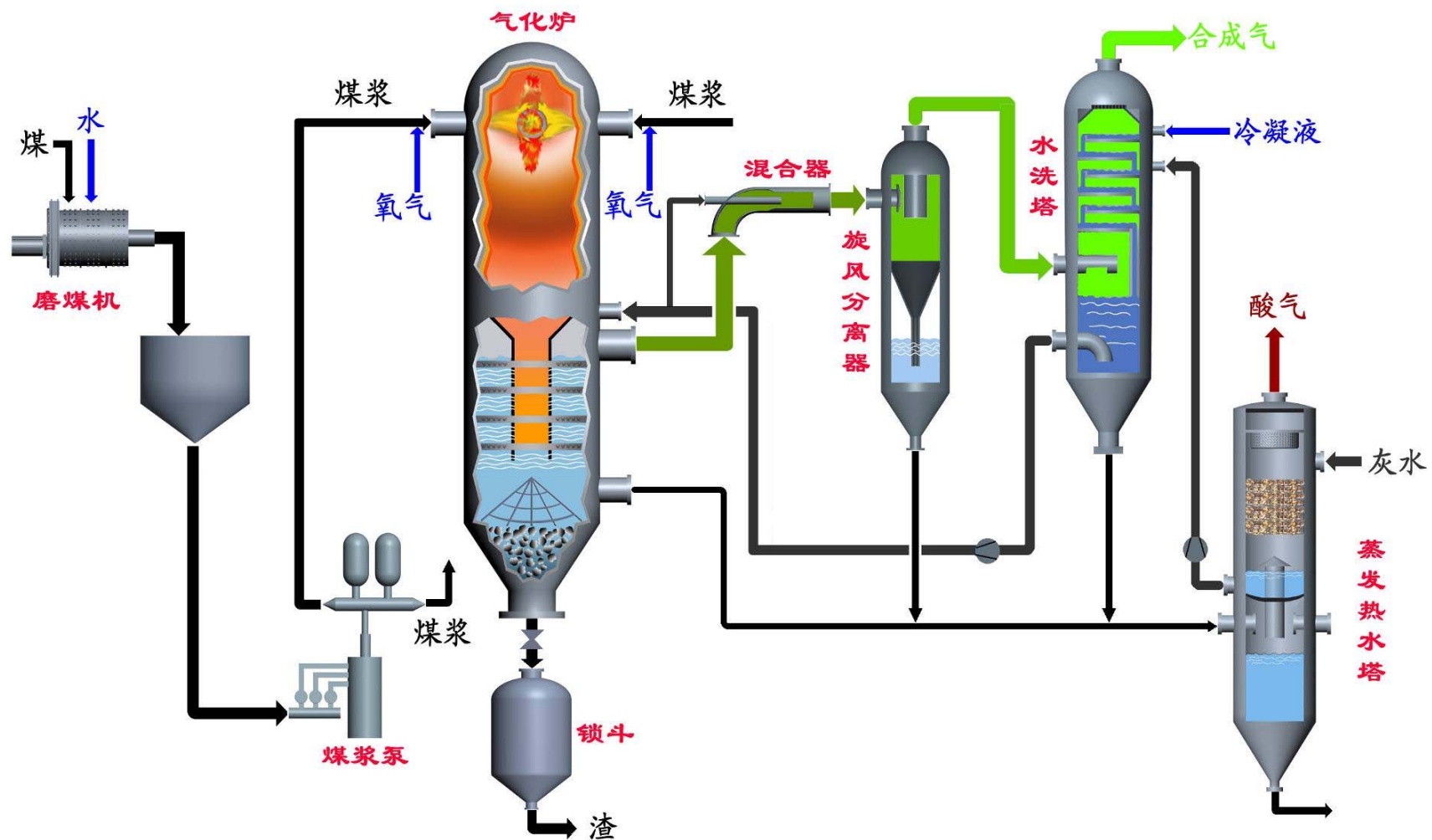


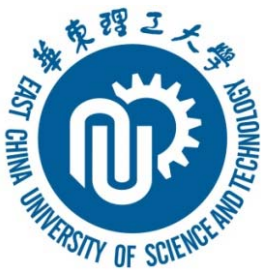
1.1 流体力学的范畴和发展简史

1.1.1 流体力学的范畴

- ✓空气动力学和气体动力学
 - ✓渗流力学
 - ✓物理化学流体动力学（爆炸力学）
 - ✓多相流体力学
 - ✓离子体动力学和电磁流体力学
 - ✓环境流体力学
 - ✓生物流变学，仿生流体力学。。。。
 - ✓工程流体力学
-
- ✓流体静力学、流体运动学和流体动力学；
 - ✓理想流体动力学、粘性流体动力学；
 - ✓不可压缩流体动力学、可压缩流体动力学；
 - ✓牛顿流体，非牛顿流体力学

流体力学在热能工程中的应用举例





流体力学发展简史

- **第一阶段（16世纪以前）：流体力学形成的萌芽阶段**
- **第二阶段（16世纪文艺复兴以后-18世纪中叶）流体力学成为一门独立学科的基础阶段**
- **第三阶段（18世纪中叶-19世纪末）流体力学沿着两个方向发展——欧拉、伯努利**
- **第四阶段（19世纪末以来）流体力学飞跃发展**



第一阶段（16世纪以前）：流体力学形成的萌芽阶段

■公元前2286年 - 公元前2278年

大禹治水——疏壅导滞（洪水归于河）

■公元前300多年

李冰 都江堰——深淘滩，低作堰

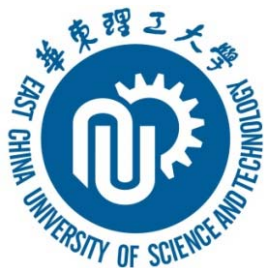
■公元584年 - 公元610年

隋朝 南北大运河、船闸应用

埃及、巴比伦、罗马、希腊、印度等地水利、造船、航海产业发展

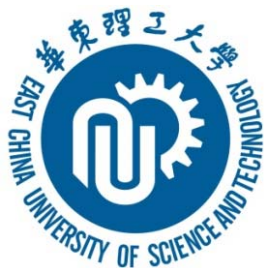
■系统研究

古希腊哲学家阿基米德《论浮体》(公元前250年)奠定了流体静力学的基础



第二阶段（16世纪文艺复兴以后-18世纪中叶）流体力学 成为一门独立学科的基础阶段

- 1586年 斯蒂芬——水静力学原理
- 1650年 帕斯卡——“帕斯卡原理”
- 1612年 伽利略——物体沉浮的基本原理
- 1686年 牛顿——牛顿内摩擦定律
- 1738年 伯努利——理想流体的运动方程即伯努利方程
- 1775年 欧拉——理想流体的运动方程即欧拉运动微分方程



第三阶段（18世纪中叶-19世纪末）流体力学沿着两个方向发展——欧拉（理论）、伯努利（实验）

■ 工程技术快速发展，提出很多经验公式

1769年 谢才——谢才公式（计算流速、流量）

1895年 曼宁——曼宁公式（计算谢才系数）

1732年 比托——比托管（测流速）

1797年 文丘里——文丘里管（测流量）

■ 理论

1823年纳维，1845年斯托克斯分别提出粘性流体运动方程组(N-S方程)



第四阶段（19世纪末以来）流体力学飞跃发展

- 理论分析与试验研究相结合
- 量纲分析和相似性原理起重要作用

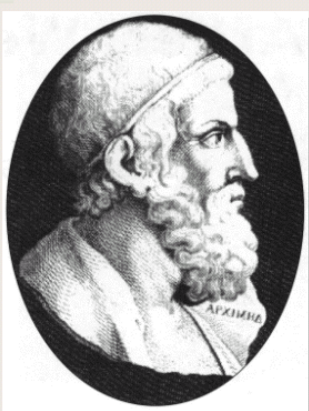
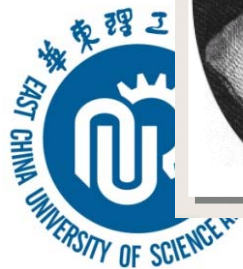
1883年 雷诺——雷诺实验(判断流态)

1903年 普朗特——边界层概念(绕流运动)

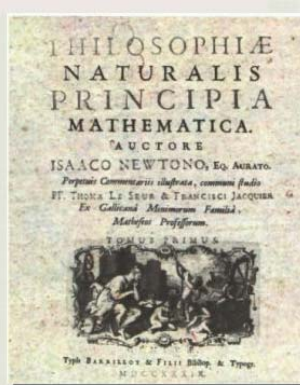
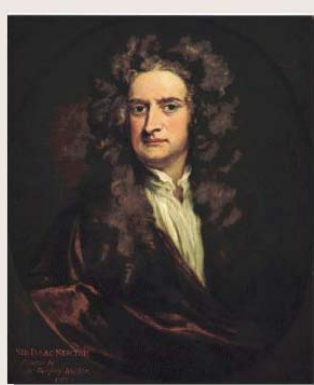
1933-1934年 尼古拉兹——尼古拉兹实验(确定阻力系数)

.....

流体力学与相关的邻近学科相互渗透，形成很多新分支和交叉学科！



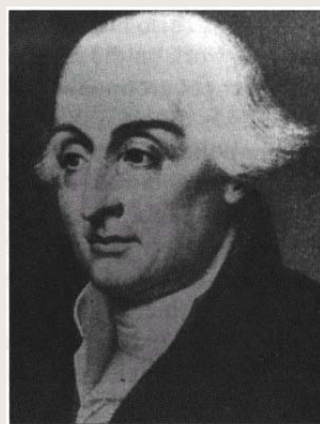
阿基米德 (Archimedes,
287-212 B.C.希腊)



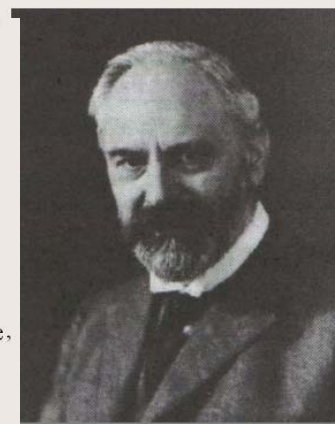
伯努利 (D.Bernoulli
1700 - 1782, 瑞士)



欧拉 (L.Euler,
1707-1783,瑞士)

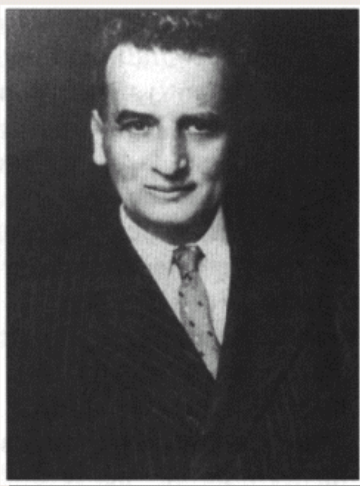


拉格朗日 (J-L.Lagrange,
1736 - 1813, 意大利)



以普朗特 (L.Prandtl,
1875 - 1953, 德国)

边界层理论为标志。

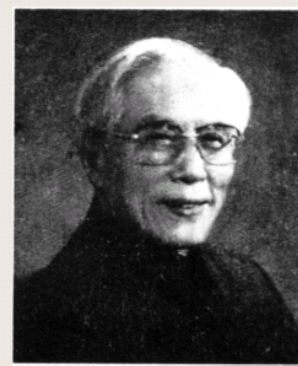


卡门 (V.Karman,
1881 - 1963, 美国)



泰勒 (G.Taylor,
1886 - 1975, 英国)

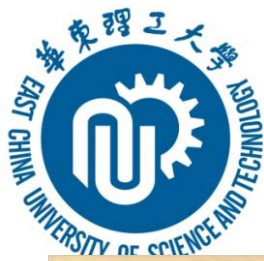
以周培源、钱学森为代表的中国科学家在湍流理论、空气动力学等许多领域中作出了基础性、开创性的贡献。



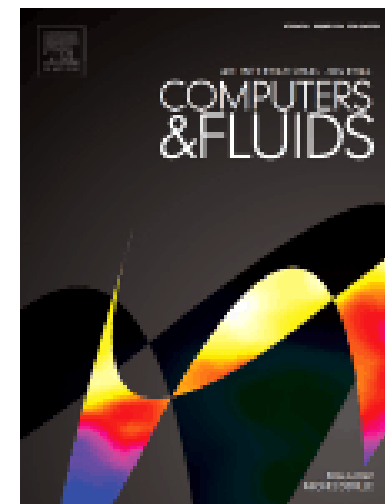
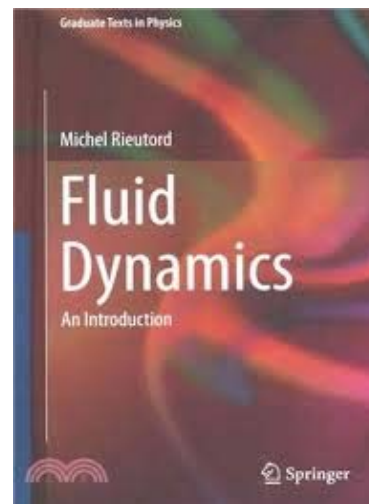
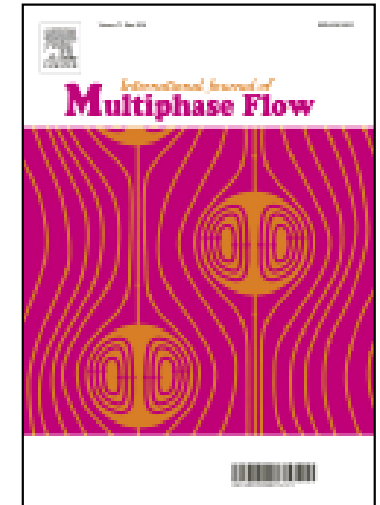
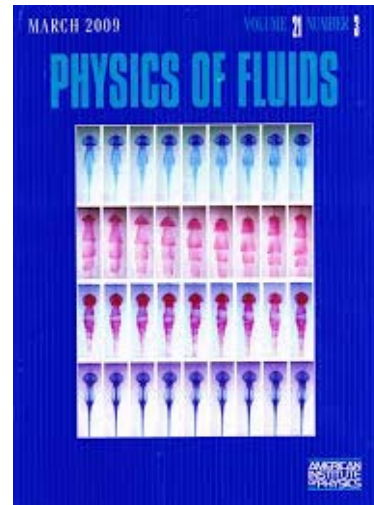
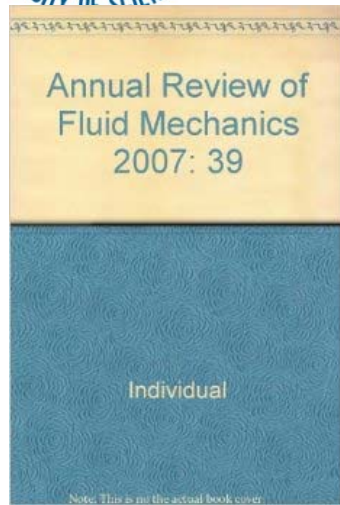
周培源 (1902 - 1993)

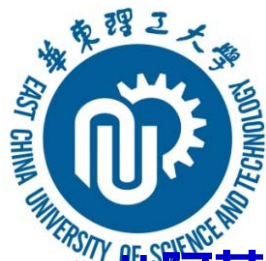


钱学森 (1911 - 2009)



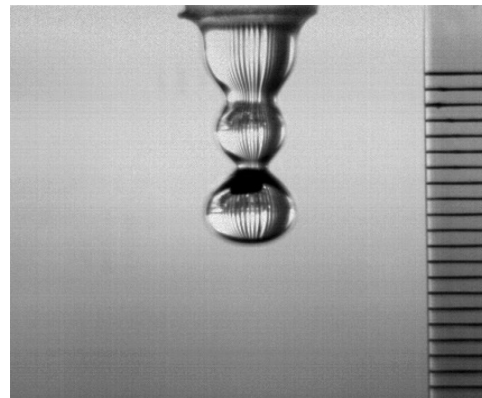
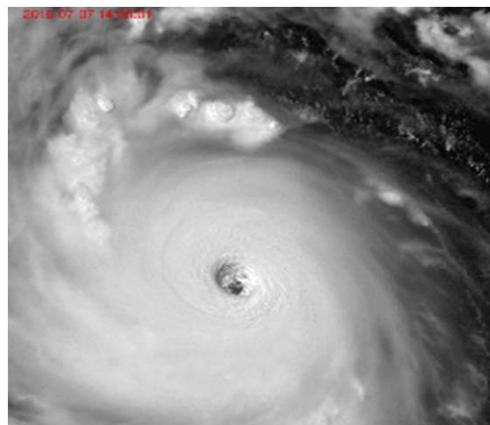
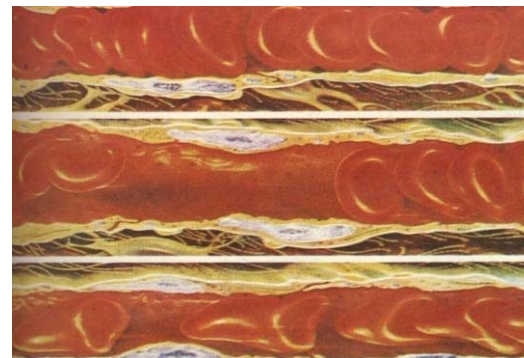
流体力学刊物





1.1.2 流体力学的发展简史

- 从阿基米德到现在的二千多年，特别是从20世纪以来，流体力学已发展成为**基础科学**体系的一部分，同时又在**工业、农业、交通运输、天文学、地学、生物学、医学**等方面得到广泛应用。
- 今后，人们一方面将根据工程技术方面的需要进行流体力学**应用性的研究**；另一方面将更深入地开展**基础研究**以探求流体的复杂流动规律和机理，以及各种更先进的流体力学实验设备和仪器的设计和开发等。





1.2 作用在流体上的力

1.2.1 质量力

作用在每个流体质点上的力，大小与流体质量成正比，又称体积力，常见的质量力如重力。

$$\lim_{dV \rightarrow M} \frac{dF}{dm} = f \quad \left. \begin{aligned} X &= \lim_{dV \rightarrow M} \frac{dF_x}{dm} \\ Y &= \lim_{dV \rightarrow M} \frac{dF_y}{dm} \\ Z &= \lim_{dV \rightarrow M} \frac{dF_z}{dm} \end{aligned} \right\} (X, Y, Z) = (0, 0, -g)$$

1.2.2 表面力

作用在流体表面上，大小与被作用的面积成正比，如法向压力和切应力

$$\left. \begin{aligned} \overline{p} &= \frac{\Delta P}{\Delta A} \\ \overline{\tau} &= \frac{\Delta T}{\Delta A} \end{aligned} \right\} \quad \left. \begin{aligned} p &= \lim_{\Delta A \rightarrow A} \frac{\Delta P}{\Delta A} \\ \tau &= \lim_{\Delta A \rightarrow A} \frac{\Delta T}{\Delta A} \end{aligned} \right\}$$

P 称为 A 点的**压强**(pressure)或**法向应力**或**正应力**， τ 称为 A 点的**切应力**(shear stress)。

正应力和切应力的因次均为 $\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$ ，在国际单位制中单位是帕斯卡，以Pa表示，

$1\text{Pa}=1\text{N/m}^2$ 。



1.3 流体的物理属性和力学特性

1.3.1 易变形性

流体没有固定的形状，其形状取决于限制它的固体边界；流体在受到很小的切应力时，就要发生连续不断的变形，直到切应力消失为止，这就是流体的易变形性或者流动性。简言之，流动性即流体受到切应力作用发生连续变形的行为。

1.3.2 密度和可压缩性

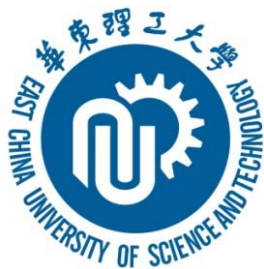
在工程计算中常常碰到容重的概念，其定义为密度与重力加速度的乘积，用 γ 表示：

$$\gamma = \rho g$$

式中： γ —流体的容重， N/m^3 ； ρ —流体的密度， kg/m^3 ；

g —重力加速度， m/s^2 ，其数值通常取9.807。

流体体积或密度随压力变化的性能称为可压缩性
(compressibility)。



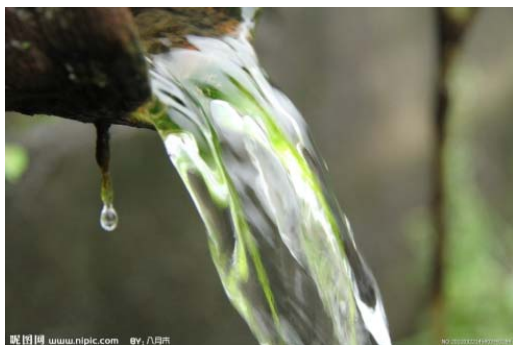
1.3.3 粘性

主要内容

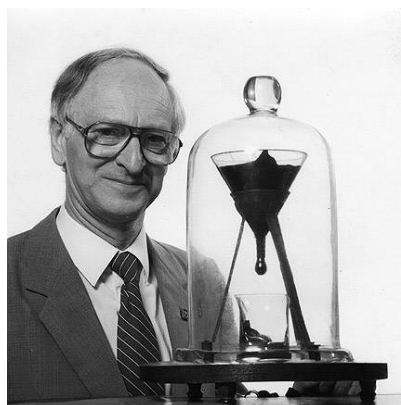
1. 粘性的定义及表现形式
2. 牛顿内摩擦定律
3. 粘性的产生原因及变化规律
4. 粘性测量及应用案例

1. 粘性的定义及表现形式

➤ 粘性是什么？ 水、蜂蜜、熔岩。。。



➤ 澳大利亚昆士兰大学沥青滴落实验已持续95年！

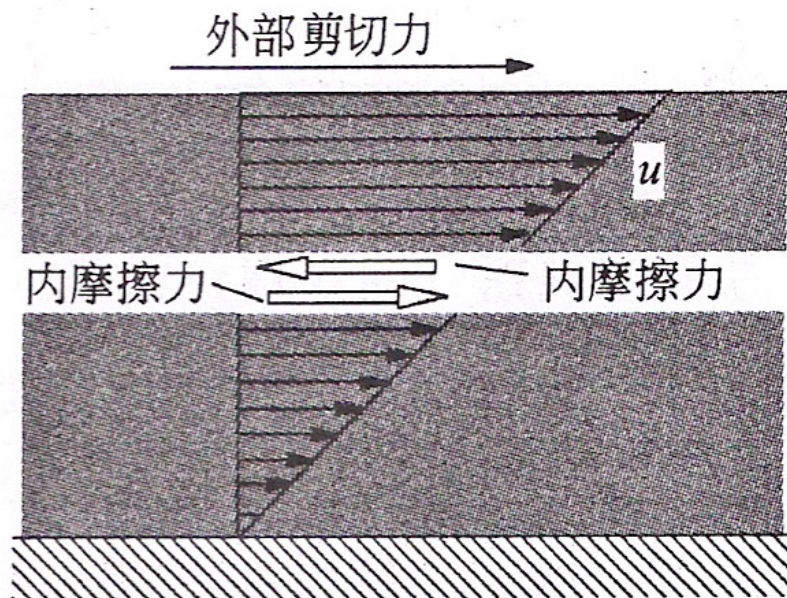


沥青是液体，而不是固体（粘性大约是水的2300亿倍）！

1. 粘性的定义及表现形式

➤ **粘性(viscous)**是流体所具有的重要属性，是指流体内部质点间或流层间因**相对运动**而产生**内摩擦力**以反抗相对运动的性质，此内摩擦力称为**粘性力(viscous force)**。

➤ 粘性作用表现为**阻碍流体内部的相对滑动**，作用在两个相邻流层之间的切应力是成对出现，而且**数值相等，方向相反**。



思考：流体中为何出现相对运动和速度梯度？

2. 牛顿内摩擦定律

➤ 1686年，牛顿通过大量的实验，总结出“**牛顿粘性定律**”。

在二维平行直线运动中流层间的粘性力大小与**流体粘性**有关，
并与**速度梯度**和**接触面积**成正比，与接触面上压力无关，即：

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \longrightarrow \tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy}$$

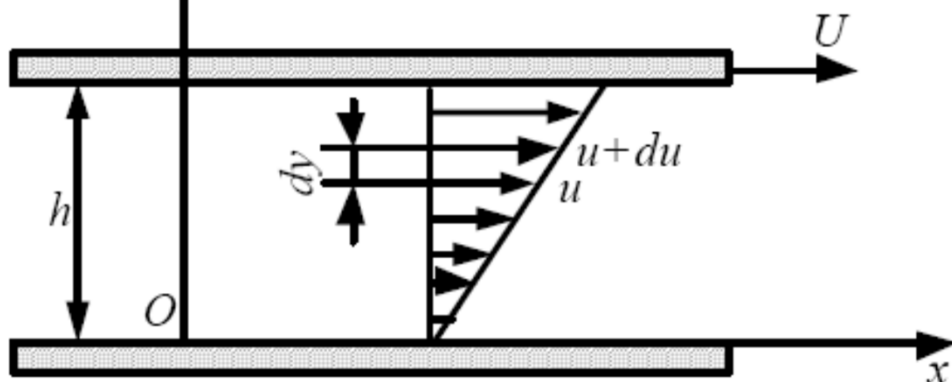


图1-1

式中： F 为粘性力，N；

A 为接触面积， m^2 ；

$\frac{du}{dy}$ 为速度梯度；

μ 粘度系数，单位 $Pa \cdot s$ 。

思考：流体和固体摩擦力差别？



2. 牛顿内摩擦定律

➤ 动力粘度(dynamic viscosity coefficient)

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}}$$

SI单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}$

工程单位: 泊 $1\text{cP}=10^{-2}\text{P}=10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}=1\text{mPa} \cdot \text{s}$

常温下水的粘度是1厘泊!

➤ 运动粘度(kinematical viscosity)

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

SI单位: m^2/s

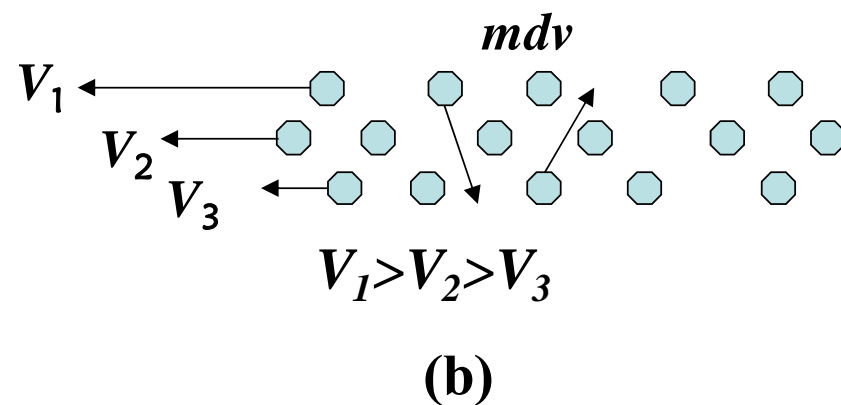
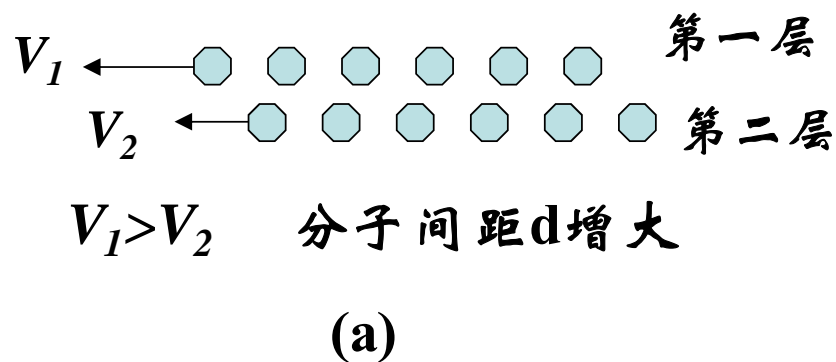
工程单位: 斯 $1\text{cSt}=1\text{mm}^2/\text{s}$

20号机油表示该种油在 50°C 时其运动粘度大致为 20cSt ,
或者运动粘度约为水运动粘度的20倍!

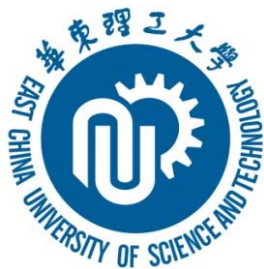
3. 流体粘性的产生原因及变化规律

流体粘性内摩擦力产生的原因：

- 分子间的吸引力，如图(a)所示。
- 分子不规则运动的动量交换，如图(b)所示。



- 对于液体，由于分子间距小，不规则运动弱，粘性力主要取决于分子间的吸引力。
- 而对于气体，由于分子间距大，吸引力很小，不规则运动强烈，粘性力主要取决于分子不规则运动的动量交换。



3. 流体粘性的产生原因及变化规律

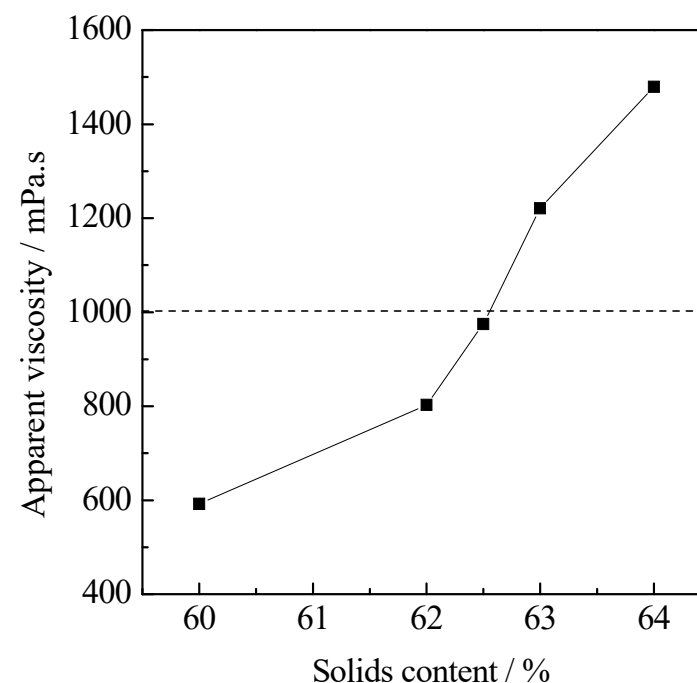
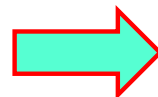
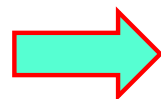
- 当温度升高时，液体的分子间距增大，液体的粘度将显著减小。
- 对气体而言，当温度升高时，分子的不规则运动加剧，使动量交换更加频繁，因此，气体的粘度将随之增大。

温度 /°C	水 $\mu / \text{mPa} \cdot \text{s}$	空气 $\mu / \text{mPa} \cdot \text{s}$	温度 /°C	水 $\mu / \text{mPa} \cdot \text{s}$	空气 $\mu / \text{mPa} \cdot \text{s}$
0	1.7921	0.01716	60	0.4688	0.01999
20	1.0050	0.01813	80	0.3565	0.02087
40	0.6560	0.01908	100	0.2838	0.02173

辩证法思想：具体问题具体分析，抓主要矛盾！

4. 粘度测量及在煤气化中应用

案例1 水煤浆粘度测量及调控



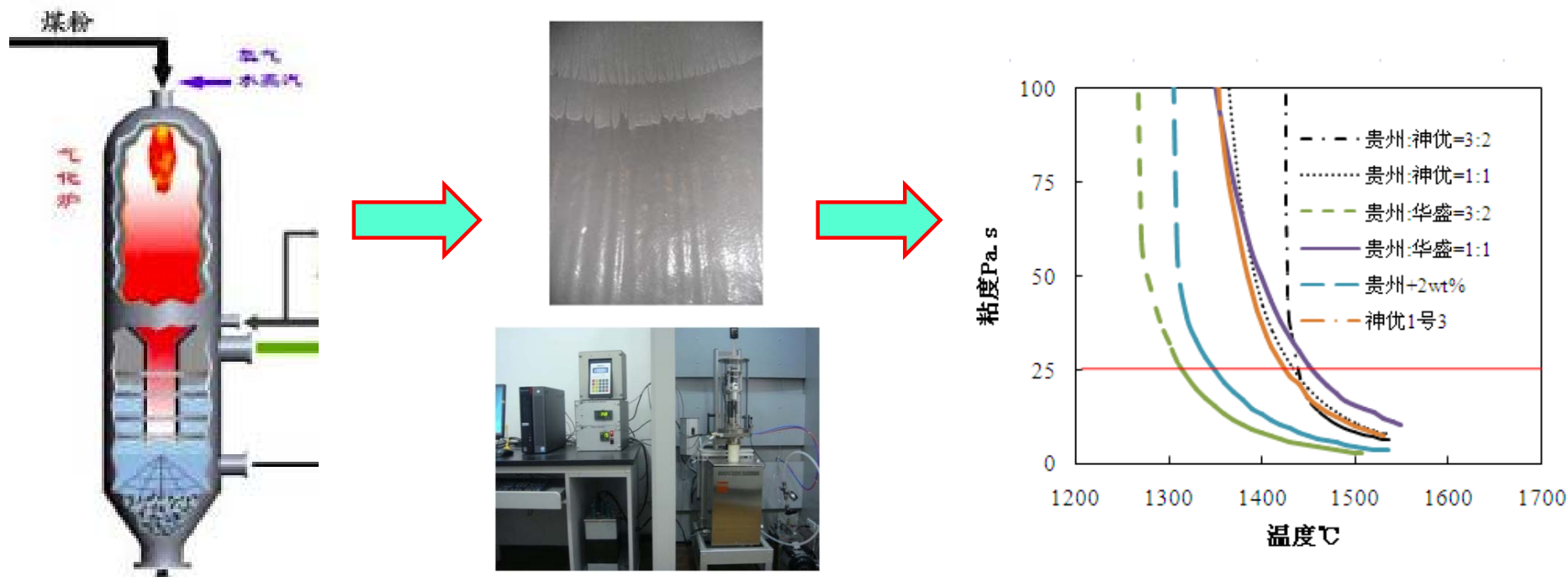
矛盾： 浓度升高，能耗下降、工艺指标上升；

但粘度增加，输送困难，雾化困难

策略： 加入高效添加剂、超细磨、粒度级配、表面修饰等

4. 粘度测量及在煤气化中应用

案例2 水冷壁气化炉壁面熔渣流动粘度调控



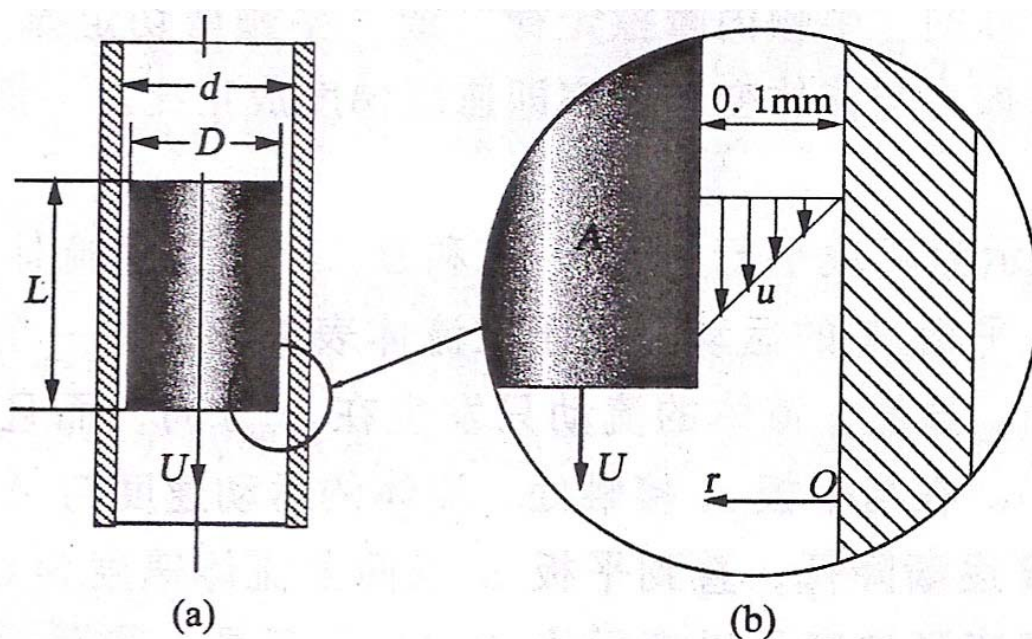
矛盾：“以渣抗渣”思想，熔渣粘度大，容易堵渣；

粘度小，水冷壁容易损坏

策略：配煤调控灰熔点，温度调控等

思考题一

例1-1 如下图所示油缸尺寸为 $d=12\text{cm}$, $l=14\text{cm}$, 间隙 $\delta=0.02\text{cm}$, 所充油的粘度 $\mu=0.65\times 10^{-1}\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。试求当活塞以速度 $u=0.5\text{m/s}$ 运动时所需拉力 F 为多少？



$$F = \mu A \frac{du}{dy} = \mu A u / \delta$$

$$A = \pi d l$$

$$F = \pi \mu d l u / \delta \approx 8.57\text{N}$$

图 1-3 例 1-1 附图

思考题二

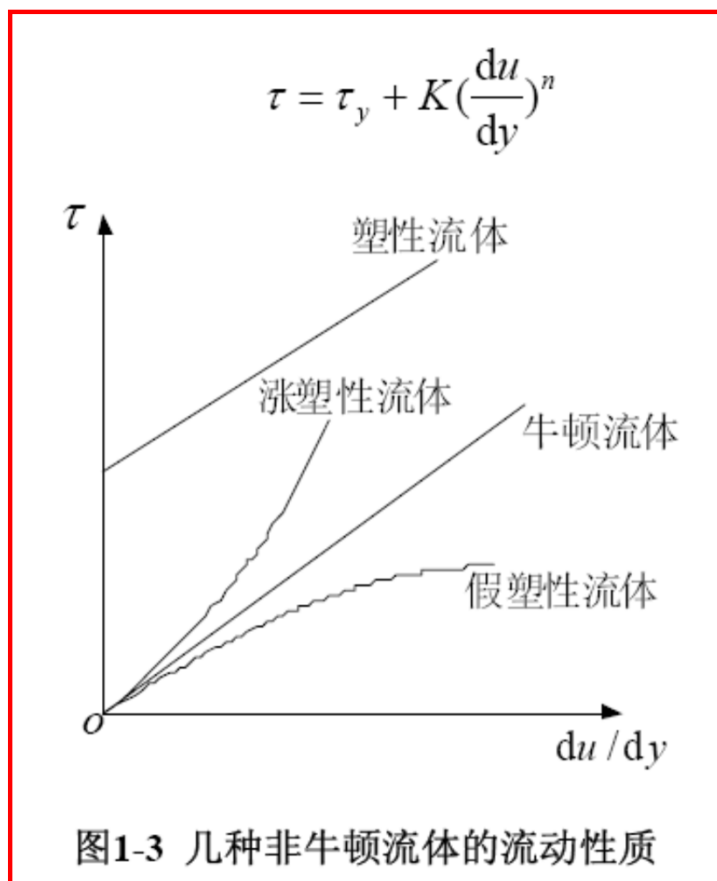


柔软的口香糖搓成圆锥体状真的能开坚硬的椰子？！

<http://tv.cctv.com/2016/07/17/VIDEkWMMmQZcJ6DenjKXPnIA160717.shtml>

1.3.4 非牛顿流体

水煤浆、高分子熔体和溶液等在层流流动时并不服从牛顿粘性定律，这些流体统称非牛顿流体。



- ① 当 $\tau_y = 0$, $n = 1$ 时为牛顿流体;
- ② 当 $\tau_y = 0$, $n > 1$ 时为涨塑性流体;
- ③ 当 $\tau_y = 0$, $n < 1$ 时为假塑性流体;
- ④ 当 $\tau_y > 0$, $n = 1$ 时为塑性流体。

1.3.4 非牛顿流体

- 随剪切率增高，粘度下降，此称为**剪切稀化现象**。
- 多数非牛顿流体表现为剪切稀化的假塑性行为，但少数浓悬浮体(如淀粉水浆)在某一剪切率范围内表现出**剪切增稠的胀塑性**，即粘度随剪切率增大而升高。
- 含固体量较多的悬浮体常表现出塑性的力学特征，即只有当施加的切应力大于某一临界值之后才开始流动，此临界值称为**屈服应力**。

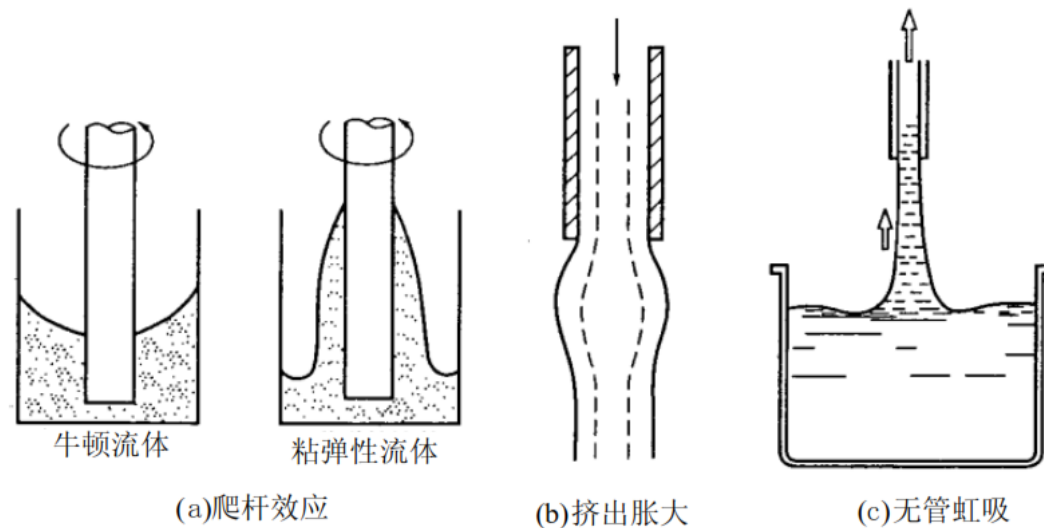
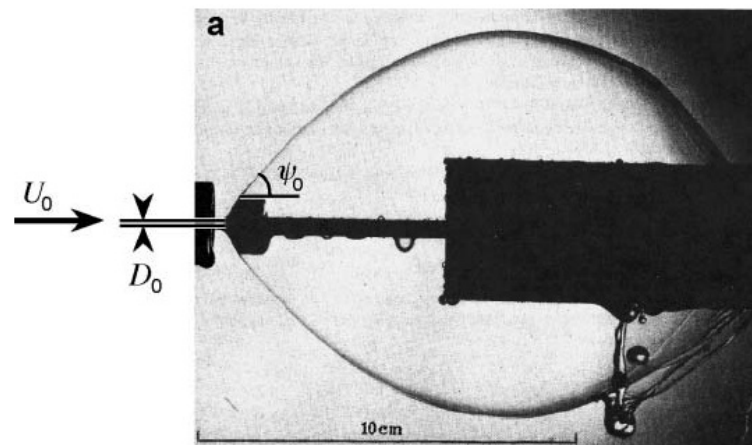


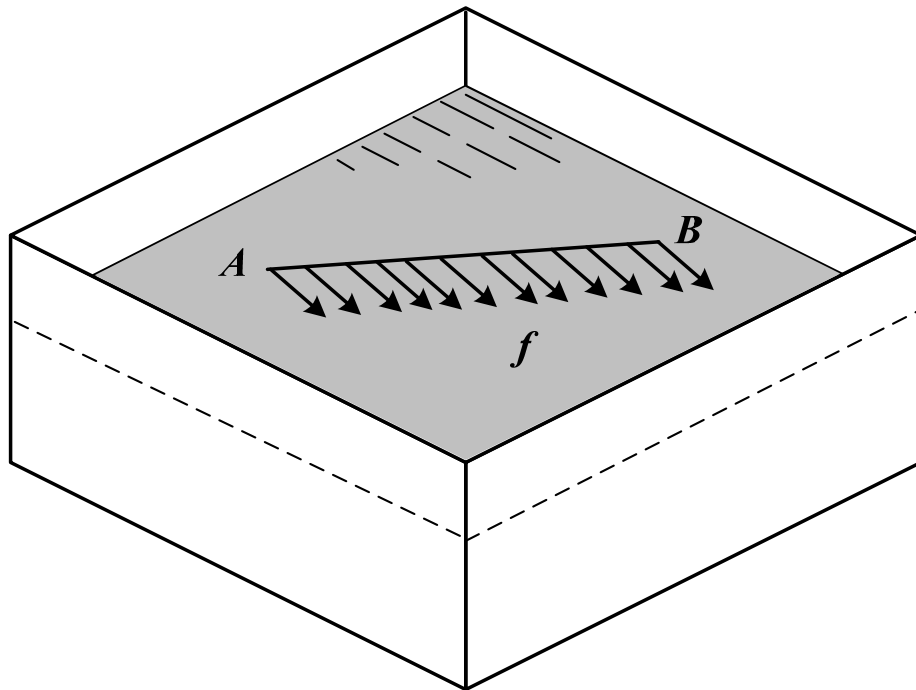
图1-4 流体弹性的表现

1.3.5 表面张力



1.3.5 表面张力

- 对于与气体接触的液体表面，由于表面两侧分子引力作用的不平衡，会使液体表面处于张紧状态，即液体表面承受有拉伸力，液体表面承受的这种拉伸力称为表面张力。
- **表面张力系数** 液体表面单位长度流体线上的拉伸力称为表面张力系数，通常用希腊字母 σ 表示，其单位是N/m。



$$f = \sigma l$$

1.3.5 表面张力

表面张力系数 σ 属于液体的物性参数，但同一液体其表面接触的物质不同，有不同的表面张力系数。表面张力系数随温度升高而降低，但不显著。液体中溶有其它物质时，表面张力也将随物质及其浓度的不同而发生变化。

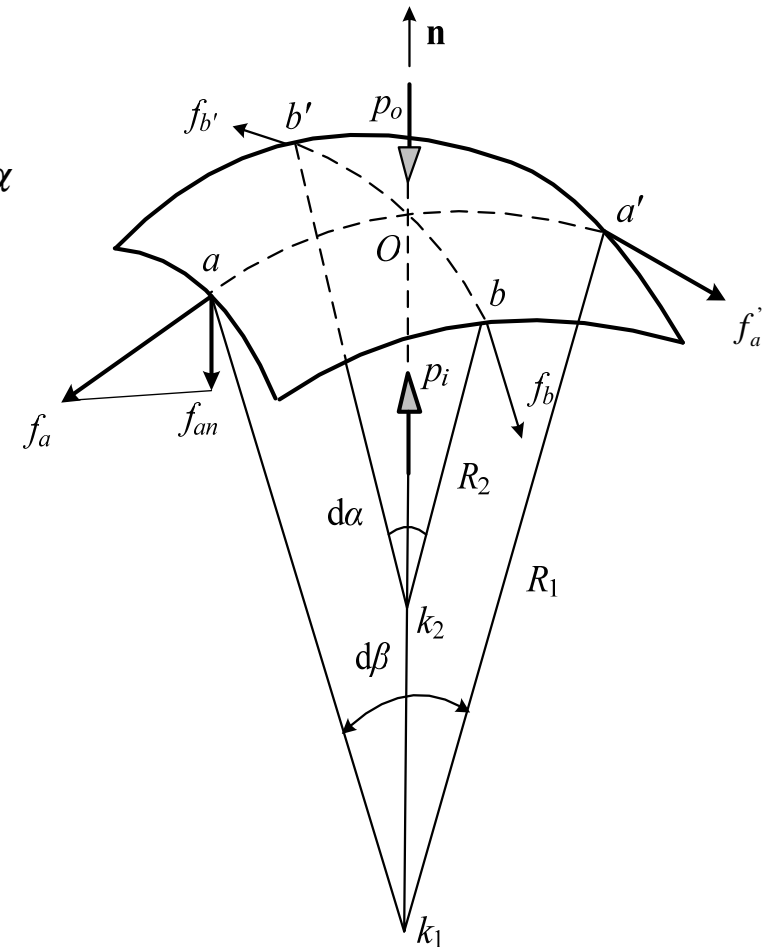
$$dl_a = dl_{a'} = R_2 d\alpha \quad dl_b = dl_{b'} = R_1 d\beta \quad dA = R_2 R_1 d\beta d\alpha$$

$$f_{an} = -f_a \sin \frac{d\beta}{2} = -\sigma dl_a \sin \frac{d\beta}{2} \approx -\frac{1}{2} \sigma R_2 d\alpha d\beta = -\frac{1}{2} \frac{\sigma}{R_1} dA$$

$$f_{a'n} = -\frac{1}{2} \frac{\sigma}{R_1} dA \quad f_{bn} = f_{b'n} = -\frac{1}{2} \frac{\sigma}{R_2} dA$$

$$f_{an} + f_{a'n} + f_{bn} + f_{b'n} = -\sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) dA$$

$$p_i dA - p_o dA - \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) dA = 0$$

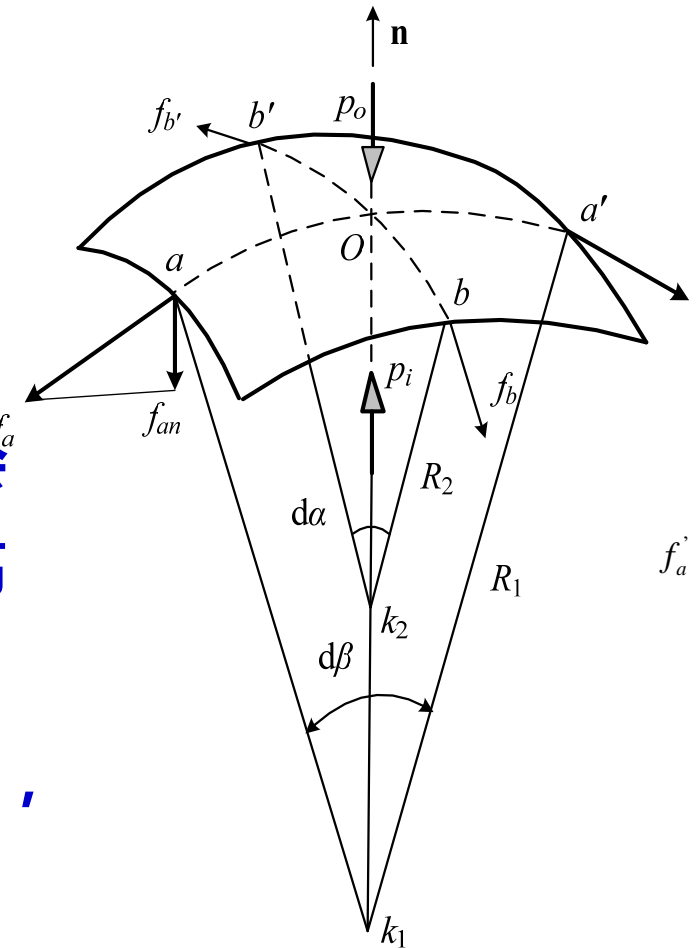


1.3.5 表面张力

弯曲液面的附加压差——拉普拉斯公式

$$p_i - p_o = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

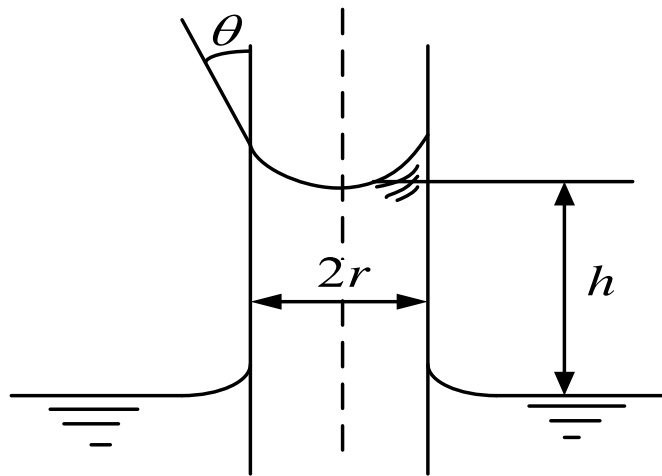
该式表明：由于表面张力的存在，弯曲液面两侧会产生附加压力差，而且凹陷一侧的压力（ p_i ）总高于凸出一侧的压力（ p_o ），对于凹形液面，同样如此。在平直液面， $R_1 = R_2 = \infty$ ，即 $p_i - p_o = 0$ ，没有附加压差；球形液面， $R_1 = R_2 = R$ ，即 $p_i - p_o = \frac{2\sigma}{R}$ 。



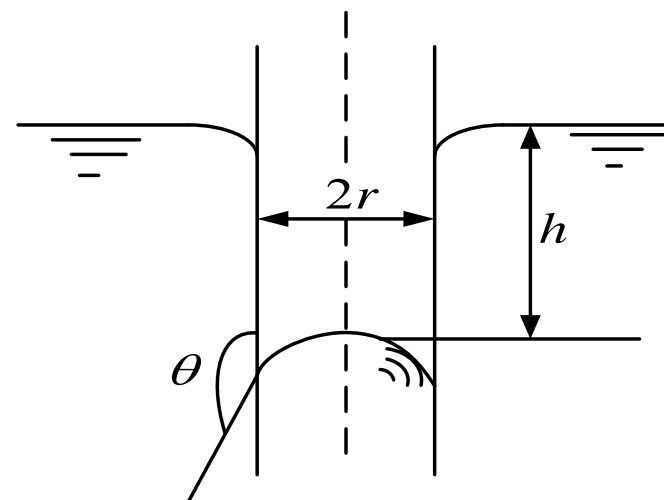
1.3.5 表面张力

毛细现象

观察发现，如果将直径很小的两支玻璃管分别插在水和水银两种液体中，管内外的液位将有明显的高度差，如图所示，这种现象称为毛细现象。



玻璃管插入水中



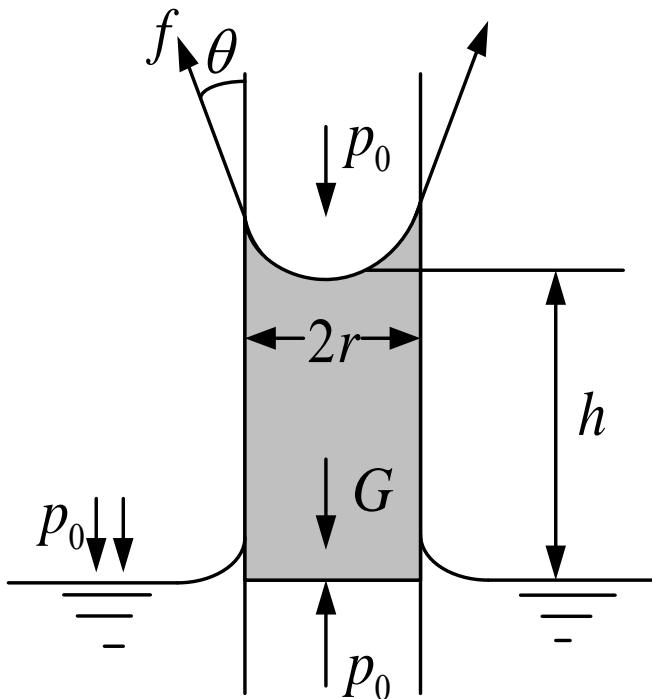
玻璃管插入水银中



1.3.5 表面张力

毛细管内外的液面高差

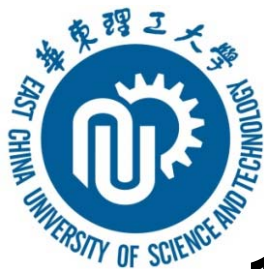
如图所示，取上升高度 h 段内的液体。分析其竖直方向的受力。液柱底部与管外液面在同一水平面，所受压力与液柱上表面压力相同，均为大气压力但方向相反，是一对平衡力。此外，液柱竖直方向受力还有液柱重力 G 和弯月面与管壁接触周边表面张力 f 的竖直分量。



$$G = \pi r^2 h \rho g \quad f_z = 2\pi r \sigma \cos \theta$$

$$G = f_z$$

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r}$$



1.4 流体力学模型

1.4.1 连续介质模型

流体微团具有“**宏观无限小，微观无限大**”的性质。这种“**连续介质**”模型，是对流体物质结构的简化，使分析问题时两大方便：第一，它使我们不考虑复杂的微观分子运动，只考虑在外力作用下的宏观机械运动；第二，能运用数学分析的连续函数工具。

流体微团（质点）：指流体中宏观尺寸非常小（远小于设备），而微观尺寸又足够大（远大于分子自由程）的任意一个物理实体：

- 所占据的宏观体积的极限为零；
- 个别分子的行为不会影响总体的统计平均特性；
- 彼此无间隙，完全充满所占空间，满足连续介质假定；
- 形状可以任意划定等。



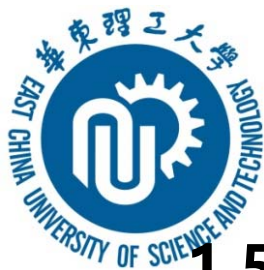
1.4 流体力学模型

1.4.2 理想流体模型

- 不考虑粘性作用的流体，称为**无粘性流体(或理想流体)**。
- 考虑粘性影响的流体，称为**粘性流体(或实际流体)**。

1.4.3 不可压缩流体模型

- 不可压缩流体模型是**不计压缩性和热胀性**而对流体物理性质的简化。
- 对于气体速度较低(小于声速—常温、常压下空气中声速为340m/s)的情况，在流动过程中压强和温度的变化较小，**密度仍然可以看作常数**，这种气体称为不可压缩气体。
- 反之，对于气体速度较高(接近或超过音速)的情况，在流动过程中其密度的变化很大，密度已经不能视为常数的气体，称为可压缩气体。



1.5 流体力学研究方法

1.5.1 理论分析法

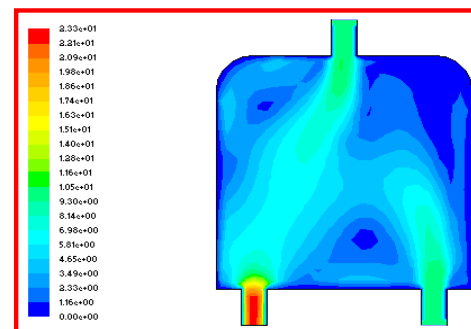
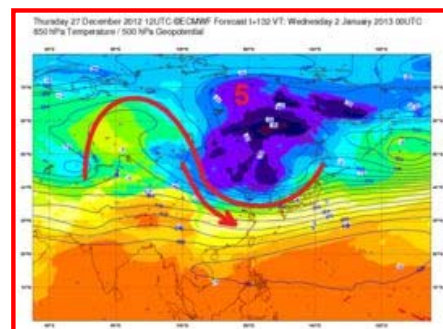
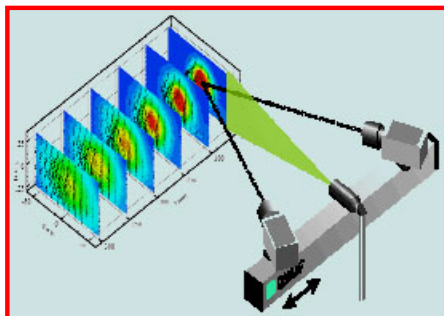
理论分析是根据流体运动的普遍规律如质量守恒、动量守恒、能量守恒等，**利用数学分析的手段**，研究流体的运动，解释已知的现象，预测可能发生的结果。

1.5.2 实验研究法

- 实验是研究流体流动问题**最基本的方法**。通过实验可以验证理论计算的结果，也可以探索新的流动现象。
- 实验能显示运动特点及其主要趋势，有助于形成概念，检验理论的正确性。
- 二百年来流体力学发展史中每一项重大进展都离不开实验。

1.5.3 数值计算法

数学的发展、计算机的不断进步以及流体力学各种计算方法(如有限差分法、有限元法和有限体积法等)的发明，使许多原来**无法用理论分析求解**的复杂流体力学问题有了求得数值解的可能性，这又促进了流体力学计算方法的发展，并形成了“计算流体力学”。





1.6 流体力学新兴领域

1.6.1 超临界流体

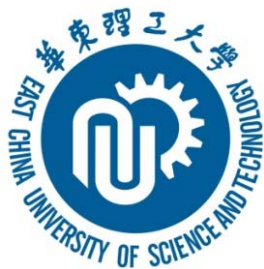
- 当物质所处的**温度高于临界温度**，**压力大于临界压力**时，该物质处于超临界状态温度及压力均处于临界点以上的液体叫**超临界流体**(supercritical fluid, 简称SCF)。
- 超临界流体的物性兼具液体性质与气体性质。

1.6.2 超流体

超流体是超低温下具有奇特性质的理想流体，即**流体内部完全没有粘滞**。

1.6.3 磁流体

- 又称磁性液体、铁磁流体或磁液，是一种新型的功能材料，它既具有液体的流动性又具有固体磁性材料的磁性。
- 磁流体力学是结合**经典流体力学**和**电动力学**的方法，研究导电流体和磁场相互作用的学科，它包括**磁流体静力学**和**磁流体动力学**两个分支。



思考题和作业

一、阅读思考补充材料
已上传至学习平台

二、概念理解辨析
理想流体，不可压缩流体，粘性和粘性力

三、课后作业
1-1~1-9