

化工原理

Chemical Engineering Principles

第一章 液体流动

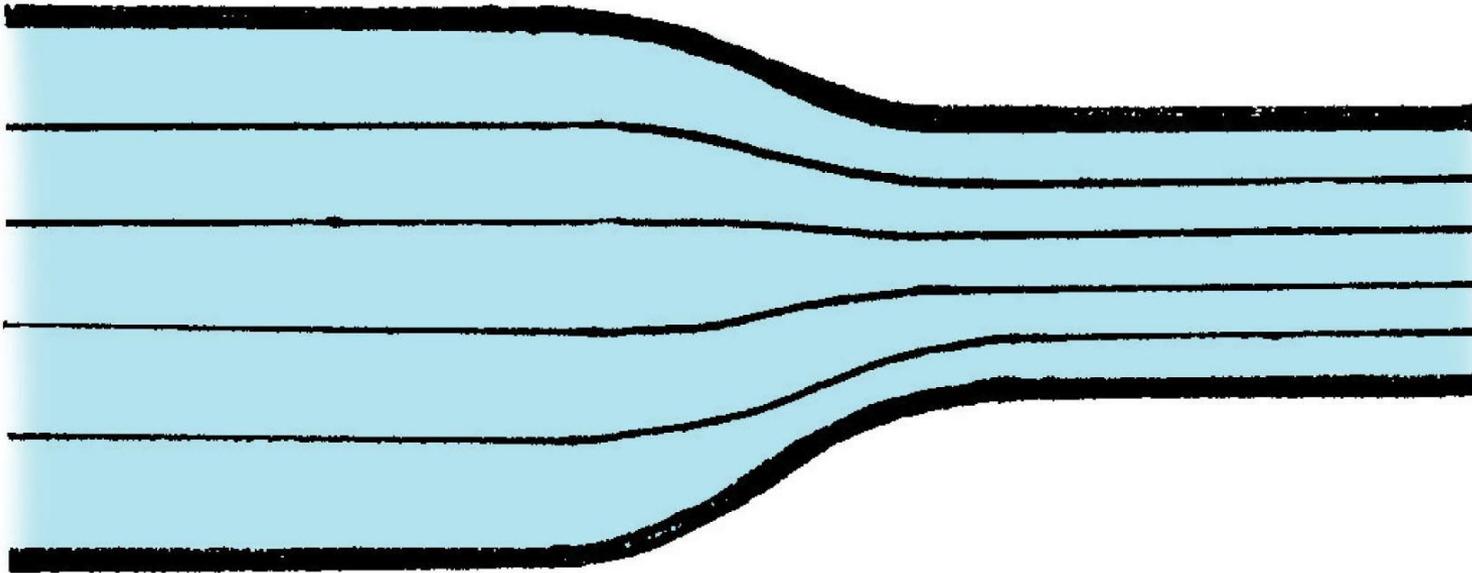
Basic Mechanics of Fluids



浙江工商大学
Zhejiang Gongshang University

Bernoulli's Principle

- *When the speed of a fluid increases, internal pressure in the fluid decreases.*



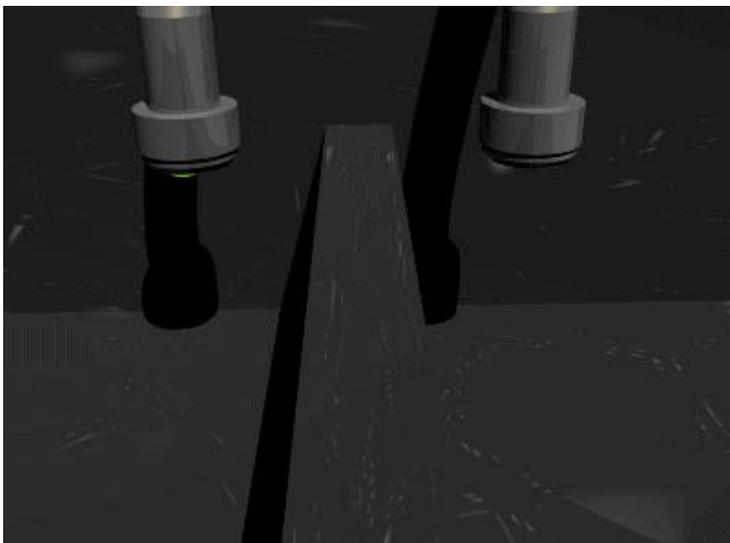
§1.4 流体流动现象

1-9 流体的粘度

一、 牛顿粘性定律

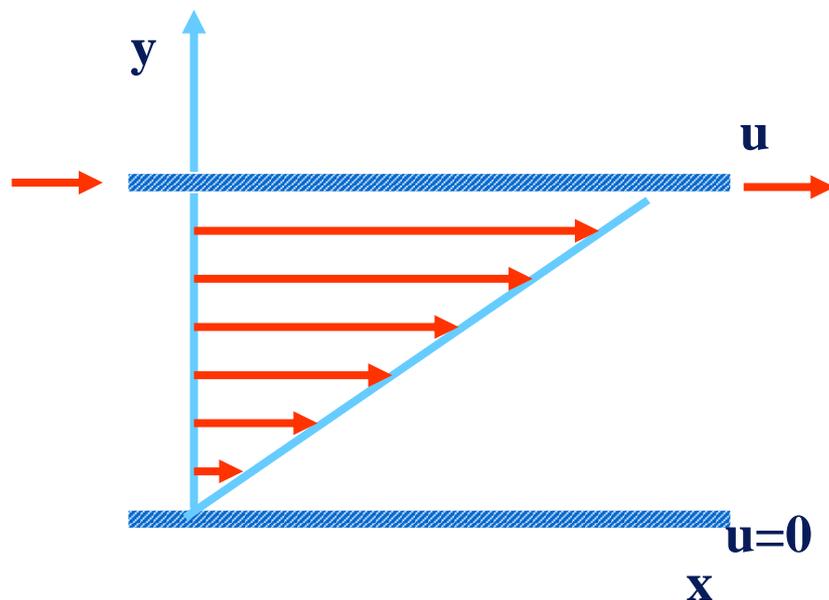
流体的典型特征是具有流动性，但不同流体的流动性能不同，这主要是因为流体内部质点间作相对运动时存在不同的内摩擦力。

这种表明流体流动时产生内摩擦力的特性称为粘性。粘性是流动性的反面，流体的粘性越大，其流动性越小。**流体的粘性是流体产生流动阻力的根源。**



§1.4 流体流动现象

下板固定，上板以恒定速度 u 沿 x 方向运动



对任意相邻两层流体，上层速度较大，下层速度较小，前者对后者起带动作用，而后者对前者起拖曳作用。

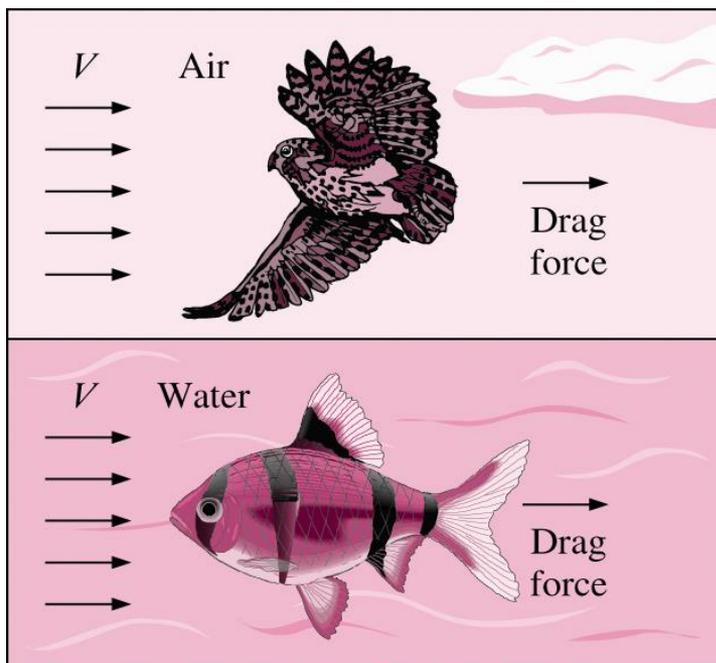
内摩擦

流体的粘性



§1.4 流体流动现象

考虑一下，这个摩擦力的大小与什么因素有关呢？



接触面积：虾/鲨鱼？

相对速度：静止的流体？或
相同速度和方向运动。

流体种类：空气/水？



§1.4 流体流动现象

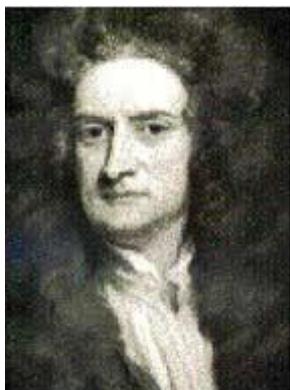
对于一定的流体，内摩擦力 F 与两流体层的速度差 du 成正比，与两层之间的垂直距离 dy 成反比，与两层间的接触面积 A 成正比。

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

法向速度梯度，即在与流体流动方向相垂直的 y 方向流体速度的变化率， $1/s$

比例系数，称为流体的**粘度或动力粘度**， $\text{Pa}\cdot\text{s}$

接触面积

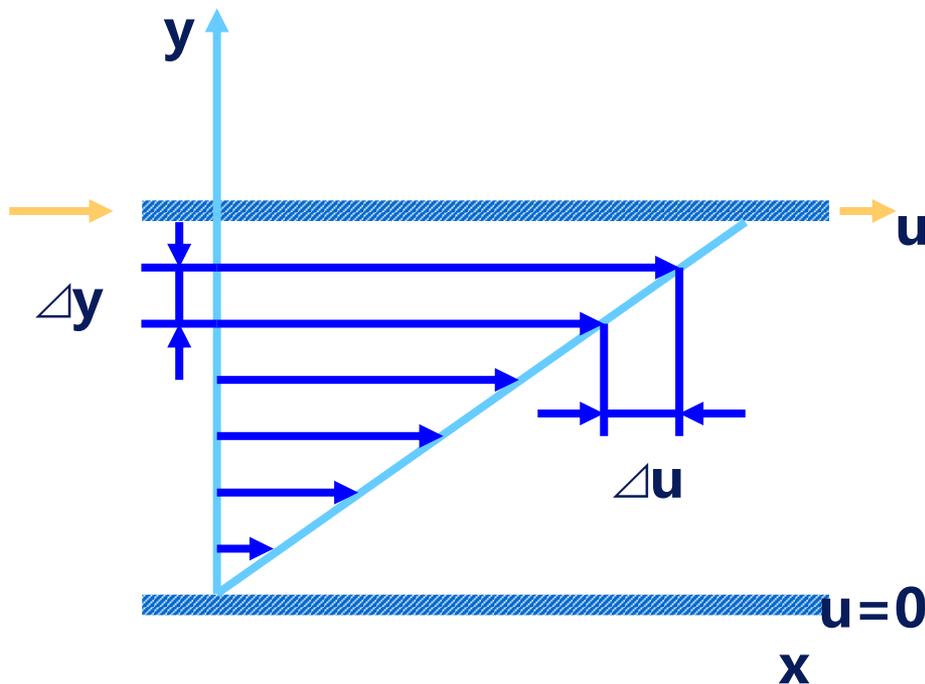


Isaac Newton (1642 - 1727)

牛顿粘性定律 Newton's Viscous Law



§1.4 流体流动现象



$\Delta u/\Delta y$ 表示速度沿法线方向上的变化率或速度梯度。

$$\tau = \mu \frac{\Delta u}{\Delta y}$$

实验证明，两流体层之间**单位面积**上的内摩擦力（或称为剪应力） τ 与垂直于流动方向的速度梯度成正比。



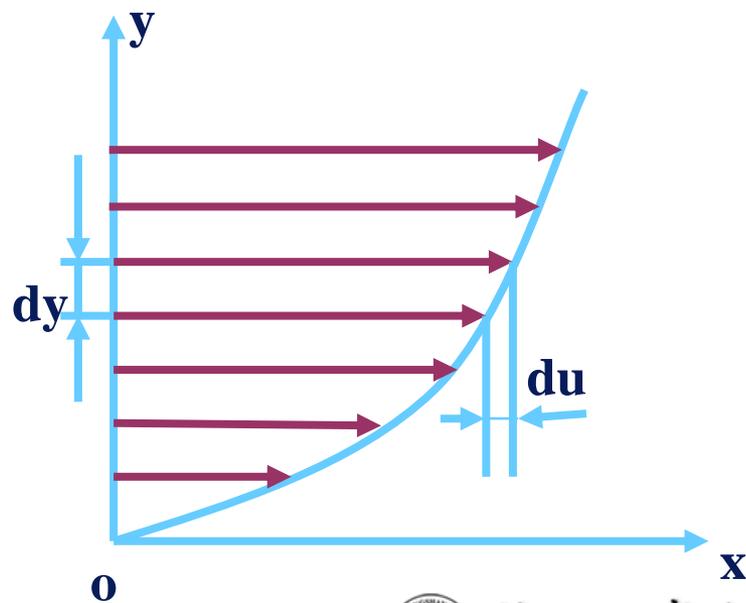
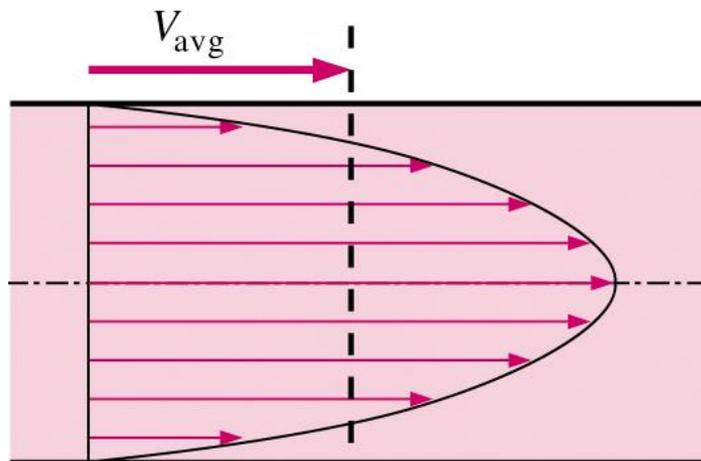
§1.4 流体流动现象

u 与 y 也可能是如右图的关系，则写成：

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-33)$$

上式中 du/dy 为速度梯度

管壁处速度梯度最大, 剪应力最大; 管中心速度覆梯度为零, 剪应力为零。



§1.4 流体流动现象

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

牛顿粘性定律表明：流体层间内摩擦力或剪应力与法向速度梯度成正比。

牛顿型流体

剪应力与速度梯度的关系符合牛顿粘性定律的流体

包括所有气体和大多数液体

非牛顿型流体

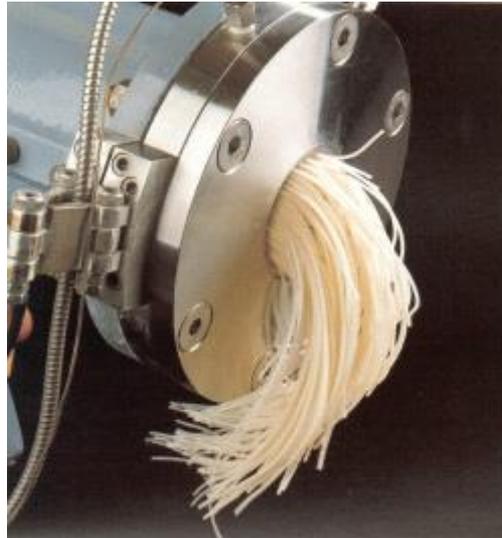
剪应力与速度梯度的关系不符合牛顿粘性定律的流体

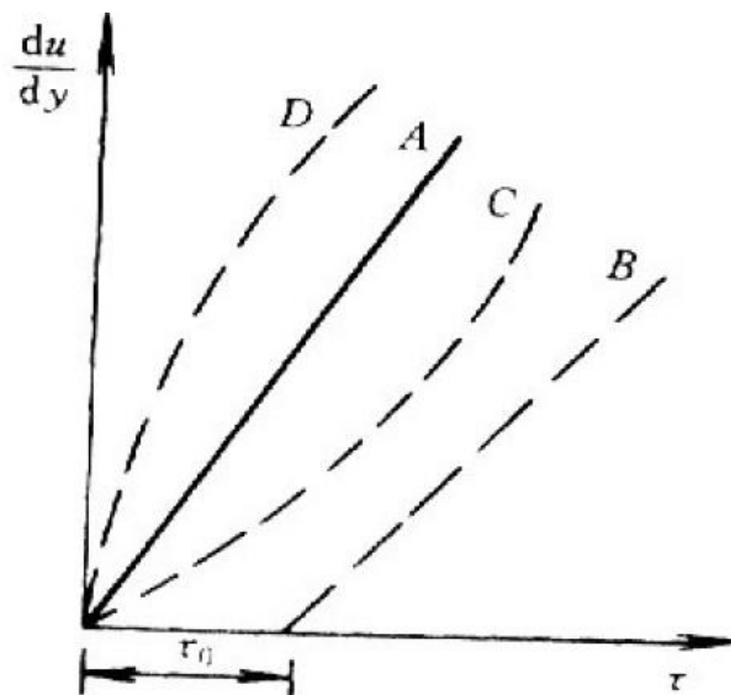
如高分子溶液、胶体溶液及悬浮液等



§1.4 流体流动现象

Non-Newtonian Fluids





- A: 牛顿流体 B: 理想塑性流体 C: 拟塑性流体
D: 胀流型流体



§1.4 流体流动现象

二. 流体的粘度

粘度的物理意义: 流体流动时在与流动方向垂直的方向上产生**单位速度梯度**所需的**剪应力**。粘度是反映流体粘性大小的物理量。

粘度也是流体的物性之一，其值由实验测定。

液体的粘度，随温度的**升高降低**，压力对其影响可忽略不计。

气体的粘度，随温度的**升高而增大**，一般情况下也可忽略压力的影响，但在极高或极低的压力条件下需考虑其影响。

粘度的单位

$$[\mu] = \frac{[\tau]}{[du/dy]} = \frac{\text{Pa}}{\frac{\text{m/s}}{\text{m}}} = \text{Pa} \cdot \text{s}$$

在一些工程手册中，粘度单位常常用物理单位制下的cP（厘泊）表示。

$$1\text{cP} = 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$$



§1.4 流体流动现象

三、剪应力与动量传递

分子动量传递是由于流体层之间速度不等，动量从速度大处向速度小处传递。

$$\text{剪应力 } \tau = \frac{F}{A} = \frac{ma}{A} = \frac{m}{A} \frac{du}{d\theta} = \frac{d(mu)}{Ad\theta}$$

↗ 动量
 ↘ 时间

剪应力表示了单位时间、通过单位面积的动量，即动量通量。

牛顿粘性定律也反映了动量通量的大小：

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \frac{\mu}{\rho} \frac{d(\rho u)}{dy} = \nu \frac{d(\rho u)}{dy}$$

$$\rho u = \frac{mu}{V}$$

$$\frac{d(\rho u)}{dy}$$

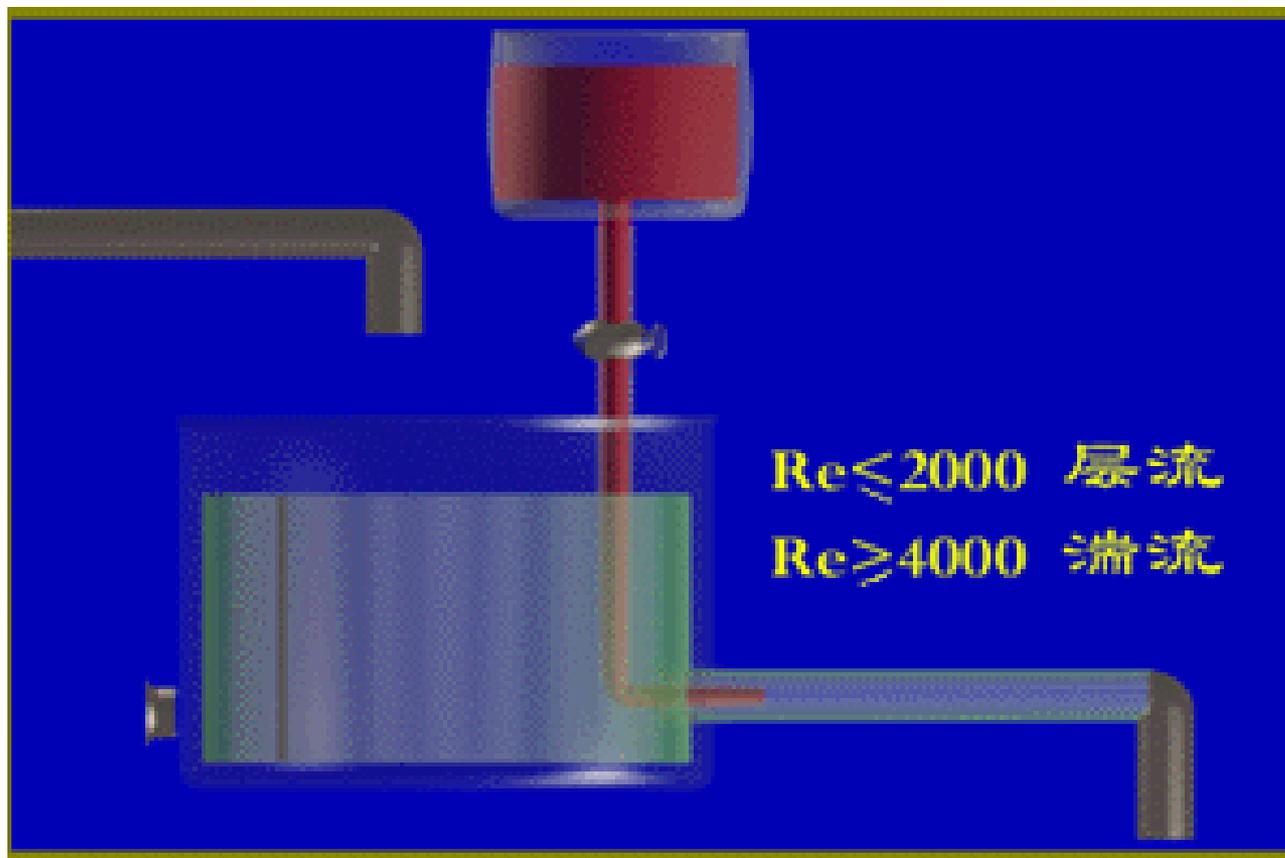
单位体积流体的动量，称为动量浓度

为动量浓度梯度



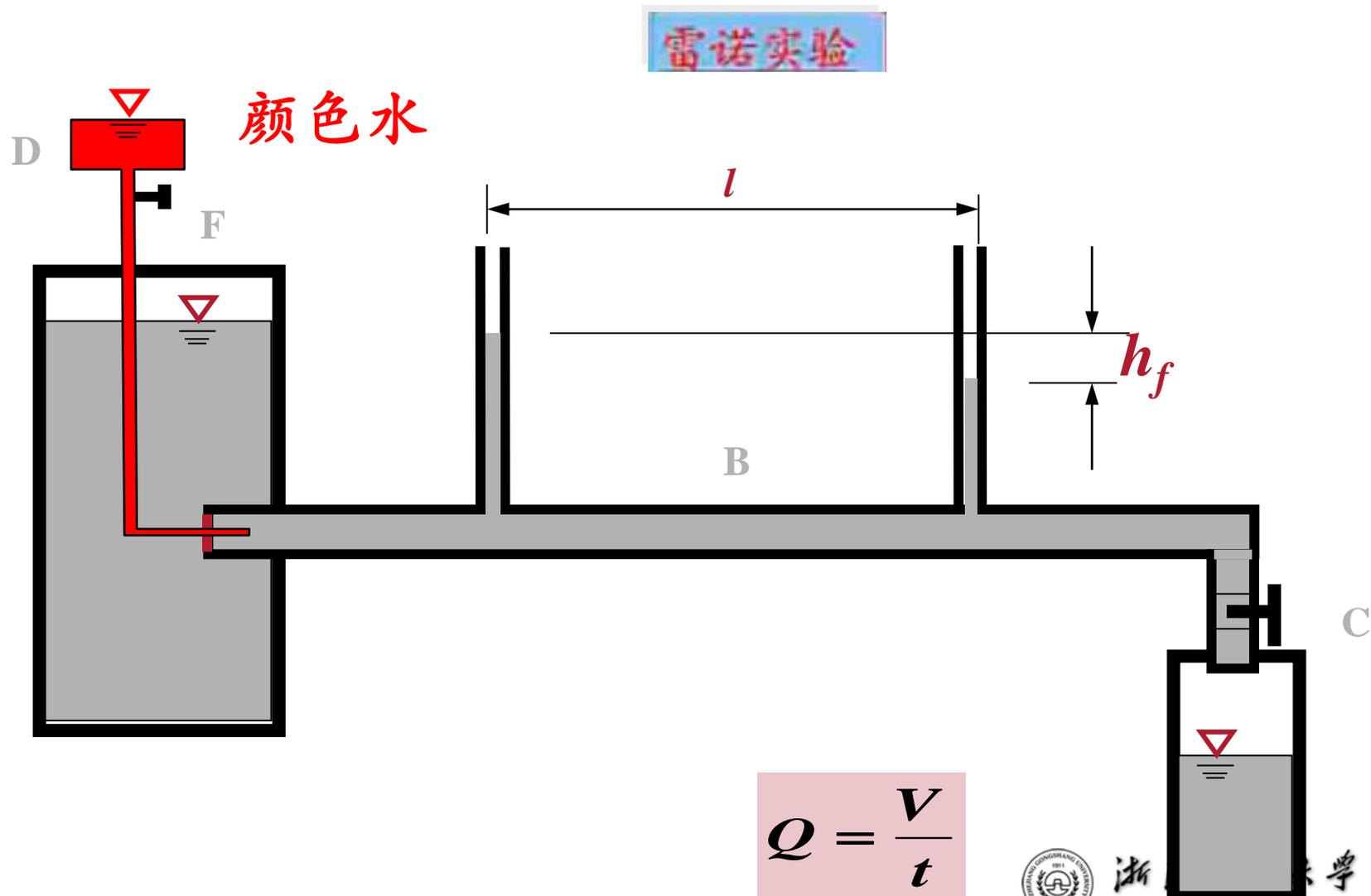
§1.4 流体流动现象

三、流体的流动型态

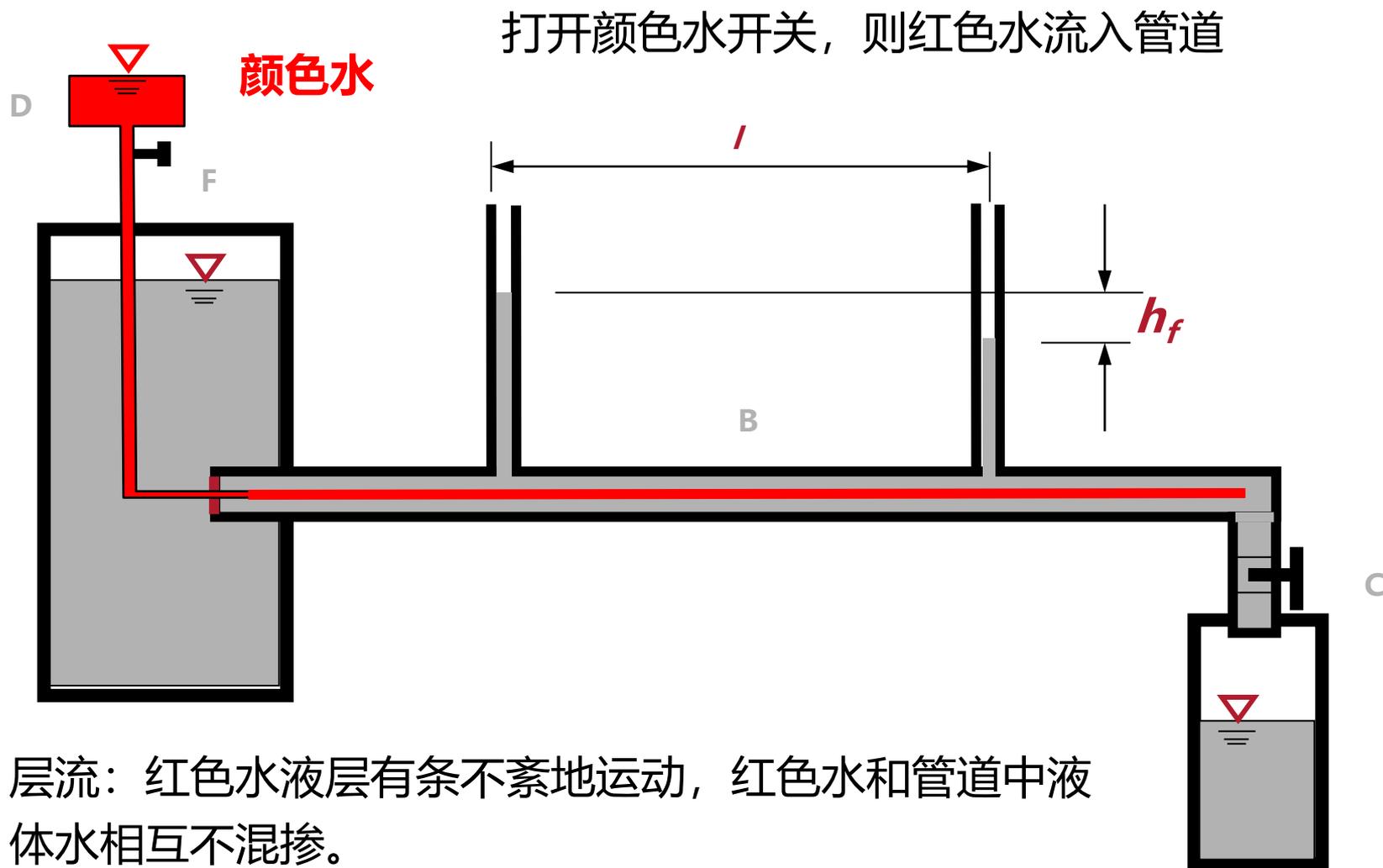


§1.4 流体流动现象

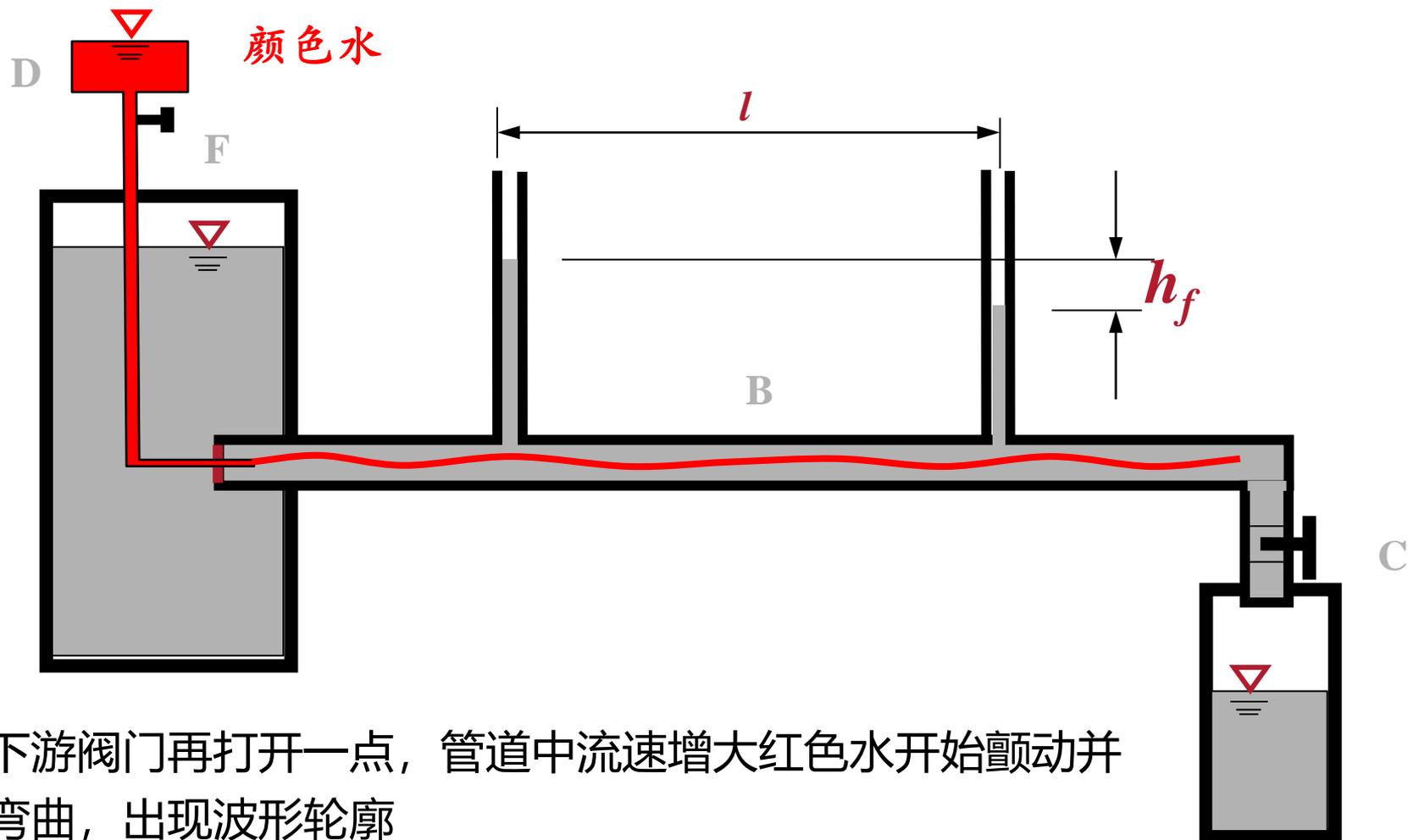
流体的流动型态



§1.4 流体流动现象



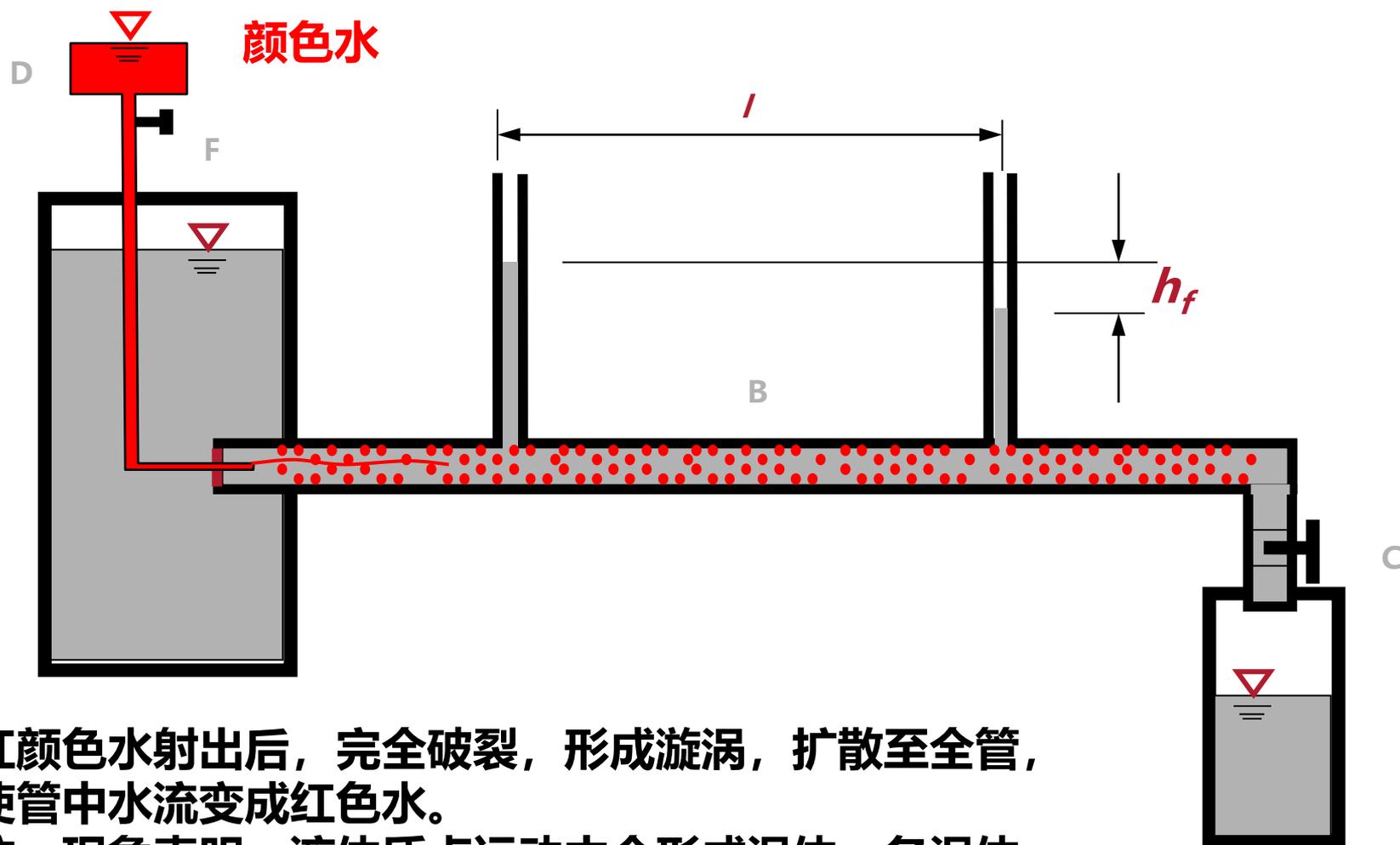
§1.4 流体流动现象



下游阀门再打开一点，管道中流速增大红色水开始颤动并弯曲，出现波形轮廓

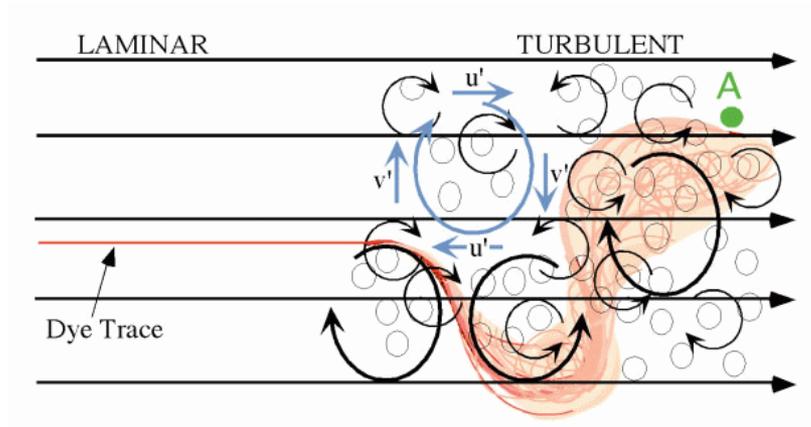
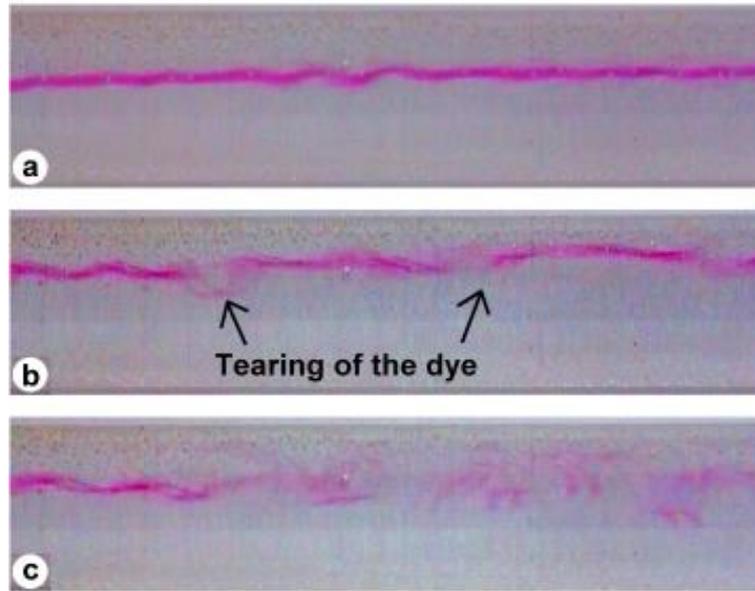


§1.4 流体流动现象



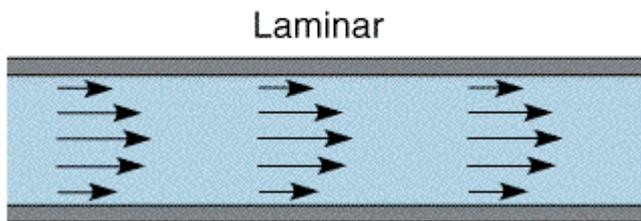
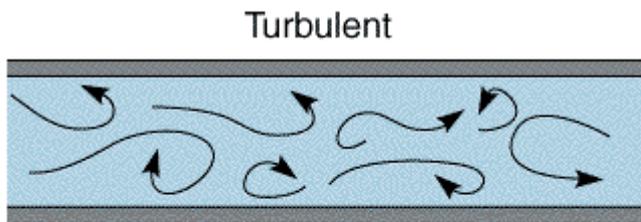
红颜色水射出后，完全破裂，形成漩涡，扩散至全管，使管中水流变成红色水。
这一现象表明：液体质点运动中会形成涡体，各涡体相互混掺。

§1.4 流体流动现象

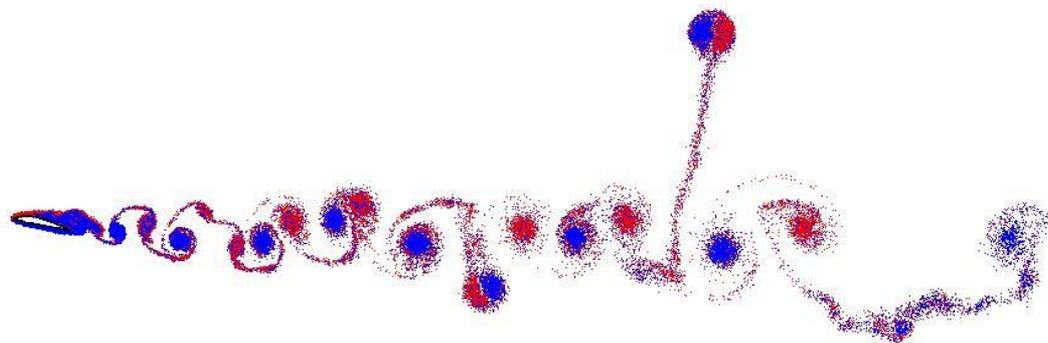


§1.4 流体流动现象

实验结果



- **紊流(Turbulent):** 各流层的液体质点形成涡体, 互相混杂。
- **层流(Laminar):** 各流层的液体质点有条不紊运动, 相互之间互不混杂。



不同形态的液流, 阻力损失规律不同

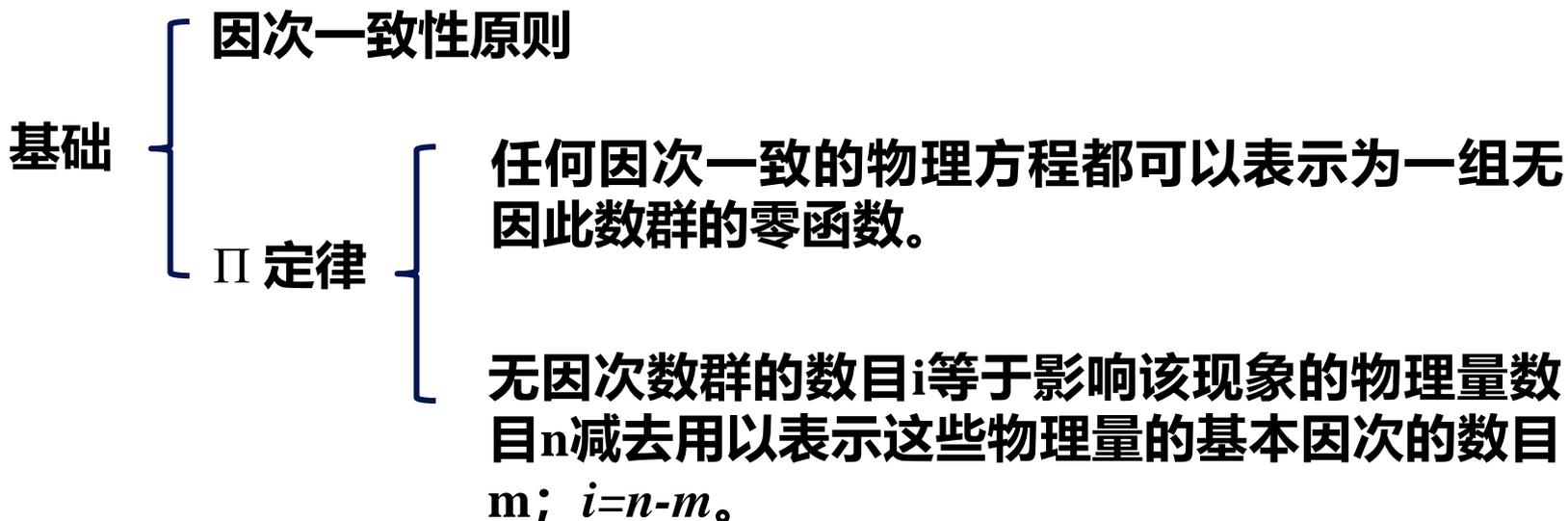


因次分析法

因次分析法

基础

Π定律



因次：是物理量（测量）单位的种类。

基本因次：这些基本量组成了所有物理量的单位。如，在

流体力学中， $[L]$ 、 $[M]$ 、 $[T]$ ；

导出因次：由基本因次经公式推导而出，称为导出量。



§1.4 流体流动现象

怎样判断流动型态呢? *因次分析法*

基础 { 因次一致性原则
Π定律

(1) 通过实验找到所有影响该现象因素 (或物理量)

物理量总数 $n = 4$

$$\text{流动形态} = f(d, u, \rho, \mu)$$

操作条件

设备条件

物性

(2) 找出各物理量量纲中所涉及的基本量纲 (因次)

$$[d] = [m] = L$$

$$[\rho] = [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] = M \cdot L^{-3}$$

$$[u] = [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] = L \cdot T^{-1}$$

$$[\mu] = [\text{Pa} \cdot \text{s}] = M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}$$

∴ 基本量纲 (因次) 数目 $m = 3$



§1.4 流体流动现象

(3) 选择 $m = 3$ 个物理量作为基本物理量

如选 d 、 u 及 ρ

(4) 将其余 $n - m = 4 - 3 = 1$ 个物理量逐一与基本物理量组成无因次数群。

其余1个物理量是： μ

$$\pi = \mu \times (d^{a_2} u^{b_2} \rho^{c_2})$$

(5) 根据量纲一致性原则确定上述待定指数



方程的各项必需具有相同的量纲



§1.4 流体流动现象

$$\begin{aligned}
 [\pi] &= (\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}) \text{L}^{a_2} (\text{L} \cdot \text{T}^{-1})^{b_2} (\text{M} \cdot \text{L}^{-3})^{c_2} \\
 &= \text{L}^{-1+a_2+b_2-3c_2} \text{T}^{-1-b_2} \text{M}^{1+c_2}
 \end{aligned}$$

无因次 \rightarrow

$$\begin{cases} -1 + a_2 + b_2 - 3c_2 = 0 \\ -1 - b_2 = 0 \\ 1 + c_2 = 0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} a_2 = -1 \\ b_2 = -1 \\ c_2 = -1 \end{cases}$$

$$\begin{aligned}
 \pi &= \mu (d^{-1} u^{-1} \rho^{-1}) \\
 &= \left(\frac{du\rho}{\mu} \right)^{-1} = \text{Re}^{-1}
 \end{aligned}$$

因次分析法结束。变量由原来的4个减少为1个，将使实验工作量大大减少。



§1.4 流体流动现象

流型判据——雷诺准数 (P39) $Re = \frac{d \rho u}{\mu}$

雷诺数	流动类型
$Re \leq 2000$	层流
$2000 < Re \leq 4000$	过渡状态
$Re > 4000$	湍流

雷诺1883年，发现流动相似律：对于几何条件相似的流动，即使其尺寸、速度、流体不同，**只要雷诺数相同，则流动是动力相似。**

雷诺数的物理意义：Re反映了流体流动中惯性力与粘性力的对比关系，标志流体流动的湍动程度。其值愈大，流体的湍动愈剧烈，内摩擦力也愈大



§1.4 流体流动现象

四、湍流的脉动现象和时均化

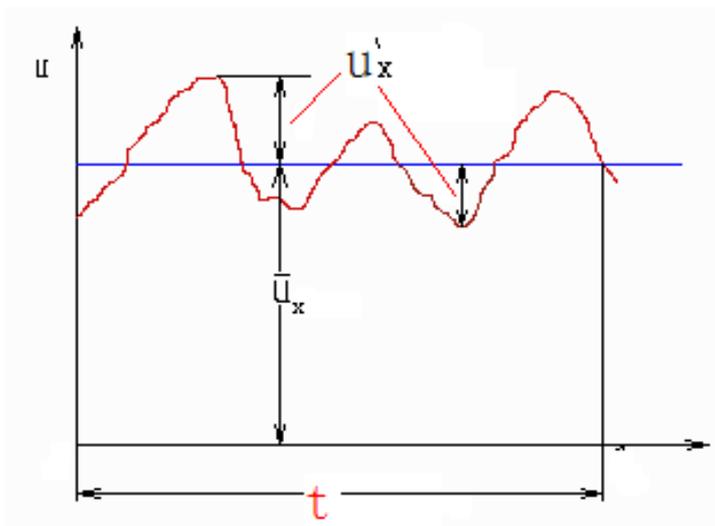
构成质点在主运动之外还有附加的**脉动**。
即瞬时速度围绕某一平均值而上下波动。

质点的脉动是湍流运动的最基本特点。

时均化速度:
$$\bar{u} = \frac{1}{T} \int_0^T u dt$$

瞬时速度:
$$u_x = \bar{u}_x + u_x'$$

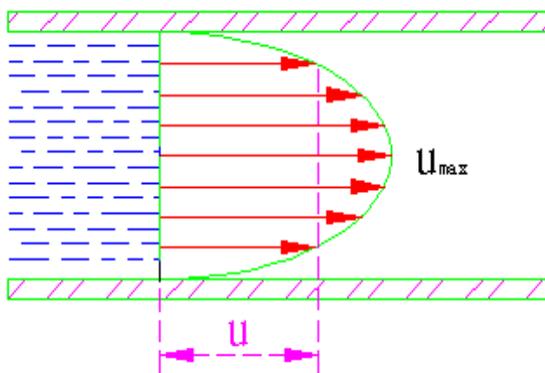
脉动速度是瞬时速度对时均速度的偏离。



流体质点的速度
脉动曲线示意图

1.4.2 管内流动的分析

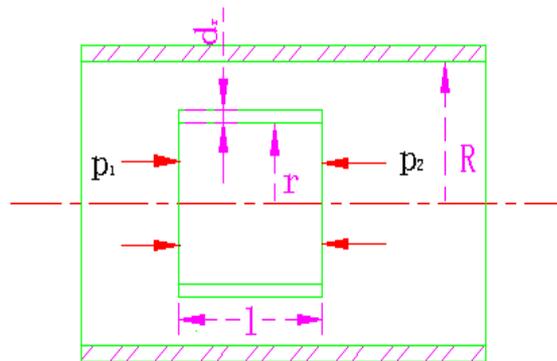
层流时的速度分布



(层流)速度分布为抛物线形状

由压力差产生的推力: $(p_1 - p_2)\pi r^2$

流体层间内摩擦力: $F = \tau A = \mu A \frac{du}{dr} = \mu(2\pi rl) \frac{du}{dr}$



在圆管内，以管轴为中心，取半径为 r 、长度为 l 的流体柱作为研究对象。

层流时的速度分布

根据牛顿第二定律，在流动方向上所受合力必定为零

$$(p_1 - p_2)\pi r^2 = -\mu(2\pi rl)\frac{du}{dr}$$

整理得
$$\frac{du}{dr} = -\frac{(p_1 - p_2)}{2\mu l} r$$

利用管壁处的边界条件， $r = R$ 时， $u = 0$ ，积分可得速度分布方程，

$$u = \frac{(p_1 - p_2)}{4\mu l} (R^2 - r^2)$$



层流时的速度分布

管中心流速为最大，即 $r = 0$ 时， $u = u_{\max}$ ，得

$$u_{\max} = \frac{(p_1 - p_2)}{4\mu l} R^2$$

$$u = \frac{(p_1 - p_2)}{4\mu l} (R^2 - r^2)$$


$$u = u_{\max} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

根据流量相等的原则，确定出管截面上的平均速度为

$$u = \frac{V_s}{\pi r^2} = \frac{1}{2} u_{\max}$$

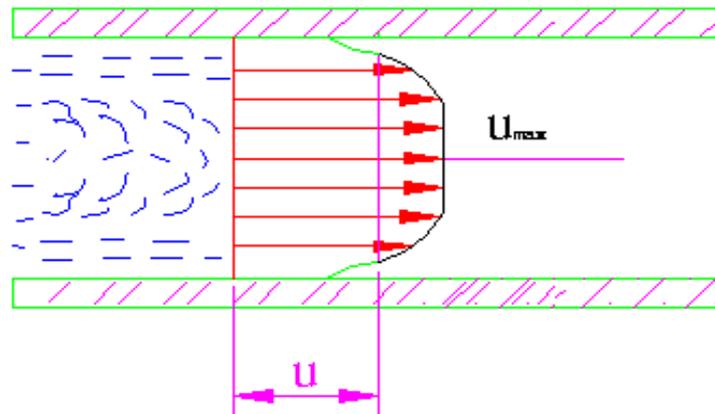
$$V_s = \int_0^R u 2\pi r dr = \int_0^R 2\pi u_{\max} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] r dr = \frac{\pi R^2}{2} u_{\max}$$

即流体在圆管内作层流流动时的**平均速度**为管中心最大速度的一半。



湍流时的速度分布

湍流时流体质点的运动情况复杂，目前还不能完全采用理论方法得出湍流时的速度分布规律。速度分布比较均匀，速度分布曲线不再是严格的抛物线。



湍流时的速度分布

$$\text{剪应力： } \tau = (\mu + e) \frac{d\dot{u}}{dy}$$

e 为湍流粘度，与流体的流动状况有关。

$$\text{湍流速度分布的经验式： } u = u_{\max} \left(1 - \frac{r}{R} \right)^n$$

湍流时的速度分布

式中 n 与 Re 有关，取值如下：

$$4 \times 10^4 < Re < 1.1 \times 10^5, \quad n = \frac{1}{6}$$

$$1.1 \times 10^5 < Re < 3.2 \times 10^6, \quad n = \frac{1}{7}$$

$$Re > 3.2 \times 10^6 \quad n = \frac{1}{10}$$

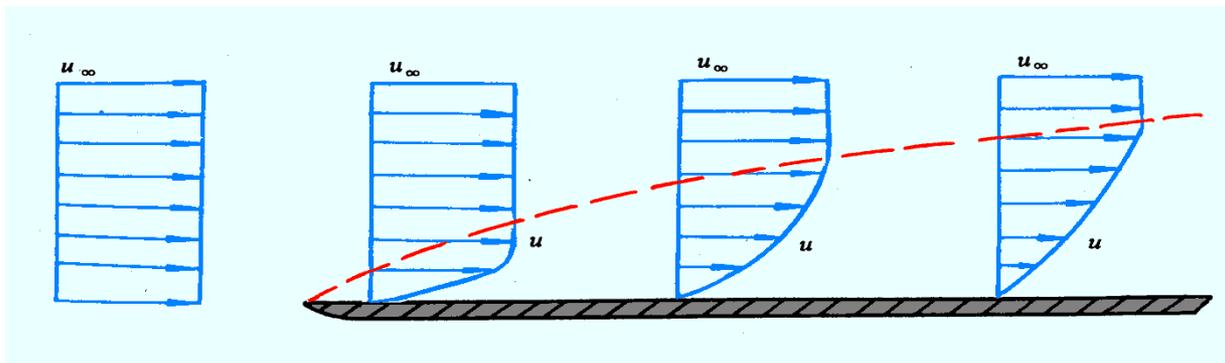
当 $n = \frac{1}{7}$ 时，推导可得流体的平均速度约为管中心最大速度的0.82倍，
即

$$u \approx 0.82 u_{\max}$$



§1.4.3 边界层概念

一、边界层(Boundary Layer)的形成



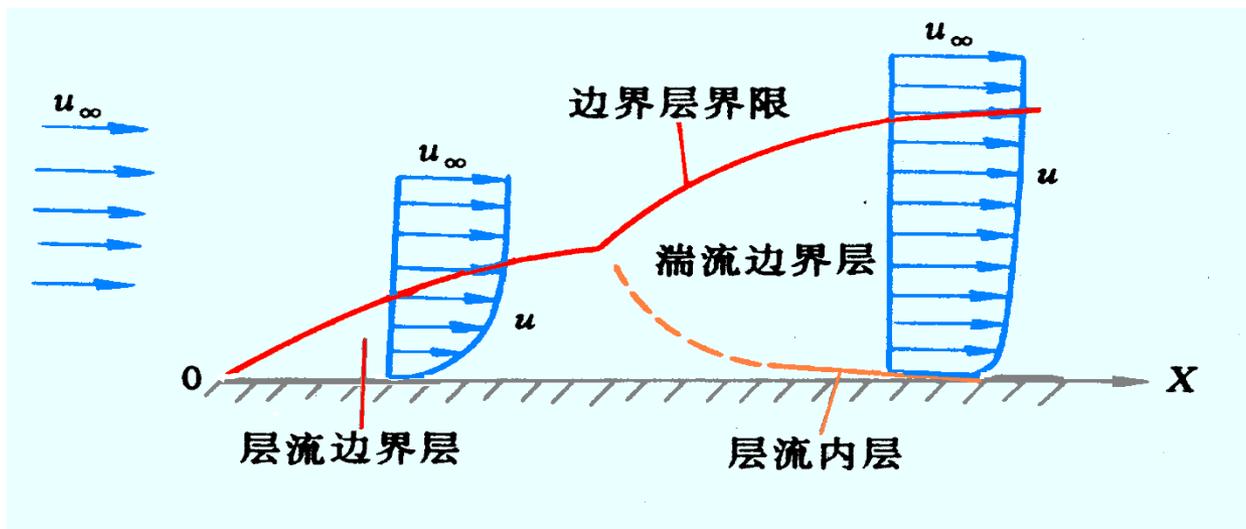
边界层区 (边界层内)：沿板面法向的速度梯度很大，需考虑粘度的影响，剪应力不可忽略。

主流区 (边界层外)：速度梯度很小，剪应力可以忽略，可视为理想流体。



§1.4.3 边界层概念

(二) 平板上的流动边界层发展



层流边界层：流体层内的流动类型为层流

湍流边界层：边界层内的流动类型为湍流

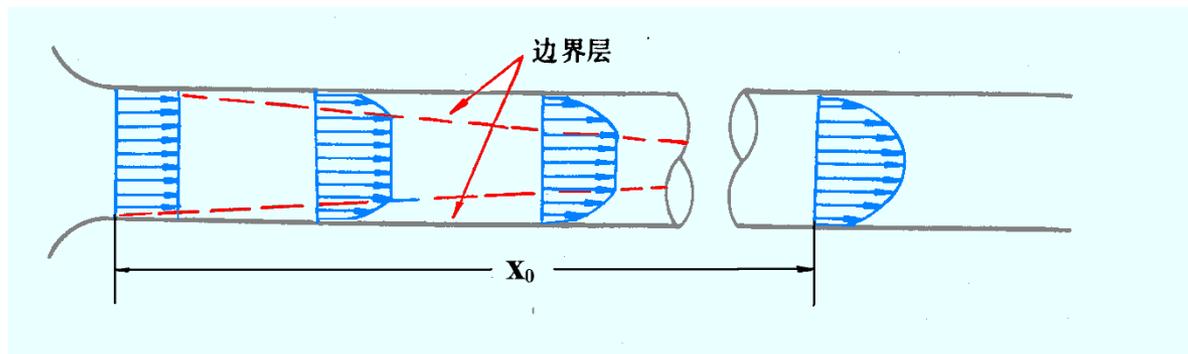
层流内层：边界层内近壁面处一薄层，无论边界层内的流型为层流或湍流，其流动类型均为层流

注意：层流边界层和层流内层的区别



§1.4.3 边界层概念

流体在圆管内流动时的边界层



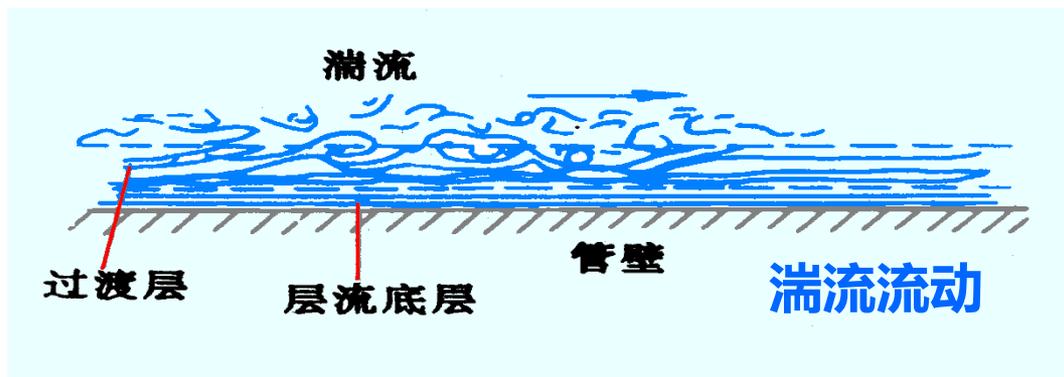
进口段长度:

$$\text{层流: } \frac{x_0}{d} = 0.05 \text{ Re} \quad \text{湍流: } \frac{x_0}{d} = 40 \sim 50$$

对于管流来说，只在进口段内才有边界层内外之分。在边界层汇合处，若边界层内流动是层流，则以后的管内流动为层流；若在汇合之前边界层内的流动已经发展成湍流，则以后的管内流动为湍流。



§1.4.3 边界层概念



当管内流体处于湍流流动时，由于流体具有粘性和壁面的约束作用，紧靠壁面处仍有一薄层流体作层流流动，称其为层流内层（或层流底层）

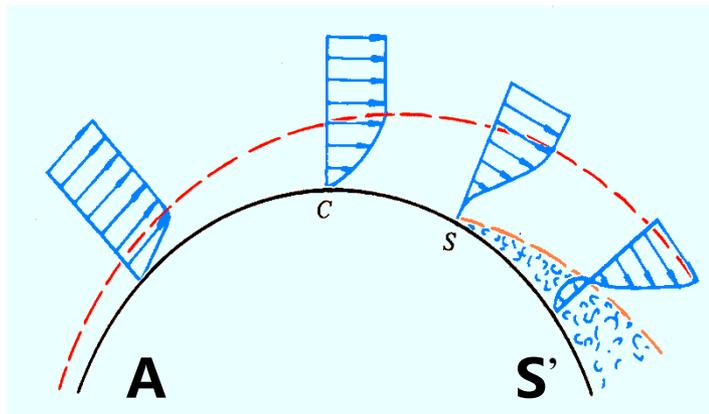
当流体在圆管内作湍流流动时，从壁面到管中心分为层流内层、过渡层和湍流主体三个区域。

层流内层是传递过程主要阻力，层流内层虽然很薄，但却对**传热**和**传质**过程都有较大的影响。



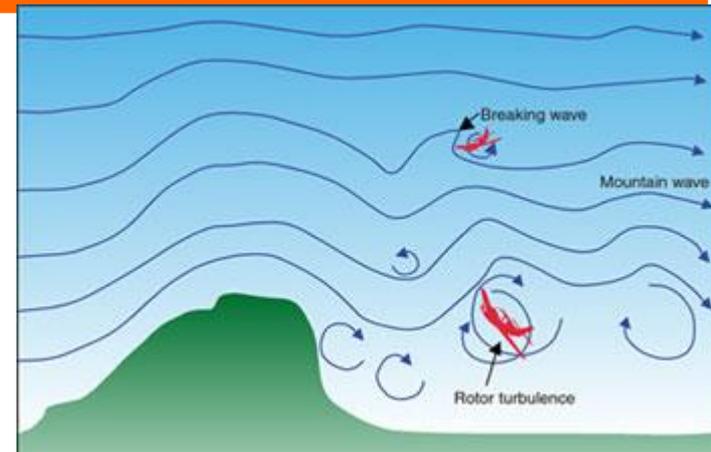
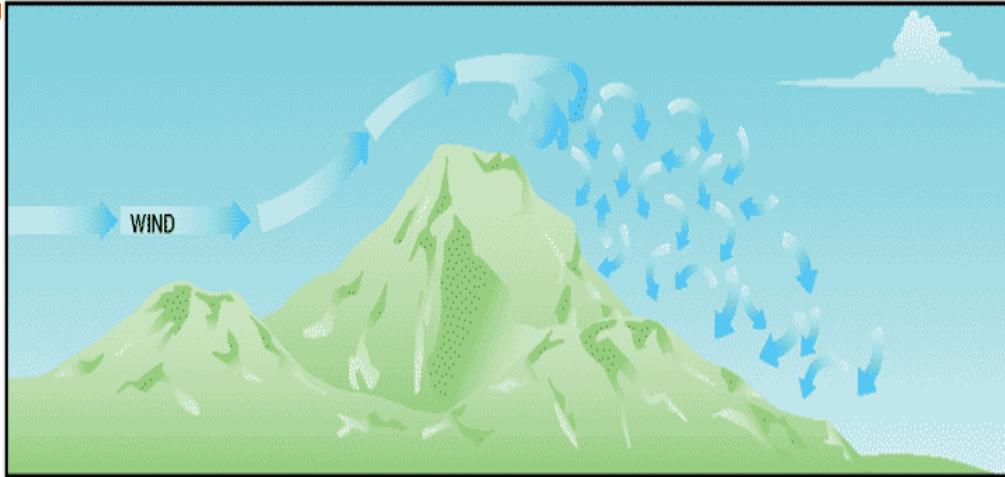
§1.4.3 边界层概念

三、边界层的分离



- **A → C: 流道截面积逐渐减小, 流速逐渐增加, 压力逐渐减小 (顺压梯度) ;**
- **C → S: 流道截面积逐渐增加, 流速逐渐减小, 压力逐渐增加 (逆压梯度) ;**
- **S点: 物体表面的流体质点在逆压梯度和粘性剪应力的作用下, 速度降为0, 压力为最大。**
- **SS'以下: 边界层脱离固体壁面, 而后倒流回来, 形成涡流, 出现边界层分离。**

§1.4.3 边界层概念



- While the wind flows smoothly up the windward side of the mountain and the upward currents help to carry an aircraft over the peak of the mountain, the wind on the leeward side does not act in a similar manner. As the air flows down the leeward side of the mountain, the air follows the contour of the terrain and is increasingly turbulent. This tends to push an aircraft into the side of a mountain. The stronger the wind, the greater the downward pressure and turbulence become.
- Due to the effect of terrain on the wind in valleys or canyons, downdrafts can be severe. Thus, a prudent pilot is well advised to seek out a mountain qualified flight instructor and get a mountain checkout before conducting a flight in or near mountainous terrain.

§1.4.3 边界层概念

边界层分离的必要条件：

流体具有粘性；

流动过程中存在逆压梯度

边界层分离的后果：

产生大量旋涡；

造成较大的能量损失

