1.5 流体流动阻力

1.5.1 管、管件和阀门简介

1.5.2 直管阻力

1.5.3 边界层分离

1.5.4 局部阻力

● **直管阻力**：流体流经直管时产生的阻力。

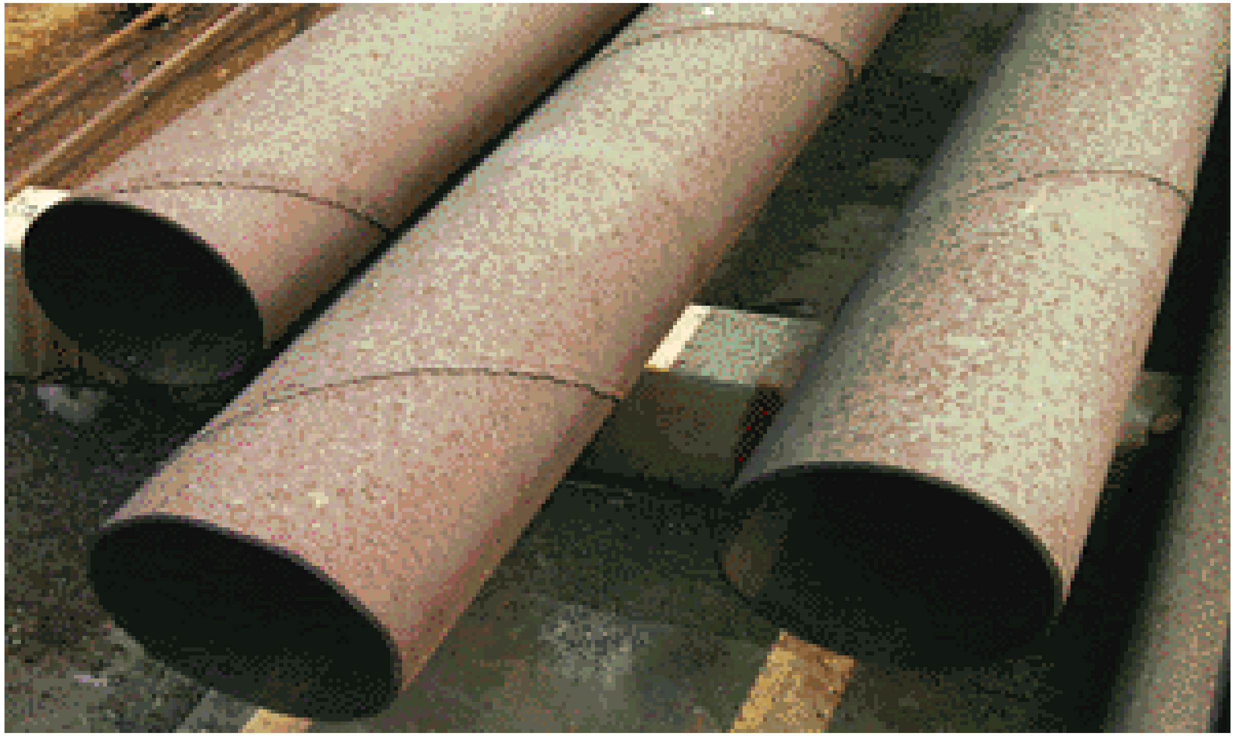
● **局部阻力**：流体流经管件、阀门等局部地方由于流速大小及方向的改变而引起的阻力。

1.5.1 管、管件和阀门简介

一、管

1. 铸铁管

2. 有缝钢管

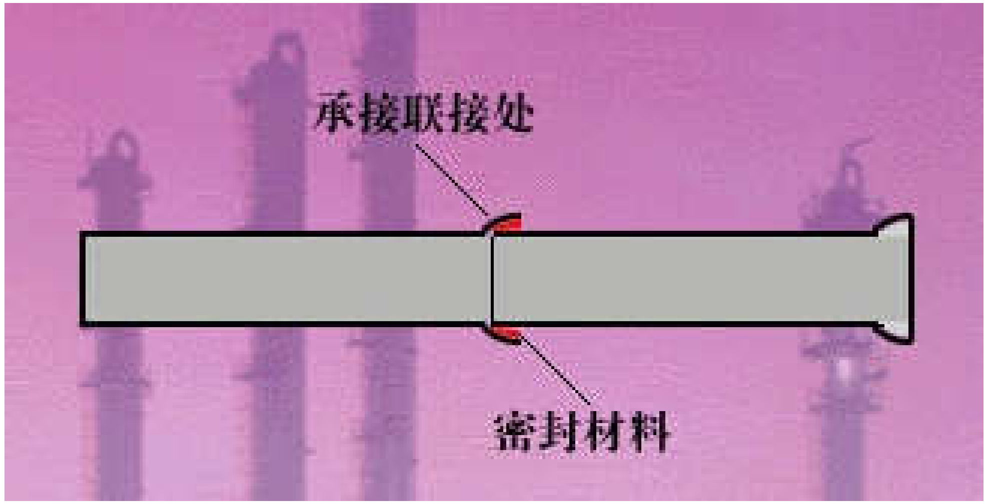


3. 无缝钢管

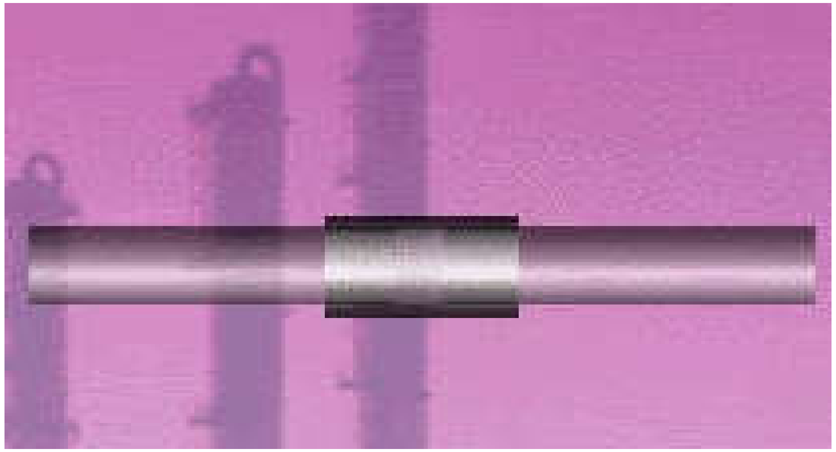
4. 不锈钢管（合金钢管）

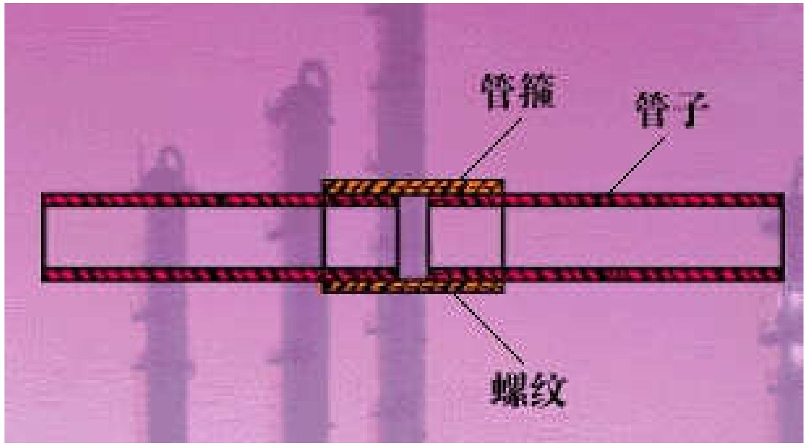
二、连接方式

1. 承插式连接

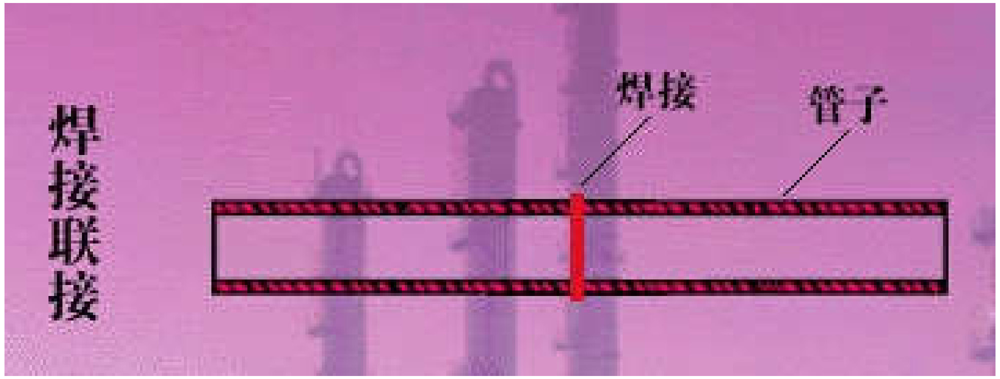


2. 螺纹连接

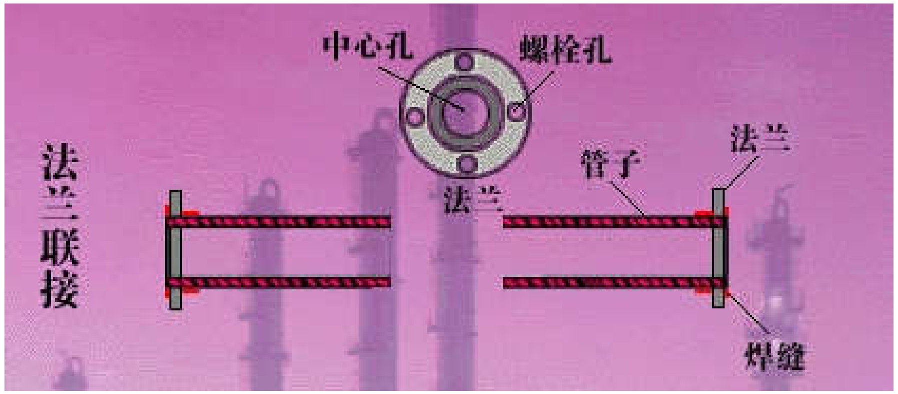


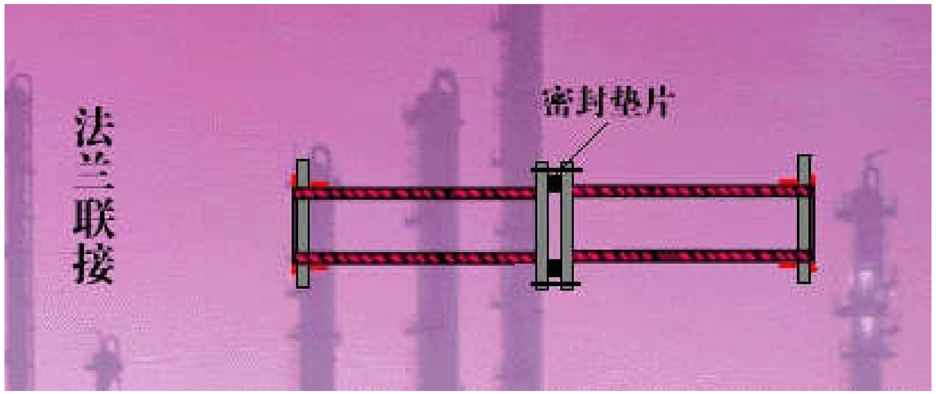


3. 焊接连接

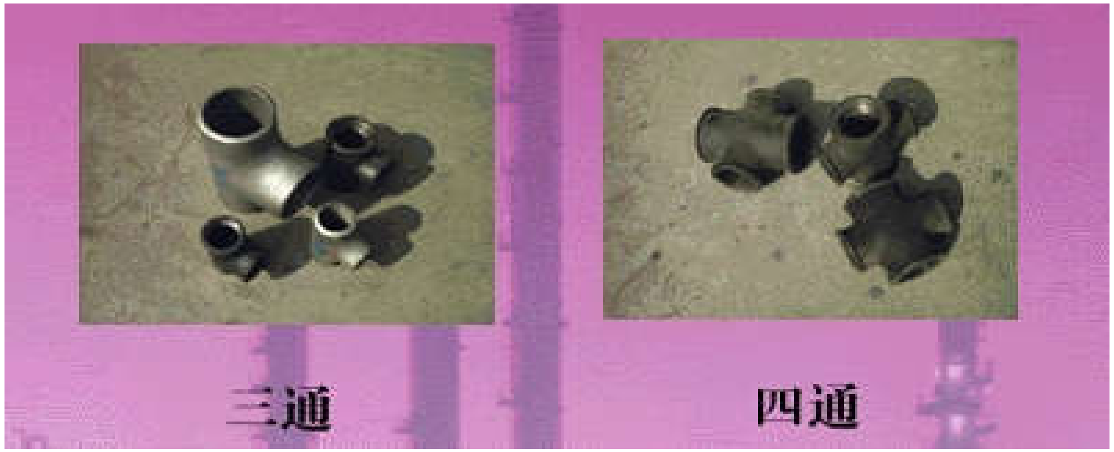


4. 法兰连接





三、管件



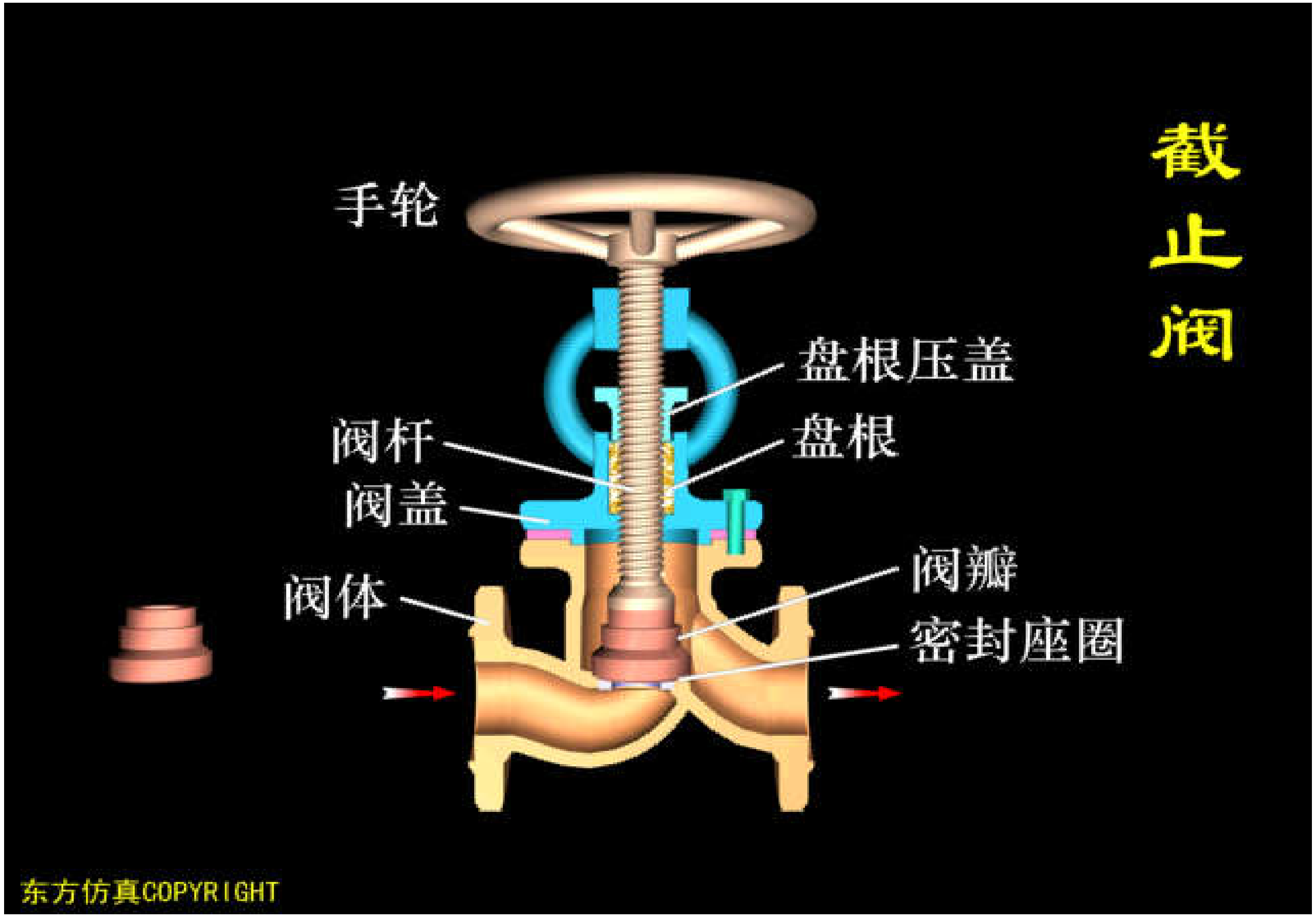
堵塞管路

连接管路

改变流体流通的截面积

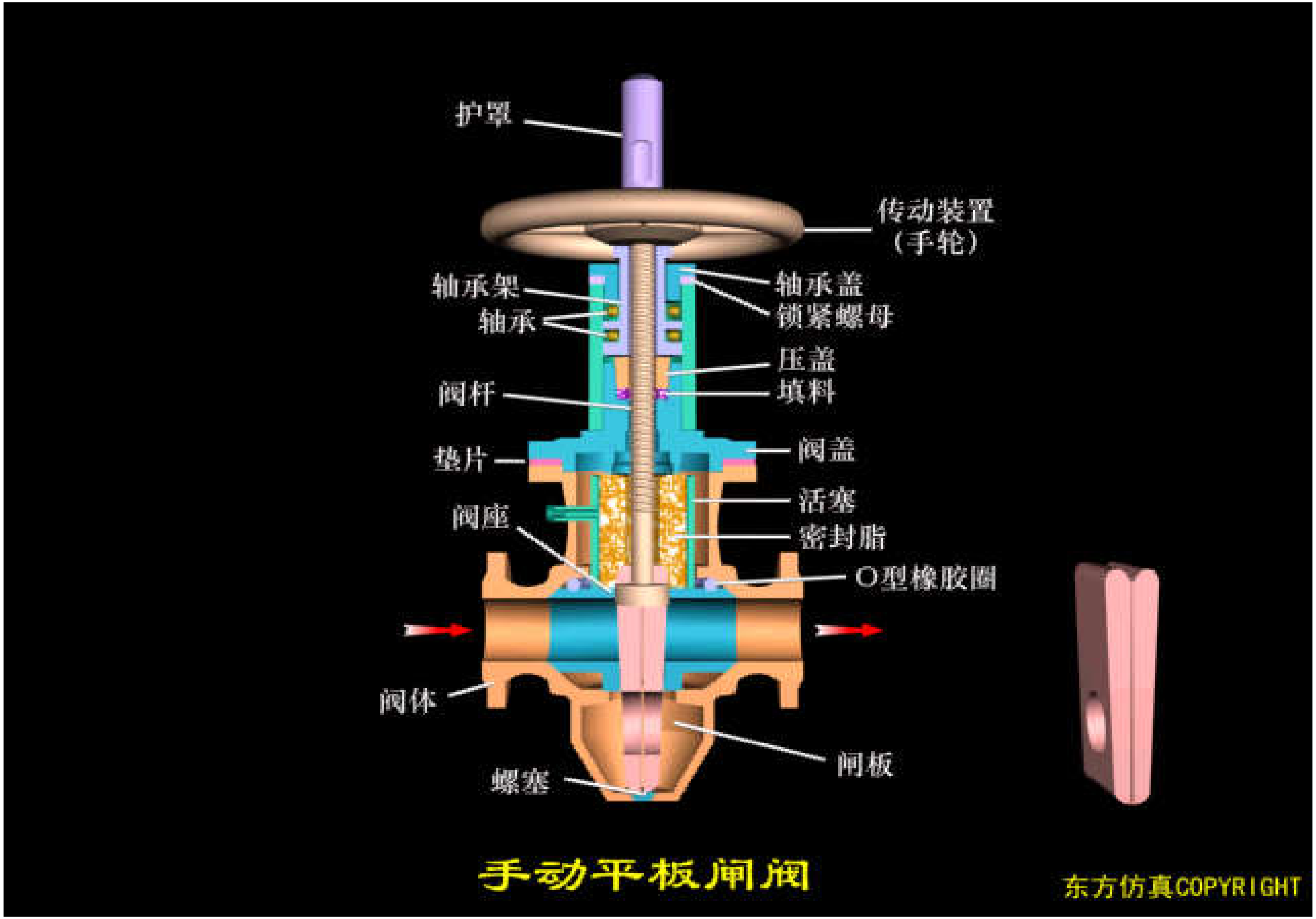
四、阀门

1. 截止阀

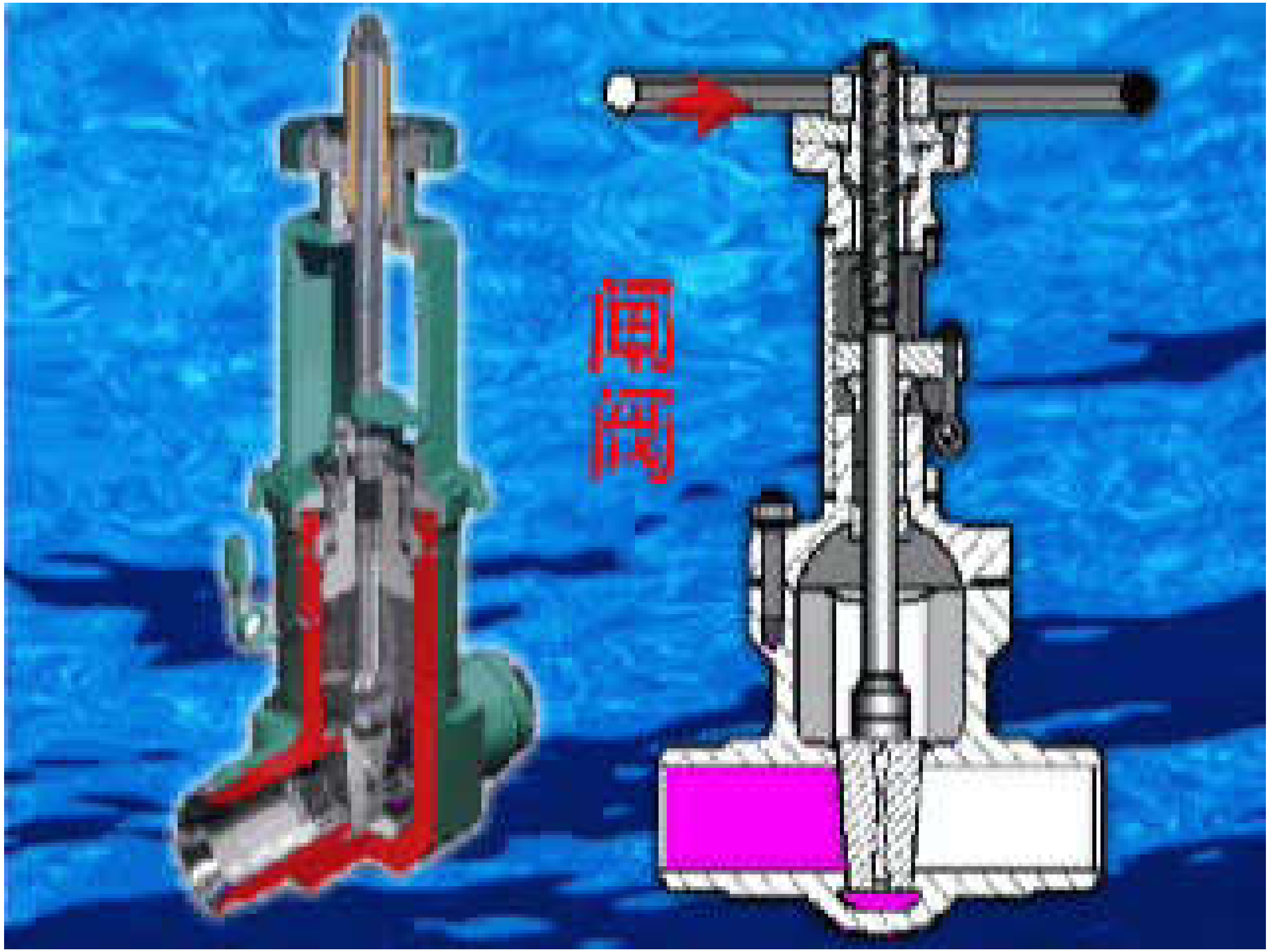


流动阻力大；用于流量调节。

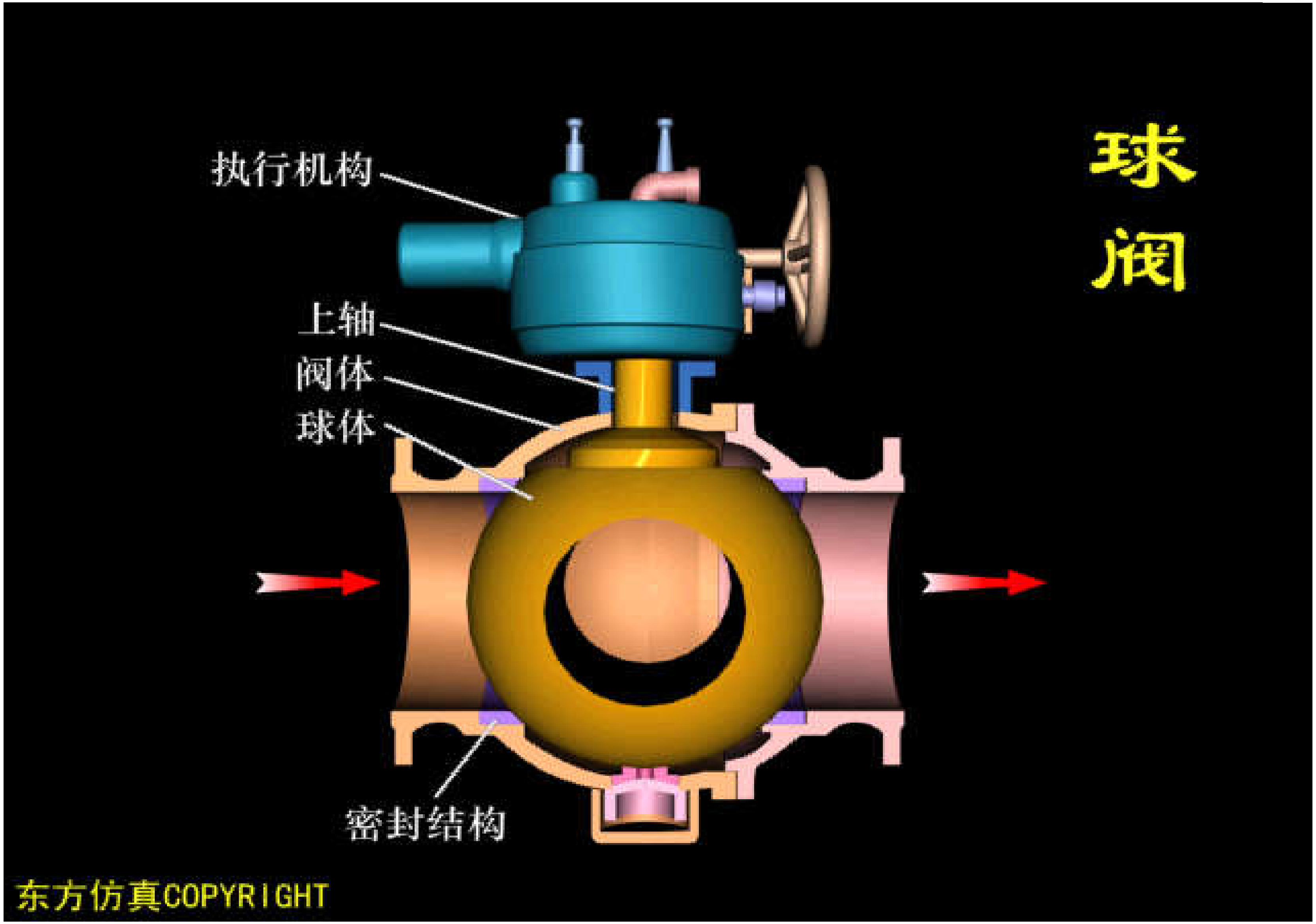
2. 闸阀



护罩
传动装置
（手轮）
轴承架
轴承盖
轴承
锁紧螺母
压盖
填料
阀杆
垫片
阀盖
活塞
阀座
密封脂
O型橡胶圈
阀体
闸板
螺塞
手动平板闸阀
东方仿真COPYRIGHT



流动阻力小；主要用于大直径管路启、闭。

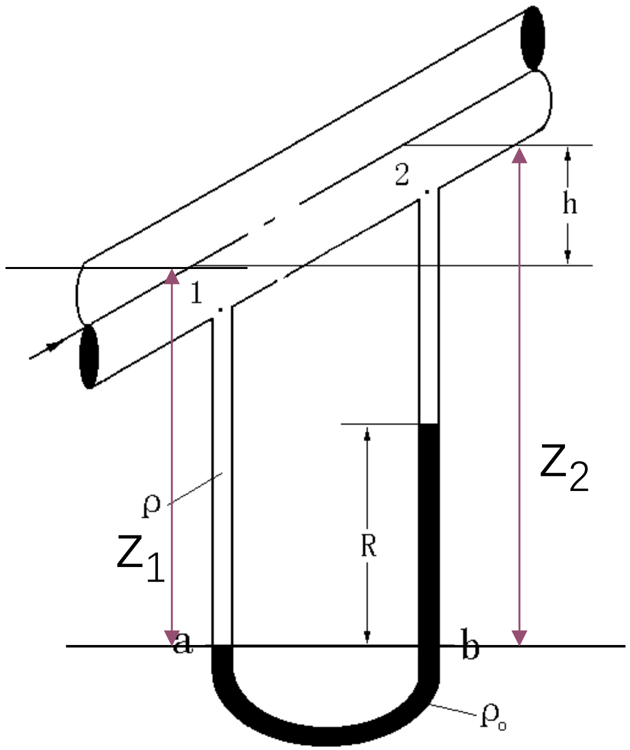

球阀
执行机构
上轴
阀体
球体
密封结构
东方仿真COPYRIGHT

3. 单向阀或止逆阀

作用是让流体单向通过管路。

1.5.2 直管阻力

一、阻力的表现形式



流体在等径直管中作定态流动

在1-1和2-2间列B.E.： $z_1 g + \frac{p_1}{\rho} = z_2 g + \frac{p_2}{\rho} + W_{f1-2}$

$$\therefore \quad W_{f1-2} = (\frac{p_1}{\rho} + gz_1) - (\frac{p_2}{\rho} + gz_2)$$

$$\boldsymbol{\Delta p_f = \rho W_f} = (p_1 + \rho g z_1) - (p_2 + \rho g z_2) = \boldsymbol{\Delta(p + \rho g z)}$$

若管道为水平管，则： $\boldsymbol{\Delta p_f = p_1 - p_2 = \Delta p}$

- 流体的流动阻力表现为势能差；
- 水平安装时，流动阻力等于两截面的静压能差 。

二、直管阻力的通式

非水平等径直管：$\tau = \dfrac{\Delta(p+\rho g z)}{2l} r$

水平等径直管，τ 分布：$\tau = \dfrac{\Delta p}{2l} r$

在壁面处：$r = R = \dfrac{d}{2}; \tau = \tau_w \quad \Rightarrow \tau_w = \dfrac{\Delta p}{4l} d$

$$\Delta p_f = \Delta p = \frac{4\tau_w l}{d} \Rightarrow \Delta p_f = \left(\frac{8\tau_w}{\rho u^2}\right)\frac{l}{d}\frac{\rho u^2}{2}$$

令 $\lambda = \dfrac{8\tau_w}{\rho u^2}$

则 $$\Delta p_f = \lambda \frac{l}{d}\frac{\rho u^2}{2}$$ ，Pa

——直管阻力通式（范宁Fanning公式）

λ——摩擦系数（摩擦因数）

$$h_f = \lambda \frac{l}{d}\frac{u^2}{2g}$$ ，m

$$W_f = \lambda \frac{l}{d}\frac{u^2}{2}$$ ，J/kg

- 该公式对层流与湍流均适用。

三、圆形直管内层流流动的阻力计算

速度分布方程： $u_{\max} = \frac{\Delta p}{4\mu l} R^2$

又， $u = \frac{1}{2} u_{max}$ ， $R = \frac{d}{2}$

水平等径直管： $\Delta p_f = \Delta p$

$$\Delta p_f = \frac{32\mu l u}{d^2}$$

——哈根-泊谡叶（Hagen-Poiseuille）方程

能量损失：$W_f = \dfrac{32\mu l u}{\rho d^2} \quad J/kg$

层流时阻力与速度的一次方成正比！

变形：$W_f = \dfrac{32\mu l u}{\rho d^2} = \dfrac{64\mu}{d\rho u}\cdot\dfrac{l}{d}\cdot\dfrac{u^2}{2} = \dfrac{64}{\mathrm{Re}}\cdot\dfrac{l}{d}\cdot\dfrac{u^2}{2}$

比较得：$\lambda = \dfrac{64}{Re}$

- 层流、l、d一定，W_f 与u?
- 层流、l、q_v一定，W_f 与d?
- 层流 $\lg\lambda - \lg\mathrm{Re}$ 直线关系

思考题

层流时，下列条件下，W_f如何变化？

1）l、d不变，u减半；

2）l、q_v不变，d减半；

3） d 、 u不变， l减半；

2）q_v不变，d、 l同时减半。

四、圆形直管内湍流流动的阻力计算

量纲（SI制）：

长度L、质量M、时间T、电流强度I、温度Θ、物质的量n和光强度J。

1\. 量纲分析法

影响因素：

（1）流体性质：ρ，μ

（2）流动的几何尺寸：d，l，ε（*epsilon*，管壁粗糙度）

（3）流动条件：u

$$\Delta p_f = f\left(\rho, \mu, u, d, l, \varepsilon\right)$$

目的：（1）减少实验工作量；

（2）结果具有普遍性，便于推广。

- 基础：量纲一致性原则

即每一个物理方程式的两边不仅数值相等，而且应具有相同的量纲。

- 基本定理：白金汉（Buckinghan）π定理

设影响某一物理现象的独立变量数为n个，这些变量的基本量纲数为m个，则该物理现象可用$N=(n-m)$个独立的无量纲的特征数（无因次数群）表示。

无量纲化过程：　$\Delta p_f = Kd^a l^b u^c \rho^d \mu^e \varepsilon^f$

$[\Delta p_f] = ML^{-1}T^{-2}$

$[d] = L$

$[l] = L$

$[u] = LT^{-1}$

$[\rho] = ML^{-3}$

$[\mu] = ML^{-1}T^{-1}$

$[\varepsilon] = L$

$$\Delta p_f = K d^a l^b u^c \rho^d \mu^e \varepsilon^f$$

$$ML^{-1}T^{-2} = K[L]^a[L]^b[LT^{-1}]^c[ML^{-3}]^d[ML^{-1}T^{-1}]^e[L]^f$$

$$ML^{-1}T^{-2} = K[M]^{e+d}[L]^{a+b+c-3d-e+f}[T]^{-c-e}$$

按量纲一致性原则：

$$\begin{cases} e+d=1 \\ a+b+c-3d-e+f=-1 \\ -c-e=-2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} a=-b-e-f \\ c=2-e \\ d=1-e \end{cases}$$

$$\frac{\Delta p_f}{\rho u^2}=K\left(\frac{l}{d}\right)^b\left(\frac{\rho d u}{\mu}\right)^{-e}\left(\frac{\varepsilon}{d}\right)^f$$

即该过程用4个无量纲的特征数表示。

物理变量：$n=7$；基本量纲：$m=3$

无量纲的特征数：$N=n-m=4$

符合π定律

无量纲化处理：$\frac{\Delta p_f}{\rho u^2}=\psi\left(\frac{\rho d u}{\mu},\frac{l}{d},\frac{\varepsilon}{d}\right)$

$$Eu=\frac{\Delta p_f}{\rho u^2}$$ ——欧拉（Euler）准数

$$\mathrm{Re}=\frac{d\rho u}{\mu}$$ ——雷诺准数

l/d——管子的长径比

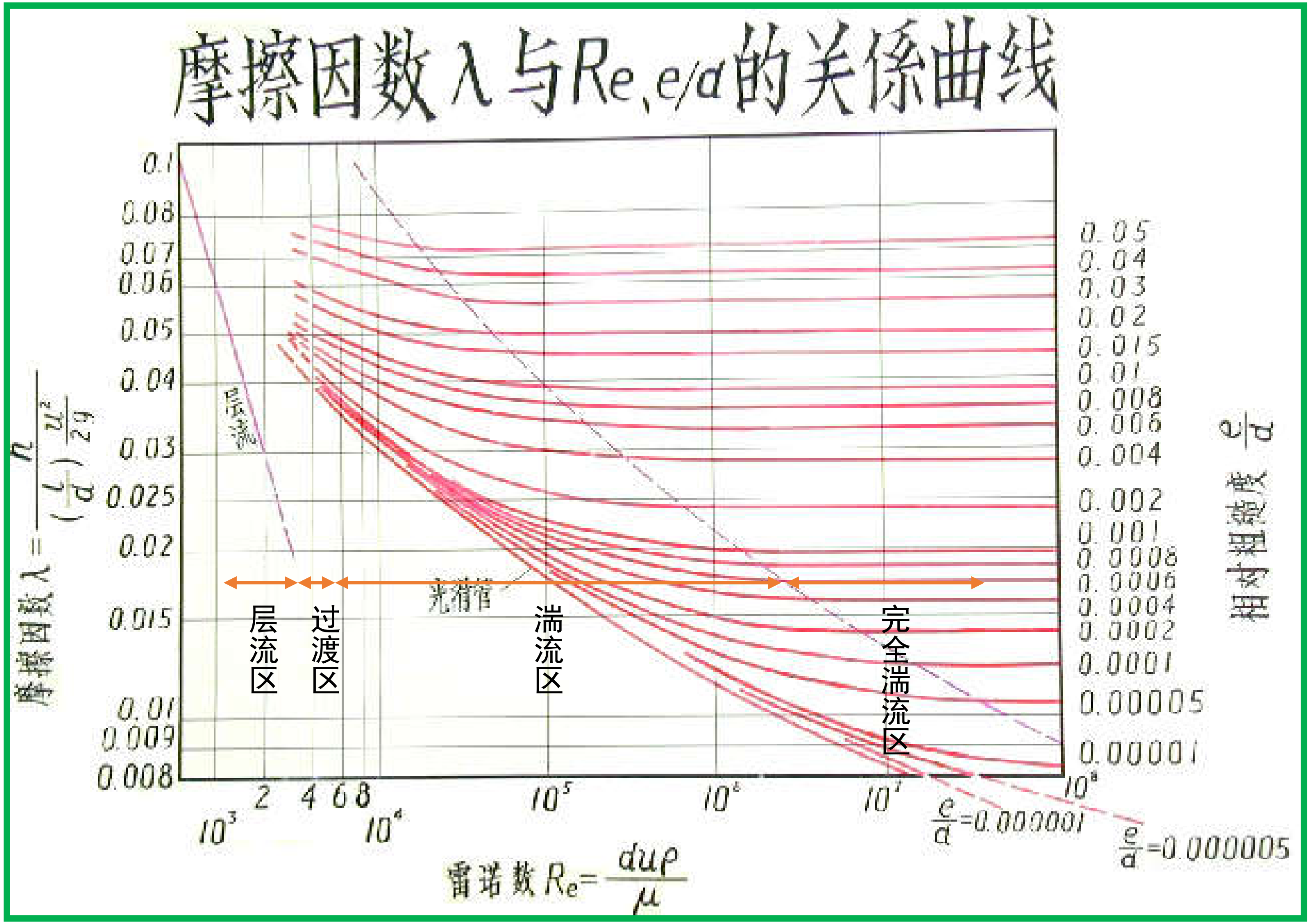
ε/d——相对粗糙度

2. 阻力损失计算

对均匀直管: $\Delta p_f \propto l$，得 $$\frac{\Delta p_f}{\rho u^2}=\varphi\left(\mathrm{Re},\ \frac{\varepsilon}{d}\right)\frac{l}{d}$$

变形 $$\Delta p_f=\phi\left(\mathrm{Re},\ \frac{\varepsilon}{d}\right)\frac{l}{d}\frac{\rho u^2}{2} \Longrightarrow \lambda=\phi(\mathrm{Re},\ \frac{\varepsilon}{d})$$

（1）莫狄（Moody）摩擦因数图（双对数坐标）



1）**层流区（Re≤ 2000）——阻力一次方区**

λ与 ε/d 无关，与 Re 为直线关系，$\lambda=64/Re$。即 $\Delta p_f \propto u$

2）过渡区（2000<Re<4000)

将湍流时的曲线延伸查取λ值

3）湍流区（Re≥4000以及虚线以下的区域）

$$\lambda = f(\mathrm{Re}, \frac{\varepsilon}{d})$$

4）**完全湍流区 （虚线以上的区域）——阻力平方区**

λ与 Re 无关，只与 ε/d 有关。当 ε/d 一定时，$\Delta p_f \propto u^2$

（2）经验公式

1）柏拉修斯（Blasius）式

$$\lambda = \frac{0.3164}{\mathrm{Re}^{0.25}}$$

适用：光滑管；Re＝5×10³～10⁵

2）考莱布鲁克（Colebrook）式

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.74 - 2\lg\left(\frac{2\varepsilon}{d} + \frac{18.7}{\mathrm{Re}\sqrt{\lambda}}\right)$$

适用：Re>4000

思考题

1、d一定，q_{v}加倍，层流时， $W_{f}'/W_{f}=?$

2、d一定，q_{v}加倍，完全湍流时， $W_{f}'/W_{f}=?$

3、q_{v}一定，d 减小1倍，层流时， $W_{f}'/W_{f}=?$

4、q_{v}一定，d 减小1倍，完全湍流时， $W_{f}'/W_{f}=?$

例题：某液体在内径为d_0的水平管路中定态流动，其平均流速为u_0，当它以相同的q_V通过等长的，内径为$d_0/2$的管子时：

（1）则其流速为原来的__B____倍

(A) 2 (B) 4 (C) 8 (D) 16

（2）若流动在完全湍流区，则压降Δp是原来的__D___倍；（忽略ε/d的变化）

(A) 4 (B) 8 (C) 16 (D) 32

（3）若流动在层流区，则压降Δp是原来的__C___倍

(A) 4 (B) 8 (C) 16 (D) 32

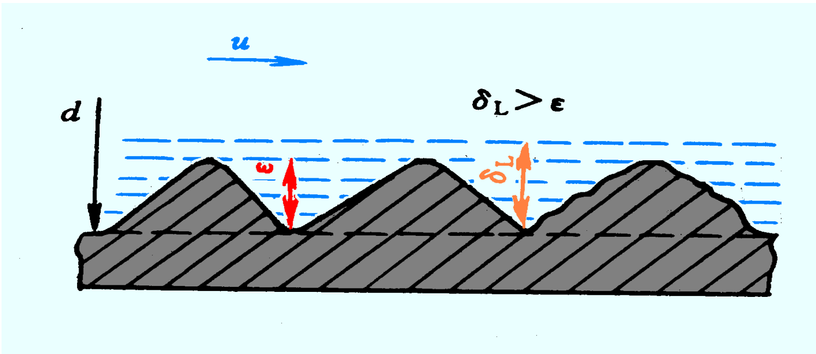
3. 管壁粗糙度对λ的影响

光滑管：玻璃管、铜管、铅管及塑料管等；
粗糙管：钢管、铸铁管等。

- 层流

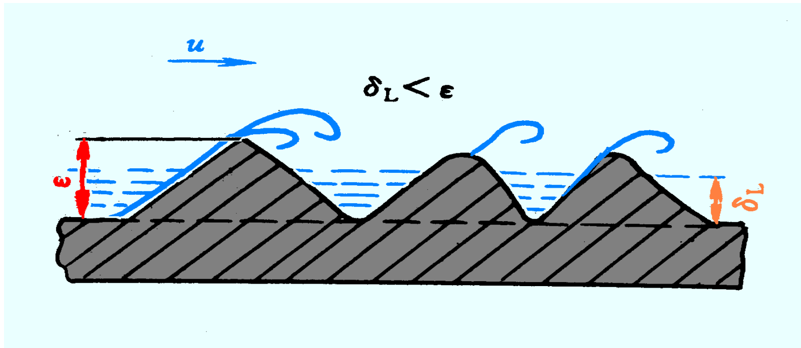
流速较慢，与管壁无碰撞；阻力与ε/d无关，只与Re有关。

- 湍流



水力光滑管

λ只与Re有关，与 ε/d 无关



完全湍流粗糙管

λ只与 ε/d 有关，与Re无关

五、 非圆形管内的流动阻力

当量直径：$d_e = 4 \times \dfrac{\text{流通截面积}}{\text{润湿周边}} = \dfrac{4A}{\Pi}$

- 套管环隙，内管的外径为d_1，外管的内径为d_2：

$$d_e = 4\frac{\frac{\pi}{4}\left(d_2^2 - d_1^2\right)}{\pi d_2 + \pi d_1} = d_2 - d_1$$

- 边长分别为a、b的矩形管：

$$d_e = 4\frac{ab}{2(a+b)} = \frac{2ab}{a+b}$$

说明：

（1）Re与h_f中（l/d和ε/d）的直径用d_e计算

（2）层流时：

$$\lambda = \frac{C}{\mathrm{Re}}$$

正方形　C＝57

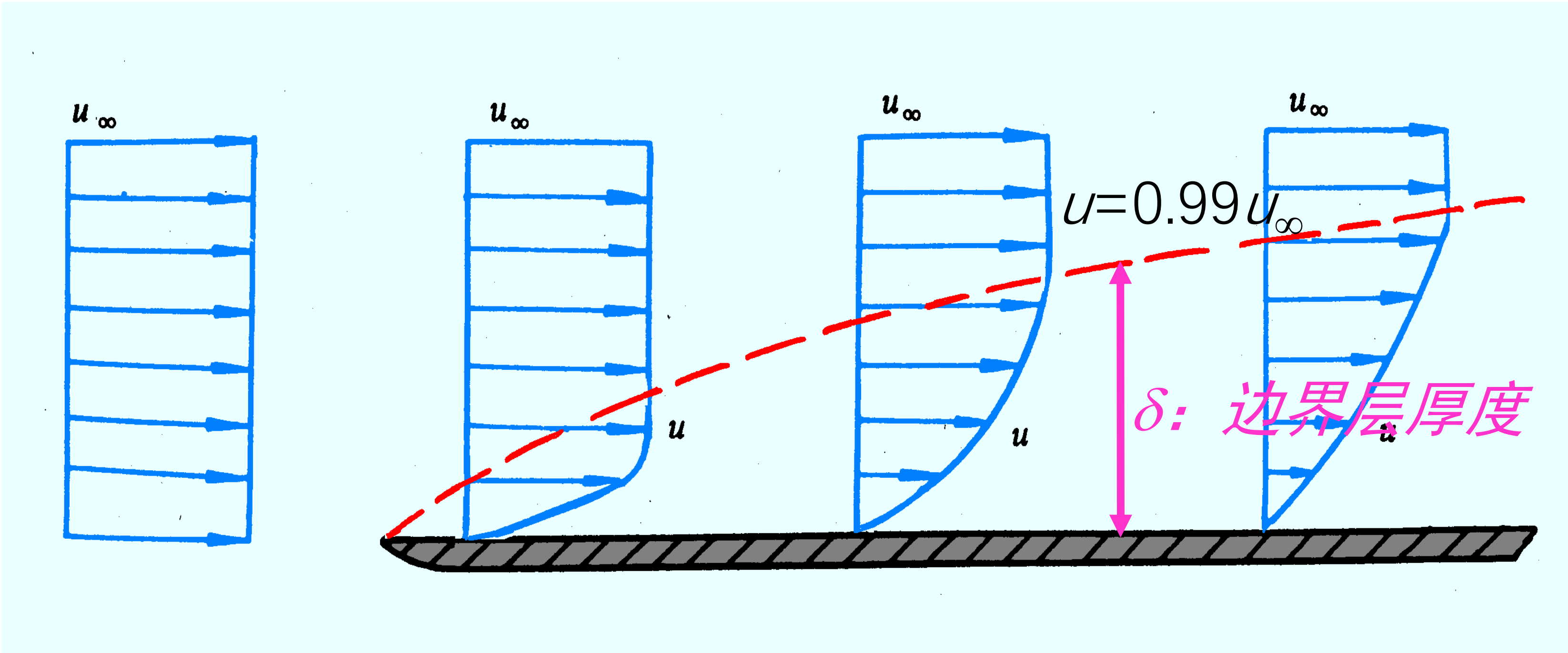
套管环隙 C＝96

（3）流速用实际流通面积计算

$$u \neq \frac{q_V}{0.785 d_e^{\,2}}$$

1.5.3 流体流动边界层

一、边界层的形成与发展



流体在平板上流动时的边界层

● 流动边界层：存在着较大速度梯度的流体层区域，

$u \le 0.99u_\infty$(主体流速)以内区域。

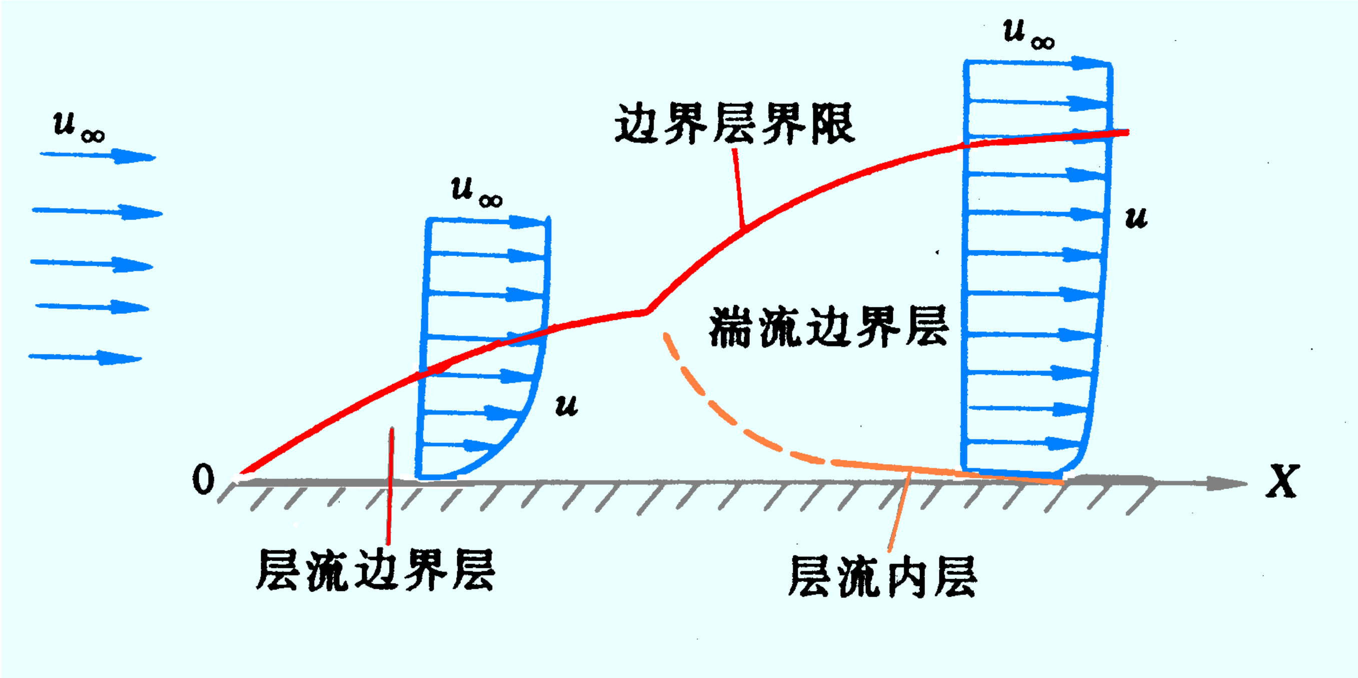
● 边界层厚度：边界层外缘与壁面间的垂直距离。

流动区域分为：边界层区和主流区

● 边界层区（边界层内）：沿板面法向的速度梯度很大，需考虑黏度的影响，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 。

边界层流型：层流和湍流边界层

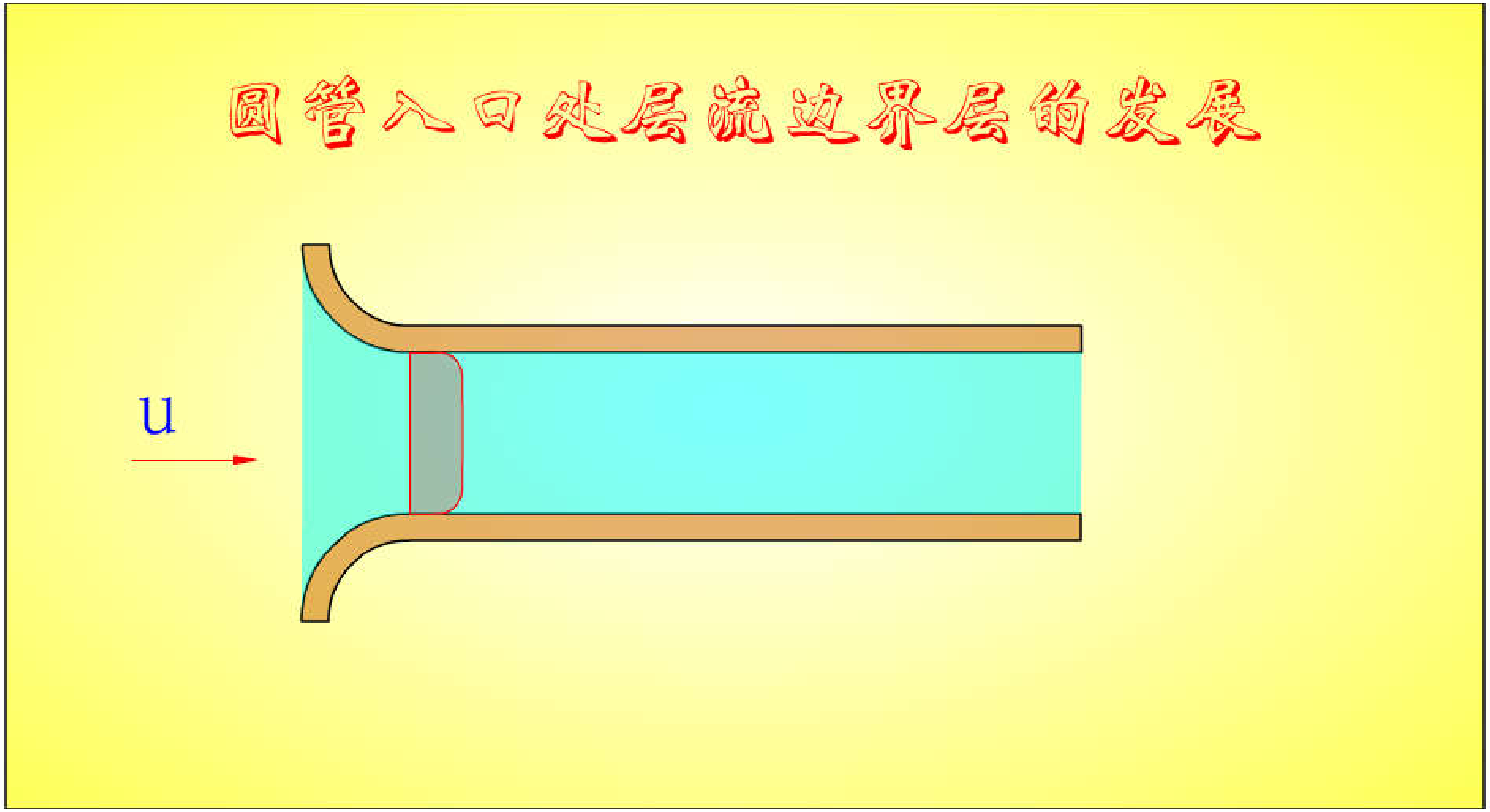


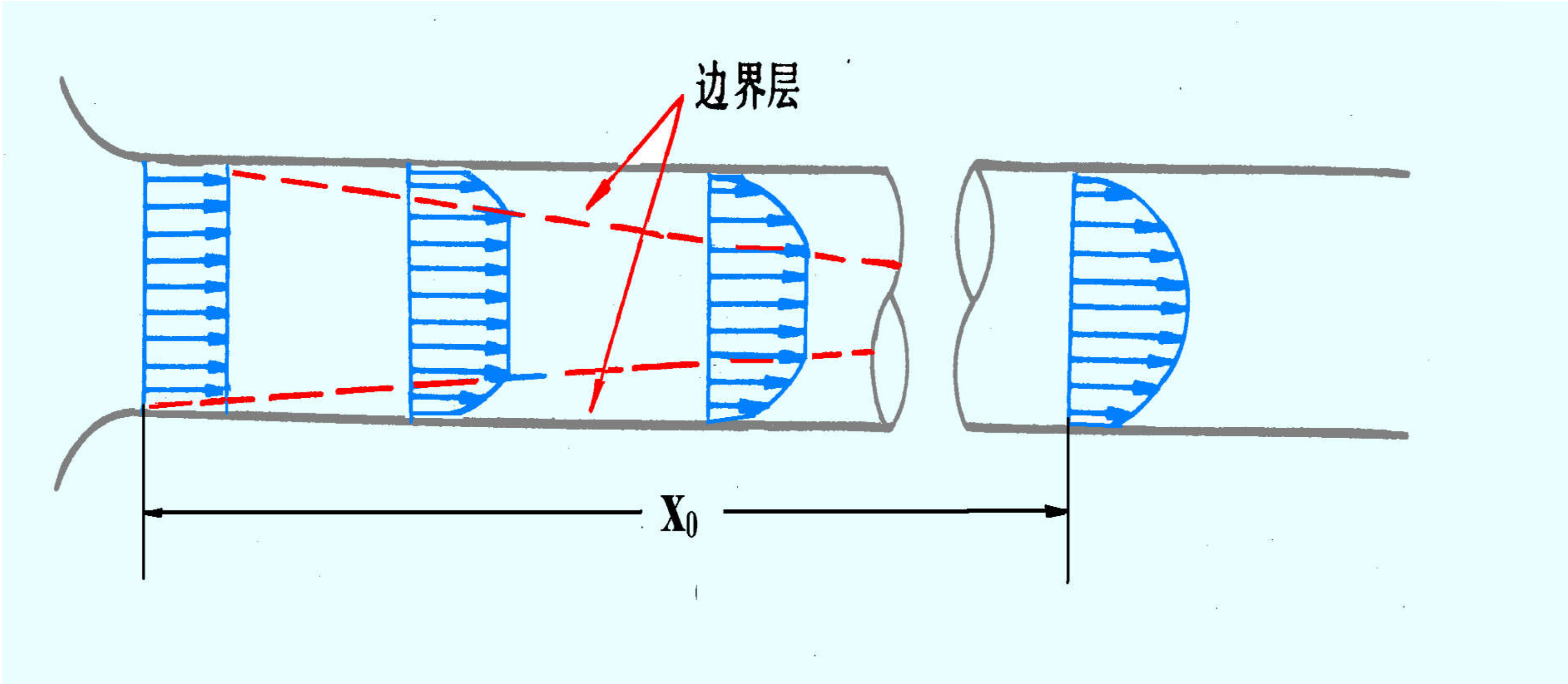
$$R_{ex} = \frac{\rho u_\infty x}{\mu}$$

x—— 离平壁前缘的距离

对光滑平壁：层流$R_{ex} < 2\times10^5$；湍流$R_{ex} > 3\times10^6$

流体在圆管内流动时的边界层





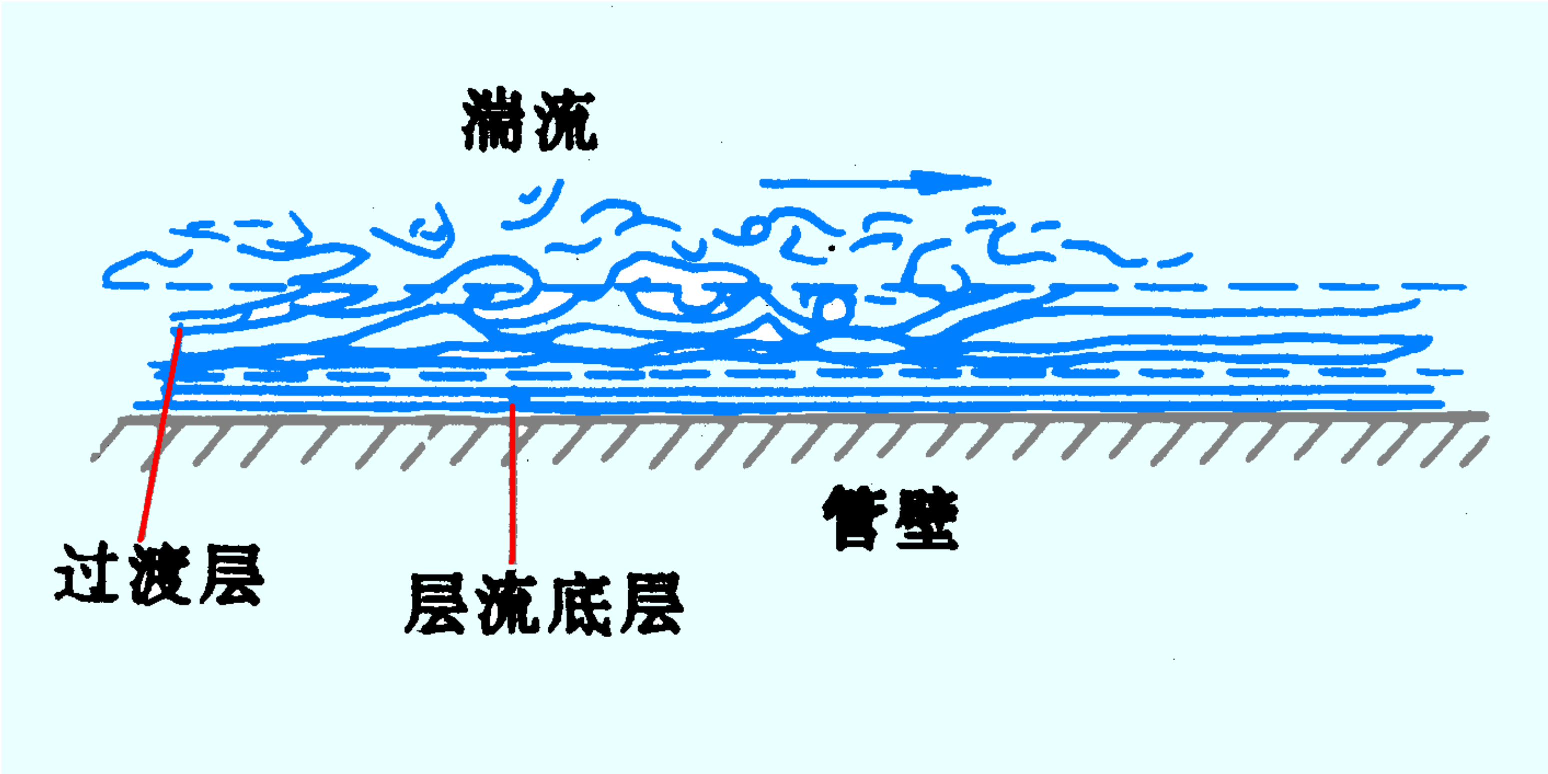
流体在圆管内流动时的边界层

- 充分发展的边界层厚度为圆管的半径，流速分布不再变化；
- 进口段内有边界层内外之分；
- 也分为层流边界层与湍流边界层。

进口段长度x_0：流体达到充分发展所需管长

层流：$\dfrac{x_0}{d} = 0.05\,\mathrm{Re}$　　湍流：$\dfrac{x_0}{d} = 40 \sim 50$

管内湍流流动时：



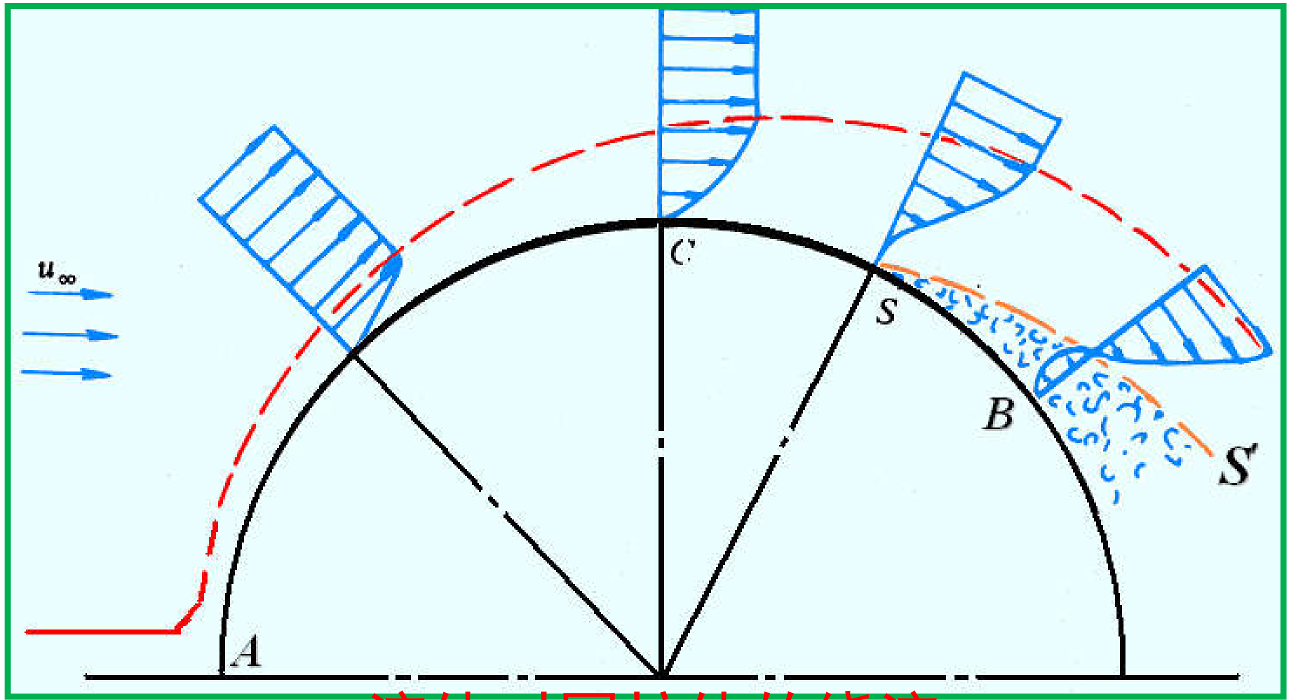
- 湍流主体：质点脉动较大，以湍流黏度为主，径向传递因为质点脉动而大大强化；
- 过渡层：分子黏度与湍流黏度相当；
- 层流内层：质点脉动较小，以分子黏度为主，径向传递只能依赖分子运动。

问题：传递过程的阻力主要存在在哪层流体内？

——层流内层，且推动力与传递阻力成正比。

Re越大，湍动程度越高，层流内层厚度越薄。

二、边界层的分离



流体对圆柱体的绕流

- $A \rightarrow C$：流道$A_{截}$↓，u↑，p↓（顺压梯度）。
- $C \rightarrow S$：流道$A_{截}$↑，u↓，p↑（逆压梯度）。
- S点：物体表面的流体质点在逆压强梯度和黏性剪应力的双重作用下，u降为0。
- SS以下：边界层脱离固体壁面，出现边界层分离；而后倒流回来，形成涡流。

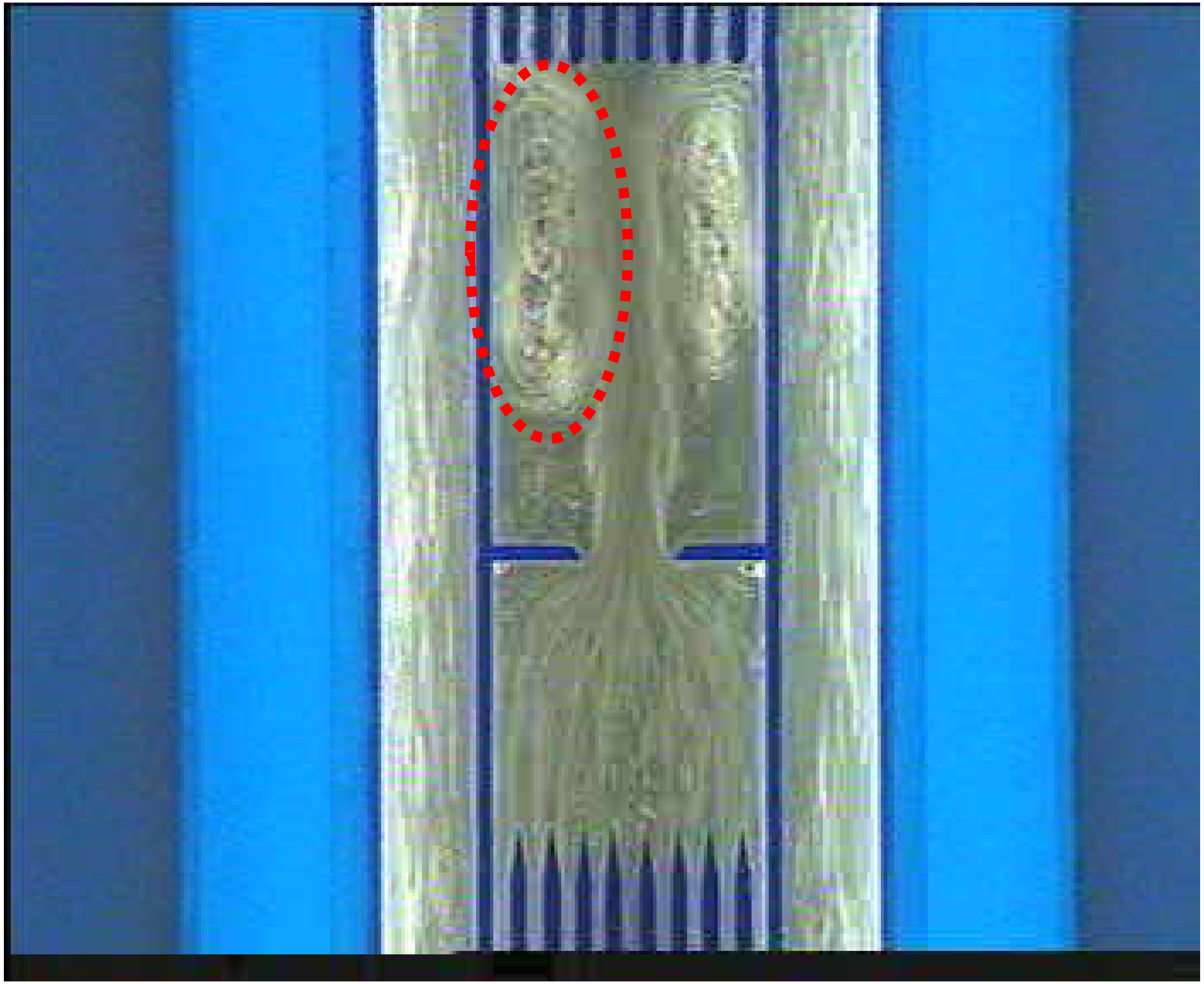
https://www.bilibili.com/video/BV1y54y1a7m4/

边界层分离的后果：

- 产生大量旋涡；
- 要消耗较大的能量。

产生边界层分离的条件：

- 流动过程中存在逆压梯度；
- 外层流体的动量来不及传入。



1.5.4 局部阻力

一、阻力系数法

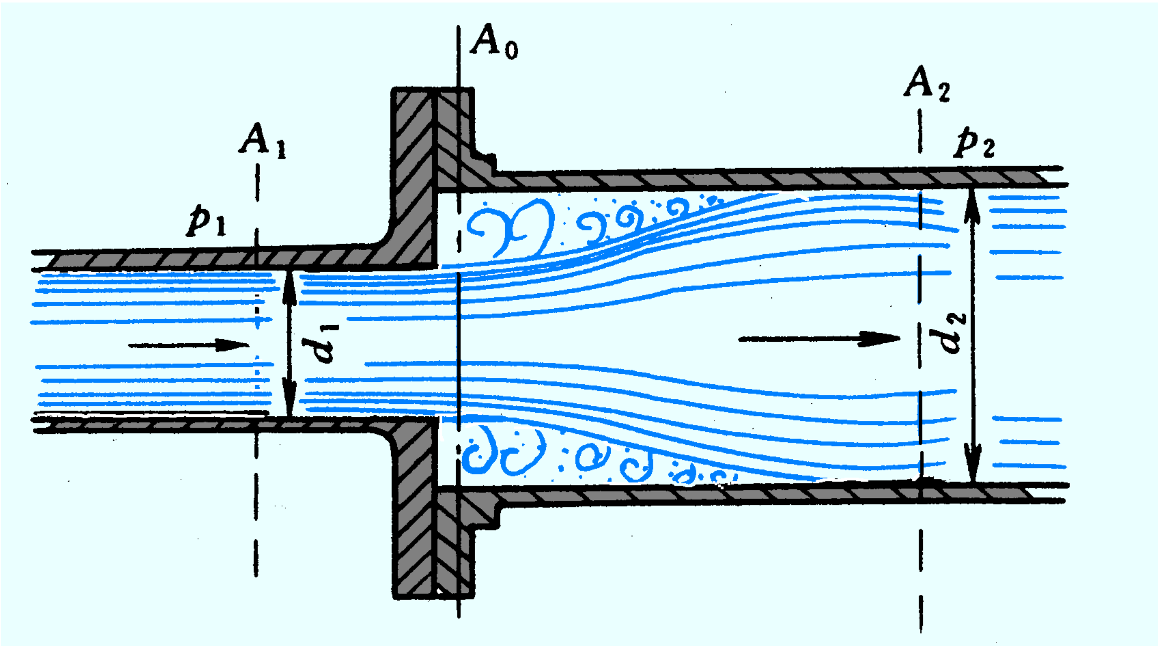
将局部阻力表示为动能的某一倍数。

$$W_f' = \zeta \frac{u^2}{2} \qquad \text{J/kg}$$

或 $$h_f' = \zeta \frac{u^2}{2g} \qquad \text{J/N=m}$$

ζ——局部阻力系数（zita），实验测定。

1. 突然扩大

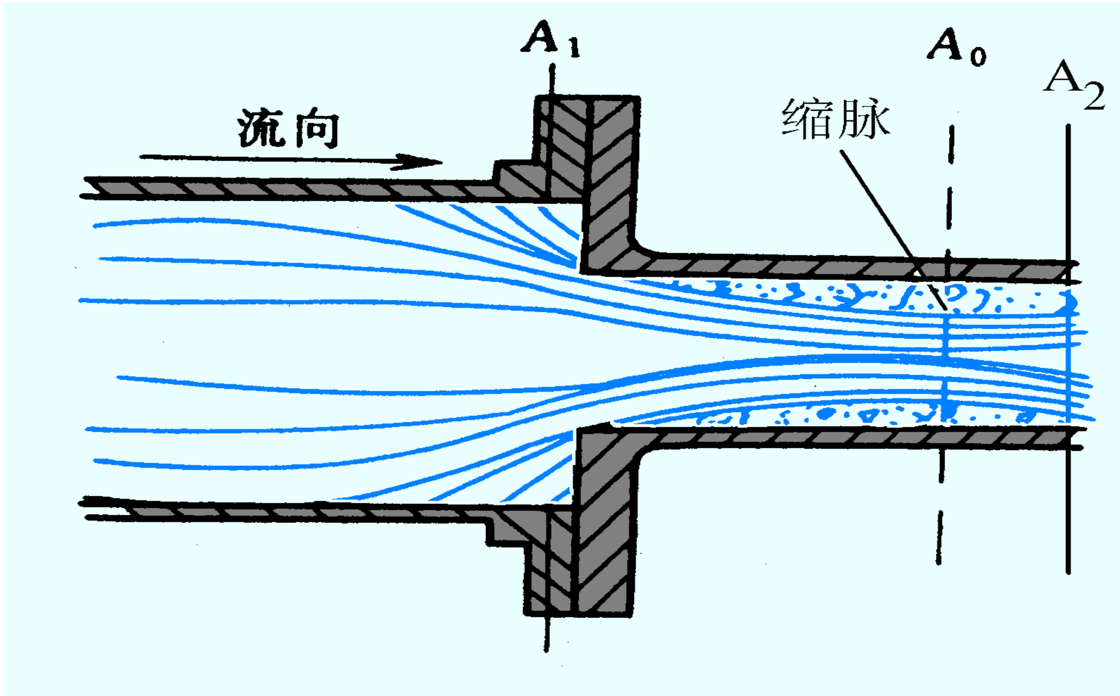


$$\zeta=(1-\frac{A_1}{A_2})^2 \qquad \zeta=0\sim1$$

$$W_f{}'=\zeta\frac{u_1{}^2}{2}$$

u_1—小管中的大速度

2. 突然缩小



$$\zeta = 0.5(1 - \frac{A_2}{A_1}) \qquad \zeta = 0 \sim 0.5$$

$$W_f' = \zeta \frac{u_2^2}{2}$$

u_2 –小管中的大速度

3. 管进口及出口

进口：流体自容器或环境进入管内；

$$\zeta_{进口} = 0.5$$

出口：流体自管子进入容器或排放到环境中。

$$\zeta_{出口} = 1$$

4 . 管件与阀门 —— $p38$

表 1-3　常用管件、阀门的局部阻力系数

名　称	阻力系数 ζ	名　称	阻力系数 ζ	名　称	阻力系数 ζ
弯头，45°	0.35	闸阀		角阀，半开	2.0
弯头，90°	0.75	全开	0.17	止逆阀	
三通	1	半开	4.5	球式	70.0
回弯头	1.5	截止阀		摇板式	2.0
管接头	0.04	全开	6.0	水表，盘式	7.0
活接头	0.04	半开	9.5		

二、当量长度法

将流体流过管件或阀门的局部阻力，折合成直径相同、长度为l_e的直管所产生的阻力 。

$$W_f' = \lambda \frac{l_e}{d}\frac{u^2}{2} \quad 或 \quad h_f' = \lambda \frac{l_e}{d}\frac{u^2}{2g}$$

l_e —— 管件或阀门的当量长度，m；实验测定。—— *p40*

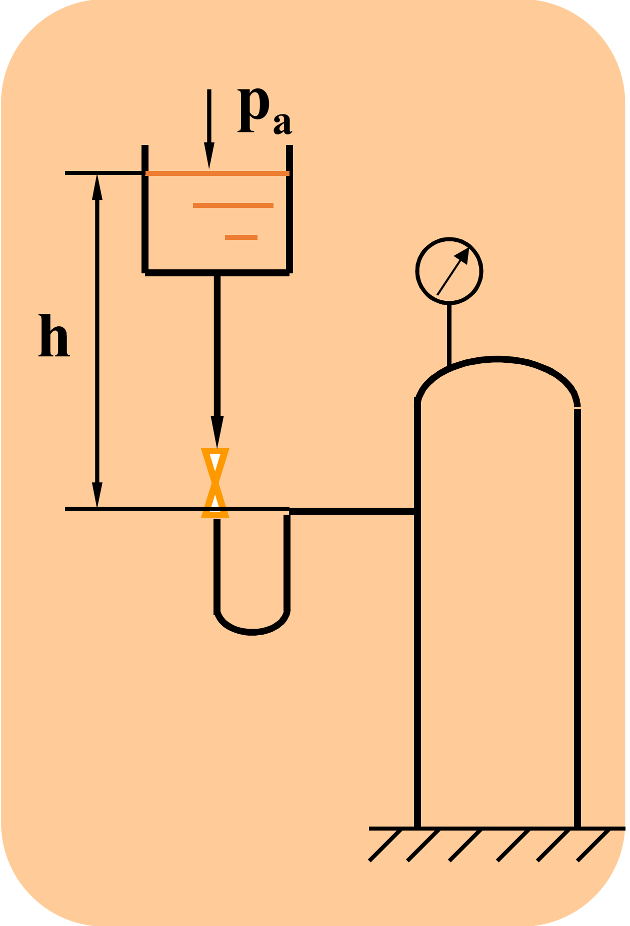
总阻力：$$W_f = \lambda \frac{l+\sum l_e}{d}\frac{u^2}{2}$$

$$W_f = (\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta)\frac{u^2}{2}$$

减少流动阻力的途径：

- 管路尽可能短，尽量走直线，少拐弯；
- 尽量不安装不必要的管件和阀门等；
- 管径适当大些。

例　　溶剂油由敞口高位槽流入精馏塔中。进料处塔中表压为0.02MPa，送液管道为φ38×3mm、长8m的钢管。管路中装有180°回弯头一个，全开球心阀一个，90°标准弯头两个。塔的进料量要维持在$3m^3/h$，试计算高位槽中的液面要高出塔的进料口多少米？(溶剂油密度$861kg/m^3$，粘度$0.643mPa\cdot S$)



取槽内液面为1-1′截面,管子出口内侧为2-2′截面,2-2′截面管中心线为基准水平面。在1-1′和2-2′截面间列柏努利方程

$$z_1g+\frac{1}{2}u_1{}^2+\frac{p_1}{\rho}+W_e=z_2g+\frac{1}{2}u_2{}^2+\frac{p_2}{\rho}+\Sigma W_{f1-2}$$

Z_1=Zm，u_1=0，p_1=0（表），We=0

Z_2=0，u_2=u，$p_2 = 0.02\times10^6$ Pa

$$\mathbf{u_2=u=\frac{q_V}{A}=\frac{3/3600}{0.785\times0.032^2}=1.04m/s}$$

$$\Sigma W_{f1-2}=?$$

$$\mathrm{Re} = \frac{d\rho u}{\mu} = \frac{0.032 \cdot 1.04 \cdot 861}{0.643 \times 10^{-3}} = 4.45 \times 10^{4}$$

$$\varepsilon / d = \frac{0.3}{32} = 0.00938$$

查摩擦因数图得 $\lambda = 0.039$

进口突然缩小 $\zeta_1 = 0.5$

180º回弯头 $\zeta_2 = 1.5$

90º标准弯头 $\zeta_3 = 0.75$

球形阀 $\zeta_4 = 6.0$

$$\sum W_{f1-2} = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta\right)\frac{u^2}{2}$$

$$= \left(0.039 \times \frac{8}{0.032} + 0.5 + 0.75 \times 2 + 1.5 + 6.0\right)\frac{1.04^2}{2}$$

$$= 10.41$$

Z=3.48m

小结1.5

范宁公式

管路总阻力 ＝ 直管阻力 ＋ 局部阻力

$$\Delta p_f = \lambda \frac{l}{d}\frac{\rho u^2}{2}$$ Pa

$$W_f = \lambda \frac{l}{d}\frac{u^2}{2}$$ J/kg

$$h_f = \lambda \frac{l}{d}\frac{u^2}{2g}$$ m

边界层概念；层流内层概念；边界层分离的条件及后果

摩擦阻力系数、局部阻力系数法、当量长度法

1. 直管阻力计算通式—范宁公式

层流： $\Delta p_f = \dfrac{32\mu l u}{d^2}$ ———哈-泊方程 $\lambda = \dfrac{64}{\mathrm{Re}}$

湍流： 量纲分析法：目的、基础、基本定律

$$\frac{\Delta p_f}{\rho u^2} = \psi\left(\frac{\rho d u}{\mu}, \frac{l}{d}, \frac{\varepsilon}{d}\right) \Rightarrow \Delta p_f = \underbrace{\phi\left(\mathrm{Re}, \frac{\varepsilon}{d}\right)}_{\lambda} \frac{l}{d}\frac{\rho u^2}{2}$$

经验关联图
经验关联式

Moody摩擦系数图：层流、过渡区、湍流区、完全湍流区

**非圆形管—— d_e

2. 局部阻力 ——— ζ和 l_e

总阻力： $W_f = \lambda \dfrac{l + \sum l_e}{d}\dfrac{u^2}{2}$ $W_f = (\lambda \dfrac{l}{d} + \sum \zeta)\dfrac{u^2}{2}$

例题：用泵把20℃的苯从地下储罐送到高位槽，流量为300L/*min*；高位槽液面比储罐液面高10*m*。泵吸入管路用φ89×4*mm*的无缝钢管，直管长为15*m*，管路上装有一个底阀（可按摇板式止逆阀全开时，ζ=2）、一个标准弯头；泵排出管用φ57×3.5*mm*的无缝钢管，直管长度为50*m*，管路上装有一个全开的闸阀、一个全开的截止阀和三个标准弯头。储罐及高位槽液面上方均为大气压，且储罐液面维持恒定。试求泵的轴功率？设泵的效率为70%。

20 ℃苯：ρ＝880kg/m^3; μ=6.5*10^{-4}Pa.s