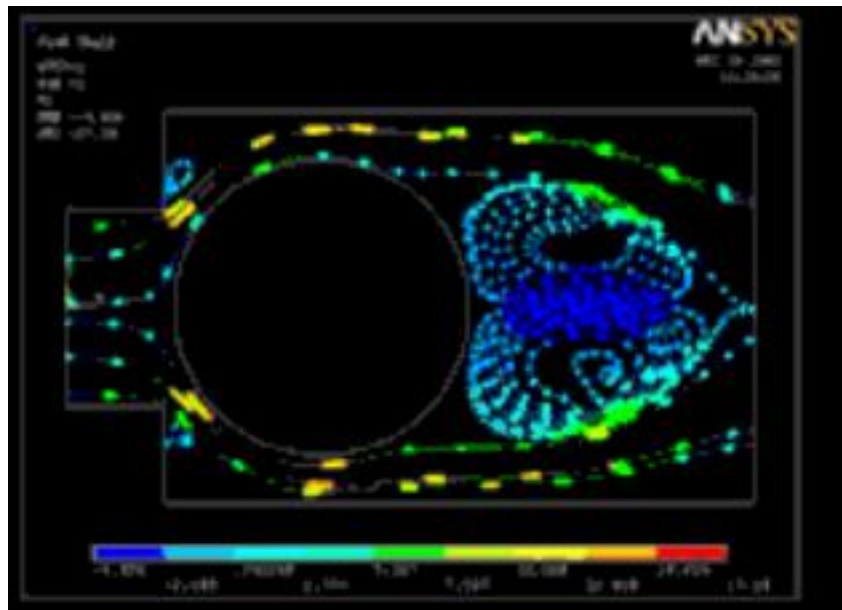


第六章 典型流体流动

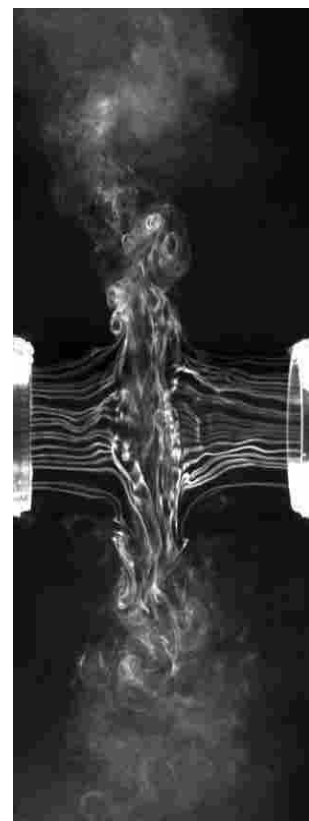
工程中常见的流动还包括**绕流**、**射流**和**撞击流**等



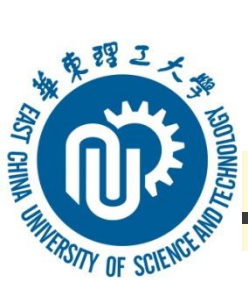
绕 流



射 流

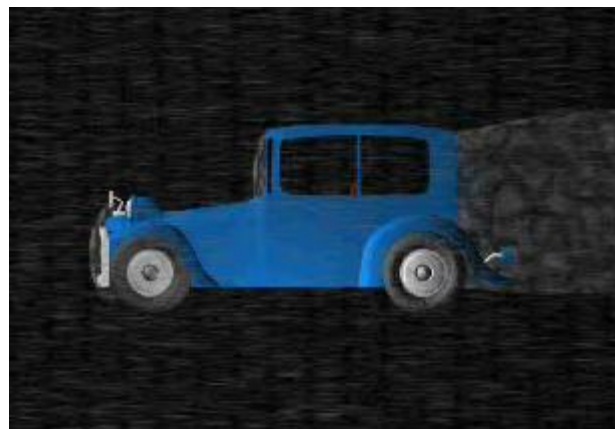


撞击流

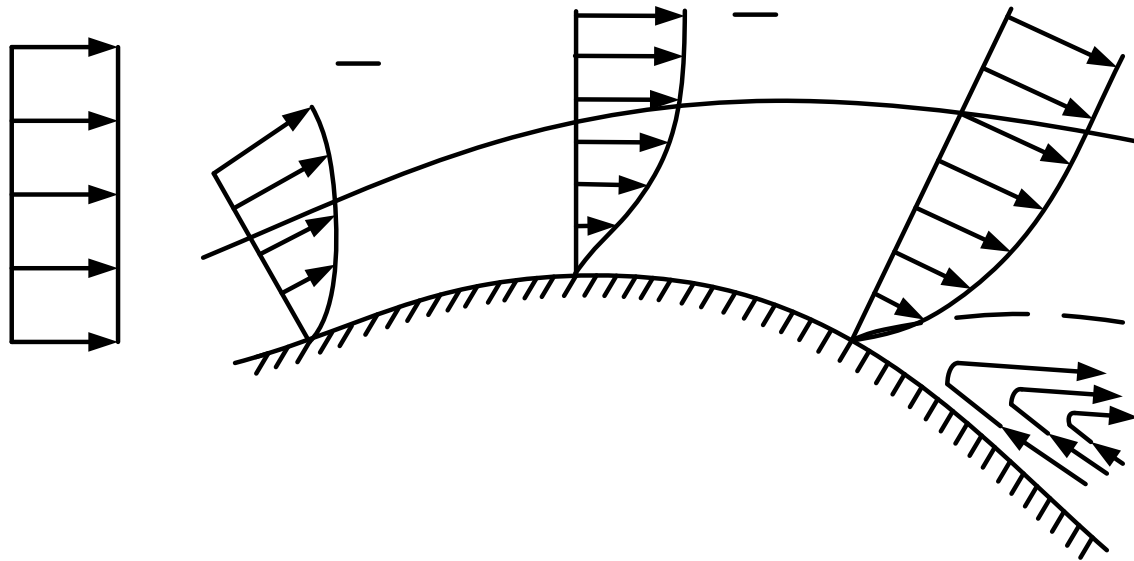


6.1 绕流

绕流是指流体绕物体外部的流动，例如对流体机械和机翼的绕流，以及管道内外热交换时的绕圆柱管道流动等。

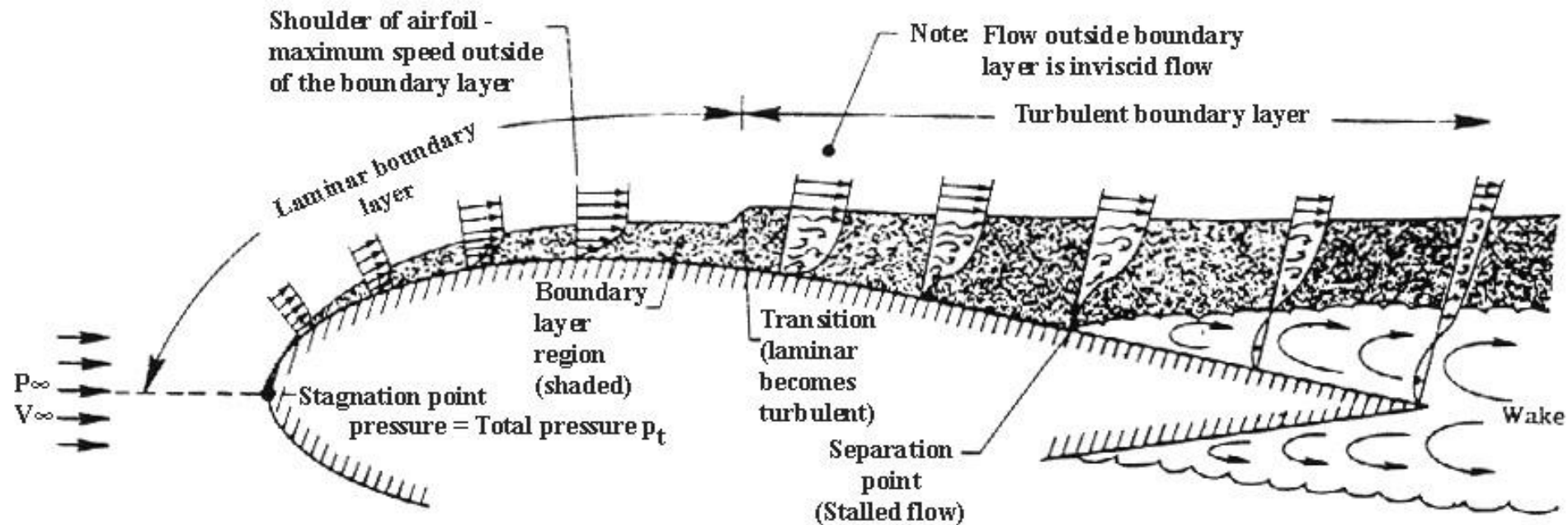


6.1.1 曲面边界层分离现象



- 在M点前方，边界层内压强沿程减小， $\frac{\partial p}{\partial x} < 0$ ；
- 在M点后方，边界层内压强沿程增大， $\frac{\partial p}{\partial x} > 0$ 。 靠近壁面的流体，在逆压作用下，将产生倒流现象，并发展成旋涡，这就是曲面边界层的分离现象。

6.1.1 曲面边界层分离现象

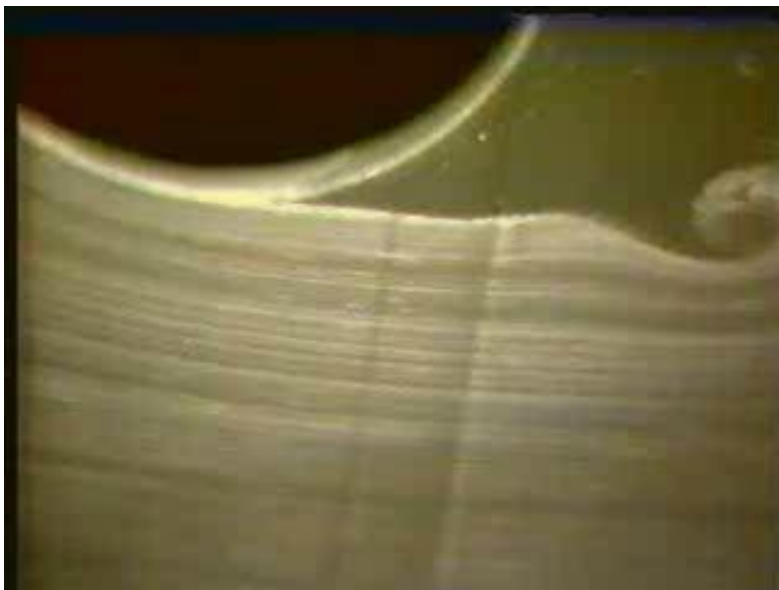


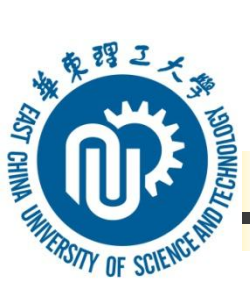
四个区域：层流边界层，过渡区域，湍流边界层，尾流区

两个点：驻点，分离点

6.1.1 曲面边界层分离现象

- ▶ 边界层分离的**根本原因**：流体粘性；
- ▶ 边界层分离的**条件**：逆压梯度；
- ▶ 边界层分离的**表现**：流体元的滞止和倒流。

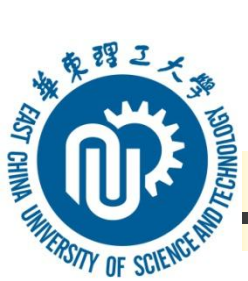




6.1.2 绕流阻力

绕流阻力(*drag of round flow*)包括**形状阻力**(*form drag*)和**摩擦阻力**(*friction drag*)两部分，物体所受到的阻力与边界层分离现象直接相关。

- 由于前后部的**压力差产生的阻力**叫做形状阻力，也称为压差阻力，一般由实验测定；
- 摩擦阻力是由于流体与物体**表面摩擦而产生的切应力**，可由边界层理论计算。
- 形状阻力是由于固体壁面**正压力**分布不均与所产生；而摩擦阻力是由于壁面上的**切应力**分布不均匀所导致。



6.1.2 绕流阻力

绕流阻力 (F_D) = 摩擦阻力 + 形状阻力 $F_D = F_f + F_p$

$$F_D = C_D \frac{\rho U_0^2}{2} A$$

$$F_f = C_f \frac{\rho u_0^2}{2} A_f \quad F_p = C_p \frac{\rho u_0^2}{2} A_D$$

式中： F_D 为物体受到的绕流阻力；

C_D 为绕流阻力系数；

U_0 为未受干扰时的来流速度；

ρ 为流体的密度；

A_D - 物体与来流垂直方向的迎流投影面积；

A_f - 物体的表面积。

6.1.2 绕流阻力

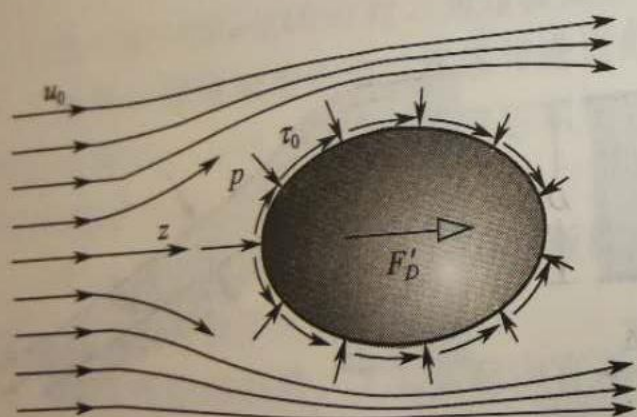


图 2-14 流体绕三维物体流动时的曳力与阻力

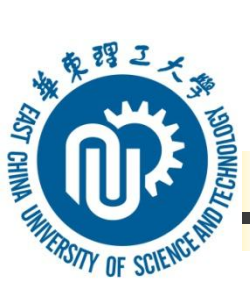
F_D 也就表示为

$$F_D(\text{流动阻力}) = F_p(\text{形状阻力}) + F_f(\text{摩擦阻力}) \quad (2-1)$$

即，流动阻力 F_D 一般由形状阻力 F_p 和摩擦阻力 F_f 两部分构成。其中，形状阻力 F_p 是物体壁面上正压力分布不均所产生的，又称为压差阻力；而摩擦阻力 F_f 则是固体壁面上切应力分布不均匀所产生的。

表示，而固体壁面在流动方向对流体的反作用力称为流动阻力，用 F_D 表示，显然 $F_D = -F'_D$ 。

形状阻力与摩擦阻力 图 2-14 所示为流体绕三维物体的流动，其中流体作用于固体壁面上的力一般可分为法向的正压力 p 和切向的切应力 τ_0 两个部分；如果用 F'_p 表示正压力 p 在流动方向 (z 方向) 的作用总力， F'_f 表示切应力 τ_0 在流动方向的作用总力，则按曳力 F'_D 的定义有： $F'_D = F'_p + F'_f$ 。相应地，固体壁面的反作用力 F_D 也就表示为



6.1.2 绕流阻力

- C_D 的主要决定因素：雷诺数、物体的形状、物体表面粗糙度等；
- C_D 很难由理论或数值计算得出，多数由实验确定。

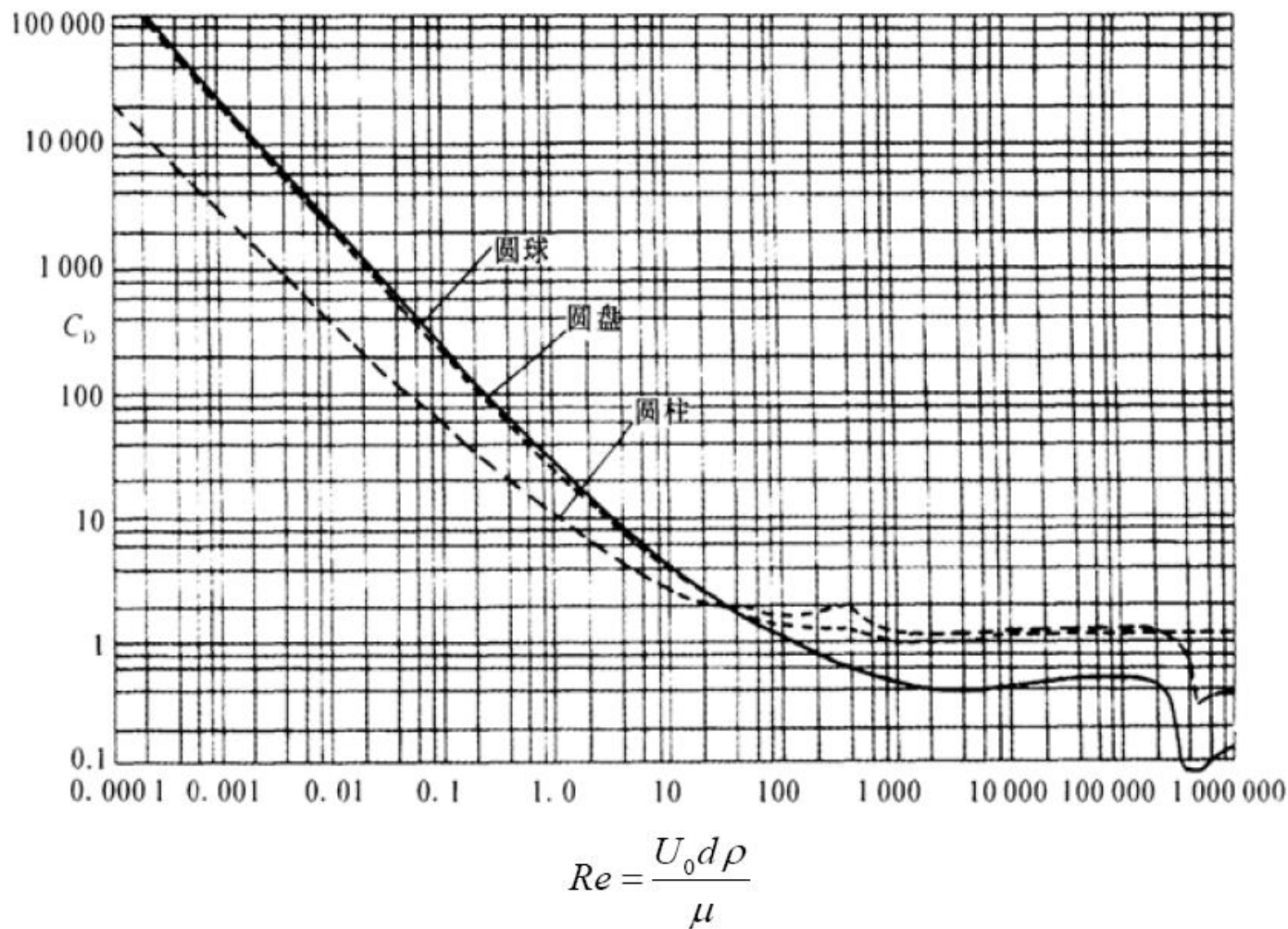
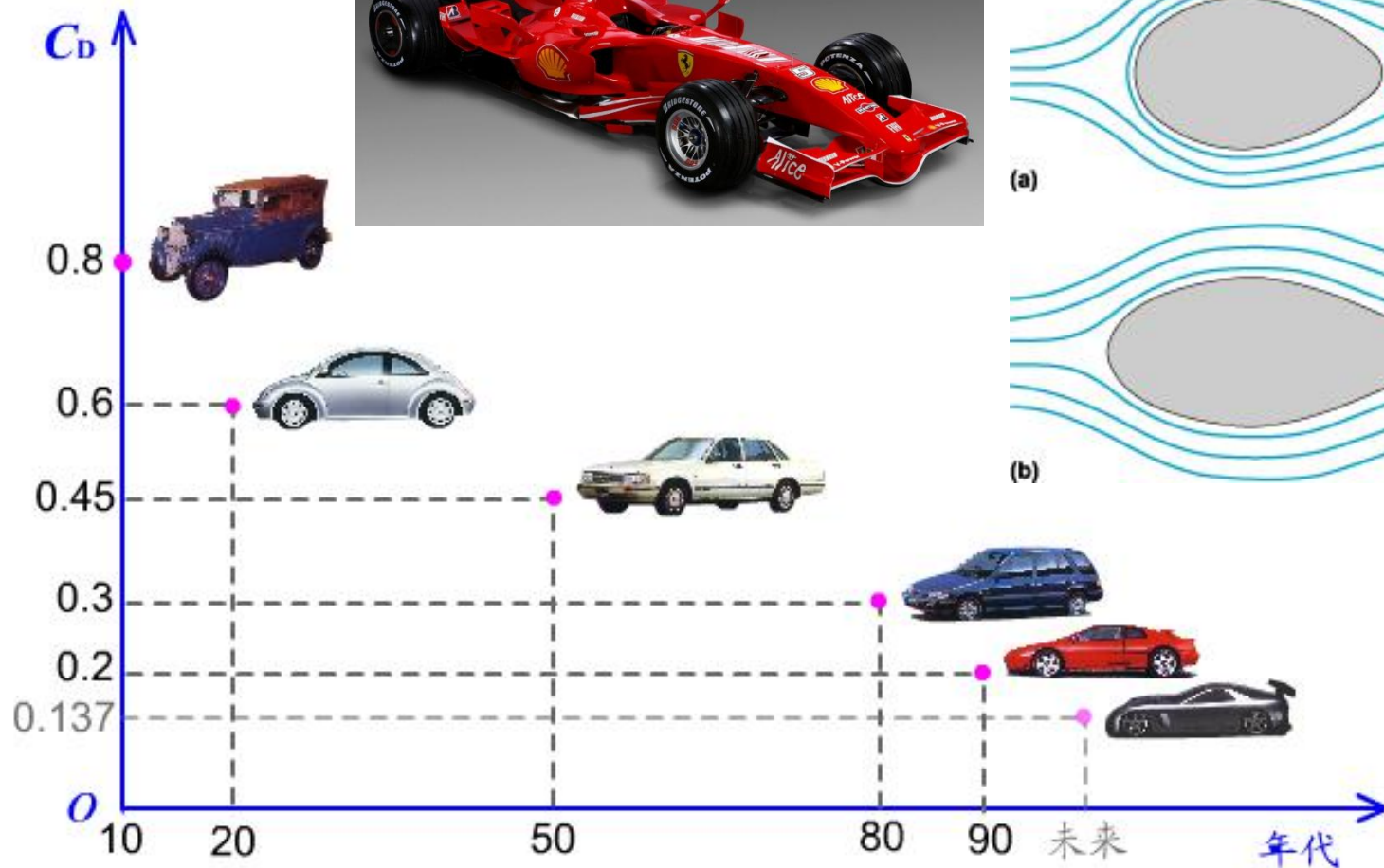
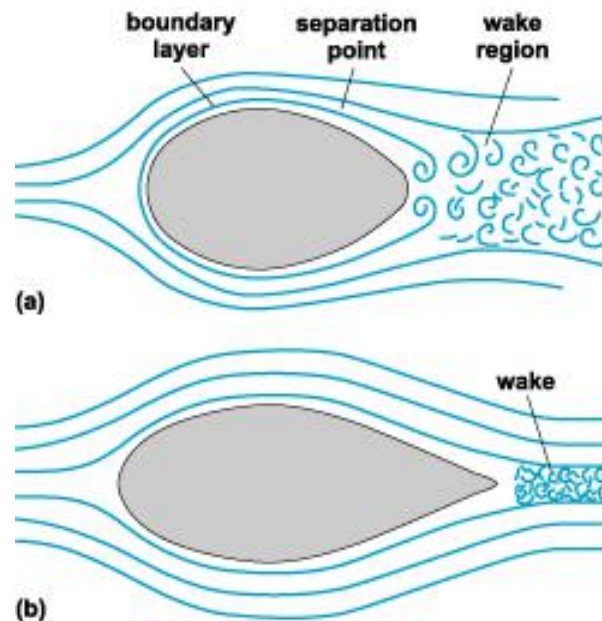


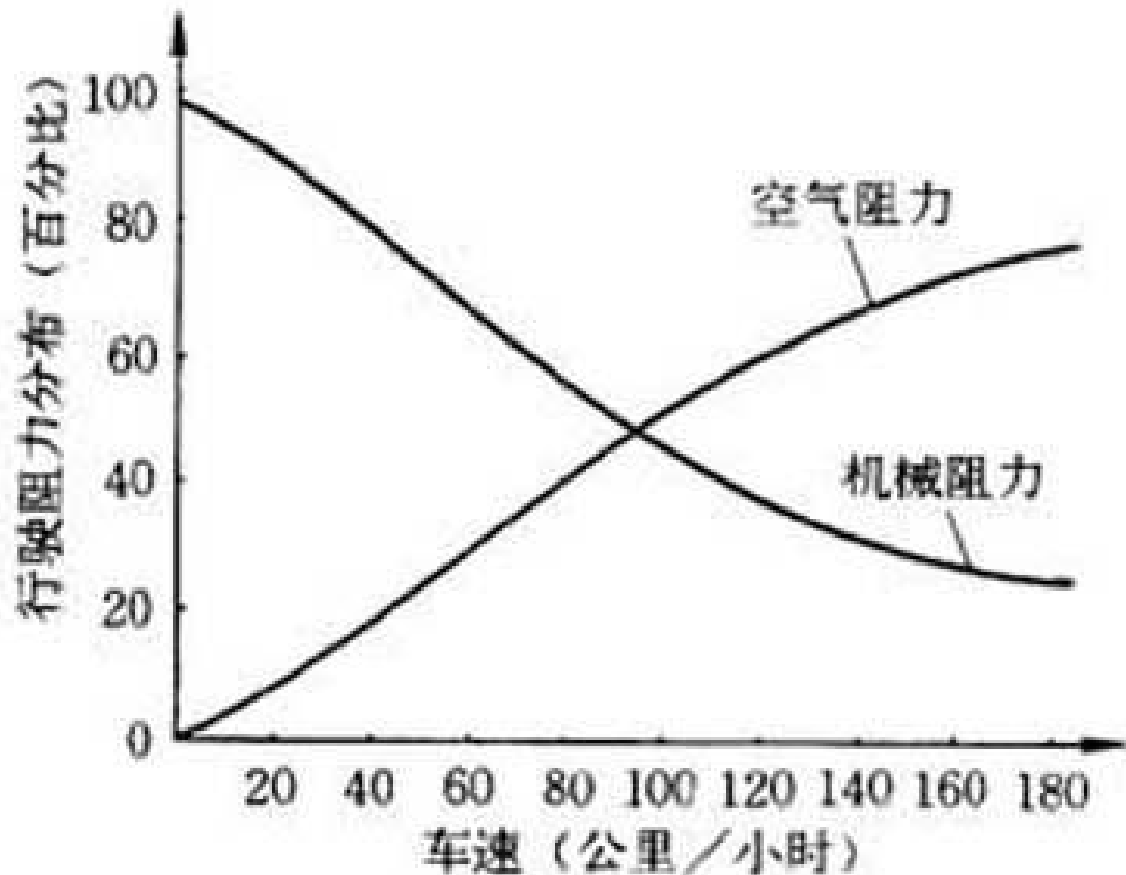
图6-2 圆球、圆盘及无限长圆柱的绕流阻力因数曲线

减小绕流阻力的措施



减小阻力案例：车型设计

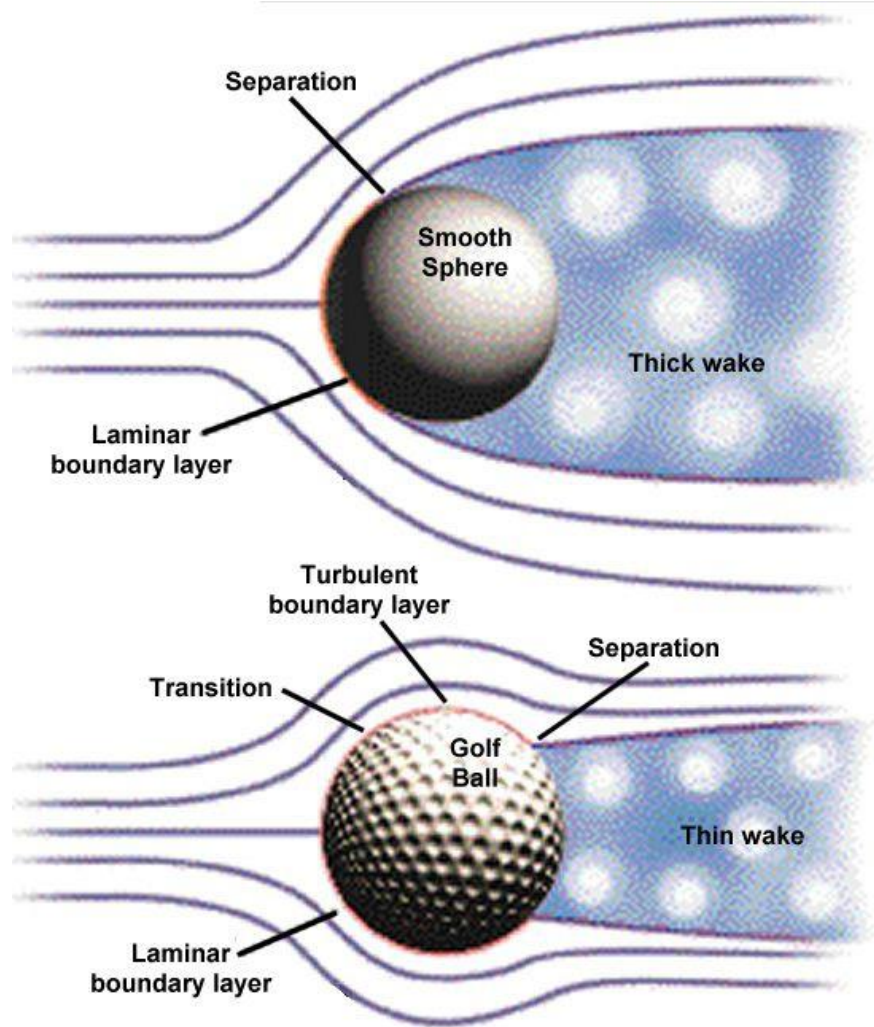
减小绕流阻力的措施



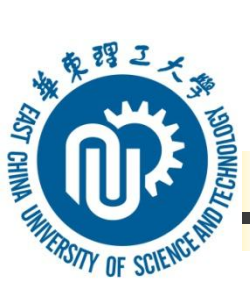
从图表中可以看到
在车速小于
90km/h的情况下
，车辆行驶阻力主
要来自机械摩擦。
在车速大于
90km/h的情况下
，空气阻力成为主
要的行驶阻力。

车速与空气阻力的关系
车为4门轿车；正投影面积2.04米²；
重1670千克； $C_d=0.45$

减小绕流阻力的措施



减小阻力案例：高尔夫球



减小绕流阻力的措施



为何国际泳联决定全球禁用鲨鱼皮泳衣？

<https://baike.baidu.com/item/%E9%B2%A8%E9%B1%BC%E7%9A%AE%E6%B3%B3%E8%A1%A3/4992198?fr=aladdin>

6.1.3 绕球体的运动

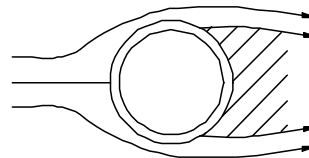
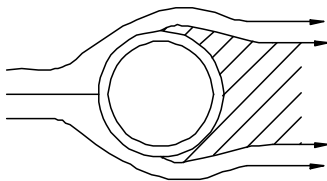
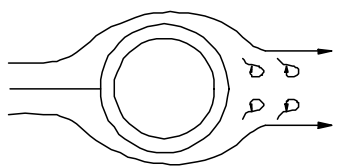
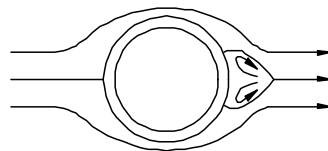
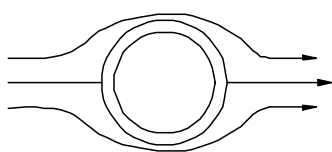
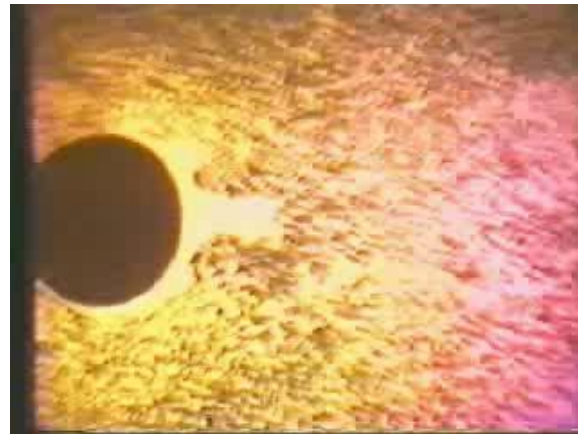
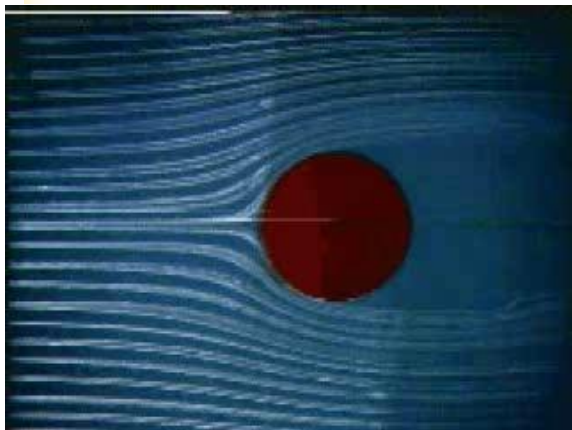
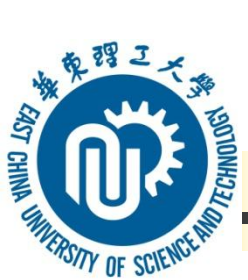


图6-4 不同雷诺数下圆柱绕流示意图



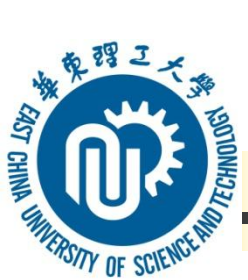
6.1.3 绕球体的运动

以三维钝体圆球绕流为例，分析绕流阻力因数 C_D 的变化规律：

- 当 $Re = \frac{U_0 d}{\nu} < 1$ 时，流体平顺的绕过球体，**不产生边界层分离现象，尾部不产生旋涡。**

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad F_D = 3\pi\mu d U_0$$

- 当 $Re > 1$ 时，球后部表面**出现层流边界层的分离**，且分离点随 Re 的增大而前移，同时绕流阻力中摩擦阻力比重下降而形状阻力比重上升。
- 当 $Re = 10^3 \sim 3 \times 10^5$ 时，边界层分离点位置相对稳定，摩擦阻力占的比重很小， **C_D 值在0.4左右，几乎与 Re 无关。**
- 当 $Re = 3 \times 10^5$ 时，分离点上游的**边界层由层流转变为湍流**，造成分离点后移，尾流区域减小，而大大降低了形状阻力，故绕流阻力出现“跌落”现象，**值迅速减小至0.1左右。**



6.1.3 绕球体的运动

(1) 球体绕流的总阻力

与圆柱体绕流类似，阻力系数 C_D 是雷诺数 Re 的函数，其总阻力按下式计算：

$$F_D = C_D \frac{\rho u_0^2}{2} A_D = C_D \frac{\rho u_0^2}{2} \frac{\pi d^2}{4}$$

对于球形颗粒，在不同的雷诺数范围内，可由 Re 计算出对应的阻力系数值。

$Re < 2$ 为斯托克斯定律区 $C_D = \frac{24}{Re}$

$2 < Re < 500$ 为阿伦 (Allen) 区 $C_D = \frac{18.5}{Re^{0.6}}$

$500 < Re < 2 \times 10^5$ 为牛顿定律区 $C_D \approx 0.44$

当 $Re > 3 \times 10^5$ 时，阻力系数急剧减小， $C_D \approx 0.2$

(2) 颗粒的沉降速度

颗粒运动微分方程

重力

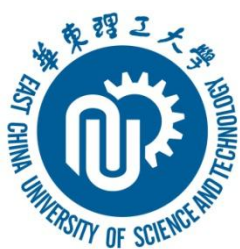
$$F_g = mg$$

浮力

$$F_b = \frac{m}{\rho_p} \rho g$$

阻力

$$F_D = C_D \frac{\rho u_0^2}{2} A_D$$



6.1.3 绕球体的运动

$$F_g - F_b - F_D = m \frac{du}{dt}$$

综合上式：

$$\frac{du}{dt} = \left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} \right) g - \frac{C_D A_D}{2m} \rho u^2$$

对于直径为d球形颗粒，运动微分方程可写为：

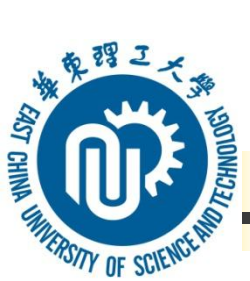
$$\frac{du}{dt} = \left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} \right) g - \frac{3C_D}{4d} \frac{\rho}{\rho_p} u^2 \quad (6-12)$$

颗粒自由沉降速度

对于球形颗粒，当 $du/dt = 0$ 时，由式(6-12)可得：

$$u_t = \sqrt{\frac{4dg(\rho_p - \rho)}{3C_D \rho}}$$

在不同的雷诺数范围取不同的 C_D 值，可得不同的自由沉降速度公式。



6.1.3 绕球体的运动

若处于斯托克斯定律区($Re < 2$), 则有:
$$u_t = \frac{d^2 (\rho_p - \rho) g}{18 \mu}$$

在阿仑区($2 < Re < 500$), 则有:

$$u_t = 0.1528 \frac{d^{1.143} [(\rho_p - \rho) g]^{0.7143}}{\rho^{0.2857} \mu^{0.4286}} = 0.27 \sqrt{\frac{d (\rho_p - \rho) g Re^{0.6}}{\rho}}$$

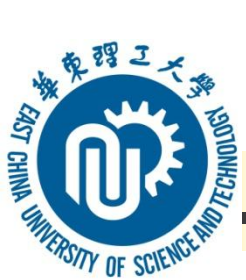
如果在牛顿定律区 ($500 < Re < 2 \times 10^5$), 则有:

$$u_t = 1.74 \sqrt{\frac{d (\rho_p - \rho) g}{\rho}}$$

当流体作水平流动时, 不会影响颗粒的沉降速度。

当流体垂直向上流动时, 颗粒的绝对速度 u_p 等于颗粒沉降速度 u_t 与流体速度 u_f 之差,

$$u_p = u_f - u_t$$



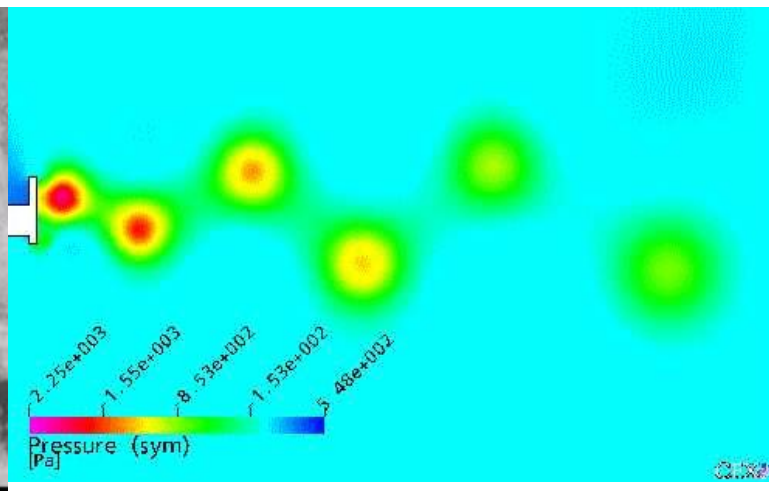
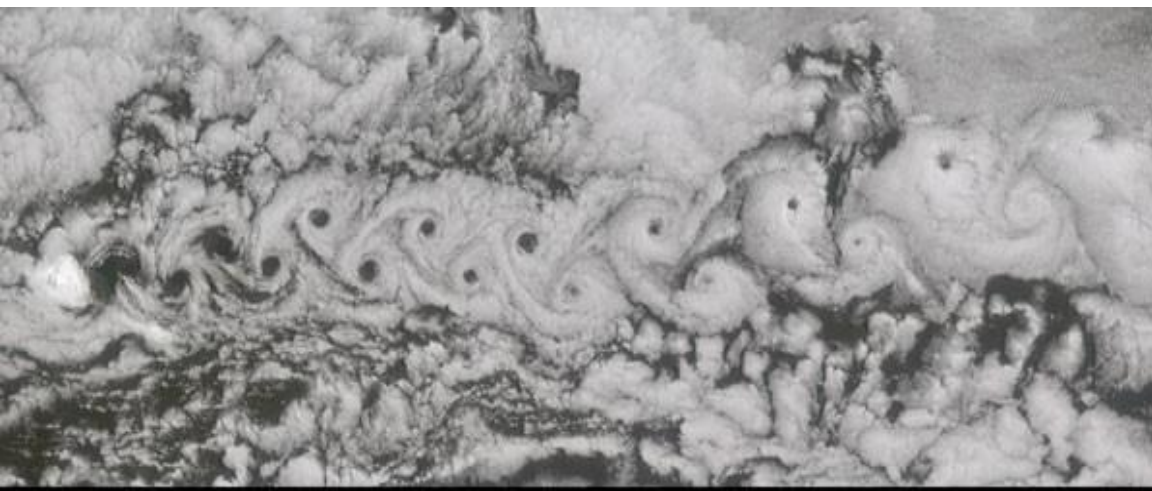
6.1.4 圆柱绕流

卡门涡街

$$f = St \frac{U_{\infty}}{d}$$

随着雷诺数的增大，边界层首先出现**分离**，分离点并不断的**前移**，当雷诺数大到一定程度时，会形成两列几乎稳定的、非对称性的、交替脱落的、旋转方向相反的**漩涡**，并随主流向下游运动，这就是卡门涡街。

<https://baijiahao.baidu.com/s?id=16232715>





6.1.5 理想流体绕圆柱流动

重力场中物体从静止开始在理想流体中运动，或者无穷远处均匀来流绕物体运动，由于符合**理想、正压、体积力有势**等条件，因而这种运动是**无旋的**。

$$\psi = U_0 y - \frac{M}{2\pi} \frac{y}{x^2 + y^2} = U_0 y \left(1 - \frac{M}{2\pi U_0} \frac{1}{x^2 + y^2} \right)$$

$$\psi = U_0 y \left(1 - \frac{M}{2\pi U_0} \frac{1}{x^2 + y^2} \right) = C \quad y \left(1 - \frac{M}{2\pi U_0} \frac{1}{x^2 + y^2} \right) = 0$$

$$y = 0 \quad x^2 + y^2 = \frac{M}{2\pi U_0} \quad \frac{M}{2\pi U_0} = r_0^2$$

$$\psi = U_0 y \left(1 - \frac{r_0^2}{x^2 + y^2} \right) = U_0 \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right) r \sin \theta$$

$$u_r = \frac{\partial \psi}{\partial r} = U_0 \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right) \cos \theta$$

$$\varphi = U_0 x + \frac{M}{2\pi} \frac{x}{x^2 + y^2} = U_0 x \left(1 + \frac{r_0^2}{x^2 + y^2} \right) = U_0 r \cos \theta \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right) \quad u_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} = -U_0 \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right) \sin \theta$$

$$u_\theta = -2U_0 \sin \theta$$

6.1.5 理想流体绕圆柱流动

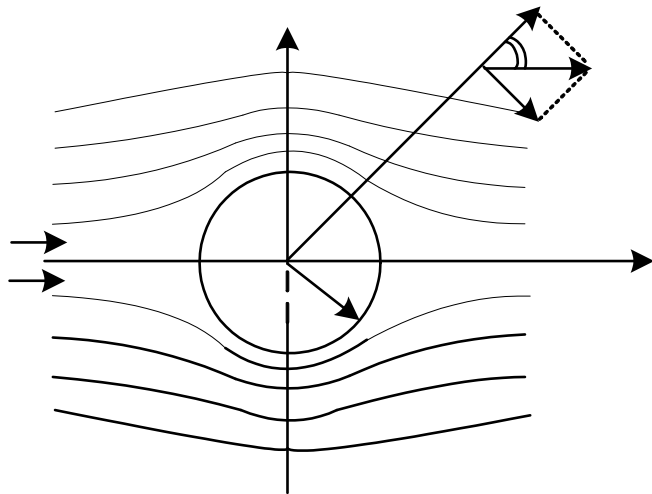


图6-5 绕圆柱体的流动

$$p + \frac{\rho u^2}{2} = p_0 + \frac{\rho U_0^2}{2} \quad \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \rho U_0^2} = 1 - \left(\frac{u}{U_0} \right)^2$$

$$\frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \rho U_0^2} = 1 - \frac{u_\theta^2 + u_r^2}{U_0^2} = -2 \frac{r_0^2}{r^2} (\sin^2 \theta - \cos^2 \theta) - \frac{r_0^4}{r^4}$$

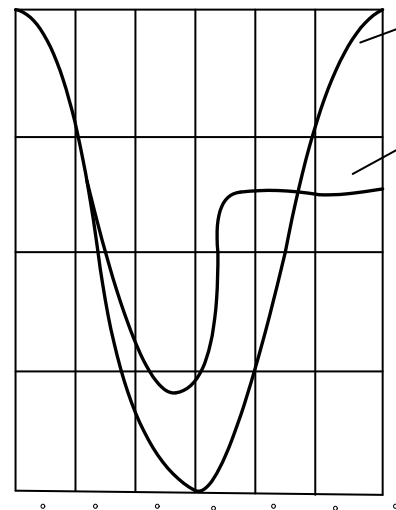
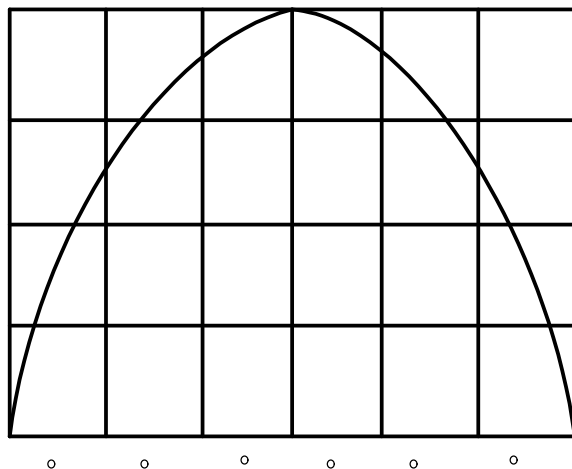
$$\frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \rho U_0^2} = 1 - \sin^4 \theta$$

当 $\theta=0$ 和 $\theta=180^\circ$ 时 $p_A = p_C = p_0 + \frac{1}{2} \rho U_0^2$

当 $\theta = \frac{\pi}{2}$ 或 $\theta = \frac{3}{2} \pi$ 时 $p_B = p_D = p_0 - \frac{3}{2} \rho U_0^2$

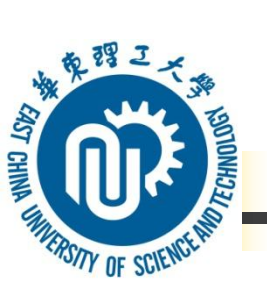
这表明，驻点压力大于无限远处来流的压力，且圆柱体中间截面上的压力是最低的。

6.1.5 理想流体绕圆柱流动



(b)

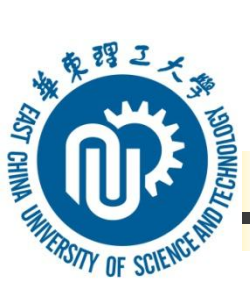
图6-6 绕圆柱体流动的速度与压力分布



6.2 射流

主要内容:

1. 射流定义及分类
2. 射流形成机理及分区
3. 射流流动特征



1. 射流定义

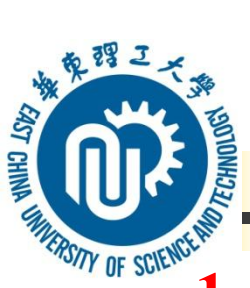
射流(jet)是指流体在一定条件下，从某一通道射入一速度和密度均匀的流体中(简称环境流体)，是流体运动的一种重要类型。



水射流



喷嘴射流雾化

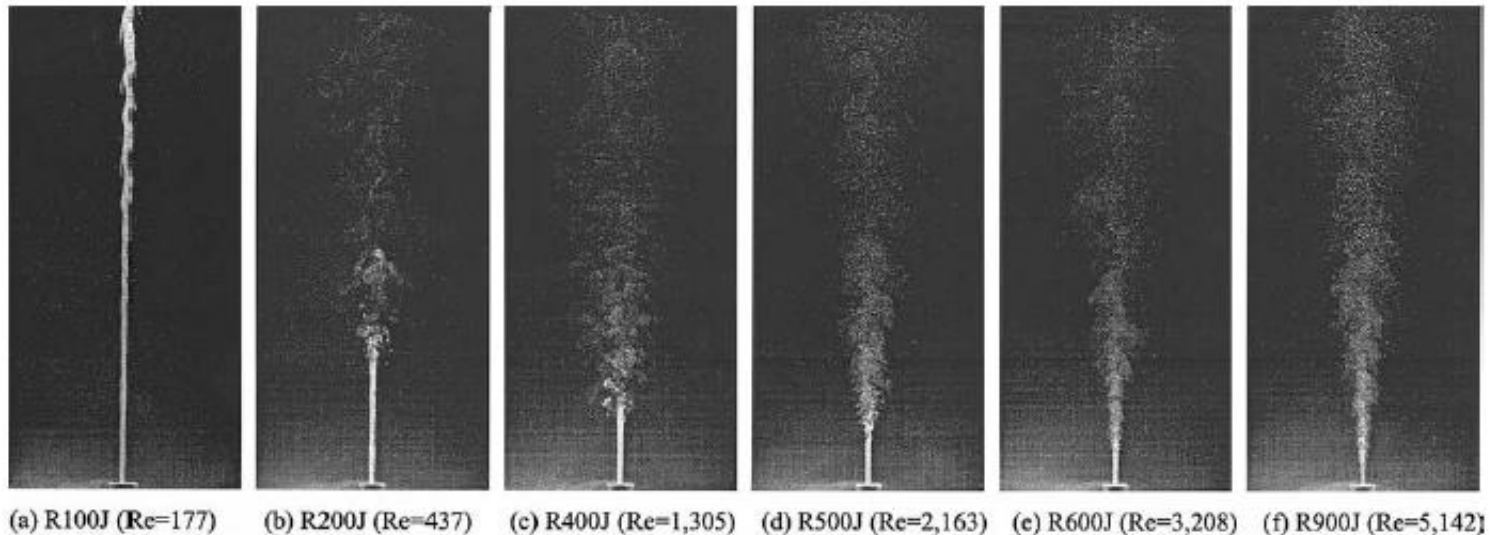


2. 射流分类

1、按流动形态分

层流射流（Laminar Jet）；

紊流射流（Turbulent Jet），又称紊动射流，各专业中遇到的射流，绝大多数是紊动射流。



层流射流、紊流射流与雷诺数的关系

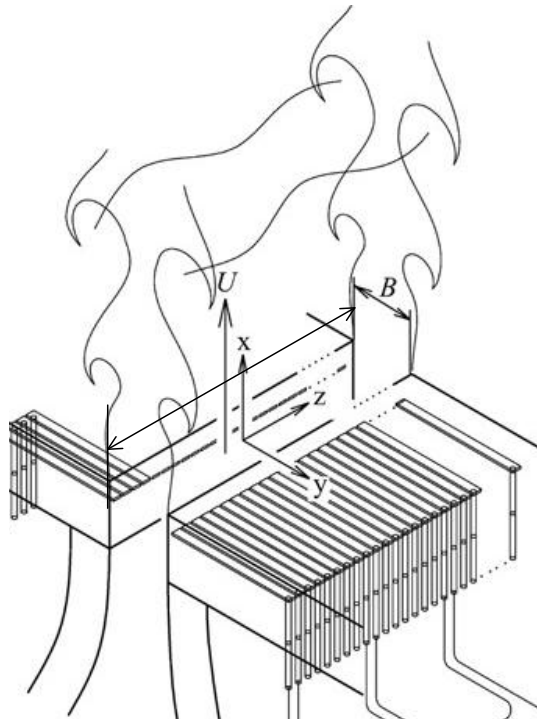
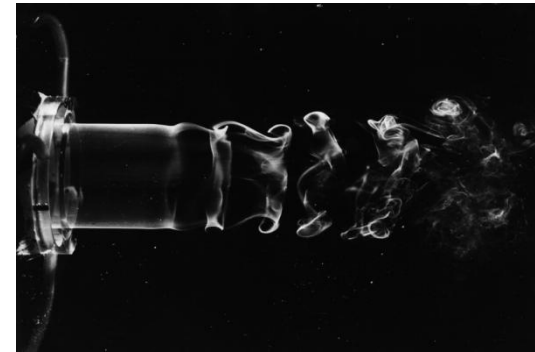
自由射流中 $Re \approx 300$ 为流动状态转折点

2. 射流分类

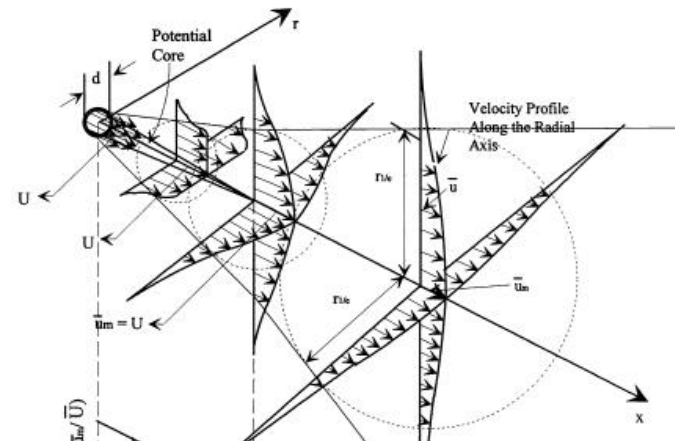
2、按射流断面形状分

平面射流(Planar Jet);

轴对称射流(Axial Symmetrical Jet)。



矩形射流



轴对称射流

2. 射流分类

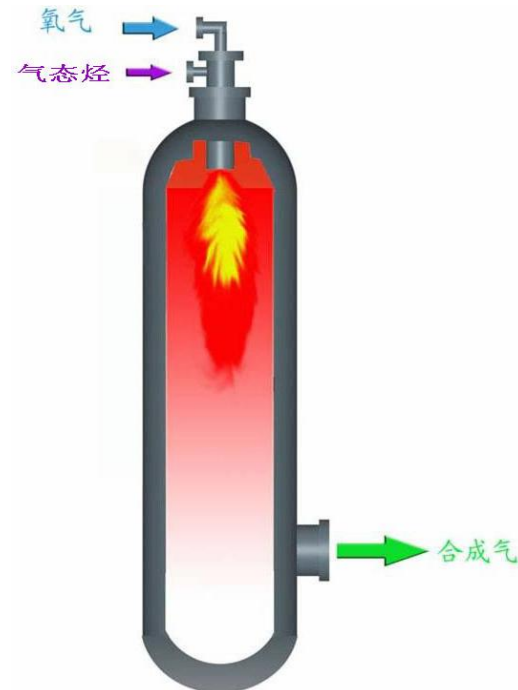
3、按出流空间大小分

自由射流(Free Jet)即出流到无限大的空间中，流动不受固体边壁的限制；

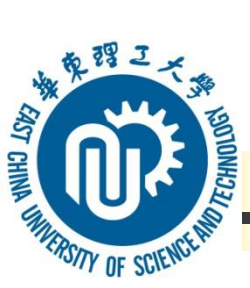
有限空间射流(Jet in Finite Space)又称受限射流。



自由射流



受限射流



2. 射流分类

4、从环境性质分

淹没射流(Submerged Jet)射入到同种性质流体内的射流；

非淹没射流(Non-Submerged Jet)射入到不同性质流体内的射流，如大气中的水射流。



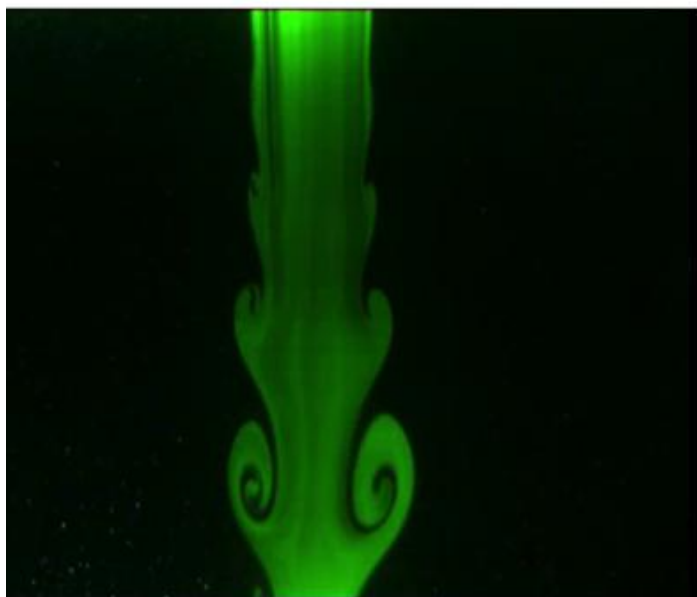
非淹没射流

2. 射流分类

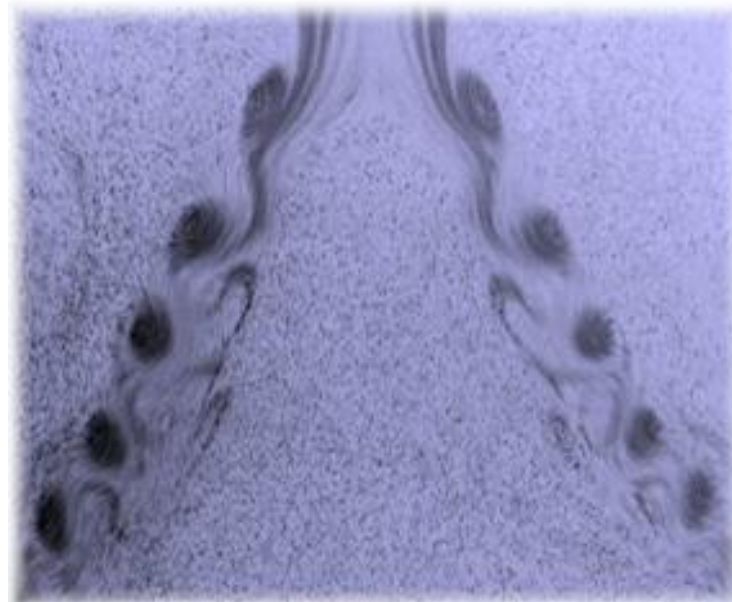
5、从周向剪切分

直射流(Straight Jet) 流体不存在周向流动剪切的射流；

旋转射流(Swirling Jet) 流体存在周向流动剪切的射流。

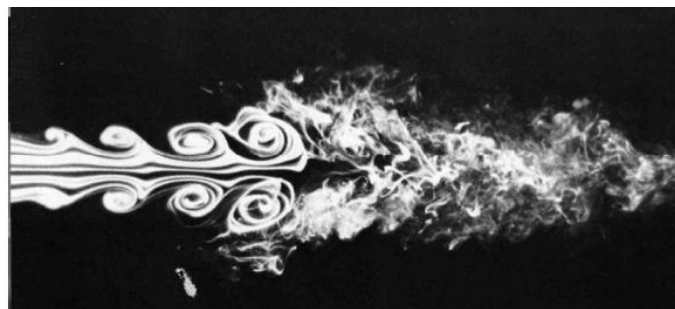
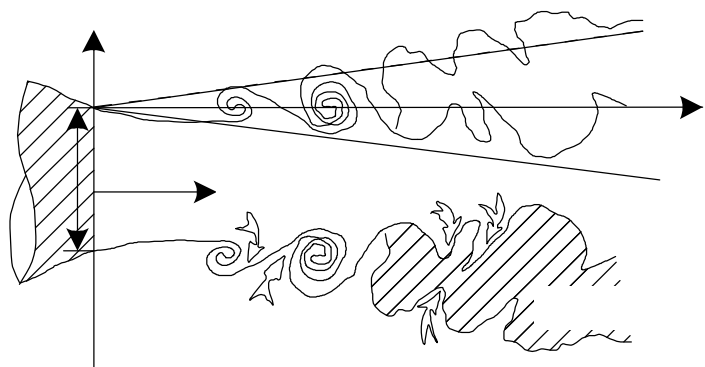


直射流

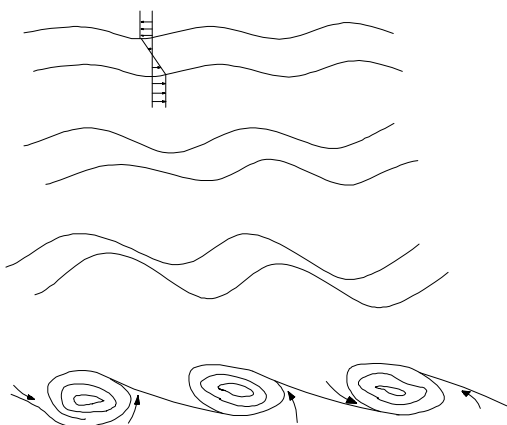


旋转射流

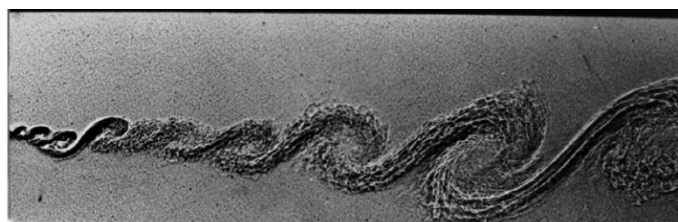
3. 自由射流的发展



湍流射流漩涡生成和卷吸



剪切层起始不稳定性漩涡生成



剪切层不稳定性

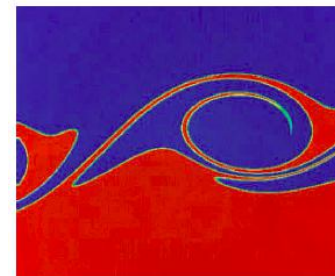


Figure 1

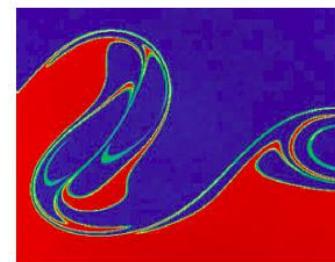


Figure 2

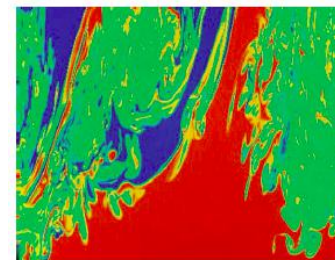
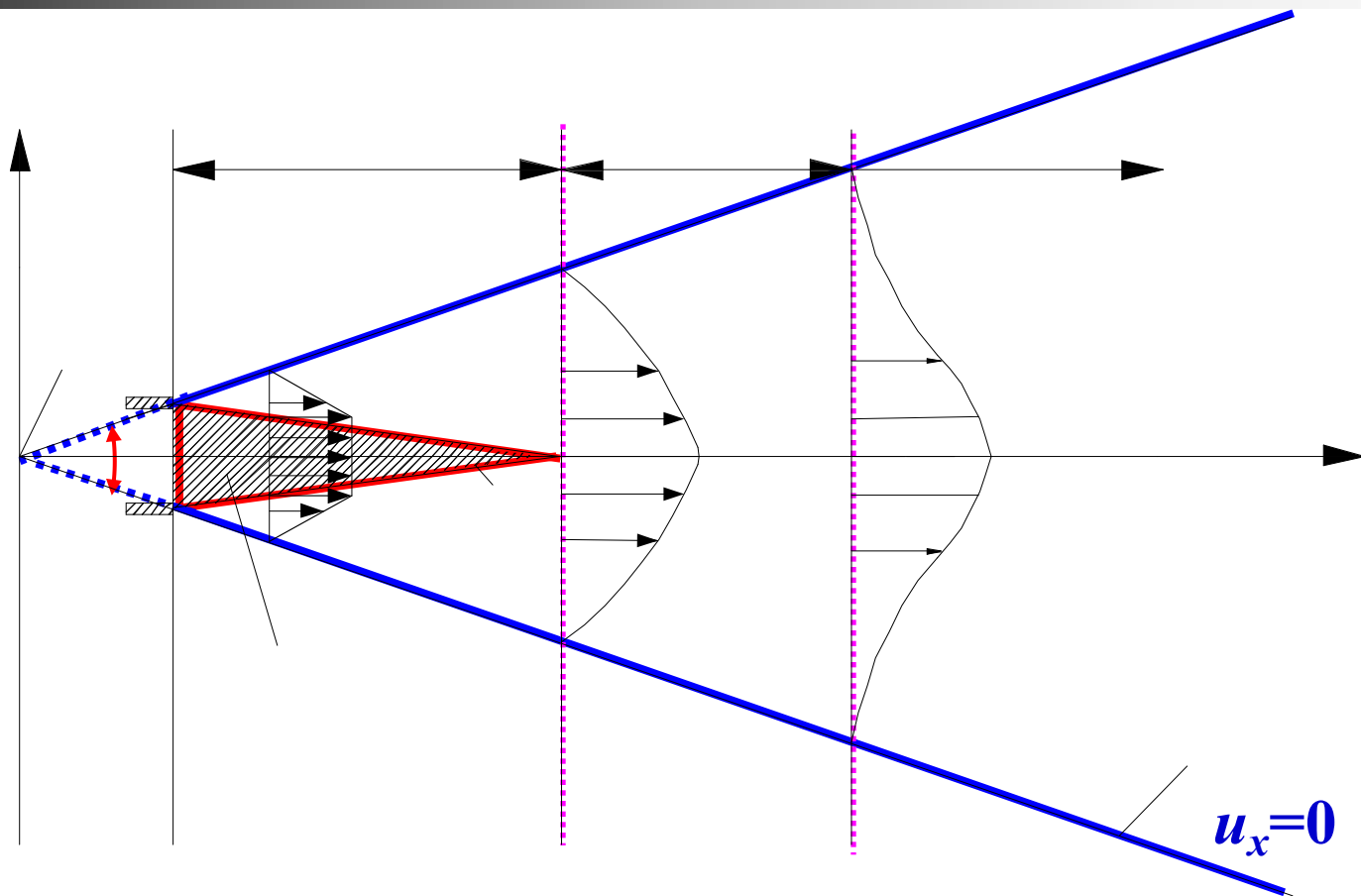


Figure 3

剪切层混合过程

3. 自由射流的发展

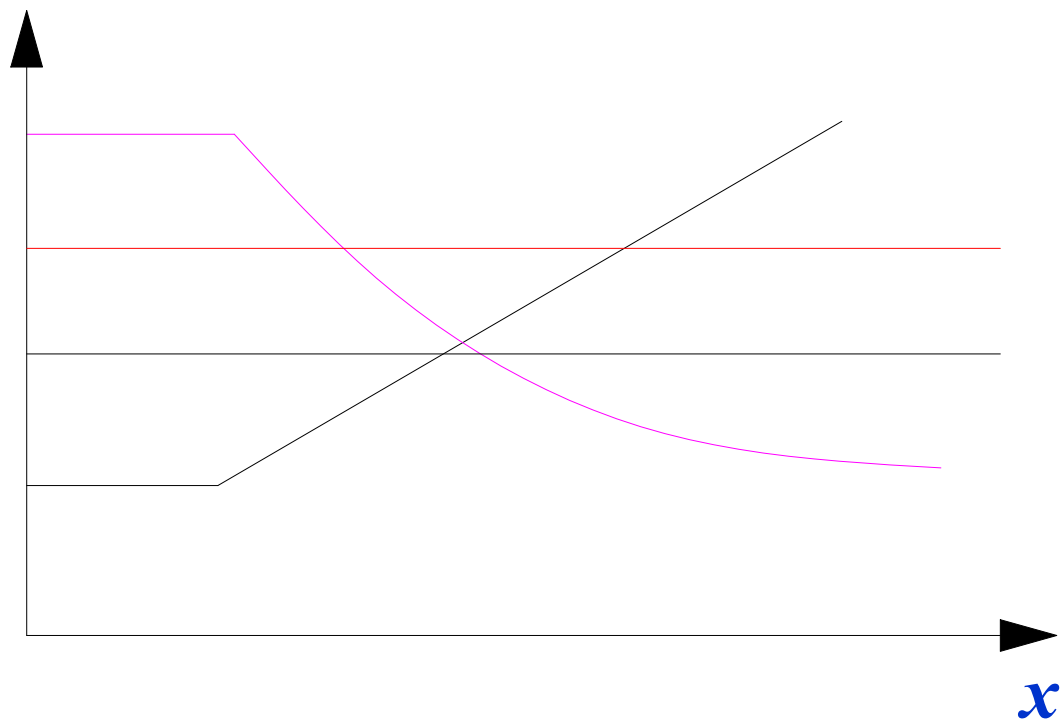


自由射流的发展过程

三个区域：开始区域（**势核区**），过渡区域和基本区域

射流极点和射流边界

3. 自由射流的发展



自由射流流动参量的变化曲线

4. 自由射流速度分布特征

(1). 平面自由湍流射流

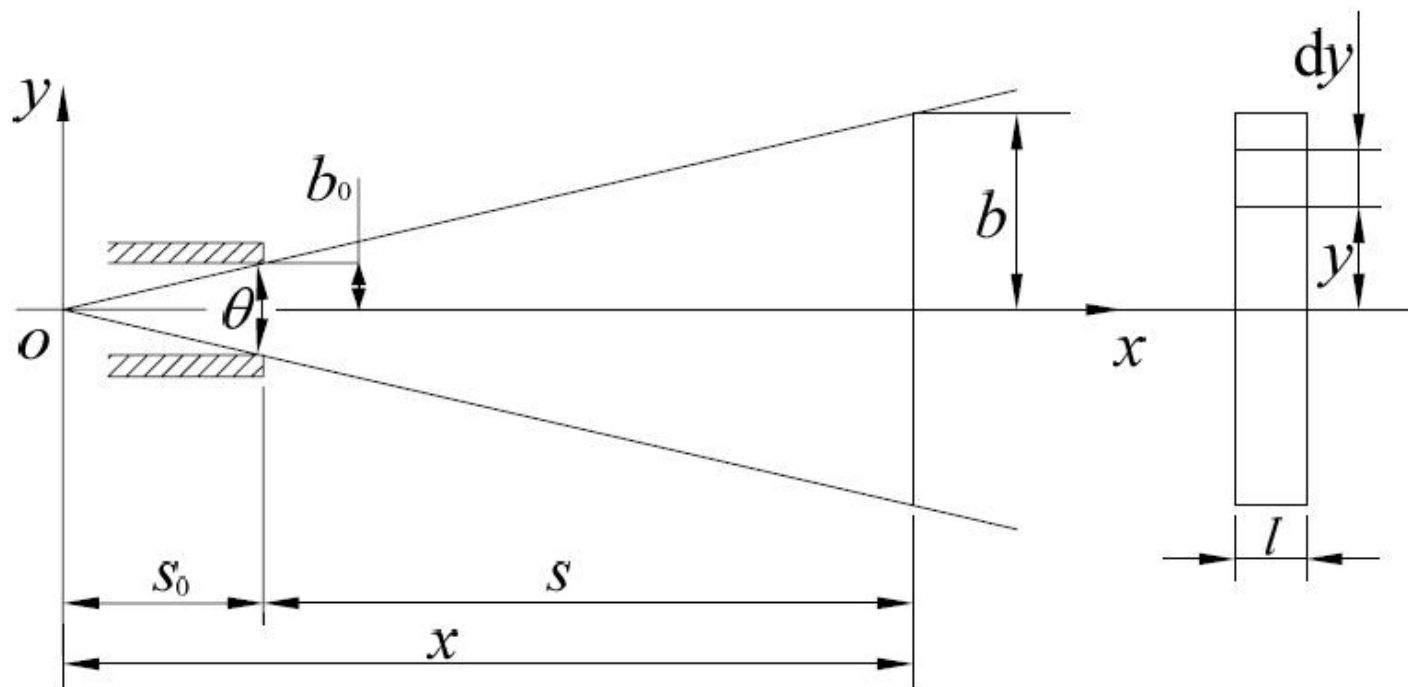
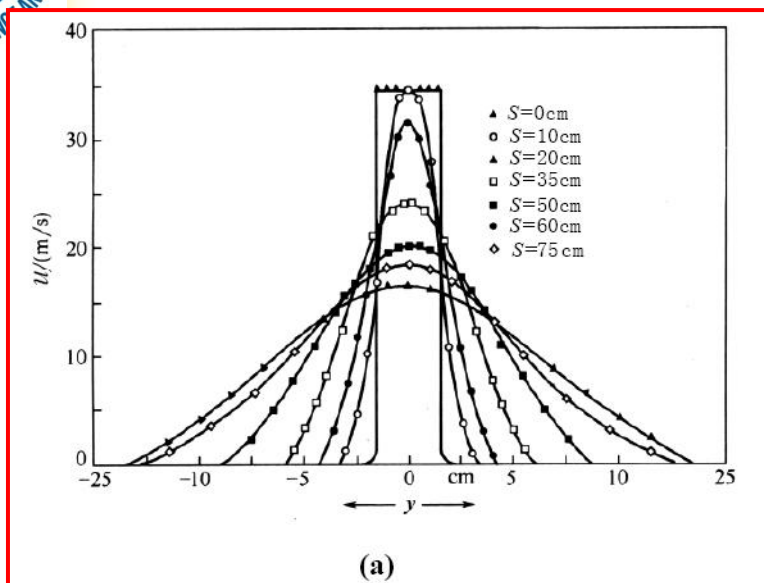


图6-7 平面自由湍流射流

4. 自由射流速度分布特征



u_m : 速度比尺, 截面最大速度
 $b_{1/2}$: 长度比尺, 速度为 $0.5 u_m$ 处 y 值

整理为 $\frac{u}{u_m} \sim \frac{y}{b_{1/2}}$ 进行标绘, 发现射流充分发展区平面射流不同截面上速度分布是相似的!

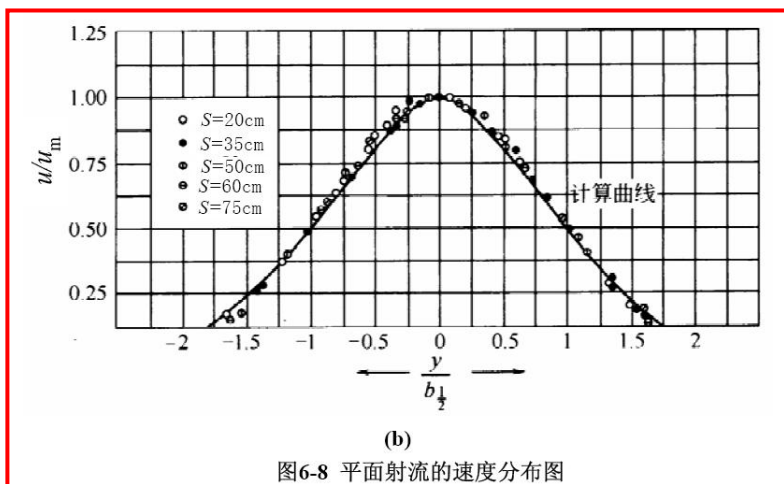
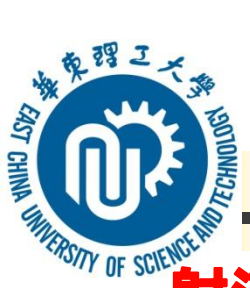


图6-8 平面射流的速度分布图

$$\frac{u_x}{u_m} = \exp \left\{ -0.69 \frac{y^2}{(b_{1/2})^2} \right\}$$

高斯分布

平面自由射流速度分布特征



4. 自由射流速度分布特征

射流场的动力特征

x 方向（射流方向）外力的合力为零，动量守恒。

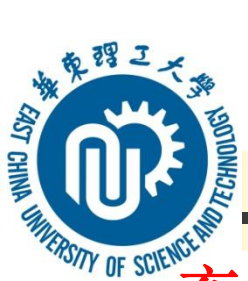
射流特征半厚度 $b_{1/2}$: $b_{1/2} \approx 0.4b$

射流扩散角: $\theta \approx 27^\circ - 30^\circ$

充分发展区射流宽度沿轴向 x 的变化为: $b \approx 0.23 x$

射流核心区长度: $x_T = 1.46 \frac{b_0}{a}$

射流卷吸量: $\frac{Q}{Q_0} = 0.54 \left(\frac{x}{2b_0} \right)^{\frac{1}{2}}$



4. 自由射流速度分布特征

充分发展区轴向速度的变化:

$$\left(\frac{u_m}{u_0}\right)^2 \frac{b}{b_0} \int_0^1 \left(\frac{u}{u_m}\right)^2 d\left(\frac{y}{b}\right) = 1 \quad \xleftarrow{\rho = \rho_0} \quad 2 \int_0^b \rho u^2 dy = 2 \rho_0 u_0^2 b_0$$

$$\frac{u_m}{u_0} = \frac{1.21}{\sqrt{ax/b_0}}$$

工程计算中:

$$\frac{u_m}{u_0} = \frac{1.21}{\sqrt{\frac{as}{b_0} + 0.417}}$$

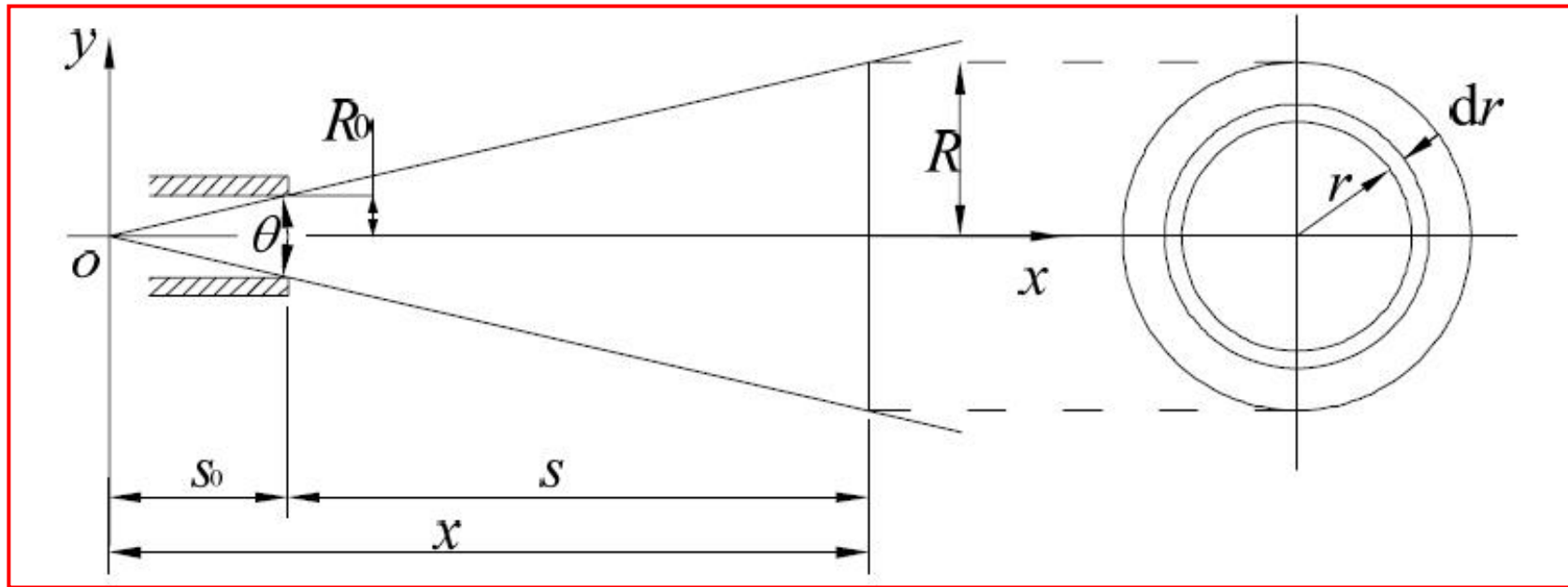
$$a = 0.1 \sim 0.11$$

S为距离喷嘴出口的长度

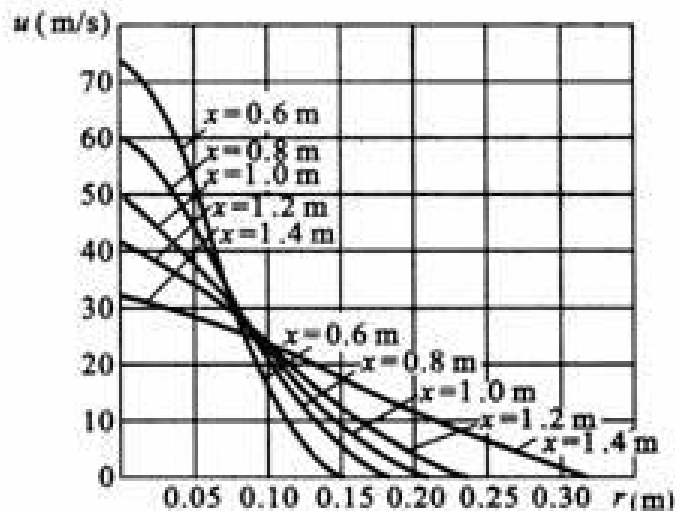
a 为一常数，其数值与喷嘴形状、喷嘴出口初始速度分布以及湍流强度有关。研究表明，喷嘴出口湍流强度增大， a 值增大，势核区长度急剧减小。

4. 自由射流速度分布特征

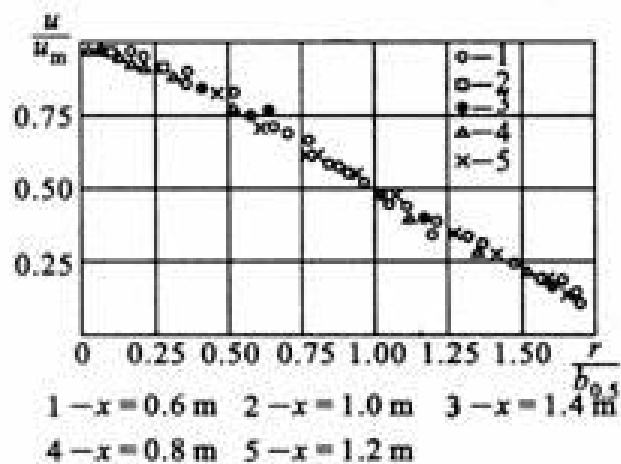
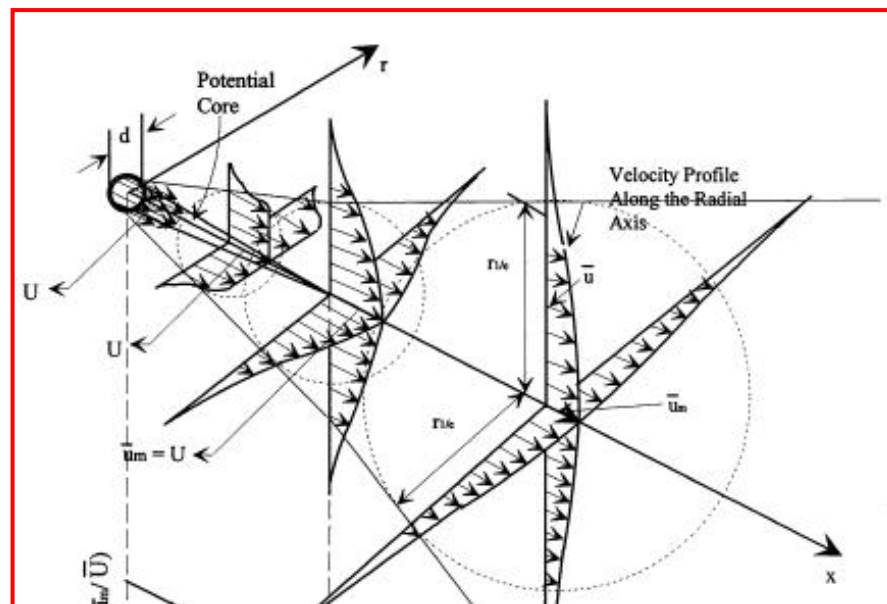
(2) 圆形断面的自由湍流射流



4. 自由射流速度分布特征

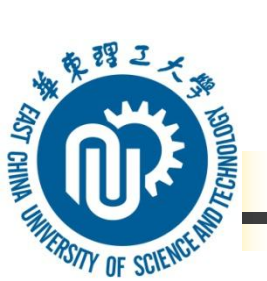


(a)



(b)

$$\frac{u_x}{u_m} = \exp \left[-\frac{r^2}{(b_{1/2})^2} \right]$$



4. 自由射流速度分布特征

射流特征半厚度 $b_{1/2}$:

$$b_{1/2} \approx 0.43R$$

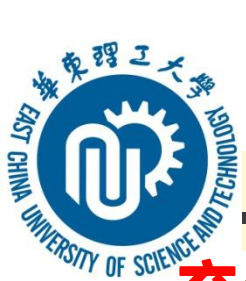
射流扩散角: $\theta \approx 27^\circ - 30^\circ$

充分发展区射流宽度沿轴向 x 的变化为: $R \approx 3.4a x$

射流卷吸量: $\frac{Q}{Q_0} = 2.20\left(\frac{as}{R_0} + 0.29\right)$

势核区长度: $x_T = 0.966 \frac{R_0}{a}$

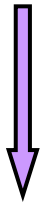
a 的平均值取0.07 ~ 0.08



4. 自由射流速度分布特征

充分发展区轴向速度的变化:

$$2\left(\frac{u_m}{u_0}\right)^2\left(\frac{R}{R_0}\right)^2\int_0^1\left(\frac{u}{u_m}\right)^2\frac{r}{R}d\left(\frac{r}{R}\right)=1 \quad \xleftarrow{\rho=\rho_0} \quad 2\pi\int_0^R\rho u^2 r dr = \pi\rho_0 u_0^2 R_0^2$$

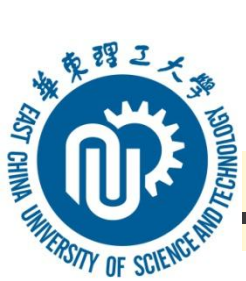


$$\frac{u_m}{u_0} = 3.28\frac{R_0}{R} = \frac{3.28R_0}{3.4ax} = 0.966\frac{R_0}{ax} \quad a=0.07 \sim 0.08$$

工程计算中:

$$\frac{u_m}{u_0} = 0.966\frac{R_0}{ax} = \frac{0.966}{\frac{as}{R_0} + 0.294}$$

S 为距离喷嘴出口的长度



4. 自由射流速度分布特征

$$\frac{u_m}{u_0} = \frac{1.21}{\sqrt{\frac{as}{b_0} + 0.417}}$$

平面射流

$$\frac{u_m}{u_0} = 0.966 \frac{R_0}{ax} = \frac{0.966}{\frac{as}{R_0} + 0.294}$$

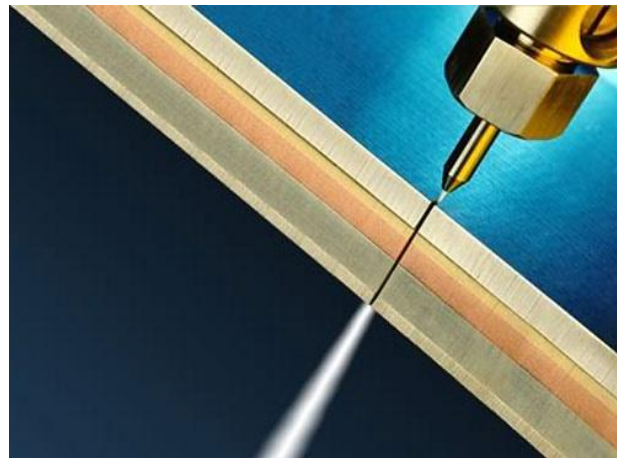
圆射流

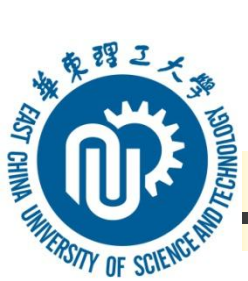
- 无论是平面射流还是圆射流，当增加射流的初速度 u_0 和喷管出口尺寸时，都会使射流的轴向速度 u_m 增加，即可增加射流的射出能力。
- 由于平面射流中，轴向速度 u_m 的减小与射出距离 x (或 s)的平方根成反比，而圆射流 u_m 的减小与 x (或 s)成反比，所以在射流初速 u_0 相同的条件下，圆射流速度衰减更快。

4. 小结

思考：自由射流和管流相比有何异同？

何谓射流的自相似性？





6.2.2 受限射流

定义：射流喷入尺寸有限的设备中；

特点：周围有一定的壁面边界、形成回流区。

斯林-纽比准数(*Thring-Newby parameters*) θ :

$$\theta = \frac{d}{D} \quad (6-17)$$

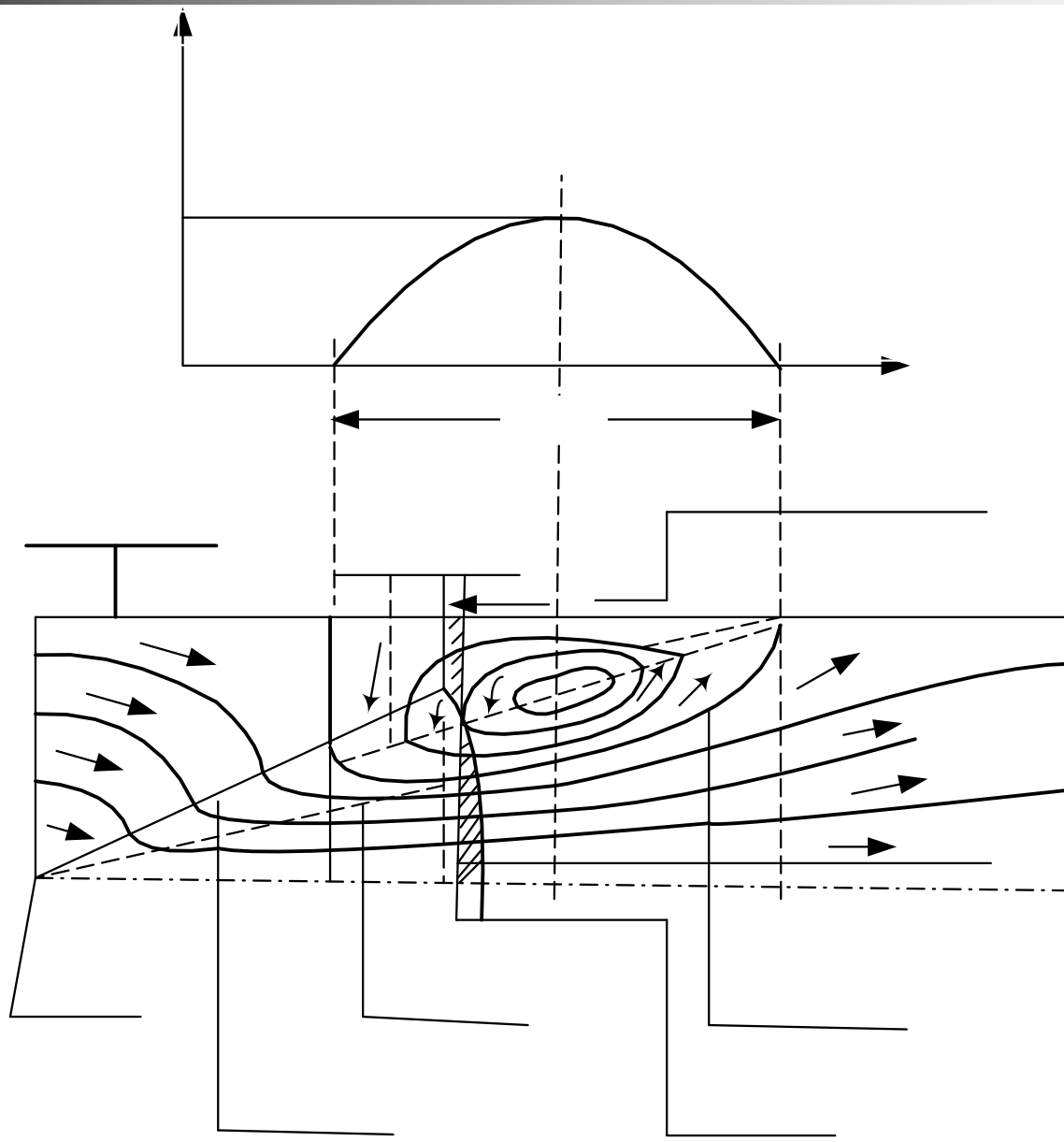
式中， d 为喷嘴直径， D 为受限空间通道的直径。

回流比 R ：

$$R = Q_R / Q_0 \quad (6-18)$$

其中 Q_R 和 Q_0 分别为受限通道的回流量和喷嘴出口的初始流量。

6.2.2 受限射流



6.2.2 受限射流

- ▶ 喷嘴设置在气化炉顶部的气流床气化炉通常称之为**单喷嘴气化炉**，已广泛应用于油气化、煤气化等领域。
- ▶ 单喷嘴受限射流气化炉的三区模型：**回流区**、**射流区**和**管流区**。

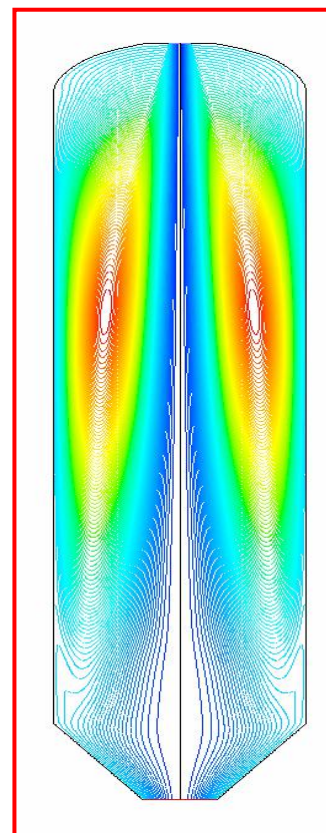
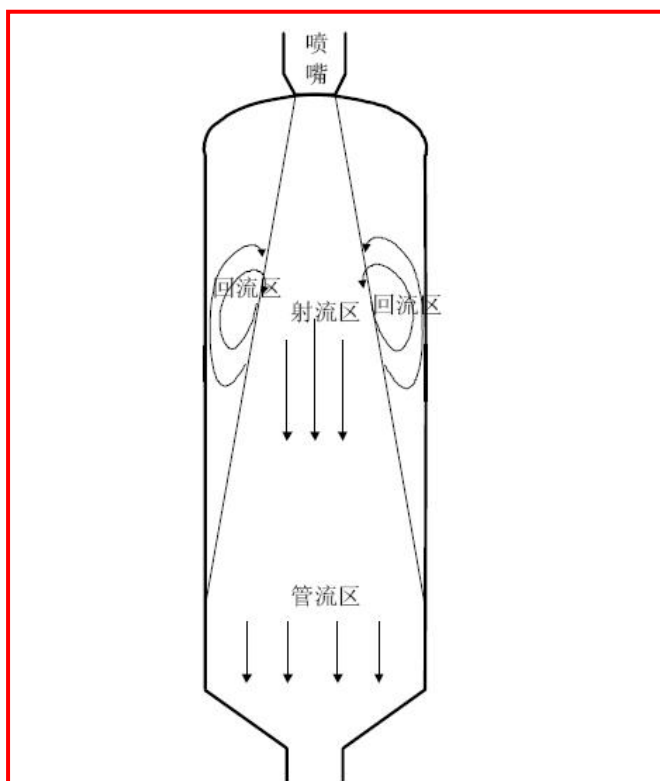


图 6-10 单喷嘴受限射流气化炉的三区模型

6.2.2 受限射流

受限射流速度分布特征

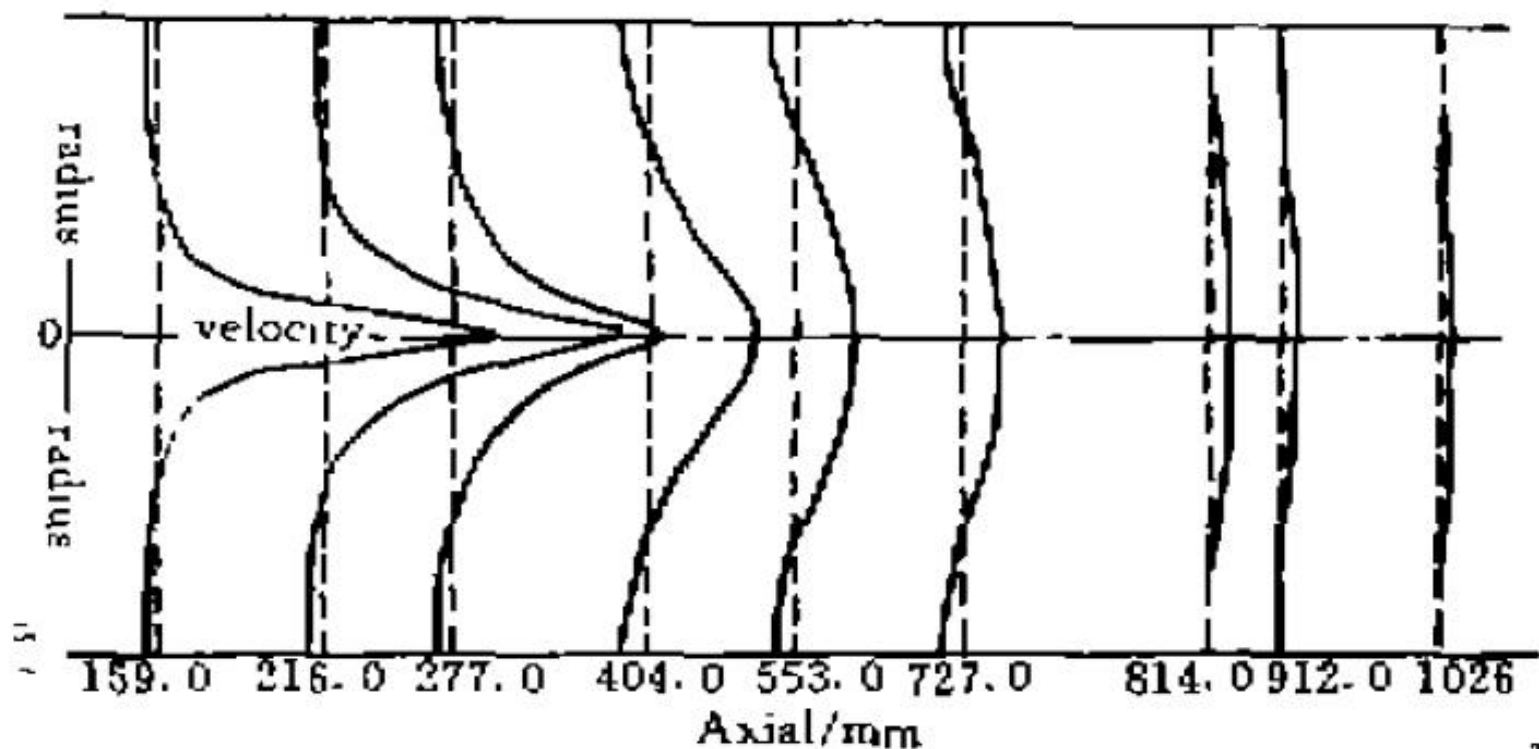


图 2 各截面上轴向速度沿径向分布

6.2.2 受限射流

受限射流回流比

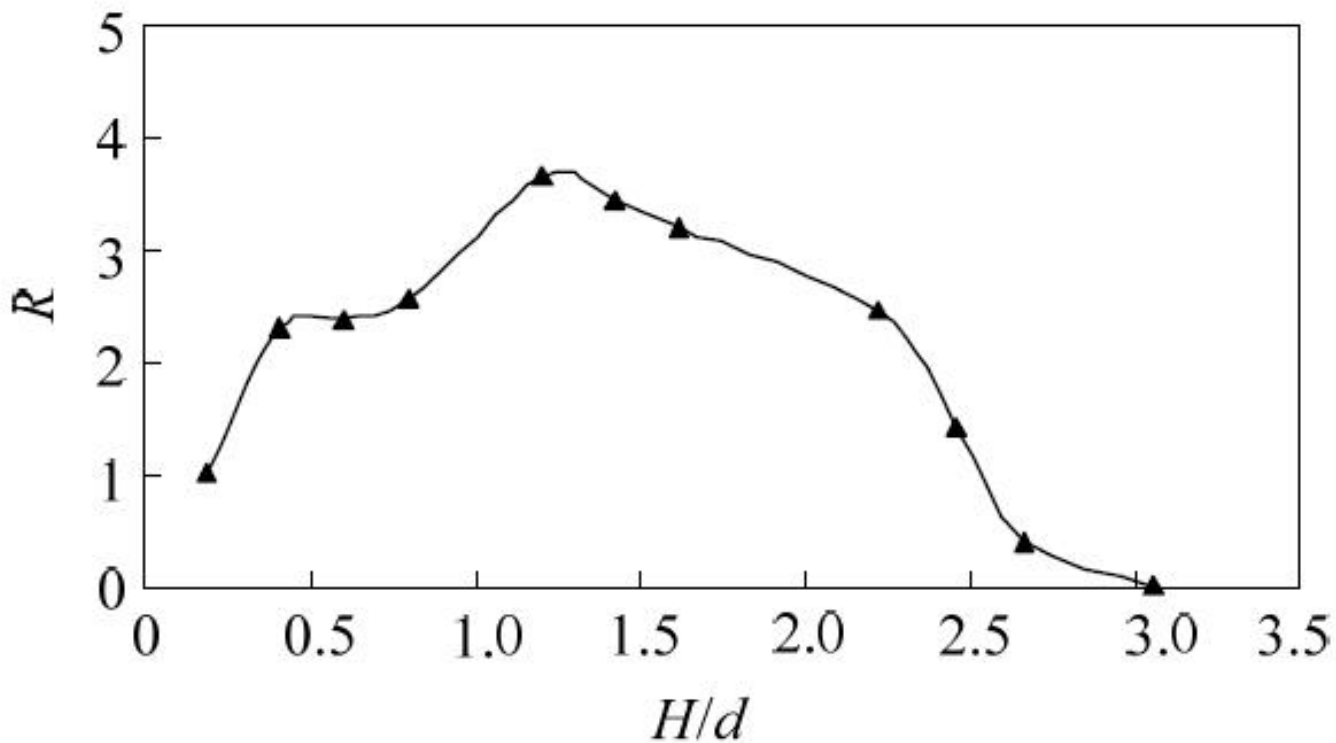


图 6-11 单喷嘴受限射流不同高度平面上回流比实验测量结果

6.2.3 同轴射流

- ▶ 在圆射流中心线处再加一股圆射流就形成了同轴射流(*coaxial jet*)；
- ▶ 同轴射流的流场结构，按流动的发展可分为初始混合区、过渡混合区和充分混合区；
- ▶ 射流区内在初始区和过渡区内存在着内射流核心区、外射流核心区内、内混合区和外混合区。

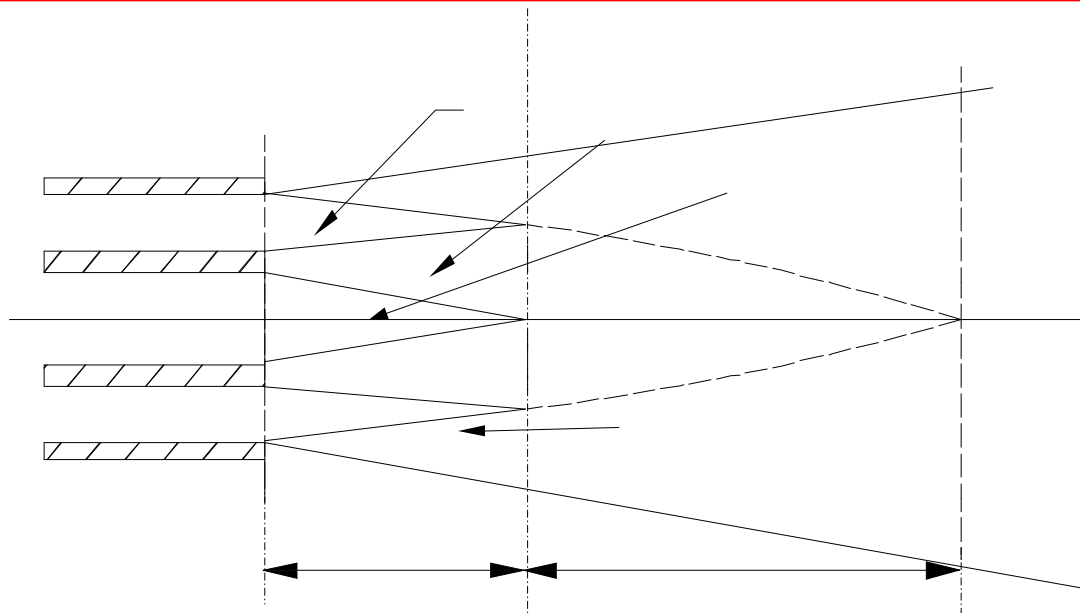
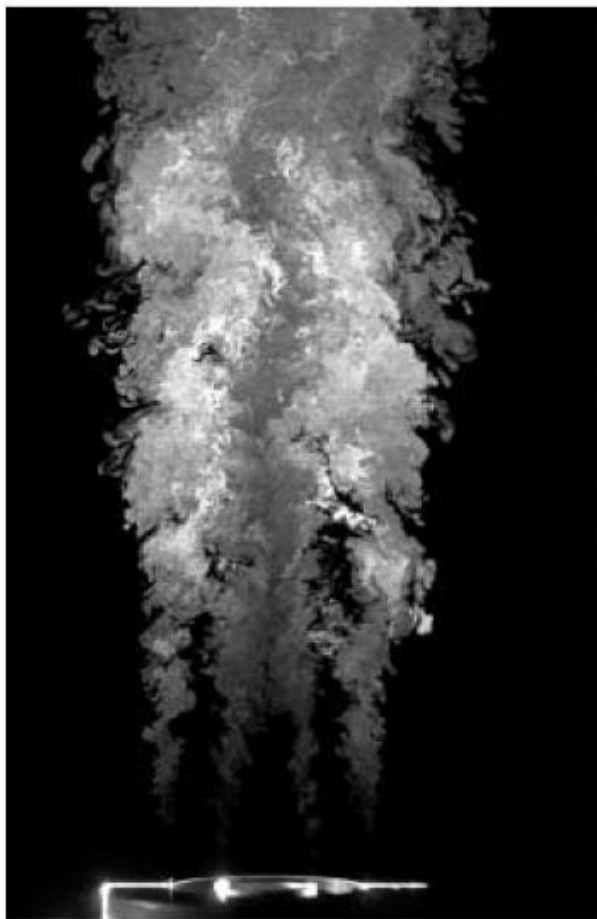


图6-15 同轴射流流场结构示意图

6.2.3 同轴射流



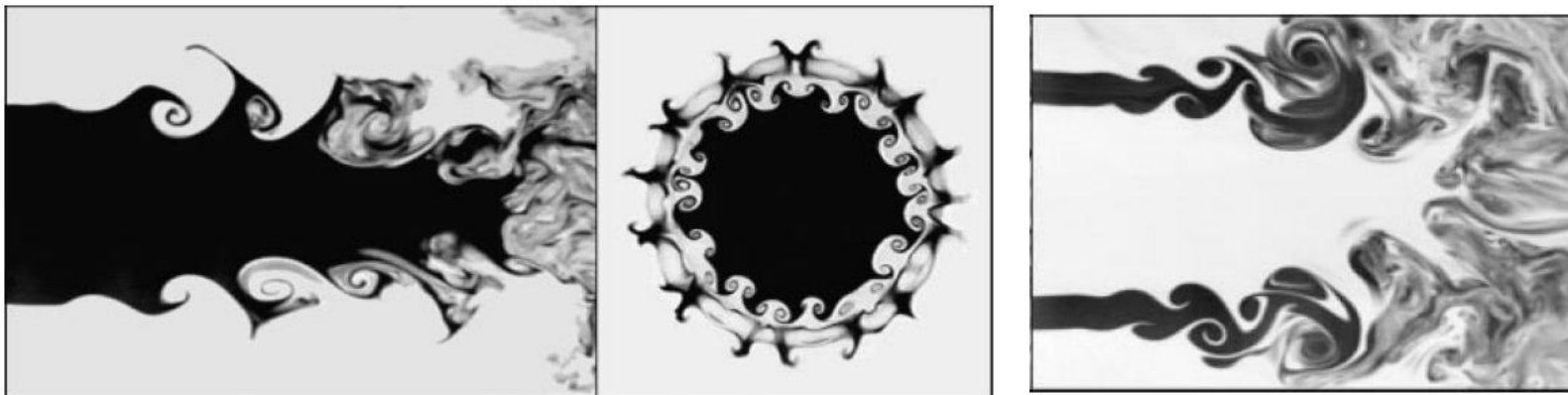
(a)瞬时流场图



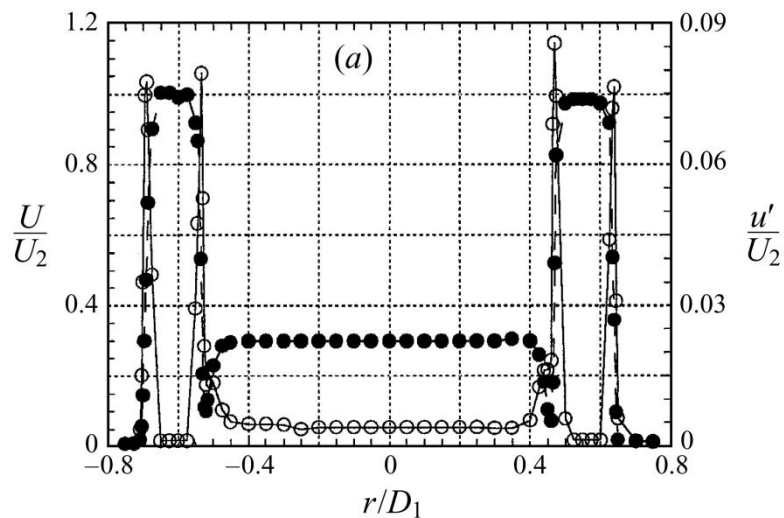
(b)时均流场图

图6-14 均相同轴射流流场结构图

6.2.3 同轴射流

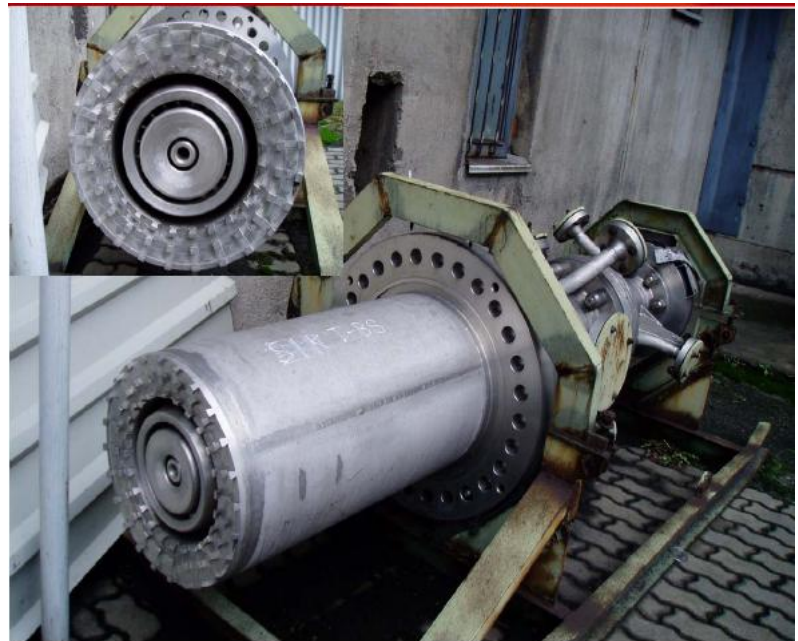


可视化图片



速度和湍流强度分布

6.2.3 同轴射流



6.2.3 同轴射流

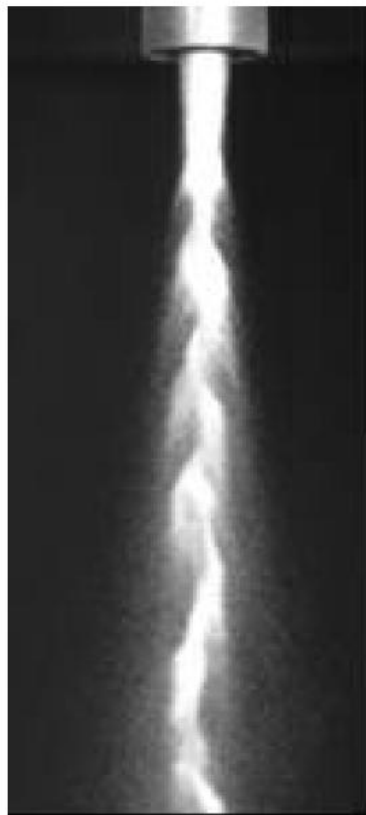
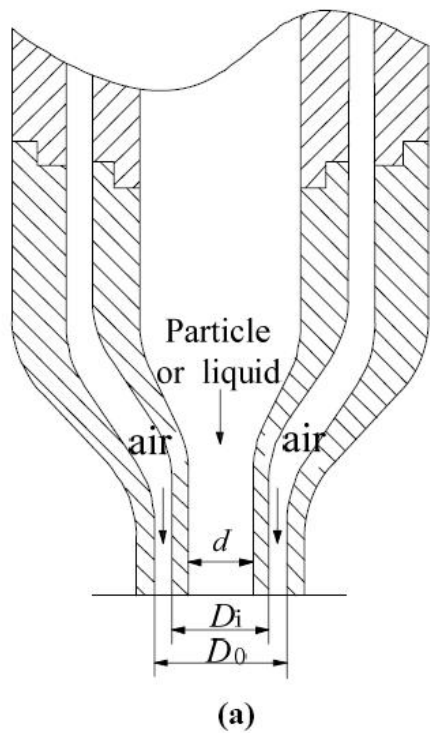
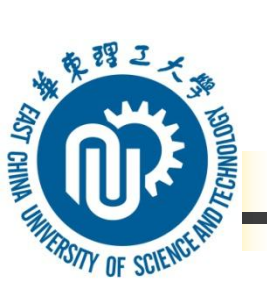


图6-15 同轴射流



6.3 撞击流

主要内容

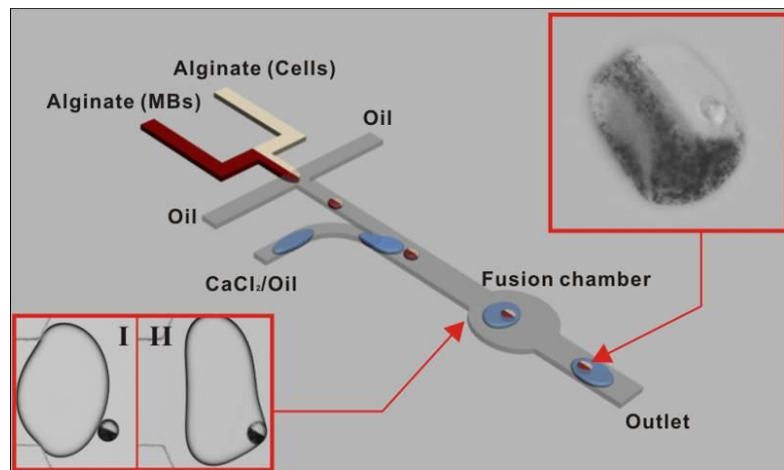
1. 撞击流定义及分类
2. 撞击流分区及流动特征
3. 撞击流应用简介

1. 撞击流定义及分类

- ▶ 撞击流的科学概念由前苏联学者1960首先提出，后来在以色列得到较多的研究，这种技术的成功应用开始也主要集中在这两个国家。
- ▶ 他们得到这样的结论： 化学工程领域中的任何一种过程，几乎都可以用撞击流来实现，而且撞击流比传统的方法效率更高，能耗更低。撞击流技术在化学工程和其他工程领域中必将成为一种通用的技术方法。



大型气化炉，直径3-4m



微流控芯片，直径微米级

1. 撞击流定义及分类

定义：两股射流离开喷嘴后相向流动、撞击，在喷嘴中间形成一个高度湍动的撞击区，轴向速度趋于零，并转为径向流动。

分类：撞壁流-对置撞击流；两股撞击-多股撞击；轴对称-平面撞击流等



撞壁流

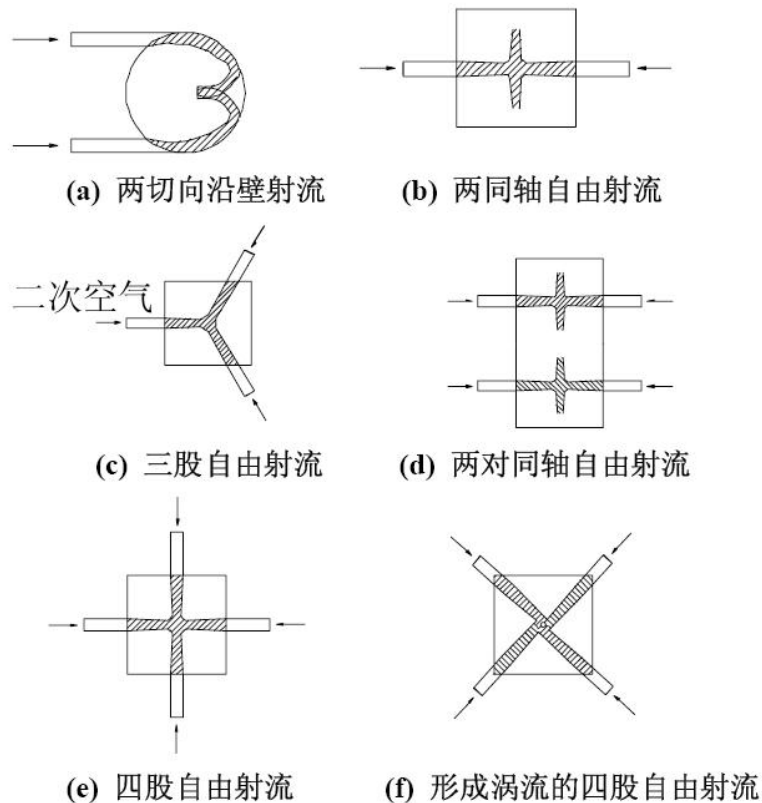
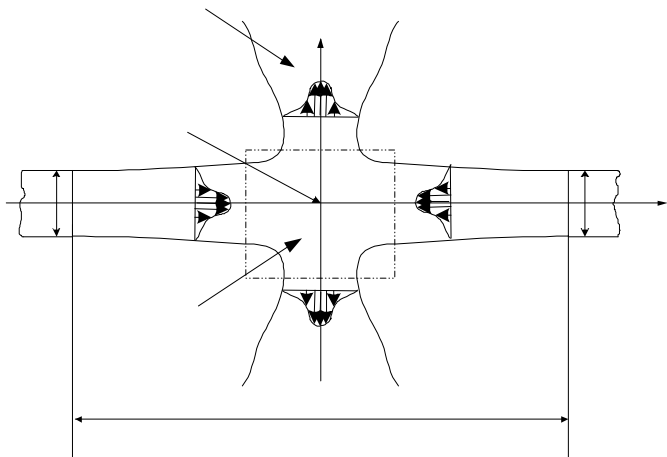


图 6-22 应用撞击流结构

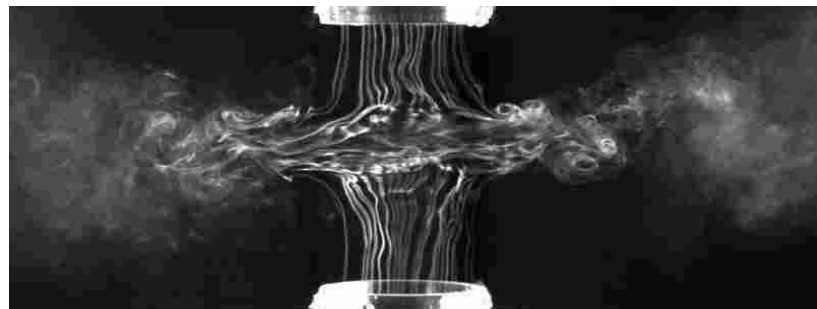
2. 撞击流分区及流动特征

撞击流流场一般可以分为以下三个区域：

- ▶ 流体离开喷嘴以后到还没有撞击之前，如同单喷嘴的自由射流，称为**射流区**；
- ▶ 相向运动的流体撞击后形成**撞击区**(也称滞止区)和驻点（**滞止点**）；
- ▶ 撞击后流体改变方向形成的区域称为**径向射流区**(也称折射流区)。

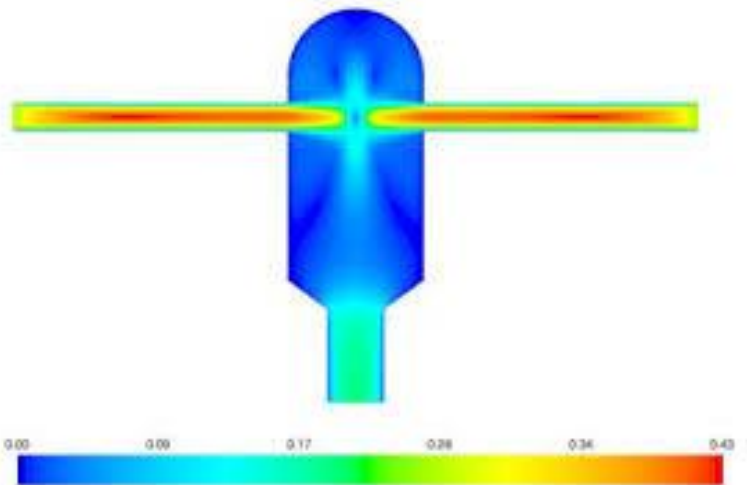


撞击流流动分区示意图



撞击流流动可视化-烟线法

撞击流的速度、压力和能量分布

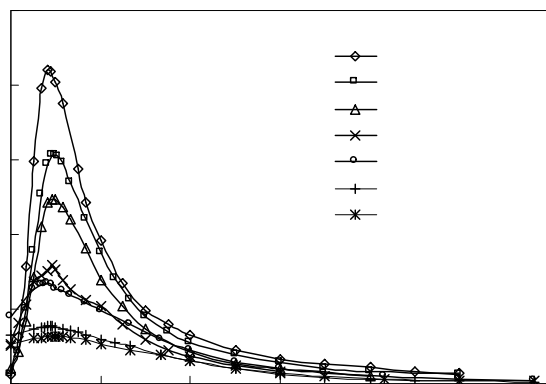


速度等高线

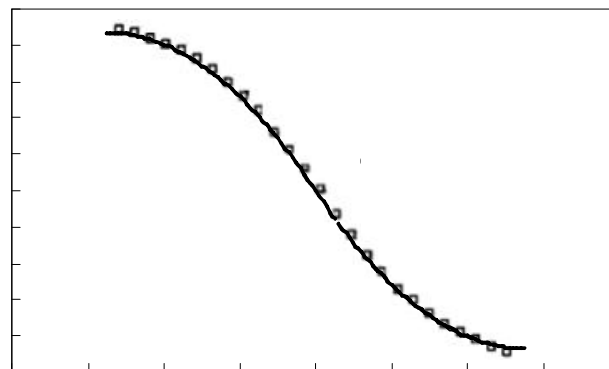
$$u = -\frac{4u_0 x}{L} \left(1 + \frac{x}{L}\right), x < 0$$

$$u = -\frac{4u_0 x}{L} \left(1 - \frac{x}{L}\right), x > 0$$

式中, u_0 为两喷嘴出口气速, L 为喷嘴间距。

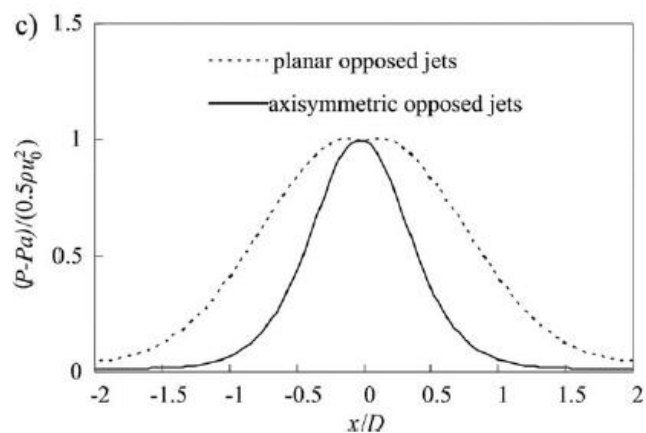
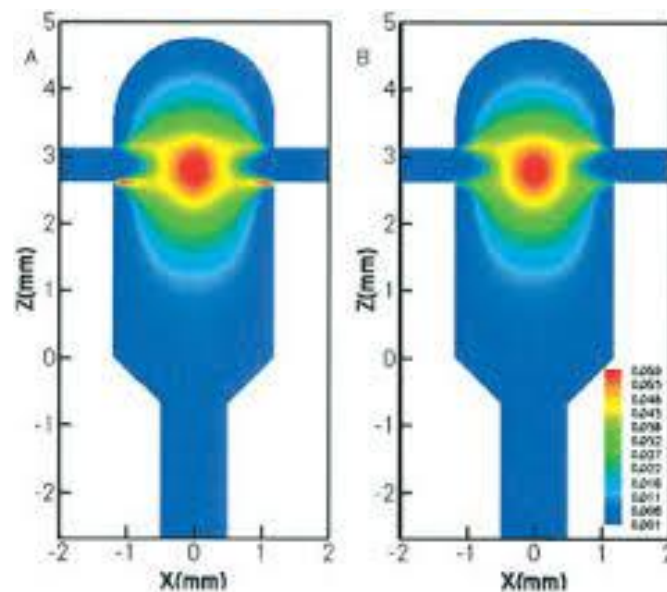
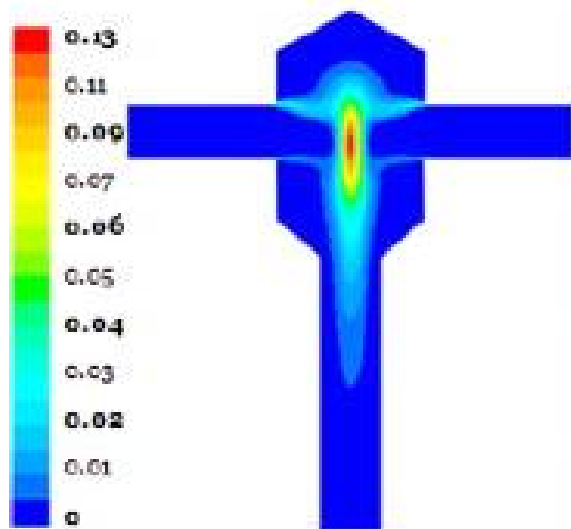


径向速度

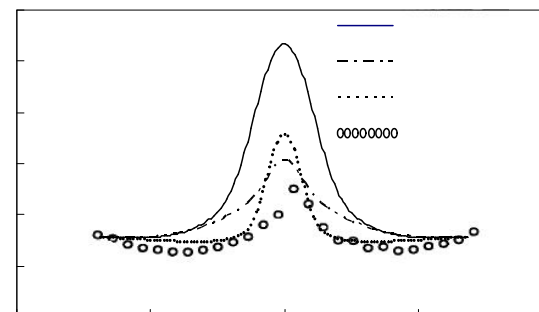


轴线速度, $L=2D$

撞击流的速度、压力和能量分布

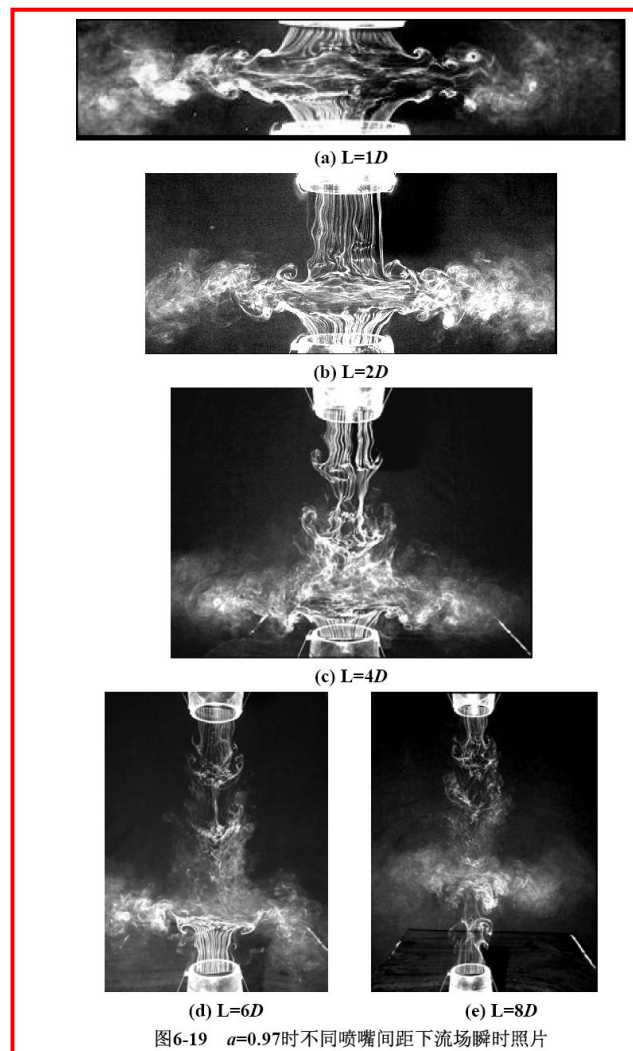
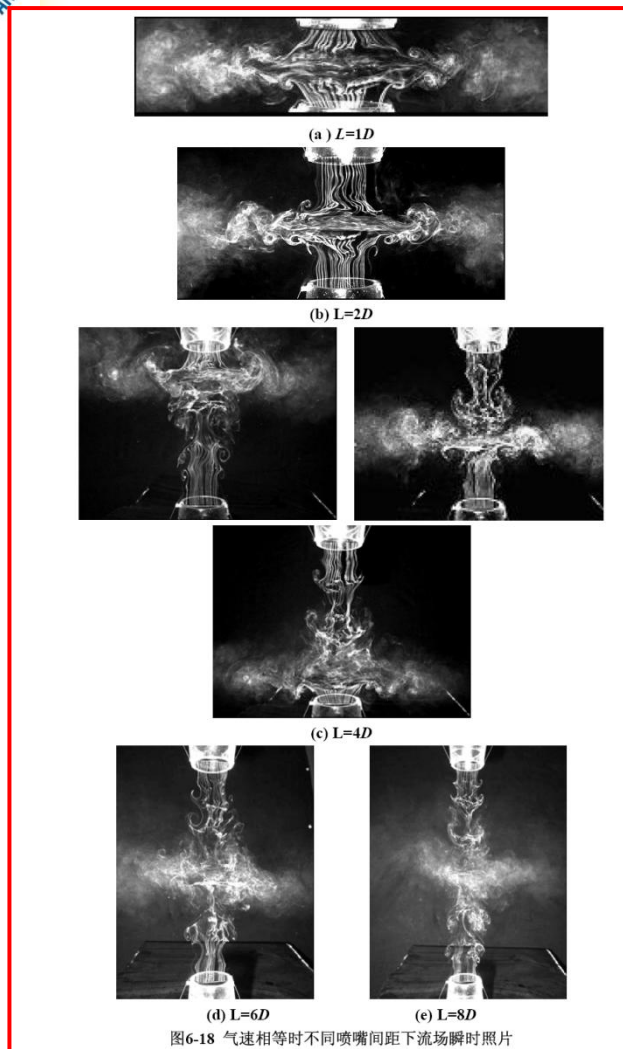


沿轴线压力分布



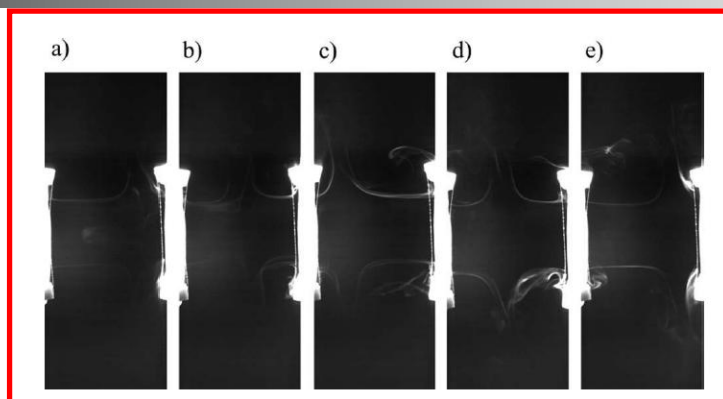
沿轴线湍流强度分布

撞击流的驻点偏移规律

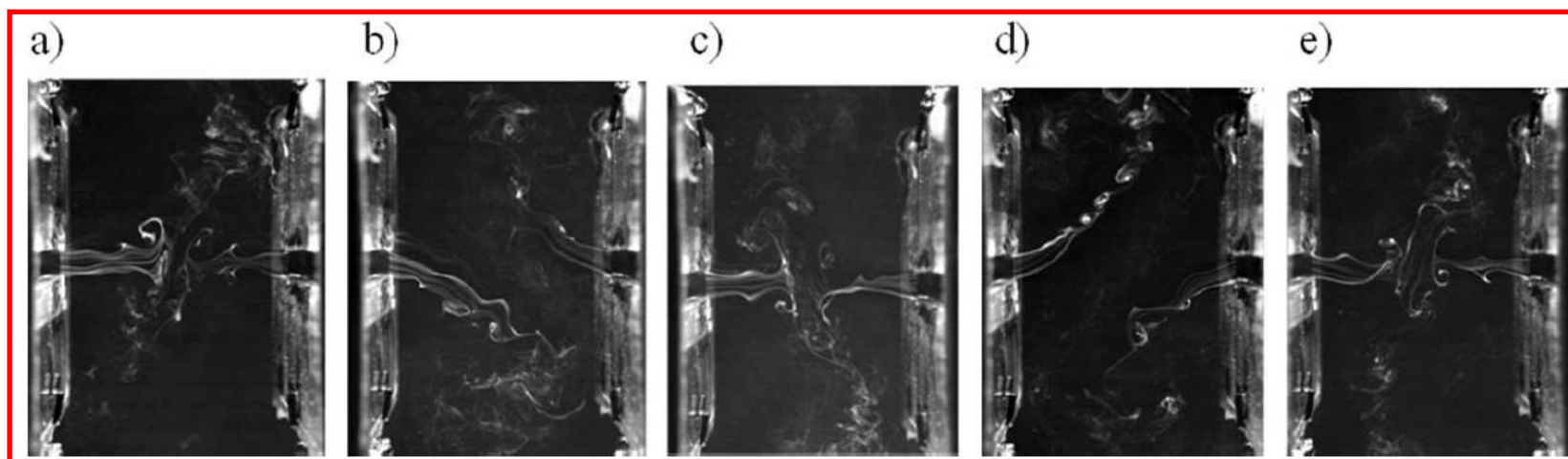


■ Study on factors influencing stagnation point offset of turbulent opposed jets. *AIChE Journal* 2010, 56(10): 2513-2522.

撞击流不稳定性研究进展



轴对称撞击流振荡

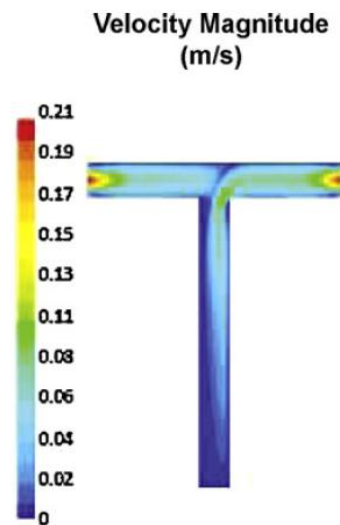
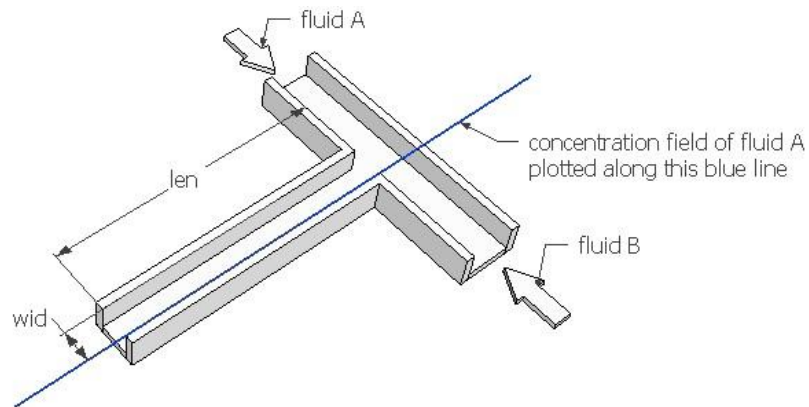
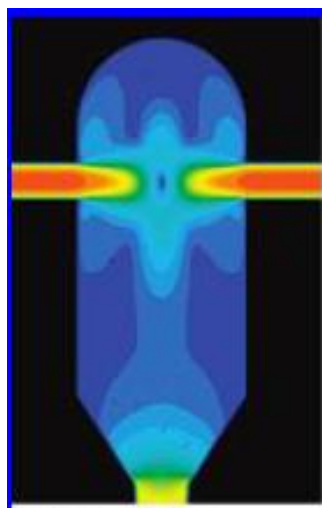


平面撞击流振荡

- ▶ *Experimental investigation of flow regimes of axisymmetric and planar opposed jets.* *AIChE Journal*, 2011, 57(6): 1434-1445.
- ▶ *Experimental study of planar opposed jets with acoustic excitation.* *Physics of Fluids*, 2013, 25, 014108

3. 撞击流工业应用简介

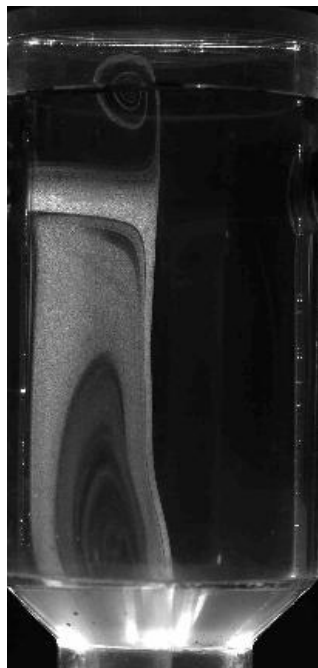
微小型撞击流反应器



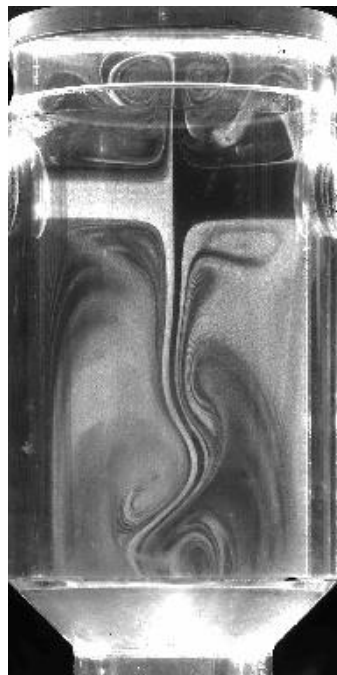
小型受限撞击流反应器CIJR

T型混合器T-mixer

微小型撞击流反应器研究进展



$Re=75$



$Re=100$



$Re=150$

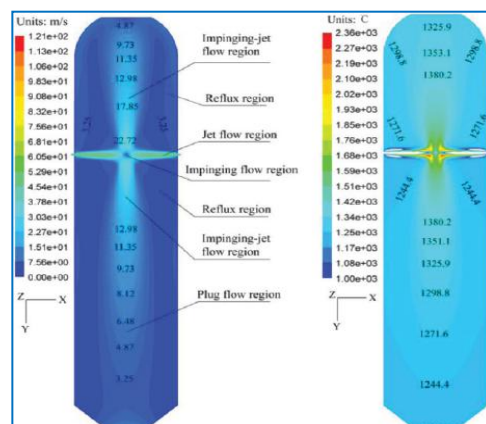
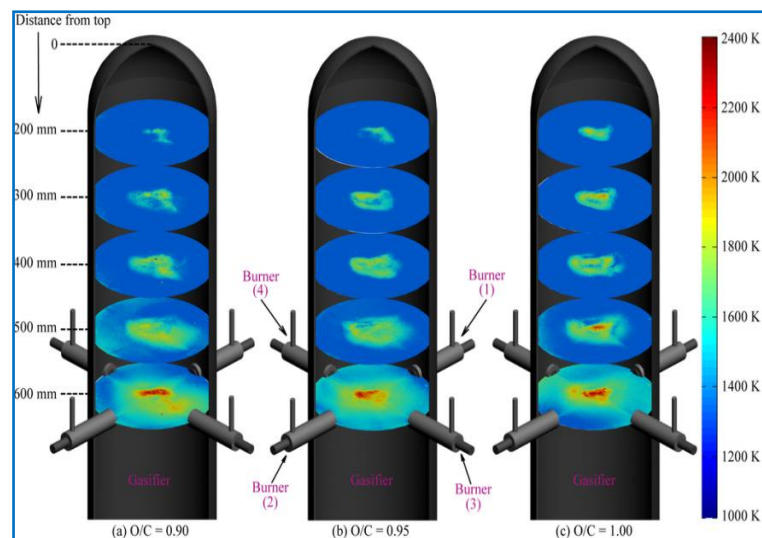
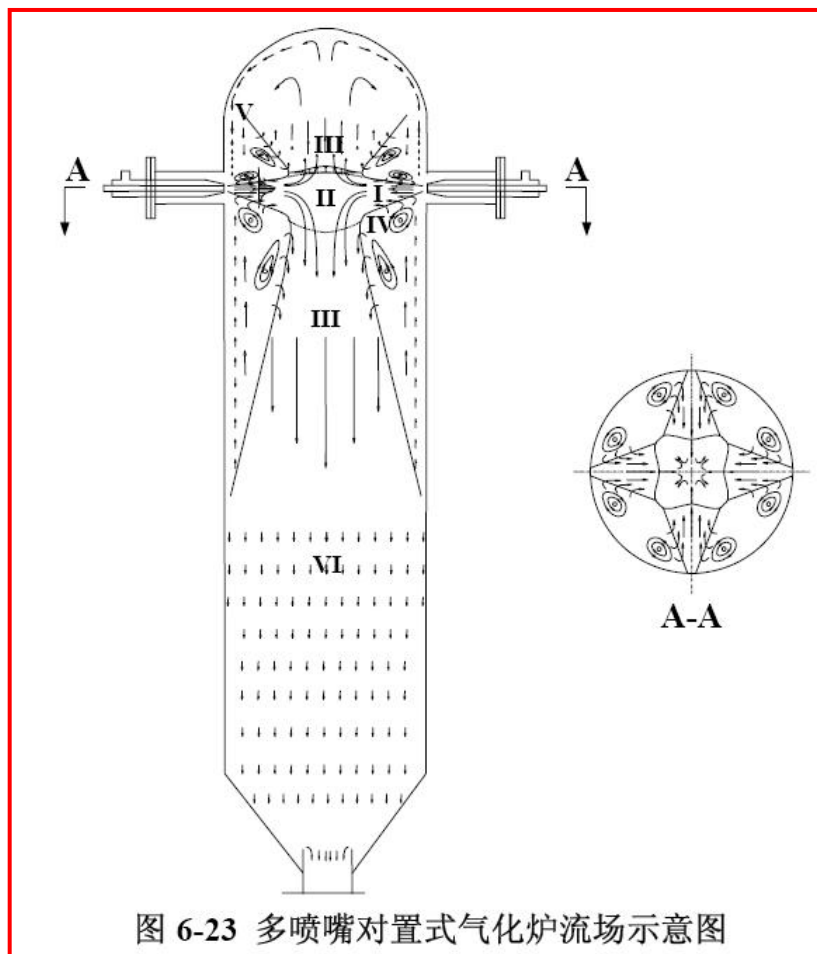
轴对称撞击流反应器



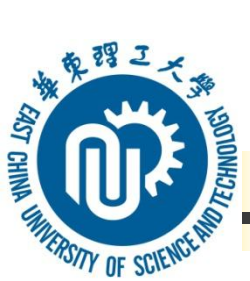
T型撞击流反应器

3. 撞击流工业应用简介

大型撞击流气化炉



射流区(I)、撞击区(II)、径向射流流股(III)、回流区(IV)、再回流区(V)和管流区(VI)



思考题

- 1. 撞击流分为那几个流动区域?**
- 2. 撞击流各个区域速度、压力和湍流强度变化规律如何?**