



西安交通大学

xi'an jiaotong university

能源与动力工程学院  
School of Energy & Power Engineering

<http://epe.xjtu.edu.cn>



# 燃 烧 学

西安交通大学能源与动力工程学院



# 第三章 燃烧空气动力学基础

## ——混合与传质

补充内容：传质学基础

第一节 湍流的物理本质和数学描写

第二节 动量、热量和质量传递的比拟

第三节 自由射流中的混合与传质

第四节 旋转射流中的混合与传质

第五节 钝体射流中的混合与传质

第六节 平行与相交射流的混合与传质



## 混合与传质在燃烧学中的意义

- 组织好工程燃烧过程的思路：

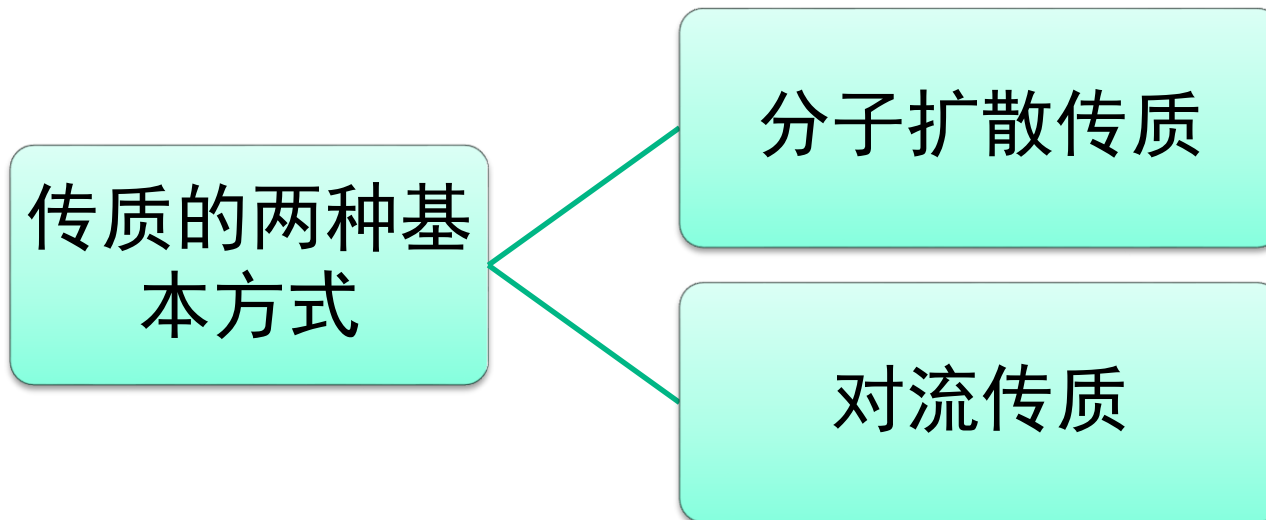
根据第二章的知识（质量作用定律、阿累尼乌斯定律、链式反应的机理）燃烧化学反应的温度、物质浓度条件不同，则化学反应的速度、反应路线和产物不同。因此，需要合理运用控制传热和传质的方法，精确地设计并控制燃烧过程中的温度分布和物质浓度分布，从而实现对燃烧速度和产物的控制。所以，工程燃烧学需要重点关注混合与传质过程。

- 各种工程燃烧过程的混合与传质的特性各不相同，需要用实验进行研究分析。但是，典型的燃烧组织过程有着共性的规律。



## 补充内容：传质学基础

- 物质由高浓度向低浓度方向的转移过程称为**传质**，也称为**质量传递**。





# 扩散的基本定律

传质的推动力是组分的浓度梯度。

- 组分  $i$  的浓度通常用质量浓度  $\rho_i$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) 或摩尔浓度  $c_i$  ( $\text{kmol}/\text{m}^3$ ) 来表示。
- 对于混合气体,  $c_i = \frac{p_i}{RT}$
- 可见在等温系统中, 组分的摩尔浓度与分压成正比。



# 费克 (Fick) 定律

- 对于一维扩散

$$\vec{j}_A = -D_{AB} \frac{d\rho_A}{dy} \quad \vec{J}_A = -D_{AB} \frac{dC_A}{dy}$$

- 质量基准 总质量浓度  $\rho$  为常数

$$\vec{j}_A = -D_{AB} \rho \nabla \omega_A = -D_{AB} \nabla \rho_A$$

- 摩尔基准 总摩尔浓度  $C$  为常数

$$\vec{J}_A = -D_{AB} C \nabla x_A = -D_{AB} \nabla C_A$$



## 质扩散率

- 费克中出现的**质扩散率**  $D$ ，表征物质扩散能力的大小，是个物性参数。它的数值取决于扩散时的温度、压力及混合物系统的性质，主要依靠实验来确定。
- 一般只用到二元混合物的质扩散率，有半经验的计算公式，在已知  $p_0, T_0$  条件下的  $D_0$  时，推算  $p, T$  条件下的  $D$

$$D = D_0 \frac{p_0}{p} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}}$$





## 对流传质及传质系数

- 流体流过壁面或液体界面时，如果主流与界面之间有浓度差，就引起传质。这种传质称之为**对流传质**。

- 流体与界面间传质通量可如下定义

$$N_A = k_C (C_{A,w} - C_{A,\infty}) = \frac{(C_{A,w} - C_{A,\infty})}{1/k_C} = \frac{\text{推动力}}{\text{阻力}} = \text{速率}$$

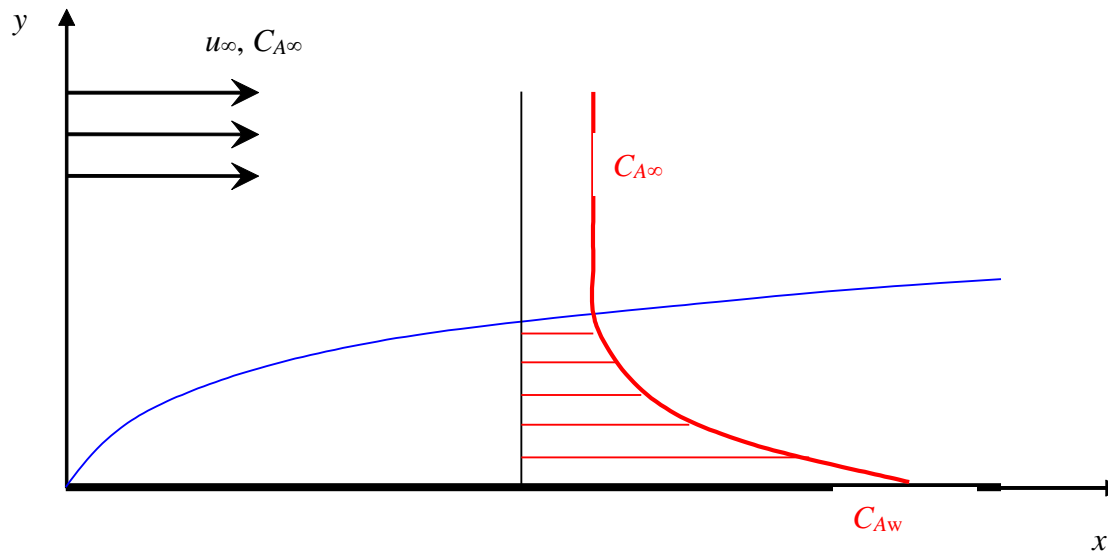
- 与传热中的牛顿冷却公式形式相同。





# 浓度边界层

- 在对流传质中，在界面上也象热边界层一样会形成浓度边界层。扩散介质的浓度变化主要发生在浓度边界层之内。





## 重要的准则数

- 普朗特准则数  $Pr = \frac{\nu}{a}$  (动量传递/热量传递)

- 施密特准则数  $Sc = \frac{\nu}{D}$  (动量传递/质量传递)

- 对流传热的努谢尔特数  $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$

- 对流传质的舍伍德数 (传质努谢尔特数)

$$Sh = \frac{\alpha_D l}{D}$$



- 管内强制对流湍流换热的公式

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$

- 管内强制对流传质的公式

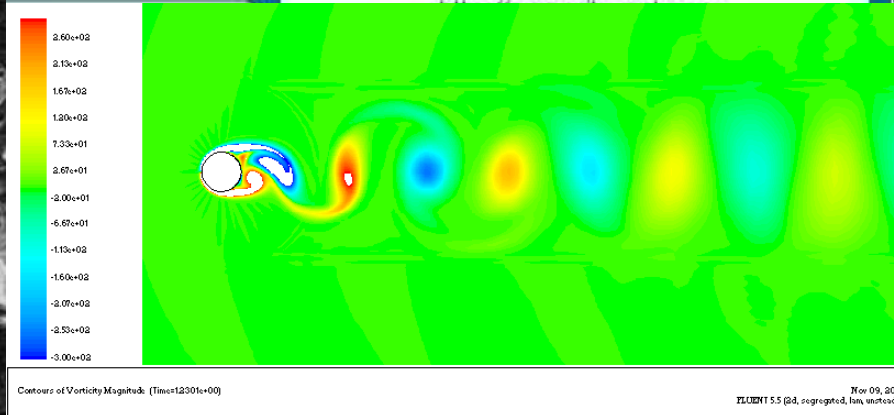
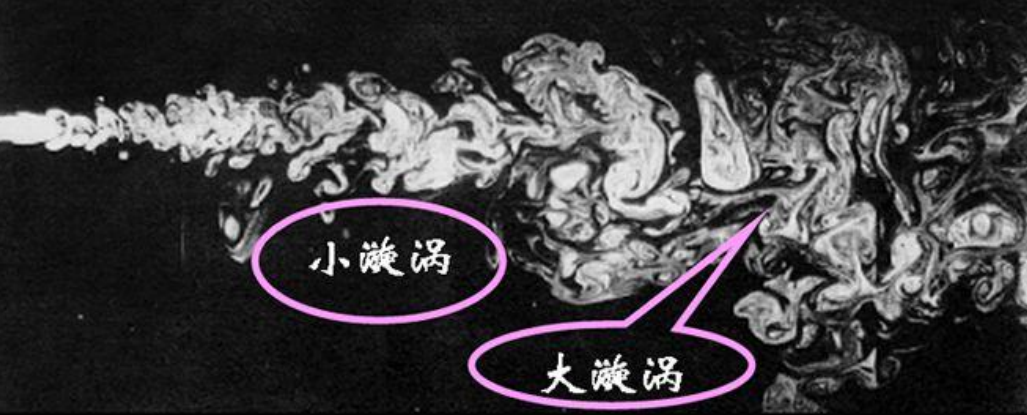
$$Sh = 0.023 Re^{0.83} Sc^{0.44}$$



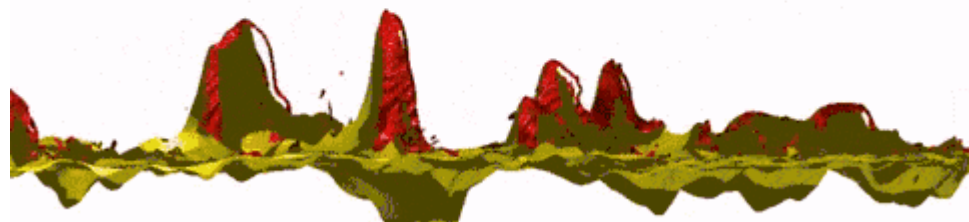
# 第一节 湍流现象及其数学描写

## 一、湍流的主要现象——脉动

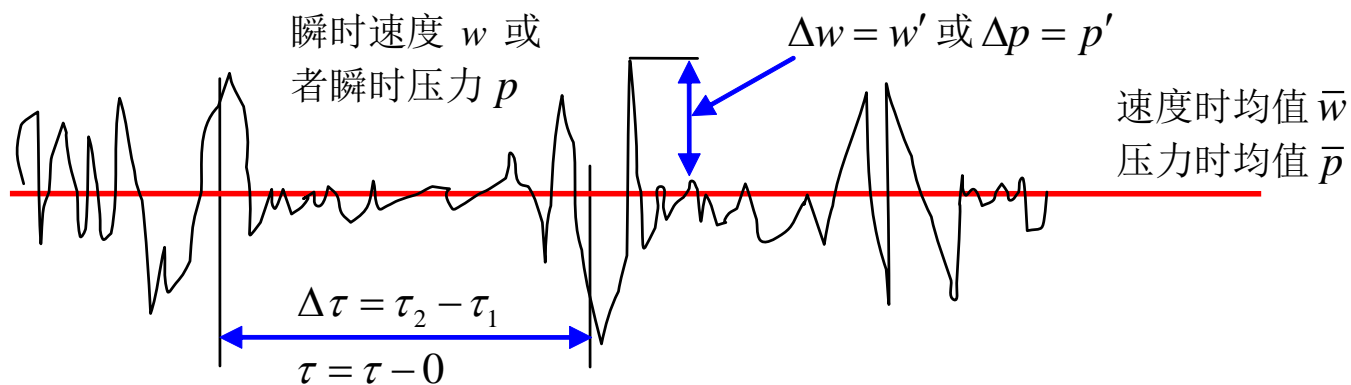
- 1883年，雷诺（Reynolds）首先发现了粘性流体存在着两种不同的流动状态——层流和湍流
- 当 $Re = \frac{wd}{\nu} \geq Re_{lj}$ 时，由定常的层流流动→非定常的紊流流动——湍流。
- 湍流的特征：流体质点的速度 $w$ 大小、方向和压力 $p$ 都随时间 $\tau$ 不断地变化，流体中明显出现很多集中的漩涡，不断地产生—消灭—再产生—再消灭。这种瞬息变化的现象称为脉动。



实验还发现湍流状态下，速度 $w$ 、压力 $p$ 、某组分物质的量 $m$ 及流体的温度 $T$ 总是在一个平均值上下不断的脉动



脉动





- $\bar{w}(\bar{p})$  是瞬时真实速度  $w$  (或者压力  $p$ ) 对时间的积分中值:

$$\text{即 } \bar{w} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} w d\tau \quad \text{及} \quad w' = w - \bar{w}$$

$$\bar{p} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} p d\tau \quad \text{及} \quad p' = p - \bar{p}$$





## 脉动的特性：

(1) 速度脉动 $w'$ （或 $p'$ ）对时间的平均值（时均值）为0。

即 
$$\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} w' d\tau = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} (w - \bar{w}) d\tau = 0$$

- (2) 速度脉动 $w'$ 的时均根值  $\sqrt{\overline{w'^2}} = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} (w - \bar{w})^2 d\tau} \neq 0$
- (3) 流场中任意一点上的两个不同方向上的速度脉动如 $w_x'$ 、 $w_y'$ 的乘积的时间平均值

$$\overline{w'_x w'_y} = \overline{(w_x - \bar{w}_x)(w_y - \bar{w}_y)} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} w'_x w'_y d\tau \neq 0$$

只有当  $w_x = \bar{w}_x$ （非湍流） 或  $w_y = \bar{w}_y$

$$\overline{w'_x w'_y} = 0$$





# 速度脉动 $w'$ 决定湍流中的“三传”过程

$-\overline{\rho w'_x w'_y}$	——湍流切应力	
$-\overline{\rho w_x'^2}$	——湍流正应力	➡ 动量传递
$\frac{\sqrt{(\overline{w_x'^2} + \overline{w_y'^2} + \overline{w_z'^2})/3}}{w^*}$	——湍动度	

$-\overline{c\rho T'w'_y}$	——湍流热通量	➡ 热量传递
$-\overline{\rho m'w'_y}$	——湍流传质通量	➡ 质量传递

其中：

$w^*$ ——某一特征速度

$c$ ——比热

$m'$ ——流体某一组分 质量的脉动量

另外两个主要量：

湍流动能  
湍流耗散

$$\left\{ \frac{1}{2} \overline{\rho(w_x'^2 + w_y'^2 + w_z'^2)} + 2 \left[ \left( \frac{\partial w'_x}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial w'_y}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w'_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \left[ \left( \frac{\partial w'_x}{\partial y} + \frac{\partial w'_y}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial w'_x}{\partial z} + \frac{\partial w'_z}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial w'_y}{\partial z} + \frac{\partial w'_z}{\partial y} \right)^2 \right] \right\}$$



## 二、湍流的数学描写—雷诺方程组

粘性不可压缩流体连续方程和运动微分方程，即 Navier-Stokes方程

按牛顿第二定律：

**惯性力=重力（体积力）+压力（表面力）+粘性力**

连续方程：
$$\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} = 0$$

运动方程：

$$\left. \begin{aligned} x\text{方向} \quad \rho \frac{dw_x}{d\tau} &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2} \right) \\ y\text{方向} \quad \rho \frac{dw_y}{d\tau} &= \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial z^2} \right) \\ z\text{方向} \quad \rho \frac{dw_z}{d\tau} &= \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \right\}$$



# 雷诺方程组

## ■ 连续方程

$$\frac{\partial \bar{w}_x}{\partial x} + \frac{\partial \bar{w}_y}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}_z}{\partial z} = 0$$

由湍流脉动引起的附加应力

## ■ X方向 $\rho \left[ \frac{\partial}{\partial x} (\bar{w}_x \bar{w}_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{w}_y \bar{w}_x) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{w}_z \bar{w}_x) \right]$

$$= \rho \bar{g}_x - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial \bar{w}_x}{\partial x} - \rho \overline{w'_x w'_x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial \bar{w}_x}{\partial y} - \rho \overline{w'_y w'_x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial \bar{w}_x}{\partial z} - \rho \overline{w'_z w'_x} \right)$$

## ■ Y方向 $\rho \left[ \frac{\partial}{\partial x} (\bar{w}_x \bar{w}_y) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{w}_y \bar{w}_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{w}_z \bar{w}_y) \right]$

$$= \rho \bar{g}_y - \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial \bar{w}_y}{\partial x} - \rho \overline{w'_x w'_y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial \bar{w}_y}{\partial y} - \rho \overline{w'_y w'_y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial \bar{w}_y}{\partial z} - \rho \overline{w'_z w'_y} \right)$$

## ■ Z方向 $\rho \left[ \frac{\partial}{\partial x} (\bar{w}_x \bar{w}_z) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{w}_y \bar{w}_z) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{w}_z \bar{w}_z) \right]$

$$= \rho \bar{g}_z - \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial \bar{w}_z}{\partial x} - \rho \overline{w'_x w'_z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial \bar{w}_z}{\partial y} - \rho \overline{w'_y w'_z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial \bar{w}_z}{\partial z} - \rho \overline{w'_z w'_z} \right)$$



## 结论：

- 加上连续方程，方程数为 $3+1=4$ ，而未知数为10个
- 10个未知数

3个时均速度

$$\overline{w_x} \quad \overline{w_y} \quad \overline{w_z}$$

1个时均压力

$$\overline{p}$$

3个湍流正应力

$$\overline{w_x'^2} \quad \overline{w_y'^2} \quad \overline{w_z'^2}$$

3个湍流切应力

$$\overline{w_x' w_y'} \quad \overline{w_y' w_z'} \quad \overline{w_z' w_x'}$$

要能求解运动方程及连续方程必须补充六个方程  
——湍流附加应力方程



# 湍流模型

- 普朗特混合长度模型
  - 雷诺应力模型
  - 代数应力模型
  - 大涡模型
  - 直接模拟的模型
- 
- 均需要用数值方法进行求解



$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \varphi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \varphi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w \varphi) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + S$$

	变量	扩散系数	湍流源项	普通源项	颗粒源项
通用变量	$\varphi$	$\Gamma$	$S_t$	$S$	$S_p$
连续方程	1	0	0	0	$S_m$
x方向速度	$u$	$\mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial x})$	0	$u S_m$
y方向速度	$v$	$\mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial y})$	0	$v S_m$
z方向速度	$w$	$\mu + \mu_t$	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x}(\mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu_{eff} \frac{\partial v}{\partial z}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu_{eff} \frac{\partial w}{\partial z})$	0	$w S_m$
湍动能	$K$	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_K}$	$G - \rho \varepsilon$	0	0
湍动能耗散率	$\varepsilon$	$\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}$	$\frac{\varepsilon}{K} (c_1 G - c_2 \rho \varepsilon)$	0	0
温度 (能量)	$T$	$\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_T}$	0	$S_T + S_R$	$T S_m + S_{T,p}$
组分	$f$	$\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_m}$	0	$S_f$	$S_{f,p}$

$$S_T = Q_F k_{0F} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) c_F^\alpha c_{O_2}^\beta$$

$$S_{T,p} = Q_C S_C k_{0C} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) c_{O_2}$$





# 第二节 “三传” 的比拟

## 动量热量质量比拟对照

传热原理	动量传递	传热量W或J/s	传质量mol/s或kg/s
傅立叶公式 牛顿公式	$\tau = -\mu \frac{dw}{dy}$	$Q = -\lambda \frac{dT}{dy} \cdot f$ $Q = \alpha \cdot \Delta T \cdot f$	$\dot{m} = -D \cdot \frac{dc}{dy} \cdot f$ $\dot{m} = \alpha_{zl} \cdot \Delta c \cdot f$
源动力	速度差	温度差	浓度差
	$\frac{dw}{dy}$ 速度梯度 1/s	$\frac{dT}{dy}$ 温度梯度 K/m	$\frac{dc}{dy}$ 浓度梯度 mol/m <sup>4</sup>
		Q—传热量 J/s $\alpha$ —放热系数 J/m <sup>2</sup> s·K $\Delta T$ —温差 K f—传热面积 m <sup>2</sup>	$\dot{m}$ 传质量 mol/s $\alpha_{zl}$ —质量交换系数 m/s $\Delta c$ —浓度差 mol/m <sup>3</sup> f—质量交换面积 m <sup>2</sup>
		$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda}$	$Nu_{zl} = \frac{\alpha_{zl} \cdot L}{D}$





# 一、分子运动扩散与湍流扩散

- 当层流状态时，流体间的相互作用和混合主要靠分子运动扩散，又称内迁移现象。用运动粘性 $\nu$ ，热扩散率 $a$ （导温系数），质量扩散系数 $D$ 来表示，单位都是 $m^2/s$

- 按分子运动论  $\nu = a = D = \frac{1}{3} \bar{l} \cdot \bar{w}$

$$Pr = \frac{\nu}{a} = 1 = \frac{\nu}{\left(\frac{\lambda}{\rho c_p}\right)}$$

$$Sc = \frac{\nu}{D} = 1$$

$$Le = \frac{a}{D} = 1$$

说明分子运动扩散的“三传”引起的速度场、温度场和浓度场分布规律一样

实际气体物质的Pr数多数在0.6~0.8之间。



# 分子运动扩散与湍流扩散

- 当层流状态  $Re < Re_{lj}$ : 靠分子运动扩散
- 不旺盛的湍流  $Re \geq Re_{lj}$ : 靠分子运动扩散+湍流运动扩散
- 旺盛湍流  $Re \gg Re_{lj}$ : 靠湍流运动扩散  $\frac{\nu}{\nu_t} = \frac{\nu}{lw'} \propto \frac{1}{Re} \ll 1$

**充分湍流,  $\therefore$  分子运动扩散可忽略**

在湍流情况下, 引入湍流  $\nu_t$ ,  $a_t$ ,  $D_t$ , 和  $Pr_t$ ,  $Sc_t$ ,  $Le_t$  来反映其“三传”。由于湍流的动量, 热量和质量扩散均源于脉动和漩涡, 可近似认为:

$$D_t \approx \nu_t \approx a_t = lw', \quad Pr_t \approx Sc_t \approx Le_t \approx 1$$



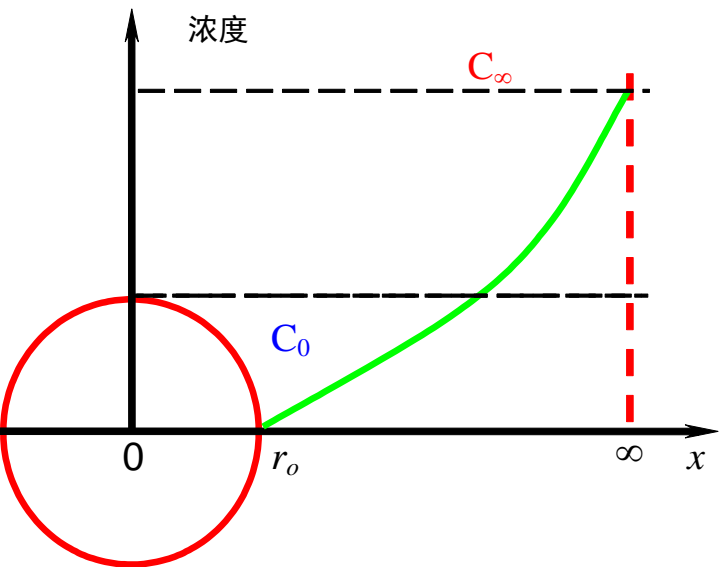
## 实验发现：

- $Pr_t = \frac{\nu}{a} \approx 0.75, Sc_t = \frac{\nu}{D} \approx 0.7 \sim 0.75 \quad \therefore Le_t = \frac{a}{D} \approx 1 \sim 0.9$
- (1)  $Pr_t = \frac{\nu}{a}$  与  $Sc_t = \frac{\nu}{D}$  均小于1，说明：动量交换过程不如热量和质量交换更强烈， **$\therefore$ 温度和浓度混合边界层比速度边界层发展得快。**
- (2) 由于 $Le_t = a/D \approx 1$ ，说明：温度和浓度边界层的发展十分相近，可以用传热过程的基本规律近似描写质量交换。



# “三传” 比拟举例

- 1、从 $\infty$ 处向C球表面扩散 $O_2$ ，质量扩散是一确定值



- 第一种物理模型：从远方 ( $\infty$ ) 通过分子扩散传递 球面上 ( $r_0$ 表面上)
- 第二种物理模型：流体与固体表面上质量交换 ( $r_0$ 表面上)

两种方式传递量相等，传质平衡

边界条件：

当 $r=\infty$ 时， $C=C_\infty$

当 $r=r_0$ 时， $C=C_0$



# “三传” 比拟举例

• 第一种模型  $\dot{m} = -D \cdot \frac{dc}{dr} \cdot 4\pi r^2 \longrightarrow dc = -\frac{\dot{m}}{D \cdot 4\pi} \left(\frac{1}{r^2}\right) dr$

积分  $c_0 - c_\infty = \frac{-\dot{m}}{4\pi D} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{\infty}\right) \longrightarrow \dot{m} = 4\pi r_0 D (c_\infty - c_0)$

• 同时，根据第二种模型  $\dot{m}$  又等于球表面上的

对流质量交换量  $\dot{m} = 4\pi r_0 D (c_\infty - c_0) = \alpha_{zl} \cdot (c_\infty - c_0) \cdot 4\pi r_0^2$

$\therefore D = \alpha_{zl} \cdot r_0 = \alpha_{zl} \cdot \frac{\delta_0}{2} \quad Nu_{zl} = \frac{\alpha_{zl} \cdot \delta_0}{D} = 2 \quad \alpha_{zl} \propto \frac{1}{\delta_0}$

说明颗粒越细，表面质量交换 ( $\alpha_{zl}$ ) 越强烈



# “三传” 比拟举例

有相对运动时的情况  $Nu_{zl} = 2 + C Re^n Sc^{\frac{1}{3}}$

$Re < 200$        $Nu_{zl} = 2 + 0.6 Re^{0.5} Sc^{\frac{1}{3}}$

$200 < Re < 15000$        $Nu_{zl} = 2 + 0.37 Re^{0.6} Sc^{\frac{1}{3}}$

流体的密度

流体与颗粒的速度差

$$Re = \frac{\rho u d_p}{\mu}$$

颗粒的直径

流体的动力粘性  $\mu$



## “三传” 比拟举例

- 动力工程燃烧中，一般煤粉或油雾与空气的相对速度比较小（也就是Re比较小），可以认为

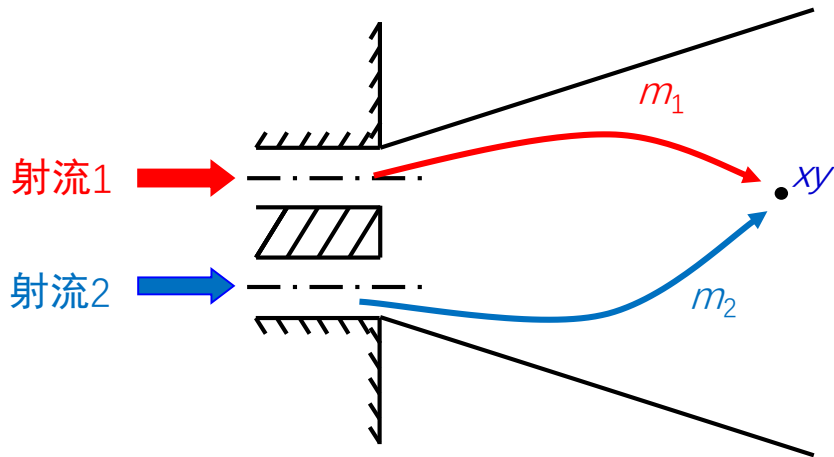
$$Nu_{zl} \approx 2$$





## 例2：利用热质混合过程相似性，用温度场模拟浓度场

问题：研究两股平行射流的混合过程



有两股射流：射流1和射流2

- $C_1$ 和 $C_2$ 是两股气流中的某种成分的初始浓度
- $T_1$ 和 $T_2$ 是两股气流的初始温度

需要获得：

- 喷口以外的空间中某一点 $xy$ 的浓度 $C_{xy}$
- 以及，该点的气体中，分别来自两股气流的混合后的质量分数 $m_1$ 和 $m_2$

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1 + m_2 = 1 \\ m_1 c_{p,1} T_1 + m_2 c_{p,2} T_2 = c_p T_{xy} \\ m_1 C_1 + m_2 C_2 = C_{xy} \end{array} \right. \xrightarrow{c_{p,1}=c_{p,2}=c_p} \left\{ \begin{array}{l} m_1 + m_2 = 1 \\ m_1 T_1 + m_2 T_2 = T_{xy} \\ m_1 C_1 + m_2 C_2 = C_{xy} \end{array} \right. \begin{array}{l} \text{质量守恒} \\ \text{热量守恒} \\ \text{组分守恒} \end{array}$$

以上方程组封闭吗？

- A 方程组封闭
- B 方程组不封闭

提交



# 先来侦破一个小案件

32





西安交通大学

xi'an jiaotong university

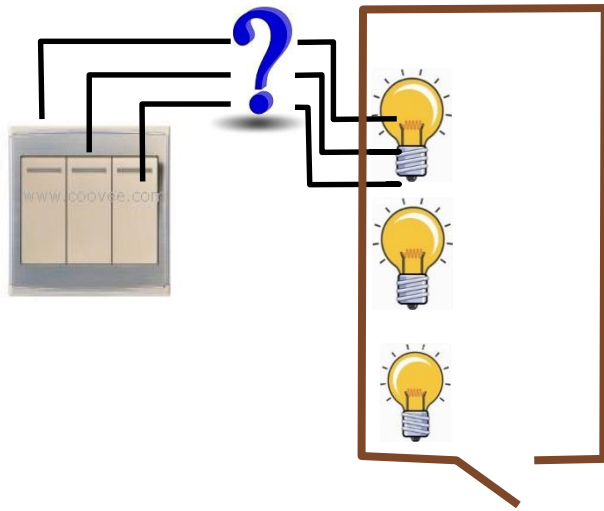
能源与动力工程学院  
School of Energy & Power Engineering

<http://epe.xjtu.edu.cn>





- 有一个墙壁及门都封闭不透光的房间（可以视作密室）。
- 房间里面的3张桌子上分别放有3盏普通的台灯。
- 控制3盏台灯的开关安装在房间之外，控制开关的地方不能看见灯点亮和熄灭的情况，但可以在操作开关之后迅速开门进入房间。
- 现在关上房间的门，人在门外，不能看见房间内的情况。



问：如果只有你一个人，只给你一次打开房门进入房间的机会，不借助任何其它工具（比如镜子、摄像机、遥控机器），也不借任何他人的帮助，怎么判断3个开关分别控制哪一盏灯？





# “破案”方法

开关状态

灯泡状态

三个灯泡，相当于3个“未知量”

亮度

温度

“开”



“亮”

使用眼睛测量“亮度”可以提供2个开关与灯泡对应的“方程”

“关”



“灭”

“冷”

开了一段时间



“热”

使用手指测量“温度”，可以补充1个开关与灯泡对应的“方程”

这是解决本题的关键所在



## 重要的提示

- 数学上和逻辑上的“未知量”必须依靠数学或者逻辑关系上封闭的条件来求解。
- 物理上的“未知量”则可以通过测量来转化为“已知量”。——这就是实验科学核心的思维方式。





## 温度场模拟浓度场

$$\begin{cases} m_1 + m_2 = 1 \\ m_1 T_1 + m_2 T_2 = T_{xy} \\ m_1 C_1 + m_2 C_2 = C_{xy} \end{cases}$$

$T_1$ 为一次风气体的初始温度，**已知量**；

$C_1$ 为一次风中某种气体组分的初始浓度，**已知量**；

$T_2$ 为二次风气体的初始温度，**已知量**；

$C_2$ 为二次风中某种气体组分的初始浓度，**已知量**；

$m_1$ 、 $m_2$ 分别为射流中某点上来自一次风、二次风的物质的质量分数，**未知量**；

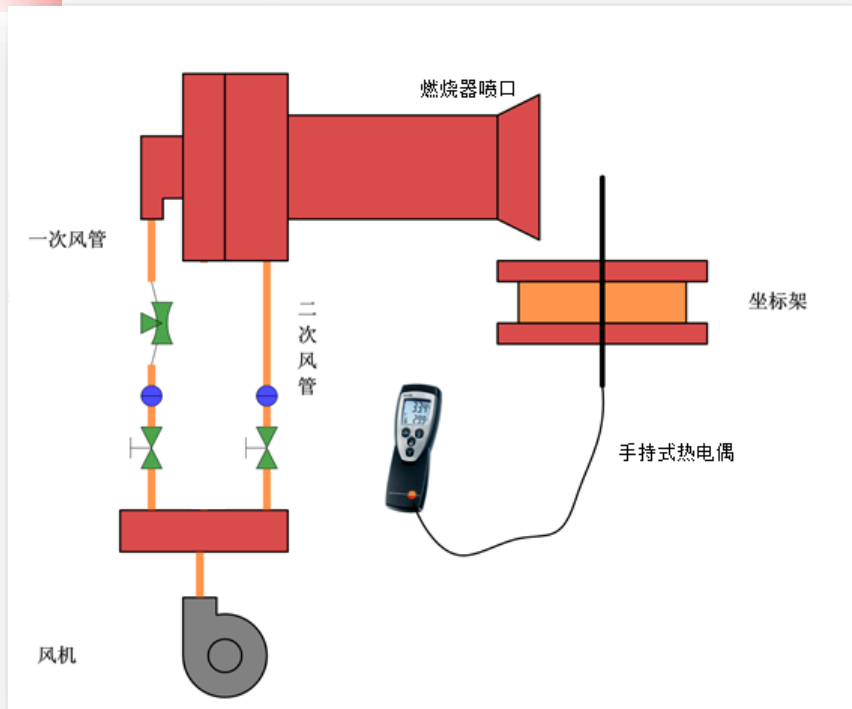
$C_{xy}$ 为射流中某点上某种气体组分的浓度，**未知量**；

$T_{xy}$ 为射流中某点气体的温度，**未知量**。

**4个未知量。一共有3个方程，方程组不封闭。**



## 温度场模拟浓度场的实施方法



- 用热电偶测量射流混合区中任意一点  $xy$  的温度  $T_{xy}$ ，使之成为已知量，减少了1个未知量，使得未知量剩下  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $C_{xy}$  3个，方程组封闭。
- 求解线性方程组，可以得到结果

$$C_{xy} = \left( \frac{T_{xy} - T_2}{T_1 - T_2} \right) (C_1 - C_2) + C_2$$

$$m_1 = \frac{T_{xy} - T_2}{T_1 - T_2}$$

$$m_2 = \frac{T_1 - T_{xy}}{T_1 - T_2}$$



## 实例：

- $T_1=60^\circ\text{C}$ ,  $T_2=$ 室温 $20^\circ\text{C}$ , 实测 $xy$ 点的 $T_{xy}=50^\circ\text{C}$

$$\therefore \frac{T_{xy} - T_2}{T_1 - T_2} = \frac{50 - 20}{60 - 20} = 0.75$$

- 实际 $C_1=3\text{mol/m}^3$ ,  $C_2=2\text{mol/m}^3$ , 那么

$$\frac{C_{xy} - C_2}{C_1 - C_2} = \frac{C_{xy} - 2}{3 - 2} = 0.75$$

- $\therefore C_{xy}=2.75\text{mol/m}^3$

求出所有点的温度场分布 $T(x, y)$ 就代表浓度场的分布 $C(x, y)$ 。

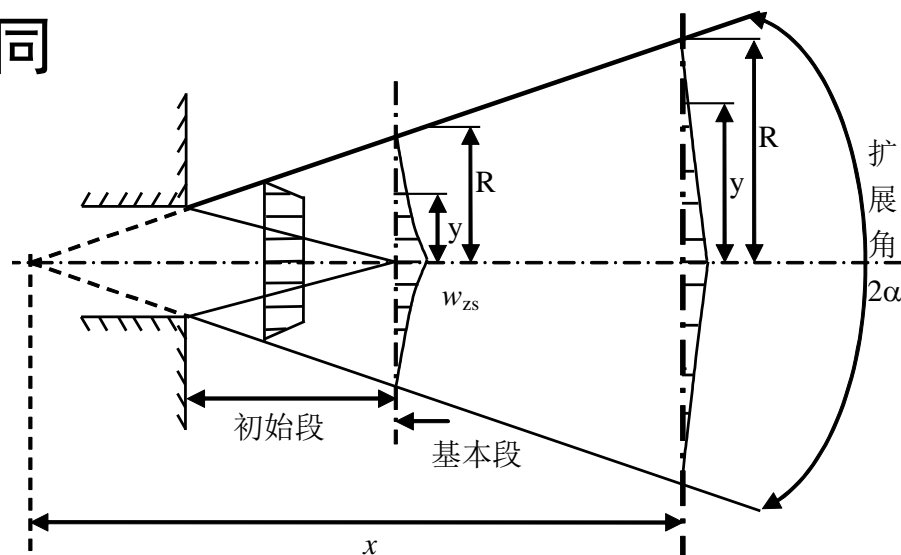
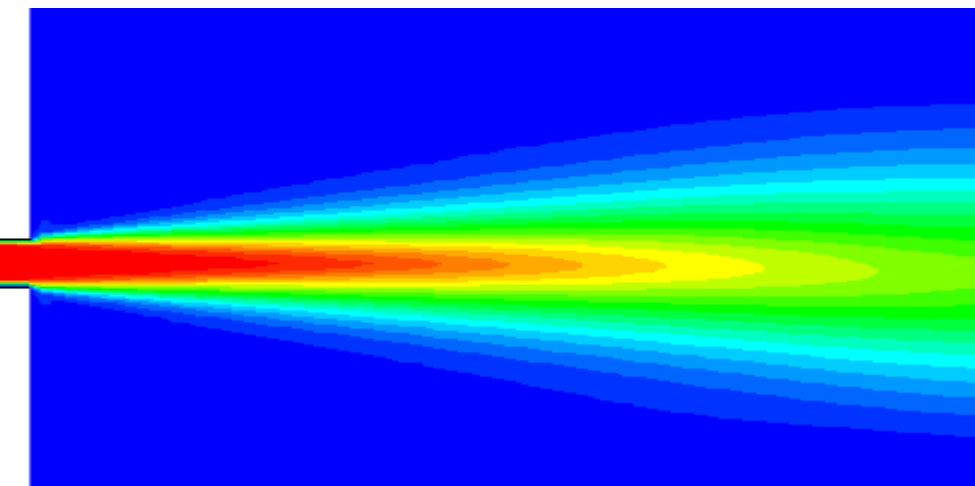


## 第三节 自由射流中的混合与传质

### 一、自由射流的形式

自由射流指流体从喷口射入

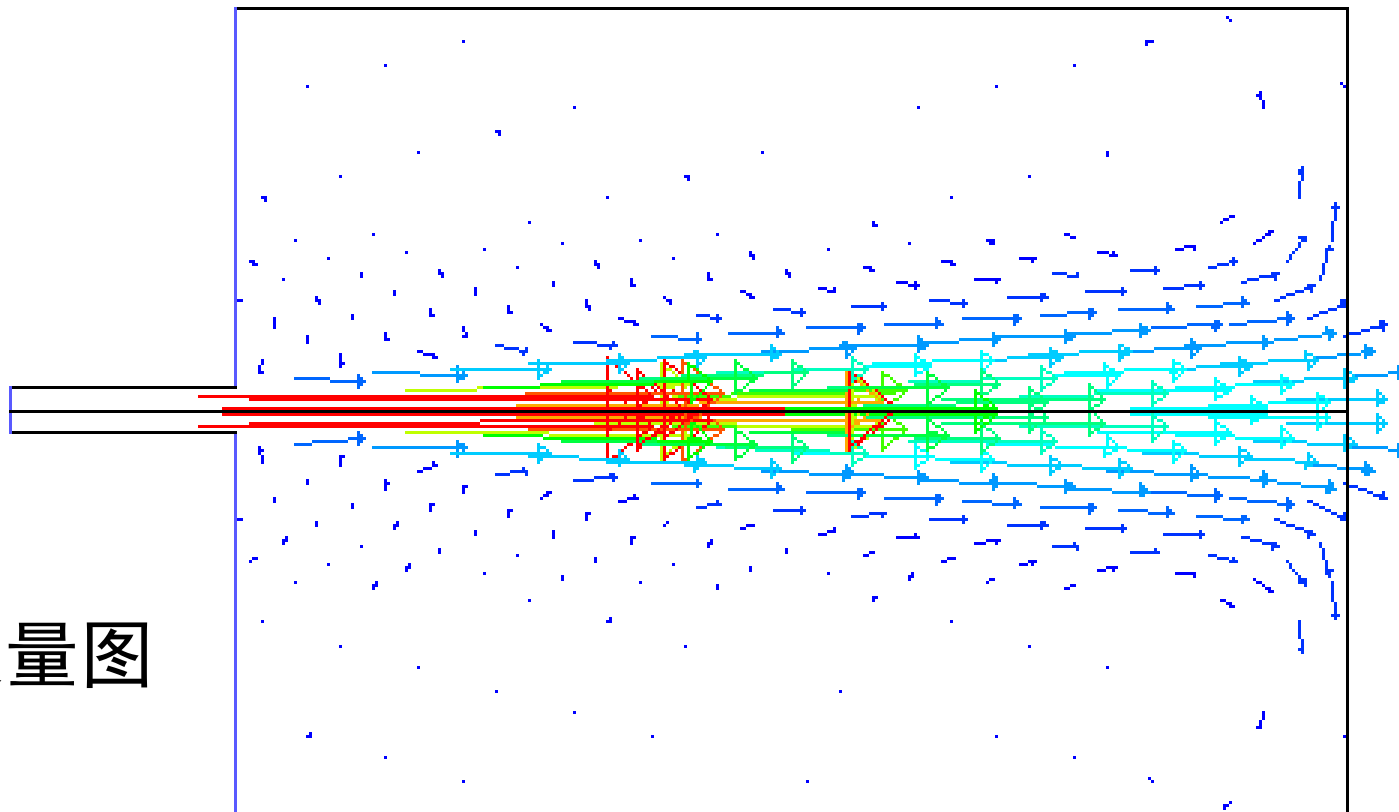
- (1) 无限大静止空间（空间流体速度为0）
- (2) 不受固体边壁限制，而淹没在周围流体介质中
- (3) 流体介质与空间介质相同





# 湍流自由射流基本特点一

自由射流中任意断面上轴向速度  $w_x \gg$  横向速度  $w_y$   
射流速度  $w \approx$  轴向速度  $w_x$



速度矢量图



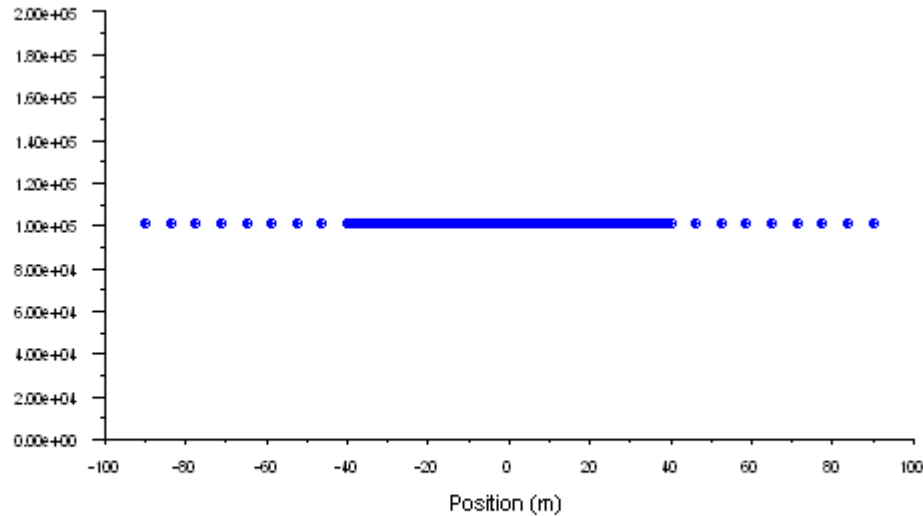
# 湍流自由射流基本特点二

自由射流内部压力 $p$ =周围介质压力 $p_{\infty}$ 。

绝对压力

Absolute Pressure (pascal)

- out
- section1
- section2
- section3



Absolute Pressure

Aug 27, 2012  
FLUENT 6.3 (2d, p1nr, rle)





## 二、射流中心动量守恒条件

### 自由射流积分（动量守恒）条件：

任意断面上动量（流率）是一个常数。其值恒等于主射流喷口断面上以  $w_1$  计算的初始动量（流率）。

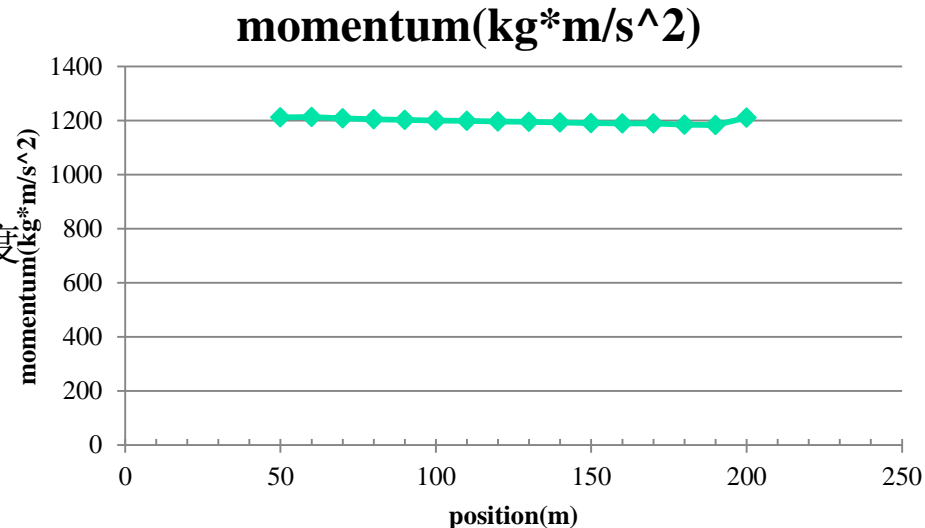
$$\int_f \rho w w d f = \rho_1 w_1 w_1 f_1 = \text{常数}$$

$\rho A w w \rightarrow$  密度  $\times$  面积  $\times$  速度  $\times$  速度

$\rightarrow$  密度  $\times$  体积流率（单位时间流动的体积） $\times$  速度

$\rightarrow$  质量流率（单位时间流动的质量） $\times$  速度

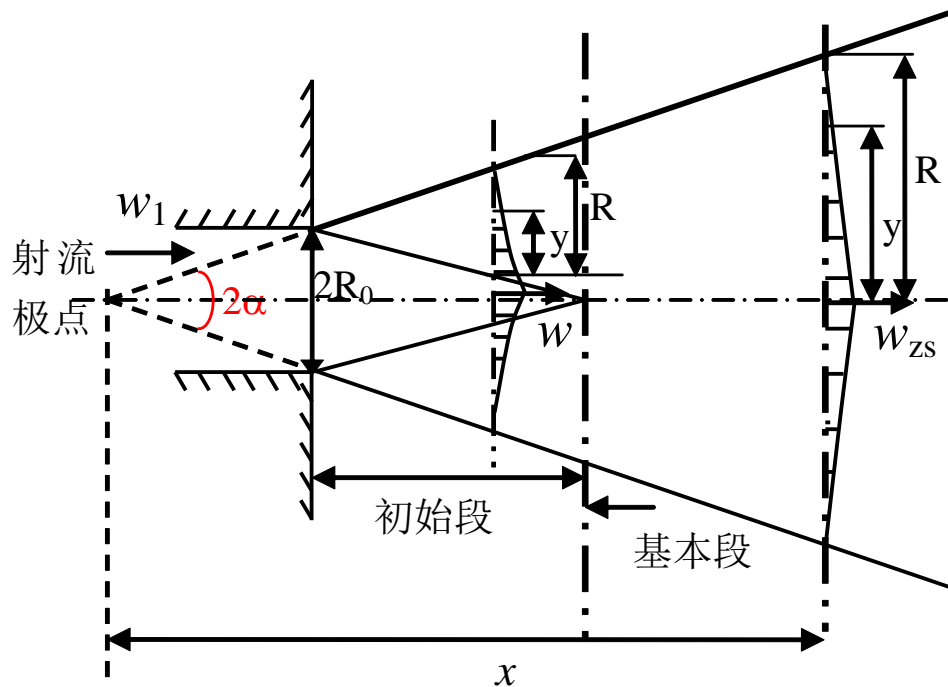
$\rightarrow$  动量流率（单位时间流动的动量）





# 三、自由射流中的混合与传质

## (1) 射流扩展角 $2\alpha$



$\alpha$ 大——表明与周围介质的湍流混合愈强烈。

实验归纳：

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{R}{x} = a \cdot \phi$$

$\phi$ ——决定于射流喷口截面形状的系数

$a$ ——决定于喷口速度均匀程度的湍流结构系数

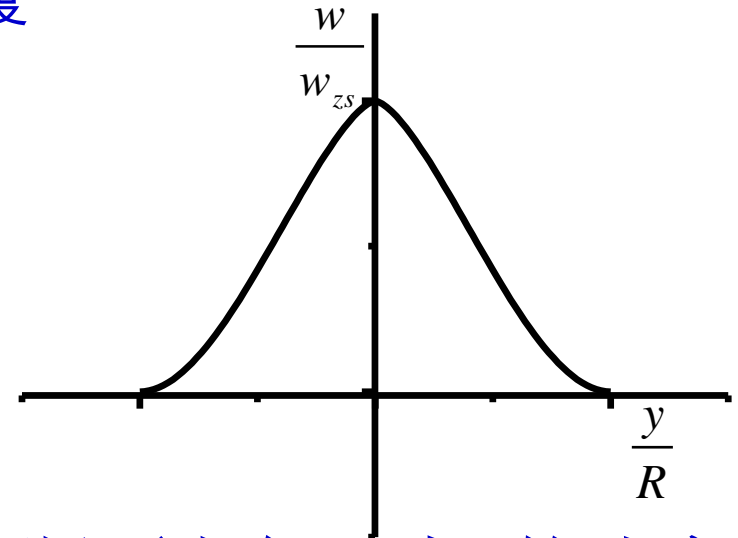
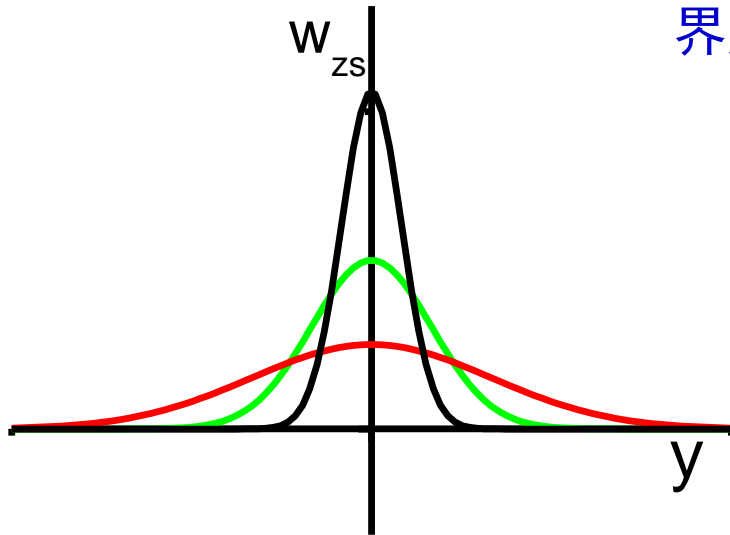


## (2) 射流断面上的速度分布—相似性

$$\frac{w}{w_{zs}} = \left[ 1 - \left( \frac{y}{R} \right)^{1.5} \right]^2$$

$w, y$ ——任意断面上任一点的速度和坐标位置

$w_{zs}, R$ ——任意断面上轴心线上的速度和边界层半宽度



- 测量出  $R$  和  $w_{zs}$ ，可求出任意断面上任一点  $y$  的速度

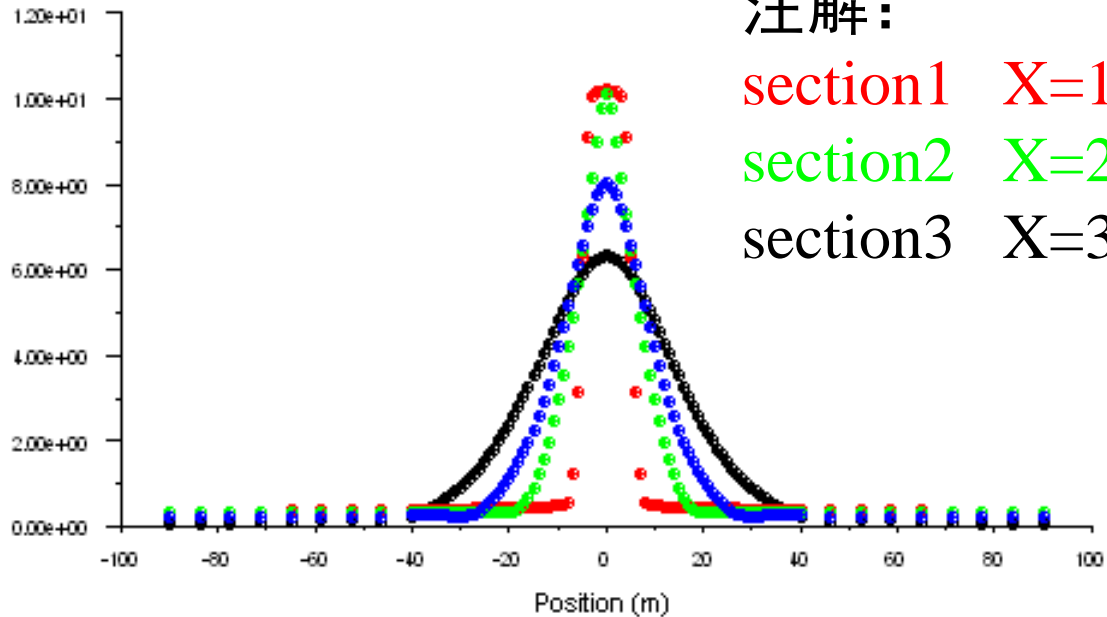


# 自由射流特点

## 不同截面上的速度大小分布

- ort
- section1
- section2
- section3

Velocity  
Magnitude  
(m/s)



注解:

section1 X=10

section2 X=20

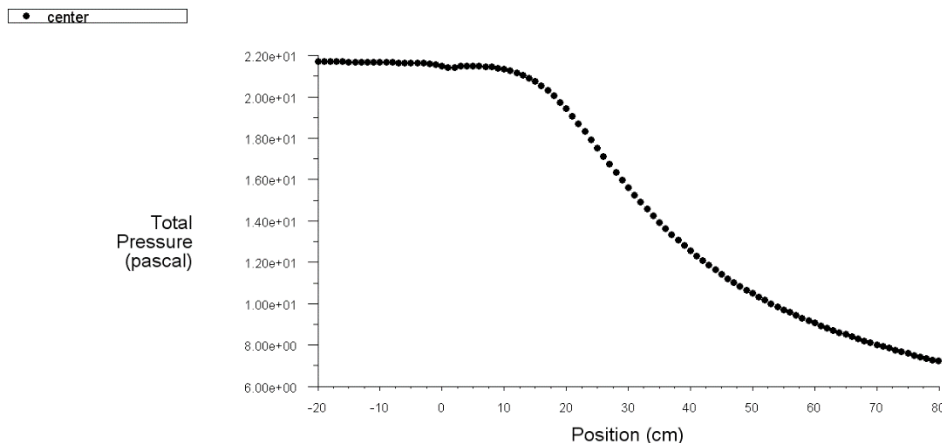
section3 X=30



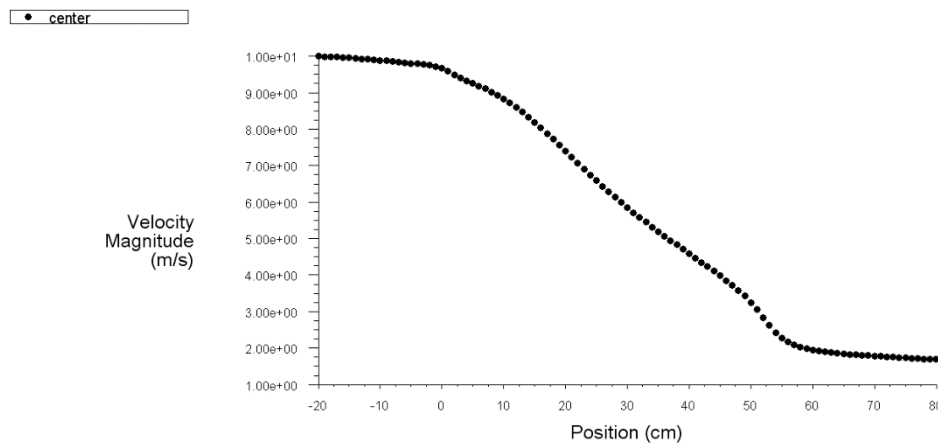
# (3) 射流轴心线上参数变化

## 等温自由射流沿轴心线参数变化规律

总压分布



轴心线上速度分布





# (4) 不等温轴对称自由射流

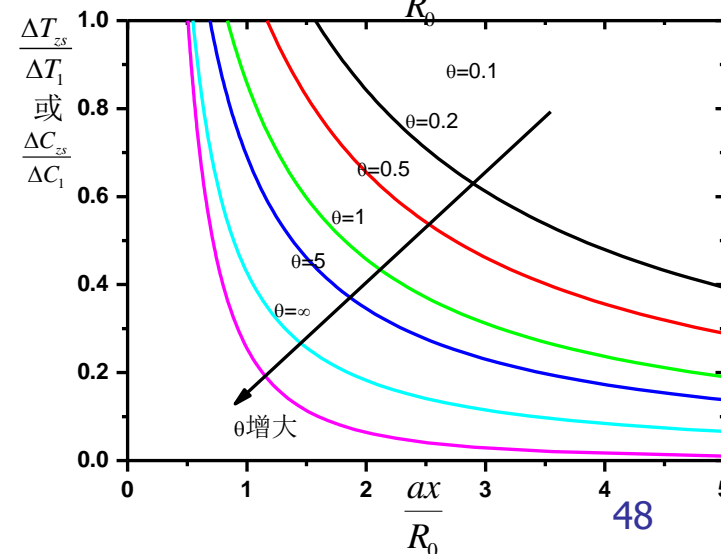
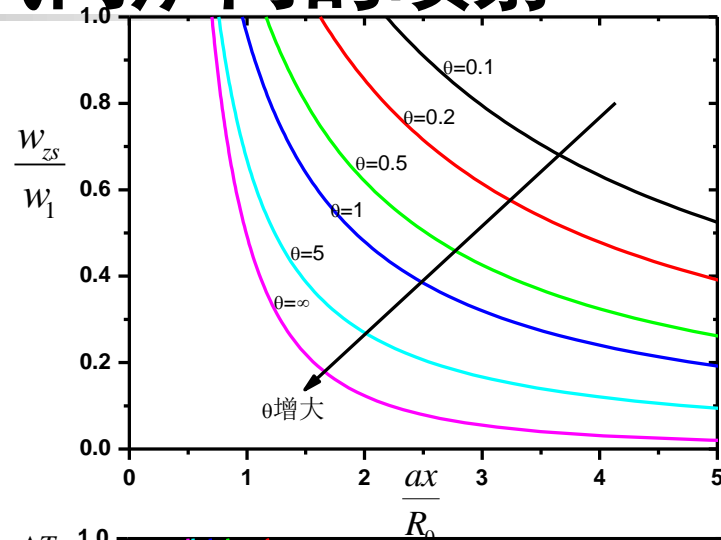
## —煤粉炉一次风、二次风向炉内的喷射

- 按动量守恒，热焓差守恒条件得

$$\frac{w_{zs}}{w_1} = \frac{0.96}{\frac{ax}{R_0}} \sqrt{\frac{1 + 0.535(\theta - 1) \frac{w_{zs}}{w_1}}{\theta}}, \quad \theta = \frac{T_1}{T_2}$$

$$\frac{\Delta C_{zs}}{\Delta C_1} = \frac{\Delta T_{zs}}{\Delta T_1} = B \frac{w_{zs}}{w_1}$$

- $\theta \uparrow$ ，无量纲速度、温差、浓度差衰减加快，射程  $\downarrow$







# 不等温自由射流混合

## 温度云图

冷射流  
进入热  
空间

$$V_{inlet} = 10m/s$$

$$T_{inlet} = 300K$$

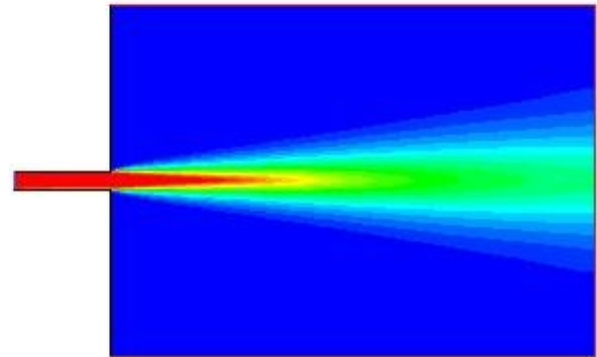
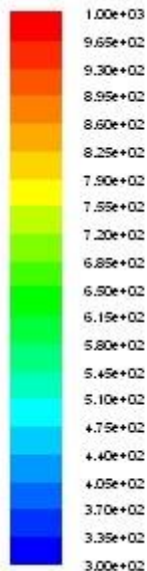
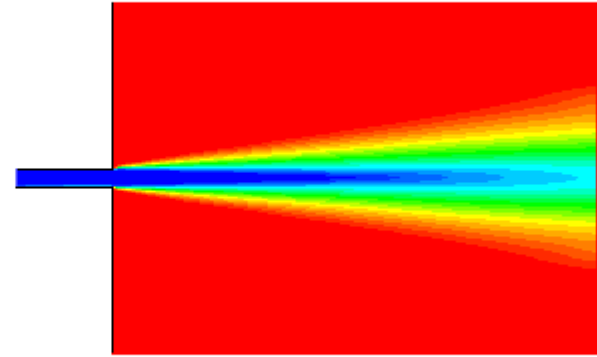
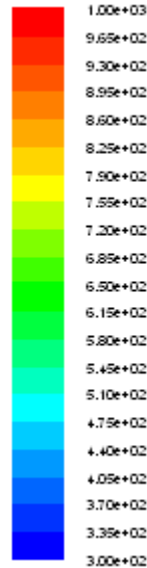
$$T_{atm} = 1500K$$

热射流  
进入冷  
空间

$$V_{inlet} = 10m/s$$

$$T_{inlet} = 1500K$$

$$T_{atm} = 300K$$





# 不等温自由射流混合

## 速度云图

冷射流  
进入热  
空间

$$V_{inlet} = 10m/s$$

$$T_{inlet} = 300K$$

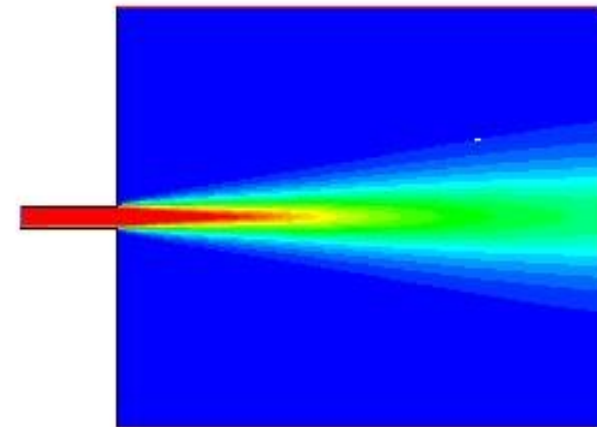
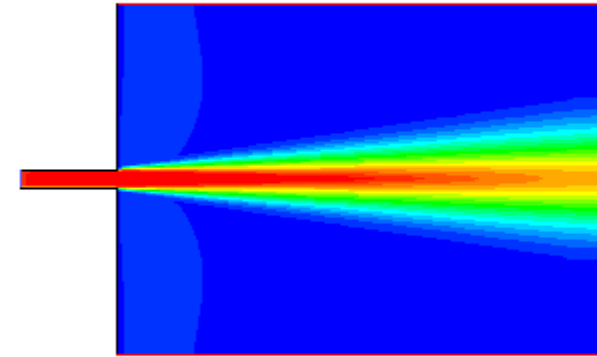
$$T_{atm} = 1500K$$

热射流  
进入冷  
空间

$$V_{inlet} = 10m/s$$

$$T_{inlet} = 1500K$$

$$T_{atm} = 300K$$





## 主要结论:

(1) 把热射流 ( $T_1$ ) 射入冷空间 ( $T_2$ ) 中

无量纲轴心速度  $w_{zs}/w_1$  衰减快, 且随  $\theta \uparrow$  有  $w_{zs}/w_1 \downarrow \downarrow$

无量纲轴心温差  $\Delta T_{zs}/\Delta T_1$  衰减快, 且随  $\theta \uparrow$  有  $\Delta T_{zs}/\Delta T_1 \downarrow \downarrow$

无量纲轴心浓度差  $\Delta C_{zs}/\Delta C_1$  衰减快, 混合强烈, 且随  $\theta \uparrow$  有  $\Delta C_{zs}/\Delta C_1 \downarrow \downarrow$

(2) 把冷射流 ( $T_1$ ) 射入热空间 ( $T_2$ ) 中

三个无量纲量  $w_{zs}/w_1$ ,  $\Delta T_{zs}/\Delta T_1$ ,  $\Delta C_{zs}/\Delta C_1$  衰减慢, 混合慢, 射程长。随  $\theta \downarrow$  衰减很慢。

如锅炉中的二次风, 从燃烧供  $O_2$  的角度应用高  $T_1$  ( $\theta$  尽可能高) 的空气, 以加强湍流混合和传质 (供  $O_2$ ), 有利于燃烧。

从组织炉内气流流动工况角度, 相反, 应用  $\theta$  低一些的空气 ( $T_1 \downarrow$ ), 衰减慢, 有足够的扰动范围, 保证气流流动。



## (5) 气固(液)两相射流中的混合与传质

- ① 颗粒只有几十微米，随风运动，对射流流场不影响，可视为自由射流，因此适用积分守恒条件和射流分布相似性规律，**由于射流中有固(液)颗粒，相当于增大了射流的密度**，射流轴心线上速度**衰减减慢**（即与周围介质混合传质减慢），射流（火焰长度）变长。

积分动量守恒条件

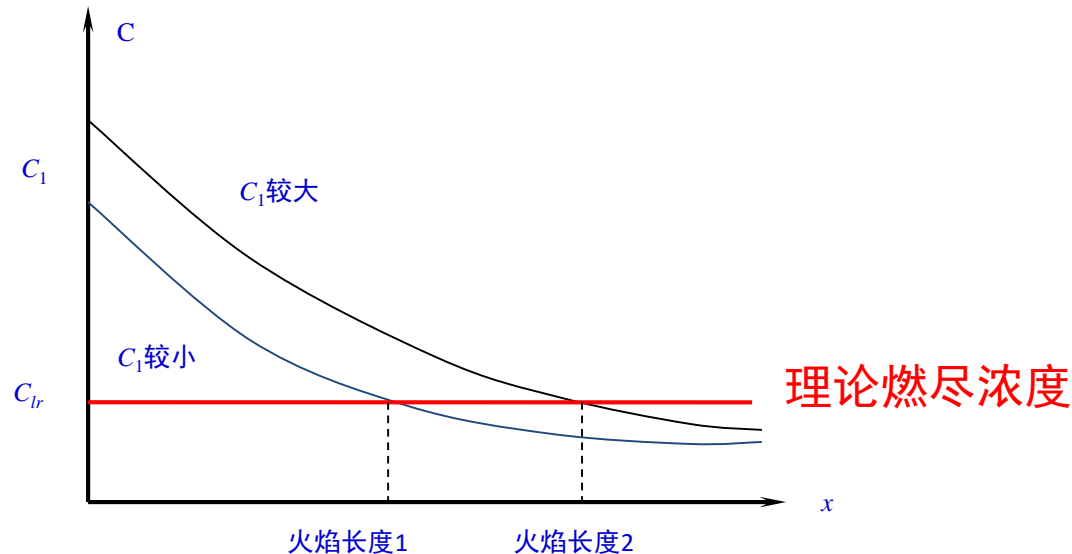
$$\int_f \rho(1+C)w^2 df = (q_{mq}w_1 + q_{mk}w_1) = \text{常数}$$

C—射流任意断面中，某混合点上的固(液)体颗粒浓度。



## (5) 气固(液)两相射流中的混合与传质

- ② 某断面轴心线上的燃料浓度  $C_{zs}$  = 化学当量比下的理论燃尽浓度  $C_{lr}$  时，燃烧才完全。此时该断面的距离  $ax/R_0$  称理论燃尽火焰长度。对某一种特定的燃料， $C_{lr}$  是一个确定值，**燃烧的理论燃尽火焰长度的大小取决于于一次风中燃料的初始浓度  $C_1$ 。**  $C_1$  越大，需要越长的射流射程来完成燃烧。

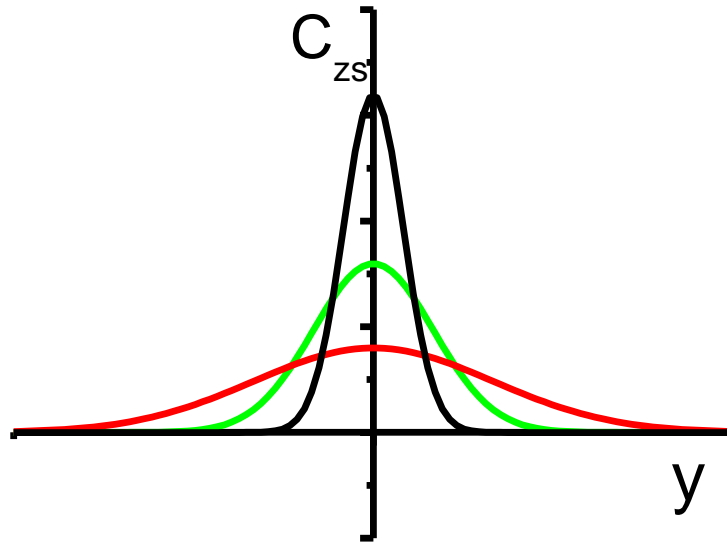






## (5) 气固(液)两相射流中的混合与传质

- ③ 以质量流量计算，任一断面上轴心线上浓度 $C_{zs}$ 是断面平均浓度的1.5倍。所以，空气和燃料的分布是不均匀匹配的，要使得射流中各处的燃料都有充足氧气，必须总过量空气系数大于1。







## 重要的结论

- 不能依靠简单的单股自由射流同时完成投送燃料和供应氧气的任务，因为氧量和燃料浓度在空间中难以精确匹配。**解决方案：把投送燃料和供氧的功能分开，使用专门的一次风投送燃料，使用专门的二次风供应氧气（使用平行或相交射流）。**
- 要避免使用大尺寸或者高流速的一次风，当燃烧设备的功率增大时，不能简单增大单股自由射流的尺寸或流速。因为这样会使得火焰变长、燃尽困难。**解决方案：将供应燃料的一次风分割为多股较小的射流，缩短射程。**
- **专门负责供氧的二次风，则可以视情况选用不同的尺寸和流速。**当供氧目标较近时，使用低流速；当供氧目标较远时，使用高流速。当供氧需求量大时，使用大尺寸；当供氧需求量小时，使用小尺寸。

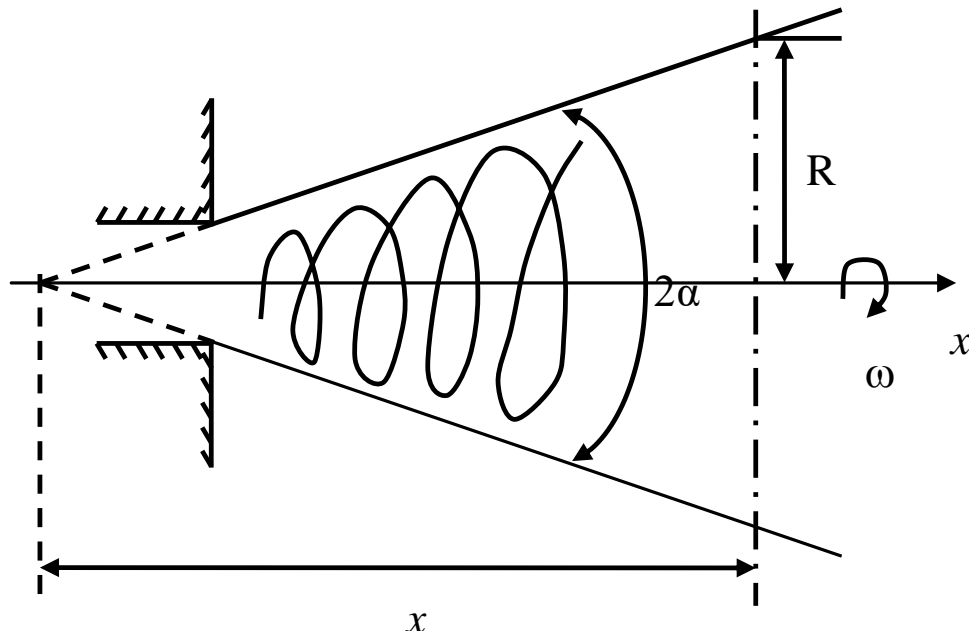


## 第四节 旋转射流中的混合与传质

### 一、旋转射流中的混合与传质的特性

旋转射流中的混合与传质形成：

一边旋转一边前进（轴向运动），便形成了旋转射流





# 速度分布:

射流断面上分成两部分:

- 射流内部: 有旋运动

$$w_\phi = wr^{n \approx 1.0}$$

$$r \rightarrow 0, \quad w_\phi \rightarrow 0$$

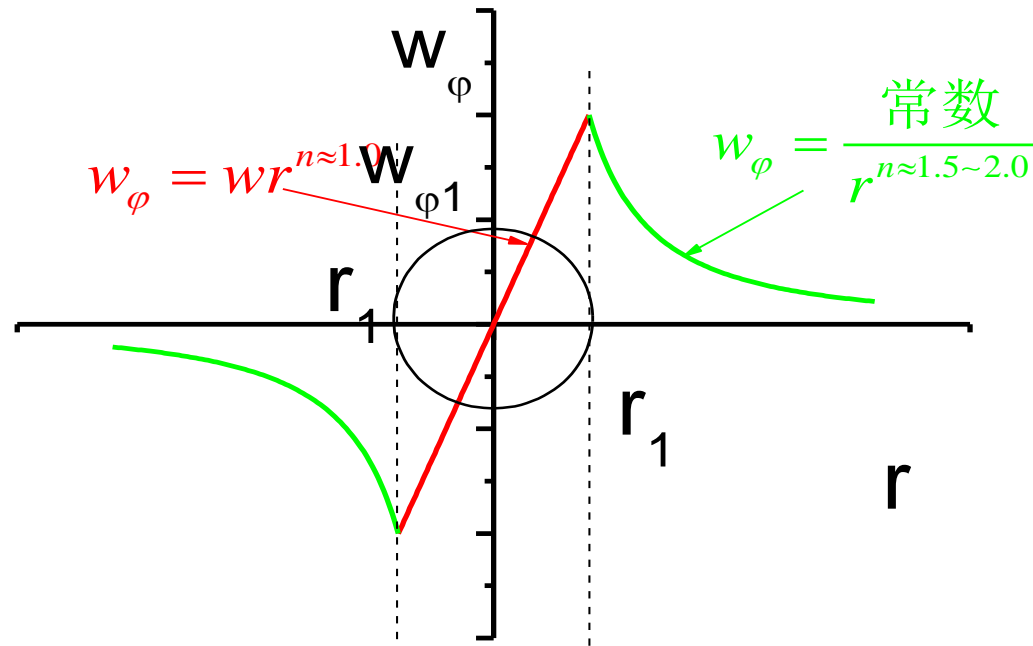
$$r \rightarrow r_1, \quad w_\phi \rightarrow w_{\phi 1}$$

- 外侧部分—无旋运动

$$w_\phi = \frac{\text{常数}}{r^{n \approx 1.5 \sim 2.0}}$$

$$r \rightarrow r_1, \quad w_\phi \rightarrow w_{\phi 1}$$

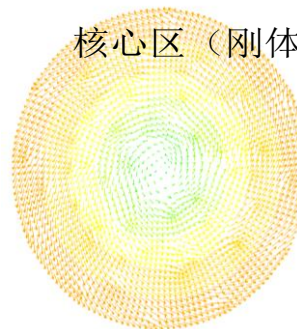
$$r \rightarrow \infty, \quad w_\phi \rightarrow 0$$



自由旋转区

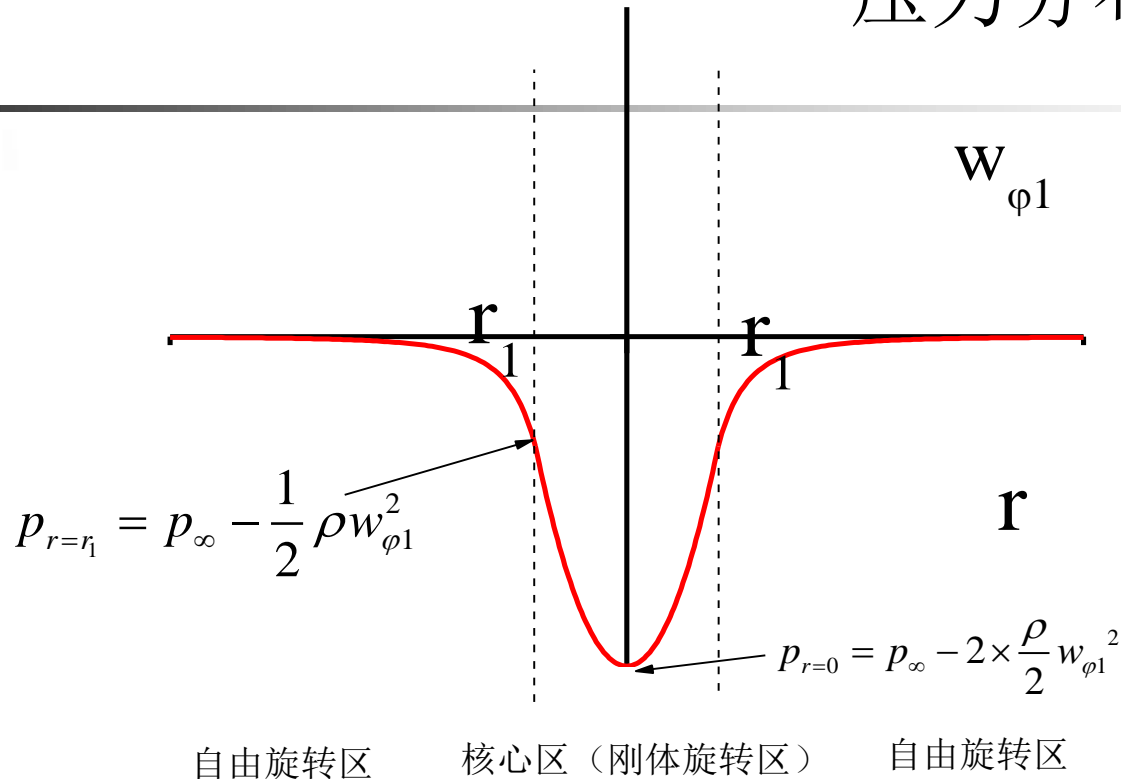
核心区 (刚体旋转区)

自由旋转区





## 压力分布



在一定的速度环量下，在喷口附近负压很大， $\therefore$ 在射流中心有一个回流区



## 二、旋流强度

工程上用旋流强度  $S$  来反映旋流射流的强弱程度

$$S = \frac{G_\phi}{G_x \cdot R} = \frac{w_\phi r}{w_x R} \propto \frac{w_\phi}{w_x}$$

其中  $R$  为定性尺寸，各国  $R$  取值不同， $S$  数值有差异

- 通常为计算方便，常用喷口处平均的  $w_\phi$  和  $w_x$  计算。
- 也有人用  $w_\phi/w_x$  来反映旋转强弱。

$$G_\phi = \int_0^{R_0} (\rho w_x 2\pi r dr) w_\phi \cdot r = const$$

旋转动量矩  $G_\phi$  守恒条件

$$G_x = \int_0^{R_0} (\rho w_x 2\pi r dr) w_x + \int_0^{R_0} p 2\pi r dr = const$$

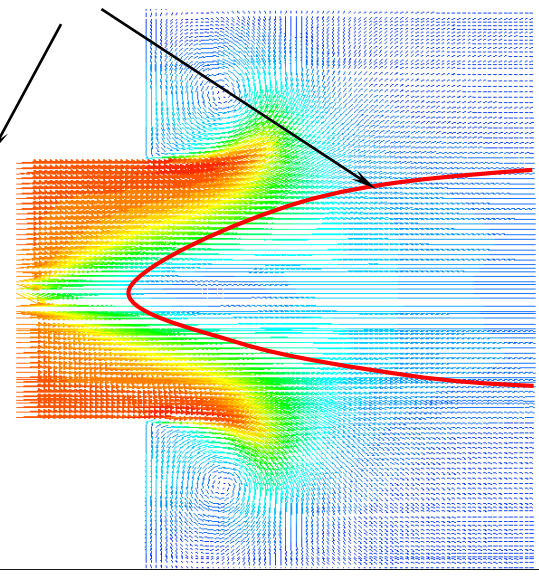
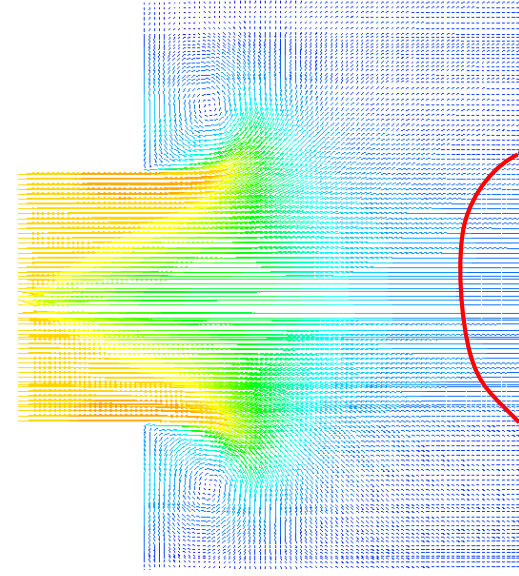
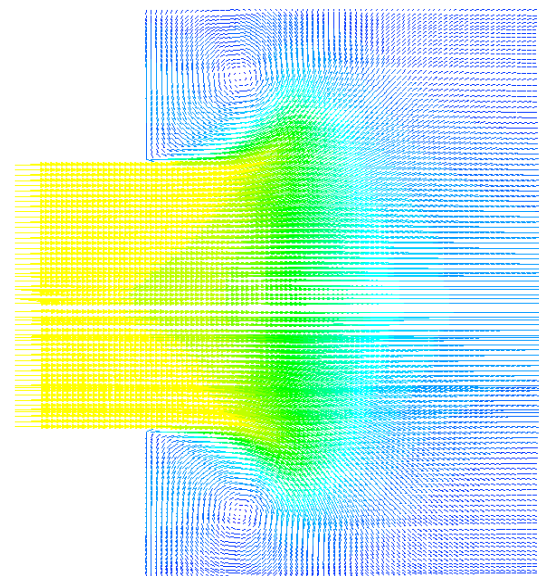
轴向动量矩  $G_x$  守恒条件





# 旋流强度对回流区影响

切向速率与轴向速率之比增大，  
回流区宽度、长度、回流量都增大。



回流区边界线

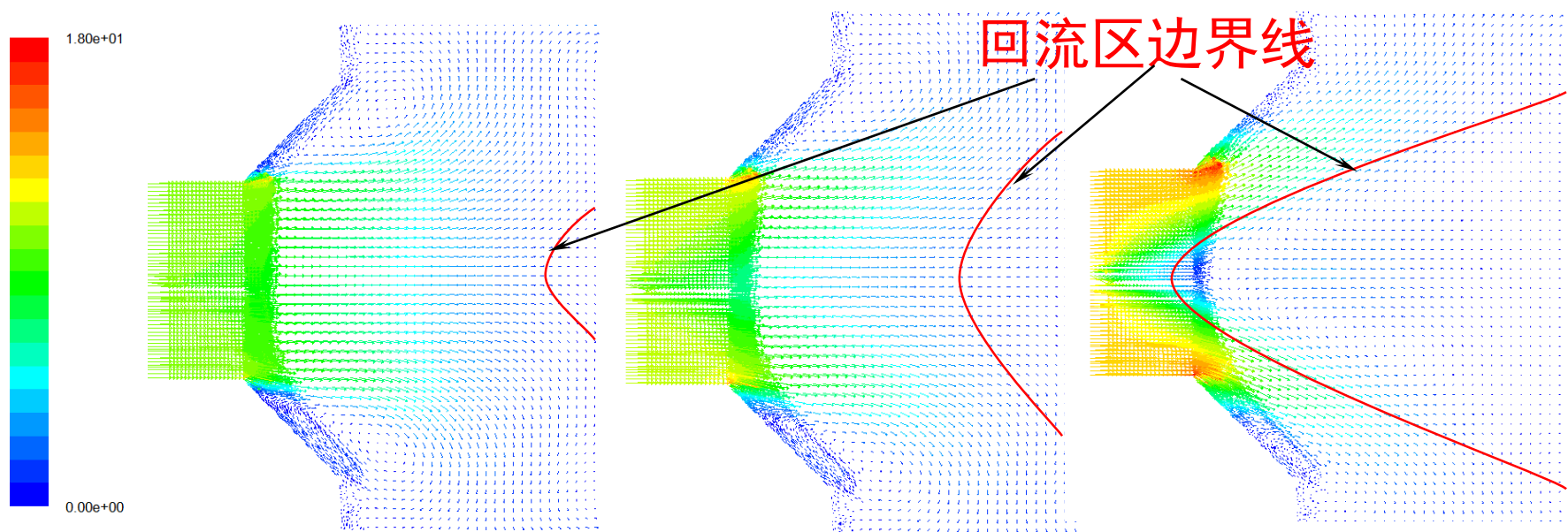
$w_x = 10\text{m/s}; w_\phi = 2\text{m/s}$     $w_x = 10\text{m/s}; w_\phi = 5\text{m/s}$     $w_x = 10\text{m/s}; w_\phi = 8\text{m/s}$





# 旋流强度对回流区影响

切向速率与轴向速率之比增大，  
回流区宽度、长度、回流量都增大。



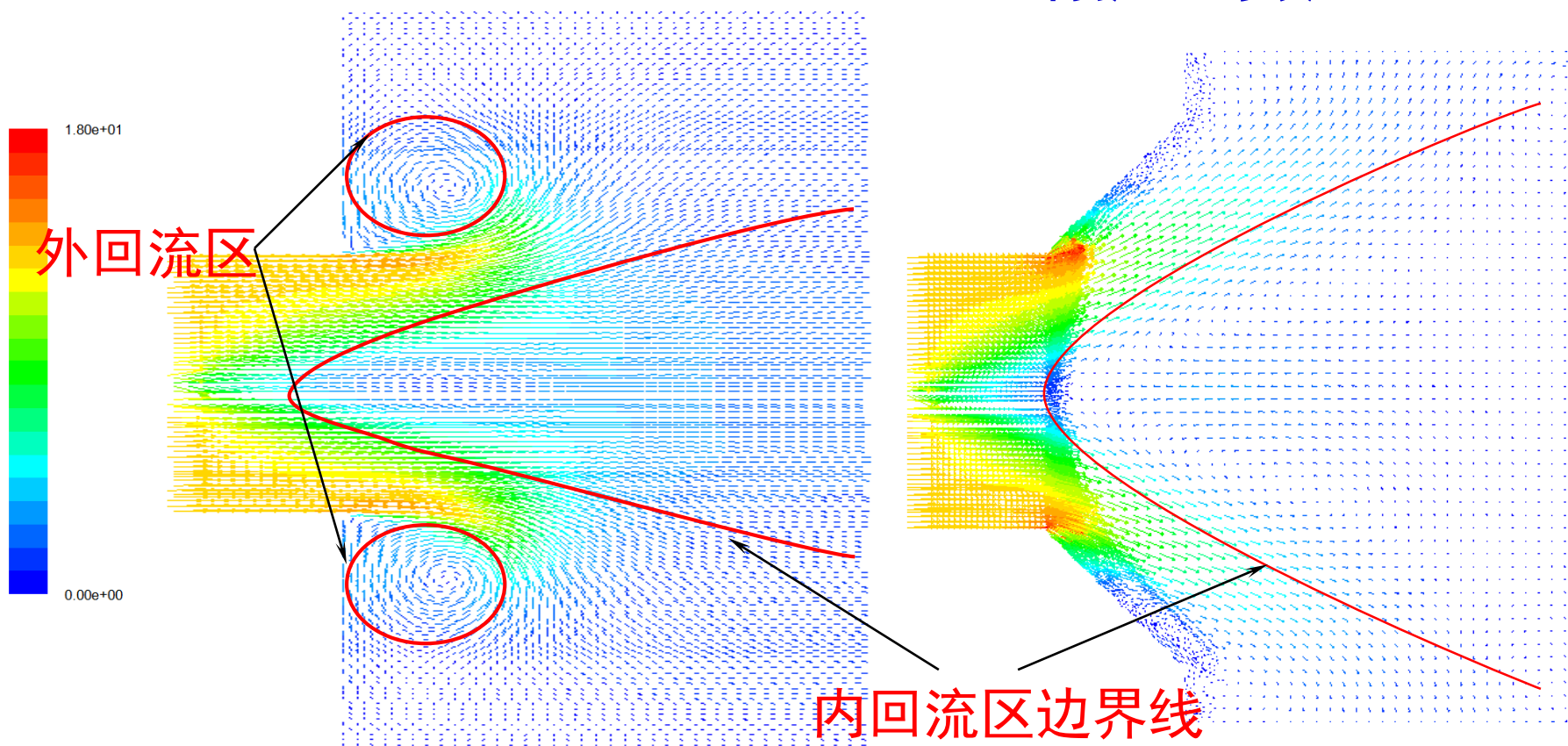
$$w_x = 10\text{m/s}; w_\varphi = 2\text{m/s} \quad w_x = 10\text{m/s}; w_\varphi = 5\text{m/s} \quad w_x = 10\text{m/s}; w_\varphi = 8\text{m/s}$$



### 三、喷口形状的影响

无扩口的喷口

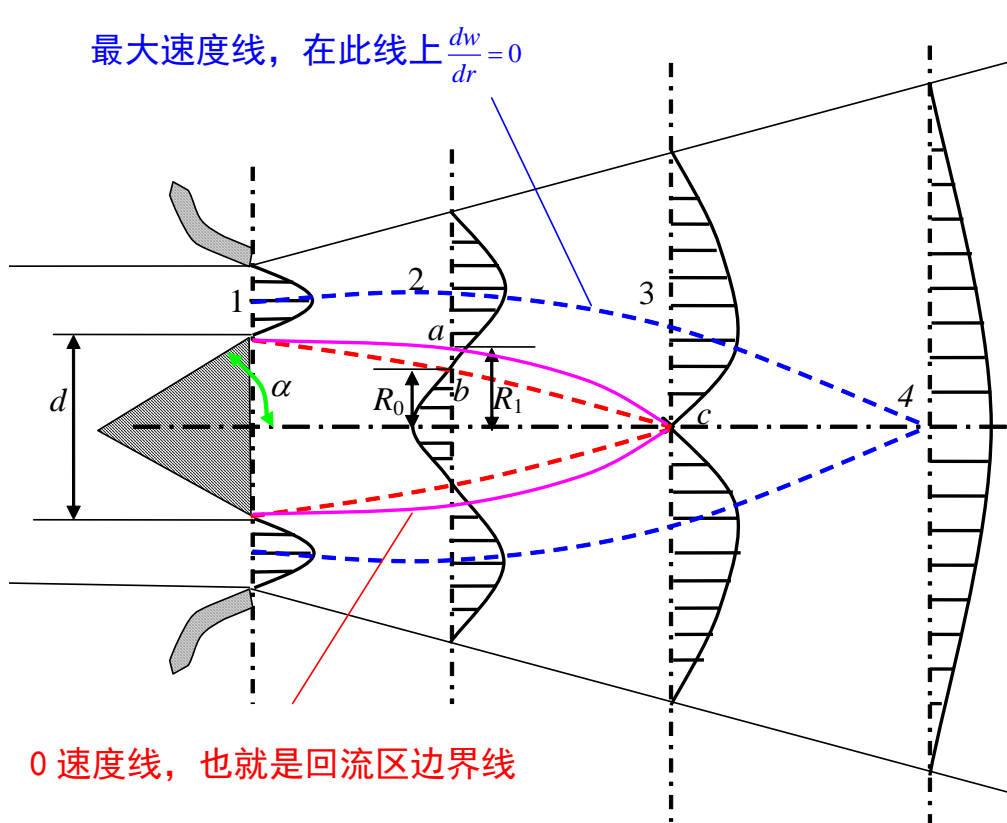
有扩口的喷口





# 第五节 钝体射流中的混合与传质

## 一、钝体射流的形成



钝体即指非流线型物体。

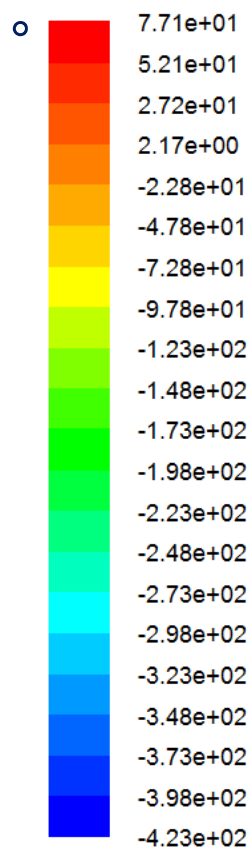
钝体射流指流体经过非流线型物体时，在钝体下游的减速扩压流动中，由于反压力梯度的作用，引起边界的脱离而形成负压，造成回流旋涡区。

在主流区与回流区进行着强烈的动量、热量和质量的交换。

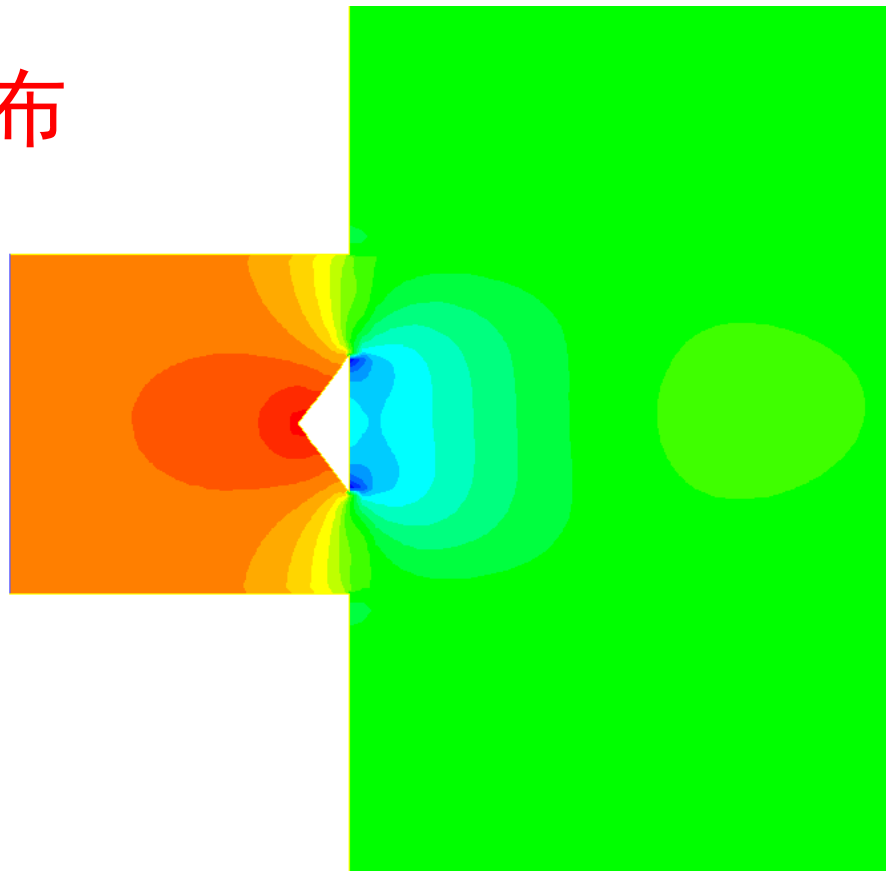


## 二、钝体几何参数对平均流动特性影响

流体经过钝体，在钝体下游做减速扩压运动，由于反压力梯度作用，引起边界层脱离形成负压，造成回流漩涡现象



静压分布



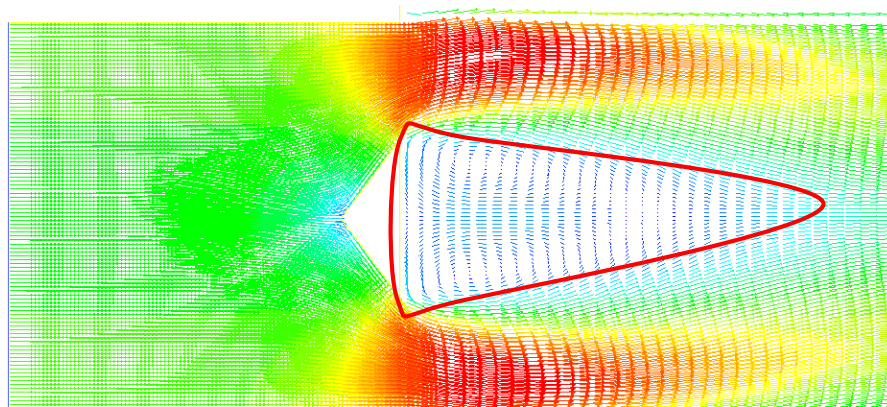




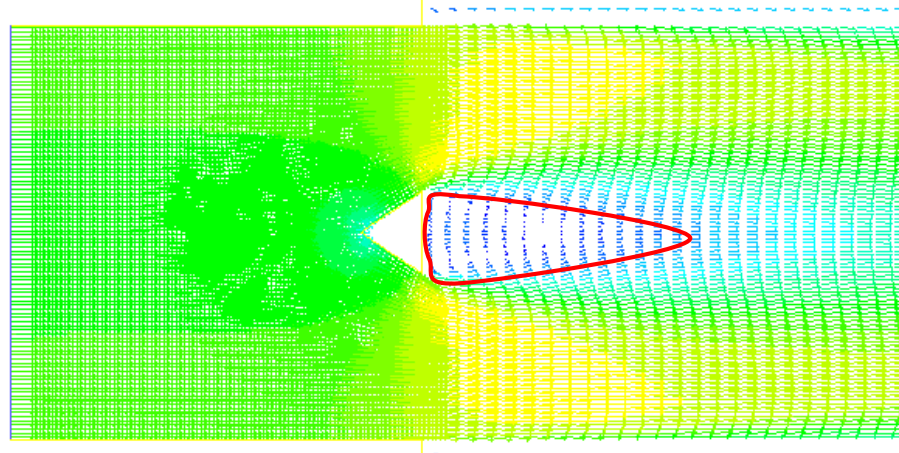
# 1、钝体张角对回流区影响

张角增大，回流区宽度、长度、回流量都增大。

速度  
矢量  
图



张角大



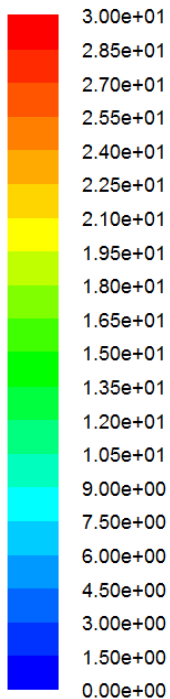
张角小



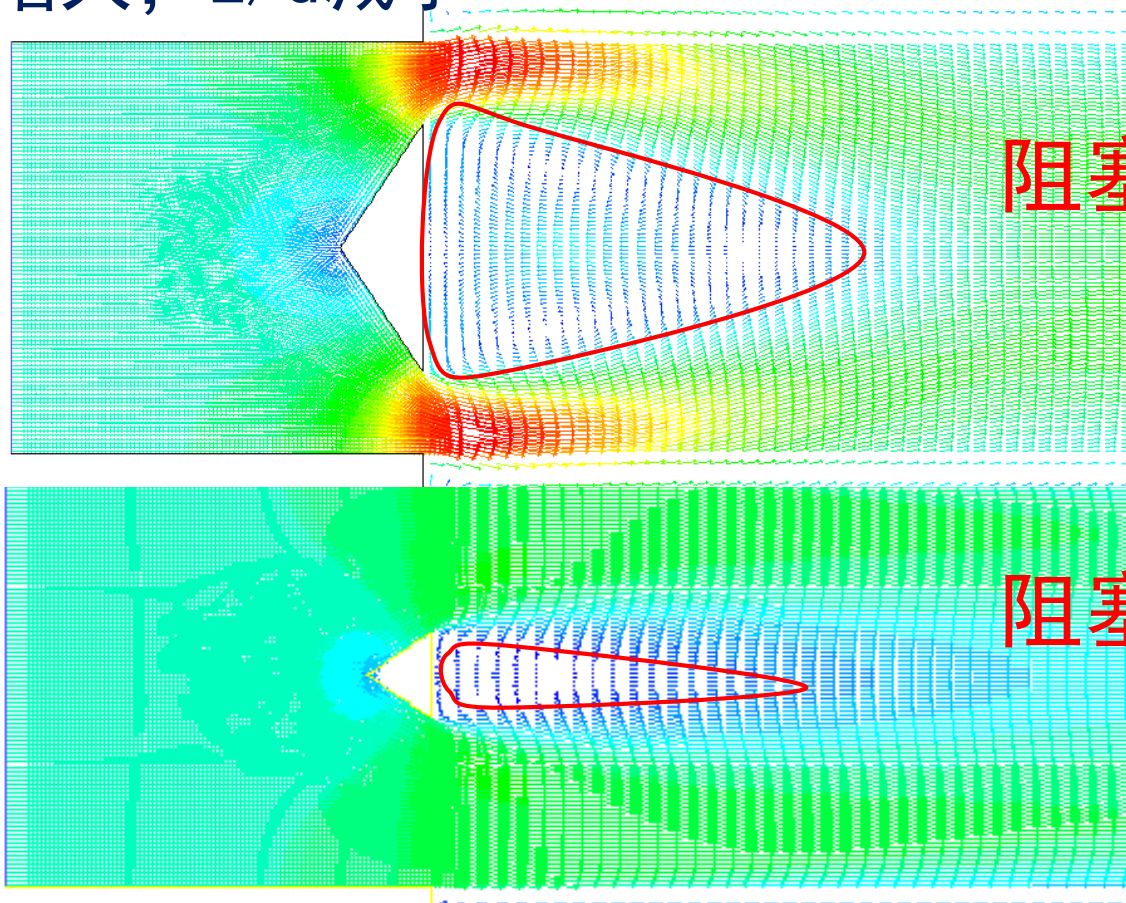
## 2、钝体阻塞率对回流区影响

阻塞率增大， $L/d$ 减小

速度  
矢量  
图



Velocity Vectors



阻塞率大

阻塞率小

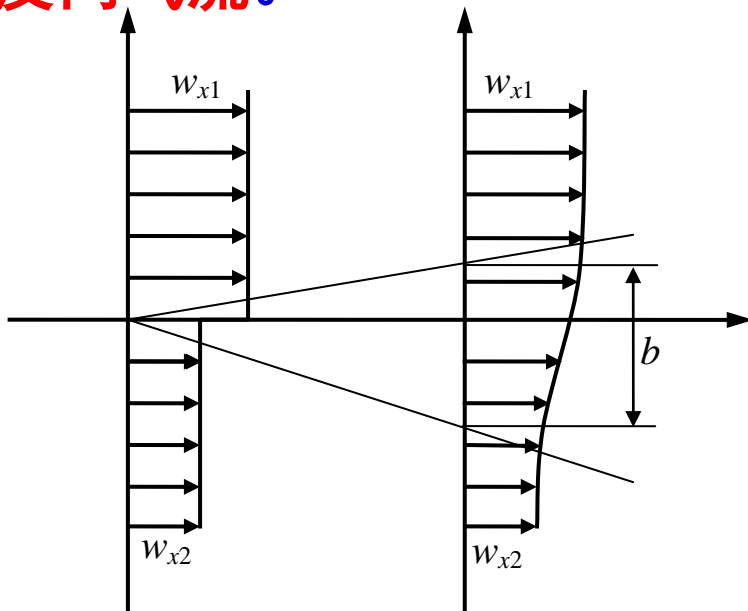




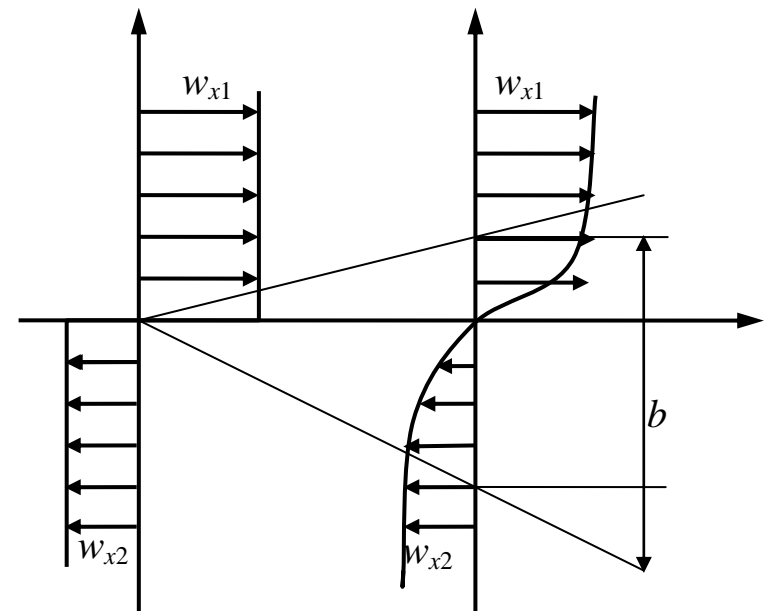
# 第六节 平行与相交射流的混合与传质

## 一、平行与相交射流混合与传质的动力学条件

当两个或两个以上射流组，其轴线平行，称为**平行射流**，轴线成一定角度相交称**相交射流**，当交角为180度则称**反向气流**。



同向平行射流



反向平行射流



$\rho A w w \rightarrow$  密度  $\times$  面积  $\times$  速度  $\times$  速度

$\rightarrow$  密度  $\times$  体积流率 (单位时间流动的体积)  $\times$  速度

$\rightarrow$  质量流率 (单位时间流动的质量)  $\times$  速度

$\rightarrow$  动量流率 (单位时间流动的动量)

即  $\rho w^2 \rightarrow$  单位截面上的动量流率

**根据三传的比拟，两股平行射流之间动量传递的  
通量可如下表示**

$$\text{动量交换率} \propto \frac{\text{推动力}}{\text{阻力}} \propto \frac{\text{动量流率差}}{\text{距离}} = k \frac{\rho_1 w_1^2 - \rho_2 w_2^2}{l}$$

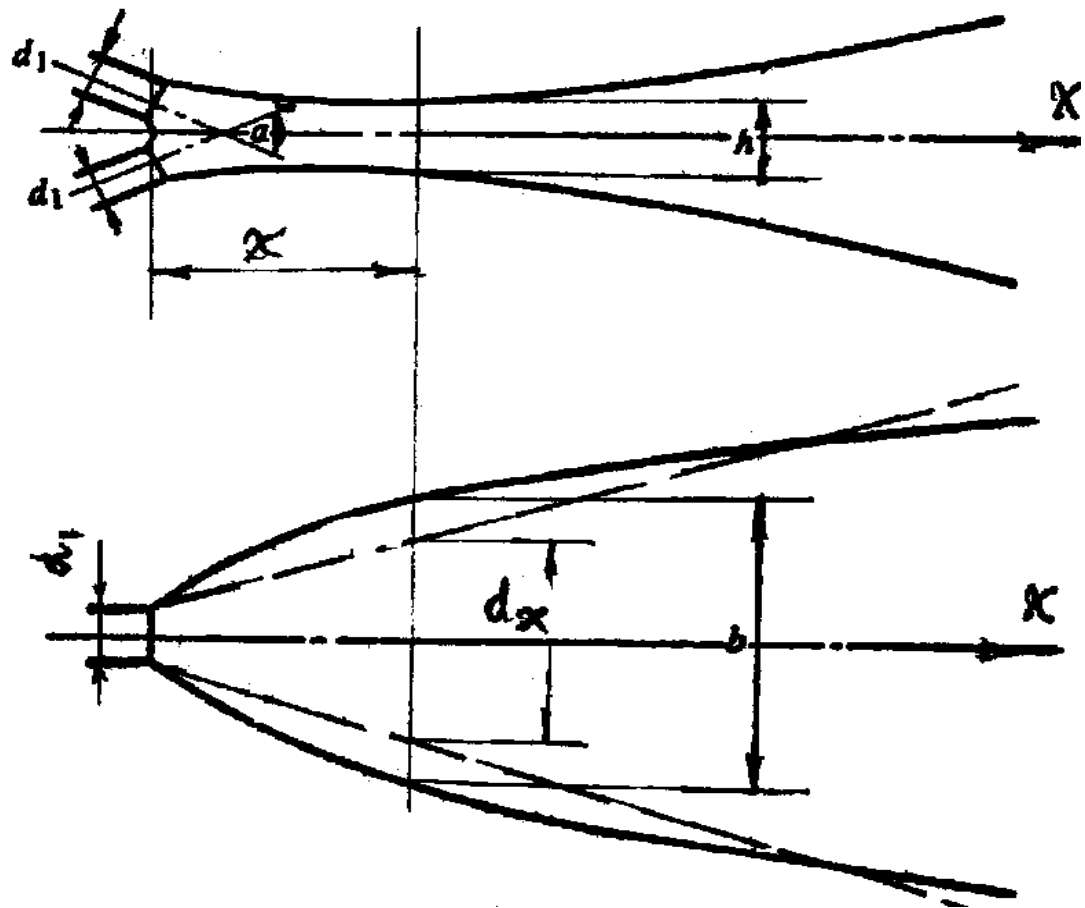


**湍流切应力间接表征了湍流中流体微团的混合，两股平行射流湍流混合的强弱决定于：**

- ① 两者的动压差  $\rho_1 w_1^2 - \rho_2 w_2^2$  和射流之间的距离，动压差是湍流扩散（三传）的动力（能量）来源，它的增加会导致流体微团在更大尺度范围内进行湍流扩散。当动压差趋近于0（动压比趋近于1）时，由于动压差引起的湍流扩散已经十分微弱，只能靠射流自身原始扰动度来维持
- ② 决定于射流自身动压  $\rho_2 w_2^2$ ，它是射流内部进行三传的动力（能量）源。一般自身动压总是维持射流内部的小尺度湍动
- ③ 系数 $k$ ，决定于射流喷口的结构特征和速度分布特征



## 二、相交射流





# 相交射流

相交射流以一定角度相交，在各自惯性力作用下相互碰撞和混合，完成“三传”，这个惯性力比湍流切应力要大数百倍。

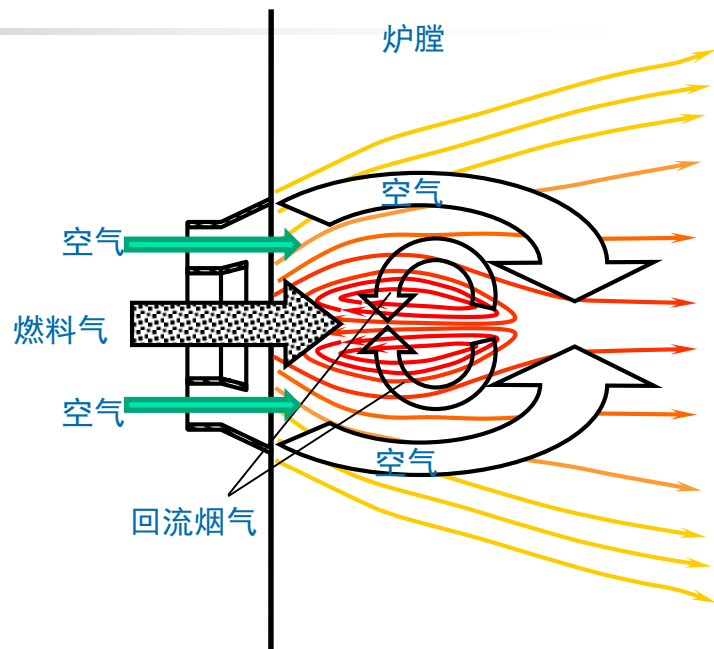
1. 射流等值核心区被强烈破坏。
2. 射流变形，压扁，混合边界层很快波及到射流轴心线区，“三传”升高。交角 $\alpha$ 越大压扁越厉害。
3. 两射流轴心线相交后，合成一股射流，同时具有最大的变形后的周边。所以与周围介质“三传”也加强。

结论：相交射流混合传质的动力学条件是两射流的动量（流率）比 $M=1$ 时混合最强烈。



# 本节作业：旋流燃烧器混合特性 研究方案设计

**研究对象：**如图所示的旋流燃烧器，由同轴的两根同心管道组成，中心管通燃料气，外层管道通助燃空气（带有旋流），当空气和燃料气喷入炉膛之后发生混合，并通过旋转射流的回流区卷吸炉膛内的高温烟气



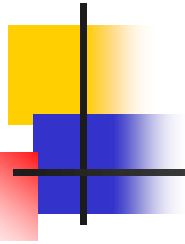
有三股来流：空气射流1、燃料射流2、大空间回流

- $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 是三股气流中的某种成分的初始浓度
- $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 是三股气流的初始温度

需要获得：

- 喷口以外的空间中某一点 $xy$ 的浓度 $C_{xy}$
- 以及，该点的气体中，分别来自三股气流的混合后的质量分数 $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$





$$\begin{cases} m_1 + m_2 + m_2 = 1 \\ m_1 T_1 + m_2 T_2 + m_2 T_3 = T_{xy} \\ m_1 C_1 + m_2 C_2 + m_2 C_3 = C_{xy} \end{cases}$$

又增加了一个未知量 $m_3$ ，如何使方程组封闭？

**作业：**旋流燃烧器混合特性实验方案设计

**研究对象：**为掌握燃烧器的燃烧特性，需要了解炉膛空间中各处的气体成分比例（**假定暂不考虑化学反应引起的成分变化**）。

**要求：**根据本章的知识，设计一个实验来完成以上研究工作，包括：1) 阐述实验的原理、测量手段、数据处理方法，2) 给出实验系统的示意图，3) 描述实验的操作过程，3) 描述数据的处理方法。



西安交通大学

*xi'an jiaotong university*

能源与动力工程学院  
School of Energy & Power Engineering

<http://epe.xjtu.edu.cn>

A decorative graphic consisting of overlapping colored squares (yellow, blue, red) and a black crosshair.

---

# The End