

第六章 气体射流

1、气体射流：气体自孔口、管嘴或条缝向外喷射所形成的流动，称气体淹没射流。送风机送风后气流的扩散，废气经烟囱进入大气后的扩散。

2、射流的分类（根据不同的特征）

流动型态	{	层流射流	实际工程中，多为紊流射流，本书只讨论紊流射流的问题。
		紊流射流	

周围介质	{	淹没射流	射流与其周围介质的物理性质相同
		非淹没射流	液体射流

周围固体边界 { 无限空间射流（自由射流）：
流入无限空间，完全不受固体边界限制。
有限空间射流

3、研究射流问题的方法

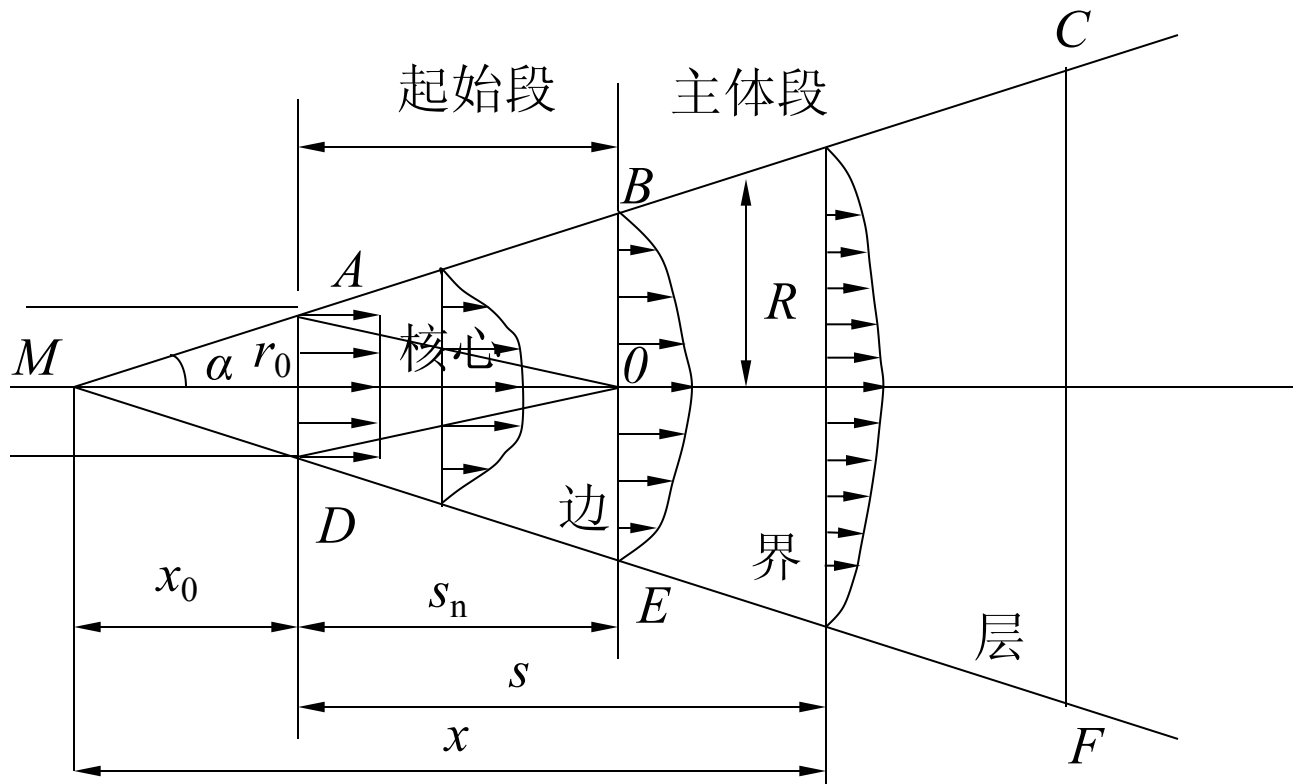
实验方法，理论分析方法

学习重点：

无限空间淹没射流的特征；
理解几个计算公式

§ 6-1 无限空间淹没紊流射流的特征

一、射流的形式、结构



形成：由于紊流脉动，卷吸周围的静止流体进入到射流，两者混掺在一起向前运动，这种情况不断地向射流的内外两侧发展，经过一定距离后扩展到射流中心。

卷吸和混掺的结果：射流断面不断扩大，流速不断降低，流量沿程增加。



射流与周围介质之间不断发生质量、动量交换

结构：

(1) 边界层 ($u < u_0$)，射流核心 ($u = u_0$)；

(2) 过渡断面：射流边界层扩展到轴心线；

起始段：轴心速度为 u_0 ；

主体段：整个射流都为边界层，轴心速度 u_m 沿程下降。

二、特性

大量的实验观测和分析表明，紊流淹没射流具有以下三个重要特性。

1、射流边界层的直线扩展（几何特征）；

扩散角 α

极点M

射流半径R（半宽度 y_0 ）， $R = Kx$ ， $\operatorname{tg} \alpha = \frac{Kx}{x} = K = 3.4a$

紊流系数 a ，由实验决定（表6-1）

无因次半径

$$\frac{R}{r_0} = 1 + 3.4a \frac{s}{r_0} = 3.4 \left(\frac{as}{r_0} + 0.294 \right)$$

$$(\bar{R}) = \frac{\bar{x}_0 + \bar{s}}{1 / \operatorname{tg} \alpha} = 0.34a(\bar{x}_0 + \bar{s}) = 3.4a\bar{x}$$

2、射流各断面上纵向流速分布的相似性（运动特征）；
用半经验公式表示：

$$\frac{v}{v_m} = \left[1 - \left(\frac{y}{R} \right)^{1.5} \right]^2$$

令 $\frac{y}{R} = \eta$

则： $\frac{v}{v_m} = \left[1 - \eta^{1.5} \right]^2$

3、射流各断面上动量守恒（动力特征）。

出口动量： $\rho Q_0 v_0 = \rho \pi r_0^2 v_0^2$

任意断面： $\int_0^R v \rho \cdot 2\pi y dy v = \int_0^R 2\pi \rho v^2 y dy$

$$\rho \pi r_0^2 v_0^2 = \int_0^R 2\pi \rho v^2 y dy$$

§ 6-2 圆形断面射流的运动分析

研究射流速度 v ，流量 Q ，沿射程 s （或 x ）的变化规律。

1、轴心速度 v_m

$$\frac{v_m}{v_0} = 3.28 \frac{r_0}{R}$$
$$\frac{v_m}{v_0} = \frac{0.965}{\frac{as}{r_0} + 0.294} = \frac{0.48}{\frac{as}{d_0} + 0.147} = \frac{0.96}{a\bar{x}} \quad (6-2-1)$$

2、断面流量 Q （取无因次流量 Q/Q_0 ）

$$\frac{Q}{Q_0} = 2.2 \left(\frac{as}{r_0} + 0.294 \right) = 4.4 \left(\frac{as}{d_0} + 0.147 \right) = 2.2 a\bar{x} \quad (6-2-2)$$

3、断面平均流速

$$v_1 = \frac{Q}{A}$$
$$\frac{v_1}{v_0} = \frac{0.19}{\frac{as}{r_0} + 0.294} = \frac{0.095}{\frac{as}{d_0} + 0.147} = \frac{0.19}{a\bar{x}} \quad (6-2-3)$$

4、质量平均流速 v_2

$$\frac{v_2}{v_0} = \frac{Q_0}{Q} = \frac{0.4545}{\frac{as}{r_0} + 0.294} = \frac{0.23}{\frac{as}{d_0} + 0.147} = \frac{0.4545}{a\bar{x}} \quad (6-2-4)$$

为什么引入这一流速?比较: $v_2=0.47v_m$

二、起始段

1、起始段核心长度 s_n 及核心收缩角 θ

s_n : 过渡断面至喷嘴的距离

$$s_n = 0.671 \frac{r_0}{a} \quad \bar{s}_n = \frac{0.671}{a} \quad (6-2-5)$$

$$\theta: \quad \operatorname{tg} \theta = \frac{r_0}{s_n} = 1.49a \quad (6-2-6)$$

2、起始段流量 Q

核心流量 Q' 边界层流量 Q''

$$Q = Q' + Q''$$

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{Q' + Q''}{Q_0} = 1 + 0.76 \frac{aS}{r_0} + 1.32 \left(\frac{aS}{r_0} \right)^2 \quad (6-2-8)$$

3、断面平均流速 v_1

$$\frac{v_1}{v_0} = \frac{1 + 0.76 \frac{as}{r_0} + 1.32 \left(\frac{as}{r_0} \right)^2}{1 + 6.8 \frac{as}{r_0} + 11.56 \left(\frac{as}{r_0} \right)^2} \quad (6-2-9)$$

4、质量平均流速 v_2

$$\frac{v_2}{v_0} = \frac{1}{1 + 0.76 \frac{as}{r_0} + 1.32 \left(\frac{as}{r_0} \right)^2} \quad (6-2-10)$$

[例6-2]P165 已知 $R=1.2\text{m}$, $v_2=3\text{m/s}$, $d_0=0.3\text{m}$

求 (1) 喷口至工作带的距离

(2) 喷嘴流量

解：（1）查得 $a=0.08$ ，求 s

$$\frac{R}{r_0} = 3.4 \left(\frac{as}{r_0} + 0.294 \right) \quad s = 3.86 \text{ m}$$

（2）求 s_n ：

$$s_n = 0.671 \frac{r_0}{a} = 0.671 \times \frac{0.15}{0.08} = 1.26 \quad s > s_n$$

所求截面在主体段内。

（3）求流量 Q_0

$$\frac{v_2}{v_0} = \frac{0.4545}{\frac{as}{r_0} + 0.294}$$

得： $v_0=15.5\text{m/s}$

所以： $Q_0 = \frac{\pi}{4} d_0^2 v_0 = \frac{\pi}{4} \times 0.3^2 \times 15.5 = 1.095 \text{ m}^3/\text{m}$

§ 6-3 平面射流

气体平面射流:

气体从狭长缝隙中外射运动，射流在垂直条缝长度的平面上扩散运动，如果条缝相当长，则视为平面射流。

$$\varphi = 2.44 \quad (K = 2.44) \quad \operatorname{tg} \alpha = 2.44a$$

喷口高度 $2b_0$ (b_0 半高度)

射流特征与圆断面射流相似，各运动参数规律的推导基本与圆断面类似，见表 6-3

§ 6-4 温差或浓差射流

温差、浓差射流：

就是射流气体本身的温度或浓度与周围气体的温度或浓度有差异。如冷风降温、热风采暖，就是用温差射流。把灰尘浓度降低就是用浓差射流。

研究射流温差、浓差的分布规律条件：

(1) 认为温度、浓度内外边界与速度内外边界相同。

(R 、 Q 、 v_m 、 v_1 、 v_2 与前同)

(2) 仅对轴心温差 ΔT_m ，平均温差沿射程的变化规律进行讨论。

$$\Delta T_0 = T_0 - T_e$$

$$\Delta T_m = T_m - T_e$$

$$\Delta T = T - T_e$$

分析依据:

$$(1) \quad \frac{\Delta T}{\Delta T_m} = \sqrt{\frac{V}{V_m}} = 1 - \left(\frac{y}{R}\right)^{1.5} \quad (\text{实验结果})$$

$$(2) \quad \rho Q_0 c \Delta T_0 = \int_Q \rho c \Delta T dQ \quad (\text{相对焓值不变, 热力特征})$$

1、轴心温差

$$\frac{\Delta T_m}{\Delta T_0} = \frac{0.706}{\frac{as}{r_0} + 0.294} = \frac{0.35}{\frac{as}{d_0} + 0.147} = \frac{0.706}{a\bar{x}} \quad (6-4-2)$$

2、质量平均温差 ΔT_2

该温差乘以 ρQc ，便得相对焓值。

$$\frac{\Delta T_2}{\Delta T_0} = \frac{Q_0}{Q} = \frac{0.455}{a\bar{x}} \quad (6-4-3)$$

3、起始段质量平均温差 ΔT_2 代入起始段 Q

$$\frac{\Delta T_2}{\Delta T_0} = \frac{1}{1 + 0.76 \frac{as}{r_0} + 1.32 \left(\frac{as}{r_0}\right)^2} \quad (6-4-4)$$

浓差、温差射流计算详见表6-4

4、射流弯曲

由于密度与周围密度不同，所受重力与浮力不相平衡，使整个射流将发生向下或向上弯曲。

整个射流仍可看作是对称于轴心线。

分析射流中心A点偏离的纵向距离 y'

方法：取轴心线上的单位体积流体作为研究对象。

考虑重力与浮力作用，应用牛二定律和气体等压状态方程。

结果:

$$(1) \quad y' = \frac{g \cdot \Delta T_0}{v_0^2 T_e} \left(0.51 \frac{a}{2r_0} s^3 + 0.35 s^2 \right) \quad (6-4-5)$$

(2) 无因次轨迹方程

$$\frac{y}{d_0} = \frac{x}{d_0} \tan \alpha + \left(\frac{g d_0 \cdot \Delta T_0}{v_0^2 T_e} \right) \left(\frac{x}{d_0 \cos \alpha} \right)^2 \left(0.51 \frac{ax}{d_0 \cos \alpha} + 0.35 \right) \quad (6-4-6)$$

$$\frac{g d_0 \cdot \Delta T_0}{v_0^2 T_e} \quad : \quad A_r \quad \text{阿基米德准数}$$

§ 6-6 有限空间射流（了解）

射流特征：边界线呈橄榄形

动量不守恒

目前有限空间射流理论尚不完全成熟，多是根据实验结果整理成近似公式或无因次曲线，供设计使用。

本章小结

- (1) 熟悉射流特征；
- (2) 圆形断面射流分析，
理解 v_m 、 Q 、 v_1 、 v_2 的变化规律及计算公式；
- (3) 理解平面射流，以及温差、浓差射流。

思考题：

- 1、为什么用无因次量研究射流运动？
- 2、什么是质量平均流速？为什么引用这一流速？
- 3、温差射流中，无因次温度分布线为什么在无因此速度线的外边？
- 4、温差射流轨迹为什么弯曲？

习题：

- 1、某锅炉喷燃器的圆形喷口，直径为500mm，喷口风速为30m/s，求离喷口2m，2.5m，5m处的轴线速度。设圆喷口的 $a=0.08$ 。

解:

$$s_n = 0.671 \frac{r_0}{a} = 0.671 \times \frac{0.25}{0.08} = 2.1$$

S=2m时, 在起始段, 所以 $v_{m1} = 30 \text{ m/s}$

S=2.5m, 5m时, 在主体段, 所以

$$\frac{v_{m2}}{v_0} = \frac{0.48}{\frac{as}{d_0} + 0.147} = \frac{0.48}{\frac{0.08 \times 2.5}{0.5} + 0.147}$$

$$v_{m2} = 26.4 \text{ m}$$

$$\frac{v_{m3}}{v_0} = \frac{0.48}{\frac{as}{d_0} + 0.147} = \frac{0.48}{\frac{0.08 \times 5}{0.5} + 0.147}$$

$$v_{m3} = 15.3 \text{ m}$$

2、由 $R_0=75\text{mm}$ 的喷口中喷射 $T_0=300\text{K}$ 的气体，周围气体的温度 $T=275\text{K}$ 。试求距喷口 $s=5\text{m}$ 处，与射流轴线相距 $y=0.4\text{m}$ 点的气体温度。设圆喷口的 $a=0.075$ 。

(答案: $T=277.8\text{K}$)