

第四节 气体的流出

一、不可压缩气体通过孔口、管嘴流出

当气体由一个较大空间突然经过一个较小孔口向外逸出，如图1.11所示，容器中的气体的压强为 P ，密度为 ρ ，容器壁上有一个出口面积为 f 的小孔或喷嘴，外界大气压为 P_a ，在压差 $P-P_a$ 的推动下，气体从小孔流出。

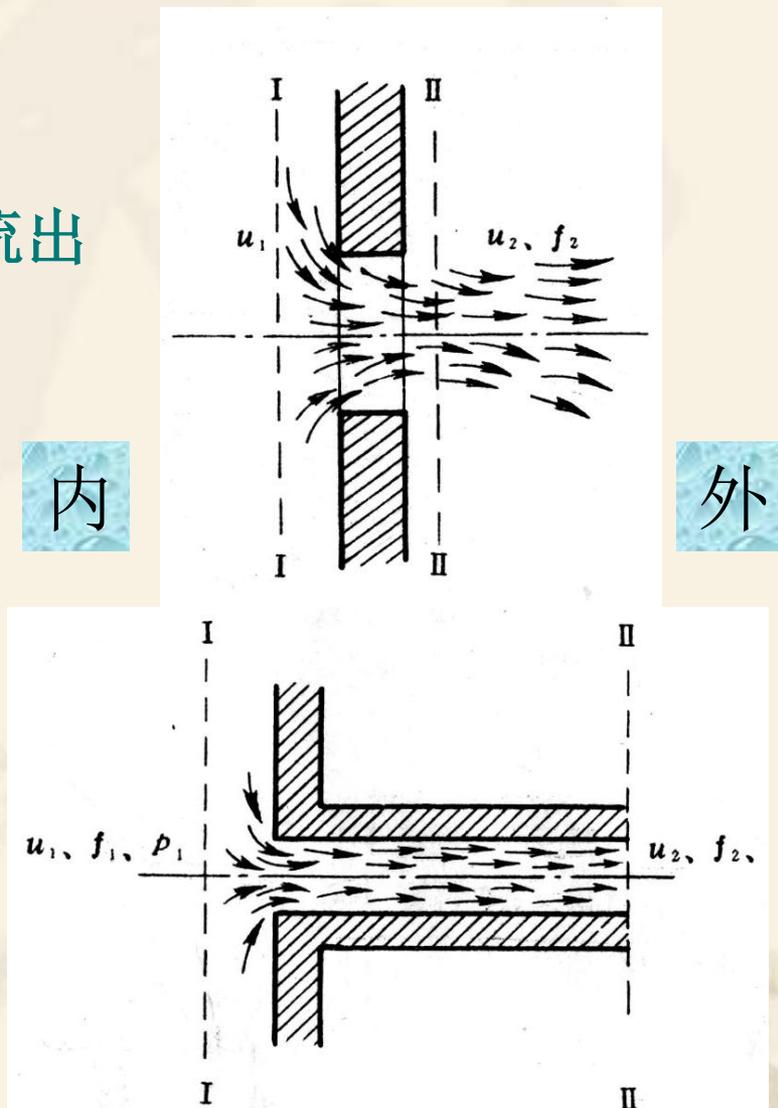


图1.11 气体通过孔口、管嘴流动

a: 薄墙小孔; b: 管嘴

- ❖ 气体流出时，静压头转变为动压头，在流出气体的惯性作用下，气流发生收缩，在II截面处形成一个最小截面(如截面II)，这种现象称为缩流。

缩流系数 $\epsilon = f_2/f$

选取I—I截面在窑内，II—II面在气流最小截面处，两截面的几何压头不发生变化，假定气体流动时没有阻力损失，根据柏努利方程：

$$p_1 + \rho u_1^2/2 = p_2 + \rho u_2^2/2$$

因为 $f_1 \gg f_2$ ， $u_1 \ll u_2$ ， $P_2 = P_0$ ，

故可写成 $p_1 = p_0 + \rho u_2^2/2$

所以 $u_2 = [2(p_1 - p_0)/\rho]^{0.5} \text{ m/s}$

若考虑能量损失，加入速度系数 φ ，（ ε 缩流系数）

$$V = f_2 u_2' = \varepsilon f \varphi u_2 = \mu f u_2,$$

μ （ $= \varepsilon \varphi$ ）—流量系数。

则：

流量 $V = \mu f u_2 = \mu f [2(p_1 - p_0)/\rho]^{1/2} \text{ m}^3/\text{s}$

表 1.2 气体通过孔嘴的系数

孔嘴类型	ε	φ	μ
薄壁孔口（圆形或正方形）	0.64	0.97	0.62
厚壁孔口（圆形或正方形）	1	0.82	0.82
棱角圆柱形外管嘴	0.82	1	0.82
圆角圆柱形外管嘴	1	0.9	0.9
棱角圆柱形内管嘴	1	0.71	0.71
流线圆柱形管嘴	1	0.97	0.97
圆锥形收缩管嘴（ $\alpha = 13^\circ$ ）	0.98	0.96	0.945
圆锥形扩散管嘴（ $\alpha = 8^\circ$ ）	1	0.98	0.98

1、薄壁小孔口

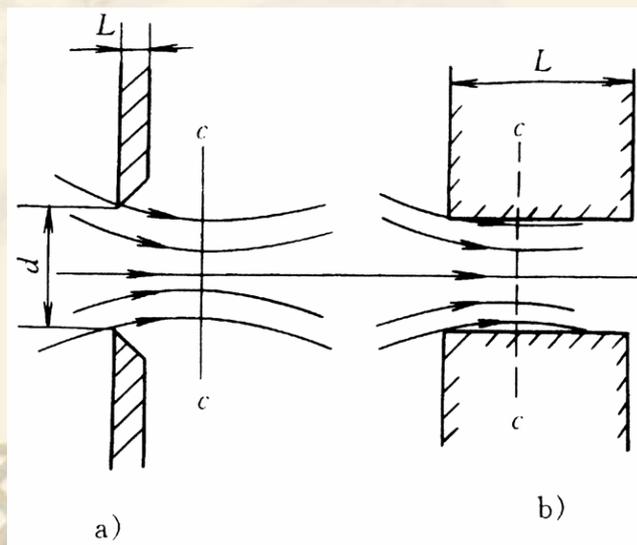
如果流体具有一定的流速，能形成射流，且孔口具有尖锐的边缘，此时边缘厚度的变化对于流体出流不产生影响，出流气股表面与孔壁可视为环线接触，这种孔口称为**薄壁小孔口**。

特征： $L/d \leq 2$

2、厚壁孔口

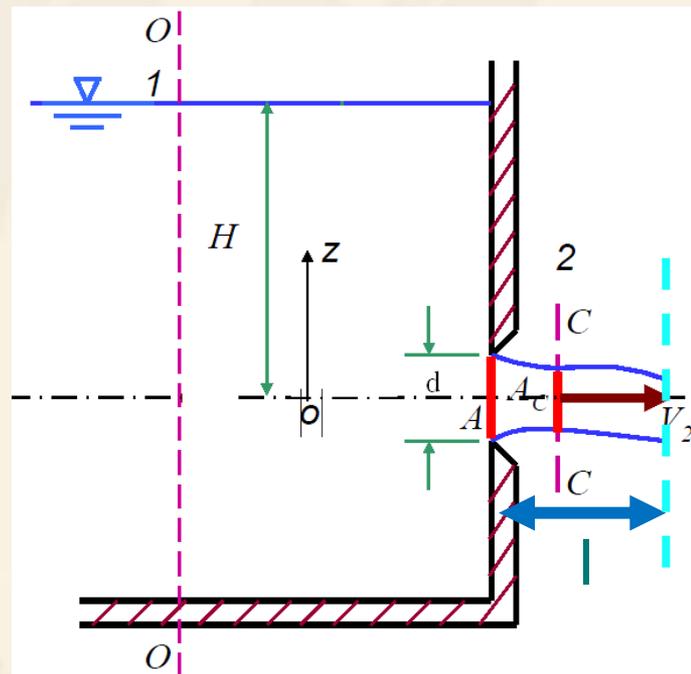
如果流体具有一定的速度，能形成射流，此时虽然孔口也具有尖锐的边缘，射流亦可以形成收缩断面，但由于孔壁较厚，壁厚对射流影响显著，射流收缩后又扩散而附壁，这种孔口称为**厚壁孔口或长孔口**。

特征： $2 < L/d \leq 4$



◆ $\frac{l}{d} \approx 0$ 孔口 $\left\{ \begin{array}{l} d \leq H/10 \text{ 小孔口} \\ d > H/10 \text{ 大孔口} \end{array} \right.$

◆ $\frac{l}{d} = 3 \sim 4$ 管嘴



◆ $\frac{l}{d} > 4$ 管路 $\left\{ \begin{array}{l} 4 < \frac{l}{d} < 1000 \text{ 短管} \\ \frac{l}{d} > 1000 \text{ 长管} \end{array} \right.$

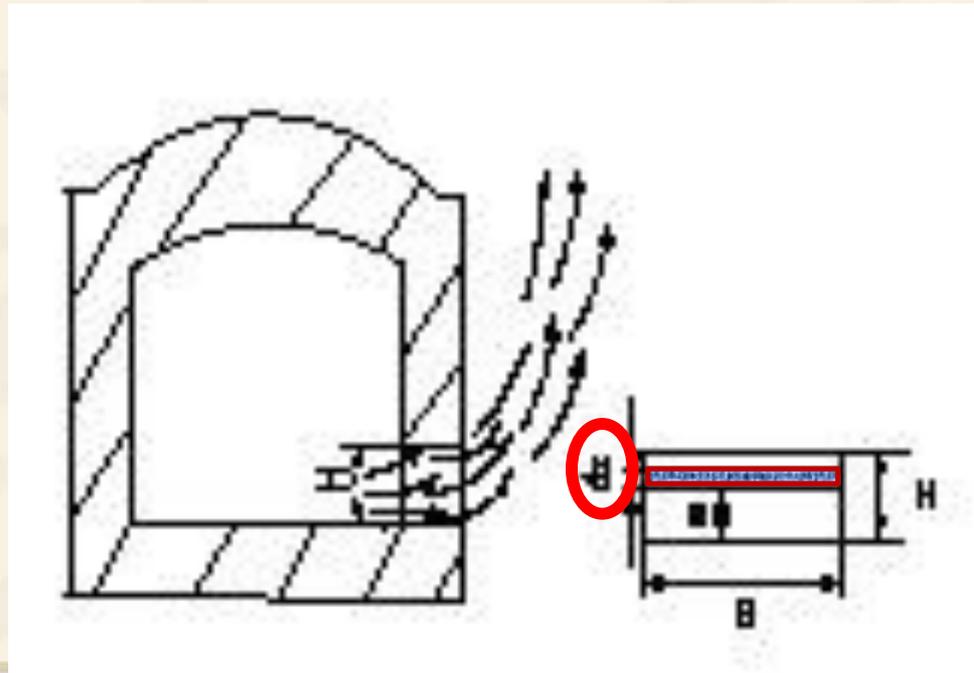
简单管路

复杂管路

二、炉门溢气

炉门溢气量的计算原理和气体从大孔流出相同，必须考虑沿炉门高度的静压头变化。

气体由炉门溢出时，压强沿高度变化，先计算单元面积的溢气量，再以炉门高度为限进行积分。设炉门宽度为 B ，高度为 H 。



在距窑底 x 处取一单元, $df=Bdx$

$$V = \mu f [2gH(\rho_a - \rho)/\rho]^{1/2}$$

μ —流量系数

单位时间通过单元面积的气体流量为:

$$\begin{aligned} dV &= \mu df [2gx(\rho_a - \rho)/\rho]^{1/2} \\ &= \mu B [2gx(\rho_a - \rho)/\rho]^{1/2} dx \end{aligned}$$

单位时间通过炉门的总溢气量:

$$\int_0^v dv = \mu B [2g(\rho_a - \rho)/\rho]^{0.5} \int_0^H x^{1/2} dx$$

$$V = 2/3 \cdot \mu BH [2gH(\rho_a - \rho)/\rho]^{1/2} \text{ m}^3/\text{s}$$

第五节 可压缩气体的流动

当气体由高压喷射器喷出时，气体喷出的速度达到音速或超音速，气体密度将发生显著变化，此时必须考虑气体的压缩性。对于可压缩气体流动，可近似按一元流动处理。

一、一元稳定流动的柏努利方程式

$$dp + \rho g dz + \rho d(u^2/2) = 0$$

气体几何压头的变化，在气体静压头和流速变化不大时可忽略。则上式表示为：

$$dp/\rho + d(u^2/2) = 0$$

积分得：

$$\int dp/\rho + u^2/2 = C_1$$

对压缩气体，可根据理想气体状态方程，依据气体状态的变化过程来确定 p 与 ρ 之间的函数关系。

绝热过程中， p 与 ρ 关系为： $p/\rho^\gamma = C$

γ 是热容比（等压摩尔热容/等容摩尔热容， C_p/C_v ）， C 是常数

将 $p/\rho^\gamma = C$ 的函数关系代入 $\int dp/\rho$ ，并积分

$$\int dp/\rho = C^{1/\gamma} \int p^{-1/\gamma} dp = p\gamma(\gamma-1)^{-1}\rho^{-1} + C_2$$

代入式 $\int dp/\rho + u^2/2 = C_1$ 得：

$$p\gamma(\gamma-1)^{-1}\rho^{-1} + u^2/2 = C$$

对于任意的I、II两截面，绝热流动的柏努利方程式为：

$$p_1\gamma(\gamma-1)^{-1}\rho_1^{-1} + u_1^2/2 = p_2\gamma(\gamma-1)^{-1}\rho_2^{-1} + u_2^2/2$$

$$\text{整理变化 } p_1/\rho_1 + p_1/[\rho_1(\gamma-1)] + u_1^2/2$$

$$= p_2/\rho_2 + p_2/[\rho_2(\gamma-1)] + u_2^2/2$$

与不可压缩流体的柏努利方程相比较（ $p/\rho + u^2/2 = C$ ），

由于绝热变化而使压力能增加了 $\gamma/(\gamma-1)$ 倍。也就是多了一项内能项， $U = p(\gamma-1)^{-1}\rho^{-1}$ 。

理想气体内能 U 与定容比热 C_v 和温度 T 之间关系为： $U = C_v T$

又由于 $p/\rho = R'T$ ， $R' = C_p - C_v$ ， $\gamma = C_p / C_v$

所以 $U = C_v T = C_v p / (\rho R') = (p/\rho) \cdot [C_v / (C_p - C_v)] = p(\gamma - 1)^{-1} \rho^{-1}$

从热力学知识，压力能与内能之和为焓。

$$i = p\gamma(\gamma - 1)^{-1} \rho^{-1} = C_p T;$$

用焓 i 表示的全能方程为：

$$i + u^2/2 = C$$

气体处于静止状态的参数用 $i_0, T_0, u_0 = 0$ 表示，则

$$C_p T + u^2/2 = C_p T_0$$

例6 为获得较高流速的气流，煤气与空气混合，采用高压气流经喷嘴（如图1.13）喷出，在I、II截面测得高压参数 p_1 为12atm ($12 \times 98070\text{Pa}$)， p_2 为10atm (980700 Pa)， u_1 为100m/s，及 t_1 为 27°C ，求喷嘴出口速度 u_2 。

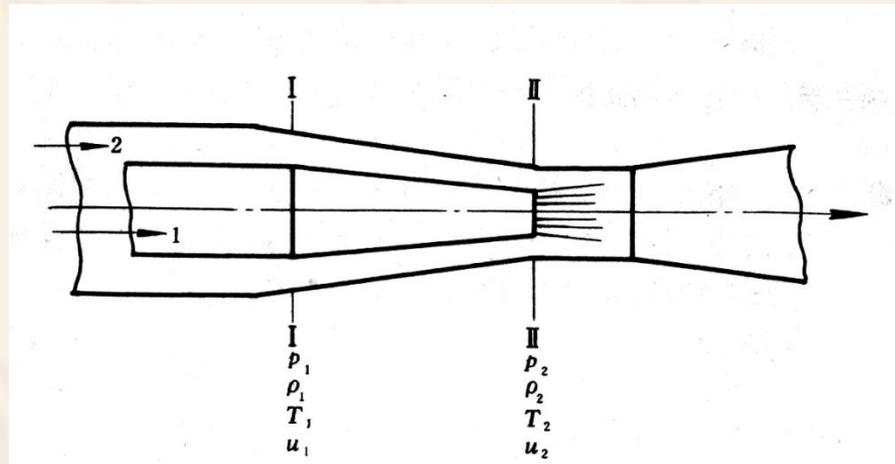


图1.13 气体喷嘴图1.高压空气；2.煤气

解：因为气流速度高、喷嘴短，来不及与外界进行热交换，故可视为绝热流动，可按上述公式进行计算：

$$\rho_1 \gamma_1 / [(\gamma_1 - 1) \rho_1] + u_1^2 / 2 = \rho_2 \gamma_2 / [(\gamma_2 - 1) \rho_2] + u_2^2 / 2$$

对于空气 $\gamma = 1.4$ ， $\gamma / (\gamma - 1) = 3.5$ ；

得到：

$$u_2 = [7(p_1/\rho_1 - p_2/\rho_2) + u_1^2]^{1/2}$$

$$\rho_1 = Mp_1/RT_1 = 29 \times 1176840 / (8314 \times 300) = 13.68 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{由 } p_1/\rho_1^\gamma = p_2/\rho_2^\gamma,$$

$$\text{得 } \rho_2 = \rho_1 (p_2/p_1)^{1/\gamma} = 13.68 \times (10/12)^{1/1.4} = 12.01 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{得到： } u_2 = 201 \text{ m/s}$$

二、音速、滞止参数、马赫数

1. 音速 c

音速指在可压缩介质中微弱扰动的传播速度。音速的公式表示为 $c = (dp/d\rho)^{1/2}$ ，其物理含义是：单位密度改变所需要的压强改变。音速可作为一种表征流体压缩性的指标。

绝热过程中， $p/\rho^\gamma=C$ ， $dp/d\rho=\gamma p/\rho=\gamma RT/M$ ，则绝热过程的音速

$$c = (dp/d\rho)^{1/2} = (\gamma p/\rho)^{1/2} = (\gamma RT/M)^{1/2}$$

例如在海平面上，15℃时空气的音速：

$$c = (1.4 \times 8314 \times 288/29)^{1/2} = 340 \text{ m/s} \quad \text{换算成} 1224 \text{ 公里/小时}$$

声音是由物体振动发生的，正在发声的物体叫做声源。物体在一秒钟之内振动的次数叫做频率。声音是声波通过任何物质传播形成的运动。

2. 滞止参数

介质处于静止或滞止时，其速度 $u=0$ 时的参数称为滞止参数，如 $p_0, \rho_0, T_0, u_0, c_0$ 。容器所连接的管道上的任意截面参数以 p, ρ, T, u, a 表示。

$$c_0^2/(\gamma-1) = c^2/(\gamma-1) + u^2/2$$

式中 c_0 ：滞止声速；

c ：流动介质声速，或当地声速。气流中声速的大小取决于气流速度，当气流速度沿流动方向增大时，当地声速减小。

3. 马赫数M

马赫将影响压缩效果的气流速度 u 和当地声速 c 联系起来，取 u 与 c 的比值， $M = u / c$ 。

$M > 1$ ， $u > c$ ，超音速流动；

$M = 1$ ， $u = c$ ，等音速流动；

$M < 1$ ， $u < c$ ，亚音速流动。

三、流速与断面的关系

由质量流量守恒定律 $\rho u A = C$ ，取对数并微分，

$$dp/\rho + du/u + dA/A = 0$$

根据 $c^2 = dp/d\rho$ 及 $c^2 = u^2/Ma^2$

及柏努利方程 $dp + \rho g dz + \rho d(u^2/2) = 0$ ，即 $dp/\rho = -u du$ ，

整理可得：

$$dp/\rho = (dp/\rho) / (dp/d\rho) = -u du / c^2 = -u du / (u^2/Ma^2)$$

$$= -Ma^2 du / u$$

$$1/A \cdot dA = (Ma^2 - 1) \cdot 1/u \cdot du$$

$$1/A \cdot dA = (M^2 - 1) \cdot 1/u \cdot du$$

表明可压缩气体的流动速度与断面的关系，得到以下结论：

(1) 当 $M < 1$ ， $u < c$ ， $(M^2 - 1) < 0$ ， dA 与 du 符号相反。气体作亚音速流动时，流速与断面成反比，与不可压缩流体运动规律一致。

(2) 当 $M > 1$ ， $u > c$ ， $(M^2 - 1) > 0$ ， dA 与 du 符号相同。流速与断面成正比，其原因是由于超音速流体密度变化大于速度变化。

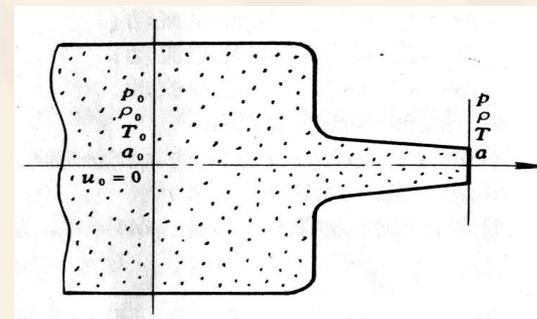
(3) 当 $M=1$ ， $u=c$ ，必有 $dA=0$ ，此时断面 A 称为**临界断面** A_e ，为最小断面。在临界断面上，气流速度等于当地音速 a_e ，还可称为临界速度 u_e 。

四、可压缩气体经收缩管嘴的流动

气体由容器中经收缩管嘴流出，如图1.15所示，容器尺寸较大，故可认为速度 $u_0 = 0$ ，列出两截面的绝热柏努利方程：

$$p_0 \gamma / [(\gamma - 1) \rho_0] = p \gamma / [(\gamma - 1) \rho] + u^2 / 2$$

根据 $\rho / \rho_0 = (p / p_0)^{1/\gamma}$ ；设 $\beta = p / p_0$



$$u = \{ [2\gamma / (\gamma - 1)] \cdot (p_0 / \rho_0) \cdot [1 - (p / p_0)^{(\gamma - 1) / \gamma}] \}^{1/2} \text{ m/s}$$

$$= \{ [2\gamma / (\gamma - 1)] \cdot (p_0 / \rho_0) \cdot [1 - \beta^{(\gamma - 1) / \gamma}] \}^{1/2} \text{ m/s}$$

计算气体由收缩管嘴流出的流量，根据 $m = \rho u A$ ，得到：

$$m = \rho_0 \{ [2\gamma / (\gamma - 1)] \cdot (p_0 / \rho_0) \cdot [1 - \beta^{(\gamma - 1) / \gamma}] \}^{1/2} A$$

$$= A \{ [2\gamma / (\gamma - 1)] p_0 \rho_0 [1 - \beta^{(\gamma - 1) / \gamma}] \}^{1/2}$$

$$= A \{ [2\gamma / (\gamma - 1)] p_0 \rho_0 [\beta^{2/\gamma} - \beta^{(\gamma + 1) / \gamma}] \}^{1/2}$$

$$= A \{ [2\gamma / (\gamma - 1)] p_0 \rho_0 [(p / p_0)^{2/\gamma} - (p / p_0)^{(\gamma + 1) / \gamma}] \}^{1/2}$$

讨论：当 $p=p_0$ ， $\beta = 1$ ，此时 $u = 0$ ， $m = 0$ ，
容器内外压强相等，不能产生流动。

当 $p < p_0$ ， $\beta < 1$ 时，

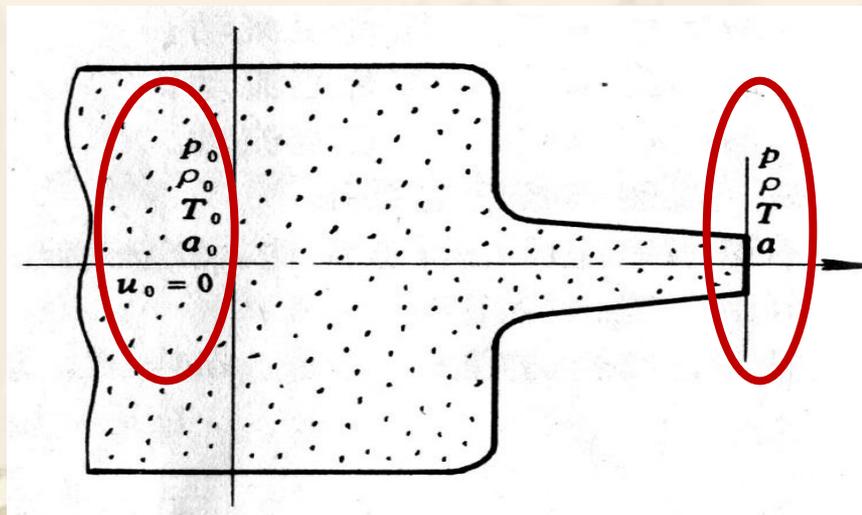
质量流量 m 可达到极值， $dm/d\beta = d(\beta^{2/\gamma} - \beta^{(\gamma+1)/\gamma})/d\beta$

临界压力比： $\beta_e = [2/(\gamma+1)]^{\gamma/(\gamma-1)}$

对双原子气体（空气）， $\gamma = 1.4$ ， $\beta_e = 0.528$

对过热蒸气， $\gamma = 1.3$ ， $\beta_e = 0.546$

$$\beta = p/p_0$$



例7 已知压缩空气的压强 P_0 为5at，反压室压强 p 为2.8at，压缩空气的温度 T_0 为288K，如采用圆形断面喷管，计算出口流速为若干？当质量流量为0.065kg/s，计算出口面积为多少？

解：确定压力比 $p/p_0 = 2.8/5 = 0.56 > 0.528$ ，未达到**临界压力比**，喷嘴流出的气体流量未达到最大，由此可知喷嘴流出气体属于亚音速气流。

$$\rho_0 = Mp_0/(RT_0) = 29 \times 5 \times 98070 / (8314 \times 288) = 5.94 \text{ kg/m}^3$$

$$u = \{ [2\gamma/(\gamma-1)] \cdot (p_0/\rho_0) \cdot [1 - (p/p_0)^{(\gamma-1)/\gamma}] \}^{1/2} = 294 \text{ m/s}$$

此时，当地音速 $c = (\gamma p/\rho)^{0.5}$ ，式中

$$\rho = \rho_0 (p/p_0)^{1/\gamma} = 5.94 \times (0.56)^{1/1.4} = 3.93 \text{ kg/m}^3$$

$$c = (\gamma p/\rho)^{0.5} = (1.4 \times 2.8 \times 98070 / 3.93)^{0.5} = 313 \text{ m/s}$$

收缩管嘴出口面积：

$$A = m / \{ [2\gamma/(\gamma-1)] p_0 \rho_0 [(p/p_0)^{2/\gamma} - (p/p_0)^{(\gamma+1)/\gamma}] \}^{-1/2} = 5.56 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$\text{或 } A = m/\rho u$$

$$d = (4A/\pi)^{0.5} = (4 \times 55.6/\pi)^{0.5} = 8.41 \text{ mm}$$

五、气体通过拉伐尔管流出

由以上分析可知，在初始断面为亚音速的气流经过收缩管嘴，如图1.14a，收缩管嘴难以获得超音速气流。而拉伐尔管可以达到超音速，其结构与特性如图1.14b，c所示，亚音速气流在收缩管嘴的最小断面处达到音速，然后再进入扩张管，满足气流的进一步膨胀，获得超音速气流。

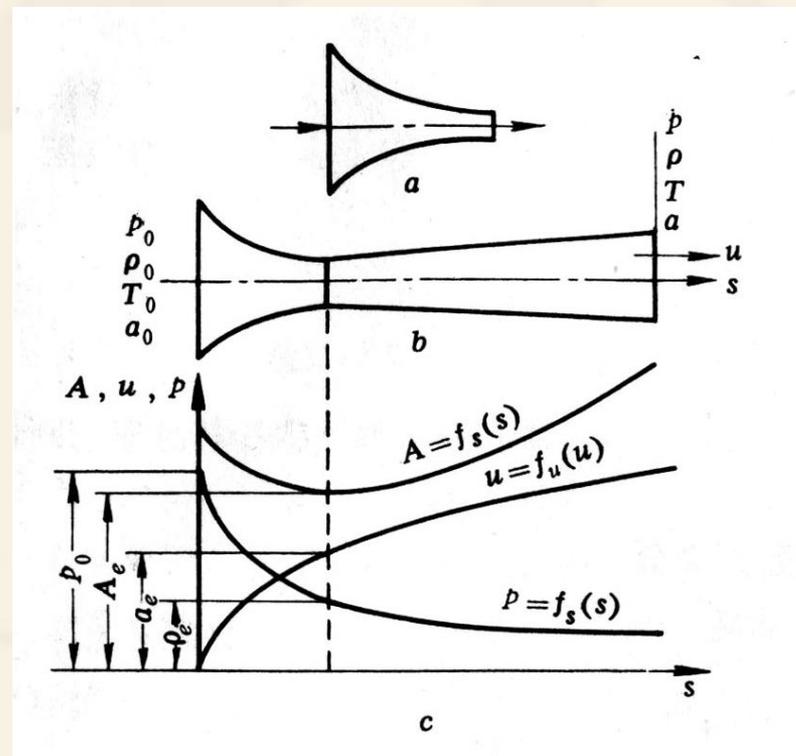


图1.14 收缩管嘴与拉伐尔管
a.收缩管嘴； b.拉伐尔管；
c.拉伐尔管 p,u,A 变化特征

在拉伐尔管喉部，即临界断面，压力比为临界压力比，流速为当地音速，质量流量为最大质量流量，其临界断面积

$$A_e = m_{\max} / \{ [2\gamma / (\gamma - 1)] \cdot p_0 \cdot \rho_0 \cdot [\beta_e^{2/\gamma} - \beta_e^{(\gamma+1)/\gamma}] \}^{1/2} ;$$

出口断面积为

$$A = m_{\max} / \{ [2\gamma / (\gamma - 1)] \cdot p_0 \cdot \rho_0 \cdot [(p/p_0)^{2/\gamma} - (p/p_0)^{(\gamma+1)/\gamma}] \}^{1/2}$$

例8 过热蒸气温度 250°C ，压强为 10at ，由拉伐尔管流出，出口处压强为 1at ，过热蒸气质量流量为 0.0875kg/s ，计算拉伐尔管临界断面及出口断面直径，如图1.16所示。

解：对于过热蒸气，已知其临界压力比

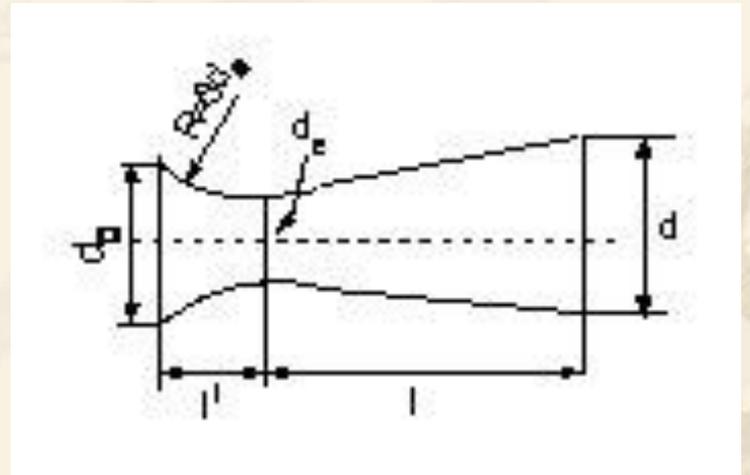
$$\beta_e = 0.546;$$

$$p_e/p_0 = 1/10 = 0.1 < \beta_e$$

或断面压强 $p_e = \beta_e \cdot p_0 = 10 \times 0.546 = 5.46\text{at}$ ，大于外界压强

判定：在拉伐尔管喉部可获得音速，

在扩张部位可获超音速。



解：

(1) 临界断面 A_e 的求得

$$\gamma=1.33, T_0=523\text{K},$$

$$\rho_0=Mp_0/(RT_0)=18 \times 10 \times 98070/(8314 \times 523)=4.06\text{kg/m}^3$$

$$\begin{aligned} \text{临界断面 } A_e &= m_{\max}/\{[2\gamma/(\gamma-1)] \cdot p_0 \rho_0 [\beta_e^{2/\gamma} - \beta_e^{(\gamma+1)/\gamma}]\}^{1/2} \\ &= 66 \text{ mm}^2 ; \end{aligned}$$

$$d_e = (4A_e/\pi)^{0.5} = 9.2 \text{ mm};$$

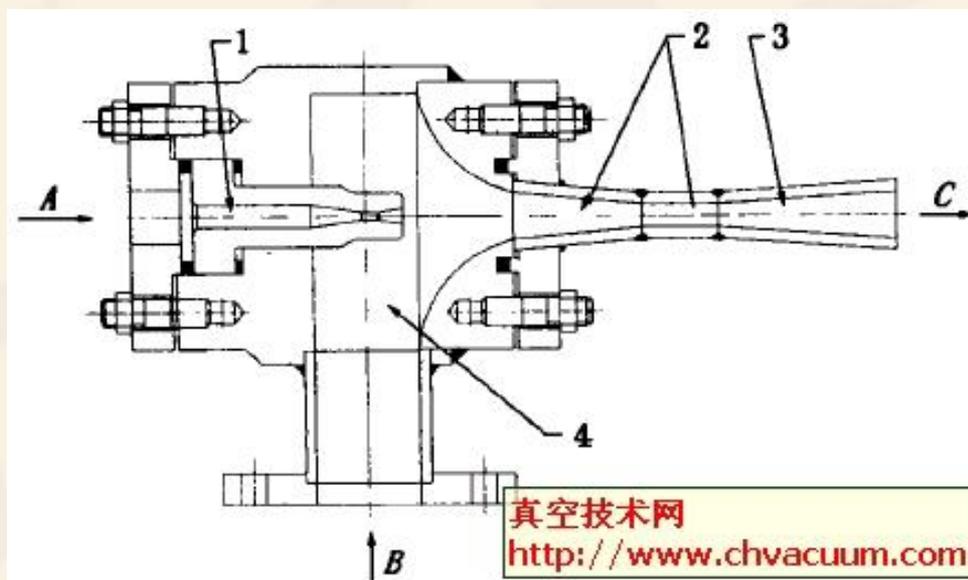
(2) 出口断面积的求得

$$A = m_{\max}/\{[2\gamma/(\gamma-1)] \cdot p_0 \rho_0 [(p/p_0)^{2/\gamma} - (p/p_0)^{(\gamma+1)/\gamma}]\}^{1/2} = 135 \text{ mm}^2;$$

$$d = 13.11 \text{ mm};$$

喷射器

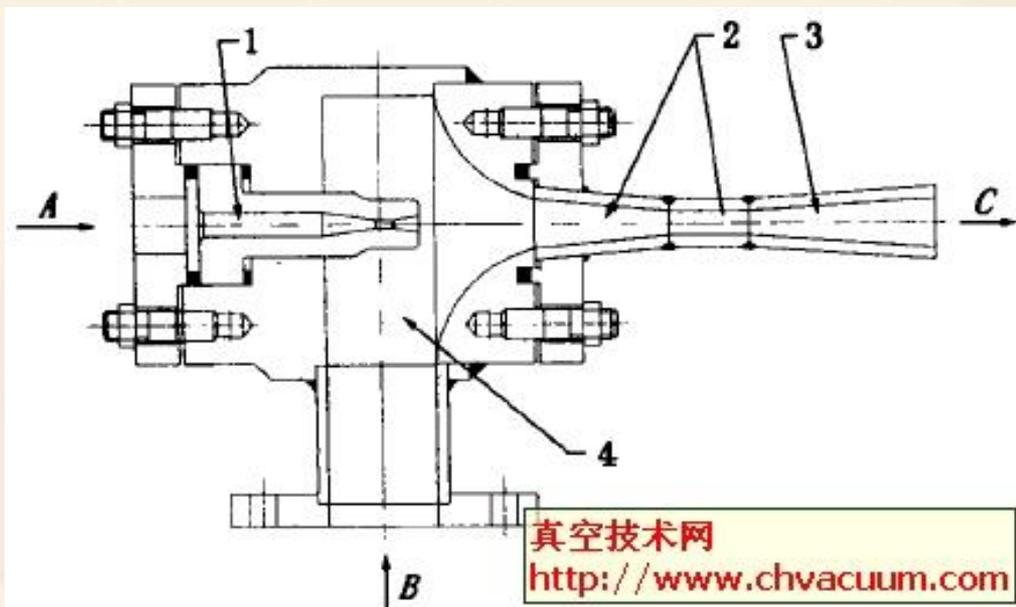
喷射器是利用高速气流由小管流入两端开口的大管中，在大管入口处形成负压，带动气体流动。



大气喷射器是以压缩空气作为工作介质,来抽吸和压送气体(被抽气体称为引射介质),以获取真空的喷射器。

1. 拉伐尔喷嘴 2. 混和室 3. 扩压器 4. 吸入室

❖ A. 工作介质入口 B. 引射介质入口 C. 混和气体出口



- (1) **喇叭形气体入口**：为减少被喷射气体的进入喷射器的阻力损失，将入口处做成喇叭形管口。
- (2) **混合管**：其作用在于使喷射气体与被喷射气体速度趋于均匀，因而使动量趋于降低，使混合管内产生压强差，引射气体流动。
- (3) **扩压管**：混合气体流过扩张管，流速降低，部分动压头转变为静压头，利用扩张管出口的静压头可使混合后的气体继续克服阻力沿管道流动。同时在混合管末端安装扩张管，可以增大喷射器两端压强差，以增大气体吸入量。

大气喷射器有如下特点:

- ❖ ①无机机械运动部件,工作不受润滑、振动等条件限制。因此,其抽气能力很大。
- ❖ ②结构简单,工作稳定可靠,使用寿命长。只要该喷射器的结构、材质选择适当,可以很好地抽出含有大量水蒸气、粉尘、易燃、易爆及有腐蚀性的气体。
- ❖ ③系统无油污染。
- ❖ ④工作压力范围较宽,可以根据需要产生不同压力的真空。

第七节 烟囱

一、烟 囱

烟囱的作用是引导窑内气体运动并将废气排出。

1. 烟囱底部所需负压的计算

将基准面取在6—6面，

其柏努利公式为

$$h_{s5} + h_{g5} + h_{k5} = h_{k6} + h_{l_{5-6}}$$

变化后 $-h_{s5} = h_{g5} - (h_{k6} - h_{k5}) - h_{l_{5-6}}$

烟囱几何压头转变为动压头增量和阻力损失，其余转变为烟囱的负压，以引导窑内气体运动，这就是烟囱工作的基本原理。

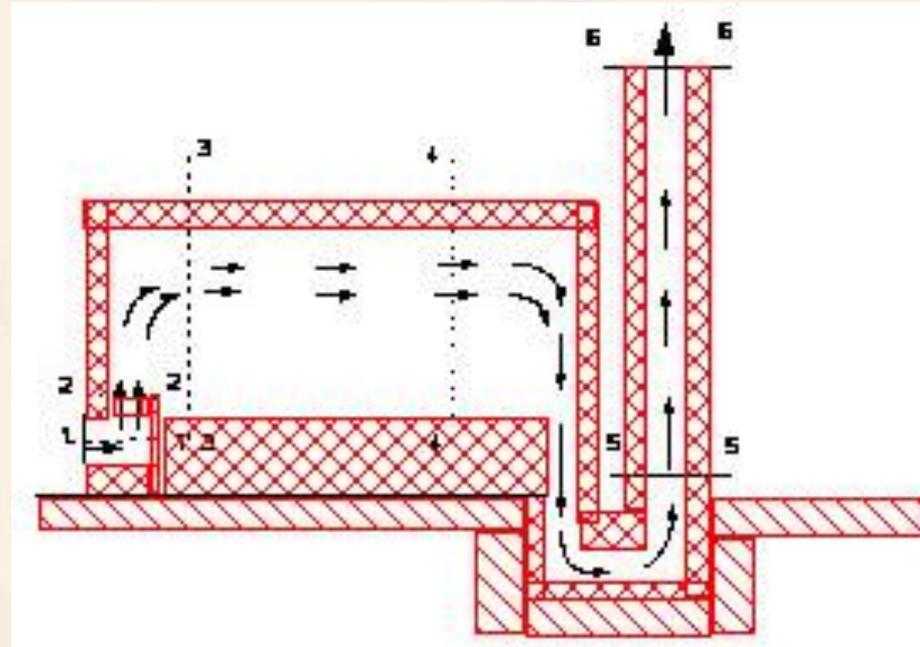


图1.19 窑炉排烟系统

截面2， $h_{g2} = 0$ ，

$$h_{s1} + h_{g1} + h_{k1} = h_{s2} + h_{k2} + hl_{1-2}$$

截面3， $h_{g3} = 0$ ，

$$h_{s2} + h_{g2} + h_{k2} = h_{s3} + h_{k3} + hl_{2-3}$$

截面4， $h_{g3} = h_{g4}$ ，

$$h_{s3} + h_{k3} = h_{s4} + h_{k4} + hl_{3-4}$$

截面5， $h_{g4} = 0$ ，

$$h_{s4} + h_{k4} = h_{s5} + h_{g5} + h_{k5} + hl_{4-5}$$

将上述4式相加，得： $h_{s1} - h_{s5} = h_{k5} - h_{k1} + h_{g5} - h_{g1} - h_{g2} + \sum hl_{1-5}$ (a)

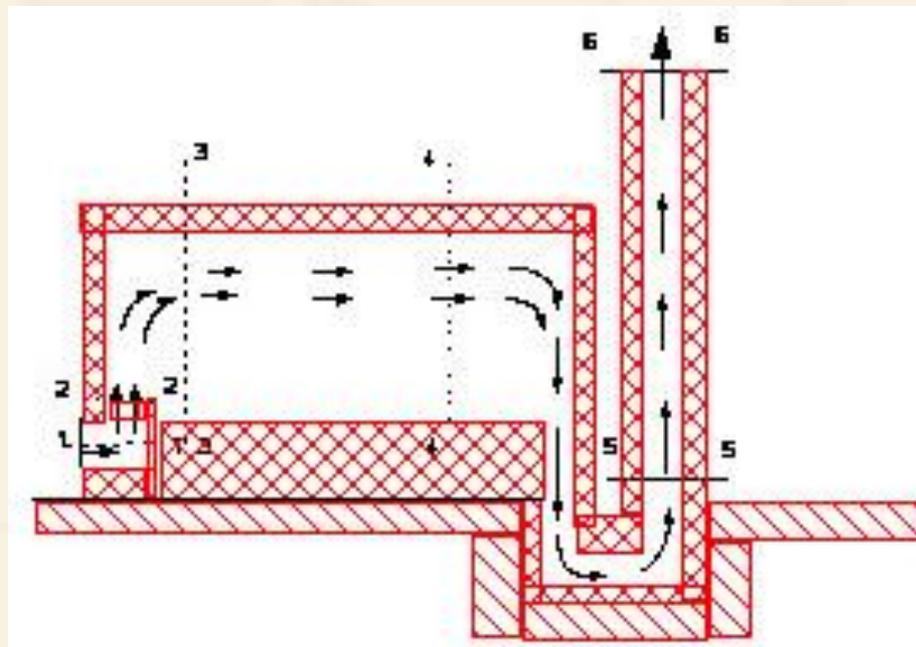


图1.19 窑炉排烟系统

2. 烟囱计算

(1) 烟囱直径计算

出口直径根据废气排出量和规定的出口速度求得：

$$d=(4q_{vn}/\pi u_n)^{0.5} \quad \text{m}$$

q_{vn} ：烟气标态流量， m^3/s ； u_n ：规定的烟气出口
标态流速， m/s

对于自然通风的窑炉，出口标态速度 $2\sim 4\text{m/s}$ ，机械通风时可取 $8\sim 15\text{m/s}$ ，一般烟囱出口直径为 $0.8\sim 1.8\text{m}$ 。底部直径为顶部直径的 $1.3\sim 1.5$ 倍。烟囱估计高度 $H'= 25\sim 30d$ ，每米落差 $1\sim 2^\circ\text{C}$ 。

(2) 烟囱高度计算

$$s = -h_s = Hg(\rho_a - \rho)p/p_0 - (\rho/2) \cdot (u_2^2 - u_1^2) - \lambda \rho u_m^2 / 2 \cdot (H/d_m)$$

式中：

s ：烟囱底部负压，习惯上称之为抽力，还应考虑1.2~1.3的储备系数。

H ：烟囱高度，m； p ：大气压强，Pa；

p_0 ：标准大气压强，Pa；

ρ 、 ρ_a ：烟气密度和空气密度，kg/m³；

u_2 、 u_1 ：顶部和底部的气体流速，m/s；

λ ：烟气流动的摩擦阻力系数，对于烟囱取 0.05~0.06；

u_m ：平均温度、平均直径下的流速，m/s；

d_m ：烟囱的平均直径m。

例9 经烟囱排出的最大标态烟气量 $q_{vn}=12000\text{m}^3/\text{h}$ ，烟气底部温度 400°C ，该区7月份地面平均温度为 27°C ，平均气压为 96000Pa ，烟囱底部负压为 130Pa ，计算烟囱直径和高度。

解：取烟气出口标态流速 $u_n=3\text{m/s}$ ，

$$\begin{aligned}\text{烟囱出口直径 } d &= (4q_{vn}/\pi u_n)^{0.5} \\ &= [4 \times 12000 / (3600 \times 3 \times 3.14)]^{0.5} = 1.19 \text{ m},\end{aligned}$$

取 $d=1.2\text{ m}$ ，底部直径 $d'=1.5d=1.8\text{ m}$

烟囱底部负压，考虑30%的储备能力， $s=1.3 \times 130=169\text{Pa}$

空气密度 ρ_a ， $\rho_a=1.293 \times 273/300=1.18\text{ kg/m}^3$

初步确定烟囱高度 H' ， $H'=26d=26 \times 1.2=31.2\text{ m}$ ，取 31m

烟囱顶部温度 t_2 ，每米落差取为 2°C/m ， $t_2=400-2 \times 31=338^\circ\text{C}$

烟气平均温度 t_m ， $t_m=(400+338)/2=369^\circ\text{C}$

烟气平均温度下的密度 ρ ， $\rho=1.293 \times 273/642=0.55\text{ kg/m}^3$

烟囱顶部烟气实际流速 u_2 :

$$u_2 = 3 \times 611 / 273 = 6.71 \text{ m/s} \quad (\text{烟囱顶部温度 } 338^\circ\text{C})$$

烟囱底部烟气实际流速 u_1 :

$$u_1 = [12000 / (3600 \times 3.14 \times 1.8^2 / 4)] \times (673 / 273) = 3.23 \text{ m/s} \quad (\text{烟囱底部温度 } 400^\circ\text{C})$$

烟囱平均直径 d_m , $d_m = (1.2 + 1.8) / 2 = 1.5 \text{ m}$

烟囱平均截面积 $F_m = 3.14 \times 1.5^2 / 4 = 1.77 \text{ m}^2$

烟气平均流速 u_m

$$u_m = 12000 / (3600 \times 1.77) \times 642 / 273 = 4.43 \text{ m/s}$$

将所有数据代入式

$$s = Hg(\rho_a - \rho)p/p_0 - (\rho/2) \cdot (u_2^2 - u_1^2) - \lambda \rho u_m^2 / 2 \cdot H / d_m$$

$$169 = H \times 9.81 \times (1.18 - 0.55) \times 96000 / 101325 - 0.55 / 2 \times$$

$$(6.71^2 - 3.23^2) - 0.05 \times 0.55 \times 4.43^2 / 2 \times H / 1.5$$

$$H = 31.43 \text{ m}$$

相对误差 $(H - H') / H' \times 100\% = 1.39\%$, 计算正确。

在进行烟囱计算时，应注意几个问题：

- (1) 几个窑合用一个烟囱时，烟囱抽力应按几个窑中**阻力最大者**进行计算，而不是各窑阻力之和；
- (2) 燃料消耗量有变化的窑，应按**最大燃耗时产生的烟气体积**进行计算；
- (3) 空气密度应按全年**最高温度时的密度**进行计算；
- (4) 根据所在地的海拔高度进行气压校正；
- (5) 应考虑环境卫生，应将烟气排至高空。