

第三节 气体运动过程中的阻力损失

- ❖ 气体在运动过程产生的能量损失，可以是由于气体沿固体壁面运动而引起的**摩擦阻力**，也可以是气体运动时遇到局部障碍，气流方向和速度突变引起的**局部阻力**。同时，在窑炉中还会有一些特殊的阻力，如气体通过制品堆垛的阻力；通过燃烧室、散料层的阻力；以及气体通过换热器管束的阻力等。

一、摩擦阻力

气体在管道内流动，由于管壁的摩擦作用以及气体内部的摩擦作用，形成了管道对气体的摩擦阻力。

摩擦阻力的计算式： $h_{lm} = \frac{l\lambda}{d} \cdot (pu^2/2) \text{ Pa}$

式中 λ :摩擦阻力系数;

l :管道长度, m;

d :管道直径, 对非圆形管道取当量直径 d_e ;

$pu^2/2$: 气体动压头, Pa

- 气体在直管内做层流流动时，摩擦阻力系数

$$\lambda = 64/\text{Re};$$

- 气体做紊流流动时，摩擦阻力系数不仅与Re有关，还与管壁粗糙度有关，

$$\lambda = A/\text{Re}^n。$$

对于光滑的金属管道 $A = 0.32$ ， $n = 0.25$ ；

表面粗糙的金属管道 $A = 0.129$ ， $n = 0.12$ ；

砖砌管道 $A = 0.175$ ， $n = 0.12$ 。

在一般的工程计算时， λ 值可近似选取。

光滑的金属管道 $\lambda = 0.02 \sim 0.025$ ；

氧化的金属管道 $\lambda = 0.035 \sim 0.04$ ；

砖砌管道 $\lambda = 0.05 \sim 0.06$ 。

二、局部阻力

当气体管道发生局部变形，如扩张、收缩、拐弯、通道设闸板等障碍。气流速度与方向均发生变化，局部阻力 h_{lj} 计算式：

$$h_{lj} = \underline{K} (\rho u^2 / 2)$$

K —局部阻力系数， K 决定于局部阻力性质（障碍形状与尺寸）

三、气体通过散料层的阻力

块状或粒状固体物料堆积所组成的物料层叫散料层。如燃烧室，煤气发生炉的煤层及竖窑中物料与燃料堆积的料层都属于散料层。

在散料层中，所形成的孔隙小且形状不规则，气体通过时其流速、方向都要发生变化，因此气体通过散料层的能量损失难于计算。可把气体在散料层中的流动，看成在若干不规则的孔隙通道中的流动，仍采用计算摩擦阻力的基本公式，但气体通过孔隙通道的流速和孔隙的当量直径难于确定，为此还需结合散料层的特点进行变换。

1. 固体颗粒的有关参数

1) 平均直径 d_m

在散料层中，固体颗粒的大小不可能均匀，因此就要采用平均粒径的概念。采用筛分法求平均粒径 d_m 。

❖ 当粒子通过粗筛网且被截留在细筛网时，粗细筛孔直径的算术或几何平均值称为**筛分径**。记作 D_A 。

算术平均径 $D_A = (a+b)/2$ 几何平均径 $D_A = (ab)^{1/2}$

a —粒子通过的粗筛网直径， b —粒子被截留的细筛网直径。

公式：

$$d_m = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{d_i}} \quad m$$

式中 d_i ：某两筛孔的平均直径， m ；

x_i ：该平均直径的颗粒质量占总质量的分数，也称质量分率。

目数，就是孔数，就是每平方英寸上的孔数目。目数越大，孔径越小。

粒度与目数的换算表					
目数	粒度μm	目数	粒度μm	目数	粒度μm
5	3900	120	124	1100	13
10	2000	140	104	1300	11
16	1190	170	89	1600	10
20	840	200	74	1800	8
25	710	230	61	2000	6.5
30	590	270	53	2500	5.5
35	500	325	44	3000	5
40	420	400	38	3500	4.5
45	350	460	30	4000	3.4
50	297	540	26	5000	2.7
60	250	650	21	6000	2.5
80	178	800	19	8000	1.6
100	150	900	15	10000	1.3

一般来说，**目数**×**孔径**（微米数）=15000

2) 物料堆积孔隙率 ϵ

孔隙体积 V_0 与总体积 V 之比，称为物料孔隙率。

$$\epsilon = V_0/V = (V - V_s)/V$$

式中 V_0 : 颗粒堆积孔隙体积, m^3 ;

V_s : 颗粒的真实体积, m^3 ;

V : 颗粒堆积的总体积, m^3 。

3) 球形度 Φ

颗粒状物料呈不规则的复杂现状，某颗粒与直径为 d 的球具有相同的体积，颗粒表面积与等体积球的表面积不同，其差别可用球形度表示：

$$\Phi = (\text{球体表面积} / \text{颗粒表面积})_{\text{等体积}}$$

当颗粒为球形时， $\Phi=1$ ；

当颗粒为任何其它复杂形状时，则 $0 < \Phi < 1$ 。

4) 比表面积 a

- ❖ 对于**单一颗粒**的比表面积 a 可表示为

$$\begin{aligned} a &= \text{颗粒表面积} / \text{颗粒体积} \\ &= (\pi d^2 / \Phi) / (\pi d^3 / 6) \\ &= 6 / (\Phi d) \end{aligned}$$

- ❖ 对于**料层**，比表面积 a 表示为：

a = 料层颗粒总表面积 / 料层体积，

料层颗粒数目 n ，总的表面积为： $n \cdot 4\pi(d_m/2)^2 / \Phi$

由颗粒总体积 = 料层体积 - 孔隙总体积，即

$$n \cdot \pi d_m^3 / 6 = V(1 - \epsilon),$$

得到：料层的比表面积 $a = 6(1 - \epsilon) / (\Phi \times d_m)$

5) 料层孔隙当量直径 d_e

按照**当量直径**的定义：

$$d_e = 4 \times (\text{通道截面积} / \text{通道浸润周边})。$$

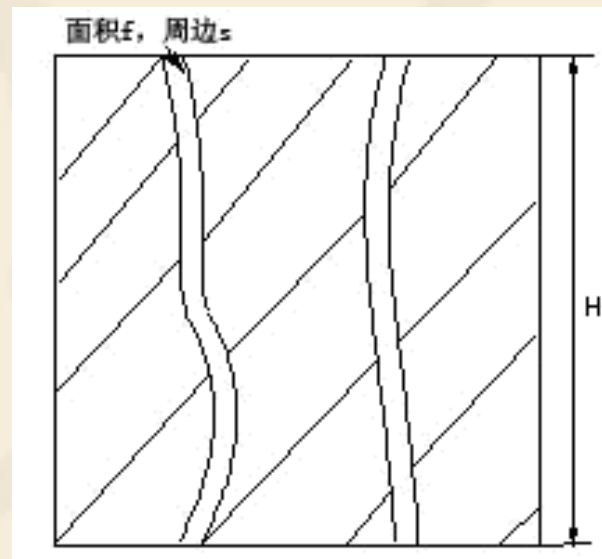
如图所示。

料层高度 H ，孔隙通道截面积 f ，
流体与固体面的接触长度 l

$$d_e = 4 (\sum f_i / \sum l_i)$$

d_e = 料层空隙的体积 / 料层空隙的表面积

$$= 4\varepsilon / a = 2\varepsilon \Phi d_m / 3(1 - \varepsilon)$$



2. 料层阻力损失的计算公式

❖ 气体通过散料层流动阻力损失：

$$h_{ls} = \underline{\lambda_0 H / d_e} \cdot (\rho u_0^2 / 2) \quad \text{Pa}$$

式中： λ_0 – 气体通过孔隙通道流动的阻力系数

H – 料层高度

d_e – 孔隙当量直径

u_0 – 气体通过孔隙流动的流速

- ❖ 当气体通过料层流动时，流速难于确定。
为此需要换算成空窑速度，即气体流量 Q 除以窑的横截面积 F 。

$$u = Q / F$$

$$u_0 = Q / F_0$$

其中， F_0 为孔隙截面积， $F_0 = F\varepsilon$

u_0 是以空窑速度表示的通过孔隙的气体流速，

$$u_0 = u / \varepsilon$$

$$h_{ls} = \lambda_0 H / d_e \cdot (\rho u_0^2 / 2)$$

考虑到阻力系数，以及其与气流的雷诺数之间的一系列计算，
经计算简化整理得到：

$$h_{ls} = \lambda^* \cdot (9/4) \cdot (H/d_m) \cdot [(1-\varepsilon)^2 / (\varepsilon^3 \varphi^2)] \cdot (\rho u^2 / 2) \text{ Pa}$$

式中，H：料层高度，m；

u：空窑速度，m/s；

λ^* ：修正阻力系数；

ε ：物料堆积孔隙率；

φ ：球形度；

d_m ：颗粒平均尺寸，m。

可看出： $H \uparrow, u \uparrow, \text{气流温度 } T(u) \uparrow \rightarrow h_{ls} \uparrow$

$\varphi \uparrow, d_m \uparrow \rightarrow h_{ls} \downarrow$

四、气体通过管束的阻力

❖ 气体横向通过管束的阻力损失

$$h_{lg} = \underline{K_g} \cdot (\rho u^2 / 2)$$

- ❖ 式中 u : 气体在管束内的流速, m/s;
 K_g : 整个管束的阻力系数。

对顺排式的管束：

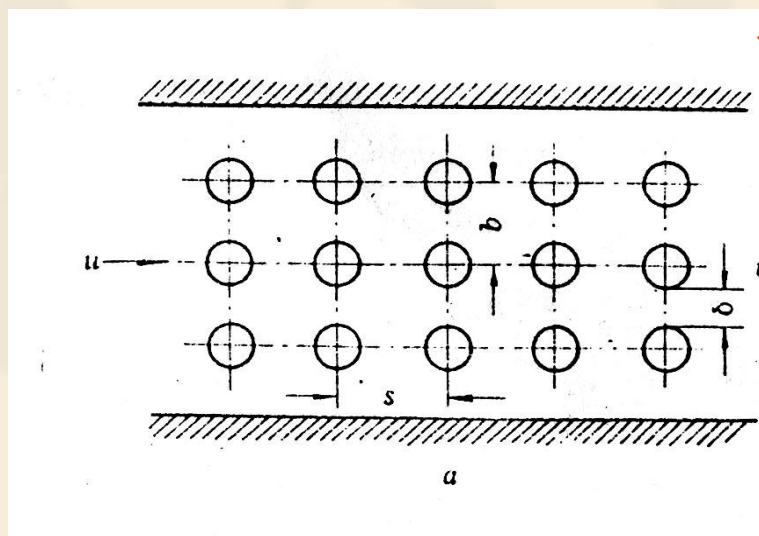


图1.10 管束在管道内的排列

❖ 当 $Re \geq 5 \times 10^4$,

$$K_g = n s \alpha / b + \beta$$

式中：

K_g ：整个管束的阻力系数；

n ：沿气流方向的管子排数；

s ：沿气流方向的管子的中心距，m；

b ：垂直气流方向的管子的中心距，m；

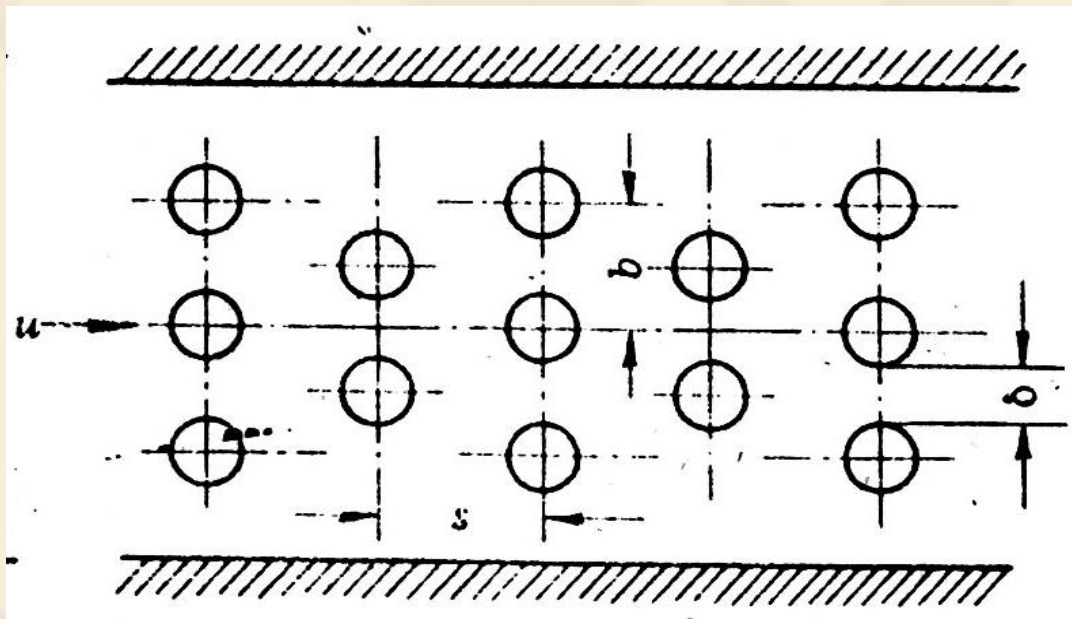
α ， β 为实验常数， $\alpha = 0.028(b/\delta)^2$ ，

$\beta = (b/\delta - 1)^2$ 。

❖ 当 $Re < 5 \times 10^4$ ，阻力系数乘以如下修正系数 ψ 。

Re	4000	6000	10000	30000
ψ	1.70	1.55	1.37	1.08

管束在管道内的排列 叉排式管束



对于叉排式的管束：

当 $Re > 5 \times 10^4$, $k_g' = (0.8 \sim 0.9)k_g$;

当 $Re < 5 \times 10^4$, 修正系数 ψ'

Re	4000	6000	10000	30000
ψ'	1.40	1.32	1.22	1.05