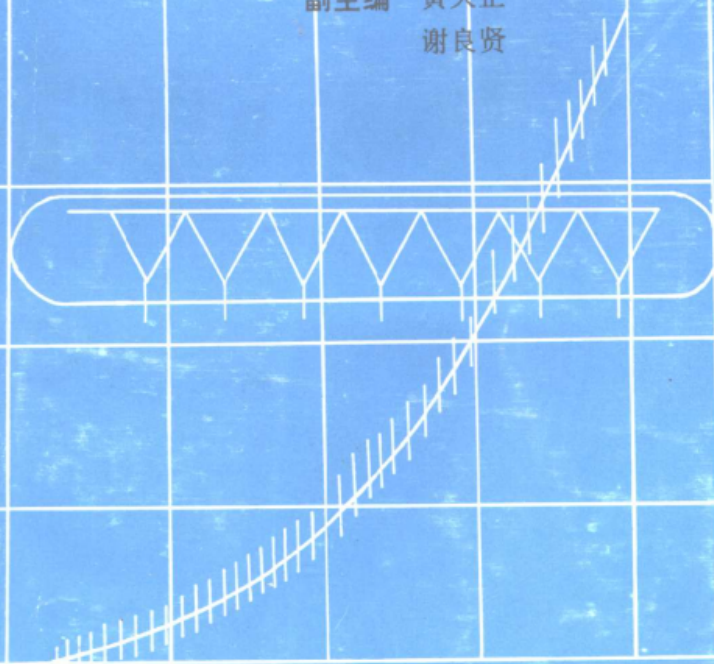


烧 结 技 术

主 编 习乃文

副主编 黄天正

谢良贤



云南人民出版社

烧 结 技 术

主 编 习乃文

副主编 黄天正

谢良贤

(滇)新登字 01 号

责任编辑:陈瑞秀 李 巍

封面设计:培 素

烧结技术 习乃文 黄天正 谢良贤

云南人民出版社出版 (昆明市书林街100号)

冶金部中南地勘局印刷厂印装

开本:850×1168 1/32 印张:11 字数:276千字

1993年5月第1版 1993年5月第1次印刷

印数:0001~1000

ISBN 7-222-01223-0/TF·2 定价:12.00元

编写说明

烧结技术在80年代有了很大发展。烧结过程反应理论和烧结矿成矿机理等方面的研究取得了许多成果,在生产工艺方面对传统的工艺如混匀制粒、点火、热风烧结、双层烧结等课题进行了更深入的研究,提出了许多新的观点和方法。同时又开发出了许多新工艺如低温烧结、双球烧结、球团烧结、烧结矿卤化物处理以及一步法直接还原等。此外,将现代控制理论与计算机技术应用于烧结过程,建立了烧结生产数学模型和自动化控制系统。这些新工艺、新技术的开发和应用,推动了我国烧结技术的进步。

为了帮助烧结专业技术人员更新知识,开拓视野,促进烧结技术的发展,更好地为企业发展服务,我们组织了从事教学、科研、设计以及生产的烧结科技工作者参加了本书的编写工作。由习乃文同志主编,黄天正、谢良贤同志任副主编。参加编写的同志有:习乃文(6,7,10,15.1,15.3);黄天正(1,2,11,16),谢良贤(9,15.2),周取定(13),杜鹤桂(14),杨世农(12),林淑芳(3,4,5),傅菊英(8)。

本书除作为烧结专业技术人员的进修教材外,还可作为团矿、炼铁专业师生的教学参考书。

由于编者水平有限,不足之处欢迎读者批评指正。

冶金系统成人教育教材编写办公室

1992年11月

目 录

1 烧结料层内气体运动规律	(1)
1.1 散料的基本参数	(1)
1.2 气流在散料层中的压力降	(8)
1.3 气流在烧结过程各带的压力降	(14)
2 烧结料内燃烧与热量传输规律	(30)
2.1 烧结料层碳燃烧的规律	(30)
2.2 烧结料层的热量传输	(35)
2.3 烧结料层的蓄热	(42)
2.4 烧结过程传热分析	(47)
3 烧结过程的固相反应、液相形成	(58)
3.1 固相反应理论	(58)
3.2 烧结过程的固相反应	(61)
3.3 烧结过程主要固相反应类型	(68)
3.4 烧结过程的液相形成	(70)
4 烧结矿的成矿过程	(79)
4.1 液相的结晶和冷却	(79)
4.2 成矿固结理论	(82)
4.3 液相形成与冷凝过程的相图分析	(84)
5 烧结矿的显微结构	(102)
5.1 熔剂性烧结矿的常见结构	(102)
5.2 显微结构与冶金性能的关系	(115)
6 原料混匀技术	(117)

6.1	概述	(117)
6.2	混匀工艺原理及其影响因素分析	(119)
6.3	混匀矿质量	(127)
7	配料技术的发展	(131)
7.1	概述	(131)
7.2	返矿参加配料	(132)
7.3	线性规划在配料中的应用	(133)
8	烧结混合料制粒机理与实践	(148)
8.1	混合料制粒性能和效果的评价	(148)
8.2	制粒后小球的结构	(151)
8.3	小球形成的连接机理	(152)
8.4	强化制粒的方法及其实践	(157)
9	布料原理及工艺设备	(164)
9.1	概述	(164)
9.2	各种布料方法的原理	(164)
9.3	新型布料技术——强化筛分布料法	(182)
10	烧结点火技术	(193)
10.1	点火因素分析	(193)
10.2	烧嘴结构及其技术特性	(202)
10.3	新型点火器的开发	(212)
11	低温烧结技术与应用	(219)
11.1	低温烧结法的实质	(219)
11.2	低温烧结的模式与基本要求	(220)
11.3	低温烧结技术的应用	(231)
12	双球烧结技术	(233)

12.1	概述	(233)
12.2	双球烧结机理	(234)
12.3	双球烧结工艺	(237)
12.4	双球烧结的技术经济效果	(241)
13	富氧烧结与双层烧结技术	(244)
13.1	富氧烧结	(244)
13.2	双层烧结	(250)
14	热风烧结原理及工艺	(260)
14.1	热风烧结原理	(260)
14.2	热风烧结工艺因素分析	(263)
14.3	热风烧结技术的应用	(268)
15	烧结新工艺及其它	(274)
15.1	烧结矿卤化物处理	(274)
15.2	球团烧结法	(280)
15.3	铁矿石直接还原法的研究	(290)
16	烧结数学模型与微机应用	(302)
16.1	数学模型的含义和作用	(302)
16.2	数学模型的分类	(303)
16.3	建模与辨识	(305)
16.4	静态模型的建立	(307)
16.5	动态模型	(315)
16.6	烧结微机过程控制	(322)
16.7	烧结人工智能系统	(326)
16.8	计算机在烧结厂的应用	(334)

1 烧结料层内气体运动规律

研究烧结料层内气体运动的基本规律,实质是研究台车上的压力场和速度场,即压力分布和气流分布,而且主要是后者。它有一个衡量参数——透气性。因为烧结料层中的热能和化学能利用的好坏(热值水平)以及烧结过程顺行的情况,与透气性有密切关系。影响气流分布的因素很多,除了主抽风机压力、料层厚度、混合料水分、料层密度外,主要决定于配合料的物理性质,即原料的粒度、堆比重、颗粒形状、空隙率等。下面首先讨论压力场和速度场中的几个基本参数。

1.1 散料的基本参数

1.1.1 烧结料的平均直径 $\bar{d}_p$

散料是由一个个单个颗粒组成的。单个颗粒大小的表示方法如下:若为球形,直接用直径 d ;若为非球形,则用当量直径 $d_{\text{当}}$ 。当量直径又可分为:

(1) 圆当量直径。与颗粒投影面积 S 相同的圆的直径,也称 Heywood 径。 $d_{\text{当}} = \sqrt{4S/\pi}$ 。

(2) 球当量直径。与颗粒体积 V 相同的球的直径。 $d_{\text{当}} = \sqrt[3]{6V/\pi} \approx 1.24 \sqrt[3]{V}$ 。

(3) 沉降速度径。终端速度与颗粒终端速度相同的球的直径。适用于 Stokes 式的称为 Stokes 径(又称阻力当量直径);适用于 Newton 式的称为 Newton 径。

实际的颗粒群,其粒径必然不一致。为了计算其平均粒径以便表示其粒径大小,必须测定其粒度组成。测定粒度组成的方法有:筛分析法(如按 ISO 标准筛)、显微镜法、沉降法、风筛法及吸附法

等。烧结用原料通常用筛分析法。

当散料的粒级上限已知时,散料的粒度分布亦可用粒度分配特性方程式(Rosin-Rammler-Bennet)计算:

$$F_{(d_i)} = \{1 - \exp[-A(\frac{d_i}{d_{\text{当}}})^n]\}100$$

式中, $F_{(d_i)}$ ——小于粒级 d_i 的累计产率, %;

d_i ——级别的粒度上限, mm;

$d_{\text{当}}$ ——整个散料粒度上限, mm;

n, A ——系数, 与粉状物料有关的系数, n 值愈大, 粒径分布范围愈窄, 细粒愈少。

烧结用原料粒度的组成范围较宽时, 要取平均直径。不同工艺过程常用平均粒径 $\bar{d}_p$ 计算, 方法见表 1-1。在冶金上常取相当等表面积的平均粒径。设混合料各粒级料重百分数(%)分别为 $g_1, g_2, \dots, g_n$, 粒度分别为 $d_1, d_2, \dots, d_n$, 则等表面积平均粒径 $\bar{d}_p$ 可用下式计算:

$$\pi \bar{d}_p^2 \cdot r = \frac{g_p \cdot 6}{\bar{d}_p} \quad g_p = \Sigma g_i$$

$$\pi d_i^2 \cdot r = \frac{g_i \cdot 6}{d_i}$$

$$\frac{\Sigma g_i \cdot 6}{\bar{d}_p} = g_1 \frac{6}{d_1} + g_2 \frac{6}{d_2} + \dots + \frac{g_n \cdot 6}{d_n} = \Sigma(g_i \frac{6}{d_i})$$

$$\bar{d}_p = \frac{\Sigma g_i}{\Sigma(\frac{g_i}{d_i})}$$

例如, 根据下列烧结料, 求其等表面积的平均粒径 $\bar{d}_p$ (加权调和平均粒径 d_3)

粒级, mm	0.3~0.7,	0.7~1.3	1.3~2.7	2.7~5.3
重量比率, %	40	30	20	10

首先求出各粒级的算术平均粒度: 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 mm, 然后计算 $\bar{d}_p$ 。

表 1-1

常用平均粒径(d_p)计算方法

名称	计算公式	物理意义	特点及常用范围
1. 加权算术平均 d_1	$d_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (g_i d_i)}{\sum g_i}$	各粒级按质量分率参加平均	尺寸比较
2. 加权几何平均 d_2	$d_2 = \left(\prod_{i=1}^n d_i^{g_i} \right)^{\frac{1}{\sum g_i}}$	各粒级按质量分率乘方连乘后开 $\sum g_i = G$ 方	多用于筛分分析中两相邻粒级之平均。
3. 加权调和平均 d_3	$d_3 = \frac{\sum g_i}{\sum \left(\frac{g_i}{d_i} \right)}$	按相当等面积的平均	冶金上常用,如散料层气体阻力计算
4. 中位数		占散料重量一半时对应的颗粒尺寸	用作图法求得

$$\bar{d}_p = \frac{100}{\frac{40}{0.5} + \frac{30}{1.0} + \frac{20}{2.0} + \frac{10}{4.0}} = \frac{100}{122.5} \approx 0.82(\text{mm})$$

1.1.2 空隙率 ϵ

ϵ 是散料层的重要参数,也是最不易准确测量的参数。它的定义是散料层中空隙体积与总体积之比,即单位散料体积中的空隙份额,可以是百分数,也可是分数。根据定义可用下式求得:

$$\epsilon = 1 - \frac{\rho_{\text{堆}}}{\rho_{\text{块}}}$$

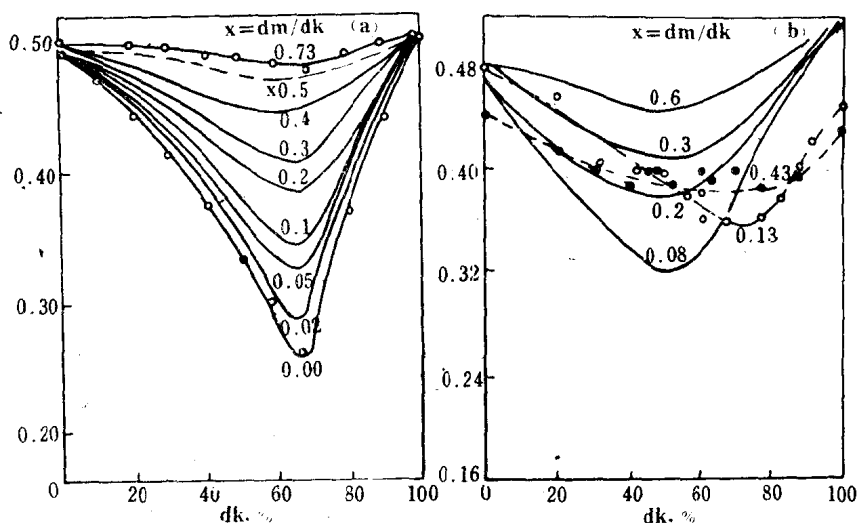
式中, $\rho_{\text{堆}}$ —— 散料的堆积密度, t/m^3 ;

$\rho_{\text{块}}$ —— 料块的密度,但不包括开气孔, t/m^3 。

当散料是由直径相等的圆球组成时,立体几何证明,随着排列方法不同, ϵ 最大为 0.476,最小为 0.260,而与粒度无关。当散料由两种或两种以上圆球组成时,空隙率降低,其降低的程度随粒径大小和两者掺合量的多少而变,目前还很难用计算的方法求得不

同粒度组成的散料体的 ϵ 。

两种不同粒度不同配比下的 ϵ 可见 C·C·弗纳斯(Furnas) 曲线及实测的烧结矿曲线(见图 1—1)。



(a) —理想球体(C·C 弗纳斯曲线);

(b) —烧结矿; m 为细粒级, k 为粗粒级, $x = d_m/d_k$

图 1—1 两种不同粒度不同比例配合的空隙率变化曲线

由图 1—1 可知, 细粒 d_m 与粗粒 d_k 直径相差愈远, ϵ 变化愈陡峭; d_k 占 60%~70% 时, ϵ 有最小值。将图 1—1 中各种曲线的 ϵ 最小值计算出 $(1-\epsilon)/\epsilon^3$, 并以均匀的 d_k 粒子的 ϵ_0 计算出 $(1-\epsilon_0)/\epsilon_0^3$, 求出 d_m/d_k 与 $\frac{(1-\epsilon)/\epsilon^3}{(1-\epsilon_0)/\epsilon_0^3}$ 的关系, 也就是与相对阻力损失的比值 $\Delta P/H$ 的关系, 这些数据绘于图 1—2。

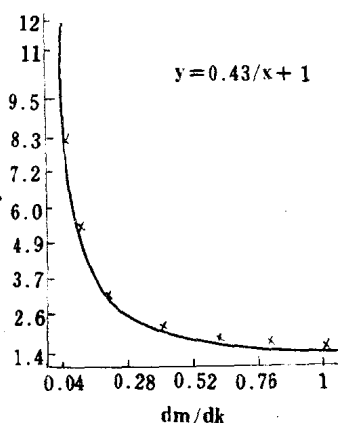
图 1—2 中曲线方程为:

$$\left\{ \frac{(1-\epsilon)/\epsilon^3}{(1-\epsilon_0)/\epsilon_0^3} - 1 \right\} \cdot \frac{d_m}{d_k} = 0.43$$

d_m/d_k 变小时, $\Delta P/H$ 变大。
当 $d_m/d_k=0.2$ 以下时, 阻力上升很快。 $d_m/d_k=0.2$ 应为极限值。

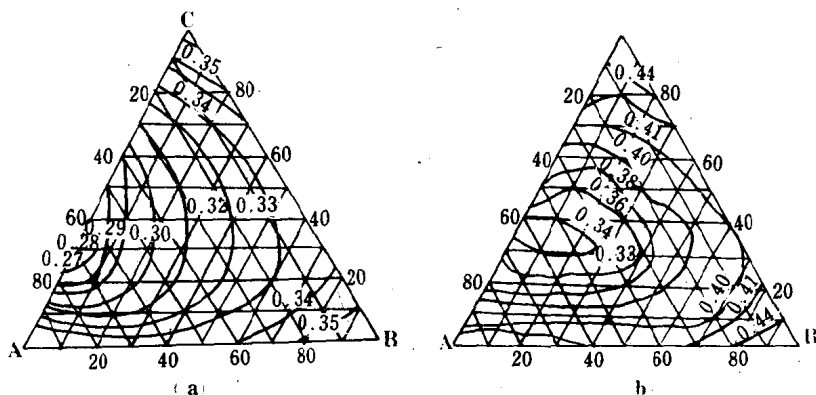
在生产实际中, 烧结原料的粒度是多级混合的。图 1-3 是三级粒度混合物的测定数据。空隙率变化以最粗级 (d_k) 和最细级 (d_m) 之间的相互作用为主。增加中间级, 引起空隙率增加。

以上说明, 均一的球形散料的 ϵ 与球的直径无关, 而烧结料和烧结矿的 ϵ 却与粒度有关, 粒度减小, ϵ 下降, 可能是粒度愈小, 表面气孔相对愈小之故。



$$Y = \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} / \frac{(1-\epsilon_0)}{\epsilon_0^3}, X = d_m/d_k$$

图 1-2 d_m/d_k 与相对阻力系数的关系



- (a) — 球体: A—28mm, ϵ 为 0.365; B—14mm, ϵ 为 0.365; C—7mm, ϵ 为 0.365。
(b) — 磁铁矿物: A—1~0.2mm, ϵ 为 0.46; B—0.2~0.045mm, ϵ 为 0.46;
C—0.045~0mm, ϵ 为 0.46

图 1-3 料层空隙率三元图

1.1.3 表面积 A、比表面积 S、形状系数 Φ

在研究散料层中的气流阻力和传热速度时,经常涉及烧结料的表面积 A 和比表面积 S 的概念。表面积 A 是指 1m^3 体积散料所具有的表面积, m^2/m^3 ; 有时也用单位重量的表面积 m^2/g 表示。比表面积 S 则是物料总表面积与物料体积之比。

对于等直径 d_0 的球形散料, 1m^3 有 N 个球, 1m^3 堆积散料中, 料的体积为 $(1-\epsilon)$, 则球的数量为:

$$N = \frac{6(1-\epsilon)}{\pi d_0^3}$$

$$\text{表面积} \quad A_0 = N \cdot \pi d_0^2 = \frac{6(1-\epsilon)}{d_0}$$

$$\text{比表面积} \quad S = \frac{A_0}{1-\epsilon} = \frac{6}{d_0}$$

实际颗粒很少是规则球形体, 实际颗粒与球粒之间差异程度用形状系数 Φ 表示, 其定义为

$$\Phi = \frac{\text{具有和颗粒体积相等的球的表面积}}{\text{颗粒的表面积}} = \frac{S_{\text{球}}}{S_{\text{料}}}$$

圆球体 $\Phi=1$; 非球形散料 $\Phi<1$ 。粒度为 d_p , 则 1m^3 物料

$$\text{总表面积} \quad A_{\text{料}} = \frac{6(1-\epsilon)}{\Phi d_p};$$

$$\text{比表面积} \quad S_{\text{料}} = \frac{6}{\Phi d_p}$$

几种常见原料的形状系数列于表 1-2。

表 1-2 几种常见原料的形状系数

烧结料	0.5~0.53	煤粉	0.73	薄片状砂粒	0.39
烧结矿	0.5~0.8	石灰石细粉	0.45	石英砂	0.55~0.63
球团矿	0.85~0.9	破碎筛分矿石	0.57		
焦炭	0.55~0.7	圆球形砂粒	0.87		
碎焦	0.65	有菱角砂粒	0.83		

1.1.4 水力学直径 d_*

按定义,水力学直径是水力学半径的四倍,即 $4 \times \frac{\text{过水断面}}{\text{润面长}}$ 。在散料层中,某一截面的过水断面(或可通面积)在数值上等于 ϵ ,而润周长则等于单位体积散料体的表面积 A ,所以水力学直径 d_* 可以表达为:

$$d_* = 4 \frac{\epsilon}{A} = 4 \cdot \frac{\epsilon \Phi d_p}{6(1-\epsilon)} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\epsilon}{1-\epsilon} \Phi d_p$$

即水力学直径与颗粒大小成正比,与料的体积成反比。这也是大粒原料透气性好的原因。

1.1.5 烧结料层结构基本参数的变化

空隙率 ϵ 是决定床层结构的重要因素,它对气体通过料层的压力降、床层的有效导热系数及比表面积都有重大的影响。影响 ϵ 的主要因素是颗粒的形状、粒度分布、比表面粗糙度及充填方式等等,这类因素可以近似地综合表示为颗粒的形状系数 Φ 对 ϵ 的影响。同时烧结过程中燃料的燃烧及料层收缩对 ϵ 的变化都是十分重要的。

在烧结过程中由于物料的熔融然后结晶与凝固形成了新的床层结构,改变了原来的料粒直径、形状系数及料层的体积收缩率。这里起决定性作用的因素是固相物料的熔融温度(或熔体的凝固温度)以及烧结过程可能达到的最高温度。图 1-4 绘出沿烧结料层高度的料层结构参数的变化。

混合料层、干燥层和烧结矿层的床层结构均不变化。混合料层和干燥层比表面积大而空隙率小,故传热效率高,升温快,但透气性不好。烧结矿层比表面积小而空隙率大,故透气性好,但传热效率低,冷却速度不快。床层结构的变化主要发生在燃烧和熔融固结层。燃烧层开始阶段由于物料尚未软熔收缩,燃烧颗粒变小使空隙率稍有增长。随着软熔发生,空隙率下降,软熔程度愈高,收缩率愈大,从而导致 ϵ 下降愈多。到固结层,则由于形状系数的减小而使

空隙率迅速上升。比表面积的变化主要在燃烧熔融阶段,由于颗粒变大, A_s 迅速变小。固结层 A_s 几乎保持不变。

1.2 气流在散料层中的压力降

气体在散料层中运动时,会产生压力损失。它包括两项:因气体粘度而产生的摩擦阻力损失;因运动时有扩张和收缩,路径曲折,故有局部阻力损失。在截面积和成分不变时,这两种阻力损失的总和就是压力降。

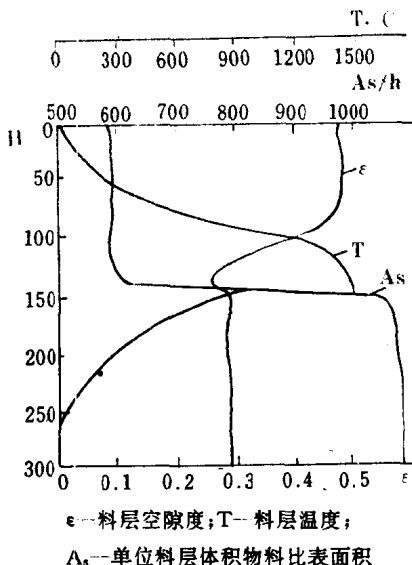


图 1-4 床层结构物性参数变化的模拟计算结果

1.2.1 扎沃隆科夫(Н. М. Жаворонков)公式

1944 年扎沃隆科夫以最简单的气流经过圆形空管的压力降为基础导出基本形式,并用试验方法确定阻力系数。

气体流过圆形空管时的压力降:

$$\Delta p/H = \frac{1}{2} \lambda \cdot \frac{\rho \cdot \omega^2}{D}$$

式中, Δp ——压力降, Pa;

H ——管长, m;

D ——管直径, m;

ρ ——气流的工作密度, kg/m^3 ;

ω ——气流的工作流速(此时为空管流速), m/s;

λ ——摩擦系数(无量纲数)。

$$\lambda = f(Re) = f\left(\frac{\omega D \rho}{\eta}\right) = f\left(\frac{\omega D}{\gamma}\right)$$

式中, Re ——雷诺数;

η ——气流粘度, $\text{kg/m} \cdot \text{s}$;

γ ——流体动粘度 ($\gamma = \frac{\eta}{\rho}$), m^2/s 。

扎沃隆科夫进一步研究了气体通过由相同直径的规则球体 (直径为 d) 填充的散料层时的压力降规律, 其表达式为:

$$\Delta p = \frac{2f\omega^2 \cdot r}{gd_s \epsilon^2} H$$

式中, r ——气体的重度, kg/m^3 ;

d_s ——通道的当量直径, m 。即认为散料层中存在许多贯通料层上下的通道, 相当一束管道, 所不同的是组成这束管道的每一根通道是曲折的, 截面忽粗忽细, 管壁非常粗糙, 实质是水力学直径 d_x ;

ϵ ——散料的空隙率 ($\epsilon < 1$);

g ——重力加速度, m/s^2 ;

f ——总的阻力 (包括摩擦阻力和局部阻力) 系数, 是雷诺数的函数;

H ——散料层高度, m 。

不同流态时, f 值不同, 修正的雷诺数 Re_m 为:

$$Re_m = \frac{\omega d_s}{\gamma \epsilon}$$

扎沃隆科夫公式的具体表达式为:

$$\text{层流时: } \Delta p = \frac{200r\omega\gamma}{gd_s^2 \epsilon} H$$

$$\text{过渡的紊流: } \Delta p = \frac{7.6r\omega^{1.8}\gamma^{0.2}}{gd_s^{1.2}\epsilon^{1.8}} H$$

$$\text{紊流时: } \Delta p = \frac{1.3r\omega^2}{gd_s \epsilon} H$$

在原料稳定和气体成分基本不变时, r 、 γ 亦可认为是常数, 则上列诸式可概括为下列通式:

$$\Delta p = k \cdot \frac{\omega^n}{\Phi} H$$

式中, k —— 气流的总摩擦系数;

Φ —— 料层的透气性指标, 与原料粒度大小、形状和料层空隙率有关。 Φ 增加, 料层透气性好; Φ 降低, 则透气性变坏;

n —— 与气体流动状态有关。层流时 $n=1$; 过渡的紊流时 $n=1.8$; 紊流时 $n=2$ 。

烧结过程处于从层流向紊流过渡的流动状态。要强化烧结过程, 必需提高通过料层的气体流量。根据测定, $n=1.54 \sim 1.82$, 平均为 1.67。改善料层透气性($\Phi \uparrow$)和提高负压($\Delta P \uparrow$), 都可以增加气体流量; 而提高烧结温度($T \uparrow$)和增加料层高度($H \uparrow$), 都会使气流量下降。

1.2.2 卡尔曼(Carman)公式^[2]

卡尔曼于 1937 年也研究了气流经过等径球体充填层时的压强规律, 其表达式为:

$$\Delta P = f_c \left(\frac{\rho \omega^2}{g} \right) \left(\frac{HS}{\epsilon^3} \right)$$

式中, f_c —— 阻力系数, 雷诺数的函数, $f_c = C_1 \left(\frac{\omega \rho}{\mu S} \right)^{-\beta}$;

ρ —— 气体密度, kg/m^3 ;

ω —— 气体空炉速度, m/s ;

μ —— 气体粘度, $\mu = \gamma \rho, \text{kg/m} \cdot \text{s}$;

S —— 散料的总表面积, $S = 6(1 - \epsilon)/d_p \Phi$;

H —— 料层高, m 。

如果以空塔质量速度 $G = \rho \omega (\text{kg/m}^2 \cdot \text{s})$ 代入上式并将与散料有关的因子移到右边, 可得:

$$\frac{\Delta P \omega^{-\beta}}{H} = C \left(\frac{1}{d_p \Phi} \right)^{1+\beta} \cdot \frac{(1 - \epsilon)^{1+\beta}}{\epsilon^3} \cdot G^{2-\beta}$$

$$\Delta P' = K G^{2-\beta}$$

上式表达了等温等压情况下均一散料体内流过的气体质量流速与压力降的关系, 式中 β 值与雷诺数有关。一般情况下, 烧结料