

224

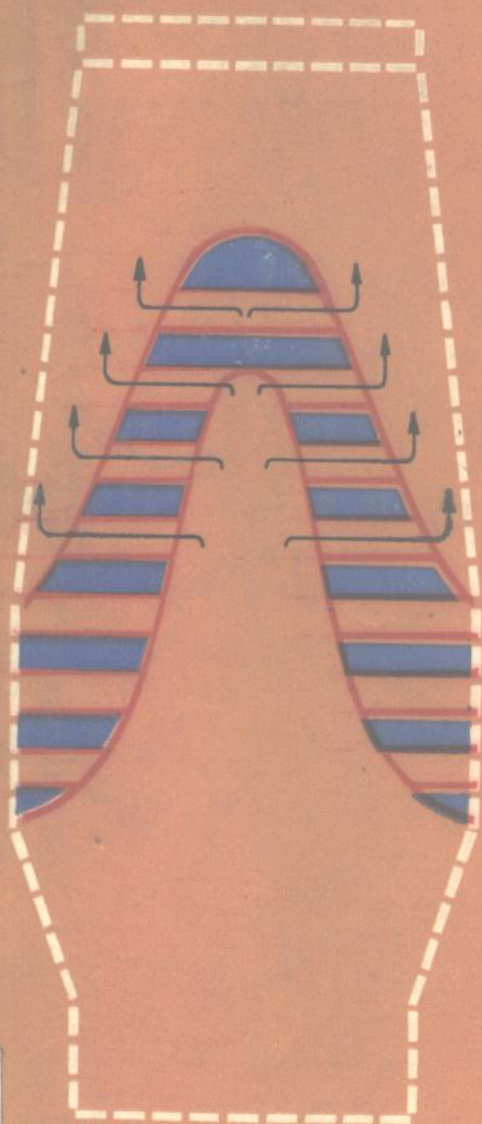
高炉过程气体动力学

傅世敏

刘子久

安云沛

编译



冶金工业出版社

7.1.14

高炉过程气体动力学

傅世敏 刘子久 安云沛 编译



冶金工业出版社

102130

2765/07

内 容 简 介

本书是在1982年苏联冶金出版社出版的В.П.塔拉索夫编著的《高炉过程气体动力学》(ГАЗОДИНАМИКА ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА)和К.А.舒米洛夫等编著的《高炉气体动力学制度的自动调节》(АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ РЕЖИМОМ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ)两书的基础上编译而成的。

本书着重论述了高炉上、下部气体动力学规律,以及为实现高炉最佳化操作所需的动力学条件;在大量实验数据的基础上,把高炉内传热、传质与流体流动过程结合在一起,对炉料和煤气流动规律作出了数学描述,提出了控制有钟和无钟高炉炉内炉料与煤气流分布的方法及高炉气体动力学综合自动化控制系统。本书不仅是一本可供大专院校用的教学参考书,而且对从事高炉生产与科研工作的科技人员,以及为高炉自动控制服务的其他科技人员都有重要的参考价值。

高炉过程气体动力学

傅世敏 刘子久 安云沛 编译

*

冶金工业出版社出版发行

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店总店科技发行所经销

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

850×1168 1/32 印张 11 7/8 字数 313 千字

1990年7月第一版 1990年7月第一次印刷

印数00,001~1,200册

ISBN 7-5024-0627-1

TF·129 定价7.75元

前 言

高炉冶炼过程的主要特征是炉料和煤气的逆流运动。在进行热量传递和质量传递的同时,发生各种各样的物理化学变化,对这一过程有着决定性影响的是高炉内的气体动力学条件。

近年来,国内外在高炉气体动力学方面已经做了不少研究工作,在生产实践中关于实现炉料和煤气流合理分布方面也积累了很丰富的经验,但是为了使高炉生产达到最佳化,还必须对高炉气体动力学作进一步的基本理论和新技术的开发研究,并且把研究成果有效地应用到生产实践中去,否则这个目标是难于达到的。

1982年苏联冶金出版社先后出版了B.П.塔拉索夫编著的《高炉过程气体动力学》和K.A.舒米洛夫等编著的《高炉气体动力学制度的自动调节》两本书。前一本书内容比较全面,除了理论上的阐述以外,还介绍了大量模型实验资料,涉及在不同的装料制度下炉料和煤气流的分布规律,其中有些结论和国内流行的观点不尽一致,如炉料中粉末的分布该书认为是集中于堆脚而不是堆尖。后一本书的主要内容是分析了风口区介质的运动和传热传质过程以及炉喉部位炉料和煤气流的分布与控制。由于高炉冶炼过程能否实现最佳化在很大程度上取决于对高炉气体动力学过程的自动控制,因此有关自动调节与控制在这两本书中都占了相当大的篇幅。

鉴于目前国内有关高炉气体动力学的专著比较少,我们在上述两书的基础上,又收集了近年来国内外期刊和文献上的有关资料及国内部分研究成果编译成了本书,以期达到促进国内进一步开展高炉气体动力学方面的研究的目的。

全书共分四章,分别由武汉钢铁学院炼铁教研室刘子久(第二章)、傅世敏(第一章和第三章)和鞍山钢铁公司钢铁研究所

安云沛（第四章）编译完成，全书由傅世敏同志总校订。由于我们教学和科研任务较重，又受水平所限，书中可能会有疏漏和不妥之处，请读者批评指正。

编译者

1989年2月

目 录

第一章 散料层内气体运动的基本规律	1
第一节 散料层的概念及特性	1
一、散料层的定义	1
二、散料层的物理特性	2
三、散料层的气体力学特性	14
第二节 散料层中的气体运动方程	19
一、理想料层中的气流运动方程	19
二、假想料层中的气流运动方程	24
三、实际料层中的气流运动方程	27
四、实际散料层中的二维气流运动方程	31
第三节 炉料与煤气在逆向运动中的透气性变化	39
一、炉料中含粉率对透气性的影响	39
二、界面渗混层的存在对逆向运动过程中透气性的影响	47
三、料层结构的变化对透气性的影响	52
第二章 高炉内块状带炉料和煤气流的分布	63
第一节 料钟布料时煤气流运动与炉料含粉率的关系	63
一、料层空隙度与炉料含粉率的关系	67
二、粉末沿炉喉半径的分布	71
三、装料顺序对料层空隙度、阻力系数和煤气压力降的影响	75
第二节 炉料和煤气流沿高炉圆周的分布	80
一、影响压力降的各项参数的确定	80
二、传热、传质与炉料粒度的关系	89
三、使用标准型布料器时炉料和煤气流沿圆周的分布	91
四、调剂圆周上煤气流分布的方法	96
第三节 高炉径向上炉料和煤气流的分布	98
一、矿焦比沿径向的变化	98
二、分装时矿焦比沿径向的变化	105
三、层装和混装	108
四、高炉径向上煤气流的分布	110

第三章 高炉内软熔带及下部气体动力学	113
第一节 高炉内软熔带的形成及其对高炉冶炼的影响	113
一、高炉内软熔带的形成及影响因素	113
二、软熔带对高炉冶炼过程的影响	120
第二节 高炉内软熔带形状及位置的检测与控制	134
一、高炉内软熔带形状及位置高低的检测方法	135
二、高炉内软熔带控制技术	148
第三节 风口前回旋区形成的动力学	153
一、风口回旋区形成的动力学条件	153
二、回旋区形成动力学及回旋区大小的计算	155
三、影响回旋区形成因素的分析	174
第四节 风口前焦炭运动及流化和液泛产生的可能性	179
第五节 综合鼓风时高炉下部气体动力学特征	197
第六节 风口回旋区内传热传质过程的研究及数学描述	205
一、风口回旋区内气固相反应的传热传质过程分析	205
二、回旋区内传热传质动力学数模	212
三、回旋区内动量、热量和质量传递同时考虑的数模	227
第四章 高炉气体动力学的控制	237
第一节 高炉气体动力学控制信息的检测	238
一、高炉炉喉料位及料面形状的测量	238
二、煤气流速与分布的测量	252
三、风口圆周工作状况的测量	259
四、检测计量的精度要求	265
第二节 合理煤气流分布及其评价方法	269
一、合理煤气流分布	269
二、根据煤气组成和温度评价气流径向分布的方法和 判断指数的确定	270
三、煤气流圆周分布的评价方法及指标确定	279
第三节 高炉气体动力学的综合自动控制系统	281
一、高炉计算机控制管理系统的功能和结构	281
二、高炉气体动力学方面的操作管理系统的功能和结构	284
三、高炉上部气体动力学控制的逻辑程序	296
四、高炉行程的综合自动控制系统	307

第四节 钟式高炉煤气分布制度的调整	316
一、料柱透气性的改善	316
二、钟式高炉径向炉料分布的控制方法	325
三、钟式高炉圆周方向均匀布料的控制	329
四、钟式高炉装料设备的改进	331
第五节 无钟炉顶布料装置的煤气分布控制与调整	335
一、无钟布料装置的工作特点	335
二、无钟布料的影响因素及布料过程的理论分析	337
三、无钟布料的自动控制与模型的建立	350
四、无钟布料对控制煤气流分布的影响与效果	356
参考文献	364
符号表	369

第一章 散料层内气体运动的基本规律

高炉是一个密闭的气—固逆相流反应器，近年来，通过对高炉停炉解剖和实测研究，对炉料在炉内的运动过程有了进一步的认识，并能在模拟实验的基础上，通过有限差分法等数值计算，求解二维条件下气流速度与压力的分布，为有效地控制高炉内炉料与煤气的合理分布提供了依据。本章将从散料层的物理特性，以及散料在气流作用下所具有的力学特征出发，对气流通过散料层的运动方程进行推导与讨论，同时对逆相流动过程中料层透气性的变化规律及影响因素进行分析与研究，为加速炉料与煤气间的动量传递，以及整个高炉内的传热传质过程打下基础。全章分散料层的概念及特性、散料层内的气体运动方程、炉料与煤气在逆相运动过程中透气性变化等三方面叙述。

第一节 散料层的概念及特性

散料层是高炉炉料的主要特征之一，它不仅影响着高炉炉身内炉料与煤气的分布，而且还影响到高炉下部气—液逆相流间的传热传质过程，为此很有必要对散料及散料层内的一些物理和力学特性有所认识，目前国内外冶金工作者在这方面也作了很多研究。

一、散料层的定义

由形状不一，大小相同或不同的同种或多种粒级料组成，并且有一定空隙能让具有一定压力的气（液）体从空隙流过的粒料群称散料层。它既非固体亦非流体，但却具有固体和流体的部分性质，如外观似固体，然而内部又无结合力，颗粒之间可以相对位移，在外力作用下力可向各个方向传递，这一点类似流体，然而其内部又有较大的摩擦力，力也只能在一定范围内有可传性，到一定程度后力就会消失，又不能象流体那样可以任意改变形

状。因此散料层具有既不同于固体，也不同于流体的一些特殊物理和力学特性。物理特性有堆角 (β)、内摩擦角 (ϕ_i)、侧压系数 (n)、堆密度 (γ)、比表面积 (S)、空隙度 (ε) 和有效质量 (q_{eff}) 等；力学特性是指在受力作用下表现出来的特性，如透气(液)性、分布不均匀性、流型不稳定性等。

二、散料层的物理特性

1. 散料的堆角 (β)、内摩擦角 (ϕ) 和侧压系数 (n)

散料中颗粒的可移动性与颗粒间的内摩擦力和粘聚力的大小有关，通常以自然堆角 (β) 和侧压系数 (n) 来表征。

由于散料的物理性质介乎固体和流体之间，它的颗粒的可移性是有限的，并且只有在界面一边坡一及其与水平面所成的角度不超过极限的情况下，才能保持其形状 (图1-1)。这个极限角 (β) 称自然堆角^[1]。

当散料装入容器内时，散料对容器壁产生的侧压力 (P_s) 与散料体的正压力 (P_v) 之比不能超过某一数值 n ，该 n 值称为侧压系数，即 $n = P_s / P_v$ 。

散料层的内摩擦角 (ϕ_i) 与颗粒大小、形状、均匀性、表面特性和散料的堆密度 (γ) 等均有关，散料层的内摩擦力，一般是由于一些颗粒陷入其它颗粒之间产生互相咬合，和颗粒间接触面上直接产生滑动和滚动而造成的，通常用散料内摩擦角的正切 $\tan \phi_i$ 来表示散料层的内摩擦系数即 $f = \tan \phi_i$ ，如果散料层内空隙中被某种胶结物或水填充，则颗粒间将会有粘聚力产生，从而使散料层的内摩擦力增大。

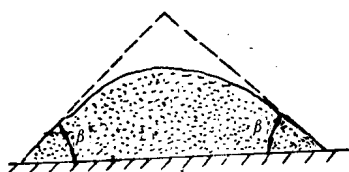


图 1-1 散料自然堆角形成图

散料层的自然堆角与摩擦力和粘聚力之间的关系可由图1-2推导出来：

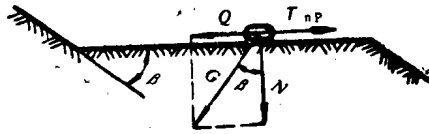


图 1-2 自然堆角与内摩擦力的关系

设重量为 G 的部分散料沿堆角为 β 的斜坡下滑，这时该部分散料上受两个力的同时作用：

$$\text{滑动力} \quad Q = G \sin \beta \quad (1-1)$$

$$\text{抗滑力} \quad T_{np} = G \cos \beta \tan \phi_1 + cF \quad (1-2)$$

式中 F 为所研究的那部分散料与斜坡的接触面， cF 为粘聚力。平衡时两力应相等，即：

$$G \sin \beta = \tan \phi_1 G \cos \beta + cF \quad (1-3)$$

两边除以 $G \sin \beta$ 则得：

$$\tan \beta = \tan \phi_1 + \frac{cF}{G \cos \beta} \quad (1-4)$$

上式表明：对无粘性的散料层，自然堆角等于内摩擦角，但对于有粘聚力的散料层（如湿料），其自然堆角则会大于内摩擦角。

散料堆角大小除与内摩擦力等物料本身有关外，还与盛料容器的几何形状、粗糙度和气氛条件等有关。高炉炉料的堆角通过开炉前加料的测定，与散料的落下高度（ h ）、炉喉半径（ r ）有以下关系：

$$\tan \beta = \tan \beta_0 - kh/r \quad (1-5)$$

式中 β_0 ——炉料的自然堆角；

k ——取决于炉料性质的常数。

可见炉料在炉内的堆角是随落下高度和炉喉半径的不同而变化的，因此可以用调节料线和炉喉间隙以改变炉料在炉内堆角的办

法来控制布料。生产条件下，由于气流的作用，炉料在炉内的堆角还将发生变化，其变化规律将在第三节中讨论。

散料层的侧压系数 (n)、内摩擦角 (ϕ_i) 与散料层内所受压力有关，Г.И.波克罗夫斯基 (Вокловский)^[1]利用静力学方法研究得出它们之间关系如下：

$$n = 1 - 0.74 \lg \phi_i - 1.52/P_v \quad (1-6)$$

2. 散料层颗粒特性——平均当量直径和平均形状系数

实际散料层是由粒度大小不一形状不同的粒料组成的，当把它作为一种混合料来研究时，需要知道它的平均当量直径和形状系数。

(1) 平均当量直径 (平均粒度)

随着散料颗粒形状和大小的不同，表示方法也各异，对球形料而言其大小以直径表示，而对非球形料则用当量直径或定径粒径表示，后者多用于粉料，它是用显微镜测出颗粒平面投影的任意两根平行线间的垂直距离来确定的。对高炉料而言，则多用当量直径，即与颗粒某种物理性质相同的直径来表示，如将沉降速度相同的颗粒看成是直径相同的球体，这个球体的直径就是当量 (有效) 直径。具体计算时，将体积与非球形颗粒体积相等的球体直径视为非球形颗粒的当量直径 (d_p)，设颗粒体积为 V ，则

$$d_p = (6V/\pi)^{1/3} \quad (1-7)$$

如果用 A 表示颗粒的表面积，则颗粒的比表面积 S 为：

$$S = A/V = \pi d_p^2 / \frac{\pi}{6} d_p^3 = 6/d_p \quad (1-8)$$

$$\text{因此} \quad d_p = 6/S \quad (1-9)$$

由于求颗粒群粒径平均值的方法很多，所以求颗粒层平均当量直径的方法也很多，澳大利亚的斯坦迪什 (Standish)^[2]总结出计算高炉散料平均当量直径的通式为：

$$(\bar{d}_p)_{m,n} = \left[\frac{\sum N_i (d_p)_i^m}{\sum N_i (d_p)_i^n} \right]^{\frac{1}{m-n}} \quad (1-10)$$

式中 N_i ——混合料中 i 粒级的体积 (重量) 百分数；

$(d_p)_i$ ——混合物中*i*粒级的当量直径；

m, n ——常数，取决于采用平均值的计算方法。

如 $m=1, n=0$ ，代入式 (1-10)，则求得的是算术平均值：

$$(\bar{d}_p)_{1,0} = \frac{\sum N_i (d_p)_i}{\sum N_i} = \sum N_i (d_p)_i \quad (1-11)$$

当 $m=3, n=2$ 代入式 (1-10)，求得的是比表面积平均粒径：

$$(\bar{d}_p)_{3,2} = \frac{\sum N_i (d_p)_i^3}{\sum N_i (d_p)_i^2} \quad (1-12)$$

当 $m=-1, n=0$ ，代入式 (1-10)，求得的是调和平均直径：

$$(\bar{d}_p)_{-1,0} = \frac{\sum N_i}{\sum \frac{N_i}{d_{pi}}} = \frac{1}{\sum \frac{N_i}{(d_p)_i}} \quad (1-13)$$

上述三种平均粒径以调和平均粒径最小，算术平均粒径最大，高炉炉料的平均粒径多用调和平均粒径。

此外，还有加权平均粒径，即：

$$\bar{d}_p = d_{p1} X_1 + d_{p2} X_2 + \cdots + d_{pi} X_i \quad (1-14)$$

式中 $X_1 X_2 \cdots X_i$ ——为各粒级的质量百分数。

加权平均粒径不但反映了颗粒大小，也反映了各种粒级的质量分数，当粒度分布范围较大时多采用加权平均值，如流态化技术或粒料气力输送工程中采用较多。

当需要计算高炉内某单元炉料沿高炉高度上的当量直径时，也可采用下述公式^[3]：

$$\bar{d}_p = \Delta(1 - \bar{\varepsilon}) / (c + D\gamma) \bar{\varepsilon} \quad (1-15)$$

式中 Δ ——单元内矿石层高度 Δ_1 和焦炭层高度 Δ_2 之和；

$\bar{\varepsilon}$ ——单元内的平均空隙度；

$$c \equiv \Delta_1(1 - \varepsilon_1) / (d_{p1} \varepsilon_1) + \Delta_2(1 - \varepsilon_2) / (d_{p2} \varepsilon_2)；$$

$$D \equiv [(1 - \varepsilon_2) / (d_{p2} \varepsilon_2) - (1 - \varepsilon_1) / (d_{p1} \varepsilon_1)] \Pi, \quad \Pi = \operatorname{tg} \beta_2 - \operatorname{tg} \beta_1。$$

β_1, β_2 分别为矿石和焦炭的堆角，脚标1、2分别表示料层

中矿石和焦炭。

(2) 平均形状系数 $\overline{\phi}$

相同质量的颗粒在流体中运动时，其所受阻力随形状不同而异，对由不同形状组成的散料层，常以颗粒形状与它同体积的球形颗粒的偏差程度（球形度）来描述，称形状系数 ϕ ：

$$\phi = \frac{\text{与颗粒体积相等的球体表面积}}{\text{颗粒表面积}} \quad (1-16)$$

显然，对于球形颗粒 $\phi=1$ ，对于一个边长为 $l \times l \times 2l$ 的长方体，它的形状系数可求得如下：

长方体体积 $= 2l^3$ ，表面积 $= 10l^2$ ，与该体积相等的球形体积应是 $\pi/6(d_p)^3$ ，由二者相等可得 $l = [\pi/12(d_p)^3]^{1/3}$ ，故：

$$\phi = \pi(d_p)^2 / 10[(\pi/12)^{1/3}d_p]^2 = 0.768$$

常见的几种散料的形状系数见表1-1^[4]。

表 1-1 几种散料的形状系数

物 料 名 称	形 状 系 数 ϕ
砂（平均）	0.75
型砂（精选）	0.65
型砂（片状）	0.43
砂粒（有棱角）	0.70~0.75
砂粒（球形）	0.83
焦炭	0.55~0.70
细煤粉	0.76

多种粒料组成的混合散料的平均形状系数($\overline{\phi}$)，可用类似求平均粒径的方法来求得，即：

$$\overline{\phi} = \sum N_i \phi_i \quad (1-17)$$

或
$$\overline{\phi} = 1 / \sum \frac{N_i}{\phi_i} \quad (1-18)$$

式中 ϕ_i —— i 粒级料的形状系数；

N_i ——混合料中 i 粒级的体积（重量）百分数。

3. 散料层的空隙度 (ε)

散料层的空隙度是散料层的一个重要特性，它对气体流动有较大影响。通常用散料层中颗粒间的空隙所占体积与整个散料层体积之比来表示：

$$\begin{aligned}\varepsilon &= V_{\text{空隙}}/V_{\text{料层}} = (V_{\text{料层}} - V_{\text{料}})/V_{\text{料层}} = 1 - V_{\text{料}}/V_{\text{料层}} \\ &= 1 - \gamma_{\text{堆}}/\gamma_{\text{假}}\end{aligned}\quad (1-19)$$

式中 $\gamma_{\text{堆}}$ ——散料层堆密度；

$\gamma_{\text{假}}$ ——散料层假密度。

由上式可见，空隙度大小随 $\gamma_{\text{堆}}$ 和 $\gamma_{\text{假}}$ 不同而异，而 $\gamma_{\text{假}}$ 又与散料排列和填充方式有关，如直径相同的圆球，其排列方式最基本的就有正方及单斜方排列，图1-3〔5〕中 a 为正方系中立方体和六方系中正斜方形的排列方式，由图1-3看出，每个球均位于立方体顶点，与其他6个球相接触，这时空隙度最大 $\varepsilon = 0.476$ ，而 b 是单斜方排列，呈菱面体堆积，每个球位于四面体顶点与其余12个球相接，因而空隙度最小，这时 $\varepsilon = 0.258$ 。由不同粒径的多种原料组成的散料，其空隙度要小于单一粒径时的空隙度，如对由两种不同配比球形料组成的混合料空隙度 (ε_m) 测定表明〔6〕(图1-4)，在大颗粒料中不断加入小颗粒料，则 ε_m 不断降低，直到小球体积占到33.3%时， ε_m 达到最小值（非球形料时小料体积占33~45%时 ε_m 最小），当小球百分比再继续增加时，混合料空隙度 (ε_m) 反而增加，图1-4的纵坐标为相对空隙度 ($\varepsilon_m/\varepsilon_0$) (ε_0 为100%大颗粒时的空隙度)。图1-4中曲线表明：相对空隙度还与两种颗粒直径比 R 有关， $R = (d_p)_L/(d_p)_S$ 称粒径比，在相同混合比下，相对空隙度 $\varepsilon_m/\varepsilon_0$ 随 R 值增大而降低。图1-5是三种球形混合料的等空隙度图，三角形三边分别是7、14、28mm球形料的体积百分含量，由图可见，当70%的28mm的球形料与30%的7mm球形料混合时， $\varepsilon_m = 0.258$ 为最小空隙度值；当7mm球形料固定在30%时，随着14mm和28mm粒料的增加， ε_m 增大。图1-6〔6〕是高炉用烧结矿和天然矿或球团矿组成的两种粒度混合料的混合空隙度与小粒度含量之间的关系曲线，横坐标表示大颗粒体积 V_L 与混合料总

体积 V_{coi} 之比 V_1/V_{coi} 和小颗粒体积 V_s 和混合料总体积 V_{coi} 之比 V_s/V_{coi} ；纵坐标为混合料空隙度 ε_m ，该图上各曲线变化规律表明，混合料空隙度 ε_m 的最小值均处在小粒度含量为30%左右，如对烧结矿而言，当 R 由2.309增加到7.518时，对应的 ε_m 最小值由0.38降低到0.36，对球团矿而言，当 R 由2.028增加到5.46时， ε_m 最小值由0.33降低到0.25。

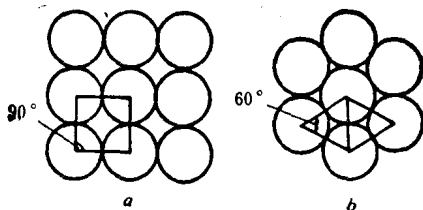


图 1-3 球的正方排列层 (a) 及单斜方排列层 (b)

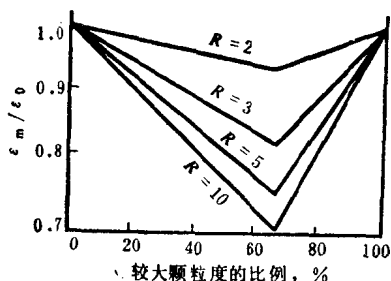


图 1-4 不同 R 值时二元球形粒料混合空隙度变化

下面介绍两种求高炉内实际混合料层空隙度的方法：

1) 当高炉内炉料呈V型料面成层分布时（图1-7）^[7]，沿半径方向 $r \rightarrow r + dr$ 范围内，由矿石层和焦炭层组成的每一个单元体内的平均空隙度 $\bar{\varepsilon}$ 可由下式求得：

$$\bar{\varepsilon} = A + Br \quad (1-20)$$

式中 $A \equiv (\Delta_1 \varepsilon_1 + \Delta_2 \varepsilon_2) / \Delta_3$ ，

$B \equiv (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \pi / \Delta_3$ ，

$\Delta \equiv \Delta_1 + \Delta_2$ ，

Δ_1 ——矿石层厚， $\Delta_1 = V_1 / (RW) + R\pi/2$ ，

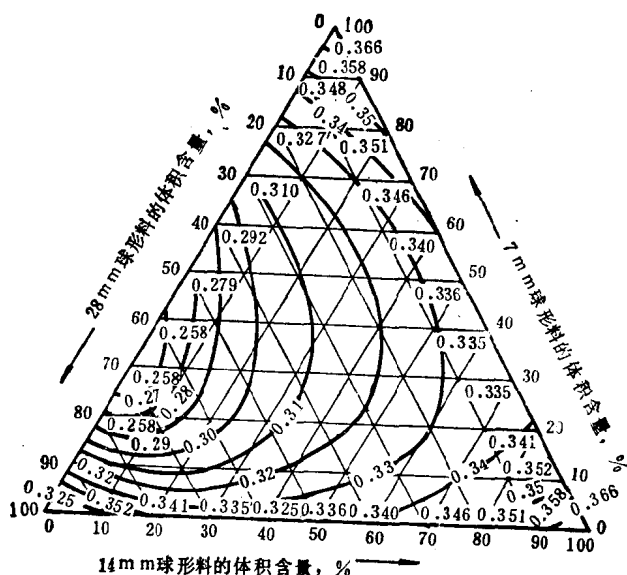


图 1-5 三种粒度的球形混合物空隙度

Δ_2 ——焦炭层厚, $\Delta_2 = V_2 / (RW) - R\Pi/2$;

R ——料层径向宽度;

W ——料层高度;

V ——料层体积, 脚标 1, 2 分别表示料层中的矿石和焦炭。

2) 利用实测煤气在炉内停留时间的平均值来计算高炉内实际料柱中的空隙度:

煤气在炉内停留时间 t 与空隙度 $\bar{\varepsilon}$ 有以下关系式:

$$t = \bar{\varepsilon} V_f / Q_g \quad (1-21)$$

式中 V_f ——高炉风口平面以上的炉料体积, m^3 ;

Q_g ——高炉内煤气的体积流量, m^3/s 。

由上式可得: $\bar{\varepsilon} = t Q_g / V_f \quad (1-22)$

测得煤气在炉内停留的时间 t 就可求出空隙度 $\bar{\varepsilon}$, 这可采用氩或氦 85 等示踪原子的示踪技术来实现, 如 1964 年普拉斯蒂因 (Pla-