

# 球磨机钢球尺寸的理论计算研究\*

段 希 祥

(昆明工学院选矿教研室)

## 摘 要

本文从破碎过程的力学实质出发,用破碎力学原理推导出计算钢球尺寸的理论公式,并参照试验研究及生产实践资料确定经验参数,最后得到能准确计算球径的及反映我国国情的半理论公式。

**关键词:** 球磨机,钢球尺寸,破碎力学

在选矿、冶金、化工、建材及水泥等基础材料工业中,各种矿物原料的磨碎都离不开球磨机。而球磨机是一种耗能巨大而能量转换效率极低的设备<sup>1)</sup>。要用好球磨机及提高能量转换效率,重要的一环就是要准确地确定钢球尺寸。过大过小的钢球尺寸均使磨矿效率降低,并使磨机的产品特性变坏,给后面作业带来危害。因此,准确地确定球磨机的钢球尺寸一直是粉碎工程学科领域内的一个重要研究课题。

长期以来,国外若干学者提出了许多计算钢球直径的公式。理论推导往往由于影响球磨机工作的因素过多而难于得到准确而实用的公式。从实际资料确定又由于磨矿条件的千差万别而难于得到准确的范围值。目前国外现成的各种经验公式及半理论公式,但这些球径公式在国内使用上不方便。本文试图根据破碎的力学原理而推导出钢球直径的计算公式。

## 一、影响钢球尺寸的主要因素分析

磨矿过程是一个影响因素错综复杂的动态过程,影响钢球尺寸的因素是多方面的:岩矿的力学性质,磨机的直径及转速,筒体衬板形状,钢球的密度及材质,矿浆的浓度及粘度等等。企图把各种影响因素均考虑在内的理论公式是极难找到的,而且数学上也难于求解很多变量的方程式。

从破碎过程的原理分析,破碎过程的力学实质是对矿块或矿粒施加破碎力以克服矿块或矿粒的内聚力而使其破坏。知影响破碎过程的因素一是破碎对象的因素,二是破碎动力的因素。

破碎对象的因素包括岩矿的机械强度及几何尺寸。矿块或矿粒的内聚力是由它们内部质

本文1988年1月6日收到,1989年3月10日收到修改稿。

\* 国家自然科学基金资助项目。

1) 李启衡,关于磨矿节能的几个问题,昆明工学院,1982,2—5。

点联结的方式及强度来决定的,宏观上常以矿块的硬度来表征矿块的强度,即表征矿块抗破坏的能力。我国常用普氏硬度系数  $f$  (M.M. Протоальяконов) 作为岩矿坚固性的分类系数,而  $f$  与岩矿的抗压强度  $\sigma_{\text{压}}$  之间的关系为  $\sigma_{\text{压}} = 100f$ 。只要有了岩矿的  $f$  值或  $\sigma_{\text{压}}$  值,再加上矿块直径  $d$ ,就可以定量确定破碎矿块所需的破碎力及破碎能。

破碎动力的因素又包括若干因素。破碎动力是由破碎介质——钢球来实施的。破碎力的大小由钢球在破碎发生之前具有的法向动能来决定,而这个法向动能与钢球的质量及速度有关,而速度则由磨机转速  $\phi$  及磨机直径  $D$  等因素确定。当钢球的材质一定时,密度  $\rho$  本是个定值。但由于矿浆浓度在各个磨机有差异,故矿浆密度  $\rho_n$  是个变值。钢球在磨机内运动,受矿浆浮力的影响,起作用的只是钢球的有效密度  $\rho_e = \rho - \rho_n$ , 故  $\rho_e$  也影响钢球动能。因此,影响法向动能的因素除目标函数钢球直径  $D_b$  外,还有  $\phi$ ,  $D$  及  $\rho_e$ 。即法向动能  $E_n$  为各因素的函数:  $E_n = f(D_b, \rho_e, D, \phi)$ 。当钢球具有的法向动能  $E_n$  大于岩矿块破坏所需要的能量时,矿块即被破碎。从破碎需要的能量来选择钢球尺寸应该是合理的,也是科学的。

上述因素是一些重要因素,可以定量地进入公式加以考虑。而其它如衬板形状、矿浆粘度以及实际破碎条件因素等,则只能定性分析,难于定量进入公式推导。这些因素影响还是大的,可以在取经验修正系数时加以考虑。

## 二、破碎所需钢球尺寸的理论公式推导

和其他理论公式推导一样,钢球的理论公式推导不能不作一些允许的假定:(1)由于钢球作抛落运动的力学研究比较透彻,且 Davis 及 Левенсон 理论能提供系统的计算钢球运动的数学方法<sup>[1]</sup>,所以取抛落运动下的钢球来研究;(2)为了计算上的方便,取被破碎的矿块或矿粒为球形,即以直径  $d$  来表示矿块或矿粒的大小;(3)岩矿均具有一定脆性,在加载块的冲击作用下矿块的破坏为脆性破坏,即应变与应力成正比;(4)矿块或矿粒受压或冲击时呈单轴应力状态,即形成的破裂面与压力方向平行且过球心;(5)岩矿的力学性质均匀,可按强度极限及受力面积计算所需破坏力;(6)钢球破碎矿块时属动载荷特征,矿块抗动载荷的能力比抗静载荷的能力低。但抗压极限强度  $\sigma_{\text{压}}$  (静载荷)易测,而且现场一般有此资料,抗冲击极限强度  $\sigma_{\text{冲}}$  (动载荷)现场往往无此资料,根据大量实践测定资料, $\sigma_{\text{压}}$  一般为  $\sigma_{\text{冲}}$  的 10 倍左右,就假定  $\sigma_{\text{冲}} = \frac{\sigma_{\text{压}}}{10}$ ,即以抗压极限强度  $\sigma_{\text{压}}$  作计算依据,用  $\sigma_{\text{压}}$  即可转换得  $\sigma_{\text{冲}}$ 。另外,和其他传统的磨矿理论一样,从球荷中取出一个钢球作为代表进行研究,同时,由于钢球下落中速度均相同,可以不考虑钢球之间的相互作用。上述假设是否合理,可用实践检验推导出的理论及半理论公式是否符合实际而得到证明。

### 1. 矿块或矿粒抗破坏的能量 $E_{\text{破}}$

设  $\sigma_{\text{压}}$  为岩矿抗压极限强度 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ), 则破坏直径  $d$  (cm) 的矿块时, 矿块破裂面积

$$S = \frac{1}{4} \pi d^2,$$

矿块能承受的冲击破坏力  $F_{\text{冲}} = S \cdot \frac{\sigma_{\text{压}}}{10} = \frac{1}{40} \pi \sigma_{\text{压}} d^2$ 。破坏此尺寸为  $d$  的矿块,所需要的破碎功应等于或大于矿块的抗破坏能量,而抗破坏能量  $E_{\text{破}}$  为

$$E_{\text{击}} = F_{\text{击}} \cdot d = \frac{1}{40} \pi \sigma_{\text{压}} d^3. \tag{1}$$

**2. 钢球落到衬板上的法向冲击动能  $E_n$**

选取直径为  $D_b(\text{cm})$ 、体积为  $V(\text{cm}^3)$  的一个钢球来研究。若钢球的有效重量为  $G_e$ ，则钢球的有效质量  $m_e$  为(设  $g$  为重力加速度)

$$m_e = \frac{G_e}{g} = \frac{1}{g} V \cdot \rho_e = \frac{\pi D_b^3 \rho_e}{6g}. \tag{2}$$

当钢球作抛落运动时(见图 1)，钢球落到衬板上的法向速度  $v_n$  为<sup>[1]</sup>

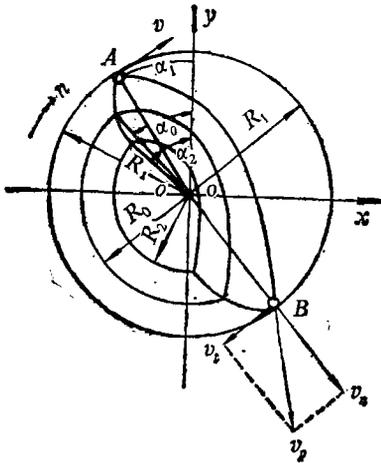


图 1 钢球作抛落运动及末端的速度分解

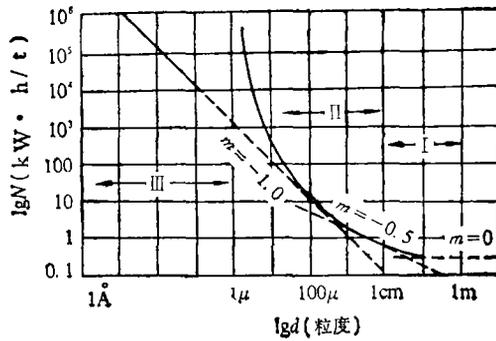


图 2 破碎产物粒度与比功耗的关系

(I——普通磨矿范围, II——普通碎矿范围, III——磨矿极限范围)

$$v_n = 8v \sin^3 \alpha \cos \alpha, \tag{3}$$

又

$$v = \sqrt{R_1 g \cos \alpha}, \tag{4}$$

式中的  $R_1$  为磨机的内半径。于是得

$$v_n = 8\sqrt{R_1 g \cos \alpha} \cdot \sin^3 \alpha \cos \alpha.$$

钢球的法向速度  $v_n$  用于冲击矿石, 切向速度  $v_t$  沿筒壁切线方向对矿块产生磨剥作用, 本研究中主要考虑冲击作用, 故未考虑  $v_t$ 。于是, 钢球落到衬板上时它所具有的法向冲击动能  $E'_n$  为

$$\begin{aligned} E'_n &= \frac{1}{2} m_e v_n^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi D_b^3 \rho_e}{6g} \cdot 64 R_1 g \sin^6 \alpha \cos^3 \alpha \\ &= \frac{32}{6} \pi D_b^3 \rho_e R_1 \sin^6 \alpha \cos^3 \alpha, \end{aligned}$$

又  $D = 2R_1$ , 故  $E'_n = \frac{16}{6} \pi D_b^3 \rho_e D \sin^6 \alpha \cos^3 \alpha. \tag{5}$

前面是取最外层球(即  $D$  为磨机直径)来研究的。但最外层球工作有利并不意味整个球荷工作有利。现假设全部球荷质量集中在某一层球上, 这层球称“中间缩聚层”, 此层球的直径设为  $D_0$ , 根据扇形对  $o$  点的极转动惯量半径的求法可得

$$R_0 = \sqrt{\frac{R_1^2 + R_2^2}{2}} = \sqrt{\frac{R_1^2 + (kR_1)^2}{2}}, \quad (6)$$

式中,  $R_1$  及  $R_2$  分别为最外层及最内层球的球层半径。  $k = \frac{R_2}{R_1}$ ,  $k$  与转速率  $\phi$  及装球率  $\varphi$  有关,  $k$  直接由表 1 中查取<sup>[3]</sup>。

又  $D_0 = 2R_0$ , 则“中间缩聚层”上的一个球落到衬板上的法向冲击动能  $E_a$  为

$$E_a = \frac{16}{6} \pi D_b^3 \rho_c D_0 \sin^6 \alpha \cos^3 \alpha. \quad (7)$$

表 1 各种装球率  $\varphi$  及转速率  $\phi$  值时参数  $k$  之值

$\phi(\%) \backslash \varphi(\%)$	65	70	75	80	85	90	95	100
30	0.527	0.635	0.700	0.746	0.777	0.802	0.819	0.831
35	—	0.511	0.618	0.683	0.726	0.759	0.781	0.797
40	—	0.237	0.508	0.606	0.669	0.711	0.740	0.760
45	—	—	0.288	0.506	0.600	0.656	0.694	0.721
50	—	—	—	0.332	0.508	0.592	0.644	0.676

### 3. 由所需破碎能量计算钢球直径

公式(1)是粒度为  $d$  的矿块抵抗破坏的能量, 公式(7)则是直径为  $D_b$  的钢球打击矿石时所具有的动能。当球的打击能大于矿块的抵抗能时, 即  $E_a \geq E_{抗}$  时发生破碎, 也即是

$$\frac{16}{6} \pi D_b^3 \rho_c D_0 \sin^6 \alpha \cos^3 \alpha \geq \frac{1}{40} \pi \sigma_{压} d^3,$$

整理得

$$D_b^3 \geq \frac{6}{640} \cdot \frac{\sigma_{压}}{\rho_c D_0 \sin^6 \alpha \cdot \cos^3 \alpha} \cdot d^3,$$

于是,

$$D_b \geq \sqrt[3]{\frac{6}{640} \cdot \frac{\sigma_{压}}{\rho_c D_0 \sin^6 \alpha \cos^3 \alpha} \cdot d^3},$$

$$D_b \geq \frac{1.817}{4 \sin^2 \alpha \cos \alpha} \sqrt[3]{\frac{\sigma_{压}}{10 \rho_c D_0}} \cdot d \text{ (cm)}. \quad (8)$$

又因  $\cos \alpha = \phi^2$ , 则  $\sin^2 \alpha = 1 - \cos^2 \alpha = 1 - \phi^4$ ,  $\sin^3 \alpha \cos \alpha = \phi^2 - \phi^6$ , 所以

$$D_b \geq \frac{0.4543}{\phi^2 - \phi^6} \cdot \sqrt[3]{\frac{\sigma_{压}}{10 \rho_c D_0}} \cdot d \text{ (cm)}. \quad (9)$$

公式(9)是对球作抛落运动导出的。球作泻落式运动时力学还无法计算。泻落式下球上升高度不高, 所需球径应加大。为使公式也适用于泻落运动并确保破碎发生, 公式(9)算出的球径应适当加大, 按加大 15% 考虑, 则公式(9)变为

$$D_b = \frac{0.5224}{\phi^2 - \phi^6} \cdot \sqrt[3]{\frac{\sigma_{压}}{10 \rho_c D_0}} \cdot d \text{ (cm)}. \quad (10)$$

公式(10)即为破碎所需的钢球直径的理论计算公式。公式(10)采用  $\text{cm} \cdot \text{g} \cdot \text{s}$  制量纲。这个理论公式是在破碎力学原理的基础上用系统而严密的 Davis 及 Левенсон 理论推导出来的,它反映了转速率  $\psi$ 、钢球有效密度  $\rho_c$ 、磨机直径  $D$  ( $D_0$  与  $D$  直接有关)、岩矿抗压极限强度  $\sigma_{\text{压}}$  及矿块尺寸  $d$  等与球径  $D_s$  的关系,是目前所见球径公式中考虑因素较多的一个。从公式看出,矿块  $\sigma_{\text{压}}$  大及粒度  $d$  大时需要大钢球,磨机直径小时需要大钢球,矿浆浓时对钢球缓冲作用大也需要大钢球,故公式反映了钢球破碎过程中的客观规律。转速率对钢球直径的影响较复杂,计算后才能看出,但当  $\psi = 100\%$  时,公式算出  $D_s \rightarrow \infty$ ,表示此时钢球直径无意义,因为此时球已离心化而无破碎作用存在。

#### 4. 钢球直径理论公式的经验修正

理论公式(10)只抓住几个主要因素进行推导,故还有一些因素未考虑。另外,为方便推导公式而假定岩矿的力学性质是均匀的,但实际上岩矿的力学性质极不均匀。而且这些影响因素对球径的影响是很大的,只是它们难于定量地进入理论公式。如不考虑这些因素的影响,公式(10)也将产生很大误差甚至使它无使用价值。事实上,这以前各国学者提出的各个球径公式中也均带有经验修正系数。不经过经验修正的纯理论公式是没有实用价值的,因为简单的数学式子不可能把磨矿过程的因素都包括进去。而且  $\sigma_{\text{压}}$  也是实测数据,固体力学理论还无法从理论上计算出  $\sigma_{\text{压}}$  值<sup>[2]</sup>。

从公式(10)没有包括的或假定不适当的因素中,拟进行如下三个方面的修正:

(1) 岩矿力学性质的不均匀修正 粗矿块内部宏观及微观裂纹多,故强度低。而当矿块变细后各种裂纹逐渐消失,强度逐渐增大。苏联学者曾做过实际测定<sup>[3]</sup>,测定资料见表 2。当矿石粒度小于 1mm 时尚未见过测定资料。但芬兰 Hukki 教授曾作过不同粒度下的磨碎功耗测定(见图 2),结果说明随着粒度变细功耗的增加不是直线的正比例关系,而是呈类似幂函数的曲线关系增长,表明细磨下功耗增加大得多。参照 Hukki 的研究及笔者进行的细磨研究,在表 2 中补充 1mm 以下的破坏力数值。

国外学者从 Bond 理论推出球磨机的给矿粒度为  $\frac{1}{2}$  英寸(即 12.7mm)时碎磨能耗最低<sup>1)</sup>。按欧美 80% 过筛粒度计的 12.7mm,相当于 95% 过筛粒度的 15mm<sup>[4]</sup>。由于公式推导是在理想情况下进行的,可以认为求出的球径是在能耗最低的情况下得到的。故以 15mm 为基准,小于 15mm 时强度增大,大于 15mm 时强度降低。若以系数  $k_1$  表示岩矿力学性质不均

表 2 各粒度下的岩矿力学不均匀系数  $k_1$  值

粒度 $d(\text{mm})$	50	40	30	25	20	15	12	10
破坏力 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	738.5	774.2	821.1	831.3	861.9	891.5	923.1	943.5
$k_1$	0.83	0.87	0.92	0.93	0.97	1.00	1.04	1.06
粒度 $d(\text{mm})$	5	3	2	1.2	1.0	0.6	0.3	0.15
破坏力 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	998.6	1085.3	1167.9	1310.7	1346.4	1417.8	1570.8	1785.0
$k_1$	1.12	1.22	1.31	1.47	1.51	1.59	1.76	2.00

1) 见 856 页脚注。

匀的修正系数, 则各个粒度下的  $k_1$  值也计算列入表 2。

(2) 磨矿过程有效控制修正 粗磨时磨矿过程好控制, 打击作用较有效, 能量浪费小, 细磨时磨矿过程不好控制, 打击作用效率低, 能量浪费大。仍以能量耗最低的 15mm 为基准, 并以  $k_2$  表示磨矿过程控制修正系数, 大于 15mm 者  $k_2 < 1$ , 小于 15mm 者  $k_2 > 1$ 。由于此方面无法提出定量修正依据, 就假设同一粒度下  $k_2$  值的影响与  $k_1$  等同。

(3) 粘度等因素的影响修正 粗磨时一定的粘度对磨矿是有利的, 细磨时粘度大会产生有害影响, 能量浪费大。如以  $k_3$  表示这方面的影响修正, 但这方面也难提出定量修正, 仍仿  $k_2$  的处理办法, 假定同一粒度下  $k_3$  的影响同  $k_1$ 。

于是, 设综合经验修正系数为  $k$ , 按前面假设得  $k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 = k_1^3$ , (11)  
 $k_2$  及  $k_3$  的假设是否合理, 以最终计算结果是否符合实际来进行检验。

这样, 理论公式(10)经过经验修正后成为

$$D_b = k \cdot \frac{0.5224}{\psi^2 - \psi^6} \cdot \sqrt[3]{\frac{\sigma_{\text{压}}}{10\rho_c D_0}} \cdot d \text{ (cm)}. \quad (12)$$

公式(12)即本文最终导出的钢球直径的半理论公式。公式中的  $k$  按表 3 选取:

$$\psi = \frac{n_{\text{实际}}}{n_{\text{临界}}} \times 100\%;$$

$\sigma_{\text{压}} = 100 \cdot f$ ,  $f$  为矿石普氏硬度系数;  $\rho_c = \rho - \rho_n$ ,  $\rho_n = \rho_i / [R_d + \rho_i(1 - R_d)]$ ,  $\rho_i$  为矿石密度,  $R_d$  为矿浆重量百分浓度;  $D_0 = 2R_0$ ,  $R_0$  由公式(6)及表 1 确定。这样, 在实际给定的磨机工作条件下就可按公式(12)计算所需要的钢球直径。

表 3 综合经验修正系数  $k$  值

粒度 $d$ (mm)	50	40	30	25	20	15	12	10
$k$	0.57	0.66	0.78	0.81	0.91	1.00	1.12	1.19
粒度 $d$ (mm)	5	3	2	1.2	1.0	0.6	0.3	0.15
$k$	1.41	1.82	2.25	3.18	3.44	4.02	5.46	8.00

### 三、球径理论公式验证与适用性讨论

公式(12)是从破碎力学原理直接推导, 并对某些条件作了一些假定及对实际磨矿条件作了一些必要的经验修正后得到的。现作一个实际计算来分析对比并进行验证。取我国磨机中规格尺寸较大而常见的直径 3.2m,  $\psi$  取 80%,  $\varphi$  取 45%,  $\rho$  取 7.8,  $\rho_i$  取 3,  $R_d$  取 75%, 我国金属矿石通常  $\sigma_{\text{压}}$  为 800—1600kg/cm<sup>2</sup>, 取平均值 1200kg/cm<sup>2</sup>。将上述数据按公式(12)计算各个粒度所需的钢球尺寸。我国磨机给矿粒度较粗, 有些小厂粗达 50mm 甚至更粗, 细磨的给矿粒度按 0.15mm 考虑。实际计算结果列入表 4。为了与国外公式的计算结果进行对比, 选取常见的 Bond 简便计算公式  $D_b = 25.4\sqrt{d}$ , Разумов 简便计算公式  $D_b = 28\sqrt[3]{d}$ , Davis 公式  $D_b = k\sqrt{d}$  以及 Олевский 公式  $D_b = 6(\lg d_k)\sqrt{d}$ , 分别按各个公式的意义及规定进行计算, 计算结果也列入表 4 以便和公式(12)的计算结果相比较。为了和我国的实际资料相对比, 在表 4 中再列入我国的实践资料, 它们多半是各选矿厂历年来的经验值。最后再加上试

表 4 按公式(12)及各常见公式计算各

磨机给矿粒度 $d$ (mm)	50	40	30	25	20	15	12
按 $D_b = 28^3 \sqrt{d}$ 计算球径 (mm)	103	96	87	82	76	69	64
按 $D_b = 6(1gd_k) \sqrt{d}$ 计算 (mm)	105	94	81	74	66	58	51
按 $D_b = 25.4 \sqrt{d}$ 计算球径 (mm)	150	134	116	106	95	82	74
按 $D_b = k \sqrt{d}$ 计算球径 (mm)	192	172	148	136	122	105	94
按公式(12)计算球径 (mm)	173	160	142	123	111	91	82
国内试验球径 (mm)				← 120—100 →		← 100—80 →	
国内生产中经验球径 (mm)	← 140—120 →			← 120—100 →			

验研究值, 3mm 以下给矿的球径为笔者的试验研究值<sup>[5]</sup>, 5mm 以上的给矿为最近几年一些厂矿降低球径的生产试验结果。

从表 4 中所列的各个球径计算公式计算结果与生产实际情况及试验研究资料对比后可以进一步认为

(1) 公式(12)意义清楚, 计算结果无论粗块或细粒给矿均与实际相符。而 Олевский 公式无论粗块及细粒级其计算结果均偏低太多; Davis 公式则是粗块及细粒的计算结果均偏大; Разумов 公式粗块下计算结果偏小太多, 细粒级下基本可用, 但也略为偏大; Bond 公式细粒级下计算结果较符合实际, 但粗块下计算结果偏小了。上述公式之所以有这样那样问题, 原因在于他们均是以一个不变的修正系数值用于粗细不同的粒级。实际磨矿中, 对矿石力学性质、粘度、打击效果等因素对粗细不同的粒级的影响是极不相同的。公式(12)注意了这一点, 不同粒级修正系数值不一样。

(2) 公式(12)适用范围广, 除粗块及细粒均能用外, 它对各种硬度的矿石均能用, 因它考虑了岩矿的抗压极限强度。按此公式计算, 非金属矿等一般石料的  $\sigma_{\text{K}}$  值多在 800kg/cm<sup>2</sup> 以下, 同一粒级下算出的球径比金属矿石低 15—20%。

(3) 公式(12)是从我国国情推导出来, 公式中需要的  $\sigma_{\text{K}}$  及  $f$  值各厂均有测定,  $d$  是用的 95% 过筛粒度, 而且考虑了磨机直径。我国磨机直径比国外小, 大多在 3.2m 以下, 最大的只 3.6m, 要保持钢球有较好的运动状态时自然转速率就高一些,  $\phi$  约 75—90%, 加上材质差, 故国内的球径应比国外大一些。国外磨机直径大, 多为 4—5m 或更大, 为了防止离心转速只能低一些,  $\phi$  约 60—75%, 而且用的是硬质合金钢球, 故球径比我国的小一些。公式(12)的计算结果能反映我国国情及反映与国外的差异。另外, 国内多数厂未具有功能指数测定数据, 使用 Allis Chalmers 公司球径公式  $\left[ D_b = \left( \frac{F}{k} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left( \frac{\delta \cdot W_i}{c_i \sqrt{D}} \right)^{\frac{1}{2}} \right]$  及 Lixed 公司球径公式

$$\left[ D_b = \sqrt{\frac{FW_i}{c_i k}} \cdot \sqrt{\frac{s}{\sqrt{D}}} \right]$$

均较困难, 因为这两个公式均有功能指数  $W_i$ 。

(4) 矿石细磨下功耗很大, 磨矿条件难于控制, 磨矿效率很低, 准确计算球径显得十分重要。公式(12)较为准确, 这是其他公式所不及的。

种给矿粒度下所需钢球尺寸值

10	5	3	2	1.2	1.0	0.6	0.3	0.15
60	48	40	35	30	28	24	19	15
47	33	21	17	13	12	9.3	6.6	4.6
67	46	37	30	22	20	16	11	7.6
86	59	45	37	29	26	20	14	10
72	43	33	27	23	21	15	10	7.3
← 80—50 →		35	30	28	25	15	10	8
← 90—80 →		← 70—60 →		← 50 →		← 40 →		

(5) 我国许多中小厂给矿粗达 40—50 mm, 而国外磨机给矿粒度一般较细。从表 4 中可见, 国外公式计算粗块的球径时一般偏低太多, 都不太适用。因此, 公式(12)对国内中小厂也适用。

(6) 由表 4 的计算结果看出, 公式(12)的计算结果与实践能较好地吻合。

### 参 考 文 献

- [1] 李启衡, 碎矿与磨矿, 冶金工业出版社, 北京, 1980, 131—150.
- [2] 徐小荷、余静, 岩石破碎学, 煤炭工业出版社, 北京, 1984, 2.
- [3] Ракитский, В. И., *Цвет. Мет.*, 1980, 7: 41—44.
- [4] 段希祥, 有色金属(选矿部分), 1985, 5: 24—29.
- [5] 段希祥, 云南冶金, 1986, 5: 16.