

半自磨机钢球大小的研究

许伟¹ 杨黎升² 唐新民³ 吴照银⁴

(1:安徽农业大学工学院 合肥 230036; 2:铜都铜业冬瓜山铜矿 安徽铜陵 244000;
3:铜陵有色公司铜山矿 安徽铜陵 244000; 4:安徽铜陵学院机械工程系 安徽铜陵 244000)

摘要 以某铜矿进口大型半自磨机为例,按冲击破碎的力度和几率分析,现用 $\Phi 130\text{mm}$ 钢球偏小,改用重量与最大粒度原矿块相等的 $\Phi 180\text{mm}$ 钢球。处理量增加 60% 以上,钢球消耗下降 40% 左右。提出钢球球径加大到原矿最大粒度即 $\Phi 240\text{mm}$ 钢球,钢球抛落几乎都冲砸在矿块上,其冲击破碎效果(破碎比、处理量能耗和物耗),都优于任何破碎机和磨球。

关键词 半自磨机 钢球 冲击破碎 处理量

中图分类号 TG580.61 TQ172.6

文献标识码 A

Research On the Half Autogenously Tumbling Mill Steel Ball Size

Xu Wei¹ Yang Lisheng² Tang Xinmin³ Wu Zhaoyin⁴

(1:Anhui Agricultural University; 2:Capital of Copper Industry Donggua Mountain Copper Mine;
3:Tongling Non-Ferrous Company Tongshan Mine; 4:Anhui Tongling Institute)

ABSTRACT This article take some copper mine import large-scale half autogenous tumbling mill as an example, according to the impact broken dynamics and the probability analysis, presently uses $\phi 130\text{mm}$ the steel ball to be small, changes to the weight and the greatest granularity undressed ore block equal $\phi 180\text{mm}$ steel ball. The live storage strength increases above 60%, the steel ball consumption drops about 40%. The steel ball diameter of a sphere to enlarge to the undressed ore greatest granularity namely $\phi 240\text{mm}$ steel ball, the steel ball throws falls nearly all flushes pounds on the ore block. It flushes defeats the smashing effect (reduction ratio, process load energy consumption and material consumption), all surpasses any breaker and other grinding machines.

KEYWORDS Half autogenous tumbling mill Steel ball Impact broken Process load

半自磨机替代常规粗、中、细三台破碎机。球矿比半自磨作业较球磨作业小得多,主要由钢球和矿石抛落把矿石冲击破碎。对钢球大小与处理量的关系和用多大钢球合适等问题进行探讨,以某铜矿选矿厂美国进口的 $\Phi 8.53\text{m} \times 3.96\text{m}$ 半自磨机为例,进行探讨。

1 试生产实际

北京某设计院选用这台 4850kW 电机拖动的

半自磨机,处理铜矿原矿粒度 $\leq 250\text{mm}$ 占 100%,而其中 $\geq 150\text{mm}$ 占 50% 左右。产品粒度 $< 12.7\text{mm}$ 占 100%,处理量 13000t/d。自 2004 年国庆试生产以来,一直未达产。初期装 $\Phi 125$ 、 $\Phi 100$ 、 $\Phi 75\text{mm}$ 钢球 100t,处理量只有 220t/h 左右。后来等量装 $\Phi 130$ 、 $\Phi 110$ 、 $\Phi 90$ 、 $\Phi 75\text{mm}$ 钢球共 120t,处理量 280t/h 左右。近期,出料格子板筛孔加大和钢球加大到 $\Phi 150\text{mm}$,处理量增加到 400t/h

① 作者简介:许伟,女,1959 年出生,1982 年毕业于安徽农业大学农机系(现安徽农业大学工学院),大学本科,讲师,现工作于安徽农业大学工学院

左右。

2 冲击破碎理论分析

2.1 冲击破碎能力理论计算公式

据疲劳积累理论,产生疲劳破碎的条件为:

$$\sigma^6 N = [C] \quad (1)$$

σ ——某矿块受到的循环应力,MPa。

N ——某矿块受到 σ 作用而破碎的次数。

$[C]$ ——矿石抗疲劳系数。与矿石性质、粒度有关,为某一常数,由实验测得。

按文献[1]和[2]所述,半自磨机冲击破碎能力计算公式为:

$$B = F^2 f_{\text{频}} \quad (2)$$

式中 B ——半自磨机的冲击破碎能力,定义为单位时间的冲击破碎工作量。

F ——钢球矿石抛落产生的冲击破碎力,kN。

$f_{\text{频}}$ ——钢球矿石抛落冲击破碎频率,次/s。

由(2)式推导出:

$$F = f_{\text{冲}} Q U_{\text{冲}} \quad (\text{kN}) \quad (3)$$

式中 $f_{\text{冲}}$ ——下落冲击力系数。

Q ——钢球矿石的单位时间抛落量,为半自磨机的冲击破碎几率,t/s。

$U_{\text{冲}}$ ——钢球矿石下落平均冲击速度,m/s。

由(2)、(3)推导出:

$$B = Q U_{\text{冲}}^2 (\text{m}^2 \text{ts}^{-3}) \quad (4)$$

$$B_{\text{th}} = B \div A (\text{m}^2 \text{hs}^{-3}) \quad (5)$$

式中 B_{th} ——冲击破碎能力消耗系数。它与邦德功指数一样,与矿石性质、粒度有关,为某一常数,由试验测得或由现状推算出来。

A ——单位时间处理量,t/h。

2.2 半自磨机矿石的冲击破碎能力较小

在工况和粒度相同的条件下,同体积的钢球和矿石下落,它们的 $f_{\text{冲}}$ 、 $U_{\text{冲}}$ 和体积 V 相同,其冲击破碎力与密度成正比: $F_{\text{矿}}:F_{\text{球}} = r_{\text{矿}}:r_{\text{钢}}$ 。其中 $r_{\text{矿}} = 3.1 \text{t/m}^3$, $r_{\text{钢}} = 7.7 \text{t/m}^3$ 。钢球矿石下落冲击破碎频率 $f_{\text{频}}$ 不变。将它们代入(2)式,同体积矿块的冲击破碎能力只有钢球的 $B_{\text{矿}}:B_{\text{球}} = (3.1 \div 7.7)^2 = 16.2\%$ 。按半自磨试验最小球矿比 $0.309:0.272 = 1.14$ 推算,装 120t 钢球,矿石量 105t,矿石体积为钢球 $(7.7 \div 3.1) \div 1.14 = 2.18$

倍。半自磨机中,矿石的冲击破碎能力也只有钢球的 $16.2\% \times 2.18 = 35.3\%$ 。则半自磨机冲击破碎能力钢球占 $1 \div (1 + 35.3\%) = 73.9\%$,且随球矿比增加而增大。因此,半自磨机生产能力大小,主要决定于钢球冲击破碎能力的大小。

2.3 钢球冲击破碎能力与球径立方成正比

在工况相同条件下,其下落冲击力系数 $f_{\text{冲}}$ 和下落冲击速度 $U_{\text{冲}}$ 是不变的,则钢球下落的冲击破碎力与球径立方成正比:

$$F_2:F_1 = d_2^3:d_1^3 = (d_2/d_1)^3 \quad (6)$$

在钢球量不变的条件下,磨机中钢球的总个数与球径立方成反比,相应钢球抛落的频率与球径立方成反比,即:

$$f_{\text{频}2}:f_{\text{频}1} = (d_2/d_1)^{-3} \quad (7)$$

把(6)、(7)代入(2)式得:

$$B_2:B_1 = (d_2/d_1)^3 \quad (8)$$

若将现用 $d_1 = 130\text{mm}$ 钢球加大到 $d_2 = 180\text{mm}$ 钢球。其钢球冲击破碎能力增加到 $B_2:B_1 = (180 \div 130)^3 = 2.65$ 倍,按上所述,钢球冲击破碎能力占半自磨机破碎能力的 73.9% ,和其他因素影响系数 0.85 计算,半自磨机处理量增加 66.5% ($2.65 \times 73.9\% \times 0.85 = 166.5\%$)。

2.4 矿块破碎次数

钢球落在某矿块上,其接触半径 a 基本不变,将 $\sigma = F/\pi a^2$ 代入(1)得: $F_2^6 N_2 = F_1^6 N_1$, $N_1 = N_2 (F_2^6 / F_1^6) = N_2 (d_2/d_1)^{3 \times 6} = N_2 (d_2/d_1)^{18}$ 。设 N_1, N_2, N_3 分别为 $130\text{mm}, 150\text{mm}, 170\text{mm}$ 钢球落在某矿块而冲击破碎了的次数。若 $\Phi 150\text{mm}$ 钢球下落在粒度 140mm 的矿块上, $N_2 = 1$ 次,这块矿石就被砸碎。若 $\Phi 130\text{mm}$ 钢球下落到这块矿石上,就要 $N_1 = 1 \times (150 \div 130)^{18} = 13$ 次,这块矿才被砸碎。若 $\Phi 170\text{mm}$ 钢球落到这块矿上,只要 $N_3 = 1 \times (150 \div 170)^{18} = 0.11$ 次就被砸碎了。剩余冲量继续冲击破碎其他矿块。若 $\Phi 170\text{mm}$ 钢球下落在粒度 200mm 的矿块上,只要 $N_3 = 1$ 次就将其破碎了。 $\Phi 150\text{mm}$ 钢球需要 $N_2 = 1 \times (170 \div 150)^{18} = 9.5$ 次, $\Phi 130\text{mm}$ 钢球需要 $N_1 = 1 \times (170 \div 130)^{18} = 125$ 次下落才能把这块粒度 200mm 的矿块破碎。

2.5 钢球球径等于矿块最大粒度为佳

钢球球径适当,磨机的处理量,应随入磨矿

石的粒度减小而增加。据上所述,钢球加大能大幅度增加半自磨机的冲击破碎能力,究竟应装多大钢球?目前,经常出现入磨原矿 $\geq 150\text{mm}$ 块矿较少,处理量反而少的现象。半自磨机入磨矿石的粒度 $\geq 150\text{mm}$ 占50%左右,矿石的平均粒度按 $\Phi 150\text{mm}$ 矿球计算,按3:2.5:2.5:2比例装入 $\Phi 130\text{mm}$ 、 $\Phi 110\text{mm}$ 、 $\Phi 90\text{mm}$ 、 $\Phi 75\text{mm}$ 钢球,钢球的平均球径按 $\Phi 110\text{mm}$ 计算,则矿石的平均体积为钢球 $(150 \div 110)^3 = 2.54$ 倍,矿石的冲击破碎能力为钢球 $35.3\% \times 2.54 = 89.5\%$ 。半自磨机的冲击破碎能力矿石占 $89.5\% \div (1 + 89.5\%) = 47.2\%$,接近钢球。出现入磨原矿粒度 $\geq 150\text{mm}$ 含量少,处理量减少的现象,说明钢球明显偏小。若把钢球加大到等于最大矿块的自重质量,原矿最大块度按 $\Phi 240\text{mm}$ 矿球计算,钢球球径应加大到 $d_2 = 240 \times (3.1 \div 7.7)^{1/3} = 177\text{mm}$ 以上,应按4:3:2:1比例,装 $\Phi 180\text{mm}$ 、 $\Phi 160\text{mm}$ 、 $\Phi 140\text{mm}$ 、 $\Phi 120\text{mm}$ 钢球,平时补加 $\Phi 180\text{mm}$ 钢球。钢球平均球径加大到 $\Phi 170\text{mm}$,矿石的平均体积只有钢球 $(150 \div 170)^3 = 69\%$,则矿石的冲击破碎能力只有钢球 $(35.3 \times 69)\% = 24.4\%$,则半自磨机冲击破碎能力钢球占 $1 \div (1 + 24.4\%) = 80.4\%$ 。

就不可能出现,入磨原矿粒度 $\geq 150\text{mm}$ 含量少而半自磨机处理量少的现象。钢球加大到 $\Phi 180\text{mm}$,半自磨机负荷基本不变,冲击破碎处理量可增加 $47.2\% + (1 - 47.2\%) \times (180 \div 130)^3 - 1 = 87\%$,处理量增加60%以上。若把钢球加大到 $\Phi 240\text{mm}$,处理量又可增加50%以上。将半自磨机真正变成以大钢球为冲击破碎锤的圆筒型冲击破碎机。

3 大钢球运行状况分析

3.1 钢球运动规律

文献[3]所述数据模型,按转速 $n = 11.6\text{r}/\text{min}$,动态充填率 $\eta_0 = 27\%$,筒体衬板平均厚度 117mm 对应内半径 $R_0 = 4.15\text{m}$,衬板谷底有效内半径 $R_a = 4.19\text{m}$,衬板凸包高 160mm 即衬板波峰的回转半径 $R_b = 4.03\text{m}$ 。查文献[4],选取动态安息角 $\theta = 25^\circ$ 及其他有关系数,计算各质点得钢球抛落的运动规律,得表1。

$A_0 \sim E_0$ 为理论动态充填表面的起抛点

$A_0' \sim B_0'$ 为凸包提升到动态安息角的起抛点

$A_{01} \sim B_{01} \sim B_{01}' \sim E_{01}$ 为开始作自由抛落的点,组成实际动态充填表面。

表1 钢球矿石抛落规律

$\alpha_0 \geq 0^\circ$ 时间 /s	起抛始点				起抛初期				抛到最高				下落到充填表面上								
	坐 标 /m	半 径 /m	起 抛 角/ $^\circ$	水平 速度 /m/s	垂直 速度 /m/s	时 间 /s	水平 速度 /m/s	坐 标 /m	水平 速度 /m/s	垂直 速度 /m/s	时 间 /s	坐 标 /m	时 间 /s	坐 标 /m	速 度 /m/s						
t_0	x_0	y_0	R	α_0	U_{0L}	U_{01L}	t_{01}	U'_{01L}	x_{01}	y_{01}	U_{01L}	U_{01L}	t_{02}	x_1	y_1	t_2	x_2	y_2	U_{2L}	U_2	
A	0	-3.78	1.77	4.19	25	2.15	4.61	0.14	2.55	-3.47	2.35	2.70	3.73	0.38	-2.44	3.06	0.996	0.254	-1.81	-9.77	10.14
B	0	-3.65	1.70	4.03	25	2.07	4.44	0.13	2.28	-3.37	2.21	2.48	3.36	0.37	-2.45	2.88	0.962	-0.06	-1.66	-9.44	9.76
B'	0	-4.02	0.257	4.03	3.66	0.312	4.88	0.32	0.64	-3.87	1.13	1.01	3.22	0.33	-3.54	1.66	0.64	-2.89	-0.34	-6.28	6.36
C	0	-3.86	0.108	3.89	1.60	0.0131	4.69	0.31	0.54	-3.76	0.89	0.81	3.11	0.32	-3.50	1.38	0.58	-3.03	-0.30	-5.71	5.77
D	0	-3.63	0	3.63	0	0	4.41	0.30	0.24	-3.60	0.51	0.43	2.92	0.30	-3.47	0.95	0.48	-3.26	-0.17	-4.70	4.72
E	0.02	-3.42	-0.09	3.43	0	0	4.17	0.30	0.23	-3.40	0.48	0.41	2.68	0.27	-3.29	0.85	0.47	-3.10	-0.25	-4.61	4.63
I	0.04	-3.26	-0.17	3.26	0	0	3.96	0.30	0.21	-3.23	0.44	0.37	2.47	0.25	-3.14	0.75	0.46	-2.97	-0.31	-4.54	4.56

按表1绘制各质点抛落的轨迹如图1。

图1说明,用 $\Phi 180\text{mm}$ 和 $\Phi 240\text{mm}$ 钢球在高 160mm 的凸包推送下,其下落点都在 B_2 与 A_2 之间,即在 y 坐标轴左右的动态充填表面上。若动态充填率增加到 $\eta_0 = 45\%$,同上计算各质点抛落规律,绘制出图2。

由图2所示,钢球下落点更远离筒体壁。当动态充填率 $\eta_0 \geq 27\%$,钢球不可能直接砸在筒体

衬板上。若钢球混合充填率太小,受凸包提升的钢球,就有可能直接砸在筒体衬板上。在现场有时听到钢球直接砸衬板的声音,就立即加大给矿量,从而增加了混合充填率,钢球砸衬板的响声也就消除了。

3.2 钢球大小与筒体衬板磨损无关

筒体衬板的磨损是钢球矿石(浆)对其作相对滑滚动,因摩擦而磨损的。磨损大小决定于接

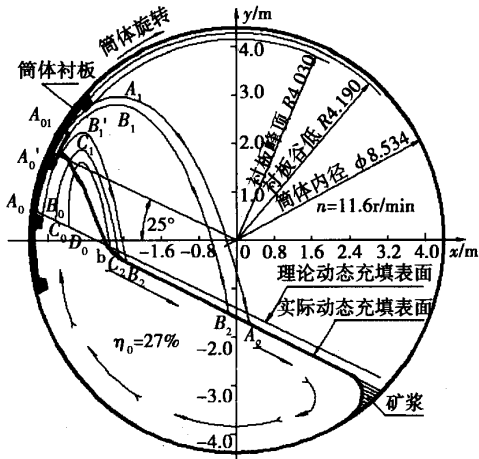


图1 η₀ = 27% 钢球矿石运动轨迹示意图

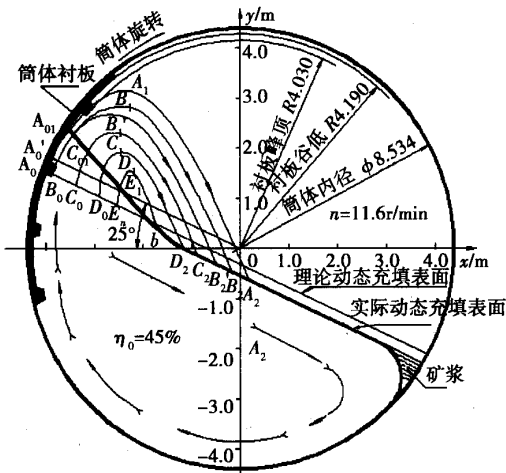


图2 η₀ = 45% 钢球矿石运动轨迹示意图

触面上总的正压力和相对速度。即与总的混合动态充填量及筒体衬板表面的速度有关。因此，在钢球量相同、混合密度不变的情况下，不论钢球大小，筒体衬板的磨损是不变的。

3.3 钢球加大单耗降低

(接80页)

4 结束语

改造后使用2年多以来，从未因密封阀的密封效果而影响高炉的装料，取得了相当可观的经济效益。



图5 Si橡胶密封圈截面图

装球量相同，钢球总的表面积与球径成反比。钢球磨损的几率与总的表面积成正比。因此单位时间钢球的消耗与球径成反比。若将φ130mm钢球加大到φ180mm钢球。钢球总的表面积比： $S_1 : S_2 = [N_1 (\pi d_1^2)] : [N_2 (\pi d_2^2)] = (d_1^2 : d_2^2) (N_1 : N_2) = (d_1 : d_2)^2 (d_1 : d_2)^{-3} = d_2 : d_1$ 。即 $S_2 = (130 \div 180) S_1$ 。则单位时间钢球消耗降低 $1 - (130 \div 180) = 27.8\%$ 。加上用φ180mm钢球处理量增加60%以上，同比钢球消耗下降 $27.8\% \times 1.6 = 44.4\%$ ，目前钢球单耗0.5kg/t，用φ180mm钢球单耗下降到 $0.5 \times (1 - 44.4\%) = 0.28\text{kg/t}$ 左右。

4 结束语

综上所述，半自磨机钢球由φ130mm加大为φ180mm，不仅能确保安全正常运转，增加处理量60%以上，是确保达产的重大举措，而且能降低钢球单耗40%左右。若钢球逐步加大到与矿块最大粒度相同的球径φ240mm，既能与最大矿块一样正常送入筒体，又能在负荷不变的情况下，再增加处理量50%以上。比用φ130mm钢球处理量增加到1.4倍，其增产、节能、降耗的经济效益更佳。

参考文献

- [1]唐新民.提高磨机处理能力和能源利用率的研究. 矿山机械,2003(1):16~19
- [2]李国保,唐新民.球磨机钢球大小的试验研究. 矿山机械,2005(4):12~14
- [3]唐新民,吴照银.球磨机筒体衬板形状的理论探讨. 矿山机械,2005(1):20~22
- [4]徐灏.《机械设计手册》第一、二卷,北京:机械工业出版社,2000

(收稿日期:2006-11-25)

参考文献

- [1]严允进主编.《炼铁机械》.北京:冶金工业出版社,2002
- [2]徐善国主编.《机械工程材料》.大连:大连理工大学出版社,1988

(收稿日期:2006-11-11)

半自磨机钢球大小的研究

作者: [许伟](#), [杨黎升](#), [唐新民](#), [吴照银](#), [Xu Wei](#), [Yang Lisheng](#), [Tang Xinmin](#), [Wu Zhaoyin](#)

作者单位: [许伟, Xu Wei \(安徽农业大学工学院, 合肥, 230036\)](#), [杨黎升, Yang Lisheng \(铜都铜业冬瓜山铜矿, 安徽铜陵, 244000\)](#), [唐新民, Tang Xinmin \(铜陵有色公司铜山矿, 安徽铜陵, 244000\)](#), [吴照银, Wu Zhaoyin \(安徽铜陵学院机械工程系, 安徽铜陵, 244000\)](#)

刊名: [冶金设备](#)

英文刊名: [METALLURGICAL EQUIPMENT](#)

年, 卷(期): 2007 (2)

被引用次数: 2次

参考文献(4条)

1. [徐灏](#) [机械设计手册](#) 2000
2. [唐新民](#); [吴照银](#) [球磨机筒体衬板形状的理论探讨](#)[期刊论文]-[矿山机械](#) 2005(01)
3. [李国保](#); [唐新民](#) [球磨机钢球大小的试验研究](#)[期刊论文]-[矿山机械](#) 2005(04)
4. [唐新民](#) [提高磨机处理能力和能源利用率的研究](#)[期刊论文]-[矿山机械](#) 2003(01)

引证文献(2条)

1. [唐新民](#), [古建宏](#), [廖安生](#) [破粉碎生产流程设备现状与节能途径](#)[期刊论文]-[中国非金属矿工业导刊](#) 2009(3)
2. [吴照银](#), [许伟](#), [唐新民](#) [半自磨机最佳充填率的探讨](#)[期刊论文]-[冶金设备](#) 2007(5)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_yjsb200702005.aspx