

武山铜矿磨矿介质与矿石力学性质匹配性研究

王肖江¹, 肖庆飞¹, 沈传刚¹, 康怀斌¹, 李博², 阮华东³

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;

2. 云南金诚信力合矿山工程设计院有限公司, 云南 昆明 650217;

3. 江西铜业股份有限公司武山铜矿, 江西 瑞昌 332204)

摘要:本文介绍了一种通过研究武山铜矿矿石力学性质确定匹配的磨机球径与球比,有效优化磨矿产品粒度特性的方法。在武山铜矿矿石普氏硬度系数均值为7.8,泊松比均值为0.224的条件下,进行推荐方案 $\Phi 100 : \Phi 70 : \Phi 50 : \Phi 30 = 15 : 25 : 30 : 30$ 和现场介质配比方案 $\Phi 100 : \Phi 80 : \Phi 60 : \Phi 40 = 30 : 40 : 20 : 10$ 的对比磨矿试验。试验结果表明,推荐方案粗级别(+0.20 mm)产率比现厂方案降低5.76%,磨矿细度(-0.074 mm)、易选级别(0.15~0.019 mm)和可选级别产率(0.20~0.010 mm)产率分别提高了11.17、7.63、3.52个百分点,达到了优化磨矿产品粒度特性的效果。

关键词:磨矿介质;力学性质;匹配性;粒度特性

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2016.04.013

中图分类号:TD952 文献标志码:A 文章编号:1000-6532(2016)04-0056-05

球磨机作为最普遍、最通用的粉磨设备,已广泛应用于冶金、化工、水泥、陶瓷、建筑、火电、医药以及国防工业等部门。球磨机处理的对象为破碎作业的产品,因此,矿石的力学性质对球磨机磨矿有很大影响。磨矿过程主要是靠磨机内的钢球来完成的,钢球作为磨矿作用的实施体,它决定着矿石的破碎行为的发生,也影响着磨矿产品质量的好坏。随着对矿产资源需求量的持续扩大,各矿产开采深度进一步延伸,矿石性质逐渐发生了变化,沿用以前的磨矿介质配比方案已不能适应矿石性质的变化,出现磨矿介质与矿石力学性质不匹配的问题,成为选厂指标提高的瓶颈。

矿石力学性质包括硬度、韧性、解理等均影响矿石的破碎行为,离开了矿石性质就难以解释清楚破碎过程的各种力学现象^[1-3]。矿石的磨碎行为能否发生取决于磨矿介质对其作用力的大小,磨矿介质作用力的大小又与介质尺寸有关。目前,国内外对适宜的磨矿介质尺寸的研究非常重视,并提出了很多确定最佳磨矿介质尺寸的方法^[4]。但是上述计

算方法在考虑矿石力学性质因素时只将矿石分为软、硬两类,相应的参数值只有两个值,因此计算得出的介质尺寸与矿石力学性质的匹配性较差。

武山铜矿球磨作业初装球为 $\Phi 100 : \Phi 80 : \Phi 60 : \Phi 40 = 30 : 40 : 20 : 10$,由于钢球尺寸过大,磨机内钢球个数较少,在处理中等偏硬韧性矿石时,出现+0.20 mm粗粒级含量与-0.010 mm过粉碎细粒级产率偏高,0.20~0.010 mm中间可选粒级产率偏低的情况。本文采用球径半理论公式与破碎统计力学原理,精确计算磨矿介质尺寸与配比,实现磨矿介质尺寸及配比与矿石力学性质的较好匹配,从而优化磨矿产品粒度特性。

1 矿石性质

武山铜矿由南北两大矿体组成,南北矿石性质差异较大。南矿带主要以含铜矽卡岩、含铜大理岩为主,北矿带主要以含铜黄铁矿、含铜高岭土、含铜破碎带为主要矿体。

由表1可知,原矿中硫化矿物总量约占

收稿日期:2015-12-18;改回日期:2016-01-22

基金项目:云南省科技计划项目基金(2013FZ022)

作者简介:王肖江(1990-),男,硕士研究生,主要研究方向为碎磨理论与工艺。

通讯作者:肖庆飞(1980-),男,副教授,博士,主要研究方向为碎磨理论与工艺。Email: 420029835@qq.com

33.94%,其中黄铁矿、白铁矿等硫化矿物占31.17%以上,矿物硬度变化较大,磨矿过程中应保

证磨矿介质与矿石硬度系数相匹配,以获得较好的磨矿效果。

表1 原矿中矿物组成

Table 1 The mineral components of the ore

矿物名称	含量/%	硬度	矿物名称	含量/%	硬度	矿物名称	含量/%	硬度
黄铜矿	2.08	3.4~4	闪锌矿	0.21	3.5~4	石榴子石	19.95	6.5~7.5
黄铁矿、白铁矿	31.17	6~6.5	方铅矿	0.02	2.5~2.75	石英	16.53	7
黝铜矿	0.39	3~4.5	磁铁矿	0.60	5.5~6.5	方解石	12.20	3
斑铜矿	0.07	3.0	赤铁矿、褐铁矿	1.00	1.0~6.5	白云石	7.95	3.5~4
绿泥石	6.34	2~2.5	透辉石	0.51	5.5~6	长石	0.33	6~6.5

表2 磨机给矿粒度组成

Table 2 The size distribution of mill feeding

粒度/mm	+5.0	-5.0	-1.5	-0.45	-0.30	-0.20	-0.15	-0.10	-0.074	-0.038	-0.020	-0.010
产率/%	6.62	2.94	9.98	15.40	15.93	16.73	11.59	5.45	9.28	2.00	1.04	3.04
		+1.5	+0.45	+0.30	+0.20	+0.15	+0.10	+0.074	+0.038	+0.020	+0.010	

黄铜矿是矿石作为最主要的铜矿物,分布很不均匀,一般为0.02~0.30 mm,粗粒黄铜矿的粒度可达1.5 mm,被包裹在闪锌矿中的微粒黄铜矿的粒度通常不到0.005 mm。黄铁矿是矿石中最主要的硫化矿物,其次为白铁矿,主要呈半自形~自形晶粒状及其集合体产出,少量呈脉状及胶状形式产出,另有

少量黄铁矿、白铁矿呈微细粒分布在脉石中,这部分黄铁矿、白铁矿较难完全单体解离。由表2可知,磨机给矿-1.5+0.10 mm 粒级物料占总量的69.63%,并且有用矿物大部分集中在这一粒级,因此在磨矿作业中,应保证-1.5+0.10 mm 粒级有效磨碎,尽快转变为合格粒级。

表3 原矿力学性质

Table 3 The ore mechanical properties

项目	抗压强度 /MPa	普氏硬度 系数	割线弹性模量 E_{50} 10^4 /MPa	E_{50} 平均值	割线泊松比 U_{50}	U_{50} 平均值
南矿带	RZNK-2	92.24	15.47		0.241	
	RZNK-3	101.11	9.8	8.62	11.06	0.279
	RZNK-4	101.88		9.09		0.330
北矿带	RZNK-1	73.03	10.99		0.161	
	RZNK-2	48.31	5.7	6.26	8.17	0.204
	RZNK-4	49.73		7.27		0.135

由表3可知,武山铜矿南矿带矿石普氏硬度系数均值为9.8,矿石较硬,北矿带矿石普氏硬度系数均值为5.7,中等偏软;整体矿石平均硬度为7.8,说明矿石属于中等偏硬矿石。矿石泊松比最大值高达0.330,韧性较大;最小值为0.135,脆性较大;泊松比平均值为0.242,矿石总体表现为韧性。

2 磨矿介质与矿石力学性质匹配性研究

在球磨机磨矿中,磨矿介质对矿石的施力方式主要为冲击与磨削,当矿石不仅硬度高、韧性大,还掺有杂脆性的矿石时,磨矿过程应充分考虑磨矿介质与矿石力学性质的匹配性关系,进行针对性磨矿。

2.1 磨矿介质尺寸匹配性

根据矿石力学性质可用以下公式计算钢球直径^[5-7]:

$$D_b = \left[\sum_{i=1}^n \frac{\gamma_i (f_i + S_i E_i + B_i u_i)}{f_a + E_a + u_a} \right] K_c \frac{0.5224}{\psi^2 - \psi^6} \sqrt[3]{\frac{\sigma_{\text{压}}}{10\rho_c D_0}} \quad (1)$$

式中: D_b —特定磨矿条件下给矿粒度 d 所需的精确球径 (cm); n —采矿点的个数; γ_i —对应采矿点的出矿比例 (%); f_i —对应采矿点的矿石普氏硬度系数; S_i —破碎函数; B_i —破裂函数; E_i —对应采矿点矿石割线弹性模量 (10^4 Mpa); u_i —对应采矿点矿石割线泊松比; f_a —整个采矿点矿石普氏硬度系数算术平均值; E_a —整个采矿点矿石割线弹性模量算

术平均值(10^4 MPa); u_a —整个采矿点矿石割线泊松比算术平均值; K_c —综合经验修正系数; ψ —磨机转速率(%); $\sigma_{\text{压}}$ —岩矿单轴抗压强度(kg/cm^2); ρ_c —钢球在矿浆中的有效密度(g/cm^3); D_0 —磨机内钢球“中间缩聚层”直径; d_f —磨机给矿95%过筛粒度(cm)。

按公式计算的各矿粒级别与最佳钢球直径关系见表4。

表4 矿粒级别与较佳钢球直径关系

Table 4 The relation between size fraction and optimum ball diameter

矿粒级别/mm	+5	-5+0.045	-0.45+0.30	-0.30+0.20
适宜球径/mm	100	70	50	30

由表4可知,针对武山铜矿矿石的力学性质与磨机参数,最佳钢球尺寸与磨机给矿窄级别物料有高度的匹配性关系。首先,磨机给矿中,软、硬矿石及韧性、脆性矿石互相夹杂,大尺寸钢球主要靠冲击作用破碎韧性偏硬矿石,小尺寸钢球主要靠磨削作用磨碎软而脆的矿石;其次,由破碎裂纹学说可知,破碎矿石所需的功,应当考虑变形能和表面能。当钢球尺寸偏大时,单个钢球的重量也大,自身冲击能量高,当钢球与脆性矿石发生破碎作用时,钢球冲击作用力远大于矿石的抗压极限强度,所以容易发生贯穿性粉碎,导致过粉碎粒级产率偏高^[8]。当钢球尺寸偏小时,钢球重量较小,自身冲击能量低,当钢球与韧性矿石发生碰撞时,其破坏类型属于疲劳破坏,会导致磨碎效率降低。由于选矿前的磨矿属于解离性磨矿,要求精确的破碎力,使矿物的解离沿弱的矿物相界面发生,从而提高矿物的单体解离度。因此,磨矿介质尺寸与矿石力学性质相匹配,是实现解离性磨矿的前提。

2.2 磨矿介质配比匹配性

钢球破碎的统计力学原理表明,对于粒度分布范围宽的矿粒群,使钢球的配比与矿粒的组成特性相匹配时会有最好的磨矿效果^[9-12]。将球磨给矿分为5个级别:+5 mm,5~0.45 mm,0.45~0.30 mm,0.30~0.20 mm。要求磨矿细度为65%,相当于磨矿粒度为0.20 mm,-0.20 mm为不需磨碎的级别,扣除-0.20 mm后可得待磨级别产率,确定各组所需球径。由此得出的球磨机介质推荐方案见表5。

表5 球磨机介质推荐方案

Table 5 The recommended scheme of ball mill medium

级别/mm	产率/%	各组适宜球径/mm	球比/%
+5	13.04	100	15
5~0.45	25.41	70	25
0.45~0.30	30.28	50	30
0.30~0.20	32.32	30	30

由表5可知,球磨机初装球介质推荐方案为: $\Phi 100 : \Phi 70 : \Phi 50 : \Phi 30 = 15 : 25 : 30 : 30$ 。由于给矿中高硬度与高韧性矿石比例较大,属中等偏硬韧性矿石, $\Phi 100$ mm钢球比例相应地由13.04%调整为15%;给矿中软脆矿石性质硬度值与泊松比严重偏小, $\Phi 30$ mm钢球比例相应地由32.32%调整为30%。

实际生产中钢球配比与矿石粒度组成特性往往不匹配,常见的是现场钢球尺寸整体偏大。将实验室推荐方案与现场方案列于表6中。

表6 球磨机初装球对比方案

Table 6 The comparative schemes of mill initial ball loading

方案名称	方案编号	方案内容	平均球径
推荐方案	方案1	$\Phi 100 : \Phi 70 : \Phi 50 : \Phi 30 = 15 : 25 : 30 : 30$	56.5 mm
现场方案	方案2	$\Phi 100 : \Phi 80 : \Phi 60 : \Phi 40 = 30 : 40 : 20 : 10$	78.0 mm

由表6可知,现厂方案平均球径比推荐方案大21.5 mm。大尺寸钢球比例大,虽然增加了冲击破碎能力,但在介质充填率一定的情况下,钢球个数与研磨面积相应减少,矿料在钢球表面粘附的比例减少,导致物料堆积在磨机底脚处,形成物料层。当钢球以抛落方式击打向衬板时,物料层对钢球冲击起到缓冲作用,磨碎效果变差,磨矿细度降低^[13]。

2.3 磨矿对比试验

根据武山铜矿选厂的磨矿要求,在 $D \times L 450 \text{ mm} \times 450 \text{ mm}$ 的实验室不连续球磨机中对比试验。试验用球磨机有效容积为 0.07153 m^3 ,转速率为75%,磨机充填率为32%,装球100 kg。每份磨矿试样按现场磨机给矿粒度组成配矿13 kg,每次磨矿时间经探索试验确定为39 min,以保证磨矿产品细度-0.74mm 65%左右(与现场磨矿的细度相当)。在上述相同的磨矿条件下,分别对上述2组初装球比进行磨矿试验,预测磨矿产品粒度特性变化趋

势^[14,15]。各种球比的磨矿产品进行缩分,取样 1 kg, 然后进行筛析及水析,结果见图 1。

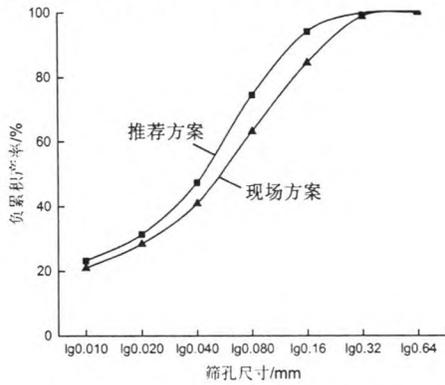


图 1 对比方案磨矿产品半对数负累积粒度特性曲线

Fig. 1 The grinding semi logarithmic negative cumulative size characteristics curve of comparative schemes

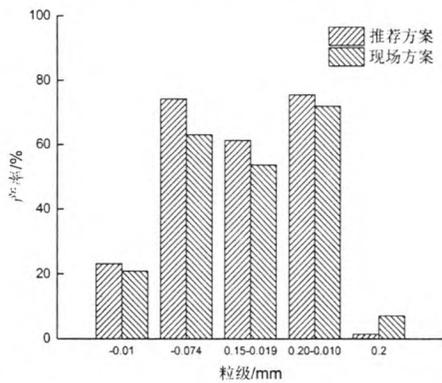


图 2 对比方案磨矿产品粒度特性表征值

Fig. 2 The grinding size characteristics value of comparative schemes

磨矿是为浮选作业提供适宜分选的合格粒级产品,磨矿产品粒度过粗或过细,浮选都无法选别,其中-0.074 mm 产率作为评判磨矿细度的指标,0.20~0.010 mm 为中间可选级别,0.15~0.019 mm 为中间易选级别。因此,磨矿作业应降低粗粒级产率,尽量减少过粉碎粒级产率。由图 2 可以看出,推荐方案+0.20 mm 粗粒级产量 1.38% 比现场方案 7.14% 减少了 5.76 个百分点,-0.074 mm 产率 74.18% 比现场方案 63.01% 增加了 11.17 个百分点,0.20~0.010 mm 产率 75.44% 比现场方案 71.92% 增加了 3.52 个百分点,0.15~0.019 mm 产率 61.24% 比现场方案 53.61% 增加了 7.63 个百分点,-0.010 mm 过粉碎级别产率 23.18% 与现场方

案 20.94% 增加了 2.24 个百分点。由图 3 可知,在一次破碎作用下,推荐方案破碎事件量总量高于现场方案。现场方案中,由于大尺寸钢球比例大,粗级别的破碎事件量高,但是相同充填率 32% 的情况下,钢球个数减少,每一次循环中破碎事件总量减少,特别是适宜破碎细粒级韧性偏硬矿石的钢球少,矿料在大钢球空隙中大量夹杂及小尺寸钢球对韧性偏硬矿石的疲劳破坏,使磨矿效率降低,磨矿效果变差。推荐方案中,磨矿介质与矿石力学性质相匹配,一次磨矿循环中破碎事件总量 1.479 比现场方案 0.987 增加了 49.85%。各尺寸钢球均与适宜其磨碎的矿石发生有效磨碎行为,粗粒级产率降低,磨矿细度及中间可选、易选级别产率增加,优化了磨矿产品粒度特性。

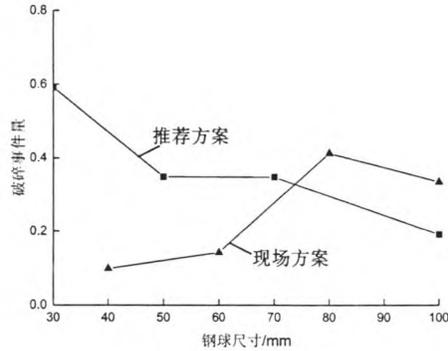


图 3 对比磨矿方案破碎事件量

Fig. 3 The breakage amount in comparative schemes

3 结 论

(1)武山铜矿有用矿物主要以黄铜矿、黄铁矿、白铁矿为主,分布不均匀。矿石普氏硬度系数平均值为 7.8,属于中等偏硬矿石;矿石泊松比最大值为 0.330,韧性较大,最小值为 0.135,脆性也大,泊松比平均值为 0.242,矿石总体表现为韧性。磨矿过程中应充分考虑磨矿介质与矿石硬度、韧性、脆性等力学性质的匹配性关系,确定磨机所需要的球径和球比。

(2)采用球径半理论公式与破碎统计力学原理进行磨矿初装球设计,得出较佳磨矿介质配比方案为 $\Phi 100 : \Phi 70 : \Phi 50 : \Phi 30 = 15 : 25 : 30 : 30$ 。

(3)采用最佳介质配比方案,其+0.20 mm 粗级别产率比现场方案降低了 5.76 个百分点,磨矿细度

(-0.074 mm)、-0.20+0.010 mm 和 -0.15+0.019 mm 产率分别比现厂方案提高了 11.17、3.52、7.63 个百分点。优化磨矿介质与矿石力学性质的匹配性可以明显降低粗粒级和过粉碎产率,提高磨矿细度和合格粒级产率,改善磨矿产品粒度特性。

参考文献:

- [1] 陈丙辰. 磨矿原理[M]. 北京:冶金工业出版社,1989. 350-366.
- [2] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京:科学出版社,2002. 12-74.
- [3] J. Malik, 王宗明. 岩石和矿石的矿物学结构与磨磨特性之间的关系[J]. 矿产综合利用,1989(3):22-27.
- [4] 段希祥. 选择性磨矿及其应用[M]. 北京:冶金工业出版社,1991. 168-169.
- [5] 段希祥. 球磨机钢球尺寸的理论计算研究[J]. 中国科学 A 辑,1989(8):856-863.
- [6] 段希祥,肖庆飞. 碎矿与磨矿[M]. 北京:冶金工业出版社,2012. 204-217.
- [7] 肖庆飞等. 一种基于矿石力学性质确定球磨机直径的方法[P]. 中国:201410814692.3,2015.06.03.
- [8] 陈建新,马少健,胡治流. 窄级别给料球磨机最佳介质尺寸判据研究[J]. 广西大学学报:自然科学版,2002(s1):8-11.
- [9] 罗春梅,肖庆飞,段希祥. 精确化装补球方法的应用研究[J]. 矿产综合利用,2008(4):22-25.
- [10] 肖庆飞. 两段磨矿精确化装补球方法的开发及应用研究[D]. 昆明:昆明理工大学国土资源工程学院,2008:42-53.
- [11] 蔡明亮,武俊杰,杨柳. 陕西某氧化铅锌矿磨矿技术试验研究[J]. 矿产综合利用,2013(3):31-35.
- [12] 钟旭群. 介质配比对磨矿效果影响的试验研究[J]. 矿冶,2014,23(5):24-43.
- [13] 马少健,陈建新. 球磨机适宜磨矿介质配比的研究[M]. 金属矿山,2000(11):27-31.
- [14] 王志辉,王长刚. 球磨磨矿试验及放大研究[J]. 矿山机械,2006,34(7):33-34.
- [15] R. P. King. Modeling&simulation of mineral processing systems. Butterworth-Heinemann, Boston.

Matching Study between Grinding Medium and Ore Mechanical Properties in Wushan Copper Mine

Wang Xiaojiang¹, Xiao Qingfei¹, Shen Chuangang¹, Kang Huaibin¹, Li Bo², Ruan Huadong³

- (1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan, China;
2. Yunnan JCHX Lihe Mining Engineering Design Co., Ltd, Kunming, Yunnan, China;
3. Wushan Copper Mine, Jiangxi Copper Corporation, Ruichang Jiangxi, China)

Abstract: This paper introduced a method of optimizing the particle size characteristics of ball mill grinding products in wushan by studying the ore mechanical properties to determine matched ball size and ball ratio. Comparative grinding tests were conducted between recommended scheme ($\Phi 100 : \Phi 70 : \Phi 50 : \Phi 30 = 15 : 25 : 30 : 30$) and plant scheme ($\Phi 100 : \Phi 80 : \Phi 60 : \Phi 40 = 30 : 40 : 20 : 10$) under the condition that the average of protodayknov coefficient of rock strength is 7.8 and average of passion's ratio is 0.224. Test results showed that recommended scheme achieved the expected performance on optimizing the grinding particle size characteristics that the yield of coarse size fraction (+0.20 mm) decreased 5.76 percent points, the grinding fineness (-0.074 mm), the yield of easily selected fraction (0.15 ~ 0.019 mm) and selectable fraction (0.20 ~ 0.010 mm) increased 11.17 percent points, 7.63 percent points and 3.52 percent points respectively.

Keywords: Grinding medium; Mechanical properties; Matching; Size characteristics