

半自磨顽石做中矿再磨介质的应用研究^{*}

肖庆飞^{1,2}, 王国强^{1,2}, 杨芳², 郭运鑫², 黄胤淇²

(1. 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 云南 昆明 650093; 2. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要:通过对冬瓜山铜矿半自磨顽石力学性质、粒度组成的测定、不同尺寸顽石作磨矿介质和顽石与钢球不同配比的磨矿对比试验及工业试验展开对处理半自磨顽石工艺的应用研究。实验室试验表明, 顽石硬度和韧性均比原矿高, 较适合做中矿再磨介质; $-80+40$ mm 粒级顽石做为磨矿介质时磨矿产品过粉碎较少, 中间粒级 $-37+10$ μm 含量较多, 磨矿效果较好; 顽石与钢球质量配比在 1:1 到 3:1 之间时, 磨矿产品粒度要求可以保证。工业试验结果表明, 半自磨顽石处理工艺应用后再磨溢流中 -0.010 mm 含量比工业试验前降低 1.34 个百分点, 半自磨机台时处理量比试验前提高了 6.64 t/h, 中矿再磨单耗由 0.50 kg/t 降为 0.20 kg/t, 铜的回收率比试验前提高 0.32 个百分点; 顽石作铜再磨介质用量 7.2 t/h, 约占顽石量的 25%, 与半自磨机中 $+40$ mm 顽石产出量相近。因此引出 $+40$ mm 顽石做中矿再磨介质, 不仅解决半自磨顽石积累问题, 同时提高半自磨处理量和铜的回收率, 降低再磨过粉碎含量和磨矿单耗。

关键词: 顽石; 半自磨; 处理量; 铜矿; 碎磨工艺

中图分类号: TD921^{+.4} **文献标识码:** B **文章编号:** 1001-0076(2017)03-0032-05

DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2017.03.006

Study on Application of Semi-autogenous Pebble for Middling Regrinding Medium

XIAO Qingfei^{1,2}, WANG Guoqiang^{1,2}, YANG Fang², GUO Yunxin², HUANG Yingqi²

(1. State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming 650093, China; 2. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: A systematic research on the mechanical properties and size characteristics of semi-autogenous pebble in Dongguashan Copper Mine, grinding contrast tests of different sizes of pebble as grinding media and different ratio of pebble and steel balls as well as the industrial test on processing semi-autogenous pebble were conducted. Experimental tests results showed that hardness and toughness of pebble were higher than those of raw ore and thus suitable for regrinding medium; the productivity of over grinding was less and easy select fraction of $-37+10$ mm was more when the $-80+40$ mm pebble was used as grinding medium; the requirements of particle size of the grinding product could be guaranteed with the proportion of pebble and steel ball from 1:1 to 3:1. The industrial test results showed that after applying the process, the -0.010 mm fraction was reduced by 1.34 percentage points; the capacity of semi-autogenous mill was increased by 6.64 t/h than before; regrinding ball consumption was reduced from 0.50 kg/t to 0.20 kg/t, the copper recovery rate increased 0.32 percentage points than before; the medium consumption of copper grinding was 7.2 t/h, accounting for about 25% of the amount of pebble and similar to the amount of

* 收稿日期: 2017-04-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51564028)

作者简介: 肖庆飞(1980-), 男, 博士, 副教授, 主要从事碎矿磨矿理论与工艺研究。

+40 mm pebble in semi – autogenous mill. Therefore, one can conclude that using +40 mm pebble as regrinding medium, not only solved the semi – autogenous pebble accumulation but also improved the semi – autogenous mill capacity and copper recovery, and reduced over grinding amount and regrinding consumption as well.

Key words: pebble; semi – autogenous grinding; capacity; copper mine; crush – mill technology

自上世纪 80 年代西方国家的新建有色选矿厂大多采用半自磨 + 球磨流程,因为由自磨机衍生而来的半自磨机不仅解决了因矿石性质变化对自磨机处理能力所产生的影响,而且半自磨能够简化选厂的破碎流程,减少占地面积和粉尘的产生,较容易实现自动化控制^[1-4]。2004 年,铜陵有色金属公司冬瓜山铜矿首次采用半自磨机并投产,使其成为国内单系列处理能力较大的选矿厂。

半自磨机运行的过程中,由于自身的工作特点,会产生规格为 -80 + 30 mm 的顽石,形成顽石积累,因该粒径的矿石不具备磨矿介质的作用,又不容易被充当自磨介质的矿石磨碎,因而在磨机的量逐渐积累,严重影响了磨机处理量^[5-7]。为了解决顽石积累的问题,冬瓜山铜矿采取了诸多措施:(1)将钢球直径从设计时的 125 mm 增大到 200 mm,处理量虽然满足,但钢球过大造成钢耗高,衬板使用寿命短,设备故障多,磨机作业率低,而半自磨排矿中 -0.010 mm 过粉碎含量约占 10%,影响后续浮选指标^[8]。(2)由半自磨机引出临界粒度物料,然后用专门的破碎机破碎后返回半自磨机,但考虑到矿石中含铁量比较大,矿石性质特殊,引出的顽石中带有小钢球无法用除铁器分离,自然无法用破碎机破碎后再返回磨机再磨^[9-12]。这种方法由于原始设计及矿石性质影响使其无法实施。

针对冬瓜山铜矿顽石无法用常规方法解决的问题,本文主要综合半自磨及中矿再磨系统进行考虑,将中矿再磨机作为砾磨机,将半自磨中的 -80 + 40 mm 顽石引出来作为中矿再磨的介质,着重论述了顽石处理新工艺的应用效果:一是解决半自磨机中顽石积累的问题,确保减小钢球直径而保证处理量,延长衬板的寿命;二是顽石部分替代中矿再磨的钢球后,大幅度降低再磨单耗;三是改善半自磨及中矿再磨的粒度组成,减轻过粉碎粒级,提高铜的回收率。

1 试验方案

实验方案如图 1 所示,将不同尺寸顽石作磨矿介质的磨

矿对比试验和顽石与钢球不同配比磨矿对比试验。不同尺寸顽石作磨矿介质的试验方法为:根据顽石尺寸的大小,将其划分为 -40 + 30 mm、-50 + 40 mm、-60 + 50 mm、-80 + 60 mm 这 4 个粒级进行顽石磨矿试验,试验在 D × L 240 × 300 mm 筒形球磨机中进行,磨矿时间经探索确定为 18 min,每次试验原矿量为 2 kg,磨矿介质顽石用量为 20 kg,磨矿浓度为 70%,对磨矿产品进行筛析后加以分析。经探索顽石与钢球不同配比的磨矿对比试验磨矿时间确定为 14 min,其它磨矿条件与不同尺寸顽石作磨矿介质的试验条件相同,根据对磨矿产品的分析选出优化方案。

2 结果与讨论

2.1 顽石力学性质的测定

顽石作为磨矿介质,是研磨矿物颗粒的主体,根据其力学性质,选用合适的磨机工作参数,才有较好的磨矿效果。昆明理工大学和冬瓜山铜矿对半自磨机中的顽石力学性质做过多次测试,测试结果见图 1 和图 2。

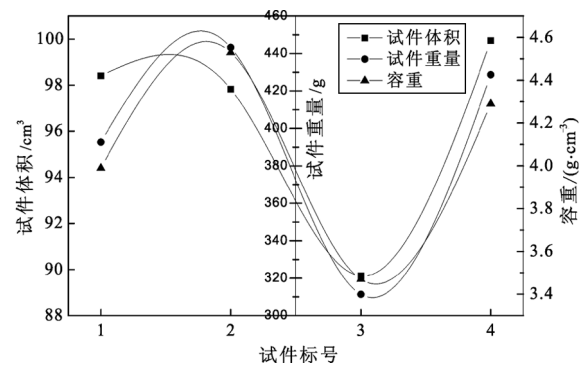


图 1 标准试件的体积、重量和容重测定结果

由图 1 和图 2 可知:(1)顽石的容重最小为 3.47 g/cm³,最大为 4.53 g/cm³,平均容重为 4.07 g/cm³;(2)顽石的普氏硬度系数均在 13 以上,平均普氏硬度系数为 15.40,可见顽石的硬度比原矿平均硬度系数 8.7 要高,说明该顽石在硬度方面适合做中矿

再磨介质;(3)1~6 标准力学试件的平均弹性模量为 4.55,平均泊松比为 0.486,比原矿平均泊松比 0.273 大,说明顽石硬度和韧性都符合做中矿再磨的介质条件。

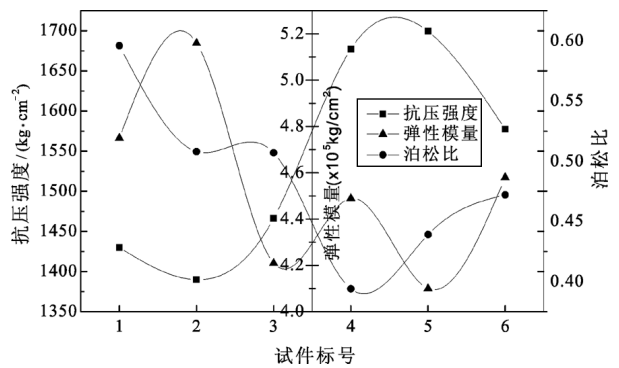


图2 标准试件单轴抗压强度、割线弹性模量和泊松比

将半自磨排矿端圆筒筛筛上顽石分成-20+10 mm、-30+20 mm、-40+30 mm、-50+40 mm、-60+50 mm、-80+60 mm 等 6 个粒度,分别在 DE50A 型压力试验机上测定其力学性能,其测试结果如图 3。

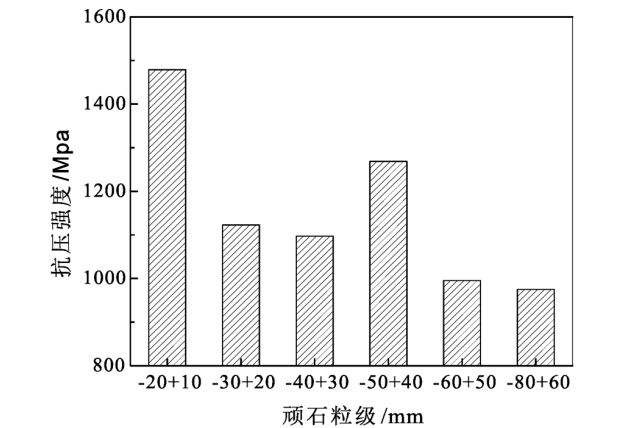


图3 不同粒度顽石的压力测试结果

从图 3 可以看出,随着矿块粒度的增大,抗压强度整体呈现减小的趋势,但顽石粒度在-50+40 mm 之间时,顽石的抗压强度出现了突然增大的现象,可初步判断 40 mm 的顽石为适合做中矿再磨介质尺寸限度,是否正确有待试验结果进行验证。

2.2 不同尺寸顽石作磨矿介质对比试验

通过不同尺寸顽石磨矿对比试验所得到的磨矿产品指标如表 1。

表 1 不同顽石介质大小磨矿结果					
对比指标	给矿	-40+30 mm 顽石	-50+40 mm 顽石	-60+50 mm 顽石	-80+60 mm 顽石
$\gamma_{-37\mu\text{m}}/\%$	42.21	92.98	94.23	93.47	93.22
新生 $\gamma_{-37\mu\text{m}}/\%$	-	50.77	52.02	51.26	51.01
$\gamma_{-37+10\mu\text{m}}/\%$	37.24	58.11	62.33	61.73	61.61
$\gamma_{-10\mu\text{m}}/\%$	4.97	35.87	31.90	31.74	31.61
顽石消耗量/($\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$)	-	41	53	92	120

由表 1 可以看出:在给矿粒度不变的条件下,(1)当采用-40+30 mm 粒度顽石作为磨矿介质时,磨矿产品中过粉碎现象严重,37 μm 以下新生成粒级和中间粒级含量低,所以此粒度顽石不适合作为中矿再磨介质;(2)当采用-50+40 mm 粒度顽石充当磨矿介质时,磨矿产品过粉碎最少,中间粒级-37+10 μm 含量是所有方案中最多的,因此,该粒度顽石最适合作为中矿再磨介质;(3)当采用-60+50 mm、-80+60 mm 粒度顽石充当磨矿介质时,磨矿产品中过粉碎含量较少,中间粒级-37+10 μm 含量较多,该粒度顽石同样适合作为中矿再磨介质。综上所述,适宜将-80+40 mm 粒度顽石作为中矿再磨介质。

2.3 顽石与钢球不同配比磨矿对比试验

中矿再磨的给矿 95% 过筛粒度为 0.12 mm,根据球径公式(1)^[13] 计算可得,中矿再磨所需的最大钢球直径为 23 mm,目前国内由于钢球制造工艺及成本影响,钢球厂提供的最小钢球尺寸普遍为 30 mm,因此,试验中推荐采用的钢球直径为 30 mm。

$$D_b = \left[\sum_{i=1}^n \frac{\gamma_i (f_i + S_i E_i + B_i \mu_i)}{f_a + E_a + \mu_u} \right] K_c \frac{0.5224}{\Psi^2 - \Psi^6} \sqrt{\frac{\sigma_{\text{压}}}{10 p_e D_0}} d_f \quad (1)$$

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); μ_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)。

为探索顽石与钢球的较优配比,并与现场采用 $\Phi 50$ mm钢球的方案进行对比,采用以下5个方案进行磨矿对比试验,各方案列于表2。

表2 顽石与钢球不同配比磨矿对比试验方案			
方案	顽石尺寸/mm	钢球尺寸/mm	顽石与钢球质量配比
方案一	—	50	—
方案二	−80+40	30	1:2
方案三	−80+40	30	1:1
方案四	−80+40	30	2:1
方案五	−80+40	30	3:1

通过顽石与钢球不同配比磨矿试验所得到的磨矿产品指标如表3所示。

表3 不同磨矿介质下展开再磨磨矿结果 /%						
对比指标	给矿	方案一	方案二	方案三	方案四	方案五
$\gamma_{-37\text{ }\mu\text{m}}$	42.21	90.26	92.51	93.43	93.86	93.14
新生 $\gamma_{-37\text{ }\mu\text{m}}$	—	48.05	50.30	51.22	51.65	50.93
$\gamma_{-37+10\text{ }\mu\text{m}}$	37.24	53.85	56.88	60.26	61.75	60.32
$\gamma_{-10\text{ }\mu\text{m}}$	4.97	36.41	35.63	33.17	32.11	32.82
顽石消耗量/($\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$)	—	—	57	62	74	109

由表3可以看出:在给矿粒度不变的条件下,(1)当采用方案一、方案二提供的顽石与钢球充当磨矿介质时,磨矿产品中过粉碎较严重, $37\text{ }\mu\text{m}$ 以下新生成粒级和中间粒级含量低,因此,这两种方案均不适合作为中矿再磨介质;(2)当采用方案四作为中矿再磨介质时,磨矿产品中过粉碎最轻,中间粒级 $-37+10\text{ }\mu\text{m}$ 含量最高,因此,方案四所采用的磨矿介质最适合作为中矿再磨介质;(3)当采用方案三和方案五作为中矿再磨介质时,虽然过粉碎和中间粒级含量都不如方案四的效果好,但这两种方案的总体磨矿效果与方案四相差不多,同样可作为中矿再磨介质。综上可得顽石与钢球质量配比在

1:1到3:1之间时,磨矿产品粒度要求可以保证。

2.4 顽石作中矿再磨介质用量分析

对冬瓜山铜矿顽石进行粒度组成测定,其测定结果如图4所示。

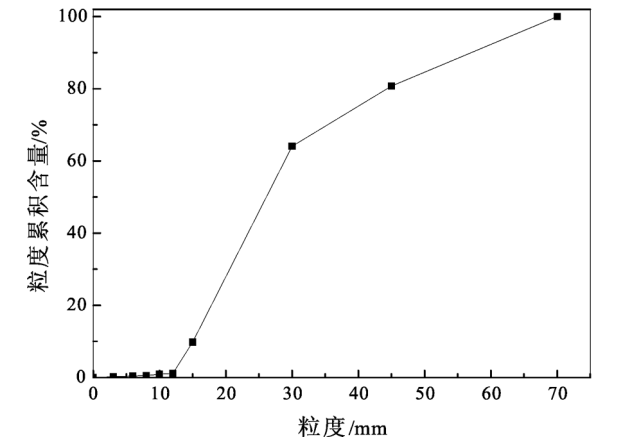


图4 顽石粒度组成分析结果

由图4可知:(1)−80+40 mm粒级顽石约占顽石总量的25%,按照半自磨机产生的顽石量30 t/h计算,半自磨机每天产生−80+40 mm粒级顽石180 t左右,而中矿再磨的处理量为原矿的16%~20%,为2 400 t/d,由表2可知,中矿再磨−80+40 mm粒级顽石消耗量为74 kg/t,即中矿再磨每天需要消耗的−80+40 mm粒级顽石约为177.6 t,即从顽石粒级含量来看,半自磨自身产生的−80+40 mm粒级顽石完全可以作为中矿再磨介质用量。(2)同时由表2看出,顽石与钢球质量配比在1:1到3:1之间时,磨矿产品的粒度特性相差不大,如果现场生产中顽石的产生量发生小的波动,可以通过调节顽石与钢球的配比来解决顽石产生量波动的问题,从工艺来看,现场只需将顽石中+40 mm分离引出作为中矿再磨介质即可。

3 工业试验

顽石力学性质测定结果、不同尺寸顽石作磨矿介质和顽石与钢球不同介质配比试验的结果表明,半自磨自身产生的−80+40 mm粒级顽石符合做中矿再磨介质的条件,顽石与钢球质量配比在1:1到3:1之间时,磨矿产品粒度要求可以保证。现场采用顽石皮带运输机转运站处增设条筛分离出+40 mm顽石,采用逐步补加法添加顽石介质后铜中矿再磨机充填率增加7%左右,原再磨充填率为30%

~32%,对再磨影响不大。半自磨顽石处理工艺研究工业化试验统计数据见表4。

表4 半自磨顽石处理工艺研究工业试验数据统计表				
技术经济指标		工业 试验前	半自磨顽 石作再磨 介质期	对比
再磨产品	+0.074 mm 旋流器溢流	1.90	1.65	-0.25
粒度组成	-0.043 mm 旋流器溢流	90.01	89.79	-0.22
/%	-0.010 mm 旋流器溢流	21.92	20.58	-1.34
半自磨台时处理量/(t·h ⁻¹)		548.80	555.44	+6.64
中矿再磨球耗/(kg·t ⁻¹)		0.50	0.20	-0.30
铜回收率/%		87.36	87.68	+0.32

由表4可知:顽石作铜中矿再磨介质达到平衡后的考查结果显示,(1)在给矿粒度不变的条件下,再磨溢流中+0.074 mm 含量为1.65%,降低0.25个百分点,-0.043 mm 含量为89.79%,降低0.22个百分点,-0.010 mm 含量比工业试验前降低1.34个百分点,说明顽石作中矿再磨介质不仅没有影响再磨溢流粒度组成,而且降低了溢流产品中过粉碎的含量;(2)工业试验后磨机台时处理量为555.44 t/h,比试验前提高了6.64 t/h,中矿再磨球耗由0.50 kg/t降为0.20 kg/t,铜的回收率比试验前提高0.32个百分点;(3)顽石作铜再磨介质用量7.2 t/h,约占顽石量的25%,与半自磨+40 mm 顽石产出量相近,+40 mm 顽石的引出,该工艺既解决了半自磨顽石积累问题,同时提高半自磨处理量和铜的回收率,降低再磨单耗。

4 结论

- (1)冬瓜山铜矿半自磨顽石平均普氏硬度系数为15.40,顽石的平均容重为4.07g/cm³,平均泊松比为0.486,硬度和韧性均比原矿高,较适合做中矿再磨介质。
- (2)实验室中不同尺寸顽石作磨矿介质的磨矿对比试验结果表明,半自磨自身产生的-80+40 mm 粒级顽石作为磨矿介质时磨矿产品中过粉碎含量较少,中间粒级-37+10 μm 含量较多,磨矿效果较好;由顽石与钢球不同配比磨矿对比试验结果得出,顽石与钢球质量配比在1:1到3:1之间时,磨矿产品粒度要求可以得到保证;通过对顽石作中矿

再磨介质用量分析得出,现场只需将顽石中+40 mm 分离引出即可满足中矿再磨介质的用量。

(3)工业试验结果表明,处理半自磨顽石工艺应用后再磨溢流中-0.010 mm 含量比工业试验前降低1.34个百分点,半自磨机台时处理量比试验前提高了6.64 t/h,中矿再磨球耗由0.50 kg/t降为0.20 kg/t,铜的回收率比试验前提高0.32个百分点;顽石作铜再磨介质用量7.2 t/h,约占顽石量的25%,与半自磨+40 mm 顽石产出量相近。因此得出引出+40 mm 顽石做中矿再磨介质的工艺,不仅解决了半自磨顽石积累问题,同时提高半自磨处理量和铜的回收率,降低了再磨单耗和其产品中过粉碎的含量。

参考文献:

[1] 周为民. 自磨半自磨发展面临的挑战[J]. 黄金,2014,35(Z):177-180.

[2] 邓禾森. 冬瓜山铜矿提高半自磨机处理能力的生产实践[J]. 有色金属(选矿部分),2010,62(4):36-38.

[3] 艾满乾,李电辉,付文姜. 半自磨工艺应用实践[J]. 黄金,2012,33(8):43-45.

[4] 杨昊. 利用银山矿半自磨顽石做立磨机介质的磨矿试验研究[D]. 赣州:江西理工大学,2015.

[5] 周波,周显文. SABC 工艺在乌努格吐山铜铅矿的成功应用[J]. 矿业工程,2013,11(5):31-33.

[6] 杨世亮,杨保东,李隆德,等. SABC 工艺在国内生产实践中的探索[J]. 黄金,2013,34(3):53-57.

[7] 袁振勇,徐文敏. PCS 系统在大型矿山的应用[J]. 有色冶金设计与研究,2012,33(6):28-30.

[8] Bayat O, Ucurum M, Poole C. Effects of size distribution on flotation kinetics of Turkish sphalerite[J]. Mineral Processing & Extractive Metallurgy Imm Transactions, 2013, 113(113): 53-59.

[9] 梁雪海. 浅谈提高湿式自磨效率的途径[J]. 工程建设,1999,31(2):18-21.

[10] 李冬,方勋,过仕民,等. 大型半自磨机在冬瓜山选矿厂应用及研究初探[J]. 金属矿山,2005(S2):297-299.

[11] B. Clermont. Run - of - mine milling pilot plant test work [M]. Elsevier Inc., 2000.

[12] Maclean A, Wirfiyata F, Khomaeni G, et al. Ball mill polymet liner evaluation at PT Newmont Nusa Tenggara - Batu Hijau mine [C]// Ausimm Mill Operators' Conference. Perth; 2014.

[13] 肖庆飞,汪太平,胡新付,等. 一种确定矿石最佳入磨粒度的方法;CN104607301A[P]. 2015-05-13.

[14] 汪太平,肖庆飞,李博. 冬瓜山铜矿一段磨矿产品粒度组成优化研究[J]. 矿产保护与利用,2014,34(4):22-26.