入磨物料粒度特性对一段磨矿中纳米陶瓷球取代钢球的影响①

周仙霖[1,2], 蒋佳颖[1,2], 陈铁军[1,2], 万军营[1,2], 李柳英[1,2], 任嫔婧[1,2]
(1.武汉科技大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430081; 2.冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430081)

摘 要: 为探究纳米陶瓷球应用于一段球磨的可行性,以钢球和纳米陶瓷球为磨矿介质,对高压辊磨产品进行球磨试验,研究磨矿产品粒度分布特征及其磁选效果。结果表明:2~3 mm 和 1~2 mm 单一粒级物料入磨时,纳米陶瓷球与钢球混合使用会降低整体磨矿效果;0.6~1 mm、0.3~0.6 mm、0.15~0.3 mm、0.074~0.15 mm 单一粒级物料入磨时,纳米陶瓷球与钢球混合使用产生的协同效应对磨矿效果产生增益;0.3~0.6 mm、0.15~0.3 mm、0.074~0.15 mm 单一粒级物料入磨时,混合球采用 50%钢球配比可实现 80%钢球配比的磨矿效果;0.074~0.15 mm 单一粒级入磨时,混合球的磨矿效果与钢球相似;-0.6 mm 混合粒级入磨时,混合球的磨矿效果与钢球近似,此粒级下可以采用混合球替代钢球进行一段磨矿。

关键词: 磨矿; 球磨; 高压辊磨; 入磨物料粒度; 纳米陶瓷球; 钢球; 一段球磨; 磨矿介质; 钢球配比
中图分类号: TD92 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.06.012
文章编号: 0253-6099(2025)06-0072-06

Influence of Particle Size of Grinding Materials on Replacement of Nano-ceramic Balls for Steel Balls in Primary Grinding

ZHOU Xianlin[1,2], JIANG Jiaying[1,2], CHEN Tiejun[1,2], WAN Junying[1,2], LI Liuying[1,2], REN Binjing[1,2]
(1. *School of Resources and Environmental Engineering*, *Wuhan University of Science and Technology*, *Wuhan* 430081, *Hubei*, *China*; 2. *Hubei Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources*, *Wuhan* 430081, *Hubei*, *China*)

Abstract: To explore the feasibility of using nano-ceramic balls in primary ball mill, a ball milling test was conducted on high-pressure roller mill product with steel balls and nano-ceramic balls as grinding media, and the particle size distribution characteristics and magnetic separation effect of the ground products were studied. The results indicate that with the feed materials singly in a size range of 2-3 mm or 1-2 mm, use of nano-ceramic balls in combination with steel balls as the medium can reduce the overall grinding effect; while with the feed material singly in a size range of 0.6-1 mm, 0.3-0.6 mm, 0.15-0.3 mm or 0.074-0.15 mm, a combination of nano-ceramic balls and steel balls has a synergistic effect, which can enhance grinding performance; with the feed material singly in a size range of 0.3-0.6 mm, 0.15-0.3 mm or 0.074-0.15 mm, the mixed media with 50% steel balls can achieve the same grinding effect brought by the media with 80% steel balls; with the feed material in a size range of 0.074-0.15 mm, the combination of two balls brings the same grinding effect as the single use of steel balls; with the feed material in a size range less than 0.6 mm, the combination of two balls can bring grinding effect approximately equivalent to that by singly using steel balls. It is concluded that a combination of nano-ceramic balls and steel balls can be used instead of single steel balls in the primary grinding of materials in size range less than 0.6 mm.

Key words: grinding; ball mill; high-pressure roller mill; particle size of feed material; nano-ceramic ball; steel ball; primary ball mill; grinding medium; mixing ratio of steel ball

① **收稿日期**: 2025-06-30
基金项目: 湖北省重点研发计划项目(2022BCA062);广西科技重大专项(桂科 AA24263047)
作者简介: 周仙霖(1986—),男,福建莆田人,博士,副教授,主要从事高效低碳磨矿理论与技术研究。E-mail:xlzhou@wust.edu.cn
通信作者: 万军营(1992—),男,河南信阳人,博士(后),主要从事复杂铁矿分选研究。E-mail:jywan92@163.com

选矿厂正面临绿色低碳转型重大挑战[1],破碎、磨矿作业能耗占选矿厂总能耗的 50%~70%,其中磨矿作业的能耗占破碎、磨矿总能耗的 80%以上[2]。优化研磨工艺、降低磨矿能耗成为选矿厂降本增效和行业绿色发展的迫切需求[3-4]。

在常规两段磨矿与阶磨阶选工艺体系中,一段磨矿能耗占磨矿总能耗的 60%~70%,二段磨矿能耗占总能耗的 30%~40%。行洛坑钨矿、安徽某磁铁矿、张庄矿等多个矿山的工业实践证实,在二段磨矿阶段应用纳米陶瓷球(以下简称陶瓷球)可降低磨矿能耗 30%~50%[5-10]。对于选矿厂而言,将陶瓷球应用于一段磨矿,具有极大的节能降耗和降本增效的潜力;但由于陶瓷球密度较小,对粗颗粒物料的研磨能力比钢球低[11-12],而一段磨矿更注重磨矿介质对粗颗粒的破碎能力[13-14]。在二段磨矿中采用陶瓷球作为磨矿介质时,入磨物料-0.074 mm 粒级占比一般为 40%~60%,较为契合陶瓷球的高效区间,许多学者围绕陶瓷球取代钢球在细磨工序应用方面进行了试验研究和论述,但针对陶瓷球应用于一段磨矿工序时磨机合适的入磨物料粒度区间,目前尚无相关研究。

传统三段一闭路破碎方式存在预选抛尾分离效果差、铁损失率高、后续磨矿能耗高等缺点[15];基于“多碎少磨、能抛早抛”的碎磨理念,采用高压辊磨机进行超细碎作业,可以有效降低球磨机的入磨粒度和钢耗,提高球磨机效率[16-18]。目前,在超细碎工艺的探索中,高压辊磨与超精细分级设备的结合已成功将入磨物料粒度精确控制在 0.5 mm 以下[19],这为陶瓷球应用于一段磨矿提供了先决条件。

陶瓷球应用于程潮铁矿选矿厂二段磨矿工序,能提高磨矿技术效率且节能效果显著[20]。为进一步探究陶瓷球应用于一段球磨的可行性,本文针对高压辊磨预处理后的原矿,基于钢球、陶瓷球和两种介质混合进行单一粒级和混合粒级的磨矿试验,通过研究产品的粒度分布特征和磁选效果来系统研究入磨物料粒度特性对一段磨矿中陶瓷球取代钢球的影响。

1　试验

1.1　试验原料

试验用原料取自湖北程潮铁矿选矿厂磨矿工序中的一段球磨给矿。对矿样进行单轴压缩试验,测得其单轴抗压强度为 58.22 MPa,换算成普氏硬度系数为 5.8,属于中硬矿石;对矿样进行球磨功指数试验,测得其邦德球磨功指数为 11.65 kWh/t,为较难磨矿石。

对矿样进行了化学组成和铁物相分析,结果分别如表 1 和表 2 所示。结果表明:该矿样 TFe 品位为 39.46%,铁主要以磁性铁形式存在,其次为赤褐铁矿;主要脉石为 SiO_2,其次为 CaO、Al_2O_3;伴生有益元素铜含量为 0.22%,硫含量为 3.53%,具有回收价值;其他元素含量均不高。

表 1　矿样化学组成分析结果(质量分数)

Table 1　Chemical composition analysis of ore sample　%

TFe	mFe	Cu	S	P_2O_5	CaO
39.46	34.68	0.22	3.53	0.53	9.61
MgO	Al_2O_3	SiO_2	TiO_2	As	
2.78	4.02	15.53	0.97	0.001	

表 2　矿石铁物相分析结果

Table 2　Analysis of iron phase in ore

铁物相	含量(质量分数)/%	分布率/%
磁性铁中铁	34.68	87.89
碳酸铁中铁	0.39	0.98
氧化铁中铁	2.43	6.16
硫化铁中铁	1.29	3.26
硅酸铁中铁	0.68	1.71
全铁	39.46	100.00

1.2　试验方法与设备

入磨粒度是影响矿物磨矿指标的重要因素,合适的入磨粒度有助于矿物达到更好的磨矿指标。为深入分析原料入磨粒度对磨矿效果的影响,进行了单一粒级和混合粒级磨矿试验。单一粒级磨矿试验所用原料为磁铁矿样经高压辊磨所得 3 mm 筛下样品,经筛分制备成 6 种粒级,分别为 2~3 mm、1~2 mm、0.6~1 mm、0.3~0.6 mm、0.15~0.3 mm、0.074~0.15 mm;混合粒级磨矿试验所用原料为磁铁矿样经高压辊磨所得对应粒级筛下样品,分别为-3 mm、-2 mm、-1 mm、-0.6 mm。

实验在武汉恒乐矿物工程设备有限公司 HLXMQ Φ240×90 锥形球磨机中进行,分别以钢球、陶瓷球、钢球+陶瓷球混合(以下简称混合球)作为磨矿介质;基于程潮铁矿选矿厂细磨工序应用陶瓷球的单因素实验结果[20],确定试验条件如下:磨矿浓度(质量分数)67%,磨矿时间 3 min,每次磨矿量 500 g;陶瓷球充填率 36%,装球制度为 Φ30 mm、Φ25 mm、Φ20 mm 球质量比 50%∶30%∶20%;钢球充填率 28%,装球制度为Φ25 mm、Φ20 mm、Φ15 mm 球质量比 30%∶40%∶30%;混合球充填率 36%,装球制度为 Φ30 mm、Φ25 mm、Φ20 mm陶瓷球质量比 50%∶30%∶20%,钢球 Φ20 mm,陶瓷球与钢球质量比1∶1。试验用钢球购自武汉探矿机械厂,试

验用陶瓷球为景德镇百特威尔新材料有限公司生产的高硬度、高耐磨的纳米氧化铝陶瓷球。陶瓷球与钢球参数(源于厂家)见表 3。

表 3 陶瓷球和钢球参数

Table 3 Parameters of ceramic balls and steel balls

磨矿介质	真密度/(t·m^{-3})	堆密度/(t·m^{-3})	莫氏硬度	破碎比例/%
钢球	7.3~7.8	5.02	6.8	≤0.5
陶瓷球	3.7	2.20	9.0	≤0.1
磨矿介质	自磨耗/[g·(kg·h)$^{-1}$]		最小有效直径/mm	
钢球	60		5	
陶瓷球	5		2	

将磨矿后的矿物按照不同粒级进行逐次筛分,筛分方法为水筛法,实验所用标准套筛筛孔尺寸分别为 3、2、1、0.6、0.3、0.150、0.074、0.045、0.019 mm。对筛分后的产品进行烘干、称重。基于混合粒级磨矿试验的结果,选取-0.6 mm 粒级物料作为入磨原料,采用磁选管进行磁选验证试验,基于程潮铁矿选矿厂现场生产条件确定磁选磁场强度为 0.16 T。

1.3 过程评价指标

单一粒级磨矿试验主要考虑负累计粒度曲线的 P_{80}值。P_{80}为磨矿产品 80%能够通过的粒度,mm。同时为定量评价混合球相对于陶瓷球和钢球的磨矿效果,引入 M 值作为衡量标准:

$$M = \frac{P_{80T} - P_{80H}}{P_{80T} - P_{80G}} \tag{1}$$

式中:M 为混合球相对陶瓷球和钢球的磨矿效果,%;P_{80T}为陶瓷球磨矿产品 80%能够通过的粒度,mm;P_{80H}为混合球磨矿产品 80%能够通过的粒度,mm;P_{80G}为钢球磨矿产品 80%能够通过的粒度,mm。

混合粒级磨矿试验主要考察磨矿技术效率,同时考察-0.074 mm 粒级占比和新生-0.019 mm 粒级占比。磨矿技术效率 E 表达式为:

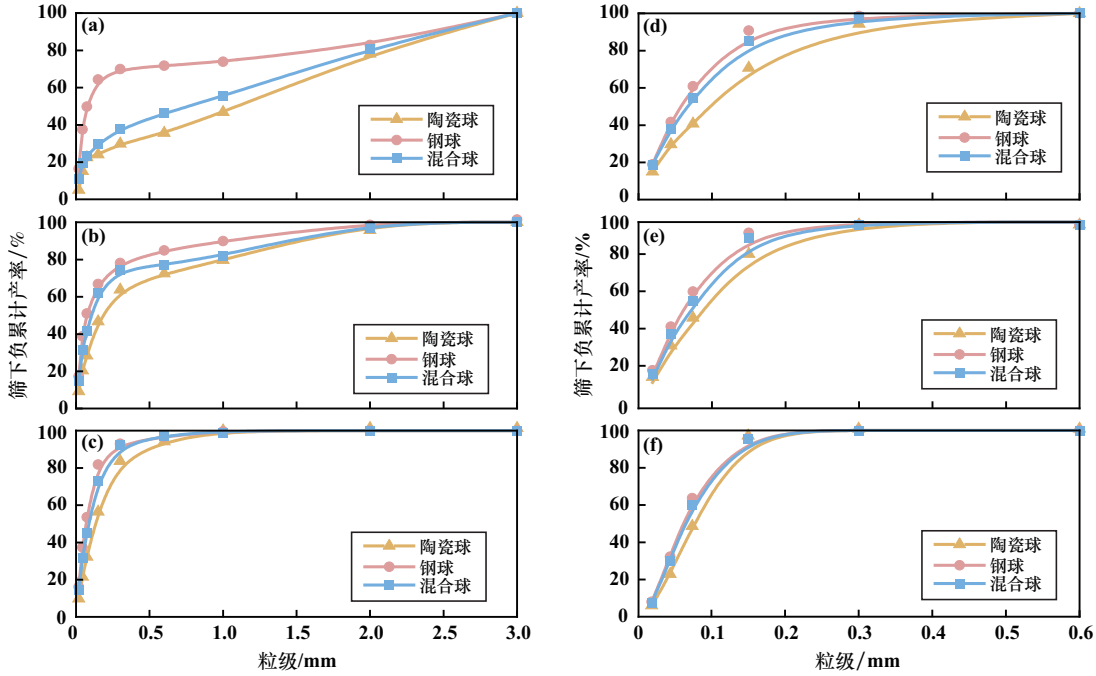
$$E = \frac{(\gamma_1 - \gamma_2) - (\gamma_4 - \gamma_3)\left(1 - \dfrac{\gamma_2 - \gamma_3}{100 - \gamma_3}\right)}{100 - \gamma_2} \times 100\% \tag{2}$$

式中:γ_1 为磨矿产品中-0.074 mm 粒级占比,%;γ_2 为给矿中-0.074 mm 粒级占比,%;γ_3 为给矿中-0.019 mm 粒级占比,%;γ_4 为磨矿产品中-0.019 mm 粒级占比,%。

2 试验结果与讨论

2.1 单一粒级下入磨粒度对磨矿指标的影响

基于 6 种不同粒级的入磨原料,采用钢球、陶瓷球及混合球 3 种磨矿介质进行磨矿试验,单一粒级磨矿产品筛下负累计粒度曲线如图 1 所示,对应的 P_{80}值和 M 值曲线如图 2 所示。



(a) 2~3 mm; (b) 1~2 mm; (c) 0.6~1 mm; (d) 0.3~0.6 mm; (e) 0.15~0.3 mm; (f) 0.074~0.150 mm

图 1 单一粒级磨矿产品筛下负累计粒度曲线

Fig. 1 Negative cumulative distribution curves for grinding products of material in a single size range

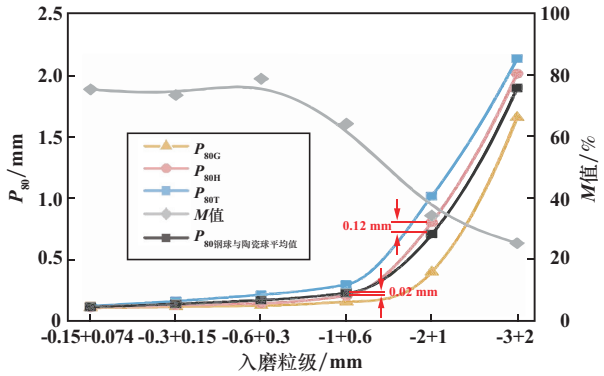


图 2　单一粒级磨矿产品 P_{80} 值和 M 值曲线

Fig. 2　Curves of P_{80} and M values for grinding products of material in a single size range

由图 1 可知，除了 2~3 mm 粒级，其他 5 个粒级相同入磨粒级不同磨矿介质磨矿产品的粒度分布曲线趋势较为相似，筛下负累计粒度曲线均为钢球>混合球>陶瓷球且曲线弧度较为相似，随着入磨物料粒级变细，混合球和陶瓷球的磨矿效果均不断提升。

入磨粒级 2~3 mm 时，混合球和陶瓷球的磨矿产品显著差于钢球，且粒度分布曲线趋势截然不同。钢球、混合球和陶瓷球的 $\gamma_{(-0.074\ mm)}$ 分别为 49.84%、23.31%、22.57%，$\gamma_{(+1\ mm)}$ 分别为 26.12%、44.48%、53.17%，钢球的 $\gamma_{(-0.074\ mm)}$ 远高于混合球和陶瓷球的值，说明在此入磨粒级下，混合球和陶瓷球的磨矿效果显著劣于钢球。混合球的 $\gamma_{(-0.074\ mm)}$ 相比陶瓷球仅提升 0.74%，说明钢球和陶瓷球混合时发挥了负面作用，混合球不适用于此入磨粒级的物料。入磨粒级 0.6~1 mm 时，不同磨矿介质磨矿产品的粒度分布曲线趋势出现显著变化，此阶段混合球和陶瓷球的各项指标均显著提升。对比图 2 可知，2~3 mm入磨物料混合球的 P_{80} 比钢球与陶瓷球的平均 P_{80} 高 0.12 mm；0.6~1 mm 入磨物料的 P_{80} 反而相对低了 0.02 mm，说明随着入磨粒级变细，使用混合球的磨矿效果显著提升，入磨物料 0.6~1 mm 时，钢球和陶瓷球混合开始具有正面协同效应。

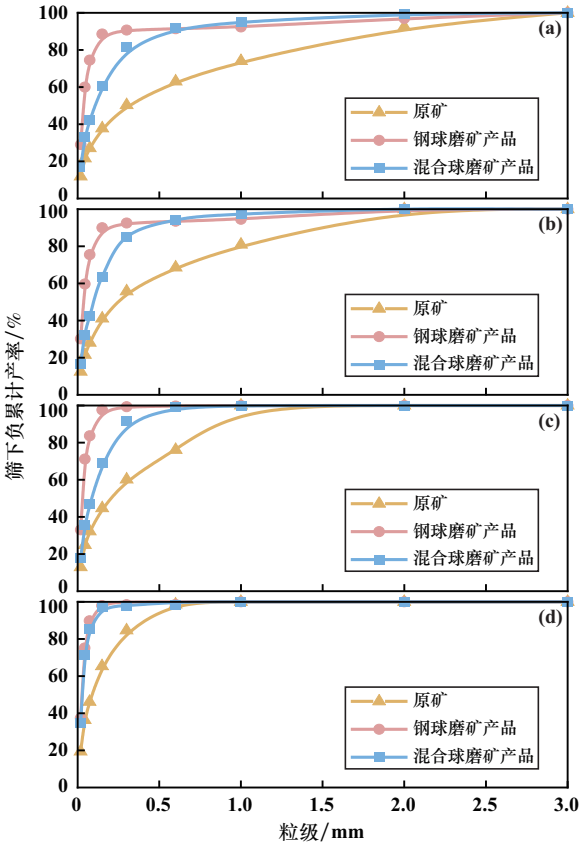
入磨粒级 0.074~0.150 mm 时，陶瓷球与混合球的磨矿效果进一步提升，钢球与混合球的粒度分布曲线近乎重合，说明这 2 种磨矿介质对该入磨粒级物料已具备相似的磨矿效果。

由图 2 可知，不同磨矿介质所对应磨矿产品的 P_{80} 曲线具有相似的变化趋势，磨矿效果均为钢球>混合球>陶瓷球。M 值随着入磨物料粒级变细而不断增加，入磨粒级 0.6~1 mm 时 M 值为 64.29%，入磨粒级 0.3~0.6 mm 时 M 值为78.87%，随后 M 值趋于稳定。说明以 1 mm 为分界线，当入磨粒级小于 1 mm 时，陶瓷球与钢球混合使用产生的协同效应得到有效发挥，强化了其对矿物的磨矿效果；入磨粒度大于 1 mm 时，上述协同效应减弱，对整体磨矿效果产生不利影响。入磨粒级 0.3~0.6 mm时，M 值取得峰值 78.87%，随着入磨物料粒级进一步降低，混合球磨矿效果进一步增强，但陶瓷球的 P_{80} 显著降低，M 值在 78%左右，说明入磨粒级 0.15~0.3 mm 和 0.074~0.150 mm 时，陶瓷球具备较好的磨矿效果。入磨粒级 0.3~0.6 mm、0.15~0.3 mm和 0.074~0.15 mm 时，M 值在 78%左右，说明对 P_{80} 而言，相比于全陶瓷球磨矿，混合球采用 50%的钢球配比可以实现 80%钢球配比的磨矿效果。

2.2　混合粒级下入磨粒度对磨矿指标的影响

2.2.1　混合粒级磨矿试验产品粒度分布特征与分析

以-0.6 mm 粒级作为混合粒级磨矿试验的入磨粒级，采用混合球和钢球作为磨矿介质，混合粒级磨矿产品筛下负累计粒度曲线如图 3 所示，各项技术指标如表 4 所示。



(a) -3 mm; (b) -2 mm; (c) -1 mm; (d) -0.6 mm

图 3　混合粒级磨矿产品筛下负累计粒度曲线

Fig. 3　Negative cumulative distribution curves for grinding products of materials in mixed size ranges

由图 3 和表 4 可知，在入磨物料粒级由-3 mm 降至-0.6 mm过程中，钢球磨矿产品的-0.074 mm 粒级

磨矿技术效率逐渐增加,新生-0.074 mm粒级占比基本不变,但在入磨粒级为-0.6 mm时出现降低,这说明钢球对+1 mm的入磨物料具有较优的磨矿效果,入磨物料粒级为-1 mm时,钢球的磨矿效果下降。

表4 混合粒级磨矿试验产品技术指标

Table 4 Technical indicators of grinding products of materials in mixed size ranges

入磨物料粒级/mm	磨矿介质	磨矿技术效率/%	新生-0.074 mm粒级占比/%	新生-0.019 mm粒级占比/%
-3	钢球	45.57	30.23	17.16
	混合球	14.82	9.91	5.11
-2	钢球	45.73	29.74	17.68
	混合球	14.75	9.82	4.38
-1	钢球	52.82	31.34	20.09
	混合球	15.74	9.56	4.97
-0.6	钢球	58.79	25.69	17.97
	混合球	53.47	23.71	15.30

相比钢球,入磨粒级对混合球的磨矿效果影响更大。入磨物料粒级由-3 mm降至-1 mm,混合球磨矿产品各项指标较差且变化不大,说明在此入磨物料粒级区间,混合球磨矿效果明显不及钢球。入磨物料粒级由-1 mm进一步下降至-0.6 mm时,混合球磨矿产品的-0.074 mm粒级磨矿技术效率由15.74%提升至53.47%,对应的钢球指标为58.79%;新生-0.074 mm粒级占比由9.56%升高至23.71%,对应的钢球指标为25.69%;新生-0.019 mm粒级占比由4.97%升高至15.30%,对应的钢球指标为17.97%;说明入磨物料粒级-0.6 mm时,混合球的磨矿效果大幅提升至与钢球近似。

2.2.2 混合粒级磨矿试验产品磁选试验结果与分析

以-0.6 mm不同磨矿介质的磨矿产品为原料,在程潮铁矿选矿厂现场生产条件下进行磁选验证试验,结果如表5所示。

表5 磨矿产品磁选验证试验结果

Table 5 Verification test results of magnetic separation for grinding products

磨矿介质	产品名称	产率/%	品位/%	回收率/%	选矿效率/%
钢球	磁选精矿	54.40	64.47	88.88	67.46
	磁选尾矿	45.60	9.62	11.12	
	原矿	100.00	39.46	100.00	
混合球	磁选精矿	53.58	64.89	88.11	68.00
	磁选尾矿	46.42	10.11	11.89	
	磁选原矿	100.00	39.46	100.00	

钢球磨矿产品经一次磁选,精矿品位为64.47%、回收率为88.88%,选矿效率为67.46%;混合球磨矿产品经一次磁选,精矿品位为64.89%、回收率为88.11%、选矿效率为68.00%。这表明采用混合球进行磨矿,磨矿产品在粒度较钢球偏粗的情况下,其选矿效率略优于钢球。

3 结论

1) 对于不同单一入磨粒级的物料,在磨矿效果上均表现为钢球>混合球>陶瓷球。单一入磨粒级2~3 mm、1~2 mm时,陶瓷球与钢球混合使用会降低整体磨矿效果;单一入磨粒级0.6~1 mm、0.3~0.6 mm、0.15~0.30 mm、0.074~0.15 mm时,陶瓷球与钢球混合使用时产生的协同效应开始对整体磨矿效果产生增益效果;单一入磨粒级0.3~0.6 mm、0.15~0.30 mm、0.074~0.15 mm时,相比全陶瓷球,混合球采用50%的钢球配比可以实现钢球配比80%的磨矿效果;单一入磨粒级0.074~0.15 mm时,混合球具备与钢球相似的磨矿效果。

2) 混合粒级磨矿试验中,入磨物料粒度变化对混合球的磨矿效果影响显著,入磨粒级为-1 mm、-2 mm、-3 mm时,混合球磨矿效果明显差于钢球。入磨粒级为-0.6 mm时,混合球的磨矿效果大幅提升,与钢球近似,同时磨矿产品的磁选效果略优于钢球,说明入磨物料粒级为-0.6 mm时,可以采用混合球替代钢球进行磨矿。

参考文献(References):

[1] 庞然,仵云超,李颖. 我国铁矿采选企业低碳路径探究[J]. 内蒙古科技大学学报, 2023,42(4):403-408.
PANG Ran, WU Yunchao, LI Ying. Exploration of low-carbon pathways for iron ore mining enterprises in China[J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2023,42(4):403-408.

[2] 韩跃新,张小龙,高鹏,等. 中国铁矿石选矿技术发展与展望[J]. 金属矿山, 2024(2):1-24.
HAN Yuexin, ZHANG Xiaolong, GAO Peng, et al. Development and prospect of iron ore processing technologies in China[J]. Metal Mine, 2024(2):1-24.

[3] 王彩云,魏炜,郑腾腾,等. 铁矿采选企业节能潜力分析[J]. 工业安全与环保, 2024,50(10):99-102.
WANG Caiyun, WEI Wei, ZHENG Tengteng, et al. Analysis on energy saving potential of iron ore mining and dressing enterprises[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2024,50(10):99-102.

[4] 李腾飞,林蜀勇,张博,等. 不同转速率下球磨机内钢球的碰撞研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019,50(2):251-256.
LI Tengfei, LIN Shuyong, ZHANG Bo, et al. Study on collisions of steel balls in grinding mill at different rotation speeds[J]. Journal of

Central South University (Science and Technology), 2019,50(2):251-256.

[5] ZHANG X L, QIN Y H, HAN Y X, et al. A potential ceramic ball grinding medium for optimizing flotation separation of chalcopyrite and pyrite[J]. Powder Technology, 2021,392:167-178.

[6] FANG X, WU C B, LIAO N N, et al. The first attempt of applying ceramic balls in industrial tumbling mill:A case study[J]. Minerals Engineering, 2022,180:107504.

[7] 钟久祥,曾冲,赖俊全,等. 瓷球磨矿在行洛坑钨矿中的工业应用[J]. 中国钨业, 2022,37(5):50-55.
ZHONG Jiuxiang, ZENG Chong, LAI Junquan, et al. Industrial application of porcelain ball grinding in Xingluokeng tungsten mine[J]. China Tungsten Industry, 2022,37(5):50-55.

[8] 林圆圆,杨会兵,王俊浩,等. 纳米陶瓷球在某铁矿二段磨矿中的应用[J]. 现代矿业, 2022,38(12):249-251.
LIN Yuanyuan, YANG Huibing, WANG Junhao, et al. Application of nano ceramic ball in second stage grinding of an iron ore[J]. Modern Mining, 2022,38(12):249-251.

[9] 齐美超,曾冲,李保健,等. 张庄铁矿二段磨矿优化研究及应用[J]. 现代矿业, 2024,40(9):183-186.
QI Meichao, ZENG Chong, LI Baojian, et al. Research and application of second stage grinding optimization in Zhangzhuang iron mine[J]. Modern Mining, 2024,40(9):183-186.

[10] 姚鑫,吴新义,曾冲,等. 某磁铁矿瓷球精确化磨矿及工业应用[J]. 矿冶工程, 2024,44(5):61-65.
YAO Xin, WU Xinyi, ZENG Chong, et al. Experimental study and industrial application of porcelain ball in precise grinding of magnetite ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(5):61-65.

[11] 邓中诚. 不同介质对磁铁矿细磨的影响及其作用机理研究[D]. 内蒙古科技大学, 2023.
DENG Zhongcheng. Study on the effect and mechanism of different media on fine grinding of magnetite[D]. Inner Mongolia University of Science and Technology, 2023.

[12] FANG X, WU C B, LIAO N N, et al. Understanding the energy-saving mechanism of ceramic balls in tumbling mills[J]. Minerals Engineering, 2024,218:108982.

[13] WU C B, CHEN Z L, LIAO N N, et al. Enhancing the grinding efficiency of a magnetite second-stage mill through ceramic ball optimization: From laboratory to industrial applications[J]. Minerals, 2024,14(2):160.

[14] 吴彩斌. 无钢球磨矿能耗基础及其工艺发展趋势[J]. 中国钨业, 2022(5):1-6.
WU Caibin. The theoretical foundation and development trend of non-steel-ball grinding technology[J]. China Tungsten Industry, 2022(5):1-6.

[15] YU J W, AN Y X, GAO P, et al. High pressure grinding roll and magnetic separation for energy saving in grinding and simultaneously improving processing capacity: A case study of a magnetite ore[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2024,41(3):1509-1522.

[16] LIU L, TAN Q, LIU L, et al. Comparison of different comminution flowsheets in terms of minerals liberation and separation properties[J]. Minerals Engineering, 2018, 125:26-33.

[17] 陈睿哲,孙永升,刘杰,等. 高压辊磨机碎磨新工艺国内外研究及应用现状[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(5):24-33.
CHEN Ruizhe, SUN Yongsheng, LIU Jie, et al. Research and application status of new grinding process of high pressure grinding mill at home and abroad[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(5):24-33.

[18] 侯英,徐亦元,杨洪英,等. 高压辊磨操作参数对磁铁矿石球磨功指数的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018,49(1):8-14.
HOU Ying, XU Yiyuan, YANG Hongying, et al. Influence of operating parameters of high pressure grinding rolls on bond work index of ball mill of magnetite ore[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018,49(1):8-14.

[19] 何亚民,魏勇,丁亚卓,等. 一种干式物料超精细分级设备:CN202311044042.0[P]. 2023-11-14.
HE Yamin, WEI Yong, DING Yazhuo, et al. A dry material ultra-fine classification equipment:CN202311044042.0[P]. 2023-11-14.

[20] 黄雯,刘曙,李鹏飞,等. 纳米陶瓷球在程潮选厂二段磨矿中的应用试验[J]. 金属矿山, 2024(10):132-138.
HUANG Wen, LIU Shu, LI Pengfei, et al. Experimental study of nano-ceramic balls in second-stage grinding of Chengchao concentrator[J]. Metal Mine, 2024(10):132-138.

引用本文:周仙霖,蒋佳颖,陈铁军,等. 入磨物料粒度特性对一段磨矿中纳米陶瓷球取代钢球的影响[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):72-77.
ZHOU Xianlin, JIANG Jiaying, CHEN Tiejun, et al. Influence of particle size of grinding materials on replacement of nano-ceramic balls for steel balls in primary grinding[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):72-77.