陶瓷球用于某磁铁矿选矿厂二段细磨的可行性研究

赵志敏,朱 磊,赵哲麟

(内蒙古包钢钢联股份有限公司巴润矿业分公司,内蒙古 包头 014080)

摘 要:陶瓷球具有密度低、耐磨性好等特点,使用寿命长,可降低能耗 15% 以上。为降低某磁铁矿选矿厂能耗并提高铁粗精矿再磨效率,以该选矿厂二次分级沉砂物料为研究对象,开展了陶瓷球、钢球以及陶瓷球 + 钢球等不同磨矿介质的磨矿特性试验。试验结果表明,采用陶瓷球部分替代钢球作为二段细磨介质完全可行。

关键词:磨矿介质;陶瓷球;磁铁矿;能耗

中图分类号:TF12 **文献标识码**:B **文章编号**:1009 - 5438(2025)06 - 0019 - 04

Feasibility Study on Applying Ceramic Ball in Secondary Stage Fine Grinding of A Magnetite Beneficiation Plant

Zhao Zhimin, Zhu Lei, Zhao Zhelin

(*Barun Mining Branch Co. of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014080, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: The ceramic ball is with such characteristics as low density, good wear resistance and long service life so that energy consumption could be reduced by over 15%. In order to reduce energy consumption and improve regrinding efficiency of iron rough concentrate of a magnetite beneficiation plant, the characteristic tests of ore grinding with different grinding media including ceramic ball, steel ball and ceramic ball + steel ball are carried out by taking the sand setting materials of secondary grading in the beneficiation plant as the research object. The test results showed that it was completely feasible to apply ceramic ball to replace part of steel ball as the grinding medium of secondary stage fine grinding.

Key words: grinding medium; ceramic ball; magnetite; energy consumption

合适的入选粒度是选矿取得良好指标的前提,磨矿作业可使目的矿物与脉石矿物充分解离[1-3]。磨矿作业能耗巨大,占整个选矿厂总能耗的 70%,在磁选矿厂中该比例可高达 75% 以上,因此磨矿工序是节能降耗的重点环节。随着国家“双碳”目标的推进,节能降耗已成为选矿行业发展的必然要求。陶瓷球作为一种新型磨矿介质[4-5],具有密度低、耐磨、耐腐蚀、无铁质污染等优点[6-8]。为此,本文以白云鄂博某磁铁矿选矿厂二段磨机(Φ5.03 m × 6.4 m 溢流型球磨机)给矿物料为研究对象,探讨陶瓷球替代该段钢球磨矿介质的磨矿特性。

1 试验样品与设备

1.1 试验样品

本次试验样品取自白云鄂博某磁铁矿选矿厂二次分级沉砂,样品经过滤、烘干后,通过混合法混匀,

收稿日期:2025 - 04 - 25

作者简介:赵志敏(1989 -),男,内蒙古包头市人,工程师,现从事选矿技术工作。

整体装入塑料桶中作为试验原料备用。采用环刀缩分法制样后,再以四分法点取试样,进行物料粒度分析。二次分级沉砂物料粒度分析结果见表1。为便于评价磨矿产品质量,根据本磁铁矿选矿厂的二段磨矿产品粒度要求,定义+0.074 mm粒级为欠磨粒级,表征磨矿不足;定义0.074~0.045 mm粒级为合格磨粒级,表征适合后续磨矿选别作业。

表1 试样粒度分析

粒级/mm	产率/%
+0.074	58.76
-0.074	41.24
-0.045	16.52

1.2 试验设备

试验设备为武汉探矿机械厂生产的XMB-Φ240 mm×300 mm球磨机。纳米复合陶瓷球(后简称陶瓷球)主要成分为Al_2O_3,密度为3.8 g/cm^3,莫氏硬度≥9,压碎强度≥300 MPa,主要规格为Φ25 mm、Φ30 mm、Φ35 mm。钢球采用轧制钢球,密度为7.8 g/cm^3,主要规格同样为Φ25 mm、Φ30 mm、Φ35 mm。

2 试验过程

2.1 初装球级配及磨矿时间试验

此次试验旨在通过试验结果,优化现场二段磨机磨矿时间,后续采用"单一变量"法确定磨机最佳磨矿浓度、磨机填充率、介质搭配及级配等关键工艺因素,探索将二段磨矿介质由原来的Φ50 mm钢球更换为Φ35 mm陶瓷球的可行性。

现场二段磨机钢球填充率为27%~30%,磨矿浓度为80%左右,磨矿产品中-0.074 mm粒级产率为61%~65%、-0.045 mm粒级产率为27%~33%。初期将填充率调整为30%,磨矿介质均为钢球,级配方案Φ35 mm∶Φ30 mm∶Φ25 mm=33.9%∶40.4%∶25.7%,为保证试验的可对比性,每批次试验干矿样均为3 kg。

第一组试验将磨矿时间定为6 min,试验参数及结果见表2。

表2 钢球磨矿产品粒度数据(磨矿时间6 min)

批次	磨矿时间/min	磨矿浓度/%	填充率/%	-0.074 mm粒级产率/%	-0.045 mm粒级产率/%
1	6	80	30	70.16	38.08
2	6	80	30	73.76	37.88
平均值	6	80	30	71.96	37.98

由表2数据可知,磨矿产品中细粒级(-0.074 mm、-0.045 mm)产率明显大于现场生产实际,表明实验室设定的6 min磨矿时间过长,超过了现场实际的磨矿时间,因此在保证其他参数不变的条件下需缩短磨矿时间和调整介质级配。

第二组试验将磨矿时间调整为4 min,级配调整为Φ35 mm∶Φ30 mm∶Φ25 mm=32.4%∶40.7%∶26.9%,试验参数及结果见表3。

表3 钢球磨矿产品粒度数据(磨矿时间4 min)

批次	磨矿时间/min	磨矿浓度/%	填充率/%	-0.074 mm粒级产率/%	-0.045 mm粒级产率/%
1	4	80	30	61.6	32.44
2	4	80	30	63.76	33.36
平均值	4	80	30	62.68	32.90

由表3数据可知,磨矿产品中细粒级(-0.074 mm、-0.045 mm)产率均与现场生产实际相吻合,说明磨矿时间制定合理。二段磨机长度为6.4 m,则磨机内矿浆流速为0.026 7 m/s。

2.2 磨矿浓度试验

第三组试验将磨矿质量浓度分别定为80%、78%、75%、73%,在溢流型球磨机中,矿浆流速受多个因素影响,包括矿浆的流变特性、磨机填充率、转速等。在填充率和转速不变的情况下,矿浆流速主要受浓度变化影响。根据经验公式:

$$V \propto \frac{1}{\mu} \tag{1}$$

式中，v 为矿浆流速，μ 为矿浆粘度，由公式(1) 可知矿浆流速 v 与矿浆粘度 μ 成反比。矿浆粘度 μ 主要受矿浆浓度 C 的影响。二者之间的关系可表述为：

$$\mu = f(C)，且\frac{d\mu}{dC} > 0 \tag{2}$$

综合公式(1) 与关系(2) 可知，在矿浆浓度升高时，其粘度的增大会直接导致矿浆流速的降低。

根据浆体流变模型推导近似形式：

$$v = v_0 \times \left(\frac{C_0}{C}\right)^n \tag{3}$$

式(3) 中，v 为待求的矿浆流速；v_0 为基准矿浆流速(已知 v_0 = 0.026 7 m/s)；C_0 为基准磨矿质量浓度，C 为新的磨矿质量浓度；n 为经验指数(基于特定浓度区间内的线性拟合结果，n = 1)。

当磨矿质量浓度分别是 80%、78%、75%、73% 时，磨矿时间分别设定为 4 min、3.85 min、3.7 min、3.6 min。磨矿介质全部采用陶瓷球，介质填充率为 30%，级配 Φ35 mm∶Φ30 mm∶Φ25 mm = 32.4%∶40.7%∶26.9%，试验参数及结果见表 4。

表 4　陶瓷球磨矿产品粒度数据(填充率 30%)

批次	磨矿时间/min	磨矿浓度/%	填充率/%	−0.074 mm 粒级产率/%	−0.045 mm 粒级产率/%
1	4	80	30	51.76	29.64
2	3.85	78	30	51.56	25.12
3	3.7	75	30	51.32	23.52
4	3.6	73	30	51.04	23.32

由表 4 可知，采用纯陶瓷球作为二段磨矿介质时，随着磨矿浓度降低磨矿产品中细粒级(−0.074 mm、−0.045 mm)产率逐渐降低，由于二段磨矿为闭路流程，若 +0.074 mm 粗粒级不能被有效粉碎，将导致循环负荷显著增加，进而引发磨机“胀肚”及进料端“返矿”等生产故障，因此不再做更低浓度试验。

2.3　磨矿介质试验

由表 4 数据可知，磨矿介质全部采用陶瓷球时，介质对物料的冲击作用较弱，且随着磨矿浓度的降低，磨矿效果变差。因此第四组试验将磨矿质量浓度调整为 80%、填充率为 30%，采用钢球 + 陶瓷球组合作为细磨介质。Φ35 mm 介质采用钢球、Φ30 mm采用陶瓷球、Φ25 mm 采用陶瓷球，级配 Φ35 mm∶Φ30 mm∶Φ25 mm = 49.5%∶30.4%∶20.1%。试验参数及结果见表 5。

表 5　钢球 + 陶瓷球磨矿产品粒度数据(填充率 30%)

批次	磨矿时间/min	磨矿浓度/%	填充率/%	−0.074 mm 粒级产率/%	−0.045 mm 粒级产率/%
1	4	80	30	56.28	28.08

由表 5 可知，磨矿介质采用“钢球 + 陶瓷球”后，−0.074 mm 细粒级产率较全部采用陶瓷球有所提高，但仍未达现场目标粒级产率下线；−0.045 mm细粒级产率超现场目标粒级产率下限。

2.4　磨矿介质填充率试验

因实验室磨机有效容积限制，若小幅度提高填充率，填充率测量误差较大，故将填充率提高至 40%，分别开展第五组全陶瓷球试验、第六组“钢球 + 陶瓷球”试验。在实际生产中，填充率过高可能导致磨矿介质淹没进料口，影响正常给矿，同时，过高的填充率会改变介质的运动状态，从高效的“抛落式”向效率较低的“泻落式”或无效的“离心式”转变，从而降低磨矿效率。因此不再做高填充率试验，一般溢流型球磨机填充率为 35% ~40% 较优。因填充率对磨矿时间影响较小，故提高填充率后，相同磨矿质量浓度时磨矿时间不再做调整。将磨矿质量浓度分别调整为 80%、78%、75%、73%，开展第五组、第六组试验。第五组试验，磨矿介质全部采用陶瓷球，级配为 Φ35 mm∶Φ30 mm∶Φ25 mm = 42.9%∶34.4%∶22.7%，试验参数及结果见表 6。

表6 陶瓷球磨矿产品粒度数据(填充率40%)

批次	磨矿时间/min	磨矿浓度/%	填充率/%	-0.074 mm粒级产率/%	-0.045 mm粒级产率/%
1	4	80	40	57.36	24.74
2	3.85	78	40	53.72	23.50
3	3.7	75	40	52.96	21.98
4	3.6	73	40	50.56	21.10

由表6数据可知,填充率为40%,采用陶瓷球作为二段磨矿介质时,随着磨矿浓度降低,磨矿产品中细粒级(-0.074 mm、-0.045 mm)产率逐渐降低。且均低于现场目标粒级产率下限。

第六组试验,磨矿介质采用钢球+陶瓷球,Φ35 mm介质采用钢球、Φ30 mm采用陶瓷球、Φ25 mm采用陶瓷球,级配为Φ35 mm:Φ30 mm:Φ25 mm=66.7%:23.7%:15.7%,试验参数及结果见表7。

表7 钢球+陶瓷球磨矿产品粒度数据(填充率40%)

批次	磨矿时间/min	磨矿浓度/%	填充率/%	-0.074 mm粒级产率/%	-0.045 mm粒级产率/%
1	4	80	40	62.16	30.30
2	3.85	78	40	62.40	28.26
3	3.7	75	40	58.16	28.22
4	3.6	73	40	57.44	26.26

由表7数据可知,采用"钢球+陶瓷"作为磨矿介质,磨矿产品中细粒级(-0.074 mm、-0.045 mm)产率较高,均高于现场目标粒级产率下限。磨矿浓度与磨矿产品目标粒级产率关系为,随着磨矿浓度的降低,磨矿产品中-0.074 mm细粒级产率先升高后降低。当磨矿浓度低于78%,磨矿产品中细粒级(-0.074 mm、-0.045 mm)产率难以达现场生产目标粒级下限。

3 结论

(1)在填充率为40%、磨矿浓度为80%条件下,采用陶瓷球替代部分钢球作为二段细磨介质,磨矿产品中目标粒级(-0.074 mm、-0.045 mm)的产率均优于现场生产控制指标的下限,满足生产工艺要求。

(2)陶瓷球密度低、耐磨性强,可有效地降低磨矿能耗及介质消耗,具备在二段细磨中部分替代钢球的可行性。

参考文献

[1] 周洪林.纳米陶瓷球在金属矿细磨中的应用及前景[J].现代矿业,2022,38(7):192-196,200.

[2] 段希祥.碎矿与磨矿[M].北京:冶金工业出版社,2012.

[3] 陈如凤,缪建成,胡继华.磨矿分级作业提效降耗技术改造与应用实践[J].有色金属(选矿部分),2022(3):103-107.

[4] 廖宁宁,吴彩斌,吴志强,等.纳米陶瓷球对铜硫矿磨矿和浮选的影响[J].有色金属工程,2019,9(1):70-76.

[5] 叶景胜,廖宁宁,吴志强,等.钢锻作为细磨介质下的磨矿能耗与粒度分布特征[J].有色金属科学与工程,2018,9(6):65-71.

[6] 吴冬,高宏伟,刘伟,等.中条山有色金属集团磁选厂选矿工艺优化改进[J].矿冶,2017,26(5):36-40.

[7] 彭操,刘江林.降低磨矿能耗技术在选矿厂中的应用剖析[J].云南化工,2008(2):65-69.

[8] 肖庆飞,石贵明,段希祥.新型细磨介质的材质选择及应用研究[J].矿冶,2006(1):15-17.