

东鞍山混磁精矿搅拌磨与球磨对比试验

苏兴国¹, 杨光¹, 陈国荣¹, 白哲²

1. 鞍山钢铁集团有限公司 东鞍山烧结厂, 辽宁 鞍山 114000;
2. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819

中图分类号: TD921+.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2021)01-0113-09
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2021.01.016

摘要 鞍钢东鞍山烧结厂原矿主要以细粒嵌布的赤铁矿和磁铁矿为主,为解决现场球磨机效率低、有用矿物单体解离度低等问题,进行了陶瓷球搅拌磨、球磨工艺的优化和对比试验。试验结果表明,搅拌磨适宜条件为充填率80%、料球比0.9、磨矿质量浓度60%、介质尺寸6 mm、搅拌器转速650 r/min;球磨适宜条件为介质质量配比为 $m(32\text{ mm}) : m(25\text{ mm}) : m(19\text{ mm})$ 为5:3:2、充填率40%、料球比1.0、磨矿质量浓度70%。此时搅拌磨机磨矿效果更好, -0.038 mm 比生产率达3 636.20 kg/($\text{m}^3 \cdot \text{h}$),磨矿效率达71.93 kg/($\text{kW} \cdot \text{h}$)。相同细度样品分析表明,搅拌磨产品中过细和过粗粒级含量均相对较少,有用矿物单体解离度比球磨机高4.5%~8%。反浮选试验表明,搅拌磨可将精矿铁品位和回收率分别提高0.94和2.99个百分点。因此,搅拌磨机比球磨机具有更好的磨矿效果和浮选指标。

关键词 搅拌磨;球磨;东鞍山铁矿石;比生产率;磨矿效率;单体解离度

引言

中国铁矿资源储量丰富,但普遍具有铁品位低、矿物结晶粒度细、组成复杂的特点,97%以上的铁矿石需要经过选矿才能入炉冶炼^[1]。近年来,我国铁矿石进口量高达10亿t/a左右,持续高位运行。近五年我国铁矿石进口量及对外依存度如表1所示。对外依存度连续5年超过80%,屡创新高,已严重威胁到我国的战略资源安全^[2-5]。

表1 我国铁矿石供需量及对外依存情况

Table 1 The iron ore supply, demand and foreign dependence of China

| 年份 | 粗钢产量 /亿 t | 铁矿石用量 /亿 t | 铁矿石进口量/亿 t | 对外依存度/% |
|------|--------------|---------------|------------|---------|
| 2015 | 8.04 | 11.41 | 9.53 | 84.20 |
| 2016 | 8.08 | 11.47 | 10.24 | 86.80 |
| 2017 | 8.32 | 12.29 | 10.75 | 86.70 |
| 2018 | 9.28 | 12.18 | 10.38 | 85.10 |
| 2019 | 9.96 | 13.05 | 10.70 | 81.10 |

磨矿作业作为选前准备的重要一环,不仅直接影响着后续选别指标,还大幅增加了选别成本。搅拌磨机作为一种新型粉磨设备具有能效高、节省介质、安装简便和易于操作等显著优点^[3,6]。与普通球磨机不同,搅拌磨装备的筒体静止,通过搅拌装置旋转带动筒体内研磨介质和矿物相互作用。研究及应用实践表明,在矿物粒度小于100 μm 时,搅拌磨装备的细磨效率远高于普通卧式球磨机,这主要因为其允许研磨介质更小,搅拌装置线速度更高,使得能量尽可能耗散在细磨矿物中^[7-10]。同时,其细磨物料的主要方式为研磨,单位容积能量密度高,在相同处理量下其规格较小。另外,采用陶瓷球作为磨矿介质,还可以大幅降低介质损耗^[11-14]。因此,立式搅拌磨机在细磨作业中有很好的应用前景。

东烧厂原矿中有用矿物与脉石矿物嵌布关系复杂,主要铁矿物大多以细粒或极细粒嵌布为主,易产生过磨泥化现象。现场采用球磨机磨矿,存在产品粒度粗细不均、磨矿效率低、有用矿物单体解离度不够及磨矿能耗较高等问题^[15-16]。为此,本试验采用新型陶瓷

球搅拌磨展开试验,对东烧厂混磁精矿进行了磨矿工艺优化和对比研究,得到最优工艺条件并对比了陶瓷球搅拌磨机和传统球磨机的 -0.038 mm 比生产率、-0.038 mm 磨矿效率、产品粒度分布及有用矿物单体解离度等指标。本研究期望对类似选厂细磨技术优化提供参考,实现矿石的高效粉磨和降本减耗。

1 试验原料

本试验原料为东鞍山烧结厂球磨机给矿,矿石主要呈浸染状构造、条纹状和波纹状构造,矿物构造主要表现为赤铁矿的自形晶结构,磁铁矿的半自形晶结构,两种及两种以上矿物之间交代结构等。其化学多元素分析结果见表 2,铁化学物相分析结果见表 3。

表 2 铁矿石样品的化学多元素组成 /%

Table 2 Chemical multi-element composition of iron ore samples

| 成分 | TFe | FeO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | CaO | MgO | S | P | 烧失 |
|----|-------|------|------------------|--------------------------------|------|------|------|------|------|
| 含量 | 33.35 | 5.84 | 45.78 | 0.59 | 0.71 | 0.62 | 0.02 | 0.08 | 3.28 |

由表 2 可知,矿石中 TFe 品位 33.35%,FeO 含量 5.84%,磁性率 17.51%,该矿石为氧化矿石;矿石中 SiO₂ 含量为 45.78%,初步判定主要脉石矿物为石英;P 含量 0.08%,S 含量 0.02%,说明矿石中硫、磷等有害元素含量不高;CaO 和 MgO 含量偏高。

表 3 东鞍山铁矿石铁化学物相分析结果 /%

Table 3 Chemical phase analysis of iron ore in Donganshan

| 铁物相 | 赤褐铁矿 | 磁性铁矿 | 碳酸铁矿 | 硅酸铁矿 | 硫化铁矿 | TFe |
|-----|-------|-------|------|------|------|--------|
| | 中的铁 | 物中的铁 | 物中的铁 | 物中的铁 | 物中的铁 | |
| 含量 | 24.05 | 6.94 | 2.45 | 0.10 | 0.03 | 33.57 |
| 分布率 | 71.65 | 20.69 | 7.30 | 0.30 | 0.08 | 100.00 |

由表 3 可知,矿石中的铁主要分布在赤褐铁矿中,含量为 24.05%,分布率达 71.65%;其次分布在磁性铁和碳酸铁中,分布率分别为 20.69% 和 7.30%;还有少量铁矿物分布在硅酸铁和硫化铁中。

表 4 矿石中矿物组成及含量统计结果 /%

Table 4 Statistics of mineral composition and content in ore

| 矿物名称 | 赤铁矿 | 磁铁矿 | 黄铁矿 | 褐铁矿 | 石英 | 绿泥石 | 碳酸盐矿物 |
|------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|
| 含量 | 29.29 | 16.78 | 0.15 | 0.01 | 34.12 | 12.57 | 7.08 |

采用 XRD 进行了矿物组成分析,结果如图 1 所示。矿石中的主要矿物为石英、赤铁矿、磁铁矿及绿泥石。结合光学显微镜对矿石光片、薄片的鉴定分析,进一步查明矿石的矿物组成及含量如表 4 所示。该铁矿石中的金属矿物主要为赤铁矿和磁铁矿,含量分别为

29.29% 和 16.78%,另有少量黄铁矿和褐铁矿。非金属矿物主要为石英、绿泥石和碳酸盐矿物,含量分别为 34.12%、12.57% 和 7.08%。

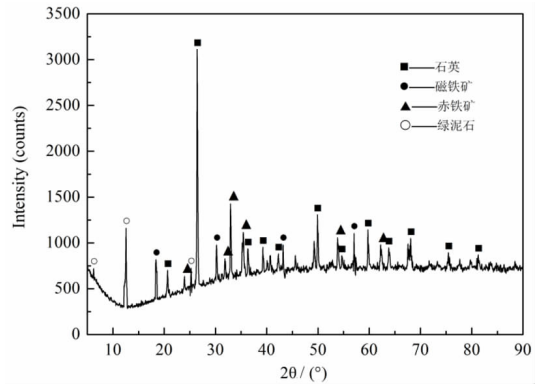


图 1 原矿 XRD 分析结果

Fig. 1 XRD analysis results of raw ore

原矿粒度分布见表 5,矿石中赤铁矿和磁铁矿的嵌布粒度见表 5。

表 5 原矿粒度组成 /%

Table 5 Grain-size composition of raw ore

| 粒度/μm | +100 | -100 +74 | -74 +45 | -45 +38 | -38 +10 | -10 | 合计 |
|-------|--------|----------|---------|---------|---------|-------|--------|
| 产率/% | 14.72 | 10.57 | 24.75 | 5.74 | 34.13 | 10.09 | 100.00 |
| 累计/% | 100.00 | 85.28 | 74.71 | 49.96 | 44.22 | 10.09 | — |

表 6 主要矿物嵌布粒度分布 /%

Table 6 Distribution of main mineral dissemination size

| 粒度/μm | +150-150 | +100-100 | -100 +75 | -75 +53 | -53 +37 | -37 |
|----------|----------|----------|----------|---------|---------|--------|
| 赤铁矿 含量/% | 8.65 | 11.12 | 10.48 | 12.67 | 20.61 | 36.47 |
| 累计/% | — | 19.77 | 30.25 | 42.92 | 63.53 | 100.00 |
| 磁铁矿 含量/% | 10.98 | 12.88 | 10.57 | 15.08 | 20.48 | 30.01 |
| 累计/% | — | 23.86 | 34.43 | 49.50 | 69.99 | 100.00 |

由表 6 可知,磁铁矿和赤铁矿的细度以细粒嵌布为主,且在细粒级中分布率高,分别为 30.25% 和 34.43%,这部分铁矿物较难从脉石中解离出来,易损失在尾矿中。通过工艺矿物学研究可知,磁铁矿和赤铁矿主要呈浸染状分布在脉石中,二者之间的嵌布关系较密切,彼此难以完全解离,尤其次生赤铁矿与磁铁矿多呈连晶体颗粒,彼此难以解离,对铁的回收有较大影响。

2 试验方法

(1) 搅拌磨机试验:采用 SLJM-2L 型立式超细搅拌磨机进行实验室搅拌磨试验,搅拌磨筒高 180 mm、直径 120 mm,搅拌轴直径 18 mm,销钉长 31 mm,销钉

直径 12 mm,共 5 组销钉,销钉间距为 30 mm。

(2)球磨机试验:采用 XMQ - Φ240 × 90 型锥形球磨机进行球磨试验。

(3)反浮选试验:采用 XFD 0.75 L 单槽浮选机,抑制剂为淀粉,活化剂为 CaO,捕收剂为现场捕收剂。分别对两种磨矿产品进行反浮选试验。

(4)采用比生产率和磨矿效率对磨机的磨矿效果进行定量评价。

比生产率是评价磨机在单位时间、单位有效体积新生成某个粒级的质量;磨矿效率是指单位能耗下,新生成某个粒级的质量。对于本研究以磨矿产品中新生成 -0.038 mm 的比生产率和磨矿效率作为评价指标。

$$q_{-0.038} = \frac{Q(\beta_p - \beta_f)}{Vt} \quad (1)$$

$$\mu_{-0.038} = \frac{Q(\beta_p - \beta_f)}{Pt} \quad (2)$$

$q_{-0.038}$ 为 -0.038 mm 比生产率, $t/(m^3 \cdot h)$; $\mu_{-0.038}$ 为 -0.038 mm 磨矿效率, $t/kW \cdot h$; Q 为新给入磨机内物料质量, kg; β_p, β_f 分别为磨矿产品和给料中 -0.038 mm 含量, %; V 为磨机有效容积, m^3 ; P 为磨机功率, W ; t 为磨矿时间, h 。

3 试验结果与讨论

3.1 搅拌磨工艺优化

3.1.1 介质充填率试验

搅拌磨机的介质充填率普遍比球磨机更大,一般达 70% ~ 80%。粉磨过程中,合适的充填率可使搅拌器充分搅动磨矿介质^[17-18]。试验用搅拌磨机有效容积为 1.79 L,固定料球比为 0.5,磨矿浓度(质量浓度)为 60%,搅拌器转速为 300 r/min,介质尺寸为 4 mm,磨矿时间为 3 min,进行充填率试验,结果见图 2。

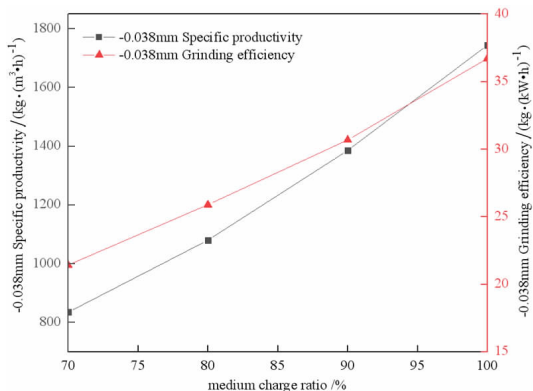


图 2 充填率对磨矿效果的影响规律
Fig. 2 Influence of filling rate on grinding effect

由图 2 可知,当介质充填率由 70% 增加到 100% 时, -0.038 mm 比生产率由 835.03 kg/(m³ · h) 逐渐增加至 1 744.74 kg/(m³ · h);磨矿效率由 21.43 kg/(kW · h) 逐渐增加到 36.72 kg/(kW · h)。综合考虑,确定适宜的陶瓷球充填率为 100%。

3.1.2 料球比试验

料球比是指物料的堆体积与介质之间的间隙体积之比。料球比过小会使处理量过小,球耗增大;料球比过大,会导致研磨不充分并降低磨矿效果^[19-20]。料球比试验固定介质充填率为 100%,试验结果见图 3。

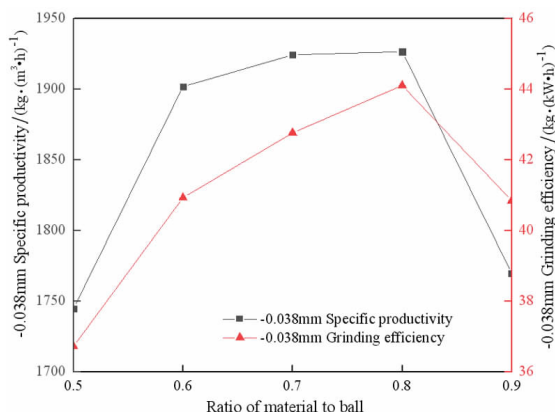


图 3 料球比对磨矿效果的影响规律
Fig. 3 Effect of material ball ratio on grinding effect

由图 3 可知,当料球比由 0.5 增加到 0.8 时, -0.038 mm 比生产率由 1 744.74 kg/(m³ · h) 逐渐增加至 1 926.74 kg/(m³ · h);磨矿效率从 36.72 kg/(kW · h) 逐渐增加到 44.11 kg/(kW · h);继续增加料球比,比生产率和磨矿效率均降低。综合考虑,选择适宜的料球比为 0.8。

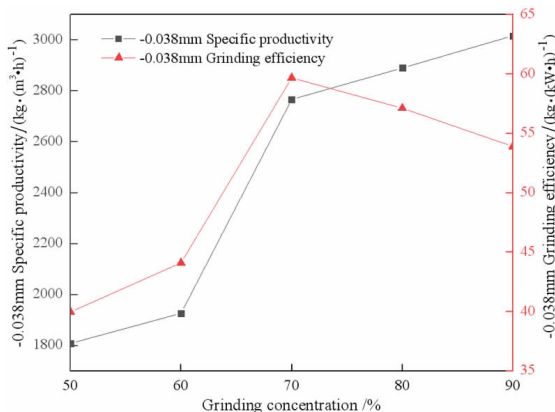


图 4 磨矿浓度对磨矿效果的影响规律
Fig. 4 Effect of grinding concentration on grinding effect

3.1.3 磨矿浓度试验

磨矿浓度试验固定陶瓷球充填率为 100%，料球比为 0.8，试验结果见图 4。

由图 4 可知，当磨矿浓度由 50% 增加到 70% 时，-0.038 mm 比生产率由 1 808.51 kg/(m³·h) 逐渐增加至 2 767.09 kg/(m³·h)；磨矿效率由 39.97 kg/(kW·h) 升至 59.68 kg/(kW·h)；当磨矿浓度继续增加至 90% 时，磨矿效率逐渐降低。综合考虑，确定适宜的磨矿浓度为 70%。

3.1.4 不同介质尺寸搅拌器转速试验

搅拌磨机作为一种中低速型细磨机械，其转速和介质尺寸对生产能力和产品细度有很大影响。搅拌转速越大，其物料粉磨效果越好，但转速过大，转轴会由于离心作用会出现粉磨死区，恶化磨矿效果。

试验固定充填率为 80%，料球比为 0.9，磨矿浓度为 60%，搅磨时间为 3 min，进行不同介质尺寸条件下，搅拌器转数对磨矿效果的影响试验。分别选择陶瓷球尺寸为 2 mm、4 mm 和 6 mm 进行试验，结果见图 5。

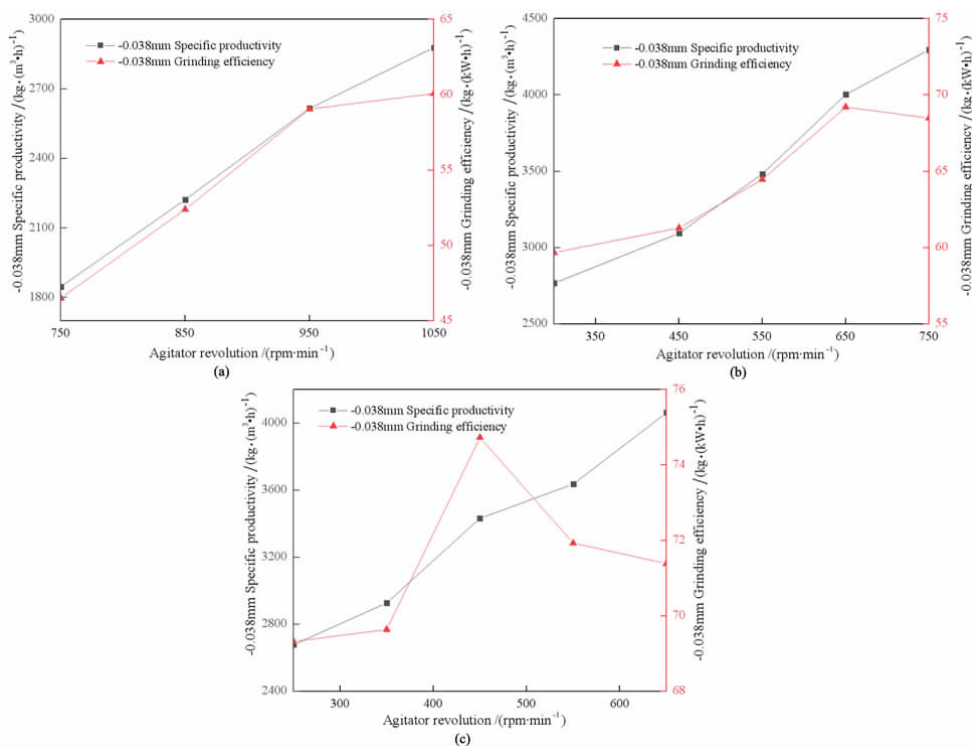


图 5 不同介质尺寸条件下搅拌器转速对磨矿效果的影响规律
Fig. 5 Effect of agitator speed on grinding effect under different medium sizes

由图 5 可知，2 mm、4 mm 和 6 mm 介质的最佳转速分别为 1 050 r/min、750 r/min 和 650 r/min，各球径最佳搅拌转速的磨矿效果见表 5。

表 7 不同球径最佳搅拌转速的磨矿效果对比

Table 7 Comparison of grinding effect of different ball diameter and optimum stirring speed

| 介质尺寸 /mm | 转速率 / (r·min ⁻¹) | 功率 /W | -0.038 mm 比生产率 /kg·(m ³ ·h) ⁻¹ | -0.038 mm 磨矿效率 /kg·(kW·h) ⁻¹ |
|----------|------------------------------|--------|--|---|
| 2 | 1 050 | 85.78 | 2 878.93 | 60.08 |
| 4 | 750 | 112.30 | 4 296.55 | 68.49 |
| 6 | 650 | 101.85 | 4 062.23 | 71.39 |

由表 7 可知，随着球径增加，-0.038 mm 比生产率及磨机功率都呈先升高后降低趋势，当球径由 2 mm

增加至 4 mm 时，磨机功率由 85.78 W 上升至 112.30 W，比生产率由 2 878.93 kg/(m³·h) 增加至 4 296.55 kg/(m³·h)；磨矿效率则呈逐渐上升趋势，当球径由 2 mm 增加至 6 mm 时，磨矿效率由 60.08 kg/(kW·h) 逐渐增加至 71.39 kg/(kW·h)。综合考虑，选择陶瓷球尺寸为 6 mm，转速为 650 r/min。

3.2 球磨工艺优化

采用实验室锥形球磨机进行优化试验。试验固定钢球 $m(32\text{ mm}) : m(25\text{ mm}) : m(19\text{ mm})$ 配比为 5 : 3 : 2、磨矿时间为 10 min、输出功率为 0.55 kW。分别进行介质充填率、料球比和磨矿浓度的条件优化试验，结果见图 6。

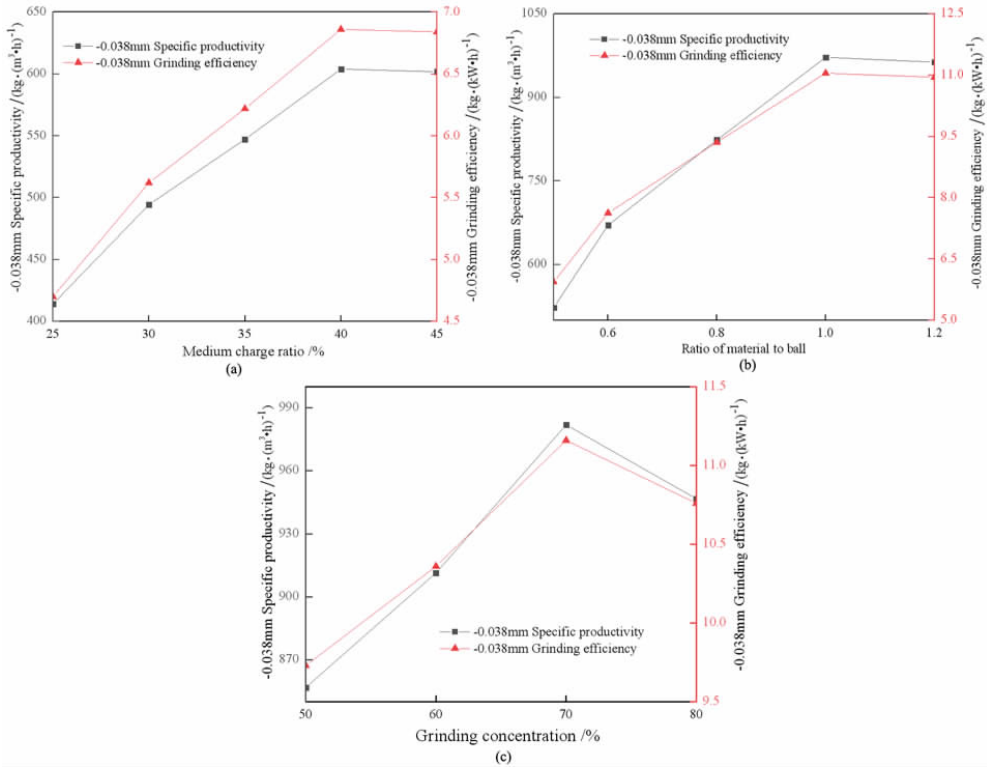


图 6 球磨工艺条件对磨矿效果的影响

Fig. 6 Influence of ball milling process conditions on grinding effect

由图 6 可知,当介质充填率、料球比和磨矿浓度逐渐增大时,磨矿产品 -0.038 mm 比生产率 and 磨矿效率都呈现先升高、后降低的趋势。当充填率为 40% 时磨矿效果最好,比生产率和磨矿效率分别达到 603.90 kg/(m³·h) 和 6.86 kg/(kW·h);当料球比为 1.0 时,比生产率和磨矿效率分别达到 972.16 kg/(m³·h) 和 11.05 kg/(kW·h);当磨矿浓度为 70% 时,比生产率和磨矿效率分别达到 981.91 kg/(m³·h) 和 11.16 kg/(kW·h);最终确定适宜的钢球充填率为 40%、料球比为 1.0、磨矿浓度为 70%。

3.3 磨矿产品对比研究

3.3.1 混磁精矿磨矿粒度曲线绘制

3.3.1.1 搅拌磨磨矿粒度曲线

根据 3.1 节试验,选取搅拌磨参数为:充填率 100%、料球比 0.8、磨矿浓度 70%、6 mm 陶瓷球、搅拌器转速 650 r/min,测定磨矿粒度曲线见图 7,产品粒度组成见图 8。

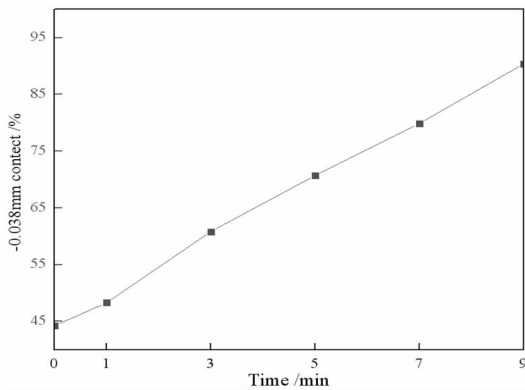


图 7 搅拌磨磨矿粒度曲线

Fig. 7 Particle size curve of stirred mill

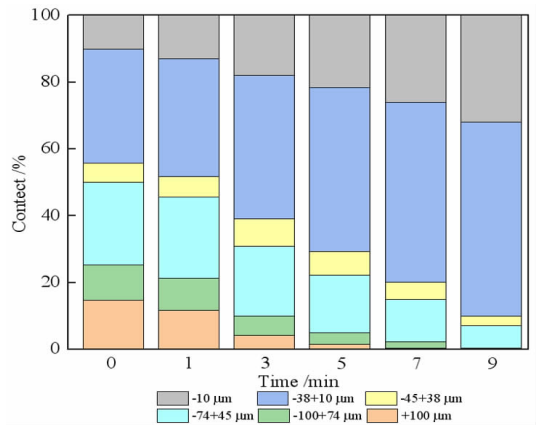


图 8 搅拌磨机磨矿产品粒度组成分析

Fig. 8 Analysis of particle size composition of stirred mill products

表 8 搅拌磨产品铁矿物单体解离度 /%

Table 8 Dissociation degree of iron mineral monomer in stirred mill products

| 磨矿时间/min | 0 | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 铁矿物解离度 | 51.35 | 58.76 | 76.67 | 83.66 | 86.22 | 89.10 |

由图 7、图 8 和表 8 可知,随着磨矿时间增加,磨矿产品中粗粒级含量明显减少, -45 + 38 μm、-38 + 10 μm、-10 μm 粒级含量明显上升;结合单体解离度分析,随着磨矿时间增长,铁矿物单体解离度也逐渐升高,由 51.35% 增至 89.10%。

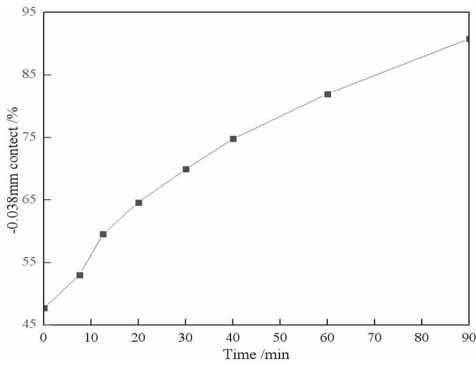


图 9 球磨机磨矿粒度曲线
Fig. 9 Grinding particle size curve of ball mill

3.3.1.2 球磨磨矿粒度曲线

由 3.2 节可知,混磁精矿最佳球磨参数为:介质配

比 m(32 mm) : m(25 mm) : m(19 mm) 为 5 : 3 : 2、充填率为 40%、料球比为 1.0、磨矿浓度为 70%。该条件下测定磨矿粒度曲线见图 9,产品粒度组成见图 10。

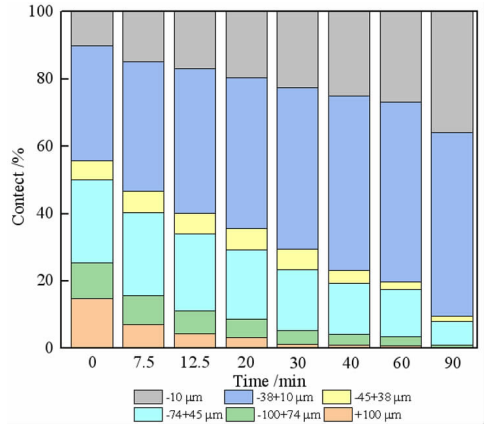


图 10 球磨机磨矿产品粒度组成分析
Fig. 10 Analysis of particle size composition of ball milled products

表 9 球磨产品铁矿物单体解离度

| 磨矿时间/min | 0 | 7.5 | 12.5 | 20 | 30 | 40 | 60 | 90 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 铁矿物解离度 | 51.35 | 65.84 | 72.75 | 74.85 | 77.41 | 79.52 | 82.62 | 85.99 |

由图 9、图 10 和表 9 可知,随着磨矿时间增加,磨矿产品中粗粒级含量明显减少, -38 + 10 μm、-10 μm

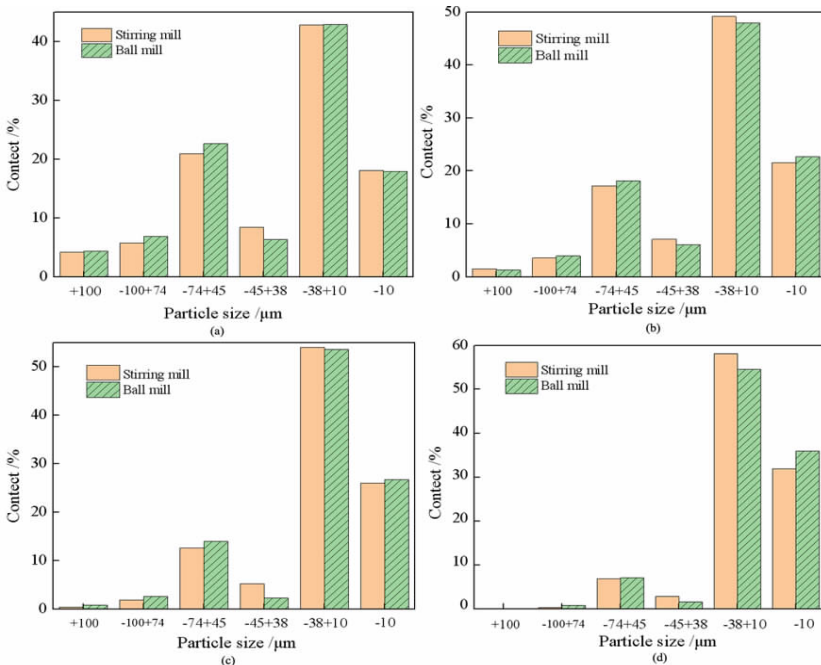


图 11 磨矿产品粒度组成对比
Fig. 11 Comparison of grain size composition of grinding products

粒级含量明显上升;结合单体解离度分析,随着磨矿时间增长,铁矿物单体解离度由由 51.35% 逐渐增至 85.99%。

3.3.2 两种磨矿工艺效果对比

3.3.2.1 产品细度及单体解离度对比

根据 3.3.1 节得到的两条磨矿粒度曲线,分别绘制了 -0.038 mm 含量为 60%、70%、80%、90% 的磨矿样品,并对其进行粒度组成分析及解离度分析,结果见图 11 和图 12。

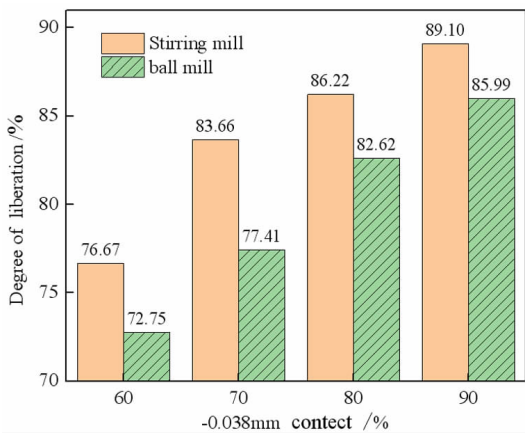


图 12 磨矿方式对铁矿物单体解离度的影响
Fig. 12 Effect of grinding methods on the dissociation of iron minerals

由图 11 所示试验结果可知,随着磨矿粒度逐渐增加,搅拌磨产品中过细粒级和过粗粒级含量均相对较

少,说明搅拌磨机不易出现过磨现象,不易泥化。由图 12 所示数据可知,相同磨矿粒度下,搅拌磨产品的单体解离度更高。-0.038 mm 含量占 70% 时,搅拌磨产品单体解离度比球磨高 6.19 个百分点。

由于微细粒级铁矿物不利于选别回收,因此陶瓷球搅拌磨更适合混磁精矿的再磨作业,相同细度条件下,搅拌磨机磨矿效果更佳,有用矿物单体解离度更高,更有利于后续选别。

3.3.2.2 浮选指标对比

两种磨矿产品“一粗一精三扫”反浮选闭路试验的数质量流程见图 13、图 14,浮选指标对比情况见表 10。

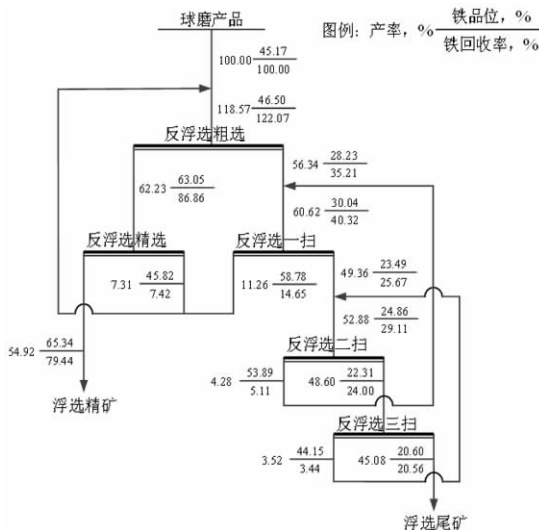


图 14 球磨产品反浮选闭路试验数质量流程
Fig. 14 Quality flow chart of closed circuit test data for reverse flotation of ball milled products

表 10 两种磨矿产品反浮选指标对比 /%

Table 10 Comparison of reverse flotation indexes of two grinding products

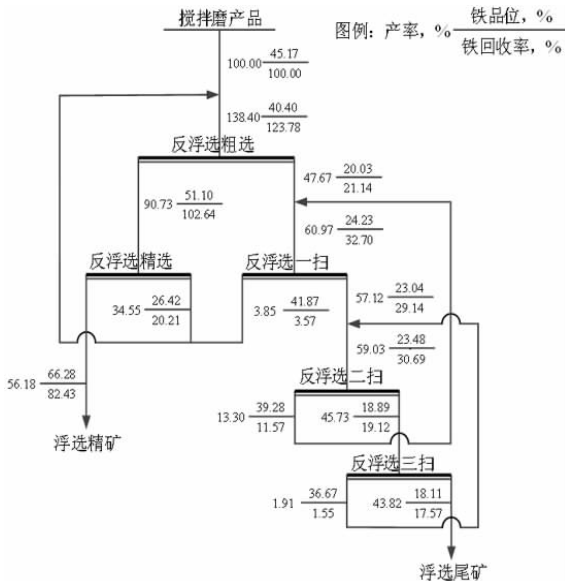
| 产品 | 铁品位 | | 铁回收率 | |
|------|-------|-------|-------|-------|
| | 球磨机 | 搅拌磨机 | 球磨机 | 搅拌磨机 |
| 浮选精矿 | 65.34 | 66.28 | 79.44 | 82.43 |
| 浮选尾矿 | 20.6 | 18.11 | 20.56 | 17.57 |

由表 10 可知,在最优浮选条件下,搅拌磨产品比球磨产品的精矿铁品位高 0.94 个百分点、回收率提高 2.99 个百分点。说明搅拌磨产品具有更好的可选性,有利于东烧厂混磁精矿的磨矿及反浮选。

4 结论

(1) 东烧厂矿石中含铁矿物主要以赤铁矿和磁铁矿为主,其相对含量分别为 29.29% 和 16.78%,脉石矿物主要为石英和绿泥石等。铁矿物主要为细粒嵌布,需要细磨才能实现有效解离。

图 13 搅拌磨产品反浮选闭路试验数质量流程
Fig. 13 Quality flow chart of closed circuit test data for reverse flotation of stirred mill products



(2) 该矿石搅拌磨磨矿的适宜条件为: 充填率 80%、料球比 0.9、磨矿浓度 60%、介质尺寸 6 mm、搅拌器转速 650 r/min; 球磨适宜条件为: 介质配比 $m(32\text{ mm}) : m(25\text{ mm}) : m(19\text{ mm})$ 为 5 : 3 : 2、充填率 40%、料球比 1.0、磨矿浓度 70%。此时搅拌磨机 -0.038 mm 比生产率比球磨机高 2 654.29 kg/(m³·h), 达到 3 636.20 kg/(m³·h); -0.038 mm 磨矿效率比球磨机高 60.77 kg/(kW·h), 达 71.93 kg/(kW·h)。

(3) 对相同细度磨矿样品分析表明, 搅拌磨产品中过细和过粗粒级含量均相对较少; 有用矿物的单体解离度比球磨高 4.5% ~ 8%; 最优条件反浮选精矿铁品位及回收率分别比球磨高出 0.94 和 2.99 个百分点。由此可知, 陶瓷球搅拌磨机比球磨机的磨矿效果更好, 不易产生过磨现象, 并有利于提高有用矿物的单体解离度和浮选指标。

参考文献:

[1] 韩跃新, 李艳军, 高鹏, 等. 复杂难选铁矿石悬浮磁化焙烧-高效分选技术[J]. 钢铁研究学报, 2019, 31(2): 89-94.

[2] 芦丹. 中国铁矿石国际贸易现状与战略分析——评《中国铁矿石资源国际合作研究》[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(12): 177.

[3] 祝昕冉. 镜铁山式铁矿石悬浮磁化焙烧物相转化基础研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2020.

[4] 王媵. 2018 年全球铁矿资源供需形势分析[J]. 中国国土资源经济, 2020, 33(3): 59-68.

[5] 韩跃新, 高鹏, 李艳军, 等. 我国铁矿资源“劣质能用、优质优用”发展战略研究[J]. 金属矿山, 2016, 486(12): 2-8.

[6] 胡国辉, 张廷龙, 宋现洲, 等. 新型陶瓷球在大型立式搅拌磨上的应用初探[J]. 矿山机械, 2018, 46(10): 30-32.

[7] 蒋述兴, 王秋红. 高纯超细石英微粉的制备方法研究[J]. 矿产保护与利用, 2009(4): 15-19.

[8] 卢世杰, 孙小旭, 何建成, 等. 典型湿式搅拌细磨技术与应用进展[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(1): 159-165.

[9] 宫贵臣, 刘杰, 韩跃新, 等. 超级铁精矿高效制备试验研究[J]. 矿产综合利用, 2018, 212(4): 42-45.

[10] XIAO XIAO, ZHANG GUOWANG, FENG QIMING, et al. The liberation effect of magnetite fine ground by vertical stirred mill and ball mill[J]. Minerals Engineering, 2012, 34: 63-69.

[11] ZHANG XIAOLONG, HAN YUEXIN, GAO PENG, et al. Effects of particle size and ferric hydroxo complex produced by different grinding media on the flotation kinetics of pyrite[J]. Powder Technology, 2020, 360: 1028-1036.

[12] 韩彬, 莫峰, 贾素娥, 等. 纳米陶瓷球在复杂多金属矿细磨的应用研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2019(4): 40-44.

[13] 季理沅. 电气石粉的超细研磨工艺研究[J]. 矿产保护与利用, 2003(3): 23-26.

[14] GAO MW, FORSSBERG E. Prediction of product size distributions for a stirred ball mill[J]. Powder Technology, 1995, 84(2): 101-106.

[15] 卢冀伟. 东鞍山难选铁矿石中菱铁矿的分离与利用[D]. 沈阳: 东北大学, 2010.

[16] 高鹏, 余建文, 张淑敏, 等. 东鞍山铁矿混磁精矿悬浮焙烧-弱磁选试验研究[J]. 金属矿山, 2016, 486(12): 18-21.

[17] 李艳军, 郭旺, 王绍兴, 等. 搅拌磨与球磨磨矿对比试验[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 38(4): 562-565, 603.

[18] 刘雁翎, 郭旺, 高鹏, 等. 搅拌磨在铁矿细磨中的应用研究[J]. 矿业工程, 2016, 14(2): 29-31.

[19] 王洋, 郭旺, 高鹏, 等. 搅拌磨机在弓长岭选厂再磨作业中的试验研究[J]. 金属矿山, 2019, 512(2): 173-177.

[20] 袁帅, 刘杰, 韩跃新, 等. 搅拌磨在关宝山铁矿二段磨矿中的应用试验[J]. 金属矿山, 2017(8): 91-94.

Optimization Test of Stirred Mill for Mixed Magnetic Concentrate from Donganshan

SU Xingguo¹, YANG Guang¹, CHEN Guorong¹, BAI Zhe²

1. Donganshan Sintering Plant, Angang Group Mining Company, Anshan 114041, China;

2. College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China

Abstract: The raw ore is mainly fine disseminated hematite and magnetite in Donganshan Sintering Plant. The field problems are low efficiency of ball milling and low monomer dissociation etc. In this research, the process optimization and comparison of magnetic concentrate ball milling and ceramic ball stirring grinding were carried out. The results show that the optimum conditions of stirring mill are as follows: filling rate of 80%, material ball ratio of 0.9, grinding concentration of 60%, medium size of 6 mm and agitator speed of 650 r/min. For ball milling, the optimum conditions are as follows: the medium ratio of 32 mm : 25 mm : 19 mm of 5 : 3 : 2, filling rate of 40%, material ball ratio of 1.0, grinding concentration of 70%. And the grinding effect of stirring mill is better. The specific productivity of -0.038 mm is 3 636.20 kg/(m³ · h), and the grinding efficiency is 71.93 kg/(kW · h). The analysis of samples with the same fineness shows that the content of superfine and coarser particles is relatively small in stirred mill products, and the dissociation degree of useful mineral monomer is 4.5% ~ 8% higher than that of ball milling. The reverse flotation test shows that the iron grade and recovery rate of concentrate can be increased by 0.94% and 2.99%, respectively. Therefore, agitation mill has better grinding effect and flotation index than ball mill.

Key words: stirring mill; ball mill; Donganshan iron ore; specific productivity; grinding efficiency; degree of liberation

引用格式:苏兴国,杨光,陈国荣,白哲.东鞍山混磁精矿搅拌磨与球磨对比试验[J].矿产保护与利用,2021,41(1):113-121.

Su XG, Yang G, Chen GR, and Bai Z. Optimization test of stirred mill for mixed magnetic concentrate from Donganshan[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2021, 41(1): 113-121.

投稿网址: <http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn