高压辊磨对超微细粒嵌布磁铁矿破碎和预选的影响

彭 畅[1]，周文波[1]，王永刚[2]，朱照强[1]，彭 宇[1]，程义桓[1]
（1. 武汉科技大学 资源与环境工程学院，湖北 武汉 430081；2. 甘肃酒钢集团宏兴钢铁股份有限公司，甘肃 嘉峪关 735100）

摘要：针对某超微细粒嵌布贫磁铁矿开发难度大、原矿入磨品位偏低、磨矿能源消耗高的问题，本文进行高压辊磨—预选工艺试验，通过对比两种破碎产品的粒度特征、相对可磨度、Bond 球磨功指数、预选指标，并结合破碎产品的表面形貌和内部微裂纹，研究高压辊磨所产生的微裂纹对于磨矿和分选的影响。结果表明：相对于常规破碎，辊压产品中 <0.074 mm 粒级质量分数增加了 14.69 个百分点，>2 mm 的粗粒级质量分数降低了 8.59 个百分点；在 160 kA/m 预选磁场强度下，辊压产品的铁品位为 31.96%，提高了 1.46 个百分点；磁性铁的回收率高达 99.45%，提高了 1.17 个百分点，抛尾率提高了 5.03 个百分点。相对可磨度试验结果表明，当磨矿细度达到 <0.03 mm 粒级质量分数为 85% 时，辊压产品的耗时相对于常规破碎缩短了 42.13%。辊压产品的 Bond 球磨功指数（目标粒度 <0.15 mm）降低了 27.90%。偏光显微镜和 SEM 扫描电镜结果表明，辊压产品结构疏松多孔、微裂纹发育充分，能产生大量的晶界裂纹，解离更充分。

关键词：高压辊磨；超微细粒；嵌布；磁铁矿；预选；可磨性；Bond 球磨功指数
中图分类号：TD951 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)02－0074－09
doi：10.13403/j.sjqt.2024.02.027

Effect of high-pressure grinding on crushing and preseparation of ultrafine particle embedded magnetite

PENG Chang[1], ZHOU Wenbo[1], WANG Yonggang[2], ZHU Zhaoqiang[1], PENG Yu[1], CHENG Yihuan[1]
(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China; 2. Hongxing iron and Steel Co., Ltd., Gansu Jiuquan Iron and Steel Group, Jiayuguan 735100, Gansu, China)

Abstract: In order to solve such problems as difficult development, low grinding grade and high grinding energy consumption of ultra-fine particle embedded poor magnetite, a high-pressure grinding preselection process test is carried out, and the influence of microcracks produced by high-pressure grinding on grinding and separation is studied by comparing the particle size characteristics, relative grindability, Bond ball milling work index and preselection index of two kinds of broken products. The results show that, compared with conventional crushing, the mass fraction of <0.074 mm in rolled products increases by 14.69%, and the mass fraction of coarse particles >2 mm decreases by 8.59%. Under the preselected magnetic field intensity of 160 kA/m, the iron grade of the rolled product concentrate is 31.96%, which is increased by 1.46%. The recovery rate of magnetic iron is as high as 99.45%, increased by 1.17%, and the tail-throwing rate is increased by 5.03%. The test results of relative grindability show that when the grinding fineness reaches less than 0.03 mm and the mass fraction of particle size is 85%, the time consumption of rolling products is shortened by 42.13%

收稿日期：2022－12－24；**修回日期**：2023－04－11
基金项目：省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室青年基金项目（2018QN19）
作者简介：彭 畅（1998—），男，硕士研究生，从事微细粒矿物分选方面的研究。
通信作者：周文波（1973—），男，副教授，从事微细粒矿物分选方面的研究。

compared with conventional crushing. Bond ball milling work index (target particle size <0.15 mm) of rolled products is decreased by 27.90%. The results of polarized light microscope and SEM show that the rolled product has loose and porous structure, fully developed microcracks, a large number of grain boundary cracks and more complete dissociation.

Key words: high pressure grinding; ultramicron; embedding; magnetite; preselection; grindability; Bond ball milling work index

我国铁矿资源总量丰富，已查明资源储量为775.3 亿吨，高居世界第五，但富矿极少，优质铁矿资源匮乏，已探明 97.5% 的铁矿资源均为贫矿。矿石禀赋差，整体呈现出“贫、细、杂”的特点，多为难选铁矿石[1-3]。微细粒嵌布磁铁矿为难选矿石类型之一，磁铁矿结晶粒度小于 0.03 mm 的铁矿石通常称为微细粒铁矿[4]。高压辊磨机作为一种超细粉碎设备，具有单位破碎能源消耗低、处理能力大、破碎产品粒度均匀等特点。与颚式破碎设备相比，高压辊磨机粉碎产品内部微裂纹明显增多、细粒级含量高、矿物解离性好[5-8]，高压辊磨机粉碎后的产品更适合预选。目前高压辊磨超细碎—磁选预选抛尾技术在贫磁铁矿石的预选中得到成功应用，尤其对于经其他破碎方式处理后无法满足预选要求的微细粒嵌布贫磁铁矿石，该工艺预选效果尤其明显[9-11]。朱泊翰等[12]针对湖南某金矿采用常规破碎工艺存在粗颗粒解离不充分、细粒过磨的问题，而采用高压辊磨工艺取代原工艺后，在相同的磨矿细度（<0.074 mm 粒级质量分数为 52%）条件下，磨矿效率提高了 14.3%，金解离度提高了 5.60 个百分点，有利于后续浮选作业获得更好的指标。郭春雷等[13]针对白云鄂博西矿区低品位铁矿石存在入选品位低、选矿利用成本高等问题，对原矿采用干式磁选预先抛尾—高压辊磨—湿式磁选抛尾—湿式弱磁选工艺，获得了 TFe 品位为 66.09%、回收率为 63.25%、磁性铁回收率为 94.82% 的合格铁精矿，试验结果为该低品位铁矿的高效开发利用提供参考依据。孙业长[14]在罗河铁矿选矿厂增设高压辊磨边料返回超细碎作业后，样品经高压辊磨破碎，其 Bond 球磨功指数由 16.15 kW·h/t 降低至13.75 kW·h/t，降幅为 14.86%，且一段球磨产能提高了 35.14%。魏波等[15]总结了高压辊磨机粉碎工艺国外应用进展，指出不断提高粉碎效率、降低粉碎成本仍是高压辊磨机粉碎工艺的发展方向。

目前我国微细粒嵌布磁铁矿的开发难度大，其主要原因是嵌布粒度细，通常需要细磨才能使其有较好的单体解离度。细磨所产生的磨矿能源消耗巨大，通常占到选矿成本的 60% 以上。本文针对某超微细粒嵌布贫磁铁矿，进行高压辊磨超细碎—湿式预选工艺试验研究，采用高压辊磨替代常规破碎流程的第三段细碎，对比不同破碎产品的粒度分布、相对可磨度、Bond 球磨功指数；通过湿式预选试验探究高压辊磨产生的微裂纹对于分选的影响，最后进一步考察微裂纹发育情况和表面形貌，以期实现提高预选精矿品位和抛尾率、减少后续入磨量、实现节能降耗的目的。

1　试验原料与方法

1.1　试验原料

试验原料为甘肃某超微细粒嵌布贫磁铁矿，其主要矿物组成、化学成分如表 1、2 所示。由表 1 可知：矿石中主要金属矿物为磁铁矿、褐铁矿，并伴随少量赤铁矿、黄铁矿；非金属矿物主要为石英、黏土矿物，少量玉髓、铁白云石，微量斜长石等。由表 2 可知，试验原料的全铁品位较低为 28.25%，SiO_2、Al_2O_3、CaO、MgO 质量分数分别为 43.65%、4.94%、1.29%、1.90%。有害杂质 S、P 质量分数较低，分别为 0.22%、0.26%。试验原料中磁铁矿的嵌布粒级分布如表 3 所示。由表 3 可知，磁铁矿在矿石中的嵌布粒度不均匀，总体粒度偏细，有69.88% 的磁铁矿颗粒嵌布于

表 1　试验原料的主要矿物组成（质量分数）

Table 1　Main mineral composition of the test raw material　　%

磁铁矿	褐铁矿	赤铁矿	黄铁矿	石英	黏土矿物	玉髓	铁白云石	斜长石	其他
28	10	3	2	22	18	6	5	3	3

表 2 试验原料的主要化学成分和烧损(质量分数)

Table 2 Main chemical composition and burning loss of the test raw material %

TFe	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	S	P	K_2O	MnO	TiO_2	烧损
28.25	43.65	4.94	1.29	1.90	0.22	0.26	0.041	0.87	0.44	2.68

表 3 试验原料中磁铁矿嵌布粒级(点测法)

Table 3 Size of magnetite intercalation in the test raw material(point test method)

粒度范围/mm	颗粒数量/个	含量比	质量分数/%	累计质量分数/%
(0.105,0.074]	2	242	0.50	0.50
(0.074,0.053]	7	343	0.71	1.22
(0.053,0.038]	108	2 700	5.62	6.83
(0.038,0.015]	2 100	33 600	69.88	76.71
<0.015	2 800	11 200	23.29	100.00
合计	5 017	48 085	100.00	—

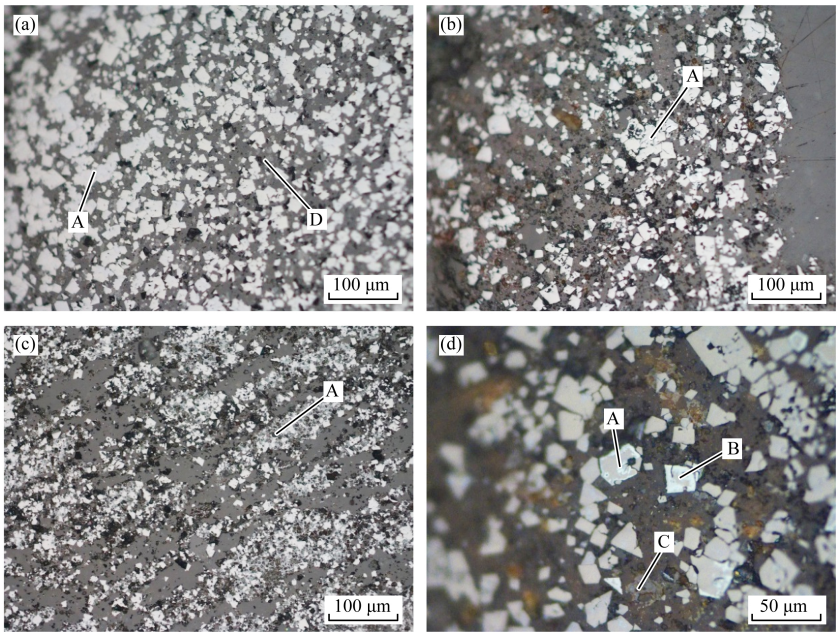
38 ~ 15 μm 的矿石中，嵌布粒度小于 15 μm 的磁铁矿颗粒占 23.29%，超过 93.17% 磁铁矿的嵌布粒度小于 38 μm。

试验原料的矿相显微结构如图 1 所示。由图 1 可知：磁铁矿晶粒多呈自形 - 半自形或它形细粒状，多见稠密浸染状分布在透明矿物中，或呈稀疏浸染状分布[图 1(a)、(b)]，局部呈条带状排布[图 1(c)]，磁铁矿可被赤铁矿沿边缘以及晶粒八面体裂开纹交代，部分磁铁矿晶粒内部裂纹较发育，被褐铁矿充填胶结[图 1(d)]。

1.2 试验流程与方法

1.2.1 制样流程

试验制样流程如图 2 所示。由图 2 可知：采用颚式破碎机对原矿破碎和筛分得到 <20 mm 的破碎产品，然后进行混匀，一部分采用 XPS-250 ×150型对辊破碎机进行细碎，得到 <3 mm 的常规细碎产品，另一部分采用高压辊磨机进行筛分全闭路细碎，控制筛尺寸为 3 mm，得到 <3 mm 的辊压细碎产品。高压辊磨机型号为 GMS0410，压辊直径为 420 mm，压辊宽度为 100 mm，压辊间隙为1 ~ 20 mm。破碎过程采用全闭路破碎。使用偏光显微镜和扫描电镜观察破碎产品。对细碎产物采用进行湿式预选抛尾试验，预选磁场强度

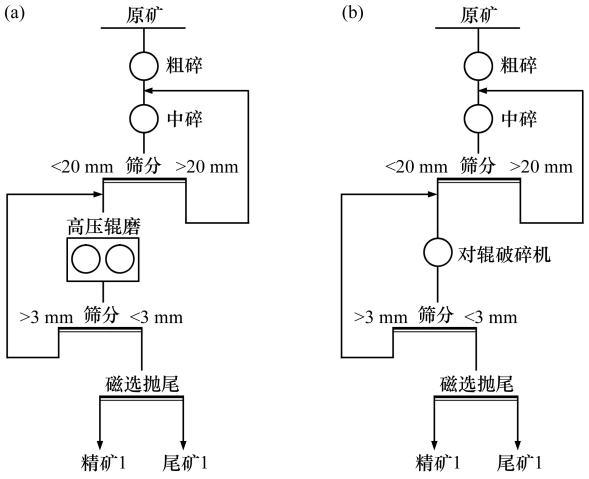


(a) 自形磁铁矿晶粒稠密浸染于透明矿物中；(b) 稀疏浸染状的磁铁矿晶粒；(c) 带状排布的磁铁矿晶粒；(d) 磁铁矿晶粒与赤铁矿、褐铁矿交代、充填胶结情况

A—磁铁矿；B—赤铁矿；C—褐铁矿；D—透明矿物。

图 1 试验原料的矿相结构分析

Fig. 1 Mineral phase structure analysis of test raw materials



矿样制备过程：(a) 高压辊磨；(b) 常规破碎

图 2　试验矿样制备流程

Fig. 2　Flow chart of test ore sample preparation

选用 160、240 kA/m。

1.2.2　试验评价指标

(1) 相对可磨度。定义相对可磨度为将同一粒度范围内的标准与试验矿样，在相同的磨矿设备、条件下磨至同一细度时，两者磨矿时间的比值。相对可磨度计算方法如下。

$$k = \frac{t_0}{t} \tag{1}$$

式中：k 为相对可磨度；t_0 为采用高压辊磨将矿样磨到 <0.074 mm 或 <0.03 mm 粒级质量分数为 85% 所需要的时间，min；t 为采用对辊破碎将矿样磨到 <0.074 mm 或 <0.03 mm 粒级质量分数为 85% 所需要的时间，min。

(2) Bond 球磨功指数。Bond 球磨功指数是物料在球磨机内被粉磨至一定细度所消耗能量的一种指标。Bond 球磨功指数的大小，反映了该物料被球磨的难易程度。为研究不同破碎方式对破碎产品 Bond 球磨功指数的影响，对不同破碎产品进行 Bond 球磨功指数试验(目标粒度为 −0.15 mm)。其计算方法(经验公式)如下[16-17]。

$$W_{ib} = \frac{49.04}{\left[P_1^{0.23} \cdot G_{bp}^{0.82} \cdot \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}}\right)\right]} \tag{2}$$

式中：W_{ib} 为 Bond 球磨功指数，kW·h/t；P_1 为试验筛孔尺寸，μm；G_{bp} 为磨矿平衡时球磨机每转新生成的粒级物料(试验筛孔尺寸下)的质量，g/r；P_{80} 为产品中 80% 物料通过的粒度，μm；F_{80} 为给料中 80% 物料通过的粒度，μm。

1.2.3　试验方法

为研究不同破碎方式对破碎产品相对可磨度的影响，使用 XMQ-240×90 锥形球磨机对 <3 mm 细碎产品进行磨矿试验，选取矿浆质量分数为 70%、介质填充率为 40% 条件进行不同磨矿时间试验，并分别以 0.074 mm 和 0.030 mm 粒级的负累积质量分数达到 85% 为标准来分析可磨度。

高压辊磨试验主要考察辊面压力和线速度对破碎的影响，试验参数条件：辊面线速度为 0.30 m/s，辊面压力分别为 2.6、3.1、3.6、4.1、4.6 N/mm^2；辊面压力为 4.1 N/mm^2，辊面线速度分别为 0.10、0.2、0.30、0.40 m/s。通过对比不同破碎产品的粒度分布情况，来进一步确定高压辊磨机的最佳工作参数。

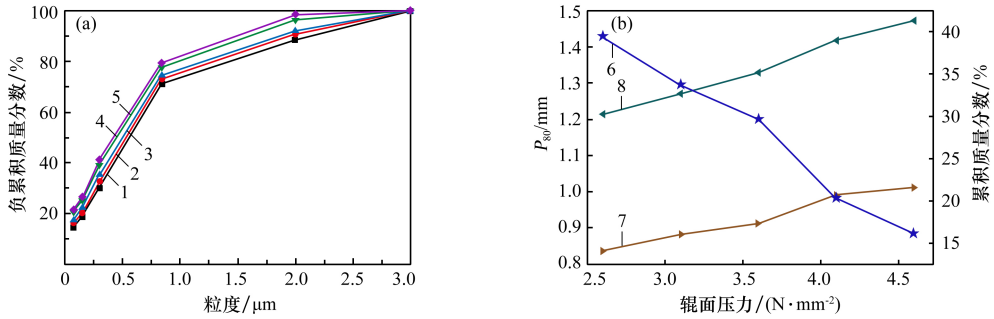
通过分析两种破碎产品的粒级分布情况，重点对比 <0.074、<0.297 mm 粒级的质量分数，来评价不同破碎产品的性能。相对可磨度试验主要探究两种破碎产品磨至 <0.074、<0.03 mm 所需的磨矿时间。Bond 功指数试验所选取的目标粒度为 <0.15 mm。通过偏光显微镜和扫描电镜对比考察两种破碎产品的裂纹发育情况和表面形貌，进一步论证高压辊磨对于磨矿和分选的影响。

2　试验结果与讨论

2.1　高压辊磨机操作因素对破碎的影响

2.1.1　不同辊面压力下的粒度分布

在辊面速度为 0.3 m/s 的条件下，对所得辊压产品进行筛分试验，结果如图 3 所示。由图 3 可知：随着辊面压力的增加，破碎效果越来越显著，但当辊面压力在 2.6 ~ 3.6 N/mm^2 和 4.1 ~ 4.6 N/mm^2 的两个范围内时，产品粒度的变化不明显；当辊面压力在 3.6 ~ 4.1 N/mm^2 时，破碎效果变化显著，<0.074 mm 粒级质量分数增加了 3.42 个百分点，<0.297 mm 粒级质量分数增加了 3.89 个百分点，P_{80} 降低 0.220 4 mm，产品的粒度明显变小。由于高压辊磨机工作压力增大会降低设备的稳定性和使用寿命，因此，在保证粒度特性的情况下，应尽量降低辊面工作压力，故确定后续试验辊面压力为 4.1 N/mm^2。



（a）粒度分布；（b）粒度特性

辊面压力/(N·mm^{-2})：1—2.6；2—3.1；3—3.6；4—4.1；5—4.6。

6—P_{80}；7—<0.074 mm 粒级质量分数；8—<0.297 mm 粒级质量分数。

图 3 不同辊面压力下产品的粒度分布和粒度特性

Fig. 3 Particle size distribution and characteristics of products under different roll surface pressures

2.1.2 不同辊面速度下的粒度分布

在辊面压力为 4.1 N/mm^2 的条件下，对不同辊面速度下的辊压产品进行筛分试验，结果如图 4 所示。由图 4 可知：辊面速度对于破碎产品粒度影响不大，当辊面速度在 0.61～0.2 m/s 和 0.3～0.4 m/s 范围内时，产品粒度变化不明显；当辊面速度在 0.2～0.3 m/s 时，<0.074 mm 粒级质量分数增加了 1.82 个百分点，<0.297 mm 粒级质量分数增加了 1.52 个百分点，P_{80}降低了 0.101 7 mm，产品的粒度明显变小。辊面速度过高会使得辊面和轴承磨损加重，缩短机器使用寿命，故确定后续试验辊面速度均为 0.3 m/s。

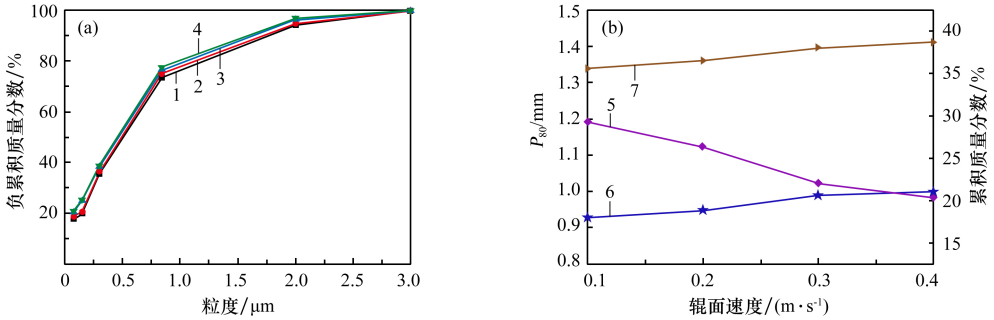
2.2 破碎产品性能

2.2.1 不同破碎方式对产品粒度的影响

对两种破碎产品分别进行筛分试验，结果如图 5 所示。由图 5 可知：高压辊磨和对辊破碎产品中<0.074 mm 细粒级质量分数分别为 20.67%、5.98%，高压辊磨样较对辊破碎样增加了 14.69 个百分点，>2 mm 粗粒质量分数降低了 8.59 个百分点，P_{80}降低了 0.78 mm，说明高压辊磨破碎效率确实高于常规破碎效率，能产生更多的细粒级，提高了单体解离度，并且能够降低后续磨矿能耗。

2.2.2 高压辊磨对物料相对可磨度的影响

高压辊磨能使物料颗粒内部产生大量裂纹、塌散、疏松等缺陷，改善物料的可磨性，提高后续磨矿效率。高压辊磨和常规破碎产物的<0.074 mm 和<0.03 mm 相对可磨度曲线如图 6 所示。由图 6 可知：在相同的磨矿时间内，高压辊磨破碎产品的<0.074、<0.03 mm 粒级产生量更高；在相同磨矿细度（<0.074 mm 粒级质量分数为 85%）时，与对辊破碎样品相比，高压辊磨机破



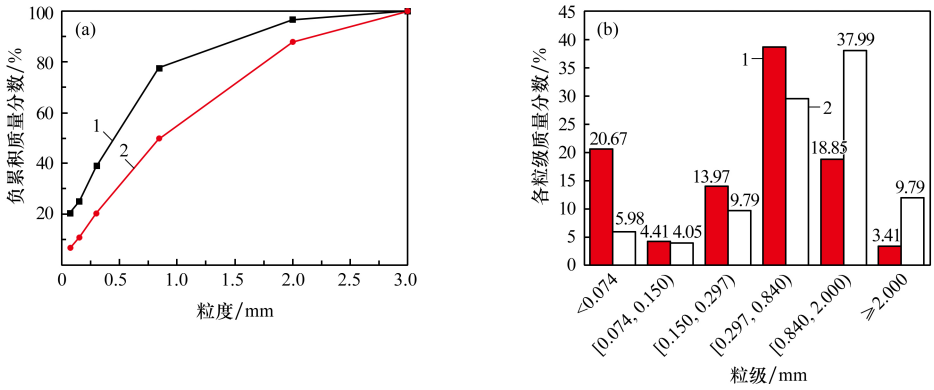
（a）粒度分布；（b）粒度特性

辊面速度/(m·s^{-1})：1—0.1；2—0.2；3—0.3；4—0.4。

5—P_{80}；6—<0.074 mm 粒级质量分数；7—<0.297 mm 粒级质量分数。

图 4 不同辊面速度下产品的粒度分布和粒度特性

Fig. 4 Particle size distribution and characteristics of products at different roll line speeds

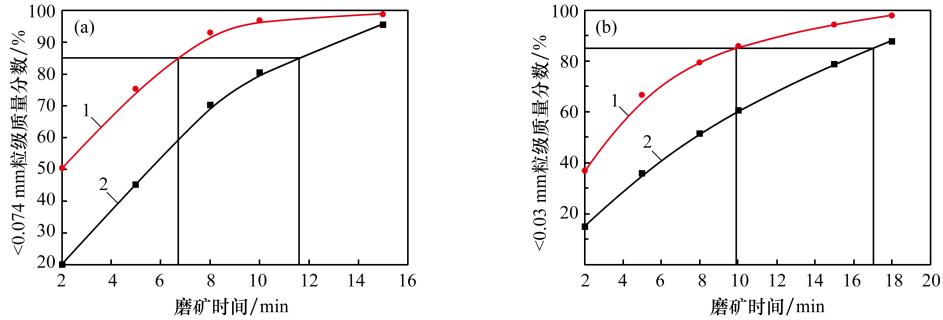


（a）负累积质量分数；（b）粒度分布

1—高压辊磨；2—对辊破碎。

图 5　不同破碎产品的粒度分布

Fig. 5　Particle size distribution of different crushed products



（a）<0.074 粒级质量分数；（b）<0.03 mm 粒级质量分数

1—高压辊磨；2—对辊破碎。

图 6　高压辊磨和常规破碎产物的 <0.074 mm 和 <0.03 mm 相对可磨度曲线

Fig. 6　<0.074 mm and <0.03 mm relative grindability curve for high-pressure roller milling and conventional crushed products

碎产品的相对可磨度为 0.578 0，耗时缩短 42.2%；当 <0.03 mm 粒级质量分数为 85% 时，相对可磨度为 0.578 7，耗时缩短 42.13%。可知，在获得相同的磨矿细度时，高压辊磨破碎产物所需要的磨矿时间更短，产品更易磨，可磨性明显提高，这说明高压辊磨机破碎过程中产生的微裂纹，对磨矿过程节能效果显著。

表 4　不同方式破碎产品磨至相同粒度所需时间

Table 4　The time it takes to grind the crushed product to the same particle size in different ways

矿样产品	磨矿时间/min	
	<0.074 mm 粒级质量分数为 85%	<0.03 mm 粒级质量分数为 85%
高压辊磨 <3 mm 产品	6.71	9.89
对辊破碎 <3 mm 产品	11.61	17.09

2.2.3　高压辊磨对物料 Bond 球磨功指数的影响

Bond 球磨功指数计算结果如表 5 所示。由表 5 可以看出：对辊破碎产品的 Bond 球磨功指数为 17.31 kW·h/t，高压辊磨产品的 Bond 球磨功指数为 12.48 kW·h/t，高压辊磨产品的 Bond 球磨功指数比对辊破碎产品降低了 27.90%，这对后续磨矿的节能降耗极为有利。

表 5　Bond 球磨功指数计算结果

Table 5　Test results of Bond work index of ball mill

矿样产品	P_{80}/μm	F_{80}/μm	G_{bp}/(g·r^{-1})	W_{ib}/(kW·h·t^{-1})
高压辊磨产品	128.2	980.51	2.617 4	12.48
对辊破碎产品	142.3	1 757.8	1.628 4	17.31

2.3　预选抛尾试验

针对细碎产物采用进行湿式预选抛尾试验，预选磁场强度选用 160、240 kA/m，试验结果如

表6所示。由表6可以看出：在160 kA/m预选磁场强度条件下，由于产生的细粒级更多，高压辊磨精矿品位为31.96%，比对辊预选精矿高1.46个百分点，抛尾率为16.33%，比对辊产品抛尾率高出5个百分点；在240 kA/m预选磁场强度条件下，由于产生的细粒级更多，高压辊磨精矿品位为30.32%，比对辊产品预选精矿高0.74个百分点，抛尾率为9.49%，比对辊产品抛尾率高3.82个百分点；并且辊压产品的磁性铁回收率高达99.45%，比对辊产品高出1.17个百分点，在保证回收率的同时，能抛出更多的尾矿，充分实现了“多碎少磨、能抛早抛”的原则。综合考虑，选择160 kA/m的预选磁场强度。

3 破碎产品表面形貌和内部微裂纹

不同破碎方式会造成产品表面形貌和内部结构不同，对后续磨矿分选作业也会产生不同的影响。利用偏光显微镜和扫描电镜对破碎产品进行对比研究，结果如图7所示。由图7可知：辊压产品因层压粉碎的影响，颗粒之间多以面接触的方式受力，结构疏松多孔，微裂纹发育充分且数量多[图7(c)、(d)]，破碎效果明显；而对辊破碎机主要进行单颗粒破碎，施力方式单一，导致产品结构单一紧密，裂纹少且发育不充分[图7(a)、(b)]。

裂纹发育是高压辊磨机粉碎产品的经典特征，包括穿晶裂纹、晶内裂纹、晶界裂纹。通过偏光显微镜对破碎产品(0.150~0.074 mm)进行观察，结果如图8所示。由图8可知：穿晶裂纹主要存在于破碎产品的粗颗粒中，裂纹宽度相对较大，贯穿深度相对较广，主要通过冲击破碎产生，是粉碎的基础，也是粉碎的初始阶段。存在于辊压产品和对辊产品中，辊压产品的穿晶裂纹发育更充分，数量更多[图8(a)、(b)]。晶内裂纹主要在同一矿物内部发生并延展，能加速粉碎过程，提高产品的细粒级含量。晶界裂纹是层压粉碎的特色之一，主要发生在不同矿物的临界交界处，有利于有用矿物与脉石矿物解离。由[图8(c)、(d)]可见：辊压产品中存在着大量的晶内裂纹和晶界裂纹；对辊产品中存在相对较少的晶内裂纹，几乎不存在解离裂纹。晶内微裂纹和晶界微裂纹也反映了两种非随机性粉碎方式，即优先粉碎和晶界粉碎。优先粉碎指粉碎裂纹通常优先出现在同一矿物内部，而晶界粉碎发生时粉碎裂纹优先沿晶界扩展[18-21]。辊压产品由于裂纹发育充分、数量多、分布广泛，且比表面积大、孔隙率高、解离更充分、Bond球磨功指数低，更加有利于后续磨矿和分选。

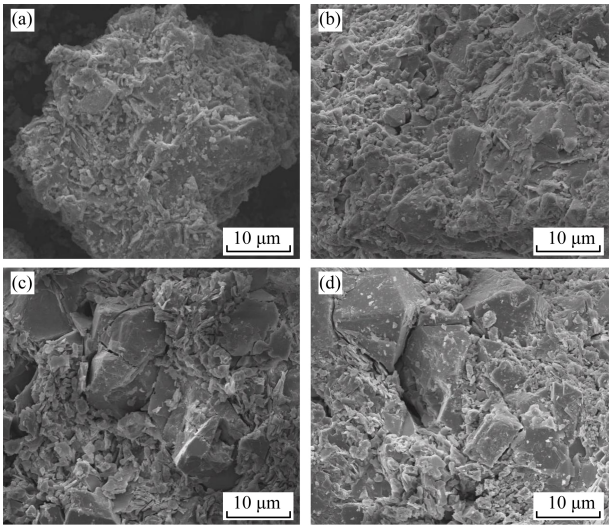
4 结 论

(1) 高压辊磨机超细碎过程中，随着辊面压力的增加，破碎粒度变细；辊面速度对产品粒度影响不大。对于试验所用高压辊磨机，当辊面压

表6 预选抛尾试验结果

Table 6 Pre-selection of tail throwing test results

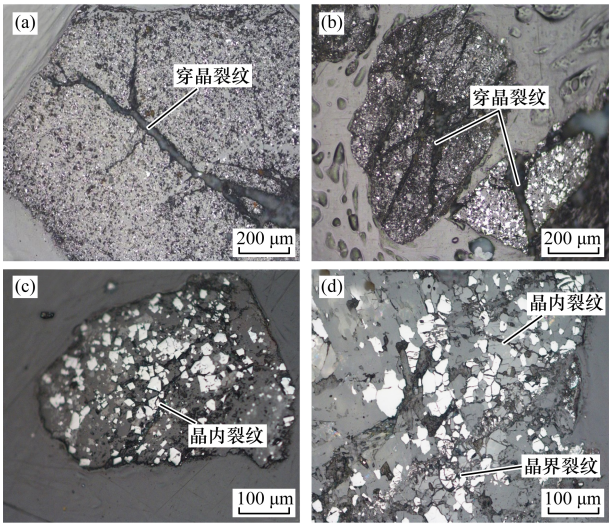
磁场强度/(kA·m^{-1})	产品名称	产率/%	TFe质量分数/%	回收率/%	磁性铁回收率/%
160	预选精矿	83.67	31.96	92.47	99.45
	尾矿	16.33	13.48	7.61	0.55
	高压辊磨<3 mm	100.00	28.92	100.00	100.00
160	预选精矿	88.70	30.50	93.77	98.28
	尾矿	11.30	15.90	6.23	1.72
	对辊破碎<3 mm	100.00	28.85	100.00	100.00
240	预选精矿	90.51	30.32	95.79	99.85
	尾矿	9.49	12.72	4.21	0.15
	高压辊磨<3 mm	100.00	28.65	100.00	100.00
240	预选精矿	94.33	29.58	97.8	98.95
	尾矿	5.67	11.06	2.20	1.05
	对辊破碎<3 mm	100.00	28.53	100.00	100.00



（a）、（b）对辊破碎；（c）、（d）高压辊磨

图 7　不同破碎产品(0.150 ~ 0.074 mm)表面形貌 SEM 图(5 000 倍)

Fig. 7　SEM diagram of surface topography of different crushed products(0.150 ~ 0.074 mm) (5 000 times)



（a）、（c）对辊破碎；（b）、（d）高压辊磨

图 8　不同破碎产品(<3 mm)内部微裂纹

Fig. 8　Microcracks inside different crushed products (<3 mm)

力为 4.1 N/mm^2、辊面速度为 0.3 m/s 时，矿石的粉碎效果最好，此时 <0.074、<0.297 mm 粒级质量分数分别为 20.67%、39.05%。高压辊磨破碎效率高于常规破碎效率，能产生更多的细粒级，辊压产品与对辊产品相比，<0.074 mm 细粒质量分数增加了 14.69 个百分点，>2 mm 粗粒级质量分数降低了 8.59 个百分点，P_{80}降低了 0.78 mm。在获得相同的磨矿细度(<0.074 mm 或 <0.03 mm 粒级质量分数为 85%)时，与对辊破碎样品相比，辊压产品的磨矿耗时缩短 42.2%。Bond 球磨功指数(目标粒度为 0.15 mm)比对辊破碎产品低 27.90%。在获得相同的磨矿细度时，高压辊磨破碎产物所需要的磨矿时间更短，产品更易磨，可磨性明显提高。

（2）在 160 kA/m 的预选磁场强度下，辊压产品精矿品位为 31.96%，回收率为 92.47%，抛尾率为 16.33%，较对辊产品精矿品位提高 1.46 个百分点，抛尾率提高 5 个百分点，回收率下降 1.3 个百分点。

（3）由于独特的破碎方式，高压辊磨机能产生大量发育充分的微裂纹，使得破碎产品颗粒结构疏松，这也使得辊压产品比常规破碎产品单体解离度高，比表面积大，可磨性好，更加利于后续磨矿和分选。

参考文献：

[1] 韩跃新,孙永升,李艳军,等. 我国铁矿选矿技术最新进展[J]. 金属矿山,2015(2):1 - 11.
HAN Yuexin, SUN Yongsheng, LI Yanjun, et al. New development on mineral processing technology of iron ore resources in China[J]. Metal Mine,2015(2):1 - 11.

[2] 索希. 我国已发现铁矿主要矿石类型及加工选冶工艺调查[J]. 华北国土资源,2018(2):17 - 19.
SUO Xi. Investigation on main ore types and processing and smelting technology of iron ore found in China[J]. Huabei Land and Resources,2018(2):17 - 19.

[3] 姜雪薇. 中国铁矿行业发展现状及前景分析[J]. 中国金属通报,2017(7):161 - 160.
JIANG Xuewei. Development status and prospect analysis of iron ore industry in China[J]. China Metal Bulletin, 2017(7):161 - 160.

[4] 陈雯,张立刚. 复杂难选铁矿石选矿技术现状及发展趋势[J]. 有色金属(选矿部分),2013(S1):19 - 23.
CHEN Wen, ZHANG Ligang. Technological progress in processing low grade fine-grainde complicated refractory iron ores[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2013(S1):19 - 23.

[5] 韩跃新,刘磊,袁致涛. 贫赤铁矿高压辊磨机产品强磁预选试验研究[J]. 矿产综合利用,2013(1):14 - 18.
HAN Yuexin, LIU Lei, YUAN Zhitao. High intensity

magnetic pre-concentration of hematite ore comminuted by high-pressure grinding roller[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2013(1):14 – 18.

[6] 刘建远,黄瑛彩. 高压辊磨机在矿物加工领域的应用[J]. 金属矿山,2010(6):1 – 8.
LIU Jianyuan, HUANG Yingcai. Applications of high-pressure grinding rolls in mineral processing[J]. Metal Mine,2010(6):1 – 8.

[7] 梅灿国,蔡海辉,李兵强,等. 微细粒级磁铁矿石选矿试验研究[J]. 矿业工程,2021,19(5):14 – 19.
MEI Canguo, CAI Haihui, LI Bingqiang, et al. Experimental research on the beneficiation of fine-particle grade magnetite ore[J]. Mining Engineering, 2021,19(5):14 – 19.

[8] HAN Y X, LIU L, YUAN Z T. Comparison of low-grade hematite product characteristics in a high-pressure grinding roller and jaw crusher[J]. Minerals & Metallurgical Processing,2012,29(2):75 – 80.

[9] 敖顺福,朱家锐,徐峰,等. 预选抛尾技术应用进展[J]. 矿产保护与利用,2021,41(4):157 – 163.
AO Shunfu, ZHU Jiarui, XU Feng, et al. Application progress of preconcentration and discarding technology[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021,41(4):157 – 163.

[10] 曹钊,屈奇奇,曹永丹,等. 内蒙古某贫磁铁矿石高压辊磨—磁选预选试验[J]. 金属矿山,2017(4):56 – 59.
CAO Zhao, QU Qiqi, CAO Yongdan, et al. HPGR crushing-magnetic separation discarding experiment on a low grade magnetite ore in inner Mongolia[J]. Metal Mine,2017(4):56 – 59.

[11] 刘义云. 近年来我国金属矿山主要碎磨技术发展回顾[J]. 现代矿业,2013,29(8):150 – 152.
LIU Yiyun. Review on the development of main grinding technology in metal mines in recent years[J]. Modern Mining,2013,29(8):150 – 152.

[12] 朱泊翰,张鹏羽,欧乐明,等. 高压辊磨对低品位金矿浮选的影响研究[J]. 矿冶工程,2022,42(3):80 – 83.
ZHU Bohan, ZHANG Pengyu, OU Leming, et al. Influence of high-pressure roller grinding on flotation performance of low-grade gold ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2022,42(3):80 – 83.

[13] 郭春雷,周志广. 高压辊磨—弱磁选工艺处理白云鄂博西矿区低品位铁矿[J]. 矿产保护与利用,2018(4):43 – 47.
GUO Chunlei,ZHOU Zhiguang. High pressure roller mill-weak magnetic separation process for low grade iron ore in Bayan Obo west mine[J]. Conservation and Utilization of Mineral,2018(4):43 – 47.

[14] 孙业长. 罗河铁矿复合铁矿石高压辊磨工艺应用研究[J]. 金属矿山,2017(5):69 – 72.
SUN Yechang. HPGR technology application research on complex iron ore of Luohe iron mine[J]. Metal Mine, 2017(5):69 – 72.

[15] 魏波,张宪伟,李丽匣,等. 高压辊磨机粉碎工艺国外应用进展与发展趋势[J]. 金属矿山,2022(2):10 – 18.
WEI Bo, ZHANG Xianwei, LI Lixia, et al. Progress and development trend of high pressure grinding rollers comminution circuits abroad[J]. Metal Mine,2022(2): 10 – 18.

[16] 袁致涛,郭小飞,严洋,等. 攀西钒钛磁铁矿高压辊磨的产品特性[J]. 东北大学学报(自然科学版),2012, 33(1):124 – 127;132.
YUAN Zhitao, GUO Xiaofei, YAN Yang, et al. Product characteristics of vanadium-titanium magnetite from Panxi by high pressure grinding roller[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science),2012,33(1): 124 – 127;132.

[17] 张一敏. 固体物料分选理论与工艺[M]. 北京:冶金工业出版社,2007.
ZHANG Yimin. Solid material separation theory and technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.

[18] GUO X, CUI S, DAI S, et al. Investigation of microcrack formation in vanadium-titanium magnetite using different crushing processes[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2019, 119(10): 811 – 816.

[19] WIKEDZI A, ARINANDA M A, LEISSNER T, et al. Breakage and liberation characteristics of low grade sulphide gold ore blends[J]. Minerals Engineering, 2018,115:33 – 40.

[20] LUCY L, AUBREY N M, MEGAN B, et al. Using mineralogical and particle shape analysis to investigate enhanced mineral liberation through phase boundary fracture[J]. Powder Technology,2016,301:794 – 804.

(下转第106页)

[7] 黄卡玛,杨晓庆. 微波加快化学反应中非热效应研究的新进展[J]. 自然科学进展,2016,16(3):273-279.
HUANG Kama, YANG Xiaoqing. Recent advances in nonthermal effects of microwave accelerated chemical reactions[J]. Progress in Natural Science,2016,16(3):273-279.

[8] 唐军旺. 微波辐射下NO转化的研究[D]. 大连:中国科学院大连化学物理研究所,2001.
TANG Junwang. Conversion of NO with microwave irradiation[D]. Dalian: Dalian Institute of Chemical Physics of Chinese Acade,2001.

[9] ZAMUDIO M A,BENSAID S,FINO D,et al. Influence of the $MgCo_2O_4$ preparation method on N_2O catalytic decomposition[J]. Industrial & engineering chemistry research,2011,50(5):2622-2627.

[10] XU W T, WANG Q G, PENG K, et al. Development of $MgCo_2O_4$-$BaCO_3$ composites as microwave catalysts for the highly effective direct decomposition of NO under excess O_2 at a low temperature[J]. Catalysis Science & Technology,2019,9(16):4276-4285.

[11] MA Z X,SHENG L P,WANG X W,et al. Oxide catalysts with ultrastrong resistance to SO_2 deactivation for removing nitric oxide at low temperature[J]. Advanced Materials,2019,31(42):1903719.

[12] CONNER W C, TOMPSETT G A. How could and do microwaves influence chemistry at interfaces[J]. The Journal of Physical Chemistry B,2008,112(7):2110-2118.

[13] TANG J, ZHANG T, LIANG D, et al. Direct decomposition of NO by microwave heating over Fe/NaZSM-5[J]. Applied Catalysis B Environmental,2002,36(1):1-7.

[14] PENG K, ZHOU J C, XU W T, et al. Microwave irradiation-selective catalytic reduction of NO to N_2 by activated carbon at low temperature[J]. Energy & Fuels,2017,31(7):7344-7351.

[15] XU W T,ZHOU J C,OU Y P,et al. Microwave selective effect:A new approach towards oxygen inhibition removal for highly-effective NO decomposition by microwave catalysis over $BaMn_xMg_{1-x}O_3$ mixed oxides at low temperature under excess oxygen[J]. Chemical Communications,2015,51(19):4073-4076.

[16] TOFAN C, KLVANA D, KIRCHNEROVA J. Decomposition of nitric oxide over perovskite oxide catalysts: effect of CO_2, H_2O and CH_4[J]. Applied Catalysis B Environmental,2002,36(4):311-323.

[17] WANG X D,ZHANG T,XU C H,et al. Microwave effects on the selective reduction of NO by CH_4 over an In-Fe_2O_3/HZSM-5 catalyst[J]. Chemical Communications,2000(4):279-280.

(上接第73页)

[18] 王海云,王剑平,张果,等. 改进FPN的Mask R-CNN工业表面缺陷检测[J]. 制造业自动化,2020,12(42):35-40.
WANG Haiyun, WANG Jianping, ZHANG Guo, et al. Industrial surface defect detection based on improved FPN Mask R-CNN[J]. ManufacturingAutomation,2020,12(42):35-40.

[19] WU Y, CHEN Y, YUAN L, et al. Rethinking classification and localization for object detection[C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR). Seattle:IEEE,2020.

[20] IZMAILOV P, PODOPRIKHIN D, GARIPOV T, et al. Averaging weights leads to wider optima and better generalization[Z/OL]. arXiv,(2018.3.14)[2019.2.25]. https://arxiv.org/abs/1803.05407.

(上接第82页)

[21] 钟文,衷水平,唐定,等. 紫金山铜矿微裂纹特性及其对磨矿动力学的影响[J]. 有色金属(选矿部分),2022(2):58-65.
ZHONG Wen, ZHONG Shuiping, TANG Ding, et al. Characteristics of microcracks and its effect on grinding dynamics in Zijinshan copper mine[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section),2022(2):58-65.