

高压辊磨超细碎对铜铁共生矿分选的影响^①

陈兴¹, 陈铁军^{1,2}, 韦东³, 黄春源³, 张涛¹

(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选冶湖北省重点实验室, 湖北武汉 430081; 3. 武钢资源集团大冶铁矿有限公司, 湖北武汉 435000)

摘要: 为探究高压辊磨超细碎对铜铁共生矿分选的影响, 对其进行了高压辊磨超细碎分选试验, 结果表明, 高压辊磨产品相比颞式破碎产品粒度小且均匀; 高压辊磨破碎产品出现了明显的晶界裂纹; 磁选抛尾试验中, 高压辊磨产品比颞式破碎产品磁选精矿铁品位提高了0.4个百分点、回收率降低了0.8个百分点, 铜品位提高了0.01个百分点、回收率提高了2.11个百分点; 浮选试验中, 高压辊磨产品比颞式破碎产品浮选粗精矿铜品位提高了0.21个百分点、回收率提高了1.84个百分点; 浮选粗选尾矿磁选试验中, 高压辊磨产品比颞式破碎产品精矿铁品位提高了1.11个百分点、回收率提高了2.45个百分点。高压辊磨破碎比颞式破碎更有利于铜品位的提升和铁精矿的回收。

关键词: 高压辊磨; 超细粉碎; 含铜铁矿; 单体解离度; 浮选; 磁选; 抛尾

中图分类号: TD92

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.04.013

文章编号: 0253-6099(2023)04-0061-04

Influence of Ultrafine Comminution by High Pressure Grinding Rolls on Separation Performance of Copper-Bearing Iron Ore

CHEN Xing¹, CHEN Tiejun^{1,2}, WEI Dong³, HUANG Chunyuan³, ZHANG Tao¹

(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; 3. Daye Iron Ore Co Ltd, WISCO Resources Group, Wuhan 435000, Hubei, China)

Abstract: In order to explore the influence of ultrafine grinding using high-pressure grinding roller (HPGR) on the separation performance of copper-bearing iron ore, mineral separation tests were carried out for HPGR milled ore. The results show that HPGR products are usually smaller and more uniform in size compared to jaw crushing products. Furthermore, obvious grain boundary cracks in HPGR products can be observed. Based on the comparison with jaw crushed ore, a test on magnetic separation of HPGR milled ore for tailings discarding led to the obtained product with iron grade up by 0.4 percentage points and iron recovery down by 0.8 percentage points, while both copper grade and recovery up by 0.01 and 2.11 percentage points respectively. A flotation test resulted in the roughing concentrate with copper grade and recovery up by 0.21 percentage points and 1.84 percentage points, respectively. The following magnetic separation test of the obtained roughing tailings led to the final iron concentrate with grade and recovery up by 1.11 and 2.45 percentage points, respectively. It is concluded that compared with jaw crushing, HPGR grinding is more conducive to improving copper grade and recovery of iron concentrate.

Key words: high pressure grinding roller (HPGR); ultrafine comminution; copper-bearing iron ore; degree of mineral liberation; flotation; magnetic separation; tailings discarding

高压辊磨的破碎原理是对矿物进行准静压料层粉碎处理^[1-3], 这种破碎方式的优点在于产品细粒级含量

高、粒度均匀, 可以使破碎产品内部产生大量微裂纹, 提高破碎产品单体解离度和可磨度, 降低破磨能耗, 符

① 收稿日期: 2023-02-18

基金项目: 湖北省教育厅科学研究计划(Q201911110)

作者简介: 陈兴(1998—), 男(蒙古族), 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 主要研究方向为复杂铁矿分选。

通信作者: 陈铁军(1973—), 男, 湖南株洲人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为复杂铁矿分选、烧结球团和二次资源综合利用。

合“多碎少磨”的技术发展趋势以及我国节能减排政策,在国内外选矿厂得到了广泛应用^[4-6]。高压辊磨破碎对单一铁矿预选抛尾较常规破碎可获得更好的分选效果^[7-8]。

湖北大冶铁矿为典型铜铁共生矿^[9-10],有用矿物多以磁铁矿、黄铜矿形式存在,且两者共生关系复杂^[11]。大冶铁矿现场采用三段一闭路破碎工艺,中碎粗粒级产品进行磁滑轮磁选抛尾,抛尾精矿和细粒级产品与圆锥破碎机构成闭路破碎筛分,筛下产品进行磨矿-浮选。采用两精两扫混合浮选,精矿再进行两精两扫分离浮选,尾矿进行三段磁选。随着开采年限增加,大冶铁矿资源日渐枯竭,为更好地实现产量与产能之间的平衡,亟须引入新的选矿设备,强化选矿厂分选效果,降低分选能耗。

本文采用高压辊磨机和颞式破碎机对大冶现场细碎筛下产品(-20 mm)进行破碎,探究2种破碎方式对铜铁共生矿磁选抛尾、浮选、浮选尾矿再磁选的影响。

1 原料性质

试验原料为湖北大冶铁矿现场细碎筛下-20 mm产品。原料矿物组成如表1所示。样品属于铜铁共生矿,其中铜主要以黄铜矿形式存在,铁主要以磁铁矿、黄铁矿、磁黄铁矿形式存在,脉石矿物主要以铁角闪石、黑云母、方解石形式存在。

表1 原料矿物组成分析结果(质量分数) %

磁铁矿	黄铜矿	黄铁矿	磁黄铁矿	辉石	长石	石榴石	黑云母
46.35	0.97	2.29	1.47	5.80	8.15	2.69	6.96
方解石	石英	绿泥石	铁角闪石	白云石	磷灰石	橄榄石	蒙脱石
9.87	1.39	0.76	10.83	0.63	0.57	0.15	0.20
榍石	石膏	伊利石	高岭石	闪锌矿	重晶石	辉钨矿	其他
0.22	0.11	0.28	0.12	0.02	0.01	0.01	0.15

原料化学成分分析结果如表2所示。样品TFe品位35.98%,磁性铁品位29.3%,铜品位0.358%,硫品位2.31%,属于低品位铜铁共生矿。

表2 原料化学成分分析结果(质量分数) %

TFe	MFe	FeO	Cu	MgO	Al ₂ O ₃
35.98	29.3	15.31	0.358	4.61	4.28
S	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂
2.31	18.22	0.165	0.939	0.76	0.25

原料粒度分布如图1所示。原料 P_{80} 为17.18 mm,

细粒级含量低,其中-5 mm粒级负累计含量40.9%,-0.9 mm粒级负累计含量19.22%,-0.074 mm粒级负累计含量3.32%。

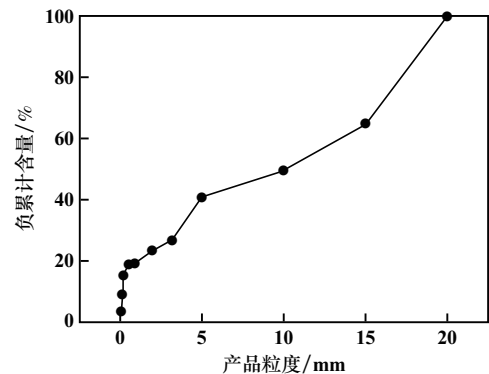


图1 原料粒度分布曲线

黄铜矿与磁铁矿单体解离度分别如图2和图3所示。随着粒度增加,磁铁矿单体解离度骤降,黄铜矿单体解离度呈下降趋势。

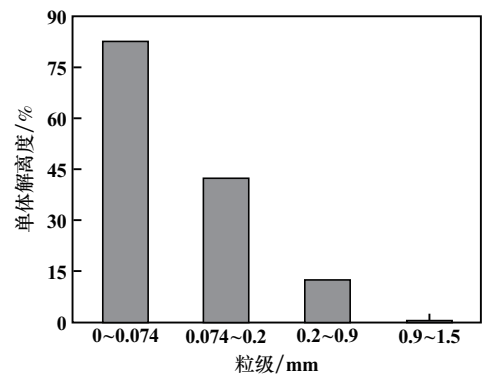


图2 磁铁矿单体解离度

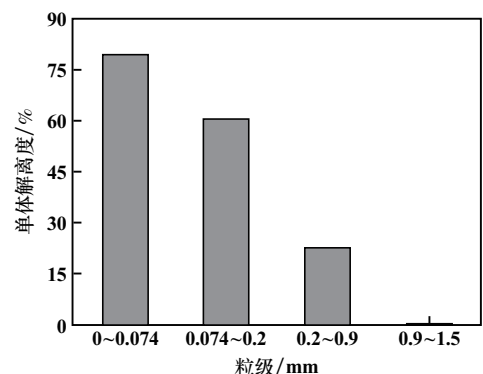


图3 黄铜矿单体解离度

2 试验结果及分析

2.1 破碎产品粒度特性

对样品进行高压辊磨破碎条件试验,确定高压辊磨工艺参数为:辊面比压力4 MPa、辊面转速0.26 m/s、

辊间距 4 mm。

对颚式破碎产品(简称颚破产品)和高压辊磨破碎产品(简称辊压产品)进行 3.2 mm 闭路破碎筛分,对其筛下产品进行粒度分析,结果如图 4 所示。由图 4 可知:颚破产品 P_{80} 为 0.895 mm, -0.074 mm 粒级负累计产率为 11.30%;辊压产品 P_{80} 为 0.807 mm, -0.074 mm 粒级负累计产率为 14.73%。辊压产品比颚破产品 -0.074 mm 粒级负累计产率增大了 3.43 个百分点,表明高压辊磨破碎在一定程度上比颚式破碎具有更大的破碎比,粉碎效率更高。

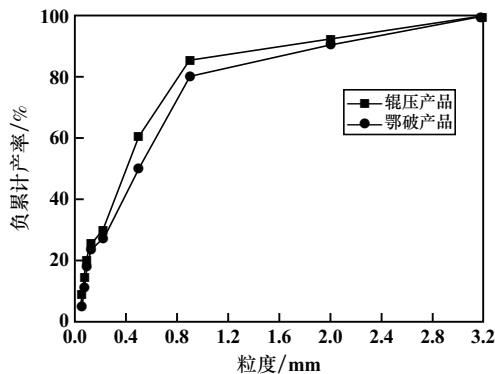


图 4 不同破碎方式下破碎产品粒度分布曲线

运用 R-R 方程(Rosin-Rammler)^[10-13]对 2 种破碎产品进行粒度特性分析:

$$R = \exp(-bd^n) \times 100\% \quad (1)$$

式中 R 为粒度大于 d 的颗粒负累计产率,%; d 为颗粒粒度,mm; b 为与产物粒度相关的参数; n 为均匀性系数, n 越小,粒度分布越均匀。

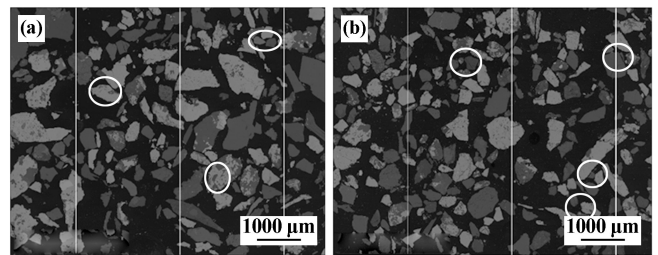
根据式(1)对图 4 中的 2 种破碎产品粒度分布曲线进行线性拟合分析,结果如表 3 所示(其中 r 为拟合相关系数)。由表 3 可以看出,辊压产品与颚破产品相比均匀性系数 n 减小,粒度分布更均匀。

表 3 不同粉碎产品 R-R 方程拟合分析结果

产品类型	n	b	r^2
辊压产品	0.841 6	1.832 4	0.957 7
颚破产品	0.869 6	1.439 2	0.963 3

对 2 种破碎产品进行 SEM 检测,结果如图 5 所示。由图 5 可以看出,辊压产品出现明显的裂纹,这些裂纹以晶界裂纹和晶内裂纹为主。有研究表明,辊间压力的大小决定辊间物料的密实程度和颗粒间相互挤压的强度^[14-15],这对物料的粉碎起着重要作用。文献[16]提出矿物缓解应变能的主要方式首先是使材料形状发生变化(原子或分子相对滑动),然后产生裂纹。矿物

给入高压辊磨机后,矿石所受到的应力分布不均匀,应力分布取决于单个矿物的力学性质,包括几何形状、物理化学特征、原始裂纹的存在和分布等。矿物受到不同方向、不同程度的应力时,晶体内部和不同晶间储存的能量使其不破裂,但当颗粒之间传递的应力大于晶体或不同晶相间的应力时,晶体内部储存的能量便会转化为自由表面能即新生原子势能,产生新的裂纹或使矿物断裂,而这些裂纹往往发生在原生裂纹或不同矿物之间^[17]。颚破产品很少存在微裂纹,且微裂纹分布多以晶内裂纹、穿晶裂纹为主,多数矿物仍处于共生状态。



(a) 颚破产品; (b) 辊压产品

图 5 - 3.2 mm 破碎产品 SEM 图

2.2 湿式磁选抛尾试验

为探究高压辊磨与颚式破碎对黄铜矿与磁铁矿分选的影响,对高压辊磨破碎和颚式破碎 3.2 mm 筛下产品进行 0.3 T 湿式磁选试验,结果如表 4 所示。从表 4 可以看出,辊压产品较颚破产品铁品位提高了 0.4 个百分点,回收率降低了 0.8 个百分点,铜品位提高了 0.01 个百分点、回收率提高了 2.11 个百分点;高压辊磨破碎较颚式破碎更有利于铁品位和铜品位的提升。

表 4 湿式磁选抛尾试验结果

破碎方式	产品名称	产率/%	品位/%			回收率/%		
			TFe	MFe	Cu	TFe	MFe	Cu
辊压	精矿	59.49	58.37	53.25	0.25	93.34	99.62	41.31
	尾矿	40.51	7.49	0.72	0.51	6.66	0.38	58.69
	给矿	100.00	37.20	31.80	0.36	100.00	100.00	100.00
颚破	精矿	60.44	57.97	52.53	0.24	94.14	99.50	39.20
	尾矿	39.56	5.52	0.41	0.57	5.86	0.50	60.80
	给矿	100.00	37.22	31.91	0.37	100.00	100.00	100.00

2.3 分选试验

2.3.1 浮选试验

对高压辊磨破碎和颚式破碎 3.2 mm 筛下产品进行一段球磨,磨矿产品经过 0.5 mm 筛分,使筛下产品粒度 -0.074 mm 粒级占比 85% 进行一段浮选。

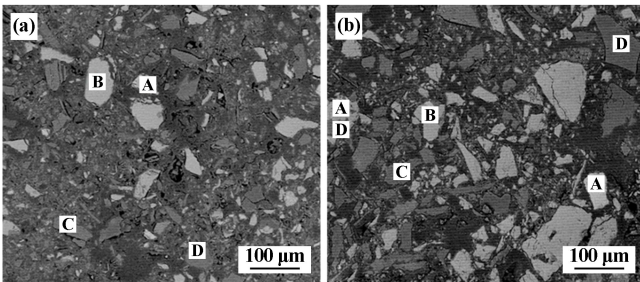
浮选给矿 125 g,浮选槽容积 500 mL,矿浆浓度 25%。在矿浆 pH 值为 7.5 时,加入 60 g/t 乙基黄药搅

拌 3 min、15 g/t 松醇油搅拌 2 min, 随后刮泡 5 min, 对取得的精矿和尾矿分别烘干称量, 浮选试验结果如表 5 所示。从表 5 可以看出, 辊压产品浮选精矿相比颚破产品浮选精矿产率降低了 1.61 个百分点、铁回收率降低了 2.58 个百分点、铜回收率提高了 1.84 个百分点、硫回收率提高了 1.60 个百分点。对比两者结果发现, 硫品位和回收率会随着铜品位和回收率升高而升高, 说明硫和铜为伴生关系, 铜主要以硫化铜形式存在, 这与原料特性分析结果相吻合。

表 5 浮选试验结果

破碎方式	产品名称	产率/%	品位/%			回收率/%		
			Fe	Cu	S	Fe	Cu	S
辊压	精矿	16.15	18.16	2.01	11.63	8.03	86.58	81.45
	尾矿	83.85	40.05	0.06	0.51	91.97	13.42	18.55
	给矿	100.00	36.51	0.37	2.31	100.00	100.00	100.00
颚破	精矿	17.76	21.55	1.80	11.01	10.61	84.74	79.85
	尾矿	82.24	39.19	0.07	0.60	89.39	15.26	20.15
	给矿	100.00	36.06	0.38	2.45	100.00	100.00	100.00

对 2 种不同破碎方式所得浮选精矿产品进行 SEM 分析, 结果如图 6 所示。对图 6 中 ABCD 点进行了 EDS 检测, 结果见图 7。从图 6 可以看出, 2 种不同破碎方式所得浮选精矿产品中均出现黄铜矿和黄铁矿, 同时也出现脉石矿物如方解石和铁角闪石等。分析图 7 结果发现, A 点物相 Cu、Fe、S 元素比例接近 1:1:2, 确定该点为黄铜矿; B 点物相 Fe、S 元素比例



(a) 辊压; (b) 鄂破

图 6 精矿 SEM 图

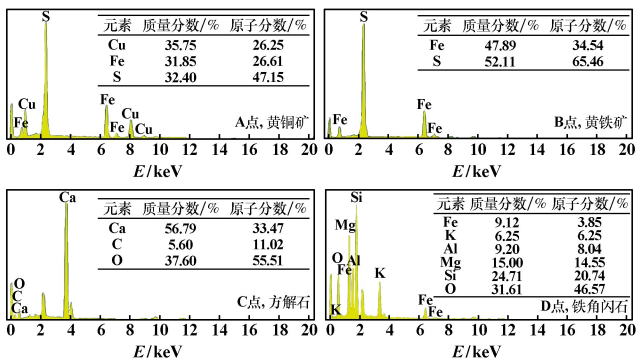


图 7 SEM 图中指定位置 EDS 分析结果

接近 1:2, 确定该点为黄铁矿; C 点物相 Ca、C、O 元素比例接近 3:1:5, 猜测该点为方解石; D 点物相包含 Fe、K、Al、Mg、Si、O, 根据元素比例和 MLA 分析结果, 猜测该点为铁角闪石。在颚破浮选精矿产品中出现了黄铜矿包裹铁角闪石现象, 而辊压浮选精矿产品不存在这种现象, 说明经过高压辊磨破碎, 产品单体解离度相比颚式破碎有所提高。

2.3.2 磁选试验

浮选尾矿主要为磁铁矿, 对浮选尾矿进行一段磁选试验。磁选使用的设备是磁选管, 磁场强度 0.15 T, 给矿浓度 10%。磁选试验结果如表 6 所示。从表 6 可以看出, 2 种浮选尾矿再磁选所得精矿产率相当, 辊压产品磁选精矿铁品位可达 66.04%、回收率为 90.23%, 颚破产品磁选精矿铁品位为 64.93%、回收率为 87.78%。

表 6 磁选试验结果

破碎方式	产品名称	产率/%	品位/%			回收率/%		
			Cu	Fe	S	Cu	Fe	S
辊压	精矿	54.35	0.04	66.04	0.49	27.18	90.23	46.72
	尾矿	45.65	0.13	8.52	0.67	72.83	9.77	53.28
	给矿	100.00	0.08	39.78	0.57	100.00	100.00	100.00
颚破	精矿	52.83	0.07	64.93	0.41	36.98	87.78	33.32
	尾矿	47.17	0.13	10.13	0.92	63.02	12.22	66.68
	给矿	100.00	0.10	39.08	0.65	100.00	100.00	100.00

3 结 论

1) 相比颚式破碎产品, 高压辊磨破碎产品具有细粒级产品产率高且粒度分布均匀的特点, 更易实现单体解离。

2) 磁选抛尾试验结果表明, 辊压产品较颚破产品铁品位提高了 0.4 个百分点、回收率降低了 0.8 个百分点, 铜品位提高了 0.01 个百分点、回收率提高了 2.11 个百分点; 高压辊磨破碎较颚式破碎更有利于铁品位和铜品位的提升。

3) 辊压产品浮选精矿铜品位 2.01%、回收率 86.58%, 铁品位 18.16%、回收率 8.03%, 硫品位 11.63%、回收率 81.45%; 颚破产品浮选精矿铜品位 1.80%、回收率 84.74%, 铁品位 21.55%、回收率 10.61%, 硫品位 11.01%、回收率 79.85%。辊压产品较颚破产品浮选精矿铜品位高 0.21 个百分点、回收率高 1.84 个百分点。

4) 浮选尾矿再磁选试验结果表明, 辊压产品所得磁选精矿铁品位 66.04%、回收率 90.23%, 颚破产品所得磁选精矿铁品位 64.93%、回收率 87.78%。辊压产品比颚破产品磁选精矿铁品位高 1.11 个百分点、回收率高 2.45 个百分点。

(下转第 68 页)

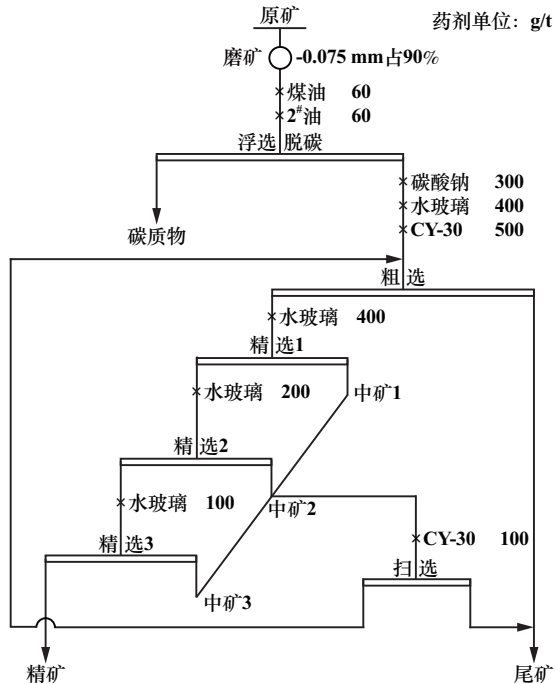


图3 “中矿合并扫选、扫精矿返回粗选”闭路试验流程

3 结 论

1) 贵州某重晶石矿属于微细粒难选含碳重晶石

(上接第64页)

参考文献:

- [1] 刘建远. 再谈高压辊磨机在矿物加工领域的应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2016(5):66-72.
- [2] 魏波, 张宏伟, 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, 2021(10):1-11.
- [3] 余良晖, 冯丹丹, 苏轶娜. 当前矿产资源形势与风险分析[J]. 国土资源情报, 2020(4):31-35.
- [4] Kazerani Nejad R, Sam A. Limitation of HPGR application[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 2017, 126(4):224-230.
- [5] 余祖芳, 谢毅龄. 提高马坑铁矿选矿生产能力的实践[J]. 福建冶金, 2019, 48(4):1-5.
- [6] 袁致涛, 朱 烁, 李丽匣, 等. 齐大山铁矿石高压辊磨产品磨矿及解离特性研究[J]. 金属矿山, 2013(10):50-53.
- [7] 裴晓东, 钱有军, 高 莉. 马坑铁矿石高压辊磨—湿式中磁预选—阶段磨选工艺试验[J]. 金属矿山, 2016(8):81-84.
- [8] 曹 钊, 屈奇奇, 曹永丹, 等. 破碎方式对贫磁铁矿预选效率和磨矿特性的影响[J]. 矿冶工程, 2017, 37(3):50-53.
- [9] 李玉红, 卢荣富, 李 宏. 大冶铁矿选矿厂技术改造[J]. 金属矿山, 2009(4):178-179.
- [10] 黄春源, 董晶晶. 大冶铁矿选矿厂洗矿工艺改造实践[J]. 现代矿业, 2018(6):149-151.

矿,目的矿物重晶石粒度分布极不均匀,与脉石矿物白云石、长石、石英嵌布关系复杂,碳质物嵌布粒度微细,影响精矿品位。

2) 采用全浮选流程,在磨矿细度-0.075 mm 粒级占90%条件下,采用“中矿合并扫选、扫精矿返粗选”流程浮选重晶石,可以获得精矿产率76.75%、BaSO₄品位92.62%、回收率88.46%的重晶石精矿,精矿密度4.32 g/cm³。研究结果可为该资源开发利用提供技术依据。

参考文献:

- [1] 陈思雨,刘四清,陈章鸿. 我国重晶石选矿与提纯研究现状及展望[J]. 矿产保护与利用, 2020(6):33-40.
- [2] 池冬瑞,程文庭,印万忠,等. 某低品位萤石重晶石矿综合利用技术研究[J]. 非金属矿, 2020, 43(4):69-72.
- [3] 刘 超,陈志强,罗传胜,等. 磁-浮联合工艺回收重晶石选矿试验研究[J]. 化工矿物与加工, 2019, 48(10):40-42.
- [4] 卢烁十,孙传尧. 盐类矿物浮选现状[J]. 矿冶, 2007(3):1-4.
- [5] 王 珏. 重晶石与重晶石矿中含钙含硅矿物浮选行为研究[D]. 贵阳:贵州大学矿业学院, 2019.

引用本文: 张立刚, 缪亚兵, 张 茂, 等. 某微细粒难选含碳重晶石选矿技术研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(4):65-68.

- [11] 董 浩. 磁黄铁矿与黄铜矿的交互作用对其浮选行为的影响规律研究[D]. 赣州:江西理工大学资源与环境工程学院, 2021.
- [12] LI Fei. Drawing Grain Size Distribution R-R-B Line Diagram by MATLAB[J]. Mine Engineering, 2015(3):166-171.
- [13] 侯 英,丁亚卓,印万忠,等. 邦铺铜铜矿石高压辊磨后物料的特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(12):4781-4786.
- [14] Saramak D, Kleiv R A. The effect of feed moisture on the comminution efficiency of HPGR circuits[J]. Minerals Engineering, 2013, 43/44:105-111.
- [15] WANG C, Nadolski S, Mejia O, et al. Energy and Cost Comparisons of HPGR based circuits with the SABC circuit installed at the Huckleberry Mine[C]//45th Annual Canadian Mineral Processors Operators Conference. 2013:121-135.
- [16] Wills B A. Mineral processing technology[M]. Holand: Elsevier Science & Technology Books, 2006.
- [17] Tavares L M. Particle weakening in high-pressure roll grinding[J]. Minerals Engineering, 2005, 18(7):651-657.

引用本文: 陈 兴,陈铁军,韦 东,等. 高压辊磨超细碎对铜铁共生矿分选的影响[J]. 矿冶工程, 2023, 43(4):61-64.