

## 山东某金矿石可磨性及浮选优化试验研究

高瑞琢<sup>1</sup>, 李文超<sup>1</sup>, 季玉兴<sup>2</sup>, 孔令安<sup>2</sup>, 赵永强<sup>3\*</sup>, 张帅<sup>1</sup>, 周海涛<sup>1</sup>

(1. 青岛金星矿业股份有限公司; 2. 山东黄金冶炼有限公司; 3. 山东科技大学能源与矿业工程学院)

**摘要:**山东某金矿因易选易处理金矿资源逐渐枯竭,入选品位不断下降,故采用混合不同矿脉金矿资源的方式配矿,但产品指标波动较大。为查明原因,开展工艺矿物学研究,并进行了可磨性及浮选优化试验。试验结果表明:混合矿金品位为3.45 g/t;金矿物主要与黄铁矿紧密共生,以包裹金为主,少量呈连生状。通过邦德球磨功指数试验发现,混合矿样功指数 $W_{10}$ 为23.36 kW·h/t,显著高于原单一矿脉矿样。在丁基黄药用量180 g/t、丁铵黑药用量2 g/t、2号油用量30 g/t、磨矿细度-0.074 mm占60.32%的条件下,经一次粗选,二次精选,三次扫选流程,获得金品位53.23 g/t的精矿,金回收率从90.08%提升至94.11%。同时,丁铵黑药用量试验发现,丁铵黑药用量较大时,泡沫较丰富,导致浮选操作难度增加。

**关键词:**金矿;邦德球磨;功指数;嵌布特征;浮选;混合矿;药剂制度

中图分类号:TD953

文章编号:1001-1277(2025)09-0104-05

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20250912

## 引言

随着金矿资源的大规模开发利用,易选易处理资源逐渐枯竭,而嵌布粒度细、品位低的金矿资源日益增多<sup>[1-2]</sup>。为保证选矿厂运行稳定,避免生产指标受原矿品位降低和矿石性质波动的影响,目前部分选矿厂采用混合高低品位、不同矿脉金矿资源的配矿模式,其主要目的在于稳定入选品位、保证处理量,以维持生产的连续性和规模效益<sup>[3-5]</sup>。然而,这种混合配矿模式使得磨矿、浮选等环节难以达到最优状态,混合矿的整体回收率可能低于单独处理高品位矿石的水平<sup>[6-8]</sup>。

山东胶东某金矿为硫化物石英型金矿,黄铁矿是金的主要载体矿物<sup>[9-10]</sup>。自2022年以来,6#矿脉金品位不断下降。采用不同矿脉金矿石混合分选后,产品指标波动较大,突出表现为选矿尾矿品位升高,且金回收率从94.32%下降到90.08%<sup>[11]</sup>。与原先处理的单一矿脉相比,混合矿在金品位、氧化程度、可磨性方面都存在着较大的差异。此外,目前对矿石性质与磨矿、浮选工艺参数之间的内在关系认识不足,导致在

后续选矿流程中,提升选矿厂经济技术指标缺乏科学依据。

因此,本文首先研究矿石性质,查明金的赋存状态、其与脉石矿物的共生规律,并以此为基础,通过邦德球磨功指数试验和浮选优化试验研究,在工艺流程与选别指标优化等方面提出合理化建议,以促进企业可持续发展。

## 1 试验部分

## 1.1 试验材料

原单一矿脉金品位为3 g/t左右。随着开采的不断深入,金品位不断下降,目前降至1 g/t左右。为满足选矿厂对原料品位的要求,现场将不同矿脉金矿石混合均匀。对现场所用混合矿样进行化学成分和物相组成分析,结果见表1。由表1可知:SiO<sub>2</sub>质量分数较高,高达68.47%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O和CaO质量分数分别为9.38%、8.63%、3.78%和1.28%。主要回收元素为Au、Ag,Au品位为3.45 g/t,Ag品位较低,仅为9.45 g/t,不具备单独回收的价值。

利用矿物自动定量分析系统(BPMA)和扫描电镜

表1 矿样成分分析结果

Table 1 Composition analysis results of ore samples

成分	Au <sup>1)</sup>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Na <sub>2</sub> O	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ag <sup>2)</sup>	S	其他
w/%	3.45	68.47	9.38	8.63	3.78	1.28	0.88	0.37	0.08	9.45	5.33	1.80

注:1)w(Au)/(g·t<sup>-1</sup>);2)w(Ag)/(g·t<sup>-1</sup>)。

收稿日期:2025-03-10;修回日期:2025-04-13

基金项目:山东省高等学校青创科技支持计划项目(2023KJ303)

作者简介:高瑞琢(1987—),男,工程师,从事选矿工艺和技术管理工作;E-mail:gaoruizhuo@163.com

\*通信作者:赵永强(1992—),男,讲师,博士,从事矿产资源综合利用研究工作;E-mail:zhaoyq@sdust.edu.cn

能谱分析等手段,对矿样进行矿物组成及相对含量分析,结果见表2。由表2可知:矿样中主要金属矿物为黄铁矿,相对含量为14.26%;其他金属矿物相对含量较少,铁氧化物、方铅矿和磁黄铁矿相对含量分别为1.89%、0.42%、0.33%。脉石矿物主要为石英、长石、云母,相对含量分别为36.14%、19.99%、16.43%。

表2 矿样的主要矿物及相对含量分析结果

矿物	石英	长石	黄铁矿	云母	白榴石	铁氧化物	方铅矿	磁黄铁矿	其他
相对含量/%	36.14	19.99	14.26	16.43	5.96	1.89	0.42	0.33	4.58

对金矿物的嵌布特征进行分析统计,汇总结果见表3。由表3可知:矿样中包裹金的分布率最大,为76.87%,其次是连生金,其分布率为19.35%,单体金的分布率相对较小,为3.78%。其中,被黄铁矿包裹的分布率较大,为44.12%,被石英、磁铁矿包裹,被方铅矿、黄铁矿包裹,被黄铁矿、磁铁矿包裹的分布率分别为13.41%、11.39%和5.04%。在连生金中,与黄铁矿连生的分布率相对较高,为12.22%。

表3 矿样中金矿物的嵌布特征

金与载体矿物之间的嵌布关系	金矿物嵌布特征	分布率/%	合计/%
包裹金	被黄铁矿包裹	44.12	76.87
	被石英、磁铁矿包裹	13.41	
	被方铅矿、黄铁矿包裹	11.39	
	被黄铁矿、磁铁矿包裹	5.04	
	被磁铁矿包裹	1.75	
	被石英包裹	1.16	
连生金	与黄铁矿连生	12.22	19.35
	与石英、磁铁矿连生	5.96	
	与方铅矿、黄铁矿连生	1.17	
单体金			3.78

## 1.2 邦德球磨功指数测定方法

邦德球磨功指数是表征矿石颗粒在球磨机中磨难易程度的一项指标,也可以应用于球磨机的选型和磨矿过程的效率评价<sup>[12-14]</sup>。现场金矿石磨矿产品粒度-0.074 mm占50%~65%,本试验邦德球磨功指数测定选取的筛孔尺寸为0.15 mm。功指数测定使用专用球磨机进行干式闭路磨矿,当循环负荷达到250%时停止磨矿;在原料研磨至平衡状态后,以 $G_{bp}$ 、 $F_{80}$ 、 $P_{80}$ 计算混合矿样的功指数,从而评价其粉磨的难易程度。其计算公式<sup>[15-17]</sup>如式(1)所示:

$$W_{ib} = \frac{4.906}{P_1^{0.23} G_{bp}^{0.82} \left( \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)} \quad (1)$$

式中: $W_{ib}$ 为邦德球磨功指数(kW·h/t); $p_1$ 为选定的筛

孔尺寸( $\mu\text{m}$ ); $G_{bp}$ 为每转新生成合格粒级的物料质量(g/t); $P_{80}$ 为产品中80%通过筛孔的孔径( $\mu\text{m}$ ); $F_{80}$ 为入料产品中80%通过筛孔的孔径( $\mu\text{m}$ )。

## 1.3 试验设备及试剂

本研究所使用邦德功指数球磨机设备型号XMGQ- $\phi 305 \text{ mm} \times 305 \text{ mm}$ ,筒体尺寸 $\phi 305 \text{ mm} \times 305 \text{ mm}$ ,筒体转速 $(70 \pm 0.5) \text{ r/min}$ ,电动机功率0.75 kW,内装钢球质量20.568 kg,一次加料体积达到 $700 \text{ cm}^3$ 。所采用的BPMA系统由扫描电子显微镜(TESCAN VEGA3 XMU)和X射线能谱仪(Thermo Scientific NORAN System 7-UD60( $60 \text{ mm}^2$ ))构成。试验所用设备为球磨机XMQ- $\phi 240 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$ 、XFD1.5 L浮选机。浮选试验所用捕收剂为丁基黄药、丁铵黑药(工业级,纯度 $\geq 90\%$ )和起泡剂2号油(工业级)均取自选矿厂现场所使用的药剂。

## 2 邦德球磨功指数试验

### 2.1 $F_{80}$ 测定

磨矿给料粒度特性:将矿样混合均匀,用0.074 mm、0.10 mm、0.15 mm、0.212 mm、0.495 mm、1.40 mm、2.36 mm、2.80 mm、3.35 mm筛孔进行筛分,并绘制测试矿样的给矿粒度特性曲线,见图1。由图1可知,给矿矿样80%通过筛孔孔径的大小为1.466 mm,即 $F_{80}$ 为1.466 mm。

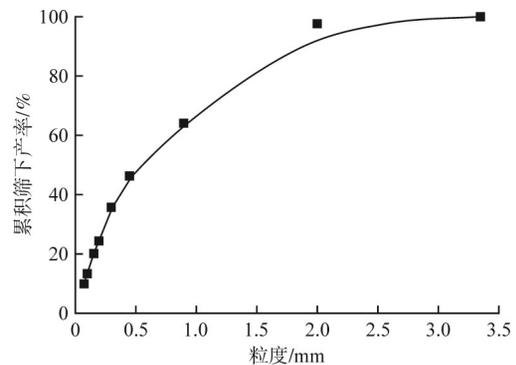


图1 邦德球磨功指数给矿粒度特性曲线

Fig. 1 Particle size characteristic curve of feed in Bond ball milling work index test

### 2.2 松散密度测定

在邦德功指数测试中,测定矿样的松散密度,目的是修正磨机装料量,消除密度对粉碎效率的影响,确保粉碎能耗计算的科学与可比性。测定过程如下:将-3.35 mm矿样混合均匀,对其进行松散密度测定。用700 mL量筒装满矿样,进行称量,为保证试验的准确性,进行3次测定,取平均值,结果见表4。由表4可知:矿样松散密度为 $1.587 \text{ g/cm}^3$ ,体积为700 mL给料矿样测试质量为1 111.02 g。

表4 松散密度测定结果

Table 4 Measured bulk densities of the sample  $g/cm^3$

第一次称量	第二次称量	第三次称量	平均值
1.593	1.602	1.566	1.587

### 2.3 球磨机每转细粉量测定

将试样装入球磨机,根据经验设定初始磨矿转速为70 r/min。磨矿后,将矿样过-0.15 mm筛,测得每转新生成的-0.15 mm 粒级物料质量,该值即为  $G_{bp}$ ,结果见表5。在连续3个  $G_{bp}$  值中,最大值与最小值之差不超过这3个  $G_{bp}$  平均值的3%时,则认为试验达到平衡,结束磨矿,结果见表6。

表5 0.15 mm 邦德球磨功指数测定试验结果

Table 5 Test results of 0.15 mm Bond ball mill work index

磨矿次序	磨矿转速/( $r \cdot min^{-1}$ )	磨矿新生成-0.15 mm 粒级物料质量/g	每转新生成-0.15 mm 粒级物料质量/( $g \cdot r^{-1}$ )
1	70	123.66	1.77
2	145	245.49	1.69
3	153	242.31	1.58
4	165	279.43	1.69
5	150	248.38	1.66
6	157	258.45	1.65

表6 3个  $G_{bp}$  平均值计算结果

Table 6 Calculation results of the average value of 3  $G_{bp}$

磨矿次序	$G_{bp}/(g \cdot r^{-1})$
4	1.69
5	1.66
6	1.65
平均值	1.67

经过测定,第1~3磨矿周期,每转新生成-0.15 mm 粒级物料质量波动较大,分别为1.77 g/r、1.69 g/r、1.58 g/r。随着磨矿周期继续增加,每转新生成-0.15 mm 粒级物料质量逐渐稳定,为1.65~1.69 g/r。通过表6计算可得,试验稳定后连续3个周期的  $G_{bp}$  平均值为1.67 g/r。这3个  $G_{bp}$  实测值的最大值与最小值之差为其平均值(1.67 g/r)的2.40%,未超过3%,表明试验达到平衡。

### 2.4 $P_{80}$ 及功指数计算

当  $G_{bp}$  达到稳定值后,对最终磨矿产品进行粒度筛析,绘制产品粒度特性曲线,见图2。由图2可知,最终磨矿产品中80%物料通过的粒度尺寸  $P_{80}$  为206  $\mu m$ 。

最后进行邦德球磨功指数计算:通过磨矿试验和粒度分析可得到  $p_1$ 、 $G_{bp}$ 、 $P_{80}$ 、 $F_{80}$  值,结果见表7。

将上述各参数代入邦德球磨功指数计算公式可

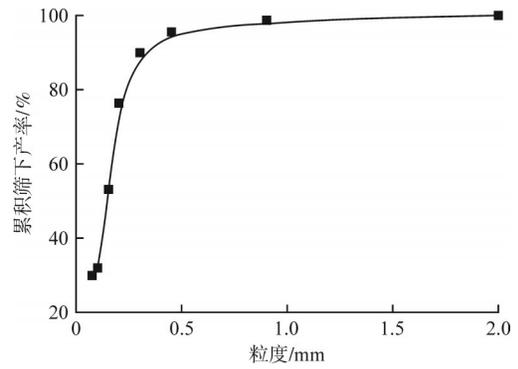


图2 最终磨矿产品粒度特性曲线

Fig. 2 Particle size characteristic curve of final grinding products

表7 邦德球磨功指数相关测定结果

Table 7 Related determination results of Bond ball mill work index

试验筛孔	可磨度	产品粒度	入磨粒度
$p_1/\mu m$	$G_{bp}/(g \cdot r^{-1})$	$P_{80}/\mu m$	$F_{80}/\mu m$
150	1.67	206	1 466

得,混合矿脉矿样的  $W_{ib}=23.36 kW \cdot h/t$ 。采用相同的方法,对原单一矿脉矿样的邦德球磨功指数进行计算,得出  $W_{ib}=20.74 kW \cdot h/t$ 。通过以上邦德球磨功指数试验发现,与单一矿脉矿样相比,混合矿脉矿样的邦德球磨功指数较大。因此,现场需优化现有的磨矿流程,如降低入磨粒度、优化钢球尺寸和配比、调整磨矿浓度、提高充填率等方式,提高对混合矿脉矿样的磨矿效果。

## 3 浮选条件优化试验研究

### 3.1 丁基黄药用量

参考现场药剂用量,进行丁基黄药用量浮选试验,药剂制度:2号油用量为30 g/t,磨矿时间14 min(粒度-0.074 mm 占55.16%),丁基黄药用量分别为60 g/t、120 g/t、180 g/t、240 g/t,试验流程见图3。由图3可知:在一定范围内,随着丁基黄药用量的增加,浮选精矿的金品位和金回收率都逐渐上升,在用量为180 g/t时,达到最高值。但是,继续增加丁基黄药用量,金品位迅速下降,金回收率缓慢下降,说明添加过量丁基黄药后,破坏了浮选过程的选择性,部分含金矿物可浮性变差,进而影响了金矿物的回收。当丁基黄药用量为180 g/t时,金回收率较高,捕收效果较好,此时金品位为20.19 g/t,金回收率为75.95%。

### 3.2 丁铵黑药用量

由于矿样中含有少量方铅矿、磁黄铁矿等金属矿物,采用单一捕收剂往往难以获得满意的金回收指标<sup>[18-20]</sup>。因此,在添加最佳丁基黄药用量的前提下,进行丁铵黑药用量浮选试验,用量分别为0,1,2,3,4 g/t,试验结果见图4。

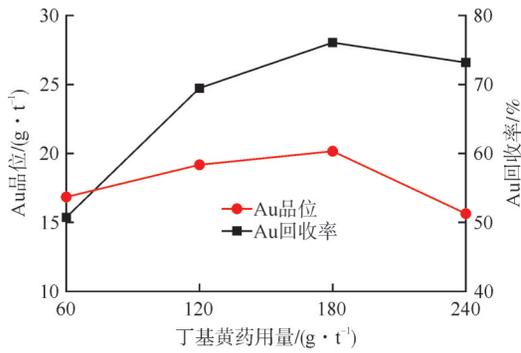


图3 丁基黄药用量试验结果

Fig. 3 Test results of xanthate dosage

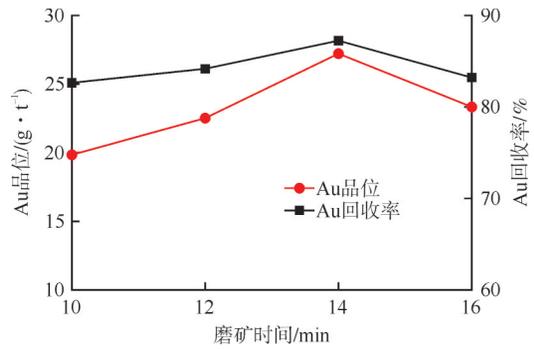


图5 磨矿时间试验结果

Fig. 5 Test results of grinding time

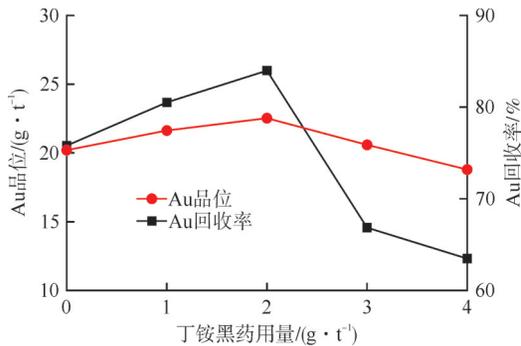


图4 丁胺黑药用量试验结果

Fig. 4 Test results of dithiophosphate dosage

由图4中可知:随着丁胺黑药用量增加,金回收率迅速上升,当用量超过2 g/t后,金回收率不断下降;金品位随着丁胺黑药用量增加,先缓慢上升后缓慢下降。这是丁胺黑药用量过大时,其具有一定的起泡性能,导致泡沫过于丰富,增大了浮选控制难度,精矿金品位和金回收率显著降低。综合分析,丁胺黑药最佳用量为2 g/t。

### 3.3 磨矿时间试验

在最佳丁基黄药和丁胺黑药用量的条件下,开展磨矿时间试验,结果见图5。由图5可知:精矿中金回收率和金品位随着磨矿时间的延长,都不断上升,均在14 min时达到最大值,随后开始下降。这表明,磨矿时间为14 min时,浮选效果最好,此时磨矿细度-0.074 mm占60.32%,精矿金品位为27.21 g/t,金回收率为87.33%。因此,选取14 min作为最佳磨矿时间。磨矿时间试验结果也说明,载金矿物的嵌布粒度相对偏细,矿石硬度较大,适当的细磨后,才能达到较好的单体解离水平。

### 3.4 浮选流程试验

在最佳药剂用量(丁基黄药用量180 g/t、丁胺黑药用量2 g/t、2号油用量为30 g/t)、磨矿细度-0.074 mm占60.32%的条件下,对是否需要增加精选及增加几次扫选进行了试验。经过试验发现,两次精选、三次扫选之后得到的精矿金品位已经达到了53.23 g/t,金回收率达到了94.11%,符合选矿厂浮选指标要求。

因此,确定的最佳条件和流程具体见图6。

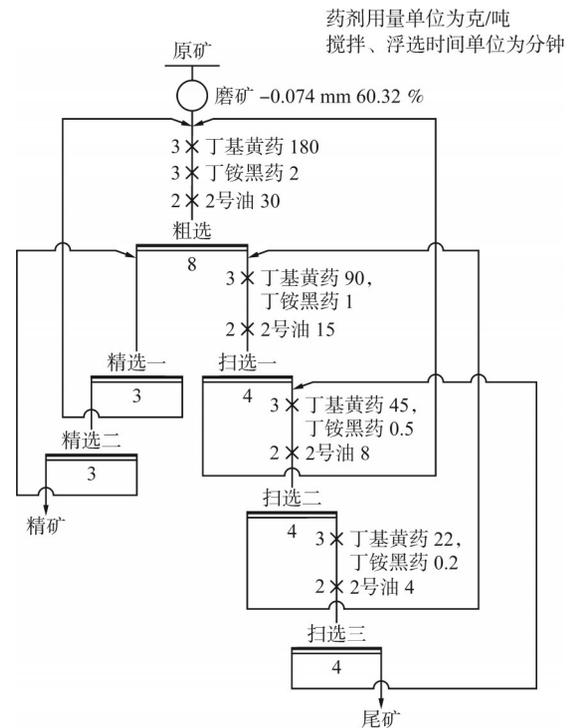


图6 最佳浮选流程及药剂用量

Fig. 6 Optimal flotation process and reagent dosage

## 4 结论

1)结合现场实际生产情况,混合矿样金品位为3.45 g/t。金属矿物主要为黄铁矿,以及少量磁黄铁矿、铁矿物和方铅矿,脉石矿物主要为石英、长石、云母等。

2)矿样金矿物嵌布特征分析表明,金矿物与黄铁矿紧密共生,主要以包裹金和连生金的形式存在,其中,包裹金占金矿物总量的76.87%。对混合矿样开展邦德球磨功指数试验,计算得出其功指数  $W_{ib}$  为23.36 kW·h/t,高于原单一矿脉矿样。

3)浮选试验结果表明:在丁基黄药用量180 g/t、丁胺黑药用量2 g/t、2号油用量30 g/t、磨矿细度-0.074 mm占60.32%的条件下,经过一次粗选、两次精选、三次扫选流程,所得精矿金品位达到53.23 g/t,

金回收率为94.11%。同时发现,丁铵黑药用量不宜过大,用量较大时,会导致泡沫过黏或过量,增加浮选操作难度。

#### [参考文献]

- [1] 朱志雄, 聂光华, 邓强, 等. 贵州某卡林型金矿工艺矿物学研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(4): 33-39, 58.
- [2] 张文杰, 朱辉, 陈桃, 等. 老挝某含碳金矿工艺矿物学及处理工艺研究[J]. 有色金属工程, 2022, 12(6): 135-143.
- [3] 陈英杰, 谢庭芳, 张松, 等. 西南地区某高氧化率铜铅杂混合矿分选实验[J/OL]. 矿产综合利用, 1-15[2025-02-22]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1251.TD.20231108.1734.024>.
- [4] 刘峰, 江旭, 李杰, 等. 河南某铅铝混合精矿分离试验研究[J]. 现代矿业, 2024, 40(1): 164-167.
- [5] 李宇宏, 李俊英. 某钼铋锡混合精矿磁选分离试验研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(3): 82-85.
- [6] 冯泽平, 李国利, 杨紫洋, 等. 某含金铜硫矿浮选分离试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(1): 112-119.
- [7] 陈艳波, 李光胜, 朱幸福, 等. 山东某含砷高硫金矿浮选实验研究[J/OL]. 矿产综合利用, 1-10[2025-02-22]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1251.TD.20230823.1113.004>.
- [8] 滕永涛. 不同类型金矿成因及地质特征[J]. 世界有色金属, 2024(2): 127-129.
- [9] 亓传铎, 杨建, 王楠. 三山岛金矿不同矿体矿石可选性试验研究[J]. 黄金, 2017, 38(12): 48-51.
- [10] 杨晓峰, 石宝宝, 李景波, 等. 胶东某金矿选矿工艺流程改造的实验研究[J]. 黑龙江科技大学学报, 2020, 30(6): 619-622.
- [11] 王艺竹, 王佳怡, 向泽慧, 等. 山东某金矿工艺矿物学及选矿影响因素研究[J]. 黄金, 2024, 45(2): 33-36.
- [12] 李沛, 刘建远, 于涛, 等. 邦德可磨度测定替代方法的研究进展[J]. 金属矿山, 2020(7): 10-15.
- [13] 侯英, 丁亚卓, 印万忠, 等. 矿石高压辊磨产品球磨功指数计算程序的建立[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(11): 4385-4391.
- [14] 李欣峰, 印万忠, 贺泽铭, 等. 邦德球磨功指数试验的影响因素[J]. 有色金属(选矿部分), 2019(3): 69-72.
- [15] 邱跃琴, 刘冰, 张覃, 等. 含稀土磷矿石磨矿功的简易测定[J]. 矿业研究与开发, 2010, 30(5): 50-51, 76.
- [16] 姚靓. 湖南某矿山石煤资源磨矿细度试验研究[J]. 新疆有色金属, 2022, 45(2): 13-15.
- [17] 黄晓毅, 杨平伟, 陈晓博, 等. 青海某低品位金矿邦德球磨功指数测定研究[J]. 有色金属设计, 2020, 47(4): 28-30.
- [18] 洪秋阳, 汤玉和, 王毓华, 等. 磁黄铁矿结构性质与可浮性差异研究[J]. 金属矿山, 2011(1): 64-67.
- [19] 刘之能, 覃文庆, 张建文. 丁基铵黑药体系下单斜磁黄铁矿浮选行为及其表面吸附机理[J]. 有色金属(选矿部分), 2009(2): 41-44.
- [20] 邱芝莲, 方建军, 何海洋, 等. 方铅矿表面亲水性及浮选抑制机理研究进展[J]. 化工矿物与加工, 2024, 53(4): 63-70.

## Experimental study of grindability and flotation optimization on a gold ore from Shandong Province

Gao Ruizhuo<sup>1</sup>, Li Wenchao<sup>1</sup>, Ji Yuxing<sup>2</sup>, Kong Ling'an<sup>2</sup>, Zhao Yongqiang<sup>3</sup>, Zhang Shuai<sup>1</sup>, Zhou Haitao<sup>1</sup>

(1. Qingdao Jinxing Mining Co., Ltd.; 2. Shandong Gold Smelting Co., Ltd.;

3. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology)

**Abstract:** With the gradual depletion of easily separated and processed gold ore resources in a gold deposit in Shandong Province, and the continuous decline in head grade, a blending strategy involving gold resources from different ore veins was adopted. However, product indices exhibited large fluctuations. To determine the cause, a process mineralogy study was conducted, along with grindability and flotation tests. The test results showed that the blended ore had a gold grade of 3.45 g/t. Gold minerals mainly occurred in close association with pyrite, predominantly as inclusions, with a small proportion as intergrowths. Bond ball mill work index tests indicated that the ore sample had a work index ( $W_{ib}$ ) of 23.36 kW·h/t, significantly higher than that of the original single-vein ore sample. Under the conditions of 180 g/t of xanthate, 2 g/t of dithiophosphate, 30 g/t of No. 2 oil, and a grinding fineness of -0.074 mm accounting for 60.32%, a one rougher-two cleaner-three scavenger flowsheet produced a concentrate with a gold grade of 53.23 g/t, and the recovery rate increased from 90.08% to 94.11%. In addition, tests on the dithiophosphate dosage showed that the amount should not be excessive; an excessive dosage led to abundant froth, increasing the difficulty of the flotation operation.

**Keywords:** gold ore; Bond ball mill; work index; distribution characteristics; flotation; blended ore; reagent regime