

## 甘肃某金矿选矿工艺优化及应用

黄裕卿<sup>1,2</sup>, 樊军怀<sup>2,3</sup>, 李广<sup>1,2</sup>, 吕占兴<sup>2,3</sup>, 田树国<sup>1,2</sup>, 刘永松<sup>2,3</sup>

(1. 低品位难处理黄金资源综合利用国家重点实验室, 福建 龙岩 361000; 2. 紫金矿业集团股份有限公司, 福建 龙岩 361000; 3. 陇南紫金矿业有限公司, 甘肃 陇南 742500)

**摘要:** 甘肃某金矿为维持生产稳定, 始终保持较高的磨矿细度, 给尾矿筑坝带来一定的负面影响。笔者通过原矿磨矿细度放粗探索, 并结合强捕收剂的使用, 发现采用戊基黄药替代原组合药剂中的丁基黄药, 磨矿细度放粗5个百分点, 金的回收率略有提高。小试和工业实验结果表明, 粗磨+中矿再磨工艺可以达到原矿直接细磨的浮选指标, 而且降低了尾矿细度, 优化了粒度组成; 且使用戊基黄药替换丁基黄药, 并调整戊基黄药和MC的比例至3:1, 可进一步降低了尾矿中金的损失。

**关键词:** 金矿; 磨矿细度; 中矿再磨; 戊基黄药; 工业实验

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2025.01.014

中图分类号: TD953 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2025)01-0119-06

**引用格式:** 黄裕卿, 樊军怀, 李广, 等. 甘肃某金矿选矿工艺优化及应用[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(1): 119-124.

HUANG Yuqing, FAN Junhui, LI Guang, et al. Optimization research and industrial application of beneficiation process in a gold mine in gansu province[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(1): 119-124.

黄金是一种具有重要战略意义的稀缺贵金属, 兼具商品和金融的双重属性。我国是全球第一大黄金生产国和消费国, 2021年黄金产量328.98 t, 黄金消费量1 120.9 t, 供需缺口达到了791.92 t, 供应压力逐渐增大, 供需缺口长期存在<sup>[1]</sup>。

我国黄金资源较丰富, 但呈现“三多、三少”的特点, 即贫矿多、富矿少, 小矿多、大矿少, 共伴生矿多、单一金矿少<sup>[2]</sup>。随着矿产资源的不断开发, 低品位难处理金矿资源占比逐渐增大, 具有工业开采价值的金矿边界品位已降至1 g/t<sup>[3]</sup>。我国在黄金矿产资源的研究和开发利用上居世界领先水平, 尤其在低品位难处理金矿方面<sup>[4-10]</sup>。

甘肃某金矿整个矿区平均含金品位在1.5 g/t左右、含硫3%左右、含砷0.2%左右, 属低品位含砷难选冶金矿石。现场采用半自磨机+球磨机碎磨流程(“SAB”流程)和“一粗-两扫-三精”的浮

选工艺流程。生产数据显示, 2021年5~9月生产累积原矿品位1.607 g/t, 累积回收率86.50%, 累积精矿品位24.89 g/t, 累积尾矿品位0.230 g/t, 累积尾矿细度-0.074 mm 87.0%左右。在目前的磨矿细度下, 生产工艺较稳定, 可以获得较高的回收率, 但高磨矿细度对尾矿库上游式筑坝带来较大负面影响, 比如带来滩面坡度小、浸润线埋深浅等问题。为了解决上游式筑坝坝体稳定性的问题, 生产中需适当降低磨矿细度, 但降低磨矿细度势必会影响回收率。为此, 开展了粗磨(降低原矿的磨矿细度)+中矿再磨的工艺研究。

一般地, 黄药碳链增长而捕收性能增强, 而其选择性则相反。实验和机理研究表明<sup>[11-12]</sup>, 戊基黄药的捕收性能强于丁基黄药。因此, 开展了戊基黄药替代丁基黄药的实验研究, 旨在降低尾矿细度的同时, 保证金的回收。

收稿日期: 2022-03-31

作者简介: 黄裕卿(1995-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事有色金属选矿工艺等方面的研究。

通信作者: 李广(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事复杂矿物选矿工艺及矿产综合利用研究。

### 1 矿石性质

甘肃某金矿矿石中金属矿物主要为黄铁矿、毒砂，微量的铁氧化物、辉铜矿、斑铜矿、闪锌矿、方铅矿，非金属矿物主要为石英、云母、长

石，其次为白云石、铁白云石、绿泥石等。载金矿物主要是黄铁矿，其次为毒砂，少量绢云母、褐铁矿；银金矿、含银自然金为主要的金矿物。

矿石的主要化学成分分析结果见表 1，金化学物相分析结果见表 2。

表 1 矿石主要化学成分分析结果/%

Table 1 Analysis results of main chemical components of the ore

Au*	Ag*	Cu	As	TFe	TS	TC	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO
1.52	<2	<0.01	0.16	4.24	2.79	0.70	60.83	15.59	2.83	1.90

\*单位为g/t。

表 2 矿石金化学物相分析结果

Table 2 Analysis results of gold phase of the ore

名称	裸露金	碳酸盐及 氧化物包裹金	硫化物 包裹金	硅酸盐及 其他包裹金	合计
含量/(g/t)	0.660	0.034	0.730	0.100	1.524
占比/%	43.31	2.23	47.90	6.56	100.00

由表 1 可知，矿石中 Ag 和 Cu 的含量非常低，MgO 和 CaO 的含量较低。由表 2 可知，矿石中金主要以裸露金和硫化物包裹金的形式存在。

### 2 实验室浮选实验

现场生产采用直接细磨工艺（原矿磨矿细度-0.074 mm 85%），经过一段粗选、两段扫选、三段精选作业得到金精矿，工艺流程见图 1。

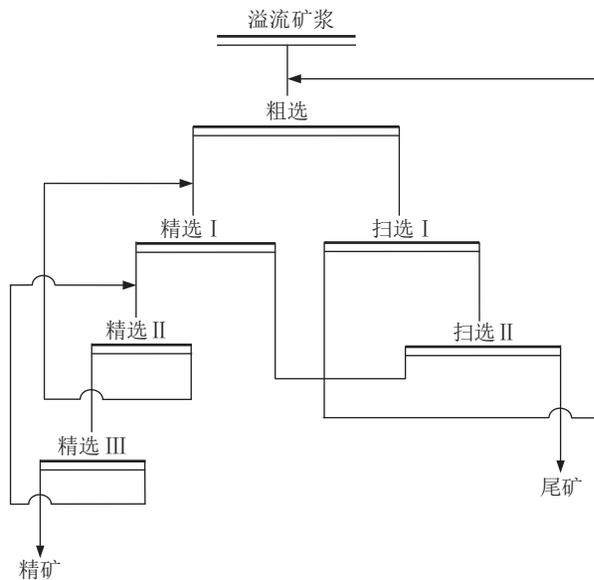


图 1 现场生产浮选工艺流程

Fig.1 Flowsheet of flotation process of on-site production

为降低尾矿细度，开展了粗磨+中矿再磨工艺的实验室研究，实验对象为生产溢流矿浆。不同

细度的溢流矿浆取自同一水力旋流器组的不同旋流器，因沉砂口磨损程度不同，细度存在差异，分别取得-0.074 mm 86% 和 79% 的溢流矿浆开展对比实验。

粗磨+中矿再磨工艺的闭路浮选流程见图 2，细磨工艺的闭路实验流程参照图 1，药剂制度同图 2。两种磨矿工艺的闭路浮选实验对比结果见表 3。

由表 3 可知，细磨工艺下（原矿磨矿细度-0.074 mm 86%），现场溢流矿浆经过一粗、两扫、三精的闭路流程，可以得到产率 5.40%、含金 28.26 g/t、金回收率 88.97% 的金精矿，在粗磨（原矿磨矿细度-0.074 mm 79%）+中矿再磨工艺中，可以得到产率 5.29%、含金 28.97 g/t、金回收率 89.25% 的金精矿。

闭路对比实验结果表明，粗磨+中矿再磨工艺可以达到原矿直接细磨的选矿效果，甚至更优。对比细磨工艺，现场溢流样采用粗磨+中矿再磨工艺所得的精矿金回收率和品位均略有提升，回收率提高了 0.28%，品位提升了 0.71 g/t。

为进一步提升金的回收率，开展了粗磨+中矿再磨工艺下戊基黄药替代丁基黄药的相关实验。在条件实验的基础上，确定了组合捕收剂中戊基黄药和 MC 的用量比例为 3:1，丁铵黑药用量保持不变。同样地，以现场溢流样作实验对象，进行了原组合捕收剂（MC+丁基黄药+丁铵黑药）和新组合捕收剂（MC+戊基黄药+丁铵黑药）的闭路对比实验，其中新组合药剂用量 MC 为（14+7+2）g/t，戊基黄药（42+21+6）g/t。捕收剂浮选流程工艺见图 2，实验结果见表 4。

由表 4 可知，粗磨+中矿再磨工艺采用新组合捕收剂（MC+戊基黄药+丁铵黑药，MC:戊基黄

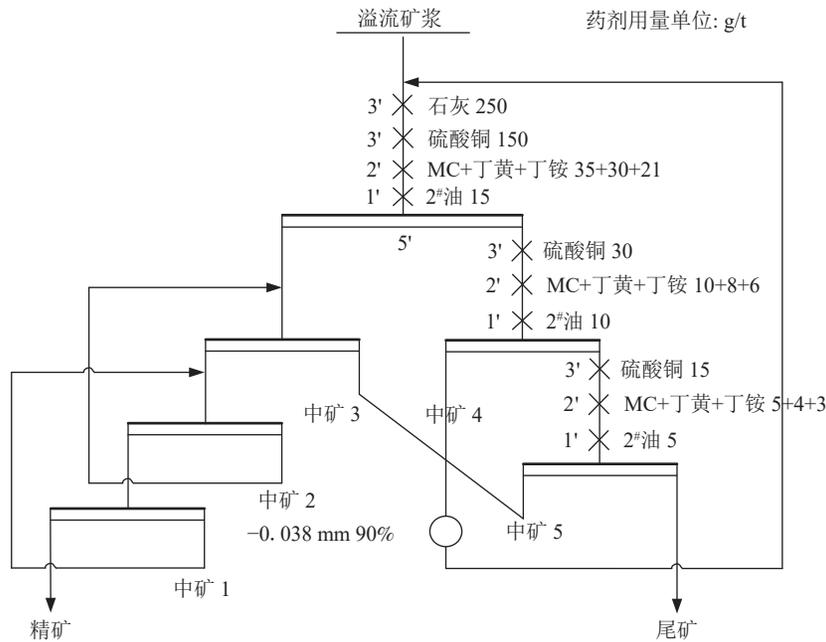


图2 粗磨+中矿再磨工艺流程

Fig.2 Flowsheet of coarse grinding + middlings regrinding process

表3 两种磨矿工艺闭路实验结果

Table 3 Results of the closed-circuit tests of two types of grinding processes

样品	实验条件	产品名称	产率/%	全品位/(g/t)	全回收率/%
现场溢流矿浆	-0.074 mm 86%	精矿	5.40	28.26	88.97
		尾矿	94.60	0.20	11.03
	-0.074 mm 79%再磨细度	精矿	5.29	28.97	89.25
		尾矿	94.71	0.19	10.75
	-0.038 mm 90%	精矿	5.29	28.97	89.25
		尾矿	94.71	0.19	10.75

表4 两种药剂制度闭路实验结果

Table 4 Results of the closed-circuit tests of two types of regimes of agent

样品	实验条件	产品名称	产率/%	品位/(g/t)	回收率/%
现场溢流矿浆	原组合捕收剂	精矿	5.29	28.97	89.25
		尾矿	94.71	0.19	10.75
	MC+丁基黄药+丁铵黑药 (42+50+30)/(g/t)	精矿	5.10	30.19	90.27
		尾矿	94.90	0.18	9.73
	新组合捕收剂	精矿	5.10	30.19	90.27
		尾矿	94.90	0.18	9.73

药=1:3), 现场溢流矿浆在闭路实验中可以得到产率 5.10%、含金 30.19 g/t、金回收率 90.27% 的金精矿。对比原组合捕收剂 (MC+丁基黄药+丁铵黑药), 精矿金回收率和品位均有提升, 回收率提高了 1.02%, 品位提升了 1.22 g/t。

闭路对比实验结果表明, 相较于细磨工艺和

原药剂制度, 采用粗磨+中矿再磨+戊基黄药的工艺, 可以进一步提升金的回收率。

### 3 工业实验

在实验室研究的基础上, 针对现场二系列工艺流程开展了工业实验研究。工业实验分为两个阶段, 第一阶段是降低原矿磨矿细度, 开启艾砂磨机对中矿进行再磨处理, 第二阶段是戊基黄药替换丁基黄药, 同时调整组合捕收剂中的药剂比例。

第一阶段, 在矿石性质、处理量基本不变的前提下, 通过提高球磨给矿的给水量和降低球磨排矿的冲水量, 将溢流矿浆的磨矿细度降至 80%~82% 左右; 第二阶段工业实验在粗磨+中矿再磨工艺的基础上, 对药剂制度进行调整, 即采用戊基黄药替换组合捕收剂中的丁基黄药, 并调整戊基黄药和 MC 的比例至 3:1。工业实验期间累计生产情况见表 5。

由表 5 可知, 工业实验前 (2021.8.1—9.30) 选厂二系列累积原矿品位 1.572 g/t, 累积回收率 86.63%, 累积尾矿品位 0.225 g/t, 磨矿细度 -0.074 mm 87.0%; 第一阶段工业实验期间 (2021.10.1—11.30), 二系列累积原矿品位 1.537 g/t, 累积回收率 86.46%, 累积尾矿品位 0.222 g/t, 磨矿细度 -0.074 mm 81.8%。对比可知,

表 5 工业实验期间的累计生产情况  
Table 5 Cumulative production during the industrial test

时间范围	原矿品位/(g/t)	回收率/%	精矿品位/(g/t)	尾矿品位/(g/t)	尾矿细度-0.074 mm/%
工业实验前2021-08-01—2021-09-30	1.572	86.63	25.27	0.225	87.0
第一阶段工业实验2021-10-01—2021-11-30	1.537	86.46	25.96	0.222	81.8
第二阶段工业实验2021-12-01—2022-01-31	1.633	87.42	25.72	0.219	81.9

二系列采用粗磨+中矿再磨工艺后，累积尾矿细度-0.074 mm 粒级含量由 87.0% 降至 81.8%，累积回收率降低了约 0.17%，仅从数据上看，粗磨+中矿再磨工艺增大了金的损失，但这与累积供矿品位降低有一定的关系。

第二阶段工业实验期间（2021.12.1—2022.1.31），二系列累积原矿品位 1.633 g/t，累积回收率 87.42%，累积尾矿品位 0.219 g/t，磨矿细度-0.074 mm 81.9%。对比工业实验前和第一阶段工业实验可知，在粗磨+中矿再磨工艺中使用戊基黄药替换丁基黄药，并调整戊基黄药和 MC 的比例至 3:1，金回收率分别提升了 0.79% 和 0.96%，虽然这与累积原矿品位的提升有密不可分的关系，但需注意到的是，尾矿品位反而降至 0.220 g/t 以下，这表明新药剂制度在生产中具有一定优势，能够降低金的损失。

通过引入戊基黄药替代组合捕收剂中的丁基黄药，并增大其所占比例，使组合捕收剂整体捕收性能增强。在扫选作业中，连生体上浮量增加，通过后续的中矿再磨，连生体进一步解离，金属返回粗选作业中得以回收。

对工业实验前和第一阶段工业实验期间的生产数据，按原矿品位进行分段统计和分析，得到了图 3。

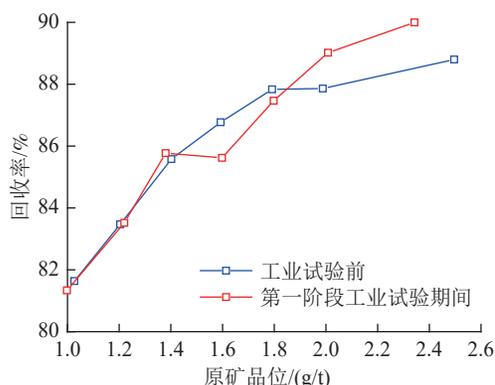


图 3 工业实验前和第一阶段工业实验期间原矿品位和回收率的关系

Fig.3 Relationship between ore grade and recovery rate before and during the first stage of the industrial test

由图 3 可知，甘肃某金矿的回收率和原矿品位基本呈正相关。总体来看，工业实验前和第一阶段工业实验期间，分段原矿品位的累计回收率差别不大，甚至在原矿品位较高时，粗磨+中矿再磨工艺更具优势，累积回收率更高。

对第一阶段工业实验前后的尾矿进行筛分，结果见表 6。

表 6 两个工艺流程尾矿产品粒度筛分结果  
Table 6 Particle size screening results of series II tailings

粒级/mm	产率/%			
	细磨工艺		粗磨+中矿再磨工艺	
	个别	负累计	个别	负累计
+0.074	13.0	100.0	18.2	100.0
-0.074+0.038	17.8	87.0	13.6	81.8
-0.038+0.025	8.2	69.2	7.9	68.2
-0.025+0.010	19.9	61.0	25.7	60.3
-0.010+0.005	15.1	41.1	19.6	34.6
-0.005	26.0	26.0	15.0	15.0
合计	100.0	-	100.0	-

由表 6 可知，二系列原本采用细磨工艺（工业实验前）排出的尾矿中-0.074 mm 为 87.0%，-0.005 mm 26.0%，远超上游式旋流器筑坝对-0.005 mm 粒级含量的要求（小于 15%），在第二阶段工业实验期间（采用粗磨+中矿再磨工艺），二系列尾矿中-0.074 mm 81.8%，-0.005 mm 粒级的含量降低至 15.0%，基本达到筑坝所需的粒度要求。

## 4 经济效益

选矿厂曾经采用细磨+中矿再磨工艺进行生产，由于原矿磨矿细度较细，艾砂磨再磨意义不大，实际生产指标并无明显提升，故艾砂磨停用，采用直接细磨工艺。此次工业实验，降低了原矿的磨矿细度，重新开启艾砂磨，较好地发挥艾砂磨的作用。

对艾砂磨的电耗和球耗成本进行计算。艾砂

磨平均功率 250 kW，一年正常开机 330 天，计算可知艾砂磨一年的用电量为  $250 \text{ kW} \times 24 \times 330 = 198 \text{ 万 kW} \cdot \text{h}$ ，当地工业用电以平均 0.45 元/kW·h 计算，则艾砂磨一年的电耗成本为 89.1 万元。艾砂磨的陶瓷球添加量 25 kg/d，陶瓷球的单价为每公斤 24.78 元，则艾砂磨一年的球耗成本为  $25 \text{ kg} \times 24.78 \times 330 = 20.4 \text{ 万元}$ 。艾砂磨正常运转一年的电耗和球耗总成本约 109.5 万元。

对药剂制度工业实验前后的捕收剂成本进行了简单的计算，结果见表 7。

由表 7 可知，戊基黄药的单价虽然高于丁基黄药，但药剂制度经过调整，戊基黄药和 MC 的总用量少于原药剂制度中丁基黄药和 MC 的用量，工业实验前后捕收剂的成本基本持平，吨矿成本均为 1.84 元。

表 7 工业实验前后捕收剂成本计算  
Table 7 Cost calculation of collectors before and after the industrial test

药剂名称	用量/ (kg/d)	单耗/ (g/t)	药剂单价/ (元/t)	吨矿成本/ 元	
MC	240	48	16 320	0.78	
原药剂 制度	丁基黄药	215	45	9 190	0.40
	丁铵黑药	180	36	18 340	0.66
	合计	-	-	-	1.84
MC	100	20	16 320	0.33	
新药剂 制度	戊基黄药	300	60	14 200	0.85
	丁铵黑药	180	36	18 340	0.66
	合计	-	-	-	1.84

按二系列实际处理量 5 000 t/d、一年正常开机 330 天计算，原矿品位、计价系数、金价分别按 1.572 g/t、80%、390 元/g 计算，根据工业实验结果，在粗磨+中矿再磨+戊基黄药工艺中，金的回收率可以提升 0.79%。计算每年可新增金属量为  $5 000 \text{ t} \times 330 \times 1.572 \times 0.79\% = 20.49 \text{ kg}$ ；每年可新增产值  $20.49 \text{ kg} \times 80\% \times 390 = 639.3 \text{ 万元}$ 。

## 5 结 论

(1) 实验室闭路对比实验结果表明，粗磨+中矿再磨工艺可以达到原矿直接细磨的选矿指标，甚至更优，而戊基黄药的使用能进一步提升金回收率。细磨工艺下，现场溢流样的回收率为 88.97%，粗磨和中矿再磨工艺下，回收率提升至 89.25%，在粗磨+中矿再磨工艺下使用戊基黄药替

代丁基黄药 (MC:戊基黄药=1:3)，金回收率分别进一步提升至 90.27%。

(2) 工业实验结果表明，粗磨+中矿再磨工艺不仅可以取得与细磨工艺相近的生产指标，而且能够降低尾矿细度，优化粒度组成。第一阶段工业实验前后，选厂二系列累积回收率分别为 86.63% 和 86.46%，累积尾矿细度由 -0.074 mm 粒级含量 87.0% 降至 81.8%，同时尾矿中 -0.005 mm 粒级含量由 28.0% 降低至 15.0%，满足了上游式旋流器筑坝的尾矿粒度要求。第二阶段工业实验采用戊基黄药替代丁基黄药，并将戊基黄药和 MC 的比例调整至 3:1，降低了尾矿中金的损失。在此期间，二系列累积回收率提升至 87.42%，同时累积尾矿品位降至 0.219 g/t。

(3) 艾砂磨的运行，每年增加的电耗和球耗约 109.5 万元，戊基黄药的使用和药剂制度的调整，实际上药耗成本并无增加，而根据工业实验中可提升 0.79% 回收率的结果，推算二系列每年可新增产值 639.3 万元，具备一定的经济效益。

## 参考文献：

- [1] 李鹏远, 李建武, 马哲. 中国金矿资源海外投资优选 [J]. *中国矿业*, 2021, 30(11):23-29.
- [2] LI P Y, LI J W, MA Z. Preference of China's gold resources overseas investment [J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(11):23-29.
- [3] 殷璐, 金哲男, 杨洪英, 等. 我国黄金资源综合利用现状与展望 [J]. *黄金科学技术*, 2018, 26(1):17-24.
- [4] YIN L, JIN Z N, YANG H Y, et al. Present situation and forecast of gold resources utilization in China [J]. *Gold Science and Technology*, 2018, 26(1):17-24.
- [5] 齐剑, 潘成龙, 田惠敏. 我国黄金行业发展趋势及政策建议 [J]. *中国市场*, 2021(15):1-8.
- [6] QI J, PAN C L, TIAN H M. Development trend and policy suggestions of China's gold industry [J]. *China Market*, 2021(15):1-8.
- [7] 熊召华. 某低品位金矿半工业性浮选柱探索试验研究 [J]. *金属矿山*, 2020(8):114-118.
- [8] XIONG Z H. The probe trial study on the flotation column pilot scale tests of some low-grade gold ore [J]. *Metal Mine*, 2020(8):114-118.
- [9] 杨应林, 石旭, 田锋, 等. 新疆某低品位细粒金矿浮选试验研究 [J]. *甘肃冶金*, 2019, 41(5):1-5.

- YANG Y L, SHI X, TIAN F, et al. Flotation experimental study on the low-grade fine gold mine from Xinjiang[J]. *Gansu Metallurgy*, 2019, 41(5):1-5.
- [6] 闫军宁, 樊军怀, 李广. 甘肃某低品位微细粒浸染型金矿浮选工艺研究及应用[J]. *黄金*, 2016, 37(10):64-67.
- YAN J N, FAN J H, LI G. Flotation of one low-grade microgranular disseminated gold ore from Gansu and its application[J]. *Gold*, 2016, 37(10):64-67.
- [7] 廖德华, 王毓华. 某低品位贫硫化物石英脉型金矿选矿试验研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2016(1):36-39.
- LIAO D H, WANG Y H. Experimental study on a low-grade and poor-sulfide quartz vein type gold ore[J]. *Nonferrous Metals(Mineral Processing Section)*, 2016(1):36-39.
- [8] 赵民, 吴天娇, 赵国斌, 等. 甘肃省某低品位金矿选矿试验研究[J]. *中国矿业*, 2015, 24(9):110-114.
- ZHAO M, WU T J, ZHAO G B, et al. Experimental research on beneficiation of a low-grade gold ore in Gansu province[J]. *China Mining Magazine*, 2015, 24(9):110-114.
- [9] 侯凯, 谢贤, 童雄, 等. 我国金矿床的工业类型及选矿研究方法[J]. *矿产综合利用*, 2014(4):9-15+24.
- HOU K, XIE X, TONG X, et al. Review of the commercial types of gold deposits and their beneficiation methods at home[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2014(4):9-15+24.
- [10] 王彦慧, 石凤野, 赵健伟, 等. 阶段磨矿阶段浮选工艺在云南镇沅金矿的应用[J]. *黄金*, 2013, 34(9):62-64.
- WANG Y H, SHI F Y, ZHAO J W, et al. Application of stage grinding and stage flotation process in Yunnan Zhenyuan gold mine[J]. *Gold*, 2013, 34(9):62-64.
- [11] 刘滨婵, 金镜潭, 刘建业. 异戊基黄药提高金回收率的研究[J]. *黄金*, 1989(9):25-30.
- LIU B C, JIN J T, LIU J Y. The study of raising gold recovery by the use of sodium isopentyl xanthate[J]. *Gold*, 1989(9):25-30.
- [12] 张泾生, 阙焯兰. *矿用药剂*[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
- ZHANG J S, QUE X L. *Bergbau-pharmazie* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008.

## Optimization Research and Industrial Application of Beneficiation Process in a Gold Mine in Gansu Province

HUANG Yuqing<sup>1,2</sup>, FAN Junhui<sup>2,3</sup>, LI Guang<sup>1,2</sup>, LYU Zhanxing<sup>2,3</sup>, TIAN Shuguo<sup>1,2</sup>, LIU Yongsong<sup>2,3</sup>  
(1.State Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Low-grade Refractory Gold Ores, Longyan 361000, Fujian, China; 2.Zijin Mining Group Co., Ltd., Longyan 361000, Fujian, China; 3.Longnan Zijin Mining Co., Ltd., Longnan 742500, Gansu, China)

**Abstract:** In order to maintain the stability of production, a gold mine in Gansu Province always adopts high grinding fineness, which has a certain negative impact on tailings damming. Through the exploration of coarse grinding of ore and combined with strong collector, it is found that using amyl xanthate instead of butyl xanthate in the original combination reagent, the grinding fineness was roughened by 5% and the recovery of gold was slightly improved. The laboratory and industrial test results show that the coarse grinding + middlings regrinding process could achieve the flotation indicators of direct fine grinding of the ore. Meanwhile, the fineness of tailings was reduced and the particle size composition was optimized. The loss of gold in tailings was further reduced by replacing butyl xanthate with amyl xanthate and adjusting the ratio of amyl xanthate to MC to 3:1.

**Keywords:** Gold mine; Grinding fineness; Middlings regrinding; Amyl xanthate; Industrial test