

某金矿工艺矿物学与选矿试验研究

郭艳华^{1,2}, 柏亚林¹, 杨俊龙¹, 王志丰¹

(1. 西北矿冶研究院; 2. 中国科学院过程工程研究所)

摘要:为充分了解某金矿矿石性质,制订合理的选矿方案,通过化学分析、偏光显微镜、人工重砂、电子探针等手段对矿石进行系统的工艺矿物学研究。结果表明:矿石中有价元素主要为金,品位为4.08 g/t。金属矿物主要为黄铁矿、胶状黄铁矿、白铁矿、毒砂等,非金属矿物主要为石英。金主要为自然金,并以包裹金为主,其次为粒间金和裂隙金;与黄铁矿嵌布关系密切,脉石矿物次之。金矿物粒度多小于0.037 mm,该矿石属微细粒浸染型金矿石。基于工艺矿物学研究结果,制订了2种浮选方案,通过对比发现,原矿粗磨—粗精矿再磨方案优于原矿一段细磨。闭路试验获得金品位为43.39 g/t、金回收率为95.08%的选别指标。

关键词:微细粒浸染型金矿石;包裹金;工艺矿物学;赋存状态;单体解离;粗精矿再磨

中图分类号:TD91

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)05-0048-05

doi:10.11792/hj20250510

引言

金作为一种贵金属,具备卓越的锻造性能、延展性、导热能力及导电性,这些优良属性使其在工业制造、医疗健康、珠宝首饰及美术工艺等多个领域均得到了广泛应用^[1-5]。截至2024年年底,中国黄金储备量为2 279.57 t,位居全球第6位,黄金储备量再创历史新高^[6]。尽管中国金资源储量相对充裕,但鉴于预计未来金资源消耗极为庞大,且中国长期保持着全球最大金消费国的地位,现有金生产能力已难以满足日益增长的市场需求^[7-11]。随着科学技术的迅猛发展,对金矿资源的需求呈持续增长态势。在此背景下,通过优化选矿工艺以提升金的选别指标,并实现矿石中金的高效回收,已然成为当前矿业研究领域的一项核心课题。

矿石的工艺矿物学特征作为反映矿石基本工艺性能的关键要素^[12-15],是制订科学选矿方案的重要依据,主要涵盖化学成分分析与矿物组成研究两大方面^[16-20]。本文采用化学分析、偏光显微镜、人工重砂、电子探针等手段对金矿石进行了系统的工艺矿物学研究,包括化学成分、矿物组成、矿物含量、结构构造、嵌布特征、矿物粒度特征及金赋存状态等。在充分了解矿石物质组成的基础上,查明影响金回收的关键因素,制订合理的选矿方案,为金的高质量回收提供技术依据。

1 矿石性质

1.1 化学成分

化学成分分析是一种基于物质化学反应的定量分析方法,依据样品的质量、反应产物的量、试剂耗量及反应中的化学计量关系,通过精确计算来确定待测成分的含量。该方法旨在全面且准确地测定矿石中各类有益元素与有害元素的含量,从而为矿石的后续加工与利用提供关键数据支撑。矿石化学成分分析结果见表1。

表1 矿石化学成分分析结果

Table 1 Results of chemical composition analysis in ores

成分	Au ¹⁾	Ag ²⁾	Pb	Zn	S	Fe	As
w/%	4.08	4.23	<0.05	0.05	3.52	4.53	0.11
成分	Cu	Sb	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Hg
w/%	<0.01	<0.01	2.55	2.73	73.08	12.62	0.008 6

注:1)w(Au)/(g·t⁻¹);2)w(Ag)/(g·t⁻¹)。

由表1可知:矿石中金品位为4.08 g/t,其余金属如铅、铜、铁、锌等含量较低;矿石中有害元素为砷,品位为0.11%;矿石中二氧化硅含量较高,同时存在一定量的钙、镁,说明脉石矿物主要为石英及硅酸盐矿物。

1.2 矿物组成

矿石矿物组成相对较为简单。金属矿物以黄铁矿、胶状黄铁矿、白铁矿、毒砂为主,其次为磁黄铁矿、胶状白铁矿、褐铁矿、赤铁矿、黄铜矿、闪锌矿、方铅

收稿日期:2025-01-03;修回日期:2025-02-04

基金项目:北京市自然科学基金项目(232067);介科学与工程全国重点实验室科研基金项目(MESO-23-A06)

作者简介:郭艳华(1986—),女,高级工程师,硕士,研究方向为稀贵金属、有色金属选矿;E-mail:gyh19861109@163.com

矿、自然金、银金矿等。非金属矿物主要为石英,少量长石、方解石、白云石、绿泥石、绢云母、高岭土、黄钾铁矾、石墨、磷灰石、锆石等。矿物组成分析结果见表 2。

表 2 矿物组成分析结果

Table 2 Mineral composition analysis results

矿物名称	相对含量/%
黄铁矿、白铁矿、磁黄铁矿	5.3
方铅矿	<0.1
闪锌矿	0.1
黄铜矿、铜蓝	<0.1
褐铁矿、赤铁矿、磁铁矿	3.9
自然金银矿物	微量
毒砂	0.1
石英等硅酸盐矿物	85.9
碳酸盐矿物	4.5

2 金赋存状态

2.1 物相分析

黄铁矿包裹金中金占比 90.32 %、银占比 8.41 %,与黄铁矿连生裂隙金中金占比 90.53 %、银占比 8.48 %,石英包裹金中金占比 87.84 %、银占比 11.75 %,金平均占比 89.56 %、银平均占比 9.55 %。依据金、银系列矿物四分法的命名标准,即依据金、银的质量分数进行划分:自然金(含金 80 %~100 %、含银 0~20 %)、银金矿(含金 50 %~80 %、含银 20 %~50 %)、金银矿(含金 20 %~50 %、含银 50 %~80 %)、自然银(含金 0~20 %、含银 80 %~100 %),可初步推断该矿石中金矿物含金约 90 %,含银约 10 %。当金矿物含金大于 80 %时,可明确判定该金矿物为自然金。

2.2 金矿物嵌布特征

金矿物的嵌布特征决定了其回收方式。因此,对发现的每一粒自然金银矿物的赋存位置、与其他矿物嵌布关系、边界形态均进行了详细记录,结果见表 4。

表 4 金矿物嵌布特征分析结果

Table 4 Distribution characteristics analysis results of gold minerals

嵌布状态		分布率/%
粒间金/裂隙金	重砂中黄铁矿边部	27.80
	黄铁矿裂隙中	2.10
	石英裂隙中	7.80
	石英中	14.10
包裹金	黄铁矿包裹金,不与任何矿物连生	29.60
	黄铁矿包裹金,与磁黄铁矿连生	6.00
	黄铁矿包裹金,与白铁矿连生	3.60
	黄铁矿包裹金,与方铅矿连生	4.50
	黄铁矿包裹金,与褐铁矿连生	4.50

由表 4 可知:金矿物与黄铁矿、脉石矿物关系密切,绝大多数为包裹金,分布率为 62.20 %,以黄铁矿包裹金为主,分布率为 29.60 %;粒间金、裂隙金多与黄铁矿连生。可通过加强对黄铁矿的回收来提高金回收率。

2.3 金矿物粒度

金矿物粒度与工艺流程的确定存在紧密关联。金矿物粒度分析结果见表 5。研究过程中并未观察到巨粒和粗粒金矿物,所有金粒的平均粒径仅为 10 μm。综合上述分析,该矿石中金矿物嵌布粒度属微细粒。在选矿过程中,金矿物可能以连生体形式存在。因此,对磨矿细度提出了较高要求。一方面,可通过细磨作业使矿物实现单体解离;另一方面,可采用粗精矿再磨的方法,降低连生体的含量,提升金精矿的品质。

表 5 金矿物粒度分析结果

Table 5 Particle size analysis results of gold minerals

粒级/mm	分布率/%
巨粒	>0.3
粗粒	0.3~0.074
中粒	0.074~0.037
细粒	0.037~0.01
微粒	0.01~0.000 5
合计	100.00

2.4 金矿物形态特征

高反射率的自然金常呈板片状、麦粒状、滚圆状、蠕虫状及不规则粒状等,赋存于脉石矿物、黄铁矿裂隙间,板片状形态占比 29.60 %,滚圆状占比 26.30 %,不规则粒状占比 22.20 %。金矿物形态特征分析结果见表 6。

表 6 金矿物形态特征分析结果

Table 6 Morphological characteristics analysis results of gold minerals

矿物颗粒形态	分布率/%
板片状	29.60
麦粒状	10.20
蠕虫状	11.70
滚圆状	26.30
不规则粒状	22.20
合计	100.00

2.5 金矿物成色

裂隙金成色略高于包裹金,而在包裹金中,黄铁矿包裹金成色又略高于石英包裹金。该矿石中金矿物以自然金为主,其银含量呈现出较大的变化范围。借助偏光显微镜对自然金矿物进行圈定,并利用电子探针技术对其进行随机分析。基于这些分析数据,计

算金成色。结合显微镜下鉴定结果,确定本矿石金成色约为864‰。

3 矿物嵌布特征及粒度特征

3.1 黄铁矿

黄铁矿、白铁矿及磁黄铁矿是铁的主要金属硫化物矿物,占矿物总量的5.3%,其中以黄铁矿为主,另

外2种矿物含量相对较少。黄铁矿的产出形式主要为浸染状,其次为脉状和皮壳状(见图1-a)。其形态以结晶粒状为主,同时也存在胶状黄铁矿。结晶粒状黄铁矿多以他形晶形式出现,部分呈现自形一半自形晶结构。其粒度分布不均匀,较大者粒度可达0.25 mm,较小者仅有几微米,通常粒度为0.02~0.25 mm。

通过光片观察发现,黄铁矿是金的主要载体矿

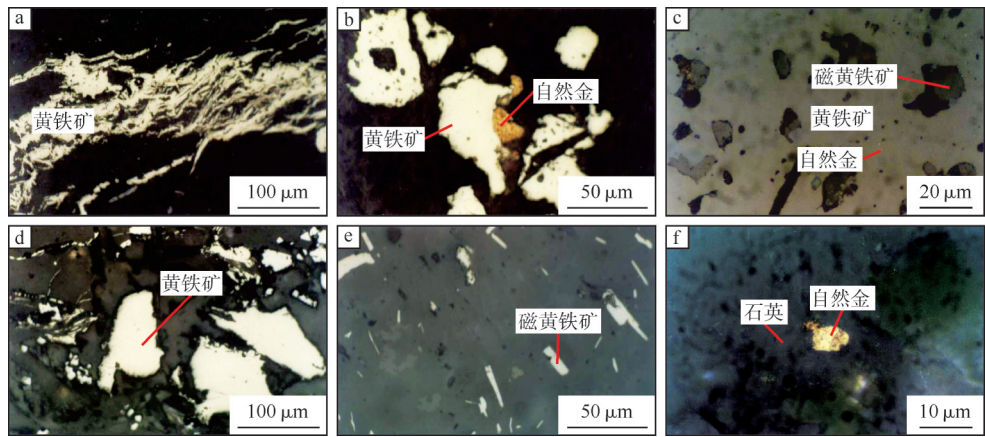


图1 黄铁矿、磁黄铁矿、脉石矿物嵌布特征

Fig. 1 Distribution characteristics of pyrite, pyrrhotite, and gangue minerals

物。然而,电子探针面扫描结果并未发现金富集点,这表明黄铁矿本身并不含金。电子探针定量分析结果显示:黄铁矿含Au 0.083%、含Ag 0.006%、含Fe 45.374%、含S 53.860%、含As 0.687%。

黄铁矿形成具有多期次的特点,早期形成的黄铁矿颗粒较粗,多数大于0.15 mm,呈他形或集合体形态,边缘因溶蚀而呈梳状、犬牙交错状,裂隙发育且结构疏松,包含大量脉石矿物或其他金属硫化物矿物的包裹体。在裂隙及颗粒间可见自然金(见图1-b、c)。胶状黄铁矿的分布不如结晶粒状黄铁矿广泛,多呈胶状、环带状等零星散布于脉石矿物中,颗粒平均大小约为0.1 mm,且未见自然金(见图1-d)。

3.2 白铁矿

白铁矿含量较少,与黄铁矿是类质同象矿物,多呈他形粒状集合体沿黄铁矿边部、裂隙充填交代,部分呈包裹体嵌布在毒砂中,也常被氧化呈残体。研究过程中发现,黄铁矿包裹金与白铁矿连生,但白铁矿中未见包裹金。

3.3 磁黄铁矿

磁黄铁矿含量仅次于黄铁矿,反射色为淡玫瑰色,强非均性,反射率介于黄铜矿与黄铁矿之间。多以他形粒状或板条状、短柱状自形晶嵌布在脉石矿物中(见图1-e),部分呈不规则粒状或溶珠状包裹在毒砂、黄铁矿中。粒度大小不等,一般小于0.15 mm。

3.4 脉石矿物

石英等硅酸盐矿物占矿物总量的85.9%,石英是

主要脉石矿物,产出形态复杂,大部分为不规则细粒状集合体,使得岩石致密,少量呈后期脉穿插其中,脉中夹杂黄铁矿,在黄铁矿中也发现有自然金。石英与自然金关系密切,其颗粒内部或微裂隙中发现自然金包裹(见图1-f),金粒比黄铁矿中包裹金略粗,平均粒度10 μm,呈滚圆状。经电子探针面扫描,石英本身不含金。

3.5 矿物粒度

粒度分析所采用的样品为试验综合样,将其压制成砂光片后开展研究。在显微镜下运用压线法,对矿物颗粒进行逐粒统计。鉴于除黄铁矿外,其他金属矿物含量相对较少,故将其合并为一类进行测定。矿物粒度分析结果见表7。由表7可知:黄铁矿中粒度小于74.3 μm的颗粒占比为47.4%;其他金属硫化物矿物中粒度小于74.3 μm的颗粒占比为81.8%,其中,粒度为9.3~37.2 μm的颗粒占比达49.6%;脉石矿物中粒度为74.3~297.3 μm的颗粒占比为49.5%。

4 选矿工艺流程及选矿指标

矿石回收的主要难点为:①金主要为自然金,并且以包裹金为主,金矿物粒度多小于0.037 mm,以微细粒为主,磨矿较难实现有用矿物充分单体解离,导致部分包裹金在尾矿中损失,增加了金回收难度;②部分粒间金、裂隙金与黄铁矿嵌布关系密切,脉石矿物次之,在精选过程中可能会有部分金与脉石矿物的连生体进入金精矿,影响金精矿品质。

表 7 矿物粒度分析结果

Table 7 Particle size analysis results of minerals

粒级/ μm	黄铁矿/%		其他金属硫化物/%		脉石矿物/%	
	个别	累积	个别	累积	个别	累积
+594.6						
-594.6~+420.4					8.5	8.5
-420.4~+297.3					14.1	22.6
-297.3~+210.2	6.2	6.2			12.5	35.1
-210.2~+148.7	15.1	21.3			13.9	49.0
-148.7~+105.1	10.0	31.3	9.1	9.1	10.9	59.9
-105.1~+74.3	21.3	52.6	9.1	18.2	12.2	72.1
-74.3~+52.6	25.8	78.4	10.6	28.8	16.7	88.8
-52.6~+37.2	7.8	86.2	11.5	40.3	3.8	92.6
-37.2~+26.3	6.9	93.1	11.8	52.1	3.1	95.7
-26.3~+18.6	4.4	97.5	11.8	63.9	1.6	97.3
-18.6~+13.1	2.2	99.7	16.7	80.6	1.0	98.3
-13.1~+9.3	0.1	99.8	9.3	89.9	1.3	99.6
-9.3~+6.6	0.2	100.0	10.0	99.9	0	99.6
-6.6~+4.6	0	100.0	0.1	100.0	0.4	100.0
-4.6~+3.3	0	100.0	0	100.0	0	100.0
-3.3	0	100.0	0	100.0	0	100.0

基于以上研究结果,制订了2种浮选方案:粗精矿不再磨(原矿一段细磨)和粗精矿再磨(原矿粗磨—粗精矿再磨)。2种方案的闭路试验流程及药剂制度分别见图2、图3,闭路试验结果见表8。

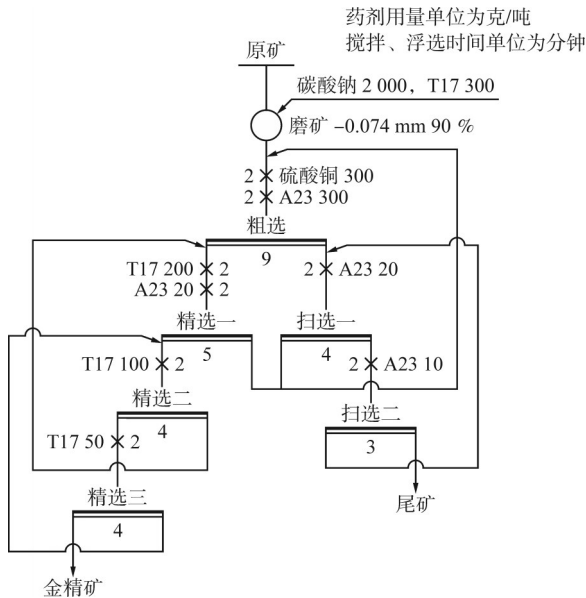


图 2 粗精矿不再磨闭路试验流程

Fig. 2 Flowchart of closed-circuit test without regrinding of roughing concentrate

由表8可知:粗精矿不再磨选矿方案获得的金精矿金品位较低,说明有部分脉石矿物连生体进入金精矿中影响其品质;粗精矿再磨后金精矿金品位和金回收率均有较大提高,说明再磨有助于微细粒包裹金与

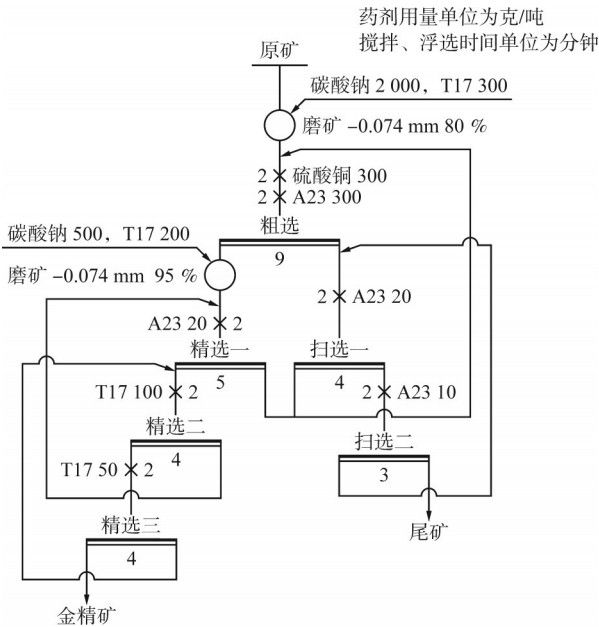


图 3 粗精矿再磨闭路试验流程

Fig. 3 Flowchart of closed-circuit test with regrinding of roughing concentrate

表 8 闭路试验结果

Table 8 Closed-circuit test results

选矿方案	产物	产率/%	金品位/($\text{g}\cdot\text{t}^{-1}$)	金回收率/%
粗精矿不再磨	金精矿	9.91	36.11	87.84
	尾矿	90.09	0.55	12.16
	原矿	100.00	4.07	100.00
粗精矿再磨	金精矿	8.93	43.39	95.08
	尾矿	91.07	0.22	4.92
	原矿	100.00	4.08	100.00

脉石矿物形成的连生体充分解离。因此,推荐该金矿石选矿方案为原矿粗磨—粗精矿再磨,闭路试验获得金品位为43.39 g/t、金回收率为95.08 %的选别指标。

5 结 论

1)该矿石中金品位为4.08 g/t,金主要以自然金形式存在,包裹金占比最高,其次为粒间金和裂隙金。金矿物与黄铁矿嵌布关系最为密切,与脉石矿物的关系次之。金矿物粒度大多小于0.037 mm,呈微细粒,故该矿石属于微细粒浸染型金矿石。金属矿物主要为黄铁矿、胶状黄铁矿、白铁矿等;脉石矿物以石英为主,含有少量长石、方解石等。影响金回收效果的因素主要为:部分包裹金进入尾矿,增加了金回收难度;部分脉石矿物连生体进入金精矿,影响金精矿品质。

2)基于工艺矿物学研究结果,制订了2种选别方案。通过对比分析发现,原矿粗磨—粗精矿再磨方案优于原矿一段细磨方案。在原矿粗磨—粗精矿再磨闭路试验中,获得了金品位为43.39 g/t、金回收率为95.08 %的良好选别指标。

[参考文献]

- [1] 张月,刘杰,张淑敏,等.某金矿工艺矿物学研究[J].有色金属(选矿部分),2024(5):63-71.
- [2] 杨政国.低品位金矿工艺矿物学特征和金回收[J].矿冶,2024,33(2):225-233.
- [3] 陆恩泽,靳建平,李艳军,等.甘肃某高硫高砷微细粒金矿石工艺矿物学研究[J].金属矿山,2023(4):131-137.
- [4] 杨素红,姜超,凌锦兰.安康某金矿工艺矿物学研究[J].有色矿冶,2022,38(1):55-58.
- [5] 王铜,于鸿宾,王艳,等.甘肃某金矿石工艺矿物学研究[J].黄金,2023,44(6):59-63.
- [6] 中国黄金协会.2024年我国黄金产量377.24吨,同比增长0.56%,黄金消费量985.31吨,同比下降9.58%[EB/OL].(2025-01-24)[2025-02-03].<https://www.cngold.org.cn/news/show-4920.html>.
- [7] 王铜,韩宗科,逢文好,等.河南某金银铅锌多金属矿石工艺矿物学研究[J].黄金,2024,45(3):37-41.
- [8] 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.
- [9] 张辰子,彭晶晶,李昱瑾,等.河南嵩县下蒿坪金矿工艺矿物学研究[J].岩石矿物学杂志,2023,42(3):402-406.
- [10] 郭谨铭,杨洪英,王文文,等.红布和马塘矿区金矿石工艺矿物学研究[J].黄金,2022,43(6):53-58.
- [11] 梁斌珺,胡海祥,邹尚,等.湖南某含砷金矿的工艺矿物学研究[J].金属矿山,2022(9):132-139.
- [12] 吉强,李光胜,朱幸福,等.基于工艺矿物学分析提高金浮选尾矿选矿回收率的研究[J].贵金属,2023,44(3):31-34.
- [13] 张凤予,张恒博,豆靖林,等.灵宝小秦岭金矿区金矿废石工艺矿物学研究[J].黄金,2023,44(5):52-56.
- [14] 谢菱芳,任帅鹏,高利远,等.湘西上芒岗某金矿堆浸尾矿金赋存状态研究[J].有色金属(选矿部分),2022(3):9-14.
- [15] 马东梅,卢军,王艳,等.某高砷高硫金精矿工艺矿物学研究[J].黄金,2022,43(9):77-80.
- [16] 陈艳波,李光胜,朱幸福.某高硫微细粒金矿选冶试验研究[J].贵金属,2023,44(2):75-80.
- [17] 刘玉川,殷录成,陈攀,等.某金矿石工艺矿物学研究[J].黄金,2023,44(1):63-67.
- [18] 梁泽来.某金矿选矿工艺试验研究[J].黄金,2022,43(10):78-81.
- [19] 马东梅,王艳,高歌,等.某石英脉型含金矿石工艺矿物学研究[J].黄金,2024,45(2):37-40.
- [20] 张鑫宇,霸慧文,应永朋,等.青海某微细浸染型难处理金矿石工艺矿物学研究[J].黄金,2024,45(3):42-45.

Experimental study on the process mineralogy and beneficiation of a gold ore

Guo Yanhua^{1,2}, Bai Yalin¹, Yang Junlong¹, Wang Zhifeng¹

(1. Northwest Research Institute of Mining and Metallurgy;

2. Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences)

Abstract: To fully understand the characteristics of a certain gold ore and develop an appropriate beneficiation scheme, a systematic process mineralogical study was conducted using chemical analysis, polarized light microscopy, manual panning, and electron probe techniques. The results showed that the valuable element in the ore is gold, with a grade of 4.08 g/t. The metallic minerals are mainly pyrite, colloform pyrite, marcasite, and arsenopyrite, while the non-metallic mineral is mainly quartz. Gold occurs mainly as native gold, predominantly in the form of inclusion gold, followed by intergranular gold and fissure gold; it is closely associated with pyrite, and to a lesser extent with gangue minerals. Most of the gold particles are smaller than 0.037 mm, classifying the ore as a microfine-grained disseminated gold ore. Based on the results of the process mineralogical study, 2 flotation schemes were developed. A comparison showed that the scheme involving coarse grinding of the raw ore followed by regrinding of the roughing concentrate performed better than one-stage fine grinding of the raw ore. The closed-circuit test produced gold concentrate with a grade of 43.39 g/t and a gold recovery rate of 95.08 %.

Keywords: microfine-grained disseminated gold ore; inclusion gold; process mineralogy; occurrence state; monomer dissociation; regrinding of roughing concentrate