

山东某金精矿工艺矿物学研究

刘佳兴¹, 王攀志², 高云², 韩百岁¹

(1. 辽宁科技大学 矿业工程学院, 辽宁 鞍山 114051; 2. 山东黄金矿业(莱州)有限公司焦家金矿, 山东 烟台 261441)

摘要: 随着金矿资源的开采, 矿石组成日益复杂, 金品位逐渐降低, 难处理金矿增多。该类矿石中金常以微包体形式嵌入黄铁矿、黄铜矿等矿物中, 难以通过传统选矿方法提高回收率。山东某金精矿因矿石品位下降、矿物组分复杂, 选冶难度增加。研究采用化学多元素分析和矿物自动分析系统 (AMICS), 分析矿石的矿物组成、金赋存状态、粒度分布及矿物连生关系, 以揭示难选原因并优化选矿工艺。结果表明, 该矿金含量 42.24 g/t, 主要以碲化金银矿形式包裹在黄铁矿、黄铜矿中, 且碲化金银矿难溶, 与氰化物反应缓慢, 导致浸出率低。脉石矿物如石英、伊利石、正长石与金矿物形成连生体, 增加选矿难度。金矿物粒度微细, 传统物理选矿难以有效回收。黄铁矿单体解离度较高, 而黄铜矿和金矿物解离度较低, 进一步限制金回收。金矿物复杂包裹与连生关系是该矿难选的主要原因, 针对该矿石建议采用化学选矿提高金品位。

关键词: 矿物自动分析系统; 金精矿; 赋存状态; 难处理原因; 化学选矿

doi:10.12476/kczhly.202503120037

中图分类号: TD913 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 04-0198-07

引用格式: 刘佳兴, 王攀志, 高云, 等. 山东某金精矿工艺矿物学研究[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(4): 198-204+214.

LIU Jiaying, WANG Panzhi, GAO Yun, et al. Process mineralogy research on a gold concentrate in Shandong[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(4): 198-204+214.

随着金矿资源的持续开采与利用, 矿石组成日益复杂, 金品位逐渐降低^[1-3]。难处理金矿资源不断增加, 这类矿石通常富含黄铁矿、黄铜矿等载金矿物, 金常以微包体形式镶嵌于载金矿物中^[4-6], 难处理金矿已经成为今后黄金工业的主要资源。据统计, 目前世界黄金总产量的 1/3 左右产自难处理金矿, 这一比例今后必将进一步提高。山东是中国“金矿之都”, 金矿资源储量丰富, 载金矿物较多。然而, 这类矿石具有性质复杂, 日益贫化和包裹严重等问题^[7-9]。传统的物理选矿方法已无法进一步提高金精矿品位^[10], 因此, 查明影响矿石难选的矿物学因素, 对于提高载金矿物中金的品位具有重要意义。

目前, 国内外大多金选厂采用浮选-浸出联

合工艺, 然而, 由于金与氰化物反应较慢, 且常被黄铁矿等硫化物包裹, 致使金的氰化浸出率较低^[11-12]。对金矿进行工艺矿物学性质研究, 旨在查明金的赋存状态、分布状态、单体金及包裹金在矿石中的含量, 为选冶提金提供重要依据^[13]。矿物自动分析系统^[14-15] (AMICS) 相比于传统物相定量分析方法, 具有以下优势, 能够对微量物相进行定量分析, 获得一定的岩相学信息以及选矿产品较为全面的工艺矿物学参数特征。杨海江等^[16]利用 BMPA 型工艺矿物学参数自动分析系统, 对某金矿石的工艺矿物学参数进行了分析, 查清影响选冶的矿物学因素, 主要为黄铁矿与金矿物嵌布粒度比较密切, 为制定合理的选冶工艺提供依据。王广伟等^[17]对青海某金矿石的工艺矿

收稿日期: 2025-03-12

基金项目: 辽宁省教育厅项目 (JYTMS20230953)

作者简介: 刘佳兴 (2001-), 男, 硕士研究生, 研究方向为难选冶矿产的综合利用。

通信作者: 韩百岁 (1987-), 男, 副教授, 研究方向为矿物加工工程。

物学参数进行了分析, 研究结果表明, 矿石中金矿物具有嵌布粒度细等特点, 并推荐了几种工艺流程, 分别为浮选-浮选尾矿细磨环保浸出联合工艺; 浮选-浮选尾矿磁选联合工艺; 浮选-浮选尾矿重选, 为合理开发利用该矿产资源提供了理论依据。王铜等^[18]利用化学多元素分析、扫描电镜、MLA 等分析手段, 对甘肃某金矿石进行了系统研究, 查明该矿石中金主要以碲化金银矿形式存在, 该矿石在浸出过程中具有难以溶解、不易解离等特点, 对矿石分选工艺流程的制定具有指导意义。

为实现金矿资源的高效开发与综合利用, 以山东某金矿的现场浮选精矿为研究对象, 采用化学分析和矿物自动分析系统 (AMICS) 等先进分析手段, 系统地研究了矿石的成分、元素含量及其分布特征、粒度分布、单体解离度以及连生体的定量关系等工艺矿物学特性, 明确了该矿石的工艺特征与难选原因。经分析可知, 该矿石属于金矿石中难选冶类型。本次工艺矿物学研究以期为该矿石后续合理提升品位提供理论依据。

1 实验

1.1 矿样制备

实验所用矿样为山东某金矿的现场浮选精矿。所有试样经阴干处理后, 过 100 μm 筛进行筛分。采用堆锥法与对角法对矿样进行混匀和缩分处理, 确保矿样具有代表性。随后将缩分后的矿样装袋密封, 用于工艺矿物学研究及后续加压浸出实验研究。

1.2 矿样 AMICS 测试

本实验测试设备包括 Sigma 500 扫描电子显微

镜、矿物自动分析系统 (AMICS), ETD-2000C 型离子溅射喷碳仪以及 OU6130 金相抛光机。样品制备方法如下:

(1) 将树脂与固化剂按 10:3 比例混合后倒入模具中, 充分搅拌直至混合液均匀且无明显分层。随后加入矿样, 继续搅拌, 搅拌期间继续添加矿样, 直至模具中的混合物呈现深黑色状态。将模具置于 30 °C 条件下进行固化, 确保样品形态稳定。

(2) 固化后的样品进行纵向切割, 使轻重颗粒能够同时展示在同一平面。样品切割完成后, 进行二次固化处理。随后利用不同目数的砂纸对切割样品表面进行逐级研磨和抛光, 直至样品表面呈现镜面, 以满足后续测试要求。

(3) 测试前, 对样品进行喷碳处理。将样品置于离子溅射喷碳仪中, 在样品抛光面上镀碳膜。喷碳过程中控制电流在 10~20 mA 之间, 并将真空度维持在 0.01~0.20 kPa, 持续 1 min 以完成镀膜。随后, 将样品置于扫描电子显微镜中, 采用背散射探头进行测试。在 20 kV 加速电压、60 μm 光阑等参数条件下进行扫描, 并对图像调焦直至清晰后, 打开能谱仪测试样品成分和矿物特征。

2 工艺矿物学

2.1 矿物组成及含量

AMICS 分析矿物颗粒图像见图 1, 可清晰地展示矿石中各种矿物的形态和分布情况, 矿物组成及重量百分比结果见表 1。由表 1 可知, 矿石所含矿物共 67 种, 矿石组成极为复杂, 矿物种类较多。金矿物包括 2 种, 分别为金银矿、碲化金银矿。此外, 金属矿物主要为黄铁矿, 其含量高达

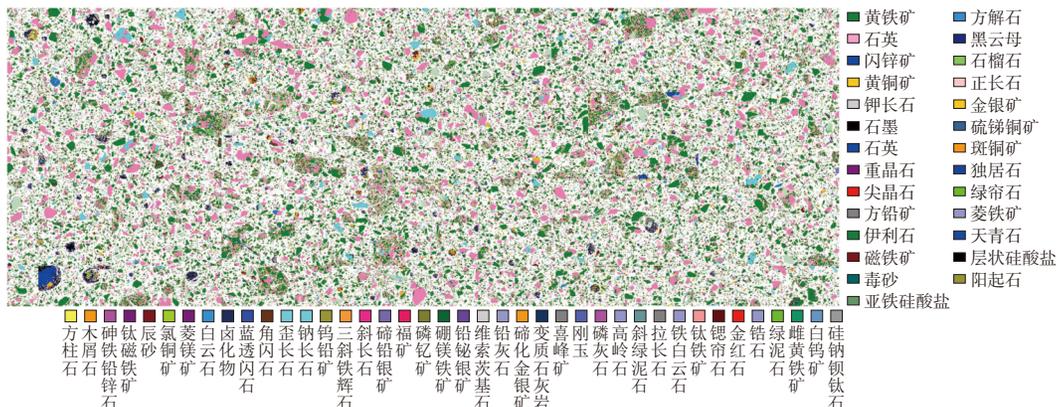


图 1 AMICS 分析矿物颗粒
Fig.1 Mineral particle analyzed by AMICS

48.57%，其次为黄铜矿、磁铁矿、菱铁矿、方铅矿、钛铁矿、闪锌矿等。脉石矿物主要为石英、伊利石，其中石英含量为 15.97%，其次为冰洲石、黑云母、磷灰石、钾长石等。总体来看，该矿石属于典型的含碲难处理金矿。矿石中硫化矿物（如黄铁矿和黄铜矿）作为主要载金矿物，容易与脉石矿物形成包裹体，对氰化浸出影响较大，会阻碍浸出剂与金的反应。

表 1 矿物组成及含量

Table 1 Mineral composition and relative content

矿物名称	含量/%	矿物名称	含量/%	矿物名称	含量/%
黄铁矿	48.57	福矿	0.01	金红石	0.02
黄铜矿	4.38	石墨	0.57	白钨矿	微量
石英	15.97	钙铝榴石	0.37	硫锑铜矿	微量
磁铁矿	1.06	卤化物	微量	闪锌矿	0.30
方铅矿	0.19	锶帘石	2.30	尖晶石	0.01
磷灰石	0.02	角闪石	0.02	钨铅矿	微量
毒砂	微量	伊利石	5.79	钛磁铁矿	微量
氯铜矿	0.01	钛铁矿	0.01	木屑石	微量
金银合金	0.02	砷铁铅锌石	微量	维索茨基石	微量
碲化金银矿	0.02	硅钠钡钛石	微量	蓝透闪石	0.06
铁白云石	0.07	铅辉石	0.05	磷钇矿	微量
黑云母	0.40	高岭石	0.03	喜峰矿	微量
斑铜矿	微量	钾长石	2.25	锆石	微量
冰洲石	0.45	拉长石	0.09	三斜铁辉石	0.02
天青石	微量	硼镁铁矿	0.02	磁黄铁矿	0.05
钠长石	2.47	菱镁矿	0.01	阳起石	0.18
绿泥石	1.80	铁白云石	0.12	顽火辉石	0.43
辰砂	微量	方柱石	0.02	碲铅银矿	微量
斜绿泥石	0.02	独居石	0.01	绿帘石	0.12
刚玉	0.01	正长石	7.25	层状硅酸盐	0.31
金刚石	0.96	铅铋银矿	微量	歪长石	0.23
白云石	0.02	斜长石	0.47	其他	1.92
变质石灰岩	0.12	菱铁矿	0.40	合计	100.00

2.2 样品中金的含量及分布

利用 AMICS 检测得到矿石元素含量分析结果、Au 的物相分析结果和 Au 在矿物中的分布见表 2~4。

表 2 矿石元素含量分析结果

Table 2 Analysis results of element content in the raw ore

Ca	Al	Mn	K	P	Fe	Mg	Ti	Co	Na	Cu	Ni	As	Zn	Rb	V*	Sb*
0.82	2.89	0.03	1.70	0.01	29.01	0.25	0.03	0.01	0.36	0.32	0.01	0.01	0.11	0.01	10.49	10.81
Ba*	Mo*	Cd*	Cr*	S	Pb	Sr	La*	Ce*	Nd*	Au*	Bi	Te	Ag*	Mo*	Cd	
20.64	6.50	5.62	16.02	30.83	0.18	0.01	11.64	23.21	9.73	42.24	0.01	21.15*	38.27	6.54	56.18*	

注：*单位为g/t。

结果表明，矿石中 Au 的品位为 42.24 g/t，金银矿和碲化金银矿主要以微细粒形式分布在黄铁矿和黄铜矿中，金在黄铁矿和黄铜矿中的分布率分别为 19.21%、11.49%，这表明黄铁矿和黄铜矿是金的主要载金矿物，而碲化金银矿与氰化物反应较慢，在氰化浸出过程中，碲化金银矿表面会形成一层薄膜，限制了金的氰化浸出^[19]。Cu、Pb、Zn 的品位分别为 0.32%、0.18%、0.11%，具有一定的回收价值。碲元素总含量未达到可选指标，不考虑其回收问题。

2.3 矿物的粒度分析

样品粒度分布、金矿物粒度分布和主要脉石矿物粒度分布曲线，见图 2~4。

图 2、3 表明，原矿中 75 μm 筛下累计产率为 39.41%，45 μm 筛下累计产率 52.16%。碲化金银矿 75 μm 筛下累计产率为 71.33%，30 μm 筛下累计产率 65.26%。金银矿 25 μm 筛下累计产率为 51.12%，12 μm 筛下累计产率 32.02%。硫化金银矿和金银矿的粒度主要集中在 0~30 μm 范围内，其中粒径小于 30 μm 时筛下累计产率已超过 80%，表明两种矿物均呈细粒级分布。

图 4 为主要脉石矿物的粒度分布曲线，根据分析结果表明，伊利石的粒度最细，其 75 μm 和 35 μm 筛下的累计产率分别为 82.18% 和 53.80%；正长石的粒度略大于伊利石，其 75 μm 和 35 μm 筛下的累计产率分别为 93.68% 和 70.11%；石英的粒度相对最粗，其 75 μm 和 35 μm 筛下的累计产率分别为 49.44% 和 21.09%。结果表明，伊利石主要以较细的粒度存在，而正长石和石英则呈现出相对较大的粒度分布，伊利石的微细粒使其在浮选过程中极易与金矿物共生，形成难以分离的团聚体，进而影响金的后续浸出工艺；正长石虽然粒度大于伊利石，但仍有一定的可能性与其他矿物影响浮选过程；石英粒度较粗，对金的回收影响较小。

2.4 主要矿物单体解离度

根据 AMICS 测试结果，得出该样品中主要矿

单位：%

表3 Au的物相分析结果
Table 3 Analysis results of Au phase

名称	金银矿中金	碲化金银矿中金	合计
金含量/(g/t)	20.92	21.32	42.24
占有率/%	49.53	50.47	100.00

表4 Au在矿物中的分布
Table 4 Distribution of Au in the samples

矿物名称	黄铁矿	黄铜矿	石英	正长石	其他	总计
矿物含量/%	48.57	4.38	15.97	7.25	23.83	100.00
金含量/%	8.11	4.85	1.22	4.84	23.22	42.24
分布率/%	19.21	11.49	2.89	11.45	54.96	100.00

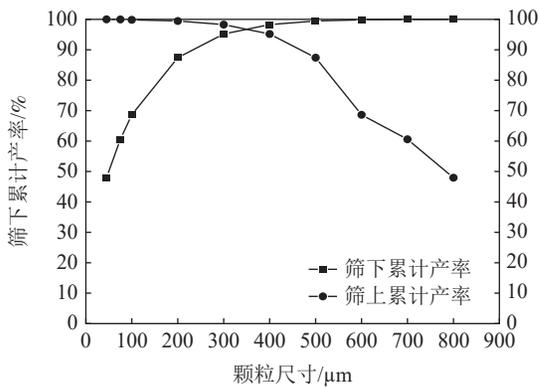


图2 样品粒度分布曲线

Fig.2 Particle size distribution curve of samples

物的单体解离度测定结果，见表5。

从表5中数据可以看出，不同矿物的单体解离度存在较大差异。黄铁矿的平均解离度为77.47%，相对较高，这是因为黄铁矿在矿石中结晶程度较好，晶体颗粒相对较大，在磨矿过程中更容易实现单体解离。黄铜矿的平均解离度为37.34%，较低，这是由于黄铜矿常与其他矿物紧

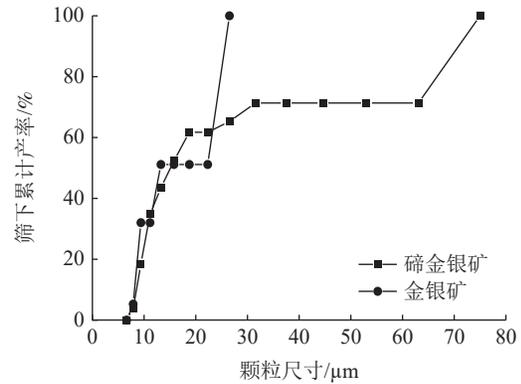


图3 金矿物粒度分布曲线

Fig.3 Particle size distribution curve of the gold ore

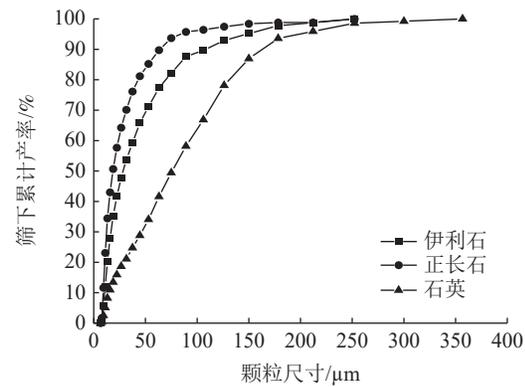


图4 主要脉石矿物粒度分布曲线

Fig.4 Particle size distribution curve of main gangue ores

密共生，在磨矿过程中难以完全解离。AuAgTe的平均解离度为60.27%，AuAg的平均解离度为17.97%，金银矿的单体解离情况不理想，这使得在选矿过程中，金银矿难以与其他矿物有效分离，影响金的回收。磁铁矿的平均解离度为46.51%，菱铁矿的平均解离度为19.39%，石英的平均解离度为70.69%。

表5 主要矿物单体解离度测定结果

Table 5 Determination of the dissociation degree of the main mineral monomers

解离度级别	黄铁矿	黄铜矿	AuAgTe	AuAg	磁铁矿	菱铁矿	石英
0%<x≤10%	0.96	30.60	44.02	12.17	19.67	48.74	6.43
10%<x≤20%	1.61	7.96	5.69	39.73	9.64	15.62	5.89
20%<x≤30%	3.08	6.88	1.11	25.84	11.57	9.47	5.16
30%<x≤40%	5.97	5.18	3.99	3.16	12.23	5.57	5.39
40%<x≤50%	5.10	7.23	0.97	0.00	11.65	6.51	4.88
50%<x≤60%	3.52	5.75	1.23	6.97	3.45	4.39	7.14
60%<x≤70%	4.41	4.21	6.08	0.00	6.98	1.43	10.15
70%<x≤80%	6.00	3.19	0.00	0.00	6.62	1.80	10.18
80%<x≤90%	12.06	4.51	28.67	0.00	8.83	0.71	14.16
90%<x<100%	44.44	12.50	1.83	0.00	5.53	1.54	23.03
100%	12.84	11.99	6.43	12.13	3.85	4.20	7.59
平均解离度/%	77.47	37.34	60.27	17.97	46.51	19.39	70.69

2.5 矿物连生定量关系和难选结构原因分析

定量关系见表 6，金矿物包裹关系见表 7。

根据 AMICS 测试结果，得出主要矿物连生体

表 6 主要矿物连生定量关系

单位：%

Table 6 Quantitative relationship of intergrowth of main minerals

矿物名称	黄铁矿	石英	黄铜矿	伊利石	磁铁矿	冰洲石	正长石	金银矿	碲化金银矿
黄铁矿	0.00	3.00	3.49	2.16	0.43	0.20	6.53	0.00	0.01
石英	6.00	0.00	1.54	4.69	0.37	0.28	9.57	0.00	0.01
黄铜矿	14.02	3.09	0.00	1.78	0.20	0.24	5.59	0.01	0.01
伊利石	7.21	7.82	1.48	0.00	0.52	0.19	12.21	0.00	0.02
磁铁矿	14.40	6.22	1.70	5.28	0.00	0.88	4.40	0.00	0.00
冰洲石	6.41	4.63	1.93	1.87	0.85	0.00	5.19	0.00	0.24
正长石	10.72	7.85	2.28	6.01	0.21	0.26	0.00	0.00	0.02
金银矿	19.21	2.89	11.49	0.00	0.00	0.00	11.45	0.00	3.36
碲化金银矿	7.51	2.78	2.10	4.56	0.00	4.97	8.36	0.51	0.00

表 7 金矿物包裹关系

单位：%

Table 7 Gold mineral encapsulation relationship

包裹关系	金银矿	碲化金银矿
单体	12.18	6.48
两相包裹	3.15	8.79
三相及以上包裹	84.67	84.73
合计	100.00	100.00

表 6、7 结果表明，金银矿的三相包裹为 84.67%，主要与黄铁矿和黄铜矿连生，其次是正长石；碲化金银矿单体百分比低于 10%，单体解离度小，与正长石连生关系最为明显。连生关系复杂是导致金品位低的主要原因。结合粒度分析结果可以得出，粒度较细的碲化金银矿与粒度较粗的黄铁矿连生系数偏高，细粒度的金银矿单体解离情况同样不理想。此外，金银矿和碲化金银矿的多相包裹特性显著增加了其解离和浸出的难度，影响金精矿的品位。

图 5~7 分别为黄铁矿、金银矿、碲化金银矿连生关系。

从图 5 可以看出，黄铁矿主要与黄铜矿呈共伴生关系，同时与脉石矿物正长石、伊利石和冰洲石形成毗邻型连生关系。黄铁矿与石英则主要表现为包裹性连生，且这种包裹夹杂的现象较为显著。黄铁矿和黄铜矿常通过包裹或紧密伴生形式，将金包裹在其中，降低了后续氰化浸出的浸出率。此外，脉石矿物会减少载体矿物与浸出剂的接触，使金的浸出受到抑制。



图 5 黄铁矿连生关系

Fig.5 Intergrowth relationship of pyrite

从图 6 中可以看出，金银矿的连生关系较为复杂，主要与石英、正长石等脉石矿物伴生，表现为毗邻型连生和包裹型连生并存。尤其是金银矿还与黄铁矿和黄铜矿存在毗邻型连生关系。金银矿物的包裹体结构较为致密，在浸出过程中，由于包裹体阻碍，浸出剂难以与金银矿充分接触，从而导致部分金银矿物未能完全暴露，这一现象直接影响了金的品位。



图 6 金银矿连生关系

Fig.6 Intergrowth relationship of electrum

从图 7 可以看出碲化金银矿的连生关系，其伴生矿物包括黄铁矿、黄铜矿、金银矿以及脉石矿物石英、伊利石、冰洲石和正长石。与其他矿物相比，碲化金银矿与黄铁矿的连生关系最为显著，二者呈毗邻型连生。此外，碲化金银矿与脉石矿物之间的连生关系较为复杂，部分与伊利石、钠长石和正长石表现为毗邻型连生，极少部分则以包裹状态存在于石英中。这种复杂的连生

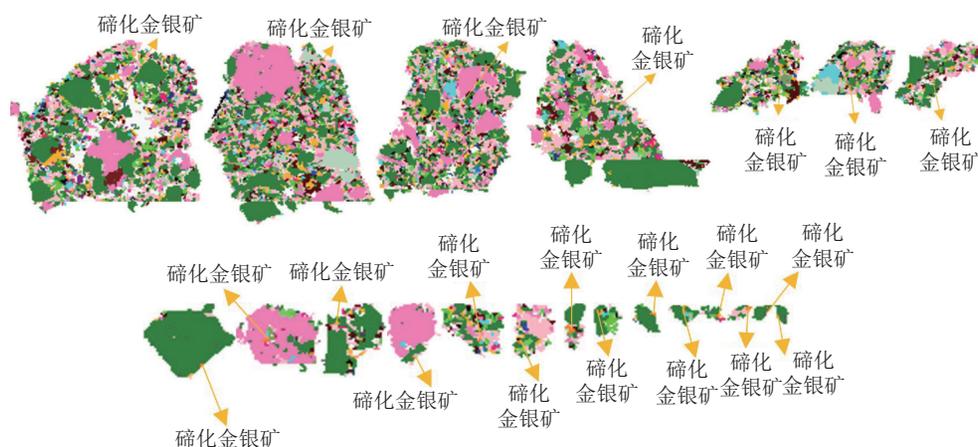


图7 碲化金银矿连生关系

Fig.7 Intergrowth relationship of telluride gold-silver ores

特性增加了碲化金银矿与载金矿物分离的难度，导致金不能完全裸露，影响后续氰化浸出。

综上所述，难处理金矿资源中难浸出问题主要源于含金矿物的黄铁矿、黄铜矿及脉石矿物之间复杂的连生、包裹特性，黄铁矿和黄铜矿通过包裹或紧密伴生形式将金包裹在其中，导致金难以在氰化浸出过程中有效回收。脉石矿物如正长石、伊利石和冰洲石的存在也会抑制金的浸出，减少金矿物与浸出剂的接触，进而降低浸出效率。此外，包裹金的矿物与脉石矿物往往会阻碍浸出剂与金的反应，进一步增加了金的浸出难度。

3 结论

(1) 矿石中有价元素主要为金元素，含量为42.24 g/t，金元素主要以金银矿中金和碲化金银矿中金的形式存在，分布率为49.53%和50.47%，碲化金银矿因化学惰性强、与氰化物反应较慢，导致浸出率低，因此选矿实验研究主要以金银矿中金的回收为主。

(2) 脉石矿物主要是石英，正长石和伊利石，含量分别是19.97%、7.25%和5.79%。脉石矿物会导致矿浆泥化严重，黄铁矿等硫化物包裹现象严重，是难浸出的主要原因。

(3) 金矿物以复杂包裹体形式存在，金银矿和碲化金银矿的三相及以上包裹占比均超84%，主要与黄铁矿、黄铜矿及正长石形成毗邻型或包裹型连生。碲化金银矿与正长石、伊利石的连生进一步限制其解离。这种包裹、连生双重作用导致金矿物表面难以与浸出剂接触，是氰化浸出效

率低的核心原因。针对上述特性，需采用化学选矿破坏硫化物结构释放包裹金以提升金回收率。

参考文献：

- [1] 陈广, 羊坤, 陈思竹, 等. 浮-重选联合流程选别金尾矿实验研究[J]. *矿产综合利用*, 2022(2):131-134.
CHEN G, YANG K, CHEN S Z, et al. Experimental study on flotation-gravity combined process for gold tailings separation[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(2):131-134.
- [2] 陈艳波, 李光胜, 朱幸福, 等. 甘肃某含砷高硫金矿浮选实验[J]. *矿产综合利用*, 2024, 45(3):206-210.
CHEN Y B, LI G S, ZHU X F, et al. Flotation experiment on an arsenic-bearing high-sulfur gold ore in Gansu[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2024, 45(3):206-210.
- [3] 明平田, 马生萍, 丁超, 等. 青海某少硫化物难选金矿选矿实验[J]. *矿产综合利用*, 2024, 45(6):161-168.
MING P T, MA S P, DING C, et al. Beneficiation experiment on a refractory low-sulfide gold ore in Qinghai[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2024, 45(6):161-168.
- [4] 赵福财, 栾东武, 丁雨波, 等. 甘肃某含砷锑难处理金矿选矿试验研究[J]. *黄金*, 2024, 45(6):45-49.
ZHAO F C, LUAN D W, DING Y B, et al. Experimental study on beneficiation of a refractory arsenic-antimony-bearing gold ore in Gansu[J]. *Gold*, 2024, 45(6):45-49.
- [5] 管继云, 张七道, 曹毅, 等. 滇东南那能金矿床成因:来自硫化物原位微量元素和同位素的证据[J]. *地质科技通报*, 2024:1-17.
GUAN J Y, ZHANG Q D, CAO Y, et al. Genesis of the Naneng gold deposit in southeastern Yunnan: Evidence from in-situ trace elements and isotopes of sulfides[J]. *Bulletin of*

Geological Science and Technology, 2024:1-17.

[6] 吴波, 吴治君, 赵明峰, 等. 贵州百地金矿床石英微量元素和 H-O 同位素地球化学特征及其矿床成因意义[J]. 华南地质, 2024:1-13.

WU B, WU Z J, ZHAO M F, et al. Geochemical characteristics of quartz trace elements and H-O isotopes in the Baidi gold deposit, Guizhou, and its metallogenic significance [J]. South China Geology, 2024:1-13.

[7] 马方通, 高利坤, 董方, 等. 难处理金矿预处理及强化氰化技术研究现状及进展[J]. 黄金, 2016, 37(4):51-55.

MA F T, GAO L K, DONG F, et al. Research status and progress on pretreatment and enhanced cyanidation technology of refractory gold ores[J]. Gold, 2016, 37(4):51-55.

[8] 王盼盼, 吴俊峰, 陈林, 等. 四川锂辉石尾矿工艺矿物学及锂的赋存状态[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(6):199-206.

WANG P P, WU J F, CHEN L, et al. Process mineralogy and lithium occurrence in spodumene tailings from Sichuan[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2024, 45(6):199-206.

[9] 吴甜甜, 沈智慧, 王建龙, 等. 难处理金矿预氧化过程中载金包裹体的相变与重构研究进展[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(5):85-94.

WU T T, SHEN Z H, WANG J L, et al. Research progress on phase transition and reconstruction of gold-bearing inclusions during pre-oxidation of refractory gold ores[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2024, 45(5):85-94.

[10] 祁栋. 高砷低品位金矿提金实验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2011.

QI D. Experimental study on gold extraction from high-arsenic and low-grade gold ore[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.

[11] 林海彬, 郭金溢, 谢洪珍, 等. 碳质高砷硫化物包裹多重难处理金矿热压氧化-氰化试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2024(10):111-118.

LIN H B, GUO J Y, XIE H Z, et al. Pressure oxidation-cyanidation test on carbonaceous high-arsenic sulfide encapsulated refractory gold ores[J]. *Nonferrous Metals (Smelting Section)*, 2024(10):111-118.

[12] 何志强, 李栋, 田庆华, 等. 湿法提金技术发展历程及应用现状[J]. 黄金, 2022, 43(2):65-74.

HE Z Q, LI D, TIAN Q H, et al. Development history and application status of hydrometallurgical gold extraction technology[J]. *Gold*, 2022, 43(2):65-74.

[13] 李磊, 彭俊, 肖仪武, 等. 影响非洲某金矿选冶回收的矿物学因素[J]. 矿产综合利用, 2023(6):202-206.

LI L, PENG J, XIAO Y W, et al. Mineralogical factors affecting beneficiation and metallurgy recovery of a gold deposit in Africa[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2023(6):202-206.

[14] 温利刚, 曾普胜, 詹秀春, 等. 矿物表征自动定量分析系统 (AMICS) 技术在稀土稀有矿物鉴定中的应用[J]. 岩矿测试, 2018, 37(2):121-129.

WEN L G, ZENG P S, ZHAN X C, et al. Application of automated mineral characterization system (AMICS) technology in rare earth and rare mineral identification[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2018, 37(2):121-129.

[15] 蔡明明, 李光胜, 朱幸福, 等. 基于金矿岩芯的自动工艺矿物学[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(3):174-178.

CAI M M, LI G S, ZHU X F, et al. Automated process mineralogy based on gold ore drill cores[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2024, 45(3):174-178.

[16] 杨海江. 某金矿石工艺矿物学研究[J]. 黄金, 2019, 40(8):66-69.

YANG H J. Process mineralogy study of a gold ore[J]. *Gold*, 2019, 40(8):66-69.

[17] 王广伟, 谢卓宏, 蒲江东. 某极难选金矿石工艺矿物学研究[J]. 矿产综合利用, 2019(6):69-73.

WANG G W, XIE Z H, PU J D. Process mineralogy study of an extremely refractory gold ore[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(6):69-73.

[18] 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.

WANG T, YU H B, WANG Y, et al. Process mineralogy study of a gold ore in Gansu[J]. *Gold*, 2023, 44(6):59-63.

[19] 杨玮, 王刚, 曹欢, 等. 从含碲金矿中综合回收金、银、碲的试验研究[J]. 矿冶工程, 2019, 39(4):39-42.

YANG W, WANG G, CAO H, et al. Experimental study on comprehensive recovery of gold, silver, and tellurium from tellurium-bearing gold ore[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2019, 39(4):39-42.

(下转第 214 页)

Abstract: The study applied the Remote Sensing Ecological Index (RSEI) to the assessment of the ecological environment quality in Zhushan County, Hubei Province. By comparing the changes in the RSEI before and after the introduction of the mine density index, the impact of mine distribution on the ecological environment was analyzed. At the same time, the DPSR-TOPSIS coupling model was used to evaluate the ecological environment carrying capacity of Zhushan County from 2001 to 2021, and an index system covering 19 indicators was constructed. The index weights were calculated by combining the analytic hierarchy process and the entropy method, and the barrier function was introduced to identify the main constraints of the carrying capacity. The results showed that the ecological environment carrying capacity in the county generally showed an exponential growth, and the main obstacle factors affecting its change were: "total social fixed asset investment", "per capita GDP", "average annual rainfall", "average annual temperature", "population density" and "general public budget expenditure". The main factors driving the change of ecological environment carrying capacity can be summarized as "economic development", "population change", "natural conditions" and "policy response". After adding the mine density index, the area with medium or lower ecological environment quality in Zhushan County increased by 1.96%, among which the area of the "rather poor" and "poor" grades increased by 42.96 km² and 27.21 km² respectively. This study has certain significance in guiding the improvement of ecological environment and carrying capacity in Zhushan county.

Keywords: mine distribution; ecological environment; remote sensing ecological index; ecological environment carrying capacity; Zhushan county

////////////////////////////////////
(上接第 204 页)

Process Mineralogy Research on a Gold Concentrate in Shandong

LIU Jiaxing¹, WANG Panzhi², GAO Yun², HAN Baisui¹

(1.School of Minging Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan , Liaoning 114051, China; 2.Jiaojia Gold Mine, Shandong Gold Mining (Laizhou), Yantai, Shandong 261441, China)

Abstract: With the continuous exploitation of gold resources, the composition of ores has become increasingly complex, and the gold grade has gradually decreased, leading to an increase in the number of refractory gold ores. In such ores, gold is often embedded in minerals like pyrite and chalcopyrite in the form of micro-encapsulated particles, making it difficult to improve recovery rates through traditional beneficiation methods. A certain gold concentrate from Shandong Province faces challenges due to declining ore grade and complex mineral composition, increasing the difficulty of beneficiation. The study used chemical multi-element analysis and Automated Mineralogy and Chemical Imaging System (AMICS) to analyze the ore's mineral composition, gold occurrence state, particle size distribution, and mineral associations to identify the reasons for poor recoverability and provide a basis for optimizing the beneficiation process. The results showed that the gold content of the ore was 42.24 g/t, with gold mainly occurring as telluride gold-silver minerals encapsulated in pyrite and chalcopyrite. The telluride minerals are insoluble and react slowly with cyanide, leading to a low leaching rate. Gangue minerals such as quartz, illite, and orthoclase form associations with gold minerals, complicating the beneficiation process. Gold minerals are fine-grained, and traditional physical beneficiation methods cannot effectively recover gold. Pyrite has a high degree of dissociation, while chalcopyrite and gold minerals have lower dissociation, further limiting gold recovery. The complex encapsulation and association of gold minerals with other minerals is the main reason for the poor recoverability of this ore. The study suggests that chemical beneficiation methods be adopted to improve gold grade for this ore.

Keywords: automatic mineral identification and characterization system; gold concentrate; reasons for difficulty selection; process mineralogy; chemical beneficiation