无尾理念下某金矿选矿试验及尾矿综合利用研究*

孙大勇[1,2,3]，李佩昱[1,3]，李杰[1,3]，朱志伟[1,3]

（1.长沙矿山研究院有限责任公司， 湖南 长沙 410012；
2.中南大学 资源加工与生物工程学院， 湖南 长沙 410083；
3.湖南省矿山固废综合利用工程技术研究中心， 湖南 长沙 410012）

摘要：基于无尾矿山理念，针对湖南某岩浆热液型金矿开展选矿与尾矿资源综合利用研究，构建了“重-浮联合工艺回收金—金尾矿综合回收石英—剩余尾矿全量充填”的无尾矿山技术体系，技术路线为：采用立式离心机重-浮联合工艺高效回收金，获得金精矿Au品位为81.69 g/t，回收率为97.06%；采用“脱泥—强磁—反浮选”工艺从金尾矿中回收石英，获得SiO_2品位98.86%、回收率65.37%的石英精矿；最终将剩余尾矿（产率38.23%）全部用于井下充填。通过工艺创新，有效解决了尾矿处置难题，实现了矿石全组分资源化与尾矿零排放，为同类矿山绿色开发提供了技术参考。

关键词：无尾矿山；金矿；综合利用；石英；充填

中图分类号：TD923 **文献标识码**：A **文章编号**：1005-2763(2026)06-0235-09

Beneficiation Test and Comprehensive Utilization of Tailings from a Gold Mine Based on Tailings-Free Concept

Sun Dayong[1,2,3], *Li Peiyu*[1,3], *Li Jie*[1,3], *Zhu Zhiwei*[1,3]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;
3.Hunan Engineering and Technology Research Center for Comprehensive Utilization of Mine Solid Waste, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: Based on the tailings-free mine concept, beneficiation and comprehensive utilization of tailings resources were studied for a magmatic hydrothermal gold mine in Hunan. A tailings-free mine technical system was established, adopting the process of gold recovery by a gravity-flotation combined process, quartz comprehensive recovery from gold tailings, and full-volume backfill of residual tailings. The technical route is as follows: gold is efficiently recovered via a vertical centrifuge gravity-flotation combined process, and a gold concentrate with an Au grade of 81.69 g/t and a recovery rate of 97.06% is obtained. Quartz is recovered from gold tailings by the desliming-high intensity magnetic separation-reverse flotation process, and a quartz concentrate with an SiO_2 grade of 98.86% and a recovery rate of 65.37% is obtained. The residual tailings with a yield of 38.23% are all applied to underground backfill. The process innovation effectively solves the problem of tailings disposal, realizes full-component resource utilization of ore and zero tailings discharge, and provides a technical reference for the green development of similar mines.

Key words: Tailings-free mine, Gold mine, Comprehensive utilization, Quartz, Backfill

0 引言

当前全球矿业正经历绿色转型，无尾矿山作为绿色矿山的重要体现形式，已成为国际矿业绿色可持续发展的重要方向[1]，国际矿业协会提出到2025年实现尾矿零排放的目标，推动矿业行业向循环经济模式转变[2]。金矿作为高价值矿产资源[3]，选矿产品产率低，尾矿量大，实现无尾矿山的成功经验少，无尾化矿山建设具有显著的研究价值和经济、环境多重效益[4]。我国印发的《黄金产业高质量发展实施方案（2025—2027年）》强调采用“源头减量、过程控制、末端治理、资源化利用”原则，建设绿色矿

* **收稿日期**：2025-12-02
基金项目：“十四五”国家重点研发计划资助项目（2022YFC2905103）
作者简介：孙大勇（1989—），男，河北唐山人，硕士，高级工程师，主要从事选矿工艺及药剂研发工作。E-mail：2418361338@qq.com

山。在学术研究方面,李杏茹等[5]提出绿色矿山建设已成为当今矿业实现可持续发展的根本要求和广泛共识,其中无尾矿山是绿色矿山建设的重要体现形式。高扬[6]、付建勋等[7]对无尾绿色矿山建设的碳减排现状及创新路径进行了深入研究,提出技术创新与体系优化是关键,需通过高效采选技术与装备升级、全组分综合利用等多路径协同推进无尾矿山建设。在国内外实践中,澳大利亚 Vertex Minerals 公司在希尔恩德金矿开展选矿减排研究,引入激光分选技术,使金品位提升 33.7%,矿石质量减少 79%,大幅降低了尾矿量[8]。山东莱州汇金纱岭金矿开展高效选矿和尾矿综合利用研究[9],采用"选矿—尾砂粗细分级—细尾砂充填—粗尾砂建材化"的工艺,尾矿综合利用率达 86.60%,处于国内领先水平。

湖南某金矿为岩浆热液型金矿,金矿物以自然金为主,沿黄铁矿、毒砂、石英等粒间充填产出,脉石矿物以石英为主。该矿距湘江直线距离 2.7 km,根据政策要求,禁止在长江干流岸线 3 km 范围内和重要支流岸线 1 km 范围内新建、改建、扩建尾矿库,导致该矿山无法按照传统方法仅回收金[10],并将尾矿堆存于尾矿库中[11],需解决矿石全组分回收的难题,进而实现矿山有价组分全部资源化利用[12-14],实现尾矿零排放[15]。

针对该金矿系统开展选矿试验与尾矿综合利用研究,构建全组分利用的技术路径,为实现尾矿零排放和矿山开发提供技术支撑。采用"重-浮联合工艺"回收金,再从金尾矿中综合回收石英,剩余尾矿全部用于充填,形成"重-浮联合工艺回收金—金尾矿综合回收石英—剩余尾矿全量充填"一体化技术体系。该技术路线有望实现无尾矿化目标,解决制约该矿山开发的政策和技术瓶颈。

1 矿石性质

湖南某金矿试样的化学多元素分析结果见表 1,矿物组成分析结果见表 2,金的化学物相分析结果见表 3。试样中可供选矿回收的主要组分是金、石英,其中 Au 的含量为 3.90 g/t、SiO_2 含量为 73.34%。金主要沿黄铁矿、毒砂等矿物粒间充填产出,少量以裂隙充填或包裹形式存在,载金矿物粒度较粗,容易解离。金及载金矿物赋存状态典型扫描电镜图如图 1、图 2 所示。

表 1 试样的化学多元素分析结果

Table 1 Results of chemical multi-element analysis of samples %

Au*	Ag*	Cu	TFe	Zn	Pb
3.90	1.26	0.018	3.98	0.046	0.02
SiO_2	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	CaO	MgO
73.34	8.69	2.84	2.92	2.88	2.68
C	S	TiO_2	As	Bi*	Sb*
0.38	0.32	0.05	0.01	<0.1	3.05

注:带"*"单位为 g/t。

表 2 试样主要矿物组成分析结果

Table 2 Results of main mineral composition analysis of samples %

金矿物	石英	云母	长石	斜绿泥石	方解石
微量	68.52	12.42	7.66	5.01	2.68
绢云母	黄铁矿	黄铜矿	毒砂	金红石	钛铁矿
0.65	0.50	0.08	0.06	0.38	0.18
针铁矿	赤(褐)铁矿	菱铁矿	方铅矿	闪锌矿	磷灰石
0.35	0.30	0.30	0.03	0.04	0.25
高岭石	铁阳起石/透辉石	锆石	榍石		
0.15	0.27	0.03	0.04		

表 3 矿石中金的化学物相分析结果

Table 3 Results of chemical phase analysis of gold in ore

	物相	含量/(g/t)	分布率/%
	单体金及裸露金	2.98	76.41
包裹金	硫化物包裹金	0.61	15.64
	铁氧化物及碳酸盐包裹金	0.19	4.87
	石英及硅酸盐包裹金	0.12	3.08
	合计	3.90	100.00

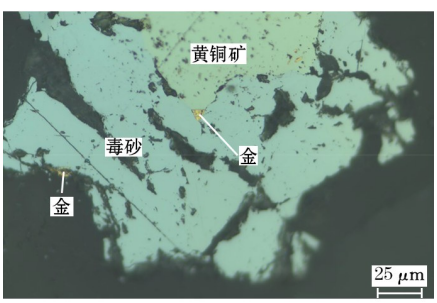


图 1 金嵌布在黄铜矿、毒砂粒间

Fig.1 Gold distributed in chalcopyrite and arsenopyrite intergranular spaces

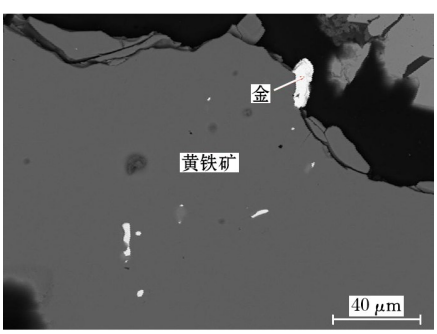


图 2 自然金嵌布在黄铁矿边缘

Fig.2 Native gold distributed along pyrite edges

2　金选矿试验研究

2.1　金选矿原则工艺的确定

为确定金高效回收的最佳技术方案，系统开展了不同磨矿细度条件下单一重选、单一浮选及重-浮联合工艺的对比试验，旨在确定适宜的原则工艺流程及磨矿细度条件。试验中，重选采用摇床分选，浮选采用一次粗选流程；重-浮联合工艺则采用摇床重选与一次粗选浮选相结合的方式。单一重选、单一浮选和重-浮联合工艺的试验流程分别见图 3、图 4 和图 5，原则工艺对比试验结果见图 6。通过系统对比分析，为原则工艺的确定和优化提供依据。

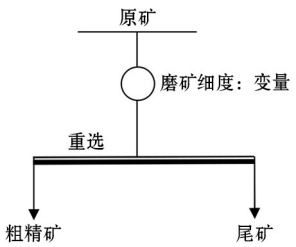


图 3　单一重选工艺试验流程

Fig.3　Test flowsheet of single gravity separation process

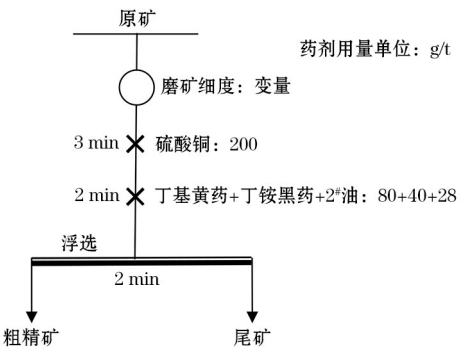


图 4　单一浮选工艺试验流程

Fig.4　Test flowsheet of single flotation process

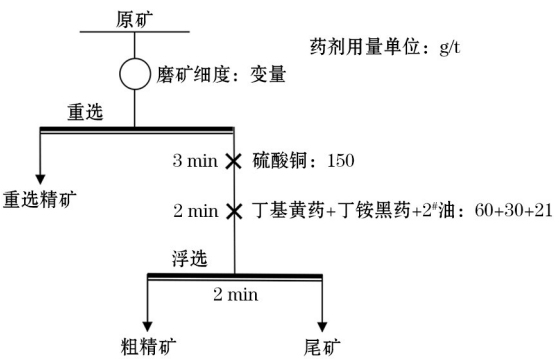


图 5　重-浮联合工艺试验流程

Fig.5　Test flowsheet of gravity separation-flotation combined process

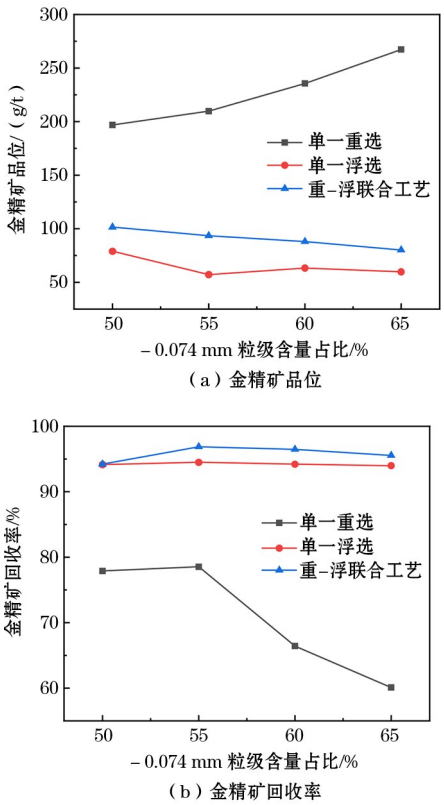


图 6　原则工艺对比试验结果

Fig.6　Comparison test results of principle process

在原则工艺流程的确定中，对比了不同磨矿细度条件下，单一重选、单一浮选及重-浮联合工艺三种方案的试验指标。从金精矿品位来看，不同磨矿细度条件下的各选矿工艺所获得的金精矿品位均达到合格标准(一般要求≥20 g/t)。其中，重-浮联合工艺的金精矿回收率显著高于单一重选或单一浮选，表现出最优的综合选别效果，因此确定采用重-浮联合工艺作为原则选矿流程。

确定原则工艺流程后，分析磨矿细度对选矿指标的影响。随着磨矿细度(－0.074 mm 粒级含量占比)的提高，金精矿回收率呈先升后降的趋势，当磨矿细度为－0.074 mm 粒级含量占比 55%时，重-浮联合工艺的金精矿回收率达到最佳值，故确定该细度为最佳磨矿工艺参数。

2.2　金重选试验

根据确定的原则工艺流程，重选作为回收金的首道作业，其主要是基于矿物颗粒间的比重差异，在重力场或离心力场中实现分选。分选差异主要在于设备作用原理的不同，摇床和螺旋溜槽依赖重力与水流，对中粗粒已解离金分选有效，但对细粒金回收

能力有限;尼尔森选矿机、离心机通过离心力强化重力分选,在复合力场下可实现更充分的分层与分离,适于粒度分布较广、解离较充分的金颗粒,可兼顾品位与回收率。试验对比了摇床、螺旋溜槽、尼尔森选矿机、立式离心机及卧式离心机等重选装备对选别效果的影响,相应试验流程如图 7 所示,分选指标结果如图 8 所示。

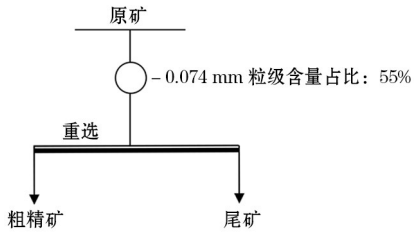


图 7 重选试验流程

Fig.7 Test flowsheet of gravity separation

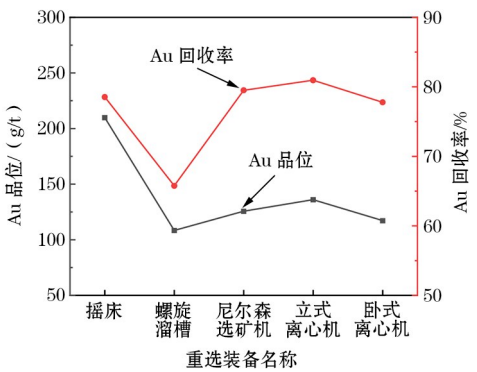


图 8 重选装备对选别效果的影响

Fig.8 Influence of gravity separation equipment on separation effect

重选试验结果表明,各设备所获得的 Au 品位均符合产品质量要求。其中,立式离心机的分选效果最佳,Au 回收率达 80.95%,显著高于其他设备。基于回收率最大化原则,确定重选作业采用立式离心机。

2.3 金浮选试验

为保证浮选试验研究给矿性质的一致性与可比性,采用立式离心机对原矿进行连续重选预处理,集中制备一批重选尾矿作为浮选给矿。将该尾矿充分混匀后,使用分样器进行多份分样,并根据矿浆浓度统一折算为干重 600 g/份,分装密封保存,以供后续系统的浮选条件试验使用。该浮选给矿的 Au 品位为 0.76 g/t,其对原矿的 Au 回收率为 19.05%。浮选试验采用 XFD 系列单槽浮选机。浮选条件试验流程如图 9 所示。

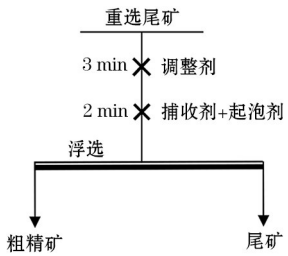


图 9 浮选条件试验流程

Fig.9 Test flowsheet of flotation conditions

2.3.1 调整剂条件试验

固定捕收剂和起泡剂为丁基黄药+丁铵黑药+2# 油:80 g/t+40 g/t+28 g/t,改变调整剂,进行浮选试验,考察其对金浮选指标的影响,其中 CK-T 为有机酸、铝盐、铜盐的混合物。调整剂条件试验结果见图 10。

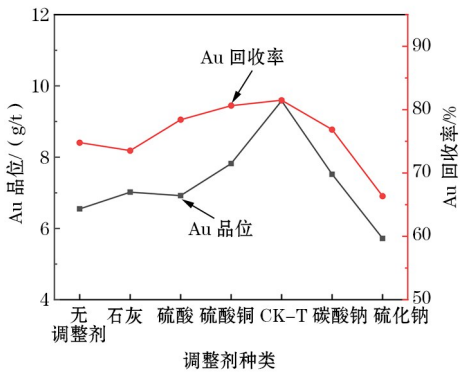


图 10 调整剂条件试验结果

Fig.10 Test results of regulator conditions

试验结果表明,采用 CK-T 作为调整剂时,浮选粗精矿的 Au 品位达到 9.58 g/t,Au 回收率为 81.49%,两项指标均显著优于其他调整剂条件,说明 CK-T 对金的高效回收具有良好的促进作用。因此,确定选用 CK-T 作为浮选调整剂。

2.3.2 捕收剂条件试验

在起泡剂 2# 油(28 g/t)与调整剂 CK-T(500 g/t)用量固定的条件下,系统开展了捕收剂种类及用量的条件试验,所选捕收剂为常用的丁基黄药、丁胺黑药、异戊基黄药、Y89 及其组合,黄药类捕收剂对载金硫化矿捕收能力强,丁胺黑药选择性好且对金捕收能力较强,Y89 为复合型捕收剂。捕收剂条件试验结果见图 11。

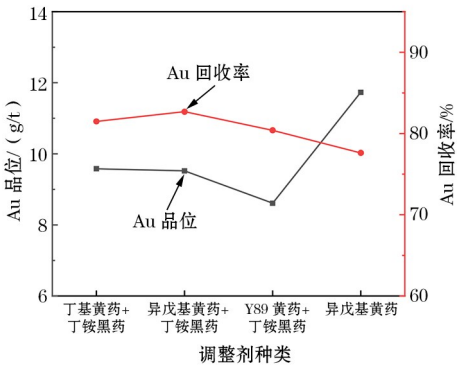


图 11　捕收剂条件试验结果

Fig.11　Test results of collector conditions

试验结果表明，采用异戊基黄药＋丁铵黑药组合作为捕收剂时，浮选粗精矿的 Au 品位为 9.52 g/t，Au 回收率达 82.68%，显著优于其他捕收剂条件，且回收率为各组最高。该药剂组合在有效保障金精矿品位的同时，表现出优异的协同捕收能力，有效提高了 Au 回收率，因此确定异戊基黄药＋丁铵黑药组合作为捕收剂。

2.4　金选矿全流程闭路试验

在系统完成重选及浮选条件试验的基础上，为进一步验证和优化整体工艺的连续性与稳定性，开展了金选矿全流程闭路试验研究。试验过程中，根据浮选现象（如泡沫层厚度、矿化效果等）对药剂制度进行了动态微调。全流程闭路试验流程如图 12 所示，试验结果见表 4。

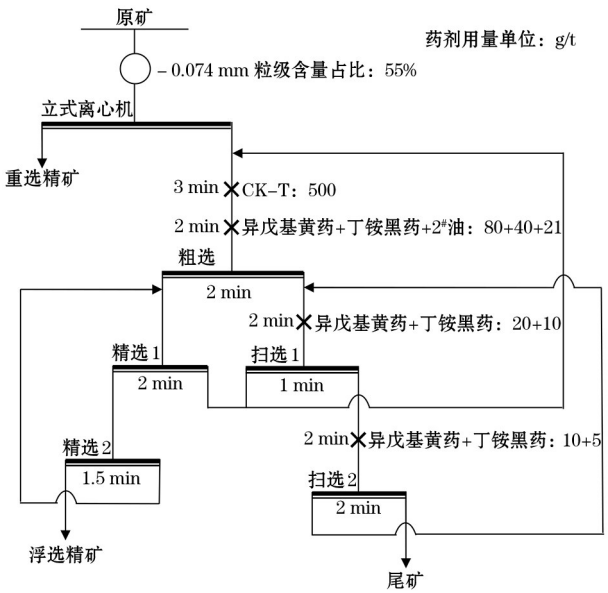


图 12　金选矿全流程闭路试验流程

Fig.12　Flowsheet of whole-process closed-circuit test for gold beneficiation

表 4　全流程闭路试验结果

Table 4　Results of whole-process closed-circuit test　%

产品名称	产率	品位				回收率			
		Au*	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	Au	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3
重选精矿	2.32	135.96	32.50	24.84	16.28	80.95	1.03	11.60	4.35
浮选精矿	2.31	27.18	38.55	9.76	10.66	16.11	1.21	4.53	2.83
重选＋浮选精矿	4.63	81.69	35.52	17.32	13.48	97.06	2.24	16.13	7.18
尾矿	95.37	0.12	75.18	4.37	8.46	2.94	97.76	83.86	92.82
原矿	100.00	3.90	73.34	4.97	8.69	100.00	100.00	100.00	100.00

注：带“*”单位为 g/t。

全流程闭路试验结果表明，重－浮联合工艺取得了显著的分选效果。最终混合金精矿 Au 品位为 81.69 g/t，Au 回收率高达 97.06%，尾矿中 Au 品位降至 0.12 g/t，Au 回收率仅为 2.94%。该联合工艺不仅实现了金的高效富集与回收，同时展现出良好的工艺协同性与稳定性，整体技术指标优异。

3　金尾矿综合利用研究

鉴于该矿山无法获准尾矿库，为实现资源开发，需全面消纳、利用尾矿。基于矿石工艺矿物学特性，对金选矿尾矿开展石英综合回收研究，其余尾矿用于采空区充填，最终实现尾矿的全部资源化利用，构建了无尾矿山的技术路线。

3.1　金选矿综合回收石英试验

金选矿尾矿中 SiO_2 含量高达 75.18%，结合工艺矿物学研究结果，其中 SiO_2 主要赋存于石英矿物中，具有良好的综合回收潜力。为进一步提升尾矿资源化利用率，本文以该金选矿尾矿为研究对象，开展石英的综合回收试验研究，通过重力脱泥－强磁脱铁－浮选除杂，获得了 SiO_2、Fe_2O_3、Al_2O_3 品位分别为 98.86%、0.04%、1.10%的石英精矿。

3.1.1　脱泥试验

石英选矿常采用预先脱泥作为预处理手段。为模拟实际工业生产条件，本试验采用基于重力沉降－虹吸抽滤的脱泥方法，系统考察了沉降时间对脱泥效率及石英品质的影响，以确定最优脱泥工艺

参数。沉降脱泥试验流程如图 13 所示,试验结果见图 14。

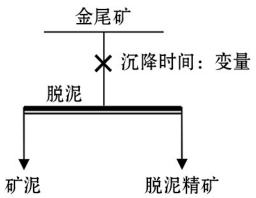


图 13 沉降脱泥试验流程

Fig.13 Test flowsheet of sedimentation desliming

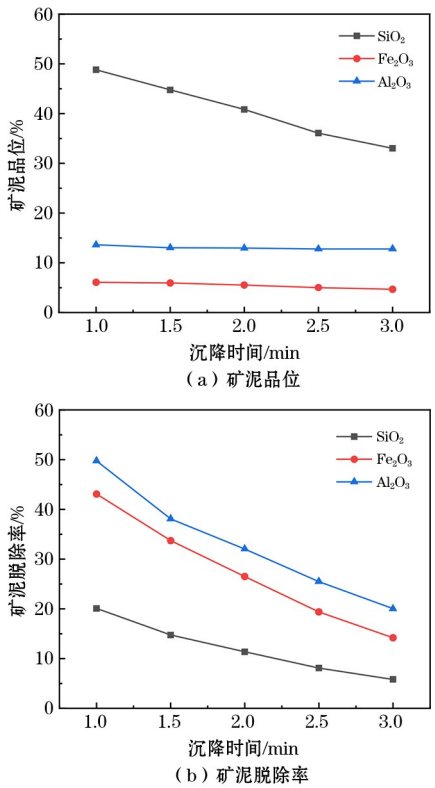


图 14 沉降脱泥试验结果

Fig.14 Test results of sedimentation desliming

试验结果表明,随着沉降时间的延长,脱泥精矿中 SiO_2 品位,以及 Fe_2O_3 与 Al_2O_3 的脱除率均呈现逐渐下降的趋势。在沉降时间为 2.5 min 时,脱泥作业取得较优综合指标,SiO_2 的脱除率较低,仅为 8.09%,同时实现了对主要杂质成分的有效脱除,其中 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 的脱除率分别达到 19.39%和 25.49%。该条件下既保证了 SiO_2 较高的回收率,又显著降低了杂质含量,符合提质增效的预处理目标。因此,确定最优沉降时间为 2.5 min。

3.1.2 强磁脱铁试验

在固定脱泥条件的基础上,对脱泥后的产品开展了强磁选脱除铁杂质的试验研究。通过系统调节磁场强度,考察其对铁矿物脱除效果及石英精矿品质的影响,以确定最佳磁选工艺参数。强磁脱铁试验流程如图 15 所示,试验结果见图 16。

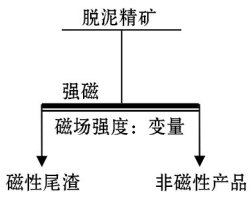


图 15 强磁脱铁试验流程

Fig.15 Test flowsheet of high-intensity magnetic iron removal

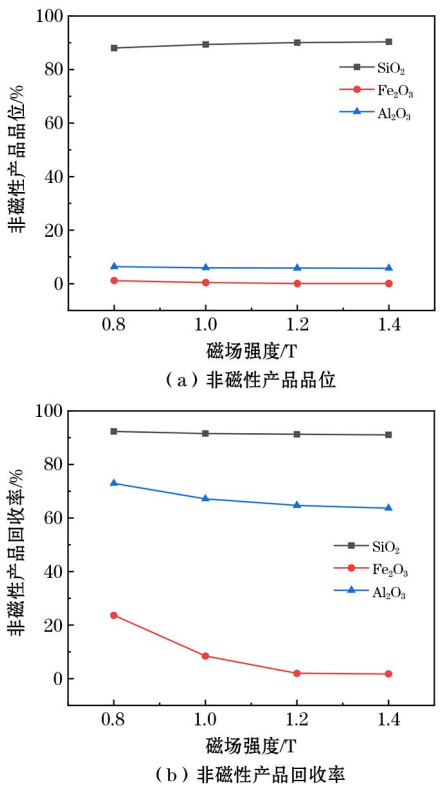


图 16 强磁脱铁试验结果

Fig.16 Test results of high-intensity magnetic iron removal

试验结果表明,当磁场强度为 1.2 T 时,非磁性产品中各组分品位分别为:SiO_2 90.04%、Fe_2O_3 0.10%、Al_2O_3 5.82%。继续提高磁场强度,SiO_2 品位提升有限,且铁、铝杂质脱除效果未见显著改善,故确定最佳磁场强度为 1.2 T。

经强磁选处理后,所得产品中 SiO_2 品位及杂质含量仍未达到石英精矿的质量要求。为实现石英资源的更高附加值利用,后续需采用反浮选工艺进一步脱除铝、铁等残余杂质,有效提升 SiO_2 品位,降低有害杂质含量。

3.1.3　反浮选除杂试验

以强磁选所得非磁性产品为原料，开展反浮选除杂试验，重点考察捕收剂用量对浮选效果的影响。本研究采用捕收剂 CK7-1，该药剂对石英矿中含有的铝、铁硅酸盐等杂质矿物具有良好的选择性和捕收能力，尤其在酸性介质中表现优异。通过系统调整 CK7-1 用量，评估其对精矿中 SiO_2 品位及铝、铁杂质脱除率的影响，以确定最佳药剂制度。反浮选除杂试验流程如图 17 所示，试验结果见图 18。

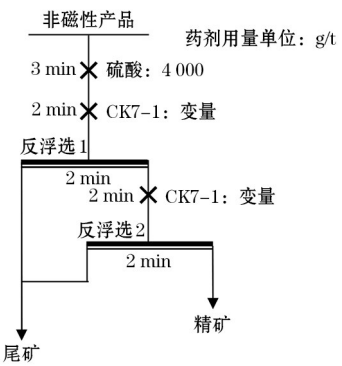


图 17　反浮选除杂试验流程

Fig.17　Test flowsheet of reverse flotation for impurity removal

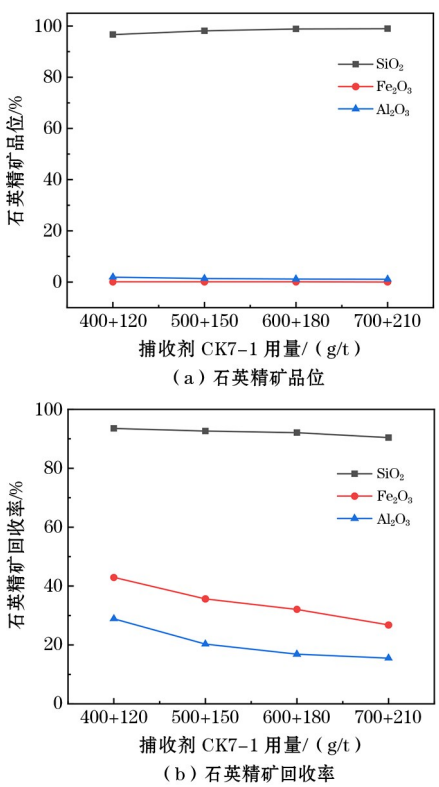


图 18　反浮选除杂试验结果

Fig.18　Test results of reverse flotation for impurity removal

试验结果表明，CK7-1 在该体系中兼具良好选择性与捕收能力，随着捕收剂 CK7-1 用量的增加，反浮选精矿中 SiO_2 品位逐渐上升，Fe_2O_3 与 Al_2O_3 等杂质含量相应降低，显示出良好的用量响应关系。在粗选捕收剂用量为 600 g/t、扫选捕收剂用量为 180 g/t 的工艺条件下，分选指标达到最优：精矿中 SiO_2 品位提高至 98.89%，Fe_2O_3 和 Al_2O_3 含量分别降至 0.04% 和 0.99%，均符合石英精矿的质量要求。

3.1.4　石英全流程选矿试验

在选定脱泥、强磁及反浮选各阶段最佳工艺参数的条件下，对浮选金尾矿开展了“脱泥—强磁—反浮选”联合工艺的全流程试验，以系统验证该技术路线综合回收石英的可行性与稳定性。试验全程参照优化后的操作条件进行，重点考察了最终精矿中 SiO_2 的富集效果及 Fe_2O_3、Al_2O_3 等杂质的脱除效率。全流程试验如图 19 所示，试验结果见表 5。

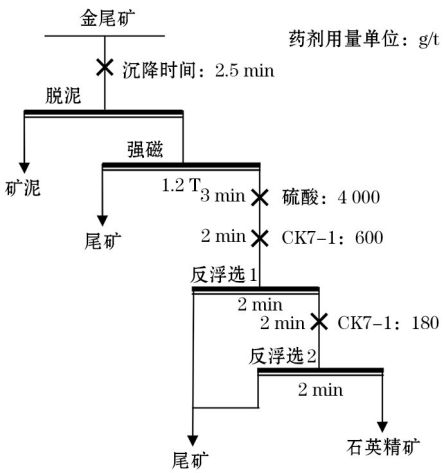


图 19　石英选矿试验流程

Fig.19　Test flowsheet of quartz beneficiation

表 5　石英选矿试验结果

Table 5　Test results of quartz beneficiation　%

产品名称	对原矿产率	品位			对原矿回收率		
		SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3
矿泥	15.99	32.69	4.78	13.11	17.52	40.84	32.83
磁性尾渣	12.07	40.02	26.31	15.43	7.41	36.41	20.67
尾矿	10.17	50.65	2.01	34.21	7.46	4.04	29.30
石英精矿	57.14	98.86	0.04	1.10	65.37	2.57	10.02
合计	95.37	75.18	4.37	8.46	97.76	83.86	92.82

结果表明，“脱泥—强磁—反浮选”联合工艺可实现金浮选尾矿中石英的高效回收，全流程试验指标良好，石英精矿 SiO_2 品位达 98.86%，Fe_2O_3 和 Al_2O_3 杂质含量分别为 0.04% 和 1.10%，符合石英

精矿产品的质量标准。

3.2 剩余尾矿用于充填的可行性研究

金精矿产率4.63%,石英精矿产率57.14%,精矿产品累计产率61.77%,剩余尾矿产率为38.23%,进行了剩余尾矿用于充填的可行性研究,评价其能否全部用于充填,实现尾矿零排放,达到矿石全组分的资源化利用,建立无尾矿山技术体系。

尾矿充填是指将浓缩后的尾矿与胶凝材料按特定配比混合,形成充填料浆后输送至井下采空区进行回填的工艺[16-17]。该矿尾矿浓缩浓度可达到69%以上,经过充填试验研究,确定胶凝材料为水泥,水泥与浓缩尾矿(干重)配比确定为1∶10,该工艺参数获得的胶结充填体可满足工艺技术要求。

开展尾矿能否全部用于充填的测算研究,以每开采1 m^3 原矿(原矿密度为2.7 t/m^3,即采出量为2.7 t)为计算基准,产生的尾矿干固体质量为2.7×38.23%=1.03 t,尾矿真密度为2.4 t/m^3,其固体体积为1.03÷2.4≈0.43 m^3。尾矿浆中水的质量为(1.03÷0.69)−1.03≈0.46 t,体积约0.46 m^3(水密度取1 t/m^3),因此尾矿浆总体积为0.43+0.46=0.89 m^3。根据充填试验结果,需添加水泥质量为1.03÷10=0.103 t,水泥真密度为3.10 t/m^3,得出其体积约为0.033 m^3。

最终充填体体积为尾矿浆体积与水泥体积之和,即0.923 m^3,小于开采形成的1 m^3 采空区体积。研究表明,每采出1 m^3 矿石所产生的尾矿全部用于充填,形成的充填体体积小于采空区体积,由此证明该矿山尾矿可全部用于井下充填。

4 结论

(1) 湖南某岩浆热液型金矿,采用重-浮联合工艺回收金,全流程闭路试验获得Au品位81.69 g/t、回收率97.06%的优异指标,实现了金的高效回收。

(2) 采用“脱泥—强磁—反浮选”工艺从金尾矿中高效回收石英,获得SiO_2品位98.86%、回收率65.37%的合格石英精矿。

(3) 金与石英回收后,剩余产率38.23%的尾矿,通过技术论证可全部用于井下充填,最终构建了“重-浮联合工艺回收金—金尾矿综合回收石英—剩余尾矿全量充填”的无尾矿山技术体系。

参考文献(References):

[1] 梅国栋.尾矿综合利用与无尾矿山建设探讨[J].金属矿山,2010(10):142-145.
Mei Guodong. Discuss on comprehensive utilization of mining tailings and development of pollution-free mines[J]. Metal Mine,2010(10):142-145.

[2] Costa F P D, Fernandes J V, Melo L R L D, et al. The potential for natural stones from northeastern Brazil to be used in civil construction[J]. Mining & Minerals, 2021(5):11050440.

[3] 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+270.
Yang Zhengguo. Process mineralogy characteristics and gold recovery of low grade gold ore[J]. Mining and Metallurgy, 2024,33(2):225-233+270.

[4] 赵福财,王苹.某金矿浮选尾矿综合利用试验研究[J].黄金,2024(4):48-51.
Zhao Fucai, Wang Ping. Experimental study on comprehensive utilization technology of flotation tailings in a gold mine[J]. Gold,2024(4):48-51.

[5] 李杏茹,禚传源,赵祺彬,等.基于标准比较的我国绿色矿山建设国际化水平与质量提升[J].矿业研究与开发,2023,43(4):224-232.
Li Xingru, Zhuo Chuanyuan, Zhao Qibin, et al. Study on the internationalization level and quality improvement of China's green mine construction based on standards comparison[J]. Mining Research and Development,2023,43(4):224-232.

[6] 高扬.绿色矿山建设碳减排现状及创新路径探析[J].黄金,2025,46(8):99-103.
Gao Yang. Current status and innovative pathways of carbon emission reduction in green mine development[J]. Gold, 2025,46(8):99-103.

[7] 付建勋,贺茂坤,江国建,等.绿色无尾矿山优化充填技术与关键装备研究[J].中国矿山工程,2022,51(3):58-61.
Fu Jianxun, He Maokun, Jiang Guojian, et al. Study on optimization of filling technology and key equipment of green tailings-free mine[J]. China Mine Engineering,2022,51(3):58-61.

[8] Robinson B. Selecting the right tailings disposal solution: a case study: environmental[J]. Civil Eengineering,2008,16(8):31-34.

[9] 吴凯,马英强,王海龙,等.山东某金矿浮选尾矿工艺矿物学[J].矿产综合利用,2024,45(5):71-75.
Wu Kai, Ma Yingqiang, Wang Hailong, et al. Study on the process mineralogy for the flotation tailings of a gold mine in Shandong Province[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2024,45(5):71-75.

[10] 宋水祥,祁忠旭,李杰,等.某石英闪长岩型高泥低硫金矿选矿试验研究[J].矿业研究与开发,2024,44(8):230-236.
Song Shuixiang, Qi Zhongxu, Li Jie, et al. Experimental study on mineral processing of a high-mud and low-sulfur content gold mine in the form of a certain quartz diorite[J]. Mining Research and Development,2024,44(8):230-236.

[11] 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+186.
Chen Guang, Yang Kun, Chen Sizhu, et al. Study on separation of gold from tailings by combined floatation-gravity beneficiation flowsheet[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2022(2):131-134+186.

[12] Li Changyu, Nan Hua, Zhang Wenzhou. Research and application of foam filling material in soft rock roadways[J]. Applied Sciences,2025,15(2):520.

[13] 王洪忠.多金属铜矿无尾排放工艺研究[J].金属矿山,2010(1):75-80.
Wang Hongzhong. Study on zero tailing discharge technology of polymetallic copper mine[J]. Metal Mine,2010(1):75-80.

[14] 陈虎,沈卫国,单来,等.国内外铁尾矿排放及综合利用状况探讨[J].混凝土,2012(2):88-92.
Chen Hu, Shen Weiguo, Shan Lai, et al. Situation of discharge and comprehensive utilization of iron tailings domestic and abroad[J]. Concrete,2012(2):88-92.

[15] 胡亚桥,覃星朗,谢经鹏.基于新型胶凝材料的超细铜尾矿充填试验及应用[J].采矿技术,2021,21(4):163-165.
Hu Yaqiao, Qin Xinglang, Xie Jingpeng. Backfilling experiment and application of ultrafine copper tailings based on a novel cementitious material[J]. Mining Technology,2021,21(4):163-165.

[16] 李创起,祝鑫,赖伟,等.掺粗骨料膏体充填料浆输送性能与充填体强度优化研究[J].矿业研究与开发,2025,45(7):109-117.
Li Chuangqi, Zhu Xin, Lai Wei, et al. Study on transport performance of paste filling slurry with coarse aggregate and optimization of backfill strength[J]. Mining Research and Development,2025,45(7):109-117.

[17] 陈国辉,郑伯坤,石勇,等.柿竹园多金属矿尾砂高浓度连续充填工艺的关键参数研究及应用[J].矿业研究与开发,2025,45(8):61-69.
Chen Guohui, Zheng Bokun, Shi Yong, et al. Research and application on key parameters of high concentration continuous filling process for tailings in Shizhuyuan Polymetallic Mine[J]. Mining Research and Development,2025,45(8):61-69.