

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2020.03.009

内蒙古某金矿选冶工艺设计

王建文

(矿冶科技集团有限公司, 北京 100160)

摘 要: 内蒙古某金矿原矿品位 1.64 g/t, 金是唯一有价金属元素, 具有整体储量较大、矿石品位高低不同和矿石类型不同等特点。通过对原矿矿石性质、选矿试验进行分析, 发现选冶指标存在差异。为了保证矿山经济效益发挥到最大, 确定了对较高品位矿石采用全泥氰化工艺方案, 对较低品位矿石采用堆浸的工艺方案。对破碎系统、全泥氰化系统和堆浸系统的工艺流程分别进行了论述, 同时在保证设计指标和工艺参数的前提下, 合理的选择了高效节能的选冶设备, 并结合现场地形进行了设备优化配置。

关键词: 金矿; 选冶工艺设计; 全泥氰化; 堆浸; 设备选型

中图分类号: TD953 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-7854 (2020) 03-0045-04

Beneficiation and metallurgical process engineering of certain gold mine in Inner Mongolia

WANG Jian-wen

(BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China)

Abstract: ROM grade of certain Inner Mongolia Gold Mine is 1.64 g/t, and gold is the only valuable metal. The mine is featured with big reserve, diversified grades and different types of ores. Through analysis on ore properties and mineral processing test results, it was found that the processing and metallurgical indices vary in a great extent. To ensure the maximum economic benefit of the mine, a process to treat high-grade ores with all-slimes cyanidation technique and treat low-grade ores with heap leaching technique was adopted. This paper provided a general illustration on crushing system, all-slimes cyanidation system and heap leaching system of the mine, in addition, under the prerequisite to guarantee design indices and process parameters, also discussed selection of high-efficient and energy-conserving processing and metallurgical equipment as well as equipment configuration optimization as per site relief.

Key words: gold mine; beneficiation and metallurgical process engineering design; all-slimes cyanidation; heap leaching; equipment sizing

内蒙古某金矿是一座大型低品位原生矿床, 具有整体储量大、但大部分矿石品位低、极少部分矿石品位高的特点。为了实现矿山经济效益的最大化, 确定选冶设计规模为处理原矿 20 000 t/d, 包含全泥氰化厂和堆浸厂两个部分, 其中全泥氰化厂设计规模为 6 000 t/d, 堆浸厂设计规模为 14 000 t/d,

高品位矿石进入全泥氰化厂, 较低品位矿石进入堆浸厂, 工作制度为每年工作 300 d, 设计服务年限为 9 年。

设计破碎系统为三段一闭路破碎, 全泥氰化为两段闭路磨矿, 磨矿产品经浓密后浸出吸附, 载金炭经过酸洗、解吸、电积产出金泥, 金泥经过酸洗、干燥、熔炼后产出合质金锭; 堆浸为筑堆, 经滴淋浸出、载金炭吸附、解吸、电积、酸洗干燥、熔炼后产出合质金锭^[1-3]。

收稿日期: 2019-12-26

作者简介: 王建文, 硕士, 正高级工程师, 主要从事选冶设计及工程项目管理。E-mail: wang_jw@bgrimm.com

1 矿石性质

该金矿矿物种类和矿的物质组成均较简单。金属矿物主要以磁黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿为主，其次为毒砂、方铅矿、闪锌矿等。非金属矿物主要是石英、长石、少量方解石、黏土矿等。矿物质组成中的主要金属矿物为微细粒自然金，黄铁矿，次生褐铁矿、黄铜矿等，非金属矿物主要为石英、斜长石、角闪石、绿泥石、绿帘石、方解石、云母等^[3]。

矿石中主要的有用组分是金，金主要以金矿物形式产出，硫化物含少量金，脉石矿物几乎不含金。金矿物可分成自然金和银金矿两类。目前在各类型矿石中基本都能见到这两类矿物。金矿物在矿石中多呈不规则片状、他形粒状，偶尔也见四六面体或八面体半自形晶，粒径变化在 0.004 ~ 0.03 mm，多数小于 0.02 mm。金矿物多数为晶隙金和裂隙金，分布于脉石矿物之间或裂隙中，少数分布于磁黄铁矿等金属硫化物矿物边部。

对原矿进行了化学成分分析，结果见表 1。

表 1 矿石化学多元素分析结果
Table 1 Multi-element analysis result of ore

成份	Au ¹⁾	Ag ¹⁾	Cu	Pb	Zn	Fe	S	As	Sb	C	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃
含量	1.64	2.88	0.035	0.005	0.075	9.49	3.66	0.012	0.005	0.35	3.78	3.04	61.87	11.57

备注：1)单位为 g/t

由表 1 可知，矿石中的金为唯一有价元素，其他元素暂无回收价值，平均金品位 1.64 g/t，金属矿物以硫化矿为主，脉石矿物以石英、绢云母、绿泥石、长石为主。

2 主要设计指标

根据原矿品位和选矿试验结果及设计确定的工艺流程，确定的选冶主要设计指标见表 2。

表 2 主要设计指标
Table 2 Main design indexes

序号	名称	指标
1	原矿处理量/(万 t · a ⁻¹)	全泥氰化厂 180
		堆浸厂 420
2	原矿品位/(g · t ⁻¹)	全泥氰化厂 1.64
		堆浸厂 0.67
3	浸出时间/d	全泥氰化厂 1.5
		堆浸厂 120
4	浸出率/%	全泥氰化厂 85.00
		堆浸厂 56.00
5	吸附率/%	99.5
6	解吸率/%	99.5
7	熔炼率/%	99.9
8	总回收率/%	全泥氰化厂 83.98
		堆浸厂 55.33
9	产量/(kg · a ⁻¹)	全泥氰化厂 2 479
		堆浸厂 1 557

3 选冶工艺设计

3.1 破碎系统

3.1.1 工艺流程

采出的矿石(粒度 1 000~0 mm)经汽车运至粗

碎车间，经 2 台棒条振动给料机给入 2 台颚式破碎机粗碎，将粒度破碎到 350~0 mm 后由皮带运到中细碎筛分车间，卸入中碎缓冲矿仓。

经 2 台圆锥破碎机中碎后的矿石用皮带运至直线振动筛筛分，筛上及筛中产品进入细碎，筛下产品为合格成品。细碎采用 4 台圆锥破碎机，筛分采用 4 台直线振动筛，筛上产品返回细碎形成闭路，筛下产品为合格成品^[1]。

破碎成品粒度 12~0 mm 的颗粒经可逆皮带机分配，全泥氰化厂所用粉矿运往粉矿仓，堆浸厂所用粉矿用汽车运到堆浸装车矿仓。

3.1.2 主要设备选择

破碎系统设计能力为 20 000 t/d，粗碎设备可选用两台大型颚式破碎机或一台旋回破碎机，采用旋回破碎机的优点是排矿粒度小于颚式破碎机，但需要建一个大型粗矿堆场，采用颚式破碎机设备基建费用低。综合比较，设计选择两台 CJ815 颚式破碎机。

中细碎设备选择进口设备，相对于国产设备有工作效率高、耗电少、性能稳定、排矿粒度细粒级比例大、循环负荷小、故障率低、重量轻、维修方便、厂房面积小、土建投资相对低的特点。设计选择 CH860 中碎圆锥破碎机 2 台，CH865 细碎圆锥破碎机 4 台。

筛分设备选用 LF3060D 直线振动筛 2 台，用于检查筛分，LF3060S 直线振动筛 4 台，用于控制筛分^[4]。

3.2 全泥氰化系统

3.2.1 工艺流程

粉矿仓内的物料由带式输送机给至一段球磨

机，一段球磨机磨矿产品自流到一段分级的泵池，泵池的矿浆通过渣浆泵给入一段旋流器进行分级，一段旋流器底流给入一段球磨机，磨矿后的矿浆自流给入泵池形成一段闭路磨矿。一段分级溢流自流至二段分级的给矿泵池，泵池的矿浆通过渣浆泵给入二段旋流器进行二段分级，二段旋流器底流给入二段球磨机，磨矿后的矿浆自流给入二段分级的给矿泵池，形成二段闭路磨矿。二段分级溢流自流到直线振动筛进行除屑，除屑后的矿浆给至高效浓密机，高效浓密机底流泵送至浸出系统，通过两段预先浸出，七段浸出吸附后，浸出产出的载金炭由空气提升器提到直线振动筛进行脱水和冲洗，脱水后的载金炭由水力输送到解吸电积车间进行解吸和冶炼，得到最终产品合质金。

氰化浸出渣自流至直线安全筛，筛上粉炭集中统一处理，筛下浸渣泵送至浸渣浓密机进行浓缩。浓密机溢流水返回流程，底流通过渣浆泵泵至搅拌槽。破氰后的浸出渣由泵送至尾矿压滤车间的搅拌槽。压滤后的尾矿由带式输送机送入尾矿库堆存^[5-6]。

全泥氰化原则工艺流程详见图1所示。

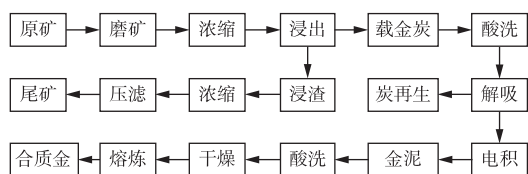


图1 全泥氰化原则工艺流程图

Fig.1 The principle flowsheet of all-slime cyanidation

3.2.2 主要设备选择

全泥氰化厂设计能力为6 000 t/d，根据原有氰化厂的处理能力，磨矿系统的一段磨矿选取MQG5064格子型球磨机1台，一段分级选用 $\Phi 500 \times 8$ 水力旋流器1组，5工3备，二段磨矿选取MQY5064溢流型球磨机1台，二段分级选用 $\Phi 350 \times 14$ 水力旋流器1组，10工4备。

浸出前旋流器溢流进入浓缩作业以保证浸出吸附浓度。根据试验数据，参考原有氰化厂使用的浓密机处理能力，浸出前浓缩及浸出渣浓缩各选用1台NXZ-38高效浓密机。

浸出吸附设备设计选择 $\Phi 15.0 \text{ m} \times 16.0 \text{ m}$ 浸出槽9台，其中2台为预先浸出槽，7台为浸出吸附槽。

尾矿中含有大量氰根，为降低尾矿库库容，减

少尾矿库占地面积，尾矿采用压滤干堆。浸出渣压滤采用板框压滤机。设计针对康明克斯板框压滤机和景津板框压滤机进行了方案比较。

方案Ⅰ：康明克斯 APN18SL80M 压滤机 6 台

方案Ⅱ：景津 HMZG800/2000-U 压滤机 12 台

两个方案均可满足设计要求，方案Ⅰ的优势在于：1) 厂房占地面积小，厂房投资相对于方案Ⅱ可节省 189 万元；2) 电耗较少，总装机功率为 222 kW，装机功率较之方案Ⅱ可减少 1 518 kW，如果电费按 0.6 元/度，电耗系数按 0.65 计算，每年可节省电费约 468 万元；3) 压滤机配 2 台隔膜泵，可以实现快速给料，提高效率，同时隔膜泵不需要高压密封水，可节省水耗和电耗。方案Ⅱ的优势在于一次性投资费用比方案Ⅰ低 70 万元。

综合比较，浸出渣压滤设备推荐选用 7 台康明克斯 APN18SL40M 板框压滤机。

解吸电积设备处理能力为 4 t/d，分别选用 $\Phi 1\,300 \times 7\,490$ 解吸柱 1 台， $\Phi 2\,000 \times 2\,600$ 电积槽 1 台及 $\Phi 900 \times 1\,700$ 电加热器 1 台。

3.3 堆浸系统

3.3.1 工艺流程

堆浸粉矿采用汽车运到堆浸场进行筑堆。筑堆按单元堆场分期、分批筑堆，每次堆高为 8 m，最终堆高 64 m。筑堆后的矿石采用滴淋浸出工艺，浸出流程按单元堆场分期分批浸出，浸出时间为 120 d。

浸出贵液直接流到处理车间的贵液池，经活性炭吸附回收金银后的贫液添加氰化钠后返回到浸出单元堆场滴淋浸出，整个浸出液组成一个循环闭路，含氰污水不外排，不会对环境造成污染。

堆浸场贵液自流到贵液池用泵扬送到吸附槽进行活性炭吸附。吸附槽内的载金炭经水力输送至冶炼车间进行解吸、电积。解吸、电积出来的金泥先经过酸洗除杂、再过滤、干燥、取样化验后，配上一定的熔剂(硼砂+硝酸钾)后进入中频炉进行熔炼，产品为合质金。

炭再生采用较成熟的火法再生工艺。解吸后的贫炭水力输送至高位贮炭槽，再均匀的给入电热式炭再生窑进行火法再生，再生后的高温活性炭先进入水淬槽进行水淬，之后再进入直线振动筛进行筛分，筛上炭输送至再生炭储槽，返回流程循环使用，筛下炭集中回收处理^[7-8]。

堆浸浸出原则工艺流程详见图2。

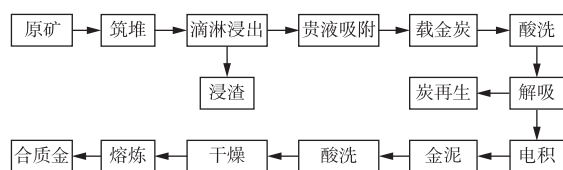


图2 堆浸原则工艺流程图

Fig. 2 The principle flowsheet of heap leaching

3.3.2 主要设备选择

堆浸场总占地面积约为 62 万 m^2 ，长 850 m，宽 730 m。整个堆浸场形成北高南低，东西两侧高于中部的地形，自北向南纵向坡度约 1%，横向坡度约 0.5%。每层堆高为 8 m，共分 8 层，高度为 64 m。矿石的堆积自然安息角为 37° ，矿堆最终堆积边坡比为 1:3。

贵液池长 150 m、宽 110 m、深 10 m，坡比为 1:3，并具有 0.6 m 的干舷距离。贵液池内部填充矿石约 89 000 m^3 。矿石孔隙率取为 0.33，贵液池溶液容纳能力约 29 000 m^3 ，贮存时间 19 h。贫液池几何尺寸为 36 m $\times$ 30 m $\times$ 6.5 m，容积为 7 600 m^3 ，贮存时间 5 h。

筑堆后的矿石采用滴淋浸出工艺，浸出流程按单元堆场分期、分批浸出。在正常堆浸工作中，浸出单元堆 2~3 个，浸出时间为 120 d。浸出贵液直接流到处理车间的贵液池，再经吸附槽进行吸附。设计选择 $\Phi 4\,500 \times 5\,400$ 吸附槽 18 台。

解吸、电积设计成 2 个系列，每个系列的处理能力为 4 t/d，其设备选择同全泥氰化厂设备。

炭再生设备选择 TZY1000 电热式炭再生窑 1 台，处理全泥氰化厂和堆浸厂经过解吸后的贫炭。

4 结论

1) 内蒙古某金矿平均金品位 1.64 g/t，金为唯一有价元素，物质组成较简单，主要金属矿物为微细粒自然金、黄铁矿、次生褐铁矿、黄铜矿等，非金属矿物主要为石英、斜长石、角闪石、绿泥石、绿帘石、方解石、云母等。矿石工艺类型为中硫化物含金矿石。

2) 根据地质资源量、矿体赋存情况，以及尚有未勘探但有可观前景的资源量情况，为了实现矿山经济效益的最大化，对较高品位矿石采用全泥氰化工艺方案，较低品位矿石采用堆浸工艺方案。

3) 在保证设计指标和工艺参数的前提下，选择大型、高效节能、安全环保、维修简单的选冶设备，并结合现场地形进行了设备优化配置，设计比较合理、可行。

参考文献

- [1] 冯守本. 选冶厂设计 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005: 91.
FENG S B. Engineering design of mineral processing plant [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 91.
- [2] 《选矿设计手册》编委会. 选矿设计手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005: 94-112.
Editorial Board of Mineral Processing Design Handbook. Mineral processing design handbook [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 94-112.
- [3] 李剑铭, 刘万峰. 内蒙巴彦哈尔金矿选矿厂设计与生产实践 [J]. 有色金属工程, 2017, 7(6): 95-99.
LI J M, LIU W F. Design and production practice of Inner Mongolia Bayanhar Gold Concentrator [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2017, 7(6): 95-99.
- [4] 《中国选矿设备手册》编委会. 中国选矿设备手册 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 566-570.
Editorial Board of China Mineral Processing Equipment Handbook. China mineral processing equipment handbook [M]. Beijing: Science Press, 2006: 566-570.
- [5] 张永涛. 中国黄金工业发展现状与未来展望 [J]. 黄金, 2011, 32(6): 1-5.
ZHANG Y T. Development status and future prospect of China's gold industry [J]. Gold, 2011, 32(6): 1-5.
- [6] 李俊平. 黄金选矿的技术现状及发展趋势 [J]. 矿业工程, 2012, 10(1): 26-28.
LI J P. Recent state and development trend of gold ore beneficiation [J]. Mining Engineering, 2012, 10(1): 26-28.
- [7] 明平田, 周学其. 某难处理金矿选矿厂扩能改造及实践 [J]. 黄金, 2017, 38(3): 54-58.
MING P T, ZHOU X Q. Renovation of capacity increasing for a refractory gold ore dressing plant and its practice [J]. Gold, 2017, 38(3): 54-58.
- [8] 周光浪. 黄金堆浸工艺的设计与应用 [J]. 世界有色金属, 2017, 38(20): 73-75.
ZHOU G L. Design and application of heap leaching process of gold [J]. World Nonferrous Metals, 2017(20): 73-75.

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2020.03.010

典型伟晶岩锂矿石选别性能及价值分析

杜玉艳 张俊杰 李仕亮 马洪志

(矿冶科技集团有限公司, 北京 100160)

摘 要: 非洲某典型伟晶岩型锂矿石有用组分 Li_2O 以不同的锂矿物形式存在。通过深入分析研究矿石性质、特点及选矿试验结果, 科学判断矿石的选别性能, 确定合理的选矿设计指标, 从而对矿石资源的价值进行客观的评价。针对境外资源, 需要回答其是否值得收购、外方提供的数据是否可靠等重大问题。对资源品质做出正确判断并做出客观的经济评价至关重要, 它可为投资主体确定投资机会及风险管控提供重要的决策依据。

关键词: 锂矿石; 选别性能; 价值

中图分类号: TD923 文献标志码: A 文章编号: 1005-7854 (2020) 03-0049-05

Analysis on separability and value of typical pegmatite lithium ores

DU Yu-yan ZHANG Jun-jie LI Shi-liang MA Hong-zhi

(BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China)

Abstract: In a typical pegmatite type lithium ore in Africa, the useful component Li_2O exists in different forms of lithium minerals. Through in-depth analysis of ore properties, characteristics and ore dressing test results, scientific judgment of ore separability, to determine a reasonable ore dressing design index, so as to objectively evaluate the value of ore resources. As for overseas resources, there are such key questions needed to be answered as whether they are worth purchasing and whether the data provided by foreign parties are reliable. It is very important to make a correct judgment on the quality of resources and make an objective economic evaluation, which provides an important decision-making basis for investors to determine investment opportunities and control risks.

Key words: lithium ore; separability; value

锂是自然界中最轻的金属, 电池行业已经成为锂最大的消费领域。玻璃和陶瓷行业是锂的第二大消费领域。

全球的锂资源分布不均, 主要分布在智利、中国、阿根廷、澳大利亚、葡萄牙、巴西、美国、津巴布韦等国^[1]。锂矿资源可分为卤水锂和矿石锂两种类型, 主要赋存于盐湖卤水和花岗伟晶岩矿床中。其中, 盐湖卤水锂占世界锂储量的 66% 和储量基础的 80% 以上, 其他为矿石锂^[2]。

本文以位于非洲的某典型花岗伟晶岩型锂矿石

为研究对象, 在对其化学成分、矿物组成和主要矿物解离度等特点分析的基础上, 深入分析该矿石的可选别性能, 并确定可能达到的最佳选别指标。此外, 按项目建设规模进行了价值分析和经济评估。分析结果可为投资主体确定投资机会及风险管控提供重要的决策依据。

1 矿石性质

矿石密度 2.64 t/m^3 、堆密度: 1.6 t/m^3 、自然安息角 38° 、磨蚀指数: 0.6、邦德棒磨功指数 $17.4 \text{ kW}\cdot\text{h/t}$ 、邦德球磨功指数 $16 \text{ kW}\cdot\text{h/t}$ 。

矿区含锂矿化伟晶岩体内部呈条带状构造, 从边部到中心其结构构造、矿化特征等呈有规律的带状排列。矿区典型伟晶岩矿石化学成分中 Li 含量

收稿日期: 2020-02-21

第一作者: 杜玉艳, 正高级工程师, 主要从事矿山资源开发、矿物加工咨询与设计。E-mail: duyuyan@bgrimm.com

较高, Cs、Nb、Sn 和 Be 的含量很低, Ta 含量中等, Fe_2O_3 平均含量为 1%。矿石主要化学元素分析结果如表 1 所示。各矿层锂矿石 XRD 矿物学分析结果见表 2。矿石中锂矿物的分配率见表 3。

对破碎粒度 P100 (100% 通过, 下同) 为 5.6 mm 的矿石进行粒度筛析, 结果表明, 锂在破碎产品的各粒级中的分布比较均匀。

表 1 锂矿石主要化学组分分析结果

Table 1 Analysis results of main chemical composite in lithium ores /%

成分	含量
Li_2O	1.656
Fe_2O_3	0.784
Al_2O_3	15.01
SiO_2	75.51
Ta_2O_5	0.012

表 2 各矿层锂矿石的 XRD 矿物学分析结果

Table 2 XRD analysis results of the lithium ores

相别	含量/%
石英	39
锂辉石	17
透锂长石	13
透长石	9
钙长石	7
钠长石	7
白云母	5
锂霞石	4
插晶菱沸石	痕量

表 3 矿石中锂矿物的分配率

Table 3 Distribution of the lithium in ore /%

	矿物中理论 Li_2O 含量	矿石中 矿物含量	Li_2O 含量	Li_2O 分配率
锂辉石	8.03	17	1.37	55.47
透锂长石	4.88	13	0.63	25.51
锂霞石	11.86	4	0.47	19.02
合计		34	2.47	100.0

由表 2 可知, 该伟晶岩锂矿石主要由石英、钠长石、锂辉石、锂云母、透锂长石、磷锰锂矿、微斜长石和一定量的白云母 (1%~5%) 组成。

由表 2~3 可知, 矿石中有益组分锂的矿物有三种: 锂辉石、透锂长石和锂霞石。根据三种锂矿物理论氧化锂含量和矿石中各矿物含量^[3]可推测该矿石中有益组分氧化锂 (Li_2O) 含量合计达 2.47%。

由于锂霞石是锂辉石蚀变的产物^[3], 不再单独论述。通过对岩心样品的 XRD 分析发现, 各矿带锂辉石和透锂长石含量之间的比值不同。

由于锂矿石锂矿物含量不同、赋存状态不同, 其可选性能也不同。因此, 需要特别注意的是, 锂矿石半定量 XRD 矿物学分析能较好地提供矿石中各矿物含量的相对比例关系, 但有用组分的实际含量还需采用矿石化学元素分析结果。特别是矿石中有益组分以多种矿物形式存在时, 上述两项分析结果同等重要。

在矿石破碎粒度—2 mm 时, 锂辉石和透锂长石基本上能够完全解离。—2mm 可以作为重介质选矿的给矿粒度, 磨矿细度 P80 (80% 通过, 下同) 为 0.18 mm 可作为后续浮选试验的最大粒度。

从对该矿石理化指标的分析结果可以推测, 该矿石属于典型花岗伟晶岩型锂矿石, 硬度大、质地脆, 且具有一定的磨蚀性。

矿石中 Li_2O 矿物主要以锂辉石和透锂长石的形式存在, 其赋存比例在整个矿床中有变化。矿石中伴生 Ta_2O_5 品位 ~120 g/t, 主要以钽铁矿形式存在, 有害杂质 Fe_2O_3 平均含量为 1%, 但不稳定, 与主要含锂矿物无直接关系, 可能与角闪石、石榴石和铁锂云母含量有关, 或者与岩体侵入期间的混染有关。

2 矿石选别性能研究与分析评价

2.1 矿石可选性试验研究

针对该矿矿石性质特点, 试验采用了重介质选矿、高梯度强磁选和浮选联合选别工艺。

将矿石破碎至 P100 为—2 mm, 分级出—2 mm+0.5 mm, 采用密度为 2.95 t/m³ 和 2.40 t/m³ 的重介质进行 DMS 试验。密度为 2.95 t/m³ 重介质用于锂辉石的选别, 密度为 2.40 t/m³ 重介质用于透锂长石的选别。重介质选矿的中矿及—0.5 mm 粒级部分细磨至 P80—0.18 mm 给入高梯度磁选, 选出磁性含钽产品和非磁性产品, 非磁性部分脱除 0.015 mm 细泥, 进入浮选流程。

试验流程如图 1 所示, 试验结果见表 4。

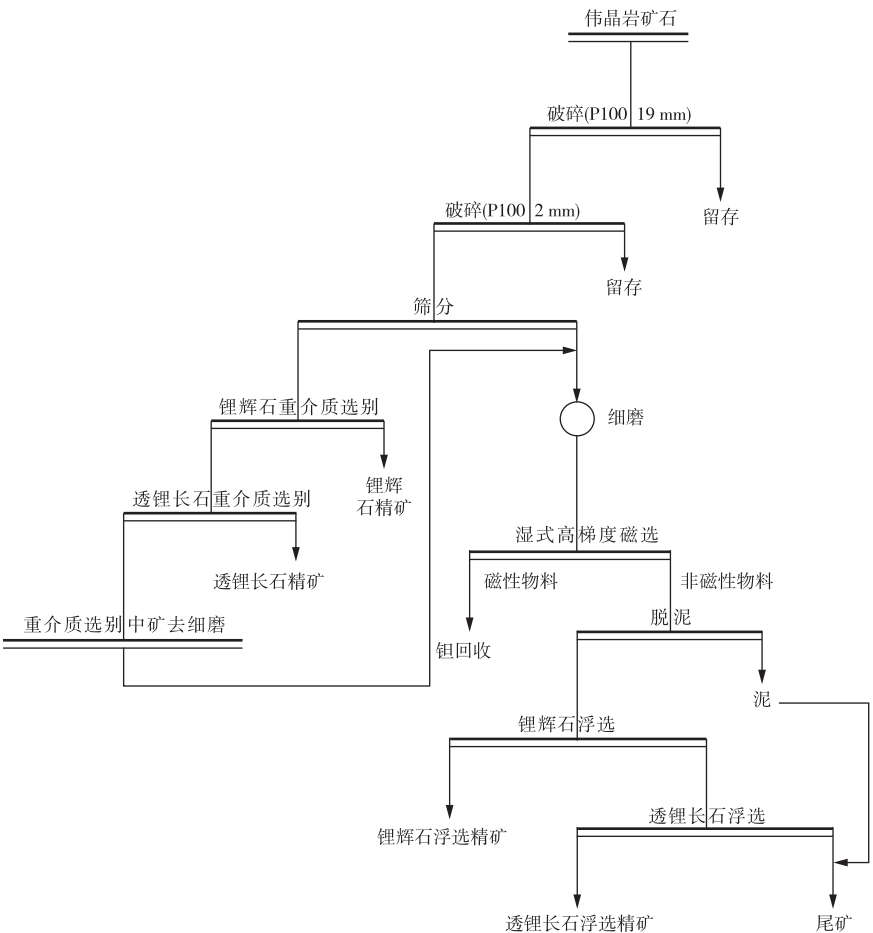


图 1 试验原则工艺流程

Fig. 1 Principle flowsheet of the test

表 4 选矿试验结果 (NAGROM) (P100—2 mm)

Table 4 Ore dressing test results(NAGROM) (P100—2 mm) /%

选别作业及产品名称	产率	品位			基于给矿的回收率		
		Li ₂ O	Fe ₂ O ₃	Ta ₂ O ₅	Li ₂ O	Fe ₂ O ₃	Ta ₂ O ₅
给矿	100.0	1.593	0.378	0.013	100	100	100
重介质选矿锂辉石精矿	2.72	5.026	0.229	0.011	8.58	1.64	2.30
重介质选矿透锂长石产品	2.25	4.169	0.085	0.003	5.88	0.50	0.52
脱泥溢流产品(泥尾矿)	1.61	1.148	1.442	0.014	1.16	6.15	1.74
锂辉石浮选—精选精矿	13.62	5.739	0.356	0.001	49.08	12.82	0.69
锂辉石浮选尾矿	67.67	0.580	0.068	0.0	24.64	12.16	0.00
磁性物料摇床精矿+中矿	0.29	2.224	11.056	1.271	0.40	8.41	28.14
磁性物料摇床尾矿	4.84	1.702	5.030	0.080	5.17	64.28	29.76
锂精矿总计	18.59	5.445	0.305	0.002	63.54	14.97	3.50
磁性物料(WHIMS)总计	0.29	2.224	11.056	1.271	0.40	8.41	28.14
尾矿总计	81.12	0.608	0.385	0.005	36.06	76.62	68.35

2.2 选别性能分析与评价

理论上，凡是具有工业价值的锂矿物都可以用浮选法来富集^[4-6]，锂辉石精矿理论最高品位 8.03%，透锂长石精矿理论最高品位 4.88%^[3]。

从表 4 数据可知，重介质选别工艺能够产出 Li₂O 品位 5.026%、回收率 8.58%、产率 2.72 %

的锂辉石精矿和 Li₂O 品位 4.169%、回收率 5.88%、产率 2.25 % 的透锂长石精矿。浮选可产出 Li₂O 品位 5.739%、回收率 49.08%、产率 13.62 % 的锂辉石精矿(包括锂霞石)，但透锂长石的浮选回收效果很差，钽的回收效果也不理想。锂精矿总计：可达 Li₂O 品位 5.445%、回收率 63.54%、产率 18.59 %。其中，锂辉石精矿 Li₂O

品位 5.62%、回收率 57.66%、产率 16.34%；透锂长石精矿 Li_2O 品位 4.169%、回收率 5.88%、产率 2.25%。两种矿物的选矿回收率相差较大，透锂长石矿物本身 Li_2O 含量就低，选矿回收率又低至 6% 以下，因此资源价值主要为矿石中的锂辉石。锂辉石相对较易回收，无论是采用重介质选矿还是浮选工艺。精矿中铁杂质的出现影响锂精矿的质量，还需要继续探索研究降铁的可能。

从矿石的物理特性来看，工艺设计即使需要考虑伟晶岩矿石的磨蚀特性，但仍然可以采用传统的破碎流程。

矿石中 Li_2O 矿物主要以锂辉石和透锂长石的形式存在，二者比例在整个矿床中有波动。采用 DMS 重介质选矿工艺 Li_2O 回收率不高于 20%，因此，对 DMS 尾矿进行螺旋选矿和浮选是必要的。选厂工艺设计需考虑产品产量与矿石工艺矿物学特性的关系，尽量提高工艺流程的灵活性和适应性。

从目前的试验结果来看，矿石中 Ta_2O_5 回收效果不理想，还需要进行更深入的研究。

3 矿石价值分析

根据上述矿石可选性试验结果，选厂设计最终产品将为锂辉石重选精矿、锂辉石浮选精矿和透锂长石重选精矿。选矿工艺流程采用三段一闭路破碎，一段棒磨、两段重介质选别，产出锂辉石重选精矿和透锂长石重选精矿，重选尾矿经球磨、磁选除铁、浮选产出锂辉石精矿。

按照矿床资源总储量，项目建设规模确定为 120 万 t/a (4 000 t/d)，选矿达产年平均设计指标及产品产量见表 5。

表 5 选矿设计指标

Table 5 Beneficiation average design targets

产品名称	产率/%	Li_2O		年产量/ 万 t
		品位/%	回收率/%	
锂辉石重选精矿	1.79	5	6.66	2.15
透锂长石重选精矿	3.16	4	9.38	3.80
锂辉石浮选精矿	9.80	5.2	37.76	11.76
尾矿	85.24	0.73	46.20	102.29
原矿	100.0	1.35	100.0	120

经测算，项目总投资为 10 747 万元，年均销售收入 9 952 万美元，年均总成本费用 7 801 万美元，项目年平均利润总额为 1 876 万美元，投资利润率为 17.45%。项目税后全投资财务内部收益率为 21.87%，高于财务基准收益率，在 10% 的折现率水

平下，项目全投资财务净现值为 6 868 万美元，项目全投资回收期（含建设期）为 5.68 年，项目有一定的盈利能力和投资回收能力。

其中，锂辉石和透锂长石的计价模式，锂辉石（品位 > 5%，在 6% 品位基础上，每下降 0.1% 品位，价格降低 15 美元）价格为 615 \$/t；透锂长石（品位 > 4%）价格为 458 \$/t。另外，通过单因素敏感性分析可知，项目主要经济评价指标对产品价格和经营成本的变化最敏感。

4 结论

1) 非洲某典型花岗伟晶岩型锂矿石，硬度大、质地脆，且具有一定的磨蚀性。预测矿石在破碎过程中可能会产生大量粉矿，并且变化范围可高达 10%，选厂破碎和磨矿工序的设计需考虑矿石这一特性。

2) 矿石中 Li_2O 矿物主要以锂辉石和透锂长石形式存在，其赋存比例在整个矿床中有波动。其中，矿石中的锂辉石无论是采用 DMS 重介质选矿还是浮选工艺，相对均较易回收；透锂长石可通过重介质选矿回收一部分，但采用浮选工艺选别效果较差。采用 DMS 重介质选矿工艺 Li_2O 回收率不高于 20%，因此，对 DMS 尾矿进行螺旋选矿和浮选是必要的。选厂工艺设计需考虑产品产量与矿石工艺矿物学特性的关系，尽量提高工艺流程的灵活性和适应性。

3) 矿石中的钽主要以钽铁矿形式存在，含 $\text{Ta}_2\text{O}_5 \sim 120$ g/t。从目前开展的试验结果来看，伴生的钽资源回收效果不理想，还需要进行更深入的研究。

4) 在确定的建设规模及当地建设条件下，通过投资估算、成本与费用估算、损益计算，可知该锂矿石资源具有一定的盈利能力和投资回收能力，资源价值体现主要以锂辉石为主，透锂长石为辅，钽铁矿暂未考虑其价值，只能作为潜在有价组分。通过单因素敏感性分析可知，项目主要经济评价指标对产品价格和经营成本的变化最敏感，投资主体需高度重视投资时机及风险管控。

参考文献

- [1] 郑绵平, 刘喜方. 中国的锂资源[J]. 新材料产业, 2007(8):13-16.
ZHENG M P, LIU X F. China's lithium resources[J]. Advanced Materials Industry, 2007(8):13-16.

(下转第 97 页)

4 自动化改造后的优点

与原银铟下线流程相比, 自动化改造后的银铟自动打码堆垛系统主要有以下优点:

1)降低员工的劳动强度, 保障员工的职业健康, 同时解放劳动力, 减少相应的劳务支出, 从而提升企业的利润效益;

2)通过自动化生产线的建立, 大幅提高了工作效率;

3)实现贵金属现场少人化和无人化作业, 有利于企业的贵金属安防管理。

5 结论

从全球范围看, 工业自动化、智能化系统是受益于未来发展的新兴方向, 拥有提高效率、节省人力成本、节能降耗、促进产业升级等明显效果。从国内来看, 工业自动化、智能化系统行业由国家法规政策的大力支持, 拥有庞大多元化的市场需求。银铟浇铸为自动化生产过程, 而银铟下线后的工艺为人工作业方式, 由于标准浇铸银铟较重, 工人劳动强度大, 且工作效率低, 同时由于银铟为贵重金属, 现场安防管理难度大。对其进行自动化改造后, 可以减轻工人的劳动强度, 提高工作效率, 实现贵金属现场少人化和无人化作业, 有利于企业的贵金属安防管理, 实现减员增效。同时对银铟自动

打码堆垛系统的改造设计与应用实践, 也进一步提高了企业的自动化生产水平, 为智能制造的发展做出贡献。

参考文献

- [1] 杜新玲, 刑相栋. 贵金属冶金技术 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2012.
DU X L, XING X D. Metallurgical technology of precious metals [M]. Changsha: Central South University Press, 2012.
 - [2] 李明照. 铜冶炼工艺 [M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2012.
LI M Z. Copper smelting process [M]. 2nd Edition. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.
 - [3] 徐科, 周鹏. 金属表面质量在线检测技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2016.
XU K, ZHOU P. Metal surface quality online testing technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2016.
 - [4] 刘小波. 工业机器人技术基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
LIU X B. Technical basis of industrial robots [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2017.
 - [5] 马志敏. 工业机器人技术及应用(KUKA)项目化教程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2017.
MA Z M. Industrial robot technology and application (KUKA) project-based course [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2017.
-
- (上接第 52 页)
- [2] 程仁举, 李成秀, 刘星, 等. 四川某锂多金属矿石选矿试验 [J]. 金属矿山, 2017 (9): 111-114.
CHENG R J, LI C X, LIU X, et al. Beneficiation test of lithium polymetallic ore in Sichuan province [J]. Metal Mine, 2017 (9): 111-114.
 - [3] 张巍. 锂霞石应用研究综述 [J]. 矿物学报, 2016, 36 (1): 80-90.
ZHANG W. A review of the application of eucryptite [J]. Journal of Minerals, 2016, 36 (1): 80-90.
 - [4] 谢贞付, 王毓华, 于福顺, 等. 伟晶岩型锂辉石矿浮选研究综述 [J]. 稀有金属, 2013, 37 (4): 641-649.
XIE Z F, WANG Y H, YU F S, et al. Reviews of flotation research on pegmatite spodumene ores [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2013, 37 (4): 641-649.
 - [5] 杨磊. 四川甲基卡地区锂辉石选矿工艺试验研究 [J]. 有色金属(选矿部分), 2014 (1): 30-34.
YANG L. Research on the mineral processing of spodumene of Jiajika area of Sichuan [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2014 (1): 30-34.
 - [6] 陈胜虎, 罗仙平, 杨备, 等. 锂辉石的选矿工艺研究现状及展望 [J]. 现代矿业, 2010, 26 (7): 5-7, 128.
CHEN S H, LUO X P, YANG B, et al. Research situation and prospect of beneficiation technology of spodumene [J]. Modern Mining, 2010, 26 (7): 5-7, 128.