

硅矿采矿工艺优化与资源综合利用效率提升

李 科

驰幸矿业（大关）有限公司 云南昭通 657400

摘 要：硅矿作为工业领域不可或缺的基础原料，其开采工艺科学性与资源利用效率直接影响相关产业发展质量。本文结合硅矿资源特性与赋存状态实际情况，系统评估现有采矿工艺技术应用成效，剖析采掘、运输及破碎等环节存在的资源浪费问题与效率瓶颈。从地质适配性、智能化应用、低品位矿开采及绿色生产角度，提出采矿工艺优化路径，同时围绕伴生资源回收、副产物高值化及循环经济模式，构建资源综合利用效率提升策略，为硅矿开采行业实现提质增效与可持续发展提供实践参考。

关键词：硅矿；采矿工艺优化；资源综合利用；绿色开采；智能化采矿

引言

硅元素在电子信息、建材、光伏等产业中的应用需求持续攀升，带动硅矿开采规模不断扩大。当前部分硅矿开采区域存在工艺选择与地质条件不匹配、资源分选精度不足等问题，不仅造成低品位矿与伴生资源浪费，还引发生态环境压力。传统采矿模式下，重产量轻效率、重开采轻利用的倾向，导致硅矿资源综合利用率长期处于较低水平。基于此，立足硅矿资源实际赋存特征，优化采矿工艺体系，挖掘资源综合利用潜力，成为推动硅矿开采行业转型升级的关键所在，对保障工业原料稳定供应与生态保护协同发展具有重要现实意义。

一、硅矿资源特性与赋存状态分析

（一）硅矿类型与矿物学特征

工业常用硅矿以石英砂矿和脉石英矿为主，石英砂矿多呈松散或半胶结状产出，矿物组成以石英为主，含少量长石、云母及黏土矿物，颗粒形态从棱角状到圆球状不等，表面常附着铁氧化物薄膜。脉石英矿则呈致密块状，石英含量普遍超过95%，结晶程度高，硬度可达莫氏7级，断口呈贝壳状，抗磨损与抗化学腐蚀性较强。不同类型硅矿的矿物结构差异明显，石英砂矿因颗粒分散性好，更易通过物理分选提纯，脉石英矿则需针对性破碎处理以释放有用矿物，这些特征直接决定后续采矿工艺的技术方向。

（二）主要硅矿床地质特征与分布规律

我国硅矿资源分布呈现“南多北少、东丰西欠”的格局，石英砂矿多集中于沿海及内陆湖泊沉积区域，这

类矿床受古地理环境影响，矿体延伸范围广，厚度从数米到数十米不等，产状平缓，埋藏深度较浅，部分区域可直接露天开采。脉石英矿则多与岩浆活动相关，常分布于花岗岩体边缘或断裂构造带附近，矿体形态以脉状、透镜状为主，走向稳定但厚度变化较大，埋藏深度差异显著，部分深部矿体需通过地下硐室开采。地质构造的复杂性直接导致同一区域硅矿矿体连续性存在差异，给采矿规划带来不小挑战。

（三）硅矿品位、杂质组成及其对选冶的影响

硅矿品位通常以二氧化硅含量为核心指标，光伏级硅原料要求二氧化硅含量不低于99.99%，普通建材用硅矿则可放宽至85%以上。多数硅矿中存在的铁、铝、钙等杂质，以氧化物或硅酸盐形式存在，铁杂质会降低硅制品白度与透光性，铝杂质则会影响熔融态硅的流动性。在选冶过程中，高品位硅矿可简化分选流程，直接进入破碎研磨环节，低品位硅矿则需增加磁选、浮选等除杂工序，不仅延长生产周期，还会提升单位产品能耗。杂质分布的不均匀性也会导致同一矿体不同区域开采出的矿石需采用差异化处理方案，增加工艺控制难度。

二、现有硅矿采矿工艺技术评估

（一）常用采矿方法（露天/地下）及其适用条件

露天采矿法在硅矿开采中应用占比超过70%，适用于埋藏深度小于30米、矿体厚度大且产状平缓的石英砂矿与浅表脉石英矿，通过剥离地表覆盖层后，采用挖掘机配合装载机进行铲装作业，作业空间开阔，设备移动便捷，矿石回采率可达85%以上。地下采矿法则多用于埋藏深度超过50米或地表有重要构筑物的脉石英矿，常

用空场法与充填法，需构建巷道与采场支护体系，作业安全性要求高，回采率通常在75%左右，当矿体厚度小于5米时，地下开采的巷道掘进成本会显著上升，经济性随之下降。两种方法的选择需严格匹配矿体赋存深度与形态特征，盲目套用易引发资源浪费。

(二) 采掘、运输与破碎环节技术现状

采掘环节中，大型露天矿多采用斗容5-10立方米的液压挖掘机，配合30-60吨级矿用卡车运输，部分小型矿山仍使用小型装载机与农用车辆，装卸效率低下且易造成矿石撒漏。地下矿采掘依赖凿岩台车与耙斗式装载机，掘进速度普遍在每月80-120米，难以满足大规模生产需求。破碎环节常用颚式破碎机进行粗碎，圆锥破碎机中碎，最终将矿石粒度控制在20毫米以下，但部分生产线缺乏预先筛分环节，大块废石进入破碎系统后，不仅增加设备磨损，还会降低破碎效率。运输与破碎设备的衔接协调性不足，常出现采掘设备等待运输或破碎机闲置的情况。

(三) 工艺流程中存在的资源浪费与效率瓶颈

多数矿山采用“一刀切”的开采模式，未对矿体不同品位区域进行分区开采，将低品位矿石与废石一同丢弃，部分矿区低品位硅矿占比超过30%，却因缺乏经济开采技术而长期闲置。分选环节仅依靠简单人工拣选或磁选，难以有效分离石英与伴生的长石、云母等矿物，导致有用组分流失。破碎过程中过度粉碎现象突出，细粒级硅矿随尾矿排放，资源回收率不足60%。效率瓶颈集中体现在设备自动化程度低，需大量人工干预操作，设备故障排查依赖经验判断，停机维修时间占比可达生产总时间的15%-20%，严重影响连续生产效率。

(四) 技术经济与环境影响综合评价

传统采矿工艺的单位矿石开采成本在80-150元/吨，低品位矿丢弃与设备低效运行导致吨矿利润空间压缩，部分小型矿山因成本过高面临停产风险。环境影响方面，露天开采形成的采空区易引发水土流失，地下开采产生的废石堆积占用土地资源，平均每开采1万吨硅矿会产生3000-5000吨废石与尾矿。破碎环节产生的粉尘无组织排放，对周边空气质量造成影响，多数矿山虽配备除尘设备，但运行维护不到位，环保达标率偏低，环保处罚成本已成为矿山运营不可忽视的支出项。

三、硅矿采矿工艺优化路径研究

(一) 基于地质条件的采矿方法优化选择

通过高精度地质勘察确定矿体边界与品位分布，采

用无人机航测与三维地质建模技术，构建矿体数字化模型，直观呈现矿体产状与厚度变化。对缓倾斜、埋藏浅的厚大矿体，采用露天台阶式开采，将台阶高度从传统的10米调整为6-8米，减少矿石崩落时的混杂程度；对深部薄矿体，采用分段空场法替代全面法，缩小采场尺寸至8-10米，配合锚网支护提升回采安全性与资源回收率。针对矿体边界模糊区域，采用探采结合模式，边勘察边开采，避免盲目掘进造成的资源浪费。

(二) 智能化与自动化技术在采矿中的应用

在采掘环节引入无人采矿设备，露天矿采用无人驾驶挖掘机与自卸卡车，通过卫星定位与智能调度系统实现协同作业，减少人工操作误差，提升运输效率20%以上。地下矿安装自动化凿岩台车与远程操控铲运机，操作人员在地面控制室即可完成采掘作业，降低井下作业风险。破碎系统配备智能传感设备，实时监测矿石粒度与流量，通过PLC控制系统自动调节破碎机参数，避免过度粉碎，细粒级硅矿回收率提升至85%。建立采矿设备状态监测平台，通过大数据分析预测设备故障，将维修响应时间缩短至2小时以内。

表1 智能化与传统采矿工艺关键指标

工艺类型	人工需求量 (人/千吨)	设备故障率 (%)	细粒级回收率 (%)	吨矿能耗 (kWh/吨)	生产连续性 (%)
传统采矿工艺	8-12	5.2-7.8	55-62	35-42	75-80
智能化采矿工艺	2-3	1.1-2.3	82-88	22-28	92-95

(三) 低品位硅矿高效开采技术探索

针对二氧化硅含量在65%-80%的低品位硅矿，采用“预先富集-高效分选”工艺，在开采现场设置移动式筛分站，通过振动筛分离出大块废石，再利用跳汰机进行重力分选，初步提升矿石品位至85%以上。对于含杂质较高的低品位矿，引入高压辊磨技术，通过挤压作用破坏矿物连生体，再采用浮选法分离石英与伴生矿物，浮选药剂选用环保型脂肪酸类捕收剂，降低对环境的影响。采用分阶段开采策略，优先开采品位相对较高的区域，同时储备低品位矿资源，为后续技术升级预留原料基础。

(四) 节能降耗与绿色采矿工艺集成方案

将节能理念融入采矿全流程，破碎环节采用颚式破碎机与冲击式破碎机组合，替代传统的多段圆锥破碎，吨矿破碎能耗降低15%-20%。运输环节优化路线设计，利用地形坡度实现矿石自流运输，减少卡车运输距离，降低燃油消耗。在采空区实施充填采矿法，利用破碎产生的废石与尾矿制作充填体，充填率达到90%以上，有

效控制地表沉降。开采现场配备喷淋降尘系统与粉尘回收装置，粉尘排放浓度控制在 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 以下，同时在采空区种植耐旱植被，实现矿山生态修复与土地复垦。

四、硅矿资源综合利用效率提升策略

(一) 伴生资源与尾矿中有价组分回收技术

硅矿伴生资源与尾矿回收需建立“先分离、后利用”的技术路径，针对伴生的长石资源，在破碎后采用浮选法分离，通过调整浮选药剂配比，实现石英与长石的有效分离，长石产品可用于陶瓷或玻璃生产。对于伴生的云母矿物，利用其片状结构特性，采用筛分-风选联合工艺进行回收，云母精矿可作为绝缘材料或填料使用。尾矿回收方面，针对石英砂尾矿，采用分级提纯技术，细粒级尾矿可加工成硅微粉，用于混凝土掺合料或涂料填料；粗粒级尾矿可用于生产建材制品，如透水砖、步道砖等。对于石英岩矿尾矿，因含有一定量的石英与长石，可通过重选-磁选联合工艺富集硅矿物，同时回收长石，实现尾矿资源的全组分利用。

(二) 硅矿加工副产物高值化利用途径

硅矿加工副产物主要包括破碎粉尘、分选废水沉淀物及切割废料等，这些副产物通过技术处理可实现高值化利用。破碎粉尘中石英含量高、颗粒细，经提纯后可制备高纯硅微粉，用于集成电路封装或光伏组件封装材料，附加值较原矿提升10倍以上。分选废水沉淀物中含有黏土与少量石英，通过脱水、煅烧等工艺处理后，可制成陶粒，用于轻质建材生产，既解决废水处理难题，又创造经济价值。硅料切割过程中产生的硅废料，含有一定量的金属杂质，通过酸浸除杂、真空熔炼等工艺，可回收高纯硅，用于工业硅生产，回收利用率可达90%以上。此外，副产物中的铁、铝等杂质，可通过化学提取技术制成相应的化工产品，如硫酸铁、氢氧化铝等，实现副产物的全元素利用，构建“原料-产品-副产物-新产品”的产业链条。

(三) 循环经济模式下的资源协同利用机制

循环经济模式的构建需要打破企业间的壁垒，建立硅矿开采、加工、下游应用的协同利用机制。在区域层

面，构建硅矿产业园区，整合采矿企业、选矿企业、建材企业及光伏企业，形成产业集群。采矿企业的低品位矿与尾矿直接供给园区内的选矿企业与建材企业，选矿企业的副产物供给化工企业，光伏企业的硅废料返回选矿企业回收利用，实现资源在园区内的循环流动。建立资源共享平台，整合各企业的生产数据、资源需求及副产物信息，通过平台匹配资源供需，提高资源利用效率。同时，建立资源利用评价体系，将资源回收率、尾矿利用率等指标纳入企业考核，推动企业从“粗放开采”向“精细利用”转型。通过协同利用机制，可使区域硅矿资源综合利用效率提升至90%以上，实现经济效益与环境效益的双赢。

结论

硅矿采矿工艺优化与资源综合利用效率提升需以资源特性为基础，以技术创新为支撑，通过精准地质勘察实现采矿方法与地质条件的适配，借助智能化技术突破传统工艺的效率瓶颈。低品位硅矿的高效开采与绿色工艺的集成应用，能够有效降低资源浪费与环境压力，而伴生资源回收、副产物高值化利用及循环经济模式的构建，则为资源综合利用提供了多元路径。

参考文献

- [1] 王恩浩, 王鹏军, 王卉, 等. 现代化采矿工艺技术 在金属矿采矿工程中的应用[J]. 冶金与材料, 2024, 44(09): 172-174.
- [2] 梁晓亮. 微波氯化Nigeria硅矿制备4N高纯石英砂的工艺研究[D]. 湖南工业大学, 2022.
- [3] 董宝华. 低硅矿生产烧结矿工艺优化研究[J]. 冶金管理, 2021, (17): 9-10.
- [4] 彭珂, 彭红霞, 邱卓明, 等. 江西省遂川县硅矿资源开发利用策略研究[J]. 中国矿业, 2018, 27(09): 16-20.
- [5] 张文方, 王文丽. 急倾斜中厚硅石矿体采矿方法研究[J]. 金属矿山, 2016, (05): 1-5.