

低品位矿石选矿提质增效关键技术探究

凡运杰

新疆紫金锌业有限公司 新疆 克孜勒苏柯尔克孜自治州 845450

摘要：随着优质矿产资源日益稀缺，低品位矿石开发利用成为保障资源供给的重要途径。高效节能破碎磨矿技术通过优化设备结构与工艺参数，降低能耗提升解离度；先进分选技术结合多种方法实现精准分离；矿石预处理改善物料性质；资源综合利用技术提高回收率。智能化、绿色化、高效节能化与多元化成为未来发展趋势，这些关键技术的突破为低品位矿石可持续发展提供有力支撑。

关键词：低品位矿石；选矿提质增效；关键技术

引言

在全球经济快速发展背景下，优质矿产资源消耗加剧，低品位矿石的高效开发利用成为矿业可持续发展的必然选择。然而，低品位矿石因品位低、嵌布复杂等特性，选矿难度大、成本高。本文针对这一现状，系统探究低品位矿石选矿提质增效的关键技术，涵盖高效节能破碎磨矿、先进分选、矿石预处理及资源综合利用技术，并对其智能化、绿色环保等发展趋势展开分析，旨在为低品位矿石开发提供技术参考。

1 低品位矿石概述

低品位矿石是指有用组分含量相对较低，在当前技术经济条件下，采用常规选矿与冶炼工艺难以获得良好经济效益的矿产资源。这类矿石广泛分布于全球各成矿带，其成因既与地质成矿作用过程中元素富集程度不足相关，也受到成矿后地质改造作用的影响，如区域变质、风化淋滤等，致使有用矿物分散、品位下降。从矿物学角度分析，低品位矿石的矿物组成往往更为复杂，除目标金属矿物外，常伴生大量脉石矿物，且有用矿物颗粒粒度细小、嵌布关系复杂。例如在低品位铜矿中，铜矿物常以细粒浸染状分布于石英、长石等脉石矿物中，部分铜元素甚至以类质同象形式赋存于其他矿物晶格内，这显著增加了有用矿物的单体解离难度与选矿富集成本。与高品位矿石相比，低品位矿石开发面临着多重技术挑战。在选矿阶段，需采用更为高效的破碎磨矿工艺以实现有用矿物的充分解离，同时需开发新型高效捕收剂、调整剂以提高目标矿物的选择性富集效率。在冶炼环节，低品位硫化矿通常需采用强化焙烧、加压酸浸等预处理技术，以提升金属浸出率，降低杂质元素对后续精炼的影响。这些技术的应用往往伴随着能耗与生产成本的显著上升。随着高品位矿产资源的不断消耗，低品位矿石已成为保障全球矿产资源可持续供应的重要

战略资源。近年来，随着选矿技术的进步，如生物选矿技术利用微生物的氧化作用选择性溶解目标金属，以及高压辊磨、自磨半自磨等高效节能磨矿技术的推广，部分低品位矿石已具备经济开发价值。低品位矿石的大规模开发仍需在技术创新与经济效益之间寻求平衡，通过研发新型选矿药剂、优化工艺流程、提高资源综合利用水平，实现低品位矿产资源的高效绿色开发。

2 低品位矿石选矿提质增效关键技术

2.1 高效节能破碎磨矿技术

低品位矿石处理中，破碎磨矿作业能耗占据选矿全流程的60%-70%，高效节能破碎磨矿技术成为降低成本的核心突破口。高压辊磨机作为新一代破碎设备，通过料层粉碎原理实现矿石的预破碎，利用两辊间强大压力使矿石颗粒内部产生微裂纹，显著降低后续磨矿难度。相较于传统破碎设备，其处理能力提升3-5倍，单位能耗降低20%-30%。结合半自磨与球磨的联合粉磨系统，能够充分发挥不同设备的优势，半自磨机利用矿石自身相互冲击研磨，减少钢球消耗，球磨机则针对粗粒级物料进行精细化磨矿，通过优化磨矿介质配比和转速控制，实现磨矿产品粒度的精准调控。新型耐磨材料的应用进一步提升破碎磨矿设备的运行效率。采用高铬铸铁、碳化钨复合材料制造的衬板和钢球，其耐磨性较传统材料提高2-3倍，减少设备检修频次和停机时间。智能化监测系统通过实时采集设备振动、电流、声音等参数，构建磨矿过程的动态模型，自动调整给矿量、水量和钢球补充量，确保磨矿作业始终处于最优工况，有效避免过磨与欠磨现象，使有用矿物与脉石矿物达到理想解离度，为后续分选作业创造良好条件^[1]。

2.2 先进分选技术

先进分选技术是实现低品位矿石提质增效的关键环节，其核心在于提升目标矿物与脉石矿物的分离精度。

浮选技术通过研发新型高效捕收剂和起泡剂,显著增强对低品位复杂矿物的选择性。例如,针对氧化铜矿开发的螯合型捕收剂,能够与铜离子形成稳定的络合物,在较宽的pH值范围内实现高效浮选,回收率提升10%-15%。微泡浮选柱采用旋流充气和气泡发生器相结合的方式,产生直径小于0.1mm的微气泡,大幅增加气泡与矿物颗粒的碰撞概率,提高细粒级矿物的回收效率,尤其适用于-20 μm 粒级矿物的分选。磁选技术在处理弱磁性低品位铁矿石方面展现出独特优势。超导高梯度磁选机利用超导线圈产生高达5T以上的强磁场,配合聚磁介质捕获弱磁性铁矿物,磁场强度较常规磁选机提升3-5倍,可有效分离品位低于15%的贫铁矿。重选技术通过改进离心选矿机的转鼓结构和流场分布,提高离心力场强度和稳定性,使重矿物与轻矿物在离心力和重力联合作用下实现高效分层,在处理低品位钨锡矿时,能够有效回收-0.074mm粒级的目的矿物,精矿品位提升20%-30%。多种分选技术的联合应用,如磁选-浮选、重选-磁选等联合流程,能够充分发挥各方法的优势,实现对复杂低品位矿石的高效分选。

2.3 矿石预处理技术

矿石预处理技术通过改变矿物表面性质或内部结构,为后续分选创造有利条件。氧化焙烧技术针对硫化矿中包裹的贵金属,在高温有氧环境下使硫化物氧化分解,破坏矿物结构,使被包裹的金、银等贵金属暴露出来,显著提高浮选或氰化浸出的回收率。对于难选氧化铜矿,采用硫酸化焙烧将氧化铜转化为可溶性硫酸铜,大幅提升浸出效率,浸出率可从常规方法的60%-70%提高至90%以上。生物预处理技术利用微生物的氧化作用,选择性分解矿石中的硫化物。嗜热嗜酸菌在45-65 $^{\circ}\text{C}$ 环境下,通过氧化黄铁矿、黄铜矿等硫化矿物,释放出包裹的金、铜等金属离子,该技术具有能耗低、环境友好等特点,尤其适用于低品位难处理金矿的预处理,可使金的浸出率提高20%-30%。高压水射流预处理通过高速水射流冲击矿石表面,在矿物颗粒内部产生微裂纹,增加矿物的比表面积,促进后续药剂的吸附和反应,在处理低品位铝土矿时,能够有效降低拜耳法溶出过程的能耗,提高氧化铝溶出率5%-8%^[2]。

2.4 资源综合利用技术

资源综合利用技术致力于实现低品位矿石中伴生元素的高效回收,提升选矿过程的经济效益和资源利用率。对于多金属硫化矿,采用全浮选工艺,依次浮选回收铜、铅、锌等有色金属,通过优化药剂制度和浮选流程,使各金属回收率均达到行业领先水平。尾矿再选技

术针对以往堆存的尾矿进行二次开发,利用先进的磁选、浮选设备,回收其中残留的铁、钨、钼等矿物,使尾矿品位降低至经济合理水平,实现资源的二次利用。有价元素提取后的尾矿可作为建筑材料原料进行综合利用。将尾矿与水泥、砂石等原料按一定比例混合,制备高性能混凝土、免烧砖等建材产品,不仅解决了尾矿堆存带来的环境污染和安全隐患问题,还降低了建筑材料的生产成本。对于富含硅、铝的尾矿,通过高温煅烧和化学处理,可制备白炭黑、分子筛等高附加值化工产品,进一步提升尾矿的综合利用价值。在低品位稀土矿处理中,采用萃取-沉淀-灼烧联合工艺,实现稀土元素的高效分离和富集,同时回收伴生的萤石、重晶石等矿物,使整个选矿过程的资源利用率提高至90%以上,实现低品位矿石资源的最大化利用。

3 低品位矿石选矿提质增效技术的发展趋势

3.1 智能化与自动化

(1) 智能化与自动化技术通过构建集成化的选矿控制系统,实现对低品位矿石选矿流程的精准调控。借助物联网传感器实时采集破碎、磨矿、浮选等关键环节的运行数据,结合机器学习算法建立动态模型,系统能够自动优化设备参数与药剂添加量,有效解决传统人工操作存在的滞后性与经验依赖问题,显著提升选矿指标的稳定性与产品质量。(2) 机器视觉与人工智能技术的深度融合,赋予选矿系统智能识别矿石特性的能力。高分辨率摄像头与深度学习算法协同工作,可快速分析矿石的矿物组成、粒度分布及表面特征,为后续选别流程提供决策依据,实现不同类型低品位矿石的差异化处理,在降低人力成本的同时大幅提高选矿效率。(3) 无人化选矿装备的研发与应用是智能化发展的重要方向。在选矿过程中,无人驾驶矿车可精准执行运输任务,自动给料机能够按设定参数稳定供料,这些自动化设备与远程监控平台紧密结合,构建起无人值守的选矿作业环境。此举既能减少人为操作带来的安全风险,又能通过设备间协同优化运行提升系统综合效益,为低品位矿石的大规模开发利用提供技术支撑。

3.2 绿色环保化

(1) 绿色环保化发展聚焦于低品位矿石选矿过程中污染物排放的控制与资源循环利用。新型环保选矿药剂的研发突破传统药剂毒性大、难降解的局限,采用可生物降解的天然原料或无毒化学合成材料,在保证选别效果的前提下,显著降低废水对环境的污染程度。高效废水处理技术如膜分离、生物处理等工艺的应用,实现选矿废水的零排放或达标排放,保护生态环境。(2) 尾矿

综合利用技术的进步为绿色选矿开辟新路径。通过对尾矿进行再选,提取其中残留的有价金属,提高资源利用率;利用尾矿制备建筑材料、充填材料等,将尾矿从废弃物转化为可利用资源,既减少尾矿堆存带来的占地与安全隐患,又降低对天然砂石等原材料的依赖,实现资源的可持续利用。(3)低品位矿石选矿过程中的粉尘、噪声污染治理技术不断升级。高效除尘设备与密闭化生产工艺的应用,有效减少粉尘无组织排放;隔音降噪材料与设备减震技术的改进,降低选矿车间及周边区域的噪声污染,营造绿色、健康的生产环境,推动低品位矿石选矿行业向生态友好型方向发展^[3]。

3.3 高效节能化

(1)高效节能化技术致力于降低低品位矿石选矿过程中的能源消耗与提升处理效率。新型节能型选矿设备的研发采用先进的设计理念与制造工艺,如新型节能球磨机通过优化筒体结构与衬板材质,降低磨矿过程中的能耗;高效浮选机采用创新的搅拌与充气方式,在保证浮选指标的同时减少动力消耗,从设备层面实现节能增效。(2)选矿工艺流程的优化整合是高效节能的关键。通过多碎少磨工艺、阶段磨矿-阶段选别工艺等优化流程,减少无效磨矿作业,提高有用矿物的单体解离度,降低磨矿能耗;采用预选抛废技术,在选矿前端剔除大量废石,减少后续选别作业的处理量,降低整体能耗,提升选矿系统的处理能力与经济效益。(3)能源回收与再利用技术在低品位矿石选矿中的应用进一步强化节能效果。余热回收系统将选矿过程中产生的热能进行回收利用,用于预热矿石或其他生产环节;采用变频调速技术根据设备实际负荷调节电机转速,降低电力消耗;通过能源管理系统实时监测与优化能源分配,实现能源的高效利用,推动低品位矿石选矿行业向高效节能方向迈进。

3.4 多元化与综合化

(1)多元化与综合化发展顺应低品位矿石性质复杂多变的特点,强调采用多种选矿技术协同作业。针对多金属共生的低品位矿石,将重选、磁选、浮选等传统选

矿方法与新兴的生物选矿、光电选矿等技术相结合,形成多元化的选矿工艺组合,根据矿石中不同矿物的物理化学性质差异,实现有价金属的高效分离与富集,提高资源综合回收率。(2)选矿与冶金、化工等产业的深度融合拓展了低品位矿石资源综合利用的途径。通过选矿-冶金联合工艺,将选矿得到的精矿直接进行冶炼,减少中间环节的物料损耗与能耗;利用化工技术对选矿产品进行深加工,开发高附加值的化工产品,实现资源的梯级利用,提升低品位矿石开发的经济效益与产业附加值。(3)低品位矿石选矿过程中伴生资源的综合利用体现了多元化与综合化的发展理念。对矿石中伴生的稀有金属、非金属矿物等进行全面评估与综合回收,不仅提高了资源利用率,还能降低单一主元素开发的市场风险。通过构建资源综合利用产业链,实现不同资源间的协同开发与循环利用,推动低品位矿石选矿行业向多元化、综合化方向转型升级^[4]。

结束语

综上所述,低品位矿石选矿提质增效关键技术研究与应用,有效提升了矿石处理效率与资源利用率,缓解了优质资源短缺压力。从高效节能破碎磨矿到先进分选等技术的创新,推动了选矿行业的技术进步。面对未来,智能化、绿色环保化等发展趋势将进一步优化选矿流程,降低环境影响。持续深化关键技术研究,是实现低品位矿石资源高效、可持续开发的关键所在。

参考文献

- [1]崔波,宋宝旭,姜效军,等.铜粗精矿的提质增效试验研究[J].中国矿业,2021,30(2):121-126.
- [2]李慧.低品位氧化锰矿石选矿工艺的改进[J].中国锰业,2024,42(5):115-118,127.
- [3]张添钧.化学选矿技术在低品位矿石处理中的应用[J].有色矿冶,2022,38(1):20-22.
- [4]吴静,马连军.某低品位金矿石选矿试验研究[J].黄金,2022,43(6):64-69.