

难处理金矿的高效选矿技术探究

朱永刚

河北大白阳金矿有限公司 河北 张家口 075100

摘要：本文围绕难处理金矿的高效选矿技术展开研究，分析其矿石成分复杂、矿物嵌布细且状态多样、物理化学性质特殊等特性。系统阐述物理选矿、化学浸出、生物浸出及多技术组合工艺等选矿技术，介绍新型破碎磨矿、分离富集设备与智能化选矿系统，并探讨环保与可持续发展策略。研究表明，多技术协同及设备创新可显著提升金回收率，为实现难处理金矿绿色高效开发提供理论与技术支撑。

关键词：难处理；金矿；高效选矿技术

1 难处理金矿的矿石特性分析

1.1 矿石成分复杂性

难处理金矿的矿石成分复杂程度远超普通金矿，其复杂性不仅体现在金元素与多种伴生元素共存，还在于这些元素之间形成的复杂矿物组合。在常见的难处理金矿中，金常与砷、锑、硫、铜、铅、锌等元素共生。以含砷难处理金矿为例，砷元素常以毒砂（ FeAsS ）、雄黄（ As_4S_4 ）等矿物形式存在，这些含砷矿物与金紧密共生，不仅会在后续选矿过程中干扰金的提取，还会带来环境风险。矿石中还可能存在碳质物，这些碳质物具有较强的吸附性，会吸附浸出剂中的金离子，导致金的回收率降低，极大增加了金矿处理的难度。这种成分的复杂性使得单一的选矿方法难以实现高效提金，需要综合多种技术手段进行处理。

1.2 矿物嵌布特征

矿物嵌布特征是决定难处理金矿选矿工艺的关键因素之一。难处理金矿中，金矿物的嵌布粒度通常极细，常以显微或次显微的形式存在于脉石矿物或其他金属矿物之中。例如，在一些卡林型金矿中，金的粒度往往小于10微米，甚至达到纳米级别，与石英、黏土矿物等紧密交织。同时金矿物的嵌布状态多样，可能呈包裹体形式存在于黄铁矿、毒砂等矿物内部，也可能沿矿物颗粒的裂隙、晶界分布^[1]。这种复杂的嵌布特征使得常规的破碎、磨矿工艺难以实现金矿物与脉石矿物的有效解离，若磨矿粒度不够，金无法充分暴露，会导致回收率降低；而过度磨矿又会产生大量矿泥，同样影响选矿指标，增加了选矿工艺优化的难度。

1.3 矿石的物理化学性质

难处理金矿的物理化学性质对选矿过程有着重要影响。从物理性质来看，矿石的硬度、密度、解理等特性会影响破碎、磨矿以及重选等选矿作业的效率。部分难

处理金矿硬度较高，如含有大量石英的金矿，在破碎和磨矿过程中能耗高、效率低，需要消耗更多的能量和时间才能达到合适的粒度。在化学性质方面，矿石中含有的硫化物、碳酸盐等矿物会与选矿药剂发生反应，影响药剂的作用效果。矿石中某些元素的化学活性较高，如砷、锑等，在浸出过程中容易生成有害的中间产物，不仅影响金的浸出率，还会对环境造成污染，因此在选矿过程中必须充分考虑矿石的物理化学性质，选择合适的选矿工艺和药剂制度。

2 难处理金矿的高效选矿技术

2.1 选矿技术

物理选矿技术主要包括重选、浮选等方法。重选是利用矿物间密度差异进行分选的方法，对于密度较大的金矿物及其连生体有较好的分选效果。在处理粗粒嵌布的难处理金矿时，重选可在磨矿后直接富集金矿物，减少后续处理的负荷。浮选则是依据矿物表面物理化学性质的差异，通过添加浮选药剂，使目的矿物表面疏水，进而附着在气泡上实现分选。在难处理金矿浮选中，常采用优先浮选或混合浮选工艺分离金与其他矿物。例如，对于含硫化物的难处理金矿，通过添加黄药类捕收剂可实现硫化物与脉石的分离，为后续金的提取创造条件。然而物理选矿技术对于细粒嵌布和复杂共生的难处理金矿效果有限，常需与其他技术联合使用。

2.2 化学浸出技术

化学浸出技术是提取难处理金矿中金的核心技术之一，其中氰化浸出是最传统且应用最广泛的方法。氰化浸出利用氰化物与金形成络合物，将金从矿石中溶解出来。尽管氰化浸出具有较高的浸出率，但存在严重的环境污染问题，氰化物的毒性对生态系统和人类健康构成巨大威胁。为解决这一问题，非氰浸出技术得到了广泛研究和应用，如硫脲浸出、硫代硫酸盐浸出、氯浸等。

硫脲浸出在酸性条件下,利用硫脲与金形成稳定的络合物实现金的溶解,该方法无毒且浸出速度快,但存在药剂成本高、易氧化失效等问题。硫代硫酸盐浸出则在碱性条件下进行,具有浸出速度快、环境友好等优点,但浸出过程易受铜、铁等杂质离子的干扰。这些化学浸出技术各有优缺点,在实际应用中需根据矿石性质选择合适的浸出体系和工艺条件。

2.3 生物浸出技术

生物浸出技术是一种绿色环保的难处理金矿选矿技术,它利用微生物的新陈代谢作用,氧化矿石中的硫化物和其他金属矿物,使包裹在其中的金暴露出来,便于后续提取。常用的微生物包括嗜酸氧化亚铁硫杆菌、氧化硫硫杆菌等。这些微生物能够在酸性环境下将黄铁矿、毒砂等硫化矿物氧化,释放出其中的金。生物浸出技术具有能耗低、环境污染小等优点,尤其适用于处理低品位、细粒嵌布的难处理金矿^[2]。生物浸出也存在浸出周期长(通常需要数周甚至数月)、对环境条件(温度、pH值、营养物质等)要求苛刻等缺点。目前,通过优化微生物培养条件、改进反应器设计等措施,不断提高生物浸出的效率和稳定性,使其在难处理金矿选矿领域的应用前景更加广阔。

2.4 多技术组合工艺

由于难处理金矿的复杂性,单一的选矿技术往往难以达到理想的选矿指标,因此多技术组合工艺成为提高金回收率的有效途径。常见的组合工艺包括“预处理+化学浸出”“物理选矿+化学浸出”等。例如,对于含砷难处理金矿,常采用焙烧预处理或加压氧化预处理的方法,将含砷矿物氧化,破坏其对金的包裹,然后再进行氰化浸出或非氰浸出,可显著提高金的浸出率。在一些复杂的多金属难处理金矿中,先通过浮选分离出主要的金属矿物,再对浮选精矿进行化学浸出,既能回收多种金属,又能提高金的回收率。多技术组合工艺能够充分发挥各技术的优势,取长补短,是未来难处理金矿选矿技术的发展方向。

3 高效选矿设备的研发与应用

3.1 新型破碎与磨矿设备

破碎与磨矿作为难处理金矿选矿的前置核心工序,其处理效果直接决定后续选别环节的效率与金属回收率。在新型破碎设备领域,高压辊磨机凭借独特的工作机制展现出显著优势。该设备通过两个相向转动的高压辊子,对进入辊间的矿石施加高达150-300MPa的压力,使矿石在挤压作用下发生层压破碎。这种破碎方式打破了传统冲击式破碎的局限,能够使矿石沿内部裂隙

优先破碎,不仅实现了3-8的高破碎比,还能将产品粒度控制在5mm以下,部分情况下甚至可达2mm。以某含砷难处理金矿项目为例,引入高压辊磨机后,后续球磨机的给矿粒度从原有的15-20mm降至5mm,磨矿能耗降低了25%-30%,显著提升了磨矿效率。在磨矿设备革新方面,搅拌磨和塔式磨成为处理细粒嵌布难处理金矿的“利器”。搅拌磨内部设置的强力搅拌器,以600-1200r/min的高速旋转驱动研磨介质(如钢球、陶瓷球),形成强烈的研磨、冲击和剪切作用。这种独特的研磨方式使得搅拌磨的单位能耗处理量比传统球磨机高30%-50%,且能将矿石磨至-200目占比90%以上,特别适合处理金矿物粒度小于10 μ m的卡林型金矿^[3]。塔式磨则采用立式结构,矿浆从底部给入,在向上流动过程中与自上而下运动的研磨介质充分接触,通过重力与机械力的协同作用实现磨矿。其具有磨矿产品粒度均匀、过粉碎现象少的特点,在处理含泥量较高的难处理金矿时,能有效避免矿泥对后续选别作业的不利影响。新型破碎与磨矿设备的应用,不仅显著提升了难处理金矿中矿物的解离度,还通过降低能耗、减少过粉碎,为选矿企业节约了大量成本。

3.2 高效分离与富集设备

高效分离与富集设备是提升难处理金矿选矿指标的关键环节,其技术进步极大推动了行业发展。在重选设备中,离心选矿机利用离心力场增强矿物的沉降分离效果。当设备以800-1500r/min的转速运转时,产生的离心力可达重力的数十倍甚至上百倍,能够有效捕获粒度在10-50 μ m的细粒金矿物。在某砂金矿项目中,采用离心选矿机后,金回收率从传统重选设备的65%提升至85%,且处理能力提高了2-3倍。浮选设备领域,浮选柱以其创新的气-液-固三相分离机制脱颖而出。该设备通过气泡发生器在柱体底部产生细小均匀的气泡,气泡在上升过程中与矿浆中的目的矿物充分接触,相较于传统机械搅拌式浮选机,其气泡直径可减小至0.1-0.3mm,矿化效率提高了30%-40%。某硫化矿型难处理金矿应用浮选柱后,金浮选回收率提高了10%-15%,同时减少了药剂用量和占地面积。磁选设备在处理含有磁性矿物(如磁铁矿、磁黄铁矿)的难处理金矿中发挥着不可替代的作用。高梯度磁选机通过在磁路中设置聚磁介质,产生高达5-10T的磁场强度,能够有效捕获弱磁性矿物。在某含磁黄铁矿的难处理金矿项目中,预先采用磁选抛除磁性矿物后,后续氰化浸出的金浸出率从68%提升至82%,显著降低了磁性矿物对金浸出的干扰。这些高效分离与富集设备通过不断优化结构设计、改进工作参数,实现难处理金矿中

有用矿物更高效、精准的分离，为提高金回收率和综合经济效益提供了有力支撑。

3.3 智能化选矿系统

随着工业4.0和物联网技术的蓬勃发展，智能化选矿系统正成为难处理金矿选矿领域的变革力量。该系统以传感器技术为基础，在破碎、磨矿、浮选、浸出等关键工序部署大量传感器，实时采集矿浆浓度、pH值、流量、设备运行参数等数百项数据。借助大数据分析和机器学习算法，系统能够建立矿石性质、工艺参数与选矿指标之间的复杂关系模型，实现对选矿过程的动态优化。在智能控制方面，系统可根据矿石性质的实时变化，自动调整破碎给矿速度、磨矿分级溢流浓度、浮选药剂添加量等关键参数。某智能化选矿厂的实际应用数据显示，引入该系统后，选矿回收率提高了5%-8%，药剂消耗降低了15%-20%。系统具备强大的设备健康管理功能，通过对设备振动、温度、电流等参数的实时监测和分析，能够提前7-15天预测设备故障，避免因设备突发故障导致的生产中断。智能化选矿系统的应用，不仅实现难处理金矿选矿过程的自动化、精准化控制，还通过数据驱动的决策模式，显著提升生产效率和企业竞争力。其作为选矿技术向智能化方向发展的重要标志，将推动整个行业朝着更加高效、绿色、可持续的方向迈进。

4 难处理金矿选矿技术的环保与可持续性

4.1 环境污染与治理

难处理金矿选矿过程中会产生大量的污染物，对环境造成严重影响。化学浸出过程中使用的氰化物、酸、碱等药剂，若处理不当会污染土壤、水体和大气。选矿产生的尾矿中含有重金属和有害物质，长期堆放会导致重金属渗漏，污染周边环境。为解决这些环境问题，需要采取一系列有效的治理措施。对于氰化物污染，可采用化学氧化法、生物降解法等进行处理，将氰化物转化为无害物质。在尾矿处理方面，可采用尾矿干堆、充填采矿等技术，减少尾矿库的占地面积和环境风险。同时加强选矿废水的处理和回用，实现水资源的循环利用，降低对环境的污染。

4.2 资源高效利用

提高难处理金矿资源的高效利用是实现可持续发展

的关键。在选矿过程中，除了提取金之外，还应注重对其他伴生有价金属的回收，如铜、铅、锌、银等。通过优化选矿工艺和设备，提高伴生金属的回收率，实现资源的综合利用^[4]。对于尾矿中的有用成分，也可采用先进的技术进行再选和利用，减少资源浪费。通过资源的高效利用，不仅提高企业的经济效益，还减少对自然资源的依赖，具有重要的经济和环境意义。

4.3 可持续发展策略

难处理金矿选矿行业的可持续发展需要政府、企业和科研机构的共同努力。政府应加强环境监管，制定严格的环保标准和政策，鼓励企业采用环保、高效的选矿技术和设备。企业应加大研发投入，积极开展技术创新，探索绿色、低碳的选矿工艺，提高资源利用效率和环境治理水平。科研机构应加强产学研合作，开展难处理金矿选矿技术的基础研究和应用研究，为行业的可持续发展提供技术支持。加强公众教育，提高公众对环境保护和资源可持续利用的意识，营造良好的社会氛围，共同推动难处理金矿选矿行业的可持续发展。

结束语

综上所述，难处理金矿高效选矿技术的研究与应用对金矿资源开发意义重大。通过剖析矿石特性、创新选矿技术与设备、加强环保治理，有效克服了难处理金矿开发难题。未来，随着科技进步，需进一步深化技术创新，优化多技术协同工艺，提升智能化水平，强化资源综合利用与环境保护，推动难处理金矿选矿行业向高效、绿色、可持续方向发展。

参考文献

- [1]王清萍,孙国平.难处理金矿的高效选矿技术探究[J].冶金与材料,2025,45(2):79-81.DOI:10.3969/j.issn.1674-5183.2025.02.028.
- [2]张呼生,宋坤.工艺矿物学在难处理金矿矿物加工中的应用[J].2020(08):2-4.
- [3]赵钥庆.探讨复杂难选铜铅锌多金属矿选矿工艺[J].冶金与材料,2024,44(02):55-57.
- [4]秦晓艳,刘建,高虎林,等.某复杂低品位铜锌硫化矿工艺矿物学研究[J].有色金属(选矿部分),2024,(03):31-37.