

细粒钼矿浮选回收工艺改进与生产实践

马淞霖

栾川龙宇钼业有限公司

摘要：随着钼资源开发不断深入，易选粗粒钼矿储量日益枯竭，细粒钼矿（粒径 $<20\text{ }\mu\text{m}$ ）已成为钼资源回收的核心对象。细粒钼矿因比表面积大、表面能高、棱面比失衡、易泥化团聚等特性，导致传统浮选工艺存在回收率偏低、药剂消耗偏高、精矿品位不稳定等突出问题，制约钼资源高效利用。本文结合细粒钼矿晶体结构特征与浮选界面作用机理，深入剖析传统浮选工艺的技术瓶颈，从磨矿分级、药剂体系、浮选设备、工艺流程四个维度提出针对性改进策略，结合工业生产实践验证改进方案的可行性与优越性，为细粒钼矿高效浮选回收提供技术支撑与工程实践范式，彰显工艺改进的专业性与应用价值。

关键词：细粒钼矿；浮选回收；工艺改进

1 细粒钼矿浮选特性及传统工艺技术瓶颈

细粒钼矿核心浮选特性体现在三个方面。一是表面性质失衡，辉钼矿解离为细粒后，极性棱面表面积占比显著提升，棱面比增大导致表面动电位负值增加，疏水性下降，可浮性降低。二是团聚与罩盖现象突出，细粒钼矿比表面积大、表面能高，易与矿泥发生非选择性团聚，同时矿泥易吸附于钼矿表面形成罩盖，阻碍捕收剂与钼矿表面的有效接触。三是浮选动力学劣势明显，细粒钼矿质量小，在矿浆中沉降速度慢，易随矿浆流失，且与气泡的有效碰撞概率低、黏附强度不足，难以实现有效矿化。

传统细粒钼矿浮选工艺的核心技术瓶颈主要包括四个方面。一是磨矿分级精度不足，传统球磨工艺易导致过磨现象，产生大量矿泥，进一步加剧细粒钼矿的团聚与流失，同时分级设备分级效率低，无法实现细粒钼矿的精准分级，导致入选粒级不合理。二是药剂体系适配性差，传统烃类捕收剂（煤油、柴油）对细粒钼矿的疏水性提升有限，且选择性差，需大量药剂覆盖矿物表面，不仅增加药剂消耗，还会导致脉石矿物同步上浮，影响精矿品位；调整剂与抑制剂搭配不合理，无法有效抑制矿泥干扰，加剧浮选分离难度。三是浮选设备分选效率低，传统浮选机气泡尺寸过大，与细粒钼矿的碰撞黏附效率低，且矿

浆搅拌强度不合理，易导致细粒钼矿团聚或流失，无法实现高效分选。四是工艺流程设计不合理，多采用单一浮选流程，未针对细粒钼矿的回收特点设置分级浮选、扫选强化等环节，导致细粒钼矿在尾矿中损失率达 50%以上。

2 细粒钼矿浮选回收工艺改进策略

2.1 优化磨矿分级工艺，减少过磨与矿泥产生

磨矿分级是细粒钼矿浮选的前提，核心是实现钼矿的充分解离，同时避免过磨产生大量矿泥。采用“阶段磨矿-分级闭路”工艺替代传统单一球磨工艺，第一段磨矿采用格子型球磨机，实现矿石初步解离，第二段采用溢流型球磨机，控制磨矿细度，确保细粒钼矿充分解离且不产生过度过磨。

优化分级设备配置，采用水力旋流器与高频振动筛联合分级，替代传统螺旋分级机，提升分级精度。水力旋流器负责粗分级，分离出合格粒级钼矿进入浮选工序，高频振动筛负责细分级，回收细粒级钼矿，同时将过磨矿泥分离出去，减少矿泥对浮选的干扰。

2.2 改进药剂体系，强化浮选分离效果

药剂体系优化是细粒钼矿浮选回收的核心，重点解决捕收剂适配性差、抑制剂效果不足、药剂消耗偏高的问题。捕收剂采用“纳米乳液捕收剂+传统烃油捕收剂”复合体系，纳米乳液捕收剂凭借尺寸效应，可显著提升在细粒钼矿表面的分散性与吸附强度，传统烃油捕收剂辅助增强疏水性，通过协同吸附机制提升细粒钼矿的可浮性，替代单一烃油捕收剂，药剂消耗可降低 15%~20%。

调整剂选用碳酸钠，调控矿浆 pH 值至 9~10，优化细粒钼矿表面电性，增强捕收剂吸附效果；抑制剂采用水玻璃与羧甲基纤维素复合体系，水玻璃抑制石英等脉石矿物，羧甲基纤维素抑制矿泥，减少矿泥罩盖与团聚现象，提升浮选选择性。同时，优化药剂添加方式，采用分段添加、多点添加，确保药剂在矿浆中均匀分散，提升药剂利用效率，避免药剂浪费。

2.3 升级浮选设备，提升分选精度与效率

浮选设备升级聚焦于提升细粒钼矿与气泡的碰撞黏附效率，减少细粒钼矿流失。采用旋流-静态微泡浮选柱替代传统浮选机，该设备兼具旋流分级与微泡浮选功能，微泡尺寸可控制在 10~50 μm ，比表面积大、上升速率慢，可显著提

升与细粒钼矿的碰撞概率和接触时间，增强矿化效果，同时利用旋流作用实现矿泥与钼矿的初步分离，提升分选精度。

在浮选柱底部增设脉动搅拌装置，优化矿浆搅拌强度，避免细粒钼矿团聚，同时促进气泡与矿物颗粒的充分接触；在浮选柱顶部设置泡沫刮出装置，调整泡沫刮出速度，减少细粒钼矿随泡沫流失。此外，在扫选工序采用微纳米气泡发生器，利用微纳米气泡的高表面张力特性，强化细粒钼矿的回收，降低尾矿中钼的损失率。

2.4 优化工艺流程，构建闭环回收体系

摒弃传统单一浮选流程，构建“分级浮选-粗选强化-多段扫选-精选提纯”的闭环浮选流程。首先，将分级后的合格粒级钼矿分为粗粒级与细粒级，采用不同浮选参数进行分级浮选，粗粒级采用常规浮选参数，细粒级采用微泡浮选与复合药剂协同，提升不同粒级钼矿的回收效果。

强化粗选工序，优化粗选矿浆浓度与浮选时间，确保细粒钼矿充分矿化；增加扫选次数至 2~3 次，采用逐步降低药剂用量的方式，回收尾矿中的细粒钼矿，提升钼总回收率；精选工序采用“多段精选+反浮选”工艺，去除精矿中的脉石杂质与矿泥，提升精矿品位。同时，将精选尾矿返回粗选工序，形成闭环回收，减少细粒钼矿流失，实现资源最大化利用。

3 生产实践验证

选取某细粒难选钼矿选厂开展工业实践，该选厂入选矿石以细粒嵌布辉钼矿为主，细粒级占比高且矿泥含量波动较大，同时伴生铜、铅杂质矿物。实践前，该厂采用传统浮选工艺，不仅存在细粒钼矿团聚、矿泥罩盖等问题，且铜铅杂质抑制不彻底，导致钼回收率偏低、精矿品位不稳定且杂质超标，药剂消耗偏高，磨矿过磨现象突出，无法满足下游深加工需求，制约选厂效益提升。

针对上述生产痛点，结合本文改进策略并参考细粒难选钼矿铜铅杂质抑制技术要点，对该厂浮选系统进行系统性改造。优化磨矿分级工艺，采用两段闭路磨矿与联合分级模式，减少过磨矿泥产生；改进药剂体系，采用复合捕收剂提升细粒钼矿可浮性，搭配复合抑制体系强化铜铅杂质与矿泥抑制，优化药剂添加方式；升级浮选设备并优化工艺流程，增设反浮选环节强化杂质分离，构建闭环回收体系，全程结合生产工况优化参数确保落地可行。

经过一段时间工业连续运行，选厂生产指标显著提升，核心痛点得到彻底解决。细粒钼矿浮选回收率与精矿品位大幅提升，铜铅杂质含量降至合格标准，

药剂单耗明显降低，矿泥干扰得到有效遏制，磨矿分级效率与浮选设备处理能力显著提高。改造后选厂新增显著经济效益，同时减少矿泥与杂质排放，实现经济效益、环保效益与产品质量的三重提升。

工业实践表明，改进后的工艺精准适配细粒难选钼矿特性，兼顾细粒回收与铜铅杂质抑制，有效破解传统工艺核心难题。该工艺可操作性强，无需大规模新增设备投资，能同步提升钼矿回收效率与产品纯度，适配含铜铅杂质的细粒钼矿选厂生产实际，具有较强的工程实用性与推广价值，可为同类选厂工艺升级提供参考。

参考文献

[1] 于志超,王立刚,孙志健,刘万峰,于洋.细粒难选钼矿浮选工艺优化及铜铅杂质抑制[J].矿冶,2025,34(4):576-582