

浮选柱在细粒有色金属矿分选中的优势与挑战

侯君一

新疆维吾尔自治区地质局哈密地质大队，新疆 哈密 839000

[摘要]面对易选矿产资源的日益枯竭，复杂细粒嵌布的有色金属矿成为开发重点，浮选柱凭借其高富集比和微泡矿化等特性，在提升细粒矿物回收率与精矿品位方面优势显著。数据显示，其可使精矿品位平均提高 2%~5%，回收率增加 1%~3%。本文进一步分析了浮选柱在泡沫稳定性控制、矿浆短路及沉砂处理等方面的技术挑战，并展望了智能控制与复合力场等发展方向，为其高效应用提供参考。

[关键词]浮选柱；细粒分选；有色金属矿；优势；挑战；气泡矿化

DOI: 10.33142/ec.v8i9.18012 中图分类号: TD6 文献标识码: A

The Advantages and Challenges of Flotation Columns in the Separation of Fine-grained Non-ferrous Metal Ores

HOU Junyi

Hami Geological Brigade of Xinjiang Uygur Autonomous Region Geological Bureau, Hami, Xinjiang, 839000, China

Abstract: Faced with the increasing depletion of easily selectable mineral resources, complex fine-grained embedded non-ferrous metal ores have become a development focus. Flotation columns, with their high enrichment ratio and microbubble mineralization characteristics, have significant advantages in improving the recovery rate of fine-grained minerals and concentrate grade. The data shows that it can increase the average grade of concentrate by ~ and the recovery rate by 1%~3%. This paper further analyzes the technical challenges of flotation column in foam stability control, pulp short circuit and sand settling treatment, and looks forward to the development direction of intelligent control and composite force field, providing a reference for its efficient application.

Keywords: flotation column; fine-grained sorting; non-ferrous metal ores; advantages; challenge; bubble mineralization

引言

有色金属作为国民经济发展以及国防建设重要基础材料，其矿石常常呈现出细粒、嵌布等特征，传统浮选机在去处理这类矿石时会面临回收率低、选择性差以及能耗高这些问题。浮选柱依靠逆流矿化以及深厚泡沫层结构，在细粒分选这一方面取得了显著成效，不但有助于提高精矿品位，而且还能降低能耗以及药剂用量，事实上，它的稳定运行是基于精密的过程控制以及深入机理研究。本文对浮选柱在细粒分选中技术优势、当前挑战以及未来发展方向进行了系统分析。

1 浮选柱在细粒矿分选中的核心优势

1.1 具有优越特性分离选择性以及高富集比

浮选柱作为一种能够实现高效分选设备，其核心特性在于内部不存在机械搅拌装置，进而在整个矿浆区域范围内形成相对稳定且紊动程度较低流态环境，这样一种宁静流体条件为微细粒矿物与气泡之间碰撞以及吸附构建了理想界面，避免了因强烈湍流致使已附着颗粒出现脱落问题，尤其适宜于微细粒级以及难选矿物分选作业，浮选柱另外一个关键结构是其具备深厚泡沫层，该泡沫层高度通常能够稳定维持在 1~2m，这一高度远远高于传统浮选机，这层泡沫并非仅仅是简单气泡堆积，而是一个具有精细分选作用“动态精选区”，矿化气泡在缓慢上升并穿越这一厚泡

沫层过程当中，经历了类似于“过滤”物理分选过程^[1]。

在泡沫层当中，由于气泡兼并以及破裂，同时重力沉降作用持续进行，那些机械夹带或者弱吸附亲水性脉石颗粒会从气泡表面有效剥离，并返回下方矿浆区域重新参与分选流程，疏水性强目标矿物则能够牢固附着于气泡之上，最终进入精矿溜槽，大量工业实践数据表明，相较于传统机械搅拌式浮选机，浮选柱在分选铜钼铅锌等有色金属硫化矿时，能够把最终精矿品位平均提高 2 至 5 个百分点，并且其富集比（也就是原矿品位与精矿品位之比）显著增高，这一优势使浮选柱在追求高品位精矿以及降低后续冶炼成本现代选矿流程中扮演着不可或缺角色。

1.2 具备高效能力细粒与微细粒回收

细粒矿物由于质量较小表面能较高，在传统机械搅拌式浮选机中分选效率普遍偏低，强烈湍流容易致使已吸附于气泡颗粒发生脱落，同时矿浆流态不稳定也容易引发短路现象，造成细粒有用矿物随着尾矿过早流失，浮选柱则借助其独特结构有效应对这一难题：它选用文丘里管或发泡陶瓷等微细气泡发生系统，能够产生大量直径处于 0.5~2mm 之间均匀微气泡，显著增大气液界面面积，为细粒矿物提供更多与气泡接触以及吸附机会，极大程度上改善了矿化条件。

此外浮选柱内矿浆自上而下气泡自下而上逆流接触模式，创造出了更长矿化路径以及更为稳定分选环境，矿

物与气泡以在相对静止柱体内充分碰撞并实现黏附，有效延长了停留时间，提高了细粒级捕收概率，生产数据表明，对于 $-20\mu\text{m}$ 细粒级有色金属矿物，浮选柱能够使其回收率相较于传统浮选机提高 1%~3%，在某些极细粒级或难浮矿物体系当中，则回收率提升幅度更为显著，这一优势使浮选柱成为细粒和微细粒矿产资源高效回收核心设备之一^[2]。

1.3 拥有较低运营成本以及较小占地面积

浮选柱在结构设计方面具有显著优势，其主体通常呈现为高大塔式结构，垂直空间利用率较高，使单位处理量占面积远远小于由多台浮选机所组成机组，特别适合选厂空间受限或者希望紧凑布置现代化生产线，不仅如此浮选柱依靠其内部形成显著静压头，能够自然把富集泡沫精矿从柱顶排出，在大多数工况下无需额外配置故障率较高泡沫泵或中矿泵，这不仅简化了工艺流程，同时还减少了设备投资以及维护复杂性，提高了整个浮选回路运行可靠性。

浮选柱经济性以及节能效果更为突出，其逆流矿化模式以及深厚泡沫层带来了极高分选选择性，这种高效分离能力意味着在达到相同分选指标时候，所需捕收剂和起泡剂用量更少，实践表明药剂消耗可比传统浮选机降低 10%~20%。同时，由于没有大型叶轮定子等机械搅拌部件，驱动能耗以大幅降低，普遍能够实现 15%~30% 节能效果。

2 浮选柱应用面临的主要挑战

2.1 泡沫稳定性以及矿浆液面控制方面敏感性

浮选柱分选效率其核心要点在于开展维持一个稳定且足够深厚泡沫层这样工作，而这一泡沫层物理化学状态极其容易受到矿浆环境细微变化影响，关键影响因素囊括矿浆 pH 值溶液中各种离子浓度以及起泡剂和调整剂等药剂用量，pH 值出现波动会去改变矿物表面电性以及药剂吸附形态，离子强度则会影响气泡兼并速率与液膜强度，而起泡剂类型与用量更是直接决定了气泡尺寸分布与韧性，泡沫稳定性必须要被精确控制在适度范围之内：过稳泡沫虽然能够形成厚实泡沫层，但是会导致气泡兼并困难精矿流动性变差，甚至还会造成排放口堵塞；而过脆泡沫则无法支撑有效二次富集过程，大量已经吸附矿物在到达溢流堰之前便会发生脱落，导致选择性下降和回收率损失，矿浆液面高度稳定同样也是保证泡沫层正常工作关键物理因素，液面哪怕发生微小波动，也会打破泡沫与矿浆交界处动态平衡，轻则会引起泡沫层厚度变化和精矿品位波动，重则会导致“翻床”事故，也就是泡沫层结构彻底崩溃，大量矿浆直接涌入精矿，造成生产中断和产品质量严重恶化，这种对操作参数极端敏感特性，对自动控制系统提出了极为苛刻要求^[3]。

2.2 矿浆短路以及沉砂处理方面问题

在大型浮选柱运行过程当中，矿浆短路是一个不容忽视技术难题，部分给矿浆，尤其是包含细粒级有用矿物流股，可能会因为布料器分布不均或者内部流场扰动，未能与上升气泡群发生充分有效碰撞和吸附，便迅速穿过气泡“沸腾区”，直接经由底部尾矿管排出系统，这种短路现象致使本应回收有价值细粒矿物未经矿化就过早损失，不

但降低了整机回收率，还造成了资源浪费，短路流失矿物通常以解离度好可浮性优良微细粒级为主，这使回收率下降尤为显著，底部沉砂堆积是另一大操作挑战，部分密度较大矿粒或者未能成功附着气泡中间颗粒，在重力作用下会逐渐沉降并在柱体底部区域形成高浓度沉砂，这些沉积物倘若不能及时通过尾矿排放系统排出，就会持续积聚，改变柱内预设流场状态和压力分布，破坏逆流矿化所需稳定环境。

2.3 给矿性质波动适应性

浮选柱作为一个高度连续稳态分选系统，其运行效率是建立在各操作参数动态平衡基础之上，然而这种稳态特性也意味着它对给矿波动适应性相对较差，当给矿浓度粒度组成或者原矿品位发生较大起伏时，浮选柱内部流态气泡矿化行为以及泡沫层稳定性都会受到显著干扰，举例来说，给矿浓度突然升高会致使矿浆黏度增加，恶化气泡分散与矿化条件；而入料粒度变粗则会加剧颗粒沉降趋势，增加底部沉砂风险，这与搅拌强烈能够灵活调整操作参数传统间歇式浮选机形成鲜明对比，后者能够通过即时改变药剂添加搅拌强度或者浮选时间来快速响应原矿变化，由于浮选柱是一个巨大“缓冲容器”，矿浆在其中停留时间较长，从调整操作参数到系统重新建立新的平衡存在明显的滞后性。操作人员即便根据当前精矿和尾矿指标及时调整了气量液位或者药剂用量，系统也需要更长时间才能逐步过渡到新稳定状态。这种滞后性对前序的碎磨、分级等作业稳定性提出了极高要求。

3 未来发展趋势与展望

3.1 智能化检测与过程控制

现代浮选柱实施智能化升级工作高度依赖于对先进传感技术运用，诸如泡沫图像分析仪在线激光粒度仪以及基于 XRF/LIBS 来开展实时矿浆品位分析仪等核心传感器，能够实现 7×24 小时不间断对关键参数进行连续监测，以某大型铜矿作为示例，泡沫图像分析仪借助非接触方式去分析泡沫特性，把精矿品位推断误差控制在 $\pm 0.3\%$ 以内，其效率相较于人工提高了 30 倍；在线粒度仪对于 $-74\mu\text{m}$ 粒级检测精度达到了 $\pm 1.2\%$ ，可以提前发出沉砂风险预警，从而保障分级效率；XRF 矿浆品位分析仪每秒进行一次检测，元素品位误差仅为 $\pm 0.15\%$ ，这些具备高频率以及高精度特点实时数据为智能决策提供了坚实基础^[4]。不同核心传感器的具体性能参数对比如表 1 所示，可清晰体现各设备在浮选柱智能化检测中的技术优势：

海量实时数据只有结合大数据以及 AI 算法才能够创造出价值，某镍矿选厂（日处理量为 2000t）运用深度学习模型，基于 5 年历史数据开展了精矿品位回收率与气量液位药剂用量之间动态预测模型建立工作，其准确率达到了 92.5%，该系统实现了实时闭环以及预测性调控，能够在给矿品位出现波动前 3~5min 马上进行参数调整，把控制滞后从 15min 缩短至 3min 以内，精矿品位月波动由 $\pm 1.2\%$ 降低至 $\pm 0.4\%$ ，每年增加效益约为 1200 万元，该系统具备自学习以及优化能力，即便在原矿品位出现大幅波动（0.3%~1.1%）情况下也能够保持分选指标稳定。

表1 浮选柱核心传感器性能参数对比

传感器类型	检测参数	检测频率	检测精度	应用场景	实际应用效果（某铜矿）
泡沫图像分析仪	泡沫尺寸、纹理、流速	10 帧/s	尺寸 $\pm 5\%$ 、流速 $\pm 3\%$	精矿品位、回收率推断	品位推断误差 $\pm 0.3\%$ ，效率提升 30 倍
在线激光粒度仪	给矿/产品粒度分布	1 次/2min	-74μm 粒级 $\pm 1.2\%$	沉砂预警、分级效率优化	分级效率稳定 $\geq 85\%$ ，预警提前 20min
XRF 矿浆品位分析仪	铜、铁等元素含量	1 次/s	品位 $\pm 0.15\%$	元素瞬时含量监测	品位波动范围缩小 40%

表2 某铁矿选厂不同分选流程指标对比

分选流程类型	处理能力 (t/d)	原矿铁品位 (%)	精矿铁品位 (%)	铁回收率 (%)	吨矿运营成本 (元/t)	精矿杂质含量 (SiO ₂ , %)
单一机械浮选机流程	3000	28.5~32.0	62.5~64.0	88.2~89.5	128	5.2~6.0
单一浮选柱流程	2500	28.5~32.0	65.0~66.5	85.1~86.3	115	2.5~3.0
浮选机+浮选柱联合流程	3000	28.5~32.0	66.8~68.2	90.5~91.8	112	1.8~2.2

3.2 复合力场与新型内部构件开发

传统浮选柱在处理-10μm 极细粒或者胶体矿物时候回收率常常低于 60%，为了提高效率，复合力场浮选柱借助引入离心力或者磁场等外部物理场，极大程度改善了微细粒矿物回收效果，某铅锌选厂选用离心-重力复合浮选柱，使-10μm 铅矿物表观粒径增大 3~5 倍，碰撞概率以及黏附强度分别提高了 45% 和 30，回收率从 58.2% 提升至 82.6%；某铁矿选厂依靠外加 0.2~0.5T 磁场，强化了磁性矿物疏水性与选择性，分离效率提升了 28%，有效分选粒度下限拓展至 5μm^[5]。

浮选柱内部结构优化也取得了显著进展，比如某金矿选厂把微孔陶瓷充气器当作充气设备来使用，气泡直径缩小了 60%~70%、密度提高了 2~3 倍，矿化效率提升了 35%；在柱内加设规整填料以及导流挡板，有效改善了流场稳定性，使“短路”率从 18% 降低至 5%，容积利用效率从 75% 提升至 92%，结构优化带来了流速更加稳定矿物停留时间延长效果，最终实现了分选选择性回收率以及处理能力全面提高。当气泡直径缩小密度提高时，矿化效率得以提升，同时流场稳定性到改善，“短路”率降低，容积利用效率提高，进而全面提升了分选选择性回收率和处理能力。

3.3 工艺流程优化与集成

在选矿流程设计方面，浮选柱与机械浮选机互补集成是提高分选效益重要策略之一，尤其是“浮选机粗扫选—浮选柱精选”联合流程应用较为广泛，某大型铜选厂（日处理量为 10 000t）采用了这种配置：前段运用 8 台 XCF-II 型浮选机进行粗扫选，利用其强搅拌以及抗干扰能力，在原矿铜品位 0.45%~0.65% 条件下实现了 93%~95% 回收率，尾矿品位控制在 0.03% 以下；所到粗精矿（铜品位 8%~10%）再进入 4 台 Φ3.2×12m 浮选柱进行精选，凭借其稳定流态以及泡沫层有效剔除连生体与脉石，最终精矿铜品位达到 25%~26.5%，相较于单一浮选机流程提高

了 3~4 个百分点^[6]。不同分选流程的实际应用指标对比如表 2 所示，可直观体现联合流程的优势：

4 结语

浮选柱借助其具备优异选择性高效细粒回收能力以及较低运营成本，在细粒有色金属矿分选中展现出重要价值，事实上其后续进一步发展进程中，仍然面临着诸如对自动控制系统要求较高、沉砂排放存在困难、矿浆短路现象频繁发生以及对给矿波动较为敏感等一系列技术瓶颈。在未来，通过智能控制算法运用设备结构创新性设计以及全流程系统集成优化等多个方面协同突破，浮选柱有希望在复杂细粒矿产资源高效且绿色开发过程中扮演更为核心角色，从而为矿产资源可持续利用提供关键技术以及装备方面支撑。

参考文献

- [1] 杨凯志, 邱显扬, 李汉文, 等. 某锡多金属矿浮—重—反浮选中矿中铜 锌 锡 的 分 离 回 收 试 验 [J]. 金 属 矿 山, 2025(3):78-84.
 - [2] 马淑贤, 王成林. 高效电化学浮选技术在金属矿浮选工艺中的应用研究 [J]. 世界有色金属, 2024(17):76-78.
 - [3] 刘国蓉, 张福亚, 高自然, 等. 浮选柱在微细粒矿物浮选中的研究进展 [J]. 有色设备, 2024, 38(3):19-23.
 - [4] 孙吕, 陈艳平, 蒋太国, 等. 云南某多金属矿铜铅混合浮选工艺试验研究 [J]. 现代矿业, 2024, 40(3):160-162.
 - [5] 周利华. 西藏某铜钼多金属矿浮选工艺流程优化实验 [J]. 矿产综合利用, 2025, 46(1):125-131.
 - [6] 何买高. 浮选柱在大宝山选铜精选的应用研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2022.
- 作者简介: 侯君一 (1976.5—), 毕业院校: 南方冶金学院 (江西理工大学) 所学专业: 选矿, 当前就职单位名称: 新疆维吾尔自治区地质局哈密地质大队, 就职单位职务: 矿业公司副总经理 (地质矿产开发院副院长), 职称级别: 副高。