

浮选机叶轮与定子间隙磨损对精矿品位和回收率的制约作用

瞿建平

呼伦贝尔驰宏矿业有限公司 内蒙古自治区 呼伦贝尔 021008

【摘要】：浮选机叶轮与定子间隙的磨损会显著影响矿浆流态与气泡分布，从而制约精矿品位与回收率的稳定性与提升。当间隙增大时，湍流强度下降、气泡粒径增大，矿粒与气泡的有效接触几率降低，导致有用矿物的捕收效率下降，同时夹带现象加剧，造成精矿品位降低。研究表明，间隙磨损不仅改变了浮选机内部的流场特征，还影响了充气量与矿浆循环路径，使分选过程的选择性减弱。通过对间隙变化过程及其对分选行为的影响进行分析，可为浮选设备的运行维护与工艺优化提供参考。

【关键词】：浮选机；叶轮与定子间隙；磨损；精矿品位；回收率

DOI:10.12417/2811-0536.25.12.017

引言

浮选作为细粒矿物分选的重要手段，其效率在很大程度上依赖于设备的结构与运行状态。叶轮与定子间隙作为浮选机内部的关键参数，直接影响矿浆循环、气泡生成及分布特性。长期运行中，磨损使间隙不断增大，破坏原有的流体动力学条件，进而影响气泡与矿粒的有效作用。间隙变化带来的分选效率波动，不仅会影响精矿质量，还可能造成有价矿物损失。深入探讨这一过程，有助于揭示磨损与选矿指标之间的内在联系。

1 叶轮与定子间隙磨损对浮选流场的破坏机理

浮选机在长期运行过程中，叶轮与定子之间的间隙不可避免地发生磨损，这一变化直接破坏了设备内部原有的流体动力学结构。叶轮的高速旋转本应在定子配合下形成稳定而高效的矿浆循环和均匀的气泡分散，但间隙增大使得局部压力差减弱，矿浆流速分布不均，形成涡流与死区，进而导致矿粒与气泡的空间分布失衡。原本在剪切作用下能够生成的大量细小气泡，因湍动减弱而减少，导致浮选机内部充气量下降，气泡表面积减小，捕收所需的界面条件也随之被削弱。矿浆与气泡在流场中失去均匀混合条件，直接影响到捕收剂在气泡表面的吸附与矿物颗粒的选择性黏附。

在间隙持续扩大的情况下，浮选机内部的能量传递效率明显下降，流场结构趋于紊乱。叶轮的叶片端部无法有效与定子导向叶片形成协同作用，造成矿浆流动方向偏移，循环路径拉长，部分矿浆未能进入高效分选区，形成无效循环。这种变化不仅减少了有用矿物颗粒与气泡的有效碰撞次数，还增加了脉石颗粒的夹带机会，使矿浆中有价矿物的分布更加分散。流场紊乱加剧了气泡合并现象，气泡直径增大导致上升速度加快，与细粒矿物的相对接触时间缩短，捕收概

率进一步降低。此类结构性破坏在矿浆流态监测和CFD数值模拟中均表现为湍动能衰减和速度梯度减弱，说明磨损后的间隙变化已显著改变了浮选机的工作特性。

间隙磨损还会影响气液相与固液相之间的相互作用规律。流场剪切力不足时，气泡在矿浆中上浮过程中易形成粗泡群体，导致矿物颗粒分选的选择性下降。有用矿物颗粒在捕收剂作用下的亲气性虽仍然存在，但由于流场能量不足，难以将其有效输送至气泡表面并保持稳定附着。定子失去对流场的有效约束，使得部分气泡在接触矿粒之前便已逸出矿浆，造成气体利用率降低。这一系列由间隙磨损引发的流体动力学恶化现象，不仅削弱了浮选机的充气与搅拌功能，还在本质上破坏了气泡—矿粒高效结合的微观条件，为后续精矿品位与回收率的下降埋下隐患。

2 间隙变化对气泡特性与矿粒碰撞概率的影响

叶轮与定子间隙的变化直接改变了浮选机内部的剪切条件和湍流特性，从而对气泡的生成、形态及分布产生显著影响。当间隙逐渐增大时，叶轮旋转所产生的局部高剪切力明显减弱，矿浆中气体的分散作用下降，气泡直径趋于增大，数量减少。细小而均匀的气泡有利于增大比表面积并提高矿粒捕收概率，而粗大气泡的形成则降低了气泡表面积，减少了与矿粒的接触机会。湍动能衰减还会导致气泡群分布不均，局部区域可能出现气泡聚集或空泡区，影响整个浮选槽的气液接触效率。气泡上升速度受直径增大的影响而加快，与细粒矿物的相对停留时间缩短，不利于弱亲气性矿物的附着，从而削弱了捕收选择性。

在间隙变化引起的流场扰动下，矿粒与气泡的碰撞概率受到多方面制约。湍流强度下降意味着矿粒与气泡之间的相对运动速度减缓，布朗运动与湍流扩散

对微细粒子的输运作用被削弱,使它们更难进入气泡的捕获半径范围内。对于粗粒矿物而言,较弱的剪切力不足以克服颗粒沉降趋势,导致其更多沉积于槽底,减少了与气泡的有效接触机会。气泡群体间的合并现象在此过程中更加频繁,使得矿粒必须依赖更短的路径和更强的亲气性才能完成附着过程,降低了整体捕收效率。由于间隙增大造成的流线改变,部分矿粒在循环路径中长时间处于无气泡区域,即便具有较高的亲气性,也无法有效实现附着,从而增加了矿物损失。

间隙变化对气泡与矿粒的相互作用还体现在微观附着动力学的改变上。气泡生成条件劣化导致表面活性剂的分布不均,使得气泡表面的疏水膜形成不稳定,缩短了矿粒在气泡上的滞留时间。在浮选机的充气过程中,叶轮与定子的协同作用减弱,使得气泡携带矿粒上浮时更易在中途脱落,尤其是对于细粒、片状或形状不规则的颗粒,这种影响更为明显。气泡群的不均匀性还会在矿浆中形成局部的过饱和区域,促进脉石颗粒的非选择性附着,加剧精矿中夹带现象。由此可见,间隙变化不仅改变了气泡的物理特性和分布模式,还深刻影响了矿粒的捕收动力学过程,最终制约了精矿品位与回收率的提升空间。

3 磨损导致精矿品位下降的原因分析

叶轮与定子间隙在浮选机运行中的持续磨损会直接破坏原有的流体动力学条件,导致精矿品位出现明显下降。间隙增大后,剪切力和湍流强度减弱,气泡的分散效果下降,生成的气泡直径增大且数量减少,导致比表面积减小,气泡与矿粒的有效接触机会也随之降低。由于细小均匀气泡对有用矿物的选择性捕收更为有利,而粗大气泡易造成脉石颗粒的非选择性附着,间隙磨损所引起的气泡特性变化直接削弱了分选过程的选择性。在这种条件下,捕收剂在气泡表面的吸附分布也不均匀,矿粒的附着过程受到干扰,造成有用矿物难以充分富集于精矿中,导致精矿品位下降。

随着间隙持续增大,浮选机内部流场紊乱程度加剧,矿浆循环路径被拉长或偏移,局部形成死区与低效区。有用矿物颗粒在这些区域中长时间停留而无法及时进入有效分选区,增加了被尾矿流带走的风险。流场的不稳定性使得气泡群体在矿浆中的分布呈现不均状态,部分区域气泡密度高而导致脉石夹带加剧,部分区域气泡稀少而使有价矿物失去附着机会。这种气泡分布的不均匀性,与湍流衰减引起的矿粒与气泡碰撞概率降低相叠加,使得精矿产品中混入了更多低品位物质。气泡合并频率增加,使得矿粒捕收依赖粗大气泡的快速上浮过程,减少了选择性分离所需的停

留时间,加剧了有用矿物与脉石的混合。

间隙磨损对精矿品位的影响还体现在非选择性夹带和脱附现象的增加上。由于流场能量不足,部分已附着于气泡的细粒有用矿物在上浮过程中易因冲击、扰动或气泡破裂而脱落,并重新进入矿浆,降低了其最终进入精矿的概率。同时,定子失去对流场的有效导向作用,使脉石颗粒更容易进入气泡捕获区域并随气泡进入精矿,增加了杂质含量。粗粒脉石在湍流不足的情况下不易沉降,反而通过低速流区被气泡卷入精矿,破坏了产品的纯度。长期运行中,这种由间隙磨损引发的选择性分选能力下降,将在累积效应下显著拉低精矿品位,并增加后续冶炼环节的能耗与成本,从而对整体选矿经济效益产生不利影响。

4 间隙磨损引起回收率降低的过程研究

叶轮与定子间隙的磨损会显著改变浮选机内部的流体动力学环境,从而对回收率造成持续性影响。间隙增大导致剪切力下降和湍流强度衰减,气泡的生成条件劣化,细小气泡数量减少且直径增大,气液比下降,矿粒与气泡的接触概率明显降低。细粒有用矿物对气泡粒径和表面积高度敏感,当气泡粒径过大时,其比表面积减小,附着位点减少,导致捕收率下降。流场紊乱使得气泡分布不均匀,一些区域气泡密度过高产生相互干扰,而另一些区域气泡不足使矿粒难以附着,这种空间分布的不均衡性直接削弱了浮选机对有用矿物的全覆盖捕收能力。部分有用矿物在长时间停留于低效循环区时未能与气泡接触便被尾矿流带走,使得回收率下降的趋势愈加明显。

在间隙磨损引起的流场变化中,矿浆循环路径被延长或偏移,使矿粒多次进入无效区域,虽然增加了停留时间,但未能增加有效附着机会。这种低效循环不仅浪费能量,还增加了矿粒沉降或被流体带出槽体的概率,进一步降低了回收率。对于粗粒矿物而言,湍流衰减意味着其被重新悬浮的可能性降低,更易沉积在槽底或进入尾矿排出口;对于微细粒矿物,湍流扩散不足会削弱布朗运动的作用,使其难以进入气泡的捕获半径。间隙增大造成的充气效率下降,使得总气泡数量减少,矿粒与气泡的碰撞频率降低,捕收剂的利用率随之下降,进一步削弱了浮选过程的分离效率。气泡合并加剧还会导致上浮速度加快,使矿粒与气泡的接触和附着时间缩短,降低了弱亲气性矿物的回收概率,这些因素叠加,构成了回收率下降的连续过程链条。

间隙磨损还会通过增加非选择性夹带和脱附现

象,对回收率产生间接影响。气泡携带脉石颗粒进入精矿,虽然在一定程度上增加了固体上浮量,但有效有价矿物的比例并未提升,反而使分选选择性下降。部分已附着的矿物在上浮过程中因气泡不稳定、流场扰动或冲击作用而脱落,并随矿浆流失到尾矿,这种二次损失在细粒和片状矿物中尤为严重。定子对流体导向能力的减弱,使得部分气泡在捕收前便提前逸出液面,造成气体利用率下降,进一步减少了矿粒的附着机会。长期运行中,这些由间隙磨损引发的流场劣化、气泡特性改变、循环路径低效化及非选择性分选现象,会在累积效应下显著压缩回收率的提升空间,使浮选系统的整体金属回收能力下降,并对生产成本与工艺稳定性产生持续性的不利影响。

5 基于间隙控制的浮选机运行与维护优化措施

叶轮与定子间隙的稳定控制是保障浮选机高效运行的重要前提,通过科学的运行管理与精确的设备维护,可以有效延缓磨损进程并减少其对精矿品位和回收率的不利影响。在设备运行过程中,应利用在线监测系统或定期检测手段实时掌握间隙变化情况,结合激光测量、声学传感或高精度位移传感等技术手段获取磨损数据,并建立磨损趋势数据库,以便在间隙接近临界值之前及时进行维护。根据不同矿石性质和生产负荷,优化叶轮转速、充气量与矿浆浓度的匹配关系,使设备在最佳水力条件下运行,从而减少局部冲刷与摩擦对叶轮和定子的损伤。

在维护环节中,应针对间隙控制采取结构优化和材料升级的综合措施。通过改进叶轮与定子的耐磨材料,如采用高铬铸铁、聚氨酯复合材料或陶瓷涂层,可显著提升抗冲蚀和抗磨损性能,从而延长使用寿命。合理的结构设计也可减少流场中高冲击区域的形成,降低磨损速率。维护过程中应严格按照标准工艺更换

易损部件,确保叶轮与定子间隙保持在设计范围内。为减少因检修停机造成的产能损失,可建立模块化更换机制,使叶轮与定子能够在短时间内拆装,从而缩短维护周期。此外,配合润滑与防腐蚀措施,可以有效减少间隙变化过程中因腐蚀与磨耗叠加导致的失效风险。

在生产管理与工艺优化层面,通过建立间隙变化与浮选指标之间的关联模型,可以实现基于数据驱动的运行调节,以补偿间隙变化带来的不利影响。当监测到间隙变化趋势可能影响气泡分散效率与矿粒捕收概率时,可提前调整药剂制度、矿浆循环量和充气强度,以补偿间隙变化带来的不利影响。可在不同生产阶段根据矿石性质差异制定间隙调整策略,例如在处理细粒高泥矿石时适当减小间隙以增强湍流和剪切作用,在处理粗粒矿石时则适度放宽间隙以减少颗粒磨损。在生产全周期中,将间隙控制与能耗优化、药剂消耗管理相结合,不仅能够稳定精矿品位与回收率,还能提升设备运行的经济性与可持续性,确保浮选机在长期运行中保持高效稳定的分选性能。

6 结语

叶轮与定子间隙的变化对浮选机的流体动力学特性、气泡分布及矿粒捕收过程产生连锁反应,是制约精矿品位与回收率稳定的重要因素。间隙磨损不仅破坏了气液固三相的有效接触条件,还加剧了非选择性夹带与矿粒脱附,导致分选过程的选择性下降。针对这一问题,运行阶段的精确监测、参数优化与维护阶段的耐磨材料应用、结构改进相结合,可有效延缓磨损进程并降低其负面影响。将间隙控制与工艺参数调整协同运用,可在保障设备稳定性的同时提升选矿经济效益,为浮选机的高效、长期运行提供坚实的技术保障。

参考文献:

- [1] 王建军.浮选机叶轮与定子间隙对浮选性能的影响[J].矿山机械,2019,47(5):72-76.
- [2] 刘海波.磨损对浮选机气泡特性与分选效果的作用机制研究[J].有色金属(选矿部分),2020,41(2):45-50.
- [3] 陈国强.浮选机内部流场变化及其对回收率的影响[J].金属矿山,2018,47(4):112-117.
- [4] 赵志远.间隙磨损对浮选机分选选择性的影响分析[J].矿冶工程,2021,41(6):89-94.
- [5] 孙伟.浮选设备耐磨材料的应用与性能优化[J].矿山机械,2022,50(3):66-70.