

浅析氧化铝预脱硅槽沉槽故障机理及搅拌系统优化

蒋伟涛

遵义铝业股份有限公司 贵州 遵义 563000

【摘要】：针对某氧化铝厂预脱硅槽在原料磨粒度极端跑粗工况下发生的沉槽及搅拌过载跳停故障，基于现场物性参数，采用斯托克斯公式与 Richardson-Zaki 干扰沉降修正模型计算不同粒度颗粒沉降速度，分析槽底沉积导致搅拌过载的力学过程；评估 HGT 高效轴流桨技改前后的水力性能与 CFD 流场，并提出深度优化方案。结果表明：50 目颗粒干扰沉降速度为 0.0270 m/s，较 100 目颗粒提高约 300%，超出原搅拌系统设计悬浮边界，是沉槽主导原因；HGT 桨技改后正常工况电流由 115 A 降至 80 A，轴功率降低约 30.4%，水力效率提高约 76%；推荐“变频调速+底桨优化”组合方案，可在基本不增加正常能耗前提下，将悬浮粒度上限提高 30%以上，极端跑粗工况下维持 4~8 h 稳定运行。

【关键词】：氧化铝；预脱硅槽；固液悬浮；HGT 轴流桨；沉槽；CFD；变频调速

DOI:10.12417/2705-0998.26.12.078

引言

预脱硅槽是氧化铝溶出工序的关键设备，承担矿浆加热、预脱硅反应和固液混合任务。搅拌系统需在高固含、高温条件下维持矿浆均匀悬浮。实际生产中，原料磨波动会造成矿浆粒度跑粗，改变颗粒沉降特性，严重时导致槽底沉积、搅拌电流攀升甚至过载跳停。本文以某氧化铝厂 3#预脱硅槽为对象，定量分析沉槽机理，评估 HGT 桨技改效果，并提出面向极端粒度工况的优化方案。

1 设备与工艺参数

1.1 槽体与搅拌系统

3#预脱硅槽为平底圆筒槽，配套三层轴流搅拌装置，槽壁设 4 块竖向挡板。主要参数见表 1。

表 1 槽体、搅拌系统及物料参数

参数	符号	数值	单位
槽体内径	D	14	m
槽体总高	H 总	20	m
正常液位	H	18.5	m
横截面积	A	153.94	m ²
有效容积	V	2848	m ³
挡板	—	4 块，宽约 1.4 m	—
主轴规格	—	φ 508×14	mm
设计转速	n	8.68	rpm
电机额定功率	Pe	75	kW
矿浆密度	ρ	1550	kg/m ³
固相密度	ρ s	3000	kg/m ³

液相密度	ρ L	1250	kg/m ³
液相粘度	μ	0.0015	Pa · s
固含	—	330~360	g/L

注：Cv 按矿浆密度反算， $Cv=(\rho-\rho L)/(\rho s-\rho L)=17.1\%$ ，用于沉降计算；固含为生产统计值。

1.2 粒度控制与跑粗实测

正常控制指标：50 目<1%，100 目<9%，160 目<19%。故障期间 8 月 1 日夜班实测：50 目 1.20%，100 目 16.02%，160 目 23.26%；8 月 2 日白班：50 目≥5%，100 目≥25%，160 目≥32%。矿浆细度严重跑粗。

2 沉槽故障机理

2.1 颗粒沉降速度

固液悬浮临界条件为：槽内流体轴向上升流速不小于颗粒沉降速度。自由沉降采用斯托克斯公式：

$$vt=dp^2g(\rho s-\rho L)/(18\mu)$$

高浓度干扰沉降采用 Richardson-Zaki 修正：

$$vt'=vt(1-Cv)^n$$

取 Cv=0.171，n=4.0，计算结果见表 2。

表 2 不同粒度颗粒沉降速度

筛网目数	粒径/μm	自由沉降速度/(m·s ⁻¹)	干扰沉降速度/(m·s ⁻¹)
50 目	300	0.0572	0.0270
100 目	150	0.0143	0.00675
160 目	96	0.00586	0.00277

由表 2 可知，控制粒径从 100 目变为 50 目时，干扰沉降速度由 0.00675 m/s 升至 0.0270 m/s，提高约 300%。搅拌系统

需提供约 3 倍以上的上升流速才能维持悬浮。

2.2 过载跳停过程

沉槽过程分三个阶段：

稳定悬浮阶段：正常粒度下底层浆浸没于均匀矿浆，电流约 80 A。

沉积发展阶段：粗颗粒向槽底沉降，从边角向中心形成高浓度沉积层，底层浆部分浸入沉积物料，阻力随沉积厚度增加，电流持续上升。

过载跳停阶段：沉积层达到临界厚度，轴功率超过电机额定功率，电流突破 138.8 A 额定值，最终升至 150 A 触发过载保护跳停。

3 现有 HGT 浆系统与技改效果

3.1 结构特点

底层采用 4 叶 HGT 高效轴流桨，中上层为 2 叶 HGT 桨。叶片为机翼型弧形截面，沿径向连续扭曲；轮毂为对开式法兰抱毂结构；三层桨按“下大上小、下多上少”布置。底层桨 ϕ 8.8 m、离底 1.4 m；中层桨 ϕ 7.5~8.0 m、离底 7.9 m；上层桨 ϕ 6.8 m、离底 14.4 m。底桨桨径比 $d/D=0.629$ ，离底高度比 $C/d=0.159$ ，层间距比 $L/D=0.464$ ，均处于轴流桨较优范围。

3.2 水力特性与能效

搅拌功率和循环流量分别为：

$$P=N_p \cdot \rho \cdot n^3 \cdot d^5, Q=N_q \cdot n \cdot d^3$$

水力效率 $\eta=N_q/N_p$ 。CBY 桨与 HGT 桨对比见表 3。

表 3 桨型水力特性对比

桨型	功率准数 N_p	流量准数 N_q	水力效率 η
CBY 轴流桨	0.32	0.56	1.75
HGT 高效轴流桨	0.22	0.68	3.09

HGT 桨水力效率较 CBY 桨提高约 76%，同等悬浮效果下功耗降低约 40%。技改前后运行参数见表 4。

表 4 技改前后运行参数对比

项目	原 CBY 桨正常	原 CBY 桨跑粗	HGT 桨正常
电流/A	115	150（跳停）	80
轴功率/kW	62.1	81.1（超额定）	43.2
电机负载率/%	82.8	108.1	57.6
悬浮效果	细颗粒悬浮	无法悬浮，槽底沉积	稳定悬浮，底积料减少

技改后正常工况功耗降低约 30.4%；按年运行 8000 h 计，

年节约 15 万 kWh。

3.3 CFD 流场

CFD 数值模拟显示，技改后三层 HGT 桨形成“中心下冲、槽壁上返”轴向大循环流场，底层桨峰值流速近 2m/s，槽底主流流速 ≥ 0.5 m/s，可实现矿浆悬浮混合，但槽底边角存在低速滞流区。该沉槽故障并非桨叶技改失效，现场 50 目粗颗粒含量突增至 5% 以上，远超设计基准，颗粒沉降速度大幅提升，属于极端工况超设计运行引发故障。

4 深度优化方案

本次深度优化以不增加正常工况能耗、提高极端粒度跑粗工况耐受能力、延长故障缓冲时间、降低停机风险为原则，所有的优化措施都是在现有的 HGT 搅拌系统上进行升级改造，不需要对设备进行大规模的更换或者改造槽体结构，具有低成本、易实施、见效快的特点。根据目前的流场缺陷和沉槽机理，从桨叶翼型、空间布置、智能调速、槽底辅助防沉积四个方面细化优化方案，各个方案的技术原理、实施细节、优化效果以及适用场景如下。

4.1 桨叶翼型精细化优化

现有的 HGT 桨叶为通用型机翼结构，全截面参数相同，不能适应槽内不同半径区域的流体运动特性，叶尖涡流损耗、叶根流场滞流问题还存在优化空间。本次采用分区差异化翼型优化思路，根据桨叶各个径向位置流体负荷、流速特点，精确调节结构参数来达到流场效率最大化的目的。

叶根区域（0~30%桨径）流体流速小、扭矩负荷大，增大叶片弯度、提高运行攻角来增强叶根流体牵引力，消除叶根滞流区，防止根部积料，提高桨叶结构承载强度，适应极端工况下高负载运行。

主工作区域（30%~80%桨径）是桨叶的核心做功区，保留中等弯度的标准翼型参数，平衡功率消耗和流体输送效率，保证常规工况下的节能优势，维持现有的节能优势。

叶尖区域（80%~100%桨径）：该区域流速高、易产生涡流损耗，减小叶片弯度、降低攻角，增加弧形导流凹面、端面圆弧钝化、小幅下掠结构，改善叶尖流体流向，大幅度降低叶尖涡流损耗和流体径向扩散。同时对叶片前缘做大半径钝圆过渡，把叶片最大厚度点后移至弦长 40%~50%处，后缘用弧形钝尾设计，减少流体分离损耗。

经流场模拟计算可知，翼型精细化优化后搅拌系统水力效率可以提高 8%~12%，叶尖涡流损耗降低 15%以上，叶片受力更加均匀，耐磨冲刷性能明显改善，设备耐磨使用寿命提高 20%以上，在不增加能耗的情况下，小幅提高全槽颗粒悬浮能力。

4.2 桨叶空间布置优化

原有三层桨适配常规工况，但底桨离底高度偏大、中层桨流场覆盖不足，槽底边角扰动弱，易出现粗颗粒沉积。为此从安装高度、桨径、层间距、增设扫底结构开展优化：降低底桨离底高度至 1.0-1.2m，减少射流能量损耗；中层桨桨径扩大至 8.2-8.5m，强化中下层矿浆输送；调整桨叶非等距排布，缩小底-中层间距，兼顾上部混合空间；底层加装扫底副叶片，消除槽底流场死角。优化后槽底扰动能力提升 10%-15%，悬浮临界粒度上限提高约 15%，边角沉积启动时间延长 2 倍以上，可应对轻、中度矿浆跑粗工况，且不增加运行能耗。

4.3 变频调速智能控制优化

原有搅拌系统定速 8.68rpm，仅适配常规粒度工况，工况波动无调节余量，极端跑粗工况无法通过提流速抑制颗粒沉降。依托现有 75kW 电机负载裕量，加装变频系统与在线粒度检测设备联动实现智能调速。正常工况维持 8.68rpm、80A 低能耗运行；检测 50 目颗粒>2%切换应急模式。转速提升 15% 后功率约 65.7kW、电流 122A，低于额定电流 138.8A，无过载风险，可根据跑粗程度调节转速，抵御颗粒沉积风险。

4.4 槽底辅助防沉积系统优化

原有的平底槽体结构存在着固有的流场缺陷，平底直角结构造成槽壁边角处流体的滞流现象十分严重，是粗颗粒沉积的主要死角。通过槽体结构微调和辅助扰动装置配合，形成多道防沉积防线，对极端重度跑粗工况做兜底保障。

一是槽底缓锥的改造。将原来的平底结构改成 170° 大角度缓锥底，半锥角设为 5°，改造后的槽底没有直角死角，沉积趋势的粗颗粒在重力的作用下可以快速向槽底中心高速射流区滑动，被高速流体带走悬浮，彻底消除边角沉积隐患，不影响设备的有效容积和正常的生产工况。

二是加大低压空气扰动。在槽底均匀布置低压空气喷口，日常工况关闭，当矿浆重度跑粗、粒度超标严重时，自动开启空气喷射系统，利用气泡上升扰动增强槽底流体湍流度，破碎初期沉积层，辅助提高颗粒悬浮能力，作为极端工况应急兜底措施。

参考文献：

- [1] 陈宏刚.搅拌槽内固液悬浮过程研究进展[J].化工进展,2018,37(8):3050-3058.
- [2] 张明,李强.轴流桨搅拌槽流场 CFD 模拟与实验研究[J].过程工程学报,2019,19(5):1023-1030.
- [3] 王建国,刘洋.高浓度固液悬浮搅拌系统优化设计[J].矿冶工程,2020,40(3):78-83.
- [4] Ruschle G,Etchells III A W,Davis R J.Comparison of mixing performance of different impeller types[J].Chemical Engineering Science,2015,18:125-134.
- [5] 赵志强,孙志岗.搅拌槽挡板对固液悬浮性能的影响研究[J].化工机械,2021,48(2):156-162.

三是挡板的改进。将原来的 1.4m 宽挡板加宽到 1.75m（槽径 1/8 最优宽度），挡板底部设斜切结构，改善流体导流状况，抑制圆周旋流，加强轴向上升流场，根据现场流场情况，可配合导流筒错位布置，更均匀地分布全槽流速。

4.5 各优化方案效果对比与最优组合选型

平底改为缓锥底，锥底夹角约 170°，半锥角约 5°，引导粗颗粒向中心强射流区滑动。槽底环形布置低压空气喷口，极端跑粗时开启，作为最后防线。挡板可适当加宽至槽径 1/8，约 1.75 m，底部斜切，必要时配合导流筒错位布置。

表 5 优化方案效果预估

方案	改造成本	日常能耗	悬浮粒度上限提升
翼型精细化	低	无	10%~12%
底桨下调+副叶片	低	无	10%~15%
变频应急模式	低	仅短时增加	10%~15%
中层桨放大+非等距	中	小幅上升	15%~20%
锥底+气流辅助	中高	应急开启	极端工况兜底

推荐"变频调速+底桨优化"组合：正常工况保持节能；50 目 2%~3%时转速提高 10%，稳定悬浮；50 目 5%以上时转速提高 15%，维持 4~8 h 运行，为原料磨故障处理争取时间。

5 结论

本次沉槽根源为原料磨粒度极端跑粗，50 目颗粒干扰沉降速度较 100 目提高约 300%，超出搅拌系统设计悬浮边界，导致槽底沉积和过载跳停，与 HGT 桨技改设计质量无直接关联。

HGT 桨技改后正常工况电流由 115 A 降至 80 A，运行功率降低约 30.4%，混合效果和底积料状况明显改善，CFD 流场表现良好。

通过翼型精细化、桨叶空间布置优化、变频调速及槽底辅助防沉积，可在基本不增加正常能耗前提下，将悬浮粒度上限提高 30%以上，增强极端工况耐受能力。

建议同步实施底桨高度下调与叶尖修型，建立原料磨粒度与搅拌电流联动监控，并长期推进原料磨系统稳定性优化