

# 原料矿浆细度控制不当导致拜耳法流程能耗上升的现场分析

陈 林

遵义铝业股份有限公司 贵州 遵义 563100

**【摘要】**：拜耳法是氧化铝生产的主要工艺，它影响着流程的稳定性以及能耗水平。本文以氧化铝生产现场为研究对象，在对原料磨制、溶出、沉降分离、输送等关键工序进行跟踪的基础上，分析矿浆细度控制不当（过粗或过细）所造成的具体表现及对各个工序能耗的影响机理，找出现场控制过程中存在的设备、操作、检测等各方面的的问题，并提出相应的优化措施并加以验证。结果表明，原料矿浆细度控制在合理范围内（+50#筛上 $\leq 1\%$ ；+100#筛上 $\leq 20\%$ ），可以有效地降低磨矿电耗、溶出蒸汽消耗和沉降分离能耗，总流程能耗降低6%以上。本文的研究可以给拜耳法氧化铝生产过程中矿浆细度的现场控制提供实践指导，帮助企业达到节能降耗、提质增效的目的。

**【关键词】**：拜耳法；矿浆细度；能耗上升；现场分析；优化控制

DOI:10.12417/2811-0722.26.07.064

## 1 引言

能耗是氧化铝生产的主要成本组成，占生产成本的30%~40%，原料矿浆制备和后续相关工序能耗占总能耗的50%以上。原料矿浆细度是磨矿工序的主要产出指标，它的好坏会直接影响矿浆的物理化学性质，进而影响到溶出、沉降、过滤、输送等一系列后续工序，从而引起流程能耗的波动。现场生产过程中，原料矿浆细度控制不好问题十分普遍，主要分为两种情况，即细度偏粗（跑粗）和细度过细（过磨）。细度跑粗会造成铝土矿解离不充分，溶出反应不完全，加大溶出工序能耗；细度过细会增大矿浆粘度，降低分离效率，增大研磨、输送和沉降工序能耗。本文以某氧化铝企业拜耳法生产线现场数据为基础，从矿浆细度控制不当时对各个工序能耗的影响入手，找出问题根源并提出相应的优化措施，为现场生产提供技术支持，助力企业节能降耗。

## 2 拜耳法流程及矿浆细度控制要求

### 2.1 拜耳法核心流程简介

拜耳法氧化铝生产主要流程有原料制备（铝土矿破碎、磨矿）、矿浆配制、预脱硅、高压溶出、赤泥沉降分离、精液分解、氢氧化铝过滤洗涤、焙烧、氧化铝产品。原料磨制工序把铝土矿和循环碱液一起磨制成合格矿浆，矿浆细度直接影响后面溶出工序的反应效率和沉降分离工序的处理效果，是原料制备和后续工序之间的关键纽带。该氧化铝厂拜耳法工艺配置5台 $\phi 3.6 \times 9\text{m}$ 双仓两段式溢流型原料球磨机，单台设计产能90t/h，用于铝土矿矿浆磨制。磨机沿进料至出料分为I仓、II仓双研磨仓体，采用分段级配钢球研磨。一段I仓：大规格钢球级配，球径 $\phi 110 \sim \phi 130\text{mm}$ ，以破碎粗颗粒物料为主；二段II仓：中小规格钢球，球径 $\phi 80 \sim 100\text{mm}$ ，承担物料细磨作业；整体研磨体球径区间80~130mm，通过两段分区研磨，实现矿石破碎+细磨一体化制浆。磨制后矿浆经过分级设备处理后再进行预脱硅和溶出工序。

### 2.2 矿浆细度控制标准及现场检测方法

根据现场生产实际和工艺要求，该企业拜耳法原料矿浆细度控制标准为+50#筛上 $\leq 1\%$ ；+100#筛上 $\leq 20\%$ ，+100#筛上残留物占固体物料重量百分比 $\leq 10\%$ ，固含350~400g/L，细度合格率目标为80%以上。矿浆细度用筛分法测定，现场采用人工取样，用100目标准筛进行筛分，称量筛上残留物的重量，计算筛上物百分比，作为细度控制的依据。理想情况下矿浆细度要控制在一定的范围内，既能够保证铝土矿颗粒充分解离，使氧化铝水合物暴露出来，加快溶出反应速度，又不能造成过磨造成矿浆粘度增大，保证后续工序的顺利进行，达到能耗最优的目的。

## 3 原料矿浆细度控制不当的现场表现及问题排查

### 3.1 现场表现

通过对该企业拜耳法生产线连续一个月的现场跟踪发现，原料矿浆细度控制不当时存在两种形式，并且都伴随着能耗异常上升。一是细度偏粗（跑粗），+50#筛上 $\leq 1\%$ 筛上物百分比一直大于1%，+100#筛上物百分比一直大于10%，最高达到15%。此时溶出工序蒸汽消耗增加，赤泥沉降速度变慢，管道磨损加重；磨矿工序返砂比增大，原料磨电流偏高，电耗增加。二是细度过细（过磨），+100#筛上物百分比小于5%，矿浆粘度明显增大。此时磨矿工序的电耗大幅上升，原料磨产能降低，沉降分离工序的絮凝剂消耗增加，底流泵、输送泵的负荷增大，电耗上升，预脱硅槽的沉淀量异常，影响后面工序的稳定。

### 3.2 问题排查

原料磨研磨介质级配不合理，钢球配比失调，部分磨机I仓钢球直径过大，破碎能力差，造成粗颗粒不能被破碎；II仓钢球磨损严重，细磨能力下降，容易产生跑粗现象；部分分级设备（水力旋流器）进料压力不稳定，分级效率低，不能很好地分离出粗颗粒，筛板形式选择不合理，部分筛板眼为同心圆式，物料通过速度快，使细度跑粗更加严重。另外原料磨筒体

转速不稳定, 过高或者过低都会影响到研磨效果, 造成细度波动。现场操作人员没有按照工艺要求调整进料量和研磨介质的补充周期, 进料量波动过大, 造成原料磨内物料停留时间不足或者过长, 出现跑粗或者过磨; 研磨介质补充不及时, 钢球、钢锻消耗后没有及时补加, 造成研磨能力下降; 操作人员对细度检测结果响应不及时, 发现细度异常后没有及时调整操作参数, 造成异常持续。现场采用人工取样检测, 检测频率为每2小时1次, 检测滞后时间长, 不能及时反映矿浆细度的变化, 造成操作调整滞后; 部分检测工具(标准筛)磨损严重, 检测精度降低, 产生检测数据偏差, 误导操作调整; 没有建立在线检测系统, 不能对细度进行实时监控和自动调节。

## 4 矿浆细度控制不当对拜耳法流程能耗的影响分析

### 4.1 对磨矿工序能耗的影响

磨矿工序是拜耳法流程能耗的重要部分, 占总流程能耗的25%~30%, 主要消耗电能。矿浆细度控制不当对磨矿能耗影响最大, 两种异常情况都会造成能耗增加。细度偏粗时, 粗颗粒物料不能完全破碎, 部分未达标的粗颗粒被分级设备返回到原料磨重新研磨, 造成返砂比增大, 原料磨负荷增大, 电流上升。现场数据表明, 结合 $\phi 3.6 \times 9\text{m}$ 双仓溢流磨的两段研磨特性, 矿浆细度需严格控制在工艺标准范围内(+50#筛上物 $\leq 1\%$ 、+100#筛上物 $\leq 10\%$ 、+160#筛上物 $\leq 20\%$ ), 既要避免粗颗粒物料导致的磨损加剧、能耗上升及后续工艺效率下降, 也要防止过度研磨造成的能耗激增、产能降低。合理控制矿浆细度, 既能保障原料磨稳定高效运行, 降低单位能耗及维护成本, 也能匹配后续溶出工序(260~265℃正常运行、最高270℃)的工艺要求, 确保整个拜耳法矿浆制备环节的经济性与稳定性。

### 4.2 对溶出工序能耗的影响

溶出工序是拜耳法流程中能耗最大的一个环节, 主要消耗蒸汽, 能耗占总流程能耗的40%~45%, 其能耗水平和矿浆细度有关。溶出工序的核心就是使铝土矿中的氧化铝水合物与碱液充分反应, 生成铝酸钠溶液, 矿浆细度影响反应接触面积及反应效率。细度偏粗时, 铝土矿颗粒解离不充分, 部分氧化铝水合物被杂质包裹, 不能和碱液充分接触, 造成溶出反应不完全。为了提高溶出率, 现场要提高溶出温度、压力, 延长溶出时间, 从而增加蒸汽消耗。现场数据显示, 当+100#筛上物百分比由8%提高到15%的时候, 溶出温度要从260℃提高到270℃, 溶出时间要从60min延长到75min, 单位矿浆溶出蒸汽消耗从1.2t/t增加到1.5t/t, 上升了25.0%。未反应的粗颗粒会随赤泥排出, 造成氧化铝回收率降低, 间接增加能耗。细度过细时, 矿浆粘度增大, 碱液和铝土矿颗粒的扩散速度变慢, 虽然接触面积增大, 但是反应效率提高有限, 矿浆流动性变差, 在加热过程中热量传递效率降低, 需要消耗更多的蒸汽来保持溶出温度。

### 4.3 对沉降分离工序能耗的影响

沉降分离工序的主要作用就是将溶出后的矿浆(铝酸钠溶液和赤泥混合物)分离出来, 得到纯净的铝酸钠精液, 主要消耗电能(泵类运行)和药剂(絮凝剂), 能耗占总流程能耗的10%~15%。矿浆细度影响赤泥的沉降速度以及分离效率。细度偏粗时, 赤泥颗粒大, 沉降速度快, 但是部分粗颗粒赤泥中包含有未反应的氧化铝, 会增大赤泥的洗涤量和洗涤次数, 进而增加水泵的运行电耗。粗颗粒赤泥对沉降槽底部管道和设备的磨损增大, 维护能耗提高。现场数据表明, 当+100#筛上物百分比由8%提高到15%的时候, 沉降槽洗涤水泵的单位电耗从8kWh/t增加到了10.5kWh/t, 增加了31.25%。+50#筛上为更粗一级粒度, 严控+50#筛上 $\leq 1\%$ 后, 细料占比增幅更大, 矿浆输送阻力、循环水量需求同步上升, 沉降槽洗涤水泵单位电耗将出现明显上涨, 能耗增幅会高于常规粗粒度波动影响。细度过细时, 赤泥颗粒细小, 沉降速度明显变慢, 为了加快沉降速度, 现场需要增大絮凝剂的用量, 并且延长沉降时间, 造成沉降槽处理能力降低, 需要增加沉降槽的运行台数, 水泵、搅拌器等设备的运行时间变长, 电耗增加。现场数据显示, 当+100#筛上物百分比从8%下降至3%时, 絮凝剂消耗从0.8kg/t上升至1.3kg/t, 沉降工序单位电耗从8kWh/t上升至11.2kWh/t, 上升幅度达40.0%。另外, 细颗粒赤泥容易堵塞过滤设备, 使过滤效率降低, 从而增加能耗。

### 4.4 对输送能耗的影响

细度偏粗时, 矿浆中粗颗粒含量高, 会造成泵体磨损增大、输送阻力加大, 使泵类负荷增大、电耗上升。粗颗粒容易堵塞管道、阀门, 经常清理造成输送效率低、设备运行能耗高。现场数据表明, 当+100#筛上物百分比由8%提高到15%的时候, 输送泵单位电耗由原来的5kWh/t增加到现在的6.8kWh/t, 上升了36.0%。细度过细时, 矿浆粘度增大, 流动性变差, 输送阻力增大, 泵体要消耗更多的电能来保持正常的输送流量。现场数据表明, 当+100#筛上物百分比由8%降到3%的时候, 输送泵单位电耗从5kWh/t增加到7.2kWh/t, 增加了44.0%。

### 4.5 综合能耗影响汇总

根据以上各个工序的能耗影响分析, 汇总出不同的矿浆细度下总流程能耗, 如下表1所示。从表1可知, 矿浆细度控制在标准范围内(+100#筛上 $\leq 8\%$ ), 单位能耗最低为210kWh/t; 细度偏粗(+100#筛上15%), 单位能耗增加到265kWh/t, 增加26.2%; 细度过细(+100#筛上3%), 单位能耗达到278kWh/t, 增加32.4%。矿浆细度控制不当会造成拜耳法流程综合能耗大幅增加, 改善细度控制是节能降耗的关键。

表1 综合能耗影响

矿浆细度 (+100# 筛上 物%)	磨矿电 耗 (kWh/ t)	溶出蒸 汽消耗 (t/t)	沉降电 耗 (kWh/ t)	输送电 耗 (kWh/ t)	总流程 单位能 耗 (kWh/t )	能耗 上升 幅度 (%)
3(过细)	49	1.32	11.2	7.2	278	32.4
8(标准)	38	1.2	8	5	210	0
15(偏粗)	46	1.5	10.5	6.8	265	26.2

(注:表中蒸汽消耗按1t蒸汽折合80kWh电能计算,总能耗为各工序能耗折算后总和。)

## 5 优化措施及实施效果

### 5.1 优化措施

针对现场排查出的问题,结合矿浆细度对能耗的影响机制,从设备优化、操作规范、检测升级三个方面制定针对性优化措施,确保矿浆细度稳定控制在标准范围内。设备优化方面,一是优化研磨介质级配,采用爬坡式配球方案,将球磨机优化为双仓溢流磨,通过调整第一仓 $\phi 80\sim\phi 90\text{mm}$ 钢球配比提升破碎能力、更换并补充第二仓 $\phi 35\times 50\text{mm}$ 钢锻保障细磨效果,以稳定矿浆细度、提升磨矿效率、降低电耗,支撑拜耳法全流程高效低耗运行。二是改进分级设备,将部分同心圆式筛板更换为放射状筛板,降低物料通过速度,提高分级精度;调整水力旋流器进料压力,稳定在0.07~0.105MPa,优化旋流器结构,提高分级效率,减少粗颗粒返回量。三是校准原料磨筒体转速,将转速稳定在设计范围内,避免转速偏高或偏低导致的研磨效果不佳。操作规范方面,一是制定标准化操作流程,明确进料量控制范围,避免进料量波动过大,确保原料磨内物料停留时间稳定;规定研磨介质补充周期,定期检查钢球、钢锻消耗情况,及时补加,维持研磨能力稳定。二是加强操作人员培训,提高操作人员对细度控制重要性的认识,规范取样、检测操作,确保检测数据准确;建立细度异常响应机制,发现细度偏离标准时,及时调整进料量、研磨介质配比等参数,避免异常持续。检测升级方面,引入矿浆细度在线检测设备,安装在原料磨出料口和分级设备溢流口,实现细度实时监测,检测频率提升至每10分钟1次,消除检测滞后问题;定期校准标准筛等检测工具,确保检测精度;建立细度数据台账,实时分析细度变化

### 参考文献:

- [1] 苏元机.高压辊磨机应用在氧化铝矿浆原料生产的新工艺初探[J].企业科技与发展,2017,(05):73-75.
- [2] 池玉蕾,唐丽云,刘庭忠,等.矿浆中和酸性废水系统中硫酸盐还原功能菌群结构与环境影响特征[J/OL].微生物学通报,1-17[2026-04-13].
- [3] 侯英,唐崇亮,杨海龙,等.矿浆流变性对浮选效果影响的研究进展[J].贵州大学学报(自然科学版),2026,43(02):66-77.
- [4] 郭凯,熊新,周雨昕.数据-仿真融合驱动的铁精矿浆管道临界流速预测[J/OL].化工进展,1-14[2026-04-13].

趋势,为操作调整提供数据支撑。

### 5.2 实施效果

将上述优化措施在该企业拜耳法生产线实施,连续运行1个月,跟踪矿浆细度及各工序能耗变化,确保数据真实可靠。矿浆细度控制效果显著提升,+50#筛上物稳定 $\leq 1\%$ 、+100#筛上物稳定在6%~8%(符合 $\leq 10\%$ 标准)、+160#筛上物稳定 $\leq 20\%$ ,细度合格率从原来的65%提升至95%以上,彻底解决了细度偏粗和过细的问题,矿浆质量稳定性大幅提高。各工序能耗均明显下降,其中磨矿工序单位电耗从38kWh/t下降至34kWh/t,下降幅度达10.5%;溶出工序单位蒸汽消耗从1.2t/t下降至1.08t/t,下降幅度达10.0%(折算电耗从96kWh/t下降至86.4kWh/t);沉降工序单位电耗从8kWh/t下降至7.2kWh/t,下降幅度达10.0%;输送工序单位电耗从5kWh/t下降至4.5kWh/t,下降幅度达10.0%。总流程单位能耗从210kWh/t下降至192kWh/t,下降幅度达8.6%,按该生产线年产能100万吨氧化铝计算,每年可节约能耗1800万kWh,折合标准煤约2212吨,节能效果显著。同时,矿浆细度稳定达标后,溶出反应更充分,氧化铝回收率提升1.2%,企业经济效益和环保效益均得到明显改善。

## 6 结论

本文通过对拜耳法生产线的现场跟踪和分析,明确原料矿浆细度控制不当是导致流程能耗上升的重要原因,主要结论如下。

- (1) 矿浆细度控制不当主要表现为细度偏粗和过细,根源在于设备研磨介质级配不合理、分级效率低,操作人员操作不规范,以及检测滞后、精度不足。
- (2) 细度偏粗会导致磨矿返砂比增大、溶出反应不完全、沉降洗涤难度增加、输送阻力上升,各工序能耗均显著上升;细度过细则会增加研磨阻力、降低溶出热量传递效率、减慢赤泥沉降速度、增大输送阻力,同样导致能耗上升,其中细度过细对能耗的影响更为显著。
- (3) 通过优化研磨介质级配、改进分级设备、规范操作流程、升级检测系统等措施,可将矿浆细度稳定控制在标准范围,实现总流程能耗下降8%以上,同时提升产品质量和生产效率。