

Research on the improvement of pseudo-boehmite production process based on equipment parameter optimization

Dongcheng Li

Chalco Zhongzhou New Material Technology Co., Ltd., Jiaozuo, Henan, 454100, China

Abstract

This study aims to address the challenges of delayed response of equipment parameters, insufficient energy efficiency of thermal systems, and production interruptions caused by mechanical vibrations in the industrial production of pseudo boehmite. A systematic analysis was conducted on 217 sets of production test data from July 27 to October 30, 2023, and a quantitative relationship model between equipment operating parameters and production performance was established using methods such as multivariate regression analysis and response surface methodology. The study revealed the influence mechanism of parameters such as host speed (28.5-90Hz), blowing and induced draft frequency (28-42Hz), and natural gas flow rate (87-134m³/h) on product particle size (D50=20-45 μm), crystallinity (72-89%), and unit energy consumption (1.8-2.3GJ/t). The results show that the synergistic effect of parameters can explain 83.2% of the fluctuation in production efficiency. Based on this, the proposed parameter optimization scheme reduces the host shutdown rate by 67%, increases the product qualification rate to 95.2%, and reduces energy consumption by 18.7%, providing a quantifiable control method for the optimization of chemical powder material processes.

Keywords

pseudo boehmite; Process optimization; Parameter coupling; Energy efficiency analysis; quality control

基于设备参数优化的拟薄水铝石生产工艺改进研究

李东成

中铝中州新材料科技有限公司, 中国·河南焦作 454100

摘 要

本研究针对拟薄水铝石工业化生产中设备参数响应滞后、热工系统能效不足及机械振动引发生产中断等难题, 系统分析 2023 年 7 月 27 日至 10 月 30 日的 217 组生产试验数据, 综合运用多变量回归分析、响应面法等方法, 建立设备运行参数与生产性能的量化关系模型。研究揭示了主机转速 (28.5 - 90Hz)、鼓风机风频率 (28 - 42Hz)、天然气流量 (87 - 134m³/h) 等参数对产品粒度 (D50 = 20 - 45 μm)、结晶度 (72 - 89%) 及单位能耗 (1.8 - 2.3GJ/t) 的影响机制。结果表明参数协同效应可解释生产效率波动的 83.2%, 据此提出的参数优化方案使主机跳停率降低 67%, 产品合格率提升至 95.2%, 能耗下降 18.7%, 为化工粉体材料工艺优化提供可量化调控方法。

关键词

拟薄水铝石; 工艺优化; 参数耦合; 能效分析; 质量控制

1 引言

拟薄水铝石 (Pseudoboehmite, $\text{AlOOH} \cdot n\text{H}_2\text{O}$) 作为石油裂化催化剂的关键载体材料, 其比表面积 (250 - 400m²/g) 与孔结构直接决定催化剂性能 [1]。在工业化生产过程中, 普遍存在设备参数响应滞后问题, 导致产品结晶度波动范围达 ±15%; 热工系统能效比不足 65%, 能源浪费严重; 机械振动引发的连续生产中断频发, 影响生产稳定性 [2]。当前相关研究多聚焦单一参数调控, 缺乏对多参数耦合作用的系统性分析 [3]。

本研究创新性构建“设备参数 - 过程状态 - 产品性能”

【作者简介】李东成 (1974-), 男, 中国山西长治人, 本科, 工程师, 从事精细氧化铝研究。

三级关联模型, 通过 96 天全流程试验, 运用 Pearson 相关性分析和主成分回归方法, 旨在揭示转速、风压、温度间的动态平衡机制, 建立基于能耗约束的质量预测方程, 并开发参数自适应调控算法, 解决拟薄水铝石生产中的实际难题^[1]。

2 材料与方法

2.1 生产系统概况

试验采用 XSG - 10 - 5 型旋转闪蒸干燥机 (江苏范群干燥设备厂), 该设备自 2018 年 7 月投产, 受设备老化影响, 效率年衰减约 3.2%。例如, 轴承磨损导致转速波动率从新机的 ±1.2Hz 增至 2023 年的 ±2.5Hz。实际运行中, 通过变频器调节鼓风机频率至 28 - 42Hz 时, 风量超出设计上限 33%, 系统压损增加 17%; 主机转速在 33Hz 时, 电机处于 110% 负荷的轻微超载状态。设备核心参数详见表 1。

表 1

参数类别	设计值	实测范围（试验期）	关联影响
主机内径	1650mm	-	决定物料停留时间
处理风量	6000m³/h	4400 - 8000m³/h	影响干燥速率与负压平衡
蒸发能力	660kg 水 /h	380 - 720kg 水 /h	限制最大进料湿度
电机功率	18.0kW	15.5 - 22.3kW	与主机转速正相关（ $r=0.81$ ）
出厂年份	2018 年 7 月	-	设备老化导致效率年衰减约 3.2%

2.2 数据采集方案

为确保数据质量，采用多源异构数据同步采集系统，涵盖设备运行参数、物料特性、能耗数据三大类。通过 OPC-UA 协议实现设备数据同步采集，采样间隔为 10s。关键监测点包括主机参数、风系统参数、热工参数等设备运行数据；粒度分布、水分含量、化学成分等物料特性数据；电力消耗、天然气消耗等能耗数据^[2]。

2.3 分析方法

本研究运用多维度数据分析方法。通过 Pearson 相关系数和 Spearman 秩相关进行参数敏感性分析，评估各参数对关键指标的影响强度。研究发现，主机转速与磨后 D50 粒径呈强负相关（ $r=-0.82$, $p<0.01$ ），天然气流量与结晶度呈正相关（ $r=0.65$, $p<0.05$ ）。

运用响应面法（RSM）和主成分回归（PCR）进行多参数耦合效应分析，通过 Box-Behnken 实验设计，建立结晶度的模型方程： $Y=80.2+2.1X_1+1.5X_2-0.8X_1X_2+0.3X_1^2$ （ X_1 为转速， X_2 为风量， $R^2=0.91$ ）。

采用 NSGA-II 算法建立约束优化问题，进行能效-质量多目标优化，获取能耗与质量的最优平衡解集。利用 LSTM 神经网络对主机跳停等瞬态问题进行动态过程建模，预警准确率达 89%。此外，通过 ANOVA 分析和蒙特卡洛模拟进行统计检验与不确定性分析。

3 设备参数与生产性能的量化关系

基于 96 天的 217 组有效生产数据，深入解析关键设备参数对拟薄水铝石生产效率、产品质量及能耗的影响机制。

3.1 主机转速的临界效应

研究发现，当主机转速从 28.5Hz 提升至 42Hz 时，物料 D50 粒径从 35 μ m 降至 12 μ m，降幅达 66%，但继续提高转速会导致过度粉碎。单位能耗在 33Hz 时达到最低值（ 1.89 ± 0.12 GJ/t），低于或高于此转速，能耗均会增加。将转速稳定在 33 - 36Hz 区间后，产能提升 18%，粒度合格率从 72% 提高至 89%。

3.2 风系统参数的协同控制

鼓风/引风频率比（ β ）存在最优值 1.25 ± 0.05 ，偏离该比例会引发物料堆积或粉尘逃逸等问题。建立负压-温度耦合模型： $\Delta P=0.78Q_{air}^{1.2}+0.12T_{mix}-15.6$ （ ΔP 为系统负压/kPa， Q_{air} 为风量 m³/min）。例如，8 月 2 日调整引风频率后，混合温度稳定性显著提升，主机跳停次数减少

62%。

3.3 天然气流量的热工平衡

响应面分析结果显示，常规生产时，天然气流量控制在 90 - 100m³/h 可实现结晶度与能耗的平衡^[3]；在高纯产品生产需求下，控制在 105 - 110m³/h 可使结晶度大于 84%。

3.4 多参数协同效应

确定最佳参数组合为转速 36Hz、风量 95m³/h、风频比 1.28，在此条件下可实现结晶度 83.7%、能耗 1.92GJ/t、产能 0.9t/h。同时，LSTM 模型能够对异常工况进行预警，如当转速 <30Hz、湿度 >15% 且电流 >80A 时，跳停风险概率超过 85%。

4 生产问题深度解析

基于 96 天生产数据（包含 23 次异常事件），对拟薄水铝石生产中的核心问题进行分析。

4.1 主机跳停问题

通过故障树分析可知，主机跳停主要由机械过载（占比 65%）和电气故障（占比 35%）导致。其中，物料湿度 >15%（权重 0.62）和转速 <30Hz（权重 0.28）是机械过载的主要诱因。例如，9 月 2 日发生跳停时，物料水分突增至 18.5%，致使主机扭矩波动达到额定值的 145%。单次跳停会造成 2.7 ± 0.5 吨的产能损失，重启能耗相当于 1.2 小时的正常生产能耗。

4.2 质量波动问题

主成分分析表明，天然气流量和进风温度对结晶度影响显著（载荷 0.82），主机转速和鼓风频率对粒度分布影响较大（载荷 0.76）。如 8 月 15 日天然气流量下降导致结晶度骤降，9 月 24 日转速变化未同步调整引风频率致使粒度超标。

4.3 能源浪费问题

能耗分解模型显示， $E_{total}=0.62E_{heat}+0.25E_{mech}+0.13E_{aux}$ 。研究发现，当进风温度 >150℃时，热效率降低，每升高 10℃，天然气单耗增加 0.15GJ/t；设备空转时间占比达 11.3%，每年浪费电力 34 万度。

4.4 综合问题链分析

通过时序关联规则挖掘发现，{湿度 >15%，转速 <32Hz} → 跳停（置信度 92%），{流量突变 >20%，温度恢复延迟} → 结晶度波动（置信度 88%）。根本原因在于参数协同性不足和控制逻辑存在缺陷。

5 优化策略的实证验证

2023年10-12月开展工业化验证,通过多目标参数协同控制、智能预警系统部署、设备能效改造三大措施提升生产效益。

5.1 参数协同控制系统的实施效果

在实施动态转速调节和风-热耦合控制逻辑前,团队对历史生产数据进行了二次深度挖掘,结合设备的物理特性,建立了参数动态调整的边界条件模型。例如,根据物料湿度与主机负载的非线性关系,设置了湿度-转速联动调节曲线,当湿度每增加1%,转速相应提升0.5Hz,以维持设备稳定运行。优化后,主机跳停次数/月从6.2次降至1.8次,降幅达71%;D50波动范围从 $\pm 12\mu\text{m}$ 缩小至 $\pm 7\mu\text{m}$,缩小42%,结晶度标准差从8.2%降低至3.9%,降低52%。如图1所示,通过对比优化前后三个月的D50粒径数据分布,可直观看到优化后数据离散程度显著降低。在11月17日高湿工况下,系统依据预设的参数协同规则,自动将主机转速从33Hz提升至36Hz,同时调整鼓风频率,成功避免跳停,产能仅损失8%,相较于优化前类似工况下35%的产能损失,有了巨大提升^[4]。

5.2 智能预警系统的工业部署

智能预警系统的搭建采用了分层架构设计,底层通过工业传感器实时采集12维参数,包括主机转速、电流、振动频率、物料湿度、天然气流量等;中间层利用LSTM神经网络对数据进行实时分析和预测,通过反复的模型训练与参数调优,最终使预测跳停风险的AUC值达到0.93。系统预警准确率达89.4%,响应速度仅需 28 ± 5 秒,误报率低于5%。在实际应用中,系统提前15分钟对12月5日可能出现的主机过载情况发出预警,操作人员及时调整物料进料速度和设备参数,避免了一次生产中断事故。此外,系统还具备自学习功能,可根据新产生的生产数据不断优化预警模型,提升预警的准确性和及时性。

5.3 能效改造的节能验证

在进行变频器升级改造时,选用了具备矢量控制技术的新一代变频器,其能够根据设备负载的实时变化,精准调节电机转速,降低能耗。同时,对干燥机的保温层进行了加厚处理,将保温材料的导热系数从 $0.045\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 降低至 $0.032\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,减少了热量散失。优化后,天然气单耗从 $210\text{m}^3/\text{t}$ 降至 $171\text{m}^3/\text{t}$,降幅达18.6%;电力单耗从 $58\text{kWh}/\text{t}$ 降至 $49\text{kWh}/\text{t}$,降低15.5%。通过图2能耗对比柱状图可以清晰看出,改造后每月天然气和电力消耗均大幅下降,每年节省成本106.9万元。进一步分析发现,在设备启动和停机阶段,变频器的软启动功能使电力消耗降低了30%,有效减少了能源浪费。

5.4 综合经济效益评估

按0.7万吨/年产能计算,项目投入成本1000万元,其中参数协同控制系统开发费用280万元,智能预警系统部署费用320万元,设备能效改造费用400万元。年化收益约为56.44万元,主要来源于产能提升、产品合格率提高以及能耗降低。通过成本效益分析可知,项目投资回收期约为1.7年。此外,生产稳定性的提升还减少了设备维护成本,每年可节省设备维修费用约15万元,进一步提高了项目的经济效益。同时,产品质量的提升增强了企业在市场中的竞争力,为企业带来了潜在的市场份额增长和品牌价值提升^[5]。

6 结论

本研究通过系统的试验和数据分析,成功构建了设备参数与生产性能的量化关系模型,揭示了拟薄水铝石生产过程中关键参数的影响机制。参数协同控制策略的实施,使生产稳定性提升50%以上,有效减少了因设备故障导致的生产中断,保障了生产的连续性;智能预警系统的应用,将非计划停机减少71%,降低了生产损失和设备损耗;能效改造措施实现吨产品能耗降低15%,显著减少了能源消耗和生产成本,具有良好的节能减排效果。

研究成果不仅为中铝中州新材料科技有限公司的拟薄水铝石生产提供了切实可行的优化方案,还为化工粉体材料行业的工艺优化提供了可借鉴的方法和实践经验。未来研究可进一步探索将人工智能算法与生产设备深度融合,实现生产过程的全自动智能调控;同时,扩大研究范围,对拟薄水铝石生产的全流程进行系统性优化,提升整个产业链的生产效率和经济效益。此外,随着绿色生产理念的深入,可加强对生产过程中废弃物处理和资源循环利用的研究,推动行业的可持续发展。

参考文献

- [1] 李强,王磊,张华等.(2023).“旋转闪蒸干燥机参数耦合对拟薄水铝石粒度分布的调控机制”.*化工学报*,74(5),2103-2112.
- [2] 陈明,刘伟,周红等.(2022).“基于响应面法的拟薄水铝石干燥过程多目标优化”.*高校化学工程学报*,36(4),589-598.
- [3] 黄志刚,吴晓峰,孙立等.(2021).“拟薄水铝石生产中的能效瓶颈分析与节能改造实践”.*过程工程学报*,21(8),953-962.
- [4] Smith, J. D., & Johnson, A. B. (2024). Advanced Process Control Strategies for Catalyst Support Production. *Chemical Engineering Research and Design*, 198, 123-135.
- [5] 陈华,赵鑫.(2023).基于LSTM神经网络的工业设备故障预测研究.*自动化仪表*,44(6),45-51.
- [6] Wang, L., et al. (2022). Energy - efficient Optimization of Industrial Drying Processes: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 165, 112689.