

智能制造背景下工业生产流程优化与提质增效管理研究

邹 超 黄信建 胡博强

中铝启元科技（郑州）有限公司 河南 郑州 450000

摘 要：智能制造成为传统工业转型升级的核心路径，为解决流程型工业生产低效、质量不稳、能耗偏高问题提供支撑。本文以氧化铝回转窑生产为研究对象，剖析传统生产流程在工艺、设备、管控、环境方面的现存缺陷及深层成因。依托智能制造相关理论与关键技术，从工艺改造、智能装备升级、参数优化、精细化管理多维度制定优化策略，构建全流程提质增效体系，助力工业生产实现智能化、精益化、绿色化高质量发展。

关键词：智能制造背景；工业生产；流程优化；提质增效管理

引言：数字经济与工业制造深度融合，推动制造业迈入智能化转型新阶段，传统流程型工业粗放式生产模式弊端日益凸显。人工主导的管控方式、老旧的生产工艺与设备，导致产品纯度不足、能耗超标、生产稳定性差，难以适配高端市场需求。为破解生产发展瓶颈，本文立足智能制造发展背景，聚焦工业生产流程优化与提质增效核心目标，结合生产实际问题探索适配的智能化改造方案，为传统工业转型升级提供实践参考。

1 相关理论与技术基础

1.1 智能制造核心理论概述

（1）智能制造的定义、核心特征与发展体系。智能制造是将制造技术与数字技术、智能技术集成于设计、生产、管理全生命周期，实现感知、分析、决策与控制的新型生产方式。其核心特征表现为以智能工厂为载体、以关键环节智能化为核心、以工业互联网为支撑。智能制造经历了数字化制造、数字化网络化制造、数字化网络化智能制造三个基本范式，构成不断演进的发展体系。（2）流程型工业智能制造的应用逻辑与适配要求。流程型工业以连续化生产过程为特征，具有原料波动性大、反应机理复杂、不易数字化等特点。其智能制造适配要求将AI、物联网、大数据等信息技术与流程制造深度融合，实现生产运营过程的动态优化与全局可视化，助力企业由自动化向智能化转型^[1]。

1.2 工业生产流程优化与提质增效理论

（1）生产流程优化的核心原则与优化维度。生产流程优化遵循精益化、系统化、标准化三大原则，以客户需求为拉动、以消除浪费为中心、以固化操作为保障。优化维度涵盖工序优化（取消、合并、重排、简化）、布局优化及工艺参数优化，实现生产全流程的精益管控。（2）工业提质增效的评价指标体系。评价指标体系涵盖质量维度（产品纯度、杂质含量、合格率）、能

耗维度（单位产品能耗、综合能耗）、产能维度（产量、设备综合效率）及成本维度（单位成本、投入产出比），构成多维度综合评判框架。

1.3 智能制造关键支撑技术

（1）DCS自动化控制系统、智能传感与实时监测技术。DCS采用控制分散、管理集中的设计思想，实现生产过程的精准控制与实时监测。智能传感器动态感知物理量、化学量等信息，转化为可处理数据信号，实现从被动检查向主动质量监控转变。（2）精细化工工艺改造、智能除杂、节能节水优化技术。精细化工工艺改造通过工序深度设计提升产品质量；智能除杂利用振动筛分、电磁除铁实现深度净化；节能节水优化通过软化预处理、管道改造与参数调优降低资源消耗。（3）生产数据收集、分析与参数正交优化技术。通过PLC系统建立生产数据库，开展数据挖掘开发。采用正交试验设计，以少量试验获取煅烧温度、窑速等关键参数最优组合，形成标准化作业指导与量化管理体系。

2 智能制造下工业生产流程现状与问题分析

2.1 工业生产原有流程概况

（1）传统回转窑煅烧氧化铝完整生产工艺流程。传统回转窑煅烧氧化铝生产工艺主要包括原料预处理、配料、煅烧、冷却、成品处理等环节。原料经湿法配料后进入除杂工序，通过平盘过滤脱水，再经回转窑高温煅烧，使氢氧化铝转化为 α 型氧化铝，最后经冷却、均化、包装入库。各工序之间以皮带输送、气力输送等方式衔接，整体流程为连续化生产，但因工序间缺乏自动化衔接反馈，物料流转参数依赖人工记录与经验调节。（2）传统生产模式的设备配置与管控模式。传统产线配置以回转窑为核心，辅以平盘过滤机、皮带输送机、下料斗、混料装置、包装设备及各类泵组。管控模式以人工巡检、就地操作和分散控制为主，各工序独立运行。配

料比例、窑头温度、窑速等关键参数由操作工凭经验设定与调整,生产记录以纸质报表为主,缺乏统一的数据采集与集成监控平台,设备运行状态反馈滞后,产线协同效率较低。

2.2 传统生产流程核心现存问题

(1) 产品质量缺陷,难以适配高端市场。原料仅经简单筛分,铁质设备磨损致磁性异物混入,成品纯净度不足;洗涤工序单一,氧化钠残留难降,钠含量普遍偏高,无法满足流延基板、电子陶瓷等高端应用对纯度与化学稳定性的要求。(2) 生产能耗偏高,资源利用率低。回转窑煅烧热效率偏低,天然气单耗高;湿法配料与洗涤用水量大,水循环不足,日用水量超设计指标,整体资源利用率待提升,生产成本压力大。(3) 自动化水平不足,人工管控误差大、参数固化、故障响应滞后。生产线仍以人工操作与经验调整为主,关键工艺参数缺乏基于实时数据的动态优化机制。当原料批次波动或设备工况发生变化时,操作人员难以及时捕捉并做出精确调整,导致产品质量波动较大。设备故障依赖人工巡检发现,响应延迟,非计划停机时有发生。(4) 生产环境管控薄弱,铁质设备易引入杂质,洁净度不达标。配料厂房地面未做防尘处理,物料流转环节中皮带输送机、下料斗等裸露铁质设备与物料长期接触摩擦,易产生铁屑脱落混入物料,影响成品洁净度,难以满足高纯产品生产的环境要求。

2.3 问题成因深度剖析

(1) 工艺层面:原料处理工序单一,脱钠、除杂工艺不完善。原料预处理仅配置单次筛分与单次洗涤,缺乏深度除铁和二次逆流洗涤工序设计,导致钠元素与磁性杂质在源头未得到充分去除,缺陷沿流程累积至成品环节,难以通过后续煅烧补救。(2) 设备层面:传统设备精度不足,老旧设备易产生杂质、能耗损耗大。传统筛分与除铁设备处理精度有限,对细粒级磁性异物去除能力不足。铁质接触部件在长期运行中磨损脱落,成为二次污染源。回转窑燃烧器与耐火材料老化,燃烧效率下降,热能损失增加,能耗居高不下^[2]。(3) 管控层面:缺乏智能化监测与标准化作业体系,生产参数无最优标准。生产过程缺乏覆盖全流程的传感器网络与数据采集系统,关键参数设定依赖经验值,未建立基于正交试验的参数优化标准体系。操作规范未量化固化,不同班次间操作差异大,导致产品质量一致性差,异常工况缺乏预警与处置预案。

3 智能制造导向下生产流程优化与提质增效实施策略

3.1 全流程工艺优化改造方案

(1) 原料端优化:智能筛分除杂、电磁除铁、二次逆流洗涤脱钠工艺改造。在原料预处理阶段,引入先进的振动筛分设备,依据原料粒度分布特征进行精准筛选分级,配合高性能电磁除铁器,利用强磁场吸附去除原料中的磁性杂质,实现从源头深度净化。针对氧化钠含量偏高问题,新增两个大型原料洗料槽并配置高效带式过滤机,采用逆流洗涤工艺对原料进行二次深度洗涤,通过多道工序的精细处理有效降低钠离子残留,从源头消除质量隐患。(2) 成品端优化:成品均化、二次除铁、精细化分级管控工艺升级。在成品阶段增设一个成品仓,内置高效混料装置实现产品均化,保证批次间质量一致性。配备新型干法除铁器,对成品进行二次除铁处理,进一步去除磁性异物,实现全流程杂质全方位把控。同步引入精细化分级管控系统,根据粒度分布要求精确调控研磨分级参数,确保产品粒度均匀可控^[3]。

(3) 辅助工艺优化:水处理系统软化预处理、管道升级与回收率优化。针对湿法配料和洗涤工序用水量大、回收率低的问题,创新实施软化预处理+管道升级+工艺优化的综合改造方案。通过优化膜元件排列布局、改进管道走向、增加回流装置等措施,将系统回收率提升至设计要求。在高压管路改造中严格控制材料质量与安装工艺,确保系统安全稳定运行,实现水资源的高效循环利用。

3.2 智能装备与自动化系统升级

(1) 洁净化设备改造,铁质设备不锈钢、镀镍处理,地坪升级改造。对平盘过滤机、下料斗、皮带输送机等长期与物料接触的裸露铁质设备进行系统性改造,更换为不锈钢材质或进行镀镍等洁净化表面处理,从物理隔离角度降低铁质脱落混入物料的风险。同步对湿法配料厂房铺设环氧树脂地坪,减少地面扬尘和颗粒物附着,全面改善生产环境的洁净度水平。(2) DCS集中控制系统搭建,实现生产实时监测、远程操作与故障诊断。搭建覆盖湿法配料、除杂、平盘过滤等关键工序的DCS集中自动化控制系统,构建统一的操作监控平台。通过中央控制室对各工序运行参数进行实时采集、显示与预警,实现生产过程精准控制与远程操作。系统内置故障诊断模块,对异常工况自动识别并推送处置建议,将故障响应从被动巡检转变为主动预警。(3) 生产数据采集体系搭建,为参数优化提供数据支撑。部署覆盖全流程关键测点的智能传感器网络,通过PLC系统建立生产数据库,连续采集温度、压力、流量、电流、振动等设备运行数据和工艺参数。利用统计软件对采集数据进行挖掘与关联分析,为后续参数优化和质量追溯提供可靠的数据基础^[4]。

3.3 核心生产参数智能化优化管控

(1) 基于正交试验的煅烧温度、窑速、气量等核心参数优化。系统收集历史生产数据,分析温度曲线、窑速、燃气流量与产品质量之间的关联关系。采用正交试验方法,设计多因素多水平试验方案,考察煅烧温度、窑速、矿化剂加入量等参数对 α 相转化率、原晶粒度等质量指标的影响规律,经多轮试验找出最优参数组合,实现产品质量与产能的协同提升。(2) 燃烧器、耐火材料等关键设备运维优化调整。对燃烧器火焰形状进行精确调整,优化窑尾温度控制范围,提升热效率。定期检查燃烧器和耐火材料的使用状态,建立关键设备健康档案,依据退化趋势制定预防性维护计划,避免因设备老化造成的能耗上升和工况波动。(3) 标准化作业体系构建,编制智能化生产作业指导书。将正交试验确定的最优参数组合与操作经验相结合,编制《回转窑煅烧低钠氧化铝标准化作业指导书》,对温度控制区间、窑速调节规则、燃气配比等关键操作进行量化规定,固化标准操作流程,消除不同班次间的操作差异,实现生产规范化、标准化管理。

3.4 提质增效精细化管理保障措施

(1) 建立全流程质量检测机制,常态化杂质、成分指标监测。构建从原料进厂到成品出厂的全流程质量检测体系,在关键工序设置取样检测节点。对氧化钠含量、磁性异物数量、 α 相转化率、原晶粒度等核心指标进行常态化监测。引入实验室信息管理系统,实现检测数据的电子化存储与趋势分析,支撑质量预警与改进决策。(2) 构建能耗管控体系,实现节水、节气降耗常态化管理。建立覆盖天然气、水、电等能源介质的在线计量与统计分析系统,按工序分解能耗指标,实施能耗定额管理。依托用水量监测数据优化水处理系统运行策

略,依托天然气消耗数据定期评估煅烧热效率。通过目标考核与持续改进机制,推动节水、节气降耗常态化落实^[5]。(3) 技术迭代与校企合作,持续优化产品晶形、粒度等核心指标。与精细氧化铝研究部门及高校科研团队密切合作,围绕晶种诱导、晶形调整剂协同应用等前沿技术开展联合攻关。持续追踪下游客户对产品晶形、粒度、纯度等指标的动态需求,将研究成果快速转化为工艺改进方案,实现核心质量指标持续优化,推动产品向高端化、定制化方向迭代升级。

结束语

本文结合智能制造技术体系,针对性解决了传统工业生产质量、能耗、管控等核心问题,完成了全流程工艺、设备、参数及管理模式的系统化优化。通过智能化改造有效弥补了传统生产短板,提升了产品品质与生产效率,降低了生产能耗与成本。未来将持续依托校企合作与技术迭代,动态优化生产指标、完善管控体系,持续深挖提质增效潜力,推动流程型工业智能制造水平持续提升。

参考文献

- [1]王爱民,孟凡超.数据驱动的智能制造生产流程动态优化与提质增效机制[J].计算机集成制造系统,2022,28(09):2789-2801.
- [2]刘建伟,张鑫.数字孪生赋能工业生产流程重构与精益化管理研究[J].机械科学与技术,2023,42(07):1089-1095.
- [3]陈曦,吴峰.智能制造视角下制造企业流程优化与生产效能提升策略[J].工业工程与管理,2024,29(03):66-72.
- [4]赵亮.工业4.0背景下生产流程智能化改造与质量管控体系建设[J].制造业自动化,2025,47(04):89-93.
- [5]叶晋桥.基于数字孪生的智能生产线系统集成开发[J].工程与管理科学,2025,7(06):285-289.