

智能控制在烧结生产中的应用研究

涂国宝 王 军

安阳钢铁股份有限公司, 河南 安阳 455000

[摘要]烧结生产作为钢铁冶金的关键造块工序, 长期面临大滞后、强耦合、非线性的复杂控制难题。围绕烧结过程智能化转型需求, 分析了智能控制在原料配料、点火烧结、设备监测及全过程协同等环节的应用现状。烧结矿质量直接制约高炉铁水产量与品质。以 AI 视觉识别、多模态大模型、边缘计算为代表的新一代智能控制技术, 正推动烧结生产从经验驱动向数据驱动转型。截至 2025 年底, 钢铁行业关键工序数控化率达 80%, 生产设备数字化率达 55%。针对当前应用瓶颈, 从感知体系、模型算法、平台集成及运维机制等方面提出提升策略, 为烧结工序智能制造升级提供参考。

[关键词]智能控制; 烧结生产; 自动化控制; 智能制造

DOI: 10.33142/ect.v4i7.20132

中图分类号: TF325.1

文献标识码: A

Research on the Application of Intelligent Control Technology in Sintering Production

TU Guobao, WANG Jun

Anyang Iron & Steel Co., Ltd., Anyang, He'nan, 455000, China

Abstract: Sintering production, as a key block making process in steel metallurgy, has long faced complex control problems such as large lag, strong coupling, and nonlinearity. Based on the demand for intelligent transformation of sintering process, the application status of intelligent control in raw material batching, ignition sintering, equipment monitoring, and whole process collaboration was analyzed. The quality of sintered ore directly restricts the production and quality of blast furnace molten iron. A new generation of intelligent control technology, represented by AI visual recognition, multimodal large model and edge computing, is promoting the transformation of sintering production from experience driven to data driven. By the end of 2025, the CNC rate of key processes in the steel industry will reach 80%, and the digitalization rate of production equipment will reach 55%. Aiming at the current application bottleneck, improvement strategies are proposed from the aspects of perception system, model algorithm, platform integration, and operation and maintenance mechanism, providing reference for the intelligent manufacturing upgrade of sintering process.

Keywords: intelligent control; sintering production; automated control; smart manufacturing

引言

烧结工序为高炉炼铁提供优质的炉料, 产品质量的好坏直接影响铁水产量和质量指标。从不完全统计可知, 2024 年我国重点统计企业烧结矿产量为 8.06 亿 t, 烧结工序能耗占钢铁生产总能耗的 10%~15%, 二氧化硫、颗粒物、氮氧化物排放量也比较高。传统的烧结控制依靠人工的经验, 操作标准不统一, 烧结过程具有很强的耦合性、大滞后性和多变量性, 所以很难进行精确的控制。伴随着新一代信息技术同制造装备的深度融合, 智能控制技术成了破解烧结生产难题、推进工序升级的主要途径。

1 智能控制技术与烧结生产工艺概述

烧结工艺流程包括原料配料、混合制粒、点火烧结、

冷却破碎和成品筛分等工序, 核心就是将铁矿粉和熔剂、燃料按比例混合, 在高温下烧结固结成具有一定强度和冶金性能的块状炉料。烧结过程是机理复杂、影响因素多、强耦合、大滞后、难建模的动态系统, 很多环节无法建立精确的数学模型来控制。智能控制技术是将人工智能、大数据、物联网、自动控制等学科融合起来的前沿技术群, 目的是使系统具有自感知、自学习、自决策、自执行的能力。近几年来, 将深度融合的智能监测装备同原有的生产控制系统融合起来, 创建起数据一张网, 成为智能控制落地的重要途径。将智能控制技术应用到烧结生产当中, 可以实现由经验依赖型向数据驱动型的转变, 给工序提质、降本、增效提供技术支持。

2 烧结生产智能控制系统构建基础

2.1 烧结生产关键控制对象分析

烧结生产的主要控制对象有原料成分和配比、混合料水分和粒度、点火温度和负压、料层透气性、烧结终点位置和成品质量指标等。烧结过程关键参数的智能预测和控制,可以提高烧结矿的质量^[1]。烧结终点位置直接影响烧结矿强度和成品率,是烧结过程的主要控制目标,混合料水分影响料层透气性和传热效率,波动太大容易造成烧结工况失稳,点火温度和煤气流量控制不好会造成能源浪费或者烧结层过烧。各个控制对象之间互相影响、互相制约,必须考虑全面才能达到全局最优。

2.2 智能控制系统组成及运行机制

烧结生产智能控制系统一般由感知层、传输层、计算层和应用层组成。感知层依靠各种传感器、工业相机以及智能检测设备来完成生产数据的即时收集工作,传输层利用工业以太网、5G 等通信手段保证数据可以顺利地传递出去,计算层安装着各种各样的智能算法和预测模型,对数据加以融合并做出决策分析,应用层会以可视化平台、控制指令等表现形式呈现优化成果。系统以数智融合为依托、实时预测为基础,形成了一个感知、认知、决策一体化的智能控制系统。从运行机制上讲,用历史数据和实时数据的联合分析来完成工况识别、参数预报和控制指令的自动下达,形成以数据为基础的闭环控制。

3 智能控制技术在烧结生产中的具体应用

3.1 原料配料与混合过程智能控制

配料环节直接影响烧结矿的化学成分稳定性,混合制粒影响料层透气性和烧结速度,二者都是烧结过程稳定运行的基础。传统的配料依靠人工调整配比,响应滞后,由于铁矿石来源越来越复杂,成分波动也越来越频繁,单纯地依靠人工经验很难保证碱度的稳定。利用人工智能算法来达到原料配比最优的目的,在遇到原料的变化、成品的震荡时可以快速准确地作出反应,碱度超标率可以降低2%~4%。智能配料系统把在线元素分析仪同原料化学成分数据库融合起来,创建以碱度、氧化镁、二氧化硅这些重要指标为靶子函数的改良模型,依照铁矿石、熔剂、燃料成分的即时变动情况,自动调节配比方案,明显改善烧结矿碱度稳定率^[2]。在混合制粒过程中,采用前馈和反馈相结合的方式对水分的调节,前馈参数考虑料量的变化、原始物料水分的变化、前序加水量,后馈参数为实时检测到的水分和目标水分的偏差以及变化率,控制精度可以达到±0.5%。系统用变频调速水泵和大小阀组合控制方式

精确控制加水量,用混合机电流信号间接反映制粒效果,形成水分、粒度、透气性三者串联闭环的控制。承德建龙215 烧结机安装智能配混系统之后,混合机自动加水、配料仓智能寻仓程序一起工作,有效地克服了物料消化、粉尘干扰造成的水分波动,给后续点火烧结提供透气性均匀的混合料层,也为烧结终点稳定控制创造了前提条件,烧结产线智能化改造中投入产出比最高的应用环节之一。

3.2 点火烧结过程智能优化控制

点火烧结是决定烧结矿质量及能耗的重要工序,也是人工经验依赖度最高的、智能改造效果最明显的工序。点火温度太低会造成料层表面欠烧、返矿率增加,温度太高会浪费能源并损害台车算条^[3]。用模糊算法控制煤气量、空气量,综合考虑目标温度、烧结机速,确定合适的点火温度,采用点火优化技术,烧结煤气消耗预计降低0.1~0.2m³/t,烧结固体燃料消耗预计降低2%~3%。从行业实践来看,将岗位操作经验与烧结生产工艺控制标准相结合,把现场复杂的操作过程变成有条理的逻辑控制程序,已经实现了烧结机点火炉无人化。敬业集团自主研发的烧结点火炉温控系统投入使用之后,在正常的工况下90%的时间内点火温度都在设定值的±30℃范围内,不需要人工干预。

根据风箱温度数据,用二次和四次曲线相结合的方法确定温度上升点的位置,采用在线调整机速、风量或者料厚等方式将烧结终点控制在目标范围内,横向一致性位置偏差预期控制精度为±1m。马钢380m²烧结机应用终点控制技术后,烧结矿返粉率由17%降至11%左右,转鼓指数提高2.1%,工序能耗由51.46kgce/t降至49.72kgce/t。除此之外,利用多模态大模型架构,将终点位置、风箱负压、机尾图像等异构参数结合起来,建立高精度、强鲁棒性的烧结终点状态软测量模型,是目前该领域前沿的研究方向,在动态、复杂的生产环境中,可以进一步提高终点监测和控制的精度,给点火烧结环节由自动化向智能化的飞跃提供新的技术途径。

3.3 主体设备智能监测与故障诊断

烧结生产线设备种类繁多,运行环境恶劣,非计划停机造成生产效率降低。台车智能视觉分析系统装有智能视觉算法,可以实时在线监测台车轮、挡板、算条的状态,对掉车轮、掉算条、挡板位移等故障进行实时监控和报警,大大缩短了烧结机非计划停机时间。使用加速度传感器结合人工智能算法,创建数据分析模型,对烧结系统内的关键风机、电机、水泵状态实施在线检测分析,在设备出现

大型故障之前就找到细微的隐患并加以消除,可以缩减非计划停机时长 15%以上。根据宝钢湛江烧结实践数据可知,烧结机台车智能诊断可以实现算条故障、台车挡板倾斜、车轮故障等智能预报,准确率达到 95%以上,是国内第一个实现无人化巡检的工厂。汉钢烧结厂用上智能电流监控系统后,全月没有发生故障,连续 2355 天没有发生工伤事故。智能诊断技术把设备维检由计划性检修变成预测性维护,大大提高了设备的作业率。伴随着 5G 低时延通信以及边缘计算能力下沉到现场,振动频谱分析、红外热成像这些多元监测数据可以实现现场级的实时融合处理,使得故障特征提取和预警响应更加及时,给烧结产线的长周期安全稳定运行提供可靠的技术支持。

3.4 烧结生产全过程智能协同控制

烧结生产是多工序协同的连续过程,各个环节孤立优化不能达到全局最优。烧结过程多目标优化和智能控制模型投入使用以后,首次实现了烧结机组生产质量与能耗的协同优化以及智能控制,完成了从人控到智控、从经验驱动到数据驱动的转变。多模型构成智能闭环控制,把高炉烧结矿产量需求当作核心,融合烧结过程温度改变等关键参数,自主挑选控制烧结生产机速。烧结智慧管控平台包含了智能控制、生产管理、设备管理、能源管理、安全管理等主要功能模块,依靠创建起原料配比改良,热工状况调节,终点智能预估以及能源介质协同等全部环节的闭环智能控制体系来打破生产,设备,品质这些多元化的数据壁垒。一些先进的企业已经把操作次数由原来的每天超过 100 次降到接近零次。

4 智能控制技术应用效果提升策略

4.1 完善生产数据采集与智能感知体系

高质量的数据是智能控制的基础。目前部分烧结产线还存在着检测装备缺乏、数据精度不高、信号传输不稳定等状况。对于高温蒸汽和粉尘不断侵蚀的监测设备,很容易造成部分监测设备损坏、传输信号异常或者中断的情况,需要加快部署高可靠性的工业级传感器、智能视觉终端以及在线检测分析设备,建立从原料进厂到成品出厂全过程的数据采集网络。无人化自动取样、弃样的原燃料工业机

器人技术可以解决燃料粒度、混合料粒度在线检测精度低的问题,检测精度达到 95%以上,此类智能检测装备的普及应该作为感知体系建设的重点方向。除此之外还要重视数据接口标准化建设,破除各个检测设备之间存在的协议壁垒,使各种异构的数据能够得到有效地汇聚和利用,给上层智能控制模型赋予完整的、精确的、及时的现场数据支持。

4.2 优化智能控制模型与算法应用

模型的精确程度以及推广使用的能力决定智能控制的效果。现有的技术对于多模态特征提取和融合存在着明显的不足,不能很好地处理烧结过程中高维、非线性以及多变量耦合的复杂数据特征。应该致力于推进数据驱动模型同工艺机理模型深度交融,就少标签、时滞数据而言,创建起迁移学习以及案例推理为支撑的在线监测模型,从而达成对烧结矿化学成分、粒度分布这些关键质量指标的实时预估与监管。从算法上讲,利用多模态大模型内部由多种不同的权重组成的多模态模型结构,把数值、图像、文本等各方面的异构信息结合起来,可以提高动态、复杂的生产环境下终点检测和控制的准确性、稳定性。还要创建模型在线自学习和定期评价体系,让算法可以应对原料状况以及设备状态的改变,依靠不断的迭代来缩减预测误差和控制误差,从而保证模型在实际工作环境中的长久适用性以及鲁棒性。

4.3 推进智能控制平台集成与系统协同

智能控制价值的实现要依靠平台。智能烧结工厂由智能装备、智能控制、信息管理、智能决策四个层次构成,用智能化全面解决方案实现,预期烧结成品稳定性提高 2%以上,能源节约 3%以上,维护成本降低 5%~10%。要积极推进智能控制平台同企业资源计划系统、制造执行系统、设备管理系统等纵向集成,达成控制指令和经营决策的协同联动。未来钢铁行业会朝着全流程工序信息一体化融合方向发展,从配料开始到高炉、炼钢、热轧直到成品,实现全流程工序信息一体化融合技术,烧结智能控制平台应该预留与上下游工序的标准化数据接口,为全流程协同优化打下基础。

表 1 烧结生产典型智能控制技术应用效果对比

应用环节	关键技术	应用效果
智能配料	人工智能优化算法	碱度波动超标率降低 2%~4%
水分控制	前馈-反馈复合控制	水分控制精度达 $\pm 0.5\%$
点火优化	模糊算法+无人化控制	煤气消耗降低 $0.1\sim 0.2\text{m}^3/\text{t}$, 固体燃料消耗降低 2%~3%
终点控制	曲线拟合法+多模态大模型	终点位置偏差 $\leq \pm 1\text{m}$
设备诊断	AI 视觉识别+振动分析	故障识别准确率 $\geq 95\%$, 非计划停机缩短 15%以上
协同控制	多目标优化模型+闭环控制	日均人工操作从超 100 次降至近零操作

4.4 健全智能运维与持续优化机制

智能控制系统投运之后要创建起完备的运维和迭代改良体系。一方面要创建设备台账管理、设备视觉诊断、预测性维护、智能设备巡检等模块,保证系统的长久稳定运行;另一方面要创建模型性能周期性评价和在线自学习体系,使控制模型可以适应原料状况、设备情况以及工艺需求的变动。从组织机构上优化人力资源配置,创造性地提出维护工程师加日班操维加翻班操维管理模式,岗位定员优化,效率提高 20%。同时还要创建故障案例知识库和运维经验数字化沉淀平台,把现场处理过的各种异常工况及其解决办法结构化保存起来,给模型训练以及人工查询提供便利。依靠制度化、规范化运维管理,使智能控制技术不断发挥效益。

5 结语

智能控制技术正在从根本上改变烧结生产传统的面貌。在原料配料、点火烧结、设备运行、全流程协同等环节上,智能控制已经取得明显的效果,可以提高产品质量、节约能源、改善劳动环境。以多模态大模型、AI 视觉识别、边缘智能为代表的新一代技术,给解决烧结过程大滞

后、强耦合、非线性控制难题提供新的方法论支持。就整个行业而言,智能控制技术在烧结方面的应用程度和范围还存在较大的发展空间,各个企业之间智能控制技术的应用水平也存在着较大的差别。未来烧结智能控制在数据感知精度、模型泛化能力、平台集成深度三个方面会进一步提升,使烧结工序由智能控制向智慧决策迈进,由单工序优化向全流程协同推进,为钢铁行业高端化、智能化、绿色化发展提供强有力的支持。

[参考文献]

- [1]严锋,刘哲,葛铭,等.烧结过程关键参数智能预测与控制研究现状与展望[J].冶金自动化,2024,48(5):1-11.
- [2]刘颂,金焕,刘然,等.借助多模态大模型的烧结终点优化模型[J].钢铁,2025,60(9):34-47.
- [3]丁成义,常仁德,郭胜兰,等.烧结过程智能控制及烧结矿冶金性能预测研究现状[J].钢铁,2024,59(4):42-56.

作者简介:涂国宝(1995—),女,河南洛阳人,助理工程师,华北理工大学冶金工程专业毕业,现就职于安阳钢铁股份有限公司,从事原料库存管理和烧结质量管控工作。