



一种混匀矿智能化换堆的解决方案

喻 波¹, 李保俊¹, 闫龙飞², 陈晓霞³, 杜 胜⁴

(1. 宁波钢铁有限公司 浙江 宁波 315807; 2. 北京首钢自动化信息技术有限公司 北京 100041;

3. 宁波大学 信息科学与工程学院 浙江 宁波 315211; 4. 中国地质大学 自动化学院 湖北 武汉 430074)

摘要: 混匀矿作为烧结工序的核心原料,其前后两堆之间质量差异的有效识别和换堆管理对烧结矿的质量稳定性有着直接影响。本研究针对传统混匀矿换堆操作中存在的质量波动和操作效率低的问题,提出了一种智能化换堆解决方案。该方案通过整合原料场和烧结工序的数据通信,建立混匀矿造堆配比和质量化验数据的线上传输处理系统,并在此基础上建立换堆计划编制、换堆操作、换堆质量调整与日常质量调整并行控制等智能控制模型,大幅降低了换堆操作的难度,提高了换堆控制的准确性。实施该方案后,换堆计划的编制时间从3 h以上缩短至0.5 h以内,操作员仅需通过简单的一键操作即可自动完成整个换堆过程;换堆当天的碱度稳定率平均提升了11.3%,FeO稳定率平均上升了4.4%。

关键词: 混匀矿; 一键换堆; 智能烧结; 数据处理模型; 混匀矿换堆

中图分类号: TF046.4; TP311.13

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)01-0103-07

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.01.013

Solution for intelligent changing piles of a kind of blending ore

YU Bo¹, LI Baojun¹, YAN Longfei², CHEN Xiaoxia³, DU Sheng⁴

(1. Ningbo Iron & Steel Co., Ltd., Ningbo 315807 Zhejiang, China; 2. Beijing Shougang Automation Information Technology Co., Ltd., Beijing 100041, China; 3. Faculty of information science and engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 4. School of Automation, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: As the core raw material of the sintering process, the effective identification of the quality difference between the two piles before and after the blending ore and the management for changing pile have a direct impact on the quality stability of the sinter. In order to solve the problems of quality fluctuation and low operation efficiency in the traditional blending ore and changing piles operation, an intelligent changing piles solution is proposed. By integrating the data communication between the raw material yard and the sintering process, an online transmission and processing system is established for matching the blending ore and changing piles ratio and quality test data, and on this basis, many intelligent control models are established, such as the preparation of changing piles plan, the changing piles operation, the changing piles quality adjustment and the daily quality adjustment, which greatly lower the difficulty of the changing piles operation and improves the accuracy of changing piles control. After the implementation of this scheme, the preparation time of the changing piles plan is shortened from more than 3 h to less than 0.5 h, and the operator can automatically complete the entire changing piles process with a simple one-click operation. On the day of changing piles, the alkalinity stability rate is increased by 11.3% on average, and the FeO stability rate is increased by 4.4% on average.

Key words: blending ore; one-click pile change; intelligent sintering; data processing model; blending ore and changing piles

收稿日期: 2024-06-17; 修回日期: 2024-08-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61803214); 浙江省自然科学基金资助项目(LY21F030004)

作者简介: 喻 波(1981—),男,高级工程师,从事原料和烧结技术研究管理工作。

通信作者: 陈晓霞(1989—),女,副教授,从事工业过程建模、优化和控制研究。

混匀矿作为钢铁厂烧结工序的核心含铁原料,是通过将不同成分和性能的铁矿粉与厂内循环杂副料在原料场精确配料后混合堆积而成。为确保烧结矿质量的稳定性,在混匀矿堆积时需要采取优化堆料参数控制^[1]、进行等硅切出^[2]等措施来稳定混匀矿堆积质量,在换堆时需要加强换堆管理^[3]来减少质量波动。传统的换堆操作计划制定耗时长达 3 h 以上,且调整过程需人工监控并持续 8 h 以上,在前后堆质量变化较大时,若预测和调整不当,可能导致烧结矿质量长时间波动,进而对高炉炉料的透气性、燃料比、炉渣流动性及利用系数等产生不良影响,增加生产成本。

近年来,钢铁行业在智能化转型方面取得了显著进展。刘颂等^[4]、侯建勇等^[5]以大数据为核心线索,探讨了参数预测、图像识别、过程控制和系统平台等在烧结等工艺中的应用。刘晓萍等^[6]、张勇等^[7]展示了铁区一体化智能管控平台在提升铁区生产效率、降低成本、减少排放以及实现智能化管理方面的重要作用 and 成效。在生产过程智能控制方面,张笑凡等^[8]提出了一种烧结台车车轮检测的模型,闫龙飞等^[9]开发了烧结混合加水自动控制系统。在质量智能控制方面,陈健等^[10]开发了烧结配料智能优化算法,张学锋等^[11]开发了烧结矿 FeO 预测的算法,吴金霞等^[12]开发了基于数据驱动的烧结矿质量预测模型。在烧结自动控制模型集成方面,邱海雨^[13]、顾文雅^[14]展示了基于控制模型策略的大型烧结机智能控制集成技术。

然而,尽管烧结已有众多智能化方面的应用,但混匀矿换堆的智能化仍面临诸多技术瓶颈和挑战,包括在打通原料场和烧结工序之间的混匀矿造堆产质量数据通道、准确高效地处理换堆过程中的大量实时数据并甄别判断数据的真实性和代表性、建立能够准确预测混匀矿换堆过程的一系列生产控制和质量控制模型、实现相关生产质量信息的实时监控以及调整时机匹配、确保换堆过程中涉及的设备和操作的安全性和可靠性等问题的解决都面临较大的困难。为了解决混匀矿智能化换堆的难题,本文在某钢铁厂设计并实施了一套线上混匀矿智能化换堆方案。该系统通过打通原料场与烧结工序之间的数据通信壁垒,借助一

系列智能控制模型和作业标准,实现了换堆计划的快速编制和无人化智能操作。换堆计划的编制时间由原先的 3 h 以上缩短至 0.5 h 以内。同时,换堆操作也变得更加简单高效,只需按下“换堆投用”按钮即可完成,实现了混匀矿的“一键换堆”。

1 系统流程

混匀矿一键换堆系统的设计思路在于通过模型自动化操作,优化“操作计划制定”与“换堆过程质量控制调整”两大环节,从而替代传统的人工数据整理、处理、计划制定及操作调整流程。此系统旨在提升计划制定的效率,优化混匀矿换堆时的烧结矿质量,并推动烧结生产过程向更程度的自动化和智能化迈进。通过减少人为操作的介入,系统旨在降低误差与风险,为企业的稳定发展与竞争力提升提供坚实的技术支撑。系统的整体流程框架如图 1 所示。

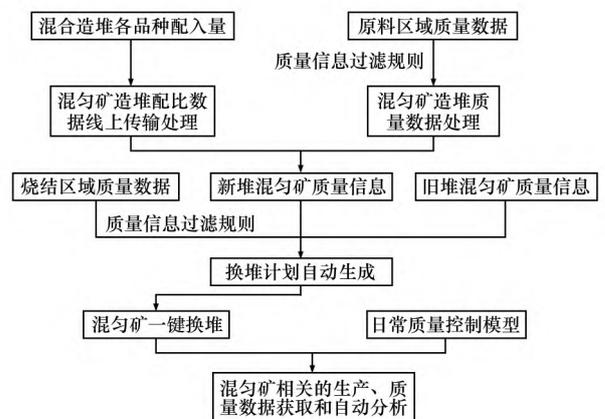


图 1 “混匀矿一键换堆”解决方案系统流程

Fig. 1 Flow chart for “one click changing stacking of mixed ore”

根据图 1 所示,此流程初始阶段获取混匀造堆各类原料的配入量,随后在线传输并处理造堆配比数据。同时,收集原料区域参与造堆的各类原料的质量数据。将这些配比和质量数据结合,经过计算,生成新堆混匀矿的质量信息。将此信息与上一堆混匀矿的质量信息进行对比分析,并结合烧结区域的质量数据,自动生成基于两堆混匀矿质量差异和烧结矿质量控制目标的混匀矿换堆计划。当新堆混匀矿开始供应时,操作员仅需通过用户界面点击“换堆投用”按钮,即可启动混匀矿的自动换堆功能。此功能将自动执行换堆相

关的生产操作和质量调整,实现无人化操作。为避免与烧结矿日常质量自动控制的相互干扰,混匀矿换堆时的质量调整与烧结矿的日常生产质量调整模型被设计为并行运行。以两堆混匀矿的换堆时机为界限,收集与混匀矿堆相关的生产、质量、成本数据,生成相关的数据分析信息,以供各级决策者使用。

2 系统功能

2.1 混匀矿造堆配比数据的线上传输和处理

利用实际造堆过程中的消耗数据,以及封堆时与 ERP 系统的数据交互功能,成功地从 ERP 系统中获取了实际造堆湿基消耗数据,实现了造堆消耗的在线数据传输。此外,针对那些不使用配料秤进行配料的特殊品种(例如用于铺底的 OG 泥等),在智能烧结系统中设计了人工配比维护功能。通过录入这些品种的配入量,系统能够迅速进行计算,并生成相应的湿基修正配比。这一实施方案充分考虑了钢铁厂在造堆生产过程中可能遇到的各种异常或非正规配加情况,确保了最终造堆配比与实际生产情况的一致性。

在确定湿基消耗后,利用“混匀矿换堆质量数据在线获取和处理系统”调用各种造堆原料的水分数据,将湿基消耗自动转换为干基配比。这一转换过程实现了“一键换堆”配比数据的在线处理,极大地提高了生产效率和数据准确性。具体计算过程见式(1)。

$$A_n = C_n \times (1 - H_n/100) \quad n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (1)$$

式中: A_n 为混匀矿造堆第 n 种物料干基消耗, t; C_n 为混匀矿造堆第 n 种物料湿基消耗, t; H_n 为混匀矿造堆第 n 种物料水分含量, %。

矿粉的配比计算公式为:

$$P_n = (A_n / \sum_{n=1}^N A_n) \times 100 \quad n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2)$$

式中: P_n 为混匀矿造堆第 n 种物料干基配比, %。

处理流程见图 2。

2.2 混匀矿换堆质量数据的获取和处理

混匀矿换堆质量数据涵盖了铁矿粉、杂副料及烧结所需的其他原燃料,其来源多样,且进厂

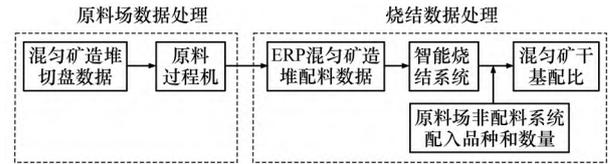


图 2 “一键换堆”配比数据的线上处理流程

Fig. 2 Online processing flow for proportion of “one click changing stacking” system

批次间的质量波动频繁,有时取样代表性不尽如人意。若采用质量数据代表性不足的情况,将加大烧结矿质量调整的难度,导致质量稳定性下降,并可能引发自动模型无法投入使用的恶性循环。

为解决这一问题,本方案通过 ERP 系统的化验子系统,实现了烧结工序对原料场混匀矿造堆原料质量数据的获取,并重点优化了质量数据的有效性甄别处理。具体而言,方案结合历年生产操作的成功经验,对近年相关原燃料质量的进厂化验及生产过程化验数据进行了统计分析,为每种原燃料的质量数据制定了个性化的采纳规则。例如,铁矿粉成分采用混匀矿造堆过程的取样数据,熔剂则采用最近三个批次烧结取样的均值数据,燃料、高内返和除尘灰则采用修正后的数据,从而显著提升了原燃料成分的代表性。

此外,方案还设立了质量成分数据的甄别筛选规则,通过设定每种原燃料各元素数据的上下限,有效排除了取样、制样和化验等环节可能出现的异常数据,为混匀矿的“一键换堆”操作奠定了坚实基础。详细的数据处理流程如图 3 所示。

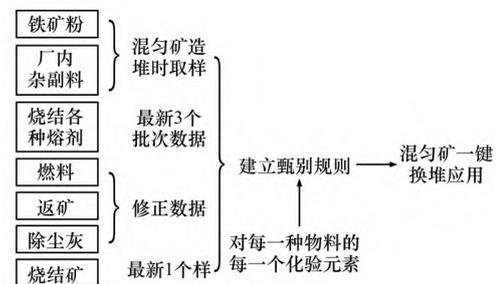


图 3 混匀矿换堆质量数据在线获取和处理系统

Fig. 3 Online acquisition and processing system for the quality data of mixed ore

2.3 混匀矿换堆计划编制的自动生成

经由在线收集和处理上述的造堆配比数据以及质量数据,能够得到混匀矿中每一种原料准确的配比和成分,继而自动计算得到新堆混匀矿的

预想成分,再结合烧结矿碱度、FeO 和 MgO 的目标值得到新堆烧结矿的预想成分。此后,该系统会自动将新堆的预想混匀矿、烧结矿成分与智能烧结系统中储存的上一堆预想成分、实际化验成分信息进行细致的差异对比。基于这些差异分析的结果,系统将生成一份详尽的换堆计划。一旦此计划在智能烧结系统中得到确认,系统将自动启动混匀矿的“一键换堆”功能。以下是具体的计算流程。

2.3.1 新堆预想混匀矿成分计算

对每种矿粉有效性判断之后,计算每种化验元素平均值结果。

矿粉 n : TFe_{-n} 、 SiO_{2-n} 、 CaO_{-n} 、 \dots 、 MgO_n , $n = 1, 2, 3, \dots, N$

混匀矿的化学成分计算公式(以 TFe 计算举例):

$$w(\text{TFe}) = \sum_{n=1}^N [w(\text{TFe})_n \times P_n] \quad n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (3)$$

其余成分计算与上式相同。

2.3.2 新堆预想烧结矿成分计算

(1) 获取烧结配料原燃料成分。首先获取参与烧结配料各原燃料品种的成分,包括 TFe、CaO、 SiO_2 、 Al_2O_3 、C、MgO……等所有化验成分(如果此段时间读取不到,则按规则取最新几条数据平均值)。其中混匀矿成分使用上述计算的“新堆预想混匀矿成分”。

(2) 获取原燃料配比。读取当前时间内烧结每一个配料仓原燃料的湿基配比,按品名料号汇总统计成每一个品种的湿基配比。根据各仓湿基比折合成配比的百分比。

$$D_n = \sum_{m=1}^M D_{n-m} \quad (n = 1, 2, 3, \dots, N; m = 1, 2, 3, \dots, M) \quad (4)$$

式中: D_n 为烧结配料第 n 种原燃料品种湿基配比,%; M 为烧结配料各原料品种的配料仓数量,个。

(3) 干配比计算。

$$E_n = D_n \times (100 - H_n) / 100 \quad (5)$$

式中: E_n 为烧结配料各原燃料品种干基配比,%; H_n 为各原燃料品种对应的水分,%。

(4) 配比去烧损计算(残存)。

$$F_n = E_n \times (100 - \eta_n) / 100 \quad (6)$$

式中: F_n 为烧结配料各原燃料品种干配比去烧损后的配比,%; η_n 为各原燃料品种的烧损值,%。

(5) 计算烧结矿化学成分。

$$w(\text{TFe}) = K_i \{ [F_N \times w(\text{TFe}) \times A_{sh} + F_1 \times w(\text{TFe})_1 + F_2 \times w(\text{TFe})_2 + \dots + F_{N-1} \times w(\text{TFe})_{N-1}] / (\sum_{j=1}^N F_j) \} \quad (7)$$

式中: K_i 为修正系数,根据各厂生产及设备情况给出; TFe 为烧结矿铁品位,%; A_{sh} 为燃料灰分,%; N 为原料总数,个。烧结矿其它成分计算与上式相同。

2.3.3 基于混匀矿、烧结矿成分差异的换堆参数计算及换堆计划的自动编制

将新堆混匀矿的预想成分和上一堆混匀矿的预想成分之间的差异作为“第一差异”,将新堆烧结矿的预想成分和上一堆烧结矿当前的预想成分(换堆计划编制时仍然在使用上一堆的混匀矿,在上一堆混匀矿的使用过程中,烧结矿的预想成分随着配比的调整而变化)之间的差异作为“第二差异”,换堆的目标是在新堆混匀矿替代上一堆混匀矿后,通过调整将“第二差异”中的碱度、FeO、MgO 的差异调整为 0,调整的方式是计算对应的石灰石粉、白云石粉和燃料的配比变化量。

由于采用了当前的烧结矿预想成分作为烧结矿调整的目标值,实际计算不用再考虑影响烧结矿预想成分与实际化验成分之间差异的复杂因素(将这一部分的工作交给烧结矿日常质量控制模型来执行),使得换堆计划的调整参数计算准确、快速,为全自动智能换堆提供了可靠的保障。

为了提升烧结生产人员对换堆差异情况的理解与应对能力,本文依据两堆混匀矿在质量和烧结性能上存在的差异,专门开发了换堆信息解读功能。该功能通过技术人员的专业分析,将换堆过程中的配矿结构、化学成分、粒度组成等差异信息详细解读,并录入相应的换堆情况说明以及参数调整建议,以供生产人员参考。

2.4 混匀矿一键换堆功能

在换堆计划编制自动生成的功能实现后,设计了混匀矿自动换堆操作的“一键换堆”功能。

首先,针对换堆质量难以精准控制的问题,设计了换堆质量调整的控制模型。该模型首先确

定了质量调整频次算法,规定了换堆时的质量调整参数,包括碱度、FeO(换算成烧结混合料含碳量)和MgO三个指标。对于这三个指标,规定了调整的原燃料品种和优先调整的仓,以及每一次调整的幅度上限。当超出幅度上限时,将进行多次调整,最多进行三次。此外,还确定了调整时机算法。该模型以所有混匀矿仓同一时间换堆为目标,根据不同的情况,当仓内上一堆混匀矿剩余一定比例时进行调整。通过采用这种优化算法,最大限度地确保了调整过程质量的顺滑,避免了质量的大幅波动。混匀矿换堆质量稳定性的提高为烧结矿日常质量自动控制打下了良好的基础。具体的质量调整分级可参见表1,每个指标的调整幅度分配和矿槽中旧料料位是一一对应的,如碱度的总调整幅度>0.06时,调整分为3次:第1次调整总幅度的30%,在旧料料位为50%时调整;第2次调整总幅度的30%,在旧料料位降至30%时调整;第3次调整总幅度的40%,在旧料料位降至20%时调整,至此,碱度调整结束。

表1 质量调整分级表

Table 1 Grading table of quality adjustment

指标名称	总调整幅度	调整幅度分配/%	矿槽中旧料料位			
			50%	40%	30%	20%
碱度	<0.03	100				○
	0.03~0.06	40		○		
		60				○
	>0.06	30	○			
		40			○	○
$w(\text{MgO}) / \%$	<0.06	100				○
	0.06~0.12	40		○		
		60				○
	>0.12	30	○			○
		40				○
混合料含碳质量分数/%	<0.04	100				○
	0.04~0.08	40		○		
		60				○
	>0.08	30	○			
		40			○	○

其次,创建了智能换堆过程控制模型。当接收到换堆计划后,该模型会在上一堆混匀矿完全进入烧结矿仓后,通过一键操作“换堆投用”按钮启动自动换堆流程。此模型利用算法精确计算第一次换堆质量调整的恰当时机,并自动记录换堆的起始时间。同时,模型会持续追踪并记录每个正在使用的混匀矿仓的仓位情况,以及混匀矿的总仓位信息,以实现槽位平衡。

在槽位平衡的过程中,模型会根据上一堆混匀矿在各个料仓的库存状况,自动分配每个仓的下料量。其目标是在同一时间内完成所有混匀矿仓的换堆工作。此外,模型还会实时监控每个仓上一堆混匀矿的库存变动,一旦达到第一次质量调整的槽位,系统将自动检测是否已引入新堆混匀矿。若已引入,系统将立即进行成分调整,确保换堆过程的连续性与精确性。

整个换堆流程完全自动化,无需人工干预,从而确保选定的混匀矿仓能够同步完成换堆任务。为实现这一目标,设计了以下换堆各混匀矿仓下料量的逻辑公式:

$$X = Z \frac{Q \times (L - \frac{O}{100} \times S)}{\sum_{m=1}^m (L - \frac{O}{100} \times S)} \quad (8)$$

式中: X 为混匀矿仓新的下料量, t/h; Z 为当前混匀矿总的设定下料量, t/h; Q 为混匀矿仓的最新启停信号; L 为混匀矿仓最新的仓位, t; O 为槽位平衡对应仓位占比, %; S 为各混匀矿仓满仓仓位, t。

再次,经过设计,推出了一款可视化的换堆过程信息化界面。该界面能够全面展示换堆过程中的各项相关信息,使生产技术人员能够实时追踪并掌握换堆的状态信息。具体的混匀矿换堆模型界面如图4所示。

最后,针对生产企业设备和仪表的可靠性问题,精心设计了众多可调整模型参数。这些参数旨在确保在各种异常情况下,都能对设备仪表进行及时修正,从而保证“一键换堆”功能的正常运作。通过这样的精细化设计,提高了模型的实用性和适应性,使模型在面对各种挑战时都能展现出强大的生命力。



图 4 混匀矿换堆模型界面

Fig. 4 Model Interface of stack transfer for the mixed ore

2.5 换堆质量调整与烧结矿日常质量控制模型并行运行的逻辑设计

在智能烧结系统中，设计了针对烧结矿碱度、MgO 和 FeO 的自动控制模型，旨在实现烧结矿质量的日常自动监控与调整。为了确保该模型与混匀矿换堆的质量控制模型互不干扰，特别规划了并行的质量控制逻辑：烧结矿质量控制模型将依据成分偏差及相应调整算法自主进行质量优化，而混匀矿换堆质量控制模型则遵循本文所述的调整算法进行独立调整。这两个模型各自独立运行，并分别向烧结配料系统发出指令。关于质量调整逻辑的详细控制图见图 5。

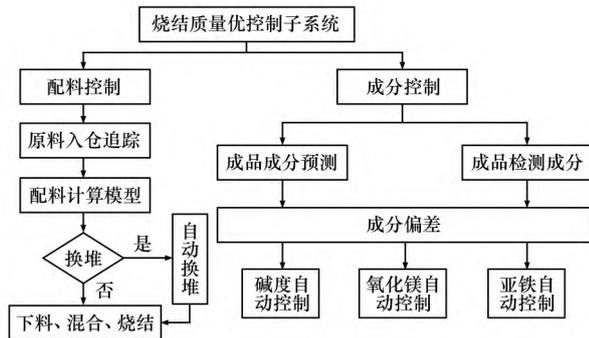


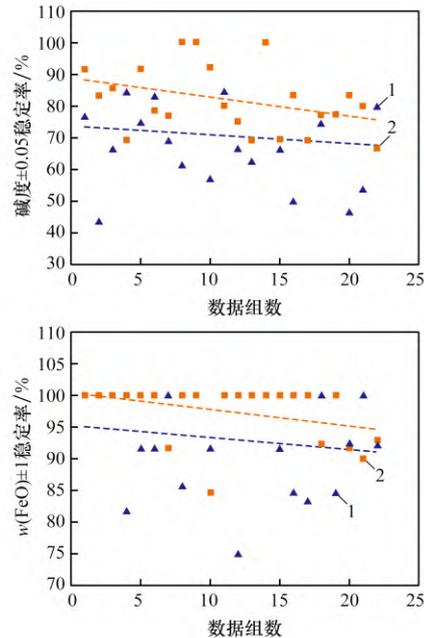
图 5 质量调整逻辑控制

Fig. 5 Logic control diagram of quality adjustment

3 实施效果分析

根据现场反馈来看，在成功实施本解决方案后，混匀矿换堆计划的编制时间得到了显著优化，从原先的 3 h 以上大幅缩短至 0.5 h 以内。同时，也观察到混匀矿换堆的质量波动得到了明显的抑制。为了系统地评估这一解决方案对烧结矿质量稳定性的影响，收集了实施前和实施后半年内的混匀

矿换堆数据，各 22 组。这些数据以换堆当天的烧结矿碱度 ± 0.05 稳定率和 FeO ± 1 稳定率为主要分析指标。通过详细的数据对比分析，发现本解决方案在提升换堆过程中烧结矿质量稳定性方面起到了显著作用。具体的数据对比结果见图 6。



1—实施前; 2—实施后。

图 6 实施前、后换堆当天的质量稳定率数据对比

Fig. 6 Comparison of quality stability rate on the day of reactor replacement before and after implementation

经过对上述数据的深入分析，在实施本解决方案后，相较于实施前，换堆当天烧结矿的碱度稳定率平均提升了 11.3%，其标准偏差则下降了 4.6。同时， $w(\text{FeO})$ 的稳定率平均上升了 4.4%，其标准偏差也降低了 3.0。这些数据显示，本解决方案的实施对于改善混匀矿换堆时的烧结矿质量稳定性具有显著效果。具体的数据对比参见表 2。

表 2 实施前、后换堆当天质量指标统计

Table 2 Quality indicators statistics for the day of reactor replacement before and after implementation

项目	实施前	实施后	变化
碱度 ± 0.05 稳定率平均值	70.5	81.8	$\uparrow 11.3$
碱度 ± 0.05 稳定率标准偏差	14.9	10.3	$\downarrow 4.6$
$w(\text{FeO}) \pm 1$ 稳定率平均值	93.0	97.4	$\uparrow 4.4$
$w(\text{FeO}) \pm 1$ 稳定率标准偏差	7.5	4.5	$\downarrow 3.0$

4 结 论

(1) 智能化换堆显著提高了工作效率。通过整合原料场和烧结工序的数据通信,建立线上传输处理系统,进行质量数据的自动优化处理,以及换堆计划编制的自动生成,换堆计划的编制时间从 3 h 以上缩短至 0.5 h 以内。

(2) 烧结矿质量稳定性得到明显改善。实施智能化换堆方案后,换堆当天的碱度稳定率平均提升了 11.3%, $w(\text{FeO})$ 稳定率平均上升了 4.4%,显著提高了烧结矿质量的稳定性。

(3) 自动化操作减少了人为失误。通过“一键换堆”功能,减少了人为操作的介入,降低了误差与风险,为企业的稳定发展与竞争力提升提供了技术支撑。

参考文献:

- [1] 华绪钦,汪建斌,孙钦伟,等.低成本制造条件下提高混匀矿质量的实践[J].烧结球团,2015,40(5):38-41.
HUA Xuqin,WANG Jianbin,SUN Qinwei,et al. Practice of improving blended ores quality under low cost manufacturing condition[J]. Sintering and Pelletizing, 2015, 40(5):38-41.
- [2] 张慧峰.宝钢提高混匀矿堆积质量实践[J].烧结球团,2016,41(5):43-47.
ZHANG Hui Feng. Practice of improving stacking quality of blended ores in Baosteel[J]. Sintering and Pelletizing, 2016, 41(5):43-47.
- [3] 郭永杰,谢春帅,王涛,等.稳定烧结矿碱度的生产实践[J].天津冶金,2022(3):8-10.
GUO Yongjie,XIE Chunshuai,WANG Tao,et al. Production practice of stabilizing sinter basicity[J]. Tianjin Metallurgy, 2022(3):8-10.
- [4] 刘颂,赵亚迪,甘丽,等.烧结系统智能制造与大数据技术应用探讨[J].钢铁,2021,56(10):54-64.
LIU Song,ZHAO Yadi,GAN Li,et al. Discussion on intelligent manufacturing of sintering system and application of big data technology[J]. Iron & Steel, 2021, 56(10):54-64.
- [5] 侯建勇,王冬寒,焦峰斌,等.大数据技术在智能炼铁生产中的应用[J].冶金动力,2022,41(1):105-109.
HOU Jianyong,WANG Donghan,JIAO Fengbin,et al. Application of big data technology in intelligent ironmaking production[J]. Metallurgical Power, 2022, 41(1):105-109.
- [6] 刘晓萍,熊昆鹏,葛小亮.兴澄炼铁大数据智能互联平台建设及应用[J].冶金自动化,2021,45(3):34-41.
LIU Xiaoping,XIONG Kunpeng,GE Xiaoliang. Construction and application of big data intelligent interconnection platform for Xingcheng ironmaking[J]. Metallurgical Industry Automation, 2021, 45(3):34-41.
- [7] 张勇,张翔,孙小东,等.铁区一体化智能管控平台的开发[J].冶金自动化,2021,45(3):19-25.
ZHANG Yong,ZHANG Xiang,SUN Xiaodong,et al. Development of integrated intelligent management and control platform for ironmaking[J]. Metallurgical Industry Automation, 2021, 45(3):19-25.
- [8] 张笑凡,方田,石海军,等.基于 MobileNetV2-SSD 的烧结台车车轮检测[J].冶金自动化,2023,47(3):3.
ZHANG Xiaofan,FANG Tian,SHI Haijun,et al. Sintering trolley wheel detection based on MobileNetV2 SSD[J]. Metallurgical Automation, 2023, 47(3):3.
- [9] 闫龙飞,秦雪刚,李涛,等.烧结混合打水自动控制的实现[J].冶金自动化,2022,46(增刊1):366.
YAN Longfei,QIN Xuegang,LI Tao,et al. Implementation of automatic control for sintering mixing and watering[J]. Metallurgical Automation, 2022, 46(Suppl 1):366.
- [10] 陈健,杨春节,胡兵,等.基于 XGBoost 和反向自适应粒子群的烧结配料智能优化方法[J].冶金自动化,2023,47(3):71-80.
CHEN Jian,YANG Chunjie,HU Bing,et al. Optimization of sinter batching based on intelligent method of XGBoost and reverse adaptive population particle swarm optimization[J]. Metallurgical Industry Automation, 2023, 47(3):71-80.
- [11] 张学锋,张功辉,周志远,等.基于改进 BP 神经网络的烧结矿 FeO 含量预测[J].冶金自动化,2023,47(3):100-108.
ZHANG Xuefeng,ZHANG Gonghui,ZHOU Zhiyuan,et al. Prediction of FeO content in sinter based on improved BP neural network[J]. Metallurgical Industry Automation, 2023, 47(3):100-108.

(下转第 148 页)

- Experimental study on mechanism of direct reduction of metallurgical dust carbon-containing pellets [J]. *Journal of Iron and Steel* 2021, 33(3): 196–201.
- [20] 郭培民,董亚峰,孔令兵,等. 碳热 FeO 反应过程的控速环节分析[J]. *钢铁研究学报* 2020, 32(2): 111–116.
- GUO Peimin, DONG Yafeng, KONG Lingtan, et al. Analysis on controlling step during FeO reduction by carbon[J]. *Journal of Iron and Steel*, 2020, 32(2): 111–116.
- [21] 王飞,茅沈栋,毛瑞,等. 原料锌含量对转底炉球团还原焙烧过程的影响[J]. *烧结球团*, 2018, 43(5): 51–55.
- WANG Fei, MAO Shendong, MAO Rui, et al. Influence of zinc content in raw materials on pellets of rotary hearth furnace during the roasting and reduction process[J]. *Sintering and Pelletizing* 2018, 43(5): 51–55.
-
- (上接第 109 页)
- [12] 吴金霞,宋雨萱. 基于数据驱动的烧结质量指标预测模型[J]. *冶金自动化* 2023, 47(A1): 83.
- WU Jinxia, SONG Yuxuan. A data-driven prediction model for sintering quality indicators[J]. *Metallurgical Automation* 2023, 47(A1): 83.
- [13] 邱海雨. 梅钢 5 号烧结机自动控制模型的研究及应用[J]. *冶金自动化* 2021, 45(3): 79.
- QIU Haiyu. Research and application of automatic control model for Meigang No. 5 sintering machine[J]. *Metallurgical Automation* 2021, 45(3): 79.
- [14] 顾文雅. 面向智能制造的大型烧结机控制系统集成技术[J]. *冶金自动化* 2021, 45(增刊 1): 204.
- GU Wenya. Fully integrated technology for large scale sintering machine control system for intelligent manufacturing[J]. *Metallurgical Automation*, 2021, 45(Suppl 1): 204.