

烧结工序的数字化智能化之路： 现状、前沿与趋势

Digital and Intelligent Transformation in Sintering Process: A Review and Outlook

供稿|周翔 / ZHOU Xiang

内 容 导 读

对近年来我国烧结生产的现状进行了系统分析，并分别从配料准备、过程控制、技术集成（节能减排）等环节梳理了烧结工序数字化智能化应用的研究进展。结合钢铁工艺特点，从烧结工序拓展延伸至钢铁全流程，进一步探讨了未来数字化智能化应用的趋势和着力点，进而提出了以下发展建议：由“点”及“面”，促进综合应用提升；赋能工序，实现生产指标效益的改善；紧抓“数据”主线，稳固数字化的根基；强化技术创新，注重示范技术应用的推广等。

2024年，我国粗钢产量10.05亿t，约占全球总产量的53.33%^[1]。丰富多样的钢铁产品很好地支撑了建筑、装备、新能源、汽车等国民经济关键领域的用钢产业快速发展。党的二十大报告提出“实施产业基础再造工程和重大技术装备攻关工程，支持专精特新企业发展，推动制造业高端化、智能化、绿色化发展。”2024年政府工作报告中也特别提出“大力推进现代化产业体系建设，加快发展新质生产力”“推动传统产业高端化、智能化、绿色化转型”等。一系列的政策导向和钢铁行业独特的工艺特点、丰富的应用场景，给数字化发展带来了前所未有的机遇和动力。

近年来，钢铁行业持续开展数字化应用实践，数字化水平不断提升。钢铁行业生产设备数字化率从2018年的44.1%增长到2022年的53.8%，增幅

约为22%；关键工序数控化率从2018年52.5%增长到2022年的72.5%，增幅约为38%^[2]。作为高炉转炉长流程钢铁生产过程中十分重要的工序，烧结工序在生产成本、碳排放方面占全流程的10%~15%，在二氧化硫（SO₂）排放、颗粒物和氮氧化物（NO_x）排放方面占全流程的40%~50%。因此，研究数字化技术、产品在烧结工序的应用，对于探索烧结乃至钢铁全流程未来的转型发展、激发新质生产力具有显著的意义和价值。

烧结生产现状

近年来，长流程在我国钢铁生产工艺中的占比持续维持在90%左右，烧结-高炉-转炉流程在现阶段及未来一段时间内仍是钢铁主要生产工艺流程。有关数据显示，我国重点统计企业现有各类规格烧

作者单位：冶金工业规划研究院，北京 100013

结机近 500 台，烧结矿年产量约 8.06 亿 t。在产业政策推动和工艺技术进步的作用下，烧结工序的主要

技术经济指标也有了显著提升。2021—2024 年重点统计企业烧结工序的主要技术经济指标情况见表 1。

表 1 2021—2024 年重点统计企业烧结工序主要技术经济指标

年份	有效面积利用系数/(t/(m ² ·h))	品位/%	碱度	合格率/%	转鼓指数/%	固体燃料消耗/(kg/t)	从业人员实物劳产率/(万t/人)	日历作业率/%
2024	1.334	55.00	1.991	97.44	78.88	50.74	1.37	92.1
2023	1.320	55.22	1.969	97.42	81.61	51.11	1.26	92.3
2022	1.310	55.32	1.937	96.84	78.58	52.33	1.09	86.6
2021	1.316	55.47	2.072	96.93	78.23	52.41	1.09	91.5

注：数据来源中国冶金网，<https://news.metal.net.cn/list-435-1.html>。

从表中数据可以看出，近年来，我国烧结工序工艺技术水平呈现出几个显著特征：（1）生产指标相对平稳，如有效面积利用系数、日历作业率等基本保持在较高水平；（2）烧结矿质量指标能够较好地支撑炼铁工序，如合格率、转鼓指数均有不同程度的提升，品位和碱度随原料和生产策略浮动；（3）能耗和效率指标创近年新高，体现了节能、数字化新技术应用方面取得的显著进展。

数字化应用研究进展

烧结工序主要由配料准备、混合料制备、点火、烧结、冷却等环节组成。目前的数字化应用实践主要围绕配料准备、过程控制、节能降耗、绿色减排等环节展开。

配料准备环节

配料准备是烧结工序的第一步，精准控制原料配比可以对烧结矿质量、钢铁生产成本以及节能减排产生重要的影响。利用数字化的手段，运用智能算法开展智能配料成为研究烧结工序数字化应用研究的热点之一。

刘征^[3]采用最小二乘法、反向传播（BP）算法，着重优化返矿率、转鼓指数等指标，建立烧结配矿模型，应用实施后使返矿率平均精确度降低 1.3%，转鼓指数精确度提高 1.3%。王策等^[4]针对烧结配矿原料成本和硫质量分数等指标，应用新型多目标遗传算法，开发烧结配矿模型，应用结果可使每吨原料成本和烧结矿中硫质量分数实现显著降低。赵志伟等^[5]采用差分进化算法对配料成本进行改进，吨烧结矿配料成本可降低 34.34 元。冯茜等^[6]使用多目标粒子群算法，研发烧结配矿预报模型以

优化配料成本、全铁含量等指标，通过模型预测应用，可实现吨烧结矿节约成本 0.86 元。以上分析表明，运用智能配料等手段对于提升烧结矿相关质量指标和降低配料成本有较为显著的作用。

在烧结矿质量成分预测方面，运用神经网络、专家系统等技术建立预测模型，对于精准有效地预报质量成分指标、提高烧结生产技术水平具有积极作用。刘然等^[7]运用卷积神经网络等算法建立预测模型，重点通过评价均方根误差（RMSE）、准确率、时间等指标来预报烧结矿的转鼓指数。该预测模型算法中卷积核特征提取示意图见图 1，其 RMSE、准确率、时间分别可达到 0.33、93.71%、83 s。范晓慧等^[8]建立了质量成分预测模型，借助灰色人工神经网络、专家系统等算法，通过命中率指标进行评价，对烧结矿的化学成分（如全铁质量分数 $w(\text{TFe})$ 、氧化钙质量分数 $w(\text{CaO})$ 、二氧化硅质量分数 $w(\text{SiO}_2)$ 、氧化镁质量分数 $w(\text{MgO})$ ）及碱度 R 的预报命中率超过 90%。Liu 等^[9]开发了基于深度神经网络（DNN）和长短期记忆（LSTM）网络的预测模型，依据给定的输入输出数据对烧结矿的化学成分进行预测。有关试验结果表明，其预测精度和稳定性较好，可对烧结矿成分实现在线检测分析。

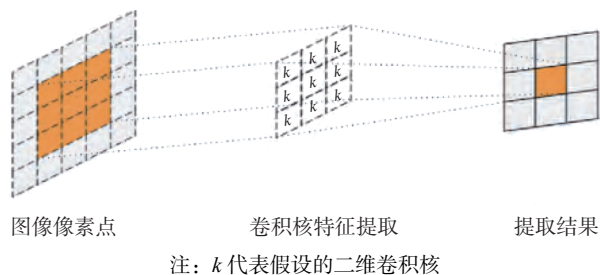


图 1 文献 [7] 预测模型算法中卷积核特征提取示意图

过程控制环节

在配料完成后的烧结过程中，数字化技术应用主要集中在终点位置预测、工况状态识别、漏风率监测、烧结矿质量预报等领域。

汪森辉等^[10]采用改进的自适应增强（AdaBoost）算法，以命中率和均方根误差（RMSE）为指标对烧结终点（BTP）位置进行预报，当绝对误差 $<1.6\text{ m}$ 时，预报模型命中率为97.4%，均方根误差为0.58。晏婷婷^[11]以精确率为评价指标，采用支持向量机算法对烧结工况进行识别预报，实现了对正常工况、欠烧结工况和不稳定工况的精确识别，精度

分别达到96.76%、92.63%和86.72%。透气性状态对于稳定烧结生产过程、提升烧结矿质量具有十分关键的作用。张军红等^[12]采用改进的遗传-反向传播算法构建了烧结矿FeO含量预报模型，与传统遗传-反向传播算法神经网络模型相比，其预测精度得到了较好的改善，提升了5.1%。袁晓丽等^[13]通过将原料成分、工艺参数、配矿方案与烧结矿质量性能等建立联系，结合数学模型算法与铁矿粉烧结配矿等特点，搭建了基于反向传播算法神经网络的烧结矿质量预测模型，其生成配矿方案算法示意图见图2。

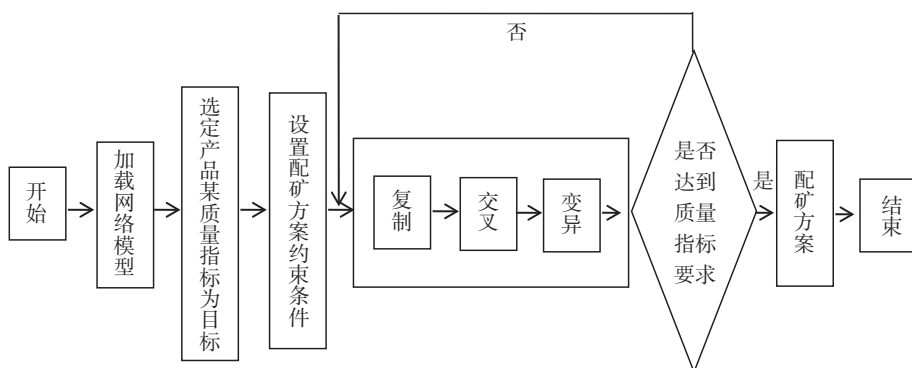


图2 文献[13]烧结优化配矿模型的生成配矿方案算法示意图

赵小青^[14]通过筛选点火温度、风箱负压、 $w(\text{TFe})$ 等变量指标作为输入项，运用深度神经网络（DNN）算法构建烧结过程透气性预测模型，并在此基础上分析料层透气性与垂直烧结速度之间的线性关系，结合不同透气性状态下混合料水分、生石灰配比等的取值范围，提出料层透气性优化策略。此外，针对烧结过程中废气温度上升点（TRP）、拐点（BRP）和烧结终点等状态参数之间的关系，范晓慧等^[15]提出了考虑模糊控制与专家规则的烧结过程状态智能监控方法，构建了以拐点为输入项的模糊控制模型，该模型将透气性指数、废弃温度上升点、拐点、烧结终点等作为前置条件，并运用专家控制规则，通过主抽风机频率、台车速度、风箱风门开度等参数来监控烧结过程状态。陆伟文等^[16]通过氧化锆测氧仪获取不同烧结烟气监测点的氧体积分分数，基于VS2022平台设计烧结区间漏风率监测分析模型，能够利用可视化在线监测等手段反映烧结机各区段漏风率的变化。该模型在钢厂实施应用

效果显著，使烧结机全系统漏风率由40.72%降至34.15%。由此可见，在烧结过程控制最关键的工况状态预测、透气性指标及漏风率控制等环节，数字化技术应用意义重大。

技术集成、节能减排

在烧结工序应用数字化工具以提升工序智能决策和监控等水平，除了单独关注具体参数或关键环节外，近年来基于技术集成，从整体系统解决方案的角度也实现了一定的创新，涌现出一批综合解决方案，对生产工艺控制、质量提升、节能减排均带来了较好的效果。

顾文雅^[17]提出通过全集成技术在烧结工序实现智能装备与可编程逻辑控制器/分布式控制系统（PLC/DCS）之间的互联互通、数据采集与集成，并自主集成研发了烧结三电控制系统，该系统相继在宁波钢铁、湛江钢铁等烧结项目中得到实施，在烧结设备智能化、智能控制以及工艺、节能减排等

方面成效显著,实现了烧结生产过程稳定和工艺过程的提质增效。邓小龙等^[18]通过以太网技术,基于Java语言开发烧结信息一体化平台,并在该平台上进一步构建烧结过程专家控制系统。烧结信息一体化平台可以根据需求定制化开发各种功能,包括烧结生产工艺流程及重点过程控制参数、关键参数历史曲线查询、关键绩效指标(KPI)自动生成、烧结成本分析、烧结电子报表、烧结生产指标大屏展示以及关键运行参数自动报警、办公网络访问机制等相关功能。烧结过程专家控制系统则聚焦烧结终点智能寻优模型、烧节点火控制器、烧结配料模型、烧结混合料水分控制器等环节的优化提升,通过应用对固体燃料消耗、烧结矿质量均实现了较大程度的改善。杨领芝等^[19]从机理和大数据分析层面建立模型,构建铁前生产大数据中心,形成铁前一体化智能管控平台,深度融合物联网、大数据、人工智能等先进工业互联网技术,实现智能配料计算、烧结矿碱度智能控制、烧结终点智能控制、数据挖掘智能对标、烧结-高炉生产联动分析等功能。该平台在青岛特钢应用效果显著,对高炉生产稳定发挥重要作用,炉况自主诊断准确率超过80%,燃料比降低2.3 kg/t,煤气利用率提高0.6%。于晗等^[20]运用智能控制手段建立烧结全过程的节能减排智能辅助诊断决策系统。该系统设计了配料-成矿预测模型、基于门控循环单元(GRU)和一种深度学习人工智能模型(Transformer)的单风箱温度预测模型、基于多风箱数据的成矿预测模型、基于自适应动态规划的烧结过程控制模型、烧结末端节能减排与智能决策模型等模块,将源头、过程、末端3个子系统通过数字化手段和工具进行了集成开发。有关应用数据显示,可实现固体燃料消耗降低18.9%,耗电量降低21.9%,NO_x减排43.6%,SO₂减排14%,颗粒物减排20.1%,效果十分显著。

此外,围绕烧结工序无组织排放、碳排放、能源消耗等占比较高的特征,钢铁行业在实施环保超低排放改造、节能降碳行动中,也从政策及技术规范指南的角度特别提出配套建设环保无组织数字化管控平台、碳排放全过程智能管控与评估平台、能源管控系统等具体路径和措施。冶金工业规划研究院等相关机构在行业企业应用案例较多,取得了较

好的效果,实现了数字化技术集成与节能降碳、绿色发展融合互通,有效促进了钢铁企业数字化、绿色转型。

趋势分析与探讨

在烧结工序数字化、智能化应用过程中,涌现出一批自主研发、技术创新、具有工艺特征的解决方案,从各个“点”上为烧结工序的技术进步和转型升级提供了强有力的支撑。但是,围绕钢铁工序乃至行业的数字化转型和应用,应清醒地认识到还存在着不少挑战。例如,工序间信息数据的互通还不完善,无法做到工序单元之间的无缝精准衔接;复杂流程工序具有多变量、非线性等特点,其智能控制的即时性、稳定性还有待进一步提升;部分数字化解决方案的底层关键共性技术、核心基础部件和关键软件仍存在知识产权掌控不足的风险;在烧结工序乃至钢铁行业的数字化应用存在投入产出比不合理现象,经济性仍有提升空间。因此,加强数字化应用研究、拓展应用场景、完善政策标准及保障措施对于提升整个钢铁工业的高质量发展具有十分重大的意义。对前述问题进行系统分析,研判烧结工序乃至钢铁生产全流程未来数字化应用的趋势和着力点,需重点关注以下几个方面。

由“点”及“面”,促进综合应用提升

烧结工序既是钢铁生产流程中的一个独立工序,同时又与前后工序紧密关联。评价其技术进步与发展水平,还需兼顾料场的基础条件、炼铁的生产技术指标等因素,这些因素相互影响、相辅相成。同样,数字化工具作为应用基础手段,也不能孤立于应用场景之外来考虑,需兼顾生产工艺、绿色发展(环保减排、节能低碳)、降本增效等多重目标,从更广阔的背景出发,避免形成数字化应用孤岛,实现综合优化和提升。因此,未来烧结工序乃至钢铁行业的数字化应用趋势,必然是工序、场景模块之间的大融合,体现为一机多用、一屏多显、输入项互联、效果综合全面。可借助人工智能技术,搭建具有特色的数智化大模型,通过不断优化迭代和大量数据的训练验证,促进数字化与生产实践的深度融合,利用其成果转化反馈指导生产实践。

赋能工序, 实现生产指标效益的改善

在钢铁生产流程中, 炼铁铁水成本占总成本的40%~50%, 而烧结工序的精准、高效、高质、稳定对于整个炼铁工序成本控制尤为关键。利用数字化技术赋能烧结工序, 完善原料采购、评价体系, 建立科学的配矿模型, 精准控制烧结生产操作, 确保生产出高质量的烧结矿产品, 将直接影响后续炼铁工序的生产指标和成本管控。有关数据显示, 综合入炉品位每升高1%, 综合焦比可降低1%~1.5%, 同时可实现产量提升2%~2.5%。烧结矿的还原性、转鼓指数、低温还原粉化率、粒度等质量指标均直接影响炼铁操作, 有效改善这些指标对实现降本增效十分重要。因此, 持续强化数字化工具手段的应用, 并与工序技术相结合, 实现互促提升, 是推进烧结工序数字化智能化应用的目标和意义。应真正将数字化转型应用落到具体工序生产实践中, 避免流于形式主义和面子工程。

紧抓“数据”主线, 稳固数字化的根基

数据是重要资产, 是数字经济发展的关键要素。2024年9月, 国家发展改革委等部门联合印发了《国家数据标准体系建设指南》, 对数据标准体系结构、框架以及数据通用基础、基础设施、资源、技术、流通、融合应用、安全保障等标准进行了全面布局。钢铁行业开展数字化转型和应用离不开数据的支撑。烧结、炼铁、炼钢等各个工序在未来融合数字化应用过程中均应更强化数据价值, 让数据活起来。建立完备的数据采集系统, 补齐数据采集短板, 提升数据汇聚、加工、存储和治理能力。围绕工序应用场景和生产运营需求, 通过数据分析, 寻找问题和潜力点, 进而反馈指导生产运营, 促进技术进步和创新, 推动以流程驱动的信息化向以数据驱动的数字化转变。同时, 还需要高度重视数据安全, 建立符合钢铁企业自身的数据管理体系, 强化网络安全与数据管理, 合理设置数据权限, 深入开展重要数据识别备案和数据安全防护工作。

强化技术创新, 注重示范技术应用的推广

数字化应用作为探索性、创新性的领域, 技术工具层出不穷, 迭代步伐稳步加快。需加强技术创新, 建立容错纠错机制, 鼓励探索具有钢铁流程

(烧结、冶炼、轧制等) 特色的数字化技术和产品。在具备条件的特定工序实施示范应用项目, 不断优化、完善功能, 在方案逐步稳定成熟后, 向流程中的相关工序进行复制推广, 实现倍增效应。针对钢铁企业数智化基础参差不齐、应用阶段存在较大差距等实际情况, 可选择理念先进、基础扎实的钢铁企业开展应用示范工程, 综合实施多手段、多工序、多场景的全面数字化应用, 快速解析数字化技术、数据以及企业生产运营中的规律, 并利用这些规律解决钢铁流程中存在的不确定性等难题, 发挥数字化应用的放大、叠加作用, 进而推进整个钢铁行业的数字化转型与高质量发展。

结束语

数字化转型和应用在烧结工序乃至钢铁全流程都是一项长期的工作, 同时也是未来钢铁企业之间竞争力提升的关键。钢铁企业要积极关注数字化技术创新, 实施数字化转型, 拥抱数字化应用, 拓展数字化深度融合, 并留足升级接口和发展空间, 坚持整体规划设计、分步实施, 扎实稳步推进。可以预见, 数字化应用必将在钢铁行业的绿色低碳、高质量发展进程中发挥独有且关键的作用。

参考文献

- [1] 年度粗钢总产量 [EB/OL]. 世界钢铁协会. (2025-03-25) [2025-03-25]. https://worldsteel.org/zh-hans/data/annual-production-steel-data/?ind=P1_crude_steel_total_pub/CHN/IND
- [2] 原材料工业司. 《钢铁行业数字化转型实施指南》解读材料 [EB/OL]. 中华人民共和国工业和信息化部. (2024-01-26) [2025-03-25]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/ycls/gzdt/art/2024/art_7757360f791d43d7ba51a67e609bb79c.html
- [3] 刘征. 烧结配料控制系统优化改进. 山东冶金, 2017, 39(2): 62
- [4] 王策, 董兆伟, 孙立辉, 等. 新型多目标遗传算法在烧结配矿中的应用. 智能计算机与应用, 2019, 9(3): 36
- [5] 赵志伟, 冯伟健, 刘颂, 等. 改进的差分进化算法及其在烧结配料中的应用. 烧结球团, 2023, 48(3): 55
- [6] 冯茜, 李擎, 王耀祖, 等. 约束多目标粒子群算法在烧结配矿优化中的应用. 控制理论与应用, 2022, 39(5): 923
- [7] 刘然, 张智峰, 刘小杰, 等. 基于工艺理论和卷积神经网络的烧结矿转鼓指数预测. 钢铁研究学报, 2023, 35(6): 651
- [8] 范晓慧, 龙红明, 陈许玲, 等. 烧结矿化学成分控制专家系统的开发与应用. 钢铁, 2006(11): 6

- [9] Liu S, Liu X J, Lyu Q, et al. Comprehensive system based on a DNN and LSTM for predicting sinter composition. *Appl Soft Comput*, 2020, 95(10): Art No. 106574
- [10] 汪森辉, 李海峰, 张永杰, 等. 基于改进的 AdaBoost. RS 算法的烧结终点预报分析. *中国冶金*, 2019, 29(10): 13
- [11] 晏婷婷. 基于动态图像视频特征的回转窑烧结工况研究 [学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2020
- [12] 张军红, 沈峰满, 谢安国. G-BP 算法在烧结矿 FeO 指标预测中的应用. *东北大学学报*, 2002(11): 1073
- [13] 袁晓丽, 范晓慧, 万新, 等. 烧结优化配矿模型的设计与软件开发. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2009, 40(6): 1476
- [14] 赵小青. 大数据技术下的烧结机烧结终点优化控制研究 [学位论文]. 唐山: 华北理工大学, 2021
- [15] 范晓慧, 黄晓贤, 陈许玲, 等. 烧结过程智能控制研究进展. *烧结球团*, 2023, 48(6): 1
- [16] 陆伟文, 余文瑶, 张德千, 等. 烧结漏风在线监测系统开发与应用. *烧结球团*, 2023, 48(6): 164
- [17] 顾文雅. 面向智能制造的大型烧结机控制系统全集成技术. *冶金自动化*, 2021, 45(S1): 204
- [18] 邓小龙, 陈虎, 杨雄文, 等. 智能化烧结控制系统开发与应用. *冶金自动化*, 2021, 45(3): 67
- [19] 杨领芝, 王海波, 陈哲, 等. 青岛特钢铁前系统智能制造优化提升实践. *山东冶金*, 2023, 45(4): 43
- [20] 于晗, 赵满坤, 潘志成, 等. 烧结全过程节能减排智能控制方法分析. *中国冶金*, 2020, 30(12): 112

作者简介: 周翔 (1984—), 男, 安徽蚌埠人, 工学硕士, 正高级工程师。2009 年 1 月毕业于北京科技大学钢铁冶金专业。主要研究方向: 绿色低碳智能烧结炼铁新技术。先后参与多项钢铁行业课题研究、国家重点研发计划及钢铁企业规划咨询项目, 先后荣获国家、省部级奖 3 项, 发表各类学术论文 20 余篇, 参编著作 3 项。通信地址: 北京市东城区北三环东路 36 号环球贸易中心 E 座 12 层; E-mail: zhouxiaang62@163.com。