



超厚料层烧结极致能效减碳研究进展与思考

陈思凡, 项子豪, 阮锦琦, 任可, 张梦仪, 周进东

(武汉科技大学 钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 湖北 武汉 430081)

摘要: 随着国家“碳达峰”和“碳中和”战略的实施, 钢铁工业作为国民经济的支柱产业, 正经历转型升级的关键时期。烧结工序作为钢铁生产中能耗与碳排放密集的环节, 其节能降碳的潜力尤为突出。本文聚焦于烧结技术的能耗现状与存在的问题, 深入分析了超厚料层烧结技术在节能减排方面的显著优势及其发展前景。同时, 也深入探讨了能效评估模型的边界划分问题, 介绍了多种评估模型, 包括基于热力学原理的焓分析模型和基于行业标准的对标分析模型等, 并指出了各模型的优缺点。此外, 本文还基于对现有研究成果和评估模型构建方法进行综合分析, 提出了一种构建超厚料层极致能效减碳模型的新方案, 旨在为能效评估模型的优化提供新的思路, 助力实现资源的合理利用, 推动烧结技术朝着绿色低碳的方向发展。

关键词: 烧结; 超厚料层; 节能减排; 焓分析; 对标分析

中图分类号: TF046.4; TF089

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)02-0001-09

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.02.019

Research progress and thinking on extreme energy efficiency and carbon reduction of ultra-thick material layer sintering

CHEN Sifan, XIANG Zihao, RUAN Jinqi, REN Ke, ZHANG Mengyi, ZHOU Jindong

(Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China)

Abstract: With the implementation of the national strategy of “carbon peak” and “carbon neutrality”, the iron and steel industry, as a pillar industry of the national economy, is experiencing a critical period of transformation and upgrading. As an intensive part of energy consumption and carbon emission in steel production, the sintering process has the potential to energy conservation and emission reduction. The current situation and existing problems of energy consumption of sintering technology are focused on, and the significant advantages and development prospects of ultra-thick material layer sintering technology in energy conservation and emission reduction are deeply analyzed. At the same time, the boundary division of energy efficiency evaluation models is also discussed in depth, and a variety of evaluation models are introduced, including the exergy analysis model based on the principle of thermodynamics and the benchmarking analysis model based on industry standards, and the advantages and disadvantages of each model are pointed out. In addition, based on the comprehensive analysis of the existing research results and evaluation model construction methods, a new scheme to construct an extreme energy efficiency carbon reduction model of ultra-thick material layer is proposed, aiming to provide new ideas for the optimization of energy efficiency evaluation models, help realize the rational utilization of resources, and promote the development of sintering technology in the direction of green and low-carbon.

收稿日期: 2024-12-05; **修回日期:** 2025-01-23

基金项目: 湖北省大学生创新创业训练计划资助项目(S202310488055); 国家自然科学基金资助项目(51604199)

作者简介: 陈思凡(2004—), 女, 从事高炉原料方面的研究。

通信作者: 周进东(1982—), 男, 副教授, 从事高炉原料方面的研究。

Key words: sintering; ultra-thick material layer; energy conservation and emission reduction; exergy analysis; benchmarking analysis

钢铁工业, 作为支撑我国国民经济发展的关键性原材料生产部门, 在驱动社会经济持续进步的同时, 也伴随着大量的能源消耗与资源使用, 构成了我国碳排放格局中的重要组成部分。我国已明确设定目标, 力求在 2030 年前实现碳排放总量的峰值控制, 并计划在 2060 年前达成碳中和的远大愿景^[1]。为实现这一宏伟蓝图, 政府相继发布了《关于严格能效约束推动重点领域节能降碳的若干意见》、《工业能效提升行动计划》等一系列政策措施, 旨在推动钢铁等关键行业的产业结构优化升级、加速技术突破、以及促进产业的集群化发展^[2]。

随着国家“双碳”(碳达峰、碳中和)战略政策的出台, 钢铁工业如何在确保绿色低碳的前提下实现可持续发展, 以及如何更加高效、合理地利用有限的自然资源, 已成为该行业转型升级的核心议题。当前, 长流程生产工艺仍占据我国钢铁生产的主导地位, 而烧结工序作为该流程中能耗较高、碳排放量大的关键环节, 亟需通过对其传统工艺的创新改造, 以减少环境污染、提升资源利用效率。

烧结技术是铁矿粉造块过程中的一项核心工艺。在铁矿的开采及贫铁矿富选过程中, 会产生大量粉矿。鉴于这些粉状矿石无法直接投入高炉进行冶炼, 因此必须先经过烧结或球团处理, 而烧结更是占据主导地位。在钢铁联合企业的整体运营中, 烧结工艺的物料管理和能源消耗均扮演着举足轻重的角色^[3]。

1870 年, 德国鲁尔区首次将烧结锅技术应用用于冶金和化工行业, 并取得了显著进展。1910 年, 全球首台带式烧结机在美国诞生, 其日均烧结矿产量可达 140 t。自 1926 年在辽宁鞍山建立四台 21.26 m² 的带式烧结机以来, 我国烧结技术的发展迈出了关键步伐。这一成就标志着中国烧结技术的迅速崛起。随着国内钢铁需求的急剧增长, 该技术得到了广泛应用。特别是在 20 世纪 80 年代, 宝钢引进了日本 450 m² 带式烧结机的设计和制造技术, 通过本土化改进和创新, 该技术在我

国得到了前所未有的推广和应用, 为钢铁工业的发展提供了强有力的技术支撑。

虽然烧结机规模的不断扩张提高了烧结产量, 然而环境污染的加剧和资源利用效率的低下问题依然突出, 尚未得到实质性解决。作为铁前工序的核心环节, 烧结工序的能耗占企业总能耗的 9% ~ 12%, 而 CO₂ 排放量则占总排放量的 11.5%。在当前经济结构调整和供给侧结构性改革的背景下, 烧结行业迫切需要淘汰低利润、高污染的过剩产能^[4-6]。

超厚料层烧结, 通常指料层厚度超过 850 mm 的烧结工艺。这种烧结工艺显著增强了烧结料层的自蓄热效应, 从而显著提升了烧结矿的品质和产量^[7]。作为提升烧结工艺能效和降低能耗的关键技术, 超厚料层烧结的主要作用包括: ① 增强烧结上层余热的回收, 减少固体燃料消耗和热能损失, 有助于烧结节能及减少烧结烟气中硫氧化物(SO_x)和氮氧化物(NO_x)的排放; ② 提升烧结矿的强度和成品率, 优化烧结矿质量; ③ 减少配碳量, 抑制烧结料层的过度和轻微烧损, 促进低温烧结, 增强烧结料层的均匀性; ④ 降低成品矿 FeO 含量, 改善其还原性; ⑤ 提高烧结矿的成品率和入炉烧结矿的比例^[8]。

根据国际统计数据, 工业企业每年约 8% 的能源消耗损失可归咎于缺乏能效监测与评估系统的配备, 而 12% 的能源浪费则与缺失能效管理体系及配套的管控措施有关^[9]。在钢铁冶炼流程中, 烧结环节因其显著的碳排放和能源消耗而尤为关键。超厚料层烧结作为一种关键的减排技术, 其能效和减碳效果的量化评估对冶金行业的生产活动至关重要。鉴于燃烧区特性受众多因素综合影响, 单一烧结杯实验难以全面揭示其机制, 因此, 数学建模已成为过程模拟与分析的关键研究手段^[10]。目前, 针对 1 000 mm 超厚烧结技术的能效减碳评估研究尚未充分开展。鉴于此, 本文从烧结技术的能耗现状与存在的问题出发, 深入分析了超厚料层烧结技术在节能减排方面的显著优势及其发展前景。并在深入探讨多种能效评估模型

优缺点的基础上,提出了一种构建超厚料层极致能效减碳模型的新方案。

1 烧结工艺现状及发展趋势

1.1 传统烧结技术存在的问题

冶金烧结是将粉末状原料在高温下加热形成固体块状物,用于提高含铁原料的还原性和炼铁效率。当前烧结工艺面临的主要挑战包括高能耗、显著的碳排放以及大量污染物排放,这些问题均与实现绿色、低碳、低耗的目标密切相关。在钢铁生产过程中,烧结工序是继炼铁之后的第二大能耗环节。其能耗构成主要包括固体燃料、电力和煤气的消耗,其中固体燃料消耗尤为突出,是降低能耗的关键因素。烧结工序的碳排放主要源自燃料的不完全燃烧和料层热量分布不均。此外,烧结工序在钢铁工业中的污染负荷居首位,排放的 SO_x 、 NO_x 、颗粒物等污染物对环境构成严重影响。随着烧结技术的快速发展,国内已安装了四五百台烧结机,显示出行业规模的显著增长,但其高污染特性也严重威胁着环境和健康。

随着“碳达峰”和“碳中和”战略的推进,烧结工艺正处于减污降碳的转型期,这既带来了挑战,也孕育了机遇,推动烧结工艺向更高效率和环境友好型方向发展。综上所述,尽管传统烧结工艺在技术和经济性能上取得了显著进展,但其环境污染问题亦不容忽视。未来的发展路径将聚焦于技术升级、污染减排,以实现绿色可持续发展的工业发展。

1.2 超厚料层烧结技术优点

厚料层烧结技术显著提高了烧结效率和烧结矿品质,其核心优势在于通过自动蓄热效应减少

燃料和 CO_2 排放,同时通过延长点火周期和增强点火强度以降低点火煤气使用量,进而减少低强度表层烧结矿的生成,提升成品率,其优势如图1所示。



图1 厚料层烧结技术优势

Fig. 1 Benefits of thick layer sintering technology

厚料层烧结最初在1979年全国烧结厂推广生产高碱度烧结矿和厚料层烧结技术上推出^[11]。随着国内烧结设备的大型化、工艺流程的优化和原料条件的改善,宝钢、鞍钢、柳钢等钢铁公司的烧结工厂调整了工艺参数并升级了设备,实现了约600 mm的厚料层生产,平均料层厚度约为471 mm。自2000年起,我国烧结机料层平均厚度逐年上升,至2005年,大中型烧结机料层厚度已扩展至600~800 mm。至2020年,河钢塞钢通过工艺技术优化将料层厚度提升至700 mm以上,实践表明,烧结工序能耗(折标煤)降低了5~8 kg/t矿,全年可减少固体燃料消耗超过1万t^[12]。酒钢烧结机的料层厚度增至860 mm,也证实了厚料层烧结在提高烧结矿质量和转鼓指标、降低烧结能耗方面的有效性^[13]。目前,天钢联合特钢、陕钢集团汉钢、中天钢铁、涟钢等多家企业已经将烧结料层厚度提高到了1 000 mm^[14-17]。

表1显示了涟钢360 m²烧结机的料层厚度从700 mm提升至1 000 mm时烧结机质量指标情况。从表1可看出,随着烧结料层厚度的增加,烧结

表1 不同料层厚度涟钢360 m²烧结机质量指标情况^[17]

Table 1 Quality index of 360 m² sintering machine in LY steel Steel under different bed layer thicknesses

年份/年	料层厚度/mm	转鼓强度/%	利用系数/[t·(m ⁻² ·h ⁻¹)]	固体燃料消耗/(kg·t ⁻¹)	返矿配比/%
2017	700~750	78.34	1.24	49.61	25.45
2018	750~900	78.73	1.32	50.60	21.92
2019	750~900	78.48	1.38	50.13	21.89
2020	750~900	78.61	1.38	49.83	22.02
2021	950	79.27	1.39	49.32	21.74
2022	980	79.11	1.38	50.60	21.75
2023	1 000	79.23	1.55	51.48	21.52

机的利用系数、返矿配比、转鼓强度均有很大的改善。但根据现场实际操作情况,采用 1 000 mm 超高料层烧结,必须要保证较好的料层透气性,才能显著提升烧结效率。天钢联合特钢、中天钢铁、汉钢在采用 1 000 mm 超高料层烧结时,均根据自身情况采取了不同改善料层透气性的措施。

1.2.1 技术优势

随着厚料层烧结的广泛应用,其技术优势越发明显。

(1) 能源效率提升。通过增加烧结料层厚度,可显著提高料层的自蓄热能力,实现余热的高效利用,减少燃料消耗。具体表现为每增加 1 mm 料层厚度,固体燃料消耗可降低约 0.25 kg/t^[18-19],可有效降低生产成本。

(2) 烧结矿品质改善。厚料层烧结延长了高温保温时间,促进了铁酸钙的形成,增加了烧结矿的液相生成量,从而提高了烧结矿的强度和成品率,同时降低成品矿 FeO 含量,改善还原性^[8,20]。

(3) 环保效益显著。厚料层燃烧技术降低了 CO₂、SO_x 和 NO_x 的排放,例如,天钢的 1 000 mm 超高料层烧结技术每年可减排 CO₂、SO₂ 和 NO_x 分别达 2 980 万 t、6.84 万 t 和 16.90 万 t^[21-22]。

1.2.2 发展趋势

(1) 工艺优化。不断改进烧结工艺,以提高烧结效率和质量,降低能耗。

(2) 智能化应用。借助人工智能和大数据技术,实现烧结过程的自动化和智能化控制,提升烧结矿的质量和产量。

(3) 绿色环保技术。采用先进的环保技术,如烟气脱硫、脱硝等,减少污染物排放,实现可持续发展。

(4) 规模化生产。建设大型烧结厂,实现生产规模的扩大,降低单位产品的生产成本,提高市场竞争力。

(5) 国际化拓展。推动技术在国际市场的应用和推广,提升我国钢铁行业的国际地位。

综上所述,我国在超厚料层烧结技术方面拥有成熟的技术基础和丰富的实践经验,多个案例的成功实施证明了技术的可靠性。形成了适合超厚料层烧结技术发展的运作模式,为行业其他企业提供了可借鉴的经验和路径。

1.3 烧结工序能耗研究现状

在烧结能耗构成中,固体燃料、电能及点火热损失占据烧结能耗的 95% 以上^[22]。周裕斌^[23]在其关于攀钢烧结节能降耗策略的研究中提出,烧结过程中产生的热量约有 80% 源自固体燃料的燃烧,而煤气点火及混合料物理热约占总热量的 16%。烧结过程中,主抽风设备是主要的电力消耗点,其消耗约占总电耗的 5%。烧结过程中排放的热能占总能耗的 49%。冷却阶段,每吨烧结矿通过冷却空气散失的热量为 0.55~0.63 GJ,占总能耗约 30%。此外,罗国民等^[24]基于物料平衡、能量平衡和焓平衡的综合性理论框架,构建了一套能效评估模型,该模型对韶钢 5[#] 烧结机的三大平衡进行了详细的能耗计算,实现了能效利用可视化。通过这一评估,从能量利用的质与量两个维度对烧结工序进行了全面的能效分析,进而对烧结工序的能流结构进行了优化。张健栋等^[25]则依据热平衡原理,建立了烧结工序的能效计算分析模型,旨在获取烧结工艺的理论参数。结合烧结能效大数据模型(图 2),对烧结过程进行深入能效评估。鞍钢烧结能效评估模型通过 Python 和 Java 编程语言实现软件化,并在能效评估过程中,划分为理论、测试、目标与实际四大模块(图 3)。模型通过对比烧结理论模块计算的理论参数与烧结测试模块测量的实际参数,以实际生产中的最优水平为目标,对烧结生产进行了细致的分析和改进。该能效评估模型在鲅鱼圈能源管控项目中

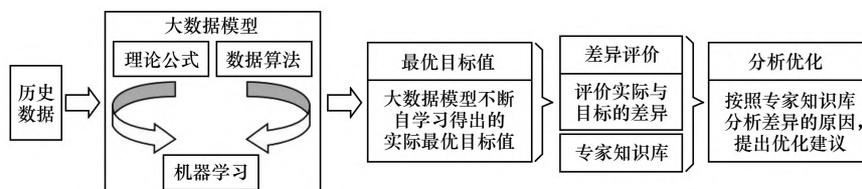


图 2 烧结能效大数据模型流程

Fig. 2 Flow block diagram for big data of energy efficiency model for sintering

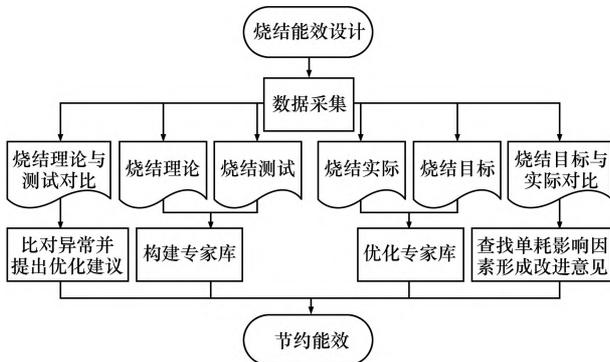


图 3 烧结能效模块组成

Fig. 3 Composition diagram for modules of energy efficiency for sintering

的应用取得了显著成效, 烧结工序的能耗降幅超过 2%, 实现了超过 1 000 万元的年度经济效益, 为能效管理提供了有力的实证支持。

2 超厚料层烧结能效评估模型思考

2.1 边界划分

边界划分是对标分析的核心, 烧结系统边界界定对评估结构和计算能效至关重要, 需将相关工序纳入边界以提高计算精度。其他行业如高速铁路信号系统也拓展了边界划分, 但需确保可比性和可量化性^[26]。周茂军等^[27]引入了烧结工序能效因子概念, 通过“三流一态”分析, 识别关键因素, 并按层级划分, 以提升能耗计算和评估的针

对性。张春霞等^[28]在中美钢铁行业对标分析中, 设定可比边界, 选择通用指标, 增强可比性。烧结工序能效减碳模型需根据国家标准进行边界划分, 包括生产系统、辅助系统和相关能耗扣除, 确保模型准确性和合理性。

烧结工序能耗边界的具体划分, 如图 4 所示^[9]。

(1) 根据烧结清洁生产标准和粗钢生产主要工序单位产品能源消耗限额, 烧结工序的能耗边界包括原燃料、能源及耗能工质的输入, 以及最终产品烧结矿、蒸汽等的输出。

(2) 边界内包含燃料和熔剂破碎、配料混匀、点火、烧结、冷却、整粒筛分、烟气净化和余热回收等生产系统, 以及机修、检验化验、计量、运输等辅助生产系统。

(3) 边界外排除与生产无关的生活能耗和回收外供的能量, 以及协同处置社会固废的能耗和因超低排放而消耗的能耗。

2.2 焓分析和神经网络预测模型

李富鹏^[29]通过焓分析模型评估烧结工序能效, 并运用 GA-BP 神经网络预测能耗, 旨在为烧结节能减排提供自动化分析工具。通过整体烧结过程分析, 构建了包含能源输入、利用和耗散的焓模型(图 5), 并识别主要能耗因素。结合烧结工艺特点和数据分析, 建立了基于遗传算法优

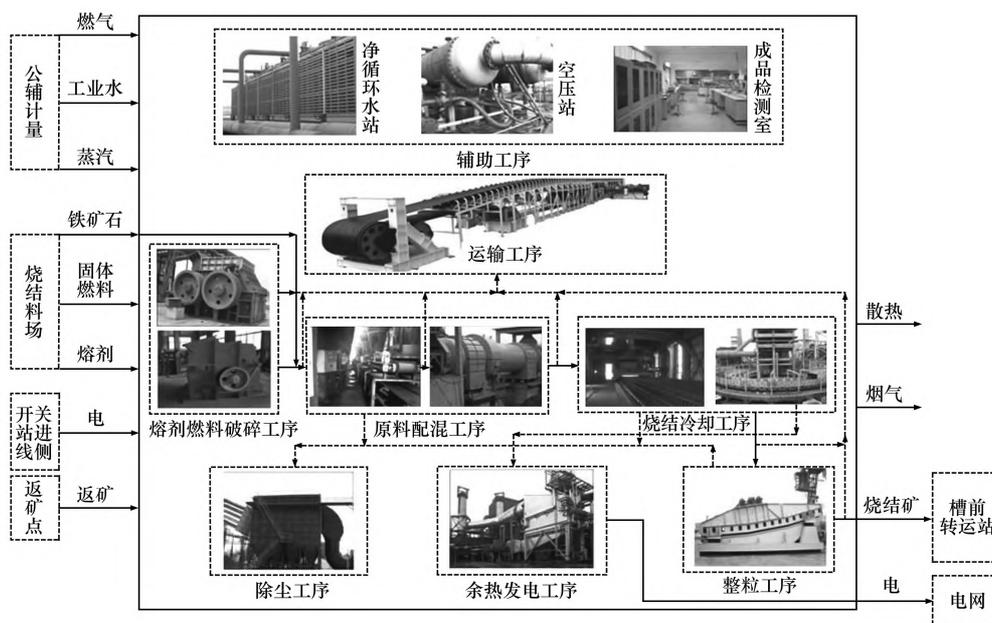


图 4 烧结工序边界划分示意

Fig. 4 Sintering process boundary division diagram

化的 BP 神经网络模型(图 6), 预测烧结能耗趋势, 以指导能源合理利用和节能潜力开发。

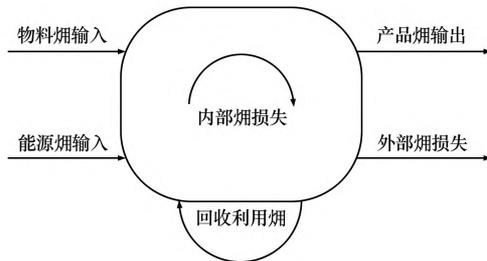


图 5 烧结工序的焓分析计算模型

Fig. 5 Calculation model of sintering process exergy analysis

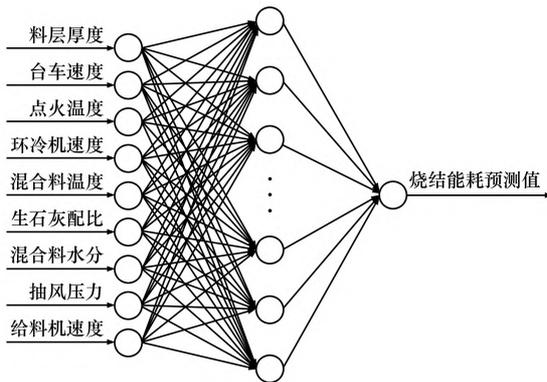


图 6 BP 神经网络结构

Fig. 6 BP neural network structure diagram

该模型优点：① 全面能效分析。利用焓分析模型对烧结过程从能源输入到物料产出进行全面分析，通过烧结焓效率模型和损率模型，提供了对能源利用情况的深入理解。② 影响因素识别。通过灰色关联度分析和烧结工艺机理分析，精确识别出影响烧结能耗的主要因素，为节能措施提供了依据。③ 预测能力。神经网络预测模型，特别是 GA-BP 模型，能够对烧结工序的能源消耗进行准确预测，帮助预测未来能耗趋势。④ 自动化控

制。建立的模型能够为烧结工序提供自动化的分析和控制，有助于实现节能减排。⑤ 优化能源利用。通过预测模型，可以合理利用能源，开发烧结工序的节能潜力，提高能源效率。⑥ 模型实用性。使用 MATLAB R2018a 进行模型构建和仿真，确保了模型的实用性和可操作性。这些优点共同构成了一个高效、全面的烧结工艺能效评估和预测工具，对于烧结生产的节能减排具有重要意义。

同时该模型也存在一定的缺点，主要在于：

① 复杂性。焓分析模型较为复杂，需要深入理解和具备一定的专业知识。② 数据需求。神经网络模型需要大量历史数据来训练，数据收集和处理比较困难。③ 模型准确性。预测模型的准确性依赖于数据的质量和模型的训练效果。

2.3 对标分析能效评估模型

节能评价和标杆分析法在 1 000 mm 超厚料层烧结过程中的应用。通过构建能效减碳评估模型，结合烧结工序边界划分和能效评估基准，运用 Matlab 工具进行对标分析，形成了一套针对烧结能效性能的科学评价体系。该方法系统地考察了关键因素和环节，旨在提升烧结工序的能源利用效率，并促进节能减排工作的有效实施。此评价体系与陈丽锦等^[30]在变温吸附碳捕集系统研究中的对标分析法类似，为烧结工艺的能效性能评估提供了实践案例，具体如图 7 所示。图 7 中： U_{EEI} 为综合能效指数； $\sum Q_{input}$ 为总热量输入，kJ； $\sum Q_{output}$ 为总热量输出，kJ； $e_{x,i}$ 为统计期内单元 i 的产品能耗，kgce/t； $e_{o,i}$ 为单元 i 的基准能耗，kgce/t； λ_i 为单元耗能量权重系数，系统所有 n 个单元 λ_i 之和为 1，即 $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ 。

该模型优点：① 实践应用。通过 Matlab 建立

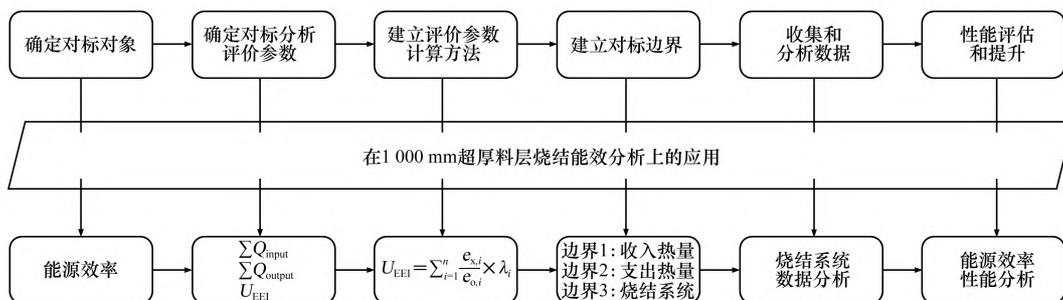


图 7 烧结工序能效性能对标分析过程

Fig. 7 Sintering process energy efficiency performance benchmarking analysis process

能效减碳评估模型, 将理论模型与实际生产相结合, 提高模型的实用性和有效性。② 基准参考。建立基于烧结工序的能效评估基准, 为评估提供科学依据, 确保评估的合理性和准确性。③ 识别节能潜力。通过评价, 企业可以清晰了解自身能耗现状, 发现节能潜力, 从而确立明确的节能工作目标。④ 系统化评估。对标分析是一个系统的评估过程, 能够全面考察烧结工艺的关键因素和环节, 覆盖影响能效的各个方面。⑤ 提升管理效率和经济效益。对标分析作为一种科学管理手段, 有助于提高资源利用效率, 规范节能管理, 提升管理水平, 并增加企业经济效益。⑥ 持续改进。对标分析是一个持续性的过程, 不断与行业领先企业比较, 有助于企业不断改善经营绩效。

该模型缺点: ① 数据获取。对标分析需要获取行业领先企业的数据, 这可能存在一定的难度。② 适用性。不同企业的烧结工艺可能存在差异, 对标分析的结果可能不完全适用于所有情况。③ 实施成本。实施对标分析可能需要一定的资源投入, 包括人力和资金。

2.4 超厚料层烧结能效评估模型思考

针对超厚料层烧结技术的极致能效与减碳效

果, 构建一套烧结能效评估对标模型, 能够帮助烧结厂全面掌握各子系统的能耗状况, 科学评价自身的能效水平, 并针对性地优化降低各子系统的能耗^[9], 同时使企业能够深入了解行业领先技术水平, 识别自身存在的不足, 并据此制定改进策略, 进而实现能效提升、成本降低并增强市场竞争力。超厚料层烧结极致能效减碳评估模型的具体价值主要体现在量化分析、优化策略和推广应用三个方面, 本文结合前人的工作基础^[29,31-32], 建立超厚料层极致能效碳评估模型的设想, 如图 8 所示。

(1) 能耗分布规律的确定。为构建超厚料层极致能效减碳模型, 首先须对烧结工艺进行细致的系统划分, 将其细分为六个子系统: 配料系统、混合系统、烧结系统、烧结矿破碎与冷却系统、筛分系统和排放控制系统。随后, 通过数据采集与分析, 明确各子系统的主要热能和电能消耗单元, 进而确立相应的能耗计算公式。利用焓分析法对系统内的焓损进行评估, 以科学量化各子系统的能耗分布规律。

(2) 能效预测模型的构建。可采用深度学习算法、BP 神经网络、混杂 Petri 网等技术手段, 构建能效预测模型。模型输入采集到的数据, 实现对各

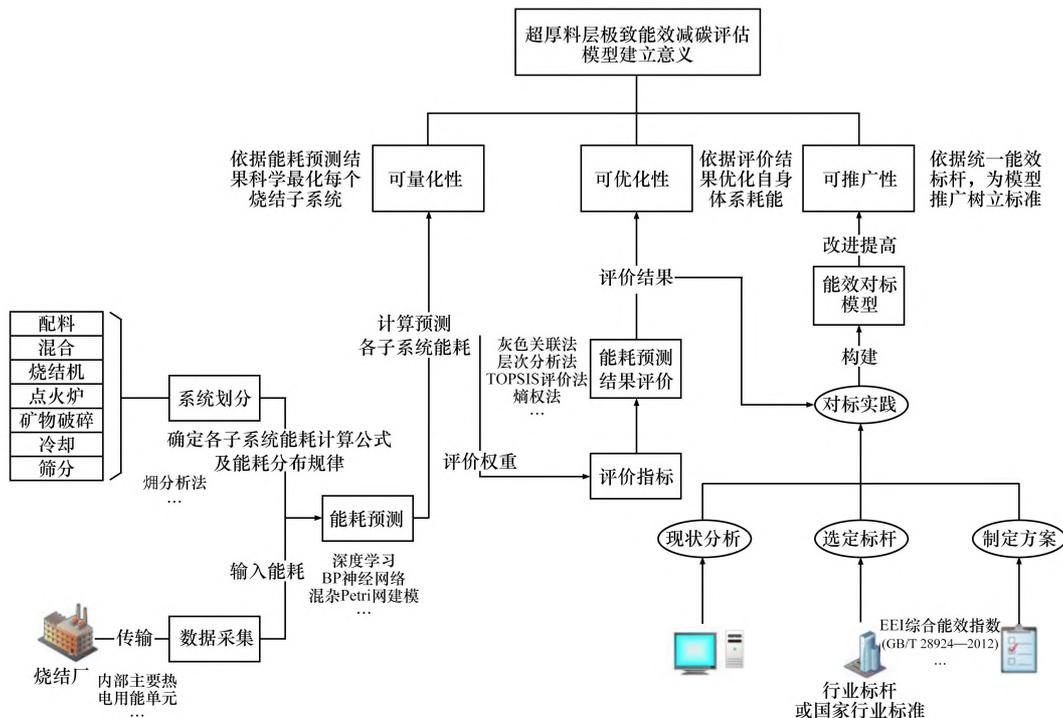


图 8 超厚料层极致能效减碳评估模型建议

Fig. 8 Suggestions for establishing an extreme energy efficiency carbon evaluation model for ultra-thick material layers

子系统能耗的综合预测。此外,对子系统能耗预测结果进行评估,以优化系统的整体能耗性能。

(3) 能效对标模型的建立。通过灰色关联度法、层次分析法、TOPSIS 评价法等方法,构建评价模型以对各子系统能耗预测结果进行系统评价。选取国家或行业标准,如 EEI 综合能效指数(GB/T 28924—2012),作为能效对标标准。对该烧结系统及其子系统进行全面的能效评估,得出指标评估结果。基于评估结果,对系统工艺进行针对性的优化与改进,以提高能效水平。

3 结论

(1) 厚料层烧结技术在减少碳排放、提升烧结矿的机械强度与质量,以及降低能耗等方面均具有显著优势。其在烧结厂的推广应用,对钢铁企业降低能源消耗具有重要推动作用。

(2) 通过应用烧结工序能耗探测和建模理论,构建超厚料层烧结极致能效评估模型,有助于对烧结技术的能效进行深入分析、精准预测和综合评估。这将有助于凸显超厚料层烧结技术的优势,实现能源消耗的可视化,从而更加有效地进行管理和控制。

(3) 超厚料层能效评估模型的构建需要明确界定评估边界。采用多种能效评估分析方法,如焓分析法、神经网络预测模型以及对标分析法等,可以综合构建一个全面的评估预测体系。这一体系有助于实现资源的合理利用,并推动烧结工序朝着绿色低碳的方向发展。

参考文献:

- [1] 李旋. 某钢铁企业的碳排放核算与减排路径优化[D]. 西安:西安建筑科技大学,2023.
LI Xuan. Carbon accounting and emission reduction path optimization for a steel company [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2023.
- [2] 姜维,张永杰,李海峰. 中国钢铁极致能效降碳实践与基础研究[J]. 钢铁,2024,59(9):2-12.
JIANG Wei, ZHANG Yongjie, LI Haifeng. Practice and basic research on carbon reduction through ultimate energy efficiency project for iron and steel in China[J]. Iron & Steel,2024,59(9):2-12.
- [3] 吴胜利,王筱留. 钢铁冶金学:炼铁部分[M]. 4版.

北京:冶金工业出版社,2019.

WU Shengli, WANG Xiaoliu. Iron and steel metallurgy-ironmaking part[M]. 4th ed. Beijing: Metallurgical Industry Press,2019.

- [4] 翟江南. 厚料层烧结技术的经济学解释[J]. 中国冶金,2017,27(6):1-6.
ZHAI Jiangnan. Economics explanation about thick-bed sintering technology[J]. China Metallurgy,2017,27(6):1-6.
- [5] 翟江南. 宝钢厚料层烧结技术创新的经济学分析[D]. 长沙:中南大学,2005.
ZHAI Jiangnan. Economic analysis of sintering technology innovation in Baosteel's thick bed[D]. Changsha:Central South University,2005.
- [6] 邹振伟,廖立. 宝钢烧结余热回收利用实践[J]. 冶金动力,2024,43(4):107-110.
ZOU Zhenwei, LIAO Li. Practice of sintering waste heat recovery of baosteel [J]. Metallurgical Power, 2024, 43(4):107-110.
- [7] 阚永海. 超厚料层烧结技术应用研究[J]. 河南冶金,2020,28(5):1-3.
KAN Yonghai. Research on application of sintering technology for super thick material layer [J]. Henan Metallurgy,2020,28(5):1-3.
- [8] 许满兴. 超厚料层烧结矿的试验研究与生产实践[C]//2014年全国炼铁生产技术暨炼铁学术年会文集(上). 郑州:中国金属学会,2014,318-320.
XU Manxing. Experimental study and production practice of ultra-thick layer sinter [C]//Collection of 2014 National Ironmaking Production Technology Conference and Ironmaking Academic Annual Conference (I). Zhengzhou:The Chinese Society for Metals,2014,318-320.
- [9] 李靖,胡兵,王兆才,等. 烧结工序能效评估技术研究及应用[J]. 武钢技术,2017(1):1-5.
LI Jing, HU Bing, WANG Zhaocai, et al. Research and application of energy efficiency evaluation technology in sintering process[J]. Wuhan Iron and Steel Corporation Technology,2017(1):1-5.
- [10] ZHANG Y P, ZHANG J L, ZHANG C, et al. Modelling and visual verification of combustion zone transfer in ultra-thick bed sintering process[J]. Ironmaking & Steelmaking,2017,44(4):304-310.
- [11] 翟江南. 厚料层烧结优化技术综述及其实践[J]. 烧结球团,2017,42(2):1-9.
ZHAI Jiangnan. A summary and practices of thick-bed

- sintering optimization techniques[J]. Sintering and Pelletizing,2017,42(2):1-9.
- [12] 陈永星,范文生. 河钢塞钢烧结系统工艺技术优化[J]. 河北冶金,2023(10):41-44.
CHEN Yongxing, FAN Wensheng. Process technology optimization of hhis group sebia steel company sintering system[J]. Hebei Metallurgy,2023(10):41-44.
- [13] 保善山,王立满,邵勇,等. 酒钢3[#]烧结机厚料层烧结生产实践[J]. 甘肃冶金,2024,46(2):21-24.
BAO Shanshan, WANG Liman, SHAO Yong, et al. Production practice of thick layer sintering on 3[#] sintering machine in jiusteel[J]. Gansu Metallurgy,2024,46(2):21-24.
- [14] 阚永海. 天钢联合特钢1 000 mm超厚料层烧结生产实践[J]. 山东冶金,2020,42(3):9-11.
KAN Yonghai. 1 000 mm deep-bed sintering practice at Tiangang united special steel[J]. Shandong Metallurgy,2020,42(3):9-11.
- [15] 王建鹏,相里军红,李文雅,等. 汉钢265 m²烧结机1 000 mm料层均质烧结技术进步[J]. 山西冶金,2021,44(5):193-195.
WANG Jianpeng, XIANGLI Junhong, LI Wenya, et al. Progress of homogeneous sintering technology of 1 000 mm material layer in 265 m² sintering machine of hansteel[J]. Shanxi Metallurgy,2021,44(5):193-195.
- [16] 李祜城,周晓冬,李国良,等. 中天钢铁180 m²烧结机1 000 mm超厚料层生产实践[J]. 冶金信息导刊,2023,60(3):36-41.
LI Zicheng, ZHOU Xiaodong, LI Guoliang, et al. Production practice of 1 000 mm ultra thick material layer on the 180 m² sintering machine of Zhongtian iron and steel[J]. Metallurgical Information Review,2023,60(3):36-41.
- [17] 李鹏飞,李来胜,阳习端,等. 超高料层烧结工艺下优化料层透气性生产实践[J]. 矿业工程,2024,22(3):48-51.
LI Pengfei, LI Laisheng, YANG Xiduan, et al. Production practice of optimizing material bed permeability by sintering technology with ultra-high material bed[J]. Mining Engineering,2024,22(3):48-51.
- [18] 赵书清,宋阳,刘巍,等. 降低烧结工序能耗的生产实践[J]. 甘肃冶金,2024,46(2):18-20.
ZHAO Shuqing, SONG Yang, LIU Wei, et al. The production practice of reducing the energy consumption of sintering process[J]. Gansu Metallurgy,2024,46(2):18-20.
- [19] 尹华明,肖婷婷. 降低烧结工序能耗的生产实践[J]. 武钢技术,2010(5):18-20.
YIN Huaming, XIAO Tingting. Production practice in reduction of energy consumption in the sintering process[J]. Wisco Technology,2010(5):18-20.
- [20] 郭世杰. 烧结过程中的温度场模拟及优化研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2023.
GUO Shijie. Simulation and optimization of temperature field in sintering process. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology,2023.
- [21] 李杰,郝鑫涛,赵欣锋,等. 烧结烟气中CO与NO的协同控制研究进展[J]. 中国冶金,2023,33(8):17-24.
LI Jie, HAO Xintao, ZHAO Xinfeng, et al. Research progress on synergistic control of CO and NO in sintering flue gas[J]. China Metallurgy,2023,33(8):17-24.
- [22] 齐玉珍,孟建荣,徐海芳,等. 降低烧结工序能耗的生产实践[J]. 河北冶金,2013(4):68-69.
QI Yuzhen, MENG Jianrong, XU Haifang, et al. Production practice to reduce energy consumption in sintering[J]. Hebei Metallurgy,2013(4):68-69.
- [23] 周裕斌. 攀钢烧结节能降耗措施[J]. 四川冶金,2012,34(1):28-33.
ZHOU Yubin. Panzhihua iron and steel sintering energy saving measures[J]. Sichuan Metallurgy,2012,34(1):28-33.
- [24] 罗国民,文五四,刘志强,等. 韶钢烧结工序用能模型开发与能流优化分析[J]. 烧结球团,2011,36(3):14-17.
LUO Guomin, WEN Wusi, LIU Zhiqiang, et al. Development of energy model for shaosteel sintering process and optimization and analysis of energy flow[J]. Sintering and Pelletizing,2011,36(3):14-17.
- [25] 张健栋,刘常鹏,詹守权. 鞍钢烧结能效模型的开发与应用[J]. 鞍钢技术,2020(5):66-70.
ZHANG Jiandong, LIU Changpeng, ZHAN Shouquan. Development of energy efficiency model for sintering in ansteel and application of model[J]. Angang Technology,2020(5):66-70.
- [26] 苏鹏飞,王果,闵永智,等. 高速铁路信号系统碳排放边界划分及分析[J]. 交通运输系统工程与信息,2024,24(2):293-303.
SU Pengfei, WANG Guo, MIN Yongzhi, et al. Carbon emission boundary analysis for high-speed railway signal system[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology,2024,24(2):293-303.

(下转第37页)

- 32(10):860-867.
- KANG Jian, NING Xiaojun, ZHANG Jianliang, et al. Effect of liquid phase generation behavior of sintering mixture on sinter quality[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2020, 32(10):860-867.
- [12] 吴胜利, 苏博, 齐渊洪, 等. 铁矿粉液相流动性的主要液相生成特征因素解析[J]. 工程科学学报, 2018, 40(3):321-329.
- WU Shengli, SU Bo, QI Yuanhong, et al. Major melt formation characteristic factor analysis of iron ore liquid phase fluidity during the sintering process[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(3):321-329.
- [13] KIMURA H, OGAWA T, KAKIKI M, et al. Effect of Al_2O_3 and MgO additions on liquidus for the CaO-SiO₂-FeO_x system at 1 573 K[J]. ISIJ International, 2005, 45(4):506-512.
- [14] CHEN C L, ZHANG L, LU L M, et al. Thermodynamic calculation of liquidus surface of FeO_x-CaO-SiO₂ system[J]. ISIJ International, 2010, 50(11):1523-1531.
- [15] 翟晓波, 王刚, 邹忠平, 等. 2种氧分压下铁矿粉烧结高温熔体的流动行为[J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(1):75-87.
- ZHAI Xiaobo, WANG Gang, ZOU Zhongping, et al. Flow behavior of high-temperature melt during iron ore sintering under two oxygen partial pressures[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2022, 34(1):75-87.
- [16] 李小明, 王翀, 邢相栋, 等. 不锈钢酸洗污泥对铁矿粉烧结液相生成的影响[J]. 烧结球团, 2018, 43(5):12-19.
- LI Xiaoming, WANG Chong, XING Xiangdong, et al. Influence of stainless steel pickling sludge on liquid phase formulation during iron ore fines sintering[J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(5):12-19.
- [17] LOO C E, LEUNG W. Factors influencing the bonding phase structure of iron ore sinters[J]. ISIJ International, 2003, 43(9):1393-1402.
- [18] MILLS K C, KEENE B J. Physical properties of BOS slags[J]. International Materials Reviews, 1987, 32(1):1-120.
- [19] GUO H, GUO X M. Effect of alumina on liquid phase formation in sintering process of iron ore fines[J]. Steel Research International, 2019, 90(8):1900138.
- [20] XU J F, ZHANG J Y, CHEN D, et al. Effects of MgO content and CaO/Al₂O₃ ratio on surface tension of calcium aluminate refining slag[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(12):3079-3084.
- ~~~~~
- (上接第9页)
- [27] 周茂军, 张文亮, 袁兵, 等. 烧结工序能效因子识别与控制的探讨[J]. 烧结球团, 2010, 35(3):10-13.
- ZHOU Maojun, ZHANG Wenliang, YUAN Bing, et al. Discussion on identification and control of energy efficiency factors for sintering process[J]. Sintering and Pelletizing, 2010, 35(3):10-13.
- [28] 张春霞, 上官方钦, 酆秀萍, 等. 中美钢铁工业能效对标研究[J]. 钢铁, 2013, 48(1):87-92.
- ZHANG Chunxia, SHANGGUAN Fangqin, LI Xiuping, et al. Study on energy efficiency benchmarking of the steel industry between China and the U. S[J]. Iron & Steel, 2013, 48(1):87-92.
- [29] 李富鹏. 烧结工序能效分析与能耗预测[D]. 唐山: 华北理工大学, 2021.
- LI Fupeng. Energy efficiency analysis and energy consumption prediction of sintering process. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2021.
- [30] 陈丽锦, 邓帅, 王珺瑶, 等. 变温吸附碳捕集系统能效性能对标分析[J]. 过程工程学报, 2021, 21(10):1225-1235.
- CHEN Lijin, DENG Shuai, WANG Junyao, et al. Benchmarking analysis on energy efficiency performance of temperature swing adsorption carbon capture system[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2021, 21(10):1225-1235.
- [31] 张学强. 原油集输系统能效对标评价体系研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2022.
- ZHANG Xueqiang. Study on energy efficiency benchmarking evaluation system of crude oil gathering and transportation system. Daqing: Northeast Petroleum University, 2022.
- [32] 高琨. 基于Petri网理论的钢铁企业生产过程能效分析研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2015.
- GAO Kun. Study on energy efficiency analysis in the production process of the iron and steel enterprises based on Petri net. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2015.