厚料层烧结工艺优化及节能降碳技术研究与应用

张振江[1]，张博飞[2]，陈铁军[3]

（1. 河南济源钢铁（集团）有限公司，河南 济源 459000；2. 中国科学院 西北生态环境资源研究院，甘肃 兰州 730000；3. 武汉科技大学 资源与环境工程学院，湖北 武汉 430081）

摘要： 在“双碳”战略目标背景下，高能耗、高排放的钢铁企业亟需通过技术创新实现绿色低碳转型。钢铁行业能耗占全国工业总能耗的 15% 以上，铁前（烧结、炼铁）工序能耗约占钢铁行业总能耗的 60%～70%，其中烧结工序又占钢铁行业碳排放的 15%～20%。因此，烧结工序是节能降碳的重要环节。本文通过系统分析烧结工序的节能降碳特点，通过微负压点火分区控制、富氧点火、混合料蒸汽加热、混合料水分控制等技术优化厚料层烧结工艺，并进行烧结余热回收、烟气内循环及智能化控制等技术创新与应用集成，开发一系列节能降碳技术，在改善料层透气性和降低漏风率的同时，提高烧结料层厚度到 900 mm。结果表明：烧结工序的高炉煤气单耗降至 37.44 m^3/t，固体燃料消耗降至 49.03 kg/t，电力单耗降至 19.68 kW·h/t；与之相应，烧结工序能耗（折标煤）降至 51.72 kg/t，较之前降低了 4.42%；在烧结工序能耗降低的同时，其碳排放强度下降了 4.41%。厚料层烧结工艺优化及节能降碳技术措施的开展，可帮助企业取得显著的综合经济效益，为钢铁行业节能降碳工作和绿色转型发展提供借鉴与参考。

关键词： 烧结；工序能耗；固体燃料消耗；高炉煤气单耗；碳排放强度

中图分类号： TF046.4 **文献标志码：** A **文章编号：** 1000－8764（2025）06－0016－09

doi： 10.13403/j.sjqt.2025.06.092

Research and application of thick layer sintering process optimization and energy conservation and carbon reduction technology

ZHANG Zhenjiang[1], ZHANG Bofei[2], CHEN Teijun[3]

(1. Henan Jiyuan Iron & Steel (Group) Co., Ltd., Jiyuan 459000, Henan, China; 2. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, Gansu, China; 3. Resources and Environmental Engineering College, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China)

Abstract: In the context of the "dual carbon" strategic goal, iron and steel enterprises with high energy consumption and high emissions urgently need to achieve green and low-carbon transformation through technological innovation. The energy consumption of the iron and steel industry accounts for more than 15% of the total energy consumption of the national industry, and the energy consumption of the pre-iron (sintering, ironmaking) process accounts for about 60%～70% of the total energy consumption of the iron and steel industry, of which the sintering process accounts for 15%～20% of the carbon emissions of the steel industry. Therefore, the sintering process is an important link in energy conservation and carbon reduction. In this paper, the sintering process is optimized by micro-negative pressure ignition zone control, oxygen-rich ignition, mixture steam heating, mixture moisture control and other technologies to optimize the thick layer sintering

收稿日期： 2025－06－29；**修回日期：** 2025－09－11

基金项目： 广西科技重大专项资助项目（桂科 AA24263047）；中国宝武低碳冶金创新基金资助项目（BWLCF202107）

作者简介： 张振江（1971—），男，高级工程师，从事铁前工艺技术、能源、环保等方面的生产与管理工作。

通信作者： 陈铁军（1973—），男，教授，从事铁矿低碳造块与直接还原、复杂难选铁矿分选、冶金二次资源综合利用等方面的研究。

中国知网 https://www.cnki.net

process，and carry out technological innovation and application integration such as sintering waste heat recovery，flue gas internal circulation and intelligent control，and develop a series of energy conservation and carbon reduction technologies to improve the air permeability of the material layer and reduce the air leakage rate，and increase the thickness of the sintering bed to 900 mm. The results show that the unit consumption of blast furnace gas in the sintering process decreases to 37.44 m^3/t，the solid fuel consumption decreases to 49.03 kg/t，and the unit power consumption decreases to 19.68 kW·h/t. Correspondingly，the energy consumption of the sintering process (discounted coal) decreases to 51.72 kg/t，which is 4.42% lower than before. While the energy consumption of the sintering process is reduced，its carbon emission intensity is reduced by 4.41%. The optimization of thick layer sintering process and the development of energy-saving and carbon reduction technical measures can help enterprises achieve significant comprehensive economic benefits，and provide reference for energy conservation and carbon reduction work and green transformation and development of the steel industry.

Key words: sintering; energy consumption; solid fuel consumption; specific consumption of blast furnace gas; carbon emission intensity

为推进“双碳”战略目标实施，国务院于 2024 年 5 月 23 日发布《2024—2025 年节能降碳行动方案》(国发〔2024〕12 号)，指明钢铁行业的主要任务：一是加强钢铁产能产量调控，要求新(改/扩)建钢铁产能置换项目必须达到能效标杆水平和环保绩效 A 级水平；二是深入调整钢铁产品结构，大力发展高性能特种钢等高端钢铁产品，严控低附加值基础原材料产品出口；三是加快钢铁行业节能降碳改造。紧随其后，国家发展改革委等五部门于 2024 年 5 月 27 日联合发布《钢铁行业节能降碳专项行动计划》(发改环资〔2024〕730 号)，要求钢铁行业深挖潜力，降低能源消耗和二氧化碳排放。计划要求到 2025 年底，在 2023 年基础上，高炉、转炉工序能耗至少降低 1%，吨钢综合能耗至少降低 2%，余热余压余能自发电率至少提高 3%，能效标杆水平以上产能达到 30%，促进钢铁行业绿色低碳高质量发展。

2024 年，我国粗钢产量为 10.05 亿吨，虽较上年同比下降 1.7%，但我国仍为全球最大钢铁生产国[1]。钢铁产品结构调整仍在持续，建筑业用钢占比下降至 50%，制造业用钢占比提高到 50%。钢铁行业能耗占全国工业总能耗的 15%以上，而铁前工序能耗(烧结、炼铁等)约占钢铁行业总能耗的 60%~70%[2]。同时，钢铁行业的碳排放占全国工业的 18%左右，而烧结工序又占钢铁行业碳排放的 15%~20%。因此，烧结工序是节能降碳的重要环节[3-4]。2023 年，济源钢铁烧结工序能耗(折标煤)为 54.11 kg/t。其中，固体燃料消耗为 45.75 kg/t，占比为 84.55%；高炉煤气单耗为 5.72 kg/t，占比为 10.57%；电力消耗为2.48 kg/t，占比为 4.58%。因此，为降低烧结工序能耗，可以重点从固体燃料消耗、高炉煤气单耗、电力消耗这三个方面展开攻关研究[5-6]。厚料层烧结是常见的降低固体燃料消耗的方法之一[7]。随着料层厚度的增加，下部料层蓄热量增大，能耗随之降低。近年来，烧结料层厚度不断增加，部分企业甚至超过 1 000 mm。该技术的弊端也逐渐显现，烧结矿层质量不均、生产效率下降和废气排放量大等问题限制了料层厚度的继续增加[8-10]。改善料层的透气性和降低漏风率是常见的提高烧结料层厚度的方法，然而当前行业对微负压点火分区控制、富氧点火等方面的实践研究较少[11]。

为此，本文首先通过微负压点火分区控制、富氧点火和混合料加热等技术对厚料层烧结工艺进行优化，然后通过余热回收[12-13]、烧结烟气内循环[14-15]及智能化控制[16]等技术的创新与集成应用，形成一系列有特色的节能降碳技术，为钢铁行业节能降碳与绿色转型提供有益借鉴与实践依据。

1　厚料层烧结工艺优化措施

厚料层烧结过程中，料层自上而下自动蓄热作用加强，有助于降低固体燃料配比；同时，还可提高烧结矿的还原性和强度，稳定烧结终点温度，降低烧结台车速度。但是厚料层烧结存在烧

中国知网　https://www.cnki.net

结矿质量不均匀、成品率下降等问题。在烧结生产中，采取微负压点火分区控制、富氧点火、混合料加热、降低混合料水分等技术措施，优化厚料层烧结工艺。实施后，烧结矿层质量均匀性得到改善，转鼓强度提高，返矿率降低，工序能耗与碳排放强度均有所降低。

1.1 微负压点火分区控制

微负压点火分区控制改造前，烧结工序的两台300 m^2烧结机料面呈灰黄色，表层有约100 mm的未完全烧结矿化的脆化层，导致烧结返矿率高，烧结工序的高炉煤气单耗高。究其原因，主要涉及点火负压高、空煤比波动大、点火温度不稳定等因素。

在抽风高负压的作用下，点火器下方料面被压实，孔隙率降低，料层透气性变差。同时，点火炉周围的冷空气被吸入炉膛，导致点火温度降低，表层烧结温度不足。现场为改善点火效果，被迫加大点火高炉煤气用量。部分未燃烧的高炉煤气随烟气逃逸，造成高炉煤气单耗升高。2024年4、10月，在1、2号烧结机实施微负压点火分区控制技术改造，具体措施包括：在点火器下方的风箱之间加装3台平行阻流器，并在6个风箱支管中部各增加1台微负压专用调节阀，将微负压点火分区控制软件植入原烧结机上位机自动控制系统。通过调整各支管的微负压专用调节阀开度来控制1#、2#、3#风箱的抽风负压及抽风量，最终实现微负压点火的分区自动调控。微负压分区控制系统如图1所示。

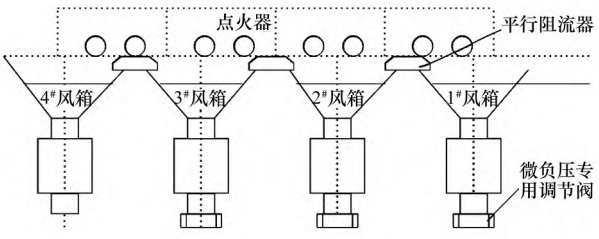


图1 微负压分区控制系统示意

Fig. 1 Schematic diagram of micro-negative pressure zone control system

根据烧结实际生产工况，当点火器下方1#、2#、3#风箱负压维持在－9 kPa至－4 kPa时，烧结抽风量既能保持在合理区间，初始料面又有良好的透气性，这为料层厚度的提高提供了条件。微负压点火分区控制前后数据变化如表1所示。由表1可见，微负压分区控制技术使用前后，1#～3#风箱负压由－12.5 kPa提高到－5.7 kPa，负压绝对值降低了6.8 kPa；高炉煤气流量由14 100 m^3/h降为11 200 m^3/h，降低了2 900 m^3/h。该技术在增加料层透气性的同时，节约了20.57%的高炉煤气用量，节能效果显著。

表1 微负压点火分区控制前后变化

Table 1 Changes before and after zone control of sintering micro negative pressure ignition

项目	1#～3#风箱负压/kPa	高炉煤气流量/($m^3 \cdot h^{-1}$)
优化前	－12.5	1 4100
优化后	－5.7	1 1200
变化量	6.8	2 900

1.2 富氧点火

采取富氧点火技术改善料面的点火烧结效果，提高表层烧结矿强度并降低返矿率。将纯氧引入点火器助燃空气管道，根据点火温度与料面烧结效果，对氧气流量进行调节(流量为0～700 m^3/h)。烧结富氧点火前后返矿率与烟气CO变化如表2所示。生产实践表明，2023年的点火富氧率为5%左右时，点火温度控制为(1 150±50) ℃，烧结料面由灰黄色变为黑灰色，表面脆化层厚度减薄；同时，烧结烟气中CO质量浓度为5 000～6 000 mg/m^3，较改造前降低了771 mg/m^3。这表明烟气中未燃烧的高炉煤气逃逸量减少，燃烧更加充分[17-19]。与实施富氧点火前的2022年对比，烧结煤气单耗降低了4.5 m^3/t，烧结矿转鼓强度增加了2.4%，返矿率下降了3.34%，富氧点火效果显著。

表2 烧结富氧点火前后返矿率与烟气CO变化

Table 2 Changes in sinter return rate and flue gas CO content before and after oxygen-enriched ignition

项目	返矿率/%	转鼓强度/%	烟气中CO质量浓度/($mg \cdot m^{-3}$)	高炉煤气单耗/($m^3 \cdot t^{-1}$)
富氧前	19.08	73.80	6 394	51.60
富氧后	15.74	76.20	5 623	47.10
变化量	3.34	2.40	771	4.50

1.3 混合料加热

烧结过程中，混合料露点是指在一定烧结负压下，混合料中水蒸气分压等于饱和蒸汽压时的

中国知网 https://www.cnki.net

温度，即混合料中水蒸气被冷凝成液态水时的温度。一般地，混合料的露点温度为 50～55 ℃。当混合料温度高于露点温度 10 ℃以上时，冷凝水用量可以减少，过湿带对料层透气性的影响减轻。在厚料层烧结过程中，料层过湿带厚度较大，所以，提高混合料温度可以减缓料层中水蒸气冷凝，减小过湿层厚度，该方法是降低烧结工序能耗的重要措施之一。本文提出蒸汽加热混合料技术，利用环冷机余热锅炉产生的低参过热蒸汽(压力为 0.3 MPa、温度为 180 ℃)，经布置于混合料仓下部锥体四周的 54 个喷嘴引射喷入料仓内，充分加热混合料。同时，采取向一次混合机加热水、向二次混合机与松料器内通入蒸汽、将混合料密封保温输送等方法，将混合料温度控制在 65 ℃(冬季)或 75 ℃(夏季)以上，在此基础上，将料层厚度控制在 770 mm 以上。

1.4　混合料水分控制

混合料水分在烧结过程中起润滑、导热、助燃、抑尘、制粒等作用。低水分、低负压有利于降低混合料露点温度，减轻过湿带的影响。水分过高时，露点温度升高，过湿带变厚，严重时料层下部呈稀糊状，料层阻力增大，透气性变差，垂直烧结速度受到影响；水分过低时，颗粒间黏结力不足，制粒效果变差，料面松散，粉尘增多，垂直烧结速度下降。水分过高或过低均会造成固体燃料消耗升高。

烧结混合料加水工艺采用质量分数为 18% 的炼钢污泥水，操控难度较大。为此，研发自动配加炼钢污泥水技术，实现从浓度与流量控制到加水方式的全流程计算机前馈与反馈自动控制。在燃料运输带、一混入口、二混入口、二混出口节点位置，分别设置微波测水仪收发装置和动态皮带计量称，测量不同料段的水分与混合料流量，控制一混、二混炼钢污泥水添加量。系统还依托机器学习算法对自动加水模型进行持续优化。该自动加水系统使混合料水分由 7.9% 降至 7.5%，加水的精确性得到提升。由于混合料水分的降低，烧结配料中煤(焦)粉配比减少了 0.02%。

综上所述，围绕厚料层烧结工艺优化，通过微负压点火分区控制、混合料加热、富氧点火、混合料水分控制等多项技术的开发与耦合应用，烧结料层厚度逐步提高至 900 mm 左右，边缘效应与热损失逐步降低，料层的自动蓄热加强，热效率提升了约 20%。2024 年，烧结工序的高炉煤气单耗降至 37.44 m^3/t，比上年降低了 9.66 m^3/t，降幅为 20.51%；烧结工序固体燃料消耗降至 49.03 kg/t，较上年降低了 0.55 kg/t，降幅为 1.11%。2025 年 1—3 月，烧结工序的高炉煤气单耗又进一步降至 29.32 m^3/t，较 2024 年降低了 8.12 m^3/t，降幅达 21.69%；烧结工序的固体燃料消耗较 2024 年降低了 0.53 kg/t，降幅达 1.08%。厚料层工艺优化技术应用后，烧结工序能耗不断降低。

2　节能降碳技术开发与应用

2.1　主抽风机汽电双驱反向发电系统

主抽风机汽电双驱反向发电系统(SHRT)耦合了传统烧结工艺、汽轮机发电、锅炉、变速离合器技术，实现烧结工序环冷机余热的综合高效利用。SHRT 的成功应用，将烧结工序产生的热能直接转化为主抽风机的机械能和发电机的电能。与传统的多级能量转换，即热能先转换为汽轮机机械能，再转换为发电机电能，最后将电能再转换为主抽风机机械能的能量转换方式相比，减少了中间环节，提高了能量转换效率。SHRT 不仅减少能量转换损失，还具备反向发电功能。

采用的 SHRT 由高效的环冷机余热锅炉、10 MW蒸汽轮机、主抽风机及相关辅机组成，具有蒸汽轮机、电动(发)电机、主抽风机三机同轴运转的特点。采用高温引风机将环冷机一段、二段的 300～450 ℃高温烟气引入余热锅炉，使余热锅炉产生的蒸汽冲转汽轮机，使汽轮机与同轴电动机共同拖动主抽风机，实现对主抽风机的汽-电双动力驱动。当汽轮机输出的轴功率大于主抽风机所需轴功率时，切换为发电模式，可以向车间内部电网反向送电。环冷机余热锅炉采用立式、双流程、双压自除氧系统。主汽蒸发量为 45 t/h，蒸汽参数为 1.5 MPa/340 ℃；低参蒸发量为 10 t/h，蒸汽参数为 0.45 MPa/200 ℃。锅炉平均出口烟气温度为 140 ℃，实现余热高效回收利用。汽轮机

中国知网　https://www.cnki.net

采用额定功率为10 MW的全冷凝补汽式汽轮机。变速离合器的转速比为3，汽轮机侧转速为3 000 r/min，电动机侧转速为1 000 r/min。

2024年SHRT的反向发电量为2.5×10^4 kW·h/d，折合1.17 kW·h/t。2019年1—4月(SHRT投用前)、2019年5月—2022年10月、2023年、2024年烧结工序的电力单耗分别为43.04、38.92、20.17、19.68 kW·h/t，2024年全年电力单耗较投用前降低了23.36 kW·h/t。全年节约电力为$1.820\ 7\times10^8$ kW·h，折合节约标煤为22 376 t，减少CO_2排放量为55 000 t。SHRT的创新应用，为烧结工序的节能降碳工作提供了一条高效的技术路径。

2.2 低温余热发电系统

在国家“双碳”战略目标背景下，确立“应收尽收”的余热利用原则。2022年3月，在烧结工序研发低温饱和蒸汽余热回收系统。该系统由低温余热锅炉、内置式余热锅炉、7.5 MW饱和蒸汽发电机及相关辅机组成，回收环冷机三段和大烟道内的低温余热。锅炉额定蒸发量为12.8 t/h，蒸汽参数为1.6 MPa/320 ℃。通过引风机将烧结环冷机三段的150～200 ℃低温热烟气引入余热锅炉，产生一路低温饱和蒸汽。同时，在烧结大烟道内置的余热锅炉产生另一路低温饱和蒸汽。将两路低温饱和蒸汽汇合引入汽轮机，使汽轮机拖动发电机组发电，实现低品质余热高效回收利用。

2024年，低温饱和蒸汽余热回收系统发电量为60 600 kW·h/d，全年回收电力为2.182×10^7 kW·h，折合节约标煤为2 681 t，碳排放强度降低7 000 t。烧结工序电力单耗下降2.84 kW·h/t，烧结工序能耗(折标煤)降低0.35 kg/t。

2.3 烧结烟气内循环系统

2022年中国钢铁工业协会将“烧结废气余热循环利用工艺技术”列入极致能效推荐技术清单。该技术是选择性地将部分烧结过程产生的多组分热烟气引回至烧结机料面，实现对废弃余热与潜热的回收。烧结烟气循环工艺具有良好的节能减排效果，符合国家和企业的低碳绿色转型和高质量发展需求。

烧结烟气内循环系统设有两套相对独立的子系统，其中一套抽取烧结机前部1#～4#风箱和尾部21#、22#风箱的烟气(前4后2)；另一套抽取环冷机二段上方烟罩内的高温烟气。两套子系统的热烟气汇合后进入5#～15#风箱上方烟罩内的烧结料面被循环利用。通过调节各子系统的循环热烟气量，将罩内烟气的O_2体积分数控制在19.5%～21%，温度控制在150～180 ℃，促进烟气中CO的二次燃烧，有利于烧结速度与烧结矿成品率的提高。对比烟气内循环系统投用与停用两种工况，在烟气循环投用状态下，使烧结固体燃料消耗降低了1.15 kg/t，折合节约标煤为1.06 kg/t。

烧结烟气内循环系统在满足风烧比为100 m^3/m^2的前提下，由于内循环烟气量占烧结总烟气量的20%，待处理净化的烧结烟气总量相应减少20%，使得主抽风机、机头电除尘器和活性炭烟气净化系统的工程投资和后续运行处理成本相应降低。主抽风机、内循环风机处理的烟气量分别为1.56×10^6、3.9×10^5 m^3/h，占比分别为80%、20%。自投产以来，烧结烟气内循环工艺对烧结矿产、质量的提高起到了重要作用。

2.4 活性炭烟气净化系统

按照“双碳”目标，烧结工序最终要达到超低排放标准和环保A类绩效水平。按照“源头控制+过程降低+末端治理”技术思路，在末端治理时采用活性炭烟气净化工艺。该工艺将烧结烟气中SO_2、NO_x、二噁英、粉尘及重金属等多种污染物协同一体化处理，无害化排放。

活性炭烟气净化系统由烟气接收、污染物吸附、升温炉、活性炭再生与循环、浓硫酸制备等子系统组成。核心设备包括6个错流式两级结构吸附塔和2个高效再生塔。烟气接收系统接收主抽风机排出的烟气，烟气经过增压风机和换热器，其温度控制在135 ℃，然后送入污染物吸附系统。污染物吸附系统设有并联布置的6个吸附塔，每个吸附塔处理烟气量为1.463×10^5 Nm^3/h。在吸附塔内，烟气先经过一级焦床，其中大部分SO_2被吸附在焦床中，低硫烟气与喷入的氨气充分混合后进入二级焦床。在活性炭的催化作用下，烟气中NO_x被NH_3还原成N_2和水。活性炭再生和循环系统接收污染物吸附系统底部排出的富硫焦，富硫焦在再生塔内被加热至400 ℃，富硫焦中的SO_2

中国知网 https://www.cnki.net

在高温下被释放出来，富含 SO_2 的 SRG 烟气被收集后送入硫酸制备系统生产浓硫酸。同时，活性炭中吸附的少量 NO_x 在再生塔中进一步发生 SCR 和 no-SCR 反应，生成 N_2 和 H_2O，实现深度脱硝。活性炭中吸附的二噁英受热分解为无害物质。至此，烧结烟气完成脱硝、脱硫和除尘的全部净化过程。净化后的烟气在吸附塔顶部汇合后经 80 m 烟囱排入大气。活性炭烟气净化系统工艺流程如图 2 所示。

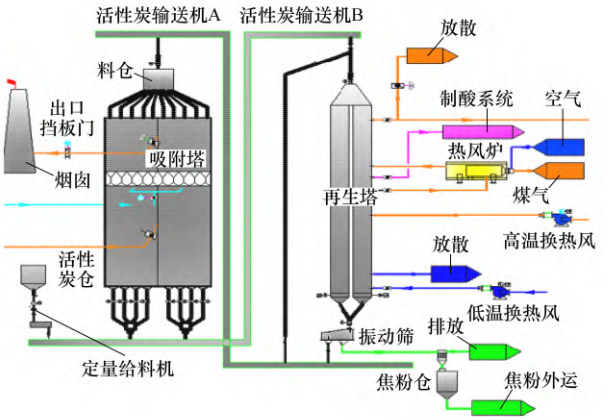


图 2　烟气脱硫脱硝系统工艺流程

Fig. 2　Process flow diagram of flue gas desulfurization and denitrification system

烧结工序烟气净化系统入口和出口处均设有对烧结机烟气成分进行在线监测的 CEMS 系统，烟气成分数据同步传送至环保管理部门。烧结净化系统烟气入口成分如表 3 所示。2024 年，烧结烟气净化系统出口粉尘平均质量浓度为 5.53 mg/m^3，除尘效率为 88.71%，减少粉尘排放量为 1 050 t；SO_2 平均质量浓度为 0.56 mg/m^3，脱硫效率为 99%，减少 SO_2 排放量为 2.1×10^4 t；NO_x 平均质量浓度为 49.63 mg/m^3，脱硝效率为 77.44%，减少 NO_x 排放量为 4 100 t；NH_3 质量浓度平均为 1.88 mg/m^3，各项指标均实现超低排放。

表 3　烧结净化系统出入口烟气质量浓度

Table 3　Flue gas composition at entrance and exit

mg/m^3

项目	烟气净化系统		超低排放标准
	入口	出口	
SO_2	900	0.56	≤35
NO_x	220	49.63	≤50
粉尘	49	5.53	≤10
氨气	—	1.88	≤8

活性炭烟气净化系统的副产品为极具工业价值的 98% 浓硫酸，且无其它固体废弃物。因此，该系统可实现烧结烟气多污染物的协同一体化处理，具有良好的环境友好性与节能降碳效益。活性炭脱硫脱硝烟气净化工序能耗如表 4 所示。2024 年，通过优化烟气净化系统运行参数，采取减少活性炭循环量、提高活性炭工作硫容、控制空气过剩系数等措施，降低高炉煤气消耗 0.82 m^3/t。由于循环量的减少，加热运载氮气消耗量也同步减少 0.98 m^3/t。高温烟气循环风机与冷却风机采用变频技术节约电力消耗 0.66 kW·h/t。因此，2024 年烟气净化系统的工序能耗(折标煤)降至 3.84 kg/t，较上年的 4.32 kg/t 降低了 11.11%。全年节约 3 700 t 标准煤，碳排放强度降低 9 100 t。

2.5　综合原料场顶棚大屋面光伏发电系统

在环保绩效创 A 与超低排放达标改造过程中，建设 4 个总投影面积为 7.5 万平方米且全封闭的 C 型原料大棚，用于贮存矿粉与块矿。利用顶棚屋

表 4　活性炭脱硫脱硝烟气净化工序能耗

Table 4　Energy consumption of activated carbon desulfurization and denitrification flue gas purification process

项目	折算系数	2023 年		2024 年	
		单耗	折标煤/(kg·t^{-1})	单耗	折标煤/(kg·t^{-1})
高炉煤气	0.121 0	8.51 m^3/t	1.029 7	7.69 m^3/t	0.930 5
电力	0.122 9	4.42 kW·h/t	0.543 2	3.76 kW·h/t	0.462 1
压缩空气	0.014 0	0.20 m^3/t	0.002 8	0.20 m^3/t	0.002 8
氮气	0.400 0	5.96 m^3/t	2.384 0	4.98 m^3/t	1.992 0
蒸汽	0.128 6	2.70 kg/t	0.347 2	3.46 kg/t	0.445 0
工业水	0.085 7	0.02 m^3/t	0.001 7	0.02 m^3/t	0.001 7
合计	—	—	4.31	—	3.83

中国知网　https://www.cnki.net

面，建设10 MW光伏发电机组。2024年日均发电量为35 000 kW·h，折合回收烧结工序电力为1.64 kW·h/t，烧结工序能耗(折标煤)降低0.2 kg/t。全年累计回收电力1.265×10^7 kW·h，碳排放强度降低4 000 t。

3 应用效果

3.1 烧结工序能耗变化

按照国家钢铁行业产能置换方案，2019—2022年对原有的烧结系统分两期进行产能置换和升级改造，一期1号烧结机于2019年4月18日投产，二期2号烧结机于2022年9月30日投产。在产能置换与升级改造过程中，采用一系列的节能降碳技术，并取得了显著效益。尤其是厚料层烧结、SHRT、低温饱和蒸汽发电、烧结烟气内循环、活性炭烟气净化等技术的开发与应用，使烧结工序的高炉煤气单耗、固体燃料消耗、电力单耗等指标均取得较大进步。2023—2024年烧结工序能耗变化如表5所示。

由表5可以看出，2024年6—10月烧结工序能耗偏高，主要原因是1号烧结机在此阶段进行分段检修，生产过程不连续，导致消耗数据异常。在1号烧结机检修后的10—12月，烧结工序能耗下降明显。这主要得益于1号烧结机检修结束后，微负压分区控制等技术的投用，导致高炉煤气单耗大幅降低。2024年，烧结高炉煤气单耗同比降低9.66 m^3/t，降幅为20.51%；固体燃料消耗同比降低0.55 kg/t，降幅为1.11%；电力单耗同比降低0.49 kW·h/t，降幅2.43%。总体来看，2024年烧结工序能耗(折标煤)比上年降低了1.74 kg/t。

需要说明的是，由于低温饱和蒸汽余热回收电力向外送入内部电网，在计算烧结工序能耗数据时，应扣除向烧结工序外输送的低温饱和蒸汽余热回收的电力部分(折标煤)0.35 kg/t。因此，2024年的烧结工序综合能耗(折标煤)实际为51.87 kg/t。

3.2 节能降碳综合效益

在烧结工序装备与技术升级改造过程中，通过研发并应用一系列有特色的节能降碳技术，烧结工序能耗显著降低，取得良好的经济效益。经重新核算，2024年烧结工序综合能耗(折标煤)为51.87 kg/t，相较于2023年的53.96 kg/t，降低了2.09 kg/t，降幅为3.87%。全年节约18 200 t标煤，节煤增效约2 555万元。同时，烧结工序CO_2排放强度由2023年的134.73 kg/t降至2024年的128.78 kg/t，降低了5.95 kg/t，降幅约为4.42%。全年减少CO_2排放46 400 t。按碳交易价格估算，预期有约395万元的降低碳排放强度的潜在收益。综上，2024年烧结工序综合能耗(折标煤)降低2.09 kg/t，全年节能降碳为企业带来约2 950万元经济效益。

4 总结与展望

(1) 通过对微负压点火分区控制、富氧点火、混合料加热以及混合料水分控制等技术的耦合应用，烧结料层厚度由770 mm逐步提高至900 mm，料层自动蓄热作用随之增强，热效率提升约20%，降低了燃料消耗，提高了烧结矿成品率。

(2) 烧结主抽风机汽电双驱反向发电技术(SHRT)，有效减少了能量多次转换造成的效率下降与能量损失。与传统的单一电动机驱动方式相比，烧结工序电力单耗降低了23.36 kW·h/t。烧结烟气内循环技术，回收了烧结烟气的显热和潜热，向烧结料面补充热量。该技术方案减少主抽风机、

表5 2023—2024年烧结工序能耗变化

Table 5 Changes in energy consumption in the sintering process from 2023 to 2024

项目	折算系数	2023年		2024年	
		单耗	折标煤/(kg·t^{-1})	单耗	折标煤/(kg·t^{-1})
高炉煤气单耗	0.121 0	47.10 m^3/t	5.699 1	37.44 m^3/t	4.530 2
固体燃料消耗	0.920 0	49.58 kg/t	45.613 6	49.03 kg/t	45.107 6
电力单耗	0.122 9	20.17 kW·h/t	2.478 9	19.68 kW·h/t	2.418 7
压缩空气单耗	0.014 0	12.28 m^3/t	0.170 8	12.06 m^3/t	0.168 8
合计	—	—	53.962 4	—	52.225 3

中国知网 https://www.cnki.net

机头电除尘器和活性炭烟气处理系统约 20% 投资费用和运行成本。低温饱和蒸汽余热回收发电系统，创新性地回收利用烧结工序环冷机与大烟道低温段的余热，进行低温余热饱和蒸汽发电，降低烧结工序能耗约 0.7%。采用活性炭烟气净化技术，实现烧结烟气多污染物一体化协同净化处理、无害化排放，减少污染物的转移与新固废的产生。脱硫效率≥99%，脱硝效率≥77.44%，除尘效率≥88.71%，达到烧结烟气的超低排放标准。

(3) 通过一系列节能降碳技术的开发与应用，2024 年烧结工序能耗(折标煤)降至 51.87 kg/t，但与国家标杆水平的 45 kg/t 相比，还有较大差距。未来将进一步研究超厚料层烧结、固体燃料分加、主抽风机汽电双驱变频、低品位余热回收利用、氢基燃料喷吹、生物质燃料、CO_2 捕集与封存等前沿技术，通过技术转化与应用，促进钢铁行业的深度节能降碳，创造更大的经济和生态效益。

参考文献:

[1] 崔志峰，上官方钦，马文略，等. 双碳背景下中国钢铁行业未来发展趋势探讨[J]. 工程科学学报，2025，47(4)：862－874.
CUI Zhifeng，SHANGGUAN Fangqin，MA Wenlue，et al. Discussion on the future development trend of China's iron and steel industry under the background of double carbon[J]. Chinese Journal of Engineering，2025，47(4)：862－874.

[2] 赵紫薇，孔福林，童莉葛，等. 基于“3060”目标的中国钢铁行业二氧化碳减排路径与潜力分析[J]. 钢铁，2022，57(2)：162－174.
ZHAO Ziwei，KONG Fulin，TONG Lige，et al. Analysis of CO_2 emission reduction path and potential of China's steel industry under the “3060” target[J]. Iron and Steel，2022，57(2)：162－174.

[3] 魏婷. 烧结余热发电的热经济性分析[D]. 北京：华北电力大学，2010.
WEI Ting. Analysis of the thermodynamic economy of sintering waste heat generating process[D]. Beijing：North China Electric Power University，2010.

[4] 李建军，邵雁，熊劲，等. 烧结工序节能减排技术研究综述[J]. 烧结球团，2022，47(5)：95－101.
LI Jianjun，SHAO Yan，XIONG Jin，et al. Research review on energy saving and emission reduction technology in sintering process[J]. Sintering and Pelletizing，2022，47(5)：95－101.

[5] 韩正轩，朱红卫，梁晓东，等. 降低 265 m^2 烧结系统点火煤气耗的实践[J]. 柳钢科技，2018(6)：5－6；43.
HAN Zhengxuan，ZHU Hongwei，LIANG Xiaodong，et al. Practice of reducing ignition gas consumption of 265 m^2 sintering system[J]. Liugang Keji，2018(6)：5－6；43.

[6] 裴元东，廖继勇，张俊杰，等. 铁矿粉烧结过程 CO 减排探讨[J]. 烧结球团，2019，44(1)：69－73.
PEI Yuandong，LIAO Jiyong，ZHANG Junjie，et al. Discussion on CO emission reduction in iron ore fines sintering process[J]. Sintering and Pelletizing，2019，44(1)：69－73.

[7] 陈思凡，项子豪，阮锦琦，等. 超厚料层烧结极致能效减碳研究进展与思考[J]. 烧结球团，2025，50(2)：1－9；37.
CHEN Sifan，XIANG Zihao，RUAN Jinqi，et al. Research progress and thinking on extreme energy efficiency and carbon reduction of ultra-thick material layer sintering[J]. Sintering and Pelletizing，2025，50(2)：1－9；37.

[8] 戴玉山，胡文祥，王义惠，等. 超厚料层烧结水碳结构优化研究[J]. 冶金能源，2024，43(2)：3－6；14.
DAI Yushan，HU Wenxiang，WANG Yihui，et al. Optimization of water-carbon structure in ultra-thick bed layer sintering[J]. Energy for Metallurgical Industry，2024，43(2)：3－6；14.

[9] 何二喜，赵改革，季志云，等. 超厚料层烧结过程固体燃料的分布规律[J]. 烧结球团，2024，49(1)：42－47.
HE Erxi，ZHAO Gaige，JI Zhiyun，et al. Distribution law of solid fuel in sintering process of ultra-thick bed of material[J]. Sintering and Pelletizing，2024，49(1)：42－47.

[10] 陈绍国，张晓臣，梁洁，等. 首钢京唐公司超厚料层烧结的试验分析[J]. 中国冶金，2023，33(3)：94－102.
CHEN Shaoguo，ZHANG Xiaochen，LIANG Jie，et al. Experimental analysis on ultra-deep bed sintering in Shougang Jingtang[J]. China Metallurgy，2023，33(3)：94－102.

[11] 李国良，李乾坤，周晓冬，等. 多工艺协同降低烧结机工序能耗生产实践[J]. 烧结球团，2021，46(1)：55－59；75.

中国知网　https://www.cnki.net

LI Guoliang, LI Qiankun, ZHOU Xiaodong, et al. Production practice on reducing energy consumption of sintering machine process with multi-technique [J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(1): 55 – 59; 75.

[12] 赵军凯,侯健,姜林. 邯钢烧结机冷却系统改造与余热发电效果提升 [J]. 中国冶金, 2020, 30(4): 69 – 73.
ZHAO Junkai, HOU Jian, JIANG Lin. Improvement of cooling system and waste heat power generation effect of sintering in Handan Iron and Steel [J]. China Metallurgy, 2020, 30(4): 69 – 73.

[13] 叶竹,张云贺. 烧结机烟气余热的有机朗肯循环发电 [J]. 材料与冶金学报, 2022, 21(5): 371 – 375.
YE Zhu, ZHANG Yunhe. Power generation from low-temperature waste heat of sintering flue gas by using organic Rankine cycle [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2022, 21(5): 371 – 375.

[14] 包涛. 安钢3号烧结机烟气循环工艺改造与应用实践 [J]. 山西冶金, 2025, 48(2): 161 – 162; 165.
BAO Tao. Transformation and application practice of gas circulation process for angang No. 3 sintering machine [J]. Shanxi Metallurgy, 2025, 48(2): 161 – 162, 165.

[15] 温胜坤. 烧结烟气循环技术应用及系统设计要点分析 [J]. 中国设备工程, 2025(6): 210 – 212.
WEN Shengkun. Analysis of application and system design points of sintering flue gas circulation technology [J]. China Plant Engineering, 2025(6): 210 – 212.

[16] 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.
DING Chengyi, CHANG Rende, GUO Shenglan, et al. Research status of intelligent control of sintering process and prediction of metallurgical properties of sinter [J]. Iron and Steel, 2024, 59(4): 42 – 56.

[17] 廖继勇,郑浩翔,甘敏,等. 烧结烟气CO的产生及治理途径:源头及过程控制技术 [J]. 烧结球团, 2021, 46(2): 8 – 16.
LIAO Jiyong, ZHENG Haoxiang, GAN Min, et al. Generation and governance way of CO in sintering flue gas: Source and process control technology [J]. Sintering and Pelletizing, 2021, 46(2): 8 – 16.

[18] 吴宏亮,罗云飞,周江虹,等. 富氧协同烟气循环对烧结矿质量指标和CO排放的影响 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(4): 1179 – 1188.
WU Hongliang, LUO Yunfei, ZHOU Jianghong, et al. Influence of oxygen enrichment and flue gas circulation on quality index of sinter and CO emissions [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(4): 1179 – 1188.

[19] 陈宇,刘臣,王兆才,等. 基于烟气循环烧结的CO过程控制优化工艺与技术 [J]. 烧结球团, 2024, 49(6): 129 – 136.
CHEN Yu, LIU Chen, WANG Zhaocai, et al. CO process control optimization technology and technique based on gas circulation sintering [J]. Sintering and Pelletizing, 2024, 49(6): 129 – 136.

(上接第8页)

[31] 卢建光,刘小杰,吕庆. PMC精矿粉造球参数的优化研究 [J]. 烧结球团, 2020, 45(6): 54 – 60.
LU Jianguang, LIU Xiaojie, LÜ Qing. Research on optimization of balling parameters of PMC concentrate powder [J]. Sintering and Pelletizing, 2020, 45(6): 54 – 60.

[32] 吴胜利,樊佳欣,朱娟,等. 基于生石灰吸水性的适宜烧结制粒水分 [J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(1): 27 – 34.
WU Shengli, FAN Jiaxin, ZHU Juan, et al. Proper water addition for sintering granulation based on the water absorbing characteristics of quicklime [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2015, 27(1): 27 – 34.

[33] 朱梦飞,周罕龙,陆启财,等. 高钛澳精粉成球特性研究和生产应用 [J]. 金属材料与冶金工程, 2023, 51(6): 38 – 44.
ZHU Mengfei, ZHOU Hanlong, LU Qicai, et al. Research on spherical characteristics and production application of high titanium Australian refined powder [J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2023, 51(6): 38 – 44.

中国知网 https://www.cnki.net