

双碳目标下钢铁烧结工序节能降碳技术研究

王 军 涂国宝

安阳钢铁股份有限公司, 河南 安阳 455000

[摘要]烧结工序是钢铁生产长流程中能耗和碳排放最集中的环节之一, 烧结工序节能降碳水平直接影响到钢铁行业“双碳”目标的实现。文中对烧结工序碳排放的主要来源进行了系统的分析, 并对节能降碳的必要性进行了阐述, 梳理了目前烧结工序固体燃料消耗、烟气排放、工艺控制、能源管理等各方面的主要问题, 重点介绍了厚料层烧结、富氢燃料喷吹、烟气循环及余热回收、智能优化控制等关键技术。经过研究得知, 采用上述各种技术综合起来可以明显降低烧结固体燃料消耗、工序能耗和CO₂排放强度。未来要冲破料层厚度和透气性、富氢燃料价格、循环工艺余热高效回收等瓶颈, 加大技术耦合集成力度, 推进烧结工序绿色低碳转型。

[关键词]双碳目标; 烧结工序; 节能降碳; 技术应用

DOI: 10.33142/ect.v4i7.20131

中图分类号: TF046.4

文献标识码: A

Research on Energy-saving and Carbon Reduction Technologies for Steel Sintering Processes under the Dual Carbon Target

WANG Jun, TU Guobao

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

Abstract: The sintering process is one of the most concentrated energy consumption and carbon emissions links in the long process of steel production. The level of energy conservation and carbon reduction in the sintering process directly affects the achievement of the "dual carbon" goal in the steel industry. The main sources of carbon emissions in the sintering process were systematically analyzed in the article, and the necessity of energy conservation and carbon reduction was elaborated. The main issues in solid fuel consumption, flue gas emissions, process control, energy management, and other aspects of the sintering process were sorted out, with a focus on key technologies such as thick layer sintering, hydrogen rich fuel injection, flue gas circulation and waste heat recovery, and intelligent optimization control. After research, it has been found that the use of various technologies mentioned above can significantly reduce sintering solid fuel consumption, process energy consumption, and CO₂ emission intensity. In the future, we need to break through bottlenecks such as material layer thickness and permeability, hydrogen rich fuel prices, and efficient recovery of waste heat from recycling processes, increase technological coupling and integration efforts, and promote the green and low-carbon transformation of sintering processes.

Keywords: dual carbon target; sintering process; energy conservation and carbon reduction; technology application

引言

自2020年我国提出“双碳”目标之后, 钢铁行业作为碳排放的重头戏, 已经完成了上千项节能技术改造。中国约90%的钢铁是用高炉、转炉长流程工艺生产出来的, 烧结工序是高炉冶炼的主要原料。烧结过程有高污染、高能耗的特点, 其污染物排放和碳排放分别占到钢铁行业总排放量的前两位。我国烧结年耗煤5500万t, CO₂排放量超过2亿t, 烟气中各种污染物排放量居钢铁工业之首。在“双碳”战略不断深入的背景之下, 烧结工序是行业能

耗(占12%~15%)和烟气排放(超过30%)的主要环节, 因此它的绿色转型问题也成了行业的重大命题。烧结是钢铁工业实现双碳目标的重要环节之一, 低碳烧结对钢铁工业绿色低碳发展有重大意义。深入研发并推广减污降碳烧结技术对于我国钢铁行业绿色低碳转型有着十分重要的意义。

1 烧结工序碳排放来源及节能降碳必要性

烧结工序的碳排放主要是固体燃料(焦粉、无烟煤等)的燃烧过程。烧结混合料中的碳质燃料在点火之后一直燃

烧,给烧结过程提供所需的热量,并且释放出大量的 CO_2 。钢铁企业生产过程中的 CO_2 排放次之于炼铁工序、焦化工序,是钢铁企业的温室气体主要来源。烧结工序能耗结构中化石燃料消耗占能耗的 86%以上,生产过程中碳排放主要是由化石燃烧和石灰石、白云石分解构成的,二者所占烧结工序碳排放量的 81.7%。烧结工艺属于钢铁原料制备的重要工序之一,它的碳排放量占钢铁流程碳排放总量的 15%,工序能耗占钢铁流程总能耗的 10%。烧结工序属于长流程钢铁生产的重要部分,其能耗占钢铁生产总能耗的 10%~15%,烧结总能耗的 80%左右是固体燃料消耗。随着超低排放改造全面落地,脱硫脱硝、烟气循环等环保设施不断投入使用,部分工序能耗逆势上涨,出现“环保达标”和“节能增效”并存的难题。烧结工序的节能降碳属于钢铁行业实现“双碳”目标的必然要求。因此降低烧结工序的温室气体排放,就是钢铁企业实现双碳目标的重要工作之一。烧结环节的能效提升和污染物治理,同全行业绿色转型成败息息相关。

2 钢铁烧结工序节能降碳存在的主要问题

2.1 固体燃料消耗高,能源利用效率偏低

烧结工序的固体燃料消耗是决定其能耗高低、碳排放强度的主要因素。固体燃料是烧结过程中主要的热量来源,占 80%以上。目前我国大部分烧结机固体燃料消耗仍然很高,比行业先进值有较大差距。我国烧结行业普遍存在着燃料不完全燃烧程度高、高料层热量分布不均匀、低温余热回收率低、烧结返矿率高等诸多问题,使得我国钢铁企业的烧结固体燃料消耗大多高达 48~50kgce/t,比国际先进水平高出 8~10kgce/t,与烧结极致能效还有很大的差距。厚料层烧结可以利用自动蓄热来降低固体燃料的消耗,但是由于“蓄热效应”造成的“烧结料层上部热量不够、下部热量过多”的固有难题一直没能得到根本解决。烧结上下部料层的热量差别大,上部热量少,成矿条件差造成返矿率高,烧结吨矿固体能耗居高不下。另外,传统的烧结工艺中点火温度偏高、燃料燃烧不充分等问题又加大了能源的浪费。

2.2 烧结烟气排放量大,余热资源利用不足

烧结工序所产生出来的烟气体积较大、成分繁杂,属于钢铁行业烟气治理的重中之重与难啃之石。烧结烟气排放量占钢铁行业总排放量的比重大于 30%。环冷机中低温冷却废气缺少高效的回收利用技术,大多直接排放,造成热量浪费和无组织排放。烧结 60%的热量是由主烟道烟气、冷却机废气带走的。烧结工序余热排放占全部能耗热量的 49%。环冷机各个段的烟气温度相差较大,一段出

口温度约为 429℃、二段约为 340℃、三段约为 270℃、四段约为 180℃、五段约为 150℃。环冷废气无组织排放严重,余热利用率低,不到发达国家 60%~90%的水平。目前烧结矿显热回收主要采用液密封环冷机、直联炉罩锅炉、环冷机余热梯级利用技术耦合形成的余热回收系统,可以将烧结矿显热回收效率提高到 50%以上,但是冷却废气品质不高、热量集中度不够,仍然有大量的除尘散热余热浪费^[1]。大烟道烟气同样含有大量的显热,但是由于烟气成分复杂、换热面容易积灰等原因,余热回收效率较低。烟气 CO 排放控制越来越严格,前端治理只能达到 6000mg/Nm³ 以下。烟气排放量大、余热回收率低并存,既加重了末端治理的负担,又造成大量的可利用能源浪费。

2.3 工艺控制精度不足,运行稳定性有待提升

烧结生产是复杂的物理化学过程,包含配料、混料、布料、点火、烧结、冷却等各个环节,各个环节的工艺参数互相耦合、互相影响。目前大部分烧结机的工艺控制仍然依靠人工经验,在生产过程中存在着大滞后、强耦合、非线性等技术难题。混合料水分控制不准、点火温度忽大忽小、烧结终点位置难定等问题时常出现,从而造成烧结矿质量不稳定、返矿率较高、能耗增大。配料时出现混合料成分准确率低、烧结矿质量波动大的情况。目前我国烧结生产存在智能控制水平低、精准控制难、生产管理模式落后、信息化程度低、人工劳动强度大、能耗高等问题。

2.4 智能化能源管理与碳排放监测体系不完善

在“双碳”目标之下,准确的碳排放核算是制定减排策略、评价减排效果的前提。但是目前很多钢铁企业对于能源管理以及碳排放监测还存在着较大的不足。碳排放数据的采集、统计和分析大多依靠人工填写,数据的准确性以及及时性不能得到保证。智慧能源动态管控系统虽然在部分企业中得到了应用,但是它的覆盖面以及智能化程度还有待提高。能源介质计量不精细,不能进行工序级、设备级的能耗精确分析。烧结智能制造包含烧结工程项目全生命周期的智能控制、智能设备、安全环保、能源管控等系统的规划设计、施工和运行。其主要目的就是推进钢铁企业烧结生产智能化、无人化以及工厂管理扁平化^[2]。碳排放监测体系不健全,企业不能及时了解碳排放状况,也不能对各项节能降碳措施的效果进行科学评价,从而影响到减排工作系统地、有针对性地开展。

3 双碳目标下钢铁烧结工序节能降碳关键技术

3.1 厚料层烧结节能技术

厚料层烧结是降低烧结工序固体燃料消耗的基础性

技术。厚料层烧结技术是在低温烧结和铁酸钙固结理论基础上,利用烧结料层的自动蓄热作用,延长烧结过程中的高温保持时间,改善矿物结晶、提高烧结矿质量、降低烧结固体燃耗。厚料层烧结技术是在铁酸钙固结理论、自动蓄热作用的基础上发展起来的一种先进的烧结技术,它具有良好的自蓄热性,得到了广大同行的认可并广泛应用于生产中,烧结料层厚度大于或等于 850mm 的烧结称为超厚料层烧结。高料层烧结是实现低碳绿色烧结生产的重要途径,是 21 世纪以来国内外烧结研究最活跃的领域之一。提高料层厚度可以充分发挥烧结料层的自动蓄热作用,减少烧结工序的固体燃料消耗。针对厚料层烧结存在的热量分布不均问题,以燃料偏聚为基础的低碳均热烧结技术,通过减少下部料层燃料配加量,并把部分燃料精确地分配到最需要热量的表层,从而解决了表层热量不足、下层热量过剩的问题,同时减少了固体燃料的总消耗。该工艺只涉及燃料分流,比传统的分层烧结工艺流程更简单、投资更少。该技术可以实现 1050mm 超厚料层烧结稳定运行,解决了厚料层烧结热量分布不均匀的问题,固体燃料总消耗比传统工艺降低 6.4%。厚料层烧结依靠自动蓄热大幅度削减固体燃耗和工序能耗,改善烧结矿强度和成品率。厚料层烧结配合燃料偏聚技术,在不增加设备投资的情况下可以有效地降低固体燃耗和碳排放,是烧结工序节能降碳的基础性技术手段。

3.2 富氢燃料喷吹与低碳燃烧技术

富氢燃料喷吹技术就是向烧结料面喷射天然气、焦炉煤气等富氢气体来补热,代替一部分固体燃料,达到碳减排的目的。中冶京诚工程技术有限公司牵头研发的烧结料面喷吹富氢燃气技术,向料面喷射天然气、焦炉煤气等富氢气体进行补热,拓宽上层燃烧带、缩小下层高温区,均匀料层纵向热量分布,降低固体燃料比例,解决传统烧结“上欠下过”热量不均问题。装置配有安全防护气舱、强制放散、全流程在线监测与控制模块,克服了燃气局部富集起火、喷吹规模受限制等行业技术、安全的瓶颈,可以稳定地实现大剂量连续喷吹^[3]。利用焦炉煤气的富氢性,改变传统的固相燃料烧结方式,用富氢燃气对上层料面进行补热,达到均热烧结的目的。工业化应用结果表明,在

不降低烧结产品质量的情况下,烧结固体燃耗可以减少 1.5~2.5kg/t,吨矿 CO₂排放减少 4.4~7.33kg;而且能有效地减少 SO₂、NO_x 的排放。使用富氢燃气喷吹技术,可以使烧结工序 CO 减排 14.8%。喷吹富氢燃气技术属于烧结领域的一种氢冶金技术,正在逐渐向工业化应用迈进。富氢燃料喷吹技术从源头上减少了碳质燃料的使用量,是烧结工序实现以气代煤低碳转型的主要方向。

3.3 烧结烟气循环及余热回收利用技术

烧结烟气循环和余热回收利用技术属于过程控污与末端协同的重要手段,包含诸多技术路线,各种方案在循环比例、节能效果、投资成本等方面存在较大差别,具体如下表 1 所示。

烟气循环技术就是将部分烧结热废气返回到烧结料层中,利用烧结烟气余热对热风进行烧结,达到二次燃烧一氧化碳的目的,从而降低固体燃料的消耗。提高烟气循环率可以大幅度减少烧结烟气排放量。末端烟气治理设施运行能耗下降 5%。通过优化风量匹配模型,把环冷机外排废气全部送入烧结机料面,用作助燃空气循环使用。余热回收上,烧结环冷机零排放全段余热回收技术创建起全段烟气回收体系。按照“热量品质分级”的原则实行梯级利用。模块化内置式大烟道余热回收技术可以准确地回收烧结机大烟道尾部风箱的余热。双压系统比单压系统多回收 10%的热量。烟气循环和余热回收相结合,可以达到减污和降碳的双重效果。

3.4 智能优化控制与数字化能源管理技术

智能优化控制技术属于提高烧结工序运行效率、挖掘节能降碳潜力的重要方法。中冶北方以传统烧结工艺为基础,将现代控制理论和人工智能技术结合起来,打破了生产过程中一直存在的大滞后、强耦合、非线性等技术难题。系统把“数智融合”当作核心,“实时预测”作为支撑来创建起“感知-认知-决策”一体化的智能控制体系。利用原料配比优化、热工状态调节、终点智能预测、能源介质协同等环节来建立一个完整的闭环智能控制,从而解决生产、设备、质量等各方面的数据壁垒问题。采用先进的控制技术,根据多年的实践经验对透气性、烧透点、成品成分等重要工艺进行诊断、优化、控制,消除个体差异,达

表 1 烧结烟气循环及余热回收主要技术方案对比

技术方案	循环/回收比例	节能降碳效果	主要技术特点
烟气内循环(热风烧结)	循环比例 20%~30%	固体燃耗降低 6%,外排烟气量减少	烟气直接返回烧结机,流程简单
烟气外循环(冷却废气)	循环比例 30%~40%	外排烟气总量减少 20%以上	需增设除尘脱硫,投资较高
环冷机全段余热回收	全段烟气 100%回收	高温段吨矿发电量达 31.82kW·h	将环冷机 1 段至 5 段烟气实现 100%回收
大烟道余热回收	—	大烟道余热回收率可达 25%	模块化内置式大烟道余热回收方法

到工况稳定、操作优化的目的^[4]。依托智慧能源动态管控系统,成功地完成了对主抽风机电耗、固体燃料消耗、烟气排放指标等重要数据的实时监控和智能分析,从而达到对二氧化碳排放进行实时、连续监测的目的,大幅度提高了碳排放数据的精确程度和时效性。经过综合测定,系统投运后可以达到吨矿固体能耗降低 2.4kg、单线年减排二氧化碳超万吨的效果。烧结过程由原来的“经验驱动”变为现在的“数据驱动”。建设烧结智能工厂已经成为智能烧结发展的必然趋势。智能优化控制和数字化能源管理技术的运用,会促使烧结工序由原来的依靠人工操作的模式转变为依靠数据进行智能控制的方式,给精准节能降碳提供技术支持。

4 结语

在“双碳”目标的指引之下,钢铁烧结工序的节能降碳由原来的“选择性”变为“生存性”的要求。厚料层烧结依靠自动蓄热大幅度削减固体燃料消耗和工序能耗。富氢喷吹改善料层温度场,加长高温保温时间,达到固体燃料消耗下降、碳排放减少和污染物共同减排的目的。烟气循环可减少外排烟气量,削减固体燃料消耗,回收余热和化学能。

三大核心技术各有优势,但是单一技术的减排效果较小。综合使用以上技术可以大大降低烧结固体燃料消耗、工序能耗和 CO₂排放强度。未来要冲破料层厚度和透气性、富氢燃料价格、循环工艺余热高效回收这些难题,加强技术耦合集成。采用各种节能降碳技术的协同使用以及系统的集成,烧结工序可以保证烧结矿的质量的同时,也能达到提高能效、减少碳排放的目的,为钢铁行业实现“双碳”目标打下基础。

[参考文献]

- [1]曹嘉宝.碳中和目标下中国钢铁行业减污降碳协同路径研究[D].沈阳:沈阳化工大学,2025.
- [2]闫焱,郭新.“双碳”目标下钢铁企业减排降碳绿色发展探析[J].资源节约与环保,2024(7):1-3.
- [3]王学武,李海峰.中国钢铁行业节能降碳的实践探索与现实挑战[J].冶金财会,2026,45(2):37-40.
- [4]徐铨辉.烧结工序节能降碳改造探索与创新技术应用实践[J].山西冶金,2026,49(3):238-240.

作者简介:王军(1998—),男,甘肃兰州人,助理工程师,武汉科技大学矿物加工专业毕业,现就职于安阳钢铁股份有限公司,从事烧结配料,高炉供料工作。