

环保视角下的钢铁连铸工艺优化与实践

渠晋栋

山西太钢不锈钢股份有限公司 山西 太原 030000

摘要: 连铸工艺作为钢铁生产的关键环节,在能源消耗、废弃物排放和资源利用方面存在显著环境影响。本文从环保视角出发,系统分析了连铸工艺的能源消耗与碳排放、废弃物与污染物排放特征,以及资源利用效率现状。针对这些问题,提出了能源效率提升、废弃物减量化与资源化、污染物排放控制、工艺参数精准控制等优化路径,并探讨了近终形连铸技术、智能化与数字化技术、绿色材料与涂层技术、多工序协同优化等集成创新方向,为钢铁连铸工艺的绿色转型提供理论支撑和实践指导。

关键词: 钢铁连铸工艺; 环境影响; 工艺优化; 集成创新; 绿色发展

引言: 钢铁行业是能源消耗与污染物排放大户,连铸工艺作为关键环节,对环境的影响显著。随着环保要求的提升,优化连铸工艺迫在眉睫。分析其环境影响,探索优化路径与创新方向,不仅能降低能耗与排放,还能提升资源利用效率,实现钢铁行业绿色转型,对推动可持续发展意义重大。

1 连铸工艺的环境影响分析

1.1 能源消耗与碳排放

连铸过程作为钢铁生产中的关键环节,能源消耗贯穿于多个工序。电耗是连铸工艺中不可忽视的一部分,从钢水的输送、结晶器的振动,到拉坯机的运转,各个环节都需要电力驱动。以一座年产300万吨钢的连铸车间为例,其年电耗可达8000万千瓦时。燃气消耗则主要体现在钢水的加热环节,为确保钢水达到适宜的浇注温度,需使用燃气对钢水进行加热,这一过程消耗大量能源。在加热过程中,每吨钢水需消耗燃气约40立方米,一座年产300万吨钢的连铸车间,年燃气消耗量可达12000万立方米^[1]。碳排放是连铸工艺对环境的重要指标之一。钢水加热是碳排放的主要源头,在加热过程中,燃气燃烧释放出大量二氧化碳。每立方米燃气燃烧约产生2千克二氧化碳,该车间年因燃气燃烧产生的二氧化碳排放量可达24万吨。设备运行同样会产生碳排放,连铸设备在长时间运转过程中,电机等部件的能耗会间接转化为碳排放。该车间设备运行年碳排放量约为5万吨。这些碳排放不仅加剧了全球气候变暖的趋势,也对生态环境造成了潜在威胁。

1.2 废弃物与污染物排放

连铸工艺在生产过程中会产生多种固体废弃物。耐火材料是其中的主要部分,在高温环境下,耐火材料会

逐渐损耗,产生废渣。一座年产300万吨钢的连铸车间,年产生耐火材料废渣约3万吨。氧化铁皮也是常见的固体废弃物,在钢水浇注和凝固过程中,部分铁元素被氧化形成氧化铁皮。该车间年产生氧化铁皮约2万吨。这些固体废弃物若处理不当,不仅会占用大量土地资源,还可能对土壤和水体造成污染。废气排放是连铸工艺的另一大环境问题。粉尘是废气中的主要污染物之一,在钢水浇注和铸坯切割过程中,会产生大量粉尘,对空气质量造成影响。在铸坯切割工序,每小时产生粉尘量可达50千克,一座年产300万吨钢的连铸车间,年切割工序粉尘产生量约为400吨。二氧化硫和氮氧化物也是废气中的重要成分,这些气体在大气中会参与化学反应,形成酸雨等环境问题,对生态环境和人类健康构成威胁。该车间年二氧化硫排放量约为80吨,氮氧化物排放量约为120吨。废水排放同样不容忽视。设备冷却水和工艺冲洗水是连铸工艺中主要的废水来源。一座年产300万吨钢的连铸车间,年产生废水约500万吨。这些废水中含有油类、悬浮物等污染物,若未经处理直接排放,会对水体环境造成污染,影响水生生物的生存和水资源的可持续利用。

1.3 资源利用效率

金属收得率是衡量连铸工艺资源利用效率的重要指标,与材料损耗密切相关。在连铸过程中,若工艺控制不当,会导致铸坯出现缺陷,如裂纹、夹杂等,这些缺陷铸坯需进行返工或报废处理,从而降低金属收得率,增加材料损耗。提高金属收得率,减少材料损耗,是提升连铸工艺资源利用效率的关键。水资源循环利用在连铸工艺中具有巨大潜力。通过采用先进的废水处理技术,对设备冷却水和工艺冲洗水进行净化处理,可实现水资源的循环利用。然而,当前水资源循环利用仍面临

一些瓶颈,如处理成本较高、处理效果不稳定等,制约了水资源循环利用的进一步推广。

2 环保导向的连铸工艺优化路径

2.1 能源效率提升技术

低温浇注技术是优化连铸工艺能源利用的重要突破方向。在传统连铸作业里,钢水需加热至较高温度以满足浇注需求,这一过程能源消耗大。通过深入探究钢水温度与流动性、凝固特性的关系,对钢水温度控制进行精细优化,在保障铸坯质量达标的前提下,尽可能降低浇注温度。如此一来,加热环节所需能源大幅减少,不仅降低了生产成本,还减少了因高温加热产生的碳排放,为连铸工艺的绿色发展奠定基础^[2]。余热回收利用为连铸工艺能源的高效利用开辟了新途径。连铸坯在凝固过程中会释放出大量显热,若能让这部分热量得到有效回收与利用,将实现能源的二次利用。利用连铸坯显热进行发电,可将原本被浪费的热能转化为电能,为连铸设备或其他生产环节提供部分电力支持。将余热用于供暖,在冬季为工厂或周边区域提供温暖,减少对传统供暖能源的依赖,进一步降低能源消耗与碳排放。高效传动系统的应用是提升连铸设备能源效率的关键举措。传统连铸设备多采用定速传动,无论设备负载如何变化,电机始终以固定转速运行,造成能源浪费。采用变频调速技术后,电机能够根据设备实际负载需求自动调整转速,实现能耗与负载的精准匹配。在拉坯机、输送辊道等设备上应用该技术,可显著降低设备运行过程中的能耗,提升整体能源利用效率。

2.2 废弃物减量化与资源化

耐火材料优化是减少连铸工艺废弃物产生的核心环节。结晶器与中间包内衬材料在连铸过程中消耗量大,传统材料易磨损、侵蚀,需频繁更换,产生大量废渣。通过研发长寿命、低损耗的新型耐火材料,延长材料使用寿命,减少更换频率,从而降低废弃物产生量。新型材料还具备更好的热稳定性与抗侵蚀性能,有助于提升铸坯质量,实现经济效益与环境效益的双赢。氧化铁皮回收利用是连铸工艺资源循环的重要体现。铸坯表面在高温环境下易形成氧化铁皮,若直接废弃,不仅造成资源浪费,还可能对环境产生污染。通过磁选技术,可将氧化铁皮从废弃物中分离出来,进行回收利用。回收的氧化铁皮可用于炼钢原料或其他相关领域,实现资源的再利用。废渣综合利用为连铸废渣找到了新的出路。连铸废渣若处理不当,会对环境造成一定影响。将连铸废渣用于建材生产或路基材料,可实现废渣的资源化利用。经过适当处理后的废渣,具备一定强度与稳定性,

能够满足建材或路基材料的要求,减少对天然资源的开采,降低环境污染。

2.3 污染物排放控制技术

封闭式浇注系统是控制连铸工艺污染物排放的有效手段。传统浇注过程中,钢水暴露在空气中,易发生二次氧化,产生大量粉尘,对空气质量造成影响。封闭式浇注系统将钢水与外界空气隔离,减少钢水暴露面积,从而降低二次氧化与粉尘排放,改善作业环境,减少对大气环境的污染。高效除尘装置在连铸工艺污染物排放控制中发挥着重要作用。在切割、打磨等关键工序,会产生大量粉尘。配置布袋除尘或电除尘设备,可对产生的粉尘进行有效捕集与处理。这些除尘装置具备高效、稳定的特点,能够显著降低粉尘排放浓度,满足环保要求。废水零排放技术是连铸工艺水污染控制的关键^[3]。通过循环水系统与膜分离技术的结合,实现废水的闭路循环。循环水系统对废水进行初步处理与回用,膜分离技术则进一步对废水进行深度净化,去除其中的杂质与污染物,使废水达到回用标准,实现废水的零排放,减少对水资源的污染与浪费。

2.4 工艺参数精准控制

拉速与冷却制度优化是提升连铸工艺质量的关键。通过数值模拟技术,对不同钢种、不同规格铸坯的拉速与二冷配水方案进行模拟分析,确定最佳工艺参数。合理的拉速与冷却制度能够减少铸坯裂纹缺陷的产生,降低返工率,提高生产效率与产品质量,同时减少因返工造成的能源与材料浪费。结晶器液面控制对连铸工艺的稳定运行至关重要。采用智能传感器与反馈系统,实时监测结晶器液面高度,并根据设定值自动调整拉速或浇注速度,稳定液面。稳定的结晶器液面能够减少漏钢风险,保障连铸生产的连续性与安全性,为连铸工艺的绿色、高效运行提供保障。

3 环保连铸工艺的集成创新方向

3.1 近终形连铸技术

薄板坯连铸连轧是近终形连铸技术的重要应用形式。在传统钢铁生产流程中,从钢水到成品板材需经过多道复杂工序,不仅工艺流程长,而且在加热环节消耗大量能源,中间环节还会产生较多排放。薄板坯连铸连轧将连铸与连轧工序紧密衔接,钢水经连铸形成薄板坯后,直接进入连轧工序进行轧制。这一创新工艺极大缩短了生产流程,减少了钢水在中间环节的停留时间,从而降低了加热能耗。由于中间环节减少,污染物排放也相应降低,实现了生产效率与环保效益的双提升。异型坯连铸同样属于近终形连铸技术的范畴。在许多钢铁制

品生产中,后续加工往往需要将坯料加工成特定形状,这一过程能耗较高。异型坯连铸技术能够直接浇铸出接近最终产品形状的截面,减少了后续加工量。例如,在生产某些特殊形状的钢材时,采用异型坯连铸可避免大量的切割、打磨等加工工序,直接降低后续加工能耗,提高材料利用率,减少废弃物产生,为钢铁生产的绿色化发展提供了有力支持。

3.2 智能化与数字化技术

大数据驱动的工艺优化为环保连铸工艺带来了新的发展机遇^[4]。在连铸生产过程中,会产生大量实时数据,涵盖温度、压力、速度等多个参数。通过先进的传感器与数据采集系统,将这些数据实时收集起来,并运用大数据分析技术进行深入挖掘。基于数据分析结果,能够动态调整工艺参数,使连铸过程始终处于最佳运行状态。当监测到钢水温度波动时,可及时调整加热功率;发现拉速不稳定时,能迅速做出调整,从而提高生产质量,减少因工艺波动导致的能源浪费与污染物排放。数字孪生技术在环保连铸工艺中发挥着独特作用。构建连铸过程的虚拟模型,将实际生产中的各种参数与状态映射到虚拟模型中。通过模拟不同工艺条件下的连铸过程,预测可能产生的环境影响,如能源消耗、污染物排放等。基于预测结果,对工艺进行优化调整,提前规避可能出现的问题。在引入新的生产工艺或设备时,可先在数字孪生模型中进行模拟测试,评估其对环境的影响,确保新工艺、新设备在环保方面达到要求后再投入实际生产。

3.3 绿色材料与涂层技术

环保型结晶器保护渣的开发是环保连铸工艺的重要环节。传统结晶器保护渣中常含有氟元素,在高温下易挥发产生有害气体,对环境与人体健康造成危害。研发低氟、无氟保护渣成为必然趋势。低氟、无氟保护渣在满足结晶器润滑、隔热等基本功能的同时,显著减少了有害气体排放,改善了作业环境,降低了对大气环境的污染。耐火材料功能涂层技术为提升耐火材料性能提供了新途径。耐火材料在连铸过程中易受到钢水侵蚀,导致使用寿命缩短,频繁更换产生大量废弃物。通过涂层技术,在耐火材料表面涂覆一层具有特殊功能的涂层,

如抗氧化、抗侵蚀涂层,可提高材料的抗侵蚀性,延长使用寿命。这不仅减少了耐火材料的消耗,降低了生产成本,还减少了废弃物产生,对环保连铸工艺的发展具有重要意义。

3.4 多工序协同优化

炼钢-精炼-连铸一体化调度是实现环保连铸的重要策略。在钢铁生产中,炼钢、精炼、连铸是相互关联的工序。通过优化物流流程,合理安排各工序的生产节奏,减少钢水在各工序之间的等待时间。钢水等待时间缩短,温度损失减少,从而降低了为补偿温度损失而进行的重复加热能耗。一体化调度还能提高生产效率,减少设备空转时间,进一步降低能源消耗与污染物排放。热装热送技术是提高能源利用效率的有效手段^[5]。将高温连铸坯直接送入加热炉进行后续加工,避免了连铸坯冷却后再重新加热的过程。这一技术减少了重复加热所需的能源消耗,提高了能源利用效率。热装热送还能缩短生产周期,提高生产效率,为钢铁生产的绿色、高效发展提供了有力保障。

结束语

环保视角下的钢铁连铸工艺优化与实践,是钢铁行业绿色发展的必然选择。通过能源效率提升、废弃物处理、污染物控制及工艺参数精准控制等优化措施,以及近终形连铸、智能化与数字化等集成创新,有效降低连铸工艺对环境的影响。钢铁企业应积极推进工艺优化与创新,提升环保水平,实现经济效益与环境效益的统一。

参考文献

- [1]安振亮.优化炼钢工艺确保高效连铸的钢水质量[J].中国金属通报,2023,(11):144-146.
- [2]赵云龙.连铸过程中铸坯质量与工艺参数优化的研究[J].中国金属通报,2025,(18):31-33.
- [3]戴荟贤,陈春雷,孙超,等.炼钢连铸设备优化配置对工艺效率与质量的影响研究[J].机械工业标准化与质量,2024(7):38-41.
- [4]张宇琛,郭兵.优化炼钢连铸油环水处理工艺的研究与实践[J].山西冶金,2025,48(6):191-192.
- [5]李威.连铸二冷工艺优化与铸坯角部裂纹控制分析[J].冶金与材料,2022,42(2):41-42.