

绿色炼钢“热身术”：五种废钢预热与加料工艺解析

Green Steelmaking Preheating Practices: A Comprehensive Analysis of Five Scrap Preheating and Charging Processes

供稿|崔荣峰¹, 范章婷² / CUI Rongfeng¹, FAN Zhangting²

内容导读

在钢铁生产中，提高废钢使用比例不仅是提升产量的有效手段，更是推动行业绿色发展、实现“双碳”目标的关键路径。废钢预热与加料工艺，作为提升废钢利用效率的核心环节，直接影响炼钢的能耗、排放与经济效益。本文系统梳理了国内目前常见的5种废钢预热与加料工艺——包括铁水罐废钢加料、废钢烘烤炉、水平振动式预热加料、顶枪式预热加料以及隧道窑式预热加料，分别从工艺流程、技术特点、适用场景与经济性等方面进行了详细阐述与对比分析。文章旨在为钢铁企业依据自身生产条件选择合适的废钢处理工艺提供科学参考，助力其在提升生产效率的同时，实现节能降耗、清洁生产与可持续发展。

钢铁工业作为我国经济的重要基础产业，在我国工业化和城镇化进程中发挥着重要作用。2024年，我国粗钢产量为10.05亿t，其中约90%的产量来自高炉-转炉长流程。长流程的生产不可避免地需要使用大量的煤、焦炭资源，这也导致钢铁产业实现“双碳”目标压力较大^[1-2]。在长流程中增加转炉废钢比，减少铁水消耗是大势所趋^[3]。

废钢是钢铁生产、消费过程中产生的可再生原料资源，是一种可高度循环使用的载能节能绿色资源。如何提高废钢的使用量以及平衡废钢和铁水在成本、消耗上的关系，需要结合设备和实际工艺，对电炉和转炉冶炼提出更精细化的要求^[4]。从目前的情况来看，适当的废钢比对企业的综合效益影响非

常显著，可大幅降低环境污染和综合能耗，具有较高的经济、环保和社会效益^[5-6]。自2016年起，由中国工程院殷瑞钰院士牵头开展的“2016—2030铁素资源强国战略”研究中已明确提出，到2030年我国钢铁积蓄量预计达到150亿t，年社会废钢铁资源产生量达到3亿t，粗钢产量由2021年的10亿t逐步降至6~6.5亿t，废钢比超过30%，有望达到或超过全球平均水平。为实现国家政策及未来目标，有必要对钢铁生产流程中的废钢比开展研究，相较废钢的加工处理等其他基础技术，废钢的预热及加料显得更为重要^[7]。

废钢预热工艺主要是通过提高废钢温度，减少其在加料和熔化阶段所需的能源消耗^[8]。随着废钢

作者单位：1. 中冶华天南京工程技术有限公司，江苏 南京 210019；2. 马鞍山市第二十二中学，安徽 马鞍山 243000

预热工艺的发展,利用废气热能进行预热的技术,已成为降低炼钢过程能耗和提高生产效率的有效途径^[9-10]。预热废钢不仅能够缩短熔化时间、减少能源消耗,还能提高冶炼过程的稳定性和生产连续性^[11]。因此,废钢预热成为现代钢铁生产中不可忽视的一环。

然而,废钢预热过程仍面临技术和经济挑战。例如,如何在高效加热的同时避免废钢过热和过度氧化^[12]、如何平衡预热温度与加料量、如何在不同炉型和生产规模中实现废钢预热的最佳效果等,都是亟待解决的问题^[13]。此外,废钢加料工艺也与其预热紧密相关,合理的加料策略不仅能够提高冶炼效率,还能改善钢液的质量和炉料的均匀性^[14-15]。

在炼钢过程中,废钢预热及加料工艺一直是研究的重点领域。已有研究对不同废钢预热及加料工

艺的流程进行了系统分析,比较了其在废钢预热效率、投资成本、燃气消耗、操作稳定性等方面的表现。研究表明,各类工艺在提高生产效率和降低成本方面存在显著差异,对能源利用率及生产过程的综合影响也各不相同^[16]。然而,面对种类繁多的工艺技术,如何根据企业自身工况进行科学选择仍是当前亟待解决的问题。基于此,本文将对目前主流的废钢预热及加料工艺进行系统梳理,重点对比分析其技术特点与适用场景,旨在为相关领域的工艺优化与技术改造提供理论依据与参考。

国内典型废钢预热及加料工艺设计分析

为提高冶炼炉的废钢比和钢水产量^[17],国内应用的废钢加料系统及应用企业如表1所示。

表1 5种主要的废钢加料系统及应用企业

废钢加料系统	应用企业
铁水罐废钢加料	德龙集团新天钢、河北纵横钢铁
废钢烘烤炉	山钢集团永锋临港、河南闽源钢铁集团、敬业集团粤北钢铁
水平振动式废钢预热及加料	宝武股份梅山钢铁、湖北金盛兰、湖南涟源钢铁
顶枪式废钢预热及加料	河北永洋特钢、包头钢铁、成都冶金
隧道窑式废钢预热及加料	河北纵横钢铁

铁水罐废钢加料

铁水罐废钢加料工艺可以增加钢水产能,同时高效利用废钢资源^[18]。该工艺的经济效益受钢铁原料、钢材价格波动影响较大^[19]。当废钢成本与炼、轧工序成本较低时,该工艺可适度提升产量,同时降低炼钢工序的辅料消耗,从而获得较好的经济效益。另外,从降碳角度考虑,在钢产量不变的前提下,该工艺可通过降低高炉铁水产量,从而有效降低吨钢 CO₂ 排放量。

工艺流程:根据长流程铁-钢界面的工艺特点,在铁水罐运输线上,采用抓钢机或专用废钢加料系统(含中位料仓、废钢称量斗、重型扇形阀等)对炼钢炉兑铁后的空铁水罐加入适量废钢(正常废钢加料量控制在铁水罐公称容量的3%~5%),返回的铁水罐可沿线采用烘烤设施进行废钢预热,也可直接到炼铁炉出铁场等待接铁。

工艺特点:

(1) 布置灵活,一般布置在炼铁炉和炼钢炉之

间,利用现有炼钢车间或单独设置废钢加料车间(图1)进行废钢的储存、加料。

(2) 废钢铁加料点需考虑各种废钢铁的堆存需求,宜设1~3 d的废钢铁堆存空间;废钢料以压块、破碎料为主,其质量符合GB/T 4223—2017《废钢铁》标准要求。

(3) 需对废钢加料过程产生烟尘进行除尘处理,可考虑并入铁水倒罐除尘系统或其他环境除尘系统,颗粒物排放浓度 $\leq 10 \text{ mg/m}^3$,岗位含尘控制浓度 $\leq 8 \text{ mg/m}^3$ 。

(4) 考虑到废钢与铁水的热平衡以及炼钢炉对入炉铁水温度(一般需 $\geq 1250^\circ\text{C}$)的要求,长流程需设铁水罐加盖装置,能有效减少空罐降温约60%。

(5) 铁水罐加完废钢后的烘烤宜采用纯氧烘烤装置,燃烧介质宜选用焦炉煤气或其他高热值燃气,可实现氮氧化物减排约75%、粉尘减排约80%,并能有效缩短烘烤时间。

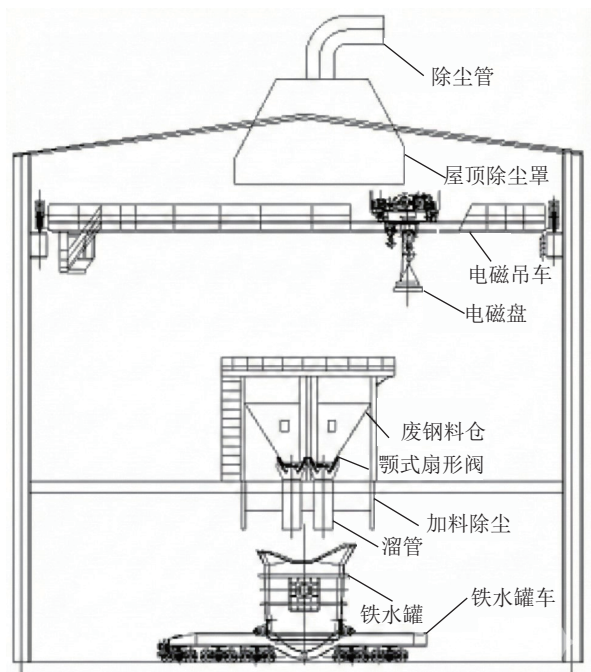


图1 铁水罐加废钢工艺现场（电磁吊+加料系统）

废钢烘烤炉

废钢烘烤炉工艺是一种单炉烘烤工艺，装置类似于炼钢炉炉后的铁合金烘烤炉（见图2）。该工艺流程为：废钢通过在线上料系统或料斗加入烘烤炉，加热至预定温度后，通过溜槽直接加入钢水罐。

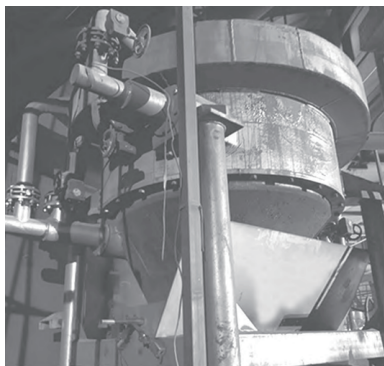


图2 转炉炉后铁合金烘烤炉^[20]

工艺特点如下：

（1）布置灵活，可布置在炼钢炉炉后主操作平台或炉后吹氩站。当布置在炉后主操作平台时，在烘烤炉容积允许的前提条件下，可实现铁合金和废钢的同时配料、烘烤、加入^[21]。

（2）采用单炉烘烤模式，目标温度为 600~750℃。一般烘烤时间为 15~20 min，若冶炼节奏

较快，采用富氧燃烧系统可将烘烤时间缩短至 10~15 min，从而与冶炼炉的冶炼周期良好匹配。

（3）废钢加入量较少，一般为单炉钢水量的 3%~5%，燃气消耗相应较低。

（4）对废钢料质量要求较高，以废钢筋头，车间内部切头、切尾废料（成分要求接近冶炼钢种要求）为主。

（5）废钢烘烤过程会产生高温烟尘，需进行除尘处理，可考虑并入冶炼炉二次除尘系统或其余环境除尘系统，颗粒物排放浓度 $\leq 10 \text{ mg/m}^3$ 。

水平振动式废钢预热及加料

水平振动式废钢预热及连续加料工艺通过设置封闭式水平加料通道，将电弧炉高温烟气引入实现废钢梯度预热，并依托振动输送装置实现废钢的连续、可控给料。废钢在预热后直接插入熔池，实现平稳熔化过程，显著降低开炉盖频次和电弧波动。该工艺有效降低单位钢水电耗与电极、炉衬消耗，提高冶炼节奏与设备寿命，兼具对多种废钢原料的适应性，因而在电炉炼钢领域表现出突出的技术与经济综合优势。

工艺流程：炼钢车间内电磁吊车吊运废钢上料，由链板机进行连续电磁振动、输送，并通过直喷燃烧系统对输送过程中的废钢物料进行连续预热，输送末端实现连续出料至废钢斗或钢水罐内^[22]，其工艺形式类似康斯迪（Consteel）电炉水平加料方式，如图3所示。

工艺特点：

（1）采用离线布置，废钢原料段需满足相应的空间要求。

（2）连续进料、连续预热、连续出料，可实现全过程的自动化操作。

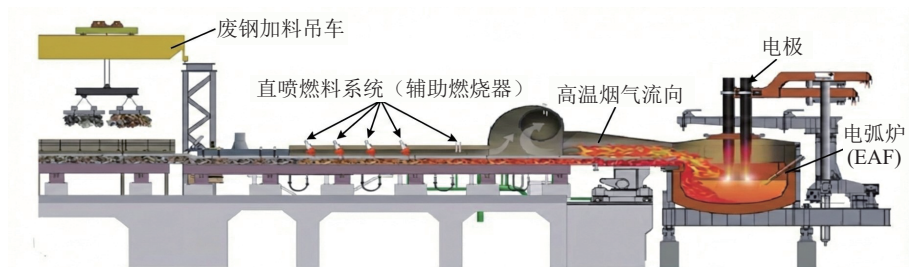
（3）热效率高，预热效果好，废钢温度可达 700~800℃。

（4）进料速度较快（ $\geq 8 \text{ m/min}$ ），满足企业快节奏生产要求。

（5）废钢加料过程会产生粉尘，需配置环境除尘系统，颗粒物排放浓度 $\leq 10 \text{ mg/m}^3$ 。

顶枪式废钢预热及加料

顶枪式废钢预热及加料工艺采用纯氧与煤气

图3 水平连续加料电弧炉示意图^[23]

（或其他高热值介质）进行混合燃烧，实现超音速喷射（ $1.2Ma$ ）。其热量集中且比传统烘烤设备高约5倍，有效射流强度提高约6倍，燃烧温度可达 $1800\sim 1950^{\circ}C$ ，可对铁（钢）水罐内所加废钢料进行高效预热^[24]。

工艺流程：铁（钢）水罐车将空罐运行至废钢加料区域，通过电磁吊或在线加料系统将废钢分批加入罐内。加完废钢后，顶枪下降进行纯氧燃烧，将废钢温度由常温提升至目标温度，随后顶枪及炉盖提升，铁（钢）水罐车将铁（钢）水罐运送至冶炼炉附近。

工艺特点：

（1）布置较为灵活，可布置在冶炼炉后钢水罐或长流程铁水罐运输线上，需配置电磁吊或抓钢机进行废钢加料。

（2）预热时间短、温度高，一般在 $8\sim 12\text{ min}$ 内可将废钢加热至 $900\sim 1100^{\circ}C$ 。

（3）采用纯氧燃烧预热，较常规烘烤方式可以实现氮氧化物减排约75%、粉尘减排约80%。

（4）废钢预热过程会产生高温烟尘，需进行除

尘处理，可考虑并入冶炼炉环境除尘系统，使颗粒物排放浓度 $\leq 10\text{ mg/m}^3$ 。

隧道窑式废钢预热及加料

隧道窑式废钢预热及加料工艺是通过设置长距离封闭预热通道，将电弧炉或加热炉排出的高温烟气导入隧道窑内，与沿输送线运动的废钢形成逆流换热，实现废钢的均匀、梯度预热。废钢通常借助链式、步进式或小车式输送装置连续通过窑道，并在出口端以连续或准连续方式加入熔池。该工艺一方面充分回收余热、显著降低单位电耗和燃料消耗，另一方面可改善废钢清洁度和装入稳定性，减轻冲击、降低粉尘与噪声，从而在冶炼过程能效、环保与操作安全性方面具有明显综合优势。

工艺流程：隧道窑式废钢预热及加料工艺采用转炉煤气（或其他高热值介质），对炼钢炉所需的废钢料进行预热。装有废钢打包块的托车进入隧道窑进行连续加热（分为预热段、加热段2个阶段），预热后的废钢卸入废钢斗，再转运至炼钢车间，详细流程见图4。

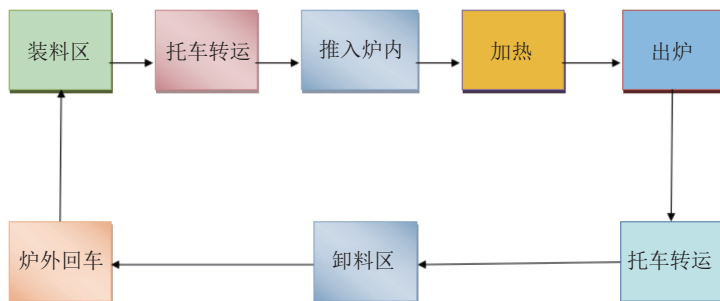


图4 隧道窑式废钢预热及加料流程图

工艺特点：

（1）采用离线布置（图5），需单独设计废钢加料及预热车间（一般尺寸为 $40\text{ m}\times 160\text{ m}$ ），毗邻

布置在炼钢炉车间。预热后的废钢通过汽运或轨道运输至炼钢车间，再通过车间吊车吊运废钢斗，将热态废钢加入炼钢炉内。

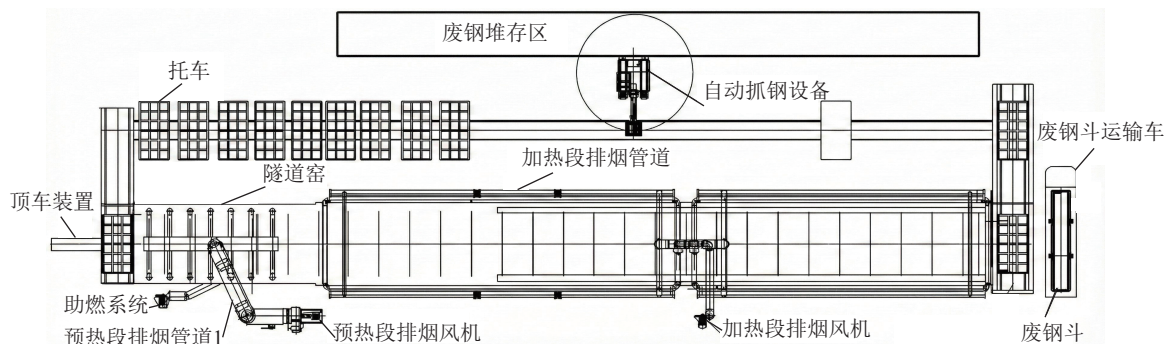


图5 隧道窑式废钢预热及加料布置图

(2) 废钢料预热目标温度为 600~700 °C，烘烤时间为 4~6 h（可调）。

(3) 废钢料加入量较少，一般为单炉钢水量的 3%~5%，燃气消耗相应较低。

(4) 对废钢料要求较高，以废钢打包块为主，其质量符合 GB/T 4223—2017《废钢铁》标准要求。

(5) 废钢烘烤过程会产生高温烟尘，需进行除尘处理，可考虑并入冶炼炉二次除尘系统或其他环境除尘系统，颗粒物排放浓度 $\leq 10 \text{ mg/m}^3$ 。

不同废钢预热加料工艺的对比及分析

Kishida 等^[25]利用 0.25 t 废钢预热实验装置对不同废钢的升温速率进行了研究，烟气流量为 240 m³/h，烟气温度为 568~672 °C。结果表明，不同废钢的升温速率存在差异，且在高温区间的升温速率低于低温区间；对于固定的吸热量，加热效率随入口烟气温度的上升而提高。该结论指出了提高入口烟温对于缩短预热时间的重要性，同时也表明在实际加料工艺中，应根据废钢的受热特性曲线动态调整烟气流速与温度，以实现能源利用效率的最大化。

国内典型废钢预热及加料工艺的主要参数对比见表 2。

通过对比可知：

(1) 1[#]、2[#]、4[#]工艺路线的投资成本均较低，但 4[#]工艺路线的燃气消耗较高，同时还需承担顶枪循环冷却水、提升电机的额外消耗，综合成本更高。

(2) 1[#]、5[#]工艺路线仅适用于长流程企业。其中，1[#]工艺路线应用广泛，技术实施难度较低；而 5[#]工艺路线投资大、燃气消耗成本高，目前应用较少，需进一步优化工艺。

(3) 2[#]工艺路线的投资、运行成本均较低，占地面积小，在炼钢车间布置灵活（一般位于炉后吹氩站或 LF 炉区域），但对废钢料型及成分要求较高；同时，现场常出现内部燃烧梁被废钢物料冲击变形、热态废钢卸料粘接等问题，需进一步优化废钢烘烤炉的炉型和加热制度。

(4) 3[#]工艺路线类似电炉水平加料设施，投资较大、运行成本低、占地面积大，对主厂房的布置要求较高，不仅需要废钢堆存场地（一般 1~3 d），还需配置电磁吊或链板转运设施，因此适宜在新建厂房内布置。

综合前述各类废钢预热及加料工艺的技术特征与应用现状可知，虽然部分工艺在投资与布置方面具有一定优势，但在热效率、能耗水平及工艺适应性方面仍存在优化空间。5[#]工艺路线的创新设计，处于在国内钢铁企业中推广应用，李昕妍^[26]利用流体

表 2 典型废钢预热及加料工艺的主要参数对比

序号	工艺项目	投资	布置要求	原料要求	预热效果	吨钢燃气介质成本
1 [#]	铁水罐废钢加料	较低	较低	较低，废钢料型多	450~750 °C 烘烤稳定	约 70 m ³
2 [#]	废钢烘烤炉	较低	较低	较高，成品废钢废钢料型单一	600~750 °C 烘烤稳定	约 60 m ³
3 [#]	水平振动式废钢预热及加料	较高	较高	较低，废钢料型多	700~800 °C 烘烤稳定	约 50 m ³
4 [#]	顶枪式废钢预热及加料	较低	较低	较低，成品废钢废钢料型多	900~1100 °C 烘烤稳定	约 200 m ³
5 [#]	隧道窑式废钢预热及加料	高	较高	较高，废钢料型单一	600~700 °C 烘烤稳定	约 350 m ³

力学 (CFD) 方法对 5# 工艺路线中的废钢预热系统的加热炉内燃烧与传热过程进行稳态温度场的模拟。为系统揭示预热过程中炉内流动与传热机理, 并为工艺参数优化与装备改进提供理论支撑, 近年来研究者普遍采用计算流体力学方法对相关物理过程进行数值模拟分析。该方法通过构建合理的物理与数学模型, 可深入解析炉内气流组织、温度场分布及辐射传热行为, 已成为废钢预热过程研究的重要工具。

李昕妍^[26]在废钢预热系统的加热炉内燃烧与传热的数值研究中, 采用 CFD 方法模拟了加热炉内复杂的热力学和流体流动条件, 模型涵盖湍流、燃烧和热传递过程, 分析了炉膛内气体流动、温度分布和浓度分布等特征。

(1) 模型选择: 该研究建立了一个基于雷诺平均法 (RANS) 湍流模型的三维数值模拟框架。该模型综合考虑了炉膛内的气流湍流、燃烧反应、辐射换热等多重物理过程, 旨在精准捕捉复杂流动下的平均速度场与压力场分布。

(2) 边界条件: 边界条件 (如流体速度、温度场和物质的浓度分布) 的设置对模拟结果的准确性至关重要。需要确定空气和燃气的入口流量、入口温度以及炉壁的温度等。

(3) 求解方法: 使用数值对方程进行离散化, 针对不同的流动条件选择合适的离散格式 (如一阶迎风格式、中心差分格式、二阶迎风格式等), 以保证数值模拟的准确性; 利用 CFD 软件对离散方程组进行求解, 得到炉膛内的速度场、温度场和组分浓度分布。

(4) 辐射热方程的确定: 基本数学模型采用稳定辐射热模型, 其计算基于斯蒂芬-玻尔兹曼定律, 公式为:

$$Q_{\text{rad}} = A\varepsilon\sigma(T_2^4 - T_{\text{env}}^4) \quad (1)$$

式中, Q_{rad} 为辐射能; A 为辐射面积; ε 为接受表面的发射率; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数; T_2 为辐射表面温度; T_{env} 为环境温度。

计算结果表明: 在 5# 工艺路线方式中, 燃气和空气从喷嘴喷入炉内发生剧烈燃烧, 导致火焰中心温度最高, 约为 2500 K; 进入炉膛后, 温度逐渐降

低至约 1300 K。炉膛后半段因距离燃烧区域较远, 温度较低且均匀。模拟结果显示, 在燃烧器喷嘴附近的初始段 ($X < 1.0 \text{ m}$), 由于燃烧反应剧烈, 局部温度梯度较大; 而在炉膛中后段 ($X > 1.0 \text{ m}$) 及中部偏下的废钢加热区, 随着高温烟气的流动与混合, 温度梯度逐渐减小, 分布趋于均匀, 有利于废钢坯加热。加热炉平均温度为 1282 K, 温度分布与速度分布基本对应 (图 6)。

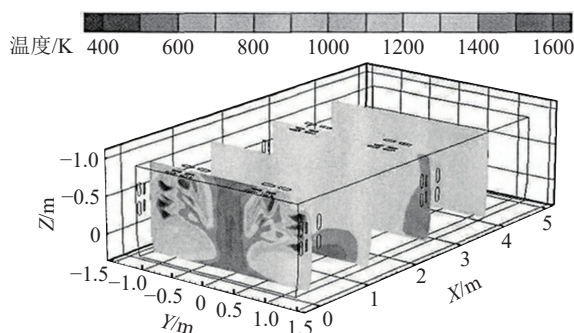


图 6 沿炉长方向上不同截面的温度分布图^[26] (X 轴: 炉长; Y 轴: 炉宽; Z 轴: 炉高)

结束语

(1) 各大钢企需结合市场行情和具体工艺设计布置, 选择低成本、环保、合理的废钢预热及加料工艺路线。

(2) 废钢预热及加料过程会产生大量烟气粉尘, 需高度重视环保治理。需针对不同工艺特点, 配套科学有效的烟气除尘设施, 确保颗粒物排放浓度控制在 10 mg/m^3 以内, 实现清洁生产与达标排放。

(3) 随着短流程炼钢比重的逐步提高, 废钢比也会相应提升, 凸显出废钢产业良好的发展趋势和较大的提升空间。

参考文献

- [1] 胡砚斌, 黄芳, 何赛, 等. 废钢预热技术在高炉-转炉长流程中发展现状及展望. 工业加热, 2023, 52(11): 1
- [2] 上官方钦, 崔志峰, 周继程, 等. 双碳背景下中国电炉流程发展战略研究. 钢铁, 2024, 59(1): 12
- [3] 刘文凭, 李少帅, 刘忠建. 提高废钢比对转炉冶炼的影响分析. 山东冶金, 2023, 45(5): 65
- [4] 刘孟珂. 废钢在铁碳熔池中的熔化行为及机理研究 [学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2022
- [5] 潘涛, 姜周华, 朱红春, 等. 电弧炉废钢预热技术的发展现状.

- 材料与冶金学报, 2020, 19(1): 6
- [6] 王少强, 操龙虎. 电炉废钢预热技术及其节能效益分析. 工业加热, 2022, 51(7): 41
- [7] 杨凯. 国内废钢-电炉炼钢发展及展望. 鞍钢技术, 2024(1): 15
- [8] 王伟. 转炉内预热废钢工艺分析及数值模拟 [学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2022
- [9] 刘志远, 程磊, 王重君, 等. 新型废钢预热技术在钢包中的应用. 宽厚板, 2022, 28(6): 26
- [10] 余衍丰, 陈生利, 蓝应华. 铁包加废钢烘烤预热技术研究. 南方金属, 2024(1): 16
- [11] 中国钢铁工业协会电炉短流程炼钢发展研究课题组. 我国电炉短流程炼钢发展研究. 冶金管理, 2023(20): 4
- [12] 刘思远, 董洪旺, 田玮. 废钢预热系统的设计与实践. 河北冶金, 2020(S1): 55
- [13] 刘斌, 缪骏, 郝阳. 双碳背景下转炉高废钢比冶炼技术发展现状及展望. 冶金经济与管理, 2024(4): 25
- [14] 郭振泳, 杨鹏. 高废钢比对转炉冶炼工艺的影响分析及控制措施. 山西冶金, 2024, 47(8): 252
- [15] 李勃, 杨凌志, 宋景凌, 等. 90 t 电炉炼钢流程一键合金加料优化系统应用. 钢铁, 2022, 57(4): 58
- [16] 傅杰, 李京社, 李晶, 等. 现代电炉炼钢技术的发展. 钢铁, 2003(6): 70
- [17] 刘慰俭, 洪新. 电炉废钢预热器对流换热过程的数学模拟. 钢铁研究学报, 1988(4): 79
- [18] 佟岩. 转炉高废钢比的研究及实践. 炼钢, 2018, 34(5): 8
- [19] 张建国. 废钢预热技术在电炉炼钢中的发展应用. 资源再生, 2017(4): 50
- [20] 王瑞军. 钢铁企业金属料预热技术. 甘肃冶金, 2023, 45(6): 37
- [21] 陈生利, 邓晖, 姜涛. 铁水包废钢预热技术研究//第十二届中国金属学会青年学术年会暨首届“碳中和”冶金青年科学家沙龙论文集(一). 赣州, 2024: 80
- [22] 姚聪林, 周浩宇, 范晓慧, 等. 水平连续加料电弧炉废钢传热行为及提效方法研究. 工业加热, 2024, 53(11): 6
- [23] 王佳. 水平连续加料预热电炉除尘系统的优化实践. 工业加热, 2025, 54(2): 65
- [24] Toulouevski Y N, Zinurov I Y. Methods of realization of high-temperature scrap preheating // *Electric Arc Furnace with Flat Bath: Achievements and Prospects*. Springer, 2015: 69
- [25] Kishida T, 朱弘. 废钢预热的实验室试验. 冶金能源, 1984(4): 52
- [26] 李昕妍. 废钢预热系统的加热炉内燃烧与传热的数值研究 [学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2021

作者简介: 崔荣峰 (1981—), 男, 江苏省南京人, 现任中冶华天工程技术有限公司炼钢技术专家, 2007年毕业于安徽工业大学冶金工程专业, 主要研究方向: 炼钢冶炼炉 (电炉、转炉、AOD 炉) 炼钢工艺、精炼工艺、连铸、模具钢铸造工艺、钢渣处理工艺、污泥造球工艺、环境除尘工艺、废钢加工及预热工艺的设计、项目管理及科研开发。个人授权发明及实用新型专利 112 项。通信地址: 江苏省南京市建邺区富春江东街 18 号中冶华天工程技术有限公司; E-mail: cuirongfengzyht@163.com。