

鄂钢低铁钢比生产实践

宋晓亮

宝武集团鄂城钢铁有限公司制造管理部, 湖北 鄂州

收稿日期: 2025年4月22日; 录用日期: 2025年6月10日; 发布日期: 2025年6月18日

摘要

本文介绍了鄂钢低铁钢比生产工艺实施过程, 通过应用铁水一罐到底、废钢、合金烘烤预热、铁水罐、钢包加盖等工艺技术, 有效解决了低铁钢比生产造成的转炉冶炼热量不足问题; 采取铁水罐加废钢、优化桶装废钢料型结构、转炉后加废钢、精炼炉加废钢等多渠道加废钢技术有效解决了大量废钢加入转炉困难的问题。实践表明实施低铁钢比生产技术后, 转炉冶炼热量平衡, 入转炉废钢量大幅提升, 铁钢比指标由915 kg/t下降至757 kg/t, 取得了节能降碳、提高生产效率的成果。

关键词

铁钢比, 转炉, 铁水, 废钢, 热量平衡

Production Practice of Low Iron/Steel Ratio in Echeng Iron & Steel Co., Ltd.

Xiaoliang Song

Manufacturing Management Department of Baowu Group Echeng Iron & Steel Co., Ltd., Ezhou Hubei

Received: Apr. 22nd, 2025; accepted: Jun. 10th, 2025; published: Jun. 18th, 2025

Abstract

This paper introduces the implementation process of the low hot metal-to-steel ratio production technology at Echeng Iron & Steel Co., Ltd. by adopting process technologies such as hot metal charging via single ladle, scrap steel and alloy preheating, ladle covering for hot metal and steel ladles, the issue of insufficient heat in converter smelting caused by low hot metal-to-steel ratio production was effectively resolved. Multiple scrap charging methods including adding scrap to hot metal ladles, optimizing scrap material types in charging buckets, post-converter scrap addition, and scrap addition in refining furnaces successfully addressed the difficulty of feeding large quantities of scrap into converters. Practice demonstrates that after implementing the low hot metal-to-steel

ratio technology, the converter smelting achieved thermal balance with significantly increased scrap input. The hot metal-to-steel ratio decreased from 915 kg/t to 757 kg/t, achieving results in energy conservation, carbon reduction, and production efficiency improvement.

Keywords

Iron-to-Steel Ratio, Basic Oxygen Furnace, Molten Iron, Scrap Steel, Heat Balance

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

“双碳”背景下，钢铁行业碳减排压力巨大，责任重大，绿色低碳成为钢铁行业高质量发展的必然选择[1]-[3]。基于大废钢比(总废钢比 $\geq 20\%$)的低铁钢比冶金流程，是适应国家碳达峰、碳中和战略的重要发展方向[3]-[8]。国内外降低铁钢比的研究聚焦于废钢利用和低碳技术。国内方面，宝武集团通过转炉大废钢比冶炼(废钢比超 30%)和电炉短流程工艺显著降低铁钢比，河钢氢冶金示范工程可实现铁钢比下降 40%~50%。国际方面，欧洲 ULCOS 项目通过高炉喷吹废弃物降低铁钢比 8%~10%，日本 COURSE50 计划开发氢还原高炉技术，美国则推广电炉“废钢 + DRI”工艺使铁钢比降至 0.15~0.25 吨/吨。

另一方面，随着国外进口铁矿石价格大幅攀升，国内钢企利润空间不断被挤压，为摆脱对进口铁矿石的大量依赖，废钢作为可循环绿色资源成为了各钢企的首要选择[9]。在我国经济快速发展的进程中，社会废钢蓄积量迅速增加，废钢资源越来越丰富，废钢价格下降空间越来越大，低铁钢比生产将成为钢铁行业大势所趋[10]。

鄂钢厂区工艺布局特点为钢产能大于铁产能，自 2017 年实施“一罐到底工艺”技术以来，已实现高炉 - 转炉工序的深度协同。该工艺通过取消铁水倒罐环节，使铁水温度损失降低 50℃ 以上，铁水运输时间缩短 50%，工序衔接效率提升 50%，转炉冶炼周期压缩至 28 分钟以下，有效释放了转炉工序的产能潜力。然而，随着工艺流程集约化程度的提升，铁水供应能力不足的矛盾日益凸显 - 铁水日供应缺口达 800~1000 吨，转炉作业率长期维持在 78% 左右。依托生产数据建模分析表明，当铁钢比每降低 0.1 吨/吨时，转炉产能可释放约 10%~15% 的弹性空间。

基于“双碳”政策、经济效益、产线效率提升等方面考虑，低铁钢比生产是鄂钢发展的必由之路。

2. 降低铁钢比措施

降低转炉铁钢比主要从两方面入手，一方面需通过优化热补偿技术(如增加铁水物理热、采用辅助燃料或预热废钢)解决入炉铁水量减少导致的冶炼热量不足问题；另一方面需开发高效废钢加入系统(如采用多渠道废钢加入技术)，确保大比例废钢能稳定、快速地加入转炉，同时需配套工艺控制模型实现冶炼过程的动态平衡。两项措施需协同推进，兼顾热力学条件与生产效率。

2.1. 热补偿技术优化

铁水是转炉冶炼热量的主要来源，降低铁钢比意味着转炉入炉结构中废钢比例增加铁水比例下降，转炉冶炼热量将会因铁水量的减少而出现不足[11]。转炉加废钢量受到转炉热量平衡约束，为此需减少铁水热量损失、提高废钢入炉温度、降低转炉出钢温度[3]。鄂钢主要通过一罐到底技术提高铁水入转炉温

度, 烘烤预热废钢、合金, 提高铁水质量, 降低出钢温度几个方面开展工作。

2.1.1. 一罐到底技术应用

一罐到底工艺是指直接采用铁水罐运输铁水, 将铁水的承接、运输、缓冲储存、铁水预处理、转炉兑铁、铁水罐快速周转、铁水保温等功能集为一体, 取消铁水折罐作业, 具有缩短工艺流程、提高铁钢界面效率, 节能降耗、绿色低碳等多重优势的生产工艺[12]。

鄂钢自 2017 年开始实施铁水一罐到底工艺, 经过三年的不断推进, 先后完成了铁水罐罐型改造, 实现铁水罐、铁水包合二为一, 取消了铁水罐折罐至铁水罐作业步骤, 优化铁水运输线路和现场作业流程, 调整铁水运输模式、铁水罐对位模式, 实现了铁水运输高效快捷。

作为铁水转运的唯一容器, 铁水罐的周转速度决定着铁水运输效率、热耗散状况, 正常用于周转的铁水罐越多, 单个罐处于空置的时间越长, 热量耗散越多, 因此加快铁水罐周转, 使铁水罐内剩余的热量尽量被废钢吸收, 是铁水罐热量利用并降低出铁过程温降的关键。

为保证铁钢工序物料的高效衔接, 创新作业流程, 优化生产组织模式, 铁水罐对位模式由“1 + 3”优化为“1 + 2”, 结合自动化电动牵引车, 由集结运输优化为两罐一组模式进行运输, 大幅提高了铁水罐周转率, 明显减少了空罐等铁带来的热损失, 进一步为铁水罐内加入废钢提供了热量条件。具体如图 1~3 所示。



Figure 1. Pre-optimization 1 + 3 alignment mode

图 1. 优化前的 1 + 3 对位模式



Figure 2. Optimized 1 + 2 alignment mode

图 2. 优化后的 1 + 2 对位模式

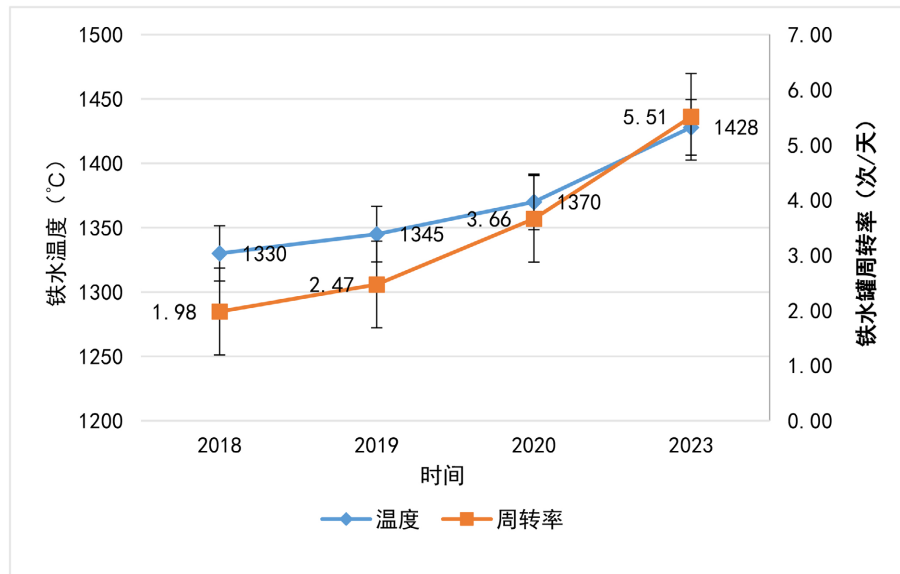


Figure 3. Hot metal ladle turnover rate and hot metal charging temperature trend
图 3. 铁水罐周转率及铁水入转炉温度趋势图

周转率的提高在一定程度上减少了铁水温降[12]-[17]。如图 3 所示，铁水罐周转率由 2018 年的 1.98 次/日提升至 2023 年的 5.51 次/日，上升趋势明显，数据统计显示，同等出铁温度条件下铁水入转炉温度也大幅提升。为总体热量平衡和发热能源控制提供了更好的基础。

2.1.2. 铁水保温系统研究与应用

铁水罐加盖技术主要是指铁水罐在运输过程中，铁水罐盖始终盖在铁水罐上，通过使用设计合理、运作方便的加取盖机构，在指定工位点进行加盖及开盖，减少铁水罐及铁水的对流散热、辐射散热及传导散热，达到保温的目的，提高铁钢界面能效[12] [17]。

无论是否加入废钢，铁水从离开高炉进入铁水罐开始就持续存在着辐射和传导为主的热耗散，因此，控制铁水与外界的热交换速率，减少铁水兑入转炉前的热耗散量，是有效利用铁水物理热、不断提高废钢比的基础条件。而作为高温金属液面，液面与外界空气的辐射热交换最为活跃、交换效率最高。因此，通过铁水罐加盖，有效减弱上述热交换，对减少罐内铁水温降速度是十分有效的。所述铁水罐加盖系统如图 4 所示。



Figure 4. Hydraulic cantilever-type hot metal ladle cover system
图 4. 液压悬臂式铁水罐加盖系统

如图 4 所示的铁水罐加盖系统，设备占位少，自重小，操作效率高，运行成本低。铁水罐加盖后，通过大数据统计，罐内铁水的降温速度从 1.34℃/min 降至 0.94℃/min，从出铁开始到铁水转运至脱硫站或直接上转炉平台兑入转炉的过程时间约 60 min，总的铁水温降可减少 12℃ 以上，特别是出现生产异常时，铁水罐转运受限、长时间静置的情况下，加盖保温对于生产过程稳定性的贡献更为明显。

2.1.3. 废钢、合金烘烤预热

1) 废钢烘烤预热

废钢预热的突出特点是可以提高金属收得率，还能将低质量废钢发挥出高质量废钢的效能[18]。

Table 1. Average specific heat capacity of steel

表 1. 钢铁的平均质量热容

项目	固态平均质量热容/kJ/kg·℃	熔化潜热/kJ/kg	液态平均质量热容/kJ/kg·℃
铁	0.745	218	0.837
钢	0.699	272	0.837

Table 2. Thermal effects of reactions at steelmaking temperatures

表 2. 炼钢温度下的反应热效应

反应式	ΔH/kJ/kg
$C + 1/2O_2 = CO$	11,637
$C + O_2 = CO_2$	34,824
$Si + O_2 = SiO_2$	29,177
$Fe + 1/2O_2 = FeO$	4249
$2Fe + 2/2O_2 = Fe_2O_3$	6459



Figure 5. Hot metal ladle scrap preheating system

图 5. 铁水罐加废钢烘烤系统

在铁水一罐到底技术、铁水罐加盖保温的条件下，直接向罐中加入废钢，结合表 1、表 2 中的数据，通过热平衡计算，并通过实践验证得废钢量与罐中铁水温度变化的关系为：

$$\Delta T_{\text{铁水}} = -(W_{\text{废钢}} \times T_{\text{烘烤}}) / W_{\text{铁水}} \pm 2$$

上式中, T 烘烤的最小值取 80°C , 即不烘烤时, 废钢仍可通过热传导吸收罐内部分热量, 温度有一定上升。在出铁温度 1500°C 、完全考虑传递过程中的温降, 保证兑入铁水 1320°C 的前提下, 最多可加入废钢 6 kg/t 。要进一步增加废钢比, 则可能打破现有的热平衡状态, 且一旦转炉出现一定的生产延误, 出现低温铁水冶炼、影响转炉稳定性的几率就会明显增加, 这不符合低铁钢比、高效率、高质量的研究目标, 因此, 在此情况下, 需引入二次热源加热废钢, 一方面减少废钢熔融吸收的热量, 另一方面, 促进废钢在铁水中快速熔融, 最终明显增加废钢比且不动摇转炉冶炼的铁原料温度、均匀性基础。

如图 5 所示, 在高炉下方建设铁水罐加废钢烘烤装置, 以高炉煤气为化学燃料热源烘烤废钢, 是最有效的低成本、低排放二次热平衡方式。在高炉煤气消耗量 $40\sim 50\text{ Nm}^3/\text{t}$ 的情况下, 将铁水罐内 1 t 废钢预热至 900°C 左右, 形成的 CO_2 排放低于 20 kg 。在铁水罐加废钢 10 吨 的条件下可提升铁水入转炉温度约 20°C 。

2) 合金烘烤预热

出钢后的钢水温度受到出钢速度、合金加入等的影响, 其中合金的影响属于必然因素, 在保持特定钢种出钢温度稳定的情况下, 通过对合金的加热、烘烤, 可稳定减少合金熔融过程的吸热量, 从而减少钢水温降。合金烘烤同样采用极低成本的高炉煤气作为热源。

鄂钢低铁钢比冶金产线共有 3 座合金烘烤装置, 布局为 1 炉 1 烤模式, 占用现场位置很少, 如图 6 所示, 经过 15 分钟烘烤加热, 可将合金预热至 400°C , 减少出钢温降 $3^{\circ}\text{C}\sim 5^{\circ}\text{C}$ 。



Figure 6. Alloy preheating operation diagram
图 6. 合金烘烤工作图

2.1.4. 提高铁水质量

铁水经过脱硫、扒渣工序, 大量脱硫剂冷料加入高温铁水进行搅拌, 再将表面的高温脱硫渣清理出来, 铁水温度下降约 30°C , 直接影响转炉铁钢比约 20 kg/t 。同时, 随着铁水 Si 含量的提高, 废钢理论加入量随之增加, 但当入炉铁水 Si 含量大于 0.7% 时, 冶炼难度增加, 炉料结构变化易引起喷溅。随着铁水 Si 含量的增加, 辅料加入量也相应增加, 新增加的辅料会吸收一部分 Si 的氧化热, 导致废钢加入量的增加趋势变缓。随着铁水温度的提高, 废钢理论加入量呈线性增加。铁水温度每增加 10°C , 废钢理论加入量平均增加 0.68 t/t [19]。

通过加强烧结熔剂质量管理, 稳定混匀矿成分等措施稳定烧结矿碱度, 控制烧结内返率, 提高焦炭强度, 铁水 Si 、 S 双达标率($0.25\% \leq \text{Si} \leq 0.60\%$, $\text{S} \leq 0.04\%$)从 78.2% 提升至 91.9% , 脱硫比例由 18% 下降至 3% , 铁水温度 $\geq 1505^{\circ}\text{C}$ 达标率增加至 95% , 为降低铁钢比创造了有利条件。

2.1.5. 降低出钢温度

出钢温度越低，钢水带走的物理热越少，可供废钢熔化的热量也就越多，随着出钢温度的降低，废钢加入量随之增加[19]。通过提高钢包运行效率、钢包加盖保温、提高铸机生产效率等手段，转炉出钢温度有了进一步降低的空间。

1) 提高钢包运行效率

炼钢厂根据生产节奏确定钢包周转数量，钢包使用在线蓄热式烘烤技术，烘烤温度可达到 1200℃，保证钢包温度。出钢使用温度较高的 A 包，禁止冷包上线，可降低出钢温度 5℃左右。

2) 钢包加盖保温

根据相关文献显示钢水的散热量可由钢包罐底的散热量 Q_1 、罐身柱面的散热量 Q_2 及钢水面的散热量 Q_3 组成，其中钢水面的散热量占整体散热量的 60%左右[20]。为减少钢水温降损失，鄂钢在钢包使用过程中全程加盖，有效减少了钢水热量散失，钢水温度损失减少约 15℃。

3) 提高连铸生产效率

与极低铁钢比、极致高效冶金过程工艺相适应，连铸工序需要同时实现高效率、高稳定性的运行目标，生产出高质量、免清理的连铸方坯和板坯。方坯连铸拉速平均提升 0.632 m/min，最高达到 4.2 m/min；板坯连铸全年平均提速 0.236 m/min；高强钢表面清理率从 18.7%降低至 2.3%。

实际生产中，需要做到浇注钢水质量和基于工序联动的温度条件保障、连铸全保护浇注设备与工艺实施、拉速提高条件下的高恒拉率过程控制、铸坯内外部质量的优化、免清理连铸坯的持续稳定生产。

2.2. 多渠道加废钢技术应用

转炉生产所用废钢如果仅考虑通过废钢斗加入转炉，受转炉炼钢厂原设计工况条件限制，不仅不能满足大废钢量装斗要求，而且也会大大影响转炉的生产效率，目前国内钢企采用多环节加废钢，转炉生产效率提高了 30%以上[21]。通过调整桶装废钢配比、铁水罐加废钢、钢包加废钢、精炼炉加废钢等多渠道加废钢技术应用，有效解决了大量废钢入转炉困难的问题。

2.2.1. 增加桶装废钢量

废钢桶配加废钢种类主要有工业打包块、钢筋打包块、工业尾料、钢筋切粒、精炉料、重型废钢、破碎料等几个品种构成，为达到低铁钢比生产要求，对废钢结构进行了优化，以重型、轻型、打包块为主，并采用破碎料、生铁块等小粒度废钢调整桶重。采取措施后，废钢单桶重量提高了 5~8 t。

2.2.2. 铁水罐加废钢

Table 3. Statistical analysis table of yield rates for scrap steel charging in hot metal ladles vs. converters
表 3. 铁水罐加废钢与转炉加废钢收得率统计分析表

指标	铁水罐加废钢	转炉加废钢
废钢收得率	90%~95%	85%~90%
合金元素收得率	80%~85%	70%~75%
渣中带铁量	2%~3%	5%~8%
适用废钢类型	轻薄料、破碎料、刨花丝	重型废钢、生铁、打包块、回收废钢、破碎料等

废钢加入铁水罐后主要通过热辐射和部分热传导吸收铁水罐内的余热。铁水罐内铁水温度高达 1450℃以上，废钢可快速吸收铁水显热预熔，熔化率可达 90%~95% (废钢中轻废占比高时可达 98%)，有效减少

转炉内的能量消耗,从而提高收得率 5%~10%。而转炉内强烈的氧化气氛可能导致废钢中的某些元素被氧化,降低收得率。铁水高碳环境(C 4.0%~4.5%)抑制废钢中 Fe、Mn 等元素的氧化,合金元素收得率比转炉高 3%~5%,如 Mn 收得率可达 85%,而转炉为 80%。废钢在铁水罐中长时间(30~60 分钟)静置熔化,非金属夹杂物(如 SiO_2 、 Al_2O_3)上浮至渣层,渣中带铁量仅 2%~3%,而转炉渣带铁量约 5%~8%。具体见表 3。

鄂钢在铁水入转炉温度提升至 1350℃之后,开始推行铁水罐加废钢工艺,其流程见图 7:

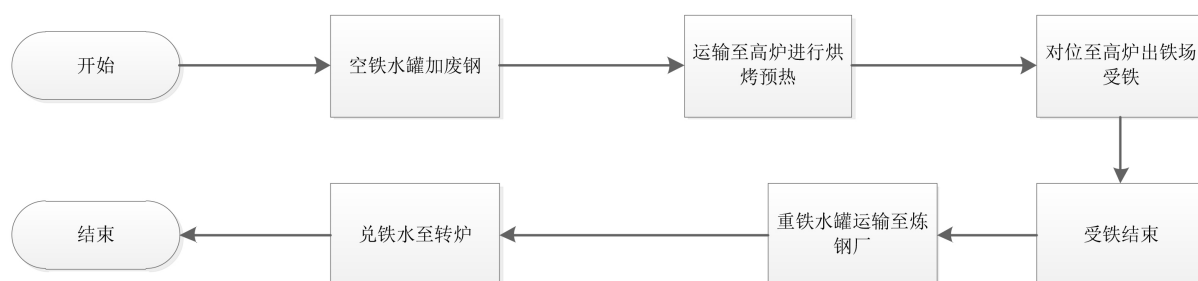


Figure 7. Process flowchart of scrap charging into hot metal ladle

图 7. 铁水罐加废钢工艺流程图

铁水罐加废钢工艺对废钢料型、质量要求很高,首先必须确保废钢干燥,没有密闭容器、危化品,废钢安全可靠;其次确保既能有利于烘烤预热又不污染环境;第三确保一定的堆比重,有利于废钢添加。鄂钢铁水罐加废钢料型主要为破碎料、轻薄料、刨花丝、工业尾料、板边等品种,通过铁水罐加废钢增加废钢入炉量 10 吨左右。

2.2.3. 钢包加废钢

通过降低出钢温度、扩大铸机结晶器尺寸、钢包加盖保温、加快钢包周转速度等措施降低钢水开浇温度,在此基础上对钢包进行加废钢,加入方式为炉后投入,废钢料型为钢筋切粒,每炉可增加废钢量约为 3 吨。与高炉加废钢和铁水罐加废钢预热模式相比,不仅能提高工序废钢用量,还有利于减少吹损和提高废钢收得率[21]。

2.2.4. 精炼炉加废钢

精炼炉加废钢在降低铁钢比的基础上,还可以实现资源循环利用、温度调控和成分优化的效果。废钢作为金属炉料可降低能耗,其熔化过程能吸收过剩热量(约 1.38 MJ/kg)实现精准控温,同时通过稀释钢水残余元素(如 Cu、Sn)及部分保留有益合金元素(如 Cr、Ni)来调节成分;在 LF 炉还原期或真空精炼温度补偿阶段加入时,新鲜金属界面还能促进脱硫反应和夹杂物上浮。精炼炉加废钢需控制废钢加入量(通常 $\leq 15\%$)、预处理水分($\leq 0.5\%$)及块度(真空精炼需 $\leq 50\text{ mm}$),以平衡冶金效果与精炼效率。实际应用中每炉加入量按 3~5 吨进行控制。

3. 生产效果

2018 年实施低铁钢比攻关以来,经过持续改进工艺,铁水入转炉温度提升 98℃,铁钢比指标稳步下降 158 kg/t,吨钢综合能耗下降明显。

1) 随着铁水入转炉温度的升高,铁钢比指标也随之下降,如图 8 所示。铁水温度升高意味着带入转炉的物理热增加,转炉一方面可以减少铁水用量,另一方面可以增加废钢用量,进而降低铁钢比。开展低铁钢比攻关以来每罐铁水装入量减少了 20 吨左右,入转炉废钢增加了 20 吨左右。

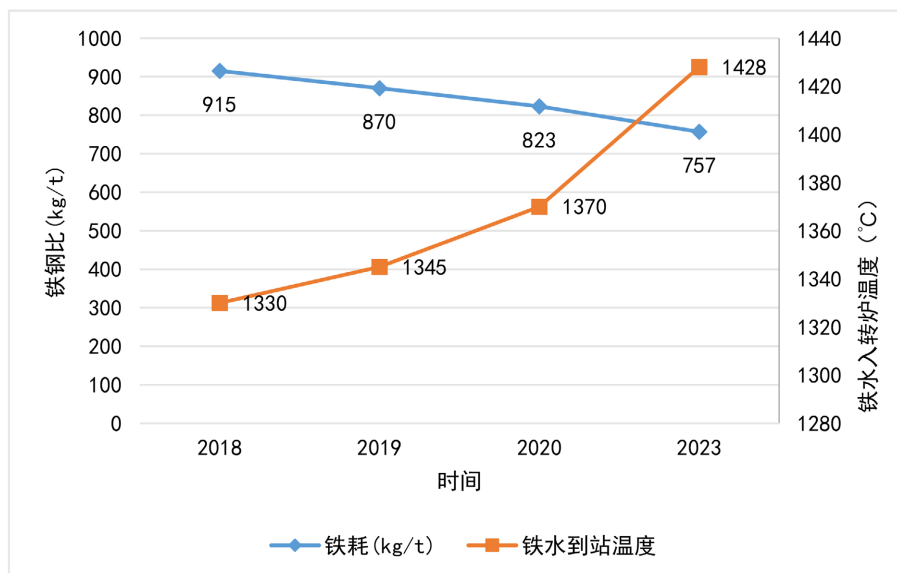


Figure 8. Trends in iron-to-steel ratio and hot metal charging temperature (2018~2023)

图 8. 2018~2023 年铁钢比、铁水入炉温度趋势图

2) 多渠道加废钢技术效果明显。通过调整装桶废钢料型降低铁钢比约 50 kg/t, 在废钢桶装桶量受到限制后, 通过增加铁水罐加废钢、转炉炉后加废钢、精炼炉加废等手段进一步降低铁钢比约 110 kg/t。降低铁钢比攻关项目逐步实施以后, 入炉铁原料结构变化如图 9 所示。

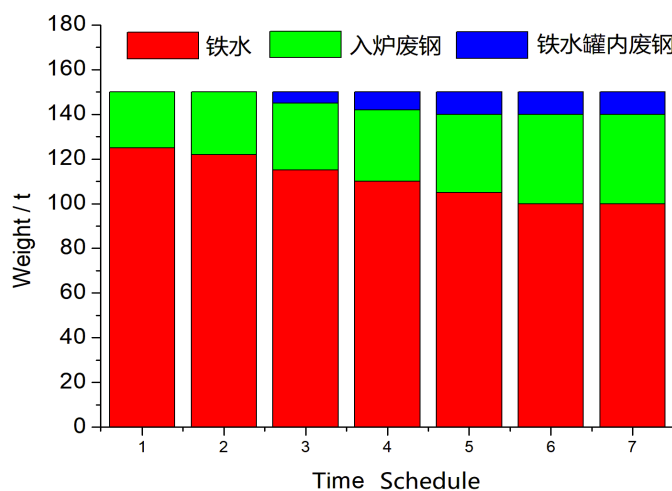


Figure 9. Iron raw material charging structure diagram

图 9. 入炉铁原料结构图

从图 9 可以看出, 随着低铁钢比工艺相关措施的落实以及控制系统的逐步成熟, 转炉入炉废钢量可稳定在 40 t 左右, 而铁水罐内可以预先加入 10 t 左右的废钢, 经烘烤后可以在入炉前完全熔融, 即铁原料总废钢比达到 33.3% 的极高数值, 在宝武集团甚至国内均处于最高水平。在入炉固态常温废钢达到 40 t, 比例超过 26% 的情况下, 初期废钢的熔化是影响转炉冶炼效率和稳定性的重要因素, 也是国内超高废钢比转炉冶炼均需面临的难题, 为此, 结合生产实践, 每一炉冶炼完成后适当留渣, 废钢入炉后通过钢渣混合, 快速升温, 兑入铁水后, 前后两次摇炉, 促进废钢在炉内均匀分布、快速熔融。

3) 铁钢比指标降低, 吨钢综合能耗同步下降, 如图 10 所示。降低铁钢比可以降低钢铁企业吨钢综合能耗, 在同等粗钢产量下, 可以减少企业综合能耗, 因此, 降低铁钢比是钢铁企业降低吨钢综合能耗的重要手段[22]-[24]。有研究表明, 转炉每用 1 t 废钢代替 1 t 铁水, 最少可以节约 559 kg 标准煤。

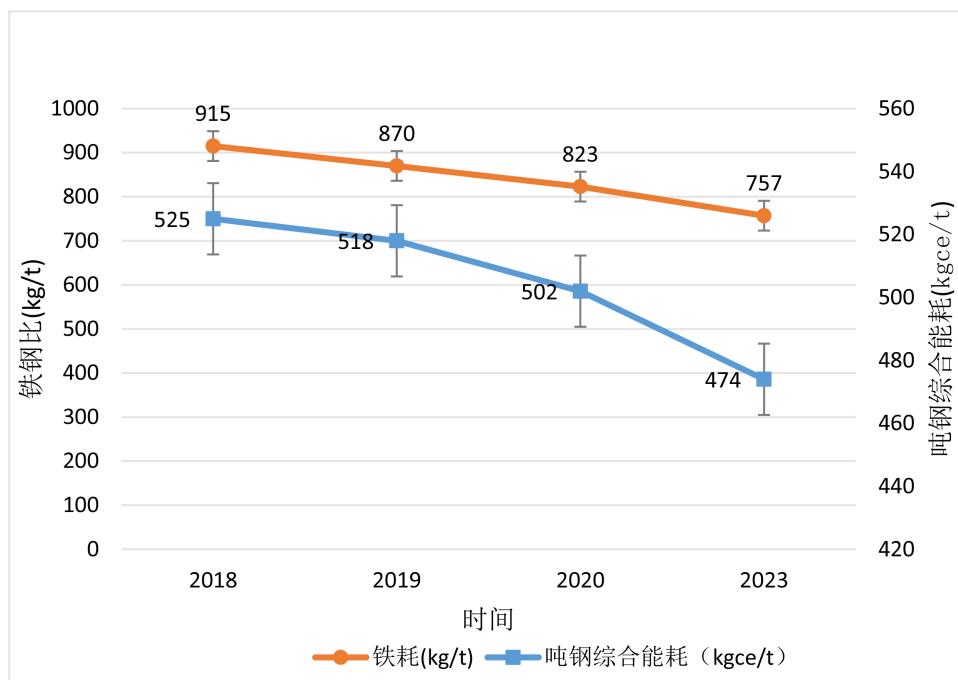


Figure 10. Iron-to-steel ratio & comprehensive energy consumption per ton of steel trend chart
图 10. 铁钢比、吨钢综合能耗趋势图

经计算鄂钢每年可直接减少 CO₂ 排放 5~7 万吨, 在同等钢产量条件下可减少生铁产量 80 万吨左右, 又可减少碳消耗约 38 万吨。

4) 产线效率稳步提升, 构建起高效能柔性化制造新范式。低铁钢比稳定实施后, 月均铁钢比可稳定在 750 kg/t 左右的水平, 最低月份平均为 730 kg/t。转炉作业率提升 10%, 转炉平均冶炼周期减少 5 min, 在同等铁水产量条件下, 炼钢日均增产 2000 吨左右。低铁钢比技术攻关同步构建了动态响应的柔性制造体系, 实现市场导向的智能决策, 行情高位时启动极致低铁钢比产能冲刺模式, 常态下采用经济铁钢比算账生产模式, 形成“市场波动-工艺参数-能效成本”三重联动的智慧制造新范式。

4. 结论

鄂钢通过实施铁水一罐到底工艺、废钢、合金烘烤预热、铁水罐、钢包加盖保温等技术手段有效解决了降低铁钢比生产造成的转炉冶炼热量不足问题; 通过铁水罐加废钢、优化桶装废钢料型结构、转炉炉后加废钢、精炼炉加废钢等多渠道加废钢技术手段有效解决了大量废钢加入转炉困难的问题, 具备了铁钢比 750 kg/t 生产能力。同时, 显著减少炼钢过程的能源消耗和碳排放, 有效提高炼钢生产效率, 同步提升柔性生产能力和绿色低碳水平, 符合钢铁行业“双碳”目标要求。

参考文献

- [1] 钟嘉豪, 周继程, 刘骁. 福建三钢集团节能降碳进展及碳减排路径[J]. 中国冶金, 2022(5): 125-130.
- [2] 张琦, 沈佳林, 许立松. 中国钢铁工业碳达峰及低碳转型路径[J]. 钢铁, 2021, 56(10): 152-163.

- [3] 韩晶, 杜滨. 铁钢比变化对吨钢综合能耗影响分析方法[J]. 钢铁, 2022(10): 188-194.
- [4] 谢安国, 陆钟武. 降低铁钢比的途径和节能效果分析[J]. 冶金能源, 1996, 15(1): 11-13.
- [5] 张福明, 颜建新, 殷瑞钰. 钢铁制造流程炼铁区段耗散结构的解析[J]. 钢铁, 2022, 57(3): 1-9.
- [6] 彭岩, 曹先常, 张玉柱. 钢铁典型工序流程节能技术新进展[J]. 中国冶金, 2017, 27(5): 8-12+32.
- [7] 方上官钦, 刘正东, 殷瑞钰. 钢铁行业“碳达峰”“碳中和”实施路径研究[J]. 中国冶金, 2021, 31(9): 15-20.
- [8] 朱晓波, 杨晓东. 中国钢铁工业低碳低耗发展之路怎么走? [N]. 中国冶金报, 2017-05-17(002).
- [9] 于定孚. 国外氧气转炉生产提高废钢比[J]. 上海金属(炼钢分册), 1983(2): 76.
- [10] 张志伟. 提高转炉废钢比研究综述[J]. 柳钢科技, 2018(1): 6-9.
- [11] 曹祎哲, 陈东宁, 赵广勋, 等. 转炉低铁钢比下冶炼工艺探讨[J]. 山西冶金, 2019(4): 126-128.
- [12] 苑洪滨, 高冰, 单庆林. “一包到底”和全程铁水罐加盖技术的应用[J]. 河北冶金, 2023(12): 71-74.
- [13] 王新东, 李铁, 张弛, 等. 河钢唐钢新区数字化绿色智能工厂的设计与实施[J]. 河北冶金, 2021(7): 1-6.
- [14] 赵广阔. 唐钢不锈钢公司铁水罐加盖装置设计研究[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
- [15] 谷宗喜. 高炉一转炉区段“界面技术”优化及仿真研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2018.
- [16] 杨光, 徐安军, 贺东风, 等. 多功能铁水罐加盖保温效果分析[J]. 钢铁, 2017, 52(7): 96-103.
- [17] 丁旭, 陈建, 纪鹏飞, 等. “一包到底”铁水罐包衬安全稳定性的提高[J]. 河北冶金, 2022(10): 29-34+86.
- [18] 陈亚团, 杨鑫, 朱青德. 低铁钢比、高废钢比技术综述和建议[J]. 山东冶金, 2019, 41(1): 4-8.
- [19] 张胤, 刁望才, 韩春鹏, 等. 转炉工艺条件优化对提高废钢比影响分析[J]. 包钢科技, 2022, 48(3): 27-30.
- [20] 曾小宁. 减少铁水和钢水出炉后温降的理论分析[J]. 冶金能源, 1996, 15(1): 27-31.
- [21] 乐德俊, 赵秀芳. 小转炉“低铁钢比、高冷料比”冶炼工艺的研究与实践[J]. 冶金标准化与质量, 2003, 41(5): 24-26+30.
- [22] 陆钟武, 谢安国, 周大刚. 再论中国钢铁工业节能方向和途径[J]. 钢铁, 1996, 31(2): 54-58.
- [23] 蔡九菊, 孙文强. 中国钢铁工业的系统节能和科学用能[J]. 钢铁, 2012, 47(5): 1-8.
- [24] 张琦, 蔡九菊. 钢铁制造流程系统节能与能效提升[J]. 钢铁, 2021, 56(8): 32-42.