



移动扫码阅读

冯超, 屠明伟, 朱荣, 等. CO₂-CO 循环利用实现钢化联产的实践与进展 [J]. 能源环境保护, 2025, 39(4): 37-47.

FENG Chao, TU Mingwei, ZHU Rong, et al. Practical Application and Progress of CO₂-CO Recycling in Steel Chemical Co-Production [J]. Energy Environmental Protection, 2025, 39(4): 37-47.

CO₂-CO 循环利用实现钢化联产的实践与进展

冯超^{1,2}, 屠明伟^{1,2}, 朱荣^{1,2,3,*}, 张天福⁴, 林滔^{1,2,5}, 王晓东⁵

(1. 北京科技大学碳中和研究院, 北京 100083; 2. 辽宁材料实验室钢铁再生技术研究所, 辽宁沈阳 110167; 3. 北京科技大学绿色低碳钢铁冶金全国重点实验室, 北京 100083; 4. 山西晋南钢铁集团, 山西临汾 043400; 5. 江苏省鑫鑫钢铁集团有限公司, 江苏连云港 222000)

摘要: 钢铁行业作为全球能源消耗和碳排放的重点领域, 面临着日益严峻的环境压力与资源利用挑战。钢化联产技术通过将钢铁生产中的废热、废气和 CO₂ 等副产物转化为有用能源, 实现能源的高效回收和利用, 成为钢铁行业低碳、绿色转型的关键技术之一。该技术通过一系列优化过程, 促进钢铁生产过程中热能、电力和化学能源的协同产出, 提高了能源利用效率, 并有效降低了碳排放。钢化联产的核心思想是在钢铁冶炼过程中, 利用废气、废热及 CO₂ 等副产物进行热电联产, 特别是 CO₂ 还原为 CO 后, 可用于进一步的冶炼或能源回收。这一技术不仅改善了钢铁生产的能效, 还有效减少了 CO₂ 的排放量, 符合当前绿色制造和低碳经济的要求。通过分析钢化联产的典型案例, 探索了一种 CO₂-CO 循环利用的生产模式, 验证了钢化联产的可实现性和经济性, 为钢铁企业实施钢化联产提供了一条可操作的路线。通过碳排分析钢化联产在高炉-转炉全流程中的 CO₂ 资源化循环利用, 实现了 CO₂ 减排总量超 30%, 其中转炉工序 CO₂ 排放降低了 27.25%。随着研究的深入和技术的成熟, 预计该技术将在钢铁生产中发挥越来越重要的作用, 为实现绿色、可持续发展的目标提供有力支撑。

关键词: 钢化联产; CO₂ 利用; 化工产品; 煤气资源化; 碳排放

中图分类号: X51; X701

文献标识码: A

文章编号: 2097-4183(2025)04-0037-11

Practical Application and Progress of CO₂-CO Recycling in Steel Chemical Co-Production

FENG Chao^{1,2}, TU Mingwei^{1,2}, ZHU Rong^{1,2,3,*}, ZHANG Tianfu⁴,
LIN Tao^{1,2,5}, WANG Xiaodong⁵

(1. Institute for Carbon Neutrality, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Iron and Steel Recycling Technology Research Institute, Liaoning Academy of Materials, Shenyang 110167, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 4. Shanxi Jinnan Iron and Steel Group Co., Ltd., Linfen 043400, China; 5. Jiangsu Binxin Iron and Steel Group Co., Ltd., Lianyungang 222000, China)

Abstract: The steel industry is one of the most energy-intensive and carbon-emitting sectors worldwide, significantly contributing to environmental challenges. As the world shifts toward more sustainable and eco-friendly industrial practices, there is increasing pressure on the steel industry to

收稿日期: 2024-12-25

修回日期: 2025-01-20

接受日期: 2025-02-07

DOI: 10.20078/j.eep.20250304

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52304343); 中国博士后科学基金资助项目(2023M730227); 国家自然科学基金资助项目(52293392)

第一作者: 冯超(1988—), 男, 辽宁鞍山人, 副研究员, 主要研究方向为钢铁工业 CO₂ 捕集及资源化利用。E-mail: ustbfengchao@163.com

*通讯作者: 朱荣(1962—), 男, 江西萍乡人, 教授, 主要研究方向为钢铁流程 CO₂ 回收及资源化利用技术。E-mail: zhurong1201@126.com

adopt technologies that mitigate its environmental impact while enhancing energy efficiency. One promising technology is steel chemical co-production, which effectively addresses these challenges by utilizing by-products such as waste heat, waste gas, and carbon dioxide (CO₂) generated during the steelmaking process. This innovative approach is critical for the steel industry's low-carbon transformation and offers a viable path toward green manufacturing. Steel chemical co-production technology focuses on capturing and repurposing by-products generated during steel production. Traditionally, processes like blast furnaces and converters produce substantial amounts of waste heat and gases, much of which remains unutilized, leading to inefficiency and environmental harm. Through co-production technology, these by-products can be converted into valuable forms of energy, such as electricity and heat. A key innovation is the treatment of CO₂, which is often released in large quantities during iron ore reduction. By converting CO₂ to CO, it can be used as a fuel for further smelting or for generating additional energy, thus closing the loop in steel production. One significant advantage is its potential to reduce CO₂ emissions. Steel producers can capture CO₂ from various stages of steelmaking, including the blast furnace and converter, and recycle it into usable energy. Reports indicate CO₂ emissions can be reduced by over 30% across the entire steel production process, with reductions of up to 27.25% specifically during the converter process. This substantially contributes to the industry's overall sustainability goals, achieved through the direct recycling of CO₂ and enhanced production system efficiency, thereby decreasing the need for additional energy inputs. The economic viability of steel chemical co-production is another critical factor. While initial investments in advanced co-production technologies may be substantial, long-term benefits are significant. By optimizing energy usage and reducing carbon emissions, steel producers can lower operational costs over time. These savings can offset the initial investment, making the technology economically attractive. Furthermore, as environmental regulations become more stringent and carbon pricing mechanisms are introduced worldwide, steelmakers adopting co-production technologies are likely to benefit from regulatory incentives, such as tax breaks or carbon credits, further enhancing the technology's economic feasibility. In conclusion, steel chemical co-production technology offers a promising solution to the dual challenges of reducing energy consumption and carbon emissions in the steel industry. By recycling CO₂ and other by-products, this technology enhances energy efficiency, lowers emissions, and provides an economically viable route for steelmakers to contribute to a more sustainable future. As the technology matures and gains widespread adoption, it will play a crucial role in helping the steel industry meet its environmental and economic challenges, aligning with the broader goals of green and sustainable development.

Keywords: Steel chemical co-production; Carbon dioxide utilization; Chemical products; Gasification of coal resources; Carbon emissions

0 引言

随着全球能源危机和气候变化问题的日益严峻,钢铁行业的绿色转型已成为全球关注的焦点。钢铁生产过程不仅能耗高,而且排放大量CO₂、NO_x和颗粒物,严重影响环境质量和生态平衡^[1]。钢铁行业是世界上最大的工业能源消耗行业之一,约占全球工业能源消耗的10%以上,同时也是最大的CO₂排放源之一^[2]。根据国际能源

署(IEA)的数据,全球钢铁行业每年产生的CO₂排放约占全球总排放量的7%^[3-4]。

钢铁行业迫切需要寻找一条既能提高生产效率,又能降低环境负担的技术路径。钢化联产技术作为一种将钢铁生产过程中综合利用副产物和废弃能源的创新技术,近年来逐渐受到学术界和工业界的广泛关注。该技术广义上可理解为钢铁与化工耦合发展,主要表现为2个产业间的物质循环利用,其中石化企业将生产过程中的低热值

合成气输送至钢铁企业,置换出焦炉煤气、转炉煤气、高炉煤气用作原料气生产化工产品,同时钢铁配套的焦化厂副产的煤焦油、粗苯可输送至化工企业进行集中加工,产生规模效应,达到合理分工协作、发挥资源协同循环利用的效果^[5-7]。在这一背景下,钢化联产节能减排技术的研究与实践显得尤为重要。钢化联产技术通过将转炉煤气、余热蒸汽等副产品进行回收和再利用,打破了传统钢铁生产过程中资源和能源的单向流动模式,实现了钢铁生产与其他产业的联动效应^[8]。这不仅有助于减少废弃物排放,降低环境污染,还能够提升企业的资源利用效率,降低生产成本,提升钢铁行业的综合竞争力^[9-10]。

本研究旨在探索钢化联产节能减排技术的理论基础、技术路线以及实际应用,分析当前钢铁行业在节能减排方面面临的主要问题和挑战,并提出相应的解决方案。通过对典型钢铁企业的案例分析,进一步探讨钢化联产技术在实际生产中的应用效果与经济性,为钢铁行业实现绿色制造和可持续发展提供理论支持和实践指导。钢化联产节能减排技术不仅是钢铁行业实现低碳转型的技术路径,也是推动全球环境保护和应对气候变化的有效措施。在这一时代背景下,开展钢化联产节能减排技术的研究具有重要的理论意义和现实价值。

1 国内外研究现状

1.1 国内研究现状

谷鹏飞等^[5]提出一种钢铁园区能量流-物质流协同优化调度方法,充分挖掘生产系统与能源系统协同优化的潜力。通过分析园区高炉、转炉、电炉工序的时序特性与物料关系,建立面向生产系统的物质流模型。考虑各生产工序的能耗特性和煤气产耗情况,建立煤气调度的能量流-物质流耦合模型。基于上述模型,以系统运行成本最小化和最低碳排为目标,对钢铁园区能量流-物质流进行协同优化调度,得到高炉、转炉、电炉生产设备的最优生产策略以及电力、煤气、焦炭能源的最佳调度结果。以山西某钢铁园区为例,对以上方法进行验证,结果表明,在满足钢铁园区生产计划要求的前提下,该方法通过物质流与能量流的协同调控可使钢铁园区的日碳排放量降低 9.56%,系统总成本降低 6.12%。

师少杰等^[11-12]针对转炉煤气组分的特点,研究了转炉煤气中羰基硫的水解机理和氧气的脱除

机理,研发出适宜转炉煤气脱除羰基硫等硫化物的工艺技术以及脱除氧气的复合氧化物催化剂。运行结果表明,经过净化后的转炉气总硫含量可以达到 $<0.1 \text{ mg/m}^3$,氧气含量可以达到 $<30 \text{ mg/m}^3$,既满足化工生产的要求,又加快了钢化联产协同降碳技术推进速度,具有较好的工业应用前景。

王改荣等^[13]综述了目前我国钢铁行业尾气利用及乙醇技术研究现状,分析了通过钢铁行业尾气制备乙醇主要技术及其工业化应用情况,认为通过将钢铁厂尾气中的有价成分 CO、CO₂、H₂ 分离提纯,作为合成气的主要组分进行高值化利用制备乙醇,是我国钢铁行业的新兴发展方向。

马云强^[14]通过 Aspen Plus 模拟软件设计并计算了焦炉煤气与转炉煤气联产乙二醇的生产过程。结果表明,焦炉煤气经过一系列处理后,可提纯 53 814 Nm³/h H₂ 和 9 586 Nm³/h CO;转炉煤气处理后,可提纯 17 940 Nm³/h CO。CO 经羰化偶联合成草酸二甲酯,再加氢合成乙二醇,年产量为 20 万 t。该工艺的 CO₂ 排放量为 1.06 t CO₂/t 乙二醇,低于煤路线的 2.89 t CO₂/t 乙二醇;碳效率为 52.71%,高于煤路线的 39.27%。经济分析显示,该工艺的内部收益率为 16.13%,乙二醇生产成本为 3 212.64 元/t,低于煤路线的 4 606.00 元/t,表明该工艺具有较好的盈利能力和经济效益。

1.2 国外研究现状

KIM 等^[15]使用 Aspen Plus V12 进行模拟甲醇生产和从高炉煤气中联合生产甲醇和氨,并使用 Aspen 过程经济分析仪(APEA)评估经济性。结果表明,在正常进行甲醇生产的案例中甲醇含量为 99.4%,产量 232.0 t/d,而使用高炉煤气联合生产甲醇和氨的案例中氨含量为 97.7%,产量为 453.4 t/d,甲醇含量为 99.8%,产量为 263.0 t/d。甲醇生产案例的年总成本为 121.6 百万美元/年,联合生产案例的年总成本为 222.1 百万美元/年。在正常进行甲醇生产的情况下,净现值(NPV)为 -810.4 百万美元/年,而在使用高炉煤气联合生产甲醇和氨的情况下,NPV 为 -981.3 百万美元/年。通过敏感性分析表明,当原材料成本降低 30% 时,共产方案在 NPV 方面可能更具经济可行性。

SINGH 等^[16]提出了一种联合化学循环工艺,利用钢铁厂富含 CO₂ 的高炉气生产 CO。该循环工艺能够充分利用丰富的 Fe₃O₄ 和 CaO 作为固体氧气和 CO₂ 载体,且可在常压下运行。在实验室规模的固定床反应器中,采用合成高炉气和

Fe₃O₄/CaO 质量比为 0.6 的混合物进行概念验证, 分别研究了在等温条件下(1 023 K)以及在 1 023 ~ 1 148 K 温度程序下的 CO 生产。实验结果对 CO 产率、CO 恒容产率、碳回收率、燃料利用率和固体利用率等性能指标进行了对比。在 10 次循环中, 温度程序法生产 CO 的产率为(0.056 ± 0.002) mol/mol 高炉气, CO 恒容产率为 7.6 mmol/(kg Fe·s), 碳回收率为 48% ± 1%, 燃料利用率为 23% ± 2%, 以及钙氧化物和铁氧化物的平均利用率分别为 22% ± 1% 和 11% ± 1%。温度程序法在前述性能指标上比等温工艺提高了 20%~35%。在 10 次连续的工艺循环中, 无论是等温工艺还是温度程序法, 都未观察到 CO 的产率显著下降。为了分析 2 种操作模式下的外部能量损失, 对年排放 100 万 t 等量 CO₂ 的钢铁厂高炉气进行了过

程模拟。结果表明, 温度程序法比等温法更加高效。尽管改变温度导致的外部能量损失增加了 20%, 但由于能够生产更高浓度的 CO, 温度程序法的外部能量效率更高。

SOLTANIEH^[17] 研究了一种集成系统, 用于共同生产电力和甲醇。该项目利用从化石燃料电厂捕集的 CO₂ 以及通过风能可再生能源产生的水电解单元产生的 H₂ 来合成甲醇。该研究还考虑了在大型马蒂安特电厂中使用水电解单元产生的 O₂ 燃烧碳捕集方法。对该系统的技术和经济分析表明, 当天然气价格为 7.8 \$/kMJ 时, 减少 CO₂ 排放的成本为 93 \$/t, 甲醇生产成本为 576 \$/t。该集成系统可产出 5.82 亿(kW·h)/a 的电力和 228 480 t/a 甲醇, 且不会向大气排放温室气体。

钢化联产在各领域中的应用汇总如图 1 所示。

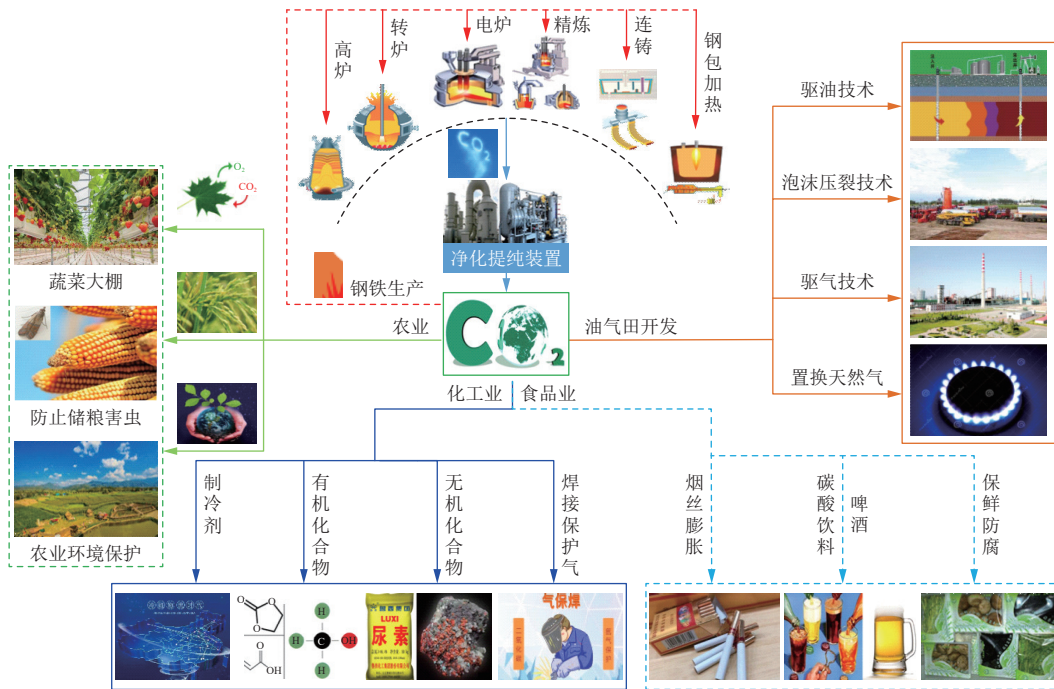


图 1 钢化联产示意图

Fig. 1 Schematic diagram of steel chemical co-production

2 冶金煤气实现钢化联产发展路径

无论是冶金还是化工行业均会产生大量的 CO₂, 同时冶金还会产生大量富含 CO 的烟气, 这 2 种气体在冶金和化工领域均可被利用, 这便是钢化联产的基础^[18]。冶金煤气实现钢化联产发展路径如图 2 所示。

2.1 CO₂ 的利用

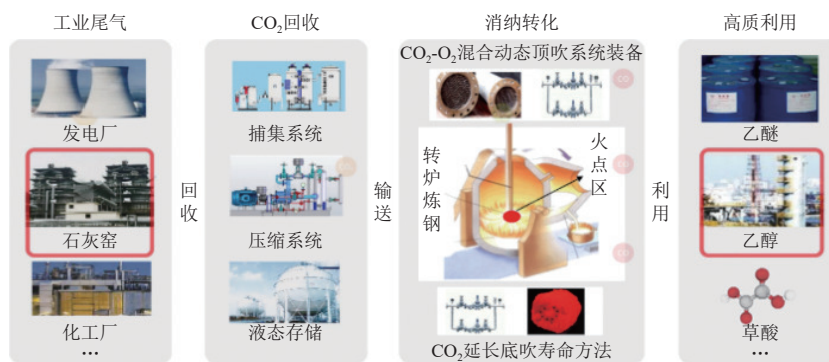
2.1.1 CO₂ 应用于钢铁行业

CO₂ 可以应用于高炉、转炉、电炉、精炼炉等

工序。在高炉风口喷吹 CO₂ 可以有效地减少其排放并提高高炉冶炼效率; 转炉顶底复吹 CO₂ 具有提高转炉煤气的热值与含量、减少除尘灰、提高钢材质量等优势; 电炉喷吹 CO₂ 还可以增强熔池搅拌效果, 改善钢液的均匀性和品质; CO₂ 在精炼工序无论是作为 LF 精炼炉的底吹气还是作为 RH 精炼炉的提升气均可提高精炼效果, 对于改善钢液质量起到了积极的作用^[19-21]。

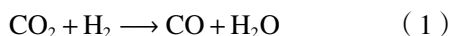
2.1.2 CO₂ 应用于化工行业

CO₂ 可以通过化学反应转化为多种化学品,

图2 CO₂-CO 循环利用的钢化联产减碳模式Fig. 2 Carbon reduction model of steel chemical co-production with CO₂-CO recycling

减少对传统化石资源(如石油、天然气)的依赖,减少碳足迹。

CO₂ 可以与 H₂ 反应生成 CO 和水,这一过程被称为 CO₂ 还原反应。生成的 CO 是合成气的重要成分(如式(1)),广泛用于生产合成化学品。



CO₂ 作为制备甲醇的合成气来源之一,反应如式(2)。甲醇是化工行业中重要的基础化学品,广泛用于制造塑料、溶剂、涂料、药品等。



CO₂ 与氨气反应生成尿素,反应如式(3),尿素是全球最重要的氮肥之一,广泛用于农业。



2.2 CO 的利用

2.2.1 CO 应用于钢铁行业

CO 在钢铁行业的应用主要集中于冶金过程,尤其在高炉炼铁中,作为还原剂用于还原铁矿石中的铁氧化物。在这一过程中,CO 的生成主要依赖焦炭与空气、蒸汽等反应。除此之外是利用 CO 热值,作为燃料燃烧发热、发电,应用价值较低。在此过程中,CO 主要来自冶金生产中产生的高炉煤气、转炉煤气和焦炉煤气等。

尽管 CO 在钢铁冶炼中已有重要应用,但其本身是一种有毒气体,且燃烧后会生成 CO₂,对环境造成负面影响。因此,钢铁行业正逐步推进绿色炼钢技术,减少 CO 的排放,并提高能源效率。

2.2.2 CO 应用于化工行业

CO 是合成气的重要成分之一,而合成气是许多化工产品的基础原料。甲醇的生产通常是通过 CO 与 H₂ 反应实现(式(4))。合成气中的 CO 与 H₂ 反应生成甲醇,这一过程被广泛应用于化学工业。



CO 和 H₂ 可通过费-托合成转化为液体烃类(式(5))。这一过程通常用于生产合成燃料,尤其是在天然气较为丰富而石油资源有限的地区。CO 与 H₂ 在催化剂作用下反应,生成液态烃类。



CO 参与一些酸类化学品的生产过程。例如,在甲酸(HCOOH)生产中,CO 和水在催化剂作用下反应生成甲酸(式(6))。



CO 还可以用于生产其他有机酸,如乙酸(CH₃COOH),这些化学品在溶剂、塑料、药物和染料中有广泛应用。

此外,CO 还可以与其他化学物质反应生成各种醇类和烯烃,这些化学产品是塑料、溶剂、医药等产品的基础材料。

3 典型钢化联产实践

山西某钢铁厂于 2012 年引进 4 台燃气轮机及整套发电设备将剩余的钢厂尾气用于热电联产,投入运行后每年发电约 4.8×10^8 kW,蒸汽 90 多万 t,在比较了钢厂尾气用于化工合成和燃气轮机发电的效益后,该钢厂决定整合周边钢厂尾气资源利用转炉煤气和焦炉煤气用于化工合成,建设年产 30 万 t 乙二醇联产 15 万 t LNG(液化天然气)项目。该项目采用钢厂尾气利用创新技术从 55 000 Nm³/h 的 BOFG(转炉煤气)和 COG(焦炉煤气)中提纯得到 32 000 Nm³/h 纯度大于 99% 的 CO 作为乙二醇合成原料气。同时化工产生的 CO₂ 又用作为原料吹入转炉,实现 CO₂ 的资源化利用。

3.1 典型钢化联产工艺路线

首先向转炉顶底复吹 CO₂ 以增加转炉煤气的含量以及转炉煤气中的 CO 含量,之后通过净化、

除氧、脱碳技术对转炉煤气实现 CO 提纯,获得的纯 CO 与亚硝酸甲酯通过羟基合成生产草酸二甲酯,之后与从焦炉煤气中经过净化、脱碳、低温冷凝获得 H₂ 反应生成乙二醇,同时得到副产物 LNG。转炉煤气和焦炉煤气脱碳产出的 CO₂ 经过压缩、干燥得到纯 CO₂,再通入转炉中实现钢化联

产和 CO₂ 的循环利用。

CO₂-CO 循环利用实现钢化联产的工艺流程如图 3 所示,其核心是转炉煤气和焦炉煤气脱碳后,将脱除的 CO₂ 进行压缩、脱水从而得到纯 CO₂,这也是实现 CO₂-CO 循环利用的核心。

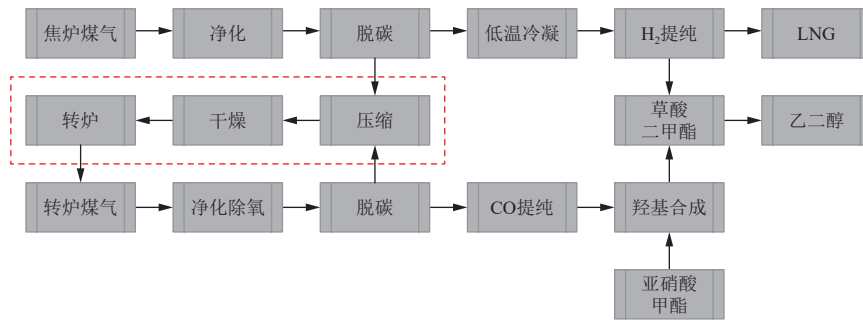


图 3 CO₂-CO 循环利用的钢化联产流程图

Fig. 3 Flow diagram of steel chemical co-production with CO₂-CO recycling

3.2 钢化联产工艺指标分析

2024 年 10 月对某钢厂进行了钢化联产前后的相关工艺指标分析,CO₂ 使用量为 2.0~4.0 Nm³/t 钢。实验阶段转炉综合铁耗 822.50 kg/t,常规对比阶段转炉综合铁耗 822.53 kg/t。实验炉次与常规对比炉次铁耗等基础情况相同。

3.2.1 转炉煤气回收对比分析

煤气回收量及热值主要受铁耗、铁水 [C] 含

量、铁块用量和焦沫用量的影响,理论上煤气回收量与这些因素呈正相关。表 1 为实验炉次以及常规炉次的铁水、废钢、铁块、铁水含碳量和焦沫用量情况,以及通过换算得到的转炉 [C] 元素输入量。根据计算结果可得,常规炉次与实验炉次的转炉输入碳情况基本相同,对于实验结果影响不明显。

表 1 转炉输入 [C] 对比分析

Table 1 Comparative analysis of converter input carbon

转炉	项目	铁水/t	废钢/t	铁块/t	铁水[C]/%	焦沫/(kg·t ⁻¹)	输入[C]/%
1#转炉	常规炉次	137.96	36.97	2.68	4.66	0.43	3.75
	实验炉次	143.19	31.26	5.79	4.51	0	3.75
	差值	5.23	-5.71	3.11	-0.15	-0.43	0
2#转炉	常规炉次	140.74	34.75	3.61	4.73	1.07	3.89
	实验炉次	142.33	32.75	4.07	4.65	0.33	3.84
	差值	1.59	-2.00	0.46	-0.08	-0.74	-0.05

注:废钢含碳0.2%,铁块含碳4.0%,铁块含硅1.0%,焦沫含碳70%,下同。

其中输入 [C] 的计算公式如式(7):

$$[C]_{\text{输入}}(\%) = \frac{M_{\text{铁水}} \cdot [C]_{\text{铁水}} + M_{\text{废钢}} \cdot [C]_{\text{废钢}} + M_{\text{铁块}} \cdot [C]_{\text{铁块}} + M_{\text{焦沫}} \cdot [C]_{\text{焦沫}}}{M_{\text{铁水}} + M_{\text{废钢}} + M_{\text{铁块}} + M_{\text{焦沫}}} \quad (7)$$

式中: M_{铁水}——铁水的质量, t;

M_{废钢}——废钢的质量, t;

M_{铁块}——铁块的质量, t;

M_{焦沫}——焦沫的质量, t;

[C]_{铁水}——铁水碳含量, %;

[C]_{废钢}——废钢碳含量, %;

[C]_{铁块}——铁块碳含量, %;

[C]_{焦沫}——焦沫碳含量, %;

[C]_{输入}——转炉输入平均碳含量, %。

由于 CO₂ 在高温下可以与钢液中的 C 反应生成 CO, 而 CO 是转炉煤气的主要成分之一, 因此转炉喷吹 CO₂ 可以增加转炉煤气的含量和热值。表 2 为常规冶炼与实验期间的煤气统计数据。根据现场的检测数据, 实验期间的煤气产量与煤气 CO 浓度均有较大的提高, 其中 CO 浓度提高 2.11%, 煤气含量与 CO 浓度的等热值煤气量提高 8.42 Nm³/t。等热值煤气量的提高对于 CO₂-CO 循

循环利用实现钢化联产的生产模式具有显著的经济与社会生态效益。

其中, 等热值煤气计算如式(8):

$$V_{\text{等}} = \frac{V_{\text{煤气}} X_{\text{CO}}}{X_{\text{标准CO}}} \quad (8)$$

式中: $V_{\text{等}}$ ——等热值煤气, Nm³/t;

$V_{\text{煤气}}$ ——实际吨钢煤气, Nm³/t;

X_{CO} ——实际煤气 CO 含量, %;

$X_{\text{标准CO}}$ ——标准煤气 CO 含量, 取 40%。

表 2 转炉煤气回收对比分析

Table 2 Comparative analysis of converter gas recovery

转炉	项目	每炉煤气量/Nm ³	吨钢煤气/Nm ³	CO浓度/%	等热值煤气/(Nm ³ ·t ⁻¹)
1#转炉	常规炉次	17 900.33	106.44	40.01	106.47
	实验炉次	18 631.98	109.12	42.12	114.89
	差值	731.65	2.68	2.11	8.42
2#转炉	常规炉次	17 980.83	107.18	41.01	109.88
	实验炉次	18 335.42	107.63	42.54	115.75
	差值	354.59	0.45	1.53	5.91

3.2.2 转炉氧耗对比分析

由于 CO₂ 在高温下呈弱氧化性, 可以与钢液中的 C、Si 等元素反应, 从而代替部分氧气。因此, 喷吹 CO₂ 后可以降低转炉氧耗从而减少生产

成本。表 3 为常规冶炼与实验期间的氧耗统计数据, 根据现场的检测数据, 转炉冶炼喷吹 CO₂ 的实验炉次氧耗量较常规炉次减少 1.75 Nm³/t, 在转炉工序中进一步降低了生产成本。

表 3 转炉氧耗对比分析

Table 3 Comparative analysis of converter oxygen consumption

转炉	项目	铁水[C]/%	铁水[Si]/%	铁水[Mn]/%	焦沫/(kg·t ⁻¹)	氧耗/(Nm ³ ·t ⁻¹)
1#转炉	常规炉次	4.69	0.31	0.24	0.21	45.57
	实验炉次	4.88	0.34	0.24	0	44.71
	差值	0.19	0.03	0	-0.21	-0.86
2#转炉	常规炉次	4.73	0.32	0.24	0.62	46.95
	实验炉次	4.83	0.34	0.25	0.33	45.20
	差值	0.10	0.02	0.01	-0.29	-1.75

3.2.3 转炉渣样对比分析

当 CO₂ 与钢液中的 C 反应生成 CO 后, 1 体积的气体会变成 2 体积的气体, 从而加强了气体对钢液的搅拌能力, 使钢液反应更充分, 这可使炉渣中全铁 (TFe) 含量降低。实验期间主要对钢种 Q235(B) 进行取样分析, 转炉渣样见表 4。实验期间喷吹 CO₂ 炉次的渣中 TFe 较常规冶炼炉次降低 0.36%, 渣中 TFe 的减少代表其钢铁料消耗的减少, 生产成本进一步降低。

3.2.4 碳氧积和脱磷率对比分析

转炉喷吹 CO₂ 可以代替部分氧气, 故而可以降低钢液的过氧化程度, 即可以降低钢液的碳氧积, 同时转炉喷吹 CO₂ 可以加强钢液的搅拌能力并增加化渣时间, 从而可以提高脱磷率。表 5 为常规冶炼与实验期间的碳氧积和脱磷率统计数据, 结果表示, 转炉钢水氧化 (TSO) 测得喷吹 CO₂ 的实验炉次相对常规冶炼炉次的碳氧积降低 0.85×10^{-4} , 终点 P 含量较常规炉次降低了 106 ppm

表 4 转炉渣样对比分析

Table 4 Comparative analysis of converter slag samples

转炉	项目	C _{CaO} /%	C _{MgO} /%	C _{SiO₂} /%	TFe/%	碱度	C _{Al₂O₃} /%	C _{MnO} /%	C _{TiO₂} /%	C _{P₂O₅} /%
1#转炉	常规炉次	43.98	6.94	17.55	14.41	2.51	1.88	2.93	1.27	1.49
	实验炉次	43.25	6.65	16.34	14.05	2.71	1.72	2.98	1.16	1.51
	差值	-0.73	-0.29	-1.21	-0.36	0.20	-0.16	0.05	-0.11	0.02
2#转炉	常规炉次	42.58	6.56	17.98	14.23	2.37	1.92	3.00	1.34	1.51
	实验炉次	42.55	6.68	16.44	14.02	2.60	1.71	3.05	1.22	1.73
	差值	-0.03	0.12	-1.54	-0.21	0.23	-0.21	0.05	-0.12	0.22

(此处 ppm 为 10⁻⁶ t/t-钢, 余同), 脱磷率较常规炉次升高了 7.18%, 对于转炉工序生产的钢水产品

质量有了明显的提高。

表 5 转炉碳氧积和脱磷率对比分析

Table 5 Comparative analysis of converter carbon-oxygen product and phosphorus removal rates

转炉	项目	TSO[C]/%	TSO[O]/ppm	铁水[P]/ppm	终点[P]/ppm	碳氧积/×10 ⁻⁴	脱磷率/%
1#转炉	常规炉次	0.04	694.44	1 250	267	29.83	78.81
	实验炉次	0.04	699.30	1 279	210	29.58	82.09
	差值	0	4.86	29	57	-0.25	3.28
2#转炉	常规炉次	0.06	500.71	1 247	295	29.87	76.50
	实验炉次	0.05	567.53	1 172	189	29.02	83.68
	差值	-0.01	66.82	75	106	-0.85	7.18

3.2.5 转炉除尘灰对比分析

转炉顶吹 CO₂ 可以降低火点区的温度, 使火点区温度低于铁的汽化温度, 从而可以减少转炉除尘灰量。表 6 为常规冶炼与实验期间的粗灰统计数据, 结果表示, 使用 CO₂ 炉次粗灰量为 3.89 kg/t, 较常规冶炼炉次减少 0.95 kg/t, 减少了 19.6%, 粗灰铁量减少 0.55 kg/t。粗灰的减少既改善了转炉工序的环境质量又可降低生产成本。

表 6 转炉除尘灰对比分析

Table 6 Comparative analysis of converter dust removal ash

时间	总统计 钢量/t	总统计 粗灰量/t	吨钢粗灰量/ (kg·t ⁻¹)	粗灰铁量/ (kg·t ⁻¹)
常规炉次	146 086.9	706.4	4.84	2.79
实验炉次	304 134.5	1 182.9	3.89	2.24
差值	—	—	-0.95	-0.55

注: 粗灰铁含量 57.69% (2024 年 7 月 1 日—2024 年 9 月 16 日品位平均值)。

3.2.6 钢化联产的化工阶段分析

化工产生的脱碳解析气通过气液分离器初步

分水后, 经管道送至 CO₂ 压缩机, 压缩后气体由干燥系统深度脱水后送至气体储罐缓存, 由管道输送经喷吹控制阀组, 供各用气点使用。这对原本被直接排出的 CO₂ 进行了资源化利用, 并通过转炉将 CO₂ 循环成可被化工使用的 CO, 与钢铁厂协同实现 CO₂-CO 循环利用。

利用转炉煤气提纯后的 CO 和焦炉煤气提纯后的 H₂ 生成乙二醇和 LNG, 其中乙二醇质量满足《工业用乙二醇》(GB/T 4649—2018) 中聚酯级指标要求, LNG 质量满足《液化天然气的一般特性》(GB/T 19204—2020) 指标要求, 氢能质量满足《质子交换膜燃料电池汽车用燃料 氢气》(GB/T 37244—2018) 的技术指标要求^[22-24]。

CO₂-CO 循环利用的钢化联产模式在满足化工产品质量要求的同时大幅降低了生产的成本, 还减少了大量的 CO₂ 排放。

3.3 钢化联产碳排分析

钢化联产模式的核心优势在于有效整合钢铁和化工行业的废气资源, 实现碳排放的显著减少, 并提升能源利用效率。图 4 和图 5 展示了钢化联产前后碳排放的变化, 转炉工序和化工工序在未

联产时是各自独立的,转炉过程不仅排放大量 CO₂,还未能有效利用转炉煤气中的 CO;化工工序则既需要高价购买 CO 原料,还会排放大量 CO₂。钢化联产模式使钢铁厂实现 CO₂ 资源化,不仅减少了碳排放,还提高了产品质量;化工厂则通过回收钢铁行业的废气,降低了生产成本,同时避免了大量 CO₂ 的排放。

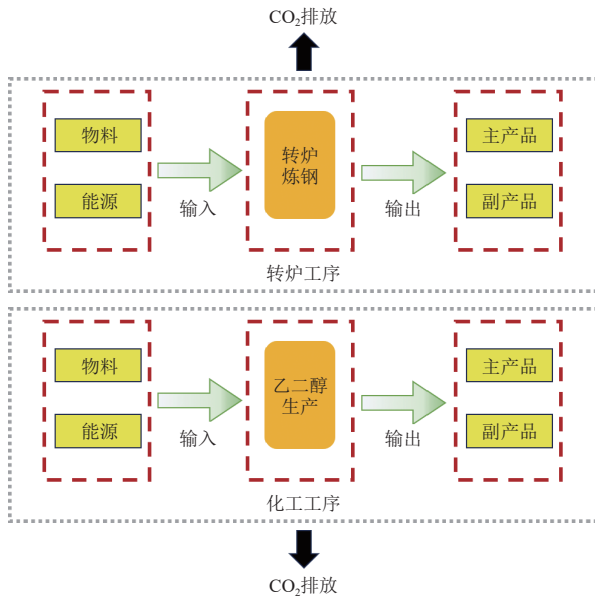


图4 钢化联产前碳排放分析

Fig. 4 Analysis of carbon emissions before steel chemical co-production

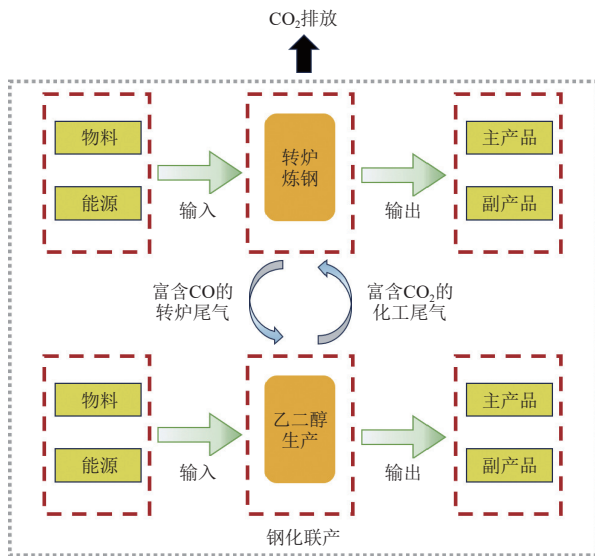


图5 钢化联产后碳排放分析

Fig. 5 Analysis of carbon emissions after steel chemical co-production

3.3.1 钢铁厂循环利用化工解析气碳排分析

转炉生产钢水时, CO₂ 的排放量主要取决于

原料成分、生产工艺和能源使用等因素。一般来说,转炉炼钢工序的 CO₂ 排放量为 0.14~0.18 t/t-钢。具体的排放量根据不同厂区的技术水平、使用的能源类型(如煤、天然气、电力等)以及废气治理设施等因素有所变化。冯超^[25] 基于碳排放模型和工业实验数据得出, CO₂ 参与转炉冶炼后可减少排放 27.30 kg/t-钢。

3.3.2 钢化联产中 CO₂ 捕集碳排分析

钢铁生产过程中使用的 CO₂ 捕集方法主要有化学吸附法和变压吸附法 2 种,其碳排分别为 1 600 kg/t CO₂ 和 1 200 kg/t CO₂^[25],而在 CO₂-CO 循环利用的钢化联产模式中捕集 CO₂ 的碳排仅为 50 kg/t CO₂,这相当于最高可减少碳排 10.85 kg/t-钢。结合转炉工序喷吹 CO₂ 可减少排放 38.15 kg/t-钢,碳排减少 27.3%。

3.3.3 钢铁企业钢化联产后碳排分析

在化工生产中,当利用转炉煤气中的 CO 生产化工产品后,在钢化联产的情况下,转炉煤气中的 CO 可以算作碳抵扣项,从而减少碳排。在高炉-转炉长流程生产过程中, CO₂ 排放量平均为 2 t/t-钢。将转炉煤气和焦炉煤气用于化工生产后,其长流程炼钢碳排可减少 20%~30%。

在钢化联产的边界条件中,将化工脱碳的 CO₂ 吹入转炉中相当于转炉煤气中的 CO₂ 固定于钢化联产的流程中,未向外界排放,进一步减少碳排。某钢厂转炉煤气回收量为 110 Nm³/t-钢,其 CO₂ 含量为 18%,基于前述数据耦合得出, CO₂-CO 循环利用可减少炼钢过程碳排 73.4 kg/t-钢,占高炉-转炉炼钢长流程总碳排的 5.2%。

综上所述, CO₂-CO 循环利用技术在钢铁行业的钢化联产中展现了广阔的前景,未来有望成为钢铁行业降碳减排、实现绿色可持续发展的重要技术之一。

4 结论与展望

(1) 基于钢化联产的 CO₂-CO 循环利用模式,实现了钢铁流程的 CO₂ 大规模消纳,并提高了钢材质量,降低了生产成本,同时增产的 CO 可为化工行业提供廉价高质原料气,提升钢铁-化工跨领域协同降碳和增值能力。

(2) 钢化联产的 CO₂-CO 循环利用提高了焦炉煤气及转炉煤气的利用价值,可大幅降低化工行业的生产成本,具有显著的经济效益优势,提升产业竞争力。

(3) 钢化联产的 CO₂ 资源化循环应用于高炉-转炉全流程, 实现 CO₂ 减排总量超 30%, 其中转炉工序 CO₂ 排放降低 27.25%。

(4) 钢铁-化工跨领域联产协同降碳符合国家“十四五”相关绿色发展规划及产业政策, 可以减少钢铁与化工行业 CO₂ 气体排放量, 既有减污降碳的社会效益, 又有经济效益, 可助力我国早日达成“双碳”目标。

参考文献 (References):

- [1] 张琦, 向婷, 田硕硕. 钢铁-化工联产系统构建及未来发展趋势 [J]. 钢铁研究学报, 2023, 35(4): 375-384.
ZHANG Qi, XIANG Ting, TIAN Shuoshuo. Construction and development trend of steel-chemical co-generation system in future[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2023, 35(4): 375-384.
- [2] 佟帅, 艾立群, 洪陆阔, 等. 30-60 目标下中国氢冶金发展现状及应用前景 [J]. 材料导报, 2023, 37(23): 117-124.
TONG Shuai, AI Liqun, HONG Lukuo, et al. Development status and application prospects of China's hydrogen metallurgy under the 30-60 target[J]. Materials Reports, 2023, 37(23): 117-124.
- [3] 李京社, 郭皓. 钢厂煤气资源化利用技术进展 [J]. 冶金经济与管理, 2020(1): 32-34.
LI Jingshe, GUO Hao. Technological advances in resource utilization of blast furnace gas in steel plants[J]. Metallurgical Economics and Management, 2020(1): 32-34.
- [4] RECHBERGER K, SPANLANG A, SASIAIN CONDE A, et al. Green hydrogen-based direct reduction for low-carbon steelmaking[J]. Steel Research International, 2020, 91(11): 2000110.
- [5] 谷鹏飞, 孙宏斌, 薛屹洵, 等. 考虑煤气调度的钢铁园区能量流-物质流协同优化方法 [J]. 电力自动化设备, 2024, 44(9): 32-40.
GU Pengfei, SUN Hongbin, XUE Yixun, et al. Collaborative optimization method of energy and material flows in iron and steel park considering gas scheduling[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(9): 32-40.
- [6] MANINDER K, SHAMSUZZAMAN F. Simulation and optimization of a 6-step dual-reflux VSA cycle for post-combustion CO₂ capture[J]. Chemical Engineering Science, 2016, 152: 507-515.
- [7] YIN, Chunbiao, SUN Weina, YANG Huawei, ZHANG Donghui. Optimization of three-bed VPSA system for biogas upgrading[J]. Chemical Engineering Science, 2015, 135: 100-108.
- [8] 石书军. 浅析钢化联产与钢铁行业降碳减排 [J]. 冶金管理, 2022(2): 48-50.
SHI Shujun. A brief analysis of co-generation and carbon reduction in the steel industry[J]. Metallurgical Management, 2022(2): 48-50.
- [9] WANG R R, ZHAO Y Q, BABICH A, et al. Hydrogen direct reduction (H-DR) in steel industry—An overview of challenges and opportunities[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 329: 129797.
- [10] LYU Ming, ZHU Rong, YANG Lingzhi. High efficiency dephosphorization by mixed injection during steelmaking process[J]. Steel Research International, 2019, 90(3): 1800454.
- [11] 师少杰, 张先茂. 转炉煤气深度净化技术研究与工业化实践 [J]. 化肥设计, 2023, 61(5): 38-40.
SHI Shaojie, ZHANG Xianmao. Research on and industrial practice of deep purification technology of converter gas[J]. Chemical Fertilizer Design, 2023, 61(5): 38-40.
- [12] 师少杰. 钢铁与化工耦合发展技术研究及实践 [J]. 煤化工, 2024, 52(3): 40-42+51.
SHI Shaojie. Research and practice on coupling development technology of steel and chemical industry[J]. Coal Chemical Industry, 2024, 52(3): 40-42+51.
- [13] 王改荣, 赵素兴, 张彩东, 等. 钢铁行业尾气制备乙醇及其工业化应用技术论述 [J]. 山西化工, 2024, 44(12): 30-33.
WANG Gairong, ZHAO Suxing, ZHANG Caidong, et al. Review on ethanol production technology and industrialization application of tail gas in iron and steel industry[J]. Shanxi Chemical Industry, 2024, 44(12): 30-33.
- [14] 马云强. 焦炉煤气与转炉煤气联产乙二醇过程模拟与经济分析 [D]. 太原: 太原理工大学, 2020: 57-66.
MA Yunqiang. Simulation and economic analysis of ethylene glycol production from coke oven gas and converter gas[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2020: 57-66.
- [15] KIM S, JEONG D H. Techno-economic analysis of methanol and ammonia co-producing process using CO₂ from blast furnace gas[J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2022, 39(8): 1999-2009.
- [16] SINGH V, BUELENS L C, POELMAN H, et al. Carbon monoxide production using a steel mill gas in a combined chemical looping process[J]. Journal of Energy Chemistry, 2022, 68: 811-825.
- [17] SOLTANIEH M, AZAR K M, SABER M. Development of a zero emission integrated system for co-production of electricity and methanol through renewable hydrogen and CO₂ capture[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2012, 7: 145-152.
- [18] HAGHPANAH R, NILAM R, RAJENDRAN A, et al. Cycle synthesis and optimization of a VSA process for post-combustion CO₂ capture[J]. AIChE Journal, 2013, 59(12): 4735-4748.
- [19] WANG Haifeng, QIU Jian, PING Xiaodong, et al. Roadmap, current situation, and prospects of low-carbon development technologies in Chinese steel industry[J]. Jour-

- nal of Iron and Steel Research International, 2024, 31(12): 2879–2892.
- [20] ZHANG Fucheng, HONG Lukuo, XU Ying. Prospects for green steelmaking technology with low carbon emissions in China[J]. *Carbon Energy*, 2024, 6(2): e456.
- [21] DONG Kai, WANG Xueliang. CO₂ utilization in the iron-making and steelmaking process[J]. *Metals*, 2019, 9(3): 273.
- [22] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 工业用乙二醇: GB/T 4649—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Ethylene glycol for industrial use: GB/T 4649—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [23] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 液化天然气的一般特性: GB/T 19204—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. General characteristics of liquefied natural gas: GB/T 19204—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [24] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 质子交换膜燃料电池汽车用燃料氢气: GB/T 37244—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Fuel specification for proton exchange membrane fuel cell vehicles—Hydrogen: GB/T 37244—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [25] 冯超. 转炉炼钢 CO-CO₂ 质能转换自循环利用的基础研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2022: 90–126.
FENG Chao. Fundamental research on the CO-CO₂ energy conversion and self-circulating utilization in blast furnace Steelmaking [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2022: 90–126.