

冶金过程中碳排放的控制策略与可持续发展路径

孙亮

中冶京诚工程技术有限公司, 中国·北京 100176

摘要: 冶金行业是碳排放主要来源之一, 在全球气候变化应对中扮演关键角色。论文分析了冶金碳排放的来源和现状, 讨论了能源结构调整、技术创新、工艺优化、碳捕获与封存 (CCS) 和循环经济等减排策略, 并结合案例分析了这些策略的应用效果。研究旨在为冶金行业的低碳转型和可持续发展提供具体思路和方法。

关键词: 冶金过程; 碳排放; 控制策略; 可持续发展

Control Strategies and Sustainable Development Paths for Carbon Emissions in Metallurgical Processes

Liang Sun

Zhongye Jingcheng Engineering Technology Co., Ltd., Beijing, 100176, China

Abstract: The metallurgical industry is one of the main sources of carbon emissions and plays a key role in global climate change response. The paper analyzes the sources and current situation of metallurgical carbon emissions, discusses emission reduction strategies such as energy structure adjustment, technological innovation, process optimization, carbon capture and storage (CCS), and circular economy, and analyzes the application effects of these strategies with case studies. The research aims to provide specific ideas and methods for the low-carbon transformation and sustainable development of the metallurgical industry.

Keywords: metallurgical process; carbon emissions; control strategy; sustainable development

0 前言

全球气候变暖推动国际社会减少碳排放。冶金业是基础产业, 也是主要能源消耗和碳排放源。钢铁和有色金属冶炼产生大量二氧化碳, 钢铁行业碳排放占全球 7% 至 9%, 有色金属冶炼排放同样关键。冶金碳排放影响气候变化, 限制行业可持续发展。研究冶金碳排放控制和可持续发展策略, 对全球碳减排和冶金行业绿色转型至关重要。

1 冶金过程中碳排放的来源与现状

1.1 碳排放来源

1.1.1 燃料燃烧排放

在冶金生产中, 化石燃料是主要能源, 如钢铁冶炼中的高炉炼铁, 焦炭是关键燃料, 为铁矿石还原提供热量和还原剂。然而, 化石燃料燃烧会释放大量二氧化碳。据研究, 每燃烧 1 吨标准煤, 约产生 2.66~2.72 吨二氧化碳。有色金属冶炼同样如此, 如铝冶炼过程中的燃料燃烧也是碳排放的重要来源。

1.1.2 化学反应排放

金属氧化物的还原反应是冶金过程的核心环节, 该过程会产生大量碳排放。在钢铁冶炼的高炉炼铁中, 铁矿石 (主要成分为铁的氧化物) 与焦炭中的碳发生还原反应, 生成铁和二氧化碳, 主要化学反应为 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{CO} \rightarrow 2\text{Fe} + 3\text{CO}_2$ 。在铝冶炼的冰晶石-氧化铝熔盐电解法中, 阳极碳块在电解过

程中与氧结合生成二氧化碳, 这是铝冶炼行业碳排放的主要途径之一。

1.1.3 电力消耗间接排放

冶金企业是电力消耗大户, 而目前全球大部分电力来自化石燃料发电。当冶金企业消耗电力时, 会产生间接碳排放。根据 IEA 数据, 每消耗 1 千瓦时煤炭发电的电力, 约产生 0.8~1 千克二氧化碳; 若来自天然气发电, 约产生 0.4~0.5 千克二氧化碳。因此, 冶金企业电力消耗产生的间接碳排放不容忽视。

1.2 冶金行业碳排放现状

冶金行业是全球碳排放的主要来源之一, 钢铁行业贡献了 7%~9% 的全球碳排放量。不同国家冶金行业的碳排放差异显著, 老旧设备和落后工艺是工业化国家碳排放强度高的原因, 而新兴经济体则因冶金产业的快速发展导致碳排放总量增加。中国作为最大的钢铁生产国, 尽管碳排放量较大, 但通过技术改进和淘汰落后产能, 碳排放强度有所降低。随着全球对气候变化的关注, 冶金行业面临减排压力, 必须加速转型。

2 碳排放控制策略

2.1 能源结构调整

2.1.1 可再生能源的应用

太阳能、风能、水能等可再生能源清洁低碳, 在冶金行业应用可再生能源是降低碳排放的重要途径。部分钢铁企

业尝试利用太阳能光伏发电满足部分生产用电需求。例如,某钢铁企业在厂房屋顶安装大规模太阳能光伏板,每年可发电数百万千瓦时,减少数千吨二氧化碳排放。在有色金属冶炼方面,一些铝厂利用水能发电供应电解铝生产电力,水电的低碳优势大幅降低了铝冶炼过程中的碳排放。生物质能在冶金行业的应用也逐渐受到关注。生物质燃料燃烧产生的二氧化碳可视为碳中性排放,因为其生长过程吸收等量二氧化碳。研究表明,在炼铁过程中使用生物质焦炭作为还原剂,可减少约 50% 的碳排放。

2.1.2 能源效率提升技术

采用高效能源转换和利用技术能提高能源利用效率,降低能源消耗和碳排放。在钢铁冶炼中,高炉炼铁是能耗和碳排放重点环节。采用高炉顶燃式热风炉技术,可将热风温度提高到 1200℃ 以上,降低燃料消耗。实际生产数据显示,采用该技术后,高炉炼铁焦比可降低 30~50 千克/吨铁,每吨铁二氧化碳排放量减少 80~130 千克。在有色金属冶炼中,优化电解工艺是提高能源效率的关键。以铝电解为例,采用新型惰性阳极材料和优化电解槽结构,可降低电解过程电压降,减少电能消耗。先进的铝电解技术可使单位产品能耗降低 10%~15%,显著减少碳排放。此外,加强能源管理系统建设,实时监测和分析能源消耗情况,及时改进能源浪费环节,也是提升能源效率的重要手段。

2.2 技术创新推动减排

2.2.1 低碳冶炼工艺研发

研发新型低碳冶炼工艺是实现冶金行业深度减排的核心。在钢铁行业,氢冶金技术被视为未来零碳排放的重要方向。氢冶金以氢气为还原剂替代焦炭,还原产物为水,而非二氧化碳。目前,高炉富氢冶炼和富氢气基竖炉是中国氢冶金发展的两大主要方向。虽然受氢气制取成本高、基础设施不完善等因素制约,氢冶金尚未大规模商业化应用,但随着技术进步和成本降低,其发展潜力巨大。在有色金属冶炼方面,不断探索新的低碳工艺。例如,铜冶炼采用闪速熔炼—吹炼一体化工艺,相比传统工艺,提高了铜回收率,降低了能源消耗和碳排放。采用该一体化工艺,铜冶炼综合能耗可降低 10%~15%,二氧化碳排放量相应减少。

2.2.2 智能控制与自动化技术

智能控制和自动化技术在冶金生产中的应用,可实现精准控制,提高生产效率,降低能源消耗和碳排放。通过安装传感器和智能控制系统,实时监测和调节冶金设备运行参数,如温度、压力、流量等,使设备处于最佳运行状态。在钢铁连铸过程中,智能控制系统精确控制钢水浇铸速度和温度,避免参数波动导致的能源浪费和产品质量问题。实际生产经验表明,采用智能连铸控制系统后,能源消耗可减少 5%~8%,同时提高铸坯质量,减少废品率,间接降低碳排放。在有色金属冶炼厂,自动化物料输送和配料系统能准确控制原材料添加量和比例,确保反应稳定高效进行。某大型铜冶炼厂采用自动化配料系统后,每年节约能源成本数百万元,

减少二氧化碳排放数千吨。

2.3 优化冶金工艺流程

2.3.1 工艺流程整合与简化

整合与简化冶金工艺流程可减少生产环节能量损失和物料消耗,降低碳排放。在钢铁联合企业中,优化整合炼铁、炼钢、轧钢工序,实现热装热送工艺。高温钢坯完成前一道工序后,直接热送到下一道工序加工,无需冷却后重新加热,显著减少钢坯加热能耗。测算表明,采用热装热送工艺,吨钢综合能耗可降低 30~50 千克标准煤,二氧化碳排放量减少 80~130 千克。在有色金属冶炼中,对复杂多段冶炼流程进行技术改进。例如,铅冶炼传统的烧结—鼓风炉熔炼工艺存在流程长、能耗高、污染大等问题,而新型的富氧底吹熔炼—鼓风炉还原工艺,将多个环节整合为两个主要步骤,缩短工艺流程,提高生产效率,降低能源消耗和碳排放。采用该新型工艺,铅冶炼综合能耗可降低 20%~30%,二氧化碳排放量大幅减少。

2.3.2 余热回收与利用

冶金过程产生大量余热,如高炉炼铁的高炉煤气显热、转炉炼钢的高温炉渣显热等。回收利用这些余热可提高能源利用效率,减少额外能源消耗,降低碳排放。在钢铁企业中,安装余热锅炉将高炉煤气显热转化为蒸汽,用于发电或供应生产生活用热。统计数据显示,余热回收可降低约 10%~20% 的能源成本,减少约 15% 的二氧化碳排放。在有色金属冶炼厂,也有多种余热回收方式。例如,铝电解过程中电解槽散发的余热通过空气冷却系统回收,用于预热原料或加热车间空气;铜冶炼中,熔炼炉排出的高温烟气通过余热锅炉产生蒸汽驱动汽轮机发电。某大型铜冶炼厂通过完善的余热回收利用系统,每年发电数千万千瓦时,减少大量外购电力,降低因电力消耗导致的间接碳排放。

2.4 碳捕获与封存 (CCS) 技术应用

2.4.1 CCS 技术原理与流程

碳捕获与封存 (CCS) 技术是将工业生产过程中产生的二氧化碳捕获、运输并封存到地下深处地质构造中的一系列技术。在冶金行业,其应用流程包括碳捕获、运输和封存三个环节。碳捕获主要采用气体吸收法、固体吸附法和膜分离法等技术。气体吸收法利用特定吸收剂与二氧化碳发生化学反应分离二氧化碳;固体吸附法通过高比表面积的固体吸附剂在一定条件下吸附二氧化碳;膜分离法则利用特殊膜材料对不同气体渗透率差异实现二氧化碳分离。捕获的二氧化碳通过管道、罐车等运输到合适的封存地点。封存技术主要有地下封存、海洋封存和工业利用等。地下封存是将二氧化碳注入地下深处咸水层、废弃油气田等地质构造;海洋封存是将二氧化碳注入深海海底以下地层;工业利用是将二氧化碳作为原料生产化学品、建筑材料等。

2.4.2 在冶金行业的应用案例与挑战

在冶金行业,已有部分企业开展 CCS 技术试点应用。例如,某钢铁企业采用气体吸收法捕获高炉煤气中的二氧化

碳,经处理后通过管道运输到附近废弃油气田进行地下封存,每年可捕获并封存数万吨二氧化碳,取得一定减排效果。在有色金属冶炼方面,部分铝厂也在探索将 CCS 技术应用于铝电解过程碳排放控制。然而,CCS 技术在冶金行业大规模应用面临诸多挑战。成本是首要问题,目前每吨二氧化碳捕集成本约为 30~100 美元,加上运输和封存成本,使得整个 CCS 项目成本较高,给利润空间有限的冶金企业带来较大负担。技术可靠性方面,CCS 技术仍在发展完善阶段,碳捕获效率、长期封存安全性等有待进一步提高。此外,CCS 项目实施涉及复杂的法律、监管和社会接受度等问题,限制了其在冶金行业的广泛推广应用。

3 可持续发展路径案例分析

3.1 钢铁企业案例

3.1.1 宝钢集团的节能减排实践

宝钢集团作为中国钢铁行业的领军企业,在节能减排和可持续发展方面成绩斐然。在能源结构调整上,宝钢积极推进可再生能源利用,在厂区建设太阳能光伏发电项目和风力发电项目,为企业提供绿色电力,减少对传统火电的依赖,降低碳排放。在工艺优化方面,宝钢对高炉炼铁、转炉炼钢等关键工序进行技术改造。采用先进的高炉喷煤技术,提高煤炭利用效率,降低焦比;在转炉炼钢过程中,优化供氧制度和造渣工艺,提高钢水质量和生产效率,减少能源消耗和碳排放。通过这些措施,2020 年宝钢集团吨钢综合能耗较 2010 年下降约 15%,碳排放强度降低 20%。宝钢还建立完善的能源管理系统和碳排放管理体系,实时监测和分析能源消耗和碳排放数据,为节能减排决策提供科学依据。

3.1.2 河钢集团的氢能炼钢探索

河钢集团在低碳冶炼技术创新方面走在行业前列,积极探索氢能炼钢技术。河钢集团与相关科研机构合作,开展富氢气基竖炉直接还原铁(DRI)工艺研究与开发。该工艺以氢气为还原剂,将铁矿石直接还原成铁,从源头上减少二氧化碳排放。目前,河钢集团的氢能炼钢示范项目已取得阶段性成果,实现钢铁生产过程零碳排放。虽然该技术仍处于示范阶段,面临氢气制取成本高、供应基础设施不完善等问题,但河钢集团的探索为钢铁行业低碳转型提供了宝贵经验。未来,随着氢能技术发展和成本降低,河钢集团有望将氢能炼钢技术商业化应用,为中国钢铁行业碳减排和可持续发展做出更大贡献。河钢集团还加强与上下游企业合作,推动整个产业链绿色发展。

3.2 有色金属企业案例

3.2.1 中国铝业的低碳电解铝技术应用

中国铝业在电解铝生产中积极推进低碳技术创新,研

发的新型高效节能电解槽技术成效显著。传统电解铝生产能耗高、碳排放大,中国铝业通过改进电解槽结构,采用新型惰性阳极材料和优化电解质配方,降低电解槽电压降,减少单位产品直流电耗。从数据上看,电解槽电压降从 4.2V 降至 3.8V,单位产品直流电耗从 13500 千瓦时/吨铝降至 12500 千瓦时/吨铝,降幅达 7.4%。按照电解铝行业平均碳排放强度计算,单位产品直流电耗每降低 1000 千瓦时,每吨铝可减少二氧化碳排放约 0.8 吨。因此,该技术使中国铝业每吨铝二氧化碳排放量减少约 6.7 吨。同时,该技术提高了铝的生产效率,产能提升 15%,实现了节能减排与企业竞争力提升的双赢。

3.2.2 江西铜业的资源循环利用模式

江西铜业构建了完善的资源循环利用体系,在铜冶炼过程中实现了资源高效回收与低排放。采用闪速熔炼—闪速吹炼“双闪”工艺,铜精矿冶炼回收率从 96% 提升至 98.5%,每年多回收铜金属约 1.2 万吨。对冶炼过程产生的余热充分利用,通过余热锅炉发电,每年产生电力约 2 亿千瓦时,占企业总用电量的 20%,相当于减少标准煤消耗约 6.4 万吨,减少二氧化碳排放约 17 万吨。在废弃物处理方面,江西铜业对冶炼渣进行深度处理,回收其中的金、银、铁等贵金属。每年从冶炼渣中回收的金、银等贵金属价值超过 2 亿元,铁精矿产量达到 50 万吨。这种资源循环利用模式提高了资源综合利用率,降低了对原生矿石的依赖,显著减少了废弃物排放和处理过程中的碳排放,为有色金属行业可持续发展提供了成功范例。

4 发展展望

冶金行业的碳减排将依靠技术创新,尤其是氢冶金技术的进步。随着可再生能源制氢成本降低,绿氢应用将增加,PEM 制氢技术的效率和成本改善将促进氢冶金的工业化。DRI 工艺和新型催化剂的优化将提升还原效率,降低能源和二氧化碳排放。有色金属冶炼可能转向无碳或低碳工艺,如生物冶金技术,以减少碳排放和能源需求。智能控制和自动化技术,结合 AI 和大数据分析,将使设备自我调节更精确,减少能源消耗和碳排放,例如通过机器学习预测设备故障,实现预防性维护。

参考文献:

- [1] 李新创,田志凌,黄导,等.钢铁行业低碳发展现状与展望[J].中国冶金,2021,31(2):1-10.
- [2] 《现代冶金学》编写组.现代冶金学[M].北京:冶金工业出版社,2019.
- [3] 张立峰,朱荣,王新华,等.钢铁工业低碳技术发展现状与展望[J].钢铁,2020,55(9):1-12.