



直接还原铁生产中的富氢冶金技术探讨

刘何美, 谢朝明

(中冶长天国际工程有限责任公司, 湖南 长沙 410012)

摘要: 直接还原铁生产作为钢铁冶炼的一个重要环节, 需要探索和应用低碳、环保的冶炼技术。富氢冶金技术作为一种新兴的炼铁技术, 具有资源利用率高、环境污染小等优点, 近年来得到了广泛关注。本文通过介绍富氢冶金技术原理, 系统分析国内外富氢冶金技术及研究进展, 总结富氢冶金技术发展趋势, 针对富氢冶金技术目前在工业化应用中存在的问题从高品位铁矿资源匮乏、还原剂的选择难、技术研发难点多、可再生能源制绿氢与冶金流程耦合难度大等4个方面进行分析, 提出优化富氢制备工艺、优化还原工艺参数、深化技术创新、过程控制与优化等4个优化策略, 以为富氢冶金技术的发展和工业化推广提供参考。

关键词: 富氢冶金; 直接还原铁; 低碳; 减排; 竖炉; 氢气

中图分类号: TF55

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)12-0001-07

doi: 10.13402/j.gcjs.2024.12.153

Discussion on hydrogen-rich metallurgical technology in direct reduced iron production

LIU Hemei, XIE Chaoming

(Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410012, Hunan, China)

Abstract: As an important part of steel smelting, direct reduced iron production requires the exploration and application of low-carbon and environmentally friendly smelting technologies. As an emerging ironmaking technology, hydrogen-rich metallurgy technology has the advantages of high resource utilization rate and low environmental pollution, and has received extensive attention in recent years. In this paper, the principle of hydrogen-rich metallurgy technology is introduced, the hydrogen-rich metallurgical technology and research progress at home and abroad are systematically analyzed, the development trend of hydrogen-rich metallurgy technology is summarized, and the problems existing in the industrial application of hydrogen-rich metallurgy technology are analyzed from such 4 aspects as lack of high-grade iron ore resources, selection of reducing agent, many difficulties in technology research and development, and difficulty in coupling green hydrogen production from renewable energy with metallurgical process. In order to provide reference for the development and industrialization of hydrogen-rich metallurgical technology, the 4 optimization strategies are proposed, including optimizing the hydrogen-rich preparation process, optimizing the reduction process parameters, deepening technological innovation, and controlling and optimizing process.

Key words: hydrogen-rich metallurgy; direct reduced iron; low carbon; emission reduction; vertical furnace; hydrogen

收稿日期: 2024-06-13

基金项目: 湖南省科技创新计划资助项目(2024ZL6020)

作者简介: 刘何美(1983—), 女, 工程师, 从事烧结球团相关技术研究及论文编审工作。

通信作者: 谢朝明(1985—), 男, 高级工程师, 从事钢铁冶金、直接还原方面的研究及工程设计工作。

2024 年 2 月 7 日,工业和信息化部、国家发展改革委、生态环境部联合发布《关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见》(以下简称《意见》)^[1],《意见》将进一步加快推动国内钢铁行业实现绿色低碳高质量发展,同时通过绿色低碳智能制造、提升资源保障能力和有效供给水平等有效手段,加快推进国内钢铁行业向产业链和价值链中高端迈进。目前,中国钢铁工业 CO₂ 排放量约占全国 CO₂ 排放量的 15%, 占全球钢铁行业碳排放量的 60% 以上,而推动国内钢铁行业在 2030 年实现“碳达峰”的目标,已经是“箭在弦上”。在“双碳”目标下,低碳冶金的优势将促使国内各大钢铁生产企业加大低碳冶金研发和投资力度,2023 年底开始,国内部分钢铁生产企业在现有钢铁产能置换中就存在明显的长流程向短流程转向的趋势,为了在未来钢铁行业的转型和竞争中取得先机。

我国是全球最大钢铁生产国,低碳发展任务紧迫而艰巨。2020 年,我国粗钢产量 10.53 亿吨占全球产量的 50% 以上。传统的炼铁工艺存在资源浪费、环境污染等问题,因此,开发高效、环保的钢铁冶金技术成为当务之急。直接还原铁(DRI)是一种以铁矿石、焦炭和还原剂为原料,通过高温反应直接还原得到的铁合金。与传统的的高炉炼铁相比,直接还原铁生产具有工艺流程简单、能耗低、环境污染小等优点。富氢冶金技术是直接还原铁生产中的关键技术手段,其核心在于利用高温富氢气体对铁矿石进行还原,从而实现高效、低成本的直接还原铁生产。

本文通过介绍富氢冶金技术原理,系统分析国内外富氢冶金技术及研究进展,总结富氢冶金技术发展趋势,针对富氢冶金技术目前在工业化应用中存在的问题进行分析,以期富氢冶金技术的发展提供参考。

1 富氢冶金的基本原理

富氢冶金是一种新兴的冶金技术,它利用氢气作为还原剂来替代传统的碳(如焦炭)进行金属冶炼。这种技术的主要优势在于其环保特性,因其产生的副产品是水蒸气,而不是二氧化碳,从

而实现了零碳排放。

在氢冶金过程中,氢气与矿石中的金属氧化物发生还原反应,将金属从其氧化物中提取出来,基本的化学反应方程式如下。



在这个反应中,氢气(H₂)作为还原剂,与铁氧化物(Fe₂O₃)反应生成铁(Fe)和水(H₂O)。这一过程不仅避免了二氧化碳的排放,而且由于反应条件较为温和,工艺流程也相对较短。

从热力学角度来看,氢还原铁氧化物的过程分为低温还原和高温熔态还原两种工艺路线。在临界温度(大约 570 ℃)以下,氢气还原铁氧化物的顺序: Fe₂O₃—Fe₃O₄—Fe;而在临界温度以上,还原顺序则变: Fe₂O₃—Fe₃O₄—FeO—Fe。

2 富氢冶金的主要技术路线

钢铁行业针对富氢冶金研究初步形成了多种技术路线,其中与直接还原铁生产相关的富氢冶金技术主要包括氢基竖炉直接还原炼铁技术和氢基流化床直接还原炼铁技术。

2.1 氢基竖炉直接还原炼铁技术

氢基竖炉直接还原炼铁技术的基本原理是利用氢气与铁矿石中的铁氧化物在竖炉中发生还原反应,生成金属铁和水蒸气。这一过程中, H₂ 作为还原剂,替代了传统的焦炭或煤等化石燃料,从而实现了低碳、环保的炼铁过程。该技术具有反应速度快、能耗低、碳排放少等优点,是富氢冶金技术的重要方向之一。

氢基竖炉直接还原炼铁技术通常与电炉炼钢相结合,形成短流程炼钢工艺,进一步提高了生产效率和产品质量。宝钢湛江钢铁百万吨级氢基竖炉项目采用了中国宝武全球首创的“多气源直接加氢零重整直接还原竖炉” Hyresp-100 工艺技术,实现了国内百万吨级氢基直接还原炼铁技术零的突破。据测算,项目投产后每年可减少二氧化碳排放 50 万吨以上,当使用氢气比例提升至 90% 时,比高炉长流程碳减排 90% 以上。北京氢冶科技有限公司的氢冶金成套装备已成功应用于阿尔及利亚高磷铁矿中试,并获得了低碳直接还原铁。后续将在此基础上对工艺及氢冶金设备进

行进一步优化, 为工业化应用奠定坚实基础。

技术优势: 1) 节能环保: 氢气燃烧后只产生水, 无温室气体排放, 符合现代环保要求; 2) 经济效益: 长远看, 操作成本会降低, 尤其是随着氢气生产技术的不断进步, 氢气的价格有望大幅下降; 3) 推动钢铁行业绿色发展: 氢冶金已成为钢铁行业绿色发展必由之路, 有助于实现钢铁行业的低碳转型。

2.2 氢基流化床直接还原炼铁技术

氢基流化床直接还原炼铁技术的基本原理是在高温条件下, H_2 与铁矿石中的 Fe_2O_3 在流化床上发生还原反应, 生成金属铁和水蒸气。这一过程中, 氢气起到了还原剂的作用, 将氧化铁中的氧夺取, 使其还原成金属铁。该技术具有传热效率高、反应均匀等优点, 适用于处理细粒铁矿石。

氢基流化床直接还原炼铁工艺主要步骤: 1) 铁矿粉与还原气体的混合: 将铁矿粉和氢气混合, 形成还原混合物; 2) 入口悬浮层: 将还原混合物送入流化床炉, 使其在炉体内形成入口悬浮层; 3) 还原层: 还原混合物在入口悬浮层的作用下, 逐渐深入到流化床炉中, 在还原层中发生还原反应, 并逐步将铁矿石还原为精铁; 4) 出口悬浮层: 还原反应结束后, 将精铁从流化床炉中取出, 形成出口悬浮层; 5) 分离和冷却: 通过物理分离和水冷却等方式, 将取出的精铁与废气、灰渣等物质进行分离和冷却。

技术特点: 1) 高效: 氢基流化床技术能够高效地还原铁矿粉, 实现低成本、高效率的生产模式; 2) 低能耗: 该工艺省去了传统还原工艺中高炉和焦炉等设备, 因此能够有效降低能源消耗; 3) 环保: 该工艺没有烟尘、氧化物、硫化物等污

染物排放, 符合现代环保要求; 4) 适用范围广: 该工艺适用于各种铁矿石及含铁固体废弃物, 生产成本低、适用范围广, 具有广阔的应用前景。

3 国内外富氢冶金发展

3.1 国外富氢冶金工艺发展进展

近年来, 全球各大钢铁生产国均致力于低碳富氢冶金技术的研发, 持续投入并不断努力, 以期在碳减排领域取得突破性进展。韩国的 COOLSTAR 项目、日本铁钢联盟的 COURSE50 低碳炼钢项目, 以及欧盟钢铁技术委员会的 ULCOS 计划, 均聚焦于碳减排这一核心目标, 各自展现出了独特的创新能力与技术实力。表 1 为部分国外富氢冶金研究及相关进展。

钢铁行业作为推动产业转型的关键领域, 其转型之路备受瞩目。在这一进程中, 富氢气体凭借其独特优势, 展现出了助力钢铁企业节能减排、加速转型的巨大潜力。众多国外研究学者已经深入探索了富氢气体在多个领域的应用, 并取得了丰硕的研究成果, 如: SPREITZER 等^[2]综述了以氢为还原剂还原氧化铁的研究进展, 说明氢气通过可再生能源生产, 可以实现无碳减排, 避免在减排过程中形成有害的温室气体, 并与一氧化碳还原剂进行对比, 给出了描述还原过程动力学的不同方法以及表观活化能的作用; WANG 等^[3]通过理论分析和计算的方法, 探讨了纯氢还原工艺的工业应用前景和基础理论和应用中的关键问题, 对目前各种制氢方法的工艺参数、成本、优缺点进行了比较, 结果表明天然气重整制氢具有良好的发展前景; PATISSON 等^[4]提出了一种利用氢还原氧化铁的铁矿石炼钢新路线, 并对其进行了详

表 1 国外富氢冶金研究及相关进展

国家	典型技术项目	进展	目标
韩国	COOLSTAR 技术项目	2017 年 12 月 ~ 2024 年 11 月	减少钢铁工业的二氧化碳排放
日本	COURSE50 项目	2008 年 7 月份启动, 2030 年实现 1 号机组工业生产, 2050 年普及应用	2030 年将二氧化碳排放量降低 30%
瑞典	HYBRIT 项目	2021 年中试成功, 在 2035 年之前形成无碳解决方案	减少 10% 的二氧化碳排放量
奥地利	H2FUTURE 项目	2017 年 ~ 2021 年	2050 年减少 80% 的二氧化碳排放量
德国	Carbon2Chem 项目	成功完成第一阶段测试	将废气转化为化工产品原材料, 二氧化碳将不再排放到空气中

细分析; TANG等^[5]探讨国内外氢冶金方法, 认为应利用国内的原料和燃料开发富氢竖炉; REN等^[6]探讨了中国钢铁工业到 2050 年实现碳中和可能的低碳转型途径, 开发了一种综合方法, 将可计算的一般均衡模型与自下而上的技术选择模块相结合, 结果表明, 虽然节能技术可以在短期内减少二氧化碳排放, 但从长远来看, 采用突破性技术(如碳捕集与封存和氢基直接还原), 增加废钢电弧炉生产的份额, 以及上游能源供应部门的脱碳将是减缓气候变化的关键。

为了实现 2050 年零碳排放的宏伟目标, 欧盟及其成员国正加大在各个领域的减排力度。鉴于钢铁行业等传统工业过程在现有技术路线下的减排潜力已趋饱和, 采用高纯氢能炼钢成为实现大幅度减排的新途径。众多国外钢铁企业正积极投资开发氢能炼钢技术, 并已有多个氢冶金项目进入了研发与试验阶段。与此同时, 国外学者对氢冶金工艺与传统工艺进行了对比分析, 结果显示, 氢冶金不仅能显著提高反应速率, 还能大幅度减少碳排放量, 这与全球绿色可持续发展的趋势高度契合。

3.2 我国富氢冶金工艺发展进展

相较于国际同行, 我国在富氢冶金工艺领域的探索起步较晚, 但近年来, 国内钢铁企业积极响应国家绿色发展的号召, 纷纷投身富氢冶金技术的研发与应用, 展现出强劲的发展势头。表 2 为我国几个具有代表性的项目进展情况。

当前, 为紧密跟随国家“碳中和”战略的步伐, 气基直接还原竖炉工艺中采用富氢气体作为能源成了焦点。这一工艺在源头上有效控制了含碳原料的使用, 并显著减少了尾气中二氧化碳的

排放。相较于传统的长流程工艺, 该工艺能显著降低二氧化碳排放量, 降幅高达 98%, 从而为钢铁行业的绿色生产开辟了新途径。

国内学者十分关注富氢冶金, 如: 詹楚卉等^[7]以化学试剂为原料, 通过高温焙烧合成不同的铁酸钙, 并对铁精矿粉进行改性处理, 考察了合成铁酸钙的氢气还原特性和改性铁精矿的流态化还原性能, 揭示了铁酸钙改性铁精矿抑制黏结的机理; 王莹等^[8]介绍了竖炉直接还原工艺 Midrex 和 HYL/Energiron 的基本流程及近年来各工艺的直接还原铁产量, 并对比分析了两种工艺的装置、原料和工艺特性, 阐述了目前全球钢铁企业在该领域的技术研发和项目投资情况, 同时指出氢基竖炉直接还原技术的发展与球团矿品位、氢还原反应过程吸热、大规模绿氢制备技术以及绿氢制备成本等问题息息相关; 员晓等^[9]主要综述了氢基直接还原技术应用现状, 并着重分析了氢基竖炉直接还原技术的能源消耗、碳排放和典型污染物排放, 研究表明, 基于绿氢竖炉直接还原技术在减污降碳效应上优于天然气/焦炉煤气竖炉直接还原工艺, 建议行业加大氢冶金及上下游相关技术装备研发攻关, 提升能源资源保障能力和核心技术供应能力; 韩星等^[10]概述了国内外氢基竖炉直接还原工艺的发展现状, 总结分析了在我国资源及能源条件下气基竖炉直接还原技术发展需要解决的关键问题, 得到基于钢铁生产全流程考虑矿粉磨选工艺的投入, 生产全铁品位高于 65%, S、P 质量分数低的纯铁精粉球团, 可解决我国直接还原铁优质原料缺少的技术难题; 在氢基竖炉炉料中加入块矿、高炉用球团矿, 是直接

表 2 国内富氢能冶金研究及相关进展

单位名称	主要技术方向	相关示范工程
中国宝武	以氢还原代替碳还原的氢冶金工艺(氢基竖炉直接还原)	100 万吨/年氢基竖炉直接还原示范工程
河钢集团	Energiron-ZR(零重整)技术	120 万吨氢冶金示范工程
鞍钢集团	风电+光伏(绿电)-电解水制氢(绿氢)-氢冶金工艺	—
酒钢集团	“煤基氢冶金理论”“浅度氢冶金磁化焙烧理论”“磁性物料风磁同步联选理论”	煤基氢冶金中试装置及配套的干磨干选中试装置热试车
建龙集团	富氢熔融还原赛思普(CISP)新工艺	氢基熔融还原法冶炼高纯铸造生铁项目
中晋太行	CSDRI 气基竖炉还原铁技术	气基竖炉直接还原铁工业化试验

还原技术发展的方向;绿色高效制氢技术中,风电制氢技术 PEM 成本将会大幅下降,具有明显市场竞争优势等结论;赵紫薇等^[11]对国内外钢铁行业现状、减碳路径与潜力进行了分析,探讨了短流程、能源结构调整和余能利用对碳减排的贡献度及碳税对减碳的影响,发现中国钢铁行业短期内可提高短流程覆盖率,同时加速研发氧气高炉、氢能冶炼、储能、余能梯级利用等减碳新技术;沈峰满等^[12]针对富氢还原对烧结矿还原性及还原粉化的影响进行了实验研究和理论分析,研究结果表明, H_2 等量域代替 CO 时, H_2 体积分数由 0% 增加到 12%, 烧结矿的 RDI(-3.15)降低约 1%~2%; H_2 等量增加, CO, CO_2 , N_2 质量分数等比例降低时, H_2 体积分数由 0% 增加到 12%, 烧结矿的 RDI(-3.15)升高约 1.5%~2.5%; H_2 体积分数从 0% 增加到 12%, 烧结矿还原度由 72.56% 增加到 94.97%; 白明华等^[13]通过计算流体力学软件模拟氢气竖炉和吹氧竖炉还原段的温度场、气体分布,计算出炉内能量的消耗,结果表明,在还原段上部 7 m 处吹氧,每还原出 1 t 铁的吹氧量为 26.78 Nm³,吹氧竖炉与氢气竖炉相比,氢气利用率提高 33.43%,氢气用量减少 22.08%,炉顶气还原势降低 61.84%,能耗减少 14.72%,吹氧周围及上部炉料温度有所升高。

针对我国的资源和能源条件,钢铁企业与高校科研单位一方面联合开展富氢冶金项目,另一方面关注世界不同地区富氢冶金项目的研究进展、方法、试验过程中出现的问题,为助力我国富氢冶金项目的发展提供理论支持。

4 富氢冶金发展面临的挑战

(1) 高品位铁矿资源匮乏。富氢直接还原要求铁精粉品位达到 68% 以上,脉石质量分数低于 4%,而我国铁矿石是以低品位磁铁矿为主,高品位铁矿资源匮乏,难以支撑我国大规模开展直接还原铁生产。

(2) 还原剂的选择对直接还原铁的生产质量具有重要影响。不同的还原剂在反应活性、成本效益以及环境影响等方面各有特点,因此,合理选择还原剂是提高直接还原铁生产效率和产品质量

量的关键。

焦炉煤气作为一种优质的还原剂,其热值高、反应活性好,能够有效提高直接还原铁的生产效率。但焦炉煤气的来源单一,仅能通过煤生产焦炭产生的副产物获取,随着煤炭产能被政策性压缩,焦炉煤气的产能也会同步缩减;且其生产过程中会产生大量的 CO_2 ,对环境造成一定影响。因此,在选择焦炉煤气作为还原剂时,需要综合考虑其需求供给关系和环保性。

天然气作为一种清洁能源,具有燃烧值高、污染小等优点,是近年来备受关注的还原剂。然而,天然气的成本较高,且资源有限,随着国际局势的转变,稳定天然气供给成为我国国际重要需求,在稳定了天然气进口管道及远洋运输后,天然气成本将得到进一步优化,不失为一种优良的富氢冶金还原剂。另外,天然气在运输和储存过程中存在一定的安全风险,需要谨慎对待。

氢气具有极高的反应活性,能够有效提高直接还原铁的生产效率,且燃烧产物仅为水,对环境友好。我国制氢规模虽然较大,但大部分均采用化石能源制氢,用于生产合成氨、甲醇等产品,可用于氢冶金的氢能资源较少。钢铁企业只有配套建设焦化项目或周边地区有焦化企业,才具有发展氢冶金的基础。而利用绿电-电解水制氢工艺,氢气成本是焦炉煤气制氢和天然气制氢的 2~3 倍,用氢成本较高,目前还难以和高炉-转炉长流程在成本上进行竞争。但随着国家大力发展风光发电产业,根据《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》中提出的主要目标,2030 年风电、太阳能发电总装机容量达到 12 亿千瓦以上。截至 2024 年 6 月底,风电光伏发电合计装机(11.8 亿千瓦)已超过煤电装机(11.7 亿千瓦)。风电光电的大规模建设势必会大幅降低电力成本,当电力成本降低到一定程度后,使用绿电来制取绿氢,氢气将会成为未来的主流还原剂。

(3) 技术研发难点多。富氢直接还原炼铁技术,作为对现有高炉-转炉工艺的突破性革新,其在技术研发领域面临着一系列亟待解决的关键挑战。首先,氢还原反应是一个强烈的吸热过程,

这一特性会显著影响反应器内部的温度分布。随着反应温度的变化,富氢气体的利用效率也将受到影响,这是技术推进中必须克服的一大难题。其次,就现有的气基竖炉工艺或流化床工艺而言,氢还原反应器内的热量主要依赖于高温还原气的物理热进行传递。然而,如何有效解决热量不足的问题,将是未来研发工作的重中之重。再者,为了补充热量,提高还原气温度和增加还原气流量成为一种可能的方法。但这一举措会改变富氢气体在竖炉中的流速,进而对氢气的还原率及利用效率产生深远影响。同时,这也对气体加热炉装备以及反应器的耐高温、耐高压、防泄漏、耐氢蚀性等性能提出了更为严苛的要求。最后,值得注意的是,氢还原过程在无渗碳条件下进行,这导致所得的直接还原铁不含碳,熔点较高,且容易再氧化。

(4) 可再生能源制绿氢与冶金流程耦合难度大。冶金工业是一种流程制造系统,生产基地由多个不可拆分的化工、冶金反应器组成,反应器内部高温、高压,伴有连续进行的多相物质相互转化的化学反应,对系统的可靠性要求很高,必须长期连续稳定运行。而可再生能源受制于风或光等外部自然条件变化,波动性较大,如何利用电网、储能、储氢等多种方式实现绿氢的稳定供应,是氢能与钢铁产业间相互耦合要解决的难题。

5 直接还原铁生产中的富氢冶金技术优化策略

(1) 优化富氢制备工艺。针对不同富氢气体来源,设计合理的富氢气体收集系统,确保富氢气体收集的稳定性和高效性。针对富氢气体中的杂质和有害成分,采用先进的净化技术,如:吸附、膜分离、催化等,提高富氢气体的纯度和热值。合理设计富氢气体储存设施,如:富氢气体储罐、富氢气体输送管道等,确保富氢气体储存和输送过程中的安全性和稳定性。根据直接还原铁生产过程中的实际需求,合理配置富氢气体终端设备,如:富氢气体燃烧器、富氢气体加热器等,提高富氢气体的利用效率。

(2) 优化还原工艺参数。根据不同铁矿石的还原特性,选择合适的还原温度。过高或过低的温度都会影响还原效率。通过实验和数据分析,找出最佳还原温度,提高还原效率;还原时间对还原效果有重要影响,根据铁矿石的还原特性,合理控制还原时间,确保还原充分,提高还原效率;还原剂用量对还原效果有直接影响,通过实验和数据分析,确定最佳还原剂用量,降低生产成本;还原气氛对还原效果有重要影响,根据铁矿石和富氢气体的特性,调整还原气氛,提高还原效率。

(3) 深化技术创新。在深化技术创新的道路上,富氢冶金技术的研发显得尤为重要。首先,加强基础研究,夯实技术根基。富氢冶金技术涉及多个学科领域,包括材料科学、化学工程、热力学等。因此,需要组织跨学科的研究团队,深入探讨富氢冶金的基本原理,揭示其内在规律,为技术创新提供坚实的理论基础。其次,优化工艺流程,提升生产效率。通过对现有富氢冶金工艺流程的优化,可以降低能耗、减少污染,提高金属回收率。这需要结合实际生产情况,对工艺参数进行精确控制,实现生产过程的自动化和智能化。再次,开发新型富氢资源,拓宽原料来源。富氢作为一种重要的冶金原料,其来源的多样性和稳定性对富氢冶金技术的发展至关重要。因此,要积极开发新的富氢资源,如绿氢、天然气、煤层气、煤制气、生物质气等,确保富氢供应的可持续性。此外,加强国际合作,引进先进技术。富氢冶金技术在全球范围内都有广泛的研究和应用,可以通过与国际先进企业的合作,引进其先进的技术和管理经验,加速我国富氢冶金技术的发展。最后,建立健全政策体系,推动富氢冶金技术产业化。政府应出台一系列扶持政策,鼓励企业加大研发投入,推动富氢冶金技术的产业化进程。

(4) 过程控制与优化。在富氢冶金过程中,精确控制温度、压力、气体流量等参数是实现高效、稳定生产的关键。随着科技的不断进步,现代富氢冶金技术已经从传统的手动操作向自动化、智能化方向发展。首先,温度控制是富氢冶金过

程中的核心环节。通过安装高精度的温度传感器,实时监测反应炉内的温度变化,并结合先进的控制算法,可以实现对温度的精确调节。例如,采用PID(比例-积分-微分)控制策略,能够有效抑制温度波动,确保冶金反应在最佳温度范围内进行,从而提高产品的质量和产量。其次,压力控制同样重要。在富氢冶金过程中,压力的波动会影响反应速率和产品质量。通过安装压力传感器和压力调节阀,可以实时监测和调整系统压力,确保压力稳定在设定范围内。此外,采用自适应控制算法,可以根据实际生产情况动态调整压力控制策略,进一步提高系统的适应性和稳定性。

6 结 语

富氢冶金技术在直接还原铁生产中具有重要作用。通过对富氢冶金技术原理、工艺流程及影响因素的分析,有助于提高直接还原铁生产效率、降低能耗和减少环境污染。然而,由于富氢气体的生产成本高昂以及当前设备技术的局限性,富氢冶金技术在国内市场的广泛推广仍面临一定挑战。展望未来,随着技术的持续进步与创新,富氢冶金技术有望在钢铁行业中扮演更加关键的角色,发挥更为重要的作用。

参考文献:

- [1] 工业和信息化部,发展改革委,生态环境部. 关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见[EB/OL]. [2022-01-20]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztl/cjgyjjpwzz/bmgzqk/202205/t20220520_1324965.html.
- [2] SPREITZER D, SCHENK J. Reduction of iron oxides with hydrogen: a review[J]. Steel research international, 2019, 90(10): 1900108.
- [3] WANG L, GUO P M, KONG L B, et al. Industrial application prospects and key issues of the pure-hydrogen reduction process[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2022, 29(10): 1922-1931.
- [4] PATISSON F, MIRGAUX O. Hydrogen ironmaking: How it works[J]. Metals, 2020, 10(7): 922.
- [5] TANG J, CHU M S, LI F, et al. Development and progress on hydrogen metallurgy[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2020, 27(6): 713-723.
- [6] REN M, LU P T, LIU X R, et al. Decarbonizing China's iron and steel industry from the supply and demand sides for carbon neutrality[J]. Applied Energy, 2021, 298: 117209.
- [7] 詹楚卉, 潘锋, 马素刚, 等. 铁酸钙改性抑制流化床氢气直接还原黏结机理[J]. 钢铁, 2024, 59(9): 114-121.
- [8] 王莹, 何志军, 陈妍, 等. 氢基竖炉直接还原工艺发展现状及思考[J]. 矿冶工程, 2024, 44(4): 212-216.
- [9] 员晓, 彭锋, 孙泽辉. 氢基竖炉直接还原技术减污降碳分析[J]. 冶金能源, 2024, 43(3): 3-7.
- [10] 韩星, 张彩东, 李兰杰, 等. 氢基竖炉直接还原技术研究现状及展望[J]. 河北冶金, 2024(4): 1-5.
- [11] 赵紫薇, 孔福林, 童莉葛, 等. 基于“3060”目标的中国钢铁行业二氧化碳减排路径与潜力分析[J]. 钢铁, 2022, 57(2): 162-174.
- [12] 沈峰满, 姜鑫, 魏国, 等. 富氢还原对烧结矿还原性及还原粉化的影响[J]. 中国冶金, 2014, 24(1): 2-5.
- [13] 白明华, 李路叶, 徐宽, 等. 直接还原竖炉氢气利用率的数值分析及优化[J]. 燕山大学学报, 2016, 40(6): 481-486.