

绿色低碳氢冶金技术进展及前景展望

赵志龙

(中冶京诚工程技术有限公司, 北京 100176)

[摘要] 钢铁工业一直是碳排放的大户。研究钢铁生产中碳素“零排放”,推动氢冶金技术发展,是全球钢铁工业实现“碳达峰、碳中和”的重要方向。本文分析了钢铁制造流程的碳排放情况,梳理国内外氢冶金技术进展,事实表明“以氢代碳”是钢铁工业大幅降低碳排放的突破口;以国家政策导向为基础,从上下游产业链协同发展角度,对氢冶金发展进行展望,提出“氢冶金+”新发展模式;基于目前钢铁行业处于绿色转型的初级阶段,建议我国发展氢冶金需要注意氢能源供给、铁矿资源品位、技术与标准以及投融资等问题。

[关键词] 钢铁; 氢能源; 氢冶金; 碳达峰; 碳中和; 碳排放

[中图分类号] TF55 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2023)05-0001-08

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2023.05.001

0 前言

工业革命以来,钢铁生产一直以煤炭作为主要能源。进入低碳经济模式,氢能将成为21世纪最具发展力的清洁能源^[1]。构建“以氢代碳”的钢铁用能新体系将成为我国钢铁行业实现“碳达峰、碳中和”目标的重要方向。事实证明,用氢气生产绿色钢铁,可以大幅减少钢铁生产带来的碳排放和环保问题^[2]。因此,研究和推动氢冶金技术发展,实现钢铁生产的碳素“零排放”技术应用,是钢铁行业实现高质量发展的重要方向,也是钢铁工业实现“双碳”目标的唯一炼铁技术选择。

1 钢铁行业碳排放情况及原因分析

1.1 钢铁行业的碳排放情况

钢铁工业是我国实现新型工业化的重要支柱产业,在国民经济发展中占重要地位。传统钢铁生产

的能源以煤/焦炭为主,能量载体主要来源于碳元素,所以气体排放物主要是碳氧化物。从全球范围看,2022年,全球钢铁工业碳排放量约为28亿t,占全球能源系统排放量的8%左右,中国钢铁工业碳排放量贡献了全球钢铁碳排放总量的60%以上,占全国碳排放总量的15%左右,是我国制造业领域中碳排放量最多的行业^[3]。综上可见,钢铁行业碳减排任务已经十分艰巨,是我国确保实现“双碳”目标的重点减排领域。

1.2 钢铁行业碳排放高的主要原因

钢铁生产主要包括炼铁、炼钢、轧钢等重点工序。从钢铁生产各工序来看,目前行业先进指标显示,每生产1t钢需要消耗约546kgce,碳排放为1810kg(表1),而“球团+烧结+焦化+高炉”的铁前系统的能耗占总能耗的85%左右,其碳排放量约占总碳排放的86%。可见,高炉炼铁工艺是实现减排目标的重要突破口。

1.3 降低钢铁碳排放的突破口

氢既是重要的工业原料,也是支撑未来能源系统清洁转型的重要二次能源^[5]。使用氢能替代碳能的新型氢冶金工艺也引起了世界钢铁行业的广泛关注。

由于H₂的黏度低、密度小、导热性好(导热能力比其他气体大7~10倍),可降低还原气体的密度

[收稿日期] 2023-06-07

[基金项目] 中国五矿科技专项计划资助项目(2020ZX A01)

[作者简介] 赵志龙(1984—),男,博士,高级工程师,主要从事钢铁冶金新技术和流程研究等工作。

[引用格式] 赵志龙.绿色低碳氢冶金技术进展及前景展望[J].绿色矿冶,2023,39(5):1-8.

表 1 钢铁生产各工序能耗及碳排放

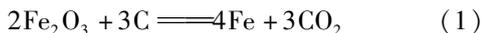
工序	球团	烧结	焦化	高炉	转炉、连铸	轧钢	综合
吨钢能耗/kgce·t ⁻¹	9	63	40	358	-27	44	546
吨钢碳排放/kg·t ⁻¹	20	180	120	1 240	44	6	1 810

注:计算方法取自生态环境部《2020 年度温室气体排放报告补充数据表》^[4],不再考虑二次能源工序碳排放,下表 2 同。

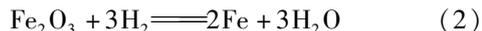
和黏度,加速气体和固体间的热交换,有利于提高铁矿石还原过程中的热能利用率。更重要的是,H₂是一种高效还原剂,其扩散速度为 CO 的 3.74 倍,其还原产物 H₂O 的扩散速度为 CO₂ 的 1.56 倍,所以 H₂能够比 CO 更快地通过矿石细微的孔隙达到反应界面,还原后生成的 H₂O 也比 CO₂ 扩散得更快。H₂不但本身具有还原作用,而且对 CO 还原还具有催化作用。

传统高炉炼铁碳冶金和新型竖炉氢冶金冶炼工艺用还原反应方程式可以分别表达为式(1)~(2)。

高炉碳冶金:



新型氢冶金:



研究表明,依靠传统高炉技术进步,碳排放量已经很难大幅减少,采用高炉风口喷氢协同炉顶煤气循环技术最多可降低 20% 碳排放量。为此,很有必要开发新能源替代传统以碳能源为主的冶金新工艺。由于氢气和铁矿石反应生成水和金属铁,没有温室气体产生,所以用氢气替代传统碳无疑是最佳低碳冶金路线。

根据实践情况,以富氢浓度 60% 的焦炉煤气为还原气体、配加 50% 废钢的“氢冶金+电炉”短流程,各工序吨钢能耗和碳排放情况见表 2。对比表 1 和表 2 可知,如果用“富氢冶金”替代传统“碳冶金”,吨钢能耗可降低约 23%,吨钢碳排放降低约 60% 以上。未来,如果以纯氢气进行冶金,将可以实现钢铁生产的“净零碳排放”。

表 2 氢冶金各工序吨钢能耗和碳排放情况

工序	球团	氢冶金 竖炉	电炉、 连铸	轧钢	综合
吨钢能耗/kgce·t ⁻¹	约 21	约 272	约 63	约 44	约 421
吨钢碳排放/kg·t ⁻¹	约 60	约 215	约 283	约 142	约 700

因此,推动氢能冶金的工艺和工程技术发展,研究炼铁生产碳素“零排放”的核心技术和装备,是新时代下全球钢铁工业实现“碳中和”目标和绿色、高

质量发展的重要方向之一。

2 国内外氢冶金进展

2.1 国外氢冶金

为了大幅减少钢铁生产过程中 CO₂ 的整体排放量,世界各国都争先开展了一些极具发展前景的低碳冶金项目^[6-7]。

欧美国家加快了有关钢铁产业能源、技术、贸易等政策的调整,大力研究低碳冶金技术,抢占低碳市场先机。在欧洲,2004 年由安赛乐米塔尔公司牵头的 ULCOS(超低 CO₂ 冶金)技术在钢铁行业内引起较大反响;2019 年起,瑞典钢铁公司发起 HYBRIT(突破性氢能冶金技术)项目,德国萨尔茨吉特钢铁公司发起 SALCOS(萨尔茨吉特低碳冶金)项目(图 1),奥钢联公司发起 H2FUTURE 项目,这些欧洲氢能利用项目再次引起全球关注。在美国,能源部采取国际合作方式开展减排 CO₂ 研究,如无焦冶金技术;用转底炉生产金属化球团或粒铁作为炼钢的原料;采用氢作为燃料闪速熔炼生产铁水;熔融氧化物电解生产铁水研究,生产完全不含碳的铁;新型悬浮炼铁技术;进行二氧化碳地质埋存研究等。这些项目的共同目标是,通过研发不同于传统碳热冶金工艺的钢铁生产技术,大幅降低钢铁工业 CO₂ 排放。

日本、韩国在钢铁低碳技术开发方面也走在世界前列。日本钢铁协会根据《巴黎协定》确定到 2030 年实现钢铁工业零碳排放的目标,拟通过生态化工艺、生态化产品、生态化解决方案来实现这一目标。目前,日本钢铁协会正在推进 COURSE50(创新炼铁工艺技术)国家项目(图 2),以及铁焦炼铁,氢还原炼铁,碳捕集、存储与利用等技术。2017 年 12 月开始,韩国正式开始氢还原炼铁 COOLSTAR 项目,主要包括“以高炉副生煤气制备氢气实现碳减排技术”和“替代型铁基原料电炉炼钢技术”等^[6]。

总体来看,国际氢冶金项目研究一般分三步走:第一步,2025 年前,建立中试装置,研究规模性工业用氢能冶炼的可行性;第二步,到 2030 年,实现以焦

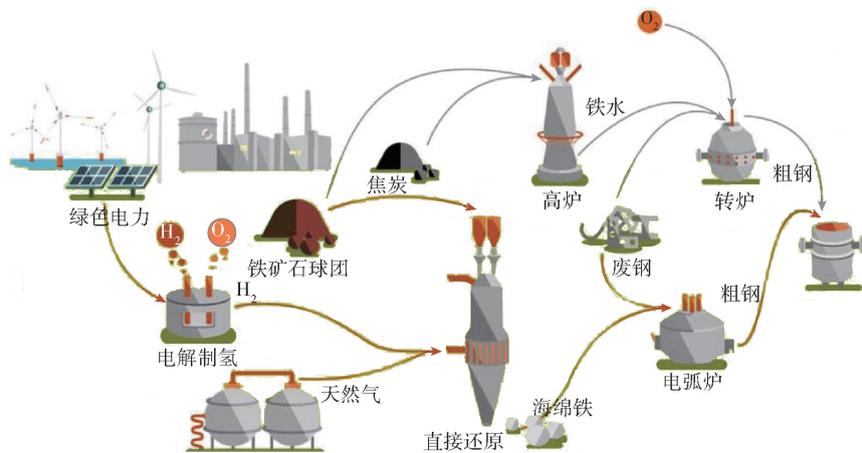


图1 SALCOS项目工艺路线图

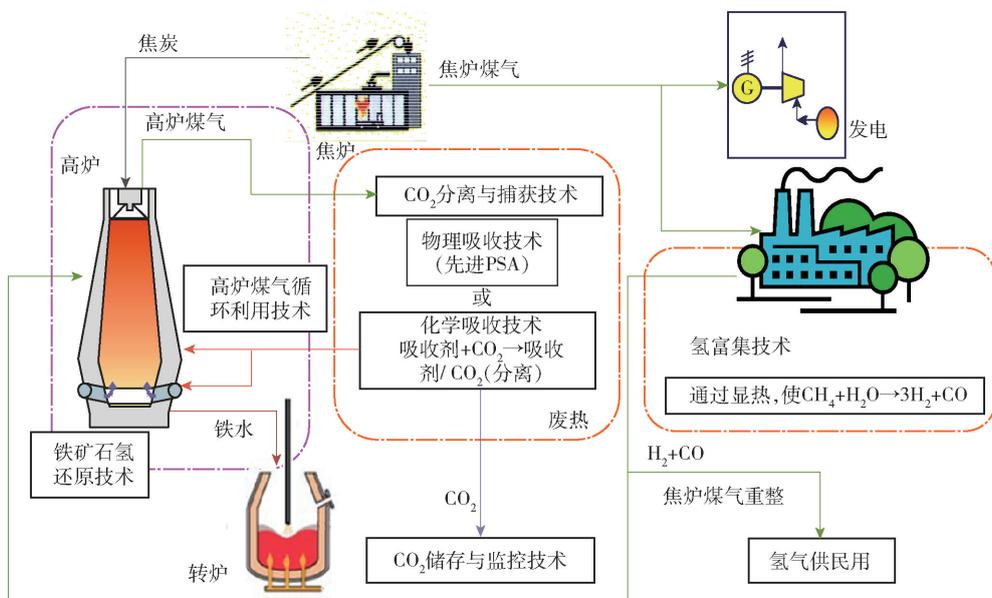


图2 日本 COURSE50 技术路线图

炉煤气、化工等副产品中产生的氢气进行工业化生产；第三步，到2050年，实现“绿氢”的工业化生产，并使用高纯氢进行钢铁冶炼，其中氢能主要来自水电、风电及核电电解水。

2.2 国内氢冶金

我国氢冶金工艺起步较晚，但发展非常迅速，尤其是特大型钢铁企业为了快速响应国家“双碳”战略部署，正在积极开展一系列极具竞争力的氢能冶金项目^[6-7]。

河钢集团是全球首个尝试竖炉氢冶金工程实践的公司，2019年11月与中冶京诚等优势单位联合研发全球首套氢冶金工艺，采用零重整技术可实现氢碳比达8:1以上，项目于2022年底全产线正式贯通，2023年5月实现连续生产，产品达到国际领先水平。宝武钢铁集团积极投入氢冶金实践（图

3)^[8]，于2022年2月开始建设湛江百万吨级直接还原氢冶金，预计2024年上半年投产。鞍钢集团联合国内研究团队，开发万吨级流化床氢气炼铁技术示范，项目于2022年9月开工建设，预计2024年投运。中晋太行氢冶金项目采用焦炉煤气重整技术，自2017年开建，2022年底进行了试生产。建龙集团的富氢熔融还原项目于2020年9月底实现试生产，目前处于工艺完善和设备检修中。钢铁研究总院2021年完成了晋南钢铁2座1860 m³高炉风口喷吹副产焦炉煤气的研究、设计和工业化试验，于2023年3月进行两座高炉喷氢试验，吨铁最高喷氢量60 m³；2022年11月，中国钢研氢冶金中心自主开发设计的世界首条纯氢竖炉示范生产线核心设备——纯氢竖炉进行吊装。上海大学牵头的高炉富氢冶金项目于2021年12月进行喷氢试验。此外，

首钢集团、山钢集团等诸多企业也在积极进行氢冶金方案论证,预计很快将进入实施阶段。

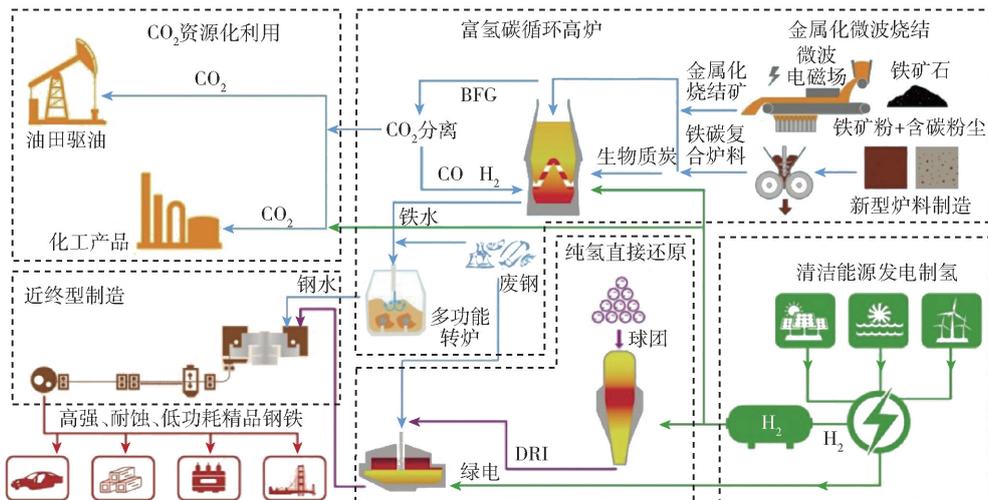
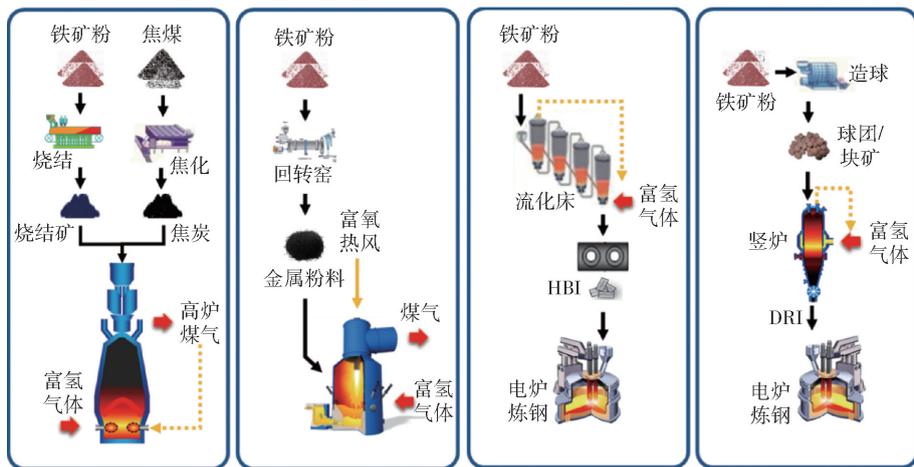


图3 中国宝武钢铁集团碳中和冶金技术路线图

2.3 氢冶金分类

根据国内外氢冶金研究和实践情况,目前氢冶金工艺主要包括高炉富氢喷吹工艺、富氢熔融还原工艺、氢基流化床还原工艺、氢基竖炉还原工艺(图4)。其中,高炉富氢喷吹和熔融还原富氢工艺是将富氢气体喷吹至炉内对铁矿石进行还原,尽可能多替代焦炭/煤,进而减少炼铁过程中

CO₂的产生,达到减排目的。氢基竖炉直接还原工艺采用高温的富氢气体在竖炉反应器中对铁矿石球团进行还原,不使用焦炭和煤,从源头上大幅减少CO₂的产生。氢基流化床还原使用高温的富氢气体在气体流化床反应器中直接对粉铁矿进行还原,不经过造球工序,从源头和工序过程进一步减少了CO₂的产生和排放。



(a)高炉富氢喷吹工艺 (b)富氢熔融还原工艺 (c)氢基流化床还原工艺 (d)氢基竖炉还原工艺

图4 国内外主流的氢冶金工艺流程简图

事实上,高炉富氢喷吹工艺、富氢熔融还原工艺仍然是以焦炭和煤炭为主的“碳冶金”工艺,依靠局部富氢很难实现大幅度减排;氢基流化床还原由于采用流态化还原工艺,铁矿粉的高温粘结失流产生和大型流化床的高温气流分布控制技术尚未突破,目前世界上仍未有规模化工艺实践;而使用天然气为气源的竖炉直接还原工艺已经非常成熟,但不能

直接使用氢气,需要对整体工艺进行再突破。总体看来,以氢基竖炉还原的氢冶金工艺将是钢铁行业实现规模化、绿色低碳发展的主要方向。

3 我国氢冶金发展政策导向

3.1 氢能相关政策

近年来,我国对发展氢能产业高度重视,出台了

一系列鼓励氢能发展的政策措施。《能源技术创新行动计划(2016—2030年)》将“氢能与燃料电池技术创新”纳入国家能源战略;2019年,政府工作报告提出“推动加氢等设施建设”,国家发展改革委《产业结构调整目录(2019年)》和《绿色产业指导目录(2019年)》也明确将氢能产业中部分内容列入国家鼓励发展方向,氢能和燃料电池领域的5项条款均属其中,覆盖新能源、有色金属、汽车、船舶、轻工五大行业,内容包括氢燃料制取、储运,燃料电池关键零部件,燃料电池车核心部件等相关设备,氢能基础设施等全产业链类目^[9];2022年3月,国家发展改革委、国家能源局联合印发《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》,部署了推动氢能产业高质量发展的重要举措以及产业发展的各阶段目标,提出我国氢能产业呈现积极发展态势,已初步掌握氢能制备、储运、加氢、燃料电池和系统集成等主要技术和生产工艺,在部分区域实现燃料电池汽车小规模示范应用^[10]。全产业链规模以上工业企业超过300家,集中分布在长三角、粤港澳大湾区、京津冀等区域^[11]。

随着国家战略实施加速,政策、资本赋能各地氢能产业。在“双碳”战略的持续推动下,政策多点开花,企业加大投入,2023年我国氢能产业发展进入新的历史时期。2023年1月30日,江西省发布的《江西省氢能产业发展中长期规划(2023—2035年)》,提出到2025年全省氢能产业总产值规模突破300亿元。此前,北京、上海、广州、河北、内蒙古、山东、河南、陕西、福建、甘肃等多地已发布氢能相关产业发展规划,大力推进氢能建设。可见,当前氢能发展成为各地方能源发展规划中重要组成部分。

3.2 氢冶金相关政策

“十四五”刚开局,国家就先后发布了《关于印发“十四五”节能减排综合工作方案的通知》《关于严格能效约束推动重点领域节能降碳的若干意见》和《高耗能行业重点领域能效标杆水平和基准水平(2021年版)》的通知,均对钢铁工业节能降碳提出新要求和新目标。

2019年以来,国务院、国家发改委、工信部、科技部、生态部、能源局、资源部、财政部等国家机构印发一系列针对发展氢冶金的政策,如《2030年前碳达峰行动方案》《十四五原材料工业发展规划》《关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见》《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》《高耗能行业

重点领域节能降碳改造升级实施指南(2022年版)》《财政支持做好碳达峰碳中和工作的意见》等,一致指出将对低碳零碳负碳、节能环保等绿色技术研发和推广应用给予大力支持,鼓励氢冶金等前沿技术探索,开展产业化试点示范。2021年以来,河北、山东、江苏、山西、广东、内蒙古等地方政府在“十四五”开局时期相继对发展氢冶金出台一系列政策鼓励支持,且不断地增加资金投入。可见,国家和地方政府正在积极稳妥推进“双碳”战略,构建完成“碳达峰、碳中和”的“1+N”政策,国家顶层设计为氢冶金发展指明方向。随着“十四五”低碳工业发展,国家还将加大力度支持和推进一大批氢冶金示范工程的实施。

4 氢冶金的市场展望

4.1 国家“双碳”战略实施要求氢冶金代替碳冶金

随着“碳达峰、碳中和”承诺期限越来越近,低碳路线已经成为世界钢铁行业的主要方向。欧盟率先确定将从2026年正式起征“碳关税”,我国碳税政策也正在筹划中。从技术角度来看,传统高炉炼铁流程也无有效的降碳措施,而我国废钢资源远远不能满足社会需求,氢冶金将是实现钢铁“碳中和”的唯一技术选择。因此,从国家“双碳”战略实施来看,我国钢铁发展的重要方向一是减量,二是发展氢冶金。

按照殷瑞钰院士团队模型^[12]推算,钢铁产量达峰后将减量发展,假设产量呈等差级数下降,到2030年为8亿t,到2060年为6亿t。若设定在2060年实现钢铁碳中和,则各种减碳措施和比例如图5所示。如果这些措施全部采纳,则还将有1亿t CO₂需要通过碳汇或碳交易等措施才能接近碳中和。由此可见,2060年氢冶金规模达到1.5亿t,这相当于250个河钢宣钢氢冶金项目(年产60万t)。也就是说,从2023年开始,平均每年建成投产6~7个氢冶金工厂才能达到此目标。尽管此模型对氢冶金发展规模化进行了保守预测,但可以看出我国钢铁行业碳中和目标对氢冶金发展非常急切。

4.2 大规模、廉价的氢能源促进氢冶金发展

发展氢冶金最重要的前提是,要有丰富、廉价的氢气资源。我国资源和能源禀赋,我国现有焦炭规模约4亿t,每年产生的焦炉煤气近2000亿m³(H₂含量约60%),除去自用等用途外,大约有1000亿m³焦炉煤气可以进行商业化利用,大约可实现200

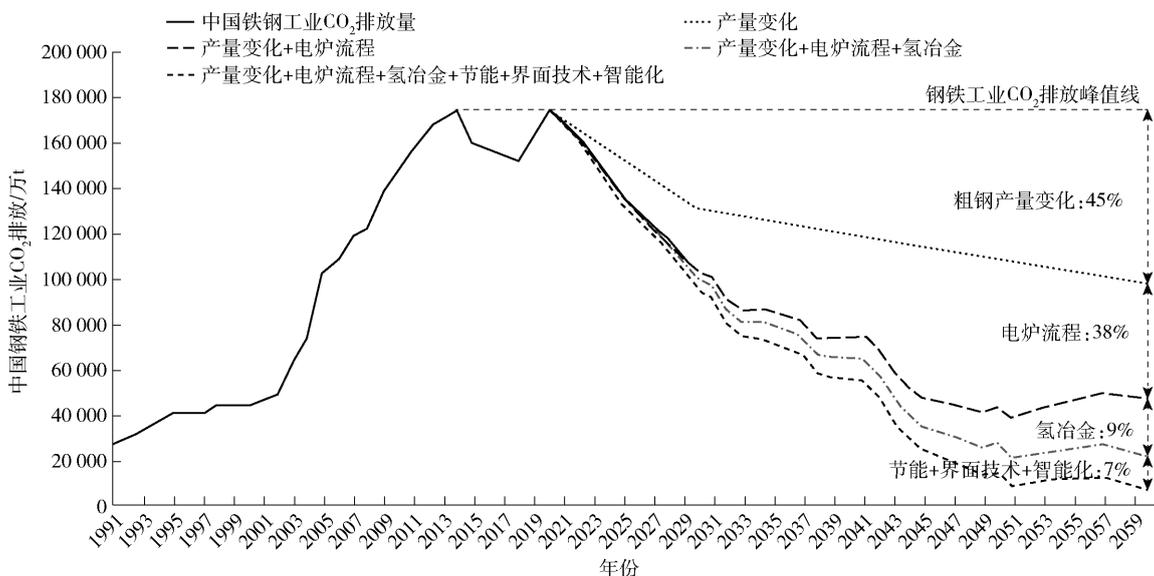


图5 中国钢铁工业实现碳中和的技术路线图

座年产 60 万 t 规模的氢冶金生产。这也是目前我国氢冶金的主流实施方向。

另外,我国还有大量的石化企业产生大量的富氢废气,其含氢量为 60% ~ 80%,石化企业一般都进行放散燃烧处理,但对于氢冶金来说这是非常好的气源。

随着我国天然气大力开发以及从国外管道运输建成引入,天然气价格呈总体下降趋势。随着分布式能源发电及核电行业的发展、制氢技术的快速进步,相关机构预计在 2025—2030 年,大规模、廉价的氢气将广泛应用于全社会。再加上,降碳补贴和碳税政策的实施,届时氢冶金市场可能将比预测的还要广阔,且纯氢冶金也将具有更好的经济性。

4.3 下游产业对绿色钢材的需求增加

在全世界面临节能减排的巨大压力下,下游产业对钢铁产品的碳排放也要有愈来愈严格的要求。以汽车行业为例,生产 1 辆汽车,钢材在所有原材料中占比为 72% ~ 88%。欧盟已要求区域内汽车生产商及其供应链在 2050 年实现碳中和。也就是说,制造绿色汽车必须使用绿色钢铁材料。2022 年,宝马公司与河钢集团签署合作备忘录,约定从 2023 年中期开始,宝马沈阳生产基地量产车型将逐步使用河钢生产的低碳汽车用钢;从 2026 年开始,在整车量产过程中使用河钢生产的绿色汽车用钢。同年,宝钢股份也与北京奔驰签署了《打造绿色钢铁供应链合作备忘录》,致力于在整车制造过程中使用更加绿色的原材料,共同打造绿色汽车钢铁供应链。

在构建新发展格局的背景下,制造业改变传统生产方式,形成以绿色发展为导向的新路径,实现可持续高质量发展,是我国融入全球产业链供应链、参与国际大循环的必要条件。因此,大力发展绿色钢铁工业,制造“绿钢”满足下游产业链日益增长需求,是新时代下钢铁绿色化、低碳化、高质量发展的必然要求。

4.4 构建氢冶金短流程的合理模式

根据国家部委和各省市的“双碳”“双控”“氢能”“智能制造”等战略部署,未来我国钢铁制造流程将主要形成“高炉 + 转炉”长流程大型综合钢铁厂和“氢冶金 + 电炉”短流程小型钢铁厂。目前,我国以长流程为基础的大型钢铁厂已经在沿海布局完成,而以新能源为基础的短流程小型钢铁厂尚在规划布局中。

根据我国资源禀赋情况及相关行业发展趋势,未来构建围绕产业链上下游,建设如钢铁与化工、电力、能源、食品、农业、汽车等多产业联合联产的“氢冶金 + ”新模式。这种新模式充分结合各行各业的需求和特点,形成区域化的产业共融,实现碳的优化分配和利用,不仅全面提高了能源利用效率,还可以实现碳捕集和优化利用的多重优势。

5 我国发展氢冶金需要注意的问题

从长远角度来看,随着绿氢生产技术的成熟,“氢冶金生产直接还原铁 + 电炉炼钢”短流程是钢铁绿色低碳的可持续发展工艺路线。但基于目前行

业处于绿色升级的初步阶段,不同钢铁企业可能会面临一些问题和困难,需要总体考虑和部署。

5.1 大规模和廉价氢能资源的供给

氢冶金不需要煤、焦炭等能源,但需要大量的富氢气体作为还原剂。按照每吨直接还原铁消耗 300 m^3 天然气来测算,年产100万t直接还原铁需要补充的天然气体量为 $37\,500\text{ m}^3/\text{h}$ 。若还原气体使用富氢气体,以焦炉煤气为例,则年产100万t绿色高纯铁需要补充约 $10\text{万 m}^3/\text{h}$ 气源。气体成本占据直接还原铁成本的20%左右。因此,保证大规模、廉价、连续稳定的氢能资源供给,是企业发展氢冶金的基础。

5.2 高品位铁矿资源供给

氢冶金与传统高炉长流程、熔融还原工艺的不同在于,使用的原料仅为铁矿石球团,无烧结、无焦化、无煤,也不用进行预还原等。就氢冶金本质来讲,对于球团矿的品位并没有严格要求,仅对冷热强度、还原性有要求,但考虑到后续电炉冶炼效率、钢水质量、炼钢效益等指标,直接还原铁品位越高,对氢冶金越有利。国外直接还原厂普遍使用品位68%左右的球团,价格较高,而国内一般使用品位62.5%左右供给高炉的普通球团,高品位铁矿资源选矿技术和球团制备技术还需要开发。因此,发展氢冶金,不能过度依赖于高品质外矿,必须开发立足于国产铁矿石的氢冶金新工艺。

5.3 使用大规模直接还原铁的电炉装备和工艺需要突破

我国目前电炉原料一般为大量铁水+废钢,而使用大规模直接还原铁的电炉还在研究中。对于电炉冶炼直接还原铁来说,存在渣量大、冶炼效率低、能耗高等问题,对上下游工序的衔接产生一定影响。另外,目前全直接还原铁的电炉技术被国外掌控,国产电炉技术有待进一步突破。因此,使用大规模直接还原铁的电炉装备国产化和优化冶炼工艺也是未来攻关方向和突破点。

5.4 氢冶金引发的新标准问题

我国钢铁行业在加速开展氢能冶金工艺技术实践,开发核心技术和关键装备,但目前我国尚未有此类技术、装备、生产和安全环保、产品质量等方面的执行标准。随着工程和生产的推进,制定行业氢能冶金技术标准已经非常急迫。目前,国家相关机构也正在积极落实储氢、输氢、用氢等相关标准,为未来安全用氢提供保障支持。

5.5 氢冶金投资融资问题

氢冶金工程是冶金工程和化学工程的结合体,经测算,约20%为冶金工程,80%为化工工程。整体氢冶金工程吨铁投资强度近2000元,而一般长流程“高炉+烧结+焦化”的吨铁投资强度仅为1000元。可见,氢冶金工程的投资非常大,未来通过提高国产化比例降低投资的幅度也有限。因此,如果将氢冶金工程和金融市场互相结合起来,解决氢冶金投资大的问题,其发展步伐将会加快。

6 结束语

在全球“双碳”背景下,氢冶金将是钢铁行业实现“碳中和”的唯一炼铁技术选择,将推动世界钢铁工业转型,引领行业绿色、低碳、智能发展。目前阶段下,以廉价富氢焦炉煤气为气源的氢冶金具有很好的发展前景。随着我国制氢技术的快速发展,大规模、廉价的绿氢资源很快将实现稳定供给,且伴随着降碳补贴和碳税政策的实施,氢冶金将具有更好的经济性和竞争力。届时,使用“绿电”、“绿氢”生产“绿钢”将彻底实现钢铁制造全流程的“净零碳排放”,推动全球钢铁行业向更低碳、更绿色、更智能、更高效、更具竞争力、更高质量发展。

[参考文献]

- [1] 车彦民,曹莉霞,刘金哲. 氢的大规模制备及在钢铁行业的应用和展望[J]. 中国冶金,2022,32(9):1-7.
- [2] 王新东,赵志龙,李传民,等. 基于富氢焦炉煤气零重整的氢冶金工程技术[J]. 钢铁,2023,58(5):11-19.
- [3] 赵志龙,杨永强,王东,等. 一场由“碳冶金”迈向“氢冶金”的颠覆性变革[N]. 中国冶金报,北京:2023-7-4(01版01条).
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 温室气体排放核算与报告要求-第5部分:钢铁生产企业:GB/T 32151.5-2015[S]. 北京:中国标准出版社,2015.
- [5] 刘坚,钟财富. 我国氢能发展现状与前景展望[J]. 中国能源,2019,41(2):32-36.
- [6] 杨天钧,张建良,刘征建,等. 低碳炼铁,势在必行[J]. 炼铁,2021,40(4):1-11.
- [7] 张福明,程相锋,银光宇,等. 国内外低碳绿色炼铁技术的发展[J]. 炼铁,2021,40(5):1-8.
- [8] 毛晓明. 宝钢低碳冶炼技术路线[C]//中国金属学会. 第十二届中国钢铁年会炼铁与原料分会场报告. 北京:中国金属学会,2019.
- [9] 祁婧,黄占兵. 推动内蒙古氢能产业健康可持续发展

的思考[J]. 北方经济, 2022(5): 45 - 48.

[10] 韩雪, 贺泓, 岳国君, 等. 生物乙醇重整制氢技术挑战与产业化发展机遇[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 134 - 144.

[11] 张建红. 助力“双碳”, 氢能产业还需加把劲[J]. 中华

环境, 2022(6): 48 - 49.

[12] 上官方钦, 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.

Progress and Prospect of Green Low Hydrocarbon Metallurgy Technology

ZHAO Zhilong

Abstract: The iron and steel industry has always been a major carbon emitter. Studying the “zero emission” of carbon in iron and steel production and promoting the development of hydrogen metallurgy technology is an important direction for the global iron and steel industry to achieve “carbon peak and carbon neutralization”. In this paper, the carbon emission of steel manufacturing process was analyzed, and the progress of hydrogen metallurgy technology at home and abroad was sorted out. The facts show that ‘replacing carbon with hydrogen’ is a breakthrough for the steel industry to greatly reduce carbon emissions. Based on the national policy orientation, the development of hydrogen metallurgy was prospected from the perspective of coordinated development of upstream and downstream industrial chains, and new development models of “hydrogen metallurgy +” were proposed. Based on the fact that the iron and steel industry was in the primary stage of green transformation, it was suggested that the development of hydrogen metallurgy in China should pay attention to the problems of hydrogen energy supply, iron ore resource grade, technology and standard, investment and financing.

Key words: steel; hydrogen energy; hydrogen metallurgy; carbon peak; carbon neutralization; carbon emissions