

低碳减排的绿色钢铁冶金技术

王国栋, 储满生

东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 沈阳 110819

摘要 低碳减排是钢铁行业面临的最紧迫问题。回顾了国际钢铁工业环境治理、低碳减排技术研发现状, 分析了低碳减排的重要发展趋势。高炉-转炉流程应重点发展以氢代焦为代表的低碳高炉炼铁技术, 而特钢系统则应以发展富氢气基竖炉直接还原技术为主。特别指出, 基于碳捕集和利用(CCU)思想, 利用冶金废气制造化工产品是高炉-转炉流程最彻底、最合理、最可持续的减排方式, 应当汇聚冶金、化工、能源、信息等行业的技术力量, 实施碳排放趋零的钢铁-化工-能源一体化网络集成项目, 即神威CCU项目(SCENWI CCU), 加紧冶金废气的捕集、输送、处理和化工工艺与产品开发。同时, 发挥中国优势, 基于工业互联网平台, 建设冶金-化工-能源三大系统密切结合、协同管控、稳定运行的智能制造网络系统, 解决系统的复杂性、动态性、波动性等关键瓶颈问题, 支持钢铁行业碳排放问题的彻底解决, 促进钢铁行业可持续、高质量发展。

关键词 钢铁行业; 低碳减排; 低碳高炉炼铁技术; 氢气基竖炉直接还原技术; 碳捕集和利用(CCU); 钢铁-化工-能源一体化网络集成(SCENWI)

钢铁行业作为高能耗、高污染的行业。传统高炉流程占据炼铁主导地位, 所用原料为烧结矿(+球团)、焦炭、喷吹煤(+氧气), 其中烧结矿和焦炭为主原料, 但烧结和炼焦工序环境负荷高, 而且炼焦需要优质焦煤, 面临资源日趋匮乏问题。一般而言, 传统高炉工艺生产1 t生铁需要消耗350 kg焦炭和150 kg煤粉^[1-3]。由于化石能源的使用, 造成炼铁、炼钢过程中CO₂和CO大量排放。中国钢铁行业碳排放占全国碳排放总量的16%^[4-8], 是碳排放量最多的行业之一。如何在中国以高炉流程占绝对主力的情况下, 实现高炉流程节能减排、健康发

展的目标, 是面临的重要任务。

1 早期的非高炉炼铁技术

早期开发的各种非高炉炼铁技术, 其主要针对点是减少SO_x、NO_x排放和应对优质焦煤资源短缺。

20世纪50—60年代, 欧美开始了气基直接还原炼铁技术的探索, 开发了HYL、Midrex等气基竖炉直接还原方法, 确立了工业规模发展直接还原铁的道路。20世纪80年代, “薄板坯连铸连轧”的成功有力地推动了“气基竖炉直接还原+电炉”短流

收稿日期: 2020-05-29; 修回日期: 2020-06-25

作者简介: 王国栋, 中国工程院院士, 教授, 研究方向为钢铁材料轧制的理论、工艺、自动化, 电子信箱: wanggd@mail.neu.edu.cn

引用格式: 王国栋, 储满生. 低碳减排的绿色钢铁冶金技术[J]. 科技导报, 2020, 38(14): 68-76; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.14.007

程的发展。

同时,以取消烧结和炼焦工序、大幅减少硫化物和氮化物排放为目标,发展了 COREX、FINEX、HIs melt 等熔融还原炼铁技术。这些技术直接使用天然块矿或粉矿,以及非焦块煤和粉煤,不使用或少量使用焦炭,具有流程短,工序少,SO_x、NO_x 和 二噁英排放低等技术优势。

2 低碳炼铁、减排 CO₂ 技术

CO₂ 气体排放造成温室效应和全球变暖,危害自然生态系统的平衡,威胁人类的生存。上一节提到的几种非高炉炼铁工艺解决了硫氮气体污染排放和焦煤短缺的问题,但均是以碳还原为主的生产过程,实际工业应用时总能耗未呈现显著的降低,CO₂ 减排问题也未得到彻底解决。面对《巴黎协定》到 2030 年和 2040 年 CO₂ 排放量相对 1990 年分别减排 40% 和 60% 的目标^[9-11],钢企、尤其是长流程钢企如何有效降低 CO₂ 排放强度成为亟待解决的问题。

因此,欧洲超低 CO₂ 排放炼钢工艺 ULCOS 项目 (ultra-low CO₂ steelmaking) 项目、日本 COURSE50 计划 (CO₂ ultimate reduction in steelmaking process by innovative technology for cool earth 50)、德国 Carbon2Chem 项目等以低碳炼铁为核心展开,探索低碳炼铁工业化的路径,以期实现节能减排、高效绿色发展。从这些项目的研发结果,可以整理出下述重要发展方向。

2.1 以氢代焦等为代表的低碳高炉炼铁技术

日本 COURSE50 项目围绕高炉碳减排,开发了部分使用氢代替焦炭作为还原剂的氢还原炼铁法,并预期通过该支柱技术研发应用而实现的碳减排目标为 10%。利用 2015 年在新日铁住金君津厂建成的小型试验高炉 (容积 10 m³) 进行炉煤气改质富氢焦和高炉风口喷吹试验^[12],随后进行了炉体拆解研究,确认部分使用氢作为还原剂的氢还原炼铁法可使 CO₂ 排放量低值接近期望的减排目标。

另外,日本 JFE 钢铁公司在 2006—2012 年开展了竖炉法铁焦项目^[13],将低黏结性煤和铁矿石粉

碎到一定粒度,加入黏结剂按一定比例混合后压块,再经竖炉炭化生产高反应性的铁焦新型炉料。使用铁焦新型炉料将改变炉内的还原机制,降低高炉热空区温度,加快铁氧化物还原,降低能量消耗和 CO₂ 排放。JFE 公司于 2011 年成功开发铁焦技术,在京滨厂中型高炉,代替 10% 焦炭 (中试规模,铁焦日产 30 t),经过多次连续使用后,取得炉况正常、焦比下降的显著效果。2013 年,在千叶厂 5153 m³ 的高炉上进行了试验,铁焦使用量 43 kg/t 铁,高炉操作稳定,燃料比降低 13~15 kg/t 铁。2016 年开始正式进入实证研究阶段,在 JFE 西日本制铁所福山地区建设一座日产能为 300 t 的实证设备,目的是扩大生产规模、确立可长期应用的操作技术等。计划到 2030 年左右以 1500 t/d 的产能规模投入实际应用。届时,铁焦将成为日本钢铁业的主要减排技术之一。

欧洲 ULCOS 项目在低碳高炉炼铁新技术方面,研究了炉顶煤气循环工艺 (TGR-BF)^[14]。该工艺有 3 个主要特点:一是使用纯氧代替传统的预热空气 (即全氧喷吹);二是 CO₂ 分离、捕集和储存;三是使用回收的 CO 循环作为还原剂,减少焦炭用量。试验结果表明,TGR-BF 技术在试验高炉上易于操作,安全性好,效率高,稳定性强。其中,将脱 CO₂ 后的部分炉顶煤气加热到 1200℃ 后与氧气和煤粉混合通过炉缸风口喷吹入炉内,同时将脱 CO₂ 后的炉顶煤气加热到 900℃ 后从炉身适当位置喷吹的方案减排效果最佳,可降低 26% 的 CO₂ 排放,被选为下一步工业规模高炉试验的首选方案。

另外,蒂森克虏伯集团与液化空气公司合作,计划到 2050 年投资 100 亿欧元,开展“以氢代煤”高炉冶炼项目^[15]。2018 年 11 月 11 日,蒂森克虏伯正式将氢气通过一个风口注入杜伊斯堡 9 号高炉,进行氢炼铁试验,标志着该项目一系列测试的开端。若进展顺利,蒂森克虏伯计划逐步将氢气使用范围扩展到该高炉全部 28 个风口。此外,蒂森克虏伯还计划从 2022 年开始,该地区其他三座高炉都将使用氢气代替煤进行冶炼,从而降低钢铁生产的 CO₂ 排放,降幅可高达 20%。此外,液化空气公司将通过其位于莱茵-鲁尔区全长 200 km 的管道确

保稳定的氢气供应。

2.2 新型气基竖炉直接还原工艺

随着碳减排压力的增大,氢气直接还原技术受到了越来越多的重视,迎来了蓬勃发展的机会。在“氢能炼钢”方面,近年来国外钢企已经进行了一系列探索,取得了一定的进展。尤其是瑞典SSAB公司突破性氢能炼铁技术(HYBRIT)项目将使钢铁生产过程的CO₂排放量降至近乎于零,有望引发特钢行业的一场变革。

ULCOS项目进行了ULCORED新型直接还原工艺的研究^[6]。利用天然气取代传统还原剂焦炭,将块矿或球团通过气基竖炉直接还原,生产固态的直接还原铁产品,用于电炉炼钢。项目研究结果表明,ULCORED与碳捕集和存储技术(CCS)结合使用,与欧洲一般高炉相比CO₂排放量降低70%。此外,ULCOS项目还研发氢气直接还原炼钢技术(hydrogen-based steelmaking)。利用电解水制取氢气,所需电力来自水力发电站和核电站。铁矿石通过氢气竖炉还原生产不含碳的直接还原铁,送入电炉炼钢。即便算上用电产生的CO₂排放量,氢气直接还原炼钢工艺CO₂排放量仅有300 kg CO₂/t钢,与传统高炉工艺1850 kg CO₂/t钢的排放量相比减少了84%。不过,氢气直接还原炼钢技术的发展很大程度上依赖氢能经济,氢气产量必须达到规模化,并且要求成本更具有竞争力。

基于ULCOS的研究结果,欧洲由瑞典SSAB公司发起的HYBRIT项目、由德国萨尔茨吉特钢铁公司发起的SALCOS项目和由奥钢联发起的H2FUTURE项目,这些项目的显著特点是通过可再生能源发电,然后采用高温电解水法生产氢气(P2G),氢气用于直接还原铁生产。2018年初HYBRIT公布的研究结果表明,SSAB采用高炉长流程工艺的CO₂排放量为1600 kg/t钢(欧洲其他国家的水平为2000~2100 kg/t钢),电力消耗为5385 kW·h;采用HYBRIT工艺的CO₂排放量仅为25 kg/t钢,电力消耗为4051 kW·h。但是,按照2017年底的电力、焦炭价格和CO₂排放交易价格,HYBRIT项目采用的氢冶金工艺成本比传统高炉工艺高20%~30%,其中电解制氢的高成本是主要因素。

2.3 碳捕集和存储技术

碳捕集和存储技术(carbon capture and storage, CCS)是将化石燃料燃烧产生的CO₂捕获,然后通过管线输送到地下或通过船舶运到海底里封存。COURSE50与ULCOS项目均对高炉煤气CO₂捕集和封存技术进行了研究^[7]。作为两大支柱技术之一,COURSE50项目预期通过分离回收高炉煤气中CO₂并封存而实现的碳减排目标为20%。为此,在JFE福山厂建设了处理能力3 t CO₂/d的试验装置,开发PSA物理吸附技术;同时开发新型化学吸附剂,在新日铁君津厂建造了捕集能力1 t CO₂/d的试验装置,研发COCS化学吸附技术,以期获得经济可行的CO₂分离回收新技术,并将成本控制在2000日元/t以下。相关的研发工作还在进一步开展中。

CCS技术被一些人士认为是大规模减少温室气体排放、缓解全球变暖问题的有效方法,但如何成功、安全、长期、无次生灾害地封存CO₂仍是尚待深入研究的重要课题。而且,封存的CO₂并未得到有效利用,造成资源浪费。

2.4 核能制氢炼钢

超高温核反应堆(VHTR)的反应产物是氢气与电能。早在2009年,韩国原子能研究院与浦项制铁公司(POSCO)等韩国13家企业及研究单位共同签署原子能氢气合作协议(KNHA),正式开展核能制氢信息交流和技术研发^[8]。2010年5月,POSCO正式着手开发超高温反应堆。预计2025年开始反应堆试运行,从2030年开始在2座高炉实际投入使用,到2040年12座高炉,从而完成氢还原炼铁。

韩国还有人建议,以核能制氢为还原剂,利用FINEX熔融还原工艺的流化床还原粉矿,生产粉状直接还原铁,然后热压块,送到电炉,以核反应堆产生的电能冶炼,生产低成本钢水,也是CO₂减排的有效措施。

2.5 Carbon2Chem项目:解放传统高炉-转炉流程,钢铁行业可持续发展前景光明

基于碳捕集与利用(carbon capture and usage, CCU)的思想,德国教育与科技部立项Carbon2Chem,执行期间为2016年3月至2026年12月31日,蒂森克虏伯与弗劳恩霍夫协会、马克斯·普

朗克研究所以及另外 15 家研究机构和合作伙伴协同合作承担该项目,探索如何利用钢铁生产的冶炼尾气为燃料,塑料或肥料行业创造有价值的初级产品^[19]。预计该项目成功后,将使德国钢铁工业每年排放量为 2000 万 t 的 CO₂ 在未来可以经济地获得利用。这占德国整个工业和制造业每年 CO₂ 排放量的 10%。

与前述各项技术聚焦于减少碳排放不同,Carbon2Chem 项目是利用钢厂废气中含有的化工原料,例如以 CO 和 CO₂ 形式存在的碳、氮和氢等,生产含有碳和氢的合成气体,再应用于生产氨气、甲醇、聚合物和高级醇等各种初级化工产品,替代目前天然气、煤等化石原料。因此,Carbon2Chem 不仅可转化钢厂废气中的 CO₂,同时也节省了生产此类合成气体的碳资源用量。2018 年 9 月,蒂森克虏伯 Carbon2Chem 项目成功地将钢厂废气转化为合成燃料,生产出第一批甲醇。2019 年 1 月,蒂森克虏伯成功利用钢厂废气生产氨,这在全球范围内尚属首次。

蒂森-克鲁伯宣布,目前全世界大约有 50 家钢厂符合引进 Carbon2Chem 项目的条件,已开始与各地的意向方建立联系,探讨将该技术运用于其他 CO₂ 密集型行业。

3 中国低碳炼铁的现状与发展建议

早期的 COREX、FINEX、HIs melt 等非高炉炼铁技术缺少低碳排放的内涵。进入 21 世纪以来,国际上的低碳炼铁技术研发主要聚焦于以氢代焦为代表的低碳高炉炼铁技术和蒂森克虏伯以冶金废气制造化工产品的 Carbon2Chem 项目,而氢气竖炉直接还原主要应用于特钢生产为主的企业,生产纯净的直接还原铁和高端特钢产品^[20-21]。依据国际发展趋势和中国钢铁工业现实需求,提出以下建议。

3.1 以氢代焦,发展低碳高炉炼铁技术

高炉是中国炼铁的绝对主力,中国应集中精力发展低碳高炉炼铁。综合国际上的研发情况,低碳高炉炼铁技术主要是富氢煤气喷吹、复合铁焦、炉顶煤气循环、氧气高炉的优化匹配。研究表明,在

复合铁焦使用量 30%、炉顶煤气循环 48.8% 的情况下,吨铁能耗降低 22.1%、焦比降低 16.4%、碳排放降低 51.8%,而生铁产量提高 39.8%,节能减排效果十分显著。

首先,应尽可能挖掘钢厂本身潜力,利用钢厂产生的含氢废气制氢,并以合理的使用量和方式将氢气喷吹入高炉。炼焦过程产生的焦炉煤气富含氢气,一般用作加热气体或用于发电。从能量合理利用的角度来看,这些氢如果能够作为氢能源,直接参加高炉内的还原反应,将大幅降低高炉碳排放,应是富氢煤气实现高附加值、梯级利用的可行办法。所以,钢铁行业当前应抓紧这方面的研究,有些尚未上焦炉煤气发电的产线,应积极考虑开展焦炉煤气重整与喷吹、炉顶煤气循环等项目,摸索副产煤气中氢的合理利用途径。通过经济性和合理性的对比研究,对钢铁工业合理利用副产煤气中的氢给出结论,指导下一步合理利用副产煤气资源。有丰富可再生能源或邻近有可靠提供氢的化工企业群,也应开展以氢代煤、以氢代焦技术的研发和应用。需说明的是,从高炉冶炼原理、焦炭料柱骨架存在的必要性和氢能技术经济性等角度出发,不可能采用氢气全部代替焦炭,存在氢气的合理用量。

其次,考虑到复合铁焦技术节能减排的巨大潜力,国内已经有一批单位正在筹划铁焦项目,计划先在单座高炉试验,成功后再逐步推广。凡是搬迁的炼铁厂,可以考虑通过搬迁进行相应的改造,实现铁焦的生产和高炉应用。宝钢曾计划在煤炭产地与煤矿当地的企业合资建设铁焦生产线,制成铁焦后,再运到钢厂使用。这样做可以减少钢厂本地投资建设和经营负担,减少相关费用,加快研发进度。

因此,钢厂应充分利用现有的条件建立研发基地,进行相关的理论与实践研究。有条件的钢铁企业,可以选择适当容积(300~500 m³)的已淘汰或将淘汰高炉,全面开展富氢煤气喷吹、复合铁焦、炉顶煤气循环、氧气高炉优化组合集成的低碳高炉前沿技术研发。其中,低碳高炉技术的理论分析计算和工艺装备设计,可以由高校、研究设计单位组织相关人员完成。

3.2 基于CCU利用冶金废气制造化工产品

巴黎协议规定的减少温室气体排放和限制全球变暖的目标对许多高排放行业来说,均是一个重大挑战。近年来,世界各国在这方面做出了广泛的努力,使能源需求和温室气体排放稳步下降。在基础原材料生产领域,一些措施已经达到热力学极限,尚没有找到更可持续的新工艺用于生产种类繁多的基础原材料。例如,绝大多数钢是通过碳密集型高炉-转炉流程生产的,尽管在替代方法方面进行了大量的开发工作,但是沿此方向在未来难有突破性、可持续发展的新进展。

碳捕集与封存(CCU)技术是一项具有大规模CO₂减排潜力的技术,有望实现化石能源的低碳利用,被广泛认为是应对全球气候变化、控制温室气体排放的重要技术之一。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》将“主要行业CO₂、甲烷等温室气体的排放控制与处置利用技术”列入环境领域优先主题,并在先进能源技术方向提出“开发高效、清洁和CO₂近零排放的化石能源开发利用技术”;《国家“十二五”科学和技术发展规划》提出“发展CO₂捕集、利用与封存等技术”。

中国钢铁企业聚焦钢铁流程煤气高效清洁利用,也在积极探索钢铁+化工绿色发展新模式。2009年5月四川达州钢铁集团公司在国内首次投产了以转炉煤气(经变温吸附法净化处理)和焦炉煤气为原料年产10万t甲醇装置,2010年4月年产20万t甲醇装置再次顺利投产,填补了国内转炉煤气制甲醇的空白,标志着国内转炉煤气制甲醇技术走向成熟,在全国钢铁行业废气综合利用方面跨出了重要一步。2012年1月,黑龙江建龙钢铁有限公司转炉煤气和焦炉煤气经变温吸附和变压吸附制备20万t/年的甲醇项目正式投产,将钢铁产业链延伸至化工领域,以实现节能环保。2010年6月,宝钢与新西兰朗泽公司合作,引进新微生物气体发酵技术,同时结合中国科学院膜分离和发酵工艺技术,在宝钢罗泾开展COREX煤气制备乙醇项目。2012年4月10日,宝钢年产300t乙醇示范项目正式投产,成功生产无水乙醇样品,随后由于罗泾COREX停产而试验中止。2012年,首钢京唐公司

与朗泽公司合资成立北京首钢朗泽新能源科技有限公司,将宝钢300t燃料乙醇示范装置整体搬迁至首钢,进行工艺优化和技术改造,以高炉煤气、转炉煤气、焦炉煤气及其混合气为原料,通过微生物发酵工艺,生产汽车及航空用燃料乙醇产品;2012年12月竣工运行,产出浓度为99.5%以上的合格燃料乙醇。在此基础上,2017年12月首朗公司在京唐建成全球首套4.5万t/年钢厂尾气生物发酵法制清洁能源商业化装置,设备国产化率97%以上。目前,首朗公司在宁夏的6万t矿热炉尾气制乙醇项目正在进行中。2017年11月,山西立恒钢铁公司利用北大先锋的钢厂尾气创新利用4.0技术,采用转炉煤气和焦炉煤气作为生产原料,建设30万t/年乙二醇的“钢化联产”项目。另外,石横特钢集团阿斯德科技有限公司利用北大先锋技术,建成世界首套转炉煤气制甲酸生产装置,以转炉煤气为基础原料,年产甲酸20万t和草酸5万t。每年可减少碳排放32万t,节约原料煤消耗100万t。2018年4月投产以来,该生产线一直稳定运行。以上这些项目为中国钢铁行业发展钢铁-化工联产、实现节能减排奠定了良好基础。

中国近年在钢化联合方面的有益探索和巨大进展,以及德国钢铁巨头蒂森-克虏伯牵头的Carbon2Chem项目取得的成果都表明,通过钢铁、化工、能源三大行业的跨工业生产网络协作,可以为中国CO₂减排提供全面、彻底、可持续发展的解决方案。

首先是钢铁行业和化工行业的联产协作。长期以来钢铁生产不可避免的CO₂排放,给钢铁行业套上了一副沉重“枷锁”,严重制约了钢铁工业的发展。如果将含有N₂、CO、CO₂和H₂为主要成分的钢铁厂的尾气进行捕集、处理成为合成气体,并提供给化工厂用于制备燃料、塑料、肥料等化工产品,既可减少CO₂排放,缓解钢铁生产的碳排放压力,同时为化工行业输入了原本需要消耗化石能源或生物质资源才能获得的含有碳的资源。

其次,在钢化联合的基础上,将能源行业并入钢化生产网络。由于钢铁企业排放的废气中所含的H₂无法满足化工产品的需求,尚需第3个行业的

支撑。能源行业利用可再生能源制氢,来弥补钢铁企业废气中氢含量的不足。

需要注意的是,钢铁、化工和能源三大系统的耦合,以及各个系统的巨型规模和高度复杂性、波动性、动态性,是跨工业网络实施过程中必须应对的最严峻的挑战。经过国内相关领域专家的共同努力,钢铁工业全流程的动态数字孪生和信息物理系统已经在顺利开发中,并渐入佳境,有望为该系统的可靠、安全、稳定、高效、智能运行提供保证。利用加载到工业互联网平台的钢铁、化工、能源3个智能制造系统,将可以稳定地对全流程进行协调和控制,做到三大工业产线在工业互联网平台框架下协调运行,最终真正体现协同、全局的优势,实现绿色、智能、协调、和谐发展。

以冶金废气制造化工产品的神威CCU项目(steel-chemicals-energy networking integration CCU, SCENWI CCU)是一项钢铁-化工-能源一体化网络集成的CCU项目。该项目是在保持高炉流程主体地位的前提下,钢铁与化工、能源和谐共存,绿色发展。该项目把多年发展起来的高炉-转炉流程从碳排放的阴霾中解放出来,又留出了继续发展的空间。可将高炉-转炉排放的 CO_2 变为有用资源,推进钢铁、化工、能源工业的协同发展,还世界百花盎然、绿水蓝天。就如同十几年前的“高炉渣制造水泥”的神来之笔,将“污染源”变成了炙手可热的“抢手货”,既改善了钢厂的环境,又为硅酸盐工业提供了优质的原料。体现了科学技术、工业系统集成、联合、协同的力量。

当然,钢铁-化工-能源一体化的SCENWI CCU项目存在如下需要迫切解决的技术难题:(1)高效低成本地实现钢铁厂废气净化处理和 CO_2 、 CO 、 H_2 、 N_2 成分捕集分离是本项目的关键问题之一,需开发新型高效气体吸附材料或吸收材料,并确立相应的净化分离工艺技术;(2) CO_2 分子十分稳定,加氢反应转化率最高仅为30%左右,而且加氢反应产物分布广,包括 CO 、甲烷、甲醇、甲酸和汽柴油等,反应选择性差,需通过开发高效催化剂和优化加氢催化工艺,进一步提高转化率和降低反应产物分离成本;(3)廉价氢气来源是本项目的又一

重要难题,需解决大规模低成本制氢工艺技术;(4)研发高附加值化工产品及其生产工艺技术,提高本项目的经济性;(5)利用工业互联网平台,开发钢铁、化工、能源的智能制造系统,有效解决三大流程工业系统的高度复杂性、波动性、动态性,实现深度耦合。因此,在今后一定阶段,建议从以下方面着手积极推进SCENWI CCU项目。

1) 研究内容的确立。项目将完成一系列重要研究开发内容:钢铁工业废气捕集、净化、处理制合成气技术与装备(含废气波动性调控);可再生能源与P2G电解水技术与装备(含供氢波动性调控);利用合成气制取化工产品技术与装备;基于工业互联网平台跨行业的流程工业(冶金、化工、能源)智能制造系统。

2) 研究队伍的组织。成立由钢铁、化工、能源、信息等行业、企业集团、研究机构、高校、风险投资公司等组成的神威CCU联盟,有组织地汇聚队伍,筹集来自政府、行业、社会各方的政策与财政支持,调动产学研用各方面的力量,开展可行性研究、基础理论研究、工艺装备与网络控制系统研究、工业装备研究。

3) 研发基地建设。建设联合研究基地,即行业联合创新中心。基地应位于现有钢铁企业内部或邻域,目前阶段利用钢铁工业提供的废气进行近工业化或准工业化试验研究,为未来对不同规模钢铁企业改造成钢铁-化工-能源网络化集成的CCU联合企业提供可靠的、可信的支持。基地研究设施主要含可再生能源研究设施与P2G研究设施、工业废气净化-处理设施、化工-冶金-能源联动模拟仿真平台。该基地可以提供真实的钢厂气体,验证实验室测试结果,也可以依据实际情况利用模拟仿真平台进行研究,以了解化学过程及催化剂如何在工业条件下对实际气体条件的变动做出反应。与钢厂的直接连接,可以在动态界面条件下对钢厂与化工厂之间的互动关系与耦合控制进行研究,为未来联合企业的设计、管理、调整、控制提供理论与实践基础。

4) 工业示范。汇聚国内优势单位,进行系统设计、设备制造,并选择有条件、有积极性的钢铁企

业作为 SCENWI 项目的试点,实施工业示范项目。

5) 推广应用。示范项目取得成功后,向钢铁全行业和其他碳排放密集行业推广应用。

3.3 非焦煤制气+气基竖炉直接还原:特钢产业低碳减排的重要措施

氢气气基竖炉直接还原技术在欧美一些国家得到发展,尤其是在 SSAB 等特钢企业受到了越来越多的重视。但是考虑到目前高炉-转炉流程是国际普钢生产的主流,而用于氢能炼钢的廉价氢气来源尚未解决。所以,氢气直接还原将会主要用于特钢企业。

2019年11月22日,河钢集团与意大利特诺恩集团签署谅解备忘录(MOU),商定双方在氢冶金技术方面开展深度合作,利用世界最先进的制氢和氢还原技术,并联手中冶京诚,共同研发、建设全球首例120万t规模的氢冶金示范工程,应用于河钢宣钢转型升级项目。项目将从分布式绿色能源、低成本制氢、焦炉煤气净化、气体自重整、氢冶金、成品热送、CO₂脱除等全流程进行创新研发,探索出一条世界钢铁工业发展低碳、甚至“零碳”经济的最佳途径,从改变能源消耗结构入手,彻底解决特钢生产的环境污染和碳排放问题,从而引领特钢行业工艺变革。

2020年5月8日,京华日钢控股集团有限公司与中国钢研签订了《年产50万吨氢冶金及高端钢材制造项目合作协议》。本项目以氢冶金全新工艺-装备-品种-用户应用为目标,进行系统性、全链条的创新开发,通过现代化工、冶金联产循环经济的方式,建设具有中国自主知识产权的首台套年产50万t氢冶金及高端钢材制造产线。

由于廉价制取氢气还是一个尚待解决的问题,所以,还原剂不能严格限于氢气,而是根据能源供应条件就地取材,更多地利用天然气或者非焦煤制富氢合成气。鉴于中国天然气资源匮乏昂贵而廉价煤炭资源储量丰富,发展煤制气-气基竖炉直接还原是比较现实的途径。煤制气-气基竖炉直接还原技术一直受到中国钢铁工作者的关注,国内已有一些单位开展了以煤制气为还原气的气基竖炉

直接还原厂的建设规划或设计。从资源条件、能耗、环境保护、生产规模、与后续工艺的衔接等诸多方面综合分析,煤制气-气基竖炉直接还原-电炉炼钢将是符合中国国情的绿色特钢生产工艺。

积极研发并应用氢气(或煤制气)气基竖炉直接还原-电炉短流程,以纯净直接还原铁和废钢为原料进行特钢生产,符合国际上特钢工业发展的大趋势,也符合中国的重大发展规划,有助于中国特钢产业低碳绿色可持续发展。煤气化是煤化工的常规技术,获得了不断完善及发展,在国内化工行业已有实际应用,并拥有多年成熟生产经验。其中,流化床法煤制气工艺投资成本低、氧耗低、生产效率高,可获得满足气基竖炉还原要求的富氢合成气。东北大学在气基竖炉用高品位铁精矿选矿、氧化球团制备、气基竖炉工艺与装备等方面进行了长期研究,成功开发高品位铁精矿精选、优质氧化球团制备和气基竖炉工程化技术。另外,在高纯净钢电炉冶炼、炉外精炼、连铸、轧制锻造方面也具有长期研究经验和全套生产技术。目前,东北大学正在与相关企业合作,建设煤制气-气基竖炉直接还原-高级特钢冶炼、铸造、锻轧中试试验线,为制造中国急需的大国重器用高端特钢贡献力量。

3.4 核能制氢

氢能源是21世纪着力发展的清洁能源。现在制氢的方法主要有3种:第一种是利用现有化石能源得到富氢气体;第二种是电转气,也即电解水制氢,由于电解水成本高,实用有一定的困难,若可再生资源能大规模应用,则可大幅降低成本;第三种是利用核能制氢,只要核能制氢有足够的安全性,则是非常理想的方法。

核能制氢虽然看起来比较遥远,但是随着超高温核反应堆的技术水平和安全性的不断提高,有可能异军突起,得到迅速发展。据中核集团董事长余剑锋2019年介绍,高温气冷堆是中国自主研发的具有固有安全性的第四代先进核能技术,具有安全性好、出口温度高等优势,其高温高压的特点与适合大规模制氢的热化学循环制氢技术十分匹配,被公认为最适合核能制氢的堆型。一台60万kW高

温气冷堆机组可满足 180 万 t 钢对氢气、电力及部分氧气的能量需求,每年可减排约 300 万 t CO₂,减少能源消费约 100 万 t 标准煤。中国在高温气冷堆技术领域已居世界领先地位,已建成并运行 10 MW 高温气冷实验堆,20 万 kW 高温气冷堆商业示范电站预计将于 2020 年建成投产。中核集团联合清华大学已启动 60 万 kW 高温气冷堆商用核电站的项目实施工作,基本完成其标准设计和评审,并启动了厂址选择工作。

考虑到核能制氢的优势,中核集团与中国宝武钢铁集团、清华大学签订了有关合作框架协议,致力于打造世界领先的核冶金产业联盟,开启了产学研用一体化合作新局面。三方有望强强联手,扎实推进核心技术的研发以及科研成果的转化与市场推广。

4 结论

低碳减排是钢铁行业面临的最紧迫的问题。高炉-转炉流程应重点发展以氢代焦等为代表的低碳高炉炼铁技术,而特钢生产系统则应以发展富氢气基竖炉直接还原技术为主,制备高端特钢产品。基于 CCU 思想,利用冶金废气制造化工产品是高炉-转炉流程最彻底、最合理、最可持续的减排方式,应当汇聚冶金、化工、能源、信息等行业的技术力量,加紧实施神威 CCU(SCENWI CCU)项目,进行冶金废气的捕集、输送、处理以及化工工艺与产品开发,同时基于工业互联网平台建设冶金-化工-能源三大系统密切结合、协同管控、稳定运行的工业互联网系统,从根本上解决钢铁行业的碳排放问题。

参考文献(References)

- [1] An R Y, Yu B Y, Li R, et al. Potential of energy savings and CO₂ emission reduction in China's iron and steel industry [J]. *Applied Energy*, 2018, 226: 823-834.
- [2] Chen Q Q, Gu Y, Tang Z Y, et al. Assessment of low-carbon iron and steel production with CO₂ recycling and utilization technologies: A case study in China[J]. *Applied Energy*, 2018, 220: 192-207.
- [3] 刘宏强, 付建勋, 刘思雨 等. 钢铁生产过程二氧化碳排放计算方法与实践[J]. *钢铁*, 2016, 51(4): 74-82.
- [4] 张肖, 吴高明, 吴声浩, 等. 大型钢铁企业典型工序碳排放系数的确定方法探讨[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(8): 2024-2027.
- [5] 李景云. 钢铁企业节能环保形势分析及应对措施[J]. *中国钢铁业*, 2014(3): 20-23.
- [6] 张琦, 贾国玉, 蔡九菊, 等. 钢铁企业炼铁系统碳素流分析及 CO₂ 减排措施[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2013, 34(3): 392-394.
- [7] Zhang Q, Li Y, Xu J, et al. Carbon element flow analysis and CO₂ emission reduction in iron and steel works[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172: 709-723.
- [8] Lin B Q, Wu R X. Designing energy policy based on dynamic change in energy and carbon dioxide emission performance of China's iron and steel industry[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 256: 1.
- [9] 上官方钦, 张春霞, 郦秀萍. 关于钢铁行业 CO₂ 排放计算方法的探讨[J]. *钢铁研究学报*, 2010, 22(11): 1-5, 10.
- [10] Peng J Y, Xie R, Lai M Y. Energy-related CO₂ emissions in the China's iron and steel industry: A global supply chain analysis[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 129: 392.
- [11] Wang X L, Lin B Q. How to reduce CO₂ emissions in China's iron and steel industry[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 57: 1496.
- [12] 魏侦凯, 郭瑞, 谢全安. 日本环保炼铁工艺 COURSE50 新技术[J]. *华北理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 40(3): 26.
- [13] Kanji Takeda, Takashi Anyashiki, Takeshi Sato, 等. 日本炼铁近期和中长期 CO₂ 减排项目进展[J]. *世界钢铁*, 2012(6): 1-7.
- [14] Quader A M, Ahmed S, Dawal S Z, et al. Present needs, recent progress and future trends of energy-efficient ultra-low carbon dioxide (CO₂) Steelmaking (ULCOS) program[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 55: 537.
- [15] 张京萍. 拥抱氢经济时代全球氢冶金技术研发亮点纷呈[N]. *世界金属导报*, 2019-11-26(F01).
- [16] Knop K, Hallin M, Burström E. ULCORED SP 12 Concept for minimized CO₂ emission[J]. *Revue de Métallurgie*, 2009, 106(10): 419.
- [17] Ding H, Zheng H R, Liang X, et al. Getting ready for carbon capture and storage in the iron and steel sector in China: Assessing the value of capture readiness[J].

- Journal of Cleaner Production, 2020, 244: 1.
- [18] Yuk S, Cho J Y, Jo C K, et al. Time-dependent neutron diffusion analysis using finite element method for a block-type VHTR core design[J]. Nuclear Engineering and Design, 2020, 360: 110512.
- [19] Teresa W, Lüke W, Büker K, et al. Carbon2Chem®-Technical center in duisburg[J]. Chemie Ingenieur Technik, 2018, 90(10), doi: 10.1002/cite.201800067.
- [20] 李峰, 储满生, 唐珏, 等. 非高炉炼铁现状及中国钢铁工艺发展方向[J]. 河北冶金, 2019, 286(10): 8.
- [21] Ramakgala C, Danha G. A review of ironmaking by direct reduction processes: Quality requirements and sustainability[J]. Procedia Manufacturing, 2019, 35: 242-245.

Green steelmaking technology with low carbon emission

WANG Guodong, CHU Mansheng

State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China

Abstract Carbon emission mitigation is the most urgent task for steel industry. Current status and developing trends of environmental treatment and low carbon emission technologies for worldwide steel industry are reviewed and analyzed in this paper. Low carbon ironmaking technology with hydrogen partially replacing coke should be given priority for the blast furnace-basic oxygen furnace process while hydrogen-enriched shaft furnace direct reduction technology for special steel production. Based on the idea of carbon capture and utilization (CCU), chemicals production using metallurgical waste gas is the most thorough yet reasonable and sustainable way for carbon emission mitigation of the steel industry. For this purpose it is necessary to gather the technology strength of steel, chemicals, energy, information and the other related industry to implement the SCENWI (steel-chemicals-energy networking integration) CCU project with near-to-zero carbon emission to accelerate the research on metallurgical waste gas capture, transportation and treatment technology, and develop chemicals production process and products. Meanwhile, it is critical to build an intelligent manufacturing network system with close combination, collaborative management and stable running based on the industrial internet platform and effectively resolve key bottleneck problems on system complexity, dynamics and fluctuation, aiming to completely solve the carbon emission problem and promote sustainable and high-quality development of the steel industry.

Keywords steel industry; low carbon emission; low carbon blast furnace ironmaking technology; hydrogen-enriched shaft furnace direct reduction technology; carbon capture and utilization; steel-chemicals-energy networking integration ●



(责任编辑 刘志远)