

DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20220689

基于富氢焦炉煤气零重整的氢冶金工程技术

王新东¹, 赵志龙², 李传民², 杨永强³

(1. 河钢集团有限公司, 河北 石家庄 050023; 2. 中冶京诚工程技术有限公司, 北京 100176;
3. 河钢集团张宣科技, 河北 宣化 075100)

摘 要: 氢能是 21 世纪最具发展力的清洁能源,是中国未来能源体系的重要组成部分。构建“以氢代碳”的钢铁用能新体系是中国钢铁行业实现“双碳”目标的重要方向。针对以氢能源为基础的氢冶金技术原理和工艺流程,对氢冶金流程工程化、关键技术、技术经济指标、运行成本估算及 CO₂ 减排情况等进行探讨,全面论述了氢冶金工程的系统组成和关键设备、工厂布局等情况。工程实践表明,以富氢焦炉煤气为还原气源的氢冶金工艺,采用气体零重整和气基直接还原炼铁技术,以氧化球团为原料,完全不使用焦炭、煤炭和烧结矿,从源头减少碳素使用,污染物产生和排放大幅减少;无烧结、焦化工序,总图布置紧凑,大幅节约用地;以焦炉煤气为气源的氢冶金,生产成本具有一定优势;根据技术经济指标估算,基于富氢焦炉煤气的氢冶金与高炉炼铁流程相比,可实现吨铁碳排放降低 58.8%左右。氢冶金工艺可为后续电炉炼钢提供优质的高纯铁质原料,对提升中国钢铁产品质量具有重要意义,为未来钢铁行业实现绿色、低碳、高质量发展奠定了坚实基础。

关键词: 焦炉煤气; 零重整; 直接还原; 氢冶金; 碳排放; 工程技术

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2023)05-0011-09

Hydrogen metallurgy engineering technologies based on zero reforming of hydrogen enriched coke oven gas

WANG Xin-dong¹, ZHAO Zhi-long², LI Chuan-min², YANG Yong-qiang³

(1. HBIS Group Co., Ltd., Shijiazhuang 050023, Hebei, China;
2. Capital Engineering and Research Incorporation Limited, Beijing 100176, China;
3. HBIS Group Zhangxuan Technology, Xuanhua 075100, Hebei, China)

Abstract: Hydrogen energy is the most powerful clean energy in the 21 st century, and is an important part of our country's future energy system. Building a new steel energy system "replacing carbon with hydrogen" is an important direction of realizing double carbon target in China's iron and steel industry. For hydrogen energy based hydrogen metallurgy technology, the principle and technological process, the hydrogen metallurgical products, key functional units are interconnected, hydrogen shaft furnace and other key equipment, plant layout, technical and economic indexes and operation cost estimation and CO₂ emissions were discussed, such as the system structure and key technologies of hydrogen metallurgical engineering. The engineering practice shows that the hydrogen metallurgy process with hydrogen-rich coke oven gas as reduction gas source, using gas reforming and gas base direct reduction iron making technology, using oxidized pellets as raw material, completely eliminating the use of coke, coal and sinter, reducing the use of carbon from the source, and greatly reducing the generation and emission of pollutants. No sintering, coking process, the general layout is compact, greatly saving land. Hydrogen metallurgy with coke oven gas as gas source has some advantages in operational cost. Based on the estimation of technical and economic indicators, hydrogen metallurgy based on hydrogen-rich coke oven gas can achieve 58.8% reduction in carbon emission per ton of iron compared with blast furnace ironmaking process. Hydrogen metallurgical process can not only provide high-quality pure hot metal for the subsequent electric furnace steelmaking, but also play a significant role in improving the quality of Chinese iron and steel products, and lay a solid foundation for the future development of green, low carbon and high quality of iron and steel industry.

Key words: coke oven gas; zero reforming; direct reduction; hydrogen metallurgy; carbon emissions; engineering technologies

近年来,为了应对气候变化,各国都在积极推进CO₂ 减排工作。氢能作为一种绿色、清洁、高效的二次能源正在加速发展,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。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“双碳”目标和绿色、高质量发展的重要方向之一^[1-6]。

氢冶金的工艺载体为气基直接还原工艺。目前,全世界范围内成熟的气基直接还原炼铁工艺可按照压力分为 2 种,即低压竖炉法-MIDREX 和高压竖炉法-HYL/ENERGIRON^[7-10]。这 2 种工艺都是基于天然气为气源的竖炉直接还原工艺,但直接使用富/纯氢气体为气源的工艺还没有成熟的实践案例。

由于中国资源和能源禀赋,每年副产的焦炉煤气达到 2 000 亿 m³。焦炉煤气氢体积分数为 60%左右,是优质且廉价的氢能源,也是目前中国发展氢冶金最实用的气源之一^[11-13]。本文将针对以富氢焦炉煤气为还原气体的竖炉零重整直接还原氢冶金工艺,根据实际工程实践,从产品方案、重点功能单元组成和相互连接,以及氢基竖炉工艺的关键设备、工厂总图布置、生产成本、CO₂ 减排情况等方面进行总结,全面论述氢冶金的系统组成和工程技术情况。

1 基于焦炉煤气零重整氢冶金工艺

1.1 原料成分要求

氢基竖炉直接还原工艺属于气-固两相还原过

程,原料为氧化球团,还原剂为富氢气体,产品为固态直接还原铁,无液态铁水产生,为后续电弧炉炼钢提供优质的高纯铁质原料^[14-15]。氢基竖炉对球团矿指标要求见表 1。

表 1 氧化球团主要成分		
Table 1 Main composition of oxidized pellet		
序号	项目	数值
1	$w(\text{Fe})/\%$	66~69
2	$w(\text{FeO})/\%$	1.0~1.5
3	$w(\text{SiO}_2)/\%$	2.0~3.0
4	$w(\text{CaO})/\%$	约 0.20
5	$w(\text{MgO})/\%$	约 0.19
6	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	约 0.44
7	$w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})/\%$	<0.2
8	$w(\text{S})/\%$	<0.006
9	$w(\text{P})/\%$	<0.05
10	$w(\text{TiO}_2)/\%$	<1.0
11	$w(\text{Mn})/\%$	<0.15
12	$w(\text{Zn})/\%$	<0.02
13	粒度/mm	6.5~31.8
14	强度/N	≥2 254

1.2 产品要求

氢基竖炉生产的直接还原铁产品分为 3 种,即冷态的直接还原铁(CDRI)、热态的直接还原铁(HDRI)、热压铁块(HBI)。上述 3 种产品可根据钢厂后续工序连接进行科学设计匹配,其产品的特征参数见表 2。

表 2 直接还原铁产品典型特征参数(质量分数)				
Table 2 Typical characteristic parameters of DRI				
序号	项目	CDRI	HDRI	HBI
1	金属化率/%	92~95	92~95	92~95
2	$w(\text{C})/\%$	1~5	1~5	0.5~5
3	$w(\text{P})/\%$	≤0.06	≤0.06	≤0.06
4	$w(\text{S})/\%$	≤0.004	≤0.004	≤0.004
5	脉石质量分数/%	2.8~6	2.8~6	2.8~6
6	体积密度/(kg·m ⁻³)	1 600~1 900	1 600~1 900	2 400~2 800
7	表观密度/(kg·m ⁻³)	3 400~3 600	3 400~3 600	4 900~5 500
8	产品温度/℃	常温	550	常温
9	典型粒度/mm	6.3~20	6.3~20	110×50×30

1.3 工艺原理

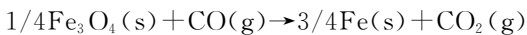
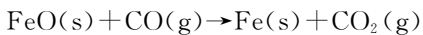
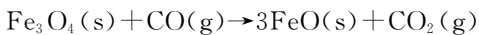
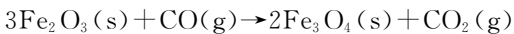
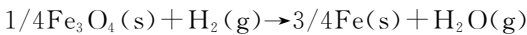
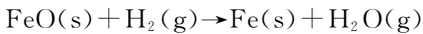
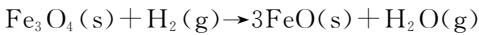
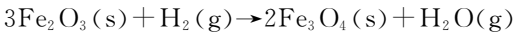
氢冶金工艺过程主要是以 H₂ 为主、CO 为辅的

还原气体对氧化球团进行还原脱氧的过程,同时伴随着焦炉煤气自重整反应和渗碳反应等^[16-20]。焦

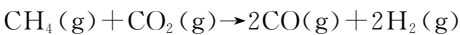
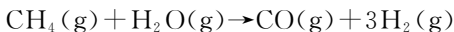
炉煤气中的 CH₄ 在氢基竖炉的环境中会发生自重整反应,分解为 H₂ 和 CO,增加还原气量;且 CH₄ 很容易与竖炉内新还原出的金属铁反应生成碳化铁,完成 DRI 的渗碳且生成 H₂,适量的渗碳将对后续电炉炼钢工序有利。

氢基竖炉内主要反应机理可使用如下方程式表示。

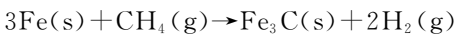
(1)竖炉内还原反应:



(2)竖炉内自重整反应:



(3)竖炉内渗碳反应:



1.4 工艺流程

以富氢焦炉煤气为气源的氢冶金工艺,整体可划分为 2 条路线,即氢基竖炉炼铁工艺和富氢气体工艺^[21]。工艺流程如图 1 所示。

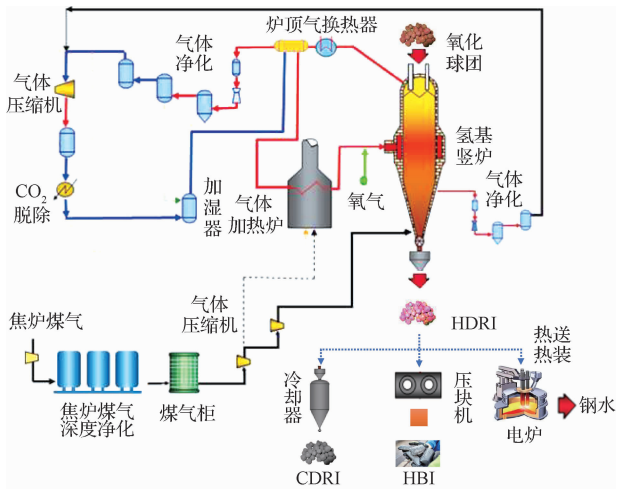


图 1 基于焦炉煤气的氢冶金工艺流程简图
Fig. 1 Schematic diagram of hydrogen metallurgy process flow based on coke oven gas

1.4.1 氢基竖炉炼铁工艺

氧化球团从竖炉顶部加入,在竖炉中按逆向原

理与富氢还原气体进行反应,被还原成 HDRI 后从竖炉锥部下端排料口处排出^[22]。大约 600 ℃ 的 HDRI 可以直接热送热装至电炉进行炼钢,也可以通过热压块机压制成 HBI,或经过冷却器进行冷却至常温制成 CDRI。

1.4.2 富氢气体工艺

富氢气体工艺可分为循环气体和补充气体 2 个工艺。

(1)循环气体工艺。竖炉内还原后的炉顶气将不断地循环使用。从竖炉顶部排出的炉顶气进入气体换热器进行回收热量,再经过多级洗涤塔净化和冷却至常温,经过气体压缩机进行提升压力后进入 CO₂ 脱除系统,脱碳后的洁净气体通过气体管式加热炉加热至 950 ℃,经喷氧提温后从氢基竖炉的中部吹入,从竖炉顶部排出,完成还原气体回路循环。

(2)补充气体工艺。以焦炉煤气为气源的氢冶金工程需要首先对焦炉煤气进行深度净化。深度净化后的焦炉煤气进入煤气柜,供补充竖炉还原气使用。补充气体经过压缩机加压后从竖炉锥部下端通入,利用竖炉内 HDRI 的温度对焦炉煤气进一步热解,热解后的气体从竖炉锥部上端排出,经过洗涤塔的净化和冷却后作为补充气体进入到竖炉还原的工艺气体循环回路。

2 氢冶金工程关键技术

2.1 工程系统组成

基于焦炉煤气零重整氢冶金工艺流程和技术原理,氢冶金工程主要包括以下设施:(1)氢基竖炉炼铁设施,包括原料及成品储运系统、氢基竖炉炼铁系统等;(2)气体工艺设施,包括焦炉煤气深度净化处理、焦炉煤气储柜、气体加压、工艺气加热、循环气体净化、CO₂ 脱除、精制等单元;(3)公辅设施,包括燃气、通风除尘、余热回收、水处理、供配电、自动化控制、液压与润滑、办公设施等。

2.2 氢冶金总图布置

根据氢冶金工艺要求,总平面布置图划分为 5 个区域,即原料及成品储运区域、原料气净化与储配区域、氢冶金核心区域、水处理区域、气体产品深加工区域。5 个区域相辅相成,平面布置紧凑,吨铁占地面积不超过 0.1 m²。氢冶金工艺由于没有烧结、焦化工序,相比传统长流程的铁前系统(烧结、焦化、高炉系统),可以大幅节约用地。

氢冶金工程典型工厂布置如图 2 所示。

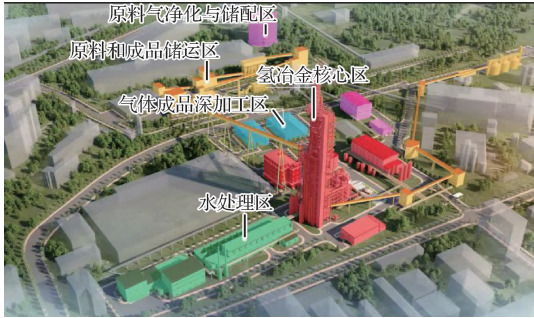


图 2 氢冶金工程典型工厂布置

Fig. 2 Typical plant layout of hydrogen metallurgy project

2.3 原料及成品储运系统

2.3.1 原料储运系统

与传统高炉相比,氢冶金原料仅使用氧化球团,矿槽系统比较简单。比较特殊的是,氢冶金工艺必须设置球团涂覆系统。球团涂覆系统为氧化球团表面进行涂层,可以有效防止竖炉内球团被还原后的粘接现象。

2.3.2 成品储运系统

氢冶金成品为固态的直接还原铁,根据后续工序连接设计主要分为 3 种,即冷态的直接还原铁(CDRI)、热态的直接还原铁(HDRI)、热压铁块(HBI)。这 3 种成品的储运方式为:(1)冷态的直接还原铁,一般配置 3 个 DRI 储仓,成品 DRI 通过皮带运输至储仓,DRI 通过皮带或卡车再运输到下游用户;(2)热态的直接还原铁,直接通过气力输送或链板机热送热装至下游电炉;(3)热压铁块,配置热压块铁堆场,通过皮带或卡车再运输到下游用户。

2.4 氢基竖炉炼铁系统

氢基竖炉炼铁系统主要包括炉顶上料系统、氢基竖炉、冷却器及 DRI 卸料器、HDRI 热送或 HBI 压块机。其中,氢基竖炉是整个氢冶金的核心设备。

氢基竖炉是圆柱锥状的压力容器,由进料管、还原区、均压区、冷却椎体及排料系统等构成,其结构示意图如图 3 所示。竖炉本体设置水套,可防止炉壳过热。本体内衬有耐火砖和浇注料,以承受高温和腐蚀。在耐火衬里和碳钢外壳体之间安装低密度绝缘浇注料。经氢基竖炉还原后的 HDRI 可以直接热送至电炉,也可以经过热压块机压制 HBI,还可以进入冷却器冷却。

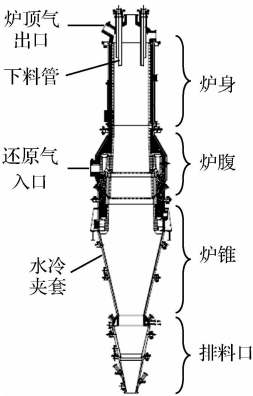


图 3 氢基竖炉示意

Fig. 3 Schematic diagram of hydrogen based shaft furnace

2.5 焦炉煤气深度净化处理系统

2.5.1 焦炉煤气深度净化处理的必要性

焦炉煤气为炼焦过程产生的副产品,初步净化后的主要成分见表 3,主要由 H₂、CH₄、CO、CO₂ 等气体组成,并含有一定量的 H₂S、CS₂、COS、NH₃、BTX(苯、甲苯、二甲苯等)、焦油和萘等。而 BTX、焦油等气体成分加热时,极易发生析碳反应,使得管道堵塞和破坏,甚至会造成爆炸等事故;同时 H₂S 和 SO₂ 对 DRI 产品质量也有影响^[23-24]。因此,必须对原料焦炉煤气进行深度净化。项目工程使用的焦炉煤气成分和深度净化后的气体成分见表 3。

表 3 焦炉煤气深度净化前后的气体成分组成

Table 3 Composition of coke oven gas

组分	气体体积分数/%							氮质量	H ₂ S 质量	焦油质量	萘质量	BTX 质量	总硫
	H ₂	CO	CH ₄	N ₂	CO ₂	C _m H _n	O ₂	浓度/ (mg·m ⁻³)	浓度/ (g·m ⁻³)	浓度/ (mg·m ⁻³)	浓度/ (mg·m ⁻³)	浓度/ (mg·m ⁻³)	
焦炉煤气	60.5	7.3	22	5	3	0.7	0.68	30	1	20	2 400	2 074	382.8
深度净化的焦炉煤气	约 60.5	约 7.3	约 22	约 5	约 3	约 0.7	约 0.68	<1	<0.001	<2	<0.005	<50	<10

2.5.2 焦炉煤气深度净化工艺

焦炉煤气深度净化可采用变温吸附法,脱除无机硫、有机硫、焦油、BTX 等杂质,为竖炉提供干净的气源。由于零重整工艺没有重整炉,所以对净化

后的焦炉煤气成分要求并不苛刻。其工艺流程为:初步净化后的焦炉煤气通过管道进入吸附塔,吸附气体中的硫化物、苯、焦油、萘等杂质,净化后的焦炉煤气送至竖炉作为还原气;根据焦炉煤气量和杂质

设置不同数量的吸附塔,塔内装填吸附剂,吸附塔数量可根据气量大小设置;吸附塔达到一定饱和程度后,从净化后的煤气管网抽取约 $5\,000\text{ m}^3/\text{h}$ (标准态)的焦炉煤气作为再生气,加热后对吸附塔进行吹扫再生;吸附塔再生时,硫化物、苯、萘、焦油等杂质被浓缩在解吸气中,将解吸气送入焦化初冷器前进行净化。净化后,焦炉煤气中 NH_3 质量浓度不超过 $0.001\text{ g}/\text{m}^3$ (标准态),总硫质量浓度不超过 $0.01\text{ g}/\text{m}^3$ (标准态),焦油质量浓度不超过 $0.002\text{ g}/\text{m}^3$ (标准态),苯质量浓度不超过 $0.05\text{ g}/\text{m}^3$ (标准态),萘质量浓度不超过 $0.001\text{ g}/\text{m}^3$ (标准态)。该工艺没有废水,废气为解吸气,可以循环利用,废渣为失效的吸附剂,一般7年需更换一次,装置投资少、成本低、环保效益显著。

2.6 气体工程单元

氢冶金直接还原工艺涉及大量的气体使用和处理,因而具有庞大的气体工程单元。从工艺流程集约化和工程投资节约化出发,项目采用焦炉煤气零重整技术,不仅省去复杂的气体重整系统,而且对生产操作、后期维护具有积极效果。

气体工程单元从功能角度主要划分为工艺气体循环系统、补充气体系统、冷却气体循环系统、工艺气体旁路系统等4个系统。

2.6.1 工艺气体循环系统

竖炉产生的炉顶气会携带大量的含铁粉尘和 H_2 ,以及还原产物 H_2O 和 CO_2 等,为了实现炉顶气体的高效利用,氢基竖炉配置了一整套复杂的工艺气回路净化循环系统。 $450\text{ }^\circ\text{C}$ 的工艺气从竖炉顶部排出后流经顶气换热器,再通过洗涤冷却系统,实现工艺气降温、脱水、除尘处理,然后进入工艺气压缩机增压至 1.1 MPa ,进入到二氧化碳脱除系统,再经加湿后进入加热炉加热,通过喷氧提升温度后进入竖炉,实现工艺气体的循环利用。

2.6.2 补充气体系统

经闭环循环利用后的工艺气体还原能力下降,必须要补充新的还原性气体。深度净化处理后的焦炉煤气经压缩机增压后从竖炉锥部的底端通入,从锥部顶端排出,再经过冷却、洗涤净化处理后,作为工艺气补充气进入到工艺气还原回路。

2.6.3 冷却气体循环系统

氢冶金冷却器系统的主要作用是将竖炉排出的 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 的 HDRI 冷却至 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 以下。冷却气体介质采用高纯氮气。氮气从冷却器下部通入,从上部排出,再经过冷却、洗涤净化和加压后实现循环利用。

2.6.4 工艺气体旁路系统

氢冶金设置1套气体旁路系统,其开启条件为,在开炉后整个工艺气体未达到流量、温度前,需要将气体反复循环。待工艺气体参数达到设计要求后,则关闭旁路系统,工艺气体送入竖炉开始正常运行。

2.7 CO_2 脱除系统

2.7.1 CO_2 脱除工艺概述

竖炉还原过程中,原工艺气体中的 CO 会转化为 CO_2 , CO_2 的累积将导致还原效率降低、能耗升高,设计要求 CO_2 体积分数一般不得超过 2% 。因此,需要将工艺气中的 CO_2 进行脱除,提高竖炉生产效率。脱除后的 CO_2 可继续提纯精制,制备工业级或食品级产品供下游行业使用^[25]。

工业上使用的脱碳方法主要有膜分离法、变压吸附法和溶剂吸收法。膜分离法材料制造成本高,多处于实验室阶段;变压吸附法产品收率较低,设备及自动化控制要求高,吸附剂用量大;溶剂吸收法包括物理吸收、化学吸收、物理-化学吸收法,其中,MDEA 法脱碳属于物理化学吸收法,已被应用于许多工业装置。MDEA 对 CO_2 有特殊的溶解性,具有溶液稳定、工艺过程能耗低、对设备腐蚀性小等优点。该工艺在投资、物料消耗、费用等方面与其他脱碳方法相比是经济的,具有很强的竞争性。

脱除后的 CO_2 纯度可以达到 92% 左右,继续进行深度提纯至 99.9% 以上,可制备成工业级或食品级 CO_2 进行销售,还可以创造新的效益。

2.7.2 CO_2 脱除工艺流程

(1)来自工艺气体压缩机的工艺气进入吸收塔下部,自下而上通过吸收塔;在吸收塔内与从吸收塔上部进入的贫胺液逆流接触,气体中的 CO_2 和 H_2S 被 MDEA 溶液吸收。未被吸收的净化气从吸收塔顶引出,再经气体洗涤器除掉夹带的溶液后进入后续工段。

(2)吸收 CO_2 后的 MDEA 溶液称为富液,从吸收塔底进入贫/富液换热器,经换热后进入汽提再生塔上部,在再生塔被再沸器中产生的蒸汽汽提再生。汽提再生塔底出来的温度约 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 的贫液经贫/富液换热器初步降温后,经贫液泵加压,再经贫液冷却器降温至约 $42\text{ }^\circ\text{C}$ 后送至吸收塔上部,重新吸收 CO_2 。

(3)在汽提再生塔内,富液被减压闪蒸并被上升的蒸汽汽提,并经过再生塔底的再沸器加热,解析出 CO_2 。解析出的 CO_2 随同蒸汽由汽提再生塔塔顶引出。酸气进入塔顶冷凝器冷却至 $45\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,然后

去回流气洗涤器。分离出水分后的 CO₂ 酸气被送入脱硫装置,脱硫后气体送至 CO₂ 精制工段,生产工业级 CO₂。

(4)汽提再生塔底部设置 1 台再沸器,采用蒸汽对塔底溶液间接加热,以保证塔底温度为 105~115 ℃,维持溶液再生。

2.8 水系统

2.8.1 水的功能与用途

水在氢冶金工艺中的作用有别于传统的高炉炼

铁,在高炉炼铁过程中水的主要用途是炉体冷却和区域消防。而在氢冶金工艺流程中,水除了用于设备冷却、气体净化外,另一个无可替代的功能就是参与重整裂化和渗碳调节反应过程。因此,清晰认知水在氢冶金还原过程中的功能和用途,是氢冶金水系统工程技术研究的基础^[26-28]。

2.8.2 水的分类与设计

(1)水系统分类。根据用途不同,氢冶金水系统一般分类见表 4。

表 4 氢冶金水系统的划分
Table 4 Division of water system in hydrogen metallurgy

序号	系统	用途	说明
1	给水	生产用水	主要用于厂区循环水系统补充水
2	给水	除盐水制备	用于蒸汽发生系统、CO ₂ 吸收系统、硫洗涤塔和 COG 压缩机区域的补水
3	给水	消防水	室内外消火栓等消防设施安全供水
4	给水	生活水	生活饮用水、洗眼器用水等
5	循环水	工艺冷却水(开路)	用于气体湿洗除尘和淬火
6	循环水	设备冷却水(开路)	用于非接触式热交换器的冷却
7	循环水	机器冷却水(闭路)	用于非接触回路中专有设备、料仓和反应器的冷却
8	循环水	淬火冷却水(开路)	用于 DRI 钢厂中高温气体的冷却
9	污水处理	氨氮废水	去除水中氨氮,满足当地排放标准
10	污水处理	污泥处置	集中收集水系统产生的污泥,进行脱水处理与外运

(2)水系统设计。与高炉炼铁水处理相比,氢冶金水处理在消防、浊环水(淬火冷却水和工艺冷却水)、除盐水系统设计存在差异性,在水系统设计时应重点关注。

在消防水系统设计上,应首先根据实际工程情况进行工艺危险分析(PHA)和火灾危险分析(FHA)。针对氢冶金项目的消防法规、标准并不健全,设计时应充分借鉴国内外冶金与化工行业设计标准,形成消防专篇设计并报送相关部门审批。

在浊环水(淬火冷却水和工艺冷却水)系统设计上,应充分考虑水中溶解气体和颗粒物分布对水处理单元的影响,同时不能忽略冷却后水温对冶炼工艺的影响。

在除盐水系统设计上,应充分考虑蒸汽发生系统和 CO₂ 吸收系统等用水点高质量用水需求。当用水点要求电导率(25 ℃)小于 0.1 μS/cm 时,设计时应充分考虑除盐水制备工艺和输配系统的可靠性。

(3)水系统技术研究。高效、节能和低碳是基于焦炉煤气的氢冶金水系统工程技术发展方向,其中

浊环水系统脱气与净化的高效耦合、基于水质特征的水处理反应器开发、水处理系统的资源协同与智能管控等都是具有良好前景的研究内容。

3 技术经济指标及碳排放分析

3.1 技术经济指标

以富氢焦炉煤气为气源的氢冶金工厂设计的主要技术经济指标见表 5。

表 5 项目主要技术经济指标
Table 5 Main technical and economic indicators of project

序号	类别	参数数值
1	年运行净时间/(h·a ⁻¹)	8 000
2	球团单耗/(t·t ⁻¹)	1.40
3	焦炉煤气单耗(标准态)/(m ³ ·t ⁻¹)	700
4	单位电耗/(kW·h·t ⁻¹)	约 200
5	氧气单耗(标准态)/(m ³ ·t ⁻¹)	约 30
6	氮气单耗(标准态)/(m ³ ·t ⁻¹)	约 40
7	补给工业水/(m ³ ·t ⁻¹)	约 1.6
8	压缩空气单耗(标准态)/(m ³ ·t ⁻¹)	约 21
9	涂覆材料 ^① /(kg·t ⁻¹)	约 4

①表示每吨原料氧化球团需要涂覆材料用量,其余为吨 DRI 需要的单耗。

以表 5 数据为基础,结合目前市场价格估算,氢冶金工艺运行成本(表 6)主要影响因素为高品位铁矿石和焦炉煤气的价格。

3.2 碳排放分析

根据《中国钢铁生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》^[29]及《温室气体排放核算方法与报告要求——第 5 部分:钢铁生产企业》(GB/T 32151.5—2015)^[30]进行计算,以富氢焦炉煤气为还原气源的氢冶金工艺,其吨 DRI 的碳排放为 433.04 kg,见表 7。

根据国内某钢铁联合企业的铁前工序指标计算,其吨铁的碳排放为 1 318.80 kg,基于焦炉煤气零重整氢冶金流程的吨铁碳排放为 543.85 kg,见表 8。

根据上述结果显示,以焦炉煤气零重整的氢冶金工艺与传统高炉铁前系统相比,生产 1 t 铁减少 CO₂ 排放 774.9 kg,减排量达 58.8%,减碳效果显著。

表 6 基于焦炉煤气的氢冶金工艺运行成本估算

Table 6 Cost estimation on hydrogen metallurgy of coke oven gas				
序号	成本项目	吨 DRI 单耗	单价/元	单位成本/(元·t ⁻¹)
1	氧化球团	1.4 t	951	1 331.4
2	涂覆材料	4 kg ^①	0.6	2.4
3	燃料及动力			563.6
1)	电	200 kW·h	0.5	100
2)	生产新水	1.6 m ³	5	8
3)	压缩空气(标准态)	21 m ³	0.1	2.1
4)	氮气(标准态)	40 m ³	0.15	6
5)	氧气(标准态)	30 m ³	0.50	15
6)	焦炉煤气(标准态)	700 m ³	0.60	420
7)	其他燃动	—	—	5
4	工资及附加	—	—	7.5
5	制造费用	—	—	100
6	DRI 制造成本	—	—	1 997.4

①为吨氧化球团消耗的涂覆材料量。

表 7 基于焦炉煤气氢冶金的碳排放情况

Table 7 Carbon emission based on hydrogen metallurgy of coke oven gas				
序号	项目	吨 DRI 单耗	CO ₂ 排放因子	吨 DRI 的 CO ₂ 排放
1	电力产生的排放	200 kW·h	0.581 0 kg/(kW·h)	116.20 kg
2	焦炉煤气折算的排放	700 m ³	0.762 2 kg/m ³	533.54 kg
3	产品 DRI 固定的碳 ^①	—1 t	91.7 kg/t	—91.7 kg
4	CO ₂ 捕集固定的碳 ^②	—125 kg	1 000 kg/t	—125 kg
	碳排放合计			433.04 kg

①产品 DRI 中固定碳质量分数为 2.5%;②生产 1 t DRI 会捕集 125 kg 的 CO₂。

表 8 高炉流程与氢冶金流程的吨铁碳排放情况对比

Table 8 Carbon emission of hydrogen metallurgy on coke oven gas						
工序	高炉流程			氢冶金流程		
	吨工序产品的 CO ₂ 排放量/kg	铁比系数 ^① /(t·t ⁻¹)	吨铁 CO ₂ 排放量/kg	吨工序产品的 CO ₂ 排放量/kg	铁比系数/(t·t ⁻¹)	吨铁 CO ₂ 排放量/kg
焦化	980	0.381 6	373.97	—	—	—
烧结	163.5	1.394 5	228.00	—	—	—
球团	80.3	0.096 9	7.78	80.3	1.38	110.814
高炉	709	1	709.00	—	—	—
氢冶金	—	—	—	433.04	1	433.04
合计			1 318.75			543.85

①铁比系数指生产吨铁消耗的工序产品质量。

4 结论

(1)新型氢冶金工艺仅使用氧化球团和富氢气

体为原料,不使用烧结矿和焦炭;首次采用焦炉煤气零重整直接还原技术,取消了复杂的气体重整系统,进一步简化了流程;总图布置紧凑,吨铁占地面积约 0.1 m²,大幅节约用地;氢冶金系统组成复杂,对生

产操作和智能化要求较高。

(2)氢冶金产品为高纯直接还原铁,根据后续工序匹配可生产冷态或热态直接还原铁,也可压制成热压铁块;产品无有害杂质元素,具有很好的成本优势,是优于废钢的优质炼钢原料,对缓解中国废钢短缺和提升钢铁产品质量有重要意义。

(3)基于富氢焦炉煤气为还原气源的氢冶金工艺,没有烧结、焦化工序及配套的脱硫脱硝环保设施,不使用煤粉和焦炭,比传统高炉铁前系统的环保优势明显;以焦炉煤气零重整氢冶金短流程从源头减少碳素使用,与传统高炉铁前流程相比,碳减排达 58.8%,减碳效果显著。

(4)基于中国能源和资源禀赋,发展以富氢焦炉煤气为气源的“氢冶金+电炉”短流程,构建“以氢代碳”的钢铁生产用能新体系,是中国钢铁行业现阶段实现“双碳”目标的重要方向,对引领中国钢铁行业实现绿色、低碳、高质量发展具有重要意义。

参考文献:

[1] 吕兵,李岩. 徐匡迪:中国须及早制定 CO₂ 减排路线图[N]. 中国冶金报,2009-11-12(A01). (LÜ Bing, LI Yan. XU Kuangdi:China must formulate a roadmap for CO₂ emission reduction as early as possible[N]. China Metallurgical News, 2009-11-12(A01).)

[2] 干勇. 钢铁生产流程发展及先进钢铁材料研究的展望[J]. 宝钢技术,2007(1):1. (GAN Yong. Prospects for development of iron and steel production process and research on advanced steel products[J]. Baosteel Technology,2007(1):1.)

[3] 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. (YANG Tian-jun, ZHANG Jian-liang, LIU Zheng-jian, et al. Low carbon ironmaking is imperative in facing environment challenge[J]. Ironmaking,2021,40(4):1.)

[4] 王新东,郝良元. 现代炼铁工艺及低碳发展方向分析[J]. 中国冶金,2021,31(5):1. (WANG Xin-dong, HAO Liang-yuan. Analysis of modern ironmaking technology and low-carbon development direction[J]. China Metallurgy,2021,31(5):1.)

[5] 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. (ZHANG Fu-ming, CHENG Xiang-feng, YIN Guang-yu, et al. Development of low-carbon green ironmaking technology at home and abroad[J]. Iron-making,2021,40(5):1.)

[6] 张玉柱,田铁磊. 低碳炼铁技术研究现状及展望[J]. 河北冶金,2022(2):1. (ZHANG Yu-zhu, TIAN Tie-lei. Research status and prospect of low carbon ironmaking technology[J]. Hebei Metallurgy,2022(2):1.)

[7] 王婷婷. 世界氢冶金技术发展现状分析[J]. 中国钢铁业,2021(5):46. (WANG Ting-ting. Analysis of the development

status of hydrogen metallurgy technology in the world[J]. China Steel,2021(5):46.)

[8] 王新东,“融合协同”的绿色工程管理及方法应用[J]. 钢铁,2022,57(11):1. (WANG Xin-dong. Green project management method and application of "integration and coordination" [J]. Iron and Steel,2022,57(11):1.)

[9] 杨凯,于勇:氢冶金技术创新与应用将带来革命性变革[N]. 中国冶金报,2021-07-08(001). (YANG Kai. YU Yong: The innovation and application of hydrogen metallurgy technology will bring revolutionary changes[N]. China Metallurgical News,2021-07-08(001).)

[10] 郑少波. 氢冶金基础研究及新工艺探索[J]. 中国冶金,2012,22(7):1. (ZHENG Shao-bo. Basic research on hydrogen metallurgy and new ironmaking idea-process[J]. China Metallurgy,2012,22(7):1.)

[11] 周颖,周红军,徐春明. 中国钢铁工业低碳绿色生产氢源思考与探索[J]. 化工进展,2022,41(2):1073. (ZHOU Ying, ZHOU Hong-jun, XU Chun-ming. Exploration of hydrogen sources for the low-carbon and green production in the steel industry in China[J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2022,41(2):1073.)

[12] 刘然,张智峰,刘小杰,等. 低碳绿色炼铁技术发展动态及展望[J]. 钢铁,2022,57(5):1. (LIU Ran, ZHANG Zhi-feng, LIU Xiao-jie, et al. Development trend and prospect of low-carbon green iron making technology[J]. Iron and Steel, 2022,57(5):1.)

[13] 高建军,朱利,克俊超,等. 晋南钢铁高炉喷吹富氢气体工业化实践[J]. 钢铁,2022,57(9):42. (GAO Jian-jun, ZHU Li, KE Jun-chao, et al. Industrialized application of hydrogen-rich gas injection into blast furnace of Jinnan Steel[J]. Iron and Steel,2022,57(9):42.)

[14] 王新东,胡启晨,张晓冬. 发挥铁前系统潜力 赶超行业先进水平[J]. 河北冶金,2022(7):1. (WANG Xin-dong, HU Qi-chen, ZHANG Xiao-dong. Developing the full potential of preironmaking system to catch up with the advanced level of the industry[J]. Hebei Metallurgy,2022(7):1.)

[15] 吴耀光,肖步庆,朱立光,等. 电炉炼钢钢铁原料的现状分析与展望[J]. 钢铁,2021,56(11):55. (WU Yao-guang, XIAO Bu-qing, ZHU Li-guang, et al. Current situation analysis and prospect of iron and steel raw material for electric arc furnace steelmaking[J]. Iron and Steel,2021,56(11):55.)

[16] 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. (CHE Yan-min, CAO Li-xia, LIU Jin-zhe. Large scale hydrogen production and its application and prospect in iron and steel industry[J]. China Metallurgy,2022,32(9):1.)

[17] 王晶,王朋. 国内外氢冶金技术研究进展[J]. 河北冶金,2022(4):1. (WANG Jing, WANG Peng. Research progress of hydrogen metallurgy technology in the domestic and overseas [J]. Hebei Metallurgy,2022(4):1.)

[18] 赵志龙,唐惠庆,郭占成. 高磷铁矿气基还原冶炼低磷铁[J]. 北京科技大学学报,2009,31(8):964. (ZHAO Zhi-long,

- TANG Hui-qing, GUO Zhan-cheng. Dephosphorization of high-level phosphorus iron ore by gas-based reduction and melt separation[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2009, 31(8): 964.)
- [19] 邵剑华, 郭占成, 唐惠庆. 还原气氛对流态化还原铁矿粉黏结失流的影响[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(3): 273. (SHAO Jian-hua, GUO Zhan-cheng, TANAG Hui-qing. Influence of reducing atmosphere on the sticking during reduction of iron ore fines in a fluidized bed[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2013, 35(3): 273.)
- [20] 鲁峰, 温良英, 韩旭, 等. CO 和 H₂ 气体还原氧化铁的微观行为及新生铁晶形貌研究[C]//第十一届中国钢铁年会论文集. 北京: 中国金属学会, 2017: 361. (LU Feng, WEN Liang-ying, HAN Xu, et al. Study on the microscopic behavior and metallic iron morphology in the process of CO and H₂ fluidized reductions for iron oxide particles[C]//Proceedings of the 11th China Iron and Steel Annual Conference. Beijing: The Chinese Society for Metals, 2017: 361.)
- [21] 范晋峰, 白明光, 季爱兵. 焦炉煤气制还原气“氢冶金”工艺探索和项目介绍[C]//第十三届中国钢铁年会论文集(摘要). 北京: 中国金属学会, 2022: 65. (FAN Jin-feng, BAI Ming-guang, JI Ai-bing. Process exploration of "Hydrogen Metallurgy" and project introduction for producing reducing gas from coke oven gas[C]//Proceedings of the 13th China Iron and Steel Annual Conference(Abstract). Beijing: The Chinese Society for Metals, 2022: 65.)
- [22] 张奔, 赵志龙, 郭豪, 等. 气基竖炉直接还原炼铁技术的发展[J]. 钢铁研究, 2016, 44(5): 59. (ZHANG Ben, ZHAO Zhi-long, GUO Hao, et al. Development of direct-reduction iron-making technology in gas-based shaft furnace[J]. Research on Iron and Steel, 2016, 44(5): 59.)
- [23] 任冰朗. 高温转炉煤气与焦炉煤气混合重整研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2022. (REN Bing-lang. The Mixed Reforming of High Temperature Converter Gas and Coke Oven Gas[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2022.)
- [24] 张淑娇, 董丽丽, 王力川, 等. 焦炉煤气净化工艺的研究进展[J]. 山东化工, 2021, 50(23): 79. (ZHANG Shu-jiao, DONG Li-li, WANG Li-chuan, et al. Research progress in coke oven gas purification process[J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50(23): 79.)
- [25] 于恒, 周继程, 酆秀萍, 等. 气基竖炉直接还原炼铁流程重构优化[J]. 中国冶金, 2021, 31(1): 31. (YU Heng, ZHOU Ji-cheng, LI Xiu-ping, et al. Reconstruction optimization of gas-based shaft furnace direct reduction ironmaking process[J]. China Metallurgy, 2021, 31(1): 31.)
- [26] 王新东, 张弛, 孙宇佳, 等. 河钢唐钢新区绿色制造技术应用实践[J]. 环境工程, 2022, 40(7): 179. (WANG Xin-dong, ZHANG Chi, SUN Yu-jia, et al. Application practice of green manufacturing technology in Tangsteel new district of HBIS group[J]. Environmental Engineering, 2022, 40(7): 179.)
- [27] 吕子强. 钢铁企业用水网络的解析及优化研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2020. (LÜ Zi-qiang. Analysis and Optimization of Water Network for Steel Plants[D]. Shenyang: Northeastern University, 2020.)
- [28] 朱庆山. 超低碳炼铁技术路径分析[J]. 化工进展, 2022, 41(3): 1391. (ZHU Qing-shan. Development pathway analyses for various ironmaking routes with ultra-low CO₂ emission [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(3): 1391.)
- [29] 国家发展和改革委员会. 中国钢铁生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)[Z]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2013-10-15. (National Development and Reform Commission. Guidelines for Accounting Methods and Reporting of Greenhouse Gas Emissions by Chinese Iron and Steel Manufacturers (Trial)[Z]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2013-10-15)
- [30] GB/T 32151.5—2015. 温室气体排放核算与报告要求 第5部分: 钢铁生产企业[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015. (GB/T 32151.5—2015. Requirements of the Greenhouse Gas Emission Accounting and Reporting—Part 5: Iron and Steel Production Enterprise[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.)