炼铁流程用氢减碳潜力分析

滕 飞[1]，郭培民[1,2]，孔令兵[1,2]，王 磊[1,2]
（1. 钢铁研究总院 先进钢铁流程及材料国家重点实验室，北京 100081；2. 钢研晟华科技股份有限公司，北京 100081）

摘要：本文对氢气高炉喷吹、氢气还原铁等炼铁领域的几种工艺用氢降低 CO_2 排放潜力效果进行了分析。结果表明：氢气喷入高炉可以降低 CO_2 排放，减排最大潜力为 21.4%，但吨铁氢气耗量超过 700 m^3；焦炉煤气喷入高炉，可以降低煤粉喷吹量，有一定的节能效果，50 m^3 的焦炉煤气可直接减排 59.4 kg 的 CO_2，综合减排 20 kg 的 CO_2；天然气喷吹可置换喷吹用煤粉，直接减碳量与喷吹天然气量的比值为 1.3 kg/m^3，取得一定的减排效果，但是我国天然气资源少、价格高，严重影响了实施的经济性；焦炉煤气生产直接还原铁，吨铁消耗为 600 m^3，当独立焦化厂产生的焦炉煤气完全用于生产直接还原铁时，吨铁可减少 CO_2 排放 78.8%。纯氢还原炼铁工艺生产 1 t 金属铁消耗 800 m^3 纯氢，通过绿电和电解水制氢吨钢电耗达到 4 000 kW·h，考虑到熔化及其它各种电消耗，吨钢总电耗达到 4 800 kW·h，远远高于废钢熔化的电能。

关键词：炼铁；氢气；焦炉煤气；天然气；氢还原；碳减排
中图分类号：X511；X701 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)01－0018－06
doi：10.13403/j.sjqt.2022.01.003

Potential analysis on carbon dioxide reduction with hydrogen in iron-making process

TENG Fei[1], **GUO Peimin**[1,2], **KONG Lingbing**[1,2], **WANG Lei**[1,2]
(1. *State Key Laboratory of Advance Steel Process and Products, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing* 100081, *China*; 2. *CISRI Sunward Technology Co., Ltd., Beijing* 100081, *China*)

Abstract: The CO_2 emission reduction potential of hydrogen in several processes of iron-making, such as hydrogen blast furnace injection and hydrogen reduced iron, is analyzed. The results show that hydrogen injection into the blast furnace can reduce CO_2 emission with a maximum potential of 21.4%, but the hydrogen consumption per ton of iron is more than 700 m^3; coke oven gas injection into the blast furnace can reduce the amount of pulverized coal blowing, which has a certain energy-saving effect, and 50 m^3 of coke oven gas can directly reduce 59.4 kg of CO_2 and a combined emission reduction of 20 kg of CO_2; natural gas blowing can replace pulverized coal for blowing, and the relationship between direct carbon reduction and natural gas blowing is 1.3 kg/m^3 natural gas, which achieves a certain emission reduction effect, but China has few natural gas resources and high prices, which seriously affects the economics of implementation; coke oven gas produces direct reduced iron, the consumption of iron per ton is 600 m^3, and when the coke oven gas produced by the independent coking plant is fully used to produce direct reduced iron, the iron per ton can reduce CO_2 emissions by 78.8%. The pure hydrogen reduction iron-making process consumes 800 m^3 of pure hydrogen per ton of iron metal, and the electricity consumption for hydrogen production through green electricity and electrolytic water reaches 4 000 kW·h per ton of steel, and taking into account melting and various other electricity consumptions, the total electricity consumption reaches 4 800 kW·h per ton of steel, which is much

收稿日期：2021－10－15；**修回日期**：2021－12－07
基金项目：国家重点研发计划资助项目(2019YFC1905200)
作者简介：滕 飞(1987—)，男，工程师，从事烧结、球团工艺技术等方面的研究。
通讯作者：郭培民(1975—)，男，博士，教授级高级工程师，从事炼铁新技术方面的研究工作。

中国知网 https://www.cnki.net

higher than the electricity for scrap melting.

Key words: iron-making; hydrogen; coke oven gas; natural gas; hydrogen reduction; carbon emission reduction

随着双碳目标的提出，2020 年至今围绕钢铁行业的减碳途径和技术一直处于热议当中。由于钢铁行业的 CO_2 排放集中在炼铁系统，国内外不少学者对此展开了研究。富氢直接还原是海绵铁的主要生产工艺，每年全世界生产超过 1×10^8 t 的海绵铁[1-2]。富氢还原工艺主要包括 Midrex、HYL-Ⅲ等竖炉还原工艺，也有粉矿流化床工艺，如 Finmet 等。但这些工艺更适合天然气丰富的国家，而我国天然气资源缺乏，导致我国氢气竖炉发展滞后。上世纪 50 年代，已经开发了全氢粉矿还原工艺，如 H-Iron 法，在 540 ℃、2.75 MPa 下用氢气还原铁矿粉。这种工艺由于低温下氢气利用率过低(仅 5%)，经济性差，效果差于富氢竖炉还原工艺[3-8]。我国曾在上世纪 70～80 年代开展了全氢还原钒钛磁铁矿研究工作，开展了吨级/小时的中间试验[9]。在高炉中喷吹焦炉煤气、天然气已在国内外一些钢厂开展试验，结果表明有潜力降低高炉炼铁的碳排放[10-11]。我国是世界上第一大粗钢生产国，其长流程钢铁产量占比高，为了寻找更适合我国的减碳技术，本文重点阐述了炼铁领域中的主要几种用氢减碳技术，并就其技术层面上的碳减排潜能进行了详细分析。

1　高炉喷吹富氢气体

上世纪高炉已有喷吹天然气和重油的实践，随着降低生产成本的考虑，成功开发了高炉喷吹煤粉技术。目前 1 t 铁水，焦炭、喷吹煤粉的使用量分别约为 350、150 kg[12]。本研究团队前期已对高炉喷吹纯氢、焦炉煤气的减碳潜力进行了分析[13-14](图 1、2)，喷吹氢气，原则上可以完全取代喷吹的煤粉。对于高炉炼铁系统来说，吨铁的耗煤量约为 700 kg(350 kg 焦炭×1.35(煤炼焦系数)+150 kg 喷煤+80 kg 烧结用煤)，减排最大潜力为 21.4%。该技术减碳效果显著，但氢气耗量惊人，喷吹 100 m^3 的纯氢气，才能节碳 15 kg，相当于少喷煤 19 kg，要想取代 150 kg 煤粉，氢气耗量超过 700 m^3，大量的过剩氢气进入高炉煤气中。因此，纯氢喷入高炉中，氢气的置换效率不高，经济性差。除非某一天煤的价格远高于氢气的价格或碳税很高，这种技术才有应用的可能性。

喷吹焦炉煤气也有一定的减碳效果，50 m^3 的焦炉煤气可减少 16.2 kg 的碳，相当于代替 20 kg的煤粉，直接减排 59.4 kg 的 CO_2。但是由于焦炉煤气中含有 20%～30% 的 CH_4 及 C_nH_m，而高炉内只能消耗部分裂解气，生成的 CO_2 和剩余的 CO 将会进入高炉煤气中。考虑到高炉煤气最终燃烧释放的 CO_2，则焦炉煤气的减排效果不高，50 m^3 焦炉煤气只可减排 20 kg 的 CO_2。

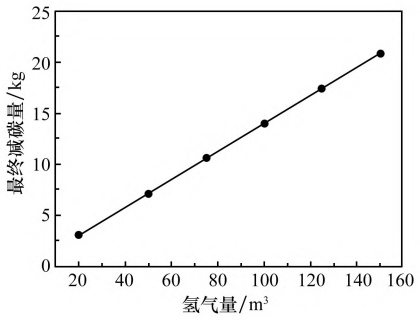


图 1　吨铁喷吹氢气量对减碳量的影响

Fig. 1　Effect of hydrogen gas volume on carbon saving of tons of iron injection

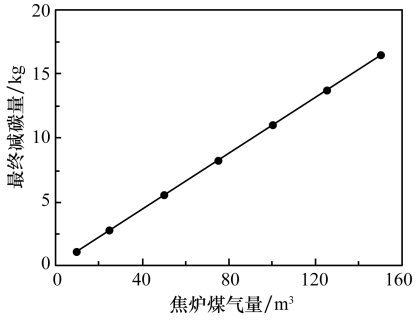


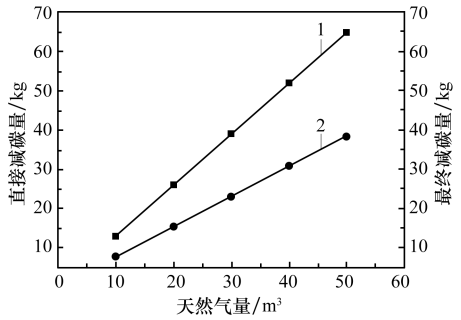
图 2　吨铁喷吹焦炉煤气量对减碳量的影响

Fig. 2　Effect of coke oven gas volume on carbon saving of tons of iron injection

喷吹天然气与喷吹氢气、焦炉煤气类似，可以降低喷吹煤粉的使用量。本文利用相似方法得到天然气的直接减碳效果与综合减碳效果，见图 3。直接减碳量与喷吹天然气量之比为 1.3

中国知网　https://www.cnki.net

kg /m^3,考虑天然气裂解未充分利用而进入高炉煤气中的最终燃烧，则最终减碳量与喷吹天然气之比为 0.77 kg /m^3。可见通过风口喷吹天然气可以取得一定的减碳效果，而目前困扰高炉喷吹天然气的主要原因是天然气的资源稀缺导致的喷吹成本高。



1—直接减碳量；2—最终减碳量。

图 3 高炉喷吹天然气预期的减碳效果

Fig. 3 Exepected carbon reduction effect of natural gas injection into blast furnace

2 富氢还原

目前，我国天然气缺乏，焦炉煤气无疑成为富氢气体研究的热点。中晋太行矿业有限公司在山西左权建设了30万吨/年的焦炉煤气直接还原铁示范工程，尚处于调试之中。宣钢、宝钢宣布建设焦炉煤气直接还原铁生产线。本研究团队 2006 年在国家十一五支撑课题资助下开始研究焦炉煤气直接还原铁工艺。本文就焦炉煤气减碳潜力近行了重点阐述。

焦炉煤气直接还原铁流程见图 4[15]。经计算，1 t 直接还原铁消耗 600 m^3 焦炉煤气，排放 425 kg 的 CO_2(未计算电力制备过程产生的 CO_2)。假定独立焦化厂产生的焦炉煤气都用于生产直接还原铁，则与高炉炼铁相比，吨铁减少 CO_2 排放量为 1 575 kg，碳减排幅度达到 78.8%。对于有焦化厂的钢铁联合企业，考虑到高炉热风炉等装备对焦炉煤气的需求，假定多余的副产焦炉煤气量可达 200 m^3，并全部用于生产直接还原铁。1 t 焦炭用于高炉可生产近 3 t 生铁，总体排放约 6 t 的 CO_2。200 m^3 焦炉煤气可生产 1/3 t 直接还原铁，吨铁 CO_2 减排最大额度可达 8.5%(不考虑后续的熔化耗电产生的 CO_2 排放)。

因此，在大规模绿氢炼铁技术到来之前，开发焦炉煤气直接还原铁是目前降低钢铁行业碳排放的有效途径之一。

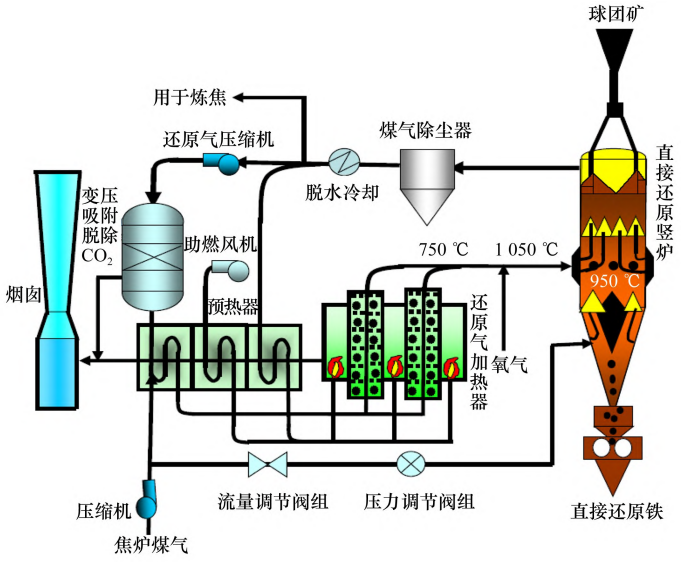


图 4 焦炉煤气直接还原铁工艺流程

Fig. 4 Process flow of coke oven gas direct reduction of iron

钢铁研究总院、东北大学等单位曾提出了煤制氢气－氢还原路线，其中煤制氢过程又包括水煤浆制气、水煤气变换以及脱硫、脱除 CO_2 等工序，煤制氢气，犹如焦炉煤气，属于灰氢，在此就不讨论它的减排潜能了。

中国知网 https://www.cnki.net

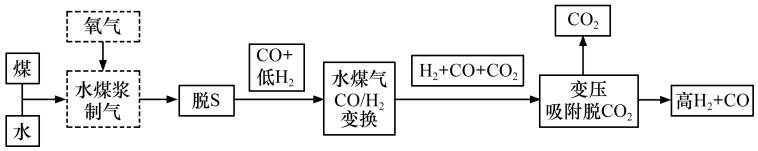


图 5　煤制氢富氢气体示意

Fig. 5　Schematic diagram of hydrogen rich gas from coal to hydrogen

3　纯氢还原

纯氢还原可以最大幅度地减少碳排放量，但其能否实施取决于我国绿电、绿氢的进展。首先是绿电，以太阳能、风能发电等绿电技术得到国家高度重视，但是太阳能、风能属于间断性的，不稳定，有效作业时间短。另外占地面积大、尚不可预测的环境风险也是需要考虑的问题。因此这些新型能源能否替代火电成为我国能源的主要载体，直接关系到我国双碳目标的实现。氢能属于二次能源，不像化石能源直接来自于大自然，它是需要进行转换的。目前的焦炉煤气、煤化工等都可以得到纯氢，但是它们均属于灰氢。依托绿电的水电解技术，将为氢还原提供优质氢气。不过目前的单体制氢装备偏小（~1 000 000 m^3/h），只能应用在有色及粉末冶金等用氢较少的行业，而对于炼铁的氢还原，对氢气消耗量过大。在绿电来临之前，电解水制氢技术还需大力攻关以为将来的大规模、低成本用氢提供技术和装备保障。

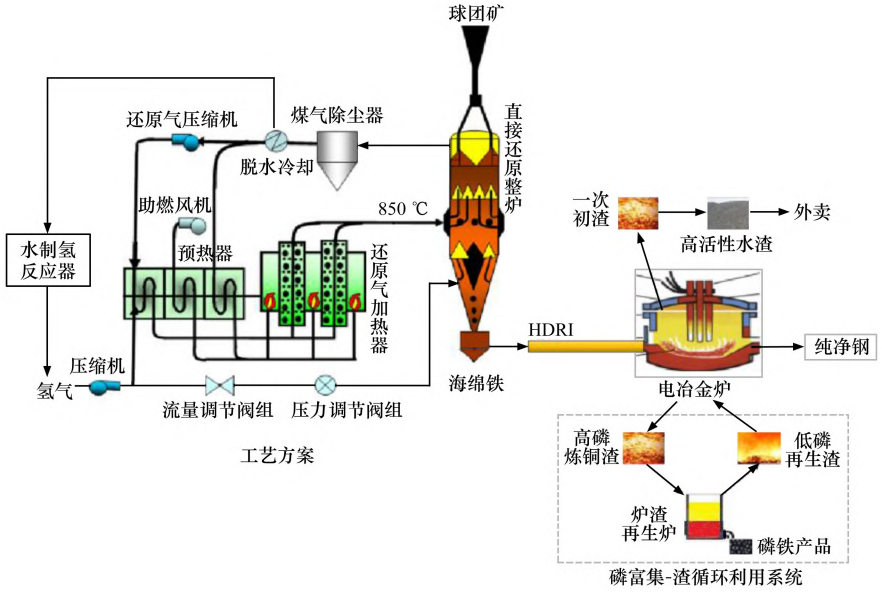


图 6　纯氢还原路线之一

Fig. 6　One of pure hydrogen reduction routes

纯氢还原铁 + 熔分炼钢流程见图 6 所示，本流程设计基于绿氢、绿电。它包括竖炉直接还原铁和电炉熔分两部分，而氢气竖炉直接还原铁系统又包括竖炉还原、绿电制氢、氢气循环、氢气加热系统等。竖炉还原得到的海绵铁经过热压块后热装送入后续电炉进行冶炼得到合格的钢水。1 t 铁理论耗氢气量为 600 m^3。在氢气循环过程中，由于竖炉还原系统使用氮气作为均压气体和氮密封等会使少量氮气进入氢气中，如果氢气完全循环，则产生氮气循环富集效应，因此必须有部分炉顶氢气不参与循环。氮平衡可通过下式：

$$[N]_0 \cdot Q_0 + Q_2 = [N] \cdot Q_1 \tag{1}$$

式中：$[N]_0$ 为除尘脱水后循环气氮体积分数，%；$[N]$ 为炉顶还原气中氮体积分数，%；Q_0 为除尘脱水后循环气流量，$Nm^3/t\text{-}_{铁}$；Q_1 为炉顶还原气吨铁流量，$Nm^3/t\text{-}_{铁}$；Q_2 为竖炉冶炼过程带入的氮气流量，$Nm^3/t\text{-}_{铁}$。

中国知网　https://www.cnki.net

除尘脱水后不循环气流量 Q_3 与 Q_1、Q_0 的关系如下：

$$Q_3 = Q_1 - 600 - Q_0 \tag{2}$$

$[N]_0$ 和 $[N]$ 的关系：

$$[N]_0 = \frac{[N]\cdot Q_1}{Q_1 - 600} \tag{3}$$

利用式(1)～式(3)可得：

$$Q_3 = Q_1 - 600 - \frac{[N]\cdot Q_1 - Q_2}{Q_1\cdot[N]}\cdot(Q_1 - 600) \tag{4}$$

Q_1 取 2 200 $Nm^3/t\text{-}_{铁}$，Q_2 取 10 $Nm^3/t\text{-}_{铁}$，可得到图7。假定炉顶煤气中含氮量为3%，则 Q_3 为242 $Nm^3/t\text{-}_{铁}$。吨铁循环氢气中部分要用于加热氢气加热炉，考虑到加热炉的燃气消耗，建议氢气中的氮体积分数控制在3.5%水平，这样1 t铁总耗氢气量为800 m^3。

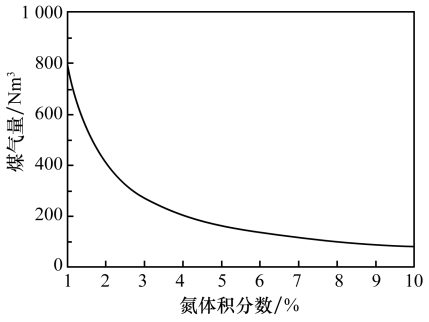


图7 炉顶煤气氮体积分数与不循环脱水煤气量关系

Fig. 7 Relationship between nitrogen content of furnace top gas and amount of non circulating dehydrated gas

若电解水制氢1 m^3，消耗5 kW·h，则生产1 t铁，氢气制备实际需要4 000 kW·h，再考虑氧气球团制备、氮气消耗、各种过程电耗以及熔化电耗，1 t钢电耗约为4 800 kW·h，很显然废钢冶炼电耗明显低于氢还原炼钢电耗，二者相差约一个数量级。按照等价热值计算，1 t钢耗能 $4\,800\times3\,600=17.28$ GJ。这个数据已经超过了目前我国钢材的制备能耗(16.12 GJ)，如果再考虑炼钢、连铸及轧机等，纯粹的氢还原能耗将超过19.05 GJ。纯氢还原炼铁工艺，可以实现碳零排放，但氢制备过程电耗高，吨钢能耗与碳冶金相比，反而上升。

对于规模不大的钢厂(如欧洲某些国家的钢厂)，用绿电绿氢还原炼钢是可以接受的，但对于我国数亿吨的钢铁规模，耗电量是惊人的。例如，按照1亿吨钢来自氢冶炼路线，则总耗电为 4.8×10^{12} kW·h，2020年我国发电总量为 7.779×10^{13} kW·h[16]，占比达到6.17%；如果2亿吨钢来自氢冶金路线，总耗电量将达到 9.6×10^{12} kW·h。鉴于我国钢铁规模巨大，用氢还原炼钢可以显著降低 CO_2 排放量，但是绿电消耗过大。

除了上述几种用氢渠道外，目前烧结用氢、氧化球团用氢也在开展研究，但毕竟这部分能耗占比不高，在此不再赘述。

4 总 结

(1) 氢气喷入高炉可以降低 CO_2 排放，减排最大潜力为21.4%，但要想完全取代喷吹煤粉，吨铁氢气耗量超过700 m^3，短期不经济。这种技术要等待氢气价格远低于煤价或碳税很高时才有其应用经济性。

(2) 焦炉煤气喷入高炉，可以降低煤粉喷吹量，50 m^3 的焦炉煤气可代替20 kg的煤粉，有一定的减碳效果。天然气喷吹可置换喷吹用煤粉，直接减碳量与喷吹天然气量之比为1.3 kg/m^3，最终减碳量与喷吹天然气量之比为0.77 kg/m^3。

(3) 采用焦炉煤气生产直接还原铁，吨铁消耗600 m^3，吨铁 CO_2 排放量可减少78.8%。在大规模绿氢炼铁技术到来之前，开发焦炉煤气直接还原铁是目前降低钢铁行业碳排放的有效途径之一。

(4) 纯氢还原炼铁工艺，可以实现零碳排放，但耗氢量过大，吨钢总电耗达到4 800 kW·h，远远高于废钢熔化的电能。

参考文献：

[1] 石禹. 世界直接还原铁产量首次超过亿吨[J]. 冶金管理,2020(18):30－32.
SHI Yu. The direct reduced iron production in the world first exceeded 100 million tons[J]. China Steel Focus,2020(18):30－32.

中国知网 https://www.cnki.net

[2] 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):55－62.
WU Yaoguang,XIAO Buqing,ZHU Liguang,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):55－62.

[3] 苏亚红. 我国钢铁行业氢冶金发展现状及建议[N]. 中国冶金报,2021－09－15(001).
SU Yahong. Development status and suggestions of hydrogen metallurgy in China′s iron and steel industry[N]. China metallurgical News,2021－09－15(001).

[4] 李建鹏. 喷吹煤气高炉工艺中煤造气合理 H_2 含量的研究[D]. 唐山:华北理工大学,2016.
LI Jianpeng. Study on reasonable H_2 content of gas in the gas-injection BF process[D]. Tangshan:North China University of Science and Technology,2016.

[5] 郭同来. 高炉喷吹焦炉煤气低碳炼铁新工艺基础研究[D]. 沈阳:东北大学,2015.
GUO Tonglai. Fundamental study on innovative process of low-carbon blast furnace ironmaking by coke oven gas injection[D]. Shenyang:Northeastern University,2015.

[6] TANG Jue,CHU Mansheng,LI Feng,et al. Development and progress on hydrogen metallurgy[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials,2020,27(6):713－723.

[7] 李少飞,顾华志,黄奥. 钢铁行业氢冶金技术的发展初探[J]. 耐火材料,2021,55(4):360－363.
LI Shaofei,GU Huazhi,HUANG Ao. Development of hydrogen metallurgy technology in iron and steel industry[J]. Refractories,2021,55(4):360－363.

[8] 唐珏,储满生,李峰,等. 我国氢冶金发展现状及未来趋势[J]. 河北冶金,2020(8):1－6;51.
TANG Jue,CHU Mansheng,LI Feng,et al. Development status and future trend of hydrogen metallurgy in China[J]. Hebei Metallurgy,2020(8):1－6;51.

[9] 朱凯荪. 我国流态化直接还原的开发及其在融熔还原中的发展[J]. 钢铁,1985(7):52－56.
ZHU Kaisun. Exploitation of fluidizing direct reduction and its application to fusion reduction in China[J]. Iron and Steel,1985(7):52－56.

[10] 马东华. 论高炉炼铁节能降耗及资源合理利用技术[J]. 冶金与材料,2020,40(6):71－72.
MA Donghua. Study on energy saving and consumption reduction and rational utilization of resources in blast furnace ironmaking process[J]. Metallurgy and materials,2020,40(6):71－72.

[11] 王瑞军. 高炉喷吹焦炉煤气进展[J]. 包钢科技,2019,45(1):32－36.
WANG Ruijun. Progress of coke oven gas for injection of blast furnace[J]. Science and Technology of Baotou Steel,2019,45(1):32－36.

[12] 郑伟成,XU Chunbao Charles,魏汝飞,等. 高炉喷吹生物炭研究进展[J]. 钢铁研究学报,2021,33(1):1－8.
ZHENG Weicheng,XU Chunmao Charles,Wei Rufei,et al. Injection of biochar into blast furnace:progress and prospects[J]. Journal of Iron and Steel Research,2021,33(1):1－8.

[13] 王磊,郭培民,孔令兵,等. 高炉风口喷吹焦炉煤气的减排能力分析[J]. 烧结球团,2021,46(4):78－83;98.
WANG Lei,GUO Peimin,KONG Lingbing,et al. Analysis on carbon emission reduction ability of blast furnace tuyere with COG injection[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(4):78－83;98.

[14] 孔令兵,郭培民,王磊,等. 喷吹的氢气在高炉内的还原行为[J]. 烧结球团,2020,45(6):1－4;46.
KONG Lingbing,GUO Peimin,WANG Lei,et al. Reduction behavior of hydrogen injected in blast furnace[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(6):1－4;46.

[15] 郭培民,赵沛. 低温快速冶金理论及技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2020.
GUO Peimin,ZHAO Pei. Theory and technology for fast metallurgy at low temperature[M]. Beijing:Metallurgical Technology Press,2020.

[16] 前瞻产业研究院. 2020 年中国电力行业发展现状分析[J]. 电器工业,2020(10):48－50.
Foresight Industry Research Institute. Analysis on the development status of China′s power industry in 2020[J]. China Electrical Equipment Industry,2020(10):48－50.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费，对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明。

中国知网　https://www.cnki.net