

工业技术

基于等离子体的低碳炼铁再造流程 模拟研究

王昊敏¹, 胡浩鑫², 夏维东², 陈仙辉^{2*}

(1. 中国科学技术大学化学与材料科学学院, 安徽 合肥 230001;

2. 中国科学技术大学热科学和能源工程系, 安徽 合肥 230001)

摘要: 设计了 2 个基于等离子体的高炉炼铁低碳再造流程。在 CO₂ 捕集分离的基础上, 分别回收高炉尾气中的 CO₂ 和还原气, 在等离子体的能量驱动下循环回高炉参与反应。使用 Aspen Plus 软件分别对 2 种再造高炉与传统高炉进行对照, 得到其物料与能量流, 并进一步通过灵敏度分析和焓分析得到本工艺在工业上改进的方向。2 种再造高炉工艺的实际焓效率分别为 82.7%、74.8%, 优于传统高炉, 并分别从能耗、碳排放和经济性 3 个方面与传统高炉进行对比, 论证了再造流程的可行性。

关键词: 高炉炼铁; 等离子体; 流程模拟; 焓分析; 碳排放; 能耗

中图分类号: TF5

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2024)12-0210-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.12.038

Simulation study on plasma-based renovated low carbon ironmaking process

WANG Hao-min¹, HU Hao-xin², XIA Wei-dong², CHEN Xian-hui^{2*}

(1. School of Chemistry and Materials Science, University of Science and Technology of China,

Hefei 230001, China; Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and

Technology of China, Hefei 230001, China)

Abstract: Two low-carbon renovation processes based on plasma are designed for blast furnace ironmaking to reduce carbon dioxide emission. On the basis of CO₂ capture and separation, CO₂ and the reduction gases in the blast furnace tail gas are recycled respectively, and driven by the plasma back to the blast furnace to participate in the reduction reaction again. Aspen Plus software is utilized to simulate these two renovation processes and a traditional blast furnace model, respectively. The material flow and energy flow are obtained, and the industrial improvement direction for this task is further obtained through sensitivity analysis and exergy analysis. The actual exergy efficiencies of these two renovation blast furnace processes are 82.7% and 74.8%, respectively, which are better than those of the traditional blast furnace. Compared with the traditional blast furnace from three aspects of energy consumption, carbon dioxide emission and economy, the feasibility of these renovation processes are demonstrated.

Key words: blast furnace ironmaking; plasma; process simulation; exergy analysis; carbon dioxide emission; energy consumption

钢铁工业作为能源密集型行业, 是全世界最大的 CO₂ 排放来源之一。2020 年我国钢铁产量超 10 亿 t, 钢铁行业碳排放占全国碳排放的 15% 以上^[1]。目前最优化的高炉炼铁流程, 生产每吨粗钢排放的碳排放在 1.5 t 以上^[2], 其中高炉组件排放的 CO₂ 占总流程的 70% 以上。随着全世界对碳排放的控制越来越严格, 钢铁行业的减排具有重大意义。低温等离子体以独特的化学活性和高焓使许多传统方法难以实现的化学反应易于发生, 在钢铁工

业中已经有不少研究^[3-5]。相比传统的燃烧加热煤气的技术, 等离子体加热可将煤气快速加热至 2 000°C 以上。由电力驱动等离子体加热替代燃烧供热, 能在很大程度上减轻钢铁行业对于化石能源的依赖, 从而降低高炉碳排放。本工艺通过等离子体为炼铁高炉供能, 分别构建了等离子体耦合 CO₂ 循环高炉 (PCDR) 模型与等离子体耦合 CO/H₂ 循环高炉 (PRGR) 模型, 并与现有传统高炉工艺进行焓分析、CO₂ 排放与经济等多方面对比。

收稿日期: 2024-02-16; 修回日期: 2024-10-26

基金项目: 国家杰出青年基金项目 (12105282)

作者简介: 王昊敏 (1999-), 男, 硕士生; 陈仙辉 (1992-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为低温等离子体应用, 通讯联系人, chenxian@ustc.edu.cn。

1 工艺流程

现有高炉炼铁将烧结矿料和焦炭分层堆放在高炉中;在炉腹底部喷吹热风与焦炭燃烧为高炉供热,同时燃烧生成 CO 和 CO₂;CO 与焦炭还原铁矿石产生铁水,产生的气体由高炉炉顶排出,高炉煤气含有 CO₂、CO 和大量 N₂。为了减少焦炭消耗量,在喷吹热风的同时吹入煤粉以部分代替焦炭燃烧。PCDR 工艺按照高炉炼铁现有的工艺条件要求,高炉在最低焦比的情况下,将以 CO 和 H₂ 为主的高温合成气作为炼铁补充还原剂,同时为炼铁反应提供所需热量;在无空气燃烧的条件下,高炉排出的尾气不含 N₂,主要成分为 CO₂、CO 以及少量 H₂;将尾气中的 CO₂ 捕集分离(CCS)并送入电弧等离子体加热器,加入煤粉与之反应,制成高温合成气送入高炉与铁矿石反应,从而实现 CO₂ 高炉内循环。PRGR 工艺在保持上述焦比的情况下,将尾气 CCS 处理后,回收 CO、H₂ 等还原气,煤粉在等离子体加热器的作用下热解后,与循环的还原气共同进入高炉参与铁还原反应,大幅降低煤耗,从而降低 CO₂ 排放。高炉所需的能量由绿电驱动的等离子体提供,整个过程可实现近零排放。另外,煤粉在等离子体反应器内预先汽化,可以最大限度降低焦比,在炼焦方面进一步节能减排,根据 Babich 等^[6]的计算,高炉中每吨铁水的冶炼至少需要 200 kg 焦炭。PCDR 工艺分离的 CO₂ 循环参与反应,而 PRGR 将 CO₂ 捕集封存,因此后续计算选用的 CCS 工艺分别为膜分离与 MEA 化学吸收^[7]。

2 建模与物流

通过 Aspen Plus 软件对再造流程与传统高炉对照流程建模,如图 1~图 3 所示。传统高炉物流来源于文献[8],以得到 1 t 铁水为基准,将模拟数据与文献数据的尾气成分进行对比,结果列于表 1,输出结果相近,从而验证本工作模型的有效性。再造高炉物料基于煤粉与焦炭等改动对物料进行调整,

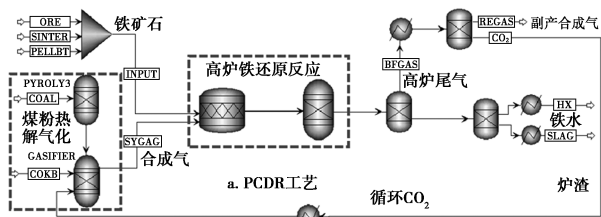


图 1 PCDR 高炉模拟流程

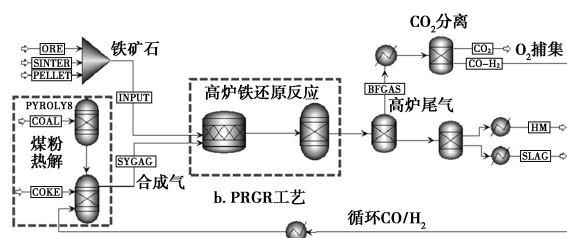


图 2 PRGR 高炉模拟流程

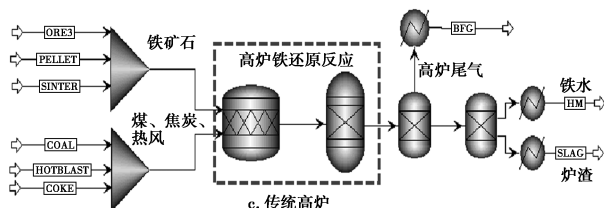


图 3 传统高炉模拟流程

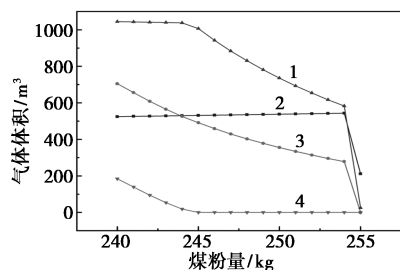
表 1 传统高炉模拟与参考的物流

输入材料	质量或体积	输出煤气成分	模拟结果 体积/m ³	参考结果/ m ³
烧结矿	1000 kg	CO	325	339
球团矿	500 kg	CO ₂	326	344
铁矿石	200 kg	H ₂	28	43
焦炭	310 kg	N ₂	712	738
煤粉	180 kg			
热风	900 m ³			

其中高炉中的焦炭为固定量,煤粉量由灵敏性分析确定。PCDR 工艺尾气中的 CO₂ 全部循环,PRGR 工艺循环的 CO 和 H₂ 作为还原剂是过量的,因此将循环量设定为 90%。

PCDR 工艺输入高炉的煤粉热解合成气和高炉尾气中 CO 和 CO₂ 成分随喷吹煤粉量的变化如图 4 所示,2 个流股的气体成分互相影响。喷吹煤粉量达到 244 kg 时,尾气循环的 CO₂ 可被煤粉完全还原。随着煤粉量的增加,尾气中的 CO 略微增加,而 CO₂ 大幅减少,这是因为 CO 与 CO₂ 中的氧来自铁矿石的分配,而碳的还原性会增强 CO 争夺氧的能力。另外,CO₂ 的变化幅度极大,这是由于尾气中的 CO₂ 全部参与循环,在整个流程中会造成堆积,因此煤粉量的小幅变化就会对循环的 CO₂ 含量造成很大影响。本文中设定尾气中 CO 与 CO₂ 比例约为 1.5:1,此时 PCDR 工艺所需煤粉量为 250 kg。根据同样方法得到的 PRGR 工艺所需煤粉量为 60 kg。PCDR 与 PRGR 再造工艺的物流流如表 2 所示,2 种

工艺每吨铁水能耗分别为 1.52、1.01 MWh。



1—热解合成气中 CO 含量;2—高炉尾气中 CO 含量;
3—高炉尾气中 CO₂ 含量;4—热解合成气中 CO₂ 含量

图 4 PCDR 工艺热解合成气与高炉尾气成分随煤粉量的变化

表 2 再造高炉物料流

工艺	输入燃料/kg		输出尾气/m ³			能耗/ MWh
	煤粉	焦炭	CO	CO ₂	H ₂	
PCDR	250	200	538	355	40	1.52
PRGR	60	200	404	248	13	1.01

3 分析与结果

3.1 焓分析

焓指在环境处于可逆状态时,可转化为有用功部分的能量,焓分析可以将不同形式的能量统一化,被广泛应用于钢铁工业在内的化工过程的评估与优化^[9]。

本文将工艺分解为热解汽化与高炉反应 2 部分进行焓分析,基准温度和基准压力设定为 298.15 K 和 101.3 kPa,分别计算物理焓和化学焓,由下式计算:

$$Ex = Ex_{ph} + Ex_{ch} \quad (1)$$

物理焓的表达式为:

$$Ex_{ph} = \sum n [(h - h_0) - T_0(S - S_0)] \quad (2)$$

对于气态混合流股,化学焓的表达式为:

$$Ex_{ch} = \sum n_i (Ex_{chi} + RT_0 \ln x_i) \quad (3)$$

对于非气态流股,化学焓的表达式为:

$$Ex_{ch} = \sum n_i Ex_{chi} \quad (4)$$

对于以非常规组分输入的煤,化学焓 (MJ/kg) 表达式为^[8]:

$$Ex_m = LHV(1.0064 + 0.1519w_H/w_C + 0.0616w_O/w_C + 0.0429w_N/w_C) \quad (5)$$

式中, n 为流股的摩尔数; T_0 为基准温度; h 和 h_0 分别为流股在反应温度和基准温度的焓; S 和 S_0 分别为流股在反应温度和基准温度的熵; x_i 为该组分在

流股中的摩尔分数; Ex_{chi} 指流股中各组分的标准摩尔化学焓; R 为摩尔气体常数; LHV 为煤的低热值; w_H 、 w_C 、 w_O 分别为氢、碳、氧的质量分数。

冶金过程中的焓损包括由于化学反应和传热等过程造成的内部焓损,以及炉渣与废气带走的外部焓损。对于高炉工艺,铁水为主要产品,高炉尾气中 CO、H₂ 等还原性气体视为副产品,其物理焓被视为废焓。

本文中计算的焓指数有内部焓损 $B_{intloss}$ 、外部焓损 $B_{outloss}$ 和总焓损 $B_{totalloss}$,总焓效率 Ψ_{all} ,以及仅将铁水视为产品的焓效率 Ψ_m 和将铁水与还原气视为产品的焓效率 Ψ_{mg} 。 Ψ_{all} 、 Ψ_m 、 Ψ_{mg} 分别由下式计算^[10]。

$$\Psi_{all} = B_{totaloutput} / B_{totalinput} \quad (6)$$

$$\Psi_m = B_{HM} / B_{totalinput} \quad (7)$$

$$\Psi_{mg} = (B_{HM} + B_{chgas}) / B_{totalinput} \quad (8)$$

式中, $B_{totalinput}$ 和 $B_{totaloutput}$ 为包括电能在内的输入和输出物料的焓; B_{HM} 为铁水焓; B_{chgas} 为尾气中还原气的化学焓。

再造高炉的焓流列于表 3。PCDR 与 PRGR 工艺的总焓损分别为 2.8、2.0 GJ。其中 PCDR 高炉的焓损主要发生在 CO₂ 循环后与煤粉还原过程,占总焓损的 94.8%,因此该工艺改进的重点要放在等离子体驱动煤粉汽化的效率上;PRGR 高炉的焓损主要集中在高炉过程,占总焓损的 85.0%,这是因为循环的还原气实际并没有全部参与还原反应,因此会在循环过程中造成焓损。

表 3 再造工艺焓流

	PCDR				PRGR			
	输入 焓/GJ	输出 焓/GJ	焓损/ GJ	焓效 率/%	输入 焓/GJ	输出 焓/GJ	焓损/ GJ	焓效 率/%
热解气化	19.6	17.0	2.6	85.6	16.7	16.4	0.3	98.1
高炉反应	18.2	18.0	0.2	99.1	17.6	15.9	1.7	90.3
工艺合计	20.5	17.7	2.8	86.5	13.4	11.4	2.0	84.9

3 种工艺计算的各焓指数列于表 4。3 种工艺的 B_{HM} 相近,但是对于副产的 B_{gas} ,PCDR 工艺远高于传统高炉,而 PRGR 工艺的还原气已大量循环回高炉反应因此可忽略不计。再造高炉的工艺流程比传统高炉复杂,因此内部焓损略高于传统高炉,但是传统工艺排放的尾气造成大量外部焓损,因此总焓损高于再造工艺。3 种工艺的焓效率对比列于表 5。3 种工艺的总焓效率相近,但是传统工艺若不回收煤气,实际焓效率 Ψ_m 仅为 59.6%,低于 PRGR 工艺

的 74.8%;而 PCDR 工艺副产煤气具有很高的价值,因此最据参考性的是 Ψ_{m-g} ,高达 82.7%。

表 4 再造工艺与传统工艺的焓指数

工艺	B_{HM}	B_{gas}	$B_{totalinput}$	$B_{totaloutput}$	B_{inloss}	$B_{outloss}$	$B_{totalloss}$
PCDR	9911	7037	20494	17731	2763	783	3546
PRGR	9911	510	13374	11361	2013	939	2952
传统高炉	10371	4206	17420	15495	1925	3197	5123

表 5 再造工艺与传统工艺的焓效率 %

工艺	Ψ_{all}	Ψ_m	Ψ_{m-g}
PCDR	86.5	48.4	82.7
PRGR	84.9	74.1	77.9
传统高炉	88.9	59.6	83.8

3.2 CO₂ 排放分析

CO₂ 排放考虑直接排放和间接排放。直接排放包括高炉中煤炭的燃烧和铁还原排放的 CO₂,其中再造工艺直接排放的 CO₂ 通过 CCS 技术大量去除。间接排放指冶炼过程消耗的烧结矿、燃料等原材料以及传统高炉的热风在生产过程中排放的 CO₂。本文中假定的绿电工艺为光伏发电,光电全生命周期的碳排放为 37 g/kWh,作为参考,火电的碳排放为 832 g/kWh。

3 种工艺碳排放结构如表 6 所示。再造工艺的尾气经过 CCS 处理,能量消耗大部分为电能,传统高炉则主要为尾气和耗能排放。若由传统的火力供电,则 PCDR、PRGR 和传统工艺的总碳排放分别为 1.87、1.39、1.56 t,但若用光电替代传统火电,则 PCDR、PRGR 工艺的碳排放量仅为 417、442 kg,分别降低 77.6% 和 68.1%;而相较于传统高炉碳排放,则分别减少了 73.3%、71.7%。

表 6 再造工艺与传统工艺的碳排放 kg

碳排放	PCDR (火电)	PCDR (绿电)	PRGR (火电)	PRGR (绿电)	传统高炉
炼焦	115	115	115	115	170
烧结	235	235	235	235	200
火电排放	1518		989		
绿电排放		67		43	
尾气			48	48	630
球团					55
高炉能耗					510
合计	1868	417	1387	442	1565

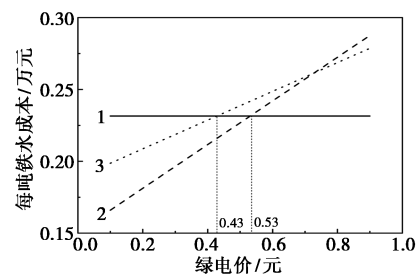
3.3 成本分析

成本分析基于传统高炉的成本结构,考虑铁矿石、煤焦等原材料,以及碳税、耗电和 CO₂ 的分离成本等。特别的,PCDR 工艺副产的煤气可作为产品售卖抵扣成本。煤气市场价格通过天然气比价法计算为 0.9 元/m³[11]。

按照当前光伏成本 0.625 元/kWh 与我国碳税价 60 元/t,3 种工艺成本构成列于表 7。PCDR、PRGR 和传统高炉工艺每吨铁水的总成本分别为 2 458、2 431、2 315 元。与传统高炉的成本主要在煤焦等原材料上不同,再造工艺的花费在电费,PCDR、PRGR 工艺电力花费分别为 950、625 元。随着技术的进步,光伏成本也会降低;同时随着当前全世界对碳排放的把控越来越严格,碳税价格会越来越高。未来各工艺分别随碳税和光电价变化如图 5、图 6 所示。按当前碳税价,当光电价分别降至 0.53、0.43 元时,PCDR 和 PRGR 工艺铁水成本将低于传统高炉;按当前光电价,当碳税价分别上涨至 184、235 元/t 时,PCDR 和 PRGR 工艺铁水成本将低于传统高炉。

表 7 3 种工艺铁水成本构成 元

工艺成本	PCDR	PRGR	传统高炉
煤	233	56	163
焦炭	383	383	576
烧结	900	900	766
球团			487
块矿	374	374	159
电费	950	625	
热风			69
煤气	-513		
碳税	25	26	94
分离成本	104	146	
合计	2458	2511	2315



1—传统高炉;2—PCDR;3—PRGR

图 5 当前电价 3 种工艺成本随绿电价的变化

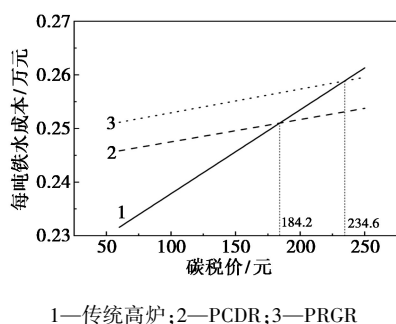


图 6 当前电价 3 种工艺成本随碳税价的变化

4 结论

提出了 PCDR、PRGR 2 种等离子体耦合高炉炼铁再造工艺路线,并与现有传统高炉工艺进行对比。使用 Aspen Plus 软件对流程建模,获得各工艺的物料与能量平衡数据,并对工艺进行焓分析以初步改进,最后从能耗、碳排放和经济 3 个方面论证了再造工艺的优越性。

(1)PCDR 工艺和 PRGR 工艺的炉顶气成分受煤粉量影响,基于此确定的 PCDR 工艺喷吹煤粉量为 250 kg,PRGR 工艺喷吹煤粉量为 60 kg。

(2)PCDR 工艺的焓损主要发生在煤粉与循环的 CO₂ 发生汽化反应的阶段,PRGR 工艺的焓损主要发生在还原气在高炉中循环的过程中,这指明了工艺未来的改进方向。PCDR 和 PRGR 的实际焓效率分别为 82.7%、74.8%,均高于传统高炉的 59.6%。

(3)电能占 PCDR 和 PRGR 工艺能耗的主要部分,若再造工艺由光伏发电,则相比传统高炉可分别降低 73.3%、71.7%。当光电成本降至 0.53、0.43

元/kWh,或碳税分别上涨到 184、235 元/t 时,PCDR 和 PRGR 工艺的吨铁水成本将低于传统高炉。

参考文献

- [1] 张琦,沈佳林,许立松.中国钢铁工业碳达峰及低碳转型路径[J].钢铁,2021,56(10):152-163.
- [2] Junwen C, Hua Z, Gang Z, et al. Low-carbon manufacturing and optimization strategies of iron and steel industry based on industrial metabolism[J]. Jom, 2023, 75(7): 2199-2211.
- [3] Plaul Jan Friedemann, Krieger Wilfried, Back Eduard. Reduction of fine ores in argon-hydrogen plasma [J]. Steel Research International, 2005, 76(8): 548-554.
- [4] Souza Filho, Ma Y, Isnaldi Rodrigues, et al. Fundamentals of green steel production: On the role of gas pressure during hydrogen reduction of iron ores[J]. Jom, 2023, 75(7): 2274-2286.
- [5] Bror, Magnus, Heegaard, et al. IRONARC: A cokeless ironmaking process[J]. Iron & Steel Technology, 2015, 12(3): 44-50.
- [6] Babich A I, Gudenau H W, Mavrommatis K T, et al. Choice of technological regimes of a blast furnace operation with injection of hot reducing gases[J]. Revista de Metalurgia, 2022, 38(4): 288-305.
- [7] Kuramochi T, Ramirez A, Turkenburg W, et al. Comparative assessment of CO₂ capture technologies for carbon-intensive industrial processes[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2012, 38(1): 87-112.
- [8] 王筱留. 钢铁冶金学(炼铁部分)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1991: 205-221.
- [9] Brauer H, Jeschar R. The significance of exergy for the thermodynamic study of the blast-furnace process[J]. Arch fuer das Eisenhuettenwesen, 1963, 34: 9-16.
- [10] Kumar B, Roy G G, Sen P K. Comparative exergy analysis between rotary hearth furnace-electric arc furnace and blast furnace-basic oxygen furnace steelmaking routes[J]. Energy and Climate Change, 2020, 1: 100016.
- [11] 刘志超, 王伟业. 关于钢铁企业回收煤气定价的思考[J]. 山西冶金, 2015, 38(6): 4-5. ■

马来西亚巴斯夫国油化学位于关丹的新异辛酸装置正式投产

10月25日,马来西亚巴斯夫国油化学(BPC)庆祝在马来西亚关丹一体化基地的第二条异辛酸(2-EHAcid)生产线正式投产。这次扩建旨在满足对优质异辛酸产品快速增长的需求,再次印证BPC致力为亚太区域内客户服务的决心。

巴斯夫集团执行董事会成员兼首席技术官柯迪文博士(Dr. Stephan Kothrade)表示:“此次扩建是我们承诺提升盈利和创造价值的重要一步。作为新战略的一部分,我们致力于加强‘核心业务’在亚洲高增长市场的布局,确保以优质产品满足客户日益增长的需求。”

巴斯夫高级副总裁、亚太区中间体业务部负责人贝明

轩(Michael Becker)说:“这次扩建能让我们更好地满足亚太地区对优质异辛酸产品快速增长的需求。通过提高产能,我们得以加强对客户需求的回应能力,并巩固我们作为市场领先供应商的地位。我们致力于成为可持续中间体的首选合作伙伴。”

随着首个异辛酸装置于2016年投产,该装置在支持亚洲业务增长方面发挥了重要作用。而在2023年一季度,第二条生产线也破土动工。截至2024年三季度,异辛酸新生产线已经全面投产,使年产能翻倍至6万t,进一步加强了BPC对推动创新以及满足全球客户需求的坚定承诺。

(高怡)