直接还原与熔融还原

基于焦炉煤气平衡的长短流程冶金工艺布局的思考

代友训[1]，余俊杰[1]，王兆才[1,2]，陈 宇[1]
(1. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205；2. 国家烧结球团装备系统工程技术研究中心，湖南 长沙 410205)

摘要： “双碳”背景下，发展低碳冶金技术已是我国钢铁企业低碳转型的必然趋势。本文在分析我国焦炉煤气的利用及气基直接还原技术现状的基础上，通过建立钢铁企业内部焦炉煤气平衡模型，提出了基于焦炉煤气平衡的长短流程冶金工艺的合理布局，以期通过合理利用焦炉煤气发展直接还原炼铁技术，为冶金工序减碳提供解决方案。同时，本文以年产 5×10^6 t 高炉铁水的钢铁企业为例，根据焦炉煤气平衡模型计算，富余的焦炉煤气可满足年产 1×10^6 t 直接还原铁生产线燃气需求，且焦化产生的碎焦可为每吨烧结矿提供 42.0 kg 的焦粉，基本满足烧结对燃料的需求。此外，长流程和短流程相融合的新模式下，吨钢 CO_2 排放量降低到 1 193 kg，减碳比高达 30.32%。

关键词： 焦炉煤气；平衡模型；气基直接还原；CO_2 减排
中图分类号： TF046.6 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2022)03－0066－07
doi： 10.13403/j.sjqt.2022.03.041

Consideration on layout of metallurgical processes of long and short flow based on coke oven gas balance

DAI Youxun[1], YU Junjie[1], WANG Zhaocai[1,2], CHEN Yu[1]
(1. *Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha* 410205, *Hunan, China*; 2. *National Engineering Research Center of Sintering and Pelletizing Equipment System, Changsha* 410205, *Hunan, China*)

Abstract: Under the background of “double carbon”, the development of low-carbon iron-making technology is an inevitable trend for low-carbon transformation for China´s iron and steel enterprises. Based on the analysis of the utilization of coke oven gas and the current situation of gas-based direct reduction technology in China, a rational layout on metallurgical processes of long and short process based on coke oven gas balance is proposed by establishing a balance model of coke oven gas within iron and steel enterprises, with a view to developing direct reduction iron-making technology through rational utilization of coke oven gas and to providing solutions for carbon reduction in metallurgical processes. Meanwhile, an iron and steel enterprise with an annual output of 5×10^6 t of molten iron in blast furnace is taken as an example, and according to the calculation on coke oven gas balance model, the surplus coke oven gas can meet the gas demand of direct reduction iron production line of the 1×10^6 t, and the crushed coke produced by coking can provide 42.0 kg of coke powder per ton of sinter, which basically meet the fuel demand for sintering. In addition, under the new mode that combines long process and short process, the CO_2 emission per ton of steel is reduced to 1 193 kg, and the carbon reduction ratio is as high as 30.32%.

Key words: coke oven gas; equilibrium model; gas-based direct reduction; CO_2 emission reduction

收稿日期： 2022－01－20；**修回日期：** 2022－02－27
基金项目： 湖南省科技成果转化及产业化计划资助项目(2020GK4055)
作者简介： 代友训(1983—)，男，高级工程师，从事铁矿烧结球团、直接还原方面的研究及工程设计工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

钢铁工业作为国民经济发展的基础产业，是建设现代化强国的重要支撑，但同时也是能源消耗和碳排放的大户。2020 年我国钢铁行业碳排放量高达 1.8×10^9 t，约占我国碳排放总量的 15%，占工业制造业的 47%[1]。为实现 2030 年前 CO_2 排放达到峰值与 2060 年实现碳中和的“双碳”目标，我国钢铁企业迫切需要进行低碳转型[2]。然而，受资源条件与历史因素影响，目前高炉—转炉的长流程仍是我国钢铁发展的压舱石，占比高达 87.1%。据相关研究测算，高炉—转炉长流程工艺的吨钢碳排放量约为 2 t，且对于长流程工艺，碳排放主要集中在铁前工序(焦化、造块、高炉)，其 CO_2 排放占吨钢总排放的 95%，电炉短流程工艺吨钢碳排放量约为 0.9 t[3-4]。因此，立足高炉—转炉长流程、发展直接还原工艺、提高短流程炼钢是现阶段钢铁企业低碳转型的必经之路，长流程与短流程的融合将构成中国特色的钢铁发展方式。

直接还原炼铁工艺流程短、CO_2 排放低、节能减排效果显著且能改善钢铁产品结构，提高钢铁产品质量，是实现低碳绿色冶金的有效途径。目前，业内学者普遍认为：在实现绿氢炼铁技术之前，利用焦炉煤气作气基竖炉还原气发展直接还原铁工艺是当前国内钢铁行业降低碳排放的重要途径[5-7]。

焦炉煤气中氢组分体积分数高，是钢铁企业内部可利用的优良还原气。合理利用焦炉煤气可以打破国内天然气资源匮乏、气基直接还原发展受限的困境，促进直接还原低碳炼铁技术的发展。本文从钢铁企业生产实际出发，通过分析我国焦炉煤气的利用及气基直接还原技术现状，提出了合理利用钢铁企业内部焦炉煤气生产直接还原铁(Direct Reduction Iron，DRI)的建议，并且通过梳理钢铁企业内部各工序焦炉煤气的消耗现状，提出了焦炉煤气平衡模型，以期对钢铁企业布局低碳直接还原短流程提供一定的参考。

1　钢铁企业焦炉煤气利用现状

我国的焦炭产量居世界首位，且规模稳定，近 10 年来均保持在 4×10^8 t 以上规模，其中有近 1/3 焦炭产能来自于钢铁联合企业(图 1)[8]。焦炉煤气(Coke Oven Gas，COG)是焦化工序生产焦炭的副产品，生产 1 t 焦炭大约产出总热值 7.5 GJ 高热值的 COG，折算体积约为 435 Nm^3/t[9]。COG 在钢铁企业内部被普遍用于高热值燃料，用于烧结、球团、轧钢等工序的加热，还有大量的富余煤气用于发电或民用供热。富余 COG 的高效、合理利用一直是科研学者的研究焦点[10]。

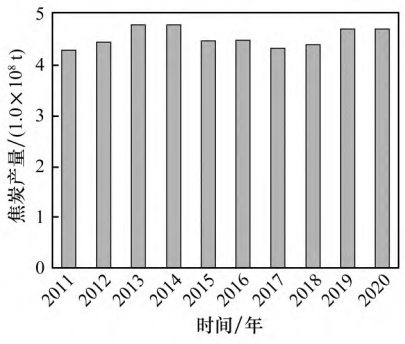


图 1　2011—2020 年我国焦炭产量

Fig. 1　Coke production of China during 2011—2020

COG 的主要成分如表 1 所示。由表 1 可知，COG 中 H_2 体积占比超过 55%，将 COG 用于供热或发电的经济效益不尽合理。H_2 相比 CO，两者的热值相当，但是目前 H_2 制备成本高，约为 CO 制备成本的 30 倍；同时相比 C、CO 等还原剂，H_2 对铁氧化物的还原效率最高，H_2 的还原潜能是 CO 的 14 倍，在矿石中的渗透速度是 CO 的 5 倍；此外，COG 中的 CH_4 体积分数相比天然气更低，煤气重整负荷低、耗氧量少、能耗低，所以富含 H_2 的 COG 用作钢铁行业的优质还原气的利用效率远高于燃料[11]，将 COG 用于生产直接还原铁可以为钢铁企业节能减排、提高产品附加值提供有益途径。

表 1　COG 主要成分占比(体积分数)[12]

Table 1　Composition of COG　　%

H_2	CH_4	CO	N_2	CO_2	O_2	C_mH_n
55 ~ 60	23 ~ 27	5 ~ 8	3 ~ 7	1.5 ~ 3	0.3 ~ 0.8	2 ~ 4

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2 焦炉煤气生产直接还原铁技术现状

我国天然气资源稀缺，主流的气基竖炉直接还原工艺在我国发展极为缓慢，国内直接还原铁主要是依靠隧道窑、回转窑等煤基直接还原工艺生产。因煤基直接还原工艺生产规模小且在能耗、环保、质量、技术和成本等方面仍然存在着诸多亟待解决的难题，所以我国直接还原铁产量极低。截止2021年中国直接还原铁产量仍未突破百万吨，与国内千万吨级别的需求严重不匹配，我国急需发展能耗低、碳排放少、单机产能大的气基直接还原铁技术。

针对我国煤多天然气少的资源特点，目前业内专家一致认为，利用COG、煤制气等替代天然气发展大型化气基竖炉，将是我国直接还原技术发展的重要方向[12-13]。近年来，COG用于气基竖炉生产DRI受到了广泛的关注和研究，并形成了两种主要的工艺路线。第一种工艺路线是将COG净化、预热后进行重整，使CH_4转化为CO和H_2，然后与净化后循环的竖炉炉顶煤气混合，在竖炉内加热还原铁矿石，制备DRI)。目前，Midrex和HYL-ZR基于该工艺利用COG均已成功生产出DRI。

河钢集团联合中国钢研科技集团和钢铁研究总院在第一种工艺流程基础上进行优化，提出了利用COG生产DRI的新工艺(图2)。新工艺与第一种工艺相比，取消了焦炉煤气CH_4重整的工序，COG首先经过变温吸附(Temperature Swing Adsorption，TSA)净化脱除苯、焦油等杂质后进行压缩，接着通过变压吸附(Pressure Swing Adsorption，PSA)技术脱除CO_2，并从COG中分离出CH_4用作燃料，最后将得到的富氢气体与净化、脱CO_2后的炉顶气混合，经过加热后通入竖炉还原铁矿石，制备DRI。新工艺与上述工艺相比突出优势在于进入气基竖炉还原气中H_2体积分数是CO的8倍以上，还原气不仅对铁矿石的还原效率高，而且可以有效降低生产工序CO_2的排放量。

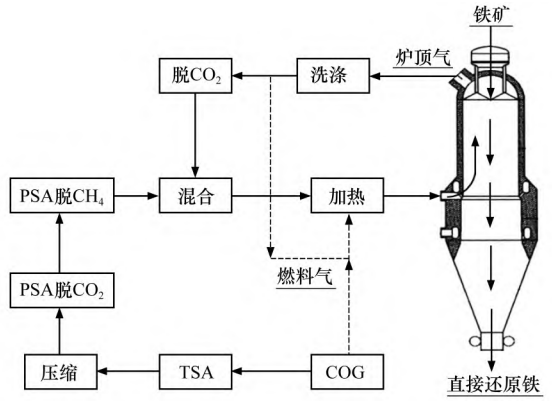


图2 气基竖炉直接还原优化后流程示意

Fig. 2 Optimization process of gas-based shaft furnace direct reduction ironmaking

在“双碳”目标的驱动下，采用具备低碳优势且不受天然气资源制约的COG作还原气的气基竖炉直接还原工艺近年来陆续得到了实质性的推广应用。目前墨西哥HYL公司与意大利达涅利公司已经联合开发出可以直接使用COG作还原气的零重整直接还原竖炉，即Energiron ZR技术[14-15]。印度京德勒钢和能源公司(JSPL)采用Energiron ZR技术，建成了首套利用COG生产DRI的直接还原铁厂，年产DRI可达2.5×10^6 t，并计划于2023年进一步将DRI年产能提高到4.7×10^6 t。

目前，COG作气基竖炉还原气生产直接还原炼铁工艺在国内也取得了突破性的进展。2020年12月，中晋太行矿业有限公司建设的我国第一套3×10^5 t/a焦炉煤气直接还原铁的CSDRI竖炉流程生产线成功投产，突破了气基竖炉直接还原炼铁技术在国内工业化应用的瓶颈；2022年2月，国内首套集成H_2与COG进行工业化生产的直接还原生产线在宝钢湛江钢铁零碳示范工厂正式开工，以COG做还原气的气基竖炉直接还原技术，可为我国当下大规模发展短流程炼铁奠定基础。

3 钢铁企业焦炉煤气平衡模型及直接还原短流程布局

3.1 焦炉煤气平衡模型

由于COG用作还原剂的利用价值远高于用作燃料，且基于COG的气基竖炉直接还原技术

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在我国已日趋成熟。同时，鉴于我国高炉炼铁长流程配套的焦化厂在生产焦炭的过程中会产生大量的 COG 副产品，其用于钢铁厂内部各工序加热后还有大量的富余。因此，在现阶段立足高炉长流程的背景下，利用焦化工序富余 COG 生产直接还原铁，不仅可以促进国内低碳短流程炼铁技术的发展，解决国内直接还原铁短缺的困境，而且还能实现钢铁企业内部富余 COG 的高效利用。

为了确定钢铁企业长流程配套气基直接还原竖炉的规模，本文系统分析了钢铁企业内部 COG 产生和利用的现状，确定了富余 COG 量 F(Nm^3/a) 与焦化工序产生 COG 量 X(Nm^3/a)、企业内部供热消耗 COG 量 Y(Nm^3/a)、损失 COG 量 Z(Nm^3/a) 之间的关系：

$$F = X - Y - Z \tag{1}$$

式中：$X = a_0X_0$(a_0 为生产每吨焦炭产生的 COG 量，Nm^3/t；X_0 为焦化厂规模，t/a；联合钢铁企业内部焦炉为复热式焦炉)；$Y = b_0Y_0 + b_1Y_1 + b_2Y_2 + \cdots + b_nY_n = \sum_{k=0}^{n} b_kY_k$($b_0$、$b_1$、$b_2$、$\cdots$ b_n 为各工序 COG 的单位消耗量，Nm^3/t；Y_0、Y_1、Y_2、$\cdots$ Y_n 为各工序的规模，t/a)；$Z = \beta X = \beta a_0X_0$($\beta$ 为 COG 损失的比例)。因此根据焦炉煤气平衡模型：

$$F = (1-\beta)\,a_0X_0 - \sum_{k=0}^{n} b_kY_k \tag{2}$$

根据式(2)可测算出配套气基直接还原竖炉的规模 M，t/a：

$$M = F/c_0 \tag{3}$$

式中：c_0 为生产每吨直接还原铁 COG 的消耗量，Nm^3/t。

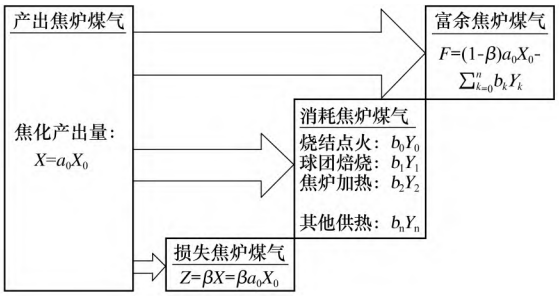


图 3　钢铁企业内部焦炉煤气平衡模型

Fig. 3　COG balance model in steelworks

3.2　铁前工艺规模配置

目前我国高炉炼铁入炉原料仍以烧结矿为主，球团矿入炉比例低，平均仅约为 15%。而生产等铁量的造块产品，球团工艺比烧结工艺的工序能耗降低 53.6%，生产吨铁减少 CO_2 排放 78.26 kg。最近有学者系统研究了高炉炉料中球团配比与能耗、铁渣及成本的关系，发现当球团配比从 17% 提高到 25% 左右时，铁渣量和能耗均降低，继续提高球团配比吨铁成本上涨较快[16-17]。本文以年产 5×10^6 t 高炉铁水的典型钢铁企业为例，结合我国高炉炉料结构、资源及企业技术经济情况，球团入炉比按 25% 计，高炉炉料消耗及铁前造块工艺规模配置见表 2。

表 2　年产 5×10^6 t 高炉铁水的炉料结构及造块工艺规模

Table 2　The charge structure of blast furnace with an annual output of 5 million tons of molten iron

炉料种类	质量分数/%			理论矿耗/[t·($t_{铁水}$)$^{-1}$]	配套产量/(1×10^4 t·a^{-1})
	铁品位	入炉比例	返矿率		
烧结矿	56.5	70	10	1.156	642
球团矿	63.0	25	5	0.413	217
块矿	63.0	5	5	0.083	43

根据当前钢铁企业生产现状，高炉炼铁的焦比按 360 kg/t 计算，焦化工序碎焦率按 13% 计算，年产 5×10^6 t 高炉铁水的钢铁企业需要配套年产 2.07×10^6 t 的焦化生产线。同时生产每吨焦炭大约产生 COG 435 Nm^3，煤气热值为 17.24 MJ/Nm^3。根据焦炉煤气平衡模型，配套焦化工序年产焦炉煤气量大约为 $9.004\ 5\times10^8$ Nm^3，如表 3 所示。

综合钢铁企业内部需求及焦炉煤气合理化利用原则，企业内部 COG 的消耗考虑烧结点火、球团焙烧、焦炉工序自耗、炼钢—轧钢供热，各工序消耗见表 4 所。其中，烧结点火按

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表3 年产 5×10^6 t 高炉铁水配套焦化规模

Table 3 The coking plant scale with an annual output of 5 million tons of molten iron

铁水产能/(1×10^4 t·a^{-1})	焦比/(kg·t^{-1})	入炉焦炭/(1×10^4 t·a^{-1})	焦化产能/(1×10^4 t·a^{-1})	碎焦量/(1×10^4 t·a^{-1})	产气量/(1×10^4 Nm^3·a^{-1})
500	360	180	207	27	90 045

表4 年产 5×10^6 t 高炉铁水配套各工序焦炉煤气消耗量

Table 4 Consumption of COG in each process with an annual output of 5 million tons of molten iron

项目	产量(1×10^4 t·a^{-1})	单耗/(Nm^3·t^{-1})	煤气量/(1×10^4 Nm^3·a^{-1})
烧结点火	642.00	3.48	2 234
球团焙烧	217.00	34.80	7 552
炼钢—轧钢	555.56	6.00	3 333
焦炉加热	207.00	64.00	13 248

使用100% COG计算，吨烧结矿点火煤气消耗为0.06 GJ；球团焙烧考虑铁原料赤铁矿配比50%，吨球团矿焙烧煤气消耗0.6 GJ；焦化炉加热、炼钢及轧钢系统消耗按行业统计平均水平计算。

基于上述高炉配套造块、焦化工序产能配置及各系统焦炉消耗，且焦炉煤气系统损失比例β按1%计，根据焦炉煤气平衡模型计算公式(2)计算得到年产 5×10^6 t 高炉铁水及配套系统富余COG量约为 $6.277\ 8\times10^8$ Nm^3/a。

同时，根据表2、3中的数据显示，焦化系统产生的碎焦量100%作烧结燃料用时，折算到吨烧结矿用焦粉约为42 kg，基本与国内烧结先进燃耗指标一致，烧结系统基本不需要再额外配加煤粉，高热值的碎焦作烧结燃料，不仅可以提高烧结矿质量，而且还能进一步降低烧结工序中CO_2及SO_2、NO_x等污染物排放。

3.3 气基直接还原规模布局测算

基于高炉—转炉长流程工艺系统配置，以及COG生产气基直接还原铁技术的成功应用，对长流程富裕COG用于发展气基直接还原铁的规模布局进行测算。测算基本原则如下。

(1) 配套气基直接还原系统包含氧化球团(DR级)、气基竖炉直接还原。

(2) 氧化球团产品质量按直接还原用球团标准执行，通常直接还原对球团抗压强度的要求高于高炉用球团，吨球团焦炉煤气的消耗量略高于高炉用球团的消耗量，按0.8 GJ计算。

(3) 参考国外发达国家电炉冶炼原料结构，DRI与废钢比按4∶6计算；DRI中全铁量按92%计算。

(4) 其它指标按行业平均水平计。

(5) 焦炉煤气平衡考虑气基直接还原配套电炉短流程炼钢系统煤气消耗。

基于以上原则，气基直接还原铁及配套短流程炼钢系统消耗指标见表5。由表5可知，生产1 t DRI及配套系统消耗的COG量c_0为630.5 Nm^3/t。

表5 短流程炼钢吨钢焦炉煤气消耗量

Table 5 COG consumption per ton of steel in short-process steelmaking

项目	产量/t	单耗/(GJ·t^{-1})	单耗/(Nm^3·t^{-1})	煤气耗量/Nm^3
球团焙烧	1.40	0.8	46.4	65.0
气基竖炉直接还原	1.00	9.5	551.0	551.0
连铸—轧钢	2.34	0.1	6.0	14.5

根据焦炉煤气平衡模型计算公式(3)，立足年产 5×10^6 t 高炉铁水配套系统富余的COG，气基直接还原系统规模可达约 1×10^6 t/a，配套炼钢系统约为 2.34×10^6 t/a。

受限于氢基资源的缺乏、制氢成本高及氢冶金技术尚不成熟等因素，深度挖掘企业内部

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

COG 合理利用，基于长流程与短流程紧密融合及焦炉煤气平衡模型，现阶段发展气基竖炉直接还原的规模与高炉炼铁系统的合理化布局见图 4。

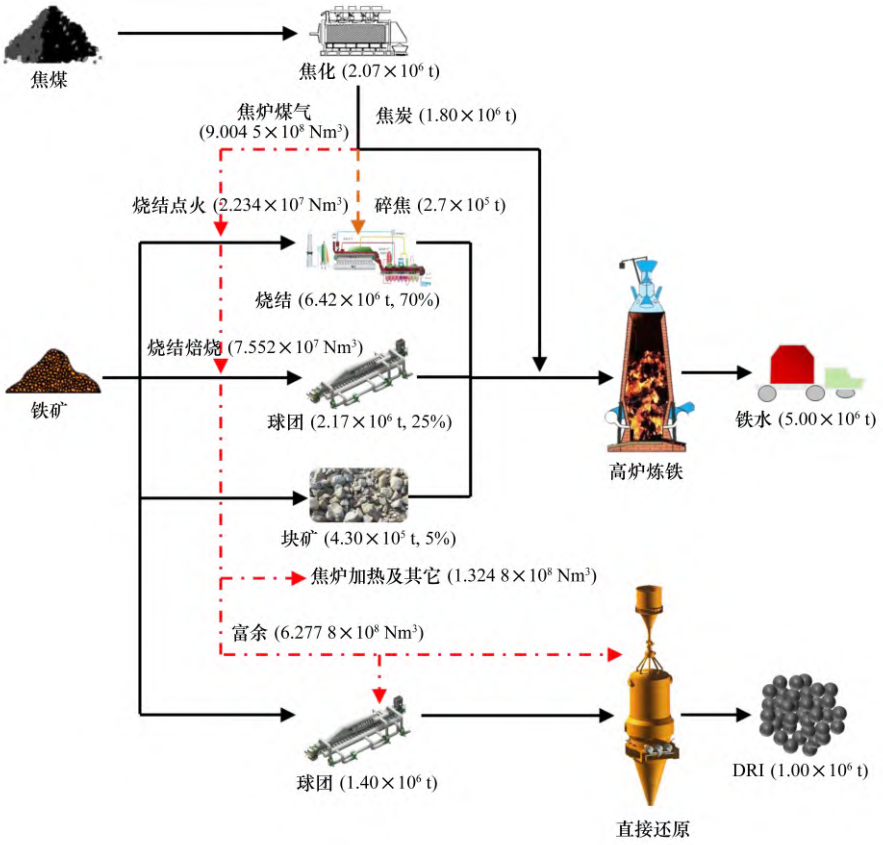


图 4　基于焦炉煤气平衡的炼铁系统合理化布局

Fig. 4　Rational layout of ironmaking system based on coke oven gas balance

3.4　吨钢碳减排预测

由于气基竖炉采用富氢的 COG 作还原气，吨 DRI 的碳排放量远低于吨高炉铁水碳排放量。随着废钢的回收利用，预计未来钢铁冶金铁钢比进一步降低。本文仍以年产 5×10^6 t 高炉铁水的典型钢铁企业为例，并配套 1×10^6 t 气基竖炉直接还原铁产量，测算长、短流程融合后的新模式吨钢碳排放量（见表 6）。测算基本原则如下。

（1）转炉炼钢铁钢比按 0.9 计算；参考国外发达国家电炉冶炼原料结构，DRI 与废钢比按 4∶6 计算。

（2）钢铁冶炼流程碳排放 95% 集中于铁前工序，测算时忽略了碳排放较少的铁后工序。

（3）高炉铁水中全铁量按 94% 计算，DRI 中全铁量按 92% 计算，炼钢及其他指标按行业平均水平计。

（4）高炉冶炼吨铁水焦比按 360 kg 计算，焦炭中碳元素质量分数按 86% 计算；吨铁水喷煤量按 160 kg 计算，煤中碳元素质量分数按 80% 计；以上的碳元素在冶金流程内充分利用后最终全部转化为 CO_2。焦化系统产生的碎焦量刚好用于烧结工序，碳元素也全部转化为 CO_2，焦炉煤气中的碳元素不管是应用于气基竖炉还是其他工序也全部转化为 CO_2。

（5）气基竖炉生产 1 t DRI 消耗的焦炉煤气量为 551 Nm^3，气基竖炉直接还原工艺加热的热源为竖炉炉顶煤气。气基竖炉直接还原工序产生的碳排放量为焦炉煤气带入的碳元素形成的 CO_2。

（6）计算碳排放时忽略冶炼过程添加的石灰石、白云石等熔剂分解过程产生的 CO_2。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表6 年产 5×10^6 t 高炉铁水钢铁企业融合新模式下吨钢碳减排量

Table 6 Carbon emission reduction per ton of steel under the new integration mode of steelworks with an annual output of 5 million tons of blast furnace hot metal

项目	高炉铁水量/(1×10^4 t)	竖炉 DRI/(1×10^4 t)	废钢量/(1×10^4 t)	粗钢产量/(1×10^4 t)	吨钢碳排放量/kg	减碳比/%
传统长流程炼钢	500	0	87.30	555.56	1 712	—
融合新模式	500	100	237.30	794.55	1 193	30.32

由表6可知，融合新模式下，吨钢 CO_2 排放量由传统长流程炼钢的1 712 kg下降到1 193 kg，减碳比高达30.32%。融合新模式下，碳排放量大幅减少的主要原因：一方面，气基竖炉炼铁过程采用更加清洁的富 H_2 燃气；另一方面，炼钢过程中废钢的添加量增加，铁钢比大幅下降。

4 结论与展望

(1) 发展气基直接还原铁技术是我国钢铁企业低碳转型的必然趋势，高效利用高炉—转炉长流程系统富余的 COG 生产直接还原铁，是现阶段降低炼铁工序的生产成本、减少碳排放、促进低碳短流程发展的有效途径。

(2) 建立钢铁企业内部焦炉煤气平衡模型，遵循 COG 合理化利用原则，配套气基直接还原系统规模达到高炉产能的20%以上，可初步实现长短流程的紧密融合。

(3) 提高球团入炉比至25%，高炉配套焦化工序产生的碎焦可为吨烧结矿提供42 kg焦粉，可在基本满足烧结燃料需求的基础上，进一步提高烧结矿产、质量，减少烧结污染物排放。

(4) 长流程和短流程相融合的新模式下，吨钢 CO_2 排放量由传统长流程炼钢的1 712 kg下降到1 193 kg，减碳比高达30.32%。

参考文献:

[1] 朱德庆，薛钰霄，潘建，等. 气基直接还原工艺研究进展和发展思考[J]. 烧结球团，2022，47(1)：1－9.
ZHU Deqing，XUE Yuxiao，PAN Jian，et al. Research process and development thinking of gas-based direct reduction process[J]. Sintering and Pelletizing，2022，47(1)：1－9.

[2] 张琦，蔡九菊. 钢铁制造流程系统节能与能效提升[J]. 钢铁，2021，56(8)：32－42.
ZHANG Qi，CAI Jiuju. Systemic energy saving and energy efficiency improving of iron and steelmaking process[J]. Iron and Steel，2021，56(8)：32－42.

[3] 郭琼. 面向未来的低碳绿色高炉炼铁技术发展研究[J]. 中国金属通报，2020(7)：14－16.
GUO Qiong. Research on the development of low-carbon green blast furnace ironmaking technology facing the future[J]. China Metal Bulletin，2020(7)：14－16.

[4] 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.
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.

[5] 叶恒棣，郑富强，胡兵，等. 氢系燃料非高炉炼铁技术现状及发展趋势[J]. 烧结球团，2022，47(1)：10－17.
YE Hengli，ZHENG Fuqiang，HU bing，et al. Current situation and development trend of hydrogen-based fuel non-blast furnace ironmaking technology[J]. Sintering and Pelletizing，2022，47(1)：10－17.

[6] 滕飞，郭培民，孔令兵，等. 炼铁流程用氢减碳潜力分析[J]. 烧结球团，2022，47(1)：18－23.
TENG Fei，GUO Peiming，KONG lingbing，et al. Potential analysis on carbon dioxide reduction with hydrogen in ironmaking process[J]. Sintering and Pelletizing，2022，47(1)：18－23.

[7] 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.
YANG Tianjun，ZHANG Jianliang，LIU Zhengjian，et al. Low carbon ironmaking is imperative in facing environment challenge[J]. Ironmaking，2021，40(4)：1－11.

[8] 闫志者. 焦炉煤气 PSA 制氢及其进展[J]. 炼油技术与工程，2014，44(1)：17－19.
YAN Zhizhe. Hydrogen production from coke oven gas and development[J]. Petroleum Refinery Engineering，2014，44(1)：17－19.

[9] 张福明，颉建新，殷瑞钰. 钢铁制造流程炼铁区段耗散结构的解析[J]. 钢铁，2022，57(3)：1－9.
ZHANG Fuming，XIE Jianxin，YIN Ruiyu. Analysis on dissipative structure of ironmaking procedure for iron and steel manufacturing process[J]. Iron and Steel，2022，57(3)：1－9.

(下转第113页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

CHEN Xin. Design and optimization of sulphric acid plant based on sintering flue gas by active coke desulphurization [J]. Sulphuric Acid Industry,2017,11:24 – 28.

[3] 郑航麟,时越,吴维杰. 烧结烟气脱硫脱硝技术现状研究 [J]. 河北冶金,2019,9(1):55 – 57.
ZHENG Hanglin,SHI Yue,WU Weijie. Study on present situation of desulfurization and denitrification technology of sintering flue gas [J]. Hebet Metallurgy,2019,9(1):55 – 57.

[4] 杨柳,王飞,毛瑞. 球团工艺活性焦脱硫脱硝系统运行问题分析 [J]. 冶金动力,2020,8(246):83 – 86.
YANG Liu,WANG Fei,MAO Rui. Analysis on operation problems of activated coke desulfurization and denitrification system in pellet process [J]. Metallurgical Power,2020,8(246):83 – 86.

[5] 樊腾飞,邢德山,孟春强,等. 烟气吸附脱硫用活性焦着火原因及影响因素 [J]. 中国环保产业,2018,1:24 – 27.
FANG Tengfei,XING Deshan,MENG Chunqiang,et al. Analysis on gauses and effect factors of activated coke ignition in flue gas desulfurization [J]. China Environmental Protection Industry,2018,1:24 – 27.

[6] 赵海亮,霍旭丰. 活性焦脱硫脱硝技术问答 [M]. 北京:冶金工业出版社,2020:51 – 53;164 – 166;204 – 208.
ZHAO Hailiang,HUO Xufeng. Question and answer on desulfurization and denitration technology of activated coke [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2020: 51 – 53; 164 – 166; 204 – 208.

[7] 叶树滋. 硫酸生产操作问答 [M]. 北京:化学工业出版社,2012:21 – 22.
YE Shuzi. Sulfuric acid production operation question and answer [M]. Beijing: Chemical Industry Press,2012:21 – 22.

[8] 周玉琴,高志正,汪满清. 硫酸生产技术 [M]. 北京:冶金工业出版社,2013:76 – 77;217 – 218.
ZHOU Yuqin,GAO Zhizheng,WANG Manqing. Sulfuric acid production technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2013:76 – 77;217 – 218.

(上接第 72 页)

[10] 李海洋. 焦炉煤气制氢气和天然气工艺及成本效益研究 [J]. 化学工程,2021,49(11):73 – 78.
LI Haiyang. Research on process and cost-benefit of coke oven gas to H_2 and natural gas [J]. Chemical and engineering,2021,49(11):73 – 78.

[11] 权芳民,王明华. 铁矿石煤基氢冶金还原技术的研究 [J]. 甘肃冶金,2021,43(3):27 – 30.
QUAN Fangmin,WAGN Minghua. Technical research on coal based hydrogen metallurgy of iron ore reduction [J]. Gansu Metallurgy,2021,43(3):27 – 30.

[12] 于恒,周继程,郦秀萍,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 – 35.
YU Heng,ZHOU Jicheng,LI Xiuping,et al. Reconstruction optimization of gas-based shaft furnace direct reduction ironmaking process [J]. China Metallurgy,2021,31(1):31 – 35.

[13] 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.
ZHANG Fuming,CHENG Xiangfeng,YIN Guangyu,et al. Development of low-carbon green ironmaking technology at home and abroad [J]. Ironmaking,2021,40(5):1 – 8.

[14] 应自伟,储满生,唐珏,等. 非高炉炼铁工艺现状及未来适应性分析 [J]. 河北冶金,2019,282(6):1 – 7.
YING Ziwei,CHU Mansheng,TANG Jue,et al. Current situation and future adaptability analysis of non-blast furnace ironmaking process [J]. Hebei Metallurgy,2019,282(6):1 – 7.

[15] 闻思修. 一种新的直接还原技术:ENERGIRON 技术 [J]. 烧结球团,2009,34(4):27.
WEN Sixiu. A new direct reduction technology-ENERGIRON technology [J]. Sintering and Pelletizing,2009,34(4):27.

[16] 许满兴,张玉兰. 新世纪我国球团矿生产技术现状及发展趋势 [J]. 烧结球团,2017,42(2):25 – 30.
XU Manxing,ZHANG Yulan. Analysis of pellet technology and production of China in 21 st century [J]. Sintering and Pelletizing,2017,42(2):25 – 30.

[17] 袁喻兴,闫天一,那洪明,等. 炼铁系统能耗和成本的集成优化及分析 [J]. 中国冶金,2022,32(1):97 – 103.
YUAN Yuxing,YAN Tianyi,NA Hongming,et al. Integrated optimization and analysis of energy consumption and cost in ironmaking system [J]. China Metallurgy,2022,32(1):97 – 103.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net