节能环保与综合利用

钢铁工业炼铁工序绿色低碳技术浅析

刘 臣，叶恒棣，魏进超，胡 兵，王兆才
（1. 国家烧结球团装备系统工程技术研究中心，湖南 长沙 410205；
2. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205）

摘要： 目前国内钢铁工业烟气中 SO_2、NO_x 等有害气体的源头控制和末端治理技术成熟，特别是焦化、烧结和球团等工序已实现超低排放。而在全球脱碳大潮的背景下，以减少碳足迹、降低碳排放为中心的温室气体控制成为新常态，钢铁冶金工艺革新与前沿技术研发成为传统钢铁产业转型升级新趋势。以氢代碳是未来低碳技术、能源变革的重要方向。基于工艺成熟的气基竖炉，富氢或纯氢气基竖炉直接还原是国内应全力发展的非高炉炼铁技术。与此同时，立足主流的烧结—高炉长流程冶炼工艺，布局发展以灰氢、蓝氢、绿氢为燃料的富氢低碳技术是实现钢铁工业绿色可持续发展的关键。

关键词： CO_2 减排；低碳；氢能；直接还原；高炉；烧结
中图分类号： TF55；TF046.4 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2021)06－0001－07
doi： 10.13403/j.sjqt.2021.06.077

An analysis on green low carbon technology of ironmaking process in the steel industry

LIU Chen，YE Hengdi，WEI Jinchao，HU Bing，WANG Zhaocai
（1. *National Engineering Research Center of Sintering and Pelletizing Equipment System，Changsha* 410205，*Hunan，China*；2. *Zhongye Changtian International Engineering Co.，Ltd.，Changsha* 410205，*Hunan，China*）

Abstract: At present，the source control and end-of-pipe treatment technologies of SO_2，NO_x and other harmful gases in the flue gas of domestic iron and steel industry are mature，especially the processes of coking，sintering and pelletizing have achieved ultra-low emissions. In the context of global decarbonization，greenhouse gas control centered on carbon footprint reduction and carbon emission reduction has become the new normal，and innovation of iron and steel metallurgy technology and cutting-edge technology R&D have become the new trend of transformation and upgrading of traditional steel industry. Hydrogen instead of carbon is an important direction for future low carbon technology and energy change. Based on the mature gas-based shaft furnace，the direct reduction of hydrogen-rich or pure hydrogen gas-based shaft furnace is the non-blast furnace ironmaking technology that should be fully developed in China. Meanwhile，based on the mainstream sintering-blast furnace long-process smelting process，the layout development of hydrogen-rich low-carbon technology fueled by gray hydrogen，blue hydrogen and green hydrogen is the key to realize green and sustainable development of steel industry.

Key words: CO_2 emission reduction；low carbon；hydrogen energy；direct reduction；blast furnace；sintering

据统计，2019年全球人类活动产生的 CO_2 排放总量达431亿吨，其中来自于化石燃料燃烧以及各类工业生产活动为368亿吨，占比为85.38%，此排放量继续突破历史记录，超过

收稿日期：2020－11－26；修回日期：2021－01－29
基金项目：湖南省重点研发计划资助项目(2018SK2049)；湖南省科技创新平台与人才计划(2018TP1033)
作者简介：刘 臣(1989—)，男，博士，工程师，从事铁矿烧结球团与直接还原等研究工作。
通讯作者：叶恒棣(1964—)，男，教授级高级工程师，国家烧结球团装备系统工程技术研究中心主任、烟气多污染物协同治理及资源化湖南省重点实验室主任，从事钢铁烟气治理与冶金装备等领域的研究工作。

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

2018年的365.7亿吨。众所周知，钢铁工业是煤炭和天然气等化石能源消耗与CO_2排放大户，2019年全世界粗钢产量达到18.69亿吨，导致CO_2排放量高达36.83亿吨(CO_2排放量为1.97 $t/t_{钢}$)，占温室气体排放总量的10.01%。其中，中国粗钢产量占全球份额的53.3%，钢铁生产模式以高炉—转炉长流程为主，CO_2排放量占全球钢铁行业碳排放量的60%。

近五年地球环境中持续增加的温室气体浓度影响气候变化，导致冰川融化、海平面上升，引发极端天气，严重威胁人类经济社会系统，因此严格限制温室气体排放成为世界各国亟待解决的重大问题。为了努力实现2 ℃或1.5 ℃的温控目标，传统高耗能、高污染的钢铁工业面临巨大挑战。为此，欧盟和日本相继启动了“ULCOS”和“COURSE50”计划，目标是在2050年之前实现CO_2排放量减少50%和30%[1]。钢铁工业作为中国兑现降低碳排放承诺的主战场之一，主要采取实施先进成熟节能低碳技术改造以减少原燃料消耗，通过淘汰落后生产工艺装备及耗能设备以优化工艺流程，通过加大风能、太阳能等非化石能源应用，建立多能互补、系统集成的能源体系等一系列措施减排CO_2[2]。

高炉—转炉长流程冶炼工艺在中国钢铁工业占主导地位，并在未来一段时间仍将占主要地位。然而，炼铁工序(包括焦化、烧结球团、高炉)的能耗占钢铁生产总能耗的90%，其CO_2排放占吨钢总排放的95%。由于种种原因，依靠现有技术实现钢铁行业进一步大幅节能、降碳的潜力已十分有限，因此钢铁工业低碳转型发展必须将重心放在炼铁工序，逐步开发应用气基、煤基直接还原等短流程工艺，改善能源结构，加强氢能等清洁能源利用，促进能源低碳化或无碳化发展。

本文探讨气基(氢气)竖炉直接还原的发展动态，同时立足烧结—高炉长流程，分析提高氢碳置换比，实施氢能清洁炼铁的可行性，为中国钢铁企业绿色发展献计献策。

1 钢铁工业节能低碳技术

作为中国国民经济重要的支柱产业，钢铁工业在烧结球团—高炉—转炉长流程生产过程中需要消耗巨量的能源，其消耗量占全国能源消耗总量的15%~16%。然而，目前我国钢铁工业的吨钢能耗不断降低，2018年钢铁工业协会会员生产企业总能耗为26 417.01万吨标煤，吨钢综合能耗为555.24 $kg_{标煤}/t$[3-4]，达到了国际先进水平。钢铁工业能效提升的两大途径是生产过程高效用能和末端余热回收利用，广泛应用的代表性技术如图1所示[5-6]。目前，随着关键性节能技术的攻关与突破，如高炉渣余热回收利用技术、低热值烧结烟气余热回收利用技术，钢铁工业吨钢能耗必然继续下降，达成绿色钢铁转型升级目标。

2018年中国单位国内生产总值CO_2排放下降4.0%，比2005年累计下降45.8%，已经提前实现了“国家自主奉献”的承诺，基本扭转了温室气体排放快速增长的局面。然而，由于钢铁长流程拥有的高碳消费与排放属性，其CO_2排放量所占全国CO_2排放总量的份额远高于国际平均水平，温室气体减排任务依旧任重道远。特别针对炼铁流程，必须依赖于新技术突破与创新，改善能源结构，采用氢冶金或富氢燃料冶金，从源头上实现低碳炼铁，其未来发展趋势如图2所示。

2 富氢与纯氢气基竖炉直接还原工艺

2.1 气基竖炉直接还原工艺

进入21世纪以来，世界直接还原铁(DRI)产量变化趋势如图3所示。2017、2018年全球DRI的总产量分别为8 710和9 980万吨，相对于2016年，其分别增长19.71%和37.16%，实现近20年来的最大涨幅。其中，气基竖炉直接还原工艺的产量占据绝对优势。据以往统计，MIDREX气基竖炉的产量约占63.2%，HYL/Energiron气基竖炉产量约占15.4%[7-8]。

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

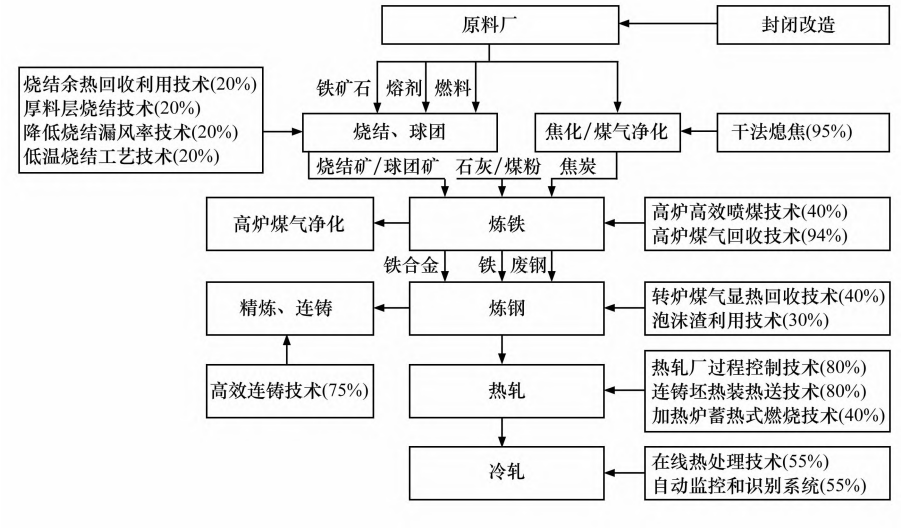


图 1　钢铁工业先进节能技术

Fig. 1　Advanced energy-saving technology in iron and steel industry

(注:图中百分比为技术普及率)

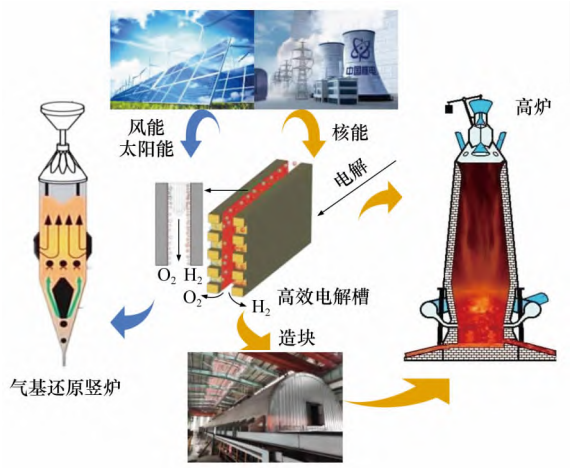


图 2　未来钢铁工业低碳炼铁发展趋势

Fig. 2　Development trend of low-carbon iron making for iron and steel industry in the future

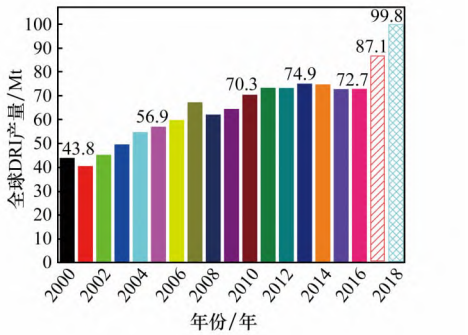


图 3　2000—2018 年世界直接还原铁产量变化

Fig. 3　The yield change of direct reduced iron in the world from 2000 to 2018

2.2　富氢煤气竖炉直接还原工艺

以天然气或煤制合成气为还原剂的 MIDREX 和 HYL/Energiron 气基竖炉早在 20 世纪 50 年代就实现了富氢煤气竖炉直接还原技术工业化应用，多数竖炉入炉煤气的氢气体积分数已达 55%~80%。以 HYL/Energiron 为例，通过在竖炉内发生甲烷与水蒸气重整转化获得富氢还原气体[式(1)]，其中 $n(H_2)/n(CO)$(摩尔比)为 3.5 左右。

$$CH_4 + H_2O = CO + 3H_2 \quad \Delta H = 206\ kJ/mol \tag{1}$$

长久以来，我国钢铁界都在密切关注与尝试发展富氢煤气竖炉直接还原工艺，却由于天然气资源和高品位铁矿石原料问题而被迫滞后。目前，为了把握时代命脉，找准前进方向，国内各大钢铁厂及中钢研、上海大学、东北大学等科研院所重新聚焦于竖炉直接还原工艺，建立了氢冶金研究平台与示范工程，研发富氢还原工艺前沿技术[9-10]。具体如表 1 所示。

2.3　纯氢气基竖炉直接还原工艺

将还原气由富氢煤气转变为纯氢气是全球钢铁工业进一步降碳，达到碳中和与零排放目标的首选。特别是纯氢气基竖炉直接还原工艺，早在 20 世纪 80 年代欧洲国家工业试验已证明其在技术上是可行的。基于MIDREX常规工艺，

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

表1 国内富氢煤气竖炉直接还原工艺动态

Table 1 Development of direct reduction process of hydrogen-rich gas shaft furnace in China

企业与科研院所	项目内容	富氢来源
宝钢湛江钢铁、中钢国际	湛江钢铁采用 HYL 工艺，一期建设 1 座百万吨级、具备全氢工艺试验条件的氢基竖炉直接还原师范工程，二期计划再建设 1 套百万吨级氢基竖炉工程，目标为氢气占比达 80%~90%	焦炉煤气、天然气及水电解绿氢
中晋太行、中国石油大学、神雾集团	采用伊朗 MME 公司的 PERED 气基竖炉直接还原炼铁新工艺，着力打造“煤炭采选—焦化—焦炉煤气制还原铁—还原铁粉—粉末冶金”信息产业链，目标为 CO_2 排放减少 28%	焦炉煤气
河钢集团、意大利特诺恩集团、中冶京城	共同研发和建设全球首例 120 万吨规模的氢冶金示范工程，包括分布式绿色能源、低成本制氢、焦炉煤气净化、气体自重整、氢冶金、成品热送、CO_2 脱除等全流程创新研发	焦炉煤气
上海大学	成立氢冶金技术研究与成果转化中心，近中期力推高炉富氢低碳冶炼技术，中远期发展基于非高炉的富氢或纯氢气基还原工艺	焦炉煤气
东北大学	成立全国高校首家低碳钢铁冶炼技术重大研究平台——低碳钢铁前沿技术研究院，重点突破低碳钢铁冶炼关键共性技术，采用氢冶金、二氧化碳捕集利用、钢铁化工智能耦合联产等前沿技术。	煤气与电解水

其采用 100% 氢气作为入炉还原气，将外部生成的氢气引入生产系统，无需重整装置，利用气体加热装置将氢气加热到所需温度。同时由于竖炉内存在水煤气反应，还原气中的 CO_2 和 CO 可保持平衡，系统不需要 CO_2 脱除装置。根据计算，与高炉流程相比，该工艺可将 CO_2 排放量降低 80% 左右。

值得注意的是，100% 纯氢气受到既环保又经济制氢技术的强烈限制。虽然氢气可广泛从水、化石燃料等含氢物质中制取，包括“绿氢”、“蓝氢”、“灰氢”这三类，但能够提供全程无碳的技术路线是有限的。“绿氢”(可再生氢)可以通过核能制氢、太阳能制氢、生物制氢，但这些孵化技术真正产业化的道路必然曲折。“蓝氢”是以实现碳中和为前提，由地球提供的煤或天然气等化石燃料制得，并将 CO_2 副产品捕获、利用和封存(CCU 与 CCS)。“灰氢”则由以焦炉煤气、氯碱尾气为代表的工业副产气制取，是短、中期所需要的低碳替代品，其既可减少污染物排放，又能实现余能回收利用。

紧跟时代发展，引领环保大任，中国高度重视清洁能源技术开发，如国家重点研发计划“可再生能源与氢能技术”重点专项 2020 年拟在氢能、太阳能、风能、可再生能源耦合与系统集成技术 4 个技术方向启动 14~28 个项目，拟安排国拨经费总概算为 6.06 亿元。在社会通用技术开发方面，需要推进采用核电、再生能源提供廉价、量产氢的技术开发，以及廉价的 CO_2 存储、再利用技术的开发等。

3 长流程富氢低碳冶炼技术

在我国，烧结—高炉长流程炼铁工艺占主导地位，如火如荼的钢铁厂新建与改造依然以长流程为主，而且在未来几十年，没有其它工艺可以替代长流程以支撑国内大循环与国内国际双循环对钢铁材料的庞大需求。然而面对环保压力，长流程低碳化任重道远，实现长流程低碳化才能助力我国实现 2040 年碳排放量减少 60% 的目标。因此，高炉与烧结的低碳化必须引起足够重视。

3.1 高炉富氢还原炼铁技术

国内外研究机构逐渐意识到将氢气用于钢铁制造是优化能源结构、工艺流程和产业结构，彻底实现低碳绿色化可持续发展的有效途径之一，并提出了基于氢冶金的高炉富氢或纯氢还原炼铁技术，如表 2 所示[11]。由表 2 可以看出，高

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

炉富氢还原炼铁技术可减排 $CO_2$15%～50%，有利于高炉低碳化发展，但这些技术的氢气来源仍以“灰氢”为主，当采用“绿氢与蓝氢”，高炉富氢还原炼铁技术的碳排放将继续降低。

表 2　国内外高炉富氢还原炼铁技术动态

Table 2　Development of hydrogen-rich reduction ironmaking technology in BF at home and abroad

企业与科研院所	项目内容	氢气来源
日本 COURSE50	以“创新的炼铁工艺”为主要研究内容，开发高炉富氢还原炼铁技术和高炉炉顶煤气 CO_2 捕集储存技术，到 2050 年吨钢 CO_2 排放量减少 30%	焦炉煤气或改质焦炉煤气
德国迪林格和萨尔钢公司	实施将自产富氢焦炉煤气输入高炉中	富氢焦炉煤气
德国蒂森克虏伯	采用“以氢代煤”富氢还原炼铁，将氢气注入杜伊斯堡 9 号高炉，减排 CO_2 达 20%。	液化气
韩国	氢还原炼铁；减排 CO_2 为 15%	副产品煤气改质
宝武集团、中核集团、清华大学	签订《核能－制氢－冶金耦合技术战略合作框架协议》，开展超高温气冷堆核能制氢的研究，实现钢铁行业的 CO_2 超低排放和绿色制造	核能制氢
邢钢、中钢研	实施清洁低碳富氢炼铁技术改造项目：实现自产焦炉煤气梯级高效利用，焦炭消耗降低 40% 以上；减少 CO_2、NO_x、SO_2 排放达 30%～50%，全年可减少 CO_2 排放约 29 万吨，减少 SO_2 排放约 1 800 t。	焦炉煤气
荣程集团、中冶赛迪、东北大学、中国石油等	2020 年共同签署绿色氢冶金战略合作框架协议，成立绿色氢能冶金“产学研”战略合作联盟，开展高炉氢能冶炼试验工作。	—

烧结作为长流程的重要工序，主要采用焦粉或无烟煤等固体燃料供热。燃料中含有 C、S、N 等，会在烧结过程形成 CO_x、SO_2、NO_x 等气体污染物，使烧结成为高能耗、高污染工序。因此，富氢、低碳烧结技术是深入降低能源消耗与污染物排放的创新前沿技术之一。

3.2　富氢燃料烧结技术

日本率先开展烧结料面喷加氢系气体燃料研究，JFE 钢铁公司和九州大学开发了烧结料面喷加 LNG 技术，实现工序能耗降低 1.65 $kg_{标煤}$/t-s。在国内，梅钢采用烧结料面喷加焦炉煤气技术实现能耗降低 1.48 $kg_{标煤}$/t-s，韶钢和中天钢铁采用烧结料面喷加天然气技术，实现工序能耗分别降低 1.99、2.63 $kg_{标煤}$/t-s。随着烧结料层喷加富氢燃料技术的优化，烧结工序能耗明显降低。近年来，叶恒棣、范晓慧等[12-14]在烧结料层喷加富氢燃料辅助烧结技术的基础上，提出高配比富氢燃料烧结技术，即烧结料面喷加高配比富氢气相燃料以替代碳系固相燃料，强化净减碳比（氢代碳占比）指标，为烧结低碳化指明了方向。

通常，烧结料层热状态变化必然影响烧结矿产、质量指标。在烧结杯中（料层高度为 700 mm）开展高配比富氢燃料烧结试验，当喷加焦炉煤气为 0.6% 时，料层高度为 300 mm 处的料层热状态如表 3 所示。由表 3 可知，在焦粉配比相同情况下，喷加焦炉煤气使料层最高温度提高33 ℃，高温焙烧时间延长1.9 min，冷却

表 3　高配比富氢燃料烧结料层热状态

Table 3　Themal state of sinter bed with high proportion hydrogen-rich fuel

试验方案	焦粉质量分数/%	焦炉煤气/%	最高温度/℃	高温焙烧时间/min	冷却速度/(℃·min^{-1})
1#	5.3	0.0	1 275	1.5	162.0
2#	5.3	0.6	1 308	3.4	79.7
3#	5.0	0.6	1 280	2.4	123.3

注：高温焙烧时间温度＞1 200 ℃；冷却速度最高温度为 900 ℃。

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

速度降低82.3 ℃/min，料层热状态指标的改善有利于液相大量生成，有利于低熔点黏结相的慢速冷凝结晶，易于产生性能优良的针、柱状铁酸钙，从而提升烧结矿强度与冶金性能[15]。在喷加焦炉煤气0.6%和保证料层热状态的前提下，固体燃料消耗降低0.3%，可实现烧结低碳化。

基于料层热状态变化，推断出独特的高配比富氢燃料烧结料层供热模式，如图4所示。

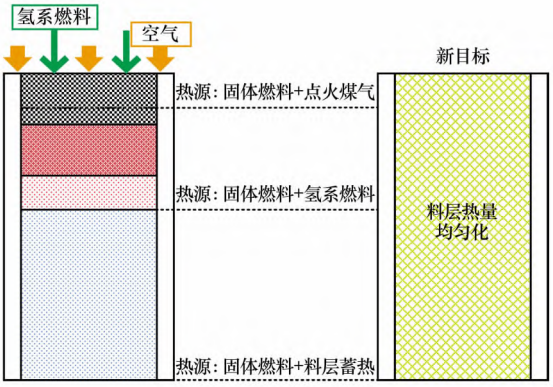


图4 高配比富氢燃料烧结的料层供热模式

Fig. 4 Heating mode of the bed in high proportion hydrogen-rich fuel sintering

料层顶部以固体燃料和点火煤气为热源，料层中上部以固体燃料和氢系燃料为热源，料层中下部以固体燃料和料层蓄热为热源。通过不同热源的热量优化，实现料层均热是高配比富氢燃料烧结实现烧结矿产量提升与质量均一化的新目标。

3.3 烧结料面喷加水蒸气技术

已有研究证明水蒸气在热力学上可参与烧结中碳的燃烧过程[16]，会发生以下反应。

$$C + H_2O(g) = CO + H_2 \quad 131.5\ kJ/mol \quad (1)$$

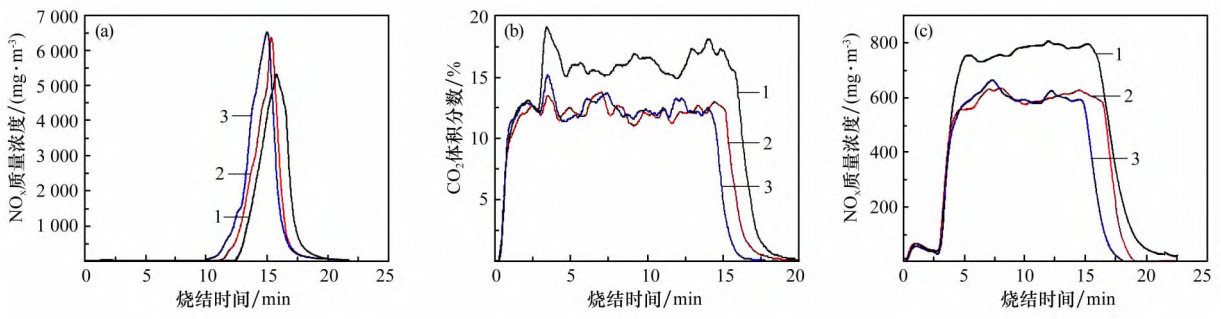
$$C + 2H_2O(g) = CO_2 + 2H_2 \quad 90\ kJ/mol \quad (2)$$

因此，可近似认为水蒸气也属于含氢燃料。在烧结杯上开展烧结料面喷加水蒸气试验，热风温度为150 ℃，水蒸气体积分数分别为2%、5%，研究喷加水蒸气对烧结指标及烟气中污染物排放规律的影响，结果分别如表4、图5所示[17]。由表4可知：当水蒸气体积分数为2%时，烧结矿的转鼓强度与烧结利用系数都有提高；当水蒸气体积分数为5%时，各项烧结指标开始变差，尤其是烧结矿转鼓强度下降幅度较大，仅为47.13%。

表4 水蒸气体积分数对烧结指标的影响

Table 4 Effect of water vapour content on sintering indexes

水蒸气体积分数/%	垂直烧结速度/(mm·min^{-1})	成品率/%	转鼓强度/%	利用系数/(t·m^{-2}·h^{-1})
0	21.67	81.47	50.34	1.420
2	22.02	79.37	50.79	1.500
5	22.33	78.59	47.13	1.417



(a) SO_2 质量浓度；(b) CO_2 体积分数；(c) NO_x 质量浓度

水蒸气体积分数/%：1—0；2—2；3—5。

图5 水蒸气体积分数对烟气中污染物的影响

Fig. 5 Effect of water vapour content on pollutant emission in sintering flue gas

由图5可知，当水蒸气体积分数为2%、5%时，烟气中 CO_2 体积分数明细降低且作用效果相同，这使得 CO_2 体积分数都为12.5%左右，这说明循环少量水蒸气就可达到 CO_2 减排

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

的目标。烟气中 SO_2 体积分数峰值逐步增加，原因是喷加的水蒸气最终会使水分冷凝带的含水量增加，吸收烟气中高体积分数 SO_2，过湿带消失时被吸收的 SO_2 再次释放出来，导致其峰值增大。烟气中 NO_x 质量浓度得到明显降低（低于 615 mg/m^3），且二者的作用效果近乎相同，反应(1)、(2)产生的还原性气体 CO 和 H_2 将新生的 NO_x 还原为 N_2，同时还原性气氛抑制焦炭燃烧过程中含氮有机化合物分解生成的部分 NO_x 前驱物向 NO_x 的进一步转化。

4　结　论

(1) 中国绿色发展理念要求传统钢铁工业由节能减排进一步转向低碳化发展，而炼铁工序低碳化是钢铁产业绿色转型升级的重中之重。富氢与纯氢气基竖炉直接还原工艺与长流程富氢低碳冶炼技术是炼铁发展的两大主流方向。

(2) 基于成熟的气基竖炉直接还原工艺，目前国内可大力发展以灰氢为还原剂的富氢煤气竖炉直接还原工艺。环保经济的制氢、储氢技术突破将推动纯氢气基竖炉直接还原工艺发展。

(3) 烧结—高炉—转炉长流程冶炼工艺的主导地位在短期内不可动摇，必须要求高炉与烧结实现同步低碳化。高炉富氢还原炼铁、富氢燃料烧结及烧结料面喷加水蒸气等前沿技术可实现长流程低碳冶炼与清洁生产。

参考文献:

[1] TECHNICAL S. Production and technology of iron and steel in Japan during 2019 [J]. ISIJ International, 2020, 60(6): 1063 – 1082.

[2] 李新创，李冰. 全球温控目标下中国钢铁工业低碳转型路径 [J]. 钢铁，2019，54(8)：224 – 231.
LI Xinchuang, LI Bing. Low carbon transition path of China´s iron and steel industry under global temperature-control target [J]. Iron and Steel, 2019, 54(8): 224 – 231.

[3] CHEN Wenying, YIN Xiang, MA Ding. A bottom-up analysis of China´s iron and steel industrial energy consumption and CO_2 emissions [J]. Applied Energy, 2014, 136: 1174 – 1183.

[4] ZHANG Qi, XU Jin, WANG Yujie, et al. Comprehensive assessment of energy conservation and CO_2 emissions mitigation in China´s iron and steel industry based on dynamic material flows [J]. Applied Energy, 2018, 209: 251 – 265.

[5] 陆钟武，蔡九菊，杜涛，等. 论钢铁行业能耗、物耗、排放的宏观调控 [J]. 中国工程科学，2015，17(5)：126 – 132.
LU Zhongwu, CAI Jiuju, DU Tao, et al. The macro-control on energy consumption, material consumption & waste emission of steel industry [J]. Strategic Study of CAE, 2015, 17(5): 126 – 132.

[6] 李新创. 钢铁工业“十二五”回顾和未来发展思考 [J]. 钢铁，2016，51(11)：1 – 6.
LI Xinchuang. Review of steel industry in the 12th Five-Year Period and future development [J]. Iron and Steel, 2016, 51(11): 1 – 6.

[7] 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 – 62.
ZHANG Ben, ZHAO Zhilong, GUO Hao, et al. Development of direct-reduction ironmaking technology in gas-based shaft furnace [J]. Research on Iron & Steel, 2016, 44(5): 59 – 62.

[8] 张福明，曹朝真，徐辉. 气基竖炉直接还原技术的发展现状与展望 [J]. 钢铁，2014，49(3)：1 – 10.
ZHANG Fuming, CAO Chaozhen, XU Hui. Current status and prospects of gas-based shaft furnace direct reduction technology [J]. Iron and Steel, 2014, 49(3): 1 – 10.

[9] 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.
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.

[10] 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.

[11] 王广，王静松，左海滨，等. 高炉煤气循环耦合富氢对中国炼铁低碳发展的意义 [J]. 中国冶金，2019，29(10)：1 – 6.
WANG Guang, WANG Jingsong, ZUO Haibin, et al. Effect of blast furnace gas recycling with hydrogen injection on low carbon development of Chinese ironmaking [J]. China Metallurgy, 2019, 29(10): 1 – 6.

[12] 叶恒棣，周浩宇，王兆才，等. 高配比富氢燃料烧结技术研究及展望 [J]. 烧结球团，2020，45(5)：1 – 7.
YE Hengdi, ZHOU Haoyu, WANG Zhaocai, et al. Research and prospect of high proportion hydrogen-rich fuel sintering technology [J]. Sintering and Pelletizing, 2020, 45(5): 1 – 7.

[13] JI Zhiyun, ZHOU Haoyu, FAN Xiaohui, et al. Insight into the application of hydrogen-rich energy in iron ore sintering: Parameters optimization and function mechanism [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 135: 91 – 100.

（下转第 26 页）

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

能及耐水性影响[J]. 混凝土,2017(5):75-78;81.
ZHANG Zhongzhe,FENG Yong,JIN Qiang,et al. Steel slag to replace aggregate effect on the mechanical properties and water resistance of concrete[J]. Concrete,2017(5):75-78;81.

[2] 王勇斌,朱丽娟,杨国辉,等. 钢渣砂在混凝土中的应用研究[J]. 商品混凝土,2019(7):38-42.
WANG Yongbin,ZHU Lijuan,YANG Guohui,et al. Applycation of steel slag in concrete[J]. Ready-mixed Concrete,2019(7):38-42.

[3] 赵立杰,张芳. 钢渣资源综合利用及发展前景展望[J]. 材料导报,2020,34(S2):1319-1322;1333.
ZHAO Zhijie,ZHANG Fang. Comprehensive utilization and development prospect of steel slag resources[J]. Materials Reports,2020,34(S2):1319-1322;1333.

[4] 王强,阎培渝. 大掺量钢渣复合胶凝材料早期水化性能和浆体结构[J]. 硅酸盐学报,2008,36(10):1406-1410;1416.
WANG Qiang,YAN Peiyu. Characteristics of Hydration Products of Steel Slag[J]. Journal of the Chinese Ceramisc Society,2008,36(10):1406-1410;1416.

[5] 林茂松,张凌怡,王琼,等. 用于钢矿粉复合助磨剂的试验研究[J]. 混凝土,2015(2):63-64;68.
LIN Maosong,ZHANG Lingyi,WANG Qiong,et al. Reserch on composite ginding aid of steel slag and blast furnace slag power[J]. Concrete,2015(2):63-64;68.

[6] 张添华,刘冰,李惊涛,等. 钢渣粉磨工艺技术现状及发展方向[J]. 环境工程,2016,34(S1):704-706;725.
ZHANG Tianhua,LIU Bing,LI Jingtao,et al. The current situation and development orientation of stell slag grinding technology[J]. Environmental Engineering,2016,34(S1):704-706;725.

[7] MOTZ H,GEISELER J. Products of steel slags an opportunity to save natural resources[J]. Waste Management,2001,21(3):285-293.

[8] RAMACHANDRAN V S. Influence of triethanolamine on the hydration characteristics of tricalcium silicate[J]. Journal of Applied Chemistry and Biotechnology,1972,22(11):1125-1138.

[9] 曹虎,李海燕,陈梦龙,等. 改性醇胺助磨剂的应用研究[J]. 中国建材科技,2020,29(1):34-36.
CAO Hu,LI Haiyan,CHEN Menglong,et al. Application research on modifide alcoholamine ginding aid[J]. China Building Materials Science &Technology,2020,29(1):34-36.

[10] 肖建敏,李辉,朱绘美,等. 利用红外和核磁技术分析矿渣硅酸盐复合胶凝材料的水化产物[J]. 材料科学与工程学报,2018,36(4):644-649;630.
XIAO Jianmin,LI Hui,ZHU Huimei,er al. Analysis on hydration products of cement-slag complex binderpastes by FITR and NMR[J]. Journal of Materials Science & Engineering,2018,36(4):644-649;630.

[11] 彭康,黄从运,杜颖,等. 改性三乙醇胺高分子助磨剂对水泥水化的影响研究[J]. 硅酸盐通报,2016,35(12):4201-4206.
PENG Kang,HUANG Congyun,DU Ying,et al. Effect of modifide triethanolamine polymer grinding aids on composite cement hydration process[J]. Bulletin of The Chinese Ceramic Society,2016,35(12):4201-4206.

[12] 江朝华,蔡安兰,严生,等. 硅酸盐类水泥助磨剂的实验研究[J]. 硅酸盐通报,2001,20(1):10-10.
JIANG Chaohua,CAI Anlan,YAN Sheng,et al. Study on ginding aids for portland-type cement[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2001,20(1):10-13.

[13] 林辉,王学光,王栋民,等. 不同官能团有机物对矿渣粉磨及矿渣水泥性能的影响[J]. 非金属矿,2014,37(5):53-56.
LIN Hui,WANG Xueguang,WANG Dongmin,et al. The influences of the organic that contains different functional groups on the grinding of slag and the performances of slag cement[J]. Non-Metallic Mines,2014,37(5):53-56.

(上接第7页)

[14] HUANG Xiaoxian,FAN Xiaohui,JI Zhiyun,et al. Investigation into the characteristics of H_2-rich gas injection over iron ore sintering process: Experiment and modelling[J]. Applied Thermal Engineering,2019,157:113709.

[15] 李文琦. 优化烧结料层透气性和温度场的研究[D]. 长沙:中南大学,2012.
LI Wenqi. Investigation on optimizing permeability and temperature field of sintering bed[D]. Changsha: Central South University,2012.

[16] 裴元东,史凤奎,吴胜利,等. 烧结料面喷洒蒸汽提高燃料燃烧效率研究[J]. 烧结球团,2016,41(6):16-20;52.
PEI Yuandong,SHI Fengkui,WU Shengli,et al. Research on spraying steam on surface of sintering material bed to increase fuel combustion efficiency[J]. Sintering and Pelletizing,2016,41(6):16-20;52.

[17] 刘臣. $SO_2/NO_x/CO_x$ 在铁矿石烟气循环烧结过程中的行为研究[D]. 长沙:中南大学,2013.
LIU Chen. Research on behavior of $SO_2/NO_x/CO_x$ in the process of flue gas circulation sintering of iron ores[D]. Changsha: Central South University,2013.

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