

国内外低碳绿色炼铁技术的发展

张福明，程相锋，银光宇，曹朝真

（首钢集团有限公司）

摘要：概述了国内外氢冶金和低碳炼铁技术的发展现状，对主要关键工艺技术进行了比对研究和分析评价。结合我国炼铁工业的资源和能源条件，对低碳冶金、氢冶金和碳-氢耦合冶金技术进行了探讨，提出了焦化+烧结+球团+高炉长流程实现低碳冶金和碳-氢耦合冶金的技术路线。针对全氧高炉、氢基竖炉直接还原铁和熔融还原炼铁技术的发展提出了建议，研究分析了其工艺过程的关键技术。

面对碳

减排和碳中和的发

展态势，炼铁工业如何最大限度地减

少对碳素能源的依赖，减少碳素消耗和CO₂

排放，是未来炼铁发展的主要课题。目前，国外已有许多钢铁企业对低碳冶金技术，特别是氢冶金技术进行了战略布局，并呈现出迅猛发展态势。我国也应积极探索适合国情的低碳冶金和节能减排技术。

1国外低碳冶金技术

以日本、瑞典、德国、韩国等工业发达国家为代表，有的是在原有高炉炼铁工艺的技术上进行改进创新，力图实现碳-氢耦合冶金（日本COURSE50）[1]；有的是创建全新工艺流程，以“绿氢”为能源，生产钢铁材料，完全摆脱碳冶金的技术路线[2-4]；有的是在已有技术的基础上进行再创新[5-6]，从传统的煤基碳素还原转变为气基氢还原或碳-氢耦合还原。

1.1日本COURSE50项目

COURSE50项目是由日本钢铁联盟发起

，并得到日本新能源和产业技术开发组织（NEDO）的支持，由神户制钢、JFE、新日铁住金、日新制钢和新日铁住金工程共同研发的突破性炼铁工艺技术[7]。日本根据现代钢铁材料应用现状、性能质量和生产技术的发展趋势，预测到2050年以后，仍然需要大量使用铁矿石通过高炉冶炼工艺，制造高品质、高性能的钢铁材料。因此，COURSE50项目是利用天然铁矿石，采用高炉炼铁工艺实现CO₂大幅度减排的新技术研发项目。

COURSE50项目的核心关键目标，旨在开发减

少高炉炼铁工艺CO₂排放，包括从高炉煤气中分离和回收CO₂

的新型高炉炼铁工艺技术，最终减少约30%的CO₂

排放量[8]。项目计划在2008—2030年完成全部技术研发工作；2030—2050年完成全部技术推广应用工作，实现新研发技术的工程化和产业化

。按项目研发最终目标值测算，2050年以后，日本炼铁工序的吨铁CO₂排放量将从目前1.641降低到1.15t。

日本研究者认为，减少高炉炼铁工艺CO₂

排放的关键技术，是开发出高炉工艺

氢还原铁矿石的新技术，其目标是实现CO₂

减排约10%。强化高炉内氢还原铁矿石过程需要两项支撑技术：一是，提高H₂体积分数的焦炉煤气重整、改质技术；二是，高强度、高反应性焦炭的生产

技术。COURSE50项目高炉煤气中CO₂

的分离和回收技术，其研发目标是实现CO₂

减排约20%。高炉富氢还原和炉顶煤气中的CO₂分离和回收，合计可降低CO₂

排放约为30%。同时，为了避免高炉煤气中CO₂脱除回收过程新增能源的CO₂

排放，还需要开发出钢铁厂未能全量利用的新型余热回收技术，从而支撑高炉煤气中CO₂的分离、回收的能量输入。

COURSE50项目在2018年先后进行了5次试验（2018年10月29日—11月27日，共计30d），通过改变还原气体和原材料配比，试验了氢气

对炼铁过程的改善效果。第二阶段的研究

重点是在高炉煤气中分离回收CO₂和余热，并计划于2022年度进行实际高炉的放大试验测试。

2018年，项目研发者采用三维高炉数学

模型，研究了氢气喷吹技术对CO₂

排放减排的影响。2022年将在2座高炉上进行工业试验，目前已开展高炉工业性试验的前期准备工作。

1.2瑞典钢铁公司的“突破性氢能炼铁技术”（HY-BRIT）

2016年，瑞典钢铁公司（SSAB）、LKAB（欧洲最大的铁矿石生产商）和Vattenfall（大瀑布公司，欧洲最大的能源公司之一）联合创建基于氢能冶金的HYBRIT项目[9]。目标是使用非化石燃料所生产的电力和氢气替代炼焦煤等传统工艺，以实现无化石能源的炼钢技术。2018年夏，该项目进入中试阶段，在瑞典吕勒奥的SSAB工厂开工建设了全球第一个无化石能源的钢铁制造中试工厂。在HYBRIT中试工厂中，采用电解水产生氢气，试验氢气直接还原技术的可行性，采用该技术生产直接还原铁（DRI），然后将DRI与废钢等一起用于炼钢生产。

2019年夏，在瑞典Malmberget的LKAB工厂建造无化石燃料的球团生产线，采用生物质燃料替代化石燃料，以实现基于无化石燃料工艺的铁矿球团制造技术。另外，计划在Svartberget的LKAB工厂建造一个位于地下25-35m的氢气存储中试装备，该项目靠近吕勒奥的HYBRIT中试工厂。预计该存储中试装备将于2022—2024年投入运行。

2020年8月5日，LKAB在球团生产工艺中使用无化石燃料工业化试验获得成功。新一代球团厂的开发正在进行中，LKAB对HYBRIT的主要研发工作是开发无化石燃料的球团生产工艺，因此需要在球团焙烧过程中改进和创新加热工艺。LKAB在Malmberget一个现有的球团厂，正在进行全面的试验研发工作，例如用生物油代替石油，在试验期内，该项目的CO₂

排放量减少了40%，该项试验将持续到2021年。除此之外，以无化石燃料电力和生物燃料为基础的替代燃料也进行了试验，其中包括采用氢气和等离子体等。

（1）建设工业级的示范线。HYBRIT工业化示范线将于2023年开工建设，计划于2025年示范工厂建成投产。该示范工厂产能将达到100万t/a，约为LKAB在Malmberget总产能的20%，约占SSAB吕勒奥厂高炉产能的50%。与此同时，SSAB奥克斯兰德厂的高炉将进行改造，计划将于2026年实现工业化无化石能源的铁矿冶炼工艺突破。SSAB最早将于2025年之前，有望将CO₂排放量减少25%。

（2）示范工厂工业化试验成功之后，将进行传统工艺流程的彻底改造。计划于2030—2040年将其全部的传统高炉流程转变为电炉流程。同时，SSAB开始逐步淘汰全公司的轧钢厂和热处理厂的化石燃料燃烧加热工艺，2045年全面实现无化石能源的钢铁制造。

1.3高炉喷吹富氢还原气体

（1）德国蒂森克虏伯高炉喷吹氢气试验项目。德国蒂森克虏伯计划将在2050年前实现碳中和的战略目标，实现温室气体的“净零排放”。为实现这个战略目标，蒂森克虏伯制定了两个关键性中期目标：一是到2030年，生产和能源供应系统的CO₂

排放量比2018年减少30%；二是使用该公司产品和技

术客户的CO₂

排放量比2017年减少16%（

例如汽车制造企业、家电制造企业等）。2018年蒂森克虏伯CO₂排放量约为2400万t，约占德国CO₂排放总量的3%。

蒂森克虏伯作为国际先进的钢铁制造企业，采用传统高炉炼铁工艺，其焦比、煤比和燃料比分别约为300kg/t、200kg/t和500kg/t，在国际上处于先进行列，特别是蒂森克虏伯的高炉喷煤技术，近30年来一直处于领先水平。面向本世纪中期的碳中和战略，蒂森克虏伯认为氢能的利用是实现碳中和战略目标的关键。2019年11月，杜伊斯堡厂9号高炉（容积为1833m³，炉缸直径为10m，日产量约为4600t/d），开始进行喷吹氢气炼铁试验，在1个风口上喷吹氢气代替煤粉，取得初步成效。计划下一阶段逐步在高炉28个风口上全部喷吹氢气，并将从2022年起开始在北莱茵-威斯特法伦州的全部3座高炉上喷吹氢气，预计可减少20%的CO₂

排放。与此同时，在实现氢能稳定供应的条件下，蒂森克虏伯已经开始规划建造利用氢气进行直接还原的冶金工厂。

（2）安赛乐米塔尔（以下简称安米）纯氢炼铁技术研发。在全球积极推动碳中和的背景下，安米计划投资6500万

欧元，在德国汉堡厂进行氢直接还原铁矿石的项目研究，项目研发技术路线与瑞典HY-BRIT类似，并计划在未来几年建设中试工厂。目前安米汉堡厂采用天然气生产直接还原铁，计划未来几年，在汉堡厂进行利用氢直接还原铁矿石的工艺试验，中试厂的规模为10万t/a。该研究项目的氢气制备将采用变压吸附工艺，从安米汉堡厂的冶金煤气中分离氢气，使其纯度达到95%以上，待未来有足够数量绿氢（来自可再生能源的氢）时，将采用绿氢生产直接还原铁。

安米在德国不莱梅厂的研究项目是通过电解槽制备氢气，并将氢气喷入高炉风口。该项目将可以减少高炉炼铁过程中所需的碳素消耗，从而减少CO₂排放。

安米在法国敦刻尔克厂，正在开发将钢铁生产过程中产生的副产煤气转化成合成气体喷入高炉的工艺，包括向高炉喷吹直接还原副产煤气技术，以及向高炉风口喷吹合成气体技术。开展炼铁高炉-

直接还原竖炉耦

合工艺流程的规模性工业试验，

利用合成气体替代化石燃料将有助于大幅降低CO₂

排放，在可以大规模获取“

绿氢”时，将向高炉喷吹“绿氢”，进而实现炼铁过程

的CO₂

净零排放。安米公司计划在欧洲板材生产基地应用这项技术，将不同来源的气体（如富氢焦炉煤气）喷入高炉，这种高效、经济的技术方案，可以有效减少钢铁生产过程中的

CO₂

排放。安米阿斯图里亚斯厂拥有先进的焦炉煤气处理工艺，可以向高炉喷吹“灰氢”，即从天然气和焦炉煤气中提取氢气，该项目将于2021年启动。

（3）德国迪林根和萨尔钢公司富氢炼铁技术。德国迪林根（Dillinger）和萨尔钢铁公司（Saarstahl）计划投资1400万欧元，从2020年开始，用于研究将钢铁厂的富氢焦炉煤气，在萨尔钢铁公司的2座高炉上喷吹，从而实现利用氢气替代部分碳素燃料的工艺技术，这项研究所涉及的设备及基础设施不影响高炉运行。

在钢铁生产中使用氢能是减少CO₂

排放的一个关键技术要素，高炉喷吹富氢焦炉煤气是生产绿色钢材和合理利用资源或能源的重要措施。在高炉生产过程中，氢气代替碳素作为还原剂和能量载体，可以有效降低在高炉生产过程CO₂排放。

2020年8月，迪林根钢铁公司发布消息，该厂建成并投产了德国首家在高炉常规运行中，使用氢气作为还原剂的氢基钢铁生产厂，该厂的钢铁生产新工艺由Dillinger和Saarstahl钢铁公司共同开发和投资。该工艺通过向高炉中喷吹富氢焦炉煤气，进一步减少CO₂

排放，目前已经取得在钢铁生产中使用氢气的工程经验，未来计划在2座高炉上喷吹纯氢。两家钢铁公司的目标是到2035年将使CO₂

排放量减少40%，除此之外，两家公司还在进一步推进大型能效提升项目，并对现有系统的优化进行可持续投资。

1.4 氢能竖炉直接还原技术

（1）安米氢基DRI-EAF工艺流程研究。安米欧洲公司在汉堡厂拥有欧洲唯一的直接还原-电炉工艺装置，计划在汉堡厂进行氢还原铁矿石生产直接还原铁（DRI）的工业化规模试验，以及电炉炼钢流程使用无渗碳DRI进行工业试验。除此之外，安米法国敦刻尔克厂已经启动一项研究工作，建造一座大型DRI工厂并配置EAF。最初考虑使用天然气竖炉工艺生产DRI，结合自身在DRI生产方面的独特经验，以及汉堡厂在氢基DRI项目的工业试验结果，目前考虑将全部使用氢生产DRI。

（2）氢基Midrex工艺。研究认为，气基竖炉直接还原技术利用天然气、页岩气、煤层气、焦炉煤气以及合成气等多种氢基气体燃料，生产DRI可以显著降低CO₂

排放[10-13]。

神户制钢全资子公司米德雷

克斯的Midrex工艺已经得到商业化应用，而且已被证实

为CO₂

排放量最低的炼铁工艺路线，这是因为该工艺采用的天然气的氢气含量高于燃煤。典型Midrex工厂所使用的还原性气体中H₂

和CO的体积百分数分别为55%和36%，而高炉使用的还原性气体中CO体积百分数约为90%以上。因此，与电炉配合使用的Midrex工艺吨钢CO₂排放量约为高炉-

转炉流程的50%。截至2018年底，全球共有79座Midrex工厂投入运行，年产量约为6000万t/a。

目前，采用Midrex工艺生产的直接还原铁（DRI）产量超过全球DRI产量的60%。在建工厂投产后，2020年达到年产7500万t/a的规模。为显著减少钢铁工业的碳足迹，该公司正在开发一种利用低碳能源制备纯氢气并利用所制氢气生产直接还原铁的技术，被命名为“MIDREX H₂”，该技术在现有或新的直接还原铁厂都具有相当的应用潜力。

2国内常规高炉低碳炼铁技术

2.1优化高炉炉料结构

由于铁矿石资源禀赋和技术传承等多种原因，我国高炉炉料一直以烧结矿为主，配加少量酸性球团矿或块矿。近20年来，我国球团技术取得飞跃性发展，大型链算机-

回转窑

和大型带式焙

烧机球团生产线相继建成投

产，球团矿入炉比例不断提高，为降低铁前工序的能耗

、CO₂

和污染物排放，提高高炉入炉矿品位，促进高炉高效生产发挥了重要作用[14]。目前，我国大多数钢铁厂都配有球团生产线，在现有铁前系统工艺装备和技术条件下，应充分发挥现有球团生产线的生产效能，进一步提高球团矿入炉比例，提高高炉入炉矿综合品位，降低燃料比和渣量，进而降低CO₂排放[15]。

研究表明，带式焙烧机使用富氢焦炉煤气生产

球团矿时，吨矿CO₂

排放量仅为60kg/t；而采用碳素固体燃料为主生

产烧结矿时，吨矿CO₂排放量约为155kg/t。显而易见，烧结工序的CO₂

排放约为球团工序的2.5倍，因此发展球团工艺、提高球团矿入炉比例，非常有利于降低铁前系统的CO₂排放。

以首钢京唐为例，目前3座5500m³高炉球团矿入炉比例已稳定达到55%左右，高炉渣比约为220kg/t，高炉燃料比为480-490kg/t[16]。由于高炉使用超低硅碱性球团矿，综合入炉矿品位提高（61.5%-62%），高炉燃料比和渣比显著降低，极其有利于降低CO₂

排放。首钢京唐球团设计产量为1200万t/a，烧结矿产量为1100万t/a，如果充分发挥现有球团产线的生产效能，每年增产球团矿100-150万t/a，可满足单座高炉球团矿入炉比例提高到70%以上。

基于现有条件，完全可以在单座高炉上试验70%以上球团矿冶炼，积极探索通过炉料结构优化和改进实现碳减排的发展路径。理论计算表明，首钢京唐单座高炉球团矿比例从55%提高至70%，即每年用100万t/a球团矿替代烧结矿，球团矿替代烧结矿而带来的降低CO₂

排放量约为12.9万t/a。同时，球团矿入炉比例达到70%，高炉渣比将降低至200kg/t以下（约为180kg/t），燃料比可降低到470kg/t（接近常规高炉碳基冶金的理论燃料比465kg/t），力争实现常规高炉超低燃料比冶炼，降低燃料比而带来的CO₂

排放降低量为12.1万t/a，因此单座

高炉如果球团矿入炉比例达到70%，每年降低CO₂

排放量可达25万t。由此推论，3座5500m³高炉提高球团矿入炉比例达到60%，可以降低CO₂排放约30.3万t/a。

2.2优化高炉操作

（1）提高并稳定风温。高炉鼓风所带人的物理热从某种意义上讲，是一种“清洁低碳能源”，是回收利用高炉冶金过程伴生煤气而获得的高温热能[17]。提高风温的现实意义在于有效降低碳素消耗（如图1所示）和碳排放，维持合理的理论燃烧温度，为风口喷吹燃料提供能量基础和保障。风温应达到1200℃以上，有条件的要达到1250℃，技术装备领先的高炉要力争达到1280±20℃。

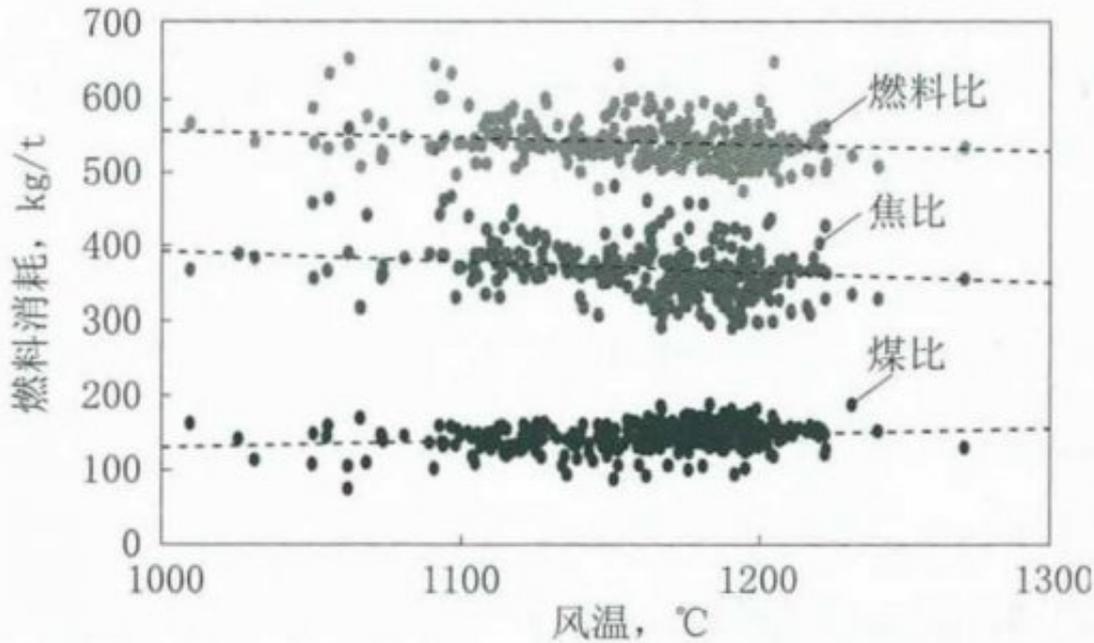


图1 2020年我国300余座高炉的燃料消耗与风温的关系

(2) 改善高炉送风操作。在极低焦炭消耗的条件下，改善高炉透气性将成为高炉炼铁技术发展最重要的研究课题。随着可再生能源发电技术的推广应用，我国电力结构将发生根本性转变（目前煤基火力发电量约占70%），基于可再生能源产生的“绿电”占比将逐步提高。提高鼓风富氧率（5%-10%）、降低吨铁鼓风量（ $<800\text{m}^3/\text{t}$ ）将成为现实，“绿电”将作为一种清洁“零碳”能源将被广泛应用于冶金工业。

提高鼓风富氧率的现实意义在于有效降低碳素消耗（如图2所示）和碳排放。随着富氧率的提高，炉腹煤气量降低，有助于提高CO和H₂的还原势能，对于改善高炉透气性，促进间接还原过程、提高生产效能都将发挥重要作用，这将成为未来高炉实现低碳冶炼的一个重要途径。

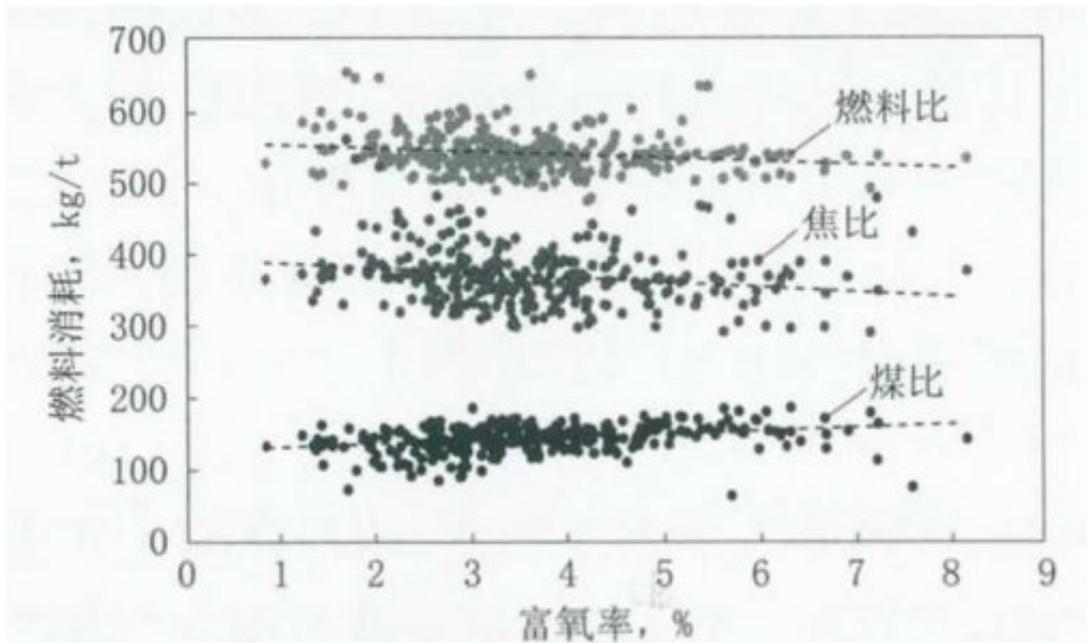


图2 2020年我国300余座高炉的燃料消耗与富氧率的关系

应当指出，未来随着社会废钢资源的增长，电炉流程的逐步推广应用将成为不争的事实。预计未来在高炉数量减少、高炉生铁总量减少的条件下，单座高炉的生产效能还将会进一步提高，采用高富氧-大喷煤和氧-

煤强化高炉冶炼将成为主要技术途径之一。

高富氧与高风温技术耦合匹配，是未来高炉大量喷吹富氢（氢基）燃料的重要基础。无论高炉喷吹天然气、焦炉煤气还是“电解制备的绿氢”，高富氧和高风温都是不可或缺的重要支撑技术。

(3) 提高炉顶压力。提高炉顶压力实质上是压缩了煤气体积、降低了煤气流速、延长了煤气在高炉内的停留时间，进而改善间接还原动力学条件，从而有助于煤气和铁矿石之间的气-固反应，增强了煤气的扩散、穿透能力，强化了煤气吸附、界面反应等还原过程。在宏观上提高顶压可以有效提高高炉透气性，促进高炉稳定顺行。近年来，我国高炉顶压提高幅度较大，一些先进高炉的顶压已经达到280kPa、接近300kPa，有效提高了煤气利用率、降低了燃料消耗（如图3所示）。

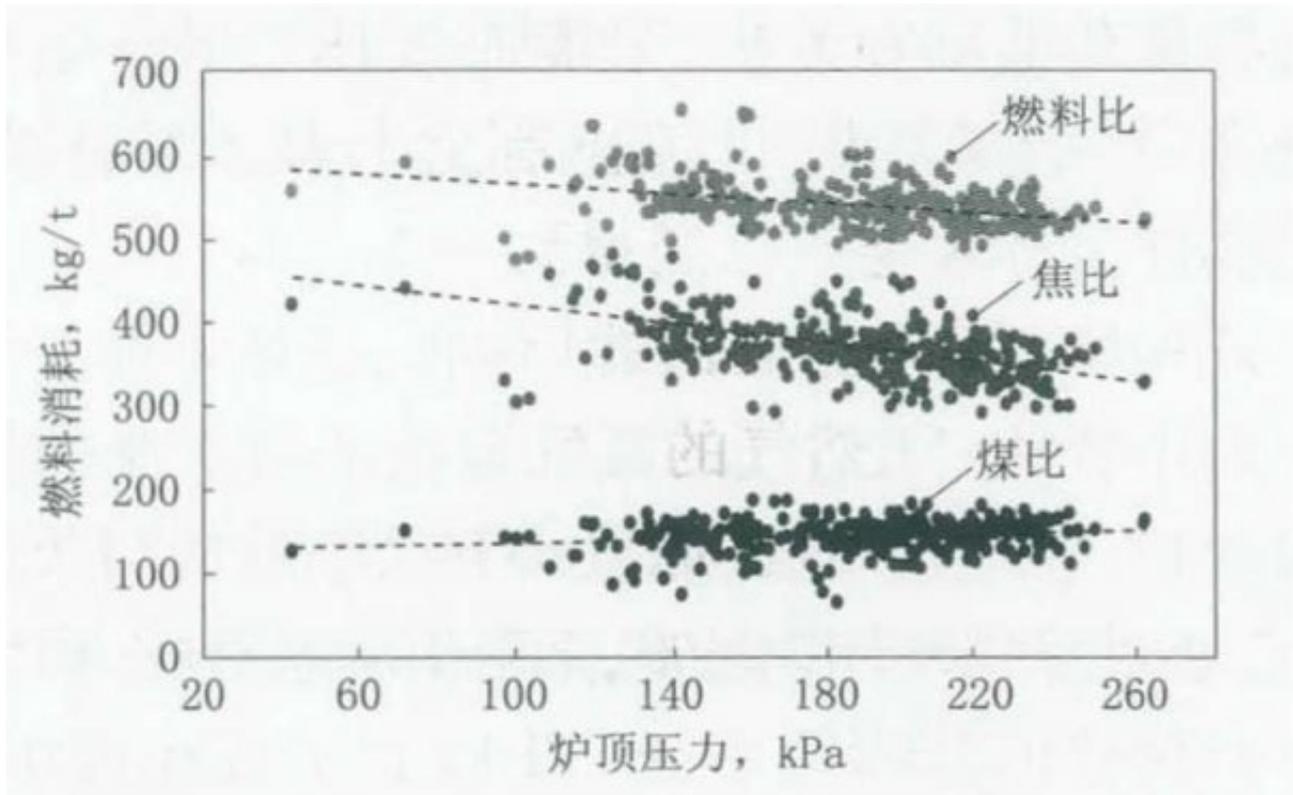


图3 2020年我国300余座高炉的燃料消耗与炉顶压力的关系

2.3 发展理念与目标

(1) 工程理念。面向未来，以高炉为中心的炼铁系统协同优化和动态有序、协同连续、精准高效运行，是炼铁系统流程结构优化和技术发展的重点。必须加强以高炉稳定顺行为基础的工程运行理念，建立系统性、全局性的工程思维模式，以技术、经济多目标整体优化为导向，不片面追求所谓的“超高利用系数”、“极低成本运行”，以及个别技术指标的“领先”，摒弃不讲客观、不顾原燃料条件、不论技术装备条件的盲目攀比和“比大比小”。

遵循钢铁制造流程的基本规律[18]，科学认识高炉冶炼过程的动态运行规律，不断总结提升，加强知识管理，做好卓越炼铁工程师的培养，造就基础扎实、经验丰富、求真务实、视野开阔的领军人才及团队，形成具有企业特色的现代化高炉炼铁生产、运行管理的工程思维和工程理念。

(2) 发展目标与路径。主要有以下几点。

在常规高炉使用固体碳素燃料（焦炭+煤粉）的条件下，降低碳素燃料消

耗是减少CO₂

排放最直接、最有效的技术措施。因此，到2030年前后，我国高炉燃料比应普遍降低到520kg/t以下（达标水准），一大批装备精良的高炉燃料比应低于500kg/t（平均先进水平），部分先进高炉应将燃料比降低到480kg/t以下（低碳），领先高炉燃料比应降低到470kg/t甚至更低（超低碳）。

进一步加强精料技术研究，探索并构建以球团矿为主的新型炉料结构体系，降低整个炼铁流程的碳素消耗和污染物排放，进而降低CO₂排放。

继续推进高风温、富氧、喷煤、高顶压等关键技术的再创新，进一步降低高炉燃料消耗，提高煤气利用率，促进高炉稳定顺行，减少CO₂排放。

加强大型高炉操作规律的研究，建立动态有序、协同连续、精准高效的现代高炉运行理念，以高炉生产长期稳定顺行为基础，不断改善、优化、提升大型高炉的动态精准操控水平。

进一步加强高炉、热风炉等主体系统运行的过程智能化监测和维护，采取有效技术措施延长高炉寿命，奠定高炉高效低排放运行技术装备基础，提高高炉生产效能[19]。

构建料场、烧结、球团、焦化、高炉炼铁系统一体化集中智能管控平台，着重解决不同工序的界面技术优化，实现物质流、能量流和信息流的高效协同运行，通过炼铁工序全流程智能化动态管控，以高炉为中心构建信息物理系统（CPS）和集成控制中心，提高智能化精准控制水平。

3探索碳-氢耦合冶金技术

我国宝武、河钢、酒钢等企业或研究机构，相继开展了低碳冶金或氢冶金的试验探索和工程研究工作，氢-氧高炉、全氧高炉、焦炉煤气-合成气竖炉直接还原，甚至是基于Hismelt铁浴法的熔融还原工艺装置，都在开展工业化应用的前期试验或者已经实现工业化初步应用。

3.1烧结过程富氢气体燃料喷吹技术

烧结过程在料面喷吹天然气或焦炉煤气，可以有效降低固体燃料消耗，改善料层传热机制，进而还可以降低烟气中CO等有害物质的排放[20]。目前铁前工序的CO₂

排放约占全流程的80%，其中每吨烧结

矿碳素固体燃料消耗约为50-60kg/t，CO₂

排放约为150-170kg/t，所以降低烧结工序的碳素燃料消耗对降低碳排放意义重大。当前国内不少烧结机正在开展“烧结烟气双循环”和烧结料面喷吹天然气（或焦炉煤气）的技术升级改造。根据测算，烧结实现烟气高效循环利用和“热风烧结”，固体碳素燃料消耗可降低约2kg/t；喷吹天然气可降低固体碳素燃料约2.5kg/t，两项技术集成应用可以降低碳素固体燃料消耗约4.

5kg/t。如果烧结实现烟气循环和喷吹天然气技术

，每吨烧结矿的CO₂排放可降低约12kg/t，因此，建议有条件的企业要加快推进烧结工序的节能减排工艺改造。

3.2高炉喷吹富氢气体燃料

结合未来能源供给条件，具备良好能源基础和技术基础的企业，在可以在高炉上开展喷吹天然气（或焦炉煤气）工业性试验及应用。理论研究和生产实践表明，通过高炉风口向高炉喷吹天然气，有利于提高高炉产量和降低燃料比。俄罗斯和美国等天然气资源充足的国家，从20世纪70年代起高炉就开始喷吹天然气，取得了提高产量、降低焦比和燃料比的生产效果。高炉喷吹天然气技术较为成熟，2019年美国安塞洛米塔尔公司印第安纳港7号高炉（4800m³）天然气喷吹量为50kg/t，高炉燃料比480kg/t[21-25]。根据理论推算，高炉喷吹1m³天然气可替代1.25kg碳素。天然气富含甲烷和氢，高炉喷吹以后甲烷在高温条件下经过裂解变成

H₂和CO，可以提高炉腹煤气中H₂

和CO体积百分数，提高高炉煤气还原势。在高风温（1200-1250 的基础上，匹配富氧鼓风，通过提高富氧率，保持

CO₂排放。因此，常规高炉喷吹富氢燃料（还原剂）是长流程钢铁工艺开展氢冶金的有效途径之一。

以5500m³高炉为例，根据理论计算，喷吹天然气30kg/t，高炉每天需要412.5t/d天然气（按高炉利用系数2.5、日产量13750t/d测算），折合53万m³/d。由于固体碳素燃料消耗的降低，理论计算吨铁可降低CO₂排放约33-36kg/t，高炉预计每年可减排CO₂约为14.5万t/a。如果喷吹焦炭煤气，由于H₂的体积百分数更高（>50%），理论上CO₂的减排效果会更加显著。

因此，有条件的高炉喷吹天然气、焦炉煤气等氢基燃料，是减少碳素燃料消耗和CO₂排放的一个新的技术途径。在当前技术条件下，“绿氢”的大量制备和使用仍处于研究探索阶段，规模化、商业化的应用还有待时日，与此同时，经济性也需要结合碳减排政策制度量力而行，不可一哄而上。

3.3高炉炉顶煤气循环技术

高炉炉顶煤气中，CO和H₂的体积分数分别约为20%-28%和1%-6%，高炉煤气低发热值约为3000-3300kJ/m³。传统工艺中一般将高炉煤气作为气体燃料使用，主要用于热风炉、焦炉、CCPP、发电机组的燃烧，因此煤气中的CO经过燃烧后，最终生成CO₂排放。高炉煤气顶气脱除CO₂（体积分数约为18%-23%）以后，不仅可以实现CO₂的分离捕集（CCS），还提高了炉顶煤气的热值。因此俄罗斯和日本将炉顶煤气脱除CO₂以后再经过风口或炉身喷口喷入高炉，实现顶气的循环再利用[26]。这种顶气脱除CO₂再循环工艺，在气基竖炉直接还原工艺中（如HYL-ZR和Midrex等）已广泛应用，属于成熟可靠技术，只不过气基竖炉的顶压比高炉更高（约为0.5-0.6MPa）。

对于喷吹富氢燃料和高富氧的高炉，由于炉腹煤气量的大幅度降低，风口前理论燃烧温度又不可能大幅度提高，加之H₂还原FeO的过程为吸热反应，高炉“三传一反”冶金过程将可能会出现供热不足的情况，因此，从炉身喷吹炉顶循环煤气，其技术本质就是实现碳-氢耦合冶金。因为CO还原FeO的过程是放热反应，这样可以把传热、传质和动量传递的“三传过程”，在新的炉料结构和燃料结构条件下，建立起新的动态耗散结构，并实现过程优化，达到铁素物质流、碳素能量流、氢素能量流和热量的动态耦合和协同运行。

3.4气基竖炉直接还原

我国转炉-高炉长流程占90%以上，由于高炉无法完全摆脱对焦炭的依赖，所以高炉-转炉长流程工艺实现碳中和的提升空间有限[27]。研究表明，采取富氢喷吹、炉顶煤气脱除CO₂后循环利用等综合技术以后，大约可以降低CO₂排放约30%。基于绿氢气基直接还原铁+电炉冶炼+绿电是实现碳中和最为有效的技术途径，目前国外不少钢铁企业计划通过氢气（绿氢）直接还原铁（DRI）+电炉（EAF）技术路线实现CO₂排放大幅度降低。

以某钢铁企业为例，目前球团矿产量为1200万t/a，采用秘鲁高品位铁矿粉（TFe 69.8%），铁矿粉中SiO₂质量百分数低于1.5%，可以制备出高品位低硅优质球团矿。由于球团工序具有一定的富余产能，可以生产50万t/a直接还原用球团矿。可以预见，我国部分钢铁企业具备生产DRI的球团制备和供给能力，同时具备较为充足的天然气和焦炉煤气资源，具备装备先进、流程合理的竖炉+电炉（DRI+EAF）制造流程和良好的资源、能源供给条件，以气基竖炉替代高炉、以电炉替代转炉，配加大宗废钢，或采用全废钢冶炼，下游工序可以和现有长材或薄板还连铸连轧产线流程匹配衔接，进而实现钢铁制造流程重构优化和集成优化。预计未来，钢铁制造流程结构调整和重构优化，将是2030年以前我国钢铁工业发展的一个重点课题。

面向未来，我国不少钢铁联合企业具备高炉-转炉长流程（BF+BOF）和竖炉-电炉短流程（DRI+EAF）“长短结合”耦合匹配的基础条件，可以形成长短两种流程的集成优化和动态协同，以长流程为主、以短流程为补充，面向不同的产品需求和产

线配置，采取不同的工艺技术路

线，进一步加大废钢资源的使用比率，从而降低CO₂

排放总量和吨钢排放量。应积极开展流程耦合集成的前期技术储备，做好气基直接还原竖炉+电炉流程工艺的概念研究和顶层设计。

因此，利用焦炉煤气、煤制气、天然气，以及绿氢，建设规模适度的DRI直接还原装置，热装热送加入电炉，再配加一定量的废钢，可以生产以长材或薄规格带材产品（薄板坯连铸连轧ESP或CSP），可以有效降低钢铁制造全流程的CO₂排放。

4结语

（1）在碳达峰、碳中和的背景下，钢铁工业应顺应时代潮流，在已有技术的基础上降低化石质碳素能源的消耗，改进工艺流程，创新关键技术，大幅度降低碳素消耗和CO₂排放。

（2

）当前

技术条件下，

以常规高炉冶炼为主流的炼

铁工艺，喷吹富氢燃料替代固体碳素燃料，炉顶煤气脱

除CO₂后循环再利用，以高炉流程为基本工艺路线的碳-氢耦合冶金；以绿氢为代表的气基竖炉直接还原、以生物质能源为驱动的球团矿制备等新技术，将在未来取得工程化应用和推广。

（3）发挥既有资源优势，开展低碳绿色炼铁新技术的探索研究。依托国内外资源，优化炉料结构、提高球团矿入炉比

率，积极

推进造块工序有效

降低碳素燃料消耗和碳减排工作。在

采用复合喷吹氢基燃料和采用顶气脱除CO₂

后循环等先进技术以后，先进高炉燃料比降低到470kg/t以下，进而实现CO₂排放减少30%以上。

5 参考文献

- [1] Shigeaki Tonomura, Naoki Kikuchi, Natsuo Ishiwata, et al. Concept and Current State of CO₂ Ultimate Reduction in the Steelmaking Process (COURSE50) Aimed at Sustainability in the Japanese Steel Industry [J]. J. Sustain. Metall. 2016 (2) : 191-199.
- [2] Ahmed I. Osman, Mahmoud Hefny, M. I. A. Abdel Maksoud, et al. Recent Advances in Carbon Capture Storage and Utilisation Technologies; a Review [J]. Environmental Chemistry Letters, 2020(19) :797-849.
- [3] 张京萍. 拥抱氢经济时代全球氢冶金技术研发亮点纷呈[N]. 世界金属导报, 2019-11-26(F01).
- [4] 胡俊鸽, 王再义, 陈 妍, 等. 日本钢铁业研究的减排 CO₂ 炼铁新技术[J]. 冶金丛刊, 2011, 193(3) : 47-50.
- [5] 严珺洁. 超低二氧化碳排放炼钢项目的进展与未来[J]. 中国冶金, 2017, 27(2) : 6-11.
- [6] 郑少波. 氢冶金基础研究及新工艺探索[J]. 中国冶金, 2012, 22(7) : 1-6.
- [7] Kota MORIYA, Koichi TAKAHASHI, Akinori MURAO. Effect of Large Amount of Co-injected Gaseous Reducing Agent on Combustibility of Pulverized Coal Analyzed with Non-contact Measurement [J]. ISIJ International, 2020, 60(8) :1662-1668.
- [8] Ryota MURAI, Michitaka SATO, Tatsuro ARIYAMA. Design of Innovative Blast Furnace for Minimizing CO₂ Emission Based on

- Optimization of Solid Fuel Injection and Top Gas Recycling[J]. ISIJ International, 2004, 44(2): 2168 - 2177.
- [9] 罗 晔. HYBRIT 项目将进入中试阶段[N]. 世界金属导报, 2018-08-28(B01).
- [10] 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): 31-35, 45.
- [11] 张福明, 李 林, 刘清梅. 中国钢铁产业发展与展望[J]. 冶金设备, 2021(2): 1-6, 29.
- [12] 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.
- [13] 曹朝真, 张福明, 毛庆武, 等. 利用焦炉煤气生产直接还原铁关键技术分析[C]// 中国金属学会. 第八届中国钢铁年会论文集. 北京: 中国金属学会, 2011: 267.
- [14] 张春霞, 上官方钦, 胡长庆, 等. 钢铁流程结构及对吨钢 CO₂ 排放的影响[J]. 钢铁, 2010, 45(5): 1-6.
- [15] 张福明. 中国高炉炼铁技术装备发展成就与展望[J]. 钢铁, 2019, 54(11): 1-8.
- [16] 张福明. 首钢绿色低碳炼铁技术的发展与展望[J]. 钢铁, 2020, 55(11): 11-18.
- [17] 张福明, 银光宇, 李 欣. 现代高炉高风温关键技术问题的认识与研究[J]. 中国冶金, 2020, 30(12): 1-8.
- [18] 张福明. 钢铁冶金从技艺走向工程科学的演化进程研究[J]. 工程研究-跨学科视野的工程, 2020, 12(6): 527-537.
- [19] 张福明. 我国 5000 m³ 级高炉技术进步与运行实绩[J]. 炼铁, 2021, 40(1): 1-8.
- [20] 张俊杰, 裴元东, 周晓冬, 等. 550 m² 烧结机喷吹天然气工艺实践[N]. 世界金属导报, 2021-02-02(B02).
- [21] Xianglong MENG, Fuming ZHANG, Weiqiao WANG, et al. Analysis of Pulverized Coal and Natural Gas Injection in 5 500 m³

Blast Furnace in Shougang Jingtang [C]// AIST . AISTech 2015 Proceedings. Cleveland;AIST, 2015: 946–958.

- [22] **K. S. Abdel Halim. Effective Utilization of Using Natural Gas Injection in the Production of Pig Iron [J]. Materials Letters, 2007, 61(14–15): 3281–3286.**
- [23] **Michal J. Wojewodka, James P. Keith, Stephen D. Horvath, et al. Natural Gas Injection Maximization on C and D Blast Furnace at ArcelorMittal Burns Harbor [C]// AIST . AISTech 2014 Proceedings. Indianapolis;AIST, 2014: 767–779.**
- [24] **Armin K. Silaen, Tyamo Okosun, Jiaqi Zhao, et al. Study of Injection Natural Gas Into Blast Furnace [C]// AIST . AISTech 2016 Proceedings. Pittsburgh;AIST, 2016: 595–602.**
- [25] **Megha Jampani, P. Chris Pistorius. Increased Use of Natural Gas in Blast Furnace Ironmaking: Methane Reforming [C]// AIST . AISTech 2016 Proceedings. Pittsburgh;AIST, 2016: 573–580.**
- [26] **Hiroshi NOGAMI, Jun-ichiro YAGI, Shin-ya KITAMURA, et al. Analysis on Material and Energy Balances of Ironmaking Systems on Blast Furnace Operations with Metallic Charging, Top Gas Recycling and Natural Gas Injection [J]. ISIJ International, 2006, 46(12): 1759–1766.**
- [27] **李 峰, 储满生, 唐 珏, 等. 基于 LCA 的煤制气-气基竖炉-电炉短流程和高炉-转炉流程环境影响分析[J]. 钢铁研究学报, 2020, 32(7): 577–583.**

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/207638.html>