

我国高炉炼铁碳生产率提升 路径研究

Study on Path to Improve Carbon Productivity of Blast Furnace Ironmaking in China

供稿|周翔¹, 白永强² / ZHOU Xiang¹, BAI Yongqiang²

内容 导 读

我国钢铁行业进入了碳达峰和能耗双控的约束发展阶段,高炉炼铁工序碳排放总量超过全社会10%,解决以高炉为中心的生铁冶炼全流程碳减排问题,提高炼铁流程碳生产率是整个钢铁行业高质量低碳发展的核心。文章对我国高炉炼铁工序碳生产率、碳排放强度、生产制造成本等关键指标的现状、取得的成绩和存在的问题进行了论述分析,提出了降低高炉炼铁工序碳排放强度和生产制造成本、提升炼铁碳生产率的重点技术路径。

2020-09-22,习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话,提出:中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和。随后,中国积极推进制定行动方案并开始采取具体措施,确保实现既定目标。钢铁工业是碳排放大户,全球钢铁碳排放量占能源系统排放量的7%左右,我国钢铁行业碳排放量占全社会碳排放总量的15%左右,是制造业31个门类中碳排放量最大行业。因此,低碳发展将为钢铁行业带来广泛而深刻的生产、消费、能源和技术革命,重塑全行业乃至经济社会发展格局。

我国钢铁工业低碳发展必须准确把握高质量发展的深刻内涵,主动突破现有瓶颈,加快推动低碳发展,助力实现“3060”双碳目标。2022年我国粗钢

产量101796万t、生铁产量86383万t,高炉炼铁工序碳排放量占钢铁全流程总碳排放量的73.6%,加上相关联的烧结及焦化,铁前全工序碳排放占比90%左右^[1],即我国高炉炼铁全流程产生的碳排放约占全国碳排放总量13.5%。因此,分析炼铁工序的碳减排路径,解决以高炉为中心的生铁冶炼流程碳排放问题,提高炼铁工序碳利用效率是整个钢铁工业低碳发展的核心,对推进钢铁全流程降碳、实现低碳发展具有重大意义^[2]。

高炉炼铁碳生产率评价指标分析

碳生产率(Carbon productivity)是指单位二氧化碳的GDP产出水平,又可称为“碳均GDP”,是兼顾碳减排和经济效益的综合指标,符合2030年碳达峰阶段“低碳和经济发展双重点”的政策要求。高炉

炼铁低碳发展思想应以提高碳生产率为核心，即在高炉炼铁工序实现以较低碳素消耗为代价创造更大经济效益。需要指出的是，由于炼钢生铁是钢铁冶炼过程的中间产品，其销售价格更大程度是受下游炼钢和钢材需求市场决定，生铁冶炼过程创造的GDP难以准确计算，也不能真实反映炼铁工序的低碳技术水平。因此，本文选择吨铁碳排放强度和制造成本两项指标予以类比进行探讨分析，评价高炉炼铁工序低碳技术水平和发展方向。分析影响高炉炼铁碳生产率的指标应重点关注以下技术路径，如图1。

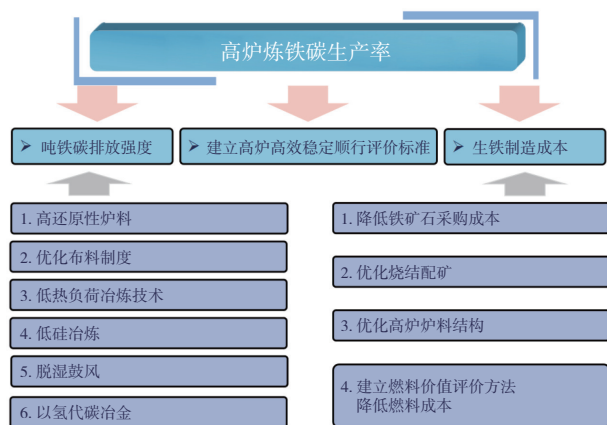


图1 影响高炉炼铁碳生产率重点技术路径示意图

吨铁碳排放强度分析

影响高炉炼铁碳排放的直接因素包括焦比、喷煤比、烟煤比例等；间接因素则更多，既包括入炉品位、炉料结构、入炉料冶金性能、焦炭质量等原燃料条件，也有保障高富氧、高顶压、高温等参数指标的装备因素，还包括装料制度、冷却制度、下部调剂等保证高炉稳定、顺行的操作技术因素。

高炉炼铁碳减排技术应用现状

我国炼铁工作者在降低高炉焦炭等碳素燃料消耗、减少碳排放方面做出了许多努力，主要技术进步包括以下方面^[2]：

(1) 装备大型化。大型高炉的能源利用效率、生产效率、节能设施配置率和使用效果等均优于中小型高炉，是实施各项节能、低碳炼铁技术的保障。近年来我国高炉装备大型化进程得到迅速发展，截至2021年底，我国2000 m³级以上高炉产能比例超过1/3，4000~5000 m³高炉17座，5000 m³以上的达到9座，占全世界巨型高炉数量的1/4。

(2) 精料冶炼技术。包括提高入炉品位、优化炉料结构、使用干熄焦、提高原燃料强度、提高炉料冶金性能、降低入炉水分和粉末等，对我国高炉炼铁过程的高效、低碳冶炼起到了至关重要的作用。

(3) 富氧喷煤技术。富氧有利于提高理论燃烧温度、喷煤比和生产效率，喷吹煤替代焦炭起提供热量和还原剂的作用，减少焦炭用量，降低碳排放，我国技术领先的高炉富氧率可超过10%、喷煤比达200 kg/t。

(4) 高顶压冶炼技术。高顶压有利于提高煤气对铁矿石的渗透性，降低煤气线速度，促进间接还原，抑制直接还原，每提高10 kPa约可降低燃料比2 kg/t。近年来操作顶压达到250 kPa以上的大型高炉数量快速增加，最高顶压可达280 kPa。

(5) 高炉热风炉双预热技术。利用热风炉烟气，通过换热器对煤气和助燃空气进行预热，降低煤气消耗并提高鼓风温度。高温有利于改善高炉下部热制度，提高能源利用率，降低焦比和燃料比；热风温度每提高100℃可降低焦比8~15 kg/t，宝钢、首钢、沙钢等超大型高炉热风温度均可达到1250℃。

(6) 脱湿鼓风。降低鼓风湿度可减少高炉高温区热量消耗，水含量每减少1 g/m³可降低焦比0.8~1 kg/t，同时可以减小鼓风湿度变化对高炉稳定性的影响，提高精细化操作水平，宝钢、中信特钢、沙钢等处于高湿度地区的大型钢铁企业已成功应用多年。

碳减排潜力及存在问题

通过理论计算可知，吨铁碳素消耗实际值与理论值差距较大，吨铁碳排放强度差距0.15 t，主要原因是高炉炼铁过程受原燃料质量、装备技术和生产操作等因素影响，碳素化学能利用水平远未达到理论平衡状态，按照年产8.64亿t生铁产量计算，年减少CO₂排放的潜力约1.3亿t。其中存在主要问题及碳减排潜力包括：

(1) 行业平均焦比和燃料比偏高。在我国高炉炼铁发展过程中，短期内个别企业高炉也曾有过焦比低于300 kg/t，燃料比低于480 kg/t的指标数据；但是高炉能长期维持焦比在300 kg/t以下，燃料比在490 kg/t以下的情况近年较为少见，行业平均燃料

比分别比欧洲和日本高出 40 kg/t 和 20 kg/t 以上。不同企业高炉燃料利用水平参差不齐,不利于提升行业整体低碳发展水平,2020 年部分企业高炉焦比最大差距达到 130 kg/t,燃料比最大差距 90 kg/t,折算吨铁碳排放差距高达 0.3 t,也是导致全行业碳排放强度偏高的主要原因之一。

(2) 优质原料保障不足,精料冶炼技术受限,导致燃料比居高。

我国炼铁产能和产量较大,大型高炉数量的快速增加对优质原燃料资源的需求激增,国内优质铁矿和焦炭资源远不能满足,而国际优质资源市场集中度高、价格高,不利于保障大高炉精料冶炼的标准,导致固体燃料消耗不降反升,存在一些 3000 m³、4000 m³ 级高炉的燃料消耗甚至远高于 1000 m³ 级高炉的情况。

(3) 低碳生产技术重视程度不一。当钢铁行业市场效益较好的时期,少数企业对高炉产量和生产效益的重视程度会远高于低碳冶炼技术,片面追求高利用系数,冶炼强度过大,超出了低碳炼铁的合理区间,导致焦比和燃料比升高。

(4) 高炉标准化、智能化操作水平不高,高效稳定顺行率偏低。高炉操作调整存在滞后性,变量因素多且互相制衡,运行状态的变化对控制动作的反应不灵敏,依靠人工很难及时判断操作动作是否有效解决问题,甚至会出现反向操作,尤其是大型高炉更难控制。部分企业在高炉顺行状态好时可以做到短周期燃料比低于 500 kg/t,但是原燃料质量的波动偏离正常区间,因监测设备不足或工艺参数调整标准不精确、不及时,导致炉况失常,反而增加了年均燃料比。

生铁制造成本分析

生铁制造成本占全流程钢铁企业制造成本的 80% 以上,对炼铁工序乃至整个企业的碳生产率均有极大影响。不同企业的生铁制造成本差距较大,2021 年成本领先和落后企业的成本差距超过 500 元/t,影响生铁制造成本的直接因素主要包括原料成本、燃料成本、动力费、其它制造费等 4 个方面。其中原料成本约占 60%,燃料成本约占 25%,是影响生铁制造成本的两大重要部分,并且原料成本和燃料

成本交互影响;动力费主要指水、电、风、气等能源介质消耗费用,占比 6%~8%;其它制造费用主要包括人员工资和折旧费等,占比 6%~8%,与高炉的投资、高效、长寿生产指标相关^[3]。

低成本炼铁技术现状

(1) 低品质矿石冶炼技术,降低原料成本

2020 年以来,我国铁矿资源年进口量超过 11 亿 t,对外依存度超过 80%,在铁矿议价方面存在话语权低的问题,并且优质铁矿资源稀缺、溢价更高。因此,我国钢铁企业在冶炼低品质矿方面取得的许多技术突破,如钕铁磁铁矿使用比例可超过 60%,烧结用褐铁矿比例由 30% 提高至 60%,高 Al₂O₃ 铁矿石高效节能冶炼技术等,降低了企业生产成本。同时,入炉矿石的多样化一定程度上缓解了市场主流矿价增长过快的问题,降低了全行业铁矿原料的采购成本。

(2) 以煤代焦,焦化配煤优化,降低燃料成本

喷吹煤价格比焦炭低 60% 以上,我国高炉高温、高富氧、大喷煤冶炼技术普及率达到 90% 以上,平均煤比达到 150 kg/t,领先水平 200 kg/t 左右,大幅替代焦炭;另外,保障焦炭质量在高炉使用标准的前提下,开发了大比例弱粘煤、高硫煤等配煤技术,增加了低品质煤的应用,有效的降低焦炭制造成本,进而优化了后续铁水成本。

(3) 发展循环经济,减少物料降级费用

烧结矿综合返矿率由 35% 以上降低至 25%,每吨铁降低无效生产和运输成本约 15 元;小块焦利用技术,行业平均焦丁比约 30 kg/t,按照与大焦差价 1500 元/t 计算,每吨铁降低成本 45 元;回收利用重力除尘灰、矿焦槽除尘灰、干熄焦粉等含碳、含铁物料,减少物料损失,提升资源综合利用水平,降低原料成本。

(4) 降低动力费

采用均压煤气回收技术,每吨铁多回收 5 m³ 高炉煤气,折算降成本 0.5~1.0 元;高炉煤气 TRT (高炉煤气余压透平发电装置) 和 BPRT (高炉煤气余压透平发电和高炉鼓风机同轴系的高炉能量回收装置) 回收利用顶压技术,降低电力成本 20 元以上;鼓风机汽改电,提高煤气转换效率,降低煤气单耗;低燃料比冶炼技术,减少吨铁风耗,领先企业

可降低鼓风费用 10 元以上。

➤ 低成本冶炼存在问题

(1) 全行业炼铁产量增加导致铁矿石价格快速上涨，生铁制造成本升高；部分企业严重忽视精料冶炼方针，采购低品质铁矿且不重视粗粮细作，综合入炉品位降低至合理标准之下，忽视入炉矿的强度、还原性和高温冶金性能标准，一味依靠增加焦炭用量来增产增效，喷煤比不高，不仅导致燃料成本升高，而且碳排放强度也大幅上升。

(2) 忽视了低价矿有害元素对高炉冶炼成本的影响。如高 Al_2O_3 、高 S、高 P、高 TiO_2 矿用量过多，部分 Zn、K、Na 等有害元素严重超标的固体废弃物反复循环使用，导致炉况不顺、焦比升高、能源利用效率下降，也为高炉安全、长寿生产带来极大隐患，从全生命周期角度并未实现真正的低碳降成本。

(3) 只重视工序单元降成本，忽略炼铁系统一体化降成本标准的制定。高炉炼铁过程影响因素多达数十项，并且是不可逆过程，一旦因原燃料质量下降而未及时响应，可能导致高炉常年不顺，近年甚至有技术领先企业因此在产量、能耗和经济效益

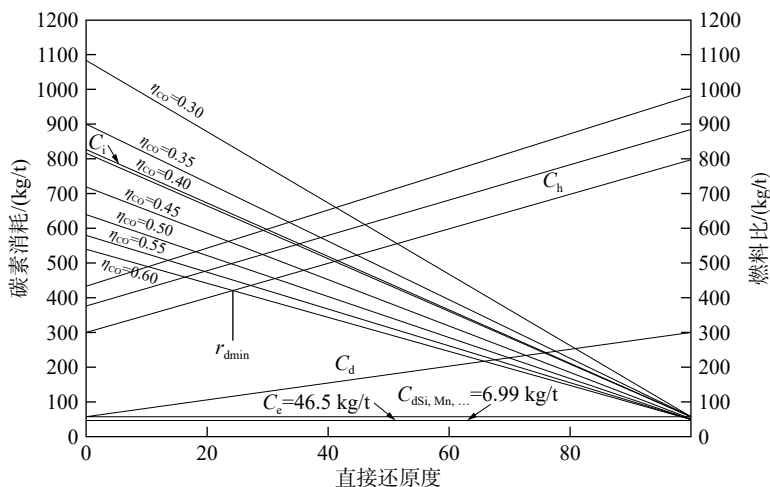
方面蒙受了巨大损失。

提高高炉碳生产率的路径探讨

通过分析影响高炉炼铁碳排放强度、制造成本的因素，提高碳生产率的主要路径应从以下几方面开展。

减少碳素消耗,降低碳排放强度

由碳素消耗与直接还原度的关系（如图 2）可知：最低碳素需求 $C_{\min}$ 对应的最低直接还原度 r_{dmin} 通常为 0.2~0.3，而我国高炉直接还原度 r_d 一般在 0.4~0.5^[4]；另外，吨铁热需求量降低，则 $C_{\min}$ 降低^[5]， r_{dmin} 增加后与实际能达到的直接还原度 r_d 更为接近，实际碳素消耗与降低后的 $C_{\min}$ 也更接近。因此，千方百计降低高炉炼铁过程中的直接还原度 r_d ，以及降低高炉炼铁过程高温区热量需求是降低碳素消耗的两大方向；另外，以氢元素代替碳元素作为还原剂和发热剂将是突破性降碳技术研究重点。降低直接还原度的技术方向包括提高炉料还原性、优化布料、降低煤气流速度等，而减少碳素热量需求的技术包括高风温、低热负荷、低顶温、低硅冶炼、低鼓风湿度等。



C_i ——间接还原碳耗； η_{CO} ——CO 利用率； Q ——吨铁耗热量； C_h ——热量需求碳耗； C_e ——铁水渗碳量； C_d ——直接还原碳耗； $C_{\text{dSi, Mn, ...}}$ ——非铁元素还原碳耗

图 2 碳素消耗、燃料比与直接还原度 r_d 的关系

➤ 高还原性炉料

提高炉料的还原性有利于加快其还原速度，在有限时间内多发展间接还原，降低直接还原度。以

烧结矿为例，FeO 质量分数每下降 1%，焦比可降低 6 kg/t，日本钢铁企业烧结矿 FeO 一般控制在 7%~9%，我国烧结矿一般为 8%~10%，仅此一项焦

比相差约 6 kg/t；但由于 FeO 太低不利于转鼓强度的改善，影响煤气流分布，因此需通过优化烧结技术兼顾两者平衡，制定合理标准。另外，市场上块矿的还原性也存在较大差别，并且与强度、膨胀率、含粉率等相互影响，如何高效利用高还原性块矿也需重点研究。

➤ 优化布料制度

宝钢利用炉喉十字测温判断上部煤气流分布状态，制定了布料制度标准，如控制炉顶煤气温度、边缘气流指数（W 值）、中心气流指数（Z 值）在最佳范围区间，并针对操作动作提供直观的结果显示，及时优化工艺参数，常年保持良好的煤气流分布，煤气利用率达到 0.52，燃料比 490 kg/t 左右。酒钢通过布料仿真模型实施去除中心加焦的优化布料措施，在原燃料指标基本不变的情况下，焦比降低 18.8 kg/t^[6]。因此，企业应利用好十字测温、炉顶红外成像、激光测定布料参数、料面形状在线模拟等技术，开发图像处理技术进行定量分析，为优化布料提供数据支撑，降低燃料比。

➤ 低热负荷冶炼技术

从节能角度出发，高炉热负荷越低，则需要焦炭和喷吹煤燃烧释放的热量越少，越有利于降低焦比和燃料比；但是，从高炉安全生产和操作层面，必须保持一定的热负荷，才能保持长期稳定顺行。我国高炉从设计阶段到实际生产操作环节均留有较大的浮动空间，热负荷管理比较粗放，冷却水带走过多的热量，导致焦比、燃料比升高。随着高炉智能化管控系统的完善，炉缸和炉体安全系统在线监测更加灵敏，具备精细化管理的基础条件，先进企业已经开展了降低热负荷减少碳消耗；以宝钢 4 号高炉为例，一代炉役期热负荷接近 110 GJ/h^[7]，二代炉役期降低至 65 GJ/h，仅此一项降低焦比 5 kg/t。因此，未来高炉应加强炉缸、炉体安全模型的建立，结合煤气流分布监测模型，实现高炉纵向和横向热负荷的均匀分布，确保操作炉型的合理与稳定的基础上，降低热负荷和燃料消耗。

➤ 低硅冶炼

低硅冶炼要求原燃料的理化性质和设备运行状况稳定，高炉炉内的煤气流分布合理而且稳定，有

较高的煤气利用率，使炉内的热制度稳定，便于控制 [Si] 的还原过程，行业铁水 [Si] 质量分数控制范围 0.25%~0.60%，平均值 0.45%；低硅冶炼维持的炉温水平在下限，为防止炉凉导致的高炉严重不顺，操作者必须具备趋势管理的技术水平和特殊情况下的应对能力。未来，随着大型智慧原料混匀技术，烧结—球团—高炉铁前一体化智能管控系统的研发和应用，可以大幅提高原料质量的稳定性、高炉趋势管理的精确性和应对特殊炉况的操作正确率，预计行业平均铁水 [Si] 质量分数可降低至 0.35%，降低焦比 5 kg/t。

➤ 脱湿鼓风

鼓风中的水分在风口回旋区发生水煤气反应，消耗的热量需由碳燃烧提供，增加了高温区的热量需求，行业经验数据表明，鼓风中水含量每增加 1 g/m³，焦比增加 0.8 kg/t，我国南方地区夏秋季节空气中水分含量超过 20 g/m³，现有脱湿鼓风技术可将水含量降低至 8 g/m³ 以下，并且有利于稳定高炉炉况，提高精细化操作水平，预计可降低焦比 10 kg/t，吨铁减少碳排放 30 kg。需要指出的是，目前脱湿鼓风耗电与吨铁鼓风耗量降低所需的耗电相抵消，未来随着冲渣水余热回收技术水平的提高，可将余热用于脱湿鼓风，可以进一步减少电力消耗。

➤ 以氢代碳冶金

H₂ 在温度大于 810 °C 时的还原势和还原速率均高于 C，可以替代部分 C 作为还原剂，减少碳耗和 CO₂ 排放，理论上 1 kg H₂ 可替代 6 kg C，减少 CO₂ 排放量 22 kg；另一方面，由于 H₂ 还原 FeO 是吸热反应，需要消耗更多的热量，实际减碳效果要略低于理论值。

（1）提高烟煤配比

喷吹煤主要有无烟煤和烟煤两大煤种，更主要是替代焦炭起发热作用，因此在选择煤种时应重点关注热值。市场上存在热值相差不大的烟煤和无烟煤，无烟煤固定碳质量分数 85% 左右，烟煤碳质量分数 60% 左右、H 质量分数可超过 5%，并且烟煤的可磨性更佳、置换比更高，在大喷煤状态下可以实现烟煤和无烟煤 1:1 置换。目前，喷煤结构中烟煤

基本占 30% 左右，主要受喷吹煤挥发分标准和安全保障限制，领先企业烟煤配比超过 60%。按照喷煤比 180 kg/t 计算，行业平均烟煤配比提高至 50%，则烟煤单耗相差 36 kg/t，影响碳素消耗减少 9 kg/t，减少 CO₂ 排放 30 kg/t。

（2）富氢煤气喷吹

高炉喷吹焦炉煤气直接替代煤粉做还原剂和发热剂实现碳减排，前苏联和德国、美国均有钢铁企业应用，国内本钢、鞍钢等企业均进行过工业试验。山西晋南钢铁对焦炉煤气提纯后 H₂ 体积分数达到了 95% 以上，在 1 座高炉进行了工业化应用，吨铁喷吹 30 m³ 富氢气体，约可替代喷吹煤 20 kg，吨铁减少 CO₂ 排放约 30 kg。

降低生铁制造成本

降低铁矿石采购成本

企业铁矿粉采购价格存在较大差异是导致制造费用差距大的主要原因之一。以进口粉矿为例，根据中国钢铁工业协会对标挖潜办公室数据，2021 年对标企业折算成 62% 品位的平均采购成本为 1128.6 元/t，采购成本最高和最低的 5 家企业成本差价为 317 元，按照吨铁消耗 1.6 t 铁矿粉计算，生铁制造成本相差 500 元。采购价相差大的原因，除物流运输费、自有矿山等因素外，不同品质铁矿的吨度价也存在差距，高品位矿溢价高。企业应根据自身实际情况，评估适宜的炉料结构和矿石采购种类，少数钢铁企业通过装备技术创新升级，制定合理标准，高效利用价格相对偏低的低品质矿石，取得较好的经济效益。需要重点指出，铁矿冶金价值评价应兼顾有害元素、渣渣成分对燃料成本和固定费用的影响，方能做到客观真实地评价矿石冶金价值，指导采购降成本。

优化烧结配矿

烧结矿品质和用量对生铁成本影响排名第一，对高炉稳定顺行的影响程度仅次于焦炭，通过优化烧结配矿，降低烧结矿成本和提高质量，对于高炉炼铁降成本意义重大。高炉优化炉料结构基本确定了烧结矿的成分范围，而相同成分下通过优化配矿也可得到不同价格和质量的烧结矿。首先对烧结原料的经济价值进行评价，结合企业铁矿资源库、矿

石冶金性能指标、冶金规划院数据库等，给出企业适用含铁原料以及合理配矿范围，再通过优化配矿软件计算确定成本最优的配矿方案，实现烧结矿降成本、提质量。

优化高炉炉料结构

我国高炉炉料结构整体为“高碱度烧结矿+酸性球团矿+块矿”，不同炉料的冶金价值相差有时会比较 大，并且炉料结构的范围区间大，极限炉料结构需要研发相关技术予以支撑，一些企业也取得了较好效果，如有企业做到块矿比接近 30% 且燃料比控制良好。利用高炉炉料冶金价值评价体系确定主要入炉原料的经济性，结合铁矿市场数据库，确定合理入炉品位、外购资源种类及炉料结构范围；设定约束条件后，通过优化计算模型确定最终的炉料结构，最大程度上发挥高性价比炉料的降成本优势。

建立燃料价值评价方法，降低燃料成本

高炉主要燃料包括焦炭、无烟煤和烟煤，燃料成本简易计算公式为：焦炭单耗×单价+无烟煤单耗×单价+烟煤单耗×单价。一般情况，燃料单价随着质量指标的提高而增加，单耗则随着质量指标的改善而下降，因此需精准确立质量指标与单耗及单价的量化关系，在高炉生产全体系目标下找到平衡点，实现燃料成本最优。

焦炭质量对高炉稳定顺行的影响程度排名第一，对成本影响仅次于烧结矿，2021 年对标挖潜企业排名前 5 和后 5 企业的采购价差达 580 元/t，对生铁成本影响大。另一方面，不同成本的焦炭质量也存在较大差距，进而影响用量；焦炭质量的评价指标包括焦炭耐磨指标（M10）、焦炭抗碎强度（M40）、焦炭反应后强度（CSR）、焦炭反应性（CRI）、固定碳、灰分含量、硫含量、含水量、挥发分、粒度指标、干熄焦率等十余项，各指标对焦炭用量均有不同程度的影响，并且影响因子交互影响，对焦炭质量的考核不能做到全面覆盖提升。因此，各企业应根据自身高炉实际生产情况，确定影响焦比的权重因子，建立适用的焦炭价值评价办法，从而选择焦炭种类和指标，实现燃料结构、燃料价格和炉料结构及生产效率的系统匹配。

2021 年喷吹煤采购成本为 1348 元/t，同比升高 534 元/t，升幅为 65.6%，但与焦炭仍有 1500 元/t 的

差价，充分提高喷煤比来降低焦比是降低生铁成本的重点之一。另外，喷吹煤平均采购成本最低的前5家企业采购成本约903元/t，而采购成本最高的5家企业为1600元/t，差价接近700元/t，降低喷吹煤采购成本也是降低生铁成本的重点。喷吹煤的挥发分、固定碳、灰分、S等成分指标以及热值、可磨性等指标影响采购成本、生产安全性、置换比等，企业应建立适合自身条件的喷吹煤资源库和评价标准，优化喷煤结构、降低采购费用、提高喷煤比和置换比。

建立高炉高效稳定顺行评价标准

建立高炉高效稳定顺行评价标准对于低成本炼铁、提高碳生产率至关重要，其中稳定顺行是基础保障，高效是核心目标。双碳背景下，“高效”的内涵应包括高效利用资源、高效利用能源、高效率利用设备等，三者交互影响，既存在同向促进关系，到一定程度后又存在反向制约关系，如何建立资源（炉料）、能源（燃料）、设备效率（作业率、有效利用系数）综合最优的系统评价标准，是提高高炉炼铁工序碳生产率的关键。但是，影响高炉高效稳定顺行的因素包括原料、装备、操作技术3大类数十项指标，评价运行状态的指标也达到十几项，错综复杂的因果关系使得高炉操作者无法确定精准的评价标准，各企业因原燃料品质和装备技术的差异更无法形成统一标准。

建议将高炉煤气流分布状态和煤气利用率作为高炉高效稳定顺行的过程评价和结果评价的核心指标。首先，高炉煤气流分布直接影响煤气热能和化学能的利用效率，关系到炉内温度分布、软熔带结构、炉墙热负荷、高炉热平衡状态，与高炉的高效稳定顺行直接相关；其次，煤气流分布状态和煤气利用率是原燃料质量、冶金性能和工艺操作技术应用效果好坏的直接体现；第三，高炉煤气利用率是最具有对标意义的指标之一，例如铁矿石价格主要以含铁品位为基准，某高炉在56.5%入炉品位下常年保持煤气利用率0.48、燃料比510 kg/t的优秀指标，对标企业需以此标准为目标进行诊断提升；第四，煤气利用率是反映高炉运行结果最直观、高炉操作者调整工艺参数最应参考的指标之一，一旦煤

气利用率下降，需尽快查找原因，短期无法解决则应调整工艺，防止炉温波动带来的煤气流失常和炉况不顺。

总之，优化煤气流分布是在资源条件基本确定的情况下，减少实际碳素消耗与理论值差距、降低焦比和燃料比、提高生产效率和能源利用效率、降低生产成本最有效的手段，该评价标准最直接、最简易、最具现场指导意义。煤气流分布状态评价标准应包括炉缸活跃性、初始煤气流分布、炉体周向均匀性、上部煤气流分布等评价标准，如炉芯温度异常、出铁前后风压和水温差异常波动、炉体周向热电偶温度紊乱变化、十字测温边缘四点温差过大等现象，均表示煤气流分布状态出现问题，应及时分析原因；失常达到一定标准后，应快速调整工艺参数，防止煤气流分布失常影响稳定顺行。评价标准制定及执行越高越严苛，炉料与间接还原的理论平衡状态越接近，能源利用效率越高，但是超过高炉极限状态的风险也越大，要求高炉操作者建立精确趋势预判的能力。

结束语

(1) 我国高炉工序产生的碳排放超过全国碳排放总量的10%，炼铁全流程碳排放量占比达到13.5%，双碳背景下炼铁工序要兼顾碳减排和经济效益两项重点，高质量发展应以提高碳生产率为核心。

(2) 各企业高炉碳生产率水平参差不齐，高炉焦比最大差距达到130 kg/t，燃料比最大差距90 kg/t，折算吨铁碳排放差距高达0.3 t，生产成本差超过500元，影响全行业碳生产率的整体提升。

(3) 降低高炉碳排放强度的技术方向，除常用的高风温、高顶压、富氧喷煤技术外，还应包括高还原性炉料、优化布料制度、低热负荷冶炼技术、低硅冶炼、脱湿鼓风、以氢代碳冶金等方面。

(4) 降低生铁成本方面，企业应建立铁矿石性价比综合评价方法，在保障高炉稳定顺行、燃料比不增加的前提下，降低原料成本，主要包括降低采购成本、优化烧结配矿、优化高炉炉料结构；除常规的降焦比、提煤比技术降低燃料成本外，应建立燃料价值评价方法，优化喷煤结构，降低燃料采购成本。

(5) 鉴于高炉炼铁对全社会碳排放的影响权重较大, 又为社会发展创造了经济价值, 建议企业对高炉炼铁工序的碳排放和经济效益进行全面系统诊断, 建立碳生产率评价标准, 实现降低碳排放强度和生产成本综合最优, 提高碳生产率, 为经济社会低碳发展、实现双碳目标做出更大贡献。

参考文献

- [1] 上官方钦, 张春霞, 胡长庆, 等. 中国钢铁工业的CO₂排放估算. 中国冶金, 2010, 20(5): 37
- [2] 周翔. “双碳”背景下我国炼铁碳减排路径. 炼铁, 2022, 41(1): 49
- [3] 周翔. 关于低成本炼铁的探讨. 冶金设备, 2018(1): 53
- [4] 项钟庸, 王筱留. 高炉设计: 炼铁工艺设计理论与实践. 2版. 北京: 冶金工业出版社, 2014
- [5] 王筱留, 张建良, 祁成林. 对低碳炼铁的几个重要技术问题的认识//第八届(2011)中国钢铁年会论文集(大会报告与分会场特邀报告). 北京: 冶金工业出版社, 2011: 795
- [6] 程子建, 高建民, 赵宏博, 等. 炼铁大数据智能互联平台在酒钢的应用. 世界金属导报, 2017-12-07(B02)
- [7] 徐飞. 宝钢4号高炉炉体热负荷分布优化实践. 炼铁, 2020, 39(3): 26

基金项目: 钢铁清洁生产与绿色循环技术发展战略研究基金资助项目(2019YFC1905201)

作者简介: 周翔(1984—), 男, 硕士, 正高级工程师。2009年毕业于北京科技大学钢铁冶金专业, 主要研究方向: 绿色低碳炼铁新技术、烧结球团资源综合利用等。通信地址: 北京市东城区北三环东路36号环球贸易中心E座12层冶金工业规划研究院; Email: zhouxiang62@163.com。

白永强(1982—), 男, 博士, 正高级工程师。2012年毕业于北京科技大学钢铁冶金专业, 主要研究方向: 烧结球团、炼铁工艺技术研究等。通信地址: 北京市海淀区西三环中路5号中国矿产资源集团有限公司; E-mail: baiyongqiang@cmr-co.com。