复合铁焦低碳炼铁新炉料技术研究进展

储满生[a,b,c]，原 野[b]，田宏宇[a,b,c]，张立峰[b]，唐 珏[a,b,c]，毕传光[a,b,c]
（东北大学 a. 低碳钢铁前沿技术教育部工程研究中心；b. 冶金学院；c. 辽宁省低碳钢铁前沿技术工程研究中心，辽宁 沈阳 110819）

摘要：铁焦作为一种新型碳铁复合炉料，可促进高炉内间接还原，降低热空区温度，提高冶炼效率，降低焦比，从而实现 CO_2 减排。因此，在双碳背景下，复合铁焦低碳炼铁新炉料开发是助推低碳高炉健康发展的有效手段。本文根据国内外研究现状并结合课题组相关的研究工作，揭示了复合铁焦低碳炼铁原理，系统综述了国内外复合铁焦制备工艺，阐明了复合铁焦在高炉中的反应行为，展望了复合铁焦未来的研究和发展方向，以期促进复合铁焦新炉料技术在我国低碳炼铁领域的创新研发和应用推广。

关键词：低碳高炉炼铁；复合铁焦；竖炉炭化；低碳炼铁新炉料；气化溶损行为
中图分类号：TF52；TQ520.6 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)01－0080－14
doi：10.13403/j.sjqt.2026.01.005

Research progress on low-carbon iron-making technology using iron-coke composite as new furnace burden

CHU Mansheng[a,b,c], YUAN Ye[b], TIAN Hongyu[a,b,c], ZHANG Lifeng[b], TANG Jue[a,b,c], BI Chuanguang[a,b,c]
(Northeastern University a. Engineering Research Center of Frontier Technologies for Low-carbon Steelmaking (Ministry of Education); b. School of Metallurgy; c. Liaoning Engineering Research Center of Frontier Technologies for Low-carbon Steelmaking, Shenyang 110819, Liaoning, China)

Abstract: As a new carbon-iron composite furnace burden, iron coke can promote the indirect reduction in the blast furnace, lower the temperature of the softening and melting zone, improve smelting efficiency, reduce coke ratio, and thus achieving CO_2 emission reduction. Therefore, in the context of carbon peaking and carbon neutrality, the development of low-carbon iron-making technology using iron-coke composite as a novel burden serves as an effective means to support the sustainable development of low-carbon blast furnaces. Based on the current research status globally and combined with relevant research work conducted by the research group, this paper elucidates the principles of low-carbon iron-making using iron-coke composite, systematically reviews the preparation processes of iron-coke composite both domestically and internationally, clarifies its reaction behavior in blast furnaces, and prospects future research and development directions, aiming to promote the innovation, development, and application of iron-coke composite technology in the field of low-carbon iron-making in China.

Key words: low-carbon blast furnace iron-making; iron-coke composite; shaft furnace carbonization; novel low-carbon iron-making burden; gasification and dissolution loss behavior

在全球气候变化的严峻挑战下，减少碳排放、 实现碳中和已成为国际社会共同关注的焦点[1－2]。

收稿日期：2025－09－27；**修回日期**：2025－11－03
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52404341)；中国宝武低碳冶金创新基金资助项目(BWLCF202313)；河北省重大科技成果转化专项资助项目(23284101Z)
作者简介：储满生(1973—)，男，教授，博士生导师，从事低碳智能化炼铁研究。
通信作者：田宏宇(1991—)，男，副教授，从事低碳炼铁、资源综合利用研究。

2023 年全世界 CO_2 排放总量为 374 亿 t，中国的 CO_2 排放占全球总排放量的 29.41% 以上[3]，其中钢铁行业占全国总排放量的 16.84%[4]。目前，中国钢铁行业 90% 仍以高炉—转炉为主要生产工艺[5]。高炉炼铁过程 CO_2 排放量的估算占整个钢铁工艺 CO_2 的 70% 以上[6]。因此，高炉炼铁工序是降低钢铁生产流程 CO_2 排放的主要环节[7]。低碳高炉炼铁技术是钢铁产业节能减排的核心重点关键技术，也是未来高炉炼铁工艺的发展方向[8]。

目前，仅依靠精料、高风温、富氧喷煤等常规技术对高炉的节能减排潜能已经逼近其物理界限[9-11]。因此，国家正大力发展碳铁复合炉料、熔剂性球团、喷吹富氢介质、炉顶煤气再循环以及高炉智能化等低碳高炉技术[12-14]。复合铁焦是通过铁基材料(铁矿粉/钢渣/赤泥)与煤粉复合，经协同炭化形成的新型碳铁复合炉料。炭化过程中金属铁被还原出来，均匀的镶嵌在碳基质，对碳气化起到催化作用，使其获得高反应性[15-18]。高炉中使用适量铁焦具有以下优势：① 降低热储备区温度，促进炉内含铁炉料的间接还原，提高高炉冶炼效率；② 铁焦带入金属铁和碳，在炉内仅熔化，降低能耗；③ 代替冶炼中部分焦炭的作用，降低焦比，减少 CO_2 排放；④ 可以利用低品位矿和冶金固废资源，原料适应性强，可降低生产成本[19-20]。NOMURA 等[21]利用高炉模拟器(BF inner reaction simulator，BIS)研究了铁焦对高炉冶炼的影响。当铁焦具有 43% 的全铁含量时，对比普通焦炭，其气化起始温度可下降 150 ℃，可使高炉的热储备区温度下降 186 ℃，使炉体运行效率提高 6.8%。

当前，国际上特别是日本对铁焦进行了大量的研究，并且已经进入工业化生产阶段，国内起步较晚，铁焦的研究大多处于实验室阶段。新日本制铁公司采用传统室式焦炉法制备铁焦[22]，这种方法中，将铁矿加入到配煤输送皮带机中，并在 8 台皮带机的输送下，使配煤和铁矿充分混合。焦炉的装煤方式为顶装，焦炉炉壁大多为硅砖，FeO 和 SiO_2 形成低熔点相铁橄榄石，1 100 ~ 1 200 ℃会黏结炉壁，影响出焦，破坏炉墙。因此，炉壁温度被控制在 1 070 ℃左右，持续 24 h，并通过湿法熄焦获得铁焦。所获得铁焦性能指标：转鼓强度为 80.9%，反应性指数为 48.8%，反应后强度为 16.3%。鉴于铁焦反应后强度过低，未见新日铁高炉实际使用焦炉法铁焦的公开报道。

国内大多采用焦炉法制备铁焦，且总体处于实验室研究阶段，焦炉法铁焦反应后强度低，高炉无法增量使用；且焦炉温度难以精确控制，炉墙侵蚀严重；需全部使用炼焦煤。东北大学开发煤/矿热压 - 竖炉炭化工艺，复合铁焦性能优于国内外研究结果，竖炉法可增加使用弱黏结煤，铁焦性能优良，具有良好应用前景，得到宝钢、河钢、鞍钢、本钢等企业高度关注。

本文根据国内外研究现状并结合课题组相关的研究工作，对复合铁焦低碳炼铁原理、国内外复合铁焦制备工艺及其在高炉中的反应行为进行了系统的阐述，并进一步展望了复合铁焦未来的研究和发展方向，以期促进复合铁焦新炉料技术在我国低碳炼铁领域的创新研发和应用推广。

1　复合铁焦低碳炼铁原理

高炉炼铁过程中，提高高炉反应效率可以降低还原剂的用量，从而实现降低吨铁成本以及减少二氧化碳排放量的目的。高炉 Rist 操作线如图 1 所示，其中，W 点为浮氏体 FeO 还原的热力学平衡点。W 点的横坐标为 x_w，取决于热储备区的平衡温度，该温度又由焦炭气化反应起始温度决定[23-24]。W 点的纵坐标 y_w，即 $n(O)/n(Fe)$，浮氏体的缺位化合物特点常取值 1.05。NAITO 等[25]以 Rist 操作线为依据，分析了提高高炉冶炼效率的两种方法：① 通过改善含铁炉料还原性和煤气流分布，使操作线右移接近或经过还原平衡 W 点(A - B)；② 通过改善焦炭的反应性，以减少热储备区的温度，使 W 向右移到 W'，而 W 点向右移，则会减小高炉运行操作线斜率，焦比降低，从而降低 CO_2 排放，同时使 FeO 还原平衡向低 CO/CO_2 方向移动，提高煤气中 CO 实际值与平衡值的差，促进 FeO 还原。根据高炉热平衡的计算结果[26]，高温区中气体带出的热量(热损失)随着热储备温度的下降而减小。热储备温度每降低 10 ℃，热损失减少23 036.80 kJ/tHM，风口碳燃

耗降低2.35 kJ/tHM。

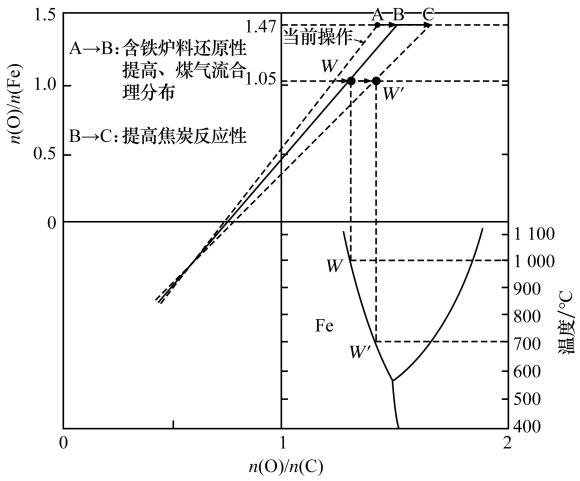


图 1 基于 Rist 操作线的提高高炉反应效率的方法

Fig. 1 Methods for enhancing blast furnace reaction efficiency based on the rist operating diagram

除此之外，焦炭在高炉中的消耗结构如图 2 所示。图 2 中，焦炭在高炉中会发生气化溶损反应，即焦炭与 CO_2 发生的气化溶损反应($C + CO_2 \rightarrow 2CO$)，以及焦炭与水蒸气发生的水煤气反应($C + H_2O \rightarrow CO + H_2$)。铁焦因为其高反应性会优先发生气化溶损反应，铁焦的加入并不增加高炉冶炼过程吨铁的碳气化溶损反应量，而是替代高炉中焦炭气化溶损的消耗量。因此，在高炉冶炼中仍用高强度普通焦炭作为料柱骨架，铁焦的加入可以降低焦炭强度损失，提高冶炼效率。UJISAWA[27] 通过实验发现，当铁焦与焦炭混合时，高反应性的铁焦因其强吸热的碳气化反应而降低了热储备区的温度，提高高炉冶炼效率。NOMURA 等[28] 对高炉中加入高反应焦炭对热储备区温度的影响经过详细的计算，当热储备区温度降低 100 ℃可使高炉碳耗下降 5%，若热储备区温度降低 300 ℃，则可节省 14% 的碳耗。

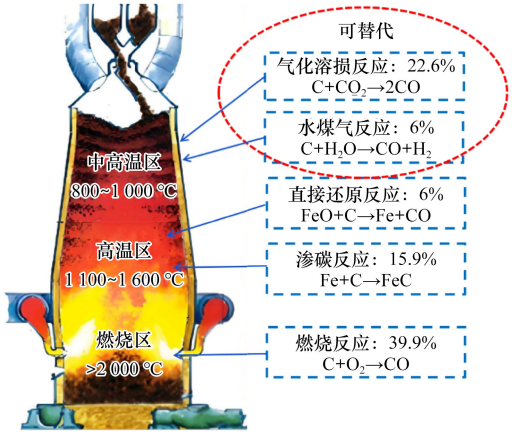
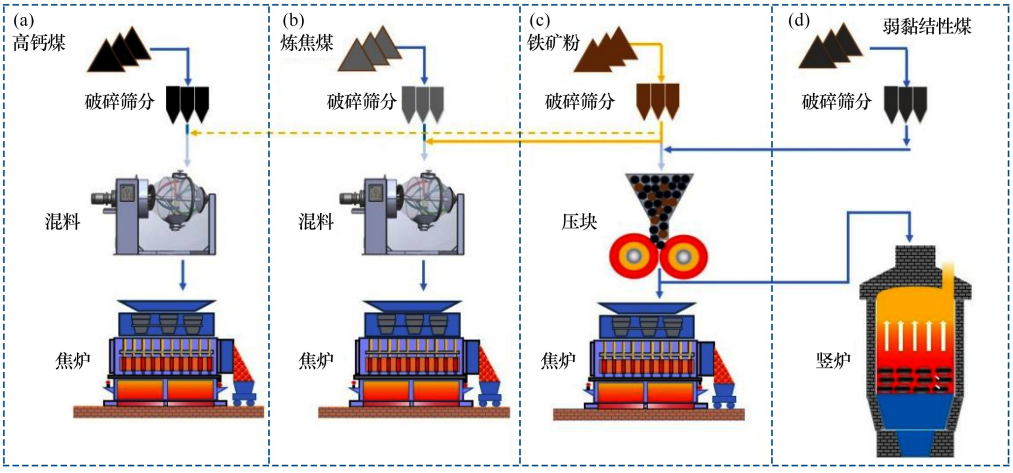


图 2 焦炭在高炉中的消耗结构

Fig. 2 Consumption distribution of coke in the blast furnace

2 国内外复合铁焦制备工艺概述

目前，我国铁焦生产技术主要采用传统室式焦炉工艺和煤/矿压块－竖炉工艺。在传统工艺中，根据装煤方式的差异，可将其划分为散体顶装法、冷压块顶装法和捣固法。煤/矿压块－竖炉工艺根据制备压块工艺的不同包括热压块－竖炉炭化工艺和冷压块－竖炉炭化工艺，其工艺流程图和工艺特点分别如图 3 和表 1 所示。



（a）散料体顶装焦炉工艺；（b）捣固焦炉工艺；（c）冷压块顶装焦炉工艺；（d）竖炉工艺

图 3 铁焦制备工艺流程

Fig. 3 Process flow of iron coke production

表 1　复合铁焦制备工艺特点和进展

Table 1　Preparation characteristics and advances in composite iron coke

工艺类型		特点	进展
焦炉工艺	散料体顶装焦炉	设备成本低，生产技术成熟且运行稳定；不能增量使用非炼焦煤；结焦时间过长，生产效率低，能耗高；原料中的铁矿粉会与硅砖反应生成低熔点物质，导致高温下炉墙受损。	国外完成试验研究，未工业化应用；国内总体处于实验室研究阶段。
	冷压块顶装焦炉工艺	设备成本低，生产技术成熟且运行稳定；冷压块易破碎。	从工业示范向规模化应用过渡的关键阶段。
	捣固室式焦炉工艺	设备成本低，生产技术成熟且运行稳定；依赖用肥煤、气肥煤和焦煤等高品质炼焦煤，难增量使用弱黏结性煤。	日本 JFE 钢铁公司进行大高炉试验，正联合研发。
竖炉工艺		可增加使用弱黏结煤，铁焦产品性能优良，具有良好应用前景。东北大学开发煤/矿热压/冷压－竖炉炭化工艺，复合铁焦性能优于国内外研究结果，得到宝钢、河钢、鞍钢、本钢等企业高度关注。	国内东北大学已完成大量的实验室研究；正在进行工业化试验准备。

2.1　散料体顶装焦炉工艺

散料体顶装焦炉工艺[29]［图 3(a)］采用传统室式焦炉，将铁矿粉与炼焦煤的混合物通过炉顶装煤孔装入炭化室，利用混合料自身重力自由下落，并在其中进行炭化。该工艺只是将传统焦炉进行微小改造，因此设备成本低，生产技术成熟且运行稳定。但也存在几个问题：① 不能增量使用非炼焦煤；② 由于焦饼中心和边缘温度分布不均，导致铁焦质量不均匀；③ 结焦时间过长，生产效率低，能耗高；④ 由于原料中的铁矿粉会与硅砖反应，生成低熔点化合物铁橄榄石，因此在高温下会使炉墙受损。

日本新日铁 NOMURA 等[30]通过散料体顶装焦炉工艺制备复合铁焦，将铁矿粉(添加质量分数为 0～20%)与配合煤(粒度 <3 mm)均匀混合，混合物中水分调至 6%，装入镀锌钢箱中置于实验焦炉中进行炭化处理。炭化过程模拟工业焦炉实际工况，在此基础上，提出了一种新的焦化工艺，即以等效升温曲线 1 250 ℃、18.5 h 为一段时间。研究发现，在焦炭中加入铁矿石后，转鼓强度有所下降，而对焦炭的反应性有明显改善。在上述基础上通过调节煤混合物组成和焦炉温度，成功实现了铁焦在散料体顶装焦炉中规模化生产。

2.2　冷压块顶装焦炉工艺

冷压块顶装焦炉工艺［图 3(b)］是将混合的铁矿与配合煤加压成形后，从炉顶装入焦炉中进行冶炼。此工艺虽然采用了煤/矿压块和焦炉焦化工艺，可以利用焦炉进行生产，减少了投资成本，且造块减少了对焦炉炉墙的侵蚀。但是，由于顶装焦炉采用螺旋装料方式，在装料时面临挤压磨损、碰撞使其内部结构破坏的一系列问题。此外，焦化时间过长会增加能耗，降低生产效率。同样，由于生产过程炉料中心和边缘温度分布不均，导致铁焦质量不均匀。

NOMURA 等[31]开发了基于煤/矿压块焦炉工艺的铁焦制备方法：将铁矿粉与弱黏结煤按不同比例混合，添加 8% 软沥青(SOP)作为黏结剂，经压块机成型后，将型块与焦粉混合装入耐热钢坩埚，最终在焦炉中炭化 18.5 h 制得铁焦。制备的铁焦抗压强度为 3 500 N/P，反应性为 35%，反应后强度为 16%。国内任华伟等[32]对炼焦煤/铁矿石/焦油残渣混合进行冷压成型及焦炉碳化处理，发现在 1/3 焦煤与铁矿石粉比例 6∶4的情况下，掺入 8%～15% 焦油渣制得的铁焦强度大于 110 N/P，最终获得的铁焦球抗压强度高达 6 900 N/P，铁焦反应性达 32%。

2.3　捣固室式焦炉工艺

捣固室式焦炉工艺［图 3(c)］通过机械捣压将配合煤压实，形成自立式煤饼送入炭化室。该流程选用优质的炼焦煤，如肥煤、气肥煤、焦煤等，而不添加弱黏煤。此外，由于所制得的焦的热强度偏低，加之国内实际运行的捣固焦炉较少，导致该工艺难以普及。

史世庄等[33－34]采用捣固焦炉生产铁焦，其方法是将配合煤与不同种类的铁矿石进行混合，再将含水量调整到 10%，在铁箱中将混合料进行压

实，达到一定的堆积密度。在 5 kg 的焦炉上进行焦化处理，然后进行湿熄焦处理。在此基础上，优化了反应条件，得到反应性为 64.07%，反应后强度为 21.63% 的铁焦。

SURESH 等[35]将中阶煤、非炼焦煤以及劣质铁矿石混合均匀后，用水使其湿度达到 8%～10%，然后将这些材料混合在一起放在铁箱里捣固至一定的堆积密度，装入焦炉炭化。得到铁焦反应性为 34.5%，反应后强度为 46.5%。

2.4 煤/矿压块－竖炉炭化新工艺

基于焦炉炭化工艺依赖炼焦煤、铁焦强度差、侵蚀炉墙的问题，本研究团队提出了煤/矿压块－竖炉炭化新工艺，其特点：① 该工艺可大量使用非/弱黏结性煤，缓解了优质炼焦煤资源紧缺问题；② 可独立使用竖炉炭化，使生产和产量可灵活控制，生产效率高，且型焦生产具有环境污染轻的优势；③ 产品具有高反应性和高强度，可以降低高炉焦比和 CO_2 排放，实现高炉低碳冶炼。因此，该工艺具有明显的优势和较好的应用前景。根据煤/矿压块成型工艺的不同可分为热压成型—竖炉炭化工艺和冷压成型－竖炉炭化工艺，其工艺流程见图 4。

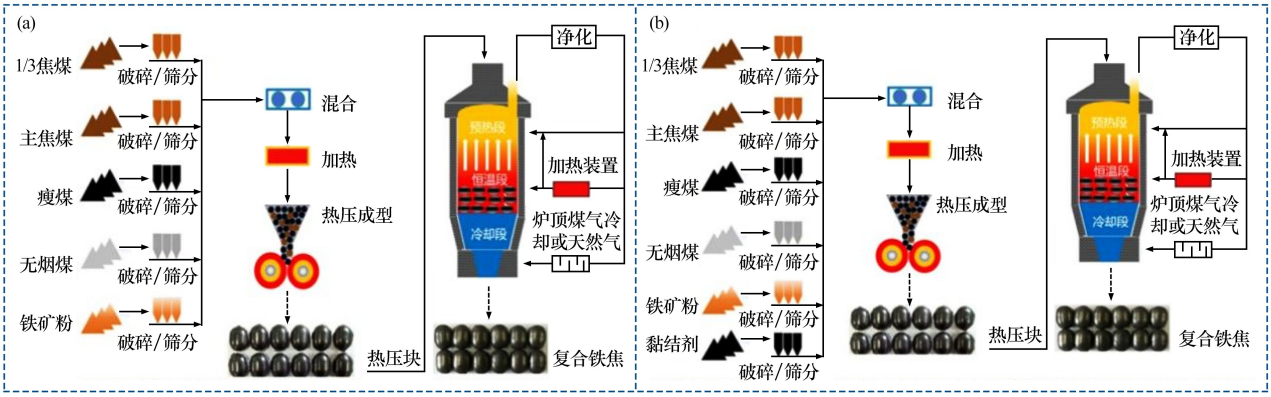
2.4.1 热压成型－竖炉炭化工艺

热压成型－竖炉炭化[图 4(a)]是将煤/矿混合物加热至适宜温度以利用烟煤的热塑性将非黏结性的无烟煤和铁矿黏结在一起制成热压块，然后通过竖炉炭化制备高质量的铁焦。该工艺可大量使用非/弱黏结性煤，缓解了优质炼焦煤资源紧缺问题；可独立使用竖炉炭化，使生产和产量可灵活控制，生产效率高[36]。

基于热压成型－竖炉炭化工艺，相较于碱金属和碱土金属，由于过渡金属(以铁为主)不会对高炉冶炼带入有害元素，原料来源也丰富，所以更适合作为铁焦的催化剂。而将铁矿粉预先加入铁焦，更有利于铁焦的气化反应的平稳性和均匀性[37]。大量的实验结果表明，基于不同的原料组成、铁/煤种类和黏结剂，铁焦适宜的热压温度为 250～350 ℃，炭化温度在 850～1 000 ℃，炭化时间在 4～6 h，可以得到抗压强度大于 4 000 N/P，反应性指数和反应后强度均大于 50% 的热压铁焦产品。此外，铁焦体积大小也是影响其成型率和抗压强度的重要因素，铁焦体积过大会导致铁焦成型率和抗压强度下降[38]。铁矿粉配比，使铁焦孔隙率增加，光学指数降低，反应性增加，反应后强度下降[39]。增加主焦煤配比会使铁焦结构致密，反应性降低，反应后强度上升[40]。对于配合煤中烟煤的利用，容易在高加热温度过程中产生大量的烟气，因此存在能耗高、环保和安全问题。此外，热压成型－竖炉炭化工艺还存在炭化过程铁焦黏结现象，影响产品质量和设备顺行。

2.4.2 冷压成型－竖炉炭化工艺

基于热压－竖炉炭化工艺存在能耗高、环保和安全问题，不利于工业生产[41-42]，本研究团队又提出添加自研复合黏结剂制备冷压块的竖炉炭化工艺。冷压成型－竖炉炭化工艺[图 4(b)]是在煤/矿混合料中加入复合黏结剂，利用复合黏结剂



(a) 热压成型－竖炉炭化工艺；(b) 冷压成型－竖炉炭化工艺

图 4 热压/冷压－竖炉炭化工艺流程

Fig. 4 Hot press/cold press-shaft furnace carbonization process

的黏结性，在外力作用下将煤/矿颗粒黏结在一起，使压块强度不小于 500 N/P，再通过适宜的竖炉炭化参数优化，可制备铁焦抗压强度不小于 2 500 N/P、金属化率不小于 70%、转鼓强度不小于 75%、反应性不小于 60%、反应后强度不小于 50% 的高品质铁焦[40,43]。由于自研复合黏结剂软化温度低，在 60～80 ℃下便可软化、流动，该温度下烟煤不会产生大量的烟气，因此生产过程环保和安全，利于工业生产。此外，常规黏结剂与复合黏结剂对铁焦的影响机制不同，前者只影响颗粒之间的结合，后者除此之外还会改变铁焦的微晶结构，更适合做黏结剂，适宜的比例范围为 3%～7%。通过基于响应曲面法以铁矿配比、炭化温度/时间为自变量，建立了铁焦抗压强度、反应性和反应后强度的二次模型，对铁焦的抗压强度、反应性和反应后强度进行了多目标协同优化，可进一步提升铁焦产品质量，获得冷压型铁焦制备的优选工艺条件。

3　复合铁焦在高炉中的反应行为

目前，针对铁焦在高炉内演变行为的研究相对有限。然而，鉴于铁焦在高炉冶炼过程中需承担与焦炭类似的作用，其必然经历复杂的化学反应与物理变化。因此，可以借鉴对焦炭演变行为的深入理解来推测和类比铁焦的历程。图 5 为焦炭在高炉内的演变过程。在高炉中，焦炭在块状带主要受到冲击，挤压，磨损等力学行为。然而，该区域的机械负荷通常远低于焦炭自身的承受极限，此阶段焦炭强度损失、料层透气性劣化均不明显[44]。焦炭软熔带经历碳气化溶损反应、渗碳反应、碱金属侵蚀，以及高温热应力、炉料挤压和摩擦。这些作用导致焦炭强度和块度快速下降，料层透气性显著恶化。焦炭在滴落带受渣铁冲刷、高温煤气冲击和渗碳反应影响，焦炭强度和块度进一步降低。在风口回旋区，焦炭被强高速气流撞击，回旋区发生剧烈燃烧，导致焦炭块度剧减，强度大幅下降。残留的焦炭进入炉缸完成对铁水的渗碳，剩余的碳在出铁时燃烧殆尽。

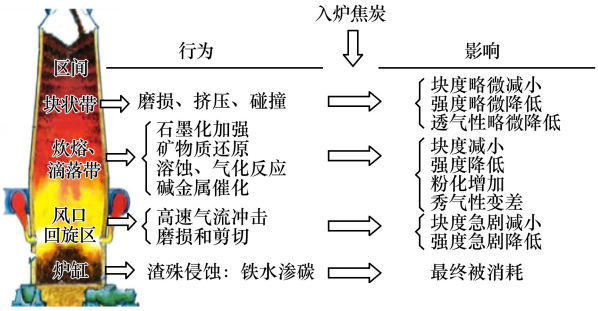


图 5　焦炭在高炉内的演变过程

Fig. 5　Transformation process of coke inside the blast furnace

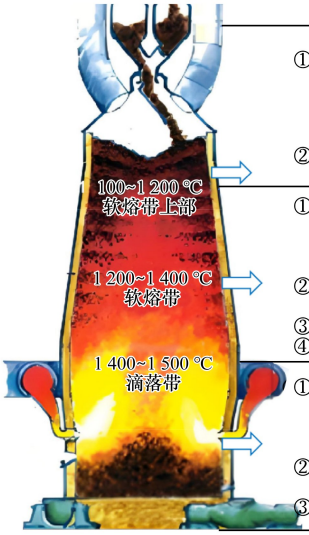
大多数研究主要从碳微晶结构、矿物质和显微形貌等微观结构方面研究焦炭在高炉冶炼过程的演变。在 1 000 ℃退火的焦炭碳微晶高度与入炉焦炭差不多，在 1 000～1 200 ℃内略有增加，在 1 200～1 600 ℃内急剧增加[45]。此外，在温度低于 1 300 ℃，焦炭的气孔率变化不明显。在1 300～1 500 ℃内，焦炭气孔率由于碳基体与矿物相的反应而增加。在1 500 ℃时，一些小气孔连接在一起形成较大的气孔，使得焦炭的气孔率增加[46]。通过模拟高炉冶炼条件下，铁焦演变过程可划分为 3 个阶段，图 6 为铁焦在模拟高炉冶炼条件下的演变行为。在 1 100～1 200 ℃之前，铁焦缓慢反应，外形、强度、碳微晶结构和微观结构变化微小，石墨化度缓慢增加；在 1 200～1 400 ℃区间铁焦剧烈反应，外形、强度和微观结构迅速劣化，碳微晶结构有序性和石墨化度迅速提高；在 1 400～1 500 ℃，铁焦劣化进一步加强，外形尺寸和强度进一步降低，微观结构急剧劣化。在铁焦渗碳解离加剧的影响下，碳微晶结构有序性和石墨化度出现降低[47]。

铁焦高温劣化主要源于碳溶损反应与铁氧化物还原反应的耦合作用，使其结构疏松、强度下降。抑制措施包括：优化制备工艺(通过配煤配矿及调控炭化制度，合理选择煤种与配比以提高反应后强度；调整铁矿粒度与配比以形成更稳定的复合结构)、添加抑制剂/改性剂，以及优化高炉操作制度。

3.1　复合铁焦与高炉炉料之间的反应行为

3.1.1　复合铁焦与含铁炉料之间耦合行为

有研究表明，复合铁焦和含铁炉料混装可以促进铁矿石还原、提高煤气利用率、降低焦比和提高高炉生产效率[48]。高反应性复合铁焦因其优



反应性	结构演变	高炉冶炼影响
① 较弱气化反应、与炉料还原耦合效应低： C+CO=2CO FeO+CO=Fe+CO_2 ② 炉料间的磨损、挤压、碰撞。	① 较低的形变和强度损失； ② 碳微晶结构有序化和石墨化程度增加缓慢； ③ 碳基质结构平坦致密，渣、铁、气孔均匀分散在介质中； ④ 高反应铁焦形变损失大，石墨化加快，碳基质结构更疏松。	高反应铁焦可以加速料层初始收缩，降低综合炉料软化起始温度。
① 较强气化反应、与炉料还原耦合效应高： C+CO=2CO FeO+CO=Fe+CO_2 ② 铁焦自身和金属铁渗碳： 3Fe+C=Fe_3C ③ 铁焦自身和炉料中渣殊熔蚀； ④ 高温石墨化。	① 形变和强度损失加剧，严重粉化； ② 碳微晶结构有序化和石墨化程度增加快速； ③ 碳基质结构疏松，金属铁渗碳增强，低熔点渣相开始熔化； ④ 高反应铁焦形变损失更大，石墨化程度增加更快，碳基质结构更加疏松。	高反应铁焦可促进含铁炉料还原，软熔带变窄，提高综合炉料软熔性能；高反应铁焦虽然粉化严重，但仍固态和高强度，起到支撑炉料和间隔炉料作用，保证料柱的透气性。
① 较强气化反应、与炉料还原耦合效应高： C+CO=2CO FeO+CO=Fe+CO_2 ② 铁焦自身和金属铁渗碳： 3Fe+C=Fe_3C ③ 铁焦自身和炉料中渣殊熔蚀。	① 形变和强度损失进一步加剧，严重粉化； ② 碳微晶结构有序化和石墨化程度降低； ③ 碳基质结构粗糙，有许多渗碳体，低熔点渣相和Fe-Si合金分布，渣铁熔融； ④ 石墨化程度下降，碳基质降解严重；金属铁渗碳更强烈，更多渣铁熔融。	高反应铁焦可加金属铁渗碳，降低炉渣黏度，改善渣殊流动性。

图 6 铁焦在模拟高炉冶炼条件下的演变行为

Fig. 6 Evolution behavior of iron-coke under simulated blast furnace conditions

异特性，被认为与含铁炉料混装可产生更显著效果。为验证这一预期并阐明其作用机制，将铁焦与含铁炉料结合，系统研究了复合铁焦对含铁炉料还原过程的影响。铁焦与含铁炉料之间耦合行为相关实验研究如表 2 所示。

由表 2 可知，将捣固型铁焦和含铁炉料进行混装，当铁焦添加量为 20% 时，烧结矿还原度增加约 2%，球团矿增加约 0.8%[49]。将热压铁焦与球团矿进行混装，当铁焦添加量增至 30% 时，球团矿还原率由 23.69% 提升至 33.72%[50]。此外，将热压铁焦和含铁炉料通过非等温还原过程，随着铁焦添加量的增加，烧结矿还原率由 18.94% 提高至 33.34%，球团矿还原率由 22.91% 增加至 36.62%，且总还原率增加幅度逐渐变缓[51]。当铁焦中铁矿粉配加质量分数在 15% 至 30% 区间内增加时，铁焦反应性随之提高 16.9%，而铁焦 – 球团混合物的还原表观活化能则相应降低 13.95 kJ/mol，协同效应增强。但当铁矿粉配加质量分数超过

表 2 铁焦与含铁炉料之间耦合行为相关实验研究

Table 2 Experimental study on the interactive behavior between iron-coke and iron-bearing burden materials

文献来源	实验条件	实验目的	实验结论
[49]	还原温度：900 ℃ 还原时间：60 min 气体组成：23.5% CO + 13.8% CO_2 + 62.7% N_2	研究捣固型铁焦对含铁炉料还原行为的影响	铁焦添加量为 20% 时，烧结矿还原度增加约 2%，球团矿增加约 0.8%
[50]	等温还原温度：1 100 ℃ 还原时间：60 min 气体组成：30% CO + 70% N_2。	热压铁焦的装料方式及添加量对球团矿等温还原的影响	混装方式显著促进球团还原；铁焦添加量从 0 增至 30% 时，球团矿还原率由 23.69% 提升至 33.72%
[51]	温度：室温以 5 ℃/min 升至 1 100 ℃ 气体流量：60 mL/min CO_2	热压铁焦对含铁炉料非等温还原过程的影响	铁焦的添加量逐渐增加，烧结矿还原率由 18.94% 提高至 33.34%，球团矿还原率由 22.91% 增加至 36.62%，且总还原率增加幅度逐渐变缓
[52]	还原温度：1 100 ℃ 还原时间：300 min 气体组成：30% CO + 70% N_2	冷压铁焦对含铁炉料等温还原过程的影响	当铁焦中铁矿粉配加质量分数由 15% 增至 30% 时，铁焦反应性提高 16.9%，而铁焦 – 球团混合物的还原表观活化能降低 13.95 kJ/mol，协同效应增强

35% 后，铁焦反应性下降，还原表观活化能上升，协同效应减弱[52]。

通过增加铁焦添加量和提高铁焦反应性均可有效促进球团和烧结矿的还原，但是促进作用具有一定限度。适宜的铁焦添加量为 25%，适宜的铁矿添加量为 30%。铁焦对含铁物料的影响机制如图 7 所示。由图 7 可知，铁焦与含铁炉料混合后，在高温下 CO 首先与含铁炉料中的氧化铁反应生成 CO_2，而铁焦则与 CO_2 在高温下迅速反应并释放出 CO，导致含铁炉料附近的还原电位大幅提高，CO 在含铁炉料表面的扩散速率也随之提高，进而加速了还原[53]。此外，反应性高的铁焦和还原性高的含铁炉料间耦合作用更加显著。

3.1.2　复合铁焦与焦炭之间反应行为

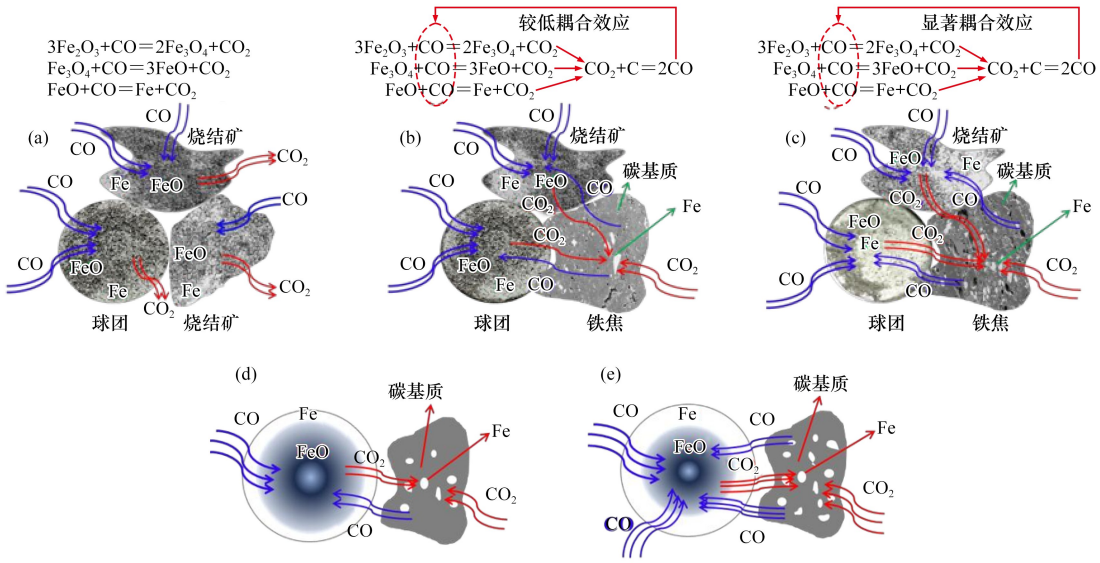
焦炭的气化反应对高炉冶炼有重要影响，不仅直接影响着炉内还原性气体(CO)的生成量和效率，更深刻影响着高炉下部软熔带和滴落带的料柱透气性，进而关系到高炉的顺行状态、生产效率、能源消耗乃至生铁质量。当铁焦被引入高炉，部分替代或与传统焦炭混合使用时，它将对传统焦炭在高炉内的反应行为产生一系列重要且复杂的影响。

通过非等温热重分析方法对铁焦与焦炭之间的气化反应进行了比较研究，铁焦的加入可以降低初始气化温度。随着铁矿石配比的增加，碳气化的活化能逐渐降低，从焦炭的 246.2 kJ/mol 降至 15% 铁焦的 192.5 kJ/mol[54-55]。铁焦在 40% H_2O + 60% CO_2 气氛的富氢高炉中应用时，铁焦会优先气化。当铁焦和焦炭共气化时，焦炭反应性指数和焦炭反应后强度分别降低和增加[56]。结果表明，随铁焦加入量的增加，焦炭的反应失重率减小，反应后强度增大，铁焦的反应失重先增大后减小，反应后强度增大。然而，这种现象在铁焦添加质量分数达到 30% 后逐渐消失，焦炭的失重和反应后强度无明显变化[57]。

铁焦的加入可以降低初始气化温度、碳气化的活化能，铁焦与焦炭的相互作用以气相耦合为主。铁焦的气化反应机理如图 8 所示。图 8 中，铁焦因高反应性优先与 CO_2 反应生成 CO，提高局部 CO 浓度。高浓度 CO 可抑制焦炭的气化，但铁焦生成的活性 CO 会驱动含铁炉料的还原，降低焦炭的气化溶损，对焦炭具有保护作用，但保护作用有一定的限度。

3.2　复合铁焦对综合炉料熔滴性能的影响

高炉冶炼过程中，含铁复合炉料的熔滴特性起着关键作用，当高炉使用复合铁焦时其对综合炉料熔滴性能的影响是积极的，主要体现在改善熔滴带透气性、降低熔融区间压差和促进软熔带



(a) 未混装铁焦；(b) 混装 10% 铁矿的铁焦；(c) 混装 30% 铁矿的铁焦；
(d) 低还原性含铁炉料和低反应性铁焦；(e) 高还原性含铁炉料和高反应性铁焦

图 7　铁焦对含铁炉料还原过程的影响机制

Fig. 7　Mechanism of the effect of iron-coke on the reduction of iron-bearing burden

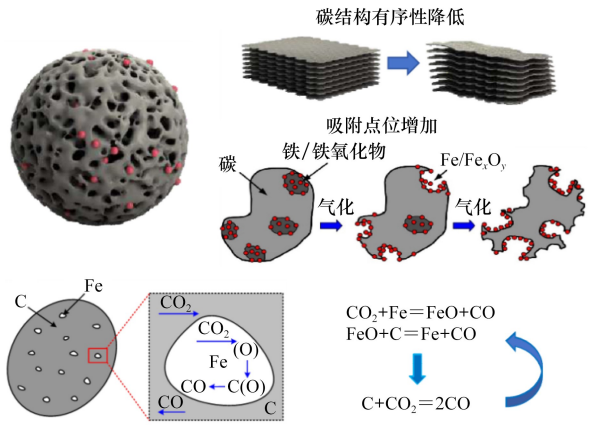


图 8 铁焦气化反应机理

Fig. 8 Gasification mechanism of iron-coke

结构优化等方面。其中综合炉料的软化和熔化会严重恶化料层的透气性，阻碍煤气流分布，威胁高炉顺行。高炉使用铁焦对综合炉料的熔滴和透气性能的影响非常重要，并且铁焦在高炉冶炼过程的演变或者降解行为对高炉长期稳定运行至关重要。关于铁焦对综合炉料熔滴的相关实验研究如表 3 所示。

由表 3 可知，在模拟富氢高炉气氛下，铁焦的应用可以显著改善铁矿石的还原和铁的渗碳过程，同时降低熔化温度 1 ~ 10 ℃，降低滴落温度 5 ~ 16 ℃，缩小软熔带区间，使炉料的熔滴区间收窄并上移，提高炉料的透气性，减少焦炭的气化溶损，从而确保焦炭的骨架作用[56]。具体来说，当还原气氛中 H_2 的质量分数为 10%，且使用全铁焦时，富氢高炉冶炼的熔滴温度区间可以从 54 ℃降至 45 ℃[57]。

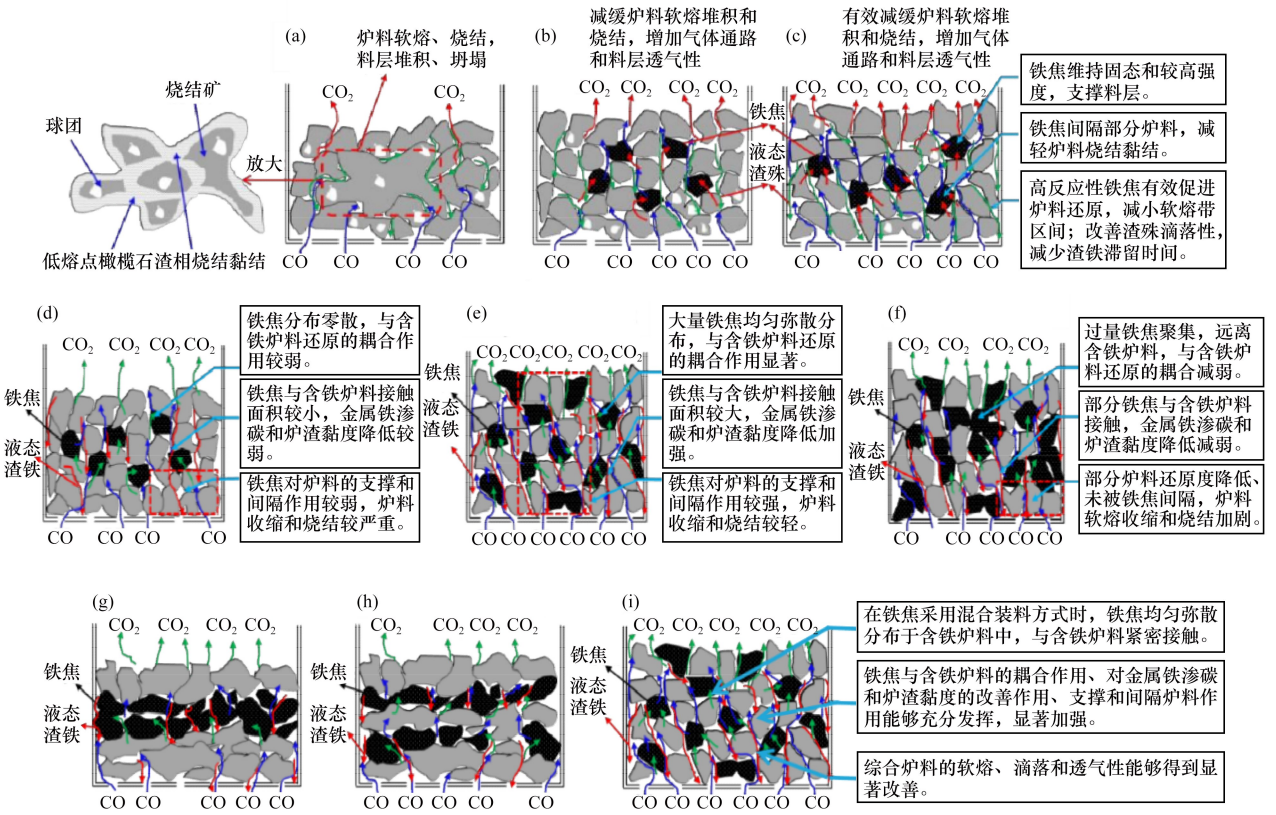
在研究铁焦在传统高炉中对综合炉料熔滴性能时，铁焦添加量增至 30% 时，可使炉料的软化温度区间增加 12.6 ℃，熔化温度区间减小 46.3 ℃，综合炉料的滴落压差下降，但滴落率存在峰值。因此，适量的热压铁焦有助于改善综合炉料的熔滴性能[58-60]。此外，通过混装的装料方式，综合炉料的软化温度区间增加 31 ℃，熔化温度区间降低 19 ℃，渣铁滴落率提高 19.6%。当铁焦中铁矿增至 30% 时，综合炉料的软化温度区间增加 44 ℃，熔化温度区间降低 61 ℃[61]。

铁焦对综合炉料熔滴性能的影响机制如图 9 所示。由图 9 可知，高炉使用铁焦加强了含铁炉料的还原，减少了低熔点渣相生成，减缓了炉料软熔收缩，使得软熔带变窄，气体通过软熔带行

表 3 铁焦对综合炉料熔滴的相关实验研究

Table 3 Experimental study on the influence of iron-coke on the melting and dropping behavior of the mixed burden

文献来源	实验条件	实验目的	实验结论
[56]	富氢高炉 40% H_2O + 60% CO_2 气氛	铁焦对综合炉料熔滴性能的影响	降低熔化温度 1 ~ 10 ℃，降低滴落温度 5 ~ 16 ℃
[55]	富氢高炉 40% H_2O + 60% CO_2 气氛	铁焦代替焦炭应用于富氢高炉	铁焦具有高反应性，保护焦炭，加速铁水的渗碳过程，改善高炉的透气性
[57]	富氢高炉 40% H_2O + 60% CO_2 气氛，还原气氛中 H_2 质量分数为 10%	富氢耦合铁焦对炼铁炉料熔滴的影响	100% 铁焦使富氢高炉冶炼的熔滴温度区间变窄，从 54 ℃降至 45 ℃
[58]	通过热模拟的试验方式，在高炉中加入 20% 铁矿的铁焦作为试验样品	铁焦对矿石熔滴性能的影响	铁焦使软熔带大幅度缩短，提高滴落生铁中的碳含量提高 0.6 ~ 1.22 倍
[59]	烧结矿：球团添加量为 72∶28，30% 铁矿铁焦，铁焦添加量为 0 ~ 30%	热压铁焦添加量对高炉综合炉料滴落性能的影响	热压铁焦添加量增至 30%，炉料软化温度区间增加 12.6 ℃，熔化温度区间减小 46.3 ℃，软熔带逐渐变窄且位置下移，综合炉料滴落压差下降
[60]	烧结矿：球团添加量为 72∶28，30% 铁矿铁焦，铁焦添加量为 30%	冷压铁焦装料方式对高炉综合炉料滴落性能的影响	混装的装料方式使综合炉料的软化温度区间增加 31 ℃，熔化温度区间降低 19 ℃，渣铁滴落率提高 19.6%
[61]	烧结矿：球团添加量为 72∶28，铁焦添加量为 30%，混装	不同反应性铁焦对高炉综合炉料滴落性能的影响	当铁焦中铁矿增至 30% 时，综合炉料的软化温度区间增加 44 ℃，熔化温度区间降低 61 ℃



不同反应性铁焦：（a）未添加铁焦；（b）10% 铁矿的铁焦；（c）30% 铁矿的铁焦；
不同铁焦添加量：（d）混装 10% 铁焦；（e）混装 30% 铁焦；（f）混装 35% 铁焦；
不同装料方式：（g）单层装料；（h）双层装；（i）混合装料

图 9　铁焦对综合炉料熔滴性能的影响机制

Fig. 9　Influence mechanism of iron-coke on the melting-dripping properties of the mixed burden

程变短；同时，可改善渣铁滴落性能，减少渣铁滞留时间。此外，铁焦维持固态和较高强度，支撑料层，也可间隔部分炉料，减轻炉料间烧结，为气体通过料层提供更多通路。因此，铁焦的添加改善了综合炉料的透气性，并且在混合装料条件下，使用较高反应性的铁焦、且添加量达到 20%～30% 时，效果更为显著。

4　展　望

随着全球碳中和目标的稳步推进和钢铁行业绿色转型的迫切需求，复合铁焦技术作为低碳高炉炼铁的前沿研究方向，其未来发展前景广阔。基于当前研究进展和技术瓶颈，未来研究应围绕性能优化、机理深化、低碳化集成及产业化应用展开，以推动该技术从实验室研究迈向工业化应用。

（1）多尺度结构设计与性能协同优化。需建立铁矿石与煤焦的适配性数据库，通过机器学习分析不同矿种和煤种的交互作用规律，揭示铁氧化物在焦炭孔隙中的迁移－还原机制，在介观尺度实现“铁－焦”界面化学键合通过新型催化剂优化铁－焦界面反应，并借助仿生分级多孔结构设计提升气固反应动力学，阐明铁焦晶格应变与碳结构演变规律。系统解决高反应性煤与高强度焦的矛盾，实现原料—成分—工艺—结构—性能的一体化精准调控。此外，微波炭化、等离子体活化等新型能源输入方式也有望显著提高效率和降低能耗。

（2）还原机理与冶金反应动力学深化。通过多气氛耦合反应机制构建 H_2-CO-CO_2-N_2 多元气氛下的热力学模型，并通过同位素示踪法区分气－固相反应路径，特别需要关注低温区的还原行为，明确铁焦在氢基高炉中的反应行为。采用高温原位技术揭示铁焦在软熔带的熔滴行为，建立铁焦结构参数与熔滴性能的定量关系，并利用化学反

应的离散元－计算流体力学(DEM-CFD)多场耦合模型及热应力场与化学收缩应力的协同作用，模拟和阐明铁焦在高炉内的溶损行为。

(3) 炭化工艺精细化调控及装备提升。铁焦的炭化过程涉及煤的热解与铁氧化物的还原反应耦合，其工艺参数对铁焦的强度、反应性和微观结构具有决定性影响，利用数字孪生技术通过建立炭化过程的多物理场模型(热－化学－力学耦合)，模拟不同装备结构下的反应行为，指导工艺参数与反应器设计的匹配。开发适用于铁焦的竖炉或外热式反应器，采用多级加热并通过分区控温实现铁焦的均匀炭化和性能优化，结合实验研究与工程放大，构建“工艺—装备—性能”一体化解决方案。

(4) 全生命周期低碳化技术集成。可利用铁焦技术实现烧结返矿、细杂料、铜渣、含锌粉尘等冶金固废资源的综合利用，达到固废资源体系内消纳、固废协同和低碳高效的效果。还可研究生物质复合铁焦技术，解决生物质灰分中K、Na等碱金属对高炉操作的负面影响。开发有效的碳沉积技术，将生物质碳固定率从现有30%提升至50%以上，系统评估生物质铁焦的碳足迹。设计氢等离子体铁焦预处理装置，在入炉前实现部分铁氧化物的预还原，构建高炉顶部煤气——电解制氢—铁焦制备的闭环系统，重点突破低品位余热驱动的水电解技术。还可探索铁焦渣作为矿化封存介质的可行性，并利用数字孪生、区块链技术等智能技术构建铁焦碳足迹追溯平台，为碳交易提供数据支撑。

(5) 标准化与产业化推广路径探索。制定涵盖铁焦冶金性能及环境效益的综合标准和评价体系。分阶段推进产业化路径，近期(2025—2030)建立万t级示范线，中期(2030—2040)开发电炉短流程专用铁焦，远期(2040—2060)实现“铁焦—绿氢—CCUS”零碳炼铁系统。

总之，复合铁焦技术的发展需要多学科交叉融合和产学研协同创新。通过持续的基础研究、技术突破和应用实践，使复合铁焦技术成为实现低碳低成本炼铁的关键技术之一，以期为全球绿色钢铁生产提供中国方案。

参考文献：

[1] 李俊峰. 做好碳达峰、碳中和工作,迎接低排放发展的新时代[J]. 世界环境,2021(1):16－19.
LI Junfeng. Do a good job of carbon peak and carbon neutralization to meet the New Era of low emission development[J]. World Environment,2021(1):16－19.

[2] KERR R A. Global warming is changing the world[J]. Science,2007,316(5822):188－190.

[3] 张福明. 首钢绿色低碳炼铁技术的发展与展望[J]. 钢铁,2020,55(8):11－18.
ZHANG Fuming. Development and prospect of green and low carbon ironmaking technologies in Shougang[J]. Iron & Steel,2020,55(8):11－18.

[4] 董成国,王盟,张玉锋. 传统高炉炼铁流程面临的问题和应对策略[J]. 冶金管理,2020(3):6.
DONG Chengguo, WANG Meng, ZHANG Yufeng. Problems facing the traditional blast furnace ironmaking process and countermeasures[J]. China Steel Focus, 2020(3):6.

[5] 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.
ZHANG Qi, SHEN Jialin, XU Lisong. Carbon peak and low-carbon transition path of China's iron and steel industry[J]. Iron & Steel,2021,56(10):152－163.

[6] AHMED H M, VISWANATHAN N, BJORKMAN B. Composite pellets-a potential raw material for iron-making[J]. Steel Research International,2014,85(3): 293－306.

[7] CHU M,YAGI J I. Numerical evaluation of blast furnace performance under top gas recycling and lower temperature operation[J]. Steel Research International, 2010,81(12):1043－1050.

[8] MIKI T, CHAIRAKSA-FUJIMOTO R, MARUYAMAM K,et al. Hydrometallurgical extraction of zinc from CaO treated EAF dust in ammonium chloride solution[J]. Journal of hazardous materials,2016,302:90－96.

[9] GAO J T,LI S Q,ZHANG Y L,et al. Experimental study on solid state recovery of metallic resources from EAF dust[J]. Ironmaking & Steelmaking,2012,39(6):446－453.

[10] DE BUZIN P J W K,HECK N C,VILELA A C F. EAF dust:An overview on the influences of physical,chemical and mineral features in its recycling and waste

incorporation routes[J]. Journal of Materials Research and Technology,2017,6(2):194 – 202.

[11] ITOH S, TSUBONE A, MATSUBAE-YOKOYAMA K, et al. New EAF dust treatment process with the aid of strong magnetic field[J]. ISIJ International, 2008, 48(10):1339 – 1344.

[12] SUN G D, MATSUURA H, TSUKIHASHI F. Influence of temperature on the selective chlorination and evaporation reactions of Zn and Pb in EAF dust[J]. Materials Transactions,2017,58(1):59 – 64.

[13] 张琦,张薇,王玉洁,等. 中国钢铁工业节能减排潜力及能效提升途径[J]. 钢铁,2019,54(2):7 – 14.
ZHANG Qi, ZHANG Wei, WANG Yujie, et al. Potential of energy saving and emission reduction and energy efficiency improvement of China's steel industry[J]. Iron & Steel,2019,54(2):7 – 14.

[14] 魏侦凯,郭瑞,谢全安. 日本环保炼铁工艺 COURSE50 新技术[J]. 华北理工大学学报(自然科学版),2018,40(3):26 – 30.
WEI Zhenkai, GUO Rui, XIE Quan'an. COURSE50 new technology of Japan's environmental ironmaking process [J]. Journal of North China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 40(3): 26 – 30.

[15] 王国栋. 钢铁行业技术创新和发展方向[J]. 钢铁,2015,50(9):1 – 10.
WANG Guodong. Technology innovation and development direction of iron and steel industry[J]. Iron & Steel, 2015,50(9):1 – 10.

[16] WANG P, LI J X, ZHOU L Y, et al. Theoretical and experimental investigation of oxygen blast furnace process with high injection of hydrogenous fuel[J]. Ironmaking & Steelmaking,2013,40(4):312 – 317.

[17] WANG J, WANG W, CHEN X H, et al. Investigation on the evolution of structure and strength of iron coke during carbonization: Carbon structure, pore structure, and carbonization mechanism[J]. Powder Technology,2024, 431:119059.

[18] QIU Shuxing. Influence of Fe_2O_3 on the properties and structure of iron coke. ACS omega 8. 35 (2023):31946 – 31953.

[19] AHMED, HESHAM M, NURNI VISWANATHAN. Composite pellets-a potential raw material for iron-making. steel research international 85. 3 (2014):293 – 306.

[20] KOWITWARANGKUL P, BABICH A, SENK D. Reduction behavior of self-reducing pellet (SRP) for low height blast furnace[J]. Steel Research International, 2014,85(11):1501 – 1509.

[21] NOMURA S, TERASHIMA H, SATO E, et al. Some fundamental aspects of highly reactive iron coke production[J]. ISIJ International, 2007, 47(6): 823 – 830.

[22] HU J G, ZHOU W T, GUO Y L, et al. Development of New Burden Materials for Blast Furnace Aiming at CO_2 Emission Reduction in Japan[J]. World Iron & Steel, 2011,11(3):1 – 4;21.

[23] KASAI A, MATSUI Y. Lowering of thermal reserve zone temperature in blast furnace by adjoining carbonaceous material and iron ore[J]. ISIJ International, 2004, 44(12):2073 – 2078.

[24] 王筱留. 钢铁冶金学(炼铁部分)[M]. 北京:冶金工业出版社,2011,198 – 200.
WANG Xiaoliu. Steel metallurgy (ironmaking volume [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2 011, 198 – 200.

[25] NAITO, MASAAKI. Improvement of blast furnace reaction efficiency by the temperature control of thermal reserve zone. Shinnittetsu Giho 384 (2006):95.

[26] 成兰伯. 高炉炼铁工艺及计算[M]. 北京:冶金工业出版社,1991:456.
CHENG Lanbo. Blast furnace ironmaking process and calculation[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1991:456.

[27] UJISAWA, YUTAKA. Subjects for achievement of blast furnace operation with low reducing agent rate. ISIJ international 45. 10 (2005):1379 – 1385.

[28] NOMURA S, HIGUCHI K, KUNITOMO K, et al. Reaction behavior of formed coke and its effect on degreasing thermal reserve zone temperature in blast furnace[J]. ISIJ International,2010,50(10):1388 – 1395.

[29] JIAN W, XIANFENG L, BIN W, et al. Emission characteristics of volatile organic compounds during a typical top-charging coking process[J]. Environmental pollution,2022,308:119648 – 119648.

[30] NOMURA S, MATSUZAKI S, NAITO M, et al. Improvement in blast furnace reaction efficiency through the use of catalyst-doped highly reactive coke[J]. Nippon

Steel Technical Report,2006(94):109 – 114.

[31] NOMURA S, NAITO M, YAMAGUCHI K. Post-reaction strength of catalyst-added highly reactive coke[J]. ISIJ International,2007,47(6):831 – 839.

[32] 任华伟. 高反应性高强度铁焦的制备及性能研究[D]. 东北大学,2019.
REN Huawei. Research on the preparation and properties of high reactivity and high strength Ferro-coke[D]. Shenyang:Northeastern University,2019.

[33] 史世庄,董晴雯,毕学工,等. 炼焦工艺条件对铁焦性能影响的试验[J]. 钢铁,2015,50(4):8 – 12.
SHI Shizhuang, DONG Qingwen, BI Xuegong, et al. Experiment of coking process conditions on iron-coke properties[J]. Iron & Steel,2015,50(4):8 – 12.

[34] 史世庄,林志龙,毕学工,等. 炼焦煤性质对铁焦性能影响的试验研究[J]. 太原理工大学学报,2015,46(3):283 – 287.
SHI Shizhuang, LIN Zhilong, BI Xuegong, et al. Experimental research of effect of coking coal quality on iron coke performance[J]. Journal of Taiyuan University of Technology,2015,46(3):283 – 287.

[35] SURESH A,PANDA A,DOMINIC M,et al. Utilisation of low-grade raw materials for preparation of reactive catalysed-coke for blast furnace application[J]. Ironmaking & Steelmaking,2019,46(5):491 – 497.

[36] ÖKVIST, LENA SUNDQVIST. Impact of activated nut coke on energy efficiency in the blast furnace. AISTech Proc 1(2014):663 – 672.

[37] NOMURA S, MATSUZAKI S, NAITO M, et al. Improvement in blast furnace reaction efficiency through the use of catalyst-doped highly reactive coke[J]. Nippon Steel Technical Report,2006(94):109 – 114.

[38] WANG H T,ZHAO W,CHU M S,et al. Effects of coal and iron ore blending on metallurgical properties of iron coke hot briquette[J]. Powder Technology,2018,328:318 – 328.

[39] WANG H T, CHU M S, ZHAO W, et al. Fundamental research on iron coke hot briquette-A new type burden used in blast furnace[J]. Ironmaking and Steelmaking,2016,43(8):571 – 580.

[40] WANG Hongtao, CHU Mansheng, ZHAO Wei, et al. Effect of process parameters on the compressive strength of iron coke hot briquette[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2016,37(6):810 – 814.

[41] ANYASHIKI T,FUKADA K,FUJIMOTO H. Development of carbon iron composite process[J]. JFE Technical Report,2009(13):1 – 6.

[42] HIGUCHI Kenichi, YOKOYAMA Hirokazu, SATO Hiroyuki, et al. Development of rapid curing process of reactive coke agglomerate[J]. ISIJ International,2017,57(1):55 – 61.

[43] 王宏涛,储满生,应自伟,等. 铁焦新型碳铁复合炉料研发现状[J]. 烧结球团,2017,42(4):44 – 53.
WANG Hongtao, CHU Mansheng, YING Ziwei, et al. Research status of iron-coke as a new carbon-iron composite burden[J]. Sintering and Pelletizing,2017,42(4):44 – 53.

[44] LI K J,KHANNA R,ZHANG J L,et al. The evolution of structural order, microstructure and mineral matter of metallurgical coke in a blast furnace:A review[J]. Fuel,2014,133:194 – 215.

[45] GUPTA S,SAHAJWALLA V,CHAUBAL P,et al. Carbon structure of coke at high temperatures and its influence on coke fines in blast furnace dust[J]. Metallurgical and Materials Transactions B,2005,36(3):385 – 394.

[46] XING X, ZHANG G Q, ROGERS H, et al. Effects of annealing on microstructure and microstrength of metallurgical coke[J]. Metallurgical and Materials Transactions B,2014,45(1):106 – 112.

[47] 鲍继伟,储满生,柳政根,等. 铁焦制备与高炉应用的研究进展[J]. 钢铁,2020,55(8):38 – 48.
BAO Jiwei, CHU Mansheng, LIU Zhenggen, et al. Research progress on preparation and application of iron coke in blast furnace[J]. Iron & Steel,2020,55(8):38 – 48.

[48] MOUSA E A,BABICH A,SENK D. Effect of nut coke-sinter mixture on the blast furnace performance[J]. ISIJ International,2011,51(3):350 – 358.

[49] 毕学工,马毅瑞,李鹏,等. 混装铁焦对人造富矿还原行为的影响[J]. 钢铁,2014,49(11):9 – 13.
BI Xuegong,MA Yirui,LI Peng,et al. Effect of iron coke mixed charging on agglomerates reduction behavior[J]. Iron & Steel,2014,49(11):9 – 13.

[50] 王宏涛,储满生,鲍继伟,等. 碳铁复合低碳炼铁炉料制备与应用研究[J]. 钢铁研究学报,2019,31(2):103 – 111.
WANG Hongtao, CHU Mansheng, BAO Jiwei, et al. Research on preparation and application for a new burden

of iron-carbon agglomerate for low carbon blast furnace ironmaking[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2019,31(2):103 – 111.

[51] WANG H T, CHU M S, BAO J W, et al. Non-isothermal reduction process analysis of iron-bearing burden with charging iron coke hot briquette under simulated blast furnace conditions[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2022,5(5):741 – 750.

[52] WANG J, WANG W, CHEN X H, et al. Role of iron ore in enhancing gasification of iron coke: Structural evolution, influence mechanism and kinetic analysis[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2025,32(1):58 – 69.

[53] ZHU K, CHEN Z M, YE S X, et al. Gasification of iron coke and cogasification behavior of iron coke and coke under simulated hydrogen-rich blast furnace condition [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2022,29(10):1839 – 1850.

[54] ZHU K, CHEN Z M, YE S X, et al. Gasification of iron coke and cogasification behavior of iron coke and coke under simulated hydrogen-rich blast furnace condition [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2022,29(10):1839 – 1850.

[55] 武校章,张淑会,兰臣臣,等. 铁焦性能的影响因素及富氢高炉使用铁焦的探讨[J]. 中国冶金,2024,34(5):11 – 20.
WU Xiaozhang, ZHANG Shuhui, LAN Chenchen, et al. Influence factors of iron coke properties and discussion on use of iron coke in hydrogen-rich blast furnace[J]. China Metallurgy, 2024,34(5):11 – 20.

[56] WU W H, XIAO Y Y, ZHANG Y W, et al. Burden melting-dripping behavior and iron-coke strength variation under simulated operation of hydrogen-rich blast furnace [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024,49: 1059 – 1069.

[57] XIAO Y Y, ZHU K, YE S X, et al. Hydrogen on softening-melting and slag forming behavior under the operation of blast furnace with iron coke charging[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022,47(73): 31129 – 31139.

[58] 程向明,毕学工,史世庄,等. 铁焦与铁矿石混装对高炉初渣形成的影响[J]. 钢铁,2014,49(8):9 – 14.
CHENG Xiangming, BI Xuegong, SHI Shizhuang, et al. Effect of ferro-coke and iron ores mixing charging on primary slag formation in blast furnace[J]. Iron & Steel, 2014,49(8):9 – 14.

[59] 肖宇阳. 富氢耦合铁焦对炼铁炉料熔滴和还原行为的影响研究[D]. 上海:上海大学,2023.
XIAO Yuyang. Research of the effect of hydrogen-rich coupled iron coke on the smelting-dripping and reduction behavior of ironmaking burden[D]. Shanghai: Shanghai University, 2023.

[60] 王宏涛,储满生,赵伟,等. 热压铁焦对高炉综合炉料熔滴性能的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版),2016,37(8):1108 – 1112.
WANG Hongtao, CHU Mansheng, ZHAO Wei, et al. Effect of iron coke hot briquette on softening-melting and dripping properties of blast furnace mixed burden[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016,37(8):1108 – 1112.

[61] 鲍继伟,储满生,唐珏,等. 铁焦添加量和装料方式对高炉综合炉料熔滴性能的影响[J]. 钢铁,2024,59(7):9 – 26.
BAO Jiwei, CHU Mansheng, TANG Jue, et al. Influence of addition amount and charging method of iron coke on softening-melting-dropping properties of blast furnace mixed burdens[J]. Iron & Steel, 2024,59(7):9 – 26.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据电子出版社、重庆维普资讯有限公司、超星学术期刊“域出版”、学术中国 – 知识产权服务平台等第三方平台在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵，不再另行支付)，对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明，如有异议请来稿说明，本刊将作适当处理。