

焦炭反应性指标在炼铁工艺中的指导意义及应用展望

周文艳

山西焦化股份有限公司 山西 临汾 041606

摘要: 焦炭作为高炉炼铁的核心原料,其质量性能直接决定了高炉冶炼的效率、能耗与稳定性。在众多焦炭质量评价指标中,焦炭反应性(CRI)及其反应后强度(CSR)因其能有效表征焦炭在高炉内高温还原性气氛下的劣化行为,已成为现代高炉操作与焦炭质量管理的关键控制参数。本文系统阐述了焦炭反应性指标(CRI/CSR)的定义、测试原理及其物理化学内涵;深入剖析了CRI/CSR对高炉内热状态、料柱透气性、煤气流分布及最终铁水质量的影响机制;全面梳理了该指标在高炉操作优化、配煤炼焦、焦炭采购与质量控制等环节的具体应用实践;并在此基础上,探讨了当前CRI/CSR指标体系存在的局限性,展望了未来焦炭质量评价向多尺度、动态化、智能化方向发展的趋势,旨在为提升我国炼铁工业的绿色、高效、智能化水平提供理论参考与技术支撑。

关键词: 焦炭反应性; CRI; CSR; 高炉炼铁; 配煤炼焦; 质量控制; 应用展望

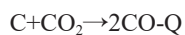
引言

高炉炼铁是钢铁工业基石,核心是将氧化铁还原为金属铁。焦炭在此过程中作用关键,既是燃料、结构材料,也是还原剂,其质量影响高炉运行。传统焦炭质量评价依赖工业、元素分析及机械强度指标,但这些多反映常温或非还原性气氛下的静态性质,无法准确预测其高炉内高温、强还原性气氛下的实际行为,如优良机械强度的焦炭也可能因与CO₂反应而粉化,引发事故。为此,国际上自20世纪70年代起推广焦炭反应性指标(CRI)和反应后强度(CSR),该指标模拟高炉内反应过程,评估焦炭化学稳定性和结构完整性,已被全球主流钢铁企业采纳,成为衡量焦炭冶金性能的“金标准”。在我国,高炉发展趋势及“双碳”目标对焦炭质量提出更高要求,深入理解和应用CRI/CSR指标意义重大,本文将梳理其理论基础、指导作用、应用场景及未来发展。

1 焦炭反应性指标(CRI/CSR)的内涵与测试方法

1.1 定义与物理化学基础

焦炭反应性(CRI)是指焦炭在高温下与二氧化碳(CO₂)发生气化反应的能力。其反应方程式为:



这是一个强烈的吸热反应。CRI值越高,表明焦炭越容易与CO₂反应,其高炉内的化学稳定性越差。焦炭反应后强度(CSR)则是指焦炭在经历上述高温反应后,其剩余焦块抵抗破碎和磨损的能力。CSR值越高,说明焦炭在反应后的骨架强度保持得越好,对维持高炉料柱的透气性越有利。从微观机理上看,焦炭与CO₂的反应并非均匀进行,而是优先发生在焦炭的活性位点,如边缘碳原

子、缺陷、微孔壁以及矿物质催化位点上^[1]。反应会不断侵蚀焦炭基质,扩大原有气孔,形成新的裂纹,最终导致焦炭结构疏松、强度下降。因此,CRI/CSR综合反映了焦炭的化学组成(特别是矿物质的种类与含量)、显微结构(气孔率、气孔壁厚度、各向异性程度)以及宏观力学性能在高温还原性环境下的协同演化规律。

1.2 标准测试方法(以ISO 18894:2006为例)

目前,国际上最通用的CRI/CSR测试方法遵循ISO 18894标准,其流程严谨且可重复性强,主要包括以下步骤:

试样制备: 选取粒度为20-25mm的焦炭试样(通常为200g),在170±10℃下干燥至恒重。

反应阶段: 将试样装入耐高温反应器中,通入惰性气体(N₂)驱除空气后,升温至1100±5℃。随后,切换为纯净的CO₂气体,以5L/min的流量通入2小时。在此期间,焦炭与CO₂发生反应,失重。

CRI计算: 反应结束后,冷却称重。CRI按以下公式计算:

$$CRI(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

其中,m₁为反应前焦炭质量,m₂为反应后焦炭质量。

转鼓试验: 将反应后的焦炭装入I型转鼓(直径130mm,长700mm),以20转/分钟的速度旋转600转。

CSR计算: 转鼓试验后,用10mm筛子筛分,称量大于10mm的焦炭质量(m₃)。CSR按以下公式计算:

$$CSR(\%) = \frac{m_3}{m_1} \times 100$$

该方法通过标准化的条件,有效地排除了外部干扰因素,使得不同来源焦炭的CRI/CSR值具有可比性,为焦

炭质量的客观评价奠定了基础。

2 CRI/CSR 对高炉冶炼过程的影响机制

2.1 对高炉热状态的影响

焦炭与 CO_2 的反应是高炉内最重要的吸热反应之一，主要发生在高炉的软熔带及以下区域（温度约900-1100℃）。CRI值高的焦炭意味着在此区域会发生更剧烈的吸热反应，大量消耗炉缸的热量。这不仅会降低炉缸的理论燃烧温度，削弱焦炭的支撑作用，还可能导致炉缸凉，影响渣铁的过热和流动性，增加燃料比^[2]。反之，低CRI的焦炭有助于维持高炉下部稳定的热状态，保证充足的热量用于铁水的熔化和过热。

2.2 对料柱透气性与煤气流分布的影响

这是CRI/CSR影响高炉顺行最核心的方面。高炉料柱的透气性是煤气上升、炉料下降的动力学基础。CSR值直接反映了焦炭在高炉中下部高温区抵抗粉化的能力。高CSR的焦炭能够有效维持软熔带焦窗的开放性和滴落带焦炭床层的空隙度，确保煤气流顺畅通过。一旦CSR过低，焦炭在反应后强度急剧下降，极易在料柱压力和铁水冲刷下破碎成粉末，堵塞焦窗和空隙，导致料柱压差急剧升高，煤气流分布紊乱，甚至引发管道行程、悬料等恶性事故，迫使高炉减风甚至休风，严重影响生产效率。

2.3 对铁水质量和高炉寿命的影响

焦炭粉化产生的细粉会被高速上升的煤气流携带至上部，参与间接还原，但更多会进入炉尘，造成资源浪费。更为严重的是，这些粉末会恶化炉料的还原性和软熔性能。此外，为了应对因焦炭劣化导致的透气性问题，操作者往往被迫采取发展边缘气流的操作制度，这会加剧炉墙的侵蚀，缩短高炉寿命。同时，不稳定的热状态和炉况也会影响脱硫等精炼反应的进行，从而对最终铁水的硫、硅等成分控制造成不利影响。

3 CRI/CSR 在炼铁工艺中的具体应用

3.1 高炉操作制度的制定与优化

高炉操作者将入炉焦炭的CRI/CSR值作为制定送风制度、装料制度和热制度的重要依据。（1）送风制度：对于CRI较高的焦炭，可能需要适当提高风温或富氧率，以补偿其在炉内过度吸热造成的热量损失。（2）装料制度：若焦炭CSR偏低，操作上需更加注重中心煤气流的稳定，避免过度发展边缘气流，以防焦炭床层过早劣化。有时会采用“平台+漏斗”等布料模式，利用矿石对中心焦炭的保护作用。（3）炉料结构：当优质低CRI/CSR焦炭资源紧张时，可通过调整烧结矿、球团矿的比例和性能，或使用部分型焦、兰炭等替代品，来弥补焦炭性能的不足，但这需要精确的炉料耦合模型支持。

3.2 配煤炼焦的核心指导原则

对于焦化厂而言，CRI/CSR是配煤方案设计的终极目标。炼焦配煤是一个复杂的系统工程，涉及多种单种煤（气煤、肥煤、焦煤、瘦煤等）的合理搭配。（1）煤质选择：研究表明，煤的镜质组反射率、惰质组含量、矿物质（特别是碱金属K、Na和碱土金属Ca、Mg）含量是影响焦炭CRI/CSR的关键因素。通常，选用低灰、低硫、镜质组反射率适中、矿物质含量少且催化活性低的主焦煤，是生产低CRI、高CSR焦炭的基础。（2）配煤模型：现代焦化厂普遍建立了基于大数据和机器学习的配煤优化模型。这些模型以历史生产数据为基础，输入各单种煤的工业分析、岩相分析等数据，预测所配混合煤炼出的焦炭CRI/CSR值，从而快速筛选出最优配比，在保证焦炭质量的前提下，最大限度地使用价格低廉的弱粘结性煤或非炼焦煤，降低配煤成本^[3]。（3）炼焦工艺调控：除了配煤，炼焦过程中的装煤堆密度、结焦时间、火落温度等工艺参数也会显著影响焦炭的显微结构，进而影响CRI/CSR。例如，干法熄焦（CDQ）相比湿法熄焦（WDQ），能更好地保留焦炭的高温强度，通常可使CSR提高3-8个百分点。

3.3 焦炭采购与供应链管理

对于大型钢铁联合企业，焦炭往往是外购的重要大宗原料。CRI/CSR指标为焦炭的定价、验收和供应商管理提供了客观、量化的标准。（1）合同签订：在焦炭采购合同中，CRI/CSR通常与灰分、硫分、机械强度等指标一同作为核心质量条款，并与价格挂钩。例如，设定 $\text{CRI} \leq 25\%$ ， $\text{CSR} \geq 65\%$ 为基准，超出或优于该范围则有相应的奖惩条款。（2）质量验收：进厂焦炭必须严格按照标准方法检测CRI/CSR，作为结算和质量追溯的依据。这促使焦化厂不断提升自身技术水平，以满足钢厂的严苛要求。（3）供应商评价：长期跟踪各供应商焦炭的CRI/CSR稳定性，可以构建供应商绩效评价体系，优化采购策略，保障供应链安全。

4 当前挑战与未来应用展望

4.1 现有指标体系的局限性

一是静态与简化的模拟：ISO标准测试是在静态、恒温、纯 CO_2 气氛下进行的，而高炉内是动态、变温、多组分（ CO 、 H_2 、 H_2O 、碱金属蒸气等）的复杂环境。特别是氢气（ H_2 ）在高炉内的比例日益增加（如喷吹天然气、富氢冶炼），而焦炭与 H_2O 的反应（ $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$ ）动力学与 $\text{C}-\text{CO}_2$ 反应不同，现有CRI/CSR无法反映焦炭在富氢环境下的行为。二是忽略碱金属催化作用：高炉内循环富集的碱金属（K、Na）对焦炭气化反应有极强

的催化作用,能显著加速焦炭劣化。标准测试未考虑此因素,导致实验室结果与高炉实际表现存在偏差。三是单一尺度评价:CRI/CSR是一个宏观的整体性指标,无法揭示焦炭劣化的微观机理和空间分布特征,难以指导焦炭微观结构的精准设计。

4.2 未来发展方向与展望

为克服上述挑战,焦炭质量评价体系正朝着更精准、更智能、更全面的方向演进。

4.2.1 开发新型动态/多气氛反应性评价方法

研究者正在探索能模拟高炉真实气氛(如CO/CO₂/H₂/H₂O混合气)和温度梯度的动态反应性测试装置。例如,热重-质谱联用(TG-MS)技术可以在程序升温条件下,实时监测焦炭在不同气氛中的失重速率和气体产物,获得更丰富的动力学信息。建立“富氢CRI”、“碱金属催化CRI”等新指标,将是未来的重要方向。

4.2.2 多尺度表征与机理研究

结合先进的表征手段,如X射线计算机断层扫描(X-ray CT)、拉曼光谱、扫描电镜-能谱(SEM-EDS)等,可以从纳米、微米到宏观尺度,全方位解析焦炭在反应过程中的结构演变、矿物质迁移和催化作用机制。这种“从里到外”的理解,将为设计新一代高性能焦炭提供理论基础。

4.2.3 人工智能驱动的智能预测与优化

随着工业互联网和数字孪生技术的发展,未来可以构建覆盖“煤-焦-铁”全流程的智能系统。该系统能够整合地质勘探数据、洗煤数据、配煤数据、炼焦工艺数据、高炉操作数据等海量信息,利用深度学习等AI算法,建立高精度的CRI/CSR预测模型,甚至直接预测焦炭在特定高炉工况下的服役寿命^[4]。这将实现从“经验配煤”到“数字配煤”、从“被动适应”到“主动设计”的根本性转变。

4.2.4 面向低碳冶金的焦炭新要求

在“双碳”背景下,高炉富氢冶炼、氢基直接还原铁(DRI)等新技术快速发展。虽然短期内高炉仍是主流,但对焦炭的要求也在变化。未来的焦炭不仅要满足传统高炉的需求,还可能需要具备更高的反应活性(以促进H₂的利用)或作为DRI工艺中的补充碳源。CRI/CSR指标体系也需要与时俱进,发展出能适应这些新场景的评价维度。

5 结语

焦炭反应性指标(CRI)和反应后强度(CSR)作为连接焦化与炼铁两大工序的关键桥梁,深刻揭示了焦炭在高炉内高温还原性环境下的劣化本质。其科学内涵在于综合反映了焦炭的化学稳定性与高温结构强度,对高炉的热状态、透气性、顺行状况及技术经济指标具有决定性的指导意义。在实践中,CRI/CSR已成功应用于高炉操作优化、配煤炼焦指导和焦炭供应链管理,成为现代钢铁企业精细化管理和降本增效的核心工具。然而,面对高炉冶炼环境日益复杂化和钢铁工业绿色低碳转型的新要求,传统的CRI/CSR评价体系亟待革新。未来的研究与发展应聚焦于构建更贴近高炉真实工况的动态、多因素反应性评价方法,深化焦炭劣化的多尺度机理认知,并深度融合人工智能与大数据技术,打造智能化的焦炭质量预测与优化平台。

参考文献

- [1]范鸡鸣,刘保华,曾仁福,等.焦炭反应性和反应后强度对硅锰矿热炉炉况影响的研究与应用[J].甘肃冶金,2024,46(06):67-69.
- [2]王越,庞克亮,马银华,等.不同焦炭光学组织的气化反应性分析[J].煤质技术,2024,39(01):47-53.
- [3]靳进.铁矿石与焦炭耦合气-固反应动力学及其热性能表征指标研究[D].辽宁科技大学,2023.
- [4]段汝元,侯瑞芳,陈旭辉,等.炼焦煤的化学结构对焦炭质量的影响[J].洁净煤技术,2025,31(S1):180-187.