DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20200203

关于高炉炉缸长寿的关键问题解析

焦克新[1,2], 张建良[1,2], 刘征建[1,2], 杨天钧[1,2]

(1. 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083;
2. 北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 高炉长寿化是大型高炉发展的必然趋势,实现高炉长寿的关键在于弄清高炉侵蚀的根本原因。从高炉炉缸侵蚀机理、高炉炉缸象脚型侵蚀原因、高炉炉缸圆周方向侵蚀不均匀性、高炉冷却强度与冷却效率以及高炉炉缸维护技术等 5 个方面探讨了高炉长寿存在的共性问题,指出高炉炉缸炭砖损毁的本质是碳不饱和铁水对炭砖的溶蚀。具体结果表明,首先,高炉炉缸象脚型侵蚀最严重部位位于高炉炉缸死料柱的根部位置;其次,阐明了直接导致高炉存在不均匀侵蚀的主要原因在于冷却系统的冷却水量和送风系统的风量在高炉周向方向分配不均匀;然后,阐明了冷却系统的作用本质是降低耐火材料热面温度,并提出了高炉冷却强度指数及高炉冷却效率指数;最后,分析了采用无钛矿护炉和钛矿护炉两种模式的高炉炉缸维护技术。

关键词: 高炉长寿; 炉缸; 冷却强度; 象脚型侵蚀; 护炉

文献标志码: A **文章编号**: 0449-749X(2020)08-0193-06

Analysis of key issues on longevity of blast furnace hearth

JIAO Ke-xin[1,2], ZHANG Jian-liang[1,2], LIU Zheng-jian[1,2], YANG Tian-jun[1,2]

(1. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Longevity of blast fornace is an inevitable trend of developing of large blast furnace. The key lies in the long life of a blast furnace is to find out the basic reason for blast furnace corrosion. Aiming at the issue, the common problems of blast furnace longevity from five aspects were discussed: The essence of blast furnace hearth erosion, the mechanism of "elephant-like erosion" in blast furnace hearth, the inhomogeneity of erosion in the circumferential direction of blast furnace hearth, the analysis of blast furnace cooling intensity and efficiency, and the maintenance technology of blast furnace. As a result, it was pointed out that the nature of carbon brick damage in the blast furnace hearth is the corrosion of carbon brick by carbon-unsaturated hot metal. The details are as follows: Firstly, the most serious part of "elephant-like erosion" was located at the root of dead stock columns. Secondly, it clarified that the main reason for the inhomogeneity of erosion was the uneven distribution of cooling water and air volume of blast system in the circumferential direction of blast furnace. Thirdly, the actual function of the cooling system was illustrated, which was to lower the hot surface temperature of refractory. Additionally, the cooling strength index and cooling efficiency index of blast furnace were proposed. At last, the maintenance technology of blast furnace hearth was explored by using two modes: titanite-free furnace protection and titanite furnace protection.

Key words: blast furnace longevity; hearth; cooling strength; elephant-like erosion; furnace protection

高炉作为目前世界上最大的单体反应器,在钢铁生产工艺流程中占据着核心地位。随着高炉不断地向大型化方向发展,实现高炉长寿显得尤为重要。高炉是一个密闭的黑箱,内部发生着复杂多变的物理化学变化,高炉内部的状况很难通过直接的手段观察到,只能通过高炉外部检测到的数据进行分析,给高炉长寿的研究带来了很大的困难。尤其是近些年发生了多起高炉炉缸烧穿事故,以及高炉炉缸侧壁温度异常升高的现象,使得高炉炉缸寿命的研究成为热点问题[1-2]。

作为高炉长寿的限制性环节——高炉炉缸部位,有些学者从高炉炉缸设计的角度展开研究,通过

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51704019)
作者简介: 焦克新(1988—), 男, 博士, 副教授; **E-mail**: jiaokexin_ustb@126.com;
通讯作者: 张建良(1965—), 男, 博士, 教授; **E-mail**: jl.zhang@ustb.edu.cn;
收稿日期: 2020-04-15

对高炉炉缸内型选定、死铁层深度、炉缸冷却设备、炉缸冷却水系统设计及耐火材料配置等方面进行分析，阐述高炉长寿的设计重在建立合理的炉缸传热体系[3-4]。有些学者从高炉生产操作的角度分析了高炉生产方面的作业措施，指出保持原燃料质量稳定、控制入炉有害元素质量分数、长期合适的送风制度、稳定的炮泥质量及炉前合理的作业方针是实现高炉长寿目标的根本[5-6]。有些学者从高炉炉缸侵蚀机理的角度阐述了铁水渗透、铁水环流冲刷、炭砖热应力、有害元素侵蚀、炉缸漏水等是高炉炉缸短寿的原因所在[7]。也有学者基于对多座高炉长寿技术应用状况和高炉炉缸破损调查，从设计、操作、维护等多方面分析了炉缸破损原因并提出了控制对策[8-10]。此外，也有炼铁科技工作者从生产管理的角度出发，分析了强化高炉日常管理、完善高炉炉缸监控管理等措施的重要性[11]。

总体而言，高炉长寿技术是一项综合技术[12]，影响长寿的因素复杂，目前炼铁科技工作者针对高炉炉缸已经从多维度进行了分析研究，然而在高炉实际生产中仍然存在不少问题，并且很多问题存在共性，因此，有必要从高炉生产中面临的主要问题的角度出发，从本质上对影响寿命的共性问题进行深入分析，弄清其根本原因，从而为生产实践提供借鉴。

1 高炉炉缸侵蚀本质分析

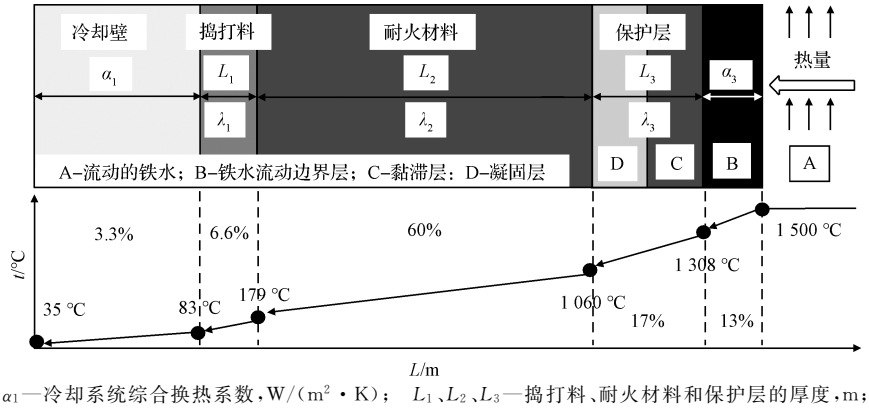
目前世界上有多座高炉实现了 20 年以上的寿命，中国在高炉长寿技术方面也取得了长足的进步，部分高炉寿命达到国际先进水平，多座高炉实现了 15 年以上的寿命[13]。对于不同的长寿高炉，炉缸设计结构及操作条件均各不相同。无论是全炭砖炉缸内衬结构还是炭砖结合陶瓷杯内衬结构，均有高炉长寿的案例，也均有高炉短寿的现象。

高炉炉缸炭砖损毁的本质是碳不饱和铁水对炭砖的溶蚀，见式(1)，炭砖中的碳质组元在高温条件下可以与铁发生反应，渗透到铁液中。高炉炉缸中的铁水是碳不饱和的，尤其是在高冶炼强度和高炉炉缸不活跃的情况下，由于铁水渗碳动力学条件不足，碳不饱和程度可以达到 10%以上。而炭砖的抗铁水溶蚀能力较弱，试验表明，炭砖在 1 500 ℃下，铁水碳质量分数为 4.5%时，炭砖的溶蚀速率为 0.96 mm/h[14]。对于厚度为 1 m 的炭砖，全部侵蚀完仅需要 43 天。并且铁水中碳质量分数越低，铁水欠饱和度越高，炭砖侵蚀速率越大。

$$C=[C]$$

$$\Delta G^{\theta} = 22\ 590 - 42.26T \tag{1}$$

高炉炉缸长寿的根本是保障炉缸炭砖不被铁水进一步侵蚀，传热学基础理论可以很好的诠释，如图 1 所示。高炉炉缸只有保障合理的传热体系，使得炭砖热面温度低于高炉炉缸保护层的形成温度，炭砖的侵蚀才能得到有效抑制。由图 1 中传热学计算结果也可看出，炭砖热面的铁水环流热阻及保护层热阻占体系总热阻的 30%，而冷却系统热阻仅占 3.3%，高炉炉缸内部状况对传热的影响潜力要远远大于冷却系统的影响潜力，对高炉炉缸侵蚀状况的调控应重点从炉内着手。因此，从高炉炉缸侵蚀本质的角度分析，最大化地降低炭砖热面温度，提高铁水的碳饱和程度是实现高炉长寿的主要技术方向，如降低铁水环流强度、降低炉缸传热体系热阻、增大冷却强度等均有利于降低炭砖热面温度。提高入炉铁矿的还原性，降低焦炭中灰分质量分数、提高炉缸热状态等均有利于提高铁水渗碳能力，提高铁水的碳饱和程度。



α_1—冷却系统综合换热系数，W/(m² · K)； L_1、L_2、L_3—捣打料、耐火材料和保护层的厚度，m；
λ_1、λ_2、λ_3—捣打料、耐火材料和保护层的导热系数，W/(m² · K)； α_2—铁水对流换热系数，W/(m² · K)。

图 1 高炉炉缸传热系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of heat transfer system in blast furnace hearth

2　高炉炉缸象脚型侵蚀原因分析

高炉炉缸侵蚀形貌主要有象脚型、宽脸型和锅底型，其中以象脚型侵蚀最为普遍[15]，高炉炉缸炉底交界部位的象脚型侵蚀也是高炉炉缸侧壁温度升高的主要共性现象。近年来，不少高炉炉缸侵蚀最为严重的部位在高度方向上具有明显的共性特征，均位于铁口中心线以下 1～2 m 的部位，随着高炉容积及高炉操作条件和原燃料条件的不同而略有差异[16]。

高炉解剖研究表明[17]，高炉炉缸中存在死料柱，某高炉炉缸中心的死焦堆的孔隙率为 30％左右，炉缸边缘死焦堆的孔隙率为 45％左右，耐火材料与炉缸死焦堆之间存在空焦区空间，约占炉缸直径的 20％，如图 2 所示。高炉入炉焦炭的平均直径为 52 mm；进入到铁口中心线处焦炭的平均直径为 34 mm，铁口中心线以下约 2 m 位置处焦炭的平均直径为 32 mm。因此高炉焦炭从入炉到铁口中心线部位的消耗量占高炉消耗焦炭总量的 72.1％；高炉炉缸铁水渗碳对焦炭的消耗量约占焦炭总量的 4.6％，其余 23.3％将再次受挤压向上漂浮至风口回旋区燃烧消耗。高炉炉缸死料柱中的焦炭既受到上部料柱和热风的压力，又受到铁水和炉渣的浮力，当死料柱沉坐在高炉炉缸中时，死料柱总体呈现圆锥形，当死料柱漂浮于炉缸中时，其在高炉炉缸中呈现的形貌主要为上部正锥形和下部倒锥形的结合。由流体力学可知，在死料柱根部，即正锥形和倒锥形交界处，空间最为狭小，铁水环流速度最大，铁水对流换热系数最高。因此，该部位对应的耐火材料热面温度最高，保护层最不易形成，炭砖最容易被侵蚀，造成该部位侵蚀最为严重。尤其是在高炉冶炼强度大、高炉炉缸中心料柱透气透液性较差的条件下，侵蚀更加剧烈，这是造成炉缸象脚型侵蚀的根本原因。因此，象脚型的形成并非是由铁水环流冲刷所致，而是由铁水在狭小空间流速增大，换热能力增强，温度升高导致侵蚀速率增大所致。从高炉炉缸象脚型侵蚀机理的角度分析，最大化地降低该部位的铁水环流强度、减小死料柱的肥大是缓解耐火材料侵蚀的主要技术方向，如提高焦炭质量以增大死料柱的透气透液性、增大鼓风动能和铁口深度以减小死料柱的体积、适当增加死铁层深度浮起死料柱、增大铁水黏度、平衡合理的冶炼强度等均为有效的技术手段。

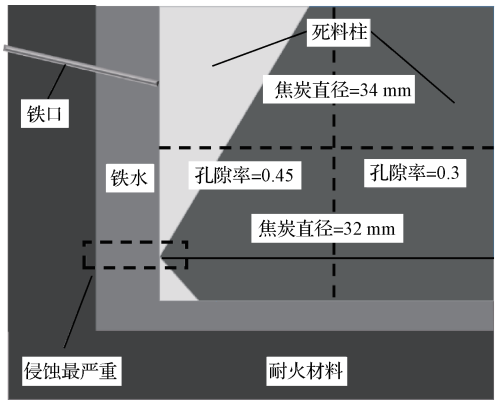


图 2　高炉炉缸死料柱状态及侵蚀示意图

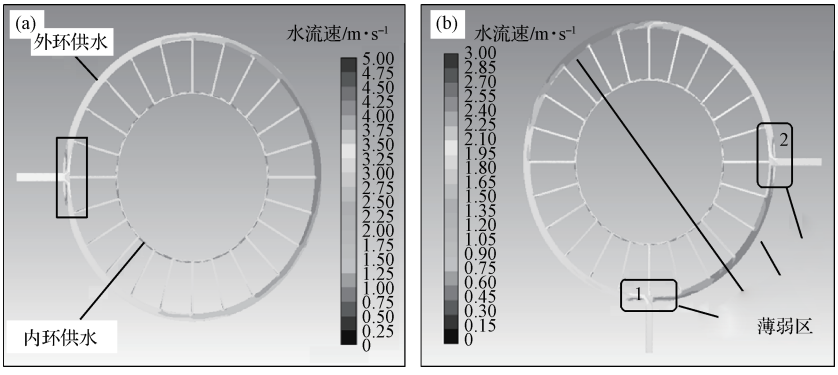
Fig. 2　Schematic diagram of deadman state and erosion of blast furnace hearth

3　高炉炉缸圆周方向侵蚀不均匀性分析

数十座高炉破损调查结果表明，高炉炉缸侵蚀程度不仅在高度方向上存在明显的差异，在周向方向上也存在明显的不均匀性。高度方向上，铁口中心线以下 1～2 m 部位，该高度部位环周位置侵蚀相对其他高度部位更为严重，不仅如此，周向的个别局部位置侵蚀尤其严重[18]。这也是高炉炉缸侧壁温度异常升高导致高炉被迫提前大修的限制性环节。

实际上，高炉设计工艺特点决定了高炉存在不均匀性。高炉上部的布料均匀状况、高炉下部的送风操作、渣铁排放操作以及冷却制度等均存在明显的不均匀性，直接导致了高炉内部物理化学反应的不均匀以及炉缸中死料柱存在偏移现象。炉墙远离死料柱，则对应位置侵蚀程度低，反之则侵蚀严重。鉴于布料制度和出铁制度的可操控特点强，则直接导致高炉存在不均匀侵蚀的主要原因在于冷却系统的冷却水量和送风系统的热风风量在高炉周向方向分配的不均匀性。以高炉冷却制度为例，高炉冷却从炉缸部位一串到顶，高炉冷却水总进水环管根据现场管路布置的便宜程度设置为单根或两根，在两根总环管的条件下，其角度也各不相同。数值模拟结果表明，无论是单根还是两根进水总管，冷却水量在并行水管的周向方向上分配存在严重的不均匀性，如图 3 所示。单根水管的情况下，在进水位置处水量最低，两根进水总管的情况下，在两根进水总管相间的位置及其对面的位置处水量最低，水量分配的不均匀程度可达到 40％以上。如果在水量较低

的条件下，因为水量分配不均导致高炉局部位置的冷却强度严重不足，大大降低了高炉炉缸的安全系数。一些高炉侵蚀最为严重、炉缸侧壁温度最高部位往往在冷却水管的进水位置处，正验证了这一点。目前很多高炉在监测方面重点关注热流强度的大小并可视化展示供高炉操作者参考，这是以高炉冷却水量分配均匀为前提，而实际冷却水量存在较大差异的情况下，利用水温差反应出的热流强度对炉缸安全状况进行监测存在较大的误区，容易引起误判。因此，从高炉炉缸圆周方向侵蚀不均匀性的角度分析，采取提高冷却水量分配的均匀度和送风系统的均匀性以及降低布料的偏析、均匀化出铁等手段是最大程度上避免炉缸周向侵蚀不均的根本措施。



1，2—进水口。

(a) 单根外环供水； (b) 两根外环供水。

图 3 高炉冷却水量分配均匀度数值模拟

Fig. 3 Numerical simulation of water distribution between BF cooling system

4 高炉冷却强度与冷却效率分析

水是最好的耐火材料。在高炉炉缸侧壁热电偶温度较高的情况下，一般通过增大冷却水量或降低冷却水温以提高冷却强度。而对于冷却系统而言，冷却水量、冷却水温差、热流强度、进水温度、水管排布等均是过程参数，是反映冷却系统的表象特征，与冷却强度不能等同。冷却系统的作用本质是降低耐火材料热面温度，形成合理的温度场梯度，保障耐火材料的安全[19]。因此，对于冷却强度的表征应该采用冷却器或耐火材料热面的最高温度。在高炉工况条件一致的条件下，能使得冷却壁和耐火材料热面温度降得更低的冷却强度是更大的。鉴于此，作者定义了高炉冷却强度指数，即理想状态条件下(冷却面积无限大)冷却壁热面最高温度与实际冷却条件下冷却壁热面最高温度的比值。高炉冷却效率指数为实际冷却水带走的热量与理想状态条件下(冷却面积无限大)冷却水带走的热量比值。计算结果表明，高炉冷却系统的冷却效率一般在 95% 以上，这也说明了采用冷却壁冷却的先进性。而不同冷却条件下高炉冷却系统的冷却强度却存在较大的波动幅度。高炉冷却强度随着水量的增大而增大，但当冷却水速大于 1.5 m/s 时，冷却强度几乎保持不变，继续增大水量对冷却强度的提高作用甚微。值得注意的是，因高炉冷却水量分配存在不均匀性，冷却水速应该由冷却系统在周向方向上匹配的最低冷却水速决定。当冷却壁的冷却比表面积为 0.7 时，冷却强度为 60%；而冷却壁的比表面积为 1.3 时，冷却系统的冷却强度可达到 96%。因此，提高冷却系统的冷却比表面积可大幅增加冷却强度的作用潜能。图 4 所示为不同工况条件下的高炉冷却系统的冷却强度和冷却效率。可见高炉冷却效率均在 90% 以上，水管结垢结垢层厚度为 2 mm 和水温升高均会降低冷却效率和冷却强度[20]。这也间接说明了，部分高炉通过提高水量以提高冷却强度，其根本原因在于进一步提高冷却水量，可以冲刷走沉积在冷却壁表面的水垢(软水条件下可能会形成腐蚀垢)，消除水垢同时降低水温可大幅提高冷却强度。此外，在喷淋的冷却条件下，冷却效率很高，而冷却强度较低，这也是冷却系统由传统的外部喷淋逐渐演变为冷却壁模式的根本原因，喷淋可以作为高炉炉役末期提高冷却强度的补充手段。

5 高炉炉缸维护技术分析

钛矿护炉是高炉炉役末期最常采用的护炉手段。当高炉炉缸侧壁温度升高，判定是因为炭砖侵

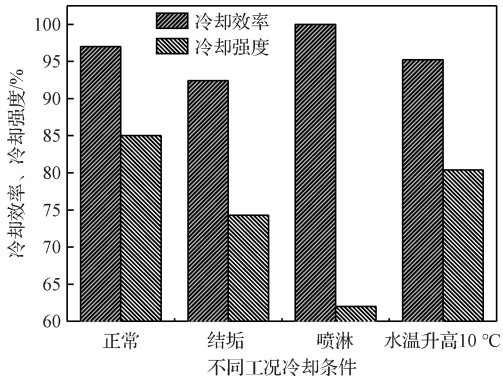


图 4　高炉不同工况下冷却效率和冷却强度

Fig. 4　Cooling efficiency and cooling intensity under different conditions of blast furnace

蚀而非串煤气等其他因素造成的情况下，向高炉中添加 TiO_2 从而形成高熔点的 Ti(C,N)[21]。钛负荷及铁水中钛质量分数控制往往难以定论，护炉也常出现达不到效果或者对炉底有效而炉缸侧壁无效的情况。

高炉正常生产时，通过控制铁水凝固线 1 150 ℃等温线形成凝铁层进而保障炭砖安全[22]。然后炭砖热面温度在传热体系热阻较小的条件下才能使得炭砖热面温度降低到 1 150 ℃以下，高炉炉缸保护层析出形式及类别见表 1。由表 1 可知，炭砖在传热体系中所占据的热阻最大，因此只有炭砖侵蚀到一定程度时才能形成凝铁层，难度相对较大；铁水中是含有一定质量分数的溶解碳，在炉缸耐火材料热面的边缘部位，温度相对较低，铁水中的碳可以析出石墨，从而富集在耐火材料热面保护炭砖，石墨碳析出温度一般为 1 250～1 350 ℃，大大降低了保护层形成的难度；在钛矿护炉情况下，Ti(C,N)从铁水中析出的温度一般为 1 400～1 450 ℃，进一步降低了保护层形成的难度。这也是高炉炉役末期选择钛矿护炉的根本原因，可以大幅降低保护层形成的热力学条件[16]。对于钛负荷及铁水中钛质量分数的控制，与高炉生产参数紧密相关，见式(2)和式(3)，Ti(C,N)的形成不仅决定于铁水中钛的质量分数，还与铁水中 C、N 元素的质量分数及铁水温度紧密相关，同时涉及碳、氮元素的活度。当临界钛质量分数计算得出后，通过钛在渣铁间的式(3)即可得出能实现护炉效果的临界钛负荷 $L(\mathrm{Ti})$[16]。钛矿护炉效果是由沉积在高炉炉缸中的 Ti(C,N)决定，在实际钛矿护炉条件下应当实时计算钛沉积率以评判护炉效果。高炉炉底往往表现出较好的护炉效果的主要原因在于炉底铁水流动相关缓慢，对流换热系数小，耐火材料热面温度低，且铁水中 C 和 N 元素质量分数相对较高，则更易于形成 Ti(C,N)，而炉缸侧壁部位铁水环流程度强，铁水中 C 和 N 元素质量分数波动大，Ti(C,N)的形成难度相对增大。因此，从高炉炉缸维护的角度分析，可采用无钛矿护炉和钛矿护炉两种模式。通过提高铁水碳质量分数、增大炉缸死料柱的空隙率及减小死料柱体积、提高炉温及铁水硅质量分数等措施可以实现无钛矿护炉模式。对于钛矿护炉模式，可以通过从热力学角度计算 Ti(C,N)的生成条件并实时计算 Ti(C,N)在高炉内的沉积率从而实现经济高效护炉。

$$\mathrm{Ti}+\mathrm{C}+\mathrm{N}=\mathrm{Ti(C,N)} \tag{2}$$

$$L(\mathrm{Ti})=\frac{w(\mathrm{Ti})}{x(\mathrm{TiO_2})}=\frac{\exp^{\frac{-\Delta G^{\theta}}{RT}}\cdot(f(\mathrm{TiO_2})\cdot(f(\mathrm{C})\cdot w(\mathrm{C}))^2)}{f(\mathrm{Ti})\cdot\left(\frac{P_{\mathrm{CO}}}{P^{\theta}}\right)^2} \tag{3}$$

式中：$w(\mathrm{Ti})$、$w(\mathrm{C})$为铁水中钛和碳的质量分数；$x(\mathrm{TiO_2})$为 TiO_2 的摩尔分数；$f(\mathrm{Ti})$、$f(\mathrm{C})$和 $f(\mathrm{TiO_2})$为钛、氮和 TiO_2 的活度系数；P_{CO}、P^{θ} 为平衡时 CO 气体的分压和标准大气压。

表 1　高炉炉缸保护层析出形式及类别

Table 1　Form and type of protective layer precipitation of blast furnace hearth

保护层类别	反应方程	析出温度范围/℃	析出难易程度
凝铁层	Fe(l)＝Fe(s)	1 150	难
石墨碳	C(s)＝C	1 250～1 350	中
Ti(C,N)	Ti＋C＋N＝Ti(C,N)	1 400～1 450	易

6　结论

(1)高炉长寿是一项系统工程，科学分析高炉长寿的本质影响因素可准确掌握异常侵蚀高炉的调控措施及方向。

(2)高炉炉缸炭砖损毁的本质是碳不饱和铁水对炭砖的溶蚀。高炉炉缸象脚型侵蚀最严重部位位于高炉炉缸死料柱的根部位置，由于铁水环流速度

最大以及对流换热系数高，造成耐火材料热面温度高，使得该部位炭砖最易侵蚀。高炉下部送风系统的风量分配不均以及冷却制度存在明显的水量分配不均匀性，是导致高炉存在不均匀侵蚀的重要原因。冷却系统的作用本质是降低耐火材料热面温度，形成合理的温度场梯度，运用本文提出的高炉冷却强度指数及高炉冷却效率指数可分析冷却系统的作用潜力。高炉炉缸维护措施可采用无钛矿护炉和钛矿护炉两种模式。

(3)随着对高炉炉缸长寿问题的深入认识，发现影响高炉炉缸长寿的关键在于高炉炉缸内部的死料柱状态，提高高炉炉缸死料柱的透气透液性、降低铁水环流强度、提高高炉炉缸活跃程度是实现现役高炉长寿的主要方向，通过采取措施适当增加炉缸向炉底侵蚀趋势，减缓炉缸侧壁侵蚀，进而形成锅底型侵蚀炉型是实现高炉长寿的技术策略。

参考文献：

[1] 汤清华. 关于延长高炉炉缸寿命的若干问题[J]. 炼铁，2014，33(5)：7.(TANG Qing-hua. Understandings on elongation of BF hearth campaign[J]. Ironmaking，2014，33(5)：7.)

[2] JIAO K X，ZHANG J L，HOU Q F，et al. Analysis of the relationship between productivity and hearth wall temperature of a commercial blast furnace and model prediction[J]. Steel Research International，2017，88(9)：1.

[3] 邹忠平，项钟庸，欧阳标，等. 高炉炉缸长寿设计理念及长寿对策[J]. 钢铁研究，2011，39(1)：38.(ZOU Zhong-ping，XIANG Zhong-yong，OUYANG Biao，et al. Design philosophy and countermeasures for long campaign life of blast furnace hearth[J]. Research on Iron and Steel，2011，39(1)：38.)

[4] 陈涛. 高炉长寿设计综述[J]. 山西冶金，2019，178(1)：64.(CHEN Tao. Review on long life design of blast furnace[J]. Shanxi Metallurgy，2019，178(1)：64.)

[5] 胡中杰，陈永明，居勤章. 宝钢高炉长寿生产实践探讨[J]. 炼铁，2017，36(6)：1.(HU Zhong-jie，CHEN Yong-ming，JU Qin-zhang. Baosteel's BF long campaign production practice and exploration[J]. Ironmaking，2017，36(6)：1.)

[6] 王训富，孙国军，朱锦明. 基于炉体调查的宝钢 3 号高炉长寿经验[J]. 炼铁，2016，35(5)17.(WANG Xun-fu，SUN Guo-jun，ZHU Jin-ming. Long campaign eperiences of Baosteel's No. 3 blast furnace from corrosion investigation[J]. Ironmaking，2016，35(5)：17.)

[7] 项钟庸，王筱留. 高炉设计——炼铁工艺设计理论与实践[M]. 北京：冶金工业出版社，2014.(XIANG Zhong-yong，WANG Xiao-liu. BF Design-Theory and Practice of Iron Making Design[M]. Beijing：Metallurgy Industry Press，2014.)

[8] 孙金铎，黄晓煜，杜续恩. 高炉炉缸破损的原因与控制[J]. 钢铁，2015，50(6)：1.(SUN Jin-duo，HUANG Xiao-yu，DU Xu-en. Reason and control of blast furnace hearth corrosion[J]. Iron and Steel，2015，50(6)：1.)

[9] JIAO K X，ZHANG J L，LIU Z J，et al. Analysis of blast furnace hearth sidewall erosion and protective layer formation [J]. ISIJ International，2016，56(11)：1956.

[10] JIAO K X，ZHANG J L，LIU Z J，et al. Dissection investigation of Ti(C，N) behavior in blast furnace hearth during vanadium titano-magnetite smelting[J]. ISIJ International，2017，57(1)：48.

[11] 王刚，李爱锋，刘风军，等. 高炉炉缸长寿智能管理系统的开发与应用[J]. 中国冶金，2016，26(4)：43.(WANG Gang，LI Ai-feng，LIU Feng-jun，et al. Development and application of intelligent management system for blast furnace hearth longevity[J]. China Metallurgy，2016，26(4)：43.)

[12] 张福明，党玉华. 我国大型高炉长寿技术发展现状[J]. 钢铁，2004，39(10)：75.(ZHANG Fu-ming，DANG Yu-hua. Present situation and development of long campaign life of large in China[J]. Iron and steel，2004，39(10)：75.)

[13] 张建良，杨天钧，王筱留，等. 钢铁冶金分学科发展：炼铁[C]//2012－2013 冶金工程技术学科发展报告，北京：中国金属学会，2014：86.(ZHANG Jian-liang，YANG Tian-jun，WANG Xiao-liu，et al. Development of iron and steel metallurgy-iron making. [C]//2012－2013 Development Report of Metallurgical Engineering Technology. Beijing：The Chinese Society for Metals，2014：86.)

[14] DENG Y，ZHANG J L，JIAO K X. Dissolution mechanism of carbon brick into molten iron[J]. ISIJ International，2018，58(5)：815.

[15] 项仲庸. 国外高炉炉缸长寿技术评述[J]. 炼铁，2013，32(5)：53.(XIANG Zhong-yong，Study of long campaign life technology of blast furnace hearth in foreign countries[J]. Ironmaking，2013，32(5)：53.)

[16] 焦克新，张建良，左海滨，等. 长寿高炉炉缸冷却系统的深入探讨[J]. 中国冶金，2014，24(4)：16.(JIAO Ke-xin，ZHANG Jian-liang，ZUO Hai-bin，et al. In-depth discussion of cooling system of long campaign blast furnace[J]. China Metallurgy. 2014，24(4)：16.)

[17] JIAO K X，ZHANG J L，CHEN C L，et al. Analysis of the deadman features in hearth based on blast furnace dissection by comprehensive image-processing technique[J]. ISIJ International，2019，59(1)：16.

[18] JIAO K X，ZHANG J L，LIU Z J，et al. Formation mechanism of the protective layer in a blast furnace hearth[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials，2015，22(10)：1017.

[19] JIAO K X，ZHANG J L，LIU Z J，et al. Investigation features of water distribution among pipes in blast furnace hearth[J]. Metallurgical Research and Technology，2019，116(1)：121.

[20] JIAO K X，ZHANG J L，LIU Z J，et al. Cooling efficiency and cooling intensity of cooling staves in blast furnace hearth [J]. Metallurgical Research and Technology，2019，116(4)：1.

[21] JIAO K X，CHEN C L，ZHANG J L，et al. Analysis of titanium distribution behaviour in vanadium-containing titano-magnetite smelting blast furnace[J]. Canadian Metallurgical Quarterly，2018，57(3)：274.

[22] 何小平，李洋龙，王红斌，等. 太钢新建 4 350 m^3 高炉长寿炉缸炉底研究[J]. 钢铁研究学报，2014，26(9)：19.(HE Xiao-ping，LI Yang-long，WANG Hong-bin，et al，Long service life and heat transfer analysis of hearth bottom of new 4350m^3 blast furnace in TISCO[J]. Journal of Iron and Steel Research，2014，26(9)：19.)