

首钢高炉炉缸内衬设计与实践

张福明

(首钢总公司)

摘要 90年代以来,首钢4座大型高炉相继进行了现代化新技术大修改造。为延长高炉寿命,设计中高炉炉缸结构参数进行了优化设计。吸收导热法和耐火材料法设计体系的精华,采用国产优质耐火材料,关键部位引进国内尚不能生产的热压炭砖、陶瓷杯等材料。应用传热数学模型,计算炉缸、炉底等温线分布,通过结构和耐火材料的优化设计,控制炉衬中1150℃等温线的位置,抑制炉缸象脚状异常侵蚀的发生,延长炉缸、炉底寿命。近8年的生产实践证明,首钢高炉采用国外高炉长寿先进技术,取得了较好的实绩,创造了80年代以来首钢大型高炉炉缸工作8年无事故的纪录。目前,4座大型高炉炉缸工作正常,冷却水温差、冷却壁热负荷、炉衬温度等参数均在正常范围之内。高炉寿命有望达到10年以上。

关键词 高炉 长寿 设计 耐火材料

1. 前言

80年代以来,日本和欧美等国都致力于高炉长寿化。到90年代末,世界主要产钢国的高炉寿命已达到或超过10~15年。其中日本川崎公司千叶厂6号高炉(4500m³)寿命已达到20年9个月。我国近年的高炉长寿化进程加快,宝钢、梅山等厂的高炉寿命均已达到10年左右。首钢4座高炉在“九五”期间相继进行了现代化新技术大修改造,高炉总容积由原来的4139m³扩大到9934m³。在高炉大型化的同时,设计中采用了多项高炉长寿新技术,力求使高炉寿命达到8~10年。在首钢高炉长寿化的进程中,最为突出的是高炉炉缸内衬设计结构的发展。迄今为止,首钢高炉寿命同80年代相比,已有了大幅度提高,大型高炉的炉缸已安全工作8年。

2. 高炉炉缸侵蚀机理分析

从60年代起,首钢高炉开始采用炭砖—高铝砖综合炉底技术,使用情况一直较好。到80年代中期,随着高炉冶炼强度的提高,炉缸、炉底问题变得突出。4号高炉(1200m³)1983年6月进行大修,投产13个月,炉缸第2段冷却壁水温差大量超限,到1986年3月就发生了炉缸烧穿事故,寿命不足3年。3号高炉(1036m³)于1984年1月大修竣工投产,当年5月,炉缸铁口两侧冷却壁水温差达到1℃以上,第2段冷却壁改用1.3MPa高压水冷却,1989年11月炉缸烧穿,1990年3月停炉抢修,寿命仅6年。

首钢高炉炉缸、炉底的破损情况与国内外大体一致,即所谓“象脚状异常侵蚀”和炉缸环裂。象脚状侵蚀最严重的部位是炉缸、炉底交界处,对应炉缸第2段冷却壁的位置,实测发现侵蚀最严重的区域距冷却壁不足100mm。另外,炉缸环形炭砖均出现环裂现象,裂缝80~100mm,见图1、图2。

联系人:张福明,男,北京(100043) 首钢设计院炼铁室主任工程师,高级工程师
电话:(010)68292003/68292004 传真:(010)68295389

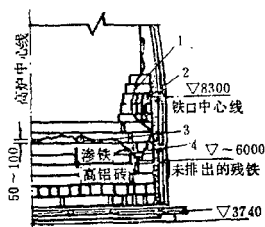


图1 4号高炉1987年4月抢修时炉缸破损情况

1—侵蚀线； 2—裂纹； 3—熔结物； 4—焦炭

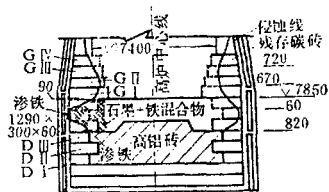


图2 3号高炉1990年3月抢修时炉缸破损情况

结合首钢的原燃料条件和生产条件，研究分析了首钢高炉炉缸侵蚀机理：

(1) 铁水对炭砖的渗透侵蚀。炉缸中铁水渗透到炭砖的气孔中，生成 Fe_3C 一类的脆性物质，形成脆化层，使炭砖热面脆化变质，理化性能下降。

(2) 铁水环流的机械冲刷。由于当时高炉的死铁层深度较浅，致使炉缸死焦柱直接坐在炉底上，炉缸透液性变差。出铁时，铁水沿炉缸周边形成环流，加剧了铁水对炭砖表面脆化层的冲刷磨蚀，使炭砖减薄。

(3) 熔融渣铁及 ZnO 、 K_2O 、 Na_2O 等碱金属对炭砖的化学侵蚀。

(4) 热应力对炭砖的破坏。由于炭砖两端存在着较大的温度梯度，产生热应力，造成炭砖断裂，使炉缸出现环裂。

(5) CO_2 、 H_2O 等氧化性气体对炭砖的氧化破坏。

由此可见，炉缸内衬的破损是一个综合侵蚀过程，有热化学侵蚀、机械磨蚀和热应力破损。因而，用于炉缸内衬的碳质耐火材料必须具有很高的抗渗透性、导热性和抗化学侵蚀性等。而且必须改进炉缸内衬的设计结构，采用合理的设计结构和新型优质耐火材料，抑制象脚状侵蚀和炉缸环裂，延长炉缸寿命。

3. 高炉炉缸的内衬设计

3.1 炉缸参数的优化

日本福武刚和柴田耕一郎等对炉缸内铁水流动的研究^{[1][2]}，使人们对炉缸渣铁排放现象有了更为深入的了解。图3是柴田耕一郎模拟试验中发现的炉缸铁水流场的分布。

我国学者刘云彩通过对炉缸死焦柱行为的研究，提出了炉缸上推力的作用及炉缸死铁层深度的推荐值^[3]。

设计中研究分析了首钢40多年高炉生产实践，结合国内外最新研究成果，新设计的高炉适当加大了炉缸直径、炉缸高度和死铁层深度等参数，见表1。

3.2 炉缸内衬设计体系

对于炉缸内衬的设计，世界上流行着两种不同的设计体系，即“导热法”和“耐火材料法”。导热法的基本原理是采用具有高抗渗透性和高导热性的碳质（或半石墨质）材料，

紧贴炉壳或冷却壁砌筑,降低砖衬热面温度,使砖衬热面形成一层保护性“渣皮”或“铁壳”,这种保护层可防止气体、熔融渣铁、碱金属对炭砖的渗透侵蚀和渣铁的冲刷磨蚀,将1150℃等温线向炉缸中心推移,以延长炉缸寿命。耐火材料法(即陶瓷杯法)的技术原理是在炉底满铺炭砖之上砌筑1~2层的莫来石砖(陶瓷垫);在炉缸壁环形炭砖热面砌一环棕刚玉预制块(陶瓷壁),由低导热的陶瓷质材料在碳质炉衬内形成一个杯状的陶瓷质内衬,即所谓陶瓷杯。利用低导热的陶瓷质材料,将1150℃等温线阻滞在陶瓷层中,使炭砖避开800~1100℃的脆性断裂区间。由于陶瓷杯的存在,使铁水不直接与炭砖接触,从结构上缓解了铁水及碱金属对炭砖的渗透、冲刷等破坏;所采用的莫来石、棕刚玉等均是低导热的高级陶瓷质材料,具有较高的抗渗透性和耐冲刷性^{[4][5]}。

首钢高炉炉缸内衬的设计思想,吸收了导热法和耐火材料法的精华,结合首钢高炉生产实践和经验,在水冷炭砖—高铝砖综合炉底技术的基础上,进行大胆的探索和实践。4座高炉在炉缸、炉底交界处至铁口平面以下的炉缸壁,紧贴冷却壁全部砌筑热压炭砖。1号高炉设计中,将导热法和耐火材料法结合一体,采用热压炭砖—陶瓷杯组合内衬技术。

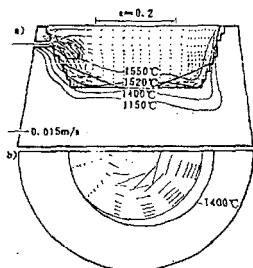


图3 炉缸铁水流动和等温线分布图

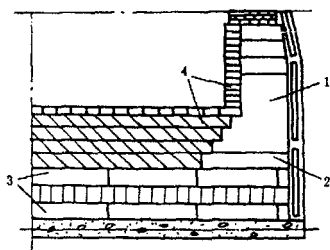


图4 2号高炉炉缸内衬结构图

1—NMA 砖; 2—国产炭砖; 3—热压炭砖; 4—高铝砖

表1 首钢高炉炉缸主要参数

炉 号	1	2	3	4
高炉有效容积 V_u , m^3	2536	1736	2536	2100
炉缸直径 d , mm	11560	9600	11560	10400
炉缸高度 h_1 , mm	4200	3700	4200	4350
死铁层深度 h_0 , mm	2200	1400	2300	1600
h_0/d	0.19	0.146	0.19	0.154
铁口角度	10°	10°	10°	10°
铁口深度 L_t , mm	2201	2250	2124	2116
L_t/R	0.38	0.47	0.37	0.41
风口数, 个	30	26	30	28
铁口数, 个	3	2	3	2

3.3 热压炭砖技术的应用

美国 UCAR 公司是导热法体系的主要倡导者。其产品热压炭砖 NMA 是在高温加热条件下加压成型的, 具有高导热性、低渗透性和优良的耐碱性。另外, NMA 砖形状较小, 加上热固性胶泥 C-34 能提供热膨胀的补偿, 从而能防止热应力断裂和收缩剥落。NMA 砖的高导热性, 使 1150℃ 等温线向炉缸中心推移, 促使炉缸壁热面能形成渣铁混凝物保护层, 防止气体、熔融渣铁、碱金属对炭砖的渗透、化学侵蚀和渣铁的冲刷磨蚀。为提高 NMA 砖的抗碱性, 特意加入了 SiO_2 , NMA 砖中的 SiO_2 优先与碱金属发生反应, 生成层状化合物, 从而缓解了由于化学侵蚀后体积膨胀对炭砖所产生的破坏^[6]。

2、3、4 号高炉均采用了炭砖—高铝砖综合炉底, 炉底总厚度 2800mm。炉底水冷管之上为厚度 150mm 的碳质找平层, 炉底满铺 3 层国产炭砖, 其上为 4 层综合炉底结构, 综合炉底第 1 层周边是国产炭砖, 中间部位立砌高度为 400mm 的高铝砖 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 80\%$); 综合炉底第 2~4 层周边紧贴冷却壁为 NMA 砖, 中间部位立砌高度为 350mm 的高铝砖, 第 4 层综合炉底以上至铁口平面以下 (即死铁层区域), 炉缸壁全部采用 NMA 砖, NMA 砖之上, 砌筑 3~4 层环形大块炭砖, 炉缸壁垂直段 NMA 砖总厚度 1257.3mm。炉缸壁炭砖热面砌一环厚度 345mm 的高铝质保护砖, 形成“简易陶瓷杯”结构, 以避免开炉初期对 NMA 砖的各类破坏。图 4 是首钢 2 号高炉炉缸内衬结构图。

3.4 陶瓷杯技术的应用

首钢 1 号高炉是最后一座进行扩容大修改造的高炉。设计中总结了前 3 座高炉炉缸内衬设计经验和生产实践, 经过充分论证, 决定在 1 号高炉上将导热法和耐火材料法结为一体, 集二者之长, 相互补充, 以期实现高炉长寿的目标。

1 号高炉炉缸内衬主要由 6 部分组成 (见图 5)^[7]: ①炉底 4 层国产满铺大块炭砖; ②炉底 3 层陶瓷垫 (第 1 层为国产莫来石砖, 第 2、3 层为 SAVOIE 公司的莫来石砖 MS4); ③炉缸壁内侧 5 层陶瓷壁 (全部为 SAVOIE 公司的棕刚玉预制块 MONOCORAL); ④炉缸壁外侧铁口中心线以下至炉缸炉底交界处 (即象脚状侵蚀区), 紧贴冷却壁共砌筑 26 层热压炭砖 MS4; ⑤炉缸壁外侧铁口中心线以上, 共砌筑 6 层国产环形大块炭砖; ⑥炉缸环形炭砖和陶瓷壁以上、风口组合砖以下, 砌筑高铝砖 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 80\%$)。

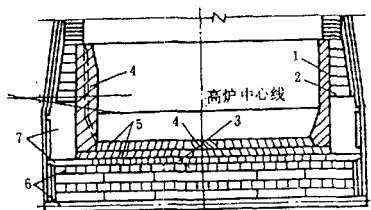


图 5 1 号高炉热压炭砖—陶瓷杯内衬结构

1—渣料; 2—国产炭砖; 3—国产莫来石刚玉砖; 4—棕刚玉预制块 MONOCORAL;
5—莫来石砖 NMA; 6—国产炭砖; 7—NMA 砖

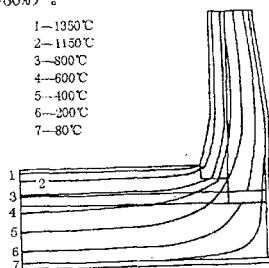


图 6 1 号高炉炉缸、炉底等温线分布

采用有限元传热模型对炉缸、炉底内衬等温线进行计算,得出了炉缸、炉底温度场分布曲线,见图6。计算表明,这种炉缸、炉底内衬结构的温度场分布是合理的,1150℃等温线处于炉底莫来石砖和炉缸壁棕刚玉预制块中,炉缸、炉底炭砖层避开了800~1100℃的温度区间,使炭砖免受断裂破损,并可消除或减轻炉缸炭砖环裂和象脚状异常侵蚀。

4. 生产实践

4.1 热压炭砖的应用实践

首钢高炉未使用热压炭砖以前,一般开炉9个月左右就要加入含钛炉料护炉,炉缸第2段冷却壁改用高压水冷却,控制冷却壁热负荷在 $11630\text{W}/\text{m}^2$ 以下。最早采用NMA砖的2号高炉,于1991年5月开炉,开炉18个月以后才开始投入含钛炉料护炉。直至今日,2号高炉炉缸已安全工作8年,累计产铁1058.8万t,单位容积产铁量达到 $6050\text{t}/\text{m}^3$ 。第2段冷却壁水温差平均 0.3°C ,铁口区冷却壁水温差最高 0.5°C (7根水管),80%以上的冷却壁水温差小于 0.3°C 。冷却壁平均热流强度 $8140\text{W}/\text{m}^2$ 。 TiO_2 加入量 $7\text{Kg}/\text{t}$,铁水中 $[\text{Ti}]$ 含量为 0.115% 。创造了80年代以来,首钢大型高炉炉缸工作8年无事故的纪录。1993年6月投产的3号高炉,目前炉缸第2、3段冷却壁进出水温差稳定在 0.2°C 、 0.3°C ,高炉运行6年尚未加入含钛炉料护炉,炉缸工作安全稳定,累计产铁1157万t。

4.2 1号高炉热压炭砖——陶瓷杯的应用实践

1号高炉1994年8月开炉,至今已生产4年9个月,累计产铁892万t。高炉投产以来,生产稳定,炉缸工作正常,热电偶温度变化平稳。高炉开炉以来,对炉缸内衬的工作状况进行了长期的测试,热电偶月平均温度变化为 $\pm 0\sim 10^\circ\text{C}$,平均温升速率仅为 $0.7\sim 1.5^\circ\text{C}/\text{月}$ 。目前,炉缸壁4层热电偶的平均温度分别为 67°C 、 94°C 、 132°C 、 127°C ,第4层铁口区热电偶平均温度 186°C 。炉缸第2、3段冷却壁85%的水温差稳定在 0.2°C 、 0.3°C 以下,铁口区冷却壁水温差 0.4°C 。该高炉投产至今未加含钛炉料护炉。近5年的生产实践表明,1号高炉炉缸热量充沛,炉缸工作均匀活跃,炉况稳定顺行。而且有利于降低燃料消耗和冶炼低硅低硫生铁,提高铁水温度。目前,1号高炉月平均利用系数 $2.25\text{t}/(\text{m}^3\cdot\text{d})$,焦比 $350\text{kg}/\text{t}$,煤比 $140\text{kg}/\text{t}$,风温 1080°C ,焦炭负荷 $4.33\text{t}/\text{t}$,取得了90年代首钢高炉生产的最佳技术指标。

5. 结语

高炉炉缸、炉底寿命是决定高炉一代寿命的关键。炉缸内衬设计结构的不断改进和优化,是实现高炉长寿的基础和前提。

(1) 高炉炉缸内衬设计中,应充分重视炉缸参数的合理性,根据炉缸内衬侵蚀机理和炉缸工作过程的研究分析,确定合理的炉缸高度、死铁层深度、铁口深度等参数。

(2) 炉缸内衬结构和耐火材料的设计选择至关重要。用于炉缸、炉底的碳质耐火材料,特别是用于象脚状侵蚀区的炭砖,必须具有优异的抗铁水渗透性、高导热性和抗化学侵蚀性等。用于陶瓷杯的耐火材料,应根据不同的使用部位进行合理选择。炉底陶瓷垫材料应具备优异的抗铁水渗透性和抗铁水熔蚀性,炉缸陶瓷壁材料应具备优异的抗铁渣侵蚀性、抗碱性和抗CO侵蚀性。另外,设计中必须注重砌体的整体稳定性,碳质材料和陶瓷质材料的合理结合也是设计成败的关键。

(3) 长寿炉缸的设计,重点是炉缸内衬结构的设计,但绝不能忽视炉缸、炉底冷却系

统的设计, 无论采用何种设计体系, 都要强调冷却系统的合理性和重要性。

(4) 首钢高炉实践表明, 导热法和耐火材料法炉缸设计体系均能实现高炉长寿。炉缸设计体系和耐火材料的选择应根据具体的生产条件、建设投资等进行具体研究, 实现优化合理配置。

参 考 文 献

- [1] 福武刚等. 高炉回旋区和炉缸工作文集, 北京: 冶金工业出版社, 1986, 1~19.
- [2] 柴田耕一郎等. 高炉炉缸铁水流动和控制, 国外钢铁, 1992, (10): 14.
- [3] 刘云彩. 高炉炉缸上推力的作用, 钢铁, 1995, (12): 1~4.
- [4] J M Bauer. Ceramic cups to extend BF hearth life, Steel Times, 1989, (1): 18~18.
- [5] J M Bauer. Low conductivity blast furnace refractories, Steel Times 1993, (1): 49.
- [6] Albert J Dzermejko. Blast furnace hearth design theory, materials and practice, Iron and Steel Engineer, 1991, (12): 23~30.
- [7] 张福明. 热压炭砖——陶瓷杯技术在首钢 1 号高炉上的应用, 炼铁, 1996, (4): 12~15.