

首钢 1 号高炉热压碳砖—陶瓷杯 组合炉缸内衬技术设计与应用

张福明

(首钢总公司)

摘 要 高炉炉缸、炉底寿命是决定一代高炉寿命的关键。首钢 1 号高炉设计中,研究分析了炉缸、炉底的侵蚀机理,将导热法和耐火材料法结为一体,采用热压炭砖—陶瓷杯组合炉缸内衬结构。5 年多的生产实践证明,1 号高炉生产稳定,炉缸工作正常,炉况稳定顺行,有利于降低燃料消耗和冶炼低硅、低硫生铁,提高铁水温度。

关键词 高炉 长寿 热压炭砖 陶瓷杯

DESIGN AND APPLICATION OF COMBINED HEARTH LINING WITH HOT PRESSED CARBON BRICK AND CERAMIC CUP IN SHOUGANG'S NO. 1 BLAST FURNACE

ZHANG Fuming

(Shougang corp.)

ABSTRACT Hearth and bottom service life is a determining factor for campaign life of blast furnace. The wear mechanism of hearth and bottom have been studied for the design of No. 1 blast furnace. Based on the principle of combining thermal-conduction solution and refractory solution, The combined hearth lining of hot pressed carbon brick and ceramic cup has been adopted. The operation for a period more than 5 years has proved; No. 1 blast furnace works stably, hearth works normaly with lower fuel consumption and low silicon and low sulphur hot metal has been produced at higher temperature.

KEY WORDS blast furnace, long campaign life, hot pressed carbon brick, ceramic cup

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 10~12 年。其中日本川崎公司千叶厂 6 号高炉(4500 m³)寿命已达到 20 年 9 个月,一代炉龄产铁量达到 13388 t/m³。

实践证实,高炉炉缸、炉底的寿命是决定高炉一代寿命的关键。特别是近年来随着高炉大型化的进程加快,加之炉腹至炉身部位快速修补技术的成功应用,使高炉炉缸、炉底问题又重新受到国内外炼铁工作者的重视。

2 首钢高炉炉缸、炉底内衬侵蚀机理的研究分析

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^[1]。随着炼铁技

术的发展,到 80 年代中期以后,高炉冶炼强度提高,炉缸、炉底问题变得突出,首钢 3、4 号高炉曾发生了炉缸烧穿事故,造成重大的经济损失。

通过对 10 多次高炉停炉实测结果的研究分析,总结得出了首钢高炉炉缸、炉底内衬的侵蚀机理。

首钢高炉炉缸、炉底内衬的破损结果是典型的“象脚状”异常侵蚀和炉缸环裂。象脚状异常侵蚀最严重的部位发生在炉缸、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 100 mm。残余炭砖和高铝砖表面粘结有凝固的渣、铁及 Ti(C,N)等高熔点凝结物。炉缸壁环形炭砖均出现环裂现象,裂缝 80~200 mm,裂缝中渗有凝固的渣、铁,见图 1。

结合首钢高炉的原、燃料条件和操作条件,研究

分析了首钢高炉炉缸、炉底内衬侵蚀机理:

(1) 铁水对炭砖的渗透侵蚀。研究表明,炉缸中的铁水具有较高的静压力(特别是高压高炉),铁水作用在炉底和炉缸周壁上的静压力,使铁水渗透到炭砖的孔隙和砖缝中,在高温条件下,铁水与炭砖发生反应,生成 Fe_3C 一类的脆性物质,形成脆化层,使炭砖热面膨胀,脆化变质,理化性能下降。

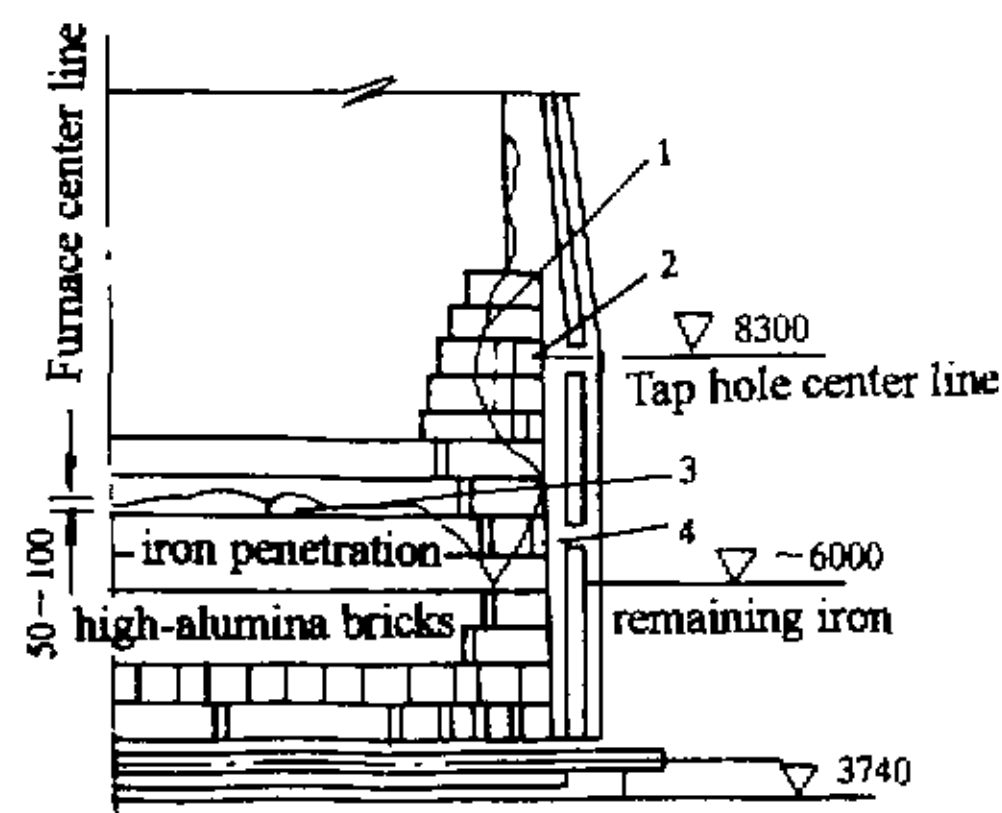


图1 首钢4号高炉(1200 m³)1987年抢修时炉缸、炉底破损情况

Fig. 1 Damaged condition of hearth and bottom of No. 4 BF in Shougang (1200 m³) when it was being repaired in 1987

1—侵蚀线;2—裂缝;3—熔结物;4—焦炭

(2) 铁水环流的机械冲刷。由于当时高炉死铁层深度较浅,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。炭砖渗铁、铁水环流冲刷两者作用交替进行,是形成炉缸象脚状异常侵蚀的主要原因。

(3) 熔融渣铁及 ZnO 、 Na_2O 、 K_2O 等碱金属对炭砖的熔蚀和化学侵蚀。炭砖热面与高温铁水接触,不断被铁水熔蚀。一般生铁中碳含量为3.2%~4.3%,实测表明,炭砖中渗铁碳含为5.43%,炭砖表面凝铁的碳含量高达9.18%。在800~1100℃温度区间内,碱金属与炭砖最易发生反应,生成物体体积膨胀,使炭砖理化性能下降,形成脆性断裂,这是炉缸壁炭砖环裂的主要原因之一。

(4) 热应力对炭砖的破坏。由于大块炭砖热面与冷面之间存在着较高的温度梯度,产生热应力,造成炭砖断裂,使炉缸壁出现环裂。

(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、炉底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、炉底内衬的碳质耐火材料必须具有很高的抗铁水渗透性、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,设计与之相匹配的冷却系统,抑制象脚状异常侵蚀和炉缸环裂,延长高炉寿命。

3 热压炭砖—陶瓷杯组合炉缸内衬技术的设计与特点

1993年,首钢总公司在2号(1726 m³)、4号(2100 m³)、3号(2536 m³)高炉现代化新技术大修改造投产以后,决定利用1号高炉(576 m³)大修机会进行扩容和现代化新技术改造。设计要求该高炉总体技术装备要达到国内先进水平,高炉寿命应达到10年以上,高炉一代炉龄产铁量达到8000 t/m³。

3.1 炉缸设计参数的优化

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

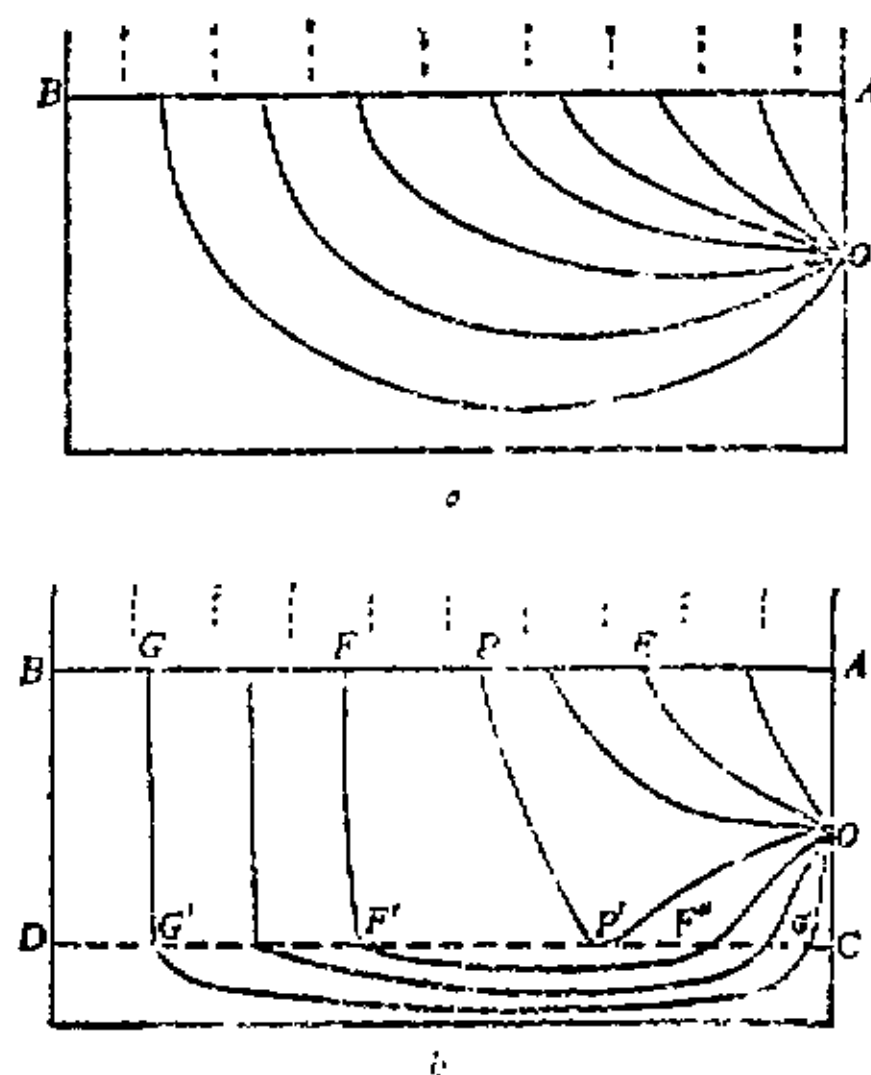


图2 炉缸铁水流动形式

Fig. 2 Hot metal flow pattern in hearth

a—焦炭床“沉坐”情况;b—焦炭床“浮起”情况

刘云彩先生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^[4]。

1号高炉设计中,研究分析了首钢40年高炉生产实践,结合国内外最新研究成果,适当加大了炉缸直径、炉缸高度、铁口深度和死铁层深度等参数,见

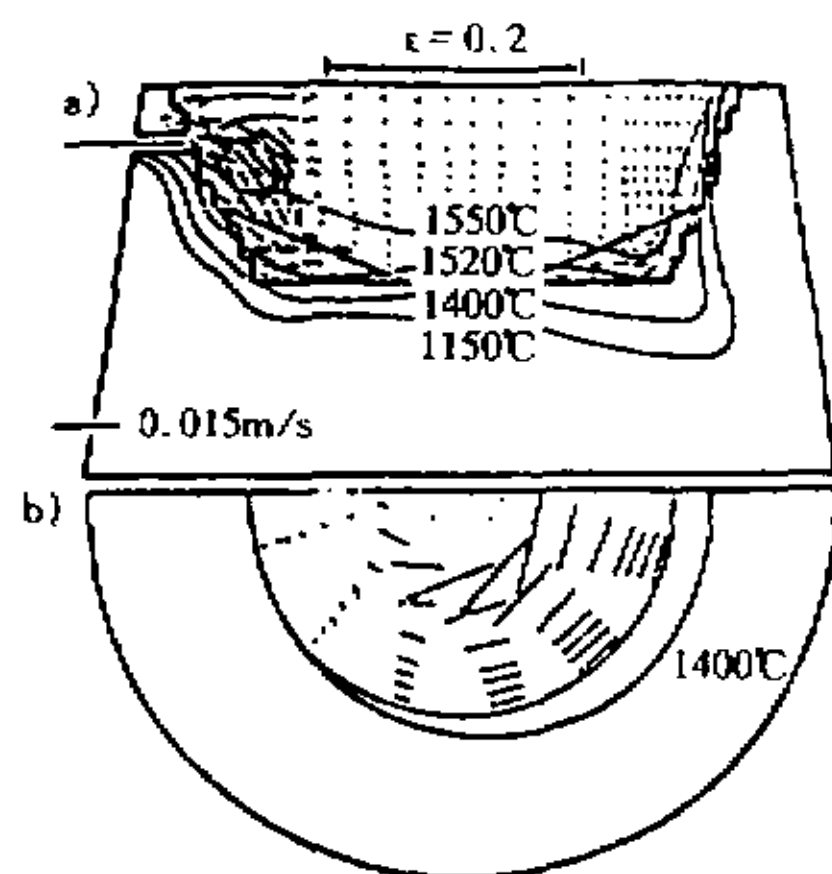


图 3 炉缸铁水流动和等温线分布

Fig. 3 Hot metal pattern and isothermal line distribution in the hearth

表 1^[5]。

3.2 炉缸内衬设计体系的确定

1 号高炉炉缸内衬设计思想,吸收了导热法和耐火材料法设计体系的精华,在水冷炭砖—高铝砖综合炉底技术基础上,进行大胆的创新和实践。将导热法和耐火材料法结合为一体,充分发挥二者的技术优势,扬长避短,集二者之长,相互补充,以实现高炉长寿的目标。

表 1 首钢 1 号高炉炉缸主要参数

Table 1 Major parameters of No. 1 BF hearth in Shougang

项目	数值
高炉有效容积 V_u/m^3	2536
炉缸直径 d/mm	11560
炉缸高度 h_1/mm	4200
死铁层深度 h_0/mm	2200
h_0/d	0.19
铁口深度 L_t/mm	2201
铁口角度	10°
L_t/R	0.38
风口数/个	30
铁口数/个	3
炉底冷却	水冷
炉缸冷却	冷却壁

对于炉缸、炉底耐火材料的选择,尽量以国产优质耐火材料为主,在关键部位引进了国内尚不能生产的热压小块炭砖 NMA 和陶瓷杯材料,这样既实现了国产材料与进口材料的合理配置,又节约了大量的外汇和工程投资。

3.3 1 号高炉炉缸、炉底内衬设计^[6]

1 号高炉炉缸、炉底内衬主要由 6 部分组成: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、炉缸炉底交界处(即象脚状异常侵蚀区),紧贴冷却壁共砌筑 26 层 UCAR 公司的热压炭砖 NMA;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($Al_2O_3 \geq 80\%$)。图 4 为 1 号高炉炉缸、炉底内衬设计结构图。

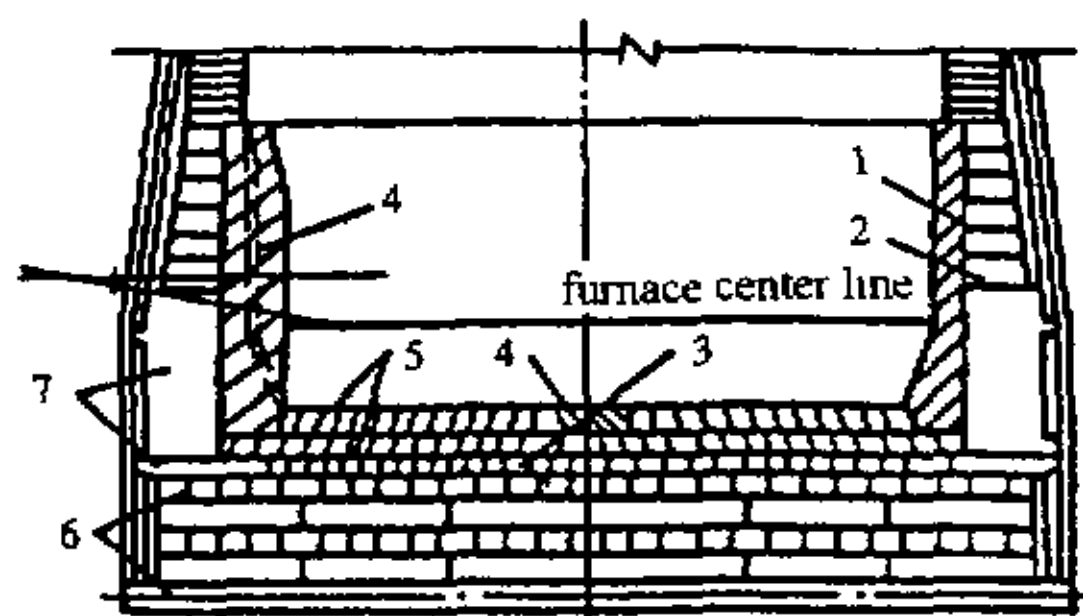


图 4 1 号高炉炉缸炉底内衬设计结构图

Fig. 4 Design structure of hearth and bottom lining of No. 1 BF

1—碳质捣料;2—国产炭砖;3—国产莫来石砖;4—棕刚玉预制块 MONOCORAL;5—莫来石砖 MS4;6—国产炭砖;7—热压炭砖 NMA

采用有限元法对炉缸、炉底内衬进行传热计算,得出了炉缸、炉底温度场分布曲线(设计值),见图 5。

图 5 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(铁水凝固线)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(炭砖脆化反应温度),使炭砖免受脆化断裂破损,可消除或减轻炉缸炭砖环裂和象脚状异常侵蚀。

3.4 1 号高炉炉缸、炉底内衬设计特点

1 号高炉将“导热法”和“耐火材料法”炉衬设计体系溶为一体,集中了热压炭砖和陶瓷杯的技术优点,二者相互补充,具有如下特点:

3.4.1 防止铁水渗透

由于在炭砖热面采用了低导热的陶瓷质耐火材料,使 1150℃等温线被阻滞在陶瓷层内,加之陶瓷

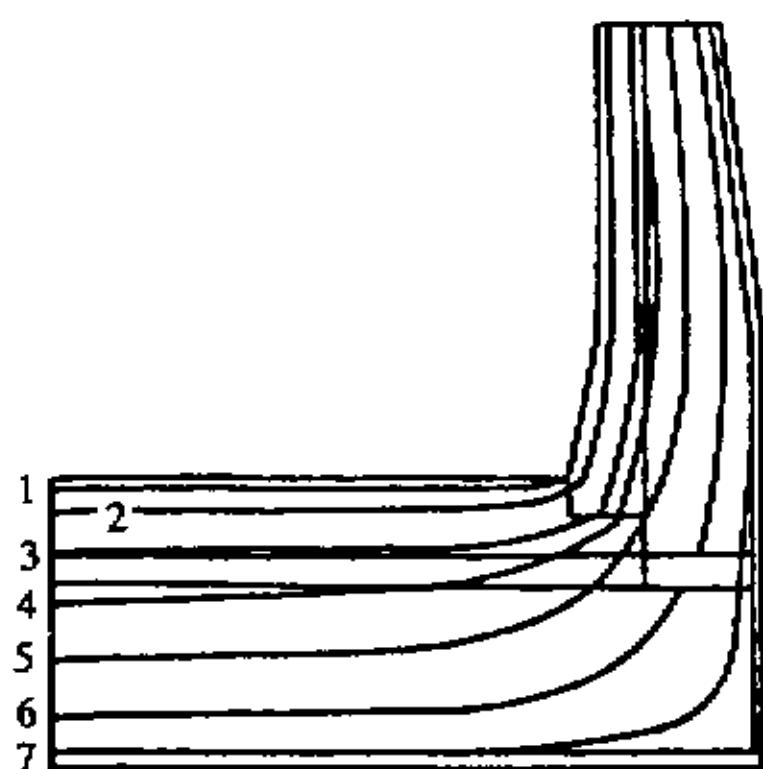


图5 1号高炉炉缸、炉底等温线分布(设计值)
Fig. 5 Isothermal line distribution in the hearth and bottom of No. 1 blast furnace (design value)

1—1350℃; 2—1150℃; 3—800℃; 4—600℃;
5—400℃; 6—200℃; 7—80℃

杯特殊的设计结构和材料的热膨胀,使砖缝紧缩,最大限度减少了铁水对炭砖的渗透侵蚀。

3.4.2 减轻铁水的流动冲刷

采用陶瓷杯应有合理的死铁层深度,设计了较深的死铁层($h_0/d=0.19$),使死焦柱漂浮在炉缸铁水中,抑制了出铁时的铁水环流,改变了铁水在炉缸内的流场分布,而且在铁口区 and 炉缸、炉底交界处,均增加了陶瓷壁的厚度,因而提高了抵抗铁水流动对炉底和炉缸壁的机械磨损。

3.4.3 抑制炉缸环状断裂

热压炭砖 NMA 由于优良的配方和特殊的成型工艺及构型,具有优异的导热性、极低的渗透性和优良的抗碱性,同传统的大块炭砖相比,渗透率仅为后者的 $1/50 \sim 1/100$,导热系数高 $2 \sim 3$ 倍。另外, NMA 形状较小,加上热固性碳质胶泥 C-34 能提供热膨胀补偿,能防止热应力断裂和收缩剥落。为提高 NMA 砖的抗碱性,特意加入了 SiO_2 等材料, 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,抑制了炉缸环状断裂的发生^[7]。

3.4.4 提高炉缸热稳定性,减少炉缸热损失

采用陶瓷杯后,能够提高铁水温度,改善铁水质量,可降低工序能耗,并为炼钢生产创造了有利条件。

3.4.5 有利于高炉操作

由于炉缸热储备量增加,使高炉易于操作,为高炉稳定顺行、活跃炉缸、冶炼低硅低硫生铁、复风操作等提供了良好的条件,并可减少炉缸堆积、风口灌

渣等操作事故。

3.4.6 大幅度延长炉缸、炉底寿命

高炉开炉以后,陶瓷杯对炭砖起到保护作用,使其不直接和铁水接触,从而使炭砖免受铁水的渗透、机械冲刷以及碱金属的化学侵蚀等破坏。而且陶瓷杯将 $800 \sim 1100^\circ\text{C}$ 等温线阻滞在陶瓷材料中,使炭砖避开脆性断裂的温度区间。热压炭砖具有优异的导热性、抗铁水渗透性和优良的抗碱性,可为陶瓷杯提供有效的冷却,从而延长陶瓷杯的寿命。即使在陶瓷杯出现破损以后,热压炭砖直接同铁水接触,由于 NMA 砖具有很高的导热性、抗铁水渗透性和抗化学侵蚀性,仍可依靠有效的冷却作用,使其热面生成保护性渣皮或铁壳,最大限度地延长高炉寿命。

4 号高炉热压炭砖—陶瓷杯组合炉缸内衬技术的应用实践与研究

1号高炉 1994 年 8 月开炉,至今已生产 5 年 10 个月。高炉投产以来,生产稳步上升,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为 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。5 年多的生产实践证明,热压炭砖—陶瓷杯组合炉缸内衬技术的应用,取得了如下的成效:

(1) 炉缸热量充沛,炉缸工作均匀活跃,为高炉稳定顺行创造了极为有利的条件。炉缸热损失减少。在铁水硅含量相同的条件下,铁水温度比其他高炉提高 $15 \sim 25^\circ\text{C}$ 。高炉投产以来,未出现过恶性炉缸堆积、风口灌渣等事故,风口损坏数量比其他高炉少 $20\% \sim 30\%$ 。1999 年 11 月,1、3 号高炉实测铁水温度与铁水硅含量关系见图 6。

(2) 有利于降低燃料消耗。由于炉缸工作均匀活跃,热量充沛,为降低焦比、提高喷煤量创造了有利条件。1999 年 4 月,高炉入炉焦比 363.6 kg/t ,煤比 138.6 kg/t ,焦丁 8.7 kg/t ,燃料比 510.9 kg/t ,喷吹率 27.1% 。由于风温较低,鼓风没有富氧等不利因素的影响,限制了喷煤量的进一步提高。

(3) 有利于低硅、低硫生铁的冶炼。由于炉缸物理热充沛,为冶炼低硅、低硫生铁创造了条件,提高了生铁质量。1998 年生铁合格率为 100% ,一级品率为 97.36% ,铁水含 $[\text{Si}]0.421\%$, $[\text{S}]0.021\%$ 。

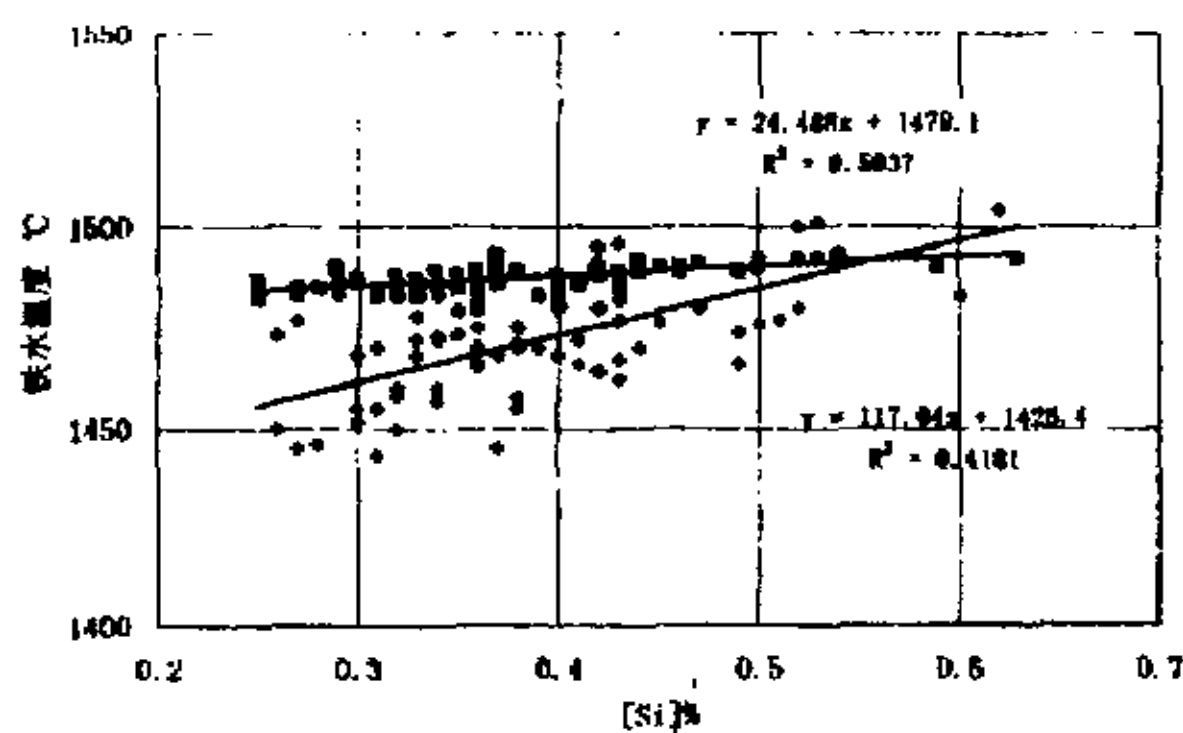


图 6 铁水温度和铁水含硅量的关系

Fig. 6 Relation of hot metal temperature and silicon content in hot metal

(4) 缩短高炉复风时间。高炉休风后,由于炉缸内保持较高的热量储备,因此高炉复风迅速,易于恢复到正常的炉况状态。而且复风后渣铁温降小,渣铁排放顺畅,未出现过复风后渣铁排放困难的现象。

(5) 渣铁物理热提高,流动性改善,炉渣粘沟现象大大减少,降低了炉前工人的劳动强度,改善了劳动条件。

(6) 炉缸、炉底热电偶温度变化平稳,月平均温度变化为 $\pm(0\sim 10)^{\circ}\text{C}$ 。开炉 5 年多以来,热电偶平均温升速率仅为 $0.7\sim 1.5^{\circ}\text{C}/\text{月}$,炉缸平均热流强度 $3500\sim 5000\text{ W}/\text{m}^2$ 。高炉至今未加入含钛炉料护炉,炉缸、炉底内衬工作状态正常,炉缸陶瓷杯仍然存在,无明显异常侵蚀,图 7 是根据 1999 年 11 月炉缸、炉底热电偶实测数据,进行传热计算得出的炉缸、炉底等温线分布。预计炉缸陶瓷杯的寿命可以达到 8 年左右,整个炉缸、炉底寿命可以达到 10~15 年。

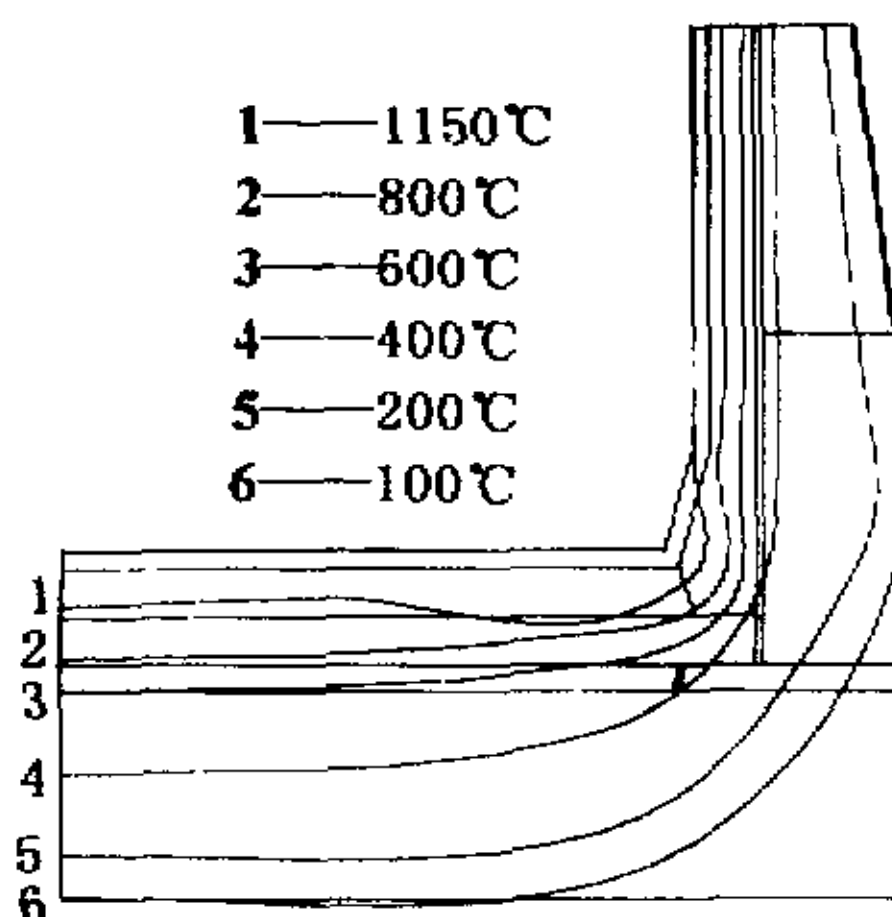


图 7 1 号高炉炉缸炉底等温线分布(计算值)

Fig. 7 Isothermal line distribution in the hearth and bottom of No. 1 BF (calculate value)

5 结语

热压炭砖—陶瓷杯组合炉缸内衬技术在首钢 1 号高炉上应用,经过 5 年多的生产实践表明:

热压炭砖—陶瓷杯组合炉缸内衬技术的设计是合理的,解决了强化冶炼的 2500 m^3 级大型高炉出现的象脚状异常侵蚀、炉缸环裂等炉衬短寿的技术难题,为强化冶炼的大型高炉炉缸、炉底长寿开创了一个新的技术体系,具有重大的技术经济价值。

(2) 该项技术兼具热压炭砖、陶瓷杯的技术优势,集二者之长,相互补充,国产与进口优质耐火材料配合使用,具有施工简便、总体投资省的优势。

(3) 该项技术的成功应用,使炉缸热量充沛,炉缸工作均匀活跃,炉况稳定顺行,降低燃料消耗,提高铁水温度和铁水质量,大幅度延长高炉寿命,取得了显著的经济效益和社会效益。

参 考 文 献

- 1 安朝俊主编. 高炉生产——首钢炼铁三十年, 1983, 402~408.
- 2 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.
- 3 柴田耕一郎等. 高炉炉缸铁水流动和控制, 国外钢铁, 1992, (10): 14.
- 4 刘云彩. 炉缸上推力对高炉进程的影响, 1988 年炼铁学术年会论文集, 北京, 244~248.
- 5 张福明. 首钢高炉炉缸内衬设计与实践, 高炉长寿及快速修补技术研讨会论文集, 1999, 宜昌, 164~169.
- 6 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.
- 7 Albert J Dzermejko Blast Furnace Hearth Design Theory, Materials and Practice. Iron and Steel Engineer, 1991, (12): 23~30.