

# 首钢1号高炉陶瓷杯炉缸的应用分析

单泊华

(首都钢铁集团公司)

**摘要** 分析了首钢1号高炉陶瓷杯炉缸的温度分布与侵蚀特点,并与炭砖炉缸进行了对比。分析表明,陶瓷杯炉缸具有耐侵蚀、节能的特点。

**关键词** 高炉 炉缸 陶瓷杯 寿命

## Application of the ceramic-cup to the Shougang No.1 BF's hearth

Shan Jihua

(Shougang Iron & Steel Group Co.)

**Abstract** The temperature distribution and erosion characteristics of the Shougang No.1 BF's hearth with ceramic-cup are analyzed. The results show that the hearth with ceramic-cup is erosion-resistant and energy-saving.

**Key words** blast furnace hearth ceramic-cup campaign life

### 1 前言

目前国内外高炉的炉缸结构基本可分为炭砖和陶瓷杯两大类。陶瓷杯炉缸自80年代问世以来发展较快,在国内已有多座大型高炉采用陶瓷杯炉缸,首钢1号高炉是国内第一座采用SAVOIE公司陶瓷杯炉缸的高炉。经过首钢1号高炉5年来的生产实践,初步证明该项技术在首钢高炉的应用是成功的。本文通过对1号高炉炉缸、炉底热电偶测温数据的分析,探索其受侵蚀特点;通过与采用国产炭砖的原3号高炉炉缸、采用NMA砖的新3号高炉炉缸对比,初步显示出陶瓷杯炉缸具有长寿与节能特点。

### 2 1号高炉陶瓷杯炉缸应用概况

首钢1号高炉有效容积2536 m<sup>3</sup>,本代炉役于1994年8月9日开炉。开炉后一周即冶炼制钢生铁,5年来炉况基本正常,截止

1999年7月底已产铁水962万t,平均有效容积利用系数达2.09,单位炉容产铁3794 t/m<sup>3</sup>。1号高炉炉缸、炉底结构见图1。为监测其受侵蚀状况,在炉缸侧壁NMA炭砖内埋设了4层热电偶,标高分别为9.7、8.8、7.8、6.9 m。在标高9.7、8.8、7.8 m的3层埋入方向为0°(正东)、30°、60°、90°(正北)、120°、150°、180°(正西)、210°、240°、270°(正南)、300°、330°,共12个方向;在标高6.9 m层埋入方向为30°、60°、120°、150°、210°、240°、300°、330°,共8个方向;在标高9.7 m的3个铁口方向86°、184°、280°也埋入了热电偶。每层各方向埋入深度分别为100 mm和200 mm。炉缸侧壁共埋入热电偶94根。

在炉底国产炭砖内,沿东西和南北方向埋设了2层热电偶,标高为6.5 m和5.6 m。在6.5 m标高,中心埋1根,半径2.27、4.67、7.06 m处各埋4根(正南埋入半径分别为2.58、5.03、7.31 m);在5.6 m标高,中心埋1根,半径2.27、4.67 m处各埋4根。炉

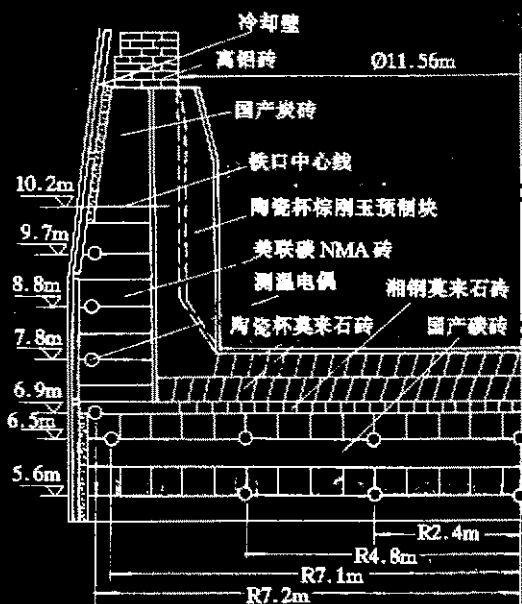


图1 首钢1号高炉炉缸、炉底结构

底共埋入热电偶 22 根。

### 3 1号高炉陶瓷杯炉底炉缸的应用分析

#### 3.1 陶瓷杯炉缸侵蚀分析

(1) 炉缸侧壁炉衬各层温度的变化规律。第一, 炉缸侧壁内衬温度与产量有明显关系, 即内衬温度随平均日产的高低而升降, 二者变化趋势一致。第二, 炉缸侧壁内衬温度与

季节有较明显关系。因为冬、夏季冷却水温度不同, 冬季为 25~26℃, 夏季为 34~35℃, 炉缸侧壁温度冬季要比夏季低。第三, 内衬平均温度升高速率很小。表 1 示出了开炉 5 年来炉缸侧壁 4 层热电偶的月平均温度升高速率。最高的是上两层热电偶, 其中 9.7 m 标高温升速率为 1.12~1.34℃/月; 最低的是最下层热电偶, 温升速率仅 0.51℃/月。如此低的温升速率表明开炉 5 年来陶瓷杯侧壁炉衬无严重侵蚀, 这应归功于陶瓷杯壁棕刚玉 MONOCORAL 优良的理化性能。低导热率使其具有良好 0 的保温特性, 高的体积密度和良好的抗渣性能使其更耐侵蚀, 大块预制结构减少了砖缝并避免了漂移。同时陶瓷杯的存在保护了 NMA 砖不与铁水接触, 并使导致炭砖环裂的 800℃ 等温线存在于杯壁之中。

(2) 炉缸侧壁砖衬受侵蚀特点分析。第一, 炉缸侧壁侵蚀量正常。表 2 是采用有限元法计算的炉缸侧壁陶瓷杯侵蚀厚度, 即以 1150℃ 等温线代替侵蚀线, 从表 2 可看出, 陶瓷杯侧壁圆周方向的侵蚀是均匀的, 在 3 层标高上无局部异常侵蚀; 第二, 侵蚀深度从

表 1 炉缸侧壁砖衬内 4 层热电偶温升情况

标高, m	埋入炭砖 200mm				埋入炭砖 100mm			
	平均温度, ℃		温升幅 度, ℃	温升速率 ℃/月	平均温度, ℃		温升幅 度, ℃	温升速率 ℃/月
	1994 年 9 月	1999 年 7 月			1994 年 9 月	1999 年 7 月		
9.7, 铁口区	158.1	222.8	64.7	1.12	124.8	189.0	64.2	1.11
9.7, 非铁口区	113.1	190.9	77.8	1.34	109.6	166.6	59.0	1.02
8.8	105.4	179.1	73.7	1.27	88.9	153.6	64.7	1.12
7.8	77.7	126.8	49.1	0.85	64.5	100.5	36.0	0.62
6.9	63.3	92.9	29.6	0.51	53.8	73.0	19.2	0.33

上向下逐渐加深(见表 3)。由于陶瓷杯设计合理, 在炉缸侧壁与底部结合处有一斜面加强, 因此剩余的陶瓷杯仍为上薄下厚, 并将继续正常工作。第三, 使用寿命将达到 8 年以上, 由于 1150℃ 等温线距实际侵蚀线还有

一段距离, 同时当接近侵蚀平衡时侵蚀速度会大大减慢, 考虑这些因素后, 1 号高炉炉缸陶瓷杯还可再使用 3 年以上。可见, 陶瓷杯的整个预期使用寿命将达到 8 年以上, 这与陶瓷杯的设计使用寿命在 8 年以上是一致的。

表2 炉缸侧壁陶瓷杯侵蚀厚度, mm

标高, m	0° 正东	30°	60°	90° 正北	120°	150°	180° 正西	240°	270° 正南	300°	330°
9.7	140	260		180		180		340	200	300	300
8.8	180	320	240	300	280	180	240	400	300	470	320
7.8	500	640	600	600	600	500	500	740	600	700	500

表3 炉缸侧壁陶瓷杯平均残余厚度及侵蚀量

标高, m	原厚度 mm	平均侵蚀 深度, mm	平均残余 厚度, mm	侵蚀量, %
9.7	400	240	160	60
8.8	500	300	200	60
7.8	840	590	250	70

第四,“象脚状侵蚀”依然存在。对表2的数据进行分析,1号高炉仍然存在象脚状侵蚀,尽管由于死铁层的加深,象脚状侵蚀已明显减轻。象脚状侵蚀的原因,一般认为是环流铁水冲刷所致,认为加深死铁层即可消除,实际造成象脚状侵蚀的原因有二,一是炉缸侧壁与炉底交界处的环流铁水冲刷,二是热应力,因为炉缸与炉底交界处正是热应力值较大的区域。就1号高炉而言,该区域热应力值高达26.7~62.5 MPa,该值并未超过陶瓷杯材料的抗压碎强度(70~120 MPa),陶瓷杯不会

被压碎,但它无疑是导致象脚状侵蚀的主要原因。

### 3.2 陶瓷杯炉底侵蚀分析

(1) 炉底砖衬温度的变化规律。第一,炉底各温度曲线仅在开炉的第一个月较低,随后即升高并进入较平稳的状态。此外各曲线随着产量水平的高低而升降,呈现较一致的正相关趋势,与炉缸侧壁温度变化的规律相似。由于受冷却水温的影响较小,温度显示与季节关系不大。第二,炉底砖衬温升速率不高,见表4。在标高6.5 m和5.6 m平面,温升最高者分别为2.56和1.05 °C/月。第三,中心点与距中心点2.27 m处的温度值较相近,二者明显高于距中心点7 m和5.03 m处的温度值。

产生上述特点的原因是,开炉后随着铁水侵蚀线下移,1150 °C等温线也下移。后者

表4 炉缸侧壁砖衬内4层热电偶温升情况

距中心 距离, m	标高 6.5 m				标高 5.6 m			
	平均温度, °C		温升幅	温升速率	平均温度, °C		温升幅	温升速率
	1994年9月	1999年7月	度, °C	°C/月	1994年9月	1999年7月	度, °C	°C/月
7.06	61.0	82.4	21.4	0.37				
5.03	239.0	384.0	145.0	2.50				
4.67	261.0	397.7	136.7	2.36	126.0	188.6	62.6	1.08
2.27	342.3	489.1	146.8	2.53	179.0	234.4	57.1	1.16
0	356.0	496.0	81.0	1.76	179.0	240.0	61.0	1.05

移动较快,前者移动较慢,当达到侵蚀平衡时二者重合,侵蚀减慢。由于液态铁水与炉底和炉缸侧壁水冷却之间的热平衡,在炉底形成了相对稳定的“铁壳”保护层,高产时,铁水流动量增加,炉底“铁壳”保护层相对减薄,炉底热流强度相对增大,炉底温度相对升高;反

之,产量低时,炉底温度相应降低。莫来石材质具有保温、受热变形小、耐铁水侵蚀等特性,再加上炉底采用同心圆砌筑,砖块之间、砖环之间互相锁住,难以上浮,使侵蚀速率小,保证了炉底安全。陶瓷杯良好的保温性能及合理的死铁层深度(2.2 m),使死焦堆不

是坐于炉底表面而是悬浮于铁水之中。出铁时,铁水从死焦堆下面流向铁口,环流铁水明显减少。

由于炉缸半径为 5.63 m,如果存在较强的环流铁水,则炉底砖衬中半径 4.76 m 和 5.03 m 处的温度应高于中心点和半径 2.27 m 处的温度。而实际情况正相反,而且半径 5.03 m 处的温度尚低于半径 4.67 m 处。此外,若环流铁水严重的话,炉缸侧壁标高 7.8 m 的温度应明显高于其他 3 层炉缸温度,而实际情况也不是这样。可见,冲刷炉缸与炉底交界处的环流铁水已明显减少。

(2) 炉底侵蚀分析。当炉底侵蚀达到稳定状态时,由于炉缸直径较大,液态铁水向炉底砖衬的传热可近似认为是一维平壁稳态传热。通过计算,炉底直径 0.92 m 的中心部位侵蚀深度仅为 80 mm,半径 2.27 mm 和 2.58 mm 4 点侵蚀深度为 180~320 mm,半径 2.27~4.67 mm 环带的平均侵蚀深度为 290 mm。4 个方向的侵蚀比较均匀,正南方侵蚀稍深。

除开炉后 1 个多月炉底砖衬温度明显升高外,其后 5 年温度一直缓慢上升。说明目前炉底尚未达到侵蚀平衡。但由于侵蚀速率较慢,开炉 5 年,中心部位仅侵蚀了陶瓷杯底厚度的 7.8%,半径 2.27~4.67 mm 平均侵蚀了杯底厚度的 28.2%。以上计算是以 1 150 °C 线代替侵蚀线,由于 1 150 °C 等温线距实际侵蚀线还有一段距离,同时当接近侵蚀平衡时侵蚀速度会大大减慢。

#### 4 与国产炭砖炉缸、NMA 炭砖炉缸对比

##### 4.1 与国产炭砖炉缸对比

(1) 受侵蚀特点分析。采用国产炭砖砌筑的原 3 号高炉(有效容积 1 036 m<sup>3</sup>,炉役期 1990 年 4 月~1995 年 2 月,其间 1990 年 12 月 30 日~1991 年 1 月 10 日中修)在炉缸二层冷却壁对应的炭砖内,沿圆周各方向共埋设了 7 层热电偶,埋入炭砖深度为 30 mm。温度测量结果表明,与 1 号高炉陶瓷杯炉缸

侧壁温度相比,开炉 16 个月后国产炭砖炉缸砖衬温度要比同等部位的陶瓷杯炉缸砖衬温度高出 400~500 °C。由于材质导热能力和耐铁水侵蚀能力差,炭块环裂形成后,在不能形成固定渣铁凝固保护层的情况下炭砖很快被严重侵蚀,再加上国产大炭块抗压碎强度过低(30.5 MPa)及死铁层过浅(0.6 m),造成热应力使炭块碎裂,环流铁水冲刷形成象脚状侵蚀。1990 年 8 月,开炉仅 5 个月即因炉缸二层水温差过高而加钛渣补炉。1995 年 2 月停炉后观察,侵蚀线距离炉缸冷却壁最近处在二层冷却壁下部,残余炭砖最薄处仅 50 mm。该代炉役仅 4 年 10 个月,单位炉容产铁 4 119 t/m<sup>3</sup>。1 号高炉陶瓷杯炉缸由于材质优良,能够抵制热应力及环流铁水的侵蚀,开炉两年来未形成明显的象脚状侵蚀。

(2) 保温效果分析。根据开炉 16 个月后的炉缸测温数据计算,原 3 号高炉国产炭砖炉缸二层冷却壁平均热流强度为 8 211 W/m<sup>2</sup>,1 号高炉陶瓷杯炉缸二层冷却壁的平均热流强度为 4 498 W/m<sup>2</sup>,后者仅为前者的 55%。1 号高炉铁口所在的三层冷却壁,平均热流强度仅为 7 211 W/m<sup>2</sup>。可见,炉缸材质不同,热量损失亦有较大差别。

通过对比,在长寿和节能方面,陶瓷杯炉缸明显优于国产炭砖炉缸。

##### 4.2 与 NMA 炭砖炉缸对比

(1) 寿命分析。首钢 1~4 号高炉自 1991 年开始在炉缸相继采用 NMA 小块炭砖,效果较好。除 2、4 号高炉铁口冷却壁热流强度偏高,被迫采用含钛炉料补炉外,炉缸未发生过大的危机。炉缸炭砖破损的主要原因是铁水熔蚀、渗透、冲刷和热应力。NMA 炭砖理化性能明显优于国产炭砖,经采用小块圆环砌筑,对铁水的渗透、冲刷和热应力有一定的抵制能力。首钢高炉铁水在温度 1 470 °C 时 C 的饱和程度仅 89%,实际含 C 量与饱和含 C 量间存在 0.52 个百分点的差值,故该铁水具有一定的溶 C 能力,对 NMA 炭砖的溶蚀

不容忽视。在受到一定程度侵蚀后，NMA 砖借助其良好的导热性能，在其热面形成具有保护作用的渣铁凝固层。1号高炉陶瓷杯炉缸则在 NMA 砖热面与铁水之间加入耐铁水熔蚀、渗透、冲刷的棕刚玉材质，避免了 NMA 砖与铁水接触，炉缸寿命在使用 NMA 砖的基础上进一步提高。无疑，增加了陶瓷杯的炉缸比 NMA 砖炉缸寿命更长。

(2) 保温效果分析。由于陶瓷杯炉缸在导热性能良好 [1 000 °C 时导热系数为 19.3 W/(m·°C)] 的 NMA 砖热面加入了导热性差 [1 200 °C 时导热系数为 4.0 W/(m·°C)] 的棕刚玉，在杯底使用导

热性能更差 [1 000 °C 时导热系数为 2.2 W/(m·°C)] 的莫来石，其保温效果必然优于 NMA 砖炉缸。① 炉衬温度比较。表 5 为 1 号、3 号高炉开炉后第 5~14 个月的炉缸相同部位(热电偶埋入炭砖均为 200 mm) 的温度数据，各层均显示 3 号高炉 NMA 砖炉缸砖衬温度要高于 1 号高炉陶瓷杯炉缸砖衬温度。但二者温差值随标高降低而降低，即在炉底平面以上、与铁水接近的 9.7 m 和 8.8 m 标高，由于温度高，二者差值也高，达到 30~40 °C，保温效果明显。在炉底平面以下的 7.8 m 和 6.9 m 标高，由于温度较低，其差值也低，为 6~10 °C。② 铁水温度比较。

表 5 1、3 号高炉炉缸相同部位砖衬温度, °C

标高, m	高炉	距开炉时间, 月							
		5	6	7	9	10	11	13	14
9.7	1号	128	126	122	137	143	143	155	158
	3号	176	181	184	166	177	173	193	197
8.8	1号	100	97	97	110	110	114	128	133
	3号	139	157	152	136	149	136	169	169
7.8	1号	74	71	71	80	78	80	89	94
	3号	88	92	88	71	86	89	105	106
6.9	1号	57	55	57	65	63	63	68	71
	3号	68	65	58	56	65	70	74	73

1994 年 11 月 7~23 日首钢钢研所和炼铁厂联合对 1、3 号高炉进行了铁水测温，初步结果显示在相同的炉容下，陶瓷杯炉缸可提高铁水温度约 15 °C。

## 5 结语

(1) 首钢 1 号高炉开炉 5 年以来，由于陶瓷杯炉缸材质优良、结构合理，已显示出炉衬升温速率慢、炉衬温度明显偏低、耐侵蚀的特点，表明该陶瓷杯炉缸具有长寿、节能等优

点。

(2) 首钢 1 号高炉炉缸陶瓷杯还可再使用 3 年以上，陶瓷杯的整个预期使用寿命将达到 8 年以上。

(3) 在炉缸长寿与保温节能方面，1 号高炉陶瓷杯炉缸明显优于国产炭砖炉缸，也优于 3 号高炉的 NMA 砖炉缸。

(责任编辑 吴业宏)