

昆钢 6 号高炉炉缸炉底侵蚀模型的开发

冯一奇, 跃华, 唐启荣, 王涛

(昆明理工大学材料与冶金工程学院, 云南昆明 650093)

摘要: 针对昆钢 6 号高炉 (2000m³) 炉缸炉底情况, 应用传热学原理, 开发了对炉缸炉底侵蚀状况进行监测的二维数学模型. 通过对模型的计算, 得到了炉缸炉底的温度场分布. 从计算所得到的侵蚀图来看, 1150℃ 侵蚀线位于第 5 层碳砖的位置, 无明显的“象脚状”侵蚀, 6 号高炉炉缸炉底的侵蚀状况基本正常.

关键词: 高炉; 炉缸炉底; 侵蚀模型; 侵蚀线; 传热学

中图分类号: TF0061.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2008)03-0011-04

Development of Erosion Model for Hearth and Bottom of No. 6 BF in Kunming Iron and Steel Group Co., Ltd.

FENG Yiqi DING Yue-hua TANG Qirong WANG Tao

(Faculty of Materials and Metallurgical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract According to conditions of hearth and bottom of No. 6 BF (2000m³) in Kunming Iron & Steel Group Co., Ltd. a two-dimensional mathematical model monitoring the erosion of hearth and bottom is developed using the theory of heat transfer. The temperature field of hearth and bottom is thus obtained. It is indicated through the calculated erosion graph that erosion line at 1150℃ is located in the fifth layer of carbon brick, that there is not big shape of “elephant foot”, and that the erosion is quite normal.

Key words blast furnace; hearth and bottom; erosion model; erosion line; heat transfer theory

0 引言

高炉长寿是现代大型高炉的重要技术特征, 在我国高炉炼铁技术进步中, 其作用尤为突出. 影响高炉寿命的因素有两个, 一个是炉缸炉底寿命, 一个是炉身下部寿命, 对于后者可以采用遥控喷补或硬质压入造衬技术进行维护修补, 而炉缸炉底修补在我国尚未成熟^[1-2]. 为及时了解和控制炉缸炉底侵蚀情况, 避免发生严重侵蚀甚至烧穿等重大事故, 开发高炉炉缸炉底侵蚀模型非常重要^[3]. 昆钢 6 号高炉设计炉容 2000m³, 1998 年 12 月开炉, 一代炉龄设计寿命为 12 年, 现已进入炉役末期, 为使昆钢 6 号高炉在生产过程中安全、稳定、顺行, 有必要对其侵蚀情况进行预测.

1 昆钢 6 号高炉炉缸炉底侵蚀模型的建立

1.1 昆钢 6 号高炉炉缸炉底结构

6 号高炉炉缸炉底采用“半石墨化低气孔率自焙碳砖 + 复合棕刚玉砖”的陶瓷杯结构. 炉底下端、炉缸侧面采用的是导热系数较高的自焙碳砖, 而炉底上端是 2 层复合棕刚玉砖, 炉底总厚度 3.05 m, 结构如图 1 所示.

此方案融合了炉缸炉底设计的“隔热法”和“导热法”两种思维模式, 利用刚玉砖较强的抗渣铁熔蚀性

收稿日期: 2007-12-07. 基金项目: 云南省科技攻关项目 (项目编号: 2006GG07).

第一作者简介: 冯一奇 (1980-), 男, 在读硕士研究生. 主要研究方向: 高炉长寿. E-mail: fengyiqi@sohu.com

能及低导热性,使高温等温线集中在刚玉砖砌体内,起到保温和使自焙碳砖免受高温渣铁侵蚀的作用.与此同时,碳砖的高导热性又可以将陶瓷杯传入的热量很快地传出去,从而达到高炉长寿的目的.

1.2 热传导方程的建立

根据傅立叶定律和导热过程中的能量守恒定律,可以推导出导热微分方程的一般表达式:

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) \quad (1)$$

在建立炉缸炉底模型时,根据实际情况,对其进行以下的简化和假设:

1) 高炉是不同半径截锥体和圆柱体的组合,所以把高炉炉缸炉底看作一个轴对称问题处理,其侵蚀状况可近似认为沿高炉中心线呈轴对称分布,即炉缸炉底的传热过程是二维的.

2) 在高炉冶炼的过程中,炉底不断地被侵蚀,但从 6 号高炉一代寿命 12 年的时间考虑,可以认为整个侵蚀过程是连续的和缓慢的,温度场相对稳定,故可忽略方程中的时间项.

3) 炉缸炉底耐火材料内部不存在内热源,所以方程简化为:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} = 0 \quad (2)$$

1.3 模型定解条件的确定

模型几何条件的确定方法是:以第 1 层碳砖的上表面作为模型下边界,左右边界由最靠近炉壳的热电偶的坐标来确定,炉缸炉底内表面 1150°C (铁水凝固温度) 等温线作为模型的内边界.由于模型是稳态热传导模型,故和初始条件无关.根据条件假设,6 高炉炉缸炉底的边界条件为:

1) 模型的上边界是绝热边界条件,即 $q_w = 0$

2) 在模型的内边界,由于炉衬与高炉铁水直接接触,可以认为该处温度与铁水温度相同,所以内边界是恒温边界条件,即 $T_w = 1450^\circ\text{C}$.

3) 把最靠近炉基和炉壳的热电偶温度值作为外边界条件,模型的边界条件如图 2 所示.

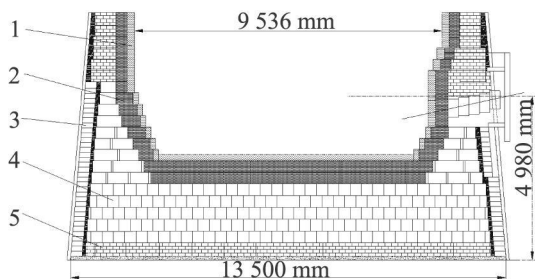
2 模型的计算结果及分析

2.1 2001 年 6 月计算结果及分析

模型的求解采用 MATLAB 软件进行计算,图 3 是 2001 年 6 月 6 号高炉炉缸炉底温度场分布,自上而下第 1 条等温线是 1150°C 侵蚀线.从图 3 中可以看出炉底侵蚀厚度大约为 400mm ,年平均侵蚀约为 $160 \sim 170\text{mm}$.在开炉初期,陶瓷砌体破损的原因主要是渣铁熔蚀,此外,由于在开炉初期自焙碳砖得不到有效的焙烧,导热能力低,由此造成刚玉莫来石砖温度升高,侵蚀加剧.

2.2 2004 年 6 月计算结果及分析

图 4 是 2004 6 号炉缸炉底温度分布图,从图 4 中可以看到,2004 6 号炉底的陶瓷杯已基本被侵蚀掉,炉缸侧壁与炉底交界的拐角处尚有少量陶瓷砌体的存在,但是,其对下面的自焙碳砖的保护作用已非常有限.3 年内侵蚀厚度大约是 300mm ,侵蚀速度比前 3 年明显减少,这主要与昆钢在实际操作方面有关.2001 年,6 号高炉出现了炉体上涨,风口上翘等现象,昆钢在减少有害元素的入炉量方面做了大量的工作,6 号高炉有害元素分布如表 1 所示^[4].



1.粘土砖;2.复合棕刚玉砖;3.半石墨碳-碳化硅砖;
4.半石墨化低气孔率自焙碳块;5.半石墨碳-碳化硅焙烧大碳块

图1 昆钢6号高炉炉缸炉底结构图

Fig.1 Structure of hearth and bottom of No. 6 BF in Kunming Iron and Steel Company

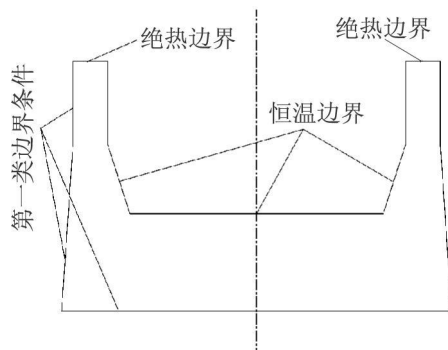


图2 模型的边界条件示意图

Fig.2 Boundary conditions of the model

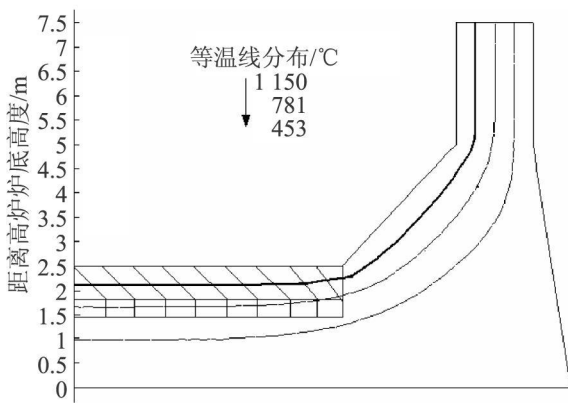


图3 2001年6号炉缸炉底温度分布
Fig.3 The temperature field of hearth and bottom in 2001.No. 6BF

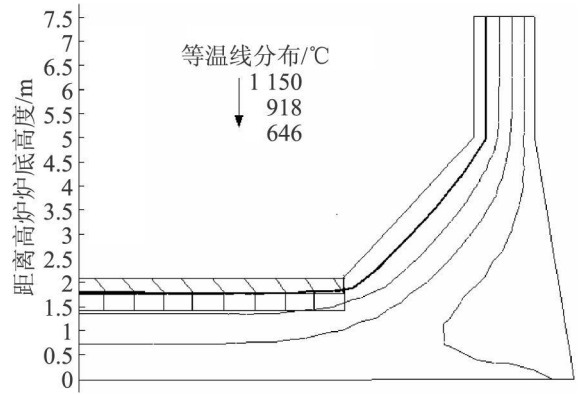


图4 2004年6号炉缸炉底温度分布
Fig.4 The temperature field of hearth and bottom in 2004.No. 6BF

表 1 6号高炉有害元素的平衡情况

Tab 1 Balance of harmful elements at No. 6 BF

时间	锌入炉量 /t	碱入炉量 /t	铅入炉量 /t	锌排出率 /%	碱排出率 /%	铅排出率 /%
1999	6 142.66	1 074.17	424.50	79.26	94.11	72.61
2000	6 922.29	1 132.19	521.22	91.31	98.47	74.07
2001	7 117.48	1 170.48	503.28	81.46	98.96	67.62
2002	7 086.13	1 286.28	386.66	84.55	98.48	78.60
2003	6 104.15	1 224.98	243.61	89.72	97.50	98.86
2004	6 023.94	1 055.57	215.54	99.13	99.59	99.21

从表 1 中可以看出, 锌、碱、铅的入炉量总体呈下降趋势, 而它们的排出率却逐渐升高, 因此高炉中有害元素的含量逐年降低. 随着高炉中有害元素的减少, 这在一定程度也减轻了有害元素对高炉的侵蚀, 侵蚀速度因此也减小.

2.3 2007年 6月计算结果及分析

当陶瓷杯被完全侵蚀掉后, 炉缸炉底将转变为高导热系数的“全炭砖炉缸炉底”结构. 2007年 6号高炉温度场分布如图 5所示.

从图 5中可以看出, 半石墨化低气孔率自焙炭砖并不能把 1150℃侵蚀线推出炭砖热面, 到 2007年 6月, 1150℃等温线已经进入到了第 5层炭砖内, 侵蚀掉了大约两层自焙炭砖的厚度, 炉底剩余高度为 1500mm左右. 从图 5中 1150℃等温线的分布来看, 6号高炉并没有出现明显的象脚状侵蚀, 这也可以从热电偶的温度上说明, 比较典型的是标高 6.845 m 的 TE4647热电偶温度在 2004年 9月 1日的温度为 244℃, 2007年 6月 11日的温度为 285℃, 在接近 3年的时间里只波动 41℃, 一方面波动幅度不大, 另一方面间隔时间较长, 因此从温度上也可说明 6号高炉没有出现象脚状侵蚀.

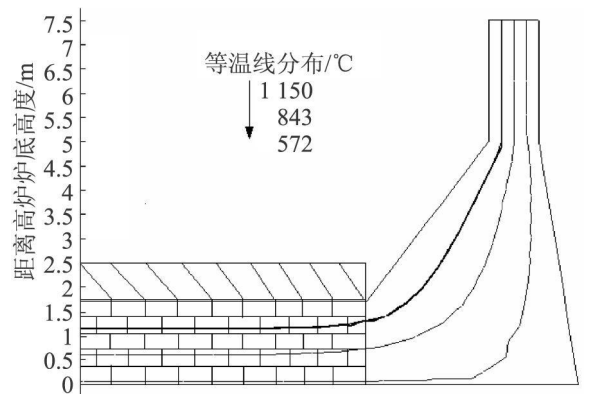


图5 2007年6号炉缸炉底温度分布
Fig.5 The temperature field of hearth and bottom in 2007.No. 6BF

3 模型的验证

为校核所建立传热模型的精确程度, 现将 6号高炉现场实测数据与所对应点的计算值列表如下:

表 2 2007 年 6 号高炉实测温度值与计算值的对比

Tab 2 Comparison between the calculated and measured temperature

检测点	测量值 / $^{\circ}\text{C}$	计算值 / $^{\circ}\text{C}$	误差 /%	检测点	测量值 / $^{\circ}\text{C}$	计算值 / $^{\circ}\text{C}$	误差 /%
TE4624	208	217	4.3	TE4635	324	311	4.0
TE4666	519	528	1.7	TE4681	478	493	3.1
TE4672	512	505	1.3	TE4677	456	462	1.3

从表 2 中可以看出, 计算得到的温度值与现场实测的温度值相差不大, 误差控制在 5% 以内, 因此可以认为本传热学模型是比较精确、合理的。

4 模型存在的不足

模型的开发是一项系统工程, 要实现长期监测, 热电偶的维护非常重要, 由于高炉在生产的过程中, 一部分热电偶因损坏数据已无法采集, 因此, 对模型计算结果的精度有一定的影响。利用高炉大、中修的机会增加热电偶的数量及合理布局, 将会提高模型预测的准确性, 对高炉的生产将会有更大的指导意义。

5 结论

1) 针对昆钢 6 号高炉炉缸炉底的实际特点, 开发了昆钢 6 号高炉炉缸炉底侵蚀预测模型, 并用 MATLAB 计算软件对该模型进行了求解。

2) 目前昆钢 6 号高炉炉底剩余厚度大约 1500mm, 从 1150 $^{\circ}\text{C}$ 侵蚀线的分布来看, 6 号高炉炉缸炉底交界处并没有出现明显的象脚状侵蚀, 对 6 号高炉的长寿前景颇为看好。

3) 使用该模型可以判断炉缸炉底的工作状态, 为高炉制定合理的冷却强度、加强炉缸炉底的维护提供可靠的依据, 对指导高炉操作具有积极作用。

参考文献:

- [1] 叶军. 陶瓷杯结构炉衬在 马钢高炉的应用实践 [J]. 炼铁, 2006 25(6): 51-53
- [2] 程坤明. 影响高炉炉底炉缸碳砖使用寿命的因素 [J]. 炼铁, 2006 25(1): 11-15
- [3] 李家新, 苏宇, 唐成润. 高炉炉底侵蚀状况动态监测模型的开发 [J]. 炼铁, 2001, 20(2): 28-30
- [4] 杨雪峰, 王涛, 李江华, 等. 昆钢 6 号高炉入炉有害元素调查分析 [J]. 云南冶金, 2006 35(4): 63-66

(上接第 10 页)

从上述的结果分析可知, 磨机的处理量、磨矿产品细度以及磨机磨矿的电耗和介质消耗均达到了预期目的, 而且原矿品位下降的同时实现了回收率的提高, 为其它类似的选厂的技术改造提供了有益的借鉴。

参考文献:

- [1] 李启衡. 碎矿与磨矿 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1980: 172, 181.
- [2] 凌永发, 段希祥. 细磨介质形状的选择及应用研究 [J]. 有色金属, 2001(6): 41-44
- [3] 段希祥. 碎矿与磨矿 [M]. 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 198
- [4] 昆明理工大学磨矿课题组. 精确化装补球方法在因民铜矿的应用研究 [R]. 昆明: 科研报告, 2007: 20-22
- [5] 段希祥. 球磨机钢球尺寸的理论计算研究 [J]. 中国科学 (A 辑), 1989: 861