DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.01.022

高炉炉缸侵蚀状况的计算

成子浩[1], 贵永亮[1], 胡宾生[1], 米舰君[2]
(1.华北理工大学 冶金与能源学院,河北 唐山 063210; 2.河北钢铁集团唐山分公司,河北 唐山 063001)

摘　要:高炉炉缸、炉底的侵蚀危害着工厂的经济效益和广大工人的生命安全。为有效的避免灾难的发生,采用两点法结合大长板理论以及长圆筒理论,对高炉炉缸,炉底的侵蚀程度进行简单计算。结果表明,获得了炉缸、炉底遭受侵蚀的形貌及侵蚀范围,为高炉采取保险措施提供了有力的依据。

关键词:炉缸;侵蚀;黑箱;两点法

中图分类号: TF576　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)01-0085-04

Calculation of Erosion Status of Blast Furnace Hearth

CHENG Zihao[1], GUI Yongliang[1], HU Binsheng[1], MI Jianjun[2]
(1. School of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China; 2. Tangshan Branch, Hebei Iron and Steel Group, Tangshan 063001, China)

Abstract: The erosion of the blast furnace hearth and the bottom of the furnace jeopardizes the economic benefits of the factory and the life safety of the workers. In order to effectively avoid the occurrence of disasters, this paper will use the two-point method combined with the theory of long board and the theory of long cylinders for the blast furnace hearth. The degree of erosion of the bottom of the furnace is simply calculated, and the erosion morphology and erosion range of the hearth and the bottom of the furnace are obtained, which provides a strong basis for the blast furnace to take insurance measures.

Key words: hearth; erosion; black box; two-point method

高炉是钢铁生产作业流线中的重中之重的大型设备与设施,其投资建设费用与后期维护、维修费用消耗巨大。而炉缸、炉底则是高炉长寿目标中最关键的部位,直接决定着一座高炉的使用寿命与高炉的安全运行,间接影响着一个企业的经济效益。在冶炼过程中,炉缸内壁一直以来遭受着渣铁冲刷和化学侵蚀,极其容易受损。从而,当炉缸受到的侵蚀达到一定程度,高炉就不得不停止生产,进行维护和维修,严重的还需要拆掉重新建造,否则就会发生重大安全事故危害工人生命安全,造成人员伤亡和经济损失。因此,实时监控炉缸侵蚀对高炉安全作业与保障经济效益具有重大意义,从而如何保障高炉生产能够安全顺行,一直以来都是炼铁生产技术界的重大课题。

1　模型的建立

众所周知,高炉生产过程是在封闭的高炉体内进行的,这就使得炉缸侵蚀过程具有了"黑箱"不可见的独特特征[1]。所以炉缸侵蚀程度的诊断就需要人们利用外部的测温条件,建立炉缸侵蚀的模型,从而监测炉缸的侵蚀程度。高炉炉缸的外部测温条件可以归总为3种:①测温点在炉缸内衬中按方位有2层及以上的布置;②测温点在炉缸内衬中按方位只有1层布置;③依靠冷却水温差而没有测温点布置。

目前,我国大多使用的是第1类和第3类测温条件,尤其是第1类测温条件,它满足于一维的两点法模型的计算条件。一维的两点法相比二维算法,算法简单,计算所需的内存容量也比较小,对计算机的运算速度要求也不高,容易实现,计算结果也能满足生产实际,可以准确预测炉缸、炉底的侵蚀情况,部分成功运行的炉缸、炉底侵蚀状况预测软件的算法也是采用了两点法[2,3]。

2　炉缸的破损机理

由于炉缸、炉底的部位结构不同,从而造成炉缸、炉底侵蚀破损的原因也有所不同。其主要原因有[4-6]:①渣、铁和煤气的机械冲刷作用;②热应力破损作用;③煤气中的CO_2、O_2、H_2O和漏入水的氧化

收稿日期:2018-09-03
基金项目:河北省留学人员科技活动项目(CL201616)
作者简介:成子浩(1993-),河北邯郸人,硕士生.研究方向:高炉炼铁.电话:18232532877,
E-mail:18232532877@163.com

作用;④铁和碱金属的侵蚀;⑤铁和碱金属的渗透使得碳砖发生质变,并在渗透层与未质变碳砖之间由于应力作用而产生环形裂缝(脆化层)。

因此造成高温熔融、渗铁上浮、脆化层形成及异常侵蚀等几类的炉缸、炉底侵蚀。

我们分析其侵蚀机理可得知,炉缸内衬所受到的侵蚀是非常复杂的,不仅仅存在着物理侵蚀,同时还发生着化学侵蚀。这些侵蚀只有遇到冷却条件,使其温度降低至铁液凝固温度(约1 150 ℃左右)才会停止。所以,我们在计算炉缸、炉底侵蚀程度时,取1 150 ℃为侵蚀参考线。

3 求解过程

3.1 炉底中心按大平板传热考虑

使用埋入的两个热电偶测量的温度值,计算炉底等温线位置及炉缸侵蚀后碳砖残存厚度。计算方式如下:

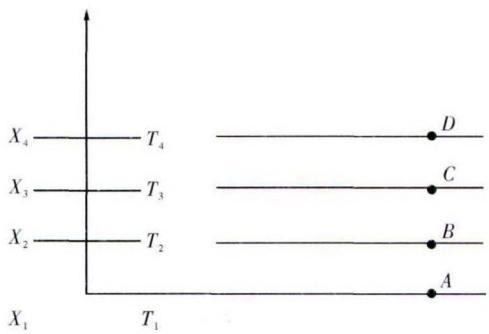

图1 热电偶位置图

Fig.1 Thermocouple position drawing

如图1所示,假设A点热电偶温度读数为T_1,C点热电偶温度读数为T_2,D点温度为1 150 ℃等温线,且X_1、X_2、X_3位置可知,以及查得碳砖的导热系数分别为λ_1、λ_2、λ_3,求B点温度以及炉底碳砖侵蚀残余厚度L。

由公式:

$$q=\lambda\cdot\Delta t/\Delta x \tag{1}$$

其中,q为热流强度,W/m^2;λ为导热系数,W/(m·℃);Δt为温差,℃;Δx为两点的距离,m。

可得:

$$q_1=\lambda_1[(T_B-T_1)/(x_2-x_1)],$$
$$q_2=\lambda_2[(T_3-T_B)/(x_3-x_2)],$$
$$q_1=q_2。$$

求解可得:

$$T_B=T_2,且\ q=a$$

所以,

$$x_4=\lambda_3(T_4-T_3)/a+x_3$$

故,炉底炭砖侵蚀残余厚度L为:

$$L=x_4-x_1$$

3.2 炉缸侧壁按长圆筒传热考虑

计算炉缸侧壁碳砖侵蚀残余厚度时,我们把炉缸看作是一个内径分别是r_1、r_2的长圆筒。其内外壁面温度分别是热电偶测温读数t_1、t_2。假设耐材的导热系数λ是一个常数,如果圆筒壁的长度很长,那么就可以忽略沿轴向的导热,也就是说温度仅沿半径方向径向发生了变化。这时,采用圆柱坐标(r,α)建立坐标系时,传热问题就可化为一维传热了,同时也满足了两点法模型的计算条件。

这时,导热微分方程式为:

$$\frac{d}{dr}\left(r\frac{dt}{dr}\right)=0 \tag{2}$$

边界条件:

$r=r_1$时,$t=t_1$;$r=r_2$时,$t=t_2$

对微分方程求解,得其通解:

$$t=c_1\ln r+g_2 \tag{3}$$

将边界条件代入式(3),解得:

$c_1=(t_2-t_1)/(\ln r_2-\ln r_1)$,$c_2=t_1-\ln r_1(t_2-t_1)/(\ln r_2-\ln r_1)$。

故,温度函数式为:

$$t=t_1+(\ln r-\ln r_1)(t_2-t_1)/(\ln r_2-\ln r_1) \tag{4}$$

由上式可知,不同于平板中的温度分布,圆筒壁中的温度分布是呈对数曲线分布。

另外,在长圆筒传热过程,即使冶炼过程已达到稳定的状态,热流强度q也不是一个常量,而是跟随r的变化而变化。但是,在冶炼过程的稳定状态下,通过半径r的整个圆筒壁的热流量Q是一定的。

所以,

$$q=-\lambda\cdot dt/dx \tag{5}$$

式(5)等号两边同时乘以$2\pi rl$得到式(6):

$$Q=-\Lambda f\cdot dt/dx=-2\lambda\pi rl\cdot dt/dx \tag{6}$$

对式(4)求导得:

$$dt/dr=(t_2-t_1)/[r\cdot(\ln r_2-\ln r_1)]$$

将其代入式(6),可得:

$$Q=2\lambda\pi l(t_1-t_2)/(\ln r_2-\ln r_1) \tag{7}$$

这时,就可以把炉缸侧壁看作是一层一层的大平板,利用串联热阻叠加原则,可得出通过多层大平板的导热总热流量:

$$Q_{总}=2\pi l(t_1-t_n)/[\ln(d_2/d_1/\lambda_1)+\ln(d_3/d_2/\lambda_2)+\cdots+\ln(d_n/d_{n-1}/\lambda_{n-1})] \tag{8}$$

4 计算结果

已知某一高炉炉缸结构图、热电偶埋入位置(如图1)、以及其热电偶测温读数(如表1),并查询得到各耐材导热系数(如表2)。详情见下表、图。

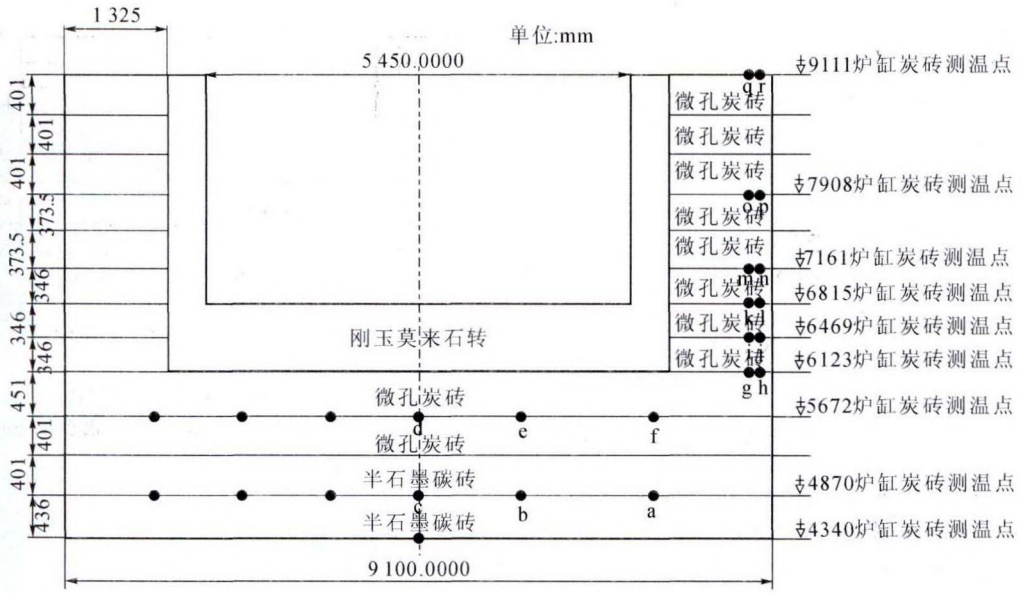

图 2 炉缸结构图以及热电偶埋入位置

Fig.2 Thermocouple measurement of results

表1 热电偶测温度数

Tab.1 Thermocouple measurement of results

编号	插入深度 /mm	读数 /℃	编号	插入深度 /mm	读数 /℃	编号	插入深度 /mm	读数 /℃
a	1 550	154	g	315	113	m	315	160
b	3 250	215	h	195	64	n	195	81
c	4 550	9	i	315	145	o	315	100
d	4 550	470	j	195	70	p	195	54
e	3 250	458	k	315	158	q	315	71
f	1 550	345	l	195	80	r	195	48

表 2 耐材导热系数

Tab.2 Thermal conductivity of refractory materials

材火材料	温度 t/℃					
	室温	100	300	600	800	1 100
半石墨碳砖	11.95	12.1	12.9	13.87	13.87	13.87
微孔炭砖	10.87	11.13	12.04	14.36	15.34	15.34
刚玉莫来石转	4.48	4.48	4.48	4.46	5.08	5.08

(1)简化炉底结构图，如图 3。

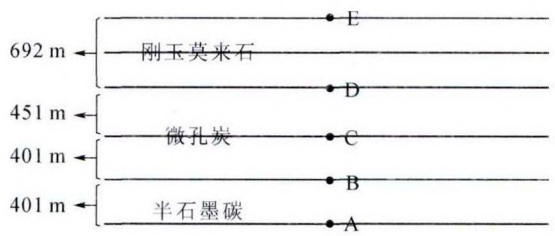

图 3 炉底结构简化图

Fig.3 Simplified diagram of the bottom structure

将表，编号 a、b、c、d、e、f 热电偶的测温读数代入式(1)，通过一系列计算，得到：

已知：T_A=10 ℃，T_C=470 ℃。

取：λ_1=12.5 W/(m·℃)，λ_2=13 W/(m·℃)。

可得：

$$\lambda_1(T_B-T_A)/\Delta x_1=\lambda_2(T_C-T_B)/\Delta x_2$$

即，

$$12.5\cdot(T_B-10)/0.401=13\cdot(470-T_B)/0.401$$

解得：T_B=245 ℃，q=7 325 W/(m²·℃)。

取 λ_3=14 W/(m·℃)，解得 ΔT=236 ℃。

故：T_D=236+470=706(℃)

取 λ_4=5 W/(m·℃)，取最内层温度为 1 150 ℃，解得 Δx=0.303。

故：L=0.303+0.451+0.401+0.401+0.436

=1.992(m)<2.381 m。

所以炉底中心(4 550 mm)处已被侵蚀，炉底炭砖残存厚度为 1.992 m。

同理，解得：

炉底(3 250 mm)处已被侵蚀，炉底炭砖残存厚度为 2.339 m。

(2)炉缸侧壁计算简化如图 4。

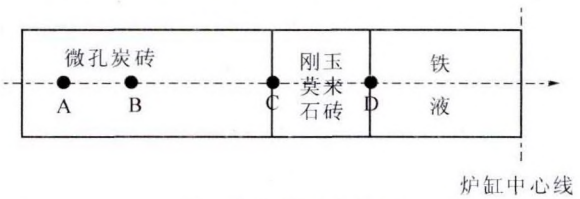

图 4 炉缸侧壁简化图

Fig.4 Simplified diagram of the side wall of the hearth

将表(1)编号 g、h、i、j、k、l、m、n、o、p、q、r 热电偶的读数代入式(4),通过一系列计算,解得:

标高 6 123 mm 处,已知 A、B 两点是热电偶插入点,读数由表 1 得

已知 T_A=64 ℃、T_B=113 ℃,

R_A=4 550+195=4 335(mm);

R_B=4 550-315=4 235(mm);

R_C=4 550-1 325=3 225(mm);

R_D 初 =4 550-1 325-500=2 725 mm。

解得:T_C=554 ℃。

由于 C 点处是微孔炭砖与刚玉莫来石砖的交界面,假设点 D 温度为 1 150 ℃等温线位置,那么对于 D 点的位置求解需要用到公式(7),得到通过 A、B 两点的热流量 = 通过 C、D 两点的热流量。所以:

$$Q_{AB}=2\pi\lambda_1 l(t_A-t_B)/(\ln r_B-\ln r_A)$$
$$=2\pi 1\cdot 11\cdot(64-113)/(\ln 4\,235-\ln 4\,335)$$
$$Q_{CD}=2\pi\lambda_2 l(t_C-t_D)/(\ln r_D-\ln r_C)$$
$$=2\pi 1\cdot 5\cdot(554-1\,150)/(\ln r_D-\ln 3\,225)$$

由:

$$Q_{AB}=Q_{CD}$$

解得:R_D=2 841 > 2 725 mm,表明炉缸已被侵蚀,耐火砖残厚 L=4 550-2 841=1 709(mm)。

同理解得:

标高 6 469 mm 处 R_D=3 084 > 2 725 mm,表明炉缸已被侵蚀,耐火砖残厚 L=4 550-3 084=1 466 mm。

标高 6 815 mm 处 R_D=3 103 > 2 725 mm,表明炉缸已被侵蚀,耐火砖残厚 L=4 550-3 103=1 447 mm。

标高 7 161 mm 处 R_D=3 109 > 2 725 mm,表明炉缸已被侵蚀,耐火砖残厚 L=4 550-3 109=1 441 mm。

标高 7 908 mm 处 R_D=2 792 > 2 725 mm,表明炉缸已被侵蚀,耐火砖残厚 L=4 550-2 792=1 758 mm。

标高 9 111 mm 处 R_D=2 170 < 2 725 mm,表明炉缸未被侵蚀,耐火砖残厚 L=4550-1 325-500=2 725 mm。

即,炉缸侵蚀结果如图 5。

图中黄线为最初内衬边界,即原始边界;图中红线为炉缸侵蚀后的内衬边界,即遭受侵蚀之后的边界。

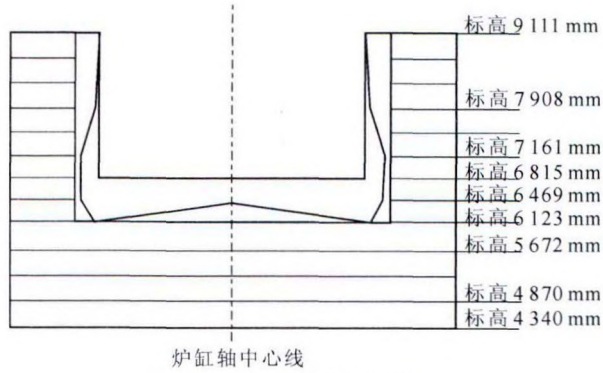

图 5 炉缸侵蚀结果图

Fig.5 Hearth erosion result diagram

5 结论

(1)两点法适用于一维传热过程,相比较有限元法,边界元法,有限差分法的其他算法,两点法计算简单迅速。但是它不能准确计算高炉炉缸炉角的侵蚀程度,所以此方法计算结果存在一定误差,模型有待改进提高。

(2)高炉炉缸、炉底大范围遭受侵蚀,各部分侵蚀程度不一,主要侵蚀部位在出铁口中心线下方,也就是标高 6.123~7.161 m,侵蚀状况较严重。

(3)炉缸、炉底侵蚀未涉及炉内砖衬,侵蚀部位主要发生在刚玉莫来石砖,未曾侵蚀到炉内碳砖。

参考文献:

[1] 陈良玉. 高炉炉缸内衬侵蚀分析与检测新技术综述 // 2007 年中小高炉炼铁学术年会[C]. 北京:中国金属学会炼铁分会,2007:13-16.

[2] 张艳允. 邯钢 5 号高炉炉缸炉底砖衬侵蚀模型 [J]. 钢铁研究,2002(4):10-12.

[3] 周莉英,王平,李家新,等. 马钢新 1 号高炉炉缸侵蚀模型的在线应用[J]. 冶金自动化,2005,29(2):25-30.

[4] 韩行禄. 耐火材料应用[M]. 北京:冶金工业出版社,1980.

[5] 赵润思. 炼铁工艺设计原理[M]. 北京:冶金工业出版社,1988.

[6] 杨尚宝. 北京科技大学学报[J]. 北京:冶金工业出版社,1988.

(上接第 84 页)

[3] 陈跃程,刘伟. 铸件清理打磨自动化技术及其应用[J]. 铸造设备与工艺,2015(5): 1-6.

[4] 王成军,沈豫浙. 应用创造学[M]. 北京:北京大学出版社,2010.

[5] 傅骏,魏继业,周杰,等. 基于 TRIZ 矛盾矩阵的快速熔模铸造工艺开发与实践[J]. 铸造技术,2016,37(2):380-383.

[6] 吴卫东,闫双颖,李德根,等. 基于 TRIZ 轮式机器人驱动轮的研究[J]. 机械设计,2011,28(5): 34-37.

[7] 夏文涵,王凯,李彦,等. 基于 TRIZ 的管道机器人自适应检测模块创新设计[J]. 机械工程学报,2016,52(5): 58-67.

[8] 杨廷力,刘安心,罗玉峰,等. 机器人机构拓扑结构设计[M]. 北京:科学出版社,2012.