

汽雾冷却条件下转炉炉体瞬态温度场

李晓燕¹, 林 恒²

(1. 高等教育出版社 自然科学出版中心 学术期刊分社, 北京 100029;
2. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘 要: 通过有限元方法, 对汽雾冷却条件下大型转炉炉体瞬态温度场进行了三维有限元仿真分析及宝钢 300 t 大型转炉热电偶数据实测, 研究了该条件下炉体瞬态温度场的分布及变化规律. 实测的炉壳温度及其变化规律与有限元仿真结果吻合较好, 证实了炉体瞬态温度场有限元分析的可信性. 研究结果表明, 汽雾冷却条件下炉壳温度呈锯齿形波动(降温速度快, 升温较慢), 平均降温速度为 2~2.5 °C/min. 运用汽雾冷却技术, 可将炉壳温度控制在材料热蠕变温度(约 400 °C)以下, 有效抑制了炉壳热蠕变变形.

关键词: 转炉; 汽雾冷却; 瞬态温度场; 有限元方法

中图分类号: TK 124

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2009)06-0727-05

为提高钢的品质和延长炉龄, 目前转炉(BOF)炼钢普遍采用了高的出钢温度、广泛使用镁碳砖炉衬以及溅渣护炉等技术, 但这些工艺及技术的应用也导致了炉壳温度升高、变形加剧, 给设备和生产安全带来了隐患. 改善炉壳钢抗热蠕变性能以及强化换热、降低炉壳温度, 都是解决此问题的有效途径.

雾化水射流强化对流传热作为一种传热强化技术, 亦被应用到转炉炉体冷却领域. 例如, 英国 Hi-vap 转炉炉体汽雾冷却系统^[1-2]. 炉体雾化水射流传热的实质是通过雾化装置将冷却水离散为液滴群, 并使这些液滴以一定的速度射向待冷却的热炉壳表面, 在液滴与热壁之间发生换热以达到降低热表面温度的目的. 由于雾化水射流强化传热物理过程的复杂性以及影响因素的多变性, 这种强化传热评价既不能用纯粹数学方法推导理论公式, 也很难从经验资料外推^[3-4]. 因此, 作者针对转炉炉体特定条件下的雾化水射流强化传热时炉体瞬态温度场进行了仿真和试验研究, 分析其分布及变化规律, 为控制炉壳温度、有效抑制炉壳热蠕变变形提供依据.

1 汽雾冷却条件下炉体三维瞬态温度场模型

1.1 几何模型

忽略出钢口对结构的影响, 转炉炉体基本结构为回转的大型冶炼容器, 可认为炉体是中心对称的, 炉体上的一些主要附属结构关于平面对称, 如下水平托架(呈正三角形分布的三点支撑)和上/下止动托架(焊接于耳轴轴线平面内托圈上下缘对应的炉壳表面上)等结构关于出钢口纵截面对称. 为有效模拟转炉炉体汽雾冷却的换热特性, 即喷雾冷却过程中因喷嘴布置非均匀及冷却区域内冷却强度变化等影响因素造成的炉壳受冷区域温度场的非均匀性, 建立了以出钢口纵向对称面所截得的二分之一炉体为研究对象、平面对称的三维有限元分析模型.

1.2 材料特性

转炉炉壳材料选为 SM41CN, 炉衬分为工作层和永久层. 永久层为镁砖, 工作层由镁碳砖构成. 这些材料的物理性能参数列于表 1 及图 1 中.

收稿日期: 2009-04-10.

作者简介: 李晓燕(1972-), 女, 宁夏银川人, 编辑.

表 1 材料物理性能参数和常量

Table 1 Physical parameters and constants of the BOF materials

材质	$\rho/$ ($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)	μ	E/GPa	热膨胀系数 $\gamma/$ ($10^{-6}\cdot\text{C}^{-1}$)	导热系数 $\lambda/$ ($\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{C})^{-1}$)	比热容 $c/$ ($\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{C})^{-1}$)
工作层镁碳砖	2.910	0.10				
永久层镁砖	2.450	0.11	图 1(a)	图 1(b)	图 1(c)	图 1(d)
炉壳 SM41CN	7.850	0.30				

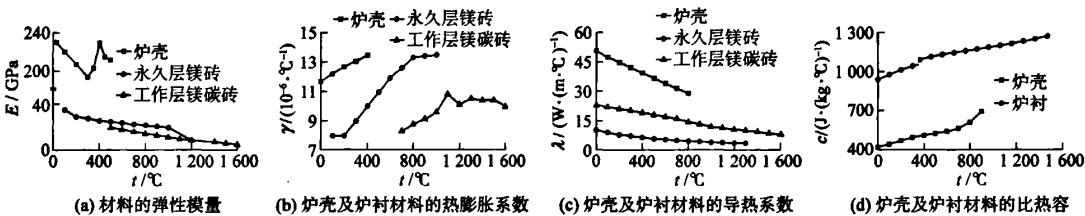


图 1 炉壳及炉衬材料特性曲线

Fig.1 Material characteristic curves of the BOF shell and lining refractories

1.3 边界条件

工作层内壁直接与钢水接触,导致温度有波动,但这种波动对工作层深层、永久层及炉壳温度分布的影响可以忽略不计^[5]. 因此,在不影响仿真精度的前提下,将工作层内壁的边界条件简化为第 1 类边界条件,即设定工作层内壁为恒温(其值等于冶炼过程中钢水的平均温度 1 600 ℃).

炉壳外表面与周围环境的热交换是通过 2 种途径实现的,即对流换热和辐射换热. 因炉壳表面的温度一般不是很高(约 200~400 ℃),所以辐射换热所占的比重较小,炉壳的散热主要是通过与环境空气的对流换热实现的. 因此,在仿真计算时将炉壳外表面作第 3 类边界条件处理,考虑对流换热系数和辐射换热系数.

对于采用雾化水射流强化传热的炉壳部位(被托圈包围的炉身及上炉锥等部位),其对流换热系数为^[5]

$$\alpha = a\omega^b t_s^c H^d \Delta \tag{1}$$

式中, α 为换热系数($\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{C})$); ω 为液流密度($10^{-3}\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{s})$); t_s 为试验钢板的表面温度($^{\circ}\text{C}$); H 为试验钢板与挡板间距离(m); a 、 b 、 c 、 d 为经验公式参数, $a = 8.38 \times 10^5$, $b = 1.21$, $c = -1.39$, $d = 2.7$; Δ 为算子, $\Delta = [0.05 + (0.14 - H)^2]^{-2.2}$.

2 汽雾冷却条件下炉体三维瞬态温度场的研究

运用 ANSYS 对汽雾冷却条件下炉体三维瞬态温度场进行分析. 首先,建立转炉炉体在空气自然对流换热条件下炉体稳态温度场,为雾化水射流冷却仿真建立初始温度场;其次,仿真单次喷雾冷却周期的炉体温度场的变化;最后,进行喷雾系统周期工作情况下炉体温度场变化的模拟.

2.1 初始温度场的建立

在自然对流换热条件下,有限元模型的边界条件确定为:炉衬内表面为第 1 类边界条件——给定温度 1 600 ℃;炉壳外表面考虑对流和辐射,按第 3 类边界条件处理^[6-8].

炉壳外表面在不同纵截面处温度分布如图 2 所示. 可见,初始态下炉壳外表面环向温度变化不大,而

沿炉体高度方向温度有较大波动。炉锥以及托圈对应的炉身部位工作温度很高,超过炉壳材料的蠕变温度(约 400 ℃),这也是工程实际中此 2 部位炉壳蠕变变形严重的原因。因此,必须强化这 2 部分炉体的传热,而其他部位的炉壳,即使是在空气自然对流的换热条件下,其温度也低于材质热蠕变温度。

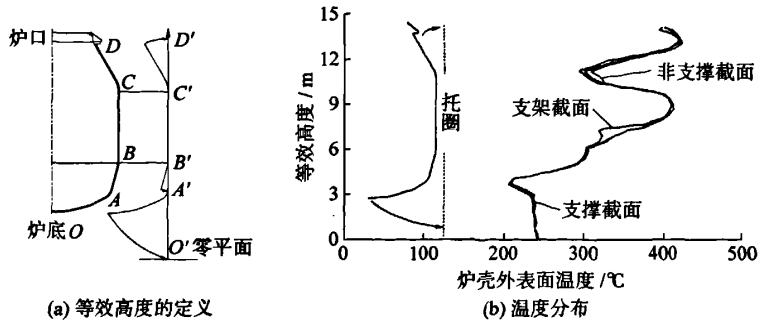


图 2 空气自然对流换热条件下炉壳外表面不同截面温度分布

Fig.2 Distribution of the shell temperature under the condition of natural convection heat transfer

2.2 单次喷雾冷却周期的炉体温度场

以上述炉体初始温度场为基础,进行单次强制喷雾冷却温度场仿真。喷雾冷却条件下的炉壳表面存在强迫对流和辐射 2 种形式的换热,按第 3 类边界条件处理。对流换热系数的确定比较复杂,按下述步骤进行:

1) 由喷嘴布置及射流方向结合雾化水射流液流密度分布规律,确定不同炉壳部位的液流密度^[5]。

2) 按实验公式(1)计算强迫对流换热系数。

热壁温度 T_w 在计算中是随时间变化的,本文按分段逼近设置多个载荷步的方法来处理。仿真时间长度为一个冶炼作业的吹炼时间——15 min。

以支架中心纵截面炉壳外表面温度分布为例,对比其喷雾冷却前后的变化(如图 3 所示),可见冷却区域内的炉壳温度得到了有效的控制,炉壳温度降到了炉壳材料的热蠕变温度(约 400 ℃)以下。

在炉身和炉锥冷却区分别选取 a 、 b 两点,记录它们的温度变化过程,如图 4 所示。可见,冷却的效果明显,温度降低速率高。在 15 min 的冷却过程中,炉壳温度由最初的高于 400 ℃,迅速降低到喷雾降温结束前的 350~360 ℃;冷却初始时炉壳温度降低速率最快,达到 7~10 ℃/min,最后稳定在 2~3 ℃/min,平均冷却速率约 3.8 ℃/min。

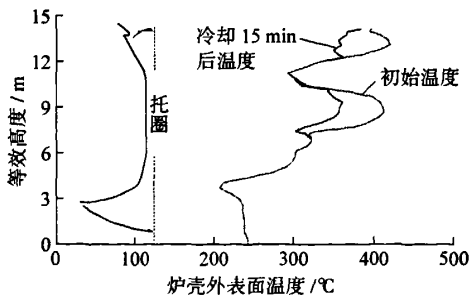


图 3 喷雾冷却前后炉壳外表面温度分布对比

Fig.3 Comparison of the temperature distribution before and after spraying cooling

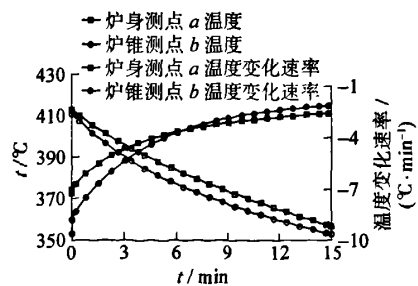


图 4 喷雾冷却过程中炉壳外表面温度变化及降温速度

Fig.4 The shell temperature variation and cooling speed during spraying cooling

2.3 周期性喷雾冷却时炉体温度场

计算中假定喷雾系统的工作周期为:喷雾冷却时间 15 min,非喷雾时间为 35 min. 图 5 是本次炉体瞬态热模拟过程中测点 a 、 b 温度变化历程.

A 代表高温危险状态. 由于炉壳长时间未得到强制冷却,传热主要依靠空气自然对流换热,导致炉壳处于高温状态——被托圈包围的炉身及炉锥处的炉壳温度高于材料热蠕变温度.

AB 代表启动汽雾冷却系统对炉体进行冷却的过程. 冷却时间 15 min,炉壳温度迅速降低,体现了炉体汽雾系统很高的冷却效率.

BC 代表因进行出钢、倒渣、加废钢及兑铁水等操作转炉处于不断的倾动状态. 安全起见,此阶段停止喷雾,炉壳温度上升.

C、D、E、F、G 代表从 A 点之后喷雾系统进入稳定的工作状态,经过若干次冷却过程,炉体冷却达到稳定冷却状态. 此时,炉壳平均温度降低速率为 $2\sim 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,冷却区炉壳温度被控制在 $320\sim 380\text{ }^{\circ}\text{C}$.

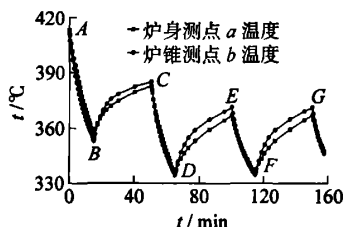


图 5 炉壳外表面温度变化曲线

Fig. 5 Temperature variation curves of the BOF shell outer surface

3 汽雾冷却条件下炉体瞬态温度实测

统计分析宝钢 300 t 转炉汽雾冷却系统预埋在炉壳冷却区的热电偶所测温度信号^[5],得到如下实测结论:

1) 当汽雾冷却系统正常工作时,测点温度呈现周期波动,实测炉壳温度为:炉身 $300\sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$,炉锥 $250\sim 360\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2) 测点温度平均变化速率在 $1.5\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 范围内,某些测点瞬时最高温度降低速率可达 $4.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

可见,实测的炉壳温度及其变化规律与仿真所得结论吻合较好. 二者的差异主要由如下 2 方面因素引起:一方面,计算中选用的喷雾冷却频率为整个炉役期内的平均值,而实际生产中喷雾系统的工作频率有变化;另一方面,真实炉体结构中,耐火材料间因接触间隙等产生的热阻会影响温度的传导,而这些在计算中很难准确模拟.

4 结论

1) 喷雾强制冷却是降低转炉炉壳温度的有效措施,周期性喷雾冷却状态下,冷却区炉壳的温度变化呈锯齿形波动,且降温较快,升温较慢. 在稳定的冷却状态下炉壳平均温度降低速率约 $2\sim 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,说明汽雾冷却的效率很高.

2) 在稳定的周期性喷雾冷却状态下,炉壳温度可得到很好的控制——托圈对应炉壳温度可控制在 $320\sim 370\text{ }^{\circ}\text{C}$,炉锥炉壳温度为 $330\sim 380\text{ }^{\circ}\text{C}$,其余部位的炉壳温度与空气自然对流换热时的温度基本一致(低于 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$),保证了炉壳温度低于其材料的热蠕变温度,可有效抑制炉壳热蠕变变形.

参考文献:

- [1] GOODMAN N J, BROWN D. Development of the hi-vap BOF cooling system[J]. Iron and Steel Engineer, 1993, 70(11): 52-55.
- [2] METALS K. Hi-vap cooling for increased BOF vessel life[J]. Steel Times, 1997, 21(10): 42-44.
- [3] BREZNY B. Effects of comolded brick on thermomechanical stresses in BOF lining [C] // Steelmaking Conference

- Proceedings. Chicago: Iron & Steel Society, 1994, 77: 499-504.
- [4] MORALES R D, LOPEZ A G, OLIVARES I M. Heat transfer analysis during water spray cooling of steel rods[J]. ISIJ International, 1990, 30(1): 48-57.
- [5] 林恒. 大型转炉炉体汽雾冷却机理及功效的研究[D]. 北京: 北京科技大学机械工程学院, 2002.
- LIN Heng. The mechanisms and effects of spray cooling of large converter[D]. Beijing: School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, 2002. (in Chinese)
- [6] 杨世铭. 传热学基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [7] ECKERT E R G, GOLDSTEIN R J. 传热学测试方法[M]. 蒋章焰, 何文欣, 陈文芳, 译. 北京: 国防工业出版社, 1987.
- [8] 顾维藻, 神家锐, 马重芳, 等. 强化传热[M]. 北京: 科学出版社, 1990.

The Distributions and Variations of the Instant-temperature-field of BOF During Spraying Cooling

LI Xiao-yan¹, LIN Heng²

(1. Journal Division of Natural Sciences, Academic Publishing Center, Higher Education Press, Beijing 100029, China;

2. School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: The distributions and variations of the instant-temperature-field of BOF during spray cooling have been studied. The instant-temperature-field FEA model for the converter has been established. Compared with the measured thermocouple data from 300 t Furnace of Bao Steel. FEA model reliability has been validated. It is found that the shell temperature line is a zigzag line: it goes down fast, then goes up slowly. The average cooling velocity is 2~2.5 °C/min. With spraying cooling system, the shell temperature can be controlled under material's creeping temperature (about 400 °C).

Key words: basic oxygen furnace(BOF); spraying cooling; the instant-temperature-field; FEA

(责任编辑 梁洁)