

高炉渣皮厚度的传热分析

刘增勋^{1,2}, 吕 庆²

(1. 东北大学材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 河北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山 063009)

摘 要:通过有限元软件 ANSYS 建立高炉冷却壁三维传热模型, 利用单元生死技术创立渣皮熔化迭代方法, 分析稳态下工艺参数对渣皮厚度的影响。分析结果表明: 高炉内炉气温度对渣皮厚度的影响最显著, 而冷却水水速影响很小; 降低冷却壁气隙宽度可以有效改善高温炉气下的挂渣情况; 冷却壁上的渣皮厚度与冷却壁热电偶测定点温度及热负荷之间存在明显的对应关系。采用熔化迭代方法建立的数学模型优化了冷却壁传热分析, 能够直接计算不同条件下高炉冷却壁上渣皮厚度。

关键词:高炉; 渣皮; 传热分析; 冷却壁; 热负荷

中图分类号: TF534.3 文献标识码: A 文章编号: 1004-7638(2008)03-0051-04

Heat Transfer Analysis for Slag Skull Thickness of Blast Furnace

Liu Zengxun^{1,2}, L Qing²

(1. School of Material and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, Liaoning, China; 2. School of Metallurgy and Energy, Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009, Hebei, China)

Abstract: Three dimensional heat transfer model is presented by finite element software ANSYS. Based on element birth and death technology, an iterative routine for slag skull melting is established to determine effect of process condition on slag skull thickness in steady state. The result shows that BF gas temperature has an obvious influence on slag skull thickness. And cooling water velocity has less effect on it. In higher gas temperature condition, the slag skull thickness is remarkably increased by decreasing the gap width. The slag skull thickness is related obviously to the measured temperature and heat load of cooling stove. The heat transfer analysis is optimized by the iterative routine for slag skull melting in this model. The slag skull thickness on BF cooling stove can be calculated by the established model in different conditions.

Key words: blast furnace; slag skull; heat transfer analysis; cooling stove; heat load

0 引言

在高炉炉腹和炉腰等高温区域, 只有渣皮才是最好的炉衬^[1]。在实际生产中, 渣皮是冷却壁和高温炉气相互作用的结果, 其厚度随着冷却制度、气流分布及冷却壁结构参数等因素改变而变化。现有的传热分析通常是在假设的固定渣皮厚度下计算温度

场^[2-4], 没有考虑工艺条件对渣皮厚度本身的影响, 计算结果的适用性受到一定限制。利用 ANSYS 软件中单元生死技术建立渣皮熔化迭代方法, 通过三维稳态传热计算, 分析冷却制度、气隙宽度和炉气温度对渣皮厚度的影响, 确定冷却壁测量点温度及热负荷与渣皮厚度的关系, 可以直接用于指导高炉工艺操作和完善冷却制度。

收稿日期: 2007-11-28

作者简介: 刘增勋(1966—), 男, 河北新乐市人, 高级工程师, 东北大学博士研究生, 主要从事钢铁工艺的教学和研究。

1 模型的建立

在传热分析中,以450 m³高炉炉役中后期铸铁冷却壁为实体模型。一般情况下,在高炉中后期,高温区域的冷却壁表面衬砖基本上已经被熔蚀。因此在建立的计算模型中,只考虑了铸铁本体内的镶砖,而原有其它耐火砖衬用渣层取代。

为了减少计算量,根据冷却壁结构特点和前人的经验^[5~7],对实体模型进行适当简化。

(1)根据炉腰冷却壁的几何对称特点,以冷却壁的1/4为计算模型。

(2)忽略冷却壁本体的弧度,在直角坐标下建立模型。

(3)忽略材料间的接触热阻,仅考虑水管与壁体间气隙的影响。

(4)所有边界面传热条件均匀一致。

简化后的实体模型如图1所示。选用solid90单元,根据实体特征综合采用自由和扫掠两种方法划分网格,所得有限元模型包括103 867个节点和64 749单元。

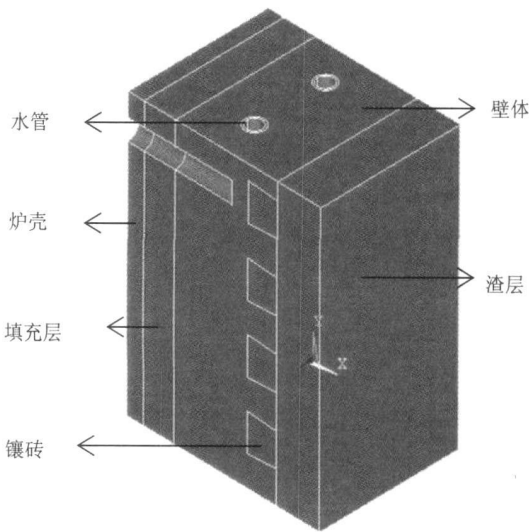


图1 计算用实体模型

Fig. 1 Entity model for analysis

为了方便施加边界条件,把炉壳和填充层纳入模型。冷却水水管内壁、炉壳外侧和炉内渣面均采用第三类边界条件,其它各面根据对称性采用绝热边界^[6]。

冷却水与水管内壁对流传热系数 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 为 $208 + 47.5v$ (式中 v 为冷却水的水速, m/s), 冷却水温度 $30^\circ C$ 。

炉壳与大气间对流传热系数 $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 为 $9.3 + 0.058 t$ (式中 t 为炉壳外侧温度, $^\circ C$), 空气温度 $30^\circ C$ 。

渣皮与炉气对流传热系数为 $232 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$, 炉气温度 $1\ 200 \sim 1\ 500^\circ C$ 。

模型采用稳态传热分析,计算中仅涉及导热系数。表1给出了分析中使用的材料导热系数^[6](除球磨铸铁外,其他材质的导热系数不考虑温度的影响)。

表1 材料的导热系数

Table 1 Thermal conductivity of involved material $W/(m \cdot ^\circ C)$

钢	球墨铸铁	SiC 结合砖	炉渣	填充层	空气
52	42.05-0.026 89 t	14.8	1.2	0.35	0.038 5

2 渣皮融化迭代方法

应用有限元分析软件 ANSYS 进行稳态传热分析,通过单元生死技术模拟渣皮生成,首次建立渣皮融化迭代方法计算冷却壁的温度场。具体分析方法如下:

在高炉冷却壁表面,由于气流和炉料的综合作用,只有温度较低的渣层才能牢固地挂在冷却壁上形成稳定渣皮,而温度较高的渣层因流动性高而脱落。本文中把炉渣能够粘附在冷却壁上的临界温度称为挂渣温度。

在实体模型中,初步选择一个厚度较大的渣层,在选用的边界条件下计算冷却壁及渣层内温度分布。由于最初确定的渣层厚度较大,在高温炉气作用下,渣层与炉气接触区域的温度会很高。如果部分渣层温度超过了挂渣温度,就将模型中对应的单元杀死,渣皮厚度将减少。

根据温度场计算结果,当渣层厚度减少后,重新寻找新的渣壳表面,在相同冷却条件和炉气温度下重新计算,冷却壁和渣层的温度场将相应发生变化。随后,根据温度场结果和挂渣温度重新判断渣层的厚度和渣面位置,再次进行传热分析。如此反复迭代计算,直到渣皮表面单元温度低于挂渣温度,模型计算结束。

3 计算结果与讨论

3.1 炉气温度

渣皮厚度及壁体最高温度与炉气温度的关系如图2所示。计算条件:冷却壁水管与壁体的气隙宽度 $0.8\ mm$ 、挂渣温度 $1\ 150^\circ C$ 。由图2可知,炉气温

度对渣皮厚度和冷却壁工作状况的影响非常显著。当炉气温度由 1 300 ℃ 增加到 1 400 ℃, 渣皮厚度从 69 mm 降低到 13 mm, 铸铁壁体的最高温度由 271 ℃ 升高到 723 ℃。这说明随着冶炼强度提高和喷煤量的增加, 边缘气流发展引起炉衬附近的气流温度进一步升高, 渣皮厚度减少, 将导致冷却壁使用寿命下降。

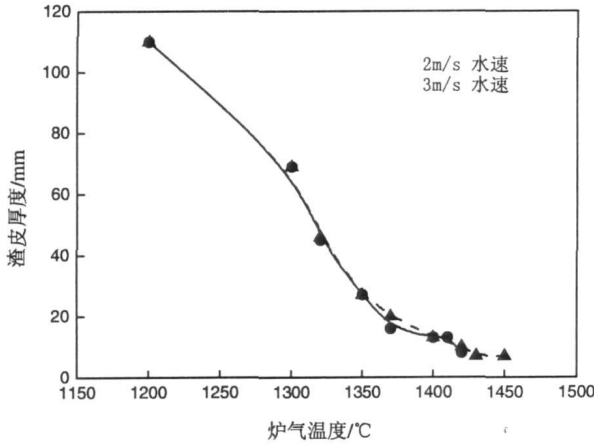


图2 炉气温度和冷却水速对渣皮厚度的影响
Fig. 2 Influence of gas temperature and water velocity on slag skull thickness

3.2 冷却水水速

渣皮厚度与冷却水水速的关系如图 2 所示。计算条件, 气隙宽度 0.08 mm, 挂渣温度 1 150 ℃。结果表明, 炉气温度在计算范围内, 冷却水的流速由 2.0 m/s 提高到 3 m/s, 对渣皮厚度和热负荷的影响都很小。因此, 冷却水与水管间的热阻很小, 不是现用铸铁冷却壁传热的制约因素。冷却水 2 m/s 的水速已经能够满足冷却壁传热需要, 进一步提高水压增加流速, 不会明显改善冷却壁的冷却能力, 对渣皮生长的促进作用很小。

3.3 气隙宽度

气隙宽度由 0.08 mm 降低到 0.04 mm, 渣皮厚度的变化情况如图 3 所示。由图 3 可知, 在炉气温度小于 1 300 ℃ 时, 减少气隙宽度对渣层厚度影响不大。随着炉气温度提高, 气隙宽度作用效果逐渐明显。在气隙宽度 0.08 mm 条件下, 炉气温度达到 1 450 ℃, 渣皮已经消失。当气隙宽度减少到 0.04 mm 时, 炉气温度达到 1 450 ℃ 时仍存在厚度 13 mm 的渣皮, 直到炉气温度提高到了 1 500 ℃ 后渣皮才完全熔化。因此, 在高炉的高温区域, 气隙宽度对渣皮厚度影响较大。

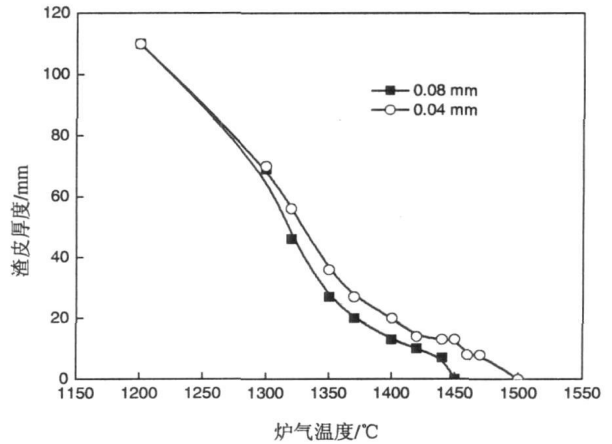


图3 气隙宽度对渣皮厚度的影响

Fig. 3 Effect of gap width on slag skull thickness

3.4 渣皮厚度与热电偶测定点温度的关系

根据不同炉气温度的温度场和渣皮厚度, 归纳出冷却壁测温点的温度与渣皮厚度的关系。在气隙宽度 0.08 mm 和水速 3 m/s 的条件下, 两者的对应关系如图 4 所示。由图 4 可知, 渣皮厚度与冷却壁测温点处的温度存在明显的对应关系。随着测定温度的升高, 渣皮厚度急剧下降。因此在实际操作中, 可以根据冷却壁的测定温度来判断渣皮厚度。同时, 结合图 2 显示的渣皮与和气流温度的关系, 通过测定点的温度也可以判断边缘发展状况。

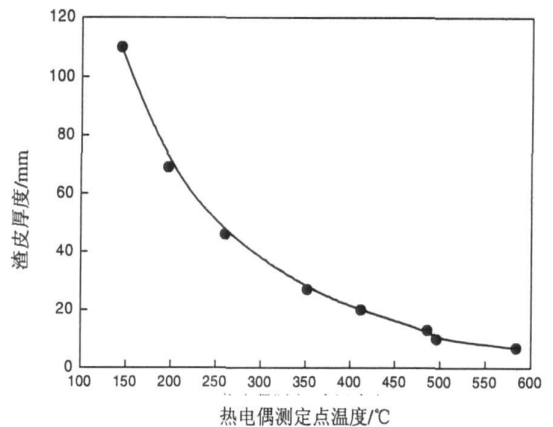


图4 冷却壁测定温度与渣皮厚度的关系

Fig. 4 Relation between measured temperature of cooling stave and slag skull thickness

3.5 渣皮厚度与热负荷的对应关系

根据不同炉气温度下的热负荷和坯壳厚度, 可以总结出热负荷与渣皮厚度的关系。在气隙宽度 0.08 mm 和水速 3 m/s 的条件下, 热负荷与渣皮厚

度的对应关系如图5所示。由图5可知,随着冷却壁热负荷的提高,粘附在冷却壁上的渣皮厚度逐渐减少。温度场计算结果表明,当炉气温度为1450℃时渣皮消失,失去渣皮保护后冷却壁热负荷达到

73 103 W/m²。在高炉生产中,由冷却水流量和温差可以计算冷却壁热负荷,利用热负荷与渣皮厚度的关系可以判断冷却壁上渣皮状态。

4 结论

(1) 高炉边缘炉气温度是影响冷却壁上渣皮厚度的主要因素,水速对促进渣皮生长没有显著作用。炉气温度增加使得冷却壁上渣皮厚度减少,冷却壁承受的热负荷升高。在生产实践中,提高高炉冶炼强度和喷煤量,冷却壁使用寿命降低,而提高冷却强度效果很小。

(2) 铸铁冷却壁水管与壁体间的气隙制约着渣皮厚度和冷却能力,尤其在高炉高温区域影响更明显。由于制作工艺限制和本体结构要求,铸铁冷却壁内气隙必然存在,因此在冶炼强度较高的情况下,不宜用于炉腰和炉腹等高温区域。

(3) 渣皮厚度与热电偶测定温度及热负荷存在明显的对应关系,生产中可以利用其分析结果来判断渣皮的工作状况,以改善高炉操作工艺。

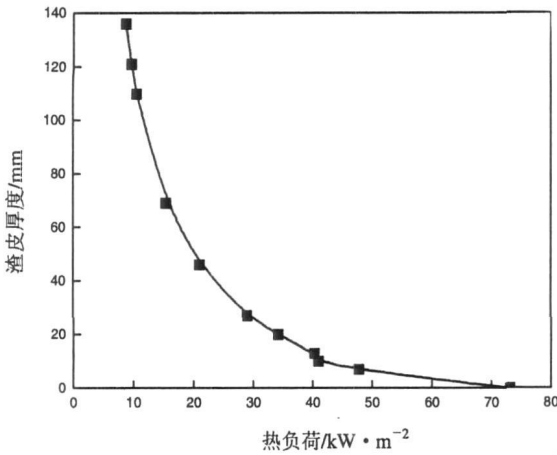


图5 冷却壁热负荷与渣皮厚度的对应关系
Fig.5 Relation between heat load of cooling stove and slag skull thickness

参考文献:

[1] Liu Qi. Adopting Copper Cooling Stave to Prolong BF Campaign[J]. Ironmaking, 2002, 21(2): 6- 10.
(刘琦. 采用铜冷却壁延长高炉炉体寿命[J]. 炼铁, 2002, 21(2): 6- 10.)

[2] Cheng Susen, Yang Tianjun. Application of Heat Transfer Theory in Analysis and Research for Head Load of Blast Furnace Wall[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2002, 14(2): 5- 8.
(程素森, 杨天钧. 高炉炉墙热负荷的传热学分析和研究[J]. 钢铁研究学报, 2002, 14(2): 5- 8.)

[3] Zhang Weijun, Wu Xueqi, Cheng Haigeng, et al. Mathematical Model of Temperature Field for Baoshan steel New No. 4 Blast Furnace Lining and Heat Transfer Analysis[J]. Journal of Northeastern University, 2006, 27(10): 1122- 1125.
(张卫军, 吴雪琦, 陈海耿, 等. 宝钢4号高炉炉衬温度场数学模型及分析[J]. 东北大学学报, 2006, 27(10): 1122- 1125.)

[4] Cheng Susen, Sun Lei, Yang Tianjun. Study on Steady Temperature Field of Cooling Plate and Lining of Blast Furnace[J]. Iron and Steel, 2004, 39(2): 14- 16.
(程素森, 孙磊, 杨天钧. 正常炉况下炉衬和冷却板稳态温度场的研究[J]. 钢铁, 2004, 39(2): 14- 16.)

[5] Deng Kai, Wu Lijun, Cheng Huier, et al. Influence of Structural Parameters on Steady State Highest Temperature and Thermal Stress of BF Cooling Stave[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2004, 25(4): 53- 58.
(邓凯, 吴俐俊, 程惠尔. 结构参数对高炉铸钢冷却壁温度及热应力分布的影响[J]. 钢铁钒钛, 2004, 25(4): 53- 58.)

[6] Xue Qingguo. Study on Heat Transfer in the Wall of Blast Furnace[D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2001.
(薛庆国. 高炉炉墙的传热学研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2001.)

[7] Qian Zhong, Cheng Huier, Wu Lijun. Analysis of the Influence Factors on Heat Transfer and Structure of Cast Steel Cooling Stave in Blast Furnace[J]. Shanghai Metals, 2005, 27(4): 34- 38.
(钱中, 程惠尔, 吴俐俊. 高炉铸钢冷却壁传热和结构的影响因素分析[J]. 上海金属, 2005, 27(4): 34- 38.)