

新型铸钢冷却壁的传热学数值模拟

姚雪峰¹, 彭德其¹, 俞天兰¹, 蒋少青², 支校衡³, 易伟¹

(1. 湖南工业大学 过程装备研究所, 湖南 株洲 412008; 2. 长沙理工大学, 湖南 长沙 410076;
3. 郴州职业技术学院, 湖南 郴州 423000)

摘要: 采用数值模拟的方法对新型铸钢冷却壁稳态温度场进行了数值模拟。计算结果表明: 新型铸钢冷却壁肋板基本磨损后的炉役期内, 即使在渣皮刚脱落时, 其热面峰值温度值也在安全温度范围内; 当热面粘结渣皮厚度为 10 mm 时, 其热面最高温度值只比铜冷却壁高 28 °C, 并且渣皮愈厚相差愈小, 趋于相同。

关键词: 炼铁高炉; 铸钢冷却壁; 长寿; 数值模拟; 流态化

中图分类号: TB35; TK224.9

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2008)03-0095-03

Numerical Simulation Based on Heat Transmission of the Cast-Steel Cooling Stave of New Structure

Yao Xuefeng¹, Peng Deqi¹, Yu Tianlan¹, Jiang Shaoqing², Zhi Xiaoheng³, Yi Wei¹

(1. Research Institute of Process Equipment, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China;
2. Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China;
3. Chenzhou Vocational Technical College, Chenzhou Hunan 423000, China)

Abstract: The steady temperature field of the new cooling stave of cast steel is numerically simulated. The result shows that the maximum temperature of its hot-side, within the service life that fins disappear, is still in the safe range even if the slag on hot side breaks off. And the temperature is merely 28 °C higher than copper cooling stave's when slag of 10 mm thickness is attached to each of them. The temperature difference between them becomes less when the thickness of slag gets thicker, and eventually tiny.

Key words: blast furnace; cast steel cooling stave; long service life; numerical simulation; fluidization

现代炼铁高炉的炉腰、炉腹的水冷壁长寿的关键是靠稳定的渣皮^[1-3], 而不是靠炉衬。铜冷却壁冷却能力强、热面温度低, 能形成 50~150 mm 厚的绝热渣皮。渣皮的存在减小了铜冷却壁热面和冷却介质之间的温度梯度, 从而大大减小了壁体的热应力。渣皮又使冷却壁热面免受煤气流的直接冲刷、下降炉料的磨损、侵蚀因素的侵蚀。因此, 铜冷却壁一代炉役寿命可达 20 年。但是, 铜冷却壁造价高昂, 为防止冷却通道内壁结垢, 铜冷却壁还必需与纯水或软水密闭循环二次冷却系统配套才能实现长寿, 该冷却系统需要增加数千万元的建造费, 每年的运行费用也要数百万元。

本文对新型的铸钢冷却壁^[4,5]稳态温度场进行数值

模拟研究, 使用大型 CFD 软件 Fluent6.2.16 计算, 初步分析的结果表明: 新型铸钢冷却壁的冷却效果、使用寿命可接近于铜冷却壁。

1 新型铸钢冷却壁的长寿原理

新型铸钢冷却壁, 吸取铜冷却壁靠降低热面温度形成渣皮实现长寿的思路, 通过减少热面侧热阻以大幅降低热面温度, 形成稳定的渣皮保护、增强渣皮的抗脱落能力, 进而达到与铜冷却壁同样长寿的目标。

为达到上述目标, 最有效的办法是改进热面侧的传热学结构设计。1) 球墨铸铁冷却壁的铸造过程中, 冷却管表面涂敷的防渗碳剂会生成大的涂层热阻和气

收稿日期: 2007-12-06

基金项目: 湖南省教育厅基金资助项目(06B024, 07D032)

作者简介: 姚雪峰(1978-), 男, 黑龙江延寿人, 湖南工业大学硕士研究生, 主要研究方向为传热强化节能。

隙层热阻,其值占总传热热阻的40%~70%^[6],采用新型铸钢冷却壁后得以根治。2)采用图1所示的螺旋流道结构强化冷却,以当量水力直径 $\Phi 46.6$ mm、冷却水平均温度30℃、冷却水平均流速 u 为1.0 m/s计算,铜冷却壁的对流换热系数 $\alpha_c = 3872.4$ W/(m²·K),而新型铸钢冷却壁 $\alpha_s = 5727.5$ W/(m²·K),对流传热系数提高幅度可达50%;且采用旋液流态化自动除垢、防垢技术^[2],能解决水垢热阻问题,省去软水密闭循环二次冷却系统^[7]。3)减小冷却壁热面一侧的厚度能降低其导热热阻。

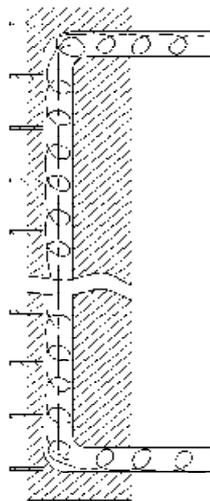


图1 新型铸钢冷却壁结构
Fig.1 The structure of the new cast-steel cooling stove

新型铸钢冷却壁波形热面和水平肋板能有效提高渣皮抗脱落的能力,也能起到双向节流的作用,抑制边缘煤气流过分发展。

2 冷却壁温度场的数值模拟

2.1 建立计算模型

新型冷却壁的计算模型在Fluent前处理软件Gambit中建立。先建立渣皮厚度为0 mm的冷却壁模型,再建立均匀附着3、5、8、15、25和50 mm渣皮的冷却壁模型,以Tet/Hybrid类型单元进行体网格划分。在Fluent中采用三维分离隐式求解器,湍动能和耗散率均采用二阶迎风格式,压力-速度耦合采用SIMPLE算法。

2.2 假设条件

假设计算的模型在宽度和高度范围内炉墙热面附近炉温均匀;各材料的导热系数按所取温度范围计算其平均值;忽略炉壳、填充层、铸钢冷却壁、渣皮相互间的接触热阻;假定冷却水温在整个热传递过程中保持不变,其值取进出口水温的平均值。

2.3 初始条件

根据湘钢2500 m³高炉实际生产中调查的数据,确定炉壳表面温度 T_w 为100℃,炉壳附近的空气平均温度设为30℃,冷却水平均温度设为40℃,冷却壁热面附近的炉气温度为1200℃。

2.4 边界条件

1)炉壳与周围空气的热交换为第三类边界条件,主要包括辐射换热和对流换热,由于炉壳表面温度 T_w 小于300℃,故辐射换热可忽略不计,只需考虑对流换热条件。换热系数为 $h_w = 9.3 + 0.058T_w$ [W/(m²·K)]。

2)冷却水与冷却壁体之间的热交换为第三类边界

条件。冷却水温为40℃,冷却壁和冷却水之间的综合换热系数 $h_{wb} = 1/R$, R 为冷却壁与冷却水之间的总热阻,新型铸钢冷却壁没有气体间隙和防渗碳剂涂层,且因采用旋液流态化技术,可及时在线清洗除垢防垢。因此,在分析中只考虑水管内表面与冷却水间的对流换热热阻 R_a 。当水速为1.0 m/s、平均水温40℃,并考虑旋液流态化强化对流换热时, $h_{wb} = 6306$ W/(m²·K)。

3)冷却壁热面与煤气流之间的热交换为第三类边界条件。在高炉内部,冷却壁的内表面与高温煤气流之间是通过对流方式进行传热的,对流换热系数为 $h_{wb} = 232$ W/(m²·K)^[8]。

4)由于冷却壁之间的布置及结构的对称性,冷却壁四周侧面为绝热边界条件。

5)炉壳、填料层及渣皮四周侧面假定为绝热边界条件。

2.5 物性参数 (见表1)

表1 求解温度场的物性参数表
Table 1 Physical parameters for temperature field solution

材料	ρ /(kg·m ⁻³)	λ /(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	C_p /(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)
炉壳钢板	7840	52	465
填料层	330	0.35	876
铸钢冷却壁	7800	50	500
耐热混凝土	2100	1.8	880
渣皮	2000	1.2	983

3 新型冷却壁与铜冷却壁的温度场比较

在设定初始条件和冷却水流速为1.0 m/s的条件下,冷却壁热面生成不同厚度渣皮层时,计算得到的热面最高温度值如图2所示。

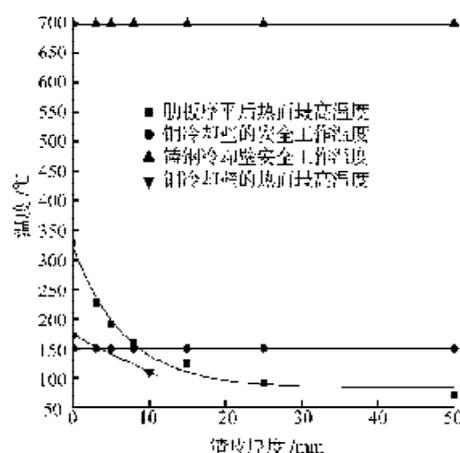


图2 渣皮厚度与冷却壁最高温度的关系
Fig.2 Relationship between slag's thickness and max temperature of cooling stove

图中铜冷却壁温度值,110℃为壁本体厚135 mm、镶砖平均高41 mm、肋高40 mm、肋厚35 mm、热面侧渣皮厚10 mm时数据;165℃为热面无渣皮时的数据^[3]。在峰值热流密度条件下,铜冷却壁的安全工作温

度为 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[9], 铸钢冷却壁为 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[10]。由图2可知, 在渣皮刚脱落时, 新型铸钢冷却壁在肋板完全磨损后的炉役期内, 热面温度仍在安全工作温度以下, 而铜冷却壁的热面温度却超过其安全工作温度。

对热面渣皮脱落至渣皮再生长到 10 mm 厚的过程进行分析比较, 新型铸钢冷却壁在肋板完全磨损后的炉役期内的热面温度高于铜冷却壁, 与渣皮的熔点温度差小于铜冷却壁, 因此, 新型冷却壁热面渣皮生成速度比铜冷却壁慢, 生成相同厚度渣皮层所需时间长。(该过程在其安全温度范围内进行。)

冷却壁的热面同样挂有 10 mm 厚的渣皮时, 新型

铸钢冷却壁热面温度为 $138\text{ }^{\circ}\text{C}$, 与铜冷却壁的温度相近。新型铸钢冷却壁热面最高温度是其安全工作温度的 20% , 而铜冷却壁为 70% 。

进一步的计算分析表明, 随着渣皮厚度的增加, 两种水冷壁的热面温度愈来愈接近。新型铸钢冷却壁同样能在热面形成坚硬的渣皮层^[11]。综合考虑新型铸钢冷却壁的波形面结构比铜冷却壁有更好的抗渣皮脱落能力和抑制边缘气流过分发展的作用, 有理由期望新型铸钢冷却壁具有与铜冷却壁相近的长寿效果。

计算模型网格划分和温度场的模拟结果见图3~图5。

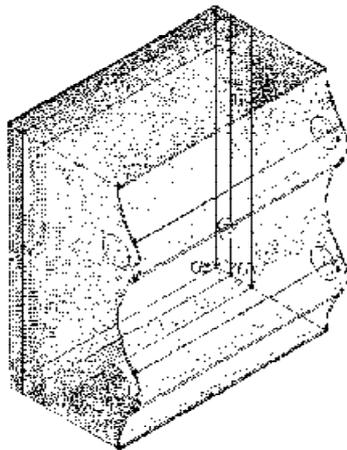


图3 计算模型网格

Fig. 3 Mesh graph of solving model

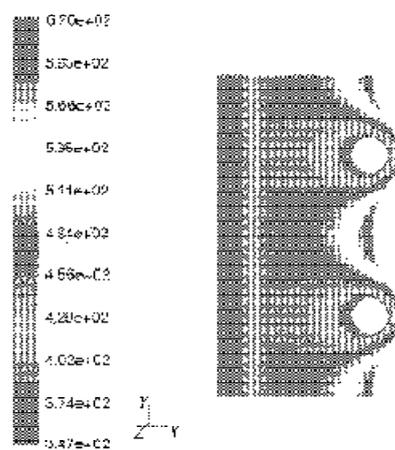


图4 无渣皮时温度场云图

Fig. 4 Contour of temperature without slag on hot surfaces

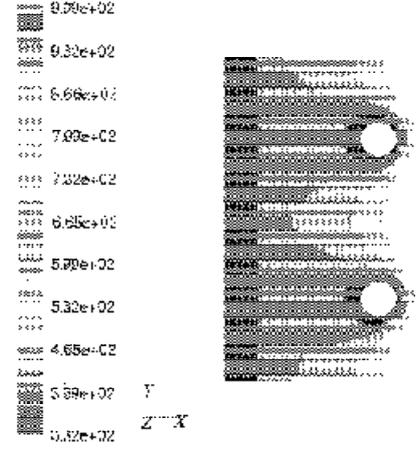


图5 渣皮厚 5 mm 时温度场云图

Fig. 5 Contour of temperature with 5 mm slag on hot surfaces

4 结论

1) 在肋板基本磨损的炉役期内, 新型铸钢冷却壁渣皮脱落后, 重新生成渣皮的速度比铜冷却壁稍慢, 但新型冷却壁的热面温度仍在安全工作温度范围内。

2) 在肋板基本磨损的炉役期内, 当新型铸钢冷却壁热面形成的渣皮厚度为 10 mm 时, 其热面温度比铜冷却壁略高, 但是比新型铸钢冷却壁的安全工作温度低的差值是铜冷却壁的 14 倍; 当新型铸钢冷却壁热面的渣皮厚度大于 10 mm 以后, 比安全工作温度低的差值倍数更大。因此, 有理由期望新型铸钢冷却壁达到与铜冷却壁那样的长寿效果。

参考文献:

- [1] 刘菁. 高炉铜冷却壁的应用及探讨[J]. 钢铁研究, 2001(3): 52-55.
- [2] 王明磊, 李大伟. 济钢5#高炉冷却壁破损分析[J]. 山东冶金, 2001, 23(4): 6-8.

- [3] 柳萌. 现代大高炉薄壁内衬技术[J]. 炼铁, 2001, 20(3): 7-11.
- [4] 彭德其, 蒋少青, 俞天兰, 等. 炼铁高炉低流速螺旋流态化水冷壁[P]. 中国专利: 200520052393.7, 2006-11-22.
- [5] 俞天兰, 俞秀民, 彭德其, 等. 一种炼铁高炉炉体自洁式高效水冷器装置[P]. 中国专利: 200510032356.4, 2007-05-16.
- [6] 周渝生, 曹传根. 铜冷却壁在高炉上的安装和使用[J]. 世界钢铁, 1999(3): 97-105.
- [7] 俞秀民, 吴金香. 管程内循环液固流态化高效换热器研究[J]. 压力容器, 1995(1): 33-36.
- [8] 程素森, 杨天钧, 杨为国, 等. 高炉铜冷却壁传热分析[J]. 钢铁, 2001(2): 8-11.
- [9] 吴启常, 黄晓煜. 高炉长寿技术研究[J]. 鞍钢技术, 2003(2): 1-9.
- [10] 钱中, 程惠尔. 基于ANSYS的高炉铸钢冷却壁传热分析[J]. 钢铁钒钛, 2005(1): 55-59.
- [11] 张士敏, 王东升. 无热阻新型铸钢冷却壁的研制和应用[J]. 钢铁, 2002(1): 14-18.

(责任编辑: 廖友媛)