

基于灰色关联度的高炉冷却壁整体优化

吴俐俊, 高秀晶, 王 树

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 基于灰色关联度分析方法, 研究了高炉冷却壁冷却水管半径、冷却水管间距、水管距热面距离、冷却壁壁体厚度等对冷却壁热面最高温度和热应力的影响。综合冷却壁结构优化分析, 得到冷却壁最优结构尺寸组合是: 水管半径 20 mm、水管间距为 220 mm, 水管距热面距离为 90 mm 和冷却壁壁体厚度 125 mm。

关键词: 高炉冷却壁; 灰色关联度分析; 整体优化

中图分类号: TF631

文献标志码: A

Global Optimization of Blast Furnace Cooling Stave Based on Grey Correlation Analysis

WU Lijun, GAO Xiuqing, WANG Shu

(College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Based on the grey correlation analysis, a study was made of the effect of the structural parameters of blast furnace (BF) cooling stave on the highest temperature and the thermal stress of the hot surface. The structural parameters included the radius of cooling water pipes, the space between cooling water pipes, the distance between the cooling water pipes and hot surface and the thickness of stave. Study results show that when the radius of the cooling stave is 20 mm, the space between cooling water pipes is 220 mm and the distance between the cooling pipes is 90 mm as well as the hot surface and the thickness of cooling stave is 125 mm, the cooling stave is optimum.

Key words: blast furnace (BF) cooling stave; the grey correlation analysis; global optimization

炉冷却壁是延长冷却壁寿命的关键。世界各国学者对高炉冷却壁的材料、结构及其性能都进行了研究, 不过大多数都只是讨论冷却壁各因素对高炉冷却壁温度分布的影响^[1-4], 或针对某一特定因素(如冷却壁冷却水管管型)进行讨论^[5-7], 而没有对高炉冷却壁进行整体结构优化。灰色关联度^[8]是灰色数学中的一种方法, 用来研究事物相互关联、相互作用的复杂因素的影响作用, 确定影响事物的本质因素, 使各种影响因素之间的“灰色”关系清晰化。本文采用灰色关联度分析方法, 以冷却壁冷却水管间距、冷却壁冷却水管半径、冷却壁冷却水管中心距热面距离、冷却壁壁体厚度 4 项为优化因素(比较序列), 以冷却壁热面最高温度、热面最大热应力为优化指标(参考序列), 利用灰色系统理论知识, 计算各个比较序列与参考序列之间的关联系数, 再进一步计算各尺寸的关联度, 获得对冷却壁热面优化指标的最大影响因素, 同时也得到了冷却壁优化的尺寸参数最佳组合。

1 高炉冷却壁传热模型的建立与求解

1.1 高炉冷却壁物理模型

选取某钢铁公司高炉铜冷却壁作为研究对象, 冷却壁本体宽为 900 mm, 高为 2 535 mm, 填充层厚度为 50 mm, 炉壳厚度为 50 mm, 耐火材料镶砖梯形尺寸为 52 mm×62 mm, 镶砖间距为 104 mm, 水速为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。高炉铜冷却壁结构图如图 1 所示。

冷却壁各部分材料热物性参数和材料力学性能参数如表 1。

1.2 高炉冷却壁计算模型的边界条件

高炉冷却壁的稳态传热可视为导热问题, 其 3 维稳态导热微分方程为

国内外钢铁企业生产情况证明, 高炉长寿关键之一是实现高炉冷却壁的长寿。因此有效延长高炉冷却壁寿命将大大降低高炉炼铁的成本, 而优化高

收稿日期: 2012-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(50974097)

第一作者: 吴俐俊(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为工程传热及余热利用。E-mail: ljwu@tongji.edu.cn

通讯作者: 高秀晶(1990—), 女, 硕士生, 主要研究方向为工程传热及余热利用。E-mail: jing99man@163.com

表 1 冷却壁材料性能参数

Tab.1 The performance parameters of BF cooling stove's material

| 名称 | 材料 | 热物性参数 | | | 力学性能参数 | | |
|-------|--------|--|--|--|--------------|-----|---|
| | | 密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 导热系数/ ($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$) | 比热容/ ($\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$) | 弹性模量/ GPa | 泊松比 | 线膨胀系数/ $10^{-6} ^\circ\text{C}^{-1}$ |
| 炉壳 | 钢板 | 7 840 | $52.2-0.025 T$ | 465 | 80 | 0.3 | 5.87 |
| 填充层 | 碳化硅捣打料 | 330 | 16.8 | 876 | 15 | 0.1 | 4.70 |
| 冷却壁本体 | 铜冷却壁 | 8 930 | $399-0.055 2 T$ | 386 | 84 | 0.3 | 16.60 |
| 镶砖 | 碳化硅 | 2 640 | 16.8 | 1 000 | 15 | 0.1 | 4.70 |
| 炉渣 | 炉渣 | 2 000 | 1.2 | 983 | 15 | 0.1 | 4.70 |

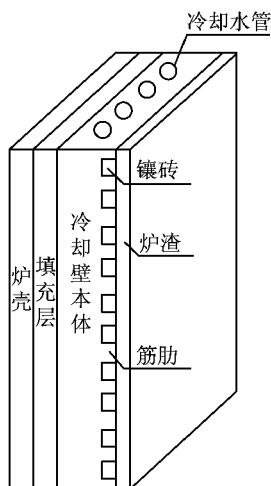


图 1 高炉冷却壁 3 维结构图

Fig.1 Three-dimensional structure graph of BF cooling stove

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

式中: T 为温度, $^\circ\text{C}$; $\lambda(T)$ 表示温度为 T 时的导热系数, $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$; x, y, z 分别为沿冷却壁宽度、高度、厚度的方向。

炉壳与周围空气的热交换为第三类边界条件, 取炉壳外表面与周围空气间的自然换热系数约为 $11 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ [9], 空气温度取 $30 ^\circ\text{C}$ 。冷却水与冷却壁之间的热交换为第三类边界条件, 冷却水温为 $40 ^\circ\text{C}$ 。经计算判断为管内湍流强制对流换热, 冷却水管内表面与水的对流换热热阻计算得出换热系数[10]为

$$h_{wb} = 0.023 v^{0.8} \lambda_w P_r^{0.4} / d_1^{0.2} \nu^{0.8} \quad (2)$$

式中: d_1 为冷却水管当量直径, m ; v 为冷却水管内水流流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; λ_w, ν, P_r 均为冷却水管内水温为 $30 ^\circ\text{C}$ 时水的物性参数。

高炉煤气与冷却壁之间存在着较为复杂的热交换, 即有对流和辐射两种形式的热量交换。当炉气温度为 $1\,200 ^\circ\text{C}$ 时, 炉气与冷却壁热面间的复合对流换热系数取 $232 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ [9]。

冷却壁底端面及顶端面为固定约束, 即冷却壁上端与下端不能移动。冷却壁传热模型的实验验证与文献[10-11]一致。

1.3 基于 ANSYS 软件高炉冷却壁传热模型的求解

采用有限元通用软件 ANSYS 对高炉冷却壁 3 维传热和热应力模型进行计算, 温度场和热应力场计算云图如图 2 和图 3 所示。

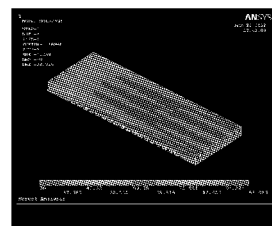


图 2 冷却壁温度分布云图

Fig.2 Temperature distribution nephogram of BF cooling stove

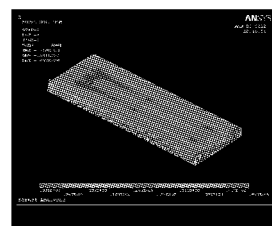


图 3 冷却壁热应力云图

Fig.3 Thermal stress distribution nephogram of BF cooling stove

2 基于灰色关联度的高炉冷却壁整体优化

2.1 灰色关联度及其计算步骤

关联度[12]是事物之间、因素之间关联性大小的量度。它定量地描述了事物或因素之间相互变化的情况, 即变化的大小、方向与速度等的相对性。灰色关联度分析的核心是计算关联度, 计算步骤为原始数据的处理、计算关联系数、求取关联度。

2.2 基于灰色关联度分析的冷却壁结构参数最优组合

高炉冷却壁各结构参数的选取如表 2 所示。

表 2 冷却壁结构尺寸数值选取

Tab.2 The structure parameters of BF cooling stove

| 冷却壁结构 | 尺寸数值选取 | | |
|-----------|--------|------|------|
| | 组合 1 | 组合 2 | 组合 3 |
| 水管半径 | 15 | 20 | 25 |
| 水管间距 | 200 | 220 | 240 |
| 水管中心距热面距离 | 85 | 90 | 95 |
| 冷却壁壁体厚度 | 125 | 135 | 145 |

表 3 高炉冷却壁参数组合及模拟结果

Tab.3 The combination of test parameters of BF cooling stove model and the simulation results

| 序号 | 圆管半径/mm | 水管间距/mm | 距热面距离/mm | 壁体厚度/mm | 热面最高温度/℃ | 热面最大热应力/MPa |
|----|---------|---------|----------|---------|----------|-------------|
| 1 | 15 | 200 | 85 | 125 | 107.4 | 69.1 |
| 2 | 15 | 220 | 90 | 135 | 98.1 | 62.6 |
| 3 | 15 | 240 | 95 | 145 | 98.9 | 56.9 |
| 4 | 20 | 220 | 85 | 145 | 86.5 | 51.1 |
| 5 | 20 | 240 | 90 | 125 | 88.8 | 53.8 |
| 6 | 20 | 200 | 95 | 135 | 96.9 | 58.3 |
| 7 | 25 | 240 | 85 | 135 | 81.0 | 50.8 |
| 8 | 25 | 200 | 90 | 145 | 89.1 | 53.5 |
| 9 | 25 | 220 | 95 | 125 | 83.3 | 52.9 |

通过比较可知,冷却壁距热面距离与冷却壁最高温度的关联度 $r_{13}=0.800$ 最大,说明在各个结构影响因素当中,优化冷却壁管中心距热面的距离对母数列的影响最大,是整个优化冷却壁方案的首选。

由灰色系统理论可知,灰色关联度越大,该因素对母序列的影响就越大。由冷却壁结构因素的 3 个水平的各个关联系数可求出各个水平的平均关联度。利用平均关联度的大小比较,就可知哪个水平对母序列影响最大,此水平为最佳水平。进而求出整个最佳水平的组合,为最优组合。

冷却壁水管半径中各个水平与冷却壁最高温度和最大热应力的关联度,计算结果为 $R=20$ mm 时平均关联度最大,为 0.826,故冷却壁水管半径优化结构尺寸取 $R=20$ mm;冷却壁水管间距 L_{04} 各个水平与冷却壁最高温度和最大热应力的关联度,计算结果为当 $L_{04}=220$ mm 时平均关联度最大,为 0.730,故优化结构尺寸取 $L_{04}=220$ mm;冷却壁水管距热面距离中各个水平与冷却壁最高温度和最大热应力的关联度,计算结果为 $L_{05}=90$ mm 时平均关联度最大,为 0.841,故冷却壁水管距热面距离优化结构尺寸取 $L_{05}=90$ mm;冷却壁壁体厚度 H_{03} 中各个水平与冷却壁最高温度和最大热应力的关联度,

冷却壁结构参数选取的是四因素和三水平,若按全排列组合须做 $3^4=81$ 次计算,计算量较大。因此,采用正交实验设计方法来设计实验方案采用的四因素三水平的正交表,如表 3 所示。

关联度计算结果如下: $r_{11}=0.524, r_{12}=0.679, r_{13}=0.800, r_{14}=0.744, r_{21}=0.568, r_{22}=0.703, r_{23}=0.789, r_{24}=0.763$ 。

由此可见,各因素对高炉冷却壁热面最高温度最大热应力的影响是相同的,由大到小的顺序是水管距热面的距离、冷却壁壁体厚度、水管间距、水管半径。

计算结果为当 $H_{03}=125$ mm 时平均关联度最大,为 0.771,故冷却壁壁体厚度优化结构尺寸取 $H_{03}=125$ mm。

综上所述,最佳冷却壁结构优化尺寸组合为水管半径 $R=20$ mm,水管间距 $L_{04}=220$ mm,水管中心距热面距离 $L_{05}=90$ mm,冷却壁壁体厚度 $H_{03}=125$ mm。

3 优化冷却壁与现有冷却壁的性能比较

为了比较优化前后冷却壁的性能,基于实验已验证的高炉冷却壁传热模型,采用 ANSYS 软件进行计算,两种冷却壁的材质及边界条件取相同的情况,计算结果如表 4 所示。

从表 4 可以看出,优化后的冷却壁比现有冷却壁的性能有一定幅度的提高,即热面最高温度降低了 22.7%,热面最大热应力降低了 29%。

4 结论

本文建立了高炉冷却壁 3 维传热稳态数学模

表 4 优化冷却壁与现有冷却壁性能比较

Tab.4 The performance comparison of the optimized and the currently available BF cooling stave

| 冷却壁类型 | 尺寸参数 | | | 计算结果 | | |
|-------|-------------|-------------|------------------|----------------|--------------|-----------------|
| | 水管半径/ mm | 水管间距/ mm | 水管中心距热面 距离/mm | 冷却壁壁体 厚度/mm | 热面最高温度/ ℃ | 热面最大热 应力/MPa |
| 优化冷却壁 | 20 | 220 | 90 | 125 | 85.3 | 51.5 |
| 实际冷却壁 | 15 | 200 | 95 | 135 | 110.4 | 72.6 |

型,采用正交试验设计法安排实验,运用灰色关联度分析方法对高炉冷却壁进行整体优化,其主要结论如下:

(1)根据灰色系统理论计算,各个因子所对应的最佳结构尺寸水平分别是水管半径 $R=20$ mm,水管管间距 $L_{04}=220$ mm,水管中心距热面距离 $L_{05}=90$ mm,冷却壁壁体厚度 $H_{03}=125$ mm.

(2)高炉冷却壁各个结构因素对冷却壁最高温度和最大热应力的影响是同步的,当冷却壁的结构变化导致冷却壁热面最高温度发生变化时,冷却壁最大热应力也会发生同样的变化,反之亦然.

(3)对于高炉冷却壁热面最高温度和最大热应力影响最大的依次为:水管距热面的距离,其次是冷却壁壁体厚度,再其次是水管间距,最后是水管半径.

(4)在各个影响冷却壁热面最高温度和最大热应力的结构因素当中,优化冷却壁水管距热面的距离对母数列的影响最大,是整个优化冷却壁方案的首选.

参考文献:

- [1] 吴樊林,王立民,刘述临.高炉冷却壁和炉衬的三维传热模型[J].钢铁,1995,30(3):4.
WU Maolin, WANG Limin, LIU Shulin. Three-dimensional heat transfer model for stave and lining of blast furnace[J]. Iron and Steel,1995,30(3):4.
- [2] 程素森,薛庆国,苍大强,等.高炉冷却壁的传热学分析[J].钢铁,1999,34(5):11.
CHENG Susen, XUE Qingguo, CANG Daqiang, et al. Heat transfer analysis of blast furnace stave[J]. Iron and Steel, 1999,34(5):11.
- [3] 钱中,程惠尔,吴俐俊.基于热态实验的冷却壁传热分析[J].钢铁,2006,18(5):10.
QIAN Zhong, CHENG Huier, WU Lijun. Heat transfer Analysis of cooling stave based on thermal state experiment [J]. Iron and Steel, 2006,18(5):10.
- [4] Steiger R W, Braun R E, Grundtisch D P. Utilization of computer analysis in blast furnace refractory lining and shell design[C]//Ironmaking Conference Proceedings. Detroit: Iron and Steel Society of AIME, 1985,44: 485-504.
- [5] 吴俐俊,程惠尔,钱中,等.冷却水管管形变化下的高炉冷却壁传热分析[J].钢铁,2005,40(5):14.
WU Lijun, CHENG Huier, QIAN Zhong, et al. Heat transfer analysis for staves with cooling water pipes of different shape [J]. Iron and Steel, 2005,40(5):14.
- [6] 段锋,周俐,王建军,等.高炉冷却壁冷却水管管形研究[J].钢铁,2008,43(2):18.
DUAN Feng, ZHOU Li, WANG Jianjun, et al. Study of shape of cooling water pipe in stave[J]. Iron and Steel, 2008,43(2): 18.
- [7] 李静,吴俐俊,周伟国.高炉铸钢冷却壁冷却水管的优化研究[J].钢铁研究,2009,37(1):12.
LI Jing, WU Lijun, ZHOU Weiguo. Structure optimization of water cooling channel of cast steel stave[J]. Research on Iron & Steel, 2009,37(1):12.
- [8] 邓聚龙.灰色系统理论教程[M].武汉:华中理工大学出版社,1990.
DENG Julong. The grey system theory course[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press,1990.
- [9] 邓凯,吴俐俊,程惠尔,等.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.
DENG Kai, WU Lijun, CHENG Huier, et al. Influence of structure parameters on steady highest temperature and thermal stress of BF Cooling Stave[J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2004,25(4):53.
- [10] Wu LJ, Xu X, Zhou W G, et al. Heat transfer analysis of blast furnace stave [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2008,51(11/12): 2824.
- [11] Wu LJ, Zhou WG, Su YL, et al. Experimental and operational thermal studies on blast furnace cast steel staves [J]. Ironmaking & Steelmaking,2008,35(3):179.
- [12] 孙芳芳.浅议灰色关联度分析方法及其应用[J].科技信息,2010(17):880.
SUN Fangfang. Grey correlation analytical method and its application[J]. Science & Technology Information,2010(17): 880.