

# 基于响应面法炉腹异型管铜冷却壁的长寿技术优化

马小刚, 陈良玉, 李 杨  
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 基于传热学理论,对近年来出现的高炉炉腹区异型管(椭圆型、矩型、双圆型、三圆型及正六边形)铜冷却壁传热模型进行参数化建模,基于冷却壁传热特性对冷却水管进行管型最优选择;模拟正常工况对开炉初期冷却壁镶砖热面未覆盖渣皮的传热模型进行热-结构耦合分析,利用响应面法得到各参数对铜冷却壁力学特性的相互影响规律.将响应面法与 NSGA-Ⅱ 遗传算法相结合对炉腹结构参数及长寿技术进行优化,优化后的炉腹结构在传热特性和力学性能方面均得到明显改善,结果证明所建模型和参数化计算程序可用作炉腹结构长寿技术的优化设计和评估.

**关 键 词:** 高炉炉腹;异型水管;铜冷却壁;响应面法;遗传算法;优化设计

中图分类号: TB 131      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2019)05-0710-06

## Optimization of Longevity Technology for Bosh Copper Cooling Stave with Shaped Tubes Based on Response Surface Method

MA Xiao-gang, CHEN Liang-yu, LI Yang  
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.  
Corresponding author: CHEN Liang-yu, E-mail: meiqiuchixiaoji@126.com)

**Abstract:** Based on the principle of heat transfer, a parametric model of thermal structure of blast furnace(BF) bosh with shaped tube copper cooling stave(ellipse, rectangle, double circle, three circle and hexagon) for heat transfer is presented. From the heat transfer analysis of copper cooling stave, the optimal choice of cooling water tubes is achieved. Stimulating the normal working condition of BF, the coupled thermal and structural analysis of the model at the initial stage of furnace opening, with the hot and cast-in-brick surface of cooling stave not covered by slag, is conducted to obtain the mutual influencing rules between parameters and its mechanical properties. The response surface method combined with genetic algorithm(NSGA-Ⅱ) is applied to optimize the structural parameters and longevity technology of bosh. The optimized bosh structure has been significantly improved in heat transfer characteristics and mechanical properties. The model and the parametric calculation program can be applied to assess and optimize the design of longevity technology of bosh.

**Key words:** blast furnace bosh; shaped tube; copper cooling stave; response surface method; genetic algorithm; optimization design

冷却壁的安全稳定工作是高炉长寿运行的基础,尤其在炉腰和炉腹高热负荷区域,良好的冷却制度和工艺条件可使冷却壁表面形成稳定渣皮,对冷却壁起保护作用,延长高炉寿命.近年来国内外学者从传热学角度出发,对炉腹区铜冷却壁热结构就传热特性、挂渣能力等方面进行了研究<sup>[1-4]</sup>. Zhong 等<sup>[5]</sup>对埋纯铜管式铸铜冷却壁进行了系统的可行性分析.郭光胜等<sup>[6]</sup>基于有限元法研究了冷却比表面积对冷却壁的传热影响.石琳等<sup>[7]</sup>对埋纯铜管式冷却壁进行热态试验研究,得出煤气温度对铜冷却壁本体应力分布影响显著. Huo 等<sup>[8]</sup>对轧制铜冷却壁水管断裂破损机理

进行论述研究,并提出修复方法. Kawaoka 等<sup>[9]</sup>对铜冷却壁纯铜材料进行高温下磨损试验,得出铜冷却壁材料在超过 200 ℃ 环境中强度明显降低. 近年来埋纯铜管式铜冷却壁已在国内外多个大型高炉上成功应用<sup>[10]</sup>. 然而,目前铜冷却壁已出现水管开裂和热面破损等现象,而对此现象产生的机理缺乏定量化的分析,外加以往对铜冷却壁的研究只局限于圆形冷却水管或某单一因素的影响,缺乏各因素间相互的影响,故本文基于传热学理论对目前高炉炉腹中普遍采用的铜冷却壁进行传热特性和力学性能分析,在优化冷却水管管型的基础上,以铜冷却壁本体厚度、冷却比表面积、冷却水水速和冷却水温度为比较序列,以高炉正常工况下冷却壁本体最大热应力为指标,量化计算各参数与指标参数间的相互关联程度. 结合响应面模型和 NSGA - II 遗传算法以铜冷却壁本体最大热应力为优化目标,对炉腹区热结构进行结构参数和长寿技术优化,并就优化前后的炉腹结构传热模型进行对比分析,验证了响应面法和 NSGA - II 遗传算法相结合对高炉炉腹区热结构进行优化分析的有效性.

1 边界条件及有限元模型

以某高炉炉腹区结构为对象进行分析,由外到内分别为炉壳(含螺栓、定位销等)、填料层、铜冷却壁(含冷却水管,本文高炉炉腹冷却壁为圆形水管)和镶砖. 相邻冷却壁间及冷却壁与炉壳间缝隙由填料填充. 冷却壁为“四进四出”埋纯铜管式铸铜冷却壁,由于每块冷却壁的工作环境基本相同,为减少计算量,取单块冷却壁 + 侧隙填料 + 填料层 + 炉壳的扇区作为计算模型. 冷却壁上下端面具有相同位移,而左右侧面环向位移为零,忽略上下左右间的传热,则单块冷却壁具有周期对称力学结构特征. 工况下水温差造成的冷却壁上下游温度梯度对其耦合特性的影响较小,冷却水取平均温度,可减少计算量,柱坐标系下单块冷却壁扇区结构模型如图 1 所示.

炉壳与周围空气间综合对流传热系数  $h_s$  的表达式为

$$h_s = 9.3 + 0.058 \cdot t_1.$$

(1)

式中,  $t_1$  为炉壳周围环境温度,℃.

根据吴俐俊等<sup>[11]</sup>基于边界条件替代法的研究数据,确定 500 ~ 1 248 ℃ 范围内热炉气与镶砖热面间的综合对流传热系数  $h_x$  随温度变化规律如式(2)所示.

$$h_x = -5.606 + 0.207t_2 + 8.414 \times 10^{-5}t_2^2.$$

(2)

式中,  $t_2$  为热炉气温度,℃.

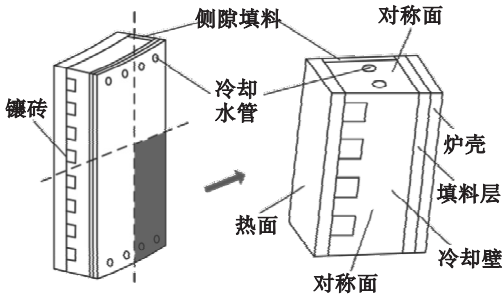


图 1 炉腹区结构扇区三维模型  
Fig. 1 Three-dimensional physical model of BF bosh

铜冷却壁具有高导热性、挂渣稳定、承受高负荷和长寿命等优点,埋纯铜管式铸铜冷却壁避免了焊接工序,彻底消除了气隙层. 某高炉炉腹区各层结构尺寸参数见表 1.

表 1 冷却壁本体尺寸参数  
Table 1 Dimension parameters of cooling stave

mm			
参数名称	尺寸	参数名称	尺寸
炉壳厚度	40	水管距热面距离	140
填料厚度	50	水管端距	80
冷却壁厚	180	水管间距	179.25
冷却壁高度	1 385	冷却壁侧缝隙宽	20
冷却壁宽度	717	燕尾槽深度	60
镶砖厚度	100	燕尾槽宽度	80 × 100
水管直径	45	冷却板内测半径	4 000

2 各管型铜冷却壁传热特性分析

为更好地比较各管型对冷却壁传热特性的影响,以圆管为参考标准,考虑两种情况下异型管冷却壁传热特性,即与圆管同横截面积和同周长.

2.1 同横截面积时冷却壁传热特性分析

各异型管当量直径  $D_G$  计算式为

$$D_G = 4A/S.$$

(3)

式中:  $A$  为过流断面面积;  $S$  为湿周长度.

各异型管当量直径见表 2,矩形管与椭圆管短长轴比例  $b/a$  均先按 0.6 进行计算.

表 2 各管型当量直径  
Table 2 Equivalent diameters of shaped tube

名称	圆管	矩形管	椭圆管
$D_G$	45.000	38.614	42.270
名称	双圆管	三圆管	六边形管
$D_G$	33.750	30.000	42.854

在给定流场下流体的惯性力与黏性力对比关系可用雷诺数  $Re$  来表征,表达式为

$$Re = \rho v l / \mu = \nu l / \nu. \tag{4}$$

式中: $\nu$  为流体速度; $\nu$  为流体运动黏度; $\rho$  为流体密度; $\mu$  为流体动力黏度; $l$  为特征长度.

雷诺数是判断流体流动状态的依据,对于圆管,当  $Re \leq 2\,300$  时为层流流动;当  $Re \geq 10^4$  时为紊流流动;当  $2\,300 < Re < 10^4$  时为过渡流流动.以圆管为例,对壁面温度不变的光滑或垂直长管且流体和壁面温差不大时,紊流状态冷却水对流换热系数可用狄特斯和玻尔特特征关联式<sup>[12]</sup>表示:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n. \tag{5}$$

式中: $n$  为指数,当流体加热时  $n = 0.4$ .

联立式(4)、式(5)和努赛尔数  $Nu = h \cdot D_G / k$ ,可得紊流状态下圆管内冷却水对流换热系数表达式:

$$h = 3\,899.75 \nu^{0.8}. \tag{6}$$

据此分别求得各管型内冷却水对流换热系数  $h$  的表达式见表 3.

表 3 同横截面积时对流换热系数表达式			
Table 3 Expression of convective heat transfer coefficients			
名称	圆管	矩形管	椭圆管
$h$	$3\,899.75 \nu^{0.8}$	$4\,020.97 \nu^{0.8}$	$3\,948.87 \nu^{0.8}$
名称	双圆管	三圆管	六边形管
$h$	$4\,127.81 \nu^{0.8}$	$4\,154.17 \nu^{0.8}$	$3\,938.05 \nu^{0.8}$

冷却水在各管型中流动时泵的功率相同,可利用强化传热评价准则作为各管型强化传热评价标准,计算式为

$$\eta = (Nu_i / Nu_0) / (f_i / f_0)^{1/3}. \tag{7}$$

式中: $Nu_i$  和  $Nu_0$  分别为异型管与圆管的努赛尔数; $f_i$  和  $f_0$  分别为异型管及圆管的阻力系数.圆管阻力系数可由 Blasius 公式求得.

热炉气温度为  $1\,200\text{ }^\circ\text{C}$ .图 2 为横截面积相同,冷却水流速  $3\text{ m/s}$  条件下高炉炉腹区各管型铜冷却壁本体最高温度  $t_{\max}$  图.

从图中计算结果可看出,各异型管与同横截面积的圆管相比, $t_{\max}$  均有小幅度降低,其中矩形管( $b/a = 0.6$ )及三圆管冷却壁温度下降最为明显.图 3 为矩形管不同  $b/a$  时  $t_{\max}$  及  $\eta$  的变化规律,随着  $b/a$  的不断增大, $t_{\max}$  不断增大, $\eta$  不断减小,当  $b/a$  大于 0.6 时, $t_{\max}$  急剧增大, $\eta$  降幅趋于平缓.从传热强化评价指标来考虑,各水管同横截面积时最佳管型为  $b/a$  不大于 0.6 的矩形管,此

时  $\eta$  基本上维持在 0.78 以上.考虑到加工难度及矩形管宽度过大影响冷却壁径向受力等问题,矩形管  $b/a$  在 0.5~0.6 范围内最为合适.图 4 为矩形管( $b/a = 0.6$ )冷却壁炉腹区热结构温度场云图.

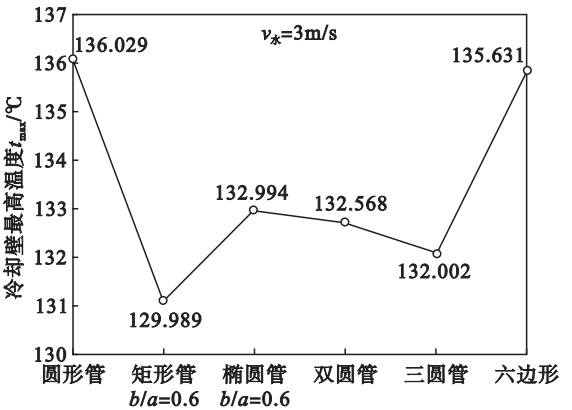


图 2 同横截面积下各管型  $t_{\max}$   
Fig. 2  $t_{\max}$  of different shaped tubes

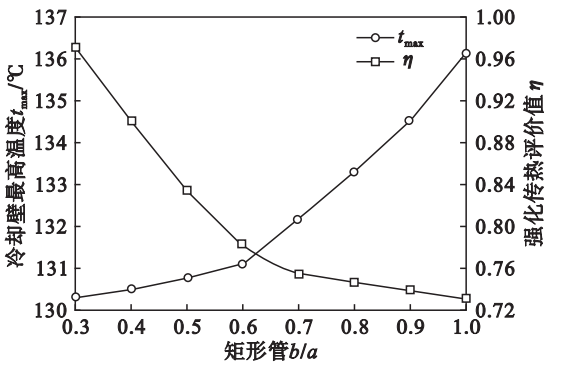


图 3 矩形管不同  $b/a$  下  $t_{\max}$  和  $\eta$  分布  
Fig. 3  $t_{\max}$  and  $\eta$  of rectangular pipes with different  $b/a$

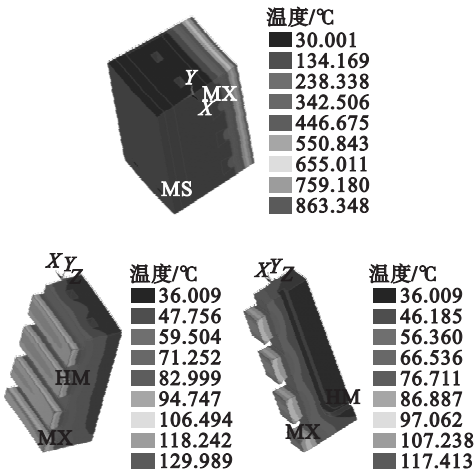


图 4 矩形管 ( $b/a = 0.6$ ) 铜冷却壁炉腹区各热结构温度场  
Fig. 4 Temperature field of each thermal structure

2.2 同周长时冷却壁传热特性分析

图 5 为各管型同周长、冷却水流速  $3\text{ m/s}$  条件下  $t_{\max}$  计算结果,由图可知同周长时椭圆管冷

却壁温度下降幅度最大. 图 6 为椭圆管不同  $b/a$  下  $t_{\max}$  和  $\eta$  分布规律, 从传热强化综合评价指标考虑, 各管型同周长时最佳管型应为  $0.55 \leq b/a \leq 0.6$  的椭圆管, 此时  $\eta$  维持在 0.83 以上.

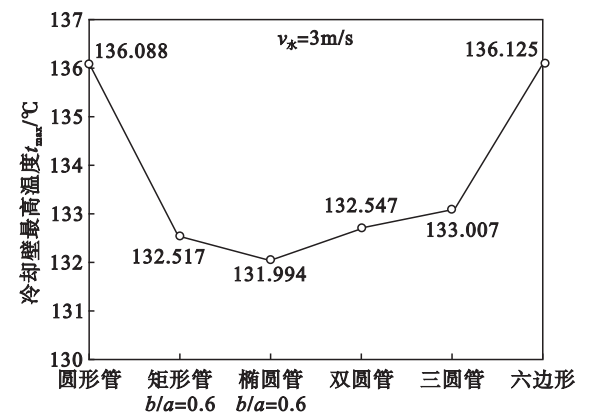


图 5 同周长下各管型  $t_{\max}$  ( $v=3\text{ m/s}$ )  
Fig. 5  $t_{\max}$  of different under shaped tubes with the same perimeter

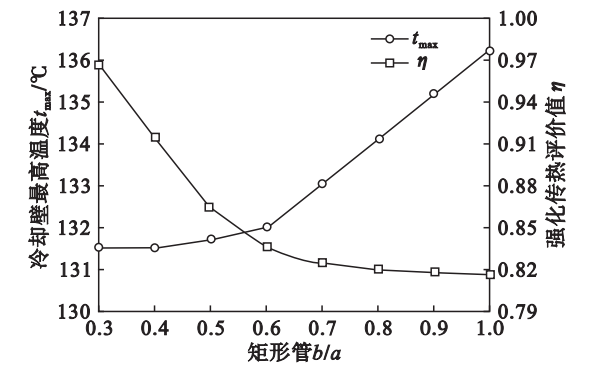


图 6 椭圆管不同  $b/a$  下  $t_{\max}$  和  $\eta$  分布  
Fig. 6  $t_{\max}$  and  $\eta$  of ellipse pipes with different  $b/a$

分析图 2 和图 5 计算结果可得, 同横截面积时矩形管铜冷却壁与同周长情况下椭圆管铜冷却壁相比在传热特性方面差距不大, 在强化传热评价指标方面略低. 综合考虑传热、流阻特性及矩形管在工作过程中易出现应力集中点等因素, 高炉炉腹区铜冷却壁冷却水管改为  $0.55 \leq b/a \leq 0.6$  的椭圆管最为合适, 同时椭圆管同原先圆管冷却壁相比可在获得相同冷却效果的同时节约大量冷却水用量, 提高效益.

### 3 高炉炉腹区结构长寿技术优化

#### 3.1 响应面法简介

响应面法基本思想是通过构造具有明确表达形式的多项式来表达隐式的功能函数. 假设功能函数  $Z$  和随机变量  $Q=[Q_1, Q_2, \cdots, Q_R]$  间关系如式(8)所示. 对随机变量的  $N$  个样本进行随机

抽样, 统计分析功能函数值  $(z_1, z_2, \cdots, z_N)$ , 由最小二乘法理论拟合得到该系统功能函数<sup>[13]</sup>.

$$Z=a_0+\sum_{i=1}^Ra_iQ_i+\sum_{i=1}^R\sum_{j=i}^Ra_{ij}Q_iQ_j.\quad(8)$$

式中:  $a_0, a_i, a_{ij}(i=1, \cdots, R; j=i, \cdots, R)$  为函数方程待定系数, 共  $1+R+R(R+1)/2$  个.

采用矩阵法对每个随机变量取三个水平点, 根据 Box - Behnken 抽样法得出中心及边中点作为样本值点, 当随机变量分布符合某种规律时, 可用式(9)确定变量水平  $q_s$ :

$$\int_{-\infty}^{q_s}f(q)\mathrm{d}q=p_n,n=1,2,3.\quad(9)$$

式中:  $f(q)$  为随机变量概率密度函数;  $p_n$  为水平点, 取  $p_1=0.01, p_2=0.5, p_3=0.99$ .

对  $S$  个随机变量样本值进行数值模拟, 得  $S$  个输出点  $(z_1, z_2, \cdots, z_S)$ , 通过回归分析可得式(10), 可确定功能函数(8)的函数关系式. 设计方法为 BBD 法.

$$S=\sum_{i=1}^S\left[z_i-\left(a_0+\sum_{i=1}^Ra_iq_i+\sum_{i=1}^R\sum_{j=i}^Ra_{ij}q_iq_j\right)\right]^2.\quad(10)$$

#### 3.2 铜冷却壁本体最大热应力响应面模型

热应力是影响高炉冷却壁寿命的关键因素之一, 从冷却壁本体热应力数值计算来分析各参数变化时的影响规律, 对高炉长寿有重要意义. 本文以表 1 中炉腹区结构为基准, 将圆管改为同周长且短长轴比例为 0.6 的椭圆管, 以工况下铜冷却壁本体最大热应力  $S_{\max}$  (即 Von Mises 等效应力) 为研究对象, 以铜冷却壁本体厚度、冷却比表面积、冷却水流速及冷却水温度为比较序列, 参数见表 4.

表 4 各随机参数水平			
Table 4 Levels of each parameter			
随机参数	水平编码值		
	-1	0	1
$x_1/\text{mm}$	155	180	205
$x_2$	0.7	1.0	1.3
$x_3/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	2	3	4
$x_4/^{\circ}\text{C}$	20	30	40

注:  $x_1, x_2, x_3$  和  $x_4$  分别为铜冷却壁本体厚度、冷却比表面积、冷却水流速和冷却水温度.

对  $S_{\max}$  计算结果进行多元回归拟合分析, 表 5 为分析结果. 该模型决定系数  $R^2=0.946\ 3$  和调整决定系数  $R^2_{\text{adj}}=0.892\ 5$ , 说明该模型计算结果对实验数据拟合较好, 可用于铜冷却壁本体最大热应力  $S_{\max}$  随各参数变化的理论预测. 各参数对



$S_{\max}$  的显著性由  $F$  检验来判定,  $P$  值越小,  $F$  值越大, 则显著程度越高. 由表 5 可得,  $x_2$  与  $x_4$  对  $S_{\max}$  影响尤为突出, 交互项中  $x_1$  和  $x_2$  的相互作用对  $S_{\max}$  的影响比较大. 限于篇幅只给出部分交互参数对  $S_{\max}$  的影响规律结果如图 7 所示.

表 5 响应面法计算结果					
Table 5 Calculations of response surface method					
随机变量	平方和	自由度	均方	F 值	P ( $P > F$ )
$x_1$	432.55	1	432.55	5.25	0.037 9
$x_2$	2 646.89	1	2 646.89	32.15	0.000 1
$x_3$	732.44	1	732.44	8.90	0.009 9
$x_4$	1 022.39	1	1 022.39	12.42	0.003 4
$x_1x_2$	862.74	1	862.74	10.48	0.006 0
$x_1x_3$	1.26	1	1.26	0.02	0.903 3
$x_1x_4$	0.75	1	0.75	$9.08 \times 10^{-3}$	0.925 4
$x_2x_3$	12.33	1	12.33	0.15	0.704 6
$x_2x_4$	$2.81 \times 10^{-3}$	1	$2.81 \times 10^{-3}$	$3.41 \times 10^{-5}$	0.995 4
$x_3x_4$	$8.19 \times 10^{-3}$	1	$8.19 \times 10^{-3}$	$9.95 \times 10^{-5}$	0.992 2
$x_1^2$	440.18	1	440.18	5.35	0.036 5
$x_2^2$	0.29	1	0.29	$3.48 \times 10^{-3}$	0.953 8
$x_3^2$	74.01	1	74.01	0.90	0.359 2
$x_4^2$	8.45	1	8.45	0.10	0.753 4
残差	1 152.64	14	82.33	—	—
总和	7 497.06	28	—	—	—

各参数对  $S_{\max}$  的影响程度由大到小排名依次为:  $x_2, x_4, x_3, x_1$ , 交互项中  $x_1$  和  $x_2$  相互作用较大. 由响应面理论可知, 影响程度越大, 该因素对目标序列的影响越大.  $S_{\max}$  随  $x_1$  增加呈先增大后减小趋势,  $x_2$  小时, 应适度减薄冷却壁厚度;  $S_{\max}$  随  $x_2$  的增大先迅速减小后趋于平缓, 冷却比表面积从 0.7 增加到 1.1 时,  $S_{\max}$  下降非常明显, 可适当增大比表面积来降低冷却壁应力;  $x_3$  从 2 m/s 增大到 4 m/s 时,  $S_{\max}$  下降幅度较小, 这是由于冷却水对流换热热阻已不是冷却壁传热的限制环节, 提高冷却水水速, 无疑增加了水流量, 同时成倍提高了水流动阻力, 增大运行成本; 当  $x_4$  较低时, 可减小水速降低成本, 水温较高时再增大水流速以减小冷却壁应力. 实际操作中还应注意水温反复变化引起的本体反复热应力, 以免造成疲劳破坏, 故水温应以稳定为主.

据式(10)可得在高炉正常工作时铜冷却壁本体最大热应力  $S_{\max}$  经回归分析后的响应面方程为

$$S_{\max} = -421.921 + 6.447 5x_1 + 280.475 7x_2 - 38.106 2x_3 + 0.527x_4 - 1.958 2x_1x_2 +$$

$$0.022 4x_1x_3 - 1.729 \times 10^{-3}x_1x_4 + 5.851 7x_2x_3 - 0.013 2x_1^2 + 2.334 3x_2^2 + 3.377 8x_3^2 + 0.011 4x_4^2.$$

(11)

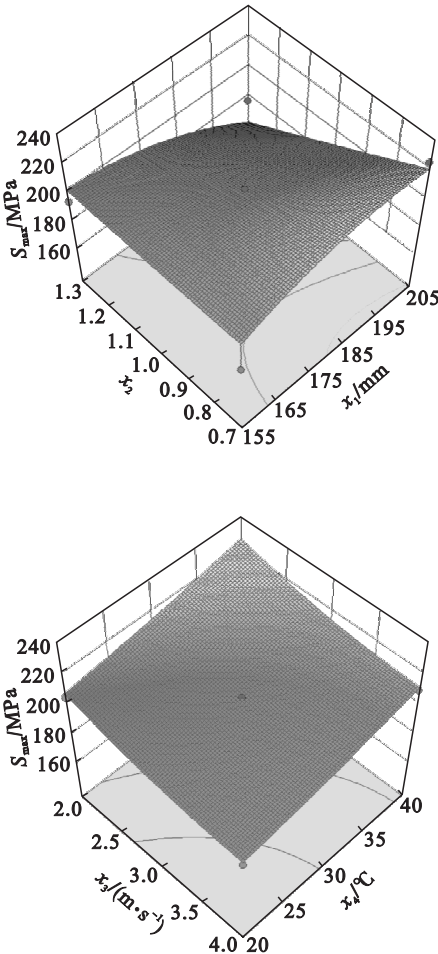


图 7  $S_{\max}$  受各因素影响规律结果  
Fig. 7 Influence results of various parameters on  $S_{\max}$

3.3 基于遗传算法的目标优化

在炉腹铜冷却壁响应面模型的基础上, 利用遗传算法对其本体最大热应力进行多参数下的高效全局寻优. 以铜冷却壁优化后的整体质量  $m_T$  不高于初始质量的 95% 及单位时间用水量  $L_s$  不高于初始单位时间用水量的 95% 作为约束条件.

优化设计的数学模型可表示为

$$\left. \begin{aligned} S_y &= \min(S_{\max}(x_1, x_2, x_3, x_4)), \\ \text{s. t. } x_1 &\in (155, 205), x_2 \in (0.7, 1.3), \\ x_3 &\in (2, 4), x_4 \in (20, 40), \\ m_T &\leq 0.95 m_0, L_s \leq 0.95 L_0. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中:  $\rho$  为铜冷却壁材料密度;  $m_0$  为椭圆管铜冷却壁初始质量;  $L_0$  为初始单位时间用水量.

取遗传算法交叉概率为 0.6, 变异概率为 0.01. 优化前后各随机变量及目标函数计算结果见表 6.

为验证优化后结果的准确性,将优化后的参数值代入有限元模型中,结果如图 8 所示.对比响应面方程计算结果 198.42 MPa,近似值误差为 0.611%,表明通过响应面模型和 NSGA – II 遗传算法对优化高炉炉腹区结构参数及长寿技术具有较高的精度.

表 6 优化前后计算结果对比

Table 6 Calculation results before and after optimization

名称	$x_1$ mm	$x_2$	$x_3$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$x_4$ $^{\circ}\text{C}$	$S_{\text{max}}$ MPa	$m_{\text{T}}$ kg	$L_s$ $\text{m}^3$
初始值	180	1.0	3.0	30	205.2	0.172	$p$ 0.012
优化后	171	1.1	2.3	30	197.2	0.162	$p$ 0.011

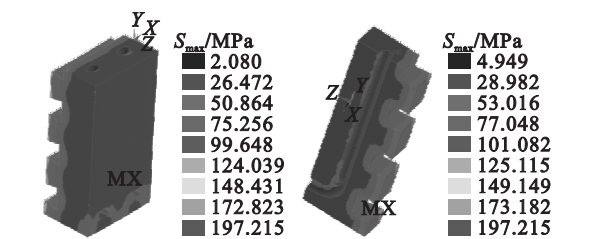


图 8 优化后铜冷却壁应力场分布

Fig. 8 Optimized stress field of copper cooling stove

4 结 论

1) 从传热强化评价指标、加工难度及冷却壁径向承力等方面来考虑,最佳管型为短长轴比例为 0.55~0.6 的椭圆管.炉腹区铜冷却壁冷却水管改为椭圆管后,能够在保证较好冷却效果的同时节约冷却水用量,有效提高企业效益.

2) 各参数对  $S_{\text{max}}$  的影响程度由大到小排名依次为:冷却比表面积、冷却水温度、冷却水速度、冷却壁本体厚度,交互项中冷却壁本体厚度和冷却比表面积相互作用比较大.设计炉腹区结构时可参考各因素对冷却壁应力场分布的影响,保证冷却壁安全工作的同时对其结构进行优化.

3) 采用响应面法和 NSGA – II 遗传算法相结合的思想对目标函数进行优化.优化后的冷却壁在传热特性方面得到提高,本体质量、冷却水用量等方面得到降低,验证了响应面法和遗传算法相结合的高炉炉腹区热结构参数优化方法的有效性.

参考文献:

[1] Guo H W, Fan D Q, Chang J, et al. Numerical simulation for BF hearth and bottom using finite difference method [C]// International Conference on Applied Informatics and Communication. 2011. Berlin: Springer-Verlag, 2011:449 – 455.

[2] Wu L L, Zhou W G, Li P, et al. Study on the equivalent convection coefficient of the hot surface of blast furnace stove [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2007, 43 (12): 1303 – 1309.

[3] Deng K, Wu L J. Influence of structural parameters on steady-state highest temperature and thermal stress of BF cooling stove [J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2004, 25 (4): 47 – 53.

[4] Smith M P, Fletcher J, Harvey R W, et al. Blast furnace cooling stove design [J]. *Steel Times International*, 2016, 40 (2): 33 – 34, 36 – 37.

[5] Zhong Y, Lu X Z, Fan X M, et al. Thermal simulation study on copper cooling stove of blast furnace [J]. *Advanced Materials Research*, 2015, 1088: 739 – 743.

[6] 郭光胜, 张建良, 焦克新, 等. 冷却比表面积对高炉炉缸铸铁冷却壁传热的影响研究 [J]. *铸造*, 2016, 65 (6): 542 – 548.  
(Guo Guang-sheng, Zhang Jian-liang, Jiao Ke-xin, et al. Study of the effect of the ratio of cooling surface area on the heat transfer of the cast iron cooling stove in blast furnace hearth [J]. *Foundry*, 2016, 65 (6): 542 – 548.)

[7] 石琳, 郭永茂, 曹福军. 铸铜冷却壁蠕变变形研究 [J]. *内蒙古科技大学学报*, 2013, 32 (1): 42 – 45.  
(Shi Lin, Guo Yong-mao, Cao Fu-jun. Research on creep deformation of cast copper staves [J]. *Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology*, 2013, 32 (1): 42 – 45.)

[8] Huo Y, Chen L Y. Analysis on heat transfer characteristics for bosh copper cooling stove with shaped tube [C]// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Xi'an: IOP Publishing, 2018: 022003.

[9] Kawaoka K, Anan K, Tsuda A, et al. Latest blast furnace relining technology at Nippon Steel [J]. *Shinnittetsu Giho*, 2006, 384: 127 – 132.

[10] Qiu H Q, Chen Z D. The forty years of vermicular graphite cast iron development in China (part I) [J]. *China Foundry*. 2007, 4 (2): 91 – 98.

[11] 吴俐俊, 周伟国. 高炉冷却壁与炉气之间的换热特性 [J]. *钢铁研究学报*, 2006, 18 (11): 7 – 10.  
(Wu Li-jun, Zhou Wei-guo. Heat transfer characteristics between gas flow and stove [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2006, 18 (11): 7 – 10.)

[12] Shah R K, London A L. Laminar flow forced convection in ducts; a source book for compact heat exchanger analytical data [M]. Pittsburgh: Academic Press, 2014: 1 – 55.

[13] 程进. 基于响应面法的几何非线性结构概率响应分析 [J]. *同济大学学报 (自然科学版)*, 2006, 34 (9): 1147 – 1151.  
(Cheng Jin. Probabilistic response analysis of geometrically nonlinear structures based on systematic response surface method [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2006, 34 (9): 1147 – 1151.)