

DOI: 10.3901/JME.2011.12.062

偏心圆环淬火过程的数值模拟*

周志方 王晓燕 顾剑锋

(1. 上海交通大学材料科学与工程学院 上海 200240;
2. 上海交通大学上海市激光制造与材料改性重点实验室 上海 200240)

摘要: 系统地介绍淬火热处理过程的传热、相变和应变计算的数学模型, 该模型充分考虑了相变潜热的影响, 并考虑到热应变等多种因素对淬火应变的综合作用。基于此模型, 采用有限元法对 GCr15 轴承钢制偏心圆环的油淬过程进行数值模拟。结果表明, 偏心圆环的薄壁端边缘在淬火 6 s 时率先开始形成马氏体, 厚壁端心部直至淬火 25 s 后才开始形成马氏体, 此时薄壁端边缘位置的马氏体转变已经基本完成。偏心圆环各部位开始形成马氏体的时间差异明显, 但最终得到的组织分布趋于一致, 都是 89% 的马氏体和 11% 的残余奥氏体。淬火过程使偏心圆环在高度方向少量膨胀, 同时其内外圆也变形成椭圆, 并且它们的长轴与偏心圆环的内外圆圆心连线共线。模拟计算得到的变形趋势与试验得到的结果一致, 但变形量比实测值小。

关键词: 淬火 数值模拟 偏心圆环

中图分类号: TG162.83

Numerical Simulation of Eccentric Cylinder Quenching Process

ZHOU Zhifang WANG Xiaoyan GU Jianfeng

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240;
2. Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: The heat transfer, phase transformation and quenching strain models for simulating quenching heat treatment process are introduced, the effect of latent heat on temperature, as well as the effect of thermal strain et al. on quenching strain are all considered in this model. Then the oil quenching process of eccentric cylinder made of GCr15 is simulated on the basis of these models by using finite element method (FEM). The results show that the martensite transformation start times at different parts of the cylinder are quite different, but they all get the similar phase proportion: 89% martensite and 11% residual austenite. Quenching process makes the height, inner and outer diameters of the cylinder, finally both circles change into two ellipses with their long axes along with the line through the two circle centers. The deformation tendency obtained by simulation calculation agrees well with the test result, but the deformation amount is smaller than the measured one.

Key words: Quenching Numerical simulation Eccentric cylinder

0 前言

作为一种传统的加工工艺, 钢铁材料的热处理仍然吸引着材料工作者不断开发新的工艺方法, 例如采用激光等新型处理手段和多种强化处理相结合^[1]。钢铁材料的热处理是一个十分复杂的过程, 很难用解析的方式精确描述, 所以长期以来多采用试验的方法探索新的热处理工艺过程, 效率不高。

近年来, 随着数值模拟算法的日益成熟和计算机求解水平的不断提高, 越来越多的人开始采用计算机模拟技术对热处理过程进行研究。苏兴武等^[2]综述了淬火冷却过程数值模拟的主要内容及研究现状, 并对存在的问题进行评述。许雪峰等^[3]讨论了感应加热有限元的处理方法, 并据此分析了圆柱工件感应淬火的过程及淬火后的温度分布与变化。宋广胜等^[4]借助有限差分法对 22CrMo 钢圆柱体试样的渗碳淬火热处理过程进行分析, 得到了渗层碳浓度分布和淬火组织、内应力变化, 并讨论了渗碳过程对后续淬火过程的影响。姚新等^[5]通过建立合适的有

* 上海市科学技术委员会重大科技攻关资助项目(08DZ1100302)。20100606 收到初稿, 20110126 收到修改稿

限元模型，研究了三种不同工艺下 P20 钢大型模具淬火时候的温度组织变化。汪建华等^[6]基于考虑高温蠕变的粘弹性有限元数值方法和试验相结合的方法，提出了两个局部焊后热处理的评定准则。但是，目前这方面的工作仍主要停留在圆柱、立方体等简单外形的结构上，并没有充分考虑结构外形尤其是壁厚对淬火过程的影响。

本文首先系统地描述了淬火热处理过程的传热、相变和应变计算的数学物理模型；然后借助一种偏心圆环零件，实现了对 3.6~14.4 mm 连续变化壁厚零件的淬火，并采用有限元法对这一零件的淬火过程进行数值模拟，以分析不同壁厚对淬火马氏体的形成和零件变形的影响。所得结果为研究工件壁厚对热处理过程的影响提供了参考。

1 淬火过程的数学模型

1.1 淬火温度变化的计算模型

淬火过程的温度初始条件和边界条件分别由式(1)、(2)表示

$$T(x, y, z, t = 0) = \theta_0 \quad (1)$$

$$\lambda \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} + \frac{\partial \theta}{\partial y} + \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) = h(\theta - \theta_c) \quad (2)$$

式中， θ_0 为试样的奥氏体化温度； θ_c 为淬火介质的温度； λ 为热导率； h 为淬火介质的表面传热系数。

采用 Fourier 传热方程式(3)^[7]计算淬火试样的温度演变，其中相变潜热 Q 根据式(4)计算得到

$$\rho c_p \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) + Q \quad (3)$$

$$Q = \frac{\Delta h_m \Delta V}{\Delta t} \quad (4)$$

式中， ρ 为材料密度； c_p 为材料的比定压热容，可根据式(5)获得； Δh_m 为质量焓变； ΔV 为相变量； Δt 为时间步长。

$$c_p = \frac{dh_m}{d\theta} \quad (5)$$

1.2 淬火组织变化的计算模型

淬火试样的初始组织为均匀的奥氏体，由于本文研究的试样尺寸较小，模型中只考虑马氏体相变。奥氏体转变成马氏体的体积分数用 K-M 模型式(6)计算^[8]

$$\varphi(\theta) = 1 - \exp[-k(M_s - \theta)] \quad (6)$$

式中， $\varphi(\theta)$ 为 θ 温度下生成的马氏体体积分数； k 为反映马氏体转变速率的常数， $k=0.0105$ ； $M_s=220$ °C。

1.3 淬火应变的计算模型

计算出试样中的温度和组织演变后，即可采用

增量理论求解试样的应变。淬火试样的应变计算需要考虑热应变、组织应变和相变塑性应变的综合作用，由式(7)求得

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^r + \varepsilon^{th} + \varepsilon^{tp} \quad (7)$$

式中， ε 为试样淬火过程中的总应变； ε^e 为弹性应变； ε^p 为塑性应变； ε^r 为相变应变； ε^{th} 为热应变； ε^{tp} 为相变塑性，由式(8)给出

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^{tp} = -\frac{3}{2} k' \ln \varphi S_{ij} h \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_{0.2}} \right) \dot{\varphi} \quad (8)$$

式中， k' 是相变系数， $k' = 2\Delta\varepsilon_{\gamma-M}^{th} / \sigma_{0.2}^\gamma$ ； $\Delta\varepsilon_{\gamma-M}^{th}$ 是 γ 相和 M 相的热应变之差； $\sigma_{0.2}^\gamma$ 是 γ 相的屈服强度； φ 表示 M 相的体积分数； S_{ij} 是应变张量； $h(\sigma_{eq} / \sigma_{0.2})$ 是当外加应力超过材料屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 的一半时自动触发的非线性项， $\sigma_{0.2}$ 由式(9)得到。关于 ε^{tp} 计算的完整描述参见 Leblond^[9-10]的文献。

$$\sigma_{0.2}(\theta) = [1 - f(\varphi)] \sigma_{0.2}^\gamma(\theta) + f(\varphi) \sigma_{0.2}^M(\theta) \quad (9)$$

式中， $\sigma_{0.2}^M$ 是 M 相的屈服强度； $f(\varphi)$ 函数由表 1 中数据插值给出。

表 1 函数 $f(\varphi)$ 的取值

参数	数值					
马氏体体积分数 φ	0	0.125	0.250	0.500	0.875	1
函数 $f(\varphi)$	0	0.044	0.124	0.391	0.668	1

得到试样的应变后，即可按照常规有限元法计算试样的位移、应力等结果。

2 模拟计算条件

2.1 材料性能与淬火工艺

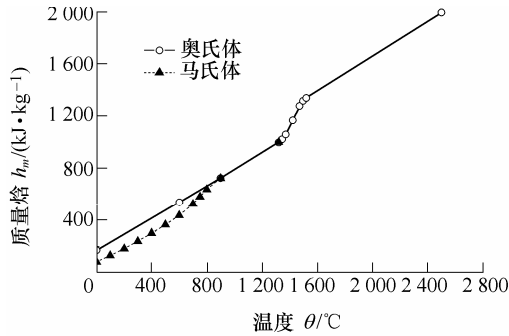
偏心圆环由 GCr15 轴承钢制备，其泊松比恒为 0.33。20 °C 时，GCr15 马氏体的密度为 7 770 kg/m³，奥氏体的密度为 7 990 kg/m³；到 1 500 °C 时，二者密度均为 7 290 kg/m³。GCr15 的热导率和热应变的值列于表 2，其他主要材料性能参数如图 1 所示。偏心圆环经 $\theta_0=860$ °C 奥氏体化均匀之后，在 $\theta_c=12$ °C 的齿轮淬火油中淬火，齿轮淬火油的换热系数如图 1d 所示。通过已知温度下的材料性能值线性插值即可得到所有温度下的材料性能结果。

表 2 GCr15 轴承钢的热导率和热应变

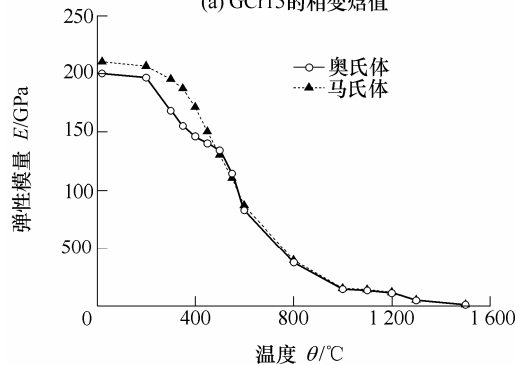
温度 $\theta/^\circ\text{C}$	马氏体的热导率 $\lambda_M / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	马氏体的热应变 $\varepsilon_M / 10^{-3}$	奥氏体的热导率 $\lambda_A / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	奥氏体的热应变 $\varepsilon_A / 10^{-3}$
0	43.84	—	15	—
25	—	2.5	—	-72
100	42.82	—	—	—
200	41.02	—	—	—
300	38.62	7	—	—
400	35.77	—	—	—
500	32.66	—	—	4.5
600	29.45	—	—	—
700	26.31	—	—	—

(续)

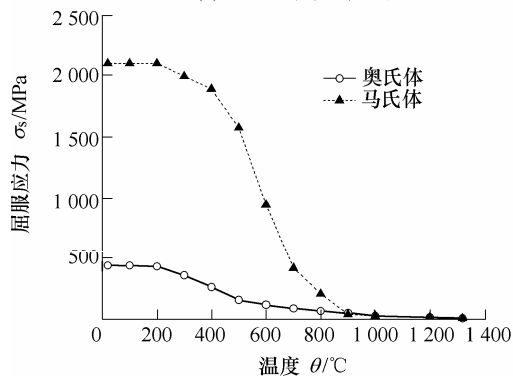
温度 $\theta/^\circ\text{C}$	马氏体的 热导率 $\lambda_M/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	马氏体的 热应变 $\varepsilon_M/10^{-3}$	奥氏体的热导率 $\lambda_A/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	奥氏体的 热应变 $\varepsilon_A/10^{-3}$
800	23.42	—	—	—
900	20.94	—	—	—
1 000	—	195	—	17.2
1 300	—	265	25	25
1 520	10	—	32	—



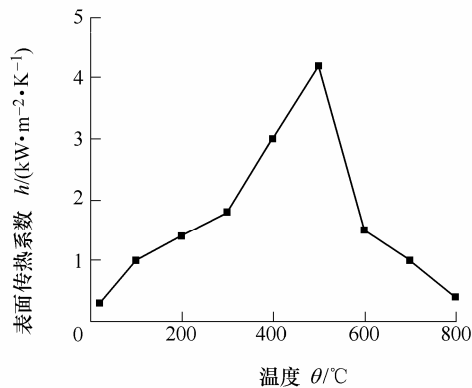
(a) GCr15的相变焓值



(b) GCr15的弹性模量值



(c) GCr15的屈服应力值

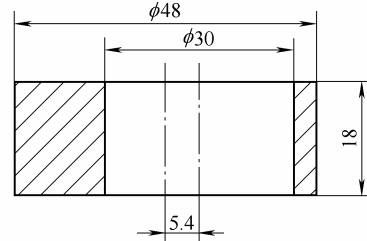


(d) 齿轮油的传热系数值

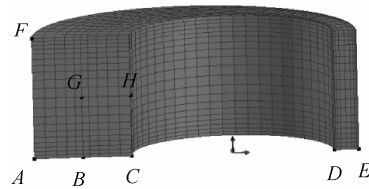
图 1 GCr15 和淬火齿轮油的主要材料参数

2.2 计算网格模型

偏心圆环的几何尺寸如图 2 所示, 采用线性八节点三维实体单元描述偏心圆环, 共有 11 550 个节点, 13 000 个单元。图 2 中为 1/2 个网格模型, 其中 $A\sim H$ 标出了 8 个特征位置节点, 便于后文进一步分析, 并且 $ABCDE$ 各节点均在内外圆环的圆心连线 O_1O_0 上。



(a) 偏心圆环的尺寸



(b) 偏心圆环的网格模型

图 2 偏心圆环的模型与网格划分

3 结果分析与讨论

3.1 淬火温度场和组织变化

图 3 描述了偏心圆环表面温度在淬火过程中的变化, 其中深色部分表示该区域的温度低于 M_s 温度。薄壁端边缘处是首先降温的部位, 淬火 6 s 以后, 这些位置的表面温度已经低于 M_s 温度, 如图 3a 所示。随后, 这一低温区域从薄壁端上下边缘处向整个薄壁端外表面延伸, 淬火 10 s 时, 整个薄壁端外表面均低于 M_s 温度, 而此时包括厚壁端的圆环大部分表面温度仍高于 M_s 温度, 如图 3b 所示。淬火 15 s 左右, 靠近薄壁端的半个圆环表面温度以及厚壁端上下边缘处的表面温度均已低于 M_s 温度, 如图 3c。淬火 19 s 时, 整个圆环表面只剩下厚壁端内径中心局部区域(节点 H 附近)的温度尚未冷却至 M_s 温度, 如图 3d 所示。

图 4 记录了淬火过程中圆环上 8 个特征节点的温度变化历程。8 个节点的冷却速度由高到低依次为 $DE\rightarrow AF\rightarrow C\rightarrow B\rightarrow H\rightarrow G$, 厚壁端心部节点 G 的冷却速度最低, 该处温度在淬火 25 s 后达到 M_s 温度, 开始形成马氏体。

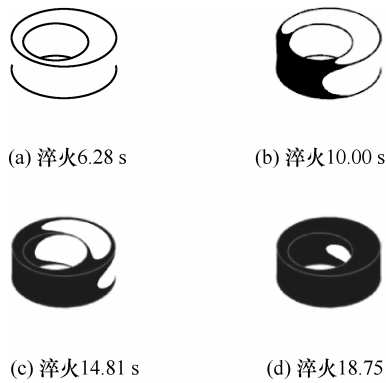


图 3 偏心圆环表面在淬火不同时刻的温度云图

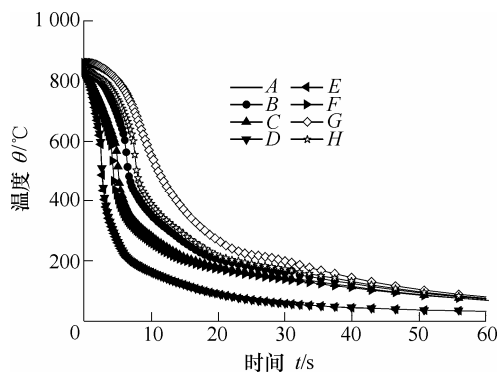


图 4 8 个特征节点在淬火过程中的温度变化曲线

偏心圆环各部位在淬火过程中的冷却速度不同，导致了这些部位马氏体的形成时间也不同，图 5 描述了各个特征节点处马氏体的体积分数变化。可见淬火 6 s 时，马氏体率先在薄壁端边缘节点 D 和 E 处生成。淬火 15 s 左右，厚壁端外边缘节点 A、F 和内边缘节点 C 处先后有马氏体形成。圆环内外表面的换热系数相同，但外表面的换热面积更大，因此马氏体更易形成。随后马氏体形成区域进一步向厚壁端其余表面拓展，淬火 20 s 时，整个圆环的外表面均有马氏体形成。厚壁端心部节点 G 最后形成马氏体，而此时薄壁端边缘处的马氏体转变已经基本完成，表明圆环的整体马氏体转变不均衡。不过由于试样尺寸较小，最终圆环各部位均由 89% 的马氏体和 11% 的残余奥氏体组成。

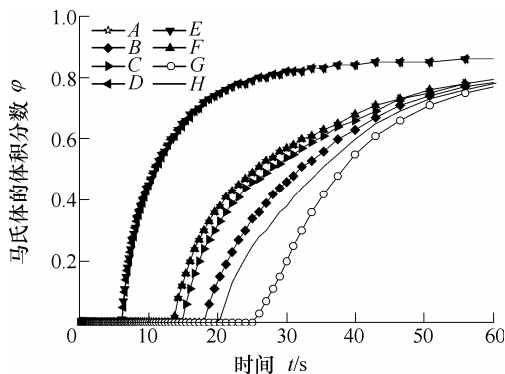


图 5 8 个特征节点的马氏体体积分数变化曲线

3.2 淬火变形结果与分析

图 6 显示了偏心圆环的圆环面在淬火前后的形状，其中线条描述的是奥氏体化之前的圆环轮廓，深色图形部分是偏心圆环在奥氏体化后刚开始淬火 ($t=0.01$ s) 和淬火终了 ($t=600$ s) 时的轮廓。可见试样在 860 °C 奥氏体化后，其内外圆环的直径都显著增加，但基本上仍保持圆形不变，如图 6a 所示。这是因为本文并未计算试样奥氏体化的过程，试样被加热到 860 °C 时只受热线性均匀膨胀。

淬火后，圆环的内、外径都在 x 方向上略有膨胀，内径在 y 方向上略有收缩，外径在 y 方向几乎不变，如图 6b 所示。结果导致内外圆环变形成两个椭圆，并且它们的长轴都与 O_1O_0 共线。这是因为在淬火过程中，试样温度降低使得热膨胀逐渐消除，取而代之的是马氏体相变引起的体积膨胀。淬火时圆环窄壁部分首先发生马氏体转变膨胀，继而是厚壁表面和心部生成马氏体，马氏体形成的不同时性使得圆环窄壁部分能够相对地自由膨胀，而厚壁部分则由于表面较早形成的马氏体提供约束，以及心部的冷却收缩，结果并没有出现明显的膨胀。

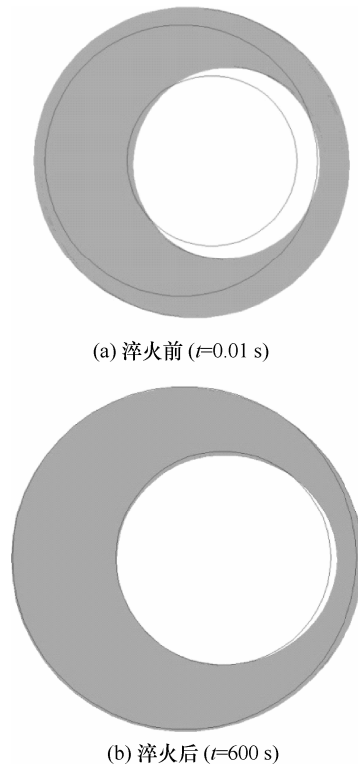


图 6 偏心圆环淬火前后的形状(线性放大 10 倍)

3.3 淬火变形的验证

为了验证上述模拟结果，本文对该图 2 所示的偏心圆环进行了淬火试验。将 3 个圆环放在保护气氛中加热到 860 °C 并均匀后淬入 12 °C 的油中。本文分别测量了淬火前工件 x 轴向上的内外圆环直径

和高度值以及淬火后椭圆的长轴长度和高度值。测量主要使用 Nikon V12B 光学投影机, 其测量精度为 $2\ \mu\text{m}$ 。采用投影机进行内外径测量时, 测量值为投影方向的内外径的最大值。偏心圆柱体淬火前后的高度值采用 TRIMOS 高度仪来测量。淬火前后的测量结果与计算值如表 3 所示, 表 3 中淬火后的内外径都是指椭圆的长轴。

表 3 偏心圆环淬火前后内外径及高度的变化 mm

参数	数值					
	试样 1	试样 2	试样 3	试验 平均值	模拟 计算值	
圆环内径 D_i	淬火前	29.988	30.006	30.057	30.017	30.000
	淬火后	30.145	30.151	30.145	30.147	30.089
	内径变量	0.157	0.145	0.088	0.130	0.089
圆环外径 D_o	淬火前	47.957	47.914	47.885	47.919	48.000
	淬火后	48.106	48.083	48.047	48.079	48.174
	外径变量	0.149	0.169	0.162	0.160	0.112
圆环高度 H	淬火前	17.790	17.812	17.815	17.806	18.000
	淬火后	17.845	17.863	17.859	17.856	18.030
	高度变量	0.055	0.051	0.044	0.050	0.030

由测量结果可知, 轴承钢偏心圆环在淬火后, 内圆和外圆都变成椭圆形。椭圆的长轴与 O_iO_o 共线而短轴方向与 O_iO_o 垂直。淬火后偏心圆环的内部椭圆和外部椭圆的长轴都大于淬火前内外圆的直径, 圆柱的高度在淬火后也略有增大。对比测量结果和模拟结果, 偏心圆环的膨胀趋势一致, 但内外圆环直径的模拟膨胀值只有实测结果的 69%, 高度方向上的膨胀量也只有实测结果的 60%。模拟变形与实测结果在数值上存在这种差别的原因是多方面的, 主要的有以下几点: 首先, 材料的参数不够准确, 尤其是高温下的参数只能通过粗略的插值得到; 其次, 淬火介质的表面换热系数不够准确, 淬火介质的换热系数不仅与温度有关, 还和实际淬火时的淬火方式、搅拌程度等有很大关系, 因此不可避免地存在一定偏差; 最后, 本文应用的计算模型中并未考虑应力作用对相变的影响, 仍不完善。

4 结论

(1) GCr15 轴承钢制成的偏心圆环经油淬后各部位开始形成马氏体的时间差异明显: 薄壁端边缘在淬火 6 s 时率先开始形成马氏体, 厚壁端心部直至淬火 25 s 后才开始形成马氏体, 此时薄壁端边缘位置的马氏体转变已经基本完成。尽管如此, 淬火完成后偏心圆环各部位的组织分布趋于均匀, 都是 89% 的淬火马氏体和 11% 的残余奥氏体。

(2) 淬火过程使偏心圆环在高度方向少量膨胀, 同时其内外圆也都膨胀, 最终变成了长轴与内

外圆环圆心连线一致的两个椭圆。模拟计算得到与试验结果相同的膨胀趋势, 但内外圆直径在椭圆长轴方向上的计算膨胀量只有三个试样实测平均值的 69%, 高度方向上的计算膨胀量也只有实测平均值的 60%。

参 考 文 献

- [1] 花银群, 杨继昌, 杨兴华, 等. 激光淬火+冲击复合强化处理 45 钢的试验研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(2): 42-44.
HUA Yinqun, YANG Jichang, YANG Xinghua, et al. Study on the experiments of laser quenched+shocked processing 45 steel[J]. Chinese Journal of Mechanical of Engineering, 2004, 40(2): 42-44.
- [2] 苏兴武, 顾敏. 淬火冷却过程数值模拟的研究现状及展望[J]. 金属热处理, 2008, 33(6): 1-7.
SU Xingwu, GU Min. Research status and prospects of the numerical simulation of quenching process [J]. Heat Treatment of Metals, 2008, 33(6): 1-7.
- [3] 许雪峰, 赵敏, 吴金富. 45 钢工件感应淬火温度场有限元模拟分析[J]. 金属热处理, 2005, 30(增刊): 152-155.
XU Xuefeng, ZHAO Min, WU Jinfu. Finite element analysis of temperature field in induction quenching of 45 steel work piece[J]. Heat Treatment of Metals, 2005, 30(Suppl.): 152-155.
- [4] 宋广胜, 刘相华, 王国栋. 22CrMo 钢渗碳淬火过程组织与应力变化的数值模拟[J]. 钢铁研究学报, 2006, 18(10): 36-40.
SONG Guangsheng, LIU Xianghua, WANG Guodong. Numerical simulation of microstructure and stress in carburizing and quenching process of 22CrMo steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2006, 18(10): 36-40.
- [5] 姚新, 顾剑锋, 胡明娟. P20 钢大型塑料模具几种淬火工艺的三维温度与组织模拟[J]. 金属热处理, 2003, 28(7): 33-37.
YAO Xin, GU Jianfeng, HU Mingjuan. 3D temperature and microstructure modeling of large-scale P20 steel mould quenching in different processes[J]. Heat Treatment of Metals, 2003, 28(7): 33-37.
- [6] 汪建华, 陆浩, 魏良武, 等. 局部焊后热处理两类评定准则的研究[J]. 机械工程学报, 2001, 37(6): 24-28.
WANG Jianhua, LU Hao, WEI Liangwu, et al. Investigation on two assessing criteria in local postweld heat treatment[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(6): 24-28.
- [7] 陶文铨. 传热学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.

(下转第 73 页)