

## 高灯杆热浸镀温度场的有限元分析

魏良武, 陆 皓, 顾剑锋

(上海交通大学 材料科学与工程学院, 上海 200030)

**摘要:**通过试验测定了高灯杆浸镀锌液的表面换热系数,分析了焊缝区温度场的分布,采用三维有限元模型定量研究了热浸镀时浸入起始端、浸入角度、速度、深度和换热系数波动等工艺条件对灯杆座焊缝区域周向温差和表里温差的影响。计算结果显示不同的浸入起始端对温差没有明显影响。降低浸镀锌液的换热系数,采用小角度快速浸入可以降低焊缝区域温差。为了降低焊缝区域的温差,建议热浸镀时由底板端快速浸至焊缝上方 30mm 以上。

**关键词:**高灯杆;热浸镀锌;温度场;有限元分析

**中图分类号:**TG156 **文献标识码:**A **文章编号:**0254-6051(2004)12-0070-05

## Finite Element Analysis of Temperature Distribution in Hot Galvanizing for High Lamp Post

WEI Liang-wu, LU Hao, GU Jian-feng

(School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** The heat exchange coefficient of dipping Zn liquid was determined by experiment and the temperature distribution of welding zone was analyzed using three dimensional finite element model. The effects of processing parameters such as starting position, dipping angle, dipping speed, dipping depth and heat exchange coefficient on temperature difference in circumferential direction and temperature difference between surface and center of welding zone of high lamp post base were investigated quantitatively. The analysis result shows that there is no obvious effect of dipping from bottom plate or shaft pipe on temperature difference. The temperature difference of welding zone can be decreased with small dipping angle, high dipping speed and low heat exchange coefficient of dipping Zn liquid. To decrease temperature



图3 40CrNi2MoA 钢主轴调质热处理后的金相组织 ×500

(a) 表面 (b) 3/4R 处 (c) 心部

Fig. 3 Microstructure of 40CrNi2MoA steel shaft after quenching and high temperature tempering ×500

(a) in the surface (b) in the 3/4R layer (c) in the center

处已出现了贝氏体,见图 3b,组织为回火索氏体 + 上贝氏体 + 下贝氏体;心部主要是索氏体和贝氏体,另有微量的游离铁素体,见图 3c。

大锻件钢的淬透性通常是用心部不产生铁素体而获得贝氏体和马氏体组织时的临界直径来表示,称为无铁素体淬透性。大型机械制造厂按大锻件用钢热处理后在某一截面上达到的屈服强度划分等级。对于我厂,后一种则更具实用性。

### 3 结语

40CrNi2MoA 钢大锻件,经过 850 油淬、550 回

火处理后,获得了良好的综合力学性能,整个横截面上的硬度分布比较合理,调质质量稳定可靠,达到了要求的技术条件。

### 参考文献:

- [1] 崔 崑. 钢铁材料及有色金属材料[M]. 北京:机械工业出版社,1980.
- [2] 东北重机学院. 大锻件热处理[M]. 北京:机械工业出版社,1974.
- [3] 安运铮. 热处理工艺学[M]. 北京:机械工业出版社,1982.

difference of welding zone, it is suggested that the high lamp-post should be dipped from bottom plate quickly to a position 30.0 mm above welding zone.

**Key words:** high lamp-post; hot-galvanizing; temperature field; finite element analysis

高杆灯是指灯杆高度在 20m 以上的照明装置,灯杆通常采用碳钢制造,生产时先将各部分焊在一起,为了美观和防止腐蚀,对灯杆要进行热浸镀锌,即将灯杆浸入熔融的锌液中以获得锌镀层。热浸镀锌采用的锌液温度一般在 450 左右。当灯杆热浸镀锌时,各部位焊缝区域各位置的温度差较大,将增加产生裂纹的可能性,因此需要分析灯杆热浸镀锌时的温度场。以虚拟样机模拟为代表的计算机辅助工程(CAE)在产品开发、研制及设计中显示出无与伦比的优越性,可以较大缩短产品的开发时间<sup>[1-2]</sup>。本文采用通用有限元软件 ANSYS 对高灯杆热浸镀锌过程中焊缝区域的温度场的分布及工艺因素的影响进行了研究,通过试验测量了浸镀锌液的表面换热系数,采用三维有限元模型分析了不同工艺条件对焊缝区域温度场的影响,为实际生产提供技术依据。

## 1 研究对象与有限元模型

高灯杆为旋转体,高度为 30m,上端为杆管,下端为底座,衬板、杆管与底板开坡口后埋弧焊焊在一起。图 1a 为灯杆底座部分的纵剖面局部示意图,衬板壁厚 6.0mm,外径 568.0mm,高 80.0mm。杆管壁厚 6.0mm,外径 580.0mm。底板厚为 35.0mm,内径为 484.0mm,外径为 900.0mm。灯杆底座焊后存在较大的焊接残余应力,因此在热浸镀锌时如果该部位存在较大温差,特别是周向温差较大时容易引起裂纹。灯杆

热浸镀时结构中心轴与液面法线有一个初始角度称为浸入角度。理论上,为  $0^\circ$  即竖直浸入时,杆的周向温差最小。生产使用的锌液池长度超过 30m,深度只有 3m,热浸镀时无法将灯杆全部直立浸入,而需要先将灯杆倾斜一定角度,由底座端开始浸入约 3m 长,随后再将灯杆继续放倒(即增加 )并浸入余下部分。考虑到灯杆顶端远离杆座焊缝区域,且杆管壁厚仅 6mm,因此为了简化,对焊缝温度分布的影响忽略不计,分析时只取底座附近部分,高度取  $L = 3.0\text{m}$ 。分析采用三维模型,由于对称性,只需要取一半结构进行分析,网格节点数 15219,单元数 8334。材料为低碳钢,计算中采用的材料热物理性能包括构件表面与空气的换热系数  $\alpha_a$ 、锌液与构件表面的换热系数  $\alpha_z$ 。构件的初始条件为室温 25,热浸镀锌液的温度为 450。边界条件为在灯杆浸入锌液部分的表面施加热对流,未浸入部分的表面施加空气对流散热,对称面为绝热边界。图 1b 中点 1~5 包围的深色区域为焊缝区域,6 为焊缝中心区域附近的一点。研究焊缝区域温度分布时,需要考察热浸镀锌的浸入起始端、浸入角度、速度  $V$ 、深度  $H$  和换热系数波动等工艺条件,对点 1~6 所在圆周位置的周向温差  $T_1$ ,以及对焊缝区域边界点 1~5 与中心点 6 的温差  $T_2$  的影响;还需考察锌液与构件表面的换热系数  $\alpha_z$  的波动对上述温差的影响。

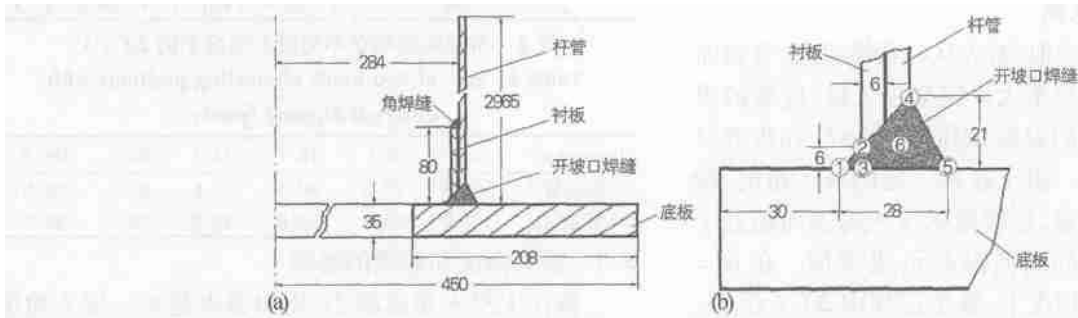


图 1 高灯杆杆座 (a) 与焊缝区 (b) 示意图

Fig. 1 Schematic of lamp-post base (a) and welding zone (b) of the high lamp-post

## 2 换热系数的测量

为计算温度场,需要知道锌液的表面换热系数。试验采用方形探头 (120mm × 120mm × 20mm),为消除

相变的影响,探头材料选用 1Cr18Ni9Ti 不锈钢<sup>[2]</sup>。选用  $\phi 3.0\text{mm}$ ,长 2500mm 的三个铠装 K 型热电偶测量温度。利用电阻储能焊机焊在方形探头长度方向的中截面距表面不同距离处。将探头放入锌液中,热电偶输出的电压信号经数据采集卡滤波放大后进行 A/D 转换输入计算机保存处理。对得到的温度-时间数据进行处理,用反传热法计算锌液的换热系数。图 2 为锌

作者简介:魏良武(1976—),男,江苏淮阴人,博士生,主要从事焊接应力变形数值模拟的研究。E-mail: lwwei@situ.edu.cn

收稿日期:2004-02-10

液表面换热系数测量值  $\alpha_0$  与温度  $T$  的关系。它在低温阶段增加很快并达到一个最大值,随后降低。组成锌液的化学成分对锌液表面换热系数  $\alpha_{zn}$  有一定影响,设  $\alpha_{zn} = A \cdot \alpha_0$ ,  $A$  为比例系数。

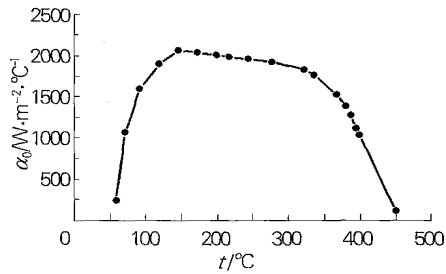


图2 锌液的表面换热系数  $\alpha_0$  与温度  $t$  的关系曲线

Fig.2 Heat exchange coefficient of zinc liquid and temperature

### 3 计算结果与比较

#### 3.1 焊缝区温度分布特征

图3为  $\theta = 30^\circ, V = 16.0 \text{ mm/s}$ , 热浸镀由底板一端浸入不同时刻的温度场。底板刚浸入时,其表面温度达到  $300^\circ\text{C}$  时,由于底板较厚,热量传递到中心位置需要较长时间,此时图3a底板中心位置温度还较低。浸入50s时锌液面已经浸入到杆管,杆管壁厚为  $6.0 \text{ mm}$ ,热量很快传递到管壁中心,因此管壁表面与管壁中心位置温度的差别不大,只是在浸入面附近有均匀的温度过渡,如图3b。此时,杆管表面温度超过  $400^\circ\text{C}$ ,而图中右侧底板中心位置温度还在  $100^\circ\text{C}$  以下。整个浸入过程中最大表里温差出现在底板焊缝区域浸入时,但焊缝区域远端的  $T_2$  和近端的  $T_2$  基本一样,点1~6中,周向温差  $T_1$  最大值出现在点4位置。灯杆完全浸入一段时间后,整个结构的温度最后达到均匀。

#### 3.2 浸入起始端的影响

与底板端先浸入类似,若先从杆顶端浸入,管表面与管中心位置温度差异不大。完全浸入后,底板的表面和中心位置有较大的温差,周向温差  $T_1$  在焊缝浸入锌液前后变化剧烈。由于存在一定的浸入角度,浸入锌液的表面迅速升温,远端尚未浸入的表面还处于初始温度,因此焊缝的周向温差迅速增加。在  $\theta = 30^\circ, V = 16.0 \text{ mm/s}$  的情况下,整个过程中  $T_1$  (点1~6) 最大值分析结果如表1。从表1可以看出,由底板端先浸入与由灯杆上端浸入时的  $T_1$  接近。当浸入速度较慢时,由底板端浸入的  $T_1$  最大值略大于由杆管上端浸入的  $T_1$  最大值;当浸入速度较快时,由底板端浸入的  $T_1$  最大值略小于由杆管上端浸入的  $T_1$  最大值。总体上,由底板端进入和由杆管上端浸入,  $T_1$  最大值并无明显差别。表2为  $\theta = 30^\circ, V = 16.0 \text{ mm/s}$  时,整个热浸镀过程中远端的  $T_2$  最大值。

从表2可知,在浸入速度很慢时  $T_2$  值都较大,底板先浸入的  $T_2$  值小于由杆管上端先浸入的  $T_2$  值。从底板先浸入时,  $T_2$  最大值随浸入速度的增加而增加;由杆管上端浸入时,  $T_2$  最大值随浸入速度的增加而降低。当速度很快时,由底板端进入和由杆管上端浸入趋于一致。

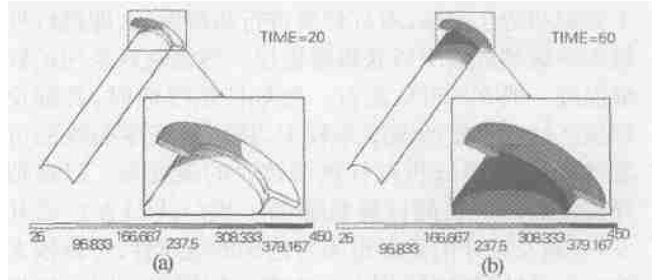


图3 高灯杆热浸镀不同时刻的温度场

Fig.3 Temperature field during hot galvanizing of the high lamp-post at different time

表1 两种起始端在不同浸入速度下的  $T_1$

Table 1  $T_1$  of two kinds of starting positions with different dipping speeds

起始位置	$V/\text{mm s}^{-1}$	1	2	3	4	5	6
底板先浸入	1.7	396.7	401.8	396.0	413.7	397.3	401.5
	8.3	262.4	280.8	247.5	333.2	264.8	274.7
	16.7	182.6	204.6	161.1	268.8	186.5	191.0
	33.3	122.6	140.5	95.2	195.0	126.7	118.6
	83.3	76.5	84.4	45.1	114.0	78.7	54.5
	166.7	51.7	58.1	24.6	75.4	53.3	28.3
杆管先浸入	1.7	390.8	392.4	388.2	402.5	388.6	391.0
	8.3	256.5	276.8	241.2	329.4	256.2	265.8
	16.7	181.0	207.8	158.6	272.4	183.3	189.3
	33.3	123.9	144.9	95.2	201.0	126.8	119.1
	83.3	77.9	86.2	45.4	117.4	79.3	54.8
	166.7	52.6	58.7	24.6	77.1	53.6	27.3

表2 两种起始端在不同浸入速度下的  $T_2$

Table 2  $T_2$  of two kinds of starting positions with different dipping speeds

$V/\text{mm s}^{-1}$	1.7	8.3	16.7	33.3	83.3	166.7
底板先浸入	107.4	72.9	80.3	83.6	85.7	86.0
杆管先浸入	122.9	97.2	92.0	88.8	86.7	86.2

#### 3.3 浸入角度和速度的影响

理论上浸入角度越小,周向温差越小。浸入角度为  $0^\circ$  时,周向温差为  $0^\circ$ ,但受锌液池深度限制无法实现  $0^\circ$  浸入。由于存在一定的浸入角度,浸入锌液的构件表面迅速升温,远端尚未浸入的构件表面还处于初始温度,导致焊缝存在周向温差。浸镀时温度分布取决于锌液与构件表面的传热和内部的固体金属之间的热传导。浸入速度对温差有重要影响,图4为不同浸入角度下点4位置的  $T_1$  和远端的  $T_2$  的最大值。可见,随着浸入角度的减小和浸入速度的增加,周向温

差明显降低。 $T_2$  在浸入速度很慢时都较大,随着浸入速度的增加先降低再增加。浸入角度的增加引起  $T_2$  的增加但其影响不大。

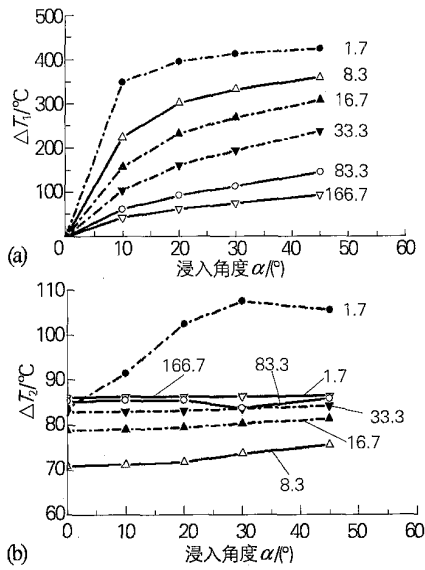


图4 不同浸入角度时的温度差

Fig.4 Temperature difference of different dipping angle

### 3.4 浸入深度的影响

为了减少焊缝区域的周向温差,计算了从底板端浸入到不同高度  $H$  时该高度对温差的影响。图5为  $\alpha = 30^\circ, V = 16.0 \text{ mm/s}$  时,  $H$  对焊缝区域  $T_1$  和远端  $T_2$  的影响。近端焊缝在锌液面下较远,浸入不同的  $H$  其近端的  $T_2$  最大值基本一样,都为  $83.8$ 。远端的  $T_2$  受  $H$  影响较大。当  $H=0$  即锌液面正好浸入在远端焊缝的点4位置时,由于该处上方灯杆没有浸入锌液,温度较低,带走了焊缝吸收的部分热量,因此远端的  $T_2$  小于近端的  $T_2$ 。随着  $H$  增加,周向温差随着  $H$  增加显著降低,浸入到焊缝上方  $50 \text{ mm}$ ,周向温差已经接近  $0$ 。计算结果显示,浸入深度  $H=50 \text{ mm}$  时,  $T_2$  降到  $10$  以下需要约  $70 \text{ s}$ 。同时,随着  $H$  增加,  $T_2$  也增加,当浸入锌液的杆管足够长,远端焊缝的传热条件就越接近近端焊缝,因此  $T_2$  的大小也就趋于近端焊缝的  $83.8$ 。计算结果显示,同样的  $H$  下,角度越大,浸入锌液的杆管部分就越多,焊缝周围受热更加充分,  $T_2$  也就越小,达到均匀的时间就越短。

### 3.5 换热系数的影响

锌液成分的变化对表面换热比例系数  $A$  有一定的影响,假设不同成分组成的锌液的  $A$  在  $0.5 \sim 1.5$  之间波动。图6为点1~6在不同界面换热比例系数下的  $T_1$  和  $T_2$  的最大值( $\alpha = 30^\circ, V = 16.7 \text{ mm/s}$ )。可见换热系数的增加使  $T_1$  和  $T_2$  相应呈线性增加。

这是因为  $z_n$  的增加使锌液传热能力增加,灯杆浸入部分的表面温度上升得更快,从而增加了其与未浸入位置的温差。锌液成分中某些元素的增加将增加换热系数,从而提高了温差,但这些元素有利于其他质量方面的要求如外观成形,因此也不可缺少,所以需要选取适当的比例以兼顾降低温差和提高外观成形的要求。

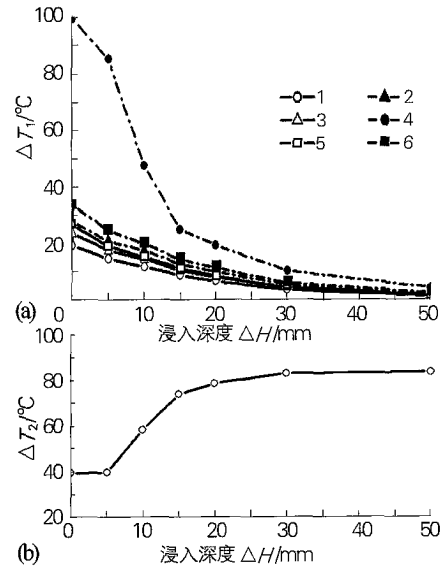


图5 灯杆热浸镀锌不同  $H$  时的温度差

Fig.5 Temperature difference during the lamp post hot-galvanizing at different  $H$

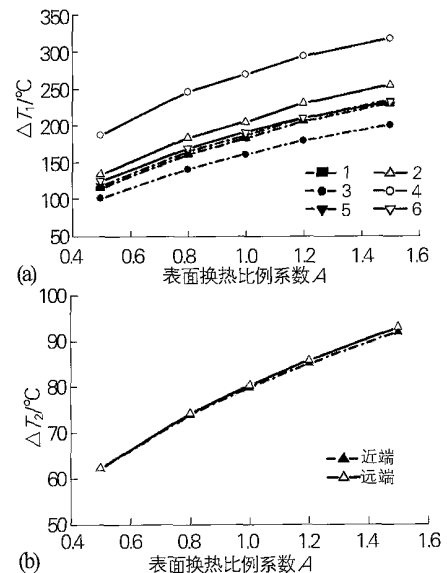


图6 锌液不同换热系数时各点的温度差

Fig.6 Temperature difference of different galvanizing liquid  $z_n$

## 4 结论

- (1) 灯杆不同的浸入端对焊接区域周向温差影响不大。
- (2) 灯杆浸入角度和速度对焊缝处周向温差影响较大,小角度快速浸入有利于降低焊缝位置的温差。
- (3) 锌液换热系数的增加将使焊缝区温差变大。

# 热处理质量的综合量化评价方法和应用

曹双安,罗新民,陈康敏

(江苏大学 材料科学与工程学院,江苏 镇江 212013)

**摘要:**提出了正交设计和热处理综合评分中存在的 key 问题,定义了相对性能指数(RI)、等价性能指数(EI)和综合性能值(IV)3个概念,给出了多个指标的综合量化评价方法。通过 GCr15 钢热处理效果的评价实例,验证了这种新的综合量化评价方法是可行的。

**关键词:**正交设计;热处理;多指标;综合量化;评价方法

**中图分类号:**TG157 **文献标识码:**C **文章编号:**0254-6051(2004)12-0074-03

## Evaluation Method of Comprehensive Quantization on Heat Treatment Quality and Its Application

CAO Shuang-an, LUO Xing-min, CHEN Kang-min

(School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China)

**Abstract:** The key question in comprehensive quantization assessment of orthogonal design and heat treatment is put forward. The relative performance index (RI), equivalent performance index (EI) and integrated performance value (IV) are clearly defined. Evaluation method of the comprehensive quantization of multiple-target is formulated. Finally, this new comprehensive quantization evaluation method is verified by the evaluation example about results of heat treatment of GCr15 steel.

**Key words:** orthogonal design; heat treatment; multiple-target; comprehensive quantization; evaluation method

### 1 引言

正交设计是利用“正交表”科学地安排与分析多因素试验的方法。它的主要优点是能在很多试验方案(也称为试验条件)中挑选出代表性强的少数试验方案,并通过对这少数试验方案的试验结果的分析,推断出最优方案,同时还可以作进一步的分析,得到比试验结果本身给出的还要多的有关各因素(也称因子)的信息<sup>[1]</sup>。目前,多指标正交试验设计的分析方法主要有两种:综合平衡法和综合评分法。其中,综合评分法是根据各指标重要性的不同,通过对其试验结果的综合分析,给每组试验评出一个指标,作为这组试验的总指标。根据这个总指标,利用单指标试验结果的直观分析法作进一步的分析,从而选出较好的试验方案,其关键问题是确定合适的评分标准和各指标的权数。

金属材料具有各种不同的性能,包括物理性能、化学性能、工艺性能和力学性能。工件的热处理,不论是预处理还是最终处理,通过考查工件的强度、硬度、塑性、韧性、耐磨性、缺口敏感性、显微组织结构等,可判断工件是否满足服役条件、热处理是否合理。然而,由于它们反映的是热处理质量的不同方面,其量纲不同、试验测定的方法也不同,甚至存在非数量化指标。例如:抗拉强度  $\sigma_b$  和断裂韧性  $K_{IC}$  分别表示材料产生最大均匀塑性变形的抗力和材料抵抗裂纹失稳扩展的能力,量纲分别为  $\text{MN} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $\text{MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$ ;洛氏硬度(HRC)和维氏硬度都表示材料表面在单位面积内抵抗变形和抵抗破裂的能力,52.4HRC 与 550HV 相当,而它们在数值上却相差一个数量级<sup>[2]</sup>;网状碳化物对轴承钢的力学性能及在反复冲击载荷下的疲劳寿命有着显著影响<sup>[3]</sup>,而碳化物量的多少和分布状态是一个很难用数量来衡量的指标,YB 9—1968 仅有 1~5 级的网状碳化物级别图。金属热处理有时要求材料热处理后具有较高的硬度和耐磨性,有时要求较高的综合力学性能。而评分标准和各指标的权重数还没有一个统

**作者简介:**曹双安(1980—),男,河南驻马店人,硕士生,研究方向为金属热处理及环境材料。联系电话:0511-8794635, E-mail: shulin608903@sohu.com; slfly@ujs.edu.cn

**收稿日期:**2004-04-28

(4) 快速浸入到焊缝位置上方 30mm 以上可较好地降低焊缝位置的周向温差。

**参考文献:**

[1] 胡明娟,潘健生,李兵,等.界面条件剧变的淬火过程三维温度场的计算机模拟[J].金属热处理学报,1996,17(增刊):90-97.

[2] 花银群,杨继昌,胡涛,等.应用 ANSYS5.7 软件模拟激光淬火曲轴温度场的研究[J].金属热处理,2002,27(8):37-38.

[3] 姚新,顾剑锋,胡明娟,等.空心圆柱体 GCr15 钢淬火过程的计算机模拟[J].材料热处理学报,2003,24(1):78-81.