

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2019.03.013

基于 Kriging – PSO 智能算法优化焊接工艺参数

马小英<sup>1</sup>, 孙志礼<sup>1</sup>, 张毅博<sup>1</sup>, 臧旭<sup>2</sup>

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中国人民解放军驻沈阳飞机工业(集团)有限公司, 辽宁 沈阳 110850)

**摘 要:** 焊接工艺参数是影响焊接成型质量的关键因素. 由于工艺参数和焊接接头的力学性能之间的关系是多维隐式的, 因此, 提出了一种 Kriging 模型和粒子群相结合的优化算法, 解决了在交流钨极氩弧焊中 3.5 mm 厚镁合金薄板的工艺参数优化问题. 首先通过田口正交法构建样本集, 其次建立输出和输入之间的 Kriging 代理模型, 并通过提出的算法获得最优工艺参数组合及其力学性能. 结果表明: 通过该算法获得的最优工艺参数组合, 其对应的焊接接头的抗拉强度、屈服强度和平均显微硬度分别达到母材的 97.6%、98% 和 91.5%, 减少了经济和时间成本, 提高了焊接工艺设计能力.

**关 键 词:** 交流钨极氩弧焊; 镁合金; 焊接工艺参数; Kriging 模型; 粒子群优化

**中图分类号:** TG 407      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2019)03-0370-06

Optimization of Welding Process Parameters Based on Kriging-PSO Intelligent Algorithm

MA Xiao-ying<sup>1</sup>, SUN Zhi-li<sup>1</sup>, ZHANG Yi-bo<sup>1</sup>, ZANG Xu<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;  
2. People's Liberation Army in Shenyang Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Shenyang 110850, China.  
Corresponding author: MA Xiao-ying, E-mail: maxiaoying722@163.com)

**Abstract:** Welding process parameters are the key factors affecting the quality of welding. Since the relationship between process parameters and the mechanical properties of welded joints is multi-dimensional and implicit, an optimization algorithm combining Kriging model and particle swarm optimization is proposed to optimize the process parameters of 3.5 mm magnesium alloy sheet in AC\_TIG welding. Firstly, the sample set is constructed by Taguchi orthogonal method. Secondly, the Kriging surrogate model is established between output and input, and then the optimal combination of process parameters and its mechanical properties are obtained by the proposed algorithm. The results show that such optimal process parameters as tensile strength, yield strength and average micro-hardness of the welded joints reach 97.6%, 98% and 91.5% of the base metal respectively. The proposed algorithm not only reduces economic and time costs, but also improves the welding process design capabilities.

**Key words:** AC\_TIG welding; magnesium alloy; welding process parameters; Kriging model; particle swarm optimization

由于镁合金材料具有轻质、高比强度和高刚度的特性, 因此被广泛用于汽车工业和航空航天领域<sup>[1-2]</sup>. 镁合金结构材料的连接问题会直接影响其应用范围, 而焊接是成本最低化的连接手段之一. 因此, 镁合金材料的焊接成为研究热点. 本文主要研究 Mg – Gd – Y 合金体系, 因为其价格低, 具有很高的耐热性, 较好的热稳定性. 焊接工艺参数(焊接电流、焊接速度和保护气体流量)是确保焊缝质量的重要影响因素<sup>[3-6]</sup>, 因此采用智能优化算法和代理模型相结合的优化方式, 搜寻最优的焊接工艺参数组合. 这种智能优化方法成为焊接优化的研究热点. Lin<sup>[7]</sup>提出了结合田口方

法、灰度相关理论和神经网络的方法优化 GMA 焊缝几何外形,该方法计算过程繁琐,需要大量的试验样本点. Gao 等<sup>[8]</sup>在 316L 不锈钢纤维激光电弧对接焊中,应用 Kriging 模型和遗传算法优化焊接工艺参数.但是遗传算法编程复杂,且收敛速度随目标函数极值点个数、分布、交叉率和变异率等不同差别很大.

与响应面、神经网络等模型相比,Kriging 模型是一种精确的插值方法,可以计算局部和全局插值精度,建立模型过程中所需参数个数较少,且已形成被广泛认可的最优模型参数计算方法;粒子群优化算法具有易于编程实现、收敛快、可有效避免局部收敛等优点.因此,将 Kriging 模型和粒子群算法相结合对 GW53 镁合金交流钨极氩弧焊缝的力学性能(如:抗拉强度、显微硬度)进行优化.所提的焊接参数优化方法具有涉及参数少、简单明了、易于编程实现等特点.

## 1 试验方案

试验选用交流钨极惰性气体保护焊,该方法广泛应用于镁合金的焊接中,钨极电弧稳定,焊缝热影响区小,变形小,接头的力学性能和耐腐蚀性能都较高.焊接母材选用经过挤压、轧制和退火态时效处理的 Mg - 5Gd - 3Y 变形镁合金,保护气体为纯度 99% 的氩气. Mg - 5Gd - 3Y 镁合金的焊接试件的尺寸为 160 mm × 60 mm × 3.5 mm,焊接材料 Mg - 5Gd - 3Y 镁合金的化学成分: Gd 4.9%, Y 2.99%, Mn 0.018%, Zr 0.005%, Mg 余量.母材的抗拉强度为 250 MPa,屈服强度为 166 MPa.镁合金焊接填充金属的选择主要依据母材的成分,一般情况下可以选用与母材成分相同的填充金属,避免镁合金在焊接过程中产生其他成分和缺陷影响焊接接头的力学性能.焊丝应从与工件成极小角度的方位上喂入电弧中,送丝导嘴在焊枪移动的前方,焊丝可以始终准确地进入熔池中,如果焊丝位置略有偏差也可以得到足够的能量以细小的熔滴向熔池过渡,确保焊丝熔敷量均匀.线切割机切割后的焊丝尺寸为 200 mm × 3.5 mm × 4 mm.

AC - TIG 需要夹具固定焊接件,防止镁合金焊件在焊接过程中产生变形,图 1 为焊接件的 V 型坡口,坡口尺寸:  $d = 3.5\text{ mm}$ ,  $n = 2\text{ mm}$ ,  $b = 1.0\text{ mm}$ ,  $\theta = 60^\circ$ .在焊件背部用铜板作为垫板,焊枪固定在速度可控制的小车上,手动送丝.焊接设备和焊件的示意图如图 2 所示.

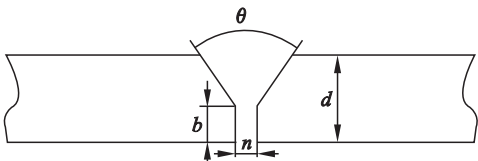


图 1 坡口形状  
Fig. 1 Groove shape

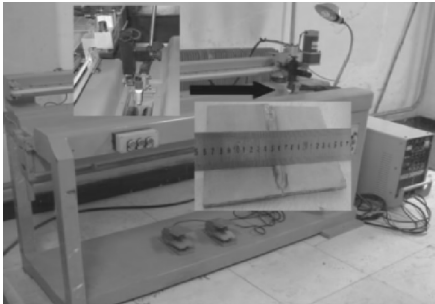


图 2 试验设备及试件  
Fig. 2 Test equipment and weldment

焊后进行焊接件的抗拉试验和微观硬度测试,首先沿着焊接样板的焊缝方向截取试样,试样进行机械抛光,用蚀刻液为 4% 的硝酸酒精溶液擦拭试样表面,然后干燥.拉伸试验机型号为 SANS - CMT5015,试件如图 3 所示.显微硬度采用维氏显微硬度计测量,测试方法如图 4 所示.

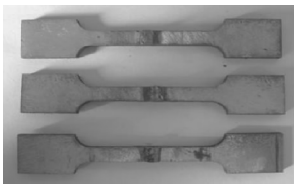


图 3 拉伸试验试样  
Fig. 3 Tensile test specimens

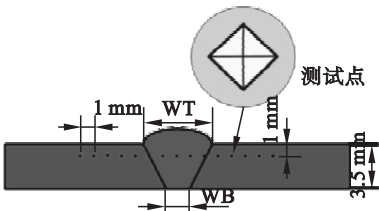


图 4 显微硬度测试  
Fig. 4 Micro-hardness test

## 2 试验设计和结果

为了减少焊接试验的时间和经济成本,获得焊接接头力学性能和焊接工艺参数之间的函数关系,应用田口正交试验方法给出参数水平如表 1 所示,其中  $x_1$  是焊接电流,  $x_2$  是焊接速度,  $x_3$  是保护气体流量,采用三因素五水平的正交试验法构建 Kriging 预测模型的正交试验数组.

表 1 输入参数和水平					
Table 1 Input parameters and their levels					
参数	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4	水平 5
$x_1/A$	155	165	175	185	195
$x_2/(mm \cdot s^{-1})$	3	5	7	9	11
$x_3/(L \cdot min^{-1})$	7	9	11	13	15

### 3 基于 Kriging – PSO 算法的优化策略

基于 Kriging – PSO 的优化算法的具体步骤如下(见图 5):

- 1) 田口正交试验法获得设计变量和对应的响应值的试验数组;
- 2) 根据试验数组和响应值,建立设计变量和目标函数之间的 Kriging 预测模型;
- 3) 应用粒子群优化算法优化目标函数,通过 Kriging 模型来估计目标函数值;
- 4) 通过上述的 Kriging – PSO 组合的优化算法获得目标函数的优化值,输出最优目标函数值对应的设计变量的组合.

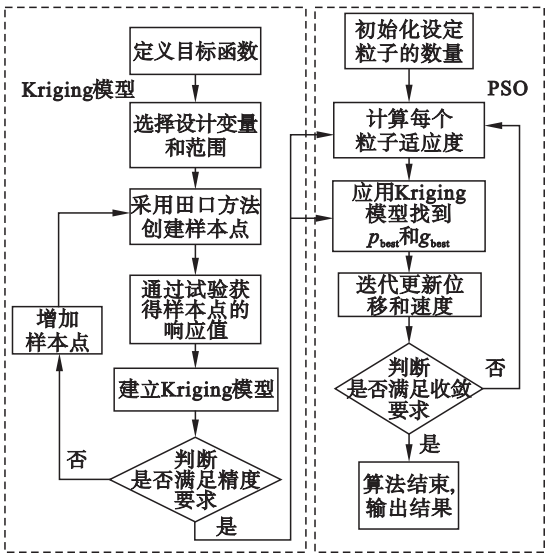


图 5 Kriging – PSO 的优化策略的流程图  
Fig. 5 Flow chart of the optimization strategy of Kriging-PSO

#### 3.1 Kriging 理论

Kriging 的数学思想是随着经典的统计学理论形成的,它由参数模型和非参数随机过程组成,计算模型简单,方便应用于预测实际工程问题. Kriging 模型作为一种半参数插值技术,与传统的插值技术相比,只需要用估计点附近的信息,而不是用所有的信息来模拟未知信息,并且可以分析

已知信息的趋势和动态. 半参数化的 Kriging 模型不需要建立特定的数学模型,应用更加灵活和方便,并且与其他近似模型相比,模型的精度不会受到随机误差的影响<sup>[9]</sup>. Kriging 模型的具体公式推导见文献[9].

#### 3.2 粒子群算法理论

粒子群算法是一种模拟鸟群觅食的仿生算法,它采用简单的速度位移模型,通过群体中粒子间的协作与竞争产生的群体智能优化搜索. 在算法优化的过程中,随机粒子  $d$  的速度和位移分别为  $v_d^k$  和  $x_d^k$ ,适应度函数计算粒子  $d$  的第  $k+1$  次迭代更新自身的速度和位移的公式为

$$v_d^{k+1} = wv_d^k + c_1r_1(p_d^k - x_d^k) + c_2r_2(p_g^k - x_d^k), \quad (1)$$

$$x_d^{k+1} = x_d^k + v_d^{k+1}. \quad (2)$$

其中: $w$  为惯性权重; $c_1$  和  $c_2$  为加速度因子; $r_1$  和  $r_2$  为  $[0,1]$  间的随机数; $p_d^k$  和  $p_g^k$  分别为个体极值和群体极值.

Yang<sup>[10]</sup> 提出的线性递减权重来转换适应度函数,表达式为

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{k_{\max}} \times k. \quad (3)$$

其中: $w_{\max}$  和  $w_{\min}$  分别为最大惯性权重和最小惯性权重; $k$  和  $k_{\max}$  分别是当前的迭代次数和最大迭代次数.

### 4 焊接工艺参数的优化

#### 4.1 焊接工艺优化的数学模型

根据试验样本集,建立基于 Kriging 模型的力学性能的目标函数,基于 Kriging 模型的焊接工艺参数优化数学模型可以表示为

$$\left. \begin{aligned} & \mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3); \\ & \min f(\mathbf{x}) = \frac{1}{f_T(x_1, x_2, x_3) + f_{HV}(x_1, x_2, x_3)}. \\ & \text{s. t.} \quad \begin{aligned} & 150 \leq x_1 \leq 200; \\ & 2.8 \leq x_2 \leq 11.2; \\ & 6.8 \leq x_3 \leq 15.2. \end{aligned} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中: $x_1, x_2, x_3$  分别是焊接电流、焊接速度和保护气体流量; $f_T$  和  $f_{HV}$  分别是焊接接头抗拉强度和平均显微硬度的输出响应.

#### 4.2 建立 Kriging 代理模型

根据正交试验表,通过 Kriging 代理模型,构建焊接工艺参数和抗拉强度、焊接工艺参数和显微硬度之间的响应面模型. 根据文献[9]中 Kriging 模型的计算公式得到相关参数  $\theta$  和向量因子  $\beta$  的值,建立基于 Kriging 的预测模型. 以抗

拉强度为例, 计算得到相关参数  $\theta = [4.746\ 7\ 2.633\ 4\ 50]$ , 向量因子为  $\beta = -0.001\ 7$ , 建立抗拉强度和焊接工艺参数的预测模型. 为了说明预测模型的精度和有效性, 根据预测模型获得新的焊接工艺参数组合与抗拉强度的响应预测值, 再根据预测模型得到的焊接工艺参数组合进行单一变量的试验, 试验得到的抗拉强度真实值和预测值之间的比较结果如图 6 所示. 由图 6 可知, 抗拉强度随着焊接工艺参数的变化预测误差不到 3%, 这些结果指出基于 Kriging 模型的预测模型的精度能被应用于优化焊接工艺参数中.

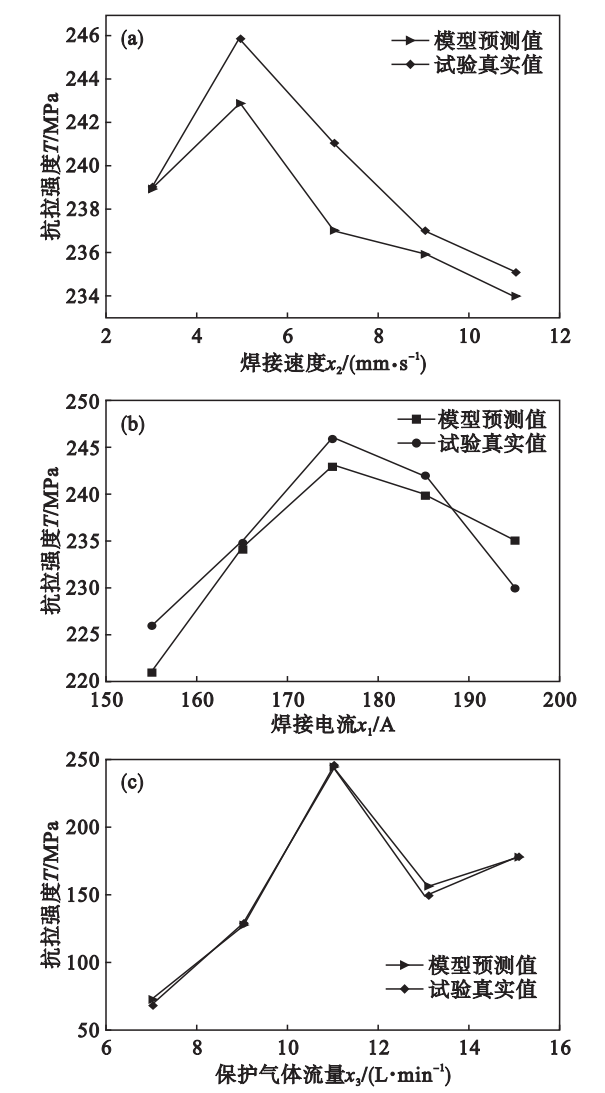


图 6 焊接件试验值和预测值之间的比较  
Fig. 6 Comparison of experimental and predicted results for the welded plates  
(a) —抗拉强度随焊接速度的变化;  
(b) —抗拉强度随焊接电流的变化;  
(c) —抗拉强度随氩气流量的变化.

从图 6 可以看出, 焊接工艺参数和抗拉强度

是非线性的. 通过比较图 6a ~ 图 6c 可知, 焊接接头的抗拉强度的主要影响因素依次是氩气流量、焊接电流、焊接速度, 这个结果与焊接工艺的要求相符合, 氩气流量过小, 熔池表面氧化严重, 焊接接头产生焊接缺陷; 氩气流量过大, 气流导致热量损失过多, 保护效果不佳, 焊接接头容易产生未焊透、未熔合和气孔等缺陷. 因此, 在交流钨极氩弧焊中, 为了得到好的焊接质量, 提高焊接接头的力学性能, 选取合适的保护气体流量值非常重要.

### 4.3 优化结果

建立基于 Kriging 代理模型的焊接接头的力学性能和焊接工艺参数之间的近似模型后, 采用粒子群算法优化焊接工艺参数. 在粒子群优化算法中不同的个体数量为了避免陷入局部最优, 迭代次数和适应度之间的关系如图 7 所示, 显然, 粒子群优化的迭代收敛速度随着种群数量的增加而增加. 根据以上的优化分析, GW53 镁合金焊接件优化后的焊接电流、焊接速度和氩气流量分别为 176.59 A, 3.45 mm/s, 10.99 L/min. 为了验证焊接工艺参数的优化结果进行试验验证, 焊接电流为 176 A, 焊接速度为 3.5 mm/s, 氩气流量为 11 L/min.

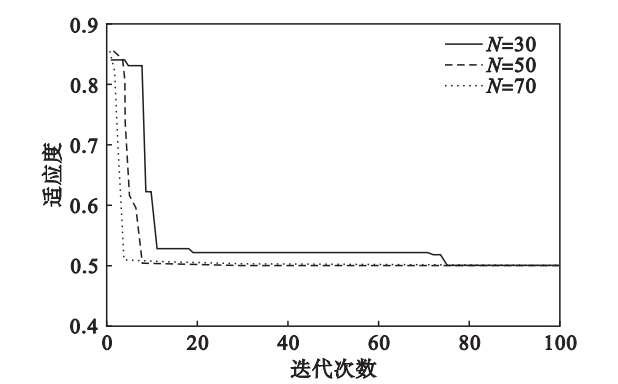


图 7 迭代次数和适应度的关系  
Fig. 7 Relation of iterations with fitness

GW53 镁合金在优化后的焊接工艺参数下进行焊接, 并对焊接后的试件进行抗拉强度和平均显微硬度检测, 优化后的焊接接头抗拉强度为 244 MPa, 达到母材的 97.6%, 屈服强度为母材的 98%; 优化后的焊缝区的平均显微硬度达到了母材的平均硬度的 91.5%, 数据如图 8 所示.

优化后焊接工艺参数组合 (焊接电流 176 A, 焊接速度 3.5 mm/s, 氩气流量 11 L/min) 的镁合金焊接件的显微组织和断口分析如图 9 和图 10 所示.



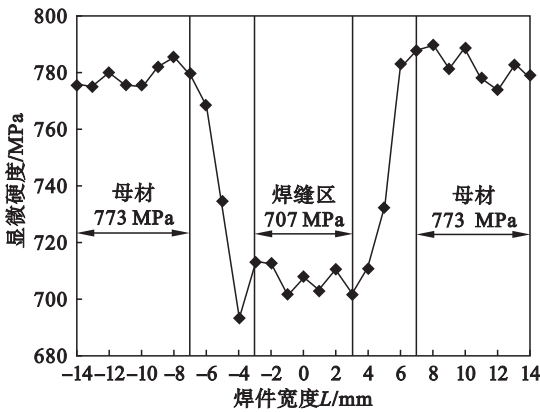


图 8 优化后的焊接接头和母材的显微硬度  
Fig. 8 Micro-hardness of the welded zone and base metal after optimization

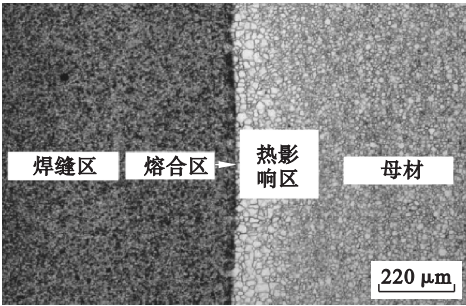


图 9 GW53 镁合金焊接件的显微组织  
Fig. 9 Microstructure for GW53 magnesium alloy welded joint

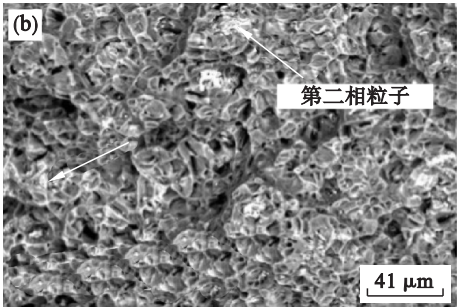
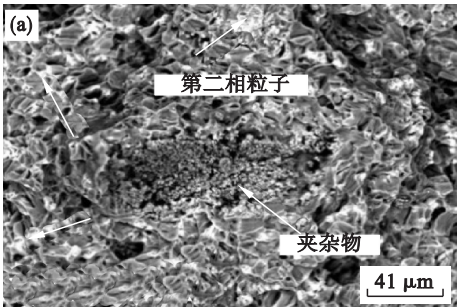


图 10 GW53 镁合金焊接件的断口形貌  
Fig. 10 Tensile fracture morphology of GW53 magnesium alloy welded plates

(a)—田口试验参数;(b)—预测模型最优参数组合。

图 9 为焊接接头的微观组织,焊缝区和热影响区分界比较明显,由于镁合金的热导率大,且焊

接时有铜垫板,所以热量散失快,焊缝区金属快速凝固,从而形成比母材细小的晶粒.此外,从图 10 断口形貌观察到,田口试验中最优焊接工艺参数组合的断口形貌和 Kriging 预测模型最优焊接工艺参数组合下的断口形貌相比,图 10a 中存在大量的第二相粒子和焊接缺陷夹杂,图 10b 中有较少的第二相粒子,没有焊接缺陷,因此,Kriging 预测模型优化后的焊接接头呈现出较好的力学性能.进一步证明采用 Kriging 模型和 PSO 相结合的优化算法对焊接参数组合进行了有效的控制,减少了 GW53 镁合金焊接过程中的缺陷.

5 结 论

1) 焊缝的抗拉强度、屈服强度和平均显微硬度达到母材的 97.6% ,98% 和 91.5% ,并且优化后的焊接工艺参数组合为:焊接速度 3.5 mm/s,焊接电流 176 A,氩气流量 11 L/min. 优化的结果验证了该方法能有效地进行焊接工艺参数的优化,通过焊接工艺参数和目标函数之间的 Kriging 模型,不但能得到最佳的焊接工艺参数组合,而且可以减少焊接试验的数量,降低试验成本,对焊接工艺设计人员的焊接工艺规划有指导性意义.

2) 基于 Kriging 预测模型的分析可知,保护气体氩气的流量是影响焊接接头抗拉强度的最主要的影响因素.焊接电流和焊接速度对抗拉强度的影响次之.

参考文献:

[ 1 ] 徐河,刘静安,谢水生. 镁合金制备与加工技术[ M ]. 北京:冶金工业出版社,2007.  
( Xu He, Liu Jing-an, Xie Shui-sheng. Magnesium alloy preparation and processing technology [ M ]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2007. )  
[ 2 ] Kulekci M K. Magnesium and its alloys applications in automotive industry [ J ]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,2009,39(9/10) :851 – 865.  
[ 3 ] Feng J L,Sun Z L,Sun H Z,et al. Optimization of structure parameters for angular contact ball bearings based on Kriging model and particle swarm optimization algorithm [ J ]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2017, 231 (23) :4298 – 4308.  
[ 4 ] Singh A,Cooper D E,Blundell N J,et al. Gibbons,modelling of weld-bead geometry and hardness profile in laser welding of plain carbon steel using neural networks and genetic algorithms [ J ]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*,2014,27(7) :656 – 674.

( 下转第 397 页 )