

再制造 HT250 基体的亚激光瞬间熔技术工艺参数优化^{*}

赵运才, 杨雷雷, 刘宗阳

(江西理工大学 机电工程学院, 江西 赣州 341000)

摘 要: 工艺参数的选取对再制造产品的表面质量至关重要。采用亚激光瞬间熔技术修复了 HT250 基体的表面缺陷, 并利用响应曲面法(RSM)和有限单元法(FEM)对其修复过程的工艺参数进行了优化。同时详细分析了输入功率 P 、单次修复时间 t 、速度 V 和保护气体流量 G 等 4 个因素对修复后试样抗拉强度的影响。研究表明: 抗拉强度受输入功率和单次修复时间影响显著, 而对其它元素呈弱依赖性。HT250 基体的亚激光瞬间熔技术的最优工艺参数为输入功率 2 800 W, 持续时间 0.57 s, 速度 6.5 mm/s, 气体流量 3 L/min。

关键词: 亚激光瞬间熔; 再制造; 响应曲面法(RSM); 有限单元法(FEM)

中图分类号: TG174.44; TH16

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2015)04-0127-07

Process Parameter Optimization of Remanufactured HT250 Matrix by Sub Moments of Laser Cladding Technology

ZHAO Yun-cai, YANG Lei-lei, LIU Zong-yang

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiang-xi)

Abstract: The selection of the process parameters of the sub laser flash smelting is essential for the surface quality of the remanufacturing products. The surface defects of HT250 substrate were repaired by sub moments of laser cladding technology, the process parameters were optimized by using response surface method (RSM) and finite element method (FEM), and the effect of in detail power, processing time, velocity and gas flow on tensile strength of remanufactured sample were also analysized in detail. It is found that the tensile strength is significantly influenced by the input power P and single repair time t , while the influence of other factors is weak. The optimal remanufactured HT250 matrix conditions are input power of 2 800 W, processing time of 0.57 s, speed of 6.5 mm/s, and gas flow of 3 L/min.

Keywords: sub moments of laser cladding; remanufacture; response surface methodology (RSM); finite element method (FEM)

0 引 言

再制造工程是以产品全寿命周期理论为指导, 遵循优质、高效、节能、环保的原则, 以先进表面工程技术为基础, 实现对失效零部件性能恢复甚至提升的过程^[1]。汽车发动机中孔类零件常因腐蚀、磨损和冲击而失效, 致使发动机性能下

降, 寿命缩短, 甚至引发严重事故。随着现代工业的发展, 发动机缸体在实际使用过程中还将面临更加复杂的综合作用的影响, 故对再制造产品质量的要求更为严苛^[2]。再制造工艺参数选取对再制造产品质量的好坏起着决定性的影响^[3]。因此, 通过优化工艺参数来提高再制造产品的质

收稿日期: 2015-05-06; **修回日期:** 2015-06-19; **基金项目:** * 国家自然科学基金(50965008); 江西省教育厅科技计划(GJJ14424)

通讯作者: 赵运才(1964—), 男(汉), 教授, 博士; **研究方向:** 再制造工程、摩擦磨损与抗磨技术; **Tel:** 139 7073 6384; **E-mail:** zhaoyunca@126.com

网络出版日期: 2015-06-23 17:17; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20150623.1717.012.html>

引文格式: 赵运才, 杨雷雷, 刘宗阳. 再制造 HT250 基体的亚激光瞬间熔技术工艺参数优化 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(4): 127-133. Zhao Y C, Yang L L, Liu Z Y. Process parameter optimization of remanufactured HT250 matrix by sub moments of laser cladding technology [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(4): 127-133.

量对再制造工程有着重要的意义。

亚激光瞬间熔技术是在氩气保护下通过设备瞬间释放上千安左右的脉冲高能离子流,将修补材料瞬间熔化而达到再制造目的的一种新型表面工程技术。因其具有可与激光相媲美的修复质量,远低于激光技术的再制造成本,在船舶、汽车、能源、电力和石油开采等领域得到广泛应用^[4]。国内外与之相关的研究报道多集中在产品修复后性能的研究上,对其再制造参数优化研究较少。而响应曲面法(Response surface method, RSM)是一种新发展起来的结合实验设计和统计技术的数学优化方法^[5],可通过对实验数据的分析,得出拟合函数和三维曲面图,进而直观的反映出影响因子对响应值的影响。响应曲面法已成功应用于生物、化学、摩擦学和激光焊接等领域^[6-9],但尚未应用在亚激光瞬间熔再制造领域。

文中结合有限单元法和响应曲面法,设计了4因素3水平的回归分析试验,采用亚激光瞬间熔设备在不同工艺条件下修复失效工件,并建立了输入功率*P*、时间*t*、速度*V*和气体流量*G*等影响因子与修复层抗拉强度之间的数学模型,讨论了4个因子对响应值影响的显著性和再制造工艺参数的优化问题。

1 试验方法与试样制备

1.1 有限元模型建立及网格划分

亚激光瞬间熔修复受损工件时具有加热温度高、高温停留时间短和冷却速度快等特点,而且随着热源的移动,温度场在时间和空间上不断发生剧烈变化。因此,亚激光瞬间熔修复过程的温度场分析属于典型的非线性瞬态热传导问题,其控制方程为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \bar{Q}$$

(1)

式中: ρ 为材料的密度,kg/m³; c 为材料的比热容,J/(kg·℃); λ 为热传导系数,W/(m·℃); T 为温度,℃; t 为传热时间,s; $\bar{Q}$ 为内热源强度,J; ρ, c, λ 均是关于温度的函数,随温度变化。

为了便于对HT250材料再制造的过程进行有限元建模分析,文中将模型简化并利用Visual-Mesh软件划分网格。基体材料采用发动机缸体常

用材料HT250灰铸铁,修复层材料选用Cr20Ni80镍铬合金。因修复区温度场及应力场变化最为剧烈,为确保计算精度,则修复区网格划分要细密,同时为兼顾计算速度,远离修复区的网格划分则相对粗大。由于热源模型选择对模拟结果起决定性作用^[10],故选用适合高能离子束热源特性的双椭球热源模型来模拟亚激光瞬间熔热源。

1.2 响应曲面法试验设计

响应曲面法(RSM)是运用数学方法和统计技术,对多因素变量问题进行建模分析,从而获取最优工艺条件的一种方法^[11-13]。现设定为自变量,为因变量即响应值,假设所有自变量和因变量均连续可控,在不受其它因素影响的情况下,因变量和自变量的基本统计模型是:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$$

(2)

若响应值随因子的变化呈线性分布,则响应适用于一次方程拟合,即:

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \dots + \alpha_k x_k + \epsilon$$

(3)

若响应值随因子的变化呈曲线分布,则响应适用于二次方程拟合,即:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \sum_{i=2}^k b_{ij} x_i x_j + \epsilon$$

(4)

式中: $\alpha = 0, 1, \dots, k$ 和 $b_{i,j} = 0, 1, \dots, k$ 均表示回归系数; ϵ 是系统误差,且服从(0, σ^2)的正态分布。

采用亚激光瞬间熔修复失效工件,选择输入功率*P*,单次修复时间*t*,速度*V*,气体流量*G*为变量,试样抗拉强度*y*为响应值。根据响应曲面法试验设计原理,设计了4因素3水平的分析试验,共29组。试验影响因子和水平选值如表1所示。

表 1 试验影响因子及取值水平			
Table 1 Experiment factors and numeric value			
Factor	Value level		
	-1	0	1
<i>P</i> /W	2 800	3 000	3 200
<i>t</i> /s	0.57	0.61	0.65
<i>V</i> /(mm·s ⁻¹)	5	6.5	8
<i>G</i> /(L·min ⁻¹)	1	3	5

1.3 试样制备及结果

拉伸试样基体材料选用发动机缸体常用材料 HT250 灰铸铁,在基体上表面中心处加工 8 mm×1 mm 的凹槽,试样尺寸及精度参照 GB/T 228-2002,如图 1 所示。用 18 μm(800 目)和 9 μm(1 500 目)的砂纸分别对凹槽粗磨和精磨后用抛光布抛光至凹槽表面粗糙度值达到 0.8 μm 时,将试样放入丙酮中进行超声清洗,去除表面的油污和杂质。凹槽修复采用 YJG-II 型亚激光瞬间熔设备,修补材料选用直径为 1.5 mm 的 Cr20Ni80 镍铬合金,其化学成分如表 2 所示。修复后试样经车削加工精整至达到原试样尺寸及精度后,采用 RSA250 型电子万能材料试验机对修复试样两端施加沿轴向的加载力来测试修复试样的抗拉强度,试验在常温(20 ℃)下进行,试验结果如表 3 所示。

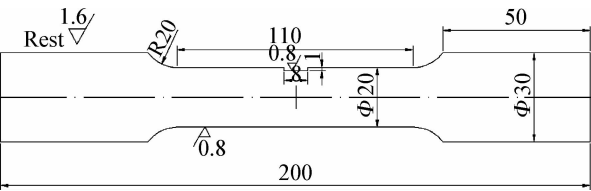


图 1 拉伸试样示意图
Fig.1 Schematic diagram of the tensile sample (Unit: mm)

表 2 Cr20Ni80 的化学成分

Table 2 Chemical compositions of Cr20Ni80				
(w/%)				
Element	C	Mn	Si	P
Content	≤0.08	≤0.6	0.75-1.6	≤0.02
Element	S	Al	Cr	Ni
Content	≤0.015	≤0.5	20-23	Bal.

2 结果与讨论

2.1 有限元分析

利用 SYSWELD 软件对 HT250 材料的亚激光瞬间熔修复过程进行了三维瞬态有限元模拟,重点研究了不同输入功率下试样修复区的温度场分布情况。因为修补材料 Cr20Ni80 的熔点为 1 400 ℃,沸点为 2 478 ℃,所以只有当试样熔合区的温度介于这两个临界温度之间时,修复试样才能够完全熔化且不被汽化。研究表明,当输入功率 $P<1\,540\text{ W}$ 或 $P>3\,640\text{ W}$ 时,熔合区温度均不满

足要求,即输入功率 P 的取值应为 $1\,540\text{ W}<P<3\,640\text{ W}$ 。相关研究^[14]表明修复层质量会随输入功率 P 、单次修复时间 t 和保护气体流速 G 的增加

表 3 试验设计及结果
Table 3 Experimental runs and results

Process factors					Response factors
No.	P/W	t/s	$V/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$G/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	Y/MPa
1	2 800	0.65	6.5	3	216.52
2	3 000	0.61	8.0	1	195.79
3	3 200	0.61	8.0	3	205.43
4	3 000	0.65	8.0	3	210.35
5	3 000	0.65	6.5	1	210.37
6	3 200	0.65	6.5	3	223.44
7	3 000	0.61	6.5	3	196.13
8	3 000	0.57	6.5	5	219.15
9	3 000	0.57	5.0	3	219.24
10	3 000	0.57	6.5	1	218.96
11	2 800	0.61	5.0	3	211.42
12	3 200	0.57	6.5	3	216.45
13	3 000	0.65	8.0	1	210.23
14	2 800	0.61	6.5	1	211.29
15	3 200	0.61	5.0	3	205.64
16	3 000	0.65	8.0	3	210.47
17	3 000	0.61	5.0	5	196.24
18	3 000	0.65	5.0	3	210.79
19	2 800	0.61	6.5	5	211.50
20	3 000	0.61	5.0	1	196.16
21	3 200	0.61	6.5	1	205.48
22	2 800	0.61	8.0	3	211.34
23	3 000	0.61	8.0	5	196.10
24	3 000	0.65	6.5	3	210.54
25	2 800	0.57	6.5	3	222.47
26	3 000	0.57	8.0	3	218.82
27	3 200	0.61	6.5	5	205.71
28	3 000	0.65	6.5	5	210.73
29	3 000	0.61	8.0	3	195.91

而增加,随修复速度 V 的增加而降低。因此,结合亚激光瞬间熔设备参数取值范围,确定试验各参数取值范围为 $2\,800\text{ W}<P<3\,200\text{ W}$, 单次修复时间 $0.57\text{ s}<t<0.65\text{ s}$, 速度 $5\text{ mm/s}<V<8\text{ mm/s}$, 保护气体流速 $1\text{ L/min}<G<5\text{ L/min}$ 。

2.2 建立数学模型

用自变量 A 、 B 、 C 、 D 来分别表示输入功率 P (W)、单次修复时间 t (s)、速度 V (mm/s) 和保护气体流量 G (L/min) 4 个影响因素,以修复后试样抗拉强度为响应值 (Y)。利用 Design-Expert 8.0 软件对试验结果进行响应面分析,得多模型分析结果见表 4,多模型数学统计结果见表 5。

表 4 多模型分析结果

Table 4 Sequential model sum of squares for tensile strength

Source	Sum of square	d_f	Mean square	F value	p -value (Prob> F)
Mean	1.27E+06	1	1.27E+06		
Linear	66.19	4	16.55	0.22	0.924 6
2FI	20.3	6	3.38	0.03	0.999 8
Quadratic	1 518.54	4	379.64	20	<0.000 1
Cubic	156.31	11	14.21	0.39	0.891 5
Residual	109.02	3	36.34		
Total	1.27E+06	29	43 827.26		

表 5 修复层抗拉强度模型统计分析

Table 5 Model summary statistics for tensile strength

Source	Standard deviation	R-squared	Adjusted R-squared	Predicted R-squared
Linear	8.67	0.035 4	-0.125 4	-0.381 5
2FI	9.96	0.046 2	-0.483 6	-1.498 8
Quadratic	4.35	0.858 1	0.716 3	0.246 9
Cubic	6.03	0.941 7	0.456 0	

由表 4 可知,模型的系数 R^2 在方程的阶数取二阶时值最大,即此时方程拟合度最高。由表 5 可知,当模型阶数为 2 阶时,模型的系数 R^2 的预测值和校核值,均为最大值。综上所述,当模型取二次方程作为响应函数时,模型的 F 值较大,概率值 $P(>F)$ 非常小,满足拟合度高,失拟度小的要求。因此,模型类型选择二次方程。

图 2 为各因素对响应值 (Y) 的影响显著性曲线。从图中可以看出, A 和 B 为主要因素,对 Y 影响明显,而 C 和 D 为次要因素,对 Y 影响较小。二阶模型的方差分析如表 6 所示。表中 Model $F=32.98$, Model $P<0.000\,1$, 即所选数学模型计算结果可被其它因素干扰的概率小于 0.01% 。在响应曲面法拟合中,一般认为拟合方程系数的 $P<0.05$ 时,则可认为该因子的影响效果显著,反之则表明影响不明显。因此, B 、 A^2 和 B^2 为主要影响因子, A 、 C 、 D 、 C^2 和 D^2 为次要影响因子。

由 Lack of fit 失拟项检验结果可以看出,所建模型拟合良好,能够反映响应值 (Y) 的变化。因此,其二次方程如下:

$$F = 5.63 \times 10^3 - 1.29A - 1.13 \times 10^4 B - 0.22C + 0.06D + 2.13 \times 10^4 A^2 + 9.22 \times 10^4 B^2 + 0.39C^2 + 0.25D^2$$

(5)

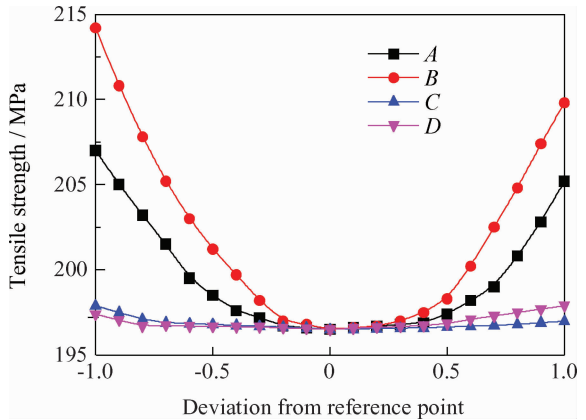


图 2 各因素对模型的影响曲线
Fig. 2 Effect curves of the factors on the model

2.3 模型验证

为验证模型的准确性,文中对模型预测值与实验值之间的差值、残差的概率分布、误差的类型及是否存在异常点进行了研究分析。

图 3 表示预测值和实验值的关系图,由图可知,预测值均匀的分布于试验值两侧,可见误差较小。

图 4 为残差的正态分布图,可见数据基本上分布于一条直线上,说明该模型预测值与试验值误差较小,精确度高。

图 5 为残差和预测值的关系图,从图中可以看出,数据随机的分布于预测值 (0 轴) 两侧,且均

表 6 修复试样的抗拉强度方差分析

Table 6 ANOVA table for tensile strength reduced quadratic model

Source	Sum of squares	d_f	Mean square	F value	p -value (Prob> F)
Model	1 582.45	4	395.61	32.98	< 0.000 1
A-Power	22.39	1	22.39	1.87	0.184 6
B-Time	76.61	1	76.61	6.39	0.018 5
C-Velocity	1.51	1	1.51	0.12	0.736 8
D-Gas	0.2	1	0.2	0.016	0.901 8
A^2	459.78	1	459.78	38.33	< 0.000 1
B^2	1 407.08	1	1 407.08	117.29	< 0.000 1
C^2	3.16	1	3.16	0.32	0.580 8
D^2	4.75	14.75	0.47	0.498 9	
Residual	287.92	24	12		
Lack of fit	287.91	23	12.52	1 738.59	0.018 9
Pure error	7.20E-03	1	7.20E-03		
Cor total	1 870.37	28			

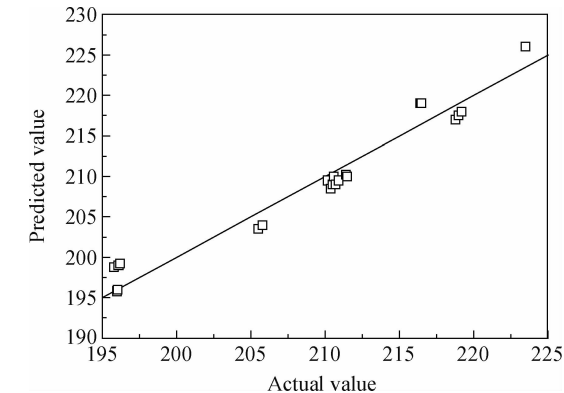


图 3 预测值与试验值之间的关系图
Fig. 3 Predicted values compared with actual values

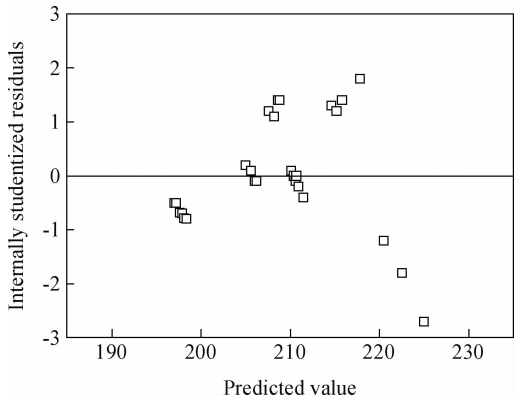


图 5 残差与预测值的关系图
Fig. 5 Residuals compared with predicted value

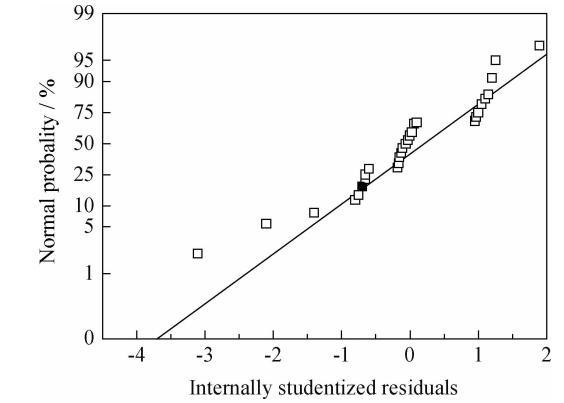


图 4 残差的正态分布图
Fig. 4 Normal plot of the residuals

分布于 $\pm 2\sigma$ ($\sigma=3$)范围内,并未发现异常点,则说明残差是由随机误差引起的。综上所述,所建数学模型与试验拟合度高,误差小。

为进一步验证所建数学模型的准确性,随机挑选工艺参数做如表 7 所示的 4 组对比试验,并列 出 每 组 试 验 的 测 量 值、模 型 预 测 值 及 误 差 率。由表 7 可知,4 组实验中最大误差仅为 1.59%,符合响应面分析中所规定的试验值与预测值之间误差控制在 1% 左右的要求。因此,所建数学模型对亚激光瞬间熔再制造 HT250 基体修复层抗拉强度的计算具备一定的准确性。

表 7 试验验证

Table 7 Confirmation experiments

No.	Process parameters				Response factors tensile strength/MPa			
	P/W	t/s	$V/(mm \cdot s^{-1})$	$G/(L \cdot min^{-1})$	Actual	Predicted	Residuals	Error (%)
14	2 800	0.61	6.5	1	211.3	208.2	-3.12	-1.48
20	3 000	0.61	5	1	196.2	198.3	2.12	1.08
21	3 200	0.61	6.5	1	205.5	205.4	-0.037	-0.02
26	3 000	0.57	8	3	218.8	215.3	-3.48	-1.59

2.4 响应面优化试验结果与分析

通过二阶模型的拟合方程式(5)可以看出单因子对响应值的影响较为复杂,仅依据拟合方程分析单因子对响应值的影响比较困难。响应曲面法可以根据拟合方程作出修复后试样的抗拉强度的等高线图和响应曲线图,直观的分析多因素变量响应问题(见图 6)。由图 6(a)可以看出,等高线为椭圆形,说明建模时所确定的两个主要变量 P 和 t 的交互作用显著^[15]。由图 6(b)可以看出,试样修复后的抗拉强度 Y 在 β 点之前随功率 P 和单次修复时间 t 的增大而减小,然后随功率 P 和单次修复时间 t 的增大而增大,最优值在 A 点取得。其原因为当再制造工艺在 α 点取得最优解后,随着 P 的增大,由于 t 过小,从而导致修复层金属未充分熔化,结合面并未达到冶金结合,故试样修复后的抗拉强度随 P 和 t 的增大而减小。当到达 β 点时, Y 取最小值,然后随着 t 的继续增大,修复层金属熔化率逐渐升高,试样修复后的抗拉强度逐渐增大。

为获取最优的再制造发动机缸体工艺参数,文中通过方程式(5),在试验设定的参数范围内对试样修复后的抗拉强度进行了预测。结果表明,再制造 HT250 基体亚激光瞬间熔修复后抗拉强度最大值的试验参数为输入功率2 800.42 W,单次修复时间为 0.57 s,速度为6.52 mm/s,气体流量 3.22 L/min。此时预测值能获得的最大抗拉强度为 225.2 MPa,置信度高达 0.93。为了便于实际工程操作,调整最优试验参数组合为输入功率 2 800 W,单次修复时间0.57 s,速度 6.5 mm/s,气体流量 3 L/min。采用该参数进行验证试验,其修复试样抗拉强度值为 222.5 MPa,与预测值 225.2 MPa相对误差仅为 1.2%,说明利用试验建立的数学模型所获取的优化结果与实际情况吻合。

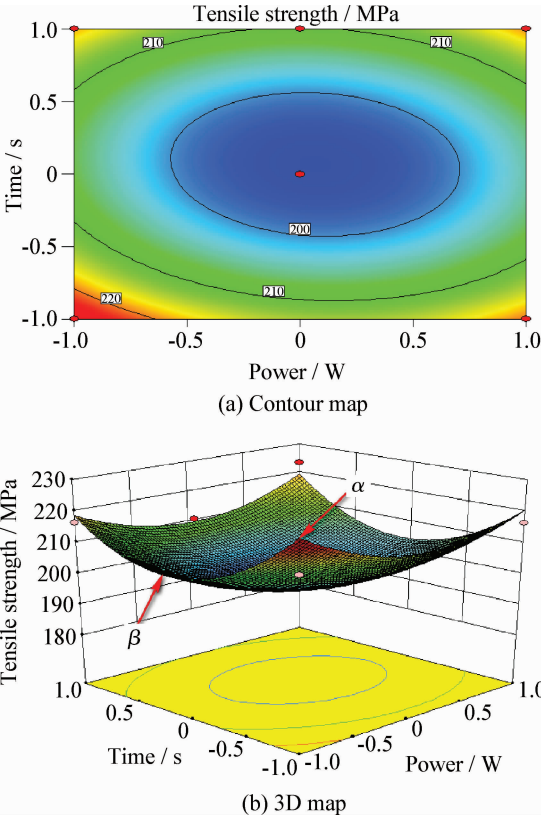


图 6 响应面的等高线图和 3D 图

Fig. 6 Contour map and 3D map of the response surface plots of the effect of power and processing time to the tensile strength

3 结 论

- (1) 响应曲面法作为一种综合的试验设计方法和数学统计技术,可以应用于亚激光瞬间熔再制造参数优化设计中。
- (2) 亚激光瞬间熔再制造工艺参数中输入功率 P 和单次修复时间 t 对修复后试样的抗拉强度影响较为显著,而其它因素对结果影响不明显。

(3) 在试验设定的参数范围内,最优工艺参数为:功率 2 800 W,单次修复时间 0.57 s,速度 6.5 mm/s,保护气体流量 3 L/min。预测能获得的试样修复后最大抗拉强度为 225.2 MPa。

参考文献

- [1] 徐滨士. 装备再制造工程的理论与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 64-85.
- Xu B S. Theory and technology of equipment remanufacturing engineering [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 64-85 (in Chinese).
- [2] 徐滨士, 谭俊, 陈建敏. 表面工程领域科学技术发展 [J]. 中国表面工程, 2011, 24(2): 1-12.
- Xu B S, Tan J, Chen J M. Science and technology development of surface engineering [J]. China Surface Engineering, 2011, 24(2): 1-12 (in Chinese).
- [3] Guide V D R. Production planning and control for remanufacturing: industry practice and research needs [J]. Journal of Operational Management, 2000, 18(4): 467-483.
- [4] 徐庆忠, 李方义, 丁韬, 等. HT250 冷焊表面残余应力实验 [J]. 焊接学报, 2012, 33(10): 33-36.
- Xu Q Z, Li F Y, Ding T, et al. Experimental analysis on cold-welding surface residual stress of HT250 [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2012, 33(10): 33-36 (in Chinese).
- [5] Khan M M A, Romoli L, Marco Fiaschi, et al. Multire-sponse optimization of laser welding of stainless steels in a constrained fillet joint configuration using RSM [J]. Internal Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 62(5/6/7/8): 587-603.
- [6] Arumugam S, Sriram G, Rajmohan T. Multi-response optimization of epoxidation process parameters of rapeseed oil using response surface methodology (RSM)-based desirability analysis [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2014, 39(3): 2277-87.
- [7] Duan X, Zhang Z, Srinivasakannan C, et al. Regeneration of spent catalyst from vinyl acetate synthesis as porous carbon: process optimization using RSM [J]. Chemical Engineering Research & Design: Transactions of the Institution of Chemical Engineers Part A, 2014, 92(7): 1249-56.
- [8] Selvi S, Rajasekar E. Theoretical and experimental investigation of wear characteristics of aluminum based metal matrix composites using RSM [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(2): 785-792.
- [9] Padmanaban G, Balasubramanian V. Optimization of laser-beam welding process parameters to attain maximum tensile strength in AZ31B magnesium alloy [J]. Optics and Laser Technology, 2010, 42(9): 1253-60.
- [10] 盖登宇, 褚元召, 李庆芬, 等. 组合热源模型在焊机数值模拟中的应用 [J]. 焊接学报, 2009, 30(5): 61-68.
- Gai D Y, Chu Y Z, Li Q F, et al. Application of combined welding heat source in arc welding simulation [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2009, 30(5): 61-68 (in Chinese).
- [11] Gunaraj V, Murugan N. Application of response surface methodologies for predicting weld base quality in submerged arc welding of pipes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 88(1/2/3): 266-275.
- [12] Myers R H, Montgomery D C. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments [M]. New York: Wiley, 2008: 497-545.
- [13] Adalarasan R, Santhanakumar M, Rajmohan M. Application of grey taguchi-based response surface methodology (GT-RSM) for optimizing the plasma arc cutting parameters of 304L stainless steel [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(5/6/7/8): 266-275.
- [14] 邱葭菲. 焊接方法和工艺 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 241-243.
- Qiu X F. Welding methods and processes [M]. Beijing: China Machine Press, 2013: 241-243 (in Chinese).
- [15] Karupaiya M, Sasikumar E, Viruthagiri T, et al. Optimization of process conditions using response surface methodology (RSM) for ethanol production from waste cashew apple juice by *Zymomonas mobilis* [J]. Chemical Engineering Communications, 2009, 196(11): 1425-35.

(责任编辑: 王文宇)