

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0350-08

基于田口方法的 Nd:YAG 脉冲激光 焊接工艺参数优化

刘会霞 向宝珍 许贞凯 宋新华 王 霄

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 对于激光焊接的工艺研究虽然不少,但因影响激光器焊接质量的因素较多,对工艺参数的优化一直缺乏有效的获取手段。田口方法作为一种优秀的统计设计方法而应用于优化激光焊接参数。针对常用 304 不锈钢进行激光焊接,基于田口方法设计实验,对试验结果进行了信噪比分析及方差分析,研究了 Nd:YAG 脉冲激光焊接工艺参数对焊缝宽度及抗拉强度的影响。建立了能预测焊接质量(焊缝宽度和抗拉强度)优化工艺参数的数学模型。结果表明,脉宽和电压对焊缝宽度起主要影响,频率和速度影响较小,速度和脉宽对抗拉强度起主要影响,建立的模型能够较好地预测实验结果。

关键词 激光技术;激光加工;脉冲激光焊接;田口方法;工艺参数;数学模型;优化

中图分类号 TG456. 7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201037s1.0350

Process Parameters Optimization of Nd:YAG Pulsed Laser Welding Based on Taguchi Method

Liu Huixia Xiang Baozhen Xu Zhenkai Song Xinhua Wang Xiao

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract Due to the many factors affecting the quality of the laser welding, though there are a lot of process parameters researches on the laser welding, the effective means of the optimization of the process parameters is deficient. Taguchi approach is used as statistical design of experiment(DOE) technique for optimizing the laser welding parameters in this paper. The experiments for laser welding common 304 stainless steel with the Taguchi method is designed. The experiments result is analyzed by signal to noise ratio and ANOVA using the softwares of Minitab14 and Design-expert7. The effects of the parameters of the Nd:YAG pulsed laser on the weld width and the tensile are studied. The mathematical models which can predicted the weld quality(the weld width and the tensile) and optimize the process parameters are developed. As a result, the influences of pulse width and voltage on the weld width are greater than frequency and speed, and the speed and the pulse width play a major role on the tensile, which shows that the mathematical models developed by softwares can predicted the results very well.

Key words laser technique; laser processing; pulsed laser welding; Taguchi method; process parameters; mathematical models; optimization

1 引 言

激光焊接与其他焊接方法相比,具有聚焦光斑功率密度高、热输入量低、焊缝窄、热影响区小、焊接变形小、焊接速度快、有“净化效应”等优点^[1~3],其中 Nd:YAG 激光器以其波长短、吸收率高以及可用光纤传输易于实现加工过程的自动化等优点而广泛应用于焊接生产中^[4]。在生产中,焊接质量可通过焊缝宽

度和抗拉强度等^[3~5]指标进行评价,而这些评价指标都受到焊接参数的影响,尤其是脉冲 Nd:YAG 激光器影响焊接因素较多,因此选择合理的焊接参数以达到优化焊缝宽度和抗拉强度的目的很有必要。实验设计和统计方法作为一种优化的手段被广泛应用,很多研究都使用了实验设计与统计方法用于参数的优化,田口方法就是其中的一种。田口方法能在不增加

收稿日期: 2010-03-16; 收到修改稿日期: 2010-05-15

作者简介: 刘会霞(1964—),女,教授,主要从事激光加工技术、数字化设计与制造技术(CAD/CAE/CAM)等方面的研究。E-mail: lhx@ujs.edu.cn

成本的前提下,通过优化工艺参数,以达到提高质量的目的。通过田口方法得到的优化工艺参数对环境条件和其他噪声因子具有抗干扰能力。传统的设计方法太复杂,并且不容易使用,因为随着工艺参数的增加,会导致实验量的大量增加。为了解决这个问题,田口方法使用了一种特殊的设计——直交表设计,它能在最小化实验的基础上达到研究整个工艺参数的目的。

最近,国外一些研究都使用了田口方法进行工艺参数的优化,并得到较好结果。Olabi 等^[6]使用反向传播的神经网络技术和田口方法设计实验,并找出了 CO₂ 激光深熔焊接的优化水平。Anawa 等^[5,7~9]和 Hassan^[10]使用田口方法设计实验,在缩小焊接熔化区域,得到合适的焊接强度、韧性,减小残余应力等的前提下,对 CO₂ 激光焊接参数进行优化。国内使用田口方法对焊接进行实验设计较多,优化研究较少,而且国外研究的大多为 CO₂ 激光器,本文针对脉冲 Nd:YAG 脉冲激光器,使用常用 SUS304 不锈钢,以表面焊缝宽度 W_1 ,背面焊缝宽度 W_2 及抗拉强度 σ_b 作为质量评价指标,基于田口方法,对实验进行设计,并对实验结果进行了信噪比(S/N)分析及方差分析(ANOVA),在此基础上建立了数学模型,用以预测焊缝宽度和抗拉强度,可用以进一步优化焊接质量。

2 实验准备与过程

实验所用激光器为 Rofin 公司 Starweld250 型 Nd:YAG 激光器,其技术参数为:激光器波长 1064 nm,脉冲宽度 0.3~20 ms,最高重复频率 500 Hz,最大单脉冲输出能量 60 J,最大平均功率 250 W,峰值功率 7 kW,激光模式为多模。

研究中使用的材料为 SUS304 不锈钢薄板,工件尺寸为 40 mm×20 mm×0.95 mm,使用材料的典型成分如表 1 所示,焊前材料使用丙酮进行表面处理,用以去除表面的油污,采用的焊接方式为对接焊。

影响焊接质量的因素有电压(U)、脉宽(T_p)、频率(f)和焊接速度(v)、离焦量、保护气体速度等。这里主要研究电压、脉宽、频率和焊接速度对焊接

质量的影响,在离焦量为 -2 mm,氩气速度为 10 L/min 时进行单因素实验,得到各参数的大致试验范围: U 为 400~490V, T_p 为 1~7 ms, f 为 2~6 Hz, v 为 40~160 mm/min。

表 1 304 不锈钢的合金成分含量
Table1 Composition of 304 stainless steel

Alloy	Mass fraction / %
Mn	1
Cr	18.1
Ni	8.6
Si	0.69
C	0.046
P	0.012
S	0.003
Fe	base

在得到单因素范围的基础上,基于田口方法,采用直交表对实验进行设计,采用 4 列 16 行的 L16 直交表,进行了 16 个实验。表 2 为选择的激光焊接参数和实验设计水平,图 1 为焊接之后的典型表面形貌。图 1(a)为表面焊接质量较好试样,图 1(b)为表面焊接质量较差,表面已产生飞溅。使用光学显微镜和图形分析软件测量焊缝表面宽度 W_1 和背面宽度 W_2 ,使用微机控制电子式万能试验机对试样进行了抗拉测试得到抗拉强度 σ_b 。在田口方法基础上,采用 Design-expert7 和 Minitab14 对得到的实验数据进行了信噪比分析和方差分析,信噪比分析可以得到参数的优化水平及各焊接因子影响大小,而方差分析能调查哪个焊接过程参数对质量特性有显著影响,在以上基础上建立了数学模型,用以预测焊缝宽度及抗拉强度,可用以进一步优化焊接质量。实验中焊缝表面宽度 W_1 和背面宽度 W_2 的测量结果如表 3 所示。

表 2 激光焊接参数和设计的水平

Table2 Parameters of the laser welding and the levels designed

Variables	U / V	T_p / ms	f / Hz	v / (mm/min)
Level 1	410	3	4	70
Level 2	430	4	5	100
Level 3	450	5	6	130
Level 4	470	6	7	160

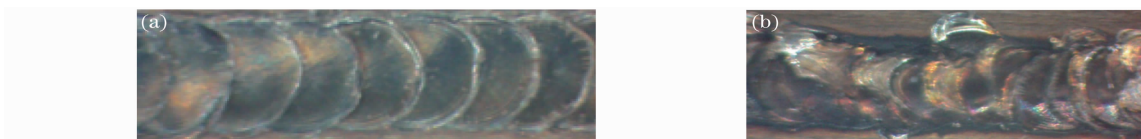


图 1 焊缝的典型表面形貌。(a)表面焊接质量较好试样,(b)表面已产生飞溅试样
Fig.1 Typical surface morphology of weld. (a)the sample with good weld surface, (b)the sample with spatter on the weld surface

表3 田口实验结果及信噪比
Table3 Experimental results and the analysis of the S/N

Experiment	U/V	T_p/ms	f/Hz	$v/(mm/min)$	W_1/mm	W_2/mm	σ_b/MPa	R_{SN1}	R_{SN2}
1	410	3	4	70	0.66	0	295	6.61	49.3
2	410	4	5	100	0.70	0.17	480	5.86	53.6
3	410	5	6	130	0.72	0.27	570	5.29	55.1
4	410	6	7	160	0.73	0.46	620	4.29	55.8
5	430	3	5	130	0.69	0.14	370	6.06	51.4
6	430	4	4	160	0.71	0.25	295	5.48	49.4
7	430	5	7	70	0.76	0.58	390	3.40	51.8
8	430	6	6	100	0.84	0.75	565	1.98	55.0
9	450	3	6	160	0.71	0.35	500	5.04	54.0
10	450	4	7	130	0.69	0.55	675	4.10	56.6
11	450	5	4	100	0.71	0.50	625	4.24	56.0
12	450	6	5	70	0.81	0.68	425	2.52	52.6
13	470	3	7	100	0.67	0.62	425	3.80	52.6
14	470	4	6	70	0.69	0.61	355	3.73	51.0
15	470	5	5	160	0.78	0.64	625	2.93	56.0
16	470	6	4	130	0.83	0.82	675	1.67	56.6

3 结果与讨论

3.1 直角表实验与信噪比分析

基于田口方法,采用直交表对实验进行设计,采用4列16行的L16直交表,进行了16个实验。选用的直角表如表3所示。

为了估量每个选择参数对结果的作用,必须计算每个控制参数的信噪比S/N。信号因子表示对平均结果的作用,噪声因子用以测量背离平均结果的作用,表示实验输出对噪声因子的敏感程度。通常,使用信噪比对质量特性进行分析有3种方式:“望大特性”、“望小特性”和“望目特性”,对于每个工艺参数每个水平的S/N都是在S/N分析的基础上计算得到的。不管为哪种质量特性,越大的S/N对应更好的焊接质量^[1],S/N值越大,则系统越稳定,因此,对工艺参数水平的优化就是找到最高的信噪比。

这里,为了最小化焊缝上下表面的宽度,必须根据“望小特性”标准进行信噪比计算公式的选择。根据“望小特性”标准,选择的S/N计算公式为

$$R_{SN1} = -10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right), \quad (1)$$

式中 y_i 为焊缝宽度, n 为实验次数。

为了最大化焊缝的抗拉强度,必须根据“望大特性”标准进行S/N计算公式的选择。根据“越大越好”标准,选择的S/N计算公式为

$$R_{SN2} = -10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right), \quad (2)$$

式中 Y_i 为试样抗拉强度, n 为实验次数。

通过S/N计算,得到的S/N如表3所示。通过Minitab软件得到信噪比响应表和信噪比主效应图,信噪比响应表可以看出那些因素对结果影响大,哪些结果影响小,或者没有影响,从信噪比主效应图可以看出各个因素对结果的影响趋势,最好的焊接参数在最高S/N时得到。表4为焊缝宽度信噪比响应表,其中Delta表示控制因子变动对焊缝宽度的效应,Rank表示各控制因子对S/N的效应排列顺序。图2为焊缝宽度信噪比主效应图,表5为焊接抗拉强度信噪比响应表,图3为抗拉强度信噪比主效应图。从这几个图表中可以看出,焊缝宽度主要受到电压和脉宽的影响,频率和速度的影响较小。最小的焊缝宽度在 $U=410V$, $T_p=3ms$, $f=4Hz$, $v=160mm/min$ 时得到。对抗拉强度影响最大的是速度和脉宽,最大抗拉强度在 $U=450V$, $T_p=6ms$, $f=7Hz$, $v=130mm/min$ 时得到。

表4 焊缝宽度信噪比响应表

Table 4 Responses for S/N of the welding width

Level	U/V	T_p/ms	f/Hz	$v/(mm/min)$
1	5.516	5.380	4.501	4.067
2	4.229	4.790	4.344	3.969
3	3.974	3.965	4.009	4.280
4	3.033	2.616	3.898	4.436
Delta	2.483	2.764	0.603	0.466
Rank	2	1	3	4

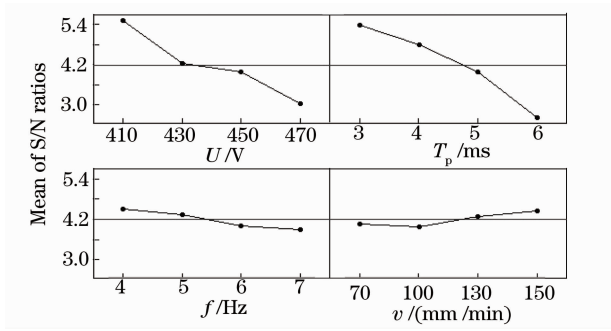


图 2 焊缝宽度信噪比主效应图

Fig. 2 Main effect for S/N of the welding width

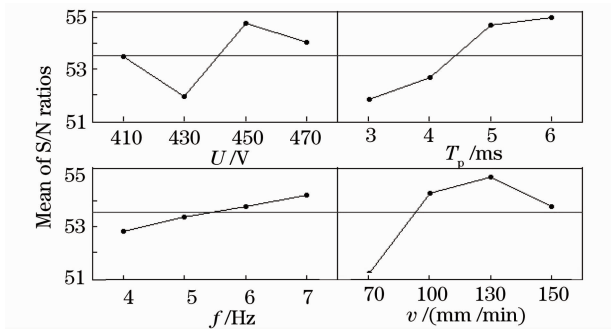


图 3 抗拉强度信噪比主效应图

Fig. 3 Main effect for S/N of the tensile strength

表 5 焊接抗拉强度信噪比响应表

Table 5 Responses for S/N of the tensile strength

Level	U/V	T_p/ms	f/Hz	$v/(mm/min)$
1	53.50	51.83	52.82	51.20
2	51.91	52.65	53.37	54.29
3	54.76	54.69	53.79	54.91
4	54.02	55.01	54.21	53.79
Delta	2.86	3.18	1.38	3.72
Rank	3	2	4	1

3.2 方差分析

ANOVA 的目的是为了调查哪个焊接过程参数对质量特性有显著影响^[6],定量分析各因素对实验结果的影响程度,并用来表明建立的模型是否有意义。通过软件 Design-expert7 进行了回归模型显著性检验、单模型系数显著性检验和失真检验,为了简化二次方程模型,使用了逐步回归方法,自动删除了无意义模型条件,结果见表 6~8 中,表中 SS 表示平方和,MS 表示平方的平均值。Residual 为残差(误差),Cortotal 为总和, d_f 为自由度, F_{value} 为测试比较模型方差与残差(误差)的方差。在 ANOVA 表中,概述了 4 个变量的分析结果,并表明建立的模型有意义。

表 6 试样表面宽度 W_1 模型的 ANOVA

Table 6 ANOVA for W_1 model

Source	SS	d_f	MS	F_{value}	$f_{Prob. > F}$
Model	43803.32	8	5475.41	27.53	0.0001 significant
U	267.01	1	267.01	1.34	0.2846
T_p	34345.00	1	34345.00	172.70	< 0.0001
f	6.64	1	6.64	0.033	0.8602
v	1351.00	1	1351.00	6.79	0.0351
U_v	3272.51	1	3272.51	16.46	0.0048
t_{pv}	1041.54	1	1041.54	5.24	0.0559
f_v	2197.59	1	2197.59	11.05	0.0127
T_p^2	3661.88	1	3661.88	18.41	0.0036
Residual	1392.12	7	198.87		
Cor total	45195.44	15			
$f_R^2 = 0.9692$				$f_{Pred.R}^2 = 0.8117$	
$f_{Adj.R}^2 = 0.9340$				$f_{Adeq.precision} = 15.742$	

表 7 试样背面宽度 W_2 模型的 ANOVA

Table 7 ANOVA for W_2 model

Source	SS	d_f	MS	F_{value}	$f_{Prob. > F}$
Model	8.300×10^5	4	2.075×10^5	71.76	< 0.0001 significant
U	70657.37	1	70657.37	24.44	0.0004
T_p	1.873×10^5	1	1.873×10^5	64.77	< 0.0001
f	63788.51	1	63788.51	22.06	0.0007
U_f	11818.89	1	11818.89	4.09	0.0682
Residual	31806.61	11	2891.51		
Cor Total	8.618×10^5	15			
$f_R^2 = 0.9631$				$f_{Pred.R}^2 = 0.9143$	
$f_{Adj.R}^2 = 0.9497$				$f_{Adeq.precision} = 25.181$	

表 8 试样抗拉强度 σ_b 模型的 ANOVA
Table 8 ANOVA for σ_b model

Source	SS	d_f	MS	F_{value}	$f_{Prob. > F}$
Model	1.980×10^5	5	39608.68	6.29	0.0068
T_p	1.270×10^5	1	1.270×10^5	20.17	0.0012
f	7031.25	1	31.25	1.12	0.3154
v	468.24	1	468.24	0.074	0.7906
T_{pf}	50269.89	1	50269.89	7.99	0.0180
f_v	38360.64	1	38360.64	6.09	0.0332
Residual	62950.36	10	6295.04		
Cor total	2.610×10^5	15			
$f_R^2 = 0.7588$				$f_{Pred. R}^2 = 0.2320$	
$f_{Adj. R}^2 = 0.6382$				$f_{Adeq. precision} = 7.965$	

3.2.1 ANOVA 输出

在 ANOVA 表中, $f_{Prob. > F}$ 的值的大小表示模型及各个因素的显著水平, 如果 $f_{Prob. > F}$ 值小于 0.05, 则表示模型或参数有显著影响, 如果 $f_{Prob. > F}$ 小于 0.01, 则表示影响极其显著。表中还有其他一些有用的信息, 如 f_R^2 , $f_{Adj. R}^2$, $f_{Adeq. precision}$ 和 $f_{Pred. R}^2$ 。 f_R^2 大体可解释为由 ANOVA 模型所“说明”的数据中的变异性所占比例, $f_{Adj. R}^2$ 是对通常 f_R^2 统计量的调整, 它反映了模型的因子数, $f_{Pred. R}^2$ 预测模型的 f_R^2 , 从各表中可以看到所有的值接近于 1, 这表示建立的模型和预测模型是可行的。 $f_{Adeq. precision}$ 用最大预测响应与最小预测响应的差除以所有预测响应的平均标准偏差计算得到, 这个量的值大一些是较为理想的, 超过 4 表明模型在预测方面具有相当好的性能^[12]。在本研究中, $f_{Adeq. precision}$ 的值明显大于 4, 说明模型

在预测方面有相当好的性能。

ANOVA 表明, 对于焊缝表面宽度 W_1 而言, 起显著影响的为脉宽、速度与电压的交互作用, 速度与频率的交互作用、脉宽的平方和速度也是重要的模型参数。对工件背面宽度 W_2 影响最大的也是脉宽, 然后依次为电压、频率和电压与频率之间的交互作用。对抗拉强度 σ_b 影响最大的也是脉宽、脉宽与频率的交互作用、频率与速度之间的交互作用, 频率和速度也是重要的模型参数。

3.2.2 实际因素条件下的最终数学模型

在实验基础上, 使用 Design-expert7 软件对实验结果进行了方差分析, 并建立数学模型, 可用于焊接质量的预测和优化, 通过方差分析结果可知建立的模型有足够的精度。以下为 Design-expert7 软件所确定实际因素的最终数学模型:

$$\begin{aligned}
 W_1 &= +1410.39295 - 2.19396 \times U - 83.46645 \times T_p + 45.39350 \times f - 5.56837 \times \\
 &\quad v + 0.020806 \times U \times v - 0.22988 \times T_p \times v - 0.38935 \times f \times v + 16.90274 \times T_p^2, \\
 W_2 &= +1427.76420 - 4.70176 \times U + 163.10795 \times T_p - 749.77500 \times f + 1.83239 \times U \times f, \\
 T_s &= -447.09700 + 369.89929 \times T_p + 73.24569 \times f - 7.35826 \times \\
 &\quad v - 47.33066 \times T_p \times f + 1.37819 \times f \times v.
 \end{aligned}$$

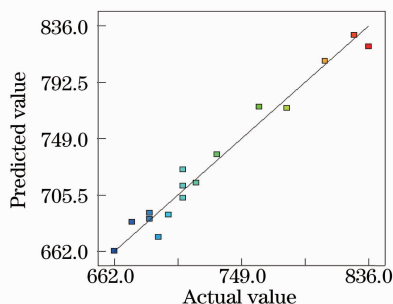


图 4 预测 W_1 值和真实值之间的关系

Fig. 4 Relation between the actual and the predicted value of W_1

3.3 模型预测

最后一步, 对焊接参数进行预测, 并进行验证。图 4~6 分别表示预测的 W_1 , W_2 和 σ_b 值与真实值之间的关系。从图中可以看出预测模型有很好的预测作用, 预测值和真实值之间相差较小。

4 焊接参数对结果的影响

为了更加具体地描述焊接参数对实验结果的影响, 通过 Design-expert7 绘制出焊接工艺参数对它们的影响的等高线图和 3D 图, 如图 7~12 所示。通过等高线图和 3D 图, 可明显地看出在其他参数不变的

情况下,所要研究的两个参数对实验结果的影响趋势,并可进行量化,当确定两个焊接参数数值时,可从图中知道实验结果,对实验结果有预测作用。

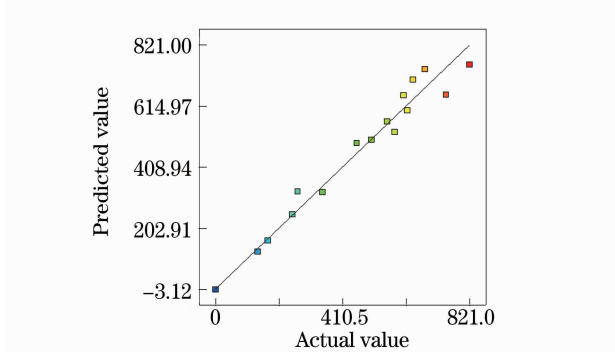


图 5 预测 W_2 值和真实值之间的关系

Fig. 5 Relation between the actual and the predicted value of W_2

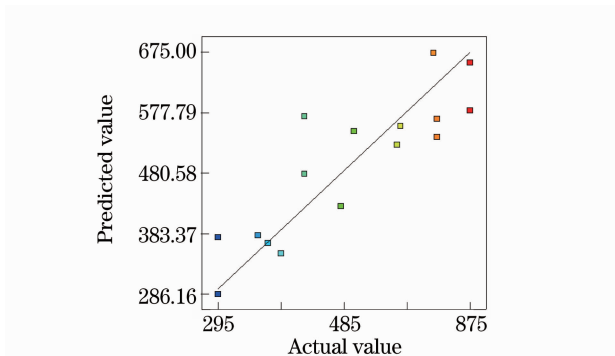


图 6 预测 σ_b 值和真实值之间的关系

Fig. 6 Relation between the actual and the predicted value of σ_b

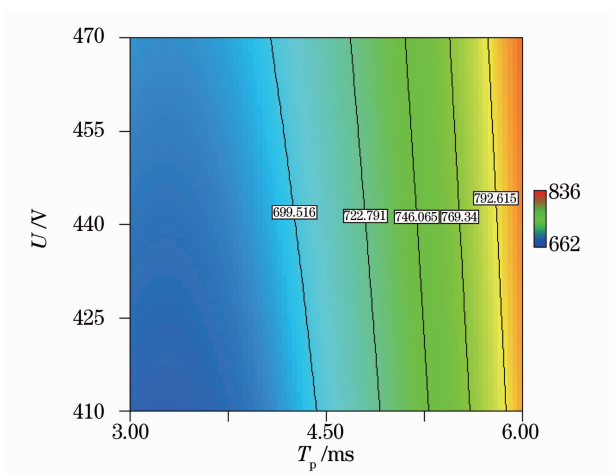


图 7 T_p 和 U 对焊缝表面宽度 W_1 影响的等高线图

Fig. 7 Contour graph of the effects of T_p and U parameters on W_1

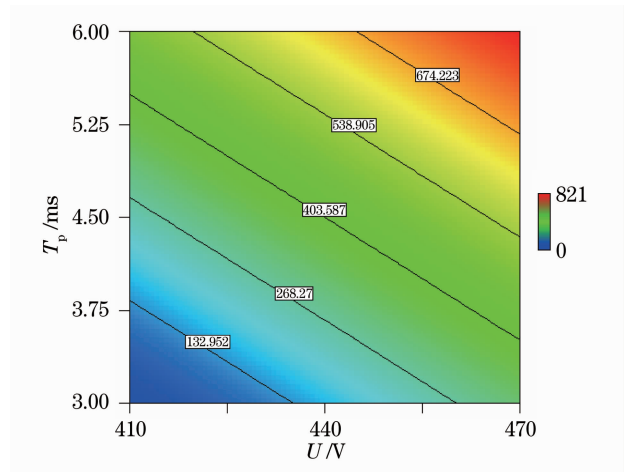


图 8 U 和 T_p 对焊缝背面宽度 W_2 影响的等高线图

Fig. 8 Contour graph of the effects of U and T_p parameters on W_2

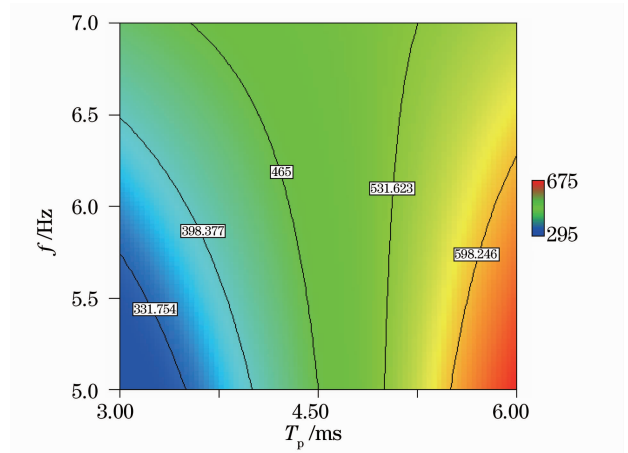


图 9 T_p 和 f 对抗拉强度 σ_b 影响的等高线图

Fig. 9 Contour graph of the effects of T_p and f parameters on σ_b

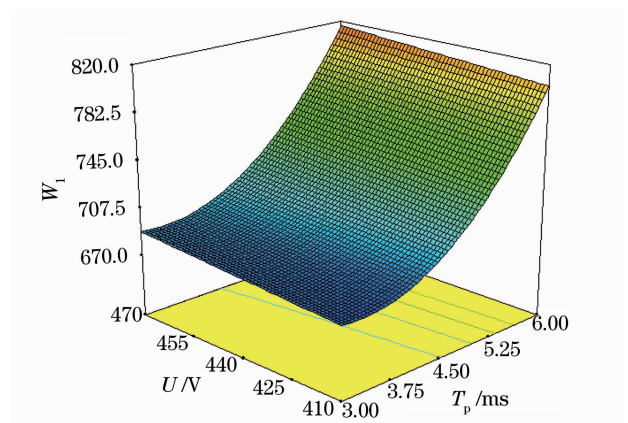
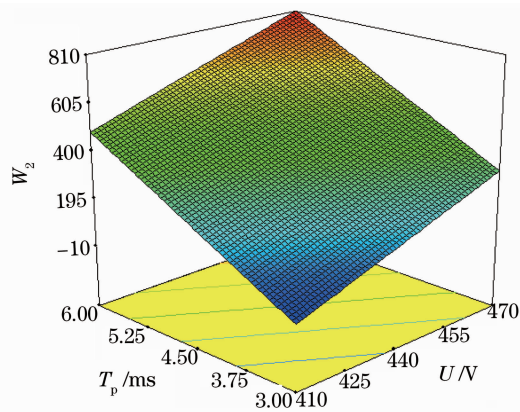
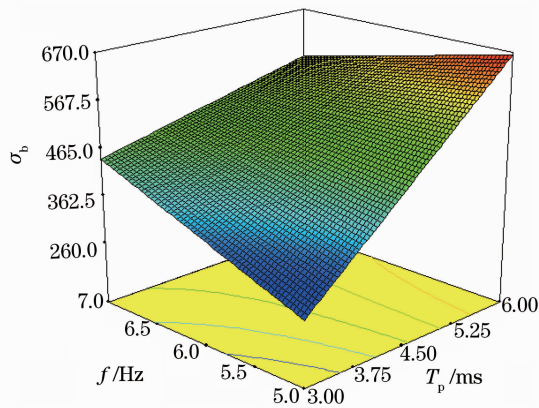


图 10 T_p 和 U 对焊缝表面宽度 W_1 影响的 3D 图

Fig. 10 3D graph of the effects of T_p and U parameters on W_1

图 11 T_p 和 U 对焊缝背面宽度 W_2 影响的 3D 图Fig. 11 3D graph of the effects of T_p and U parameters on W_2 图 12 T_p 和 f 对抗拉强度 σ_b 影响的 3D 图Fig. 12 3D graph of the effects of T_p and f parameters on σ_b

4.1 焊接参数对 W_1 的影响

由表 4 和图 2 可知,对焊缝表面宽度 W_1 影响最大的是脉宽和电压,其他两个因素影响较小,其中影响最大的为脉宽,随着脉宽的增加,信噪比减小,焊缝宽度增大,随着电压的增加,信噪比减小,焊缝宽度增大。这是由于电压或脉宽的增加,单脉冲作用工件的时间增加,导致了焊缝宽度的增加。图 7 的等高线图和图 10 的 3D 图表示 $f=5.5 \text{ Hz}$, $v=115 \text{ mm/min}$ 时, T_p 和 U 对焊缝表面宽度 W_1 的影响。从图 7,10 中也反映了随着脉宽和电压的增加,焊缝宽度增大,影响最大的焊接因素也为脉宽。

4.2 焊接参数对 W_2 的影响

由表 4,表 7 和图 2 可知,对焊缝背面宽度 W_2 影响最大的是电压,其次是脉宽,其他两个因素影响较小,而对焊缝表面宽度影响较大的是脉宽,这有可能是电压对脉冲峰值功率影响最大,从而影响焊缝熔深度,所以对焊缝背面宽度影响更大。图 8 的等

高线图和图 11 的 3D 图表示了 $f=5.5 \text{ Hz}$, $v=115 \text{ mm/min}$ 时, U 和 T_p 对焊缝背面宽度 W_2 的影响。从图中可看出,随着电压和脉宽的增加,单脉冲作用工件的时间增加,导致了焊缝宽度的增加。

4.3 焊接参数对 σ_b 的影响

由表 5 和图 3 可知,对抗拉强度影响最大的是脉宽和速度,在选择参数范围内,随着脉宽的增大,抗拉强度也增加。抗拉强度随着速度的增加,先增大,当 $v>130 \text{ mm/min}$ 时,抗拉强度有所减小,这有可能是当速度很小时,激光的线能量密度过大,工件被焊穿,导致抗拉强度较小;随着速度增加,线能量密度减小,工件焊接良好,抗拉强度增加;但当速度进一步增加,线能量密度进一步减小时,工件未全焊透,导致抗拉强度降低。图 9 的等高线图和图 12 的 3D 图表示了 $U=440 \text{ V}$, $v=115 \text{ mm/min}$ 时, T_p 和 f 对抗拉强度的影响。从图中可看出,随着脉宽的增加,抗拉强度也增加,随着频率的增加,抗拉强度也有少量增加,但增加幅度不大,由此也看出脉宽影响更大。

5 结 论

基于田口方法,研究了 Nd:YAG 脉冲激光器焊接工艺参数对焊缝宽度及抗拉强度的影响,得到以下结论:

1)通过 S/N 和方差分析可知,在所选的焊接参数中,脉宽和电压对焊缝宽度的影响最大,随着脉宽和电压的增加,焊缝宽度不断增加,频率和速度影响不大,速度和脉宽对抗拉强度的影响最大,在选择参数范围内,随着脉宽的增加,抗拉强度增加,随着速度的增加,抗拉强度呈现先增加后减小的趋势。

2)通过 Design-expert7 绘制出焊接工艺参数对实验结果影响的等高线图和 3D 图,更加具体地描述焊接参数对实验结果的影响,可明显地看出在其他参数不变的情况下,所要研究的两个参数对实验结果的影响趋势,并可进行量化,当确定两个焊接参数数值时,可从图中知道实验结果,对实验结果有预测作用。

3)在试验的基础上,对焊缝宽度和抗拉结果进行了分析,并建立数学模型,从 ANOVA 表和图 4~6 中可看出建立的模型能够较好地预测实验结果。

参 考 文 献

- 1 Ruisheng Huang, Liming Liu, Fan Zhang. Influences of laser in low power YAG laser MAG hybrid welding process [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, 6(1): 47~50

- 2 K. R. Balasubramanian, S. N. Siva, G. Buvanasekaran *et al.*. Numerical and experimental investigation of laser beam welding of AISI 304 stainless steel sheet [J]. *Advances in Production Engineering&Management*, 2008, **3**(2): 93~105
- 3 K. Manonmani, N. Murugan, G. Buvanasekaran. Effects of process parameters on the bead geometry of laser beam butt welded stainless steel sheets[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, 2007, **32**(11-12): 1125~1133
- 4 Wu Dongjiang, Yin Bo, Zhang Weizhe *et al.*. Nd:YAG laser beam welding invar36 alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1773~1777
吴东江, 尹波, 张维哲等. Nd:YAG激光焊接殷钢材料的工艺研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(11): 1773~1777
- 5 E. M. Anawa, A. G. Olabi. Optimization of tensile strength of ferritic austenitic laser-welded components [J]. *Opt. Laser. Eng.*, 2008, **46**(8): 571~577
- 6 A. G. Olabi, G. Casalino, K. Y. Benyounis *et al.*. An ANN and Taguchi algorithms integrated approach to the optimization of CO₂ laser welding [J]. *Adv. Eng. Softw.*, 2006, **37**(10): 643~648
- 7 E. M. Anawa, A. G. Olabi. Using Taguchi method to optimize welding pool of dissimilar laser-welded components [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2008, **40**(2): 379~388
- 8 E. M. Anawa, A. G. Olabi. Effects of laser welding conditions on toughness of dissimilar welded components [J]. *J. Appl. Mech. Mater.*, 2006, **5-6**: 375~380
- 9 E. M. Anawa, A. G. Olabi. Control of welding residual stress for dissimilar laser welded materials [J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2008, **204**(1-3): 22~33
- 10 E. M. Hassan. Feasibility and Optimization of Dissimilar Laser Welding Components[D]. Dublin: Dublin City University, 2008
- 11 Lin Xiuxiong. Combat Techniques of the Taguchi Methods [M]. Shenzhen: Haitian Press, 2004. 74~75
林秀雄. 田口方法实战技术[M]. 深圳: 海天出版社, 2004. 74~75
- 12 D. C. Montgomery. Design and Analysis of Experiments[M]. Fu Yusheng *et al.*. transl.. Beijing: Posts & Telecommunications Press, 2008. 80~81
D. C. Montgomery. 实验设计与分析[M]. 傅钰生等译. 北京: 人民邮电出版社, 2008. 80~81