

6082 铝合金激光冲击强化显微硬度正交试验

陆莹 赵吉宾 乔红超

中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110176

摘要 研究了激光冲击强化对航空常用材料 6082 铝合金的作用效果, 考查了激光脉宽、单脉冲能量、冲击次数以及吸收层的厚度等工艺参数对该铝合金的显微硬度的影响, 并对激光冲击强化工艺参数进行了正交试验设计。通过对正交试验进行分析, 统计了不同因素最佳的冲击强化工艺, 得出 6082 铝合金最佳的工艺参数: 16 ns 激光脉宽、6 J 单脉冲能量、一次冲击、0.2 mm 吸收层厚度。对正交试验结果进行了分析, 得出结论: 由于 6082 铝合金的屈服强度较低, 因此最高弹性应力也较低, 强化效果最优的值较低, 功率密度过大反而会影响激光冲击强化的效果, 表面显微硬度也会随之降低。

关键词 激光冲击强化; 铝合金; 正交试验; 显微硬度

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.081404

Orthogonal Test of Laser Shocked 6082 Aluminum Alloy

Lu Ying Zhao Jibin Qiao Hongchao

Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110176, China

Abstract We studied a kind of common aerial aluminum alloy material, 6082 aluminum alloy, by laser shock processing (LSP) in this paper. This research forced on the effect of technology parameters on the micro-hardness peened by laser, including laser pulse width, signal pulse energy, the number of laser shocks, and the thickness of ablative layer. We designed an orthogonal experiment of process parameters of LSP, and the best technological parameters are obtained. On this basis, the best performance of the SLP of 6082 aluminum alloy is analyzed: Laser pulse width is 16 ns, and energy is 6 J when 6082 aluminum alloy is peened only once with the 0.2-mm thickness of absorption layer. According to the test results, we conclude that due to the low yield strength of 6082 aluminium alloy, the highest elastic level is also lower, thus the optimal value of the strengthen effect is low. When the power density is too large, it will influence the effect of LSP. The surface microhardness will also decrease.

Key words laser shock processing; aluminum alloy; orthogonal experiment; micro-hardness

OCIS codes 140.3390; 220.4610; 160.3900

1 引言

铝合金以其比重小、强度高、优良性能被广泛地应用于航空航天领域。铝合金不仅能够有效地满足飞机结构件的设计力学性能, 还可以适应复杂的环境, 具有较好的耐腐蚀性能, 常作为航空飞机发动机或某些核心部件的材料。但是在航空部件服役的过程中, 会出现严重的表面异物损伤和疲劳裂纹。因此需要采用更为有效的表面强化工艺, 以提高零件的抗异物损伤的能力和疲劳寿命^[1-3]。

激光冲击强化工艺利用激光诱导在金属表面引入高速率、高能量的等离子体冲击波, 当冲击波的波峰超过材料的动态屈服强度时, 就会引起材料表层发生较大的塑性变形, 而塑性变形能以残余压应力的形式储存在被冲击区域。从微观角度上讲, 材料表面形成了大量的位错, 有效地提高晶粒内部的位错密度, 使材料表面发生强化, 这就是所谓的位错强化^[4-6]。因此激光冲击强化工艺可以有效地提高表面硬度和抗疲劳寿命, 对提高其抗疲劳寿命具有非常重要的意义。目前, 已经有相关文献报道^[2,4,7-9], 利用激光冲击强化工艺对航空常用铝合金进行研究。

正交试验法是一种安排组织试验的方法。它利用一套规格化的表格, 即正交表来设计试验方案和分析

收稿日期: 2015-03-25; 收到修改稿日期: 2015-04-12; 网络出版日期: 2015-07-16

作者简介: 陆莹(1987—), 女, 硕士, 研究实习员, 主要从事钛合金分析技术方面的研究。E-mail: luying@sia.cn

试验结果,能够在很多的试验条件中,选出少数几个代表性强的试验条件,并通过这几次试验的数据,找到较好的生产条件,即最优的或较优的方案。

首先对单一变量进行试验,得出激光冲击显微硬度与单一变量之间的关系,寻找显微硬度的变化规律。然后,利用正交试验方法对激光冲击过程中能量、脉宽、冲击次数及吸收层厚度四个工艺参数设计了四水平四因素(L₄⁴)的正交试验,利用显微硬度对其进行性能表征,得到了最佳的铝合金激光冲击强化试验方案。

2 试验材料及方法

试验中采用的是由中国科学院沈阳自动化研究所高能激光冲击设备,整套设备是由脉冲纳秒Nd:YAG高性能激光系统、激光光路、加持工件机器人以及送水系统组成。激光器系统波长为1064 nm,脉冲宽度为14~17 ns,单脉冲能量范围为2~7 J,聚焦光斑直径为2 mm,脉冲频率为0~2 Hz,光斑的搭接率大于30%。

试验中所用的铝合金是2 mm厚的轧制板材,加工成15 mm × 300 mm的试样,用100#到800#的SiC砂纸打磨,然后利用三氧化二铬(Cr₂O₃)稀溶液进行抛光直至表面无划痕。为了增强对激光能量的吸收,使其更好地转变为等离子体冲击波,并且保护试样表面不被高能激光束灼伤,试验中采用黑胶带作为激光冲击强化的吸收层;同时为了防止冲击波向外扩散,并延长冲击波的作用时间,在黑胶带外侧喷水形成水层,作为冲击的约束层,水层厚度约为2 mm。

在研究不同激光冲击工艺参数对其强化效果的过程中,为方便起见,使用字母代表不同的工艺参数,用数字代表不同的水平,工艺参数设计如表1所示。

表1 正交试验的工艺参数

Table 1 Process parameters of orthogonal experiment

	A (pulse width /ns)	B (laser energy /J)	C (shock number)	D (ablator /mm)
1	14	4	1	0.15
2	15	5	2	0.20
3	16	6	3	0.25
4	17	7	4	0.50

为了得出激光冲击强化的最佳工艺参数,设计了四因素四水平的激光冲击强化正交试验,试验设计如表2所示。

表2 激光冲击正交试验设计

Table 2 Orthogonal experiment design of laser shock peening

	Pulse width /ns	Laser energy/J	Number	Ablator /mm	
1	A1B1C1D1	14	4	1	0.15
2	A1B2C2D2	14	5	2	0.20
3	A1B3C3D3	14	6	3	0.25
4	A1B4C4D4	14	7	4	0.50
5	A2B1C2D3	15	4	2	0.25
6	A2B2C1D4	15	5	1	0.50
7	A2B3C4D1	15	6	4	0.15
8	A2B4C3D2	15	7	3	0.20
9	A3B1C3D4	16	4	3	0.50
10	A3B2C4D3	16	5	4	0.25
11	A3B3C1D2	16	6	1	0.20
12	A3B4C2D1	16	7	2	0.15
13	A4B1C4D2	17	4	4	0.20
14	A4B2C3D1	17	5	3	0.15
15	A4B3C2D4	17	6	2	0.50
16	A4B4C1D3	17	7	1	0.25

3 试验结果与讨论

3.1 激光冲击强化工艺参数对铝合金强化效果的影响

3.1.1 激光脉宽对铝合金激光冲击强化效果的影响

为了研究不同的工艺参数对激光冲击铝合金强化效果的影响,采用控制变量的方法,研究不同工艺变化对强化效果的影响程度。首先研究激光脉宽对显微硬度的影响,工艺设计如表3所示。

表3 激光脉宽的工艺参数设计

Table 3 Process parameters design of laser pulse width

Parameters	Pulse width /ns	Energy /J	No.	Ablator /mm
	14, 15, 16, 17	5	1	0.25

对冲击后的铝合金表面进行了显微硬度的测试,测试结果如表4所示,将表4结果绘制曲线,如图1所示。

表4 不同激光脉宽下显微硬度的测试结果

Table 4 Micro-hardness test results under different laser pulse widths

Laser pulse width /ns	Average /HV	Amplification /%
Unpeened	110.5	0.0
14	130.86	18.43
15	133.53	20.8
16	135.65	22.7
17	128.23	16.0

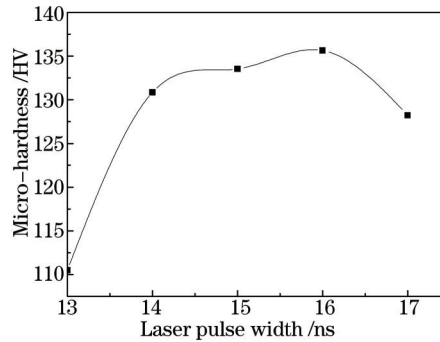


图1 激光脉宽对材料显微硬度的影响

Fig.1 Influence of Laser pulse width on material micro-hardness

由图1可知,随着激光脉宽的增加,显微维氏硬度先升高后降低。一般情况下,激光脉宽越小激光形成的能量密度越大,形成更大的应力冲击波,即激光冲击强化效果越明显。但是,试验结果却不符合理论,原因可以解释为:由于6082铝合金较软,也就是说铝合金屈服强度较低,变形所需的应力较小。还有一种可能,冲击波在金属表面发生发射和折射,部分冲击波会加强,部分减弱,因此在金属表面发生复杂的作用。

3.1.2 激光能量对铝合金激光冲击强化效果的影响

研究激光单脉冲能量对铝合金强化效果的影响时,根据试验经验,设置的工艺参数如表5所示。

表5 激光单脉冲能量的工艺参数设计

Table 5 Process parameters design of laser single pulse energy

Parameters	Pulse width /ns	Energy /J	No.	Ablator /mm
	15	4, 5, 6, 7	1	0.25

根据表5对铝合金进行激光冲击强化,并测试其显微硬度,结果如表6所示。将表6结果绘制曲线,如图2所示。

表6 不同激光单脉冲能量下显微硬度的测试结果

Table 6 Micro-hardness test results under different laser single pulse energies

Laser single pulse energy /J	Average /HV	Amplification /%
Unpeened	110.50	0.0
4	124.00	12.21
5	133.53	17.19
6	137.28	24.23
7	134.10	18.98

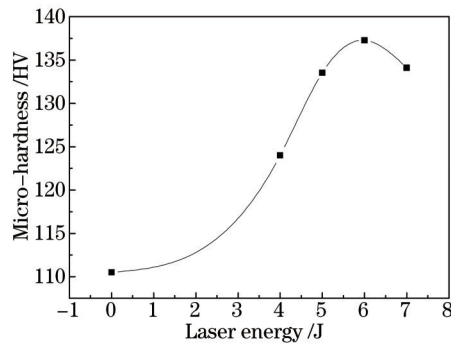


图2 激光单脉冲能量对材料显微硬度的影响

Fig.2 Influence of single pulse energy on material micro-hardness

由图2可知,随着激光能量的提高,激光的能量密度相应提高,但是根据试验结果(表6)所示,激光能量为6 J时,显微硬度值达到最大,当以7 J冲击试样时,显微硬度略有降低,与5 J冲击得到的显微硬度接近。

3.1.3 激光冲击次数对铝合金激光冲击强化效果的影响

研究了冲击次数对激光冲击强化效果的影响情况,设置的工艺参数如表7所示。

表7 冲击次数影响的工艺参数设计

Table 7 Process parameters design of shock number

	Pulse width /ns	Energy /J	No.	Ablator /mm
Parameters	15	5	1,2,3,4	0.25

根据表7对铝合金进行激光冲击强化,并测试其显微硬度,如表8所示。

表8 不同冲击次数下显微硬度测试结果

Table 8 Micro-hardness test results under different shock numbers

Shock number	Average /HV	Amplification /%
Unpeened	110.5	0.0
1	133.53	17.19
2	133.71	21.00
3	133.80	21.10
4	133.10	20.10

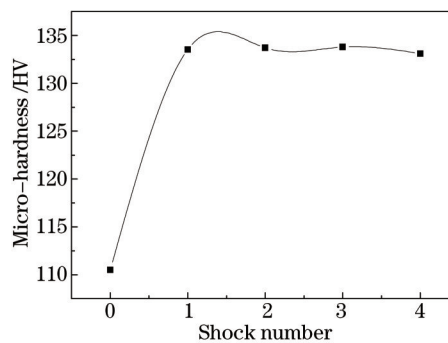


图3 冲击次数对材料显微硬度的影响

Fig.3 Influence of shock number on material micro-hardness

根据经验^[11]可知,一般情况下,随着冲击次数的增加,材料的显微硬度会有一些的升高,但是在本次试验中,冲击次数的增加并没有明显的提高显微硬度,冲击一次即可达到预期的效果。

3.1.4 吸收层厚度对铝合金激光冲击强化效果的影响

吸收层的厚度对激光冲击强化的影响是较为明显的,吸收层的主要作用就是将激光转化为等离子体冲击波,吸收层的厚度直接影响冲击波的大小和作用情况,因此对吸收层厚度的研究是很有意义的。为研究吸收层厚度对铝合金激光冲击强化效果的影响,设置的工艺参数如表9所示。

表9 吸收层厚度影响的工艺参数设计

Table 9 Process parameters design of absorption layer thickness

Parameters	Pulse width /ns	Energy /J	No.	Ablator /mm
	15	5	1	0.15, 0.2, 0.25, 0.5

根据表9对铝合金进行激光冲击强化,并测试其显微硬度,如表10所示。

表10 不同吸收层厚度下显微硬度测试结果

Table 10 Micro-hardness test results under different absorption layer thicknesses

Absorption layer thickness	Average /HV	Amplification /%
Unpeened	110.50	0.0
0.15	133.84	21.12
0.20	137.63	24.55
0.25	133.53	20.84
0.50	129.60	17.28

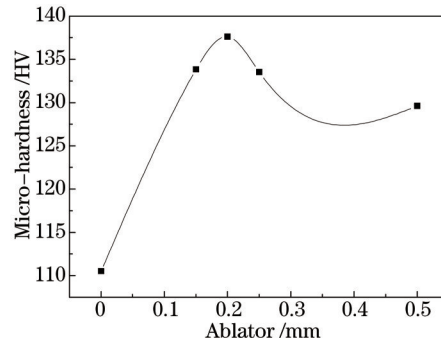


图4 不同吸收层厚度下材料显微硬度的影响

Fig.4 Influence of absorption layer thickness on material micro-hardness

由于冲击过程产生的冲击波瞬间能达到几个兆帕,这样强大的冲击作用在吸收层的表面可能会导致表面破损,严重影响冲击效果,并且还会造成试样表面的损伤。因此,在吸收层表面无损伤的情况下,探索不同厚度吸收层对激光冲击强化效果的影响。由图4可知,随着吸收层厚度的增加,显微硬度先增加后减小,在吸收层厚度为0.2 mm时显微硬度达到最大值137.63 HV,提高了近25%。

3.2 激光冲击强化正交试验对铝合金强化效果的影响

影响激光冲击强化效果的主要工艺参数有脉宽、单脉冲能量、冲击次数以及吸收层的厚度,若对四组工艺参数进行全面的分析,得到最佳的试验工艺,要进行64组试验,这样增大了试验的工作量,也增加了试验复杂性。因此,设计了四水平四因素的正交试验(L_4^4),仅需进行16组试验,将优化过程简化。利用显微硬度对

表11 正交试验试验结论

Table 11 Orthogonal experiment results

		Average /HV	Amplification
0	Unpeened	110.50	0.0
1	A1B1C1D1	128.65	14.4
2	A1B2C2D2	134.90	22.1
3	A1B3C3D3	130.53	18.1
4	A1B4C4D4	128.70	16.5
5	A2B1C2D3	125.60	13.7
6	A2B2C1D4	126.25	14.3
7	A2B3C4D1	133.60	21.0
8	A2B4C3D2	130.00	17.6
9	A3B1C3D4	130.03	17.6
10	A3B2C4D3	135.53	22.7
11	A3B3C1D2	138.10	25.0
12	A3B4C2D1	127.10	15.0
13	A4B1C4D2	125.77	14.2
14	A4B2C3D1	130.45	18.1
15	A4B3C2D4	132.70	20.1
16	A4B4C1D3	135.83	23.0

工艺进行表征,并对试验结论进行极差分析,最终得出最佳的激光冲击强化的工艺参数。对正交试验设计中的指标优选、因素主次、水平优劣等问题进行讨论,正交试验结果如表 11 所示。

进一步对这 16 组正交力学性能数据指标通过统计进行极差分析及假设检验,以期获得最佳的热处理工艺参数。根据正交试验统计结果并对其进行极差分析可以得出不同因素对力学性能指标影响程度,并将影响因素水平大小排列。因此,通过正交设计试验的优点,可以有效降低试验成本,缩短工艺周期。

正交试验数据直观分析包括以下内容:计算不同因素在每个水平下的平均转化率,将因素的影响大小排列从而设计工艺优化参数,根据已有的结果对追加试验进行推断。表 12~15 为激光脉宽、激光单脉冲能量、冲击次数、吸收层厚度在不同水平下的平均转化率计算结果。图 5~8 分别为利用表 12~15 绘制的曲线,并与单变量结果进行了对比。其中 T 代表不同水平转化率的求和,例如表 3~11 中 T_1 为激光脉宽为 14 ns 时四次试验转化率之和,如对显微硬度 $T_1 = 128.65 + 134.90 + 130.53 + 128.7 = 522.78$, 其均值 $m_1 = T_{1/4} = 130.7$ 为, m 表示每个因素下不同水平的平均转化率,同样采用该方式计算。

表 12 激光脉宽在不同水平下的平均转化率

Table 12 Average conversion rate of the laser pulse width under different levels

	Micro-hardness /HV
T_1	512.78
T_2	515.45
T_3	530.76
T_4	524.75
m_1	128.20
m_2	128.90
m_3	132.70
m_4	131.20

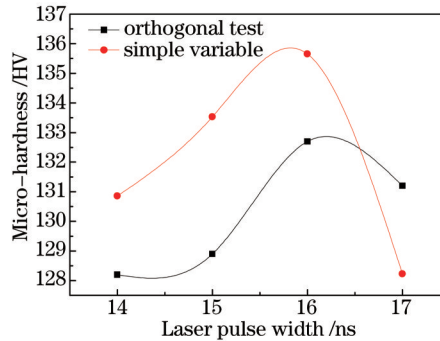


图 5 激光脉宽在不同水平下的转化率曲线

Fig.5 Conversion rate curve of laser pulse width under different levels

表 13 激光单脉冲能量在不同水平下的平均转化率

Table 13 Average conversion rate of the laser energy under different levels

	Micro-hardness /HV
T_1	510.50
T_2	527.13
T_3	534.93
T_4	521.63
m_1	127.51
m_2	131.78
m_3	133.73
m_4	130.40

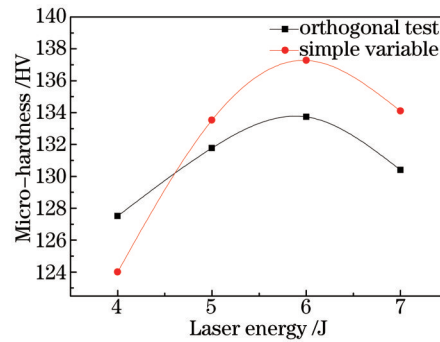


图6 激光单脉冲能量在不同水平下的转化率曲线

Fig.6 Conversion rate curve of laser energy under different levels

表14 冲击次数在不同水平下的平均转化率

Table 14 Average conversion rate of different shock numbers under different levels

	Micro-hardness /HV
T_1	519.60
T_2	520.30
T_3	521.01
T_4	522.78
m_1	129.85
m_2	130.10
m_3	130.25
m_4	130.70

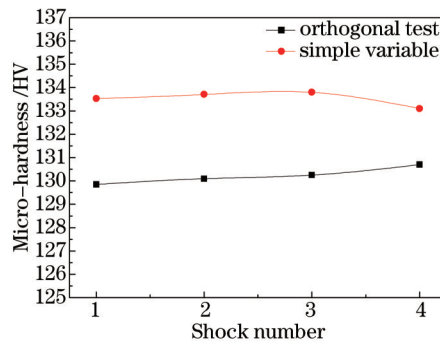


图7 激光能量在不同水平下的转化率曲线

Fig.7 Conversion rate curve of different shock number under different levels

冲击次数对6082铝合金显微硬度没有明显的影响,而且冲击次数的提高会明显增大材料,因此,为了简化试验过程,同时提高表面光洁度,认为仅冲击一次即可达到增大显微硬度的效果。

表15 吸收层厚度在不同水平下的平均转化率

Table 15 Average conversion rate of different absorption layer thicknesses under different levels

	Micro-hardness/HV
T_1	519.80
T_2	528.80
T_3	527.50
T_4	517.70
m_1	129.95
m_2	132.20
m_3	131.90
m_4	129.40

根据统计结果可知,提高显微硬度的最佳方案为A3B3C1D2,具体工艺如表16所示。对该工艺进行补充试验,得到显微维氏硬度值为135.8 HV,提高了23%。

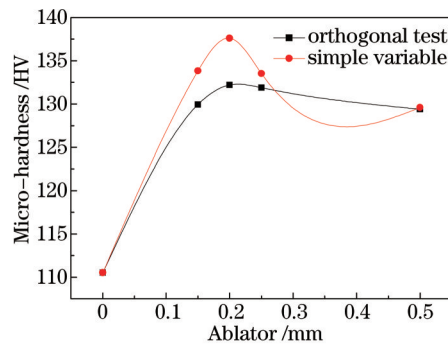


图8 激光能量在不同水平下的转化率曲线

Fig.8 Conversion rate curve of different shock numbers

表 16 表面显微硬度最佳激光冲击强化工艺

Table 16 Best process of laser shock processing on micro-hardness

Parameters	Pulse width /ns	Laser energy /J	No.	Ablator /mm
	16	6	1	2

3.3 变化趋势产生的原因

一般情况下,激光冲击强化效果主要取决于激光诱导冲击波的峰值大小,且激光冲击强化处理产生的冲击波压力峰值是关于激光功率密度的函数:

$$q = \frac{4E}{n\pi d^2}, \quad (1)$$

式中 q 为激光功率密度, d 为光斑直径, n 为脉宽, E 为激光能量。当冲击波压力超过最高弹性应力(HEL)时,金属表面产生永久的塑性变形^[8-9]。

冲击波的峰值 p 与功率密度 q 之间的关系满足

$$p = \frac{[2(k^2 - 1)]^{2/3}}{k + 1} \rho_0^{1/3} (Aq)^{2/3}, \quad (2)$$

式中 p 为冲击波峰值压强; k 为比热比; A 为吸收层与金属表面对冲击波的吸收系数,其大小与吸收层的性质有关; ρ_0 为整个体系的综合系数,它与约束层、吸收层以及材料性质都相关。从(2)式可知,激光诱导冲击波的峰值会随着功率密度的增加而升高。但是并非功率密度越高越好,因为其最高的弹性应力(HEL)是一个阈值,HEL与材料的屈服极限具有一定的关系,即

$$F_{\text{HEL}} = \frac{(1 - \nu)}{(1 - 2\nu)} \sigma_{\gamma}^{\text{dyn}}, \quad (3)$$

式中 F_{HEL} 为 HEL 的值; ν 为各相异性系数,一般在 0.25~0.3 之间; $\sigma_{\gamma}^{\text{dyn}}$ 为材料的屈服强度。一般情况下,冲击效果可以达到最好时^[10],材料的 HEL 与冲击波压强 p 之间满足

$$2F_{\text{HEL}} < p < 2.5F_{\text{HEL}}. \quad (4)$$

也就是说并非功率密度越大,冲击效果越好,而是有一定最佳范围的,当功率密度超过阈值时,就会降低激光冲击效果。

一般情况下,金属表面的流变应力随着激光诱导冲击波压力峰值的增加而增大。但是对某一材料,当诱导冲击波的峰值超过一定阈值时,流变应力就达到饱和,即使功率密度继续增加,表面的流变应力也不发生变化。但是,材料内部流变应力的峰值就会向内部传播,从而导致强化层的深度仍然有所增加。由于 6082 铝合金的屈服强度较低,因此 HEL 也较低,强化效果最优的值较低。因此,功率密度过大反而会影响激光冲击强化的效果,表面显微硬度也会随之降低^[7,9]。

吸收层太薄可能会造成金属表面烧蚀,或者无法形成能量足够大的冲击波,降低作用效果;合适厚度的吸收层可以增大表面冲击波的应力幅值,增大冲击波峰压的持续时间^[10-11];如果吸收层过厚,会对激光冲击波造成衰减,导致能量损失,降低冲击效果。因此,吸收层的厚度具有一个临界值,控制好吸收层的厚度很重要^[12-14]。

4 结 论

探索了激光冲击工艺参数对 6082 铝合金表面显微硬度的影响,包括激光脉宽、激光能量、冲击次数以及吸收层的厚度。研究发现,激光脉宽减小会导致金属表面显微硬度先增加后减小;激光能量增加导致显微硬度先增加后少许降低;而冲击次数对冲击效果的影响不甚明显;而吸收层的厚度增加会导致显微硬度先增加后减小。对四组工艺参数设计 L_4 四元素四水平的正交试验,统计试验得到的表面硬度结果,并对试验结果进行极差分析,其变化趋势与控制单因素变量得到的变化趋势基本一致,最终得到激光冲击强化的最佳工艺:激光脉宽为 16 ns;激光能量为 6 J;冲击 1 次;吸收层厚度为 2 mm。

进一步讨论了不同因素下材料表面显微硬度变化趋势产生的原因:由于 6082 铝合金的屈服强度较低,HEL 也较低,强化效果最优的值较低。因此,功率密度过大反而会影响激光冲击强化的效果,表面显微硬度也会随之降低。

参 考 文 献

- 1 Zhu Wei, Zhou Jianzhong, Huang Shu, *et al.*. Study on the numerical simulation and statistical optimization of micro-scale laser shock peening[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(s1): s103005.
朱 伟,周建忠,黄 舒,等. 微尺度激光喷丸纯铜数值模拟和统计优化分析[J]. 中国激光, 2011, 38(s1): s103005.
- 2 Nie Xiangfan, He Weifeng, Li Qipeng, *et al.*. Improvement of structure and mechanical properties of TC6 titanium alloy with laser shock peening[J]. High Power laser and Particle Beams, 2013, 25(5): 1115-1119.
聂祥樊,何卫锋,李启鹏,等. 激光喷丸改善 TC6 钛合金组织和力学性能[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(5): 1115-1119.
- 3 Li Wei, Li Yinghong, He Weifeng, *et al.*. Development and application of laser shock processing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(12): 13-19.
李 伟,李应红,何伟峰,等. 激光冲击强化技术的发展和应[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(12): 13-19.
- 4 Lin D, Zhang M Y, Ye C, *et al.*. Larger scale, highly dense nanoholes on surfaces by underwater laser assisted hydrogen etching etchnear nanocrystalline boundary[J]. Applied Surface Science, 2012, 258(10): 4254-4259.
- 5 Qiao Hongchao, Zhao Yixiang, Zhao Jibin, *et al.*. Effect of laser peening on microstructures and properties of TiAlalloy [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(7): 1766-1773.
乔红超,赵亦翔,赵吉宾,等. 激光冲击强化对 TiAl 合金组织和性能的影响[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(7): 1766-1773.
- 6 Lu Ying, Zhao Jibin, Qiao Hongchao. Investigation of technical and strengthening mechanism research of TiAlalloy by laser shock peening[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1003013.
陆 莹,赵吉宾,乔红超. TiAl 合金激光冲击强化工艺探索及强化机制研究[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1003013.
- 7 Amar H, Vignal V, Krawiec H, *et al.*. Influence of the microstructure and laser shock processing (LSP) on the corrosion behaviour of the AA2050-T8 aluminium alloy[J]. Corrosion Science, 2011, 53(2): 3215-3221.
- 8 Qiao Hongchao, Zhao Jibin, Lu Ying. Develop and analysis of nanosecond pulse width Nd:YAG laser for laser peening[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0802001.
乔红超,赵吉宾,陆 莹. 纳秒脉宽 Nd:YAG 激光冲击强化激光器的研制及分析[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0802001.
- 9 Luo K Y, Lu J Z, Zhang L F, *et al.*. The microstructural mechanism for mechanical property of LY2 aluminum alloy after laser shock processing[J]. Materials and Design, 2010, 31(5): 2599-2603.
- 10 Couturier S, De R M, Hallouin M, *et al.*. Shock profile induced by short laser pulses[J]. Journal of Applied Physics, 1996, 79(12): 554-565.
- 11 Chu J P, Rigsbee J M, Banas G, *et al.*. Laser-shock processing effects on surface microstructure and mechanical properties of low carbon steel[J]. Materials Science and Engineering, 1999, 260(1): 260-268.
- 12 Zhang Y K, Lu J Z, Ren X D, *et al.*. The effect of laser shock processing on the mechanical properties and fatigue lives of the turbojet engine blades manufactured by LY2 aluminum alloy[J]. Materials and Design, 2009, 30(5): 1697-1703.
- 13 Luo Xinmin, Yuan Chunzhi, Zhang Jingwen, *et al.*. Laser shocking and its effects on microstructure and properties of metallic materials[J]. Heat Treatment, 2012, 27(1): 7-23.
罗新民,苑春智,张静文,等. 激光冲击及其对金属材料组织和性能的影响[J]. 热处理, 2012, 27(1): 7-23.
- 14 Ni Minxiong, Zhou Jianzhong, Yang Chaojun, *et al.*. Investigation of generation mechanism and influencing factors on residual stress fields by laser shock processing[J]. Applied Laser, 2006, 26(2): 73-77.
倪敏雄,周建忠,杨超君,等. 激光冲击处理的残余应力场形成机理及影响因素分析[J]. 应用激光, 2006, 26(2): 73-77.

栏目编辑:殷建芳