

文章编号: 1001-3806(2008)04-0377-03

基于 Taguchi 方法的激光喷丸强化工艺参量的优化研究

孙月庆, 周建忠*, 梁庆磊, 陈毅彬, 黄舒
(江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为了对激光喷丸强化的工艺参量进行全面评估, 通过改变激光能量(A)、脉冲宽度(B)和光斑直径(C), 对 12mm 厚的 6061-T6 铝合金板料进行模拟实验研究, 旨在评价激光工艺参量对喷丸后残余应力的影响及彼此之间的交互作用。在 Taguchi 方法指导的基础上, 采用 ABAQUS 有限元分析软件进行实验模拟, 并运用 MNIAB 软件对数值模拟结果进行统计分析。结果表明, 3 个激光工艺参量对残余压应力都有着显著的影响, 按照对残余压应力影响程度的大小进行排序, 依次为光斑直径、脉冲宽度和激光能量。最佳的参量水平组合为 $A_3B_3C_2$, 对应的表面残余应力大小为 125MPa。

关键词: 激光技术; 参量优化; Taguchi 方法; 激光喷丸强化; 残余压应力

中图分类号: TN249; TG156.99 **文献标识码:** A

Optimization of laser peening parameters using Taguchi method

SUN Yue-qing, ZHOU Jian-zhong, LIANG Qing-lei, CHEN Yi-bin, HUANG Shu
(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to make a comprehensive evaluation of process parameters of laser peening, a Taguchi experimental method was adopted here. Laser peening of the 12mm thick 6061-T6 aluminum alloy sheet was studied by changing the laser power, laser shot diameter and pulse width. The objective of the study was to assess the impact of laser parameters on residual compressive stress and the interaction of parameters. The finite element software ABAQUS was applied to simulate the laser peening process. The Taguchi method was used to formulate the experimental layout and establish the order of predominance among the identified critical parameters, and predict the optimal setting for each process parameter. The results obtained were analyzed using the software MNIAB. The results show that three parameters related to the magnitude of compressive residual stress imply different effects. Laser shot diameter ranks first, followed by pulse width and laser power. The best combination of levels is $A_3B_3C_2$. The optimal result is confirmed with a superior ultimate surface residual compressive stress of 125MPa.

Key words: laser technique; parameter optimum; Taguchi method; laser peening; residual compressive stress

引 言

激光喷丸强化是利用高能脉冲激光束替代有质弹丸冲击零件表面诱导的高幅冲击波压力进行材料表面改性的技术。激光喷丸强化在金属材料表层引入较大的残余压应力, 从而显著提高零件的疲劳寿命和抗应力腐蚀能力。与传统的机械喷丸相比较, 激光喷丸强化形成的残余压应力层深度要比机械喷丸强化形成的残余压应力层深^[1]。目前在国外, 激光喷丸强化技术已开始工程化应用, 广泛应用于处理具有局部应力集中的疲劳件, 例如铁轨、汽车连杆、弹簧、齿轮、轴承、汽轮机中的叶片、航空器中的紧固件、起落架装置以及其

它具有易疲劳的槽口、孔洞、转角等的机器部件^[2]。

从现有的相关文献来看, 国外学者对激光喷丸强化效果进行了大量的实验研究, 并进行了相应的残余应力测量分析^[3-4], 但对于激光喷丸强化形成的残余应力优化和控制方法等方面的研究尚未见报道。在研究激光喷丸强化时, 国内学者大多应用单因素试验法来评估工艺参量对喷丸效果的影响。由于单因素方法的片面性, 工艺参量之间的交互作用则无法认识; 对板料激光喷丸强化的工艺参量进行优化等问题都需要全面的对参量进行考虑^[4]。在本文中, 采用一种基于 Taguchi 理论的方法对 6061-T6 铝合金板料的激光喷丸强化的工艺参量进行全面的评估, 优化出面向抗疲劳制造的激光喷丸强化工艺参量, 从而实现激光喷丸强化过程残余应力水平的合理控制。

1 Taguchi 方法

Taguchi 方法又称健壮法或稳健法, 是一种聚焦于

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50675090)

作者简介: 孙月庆 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光加工机理及其应用方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn

收稿日期: 2007-04-19; 收到修改稿日期: 2007-05-14

最小化过程变差或使产品、过程对噪声因素最不敏感的试验设计方法。该方法是一种能设计出环境条件复杂多变条件下能够稳定和优化操作的高效方法。Taguchi方法的首要目标是找出过程调整或维持时响应变量变差最小的因子水平设置,当确定了影响变差的因子,就可以确定降低变差的可控因子水平设置或制造对因子水平变化不敏感的产品。参量设计是Taguchi方法的关键。

Taguchi方法中参量设计的核心分析工具是:正交试验设计和信噪比。正交表具有“均匀分散性,整齐可比”,就是每个因素的每个水平与另一个因素每个水平各相交一次。由于上述特点,应用正交表来安排实验是有代表性的,能够比较全面地反映各因素、各水平对指标影响的大致情况。因此,用正交表安排实验就能够减少实验次数。信噪比作为衡量产品质量稳健的指标,通过对各种实验方案的统计分析,找出抗干扰能力强、调整性好、性能稳定的最佳参量水平组合。信噪比值的级差越大,影响因子水平就越高。ANOVA统计分析用来确定统计数字上有显著影响的过程参量。基于以上的分析可以预测过程参量的最佳组合^[5-9]。

2 激光喷丸强化的数值模拟

为了探索 Taguchi理论在激光喷丸强化效果控制方面的适用性,应用 ABAQUS/Explicit和 ABAQUS/Standard模块来模拟计算正交试验计划下单次激光喷丸下试样表面的残余压应力值。

试验中所用材料为 6061-T6 铝合金圆形板,几何尺寸为直径 40mm ×12mm。性能参量为:静态屈服强度 230MPa,抗拉强度 290MPa,泊松比 0.35,弹性模量 72GPa。

2.1 本够模型

由于板料的激光喷丸强化是一个高度非线性的瞬时动态事件,因此,对其模拟主要是在 ABAQUS/Explicit模块中进行,所以选用 ABAQUS/Explicit中自带的 Johnson-Cook模型^[10]。Johnson-Cook(JC)模型用来模拟高应变率下的金属材料。JC强化模型表示为 3 项的乘积,分别反映了应变硬化、应变率硬化和温度软化。这里使用 JC模型的修正形式:

$$\sigma = (a + b\varepsilon^n) \left[1 + c \ln \left(1 + \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] (1 - T^m) \quad (1)$$

并使参考应变率 $\dot{\varepsilon}_0 = 1$,这样公式中 a 为材料的静态屈服应力。 a, b, c, m, n 是常数,通过实验来确定, T 是温度。

2.2 模拟过程

在模块中建立板料模型,选用合适的网格密度,选

择单元类型。在所有建模信息如元素类型、材料定义、边界条件、加载设置、输出设置、重起设置等完成后,将输入文件导入 ABAQUS模块中求解。对于冲击波的加载,在 ABAQUS中按照加载方式预先设置一个振幅曲线,使载荷按照振幅曲线的变化规律进行变化。

3 激光工艺参量优化过程

激光喷丸强化的直接作用效果是在金属材料的表面引入较大的残余压应力。通过调整激光喷丸的工艺参量就可以实现对残余应力大小进行控制。因此,选择合适的激光工艺参量来达到较大的表面残余应力对于抗疲劳制造是相当关键的。目前,在激光喷丸过程中,影响残余应力大小的可控激光参量主要有以下 3 个:激光能量、脉冲宽度和光斑直径。为了评估激光工艺参量对于喷丸强化的影响以及优化工艺参量以获得较大的表面残余压应力,Taguchi方法被用来对试验进行合理安排,建立各关键参量的主次影响关系,并且预测最佳的试验参量组合。

Taguchi方法的实施步骤如下:(1)选定品质特性;(2)确定控制因子和噪声因子;(3)选择正交试验安排;(4)执行试验,收集数据;(5)分析数据,确定最优的因素水平组合;(6)预测最佳的性能。

3.1 品质特性的选择

根据产品的质量特征,Taguchi方法提供了 3 种形式的质量特征损失函数:望小特性、望大特性和望目特性。为了提高材料的抗疲劳性能,期望材料表面的残余压应力越大越好。所以,依据残余应力的期望值,试验中采用望大品质特性,其信噪比为:

$$\eta = -10 \log \frac{1}{n} \left(\sum \frac{1}{y_j^2} \right) \quad (2)$$

3.2 控制参数水平的设定

在激光喷丸过程中影响试样表面残余应力的关键控制参量主要是激光能量、脉冲宽度和光斑直径。Taguchi方法优化的对象就是这 3 个可控的设计参量,优化的目标就是选择合理的控制参量组合,使噪声因素对响应的影响最小化。试验的控制因素水平见表 1。

Table 1 Table of orthogonal experimental factor levels

symbol	laser peening parameter	level 1	level 2	level 3
A	laser power/J	15	25	35
B	pulse width/ns	18	23	30
C	laser shot diameter/mm	6	8	10

Taguchi试验设计又称正交设计,其试验表为一个分部因子设计阵列,可以保证任一因子的各水平为平衡组合,每个因子可以独立进行评估。在试验设计中,

采用了 L_9 正交表, 3 因子 3 水平 9 次试验, 试验结果数据运用统计软件 M N I T A B 进行分析。表 2 显示的是针对响应为表面残余压应力的正交试验安排及其相应的在 A B A Q U S 上模拟的试验结果。

Table 2 Orthogonal experimental program and simulation analysis

simulation No.	laser peening parameter level			simulation results surface residual stress/MPa
	A	B	C	
1	1	1	1	- 62.7
2	1	2	2	- 86
3	1	3	3	- 73.1
4	2	1	2	- 81.6
5	2	2	3	- 70.4
6	2	3	1	- 88.2
7	3	1	3	- 72
8	3	2	1	- 75.7
9	3	3	2	- 125

4 试验模拟结果分析

为了评估各控制因素对于残余应力的影响程度, 必须计算各控制因素平均值和信噪比。在 Taguchi 数据分析当中, 主因素效果图显示每一个控制因素处于不同水平时对响应特性的影响。通过画出每个因素水平的特性平均值曲线, 辅助工具就可以画出主效应图。在试验过程中, 借助统计分析软件 M N I T A B 计算 9 次平均值和 9 次信噪比。结果见图 1 和图 2。

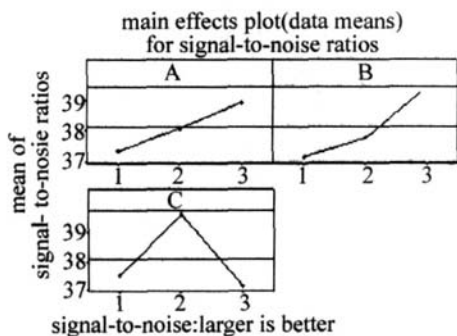


Fig. 1 Effects of parameters on signal-to-noise ratios

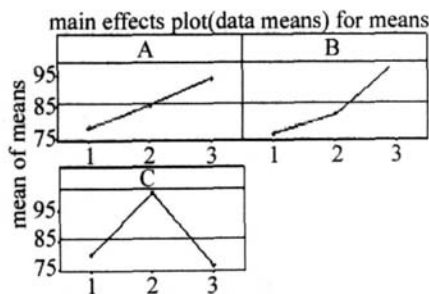


Fig. 2 Effects of parameters on means

由依据 Taguchi 方法生成的图表可以看出, 3 个激光工艺参量对残余压应力都有着显著的影响。根据均

值图和信噪图可以得出, 最佳的参量水平组合为 3, 3, 2, 即激光能量, 脉冲宽度和光斑直径分别为 35J, 30ns 和 8mm。从信噪比可以确定这种方法对于噪声影响是稳健的。从图 1 中可以看出, 残余压应力是随着激光能量和脉冲宽度的增加而增大的。表 3 用极差分析方法判断影响因素的主次关系, 按照它们对于残余压应力的影响度来排序依次是 C, B, A。

Table 3 Response for signal-to-noise ratios of residual stress (large is better)

	level A (laser power/J)	B (pulse width/ns)	C (laser shot diameter/mm)
1	37.30	37.12	37.49
2	38.04	37.74	39.62
3	38.90	39.39	37.13
delta	1.59	2.27	2.49
rank	3	2	1

M N I T A B 的 Taguchi 设计允许评估部分所选择的因子间的交互作用, 当指定需评估其交互作用的因子后, M N I T A B 将尝试将各因子放置至适当栏以评估所选择的交互作用。交互作用图用于判断因素之间是否存在交互作用。当有两个因素时, 生成单一交互作用图, 当存在 3 个以上因素时, 可以生成交互作用矩阵。图 3 就是激光能量 (A)、脉冲密度 (B)、光斑直径 (C) 3 个因素所形成的交互作用矩阵图。由于图中的线条存在交叉现象, 因此, 这 3 个工艺参量有交互作用。

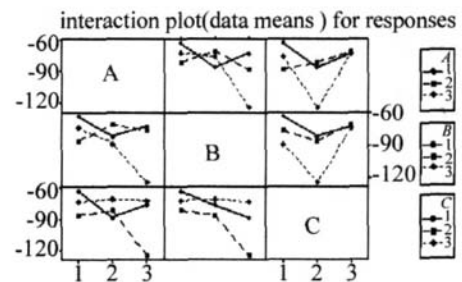


Fig. 3 Interaction effects of parameters

5 结论

将工业品质管理中的 Taguchi 方法运用到激光喷丸强化过程的优化中, 采用 L_9 正交试验对关键的激光工艺参量 (激光能量, 脉冲宽度, 光斑直径) 进行优化控制, 可知: (1) 激光束光斑直径 (因素 C) 对增加残余应力的影响是双重的, 但它存在一个最佳值; 激光脉冲能量和脉冲宽度对增加残余应力的影响都有显著的影响, 且级位越高越好。因此, 在板料的激光喷丸强化时, 可保证激光束光斑直径不变, 尽量增大激光脉冲能量和脉冲宽度, 以获得较大的残余压应力。(2) 单次激光喷丸强化的条件下激光光斑直径是最显著的影响因子, 依据它们对喷丸后材料表面残余压应力的影响

(下转第 386 页)

同的增益,且传播方向相同,故属于异增益同向模。直观上看出,这3类对模物理图像不同,则耦合效应不同,相应地在数学上,这3类对模表达式不同,则耦合系数也不同。实际上作者考虑的只是一种四频环形激光器,其它的激光器还可能存在另外一类对模:同增益同向模,读者仔细分析上述3类对模耦合系数表达式的规律性不难得出同增益同向模的耦合系数。

事实上,对于六频、八频等任意多模(圆偏振模)环形激光器,以上4类对模耦合系数表达式也是适用的,只需判断所研究的对模属于哪一类即可套用对应的公式。另外,在线偏振模环形激光器和直管气体激光器以及其它 $J_a \rightarrow J_b$ 情况下,只需将本文中得出的兰姆系数稍加简单修正即可应用,因此本结果具有一定的普适性。

4 结论

以四频环形激光器为例,从兰姆半经典自治场理论出发,用三阶微扰方法推导出非多普勒极限普遍情形下并包含粒子数脉动效应的兰姆系数解析表达式,分析表明,本文中的结果具有一定的普适性,为定量研究激光模耦合精细效应提供了参考。

参考文献

[1] ZHANG G Y. Study on the oscillating character of multimode field in

- laser cavity [J]. Laser Journal, 1996, 17(5): 210-238 (in Chinese).
- [2] XU G Ch. Investigation on the validity of the third-order approximation of semiclassical laser theory [J]. Laser Journal, 1997, 18(2): 5-9 (in Chinese).
- [3] HAN A M. Three levels extension of Lamb laser theory [J]. Journal of Qingdao University, 1993, 6(1): 70-73 (in Chinese).
- [4] ZHANG D Y, ZENG X B. Frequency and intensity of the single mode field in the laser cavity [J]. Laser Journal, 1994, 15(5): 221-226 (in Chinese).
- [5] CHOW W W, HUTCHING T J, SANDERS V, *et al* Multi-oscillator laser gyro [J]. IEEE J Q E, 1980, 16(9): 918-935.
- [6] O'BRYAN C L III, SARGENT M R III. Theory of multimode laser operation [J]. Phys Rev, 1973, 8(6): 3071-3092.
- [7] AGARWAL A, GHOSH R. Collisional effects in gas lasers [J]. Phys Rev, 1993, A47(2): 1407-1414.
- [8] SANDERS V E, KIEHN R M. Dual-polarized ring lasers [J]. IEEE J Q E, 1977, 13(9): 739-744.
- [9] ANDREWS D A, KING T A. A multi-oscillator ring laser with Zeeman bias [J]. Journal of Modern Optics, 1994, 41(10): 2019-2032.
- [10] CHOW W W, HAMBENNE J B, HANSON D R, *et al* Theory of a Zeeman ring laser-part II: special cases [J]. IEEE J Q E, 1979, 15(11): 1301-1308.
- [11] WATKINS L S, SMITH R C. Operation of a circularly polarized ring laser [J]. IEEE J Q E, 1971, 7(2): 59-62.
- [12] HANSON D R, SARGENT M III. Theory of a Zeeman ring laser: general formalism [J]. Phys Rev, 1974, 9(1): 466-480.
- [13] GAO B L. The locking phenomenon of the second kind in differential laser gyro [J]. Journal of National University of Defense Technology, 1982, 1(3): 37-57 (in Chinese).

(上接第379页)

大小,依次为激光光斑直径,脉冲宽度和激光能量。(3)利用 Taguchi方法可对板料激光喷丸强化的工艺参量进行综合评估,克服了单因素方法的片面性;了解了工艺参量之间的交互作用;得出了激光喷丸强化的关键因素,为认识各参量之间的相互联系,建立多参量对激光喷丸强化的数学模型奠定了试验基础。一旦激光喷丸强化的认识上升为理论,就可利用激光喷丸强化的规律,对板料喷丸强化的工艺参量进行优化,对激光喷丸强化进行控制,从而实现激光喷丸强化的精确成效。

参考文献

- [1] RANKIN J E, HILL M R, HACKEL L A. The effect of process variation on residual stress in laser peened 7049 T73 aluminum alloy [J]. Materials Science and Engineering, 2003, A349(1/2): 279-291.
- [2] HAMMERSLEY G, HACKEL L A, HARRIS F. Surface prestressing to improve fatigue strength of components by laser shot peening [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2000, 34(4/6): 327-337.
- [3] GOMEZ-ROSAS G, RUBIO-D-GONZALEZ C, OCANA J L. High level compressive residual stresses produced in aluminum alloys by laser shock processing [J]. Applied Surface Science, 2005, 252(4): 883-887.

- [4] ZHOU J Zh, ZHANG Y K, ZHOU M. Study on technique of laser shock forming of metal sheet [J]. Laser Technology, 2002, 26(6): 478-480 (in Chinese).
- [5] OLABIA G, CANALINO G, BENYAUNIS K Y, *et al* An ANN and Taguchi algorithms integrated approach to the optimization of CO₂ laser welding [J]. Advance in Engineering Software, 2006, 37(10): 643-648.
- [6] PAN L K, WANG Ch Ch, HSIAO Y Ch, *et al* Optimization of Nd:YAG laser welding onto magnesium alloy via Taguchi analysis [J]. Opt & Laser Technol, 2005, 37(1): 33-42.
- [7] LI Ch H, TSAI M J, YANG C D. Study of optimal laser parameters for cutting QFN packages by Taguchi's matrix method [J]. Opt & Laser Technol, 2007, 39(4): 786-795.
- [8] CHANG Ch W, KUO Ch P. Evaluation of surface roughness in laser-assisted machining of aluminum oxide ceramics with Taguchi method [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2007, 47(1): 141-147.
- [9] LU Ch, YAO Y L. Optimal and robust design of the laser forming process [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2002, 4(1): 52-66.
- [10] OCANA J L, MORALES M, MOLPECERES C, *et al* Numerical simulation of surface deformation and residual stresses fields in laser shock processing experiments [J]. Applied Surface Science, 2004, 238(1/4): 242-248.