

基于数值模拟的激光喷丸参数集成优化

范金荣¹ 黄 舒^{1,2*} 周建忠¹ 王 维¹ 樊玉杰¹ 高 彬¹ 朱 伟¹ 徐增闯^{1,2}

(¹ 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013; ² 镇江惟真激光技术有限公司, 江苏 镇江 212009)

摘要 为研究不同激光喷丸(LSP)工艺参数对强化效果的影响,以 ISIGHT 软件为平台,结合数值模拟软件 ANSYS 建立了激光喷丸参数化文件。采用多岛遗传算法对激光工艺参数进行优化,获得一组最佳参数组合。探讨了不同峰值压力及光斑半径对残余应力场及塑性变形的影响,结合实验对优化后激光参数下的塑性变形结果进行了验证。结果表明:模拟结果和实验结果一致性较好,所设计的优化方法可行,对今后的研究具有指导意义。

关键词 激光技术;激光喷丸;参数化设计;数值模拟集成;多岛遗传算法

中图分类号 TN249;TG156.99 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.s103003

Integration Optimization of Laser Shock Peening Parameters Based on Numerical Simulation

Fan Jinrong¹ Huang Shu^{1,2} Zhou Jianzhong¹ Wang Wei¹ Fan Yujie¹
Gao Bin¹ Zhu Wei¹ Xu Zengchuang^{1,2}

(¹ School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)
(² V-Zhen Laser Technology Corporation of Zhenjiang, Zhenjiang, Jiangsu 212009, China)

Abstract In order to investigate the influence of different laser shot peening (LSP) parameters on the strengthening effect, the finite element software ANSYS integrated with ISIGHT was adopted to establish a LSP parameterized file. Multi-island genetic algorithm (MIGA) was applied to optimize the process parameters of LSP, and an optimal parameter combination was obtained. The effects of different LSP parameters on the residual stress field and plastic deformation of the treated surface were discussed. Good consistency can be found between the simulation and experimental results under the optimal process parameters, which indicated that the optimization approach was feasible, and some guidance for the future research was also pointed out.

Key words laser technique; laser shot peening; parameterize design; numerical simulation integration; multi-island genetic algorithm

OCIS codes 160.3380; 350.3390

1 引 言

激光喷丸(LSP)强化诱导的残余压应力能够有效地改善材料的耐磨、耐腐蚀和抗疲劳性能,提高构件的使用寿命,而在此工艺中影响材料表面残余应力分布及塑性变形的的主要工艺参数有激光能量、脉

冲宽度、光斑直径、喷丸次数及喷丸轨迹等,如何控制这些参数,以获得理想的残余应力场分布及塑性变形,是当前研究中急需解决的问题之一^[1]。部分学者采用正交试验设计、响应曲面设计等优化方法对实验方案中的各个参数进行规划^[2,3],根据参数

收稿日期: 2011-06-20; **收到修改稿日期**: 2011-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(51175236)、教育部博士点基金(200802990004)、江苏省自然科学基金(BK2009219, BK2010351)、江苏省高校自然科学基金重大项目(08KJA460002)、江苏省高校自然科学基金(10KJB460002)、江苏大学研究生创新基金(CX09B_07XZ, CX08B_06x)、江苏省第六批“六大人才高峰”(2009)和江苏高校优势学科建设工程(2010)资助课题。

作者简介: 范金荣(1987—),女,硕士研究生,主要从事激光冲击工艺控制方面的研究。E-mail: fjrong827@126.com

导师简介: 周建忠(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事激光先进制造和表面改性延寿技术等方面的研究。

E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: huanshu11@sina.com

组合对结果的影响程度进行逐步分析或者测量,但其过程往往比较复杂。近年来,采用遗传优化算法精确控制激光参数成为研究的热点^[4]。2001年以来,C. Cheng等^[5,6]多次将遗传算法应用于激光器的研究和设计中,对激光器参数进行全局优化,从而实现了对激光器输出参数的控制。2010年,肖光宗等^[4]提出了一种新颖的基于人工神经网络(ANN)和遗传算法(GA)的激光器参数全局优化方法,建立激光器输出功率的人工神经网络模型,用以模拟激光器参数对输出功率的综合影响机理,进而以该模型作为目标函数,采用遗传算法对激光器参数进行全局优化,参数全局优化后,激光器预期输出功率高于实验室已有的同等尺寸的激光器,验证了该方法的有效性。随着计算机技术的飞速发展,美国Engineous等公司将这种算法集成于软件ISIGHT中,发展成为能够带动各种三维建模软件、有限元软件依照其算法规则,在一定工艺参数及目标参数约束下运行的集成化软件平台,使得工程结构优化设计^[7]、参数优化设计^[8]等能够集数值模拟与优化为一体。从而使以遗传算法为优化算法,通过搭建软件平台,集成激光喷丸有限元数值模型,进而高效而精确地控制激光喷丸参数成为可能。

本文利用有限元软件ANSYS,对纯铜靶材进行激光冲击波加载分析,以多岛遗传算法(MIGA)

为优化算法对各激光参数进行集成控制,最终得到既定目标条件下的最佳激光参数组合,并定性地分析各因素对表面残余应力及其表面塑性变形的影响,为今后激光喷丸工艺参数及其过程控制提供一种有效的分析方法。

2 激光喷丸参数化文件的建立

材料为99.9%(质量分数)的纯铜,其主要性能参数如表1所示。分别进行了单点及多点激光喷丸模拟。模型尺寸分别为2 mm×2 mm×2 mm及4 mm×4 mm×2 mm,为节省计算资源,采取1/4模型进行模拟,网格单元类型为SOLID164,光斑半径为0.5 mm,冲击区域进行网格细化,单元尺寸取0.05 mm,其余为0.1 mm。冲击区两侧面采用对称边界条件,而底面及另外两侧面采用非反射边界条件,模型厚度方向没有进行体分割^[9,10]。单点喷丸模型只把1/4模块平均分割成4块,多点喷丸并没有进行体分割,图1为所建立的有限元模型。激光能量为1.05 J(即冲击波峰值压力5 MPa),光斑中心距离为一个直径。脉宽为8 ns,冲击波压力呈高斯时空分布,设定求解时间分别为 4×10^{-6} s及 7.5×10^{-6} s,建立的参数化文件作为后续遗传算法操作的模型文件。

表1 纯铜的主要性能参数

Table 1 Main property parameters of pure copper

| Material properties | Density ρ /(kg /m ³) | Poisson's ratio ν | Young's modulus E /GPa | Elastic limit /GPa |
|---------------------|---------------------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------|
| TU1 | 8960 | 0.343 | 110 | 0.83 |

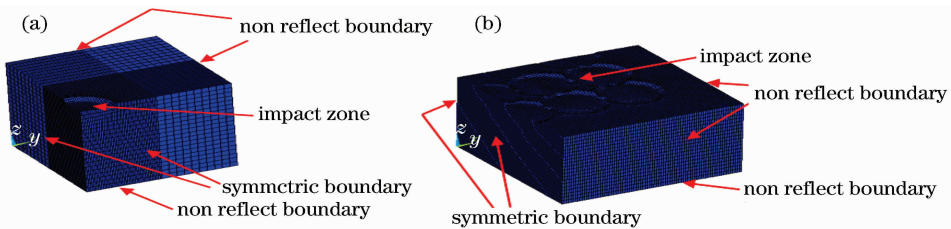


图1 激光喷丸模型边界条件。(a) 单点模型; (b) 多点模型

Fig. 1 Boundary conditions of the LSP model. (a) Single shot model; (b) multipoint model

3 参数化文件的集成

3.1 目标参量设定及其位置

为确保在小光斑直径下能精确测量光斑范围内的残余应力,采用测量塑性变形量来表征残余应力场的分布。设计新的目标参量来表征激光喷丸的效果,从而进行激光喷丸的参数化设计研究。主要的设计变量有:激光峰值压力 P_{max} 、光斑半径 R 、光斑中心距

离 L 。目标变量主要有:表层 Z 方向的平均位移 $SurfUZ$ 、表层平均残余应力 $SurfSY$,其余主要的输出变量为:1) 深度方向各单元表面的平均残余应力: $DSurfSY1, DSurfSY2 \dots DSurfSY19$; 2) 最大残余压应力: SY ; 3) 深度表层沿 Z 方向的平均位移: $DSurfUZ1, DSurfUZ2 \dots DSurfUZ19$; 其位置如图2所示,层与层的间距为一个网格单元长度。

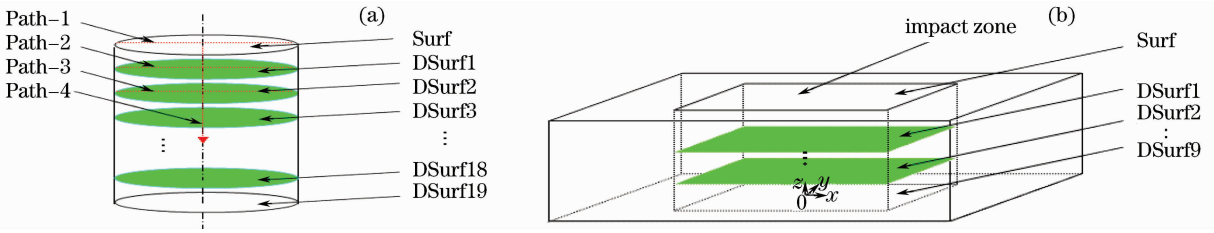


图 2 激光喷丸目标参量位置。(a) 单点；(b) 多点

Fig. 2 Location of target parameters of LSP. (a) Single shot; (b) multipoint

3.2 参数集成优化的数学模型

建立适当的数学模型是激光喷丸参数优化的重要阶段,本文将工程优化设计的思想应用于激光喷丸,建立激光喷丸的优化数学模型,其为非线性规划模型

$$\begin{aligned} & \min F(X_1), \max F(X_2); X_1, X_2 \in R^n \\ & s. t. G_k(X) \leq 0, k = 1, 2, \dots, K \\ & X_i \in [X_i^l, X_i^u], i = 1, 2, \dots, n. \end{aligned}$$

式中 $F(X_1), F(X_2)$ 为目标函数, $G_k(X) \leq 0$ 为约束条件, X 为设计变量。设计变量的约束条件:激光冲击波峰值压力阈值: $2 \text{ GPa} \leq P_{\max} \leq 10 \text{ GPa}$;激光光斑半径阈值: $0.39 \text{ mm} \leq R \leq 0.6 \text{ mm}$;光斑中心距离: $0.39 \text{ mm} \leq L \leq 1.2 \text{ mm}$;初始值为 $R = 0.5 \text{ mm}$, $P_{\max} = 5 \text{ GPa}$,对应激光能量 $E = 1.04 \text{ J}$ 。

为得到尽可能大而深的表面残余压应力场,同时又能保证较好的表面质量,就要保证表层 DSurf1, DSurf2 的残余应力为压应力,即压应力层的厚度保证在 DSurf2 以下,采用以下目标约束条件: $\min \{SY, \text{SurfSY}, \text{DSurfSY1}, \text{DSurfSY2}\}$, $\text{DSurfSY}, \text{DSurfSY1} \leq 0$; $\max \{UZ, \text{DSurfUZ}, \text{DSurfUZ1}, \text{DSurfUZ2}\}$ 。

4 多岛遗传算法

采用多岛遗传算法进行参数优化,控制参数的设置为:子种群大小为 10,子种群个数(也称“岛”)为 5,遗传代数数为 10,交叉概率设为 0.7,变异概率设为 0.08,其他采用默认数值,如表 2 所示。

表 2 多岛遗传算法参数设置

Table 2 Parameters setting of MIGA

| Subgroup | Island number | Generation number | Crossover probability | Mutation probability | Genetic probability | Genetic interval |
|----------|---------------|-------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|------------------|
| 10 | 5 | 10 | 0.7 | 0.08 | 0.5 | 5 |

5 结果与讨论

采用 ISIGHT 软件对单点激光喷丸参数进行 500 步优化得到的进程曲线如图 3 所示。遗传算法运行至 354 步时收敛,单点喷丸下得到最优参数组合值为 $[0.39 \text{ mm}, 6652.78 \text{ MPa}]$,其残余应力分布云图如图 4 所示。

经过 500 次迭代后,运行至第 454 步时,多岛遗传算法收敛,得到表 3 参数组合下的最优解组合 $[0.39 \text{ mm}, 3326.39 \text{ MPa}]$,优化后所得最大残余压应力值大幅提高,材料表面的平均残余压应力降低,而深度方向的平均残余压应力也有所提高。

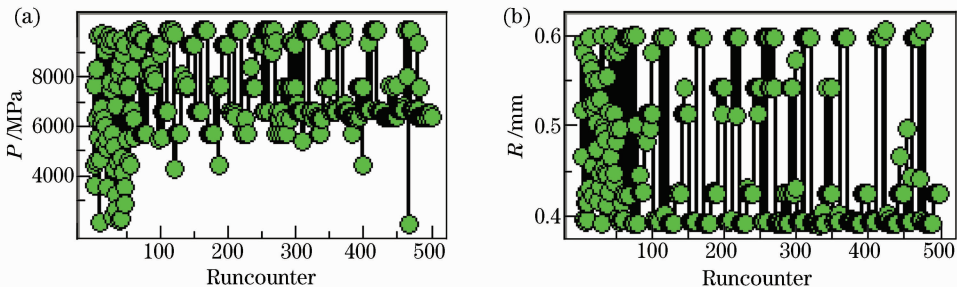


图 3 各变量运行次数曲线。(a) 峰值压力；(b) 光斑半径

Fig. 3 Run times curve of variables. (a) Peak pressure; (b) spot radius

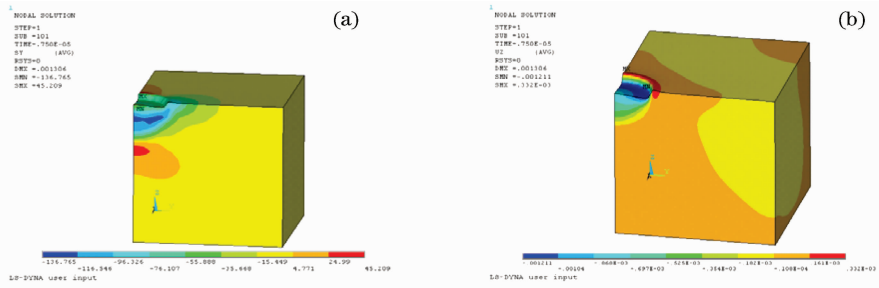


图 4 单点激光喷丸各目标变量云图。(a) Y 方向的残余应力；(b) Z 方向变形

Fig. 4 Contour of target variables of LSP. (a) Residual stress along Y direction; (b) deformation along Z direction

表 3 各参数值优化前后对比

Table 3 Comparison of parameter values before and after optimization

| Variables | Parameters | Before optimization | After optimization | Increase |
|------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------|
| | | | | Yes/No |
| Target variables | P /MPa | 2500 | 3326 | Yes |
| | R /mm | 0.5 | 0.392 | No |
| | S_Y /MPa | -110.06 | -139.91 | Yes |
| | $USUM$ /mm | 0.677×10^{-3} | 0.128×10^{-2} | Yes |
| | SurfSY /MPa | -41.24 | -35.48 | No |
| | SurfUSUM /mm | 0.469×10^{-3} | 0.104×10^{-2} | Yes |
| | SurfUZ /mm | -0.406×10^{-3} | -0.923×10^{-3} | Yes |
| | DSurfSY1 /MPa | -117.39 | -139.27 | Yes |
| | DSurfUZ1 /mm | -0.212×10^{-3} | -0.552×10^{-3} | Yes |
| | DSurfSY2 /MPa | -52.091 | -108.04 | Yes |
| DSurfUZ2 /mm | -0.259×10^{-4} | -0.235×10^{-3} | Yes | |
| DSurfSY3 /MPa | -15.97 | -60.11 | Yes | |
| DSurfUZ3 /mm | 0.727×10^{-4} | -0.312×10^{-4} | No | |

5.1 激光冲击波峰值压力的影响

由图 5(a)可知,峰值压力在 3000~10000 MPa

之间,模型中最大残余压应力值随激光峰值压力的增大而成近似指数增加,由于 X、Y 方向近似对称,

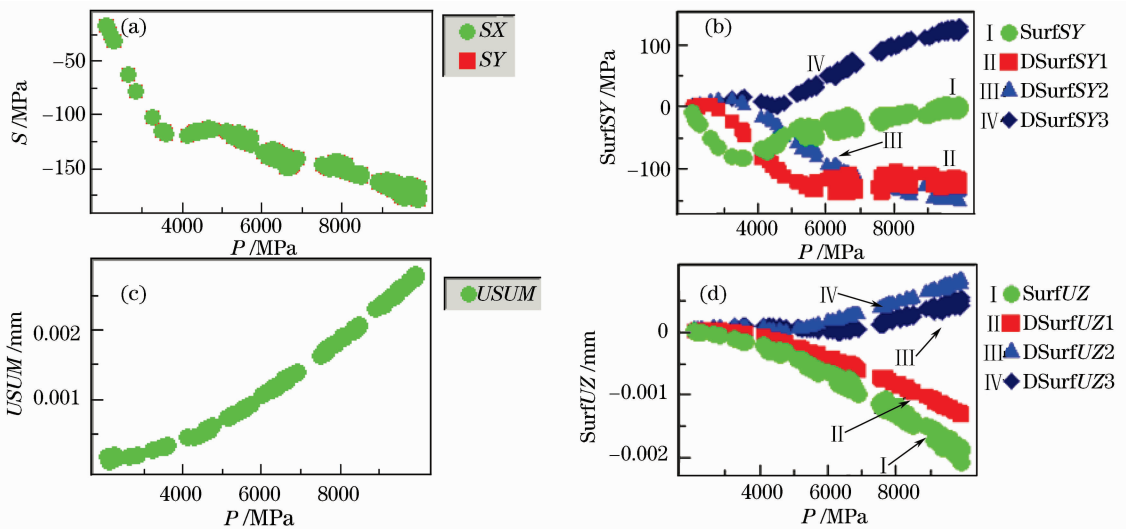


图 5 激光峰值压力对各目标参量的影响。(a)最大残余压应力；(b)各表层平均残余压应力；(c)最大变形量；(d)各表层沿 Z 方向平均变形量

Fig. 5 Influence of laser peak pressure on target variables. (a) Maximum residual compressive stress; (b) the average residual compressive stress of each surface; (c) maximum deformation; (d) the average deformation along Z direction of each surface

故模型中 X、Y 方向的最大残余压应力值变化趋势一致,在图中为一条曲线。由图 5(b)可知,材料最表层(Surf)的峰值压力呈现先减小后缓慢增大趋势,最终在超过 7000 MPa 时呈饱和状态,这表明激光喷丸峰值压力最佳范围位于 3000~7000 MPa;在材料的次表层(DSurf1, DSurf2),峰值压力在 3000~5500 MPa 之间,平均残余压应力在各表面随峰值压力的变化趋势一致,而在表层 DSurf1, DSurfSY1 随峰值压力的增加而缓慢增大,在表层 DSurf2,DSurfSY2 随峰值压力的增加缓慢减小。表层 DSurf3 呈现残余压应力状态。每相邻表层之间的距离为一个单元格的长度,即为 0.05 mm,因此由图 5(c)可以得出变形深度大约在 0.01 mm 以下。材料各表层平均变形量及最大变形量均随着激光峰

值压力的增大而增大,呈半个抛物线趋势增加。由图 5(d)可以看出,次表层 DSurf1 以下,沿着方向的平均变形量(DSurfUZ2,DSurfUZ3)呈正值增加,由此也可以看出,表层 0.01 mm 以下,材料也可能呈拉应力状态。

5.2 激光光斑尺寸的影响

图 6 为光斑半径及中心距离随着运行步骤的变化图,由图 6(a)可以看出,在激光峰值压力约为 6652 MPa 时,光斑半径范围在 $0.39 \text{ mm} < R < 0.61 \text{ mm}$ 内取值情况,在既定的运行步骤下,半径的取值几乎涵盖既定半径范围内的所有值。图 6(b)为光斑中心距离随着运行步骤的变化,可见,光斑中心距离在既定范围内取值较为均匀。

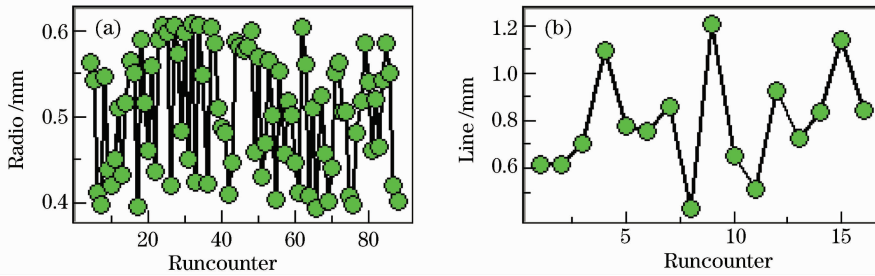


图 6 光斑半径和中心距离随着运行步骤的变化。(a) 光斑半径;(b)中心距离

Fig. 6 Change of spot radius and center distance with running steps. (a) Spot radius; (b) center distance

各表层的平均残余应力与半径的关系如图 7 所示,随着半径的增加,前两表层的平均残余应力呈抛物线减小的趋势;而后两表层则呈增大的趋势,这表明,在此半径范围内取值,随着半径的增加,残余压

应力的影响深度不断变大。与此同时,各表层平均变形量随着半径的增加逐渐减小,由图 7(b)可以看出,前两表层变化趋势较为明显,而后两表层几乎没有变化,这表明,在此既定峰值压力下及半径范围

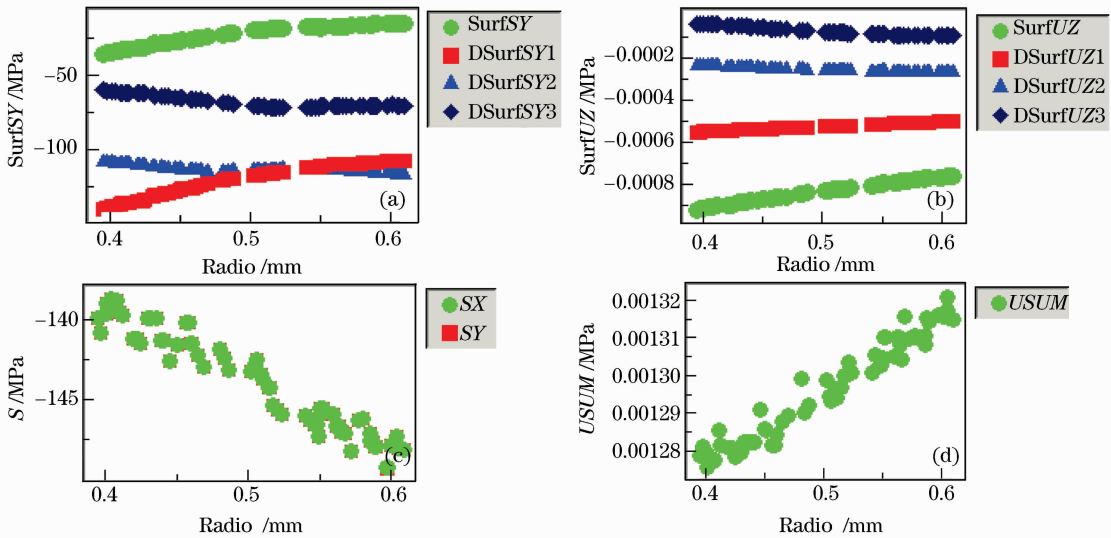


图 7 光斑半径对各变量的影响。(a) 表层平均残余应力;(b) 表层平均变形量;(c) 最大残余应力;(d) 最大变形量

Fig. 7 Influence of spot radius on the variables. (a) The average residual stress of each surface;

(b) the average deformation of each surface; (c) maximum residual stress; (d) maximum deformation

内,激光光斑半径对铜材料表层变形的影响较大。材料中最大的残余压应力随着半径的增加逐渐减小,在半径大小为 0.6 mm 处其值最大。而表层最大残余压应力对应的最大的光斑半径为 0.4 mm,由于在此范围内,模型中的最大残余压应力变化不大,符合优化条件的最佳值取为 0.4 mm。

5.3 实验验证

对以上优化参数分别进行激光喷丸的单点及多点喷丸实验。实验采用德国 InnoLas 公司生产的

SpitLight2000 型脉冲 Nd:YAG 固体激光器。激光脉宽 8 ns,激光能量为 1.2 J,光斑直径为 0.8 mm,单次喷丸。多点激光喷丸采用的搭接率分别为 0%,30%,50%,如图 8 所示。采用基恩士国际贸易公司生产的 VK-9700 超高速 3D 镭射显微形貌仪测量单点喷丸及多点喷丸表面变形量,测量发现优化后参数的模拟结果与实验测量结果一致性较好,如图 9 所示。



图 8 激光喷丸试样。(a) 相切; (b) 30% 搭接率; (c) 50% 搭接率

Fig. 8 Samples of laser shot peening. (a) Tangent; (b) 30% overlapping rate; (c) 50% overlapping rate

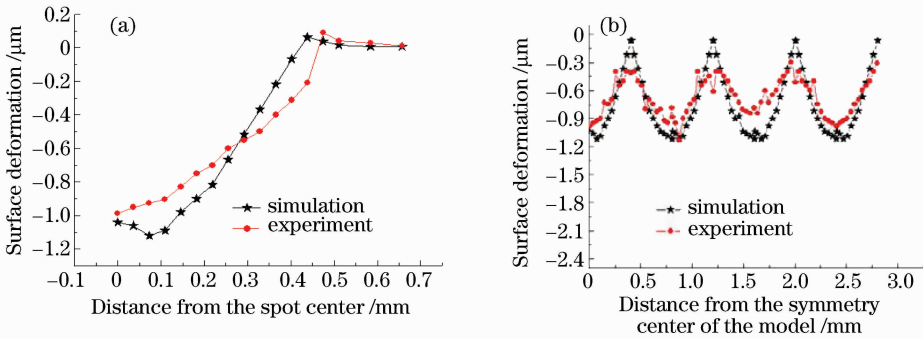


图 9 最优解组合下的表面变形量。(a) 单点; (b) 多点

Fig. 9 Optimal solution combinations of surface deformation. (a) Single shot; (b) multipoint

6 结 论

1) 采用多岛遗传算法得到最优解组合[0.39 mm, 3326.39 MPa],优化后所得最大残余压应力值增幅较大,材料表面的平均残余压应力降低,而深度方向的平均残余压应力有所提高。

2) 通过研究峰值压力、光斑半径、光斑中心距离对残余应力及表面变形的影响,得到最佳的参数取值范围,即光斑在相切时的残余应力分布和表面变形最好。

3) 采用优化参数分别进行激光喷丸的单点及多点喷丸实验,模拟结果与实验测量结果相一致。

参 考 文 献

1 Zhou Jianzhong, Fan Yujie, Huang Shu *et al.*. Research and prospect on micro-scale laser shot peening[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0601003

周建忠,樊玉杰,黄舒等.激光微喷丸强化技术的研究与展望[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0601003

2 Sun Yueqing, Zhou Jianzhong, Liang Qinglei *et al.*. Optimization of laser peening parameters using Taguchi method[J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(4): 377~379

孙月庆,周建忠,梁庆磊等.基于 Taguchi 方法的激光喷丸强化工艺参数的优化研究[J]. *激光技术*, 2008, **32**(4): 377~379

3 Yu Zilan, Gao Chuanyu, Zeng Danyong *et al.*. Study of the surface qualities of laser shock-processing zones using an artificial neural network[J]. *Laser Technology*, 2001, **25**(1): 1~6

於自岚,高传玉,曾单勇等.激光冲击区表面质量的人工神经网络研究[J]. *激光技术*, 2001, **25**(1): 1~6

4 Xiao Guangzong, Long Xingwu, Zhang Bin *et al.*. A novel global optimization method to design laser parameters with artificial neural network and genetic algorithm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1203~1208

肖光宗,龙兴武,张斌等.基于神经网络和遗传算法的激光器参数全局优化方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1203~1208

5 C. Cheng, S. L. He. Optical design for a copper laser system with a maximum power by using a genetic algorithm[J]. *Opt. and Quant. Electron.*, 2001, **33**(1): 83~85

6 C. Cheng, F. Zhuang. Plasma kinetics mechanisms of an

- optimized copper vapor laser[J]. *J. Appl. Phys.*, 2000, **33**(10): 339~341
- 7 Luo Zhigao, Chen Baolei, Pang Chaoli. Application of genetic algorithm to optimization of composition admeasurements for compound material[J]. *J. Engineering Design*, 2009, **16**(5): 326~330
骆志高, 陈保磊, 庞朝利. 遗传算法在复合材料成分优化中的应用[J]. *工程设计学报*, 2009, **16**(5): 326~330
- 8 Mu Shuzhi, Du Chunjiang, Mu Fuyuan *et al.*. Topology optimization of a continuum structure using multi-island genetic algorithm (MIGA)[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2009, **28**(10): 1316~1320
牟淑志, 杜春江, 牟福元等. 基于多岛遗传算法的连续体结构拓扑优化[J]. *机械科学与技术*, 2009, **28**(10): 1316~1320
- 9 Wang Fei, Yao Zhenqiang. Numerical simulation research on laser peening[J]. *Applied Laser*, 2005, **25**(5): 309~312
王飞, 姚振强. 激光冲击强化的数值模拟研究[J]. *应用激光*, 2005, **25**(5): 309~312
- 10 JL. Ocan, M. Morales, C. Molpeceres *et al.*. Numerical simulation of surface deformation and residual stress fields in laser shock processing experiments [J]. *Applied Surface Science*, 2004, **238**: 242~248

栏目编辑：胡冰