

微尺度激光喷丸纯铜数值模拟和统计优化分析

朱 伟 周建忠 黄 舒 樊玉杰 高 彬 范金荣 徐增闯

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 为了保证高质量的微尺度激光喷丸强化(μ LSP),建立了恰当的数值模拟分析模型,并对模拟中的一些关键技术问题进行了研究和处理。通过对比模拟得到的残余应力场表征值与工艺参数计算所得数据,找出了影响微尺度激光喷丸诱导残余应力场的表征值的关键参数。利用基于响应面的 Box-Behnken 优化方法进行实验设计,提取各组激光工艺参数下的残余应力表征值进行数据处理,确定各因素以及相关因素的交互作用对残余应力表征值的影响,建立了激光工艺参数与平均表面残余应力的二次回归模型,并对模型的合理性进行了验证,在此基础上确定了最佳激光工艺参数组合。

关键词 激光技术;微尺度激光喷丸强化;统计优化;数值模拟;残余应力

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.s103005

Study on the Numerical Simulation and Statistical Optimization of Micro-Scale Laser Shock Peening

Zhu Wei Zhou Jianzhong Huang Shu Fan Yujie Gao Bin Fan Jinrong Xu Zengchuang

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

Abstract In order to ensure high quality of micro scale laser shock peening (μ LSP), an appropriate analysis model is established for the numerical simulation of the process, and then some key technical issues in the simulation are studied and solved. By extracting the characteristics of residual stress field and comparing the calculated data with the process parameters, the critical parameters affecting the value of the characteristics of residual stress field induced by μ LSP are searched out. The Box-Behnken optimization program based on the response surface methodology (RSM) is developed to search out the influence of the identified critical parameters and the interaction of the parameters to characteristics of the residual stress field. A quadratic regression model for predicting the average surface residual stress which is one of the characteristics of residual stress field is established, the optimal setting for each process parameter is predicted also.

Key words laser technique; micro-scale laser shock peening; statistical optimization; numerical simulation; residual stress

OCIS codes 140.3390; 220.4000; 220.461

1 引 言

微电子机械系统(MEMS)技术作为重要的军民两用技术,已深刻影响民用和国防等科学技术的发展。随着其研究的不断深入和应用的日益广泛,对小型化产品的功能和可靠性等要求越来越高,从而使得对具有一定形状精度和表面质量的金属微器件的需求日益迫切^[1,2]。近数十年来, MEMS 的设计和制造通过各种各样的方法得以显著的提高,同时 MEMS 的失效和可靠性问题也受到越来越多

的关注^[3,4]。一些 MEMS 器件在运转中承受热和交变循环载荷,例如微引擎和微开关,容易导致变形、断裂、磨损及疲劳失效,因此对微器件的磨损和疲劳性能提出了较高的要求^[5]。微尺度激光喷丸强化(μ LSP)技术为解决微细结构表面的改性延寿提供了一种全新的方法,其是利用高重复频率的能量为微焦到毫焦量级,光斑为微米量级的短脉冲激光束和材料相互作用诱导的冲击波压力进行表面改性的技术,通过强化作用和适度残余应力分布,可大幅

收稿日期: 2011-07-08; **收到修改稿日期**: 2011-09-12

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2009219)、教育部博士点基金(200802990004)和江苏省高校优势学科建设工程资助项目(2010)资助课题。

作者简介: 朱 伟(1987—),男,硕士研究生,主要从事微尺度激光冲击强化方面的研究。E-mail: zw461832110@163.com

导师简介: 周建忠(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事激光表面改性方面的研究。E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)

改善微构件的力学性能,有效改善微器件以及整个MEMS的疲劳寿命,从而提高结构可靠性^[6]。 μ LSP已被证明可以有效地增加金属表面的硬度,提高部件的抗磨损性,在处理表面上产生理想的残余应力分布,提高器件的可靠性^[6,7]。由于其采用的激光光束尺寸在微米量级,和能量吸收层厚度相当,因而与毫米量级宏观激光喷丸强化(LSP)技术在诸多方面存在不同。目前,国内外对于微尺度激光喷丸强化已有一些研究,但对于该过程的统计优化分析却较为缺乏。

本文建立了微尺度激光喷丸强化的有限元分析模型,讨论并处理了有限元模拟过程中的关键技术。基于Abaqus有限元分析平台,设计了有限元模拟的实施流程并进行分析,比较激光微喷丸诱导的残余应力各表征值与工艺参数之间的关系,得到关键影响因素。基于响应面法技术,采用Box-Behnken实验设计方案研究各因素以及相关因素的交互作用对残余应力表征值的影响,建立了激光工艺参数与平均表面残余应力的二次回归模型,并通过实验数据检验了模型的合理性,在此基础上确定最佳激光工艺参数组合,为微尺度激光喷丸强化过程的有效实施和残余应力控制提供指导。

2 有限元分析

2.1 有限元模型及前处理

针对微尺度激光喷丸强化过程的实际情况,采用大型有限元分析软件Abaqus对微尺度激光喷丸铜箔的应力应变进行分析计算。由于微尺度激光喷丸强化过程的实际工况条件较为复杂,因此必须对有限元模型以及模拟过程中的关键技术做适当处理。其有限元分析过程如图1所示。整个有限元模拟过程可分为两个模块:Abaqus/Explicit和Abaqus/Standard。Abaqus/Explicit是一个动态分

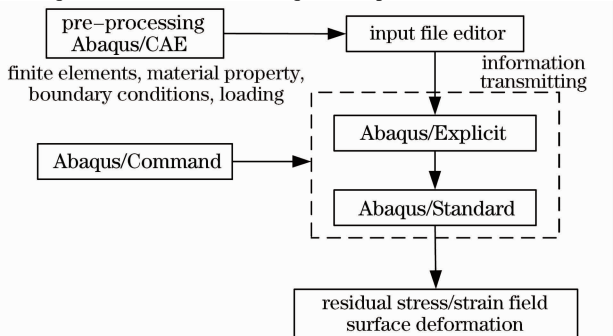


图1 Abaqus的典型分析过程

Fig. 1 Analysis process of Abaqus program

析模块,用于模拟 μ LSP诱导的激光冲击波加载过程和材料中产生的动态响应。Abaqus/Standard是一个通用分析模块,可进行静态隐式分析,决定所产生的残余应力状态。在Abaqus/Explicit进行动态分析至塑性变形结束时,生成一个包含应力、应变和位移数据的重启动文件。然后,利用Abaqus/Standard读入上述重启动文件进行独立的静态隐式分析,最终得到静平衡的残余应力场。

有限元分析中所使用的模型尺寸为 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm} \times 0.05\text{ mm}$,为了使有限元计算收敛并得到准确的结果,使用了特殊的网格划分形式,有限元模型的网格划分如图2所示。激光喷丸区域位于模型上表面的中心处,对单点激光喷丸区域进行网格细化。同时,将模型平分为上下两块,厚度方向采用偏置法划分网格,网格由密变疏。模型的四侧和底面设置为无反射边界,防止应力波在边界处反射,以模拟半无限实体。

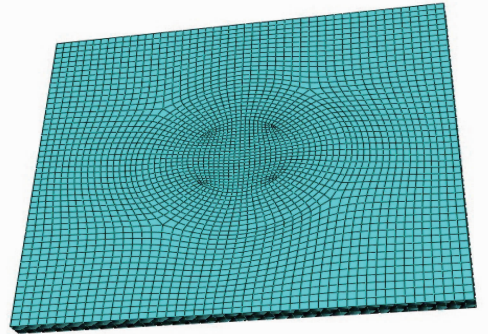


图2 有限元模型网格

Fig. 2 Meshing of the model

2.2 冲击波压力载荷

考虑到激光能量非均匀的时间和空间分布,激光诱导的冲击波压力表示为^[8]

$$P(r,t) = P_{\max} A(t) \exp\left(-\frac{r^2}{2R^2}\right), \quad (1)$$

式中 $A(t)$ 为冲击波压力的幅值率,如图3所示; r 为一点到激光光斑中心的距离; R 为激光光斑半径;

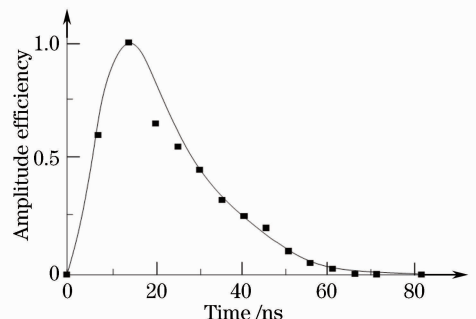


图3 激光冲击波压力的幅值率曲线

Fig. 3 Pressure amplitude profile of shock wave

P_{\max} 为激光冲击波的峰值压力,它与入射激光的功率密度平方根成正比,可表示为^[9]

$$P_{\max} = \sqrt{\frac{A(\gamma-1)I_0 Z_{t_0} Z_{c_0} \rho}{(2\gamma-1)(K_0 Z_{c_0} + K_c Z_{t_0})}} \quad (2)$$

2.3 材料属性

模拟所选用的材料为厚度 50 μm 的纯铜薄膜。考虑到应变率和硬化的影响,设定材料为各向同性,塑性应变服从 Von Mises 屈服准则,纯铜薄膜的材料性能见表 1。

表 1 纯铜的力学性能参数

Table 1 Mechanical properties of pure copper

Material	$\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	ν	E / GPa	$\sigma_{0.2} / \text{MPa}$	σ_b / MPa
Pure Cu	8960	0.343	110	172	196

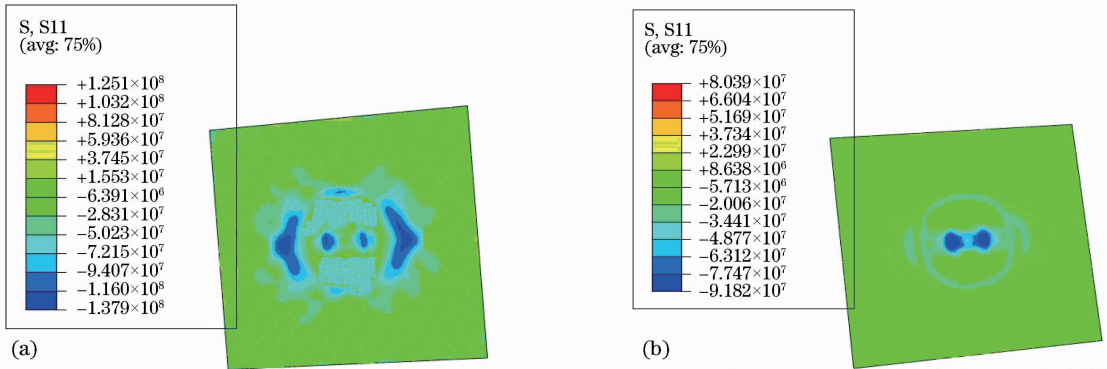


图 4 单点微尺度激光喷丸应力分布云图(光斑直径:250 μm ,峰值压力:2.5 GPa,喷丸次数:1次)。

(a) 表面 S11 动态应力分布; (b) 表面 S11 静态残余应力分布

Fig. 4 Contour of the residual stress distribution (spot diameter of 250 μm , peak pressure of 2.5 GPa, single pulse).

(a) S11 residual stress from dynamic analysis; (b) S11 residual stress from static analysis

图 5 所示为典型的残余应力沿板料表面光斑直径方向和距表面一定深度处的径向 S11 应力分布图,模拟结果表明残余压应力在光斑中心处较小而残余应力的最大值出现在距离光斑中心一定距离的地方,如图 5(a)所示。这是因为利用圆形光斑喷丸

试样时,喷丸区边缘会产生如 Rayleigh 波和切变应力波塑性应变,从而降低了此处的残余压应力值,而对微尺度激光喷丸来说,所采用的光斑尺寸在微米量级,所以这种现象非常明显。提取在表面残余压应力达到最大值处沿深度方向上的残余应力分布,

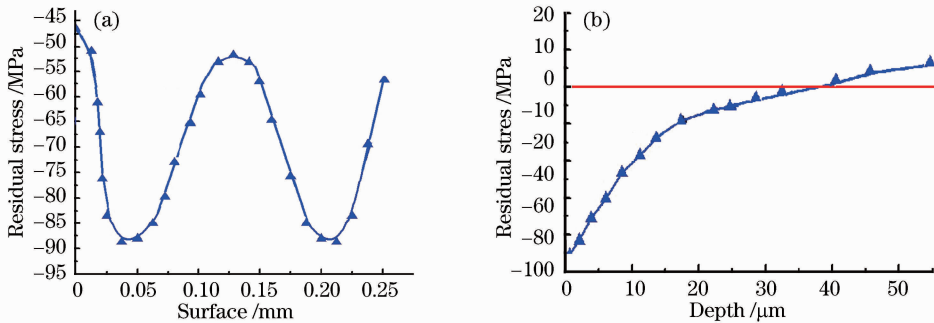


图 5 单点微尺度激光喷丸诱导的残余应力(光斑直径:250 μm ,峰值压力:2.5 GPa,喷丸次数:1次)。

(a) 沿表面光斑直径方向; (b) 沿深度方向

Fig. 5 Typical residual stress distribution (spot diameter of 250 μm , peak pressure of 2.5 GPa, single pulse).

(a) S11 radial stress on the surface; (b) S11 stress along the depth

如图 5(b)所示,残余压应力随着离表面距离的增加而逐渐减小,单次喷丸后的残余压应力影响层深度保持在 $38.5 \mu\text{m}$ 左右,这与后面的实验结果非常相近。

3 实验验证

图 6 是所用激光光斑直径为 $250 \mu\text{m}$,能量为 60 mJ ,光斑相切,无能量吸收层,K9 玻璃做约束层时喷丸后 VHX-600 超景深 3D 显微系统测量得到的形貌[图 6(a)]以及相应有限元分析(FEM)结果[图 6(b)]。图 6(a)是单个喷丸点放大后的轮廓图,取两条绿线之间的区域,显微系统软件自动测量区域内每个点的表面位移并计算平均值,由右边的测量结果可知平均值为 $36.5 \mu\text{m}$,即微喷丸点处的凹

陷深度为 $36.5 \mu\text{m}$;两条蓝线之间的宽度大约为激光光斑的直径长度,同样由图 6(a)中的测量结果可知这段距离为 $261.2 \mu\text{m}$,接近于 $250 \mu\text{m}$,与实验参数吻合;由图同样可知微尺度激光喷丸引起的塑性变形区域要大于光斑直径。图 6(b)是应用同样的激光参数(即经计算得到的 60 mJ 对应峰值压力 4 GPa ,光斑直径 $250 \mu\text{m}$,单次喷丸)经 Abaqus 动、静态分析得到的表面位移云图,由于模型尺寸相对于光斑直径不是很大,由图可知微尺度激光喷丸作用范围波及整个试样,大于光斑直径,与实验结果一致;图中光斑中心处大部分为深蓝色,同时由左上角表中的相应数值可以发现表面位移集中在 $31.25 \sim 39.01 \mu\text{m}$ 之间,其平均值一定在 $30 \sim 40 \mu\text{m}$ 之间,与实验结果非常吻合。

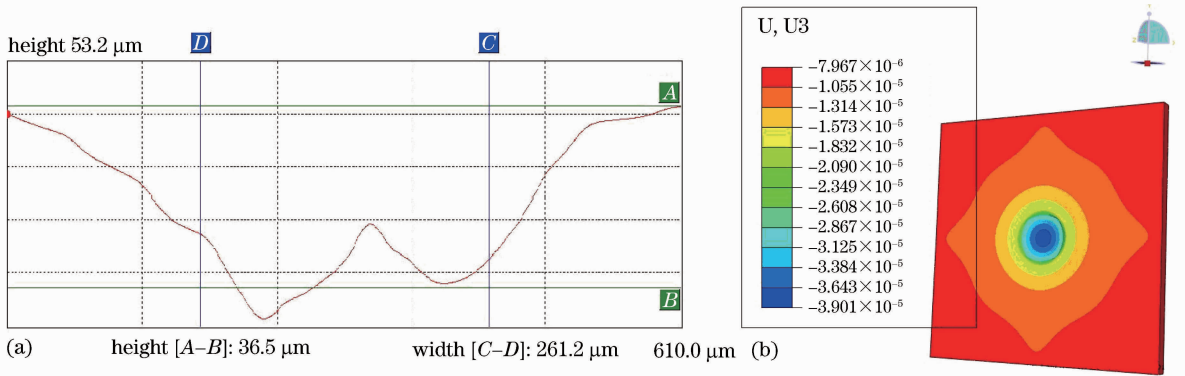


图 6 单点微尺度激光喷丸产生的表面形貌(光斑直径: $250 \mu\text{m}$, 峰值压力: 2.5 GPa , 喷丸次数: 1 次)。

(a) VHX-600 测量结果 3D; (b) FEM 分析结果

Fig. 6 Deformation by μLSP (Spot diameter of $250 \mu\text{m}$, peak pressure of 2.5 GPa , single pulse).

(a) 3D morphology by VHX-600; (b) surface displacement contour by FEM

4 微尺度激光喷丸强化效果统计分析

根据已有实验及对微尺度激光喷丸强化工艺的数值模拟研究,微尺度激光喷丸能量密度 A 、光斑直径 B 及喷丸次数 C 这三个因素是影响喷丸强化效果的重要因素,因此以这三个因素为自变量,分别设为 X_1, X_2, X_3 。以微尺度激光喷丸后板料表面残余压应力平均值 σ_s^{rc} ,残余压应力最大值 $\sigma_{\text{max}}^{\text{rc}}$,残余压应力影响层深度 δ_{rc} 作为响应值,分别设为 Y_1, Y_2, Y_3 。模拟采用的激光光斑范围为 $200 \sim 300 \mu\text{m}$,喷丸最

大次数为 3 次。根据 Box-Behnken 的中心组合实验设计原理,设计三因素三水平的实验,每个因素取三个水平,以 $(-1, 0, 1)$ 编码,括号中的编码分别表示自变量的低、中、高三个水平,按方程 $X_i = (x_i - x_0) / \Delta x$ 对自变量进行编码。其中 X_i 为自变量的编码值, x_i 为自变量的真实值, x_0 为实验中心点处自变量的真实值, Δx 为自变量的变化步长。因素水平及编码见表 2。

表 2 实验因素水平及编码

Table 2 Experimental factors levels and codes

Factor	Coding		Level		
	Code value	Real value	-1	0	1
$A / (\text{GW}/\text{cm}^2)$	X_1	x_1	1.5	2	2.5
B / mm	X_2	x_2	0.20	0.25	0.30
C / n	X_3	x_3	1	2	3

以单点微尺度激光喷丸后的纯铜薄膜(1 mm×1 mm×0.05 mm)为研究对象,从数值模拟结果中提取不同激光工艺参数下的上述响应值作为统计分析的处理样本,表 3 为经 Box-Behnken 法设计出的

微尺度激光喷丸模拟实验组合及模拟结果,实验共分 15 组,其中 12 个为析因点,3 个为零点,零点实验重复 3 次,用以估计实验误差。由于模拟结果有很好的 consistency,其响应值相同。

表 3 残余压应力场特征参数模拟结果

Table 3 Simulation results of characteristic parameters of residual stress field

Experimental number	Factor			Residual stress characteristic		
	X_1	X_2	X_3	$\sigma_s^{rc}(Y_1) / \text{MPa}$	$\sigma_{\max}^{rc}(Y_2) / \text{MPa}$	$\delta_{rc}(Y_3) / \mu\text{m}$
1	-1	-1	0	-94.62	-114.82	32.5
2	-1	1	0	-86.23	-103.11	25.5
3	1	-1	0	-102.3	-123.53	33.2
4	1	1	0	-112.80	-125.91	14.1
5	0	-1	-1	-78.45	-108.00	40.5
6	0	-1	1	-81.69	-95.21	32.0
7	0	1	-1	-81.52	-102.42	35.1
8	0	1	1	-51.82	-116.32	19.2
9	-1	0	-1	-54.53	-77.12	42.8
10	1	0	-1	-68.41	-91.82	38.5
11	-1	0	1	-55.40	-91.11	32.5
12	1	0	1	-42.91	-144.91	33.4
13	0	0	0	-67.74	-95.62	30.0
14	0	0	0	-67.74	-95.62	30.0
15	0	0	0	-67.74	-95.62	30.0

为了评价各参数对残余应力的影响,根据表 3 中的实验结果分析各因素对响应值的影响水平,首先进行单因素分析,单因素作用下响应值的二维水平图如图 7 所示。由图可知,表面残余压应力平均值 Y_1 随着微喷丸能量密度 X_1 增大而增大;在

(-1,0)水平区间随着光斑直径 X_2 增大表面残余压应力平均值 Y_1 相应减小,但在(0,1)水平区间呈相反作用,这是其他两个量同时变化影响的结果;表面残余压应力平均值 Y_1 先是随着微尺度激光喷丸次数 X_3 增大而增加,达到最大值后逐渐减小。

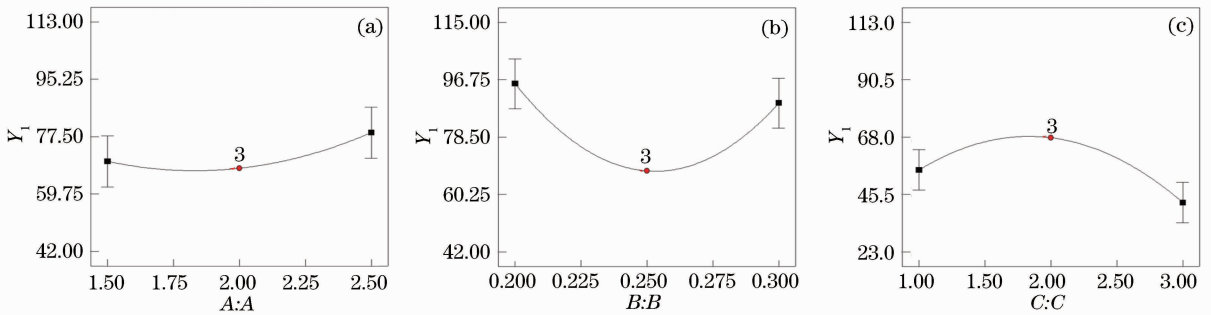


图 7 单因素作用下响应值的二维水平图

Fig. 7 2D level pictures of response value under single-factor

通过 Design Expert 得到二次回归模型为

$$Y_1 = 67.74 + 4.45A - 3.09B - 6.39C + 1.72AB - 6.59AC - 8.23BC + 6.60A^2 + 24.65B^2 - 1.902C^2, \quad (3)$$

根据上面的二次回归模型,由软件拟合出每两个因素对表面平均残余应力的响应面 3D 图和等高线分

析图如图 8 所示。

从响应面的最高点和等值线可以看出,在所选范围内存在极值,该点既是响应面的最高点,同时又是等值线最小椭圆的中心点。图 8(b)和(c)表明, A 和 C、B 和 C 的交互作用不大,从图 8(a)可以看出, A 和 B 的交互作用较强,编码值较大的 A 和 B 使得响应值有

增大的趋势,而 A 对其影响更为明显。由 Design Expert 分析对参数进行优化,得到最大响应值 Y_1 对应的微尺度激光喷丸强化工艺参数最优组合为:微尺

度激光喷丸能量密度 $A(X_1)$ 2.5 GW/cm^2 、光斑直径 $B(X_2)$ $300 \mu\text{m}$ 及喷丸次数 $C(X_3)$ 1 次,此时回归模型预测的表面残余压应力平均值 Y_1 为 111 MPa 。

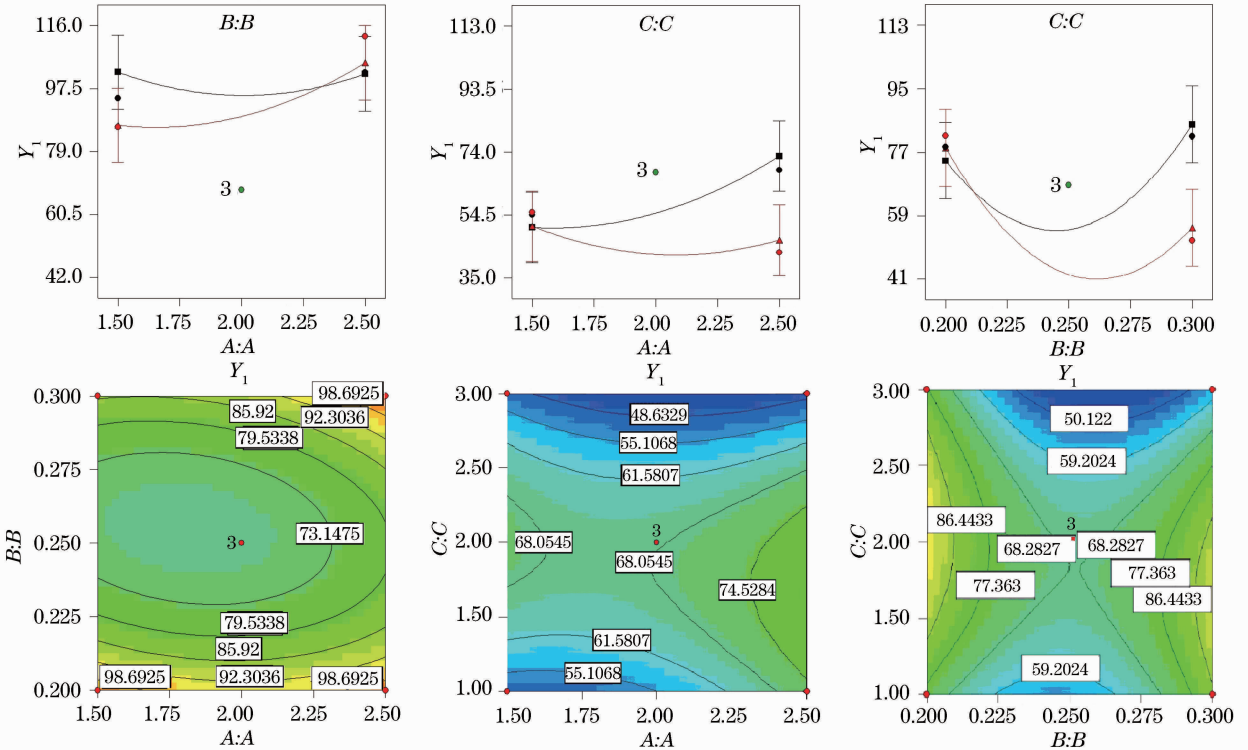


图 8 Y_1 响应面及等高线分析图。(a) X_1, X_2 对 Y_1 的交互作用; (b) X_1, X_3 对 Y_1 的交互作用; (c) X_2, X_3 对 Y_1 的交互作用

Fig. 8 Y_1 response contour graph. (a) Interaction of X_1 and X_2 with Y_1 ; (b) interaction of X_1 and X_3 with Y_1 ; (c) interaction of X_2 and X_3 with Y_1

为检验响应面分析法的可行性,采用得到的最优参数组合进行模拟实验。考虑到各因素的实际控制水平,以微尺度激光喷丸能量密度 $A(X_1)$ 2.5 GW/cm^2 、光斑直径 $B(X_2)$ $300 \mu\text{m}$ 及喷丸次数 $C(X_3)$ 1 次作为实际实验的最佳组合。模拟与实验结果的一致性良好,因此,响应面分析得到的预测模型是显著的,采用响应面方法对微尺度激光喷丸强化表面残余压应力平均值预测的参数优化是可行的,对实际操作具有一定的指导意义。

计方法进行实验设计,提取各组激光工艺参数下的残余应力表征值进行数据处理,确定各因素以及相关因素的交互作用对残余应力表征值的影响,建立了激光工艺参数与平均表面残余应力的二次回归模型,并通过实验数据对模型的合理性进行了验证。根据回归模型拟合两个因素对表面平均残余应力的响应面图,在此基础上确定了最佳激光工艺参数组合:微尺度激光喷丸能量密度 $A(X_1)$ 2.5 GW/cm^2 、光斑直径 $B(X_2)$ $300 \mu\text{m}$ 及喷丸次数 $C(X_3)$ 1 次。

5 结 论

在有限元分析理论的基础上,利用 Abaqus 软件建立微尺度激光喷丸效果的预测模型。对于铜薄膜试样,通过数值模拟研究了 μLSP 诱导的残余应力分布,得到峰值压力 2.5 GPa ,光斑直径 $250 \mu\text{m}$ 时单次冲击下的最大残余压应力值为 -91.82 MPa ,残余压应力影响层深度为 $38.5 \mu\text{m}$,与实验结果非常吻合。模拟时使用 Design Expert 软件中的 Box-Behnken 设

参 考 文 献

- 1 Peng Linfa, Lai Xinmin, Lee HyeJin *et al.*. Friction behavior modeling and analysis in micro/meso scale metal forming process [J]. *Materials and Design*, 2010, **31**(2): 1953~1961
- 2 Y. Nakamaru, H. Honma. Fabrication of three-dimensional microstructure by nickel plating and photolithography [J]. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 2009, **87**(5): 259~263
- 3 S. W. Han, H. W. Lee, H. J. Lee *et al.*. Mechanical properties of Au thin film for application in MEMS/NEMS using microtensile test [J]. *Current Appl. Phys.*, 2006, **6** (s1): 81~85

- 4 Ta-Hsuan Lin, Stephen Paul, Susan Lu *et al.*. A study on the performance and reliability of magnetostatic actuated RF MEMS switches[J]. *Microelectron. Reliab.*, 2009, **49**(1): 59~65
- 5 Y. Lawrence Yao, Wenwu Zhang, Hongqiang Chen. Advances in micro-scale laser peening technology[C]. ICFDM'2002, **1**: 6~12
- 6 Zhou Jianzhong, Fan Yujie, Huang Shu *et al.*. Research and prospect on micro-scale laser shot peenong [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
- 7 H. Chen, Y. L. Yao, J. W. Kysar. Spatially resolved characterization of residual stress induced by micro scale laser shock peening[J]. *Manuf. Sci. Engng.*, 2004, **126**(2): 226~236
- 8 H. Chen, J. W. Kysar, Y. L. Yao. Characterization of plastic deformation induced by micro scale laser shock peening[J]. *J. Appl. Mech.*, 2004, **71**(5): 713~723
- 9 Zhou Jianzhong, Zhang Yongkang, Zhou Ming *et al.*. Theoretical analysis on deformation of sheet metal under one laser shot loading[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 135~138
周建忠, 张永康, 周 明等. 单次激光冲击下板料变形的理论分析[J]. 中国激光, 2005, **32**(1): 135~138
- 10 W. W. Zhang, Y. L. Yao. Microscale laser shock processing: modeling, testing and microstructure characterization [J]. *J. Manufacturing Processes*, 2002, **3**(2): 128~143

栏目编辑: 胡 冰