

# 激光喷丸成形多尺度有限元模拟技术

闫家阳<sup>1</sup>,王永军<sup>1</sup>,王俊彪<sup>1</sup>,高国强<sup>1,2</sup>,王强<sup>3</sup>

(1. 西北工业大学机电学院,西安 710072;

2. 航空工业西安飞机工业(集团)有限责任公司,西安 710089;

3. 中国航发北京航空材料研究院,北京 100095)

**[摘要]** 激光喷丸技术是一种先进的金属塑性成形和表面强化技术,相比于弹丸喷丸,激光喷丸能量密度更大,因而成形能力更强,可以用于成形刚度更大的钣金件,如飞机整体壁板,在航空航天领域有广泛的应用前景。构建一种多尺度激光喷丸成形模拟方法,包括激光喷丸诱导应力场的计算方法和基于直接应力法的工件成形曲率的预测方法。预测结果通过 2024-T351 铝合金块状试件和典型截面单筋件激光喷丸试验得到了验证,试验结果与模拟结果吻合较好,表明此模拟方法有效可行。

**关键词:** 激光喷丸成形;多尺度方法;有限元模拟;整体壁板

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2020.12.053



闫家阳

博士研究生,主要研究方向为激光喷丸成形理论与技术应用。

激光喷丸原理与弹丸喷丸类似,但物理过程有所不同。一般来说,工件受喷表面上需要涂覆一层吸能材料(如黑漆、黑色胶布),用以吸收脉冲激光的能量。吸收层材料吸收激光能量后,在数纳秒的时间内气化为等离子体并发生爆炸。爆炸冲击波作用于工件表面,表层的金属材料发生塑性变形并留下残余应力。在激光喷丸的物理过程中没有实体弹丸,等离子体爆炸起到了弹丸冲击的效果。为增大冲击压力,通常还需要在吸收层之外施以一层透明介质作为约束层(通常为水流)。激光喷丸的原理如图 1 所示。

与弹丸喷丸相比,激光喷丸具有高度的可控性,每次冲击的能量密度和点位坐标可以精确确定,因此容易实现精确控形;通过合理设计喷丸

点阵,还可以在在一定程度上省去预应力工序,节省人力物力;此外,由于点位排布更加均匀,残余应力场也更加均匀,如图 2 所示。

有关激光喷丸残余应力场的有限元模拟,1998 年美国 Braisted 等<sup>[1]</sup>利用有限元法对圆形光斑激光喷丸残余应力在深度方向和表面半径方向残余应力分布情况进行了分析;周建忠等<sup>[2-6]</sup>对 Fabbro 提出的冲击压力计算模型进行了改进,并在 Abaqus 平台上进行了有限元模拟;2007 年 Wang 等<sup>[7]</sup>对有约束条件下薄板激光喷丸残余应力场进行了模拟,发现此时应力波会在板料上下界面之间发生复杂的反射。近年来,有关激光喷丸成形的研究多集中在不同工艺参数对变形效果的影响上,如激光能量密度<sup>[8]</sup>、板料厚度<sup>[8-9]</sup>、光斑搭接

率<sup>[10]</sup>、喷丸轨迹<sup>[11]</sup>等因素。2014年Ding等研究了激光能量对板料弯折角度的影响,发现当板料厚度一定时,随着激光功率密度增大,板料弯折角度先增大后减小,之后变为反向弯曲;Pence等<sup>[9]</sup>则研究了激光参数不变时,板料厚度对弯折角度的影响,发现了随着板料厚度减小,折弯角度也会先增大后减小最后变为反向,而现有对于具有复杂曲率和复杂结构的壁板成形则关注较少。本研究在总结前人研究的基础上,探索出一种可应用于某飞机壁板的多尺度有限元模拟方法,以及一种板料目标曲率驱动的激光喷丸点阵设计方法,并通过试验研究证实了本模拟方法的可行性。

### 多尺度模拟方法

在利用有限元法模拟激光喷丸诱导应力场时,往往需要对单个冲击点或较少个冲击点组成的点阵进行建模,模型尺度在 $10^0\sim 10^1\text{mm}$ 级,单元尺寸在 $10^{-2}\sim 10^{-3}\text{mm}$ 级;但是对于尺寸较大( $10^3\sim 10^4\text{mm}$ 级)的典型件甚至实际生产中的壁板件,若仍采用 $10^{-2}\text{mm}$ 级的单元划分,同时考虑到巨大的激光冲击点数,计算成本将是难以接受的。因此,在模拟整体壁板激光喷丸成形时,需要采取多尺度的模拟方法,即通过代表性体积单元对较少个喷丸点形成的诱导应力场进行模拟,分析其诱导应力场的特征,计算出平均诱导应力;再将平均诱

导应力直接赋予壁板的变质层区域,计算分析工件的变形情况。计算流程如图3和图4所示。

此过程中主要用到两种有限元模型:一种是用于计算诱导应力的实体模型(代表体积单元),往往包含单个或少数个喷丸点,如图5(a)所示为1/4模型。所谓诱导应力,指的是喷丸处理后,材料发生弹塑性变形但未发生弹性回复时的应力状态,与残余应力不同,残余应力是指材料发生弹性回复后的残余的应力状态。在没有约束的自由状态下,弹性回复是即刻发生的,只有在材料受到充分约束时,才能产生诱导应力。在激光喷丸成形有限元分析中,结合使用有限元和无限元网格,相当于构造了一个半无限体,无限元网格节点无法发生法向位移,起到了对内部材料的约束作用,避免了材料发生回弹变形,采用Abaqus/Explicit求解器,可以计算得到激光冲击后材料内部产生的诱导应力分布情况;另一种是用于计算板料整体变形情况的壳单元计算模型,图5(b)将代表体积单元模型计算得到的诱导应力通过Fortran子程序导入喷丸区域表面的塑性变形层中,采用Abaqus/Standard求解器,只进行回弹计算,计算得到板料激光喷丸的变形情况。

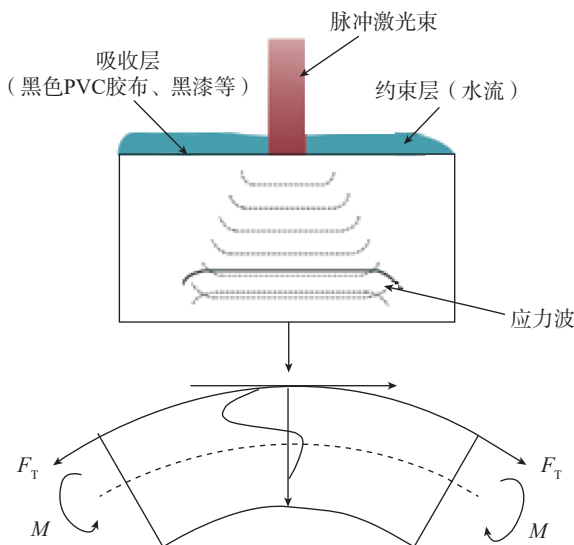


图1 激光喷丸原理  
Fig.1 Principle of LSP

### 冲击压力模型

圆形光斑区域内任何一点的冲击压力 $P$ 可以表示为该点至光斑中

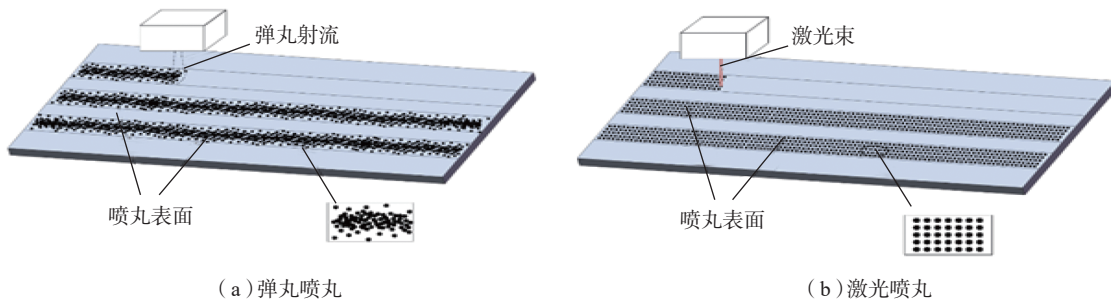


图2 弹丸喷丸与激光喷丸比较  
Fig.2 Comparison of shot peening and laser shock peening

心的距离  $\rho$ 、冲击时间  $\tau$  和冲击压力峰值  $P_0$  的函数。

$$P(\rho, \tau, P_0) = P_0 \cdot p(\rho) \cdot p(\tau) \quad (1)$$

式中,  $p(\rho)$  表示冲击力幅值在径向和时间上的分布规律, 量纲是 1。

可以认为冲击压力在径向上满

足正态分布, 即<sup>[12]</sup>

$$p(\rho) = \exp\left(-\frac{\rho}{2\rho_0^2}\right) \quad (2)$$

式中,  $\rho_0$  为圆形光斑的半径, 冲击压力随时间变化的波形通常如图 6<sup>[13]</sup> 所示。

$P_0$  表示冲击压力峰值, 可以表示为激光功率密度  $I$  的函数, 即

$$P_0 = K\sqrt{I} \quad (3)$$

$K$  是与约束层材料、吸收层材料、靶材材料、激光波长等多种参数相关的复合参数, 根据 Fabbro 等的

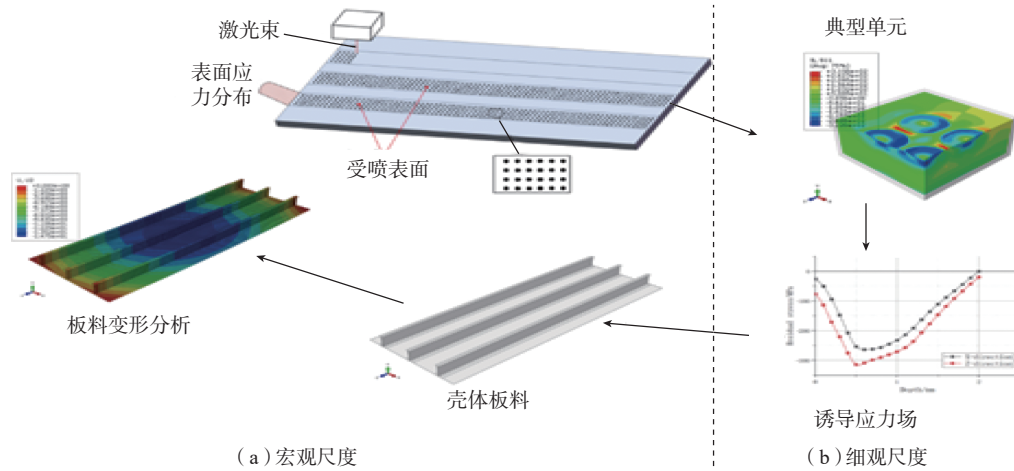


图3 激光喷丸成形多尺度研究方法示意图  
Fig.3 Multiscale research method of LPF

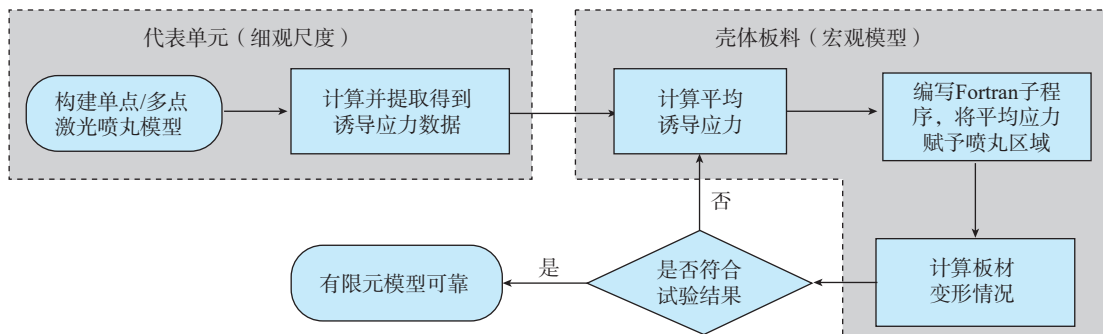


图4 激光喷丸成形有限元模拟研究流程  
Fig.4 Flow chart of research of LPF

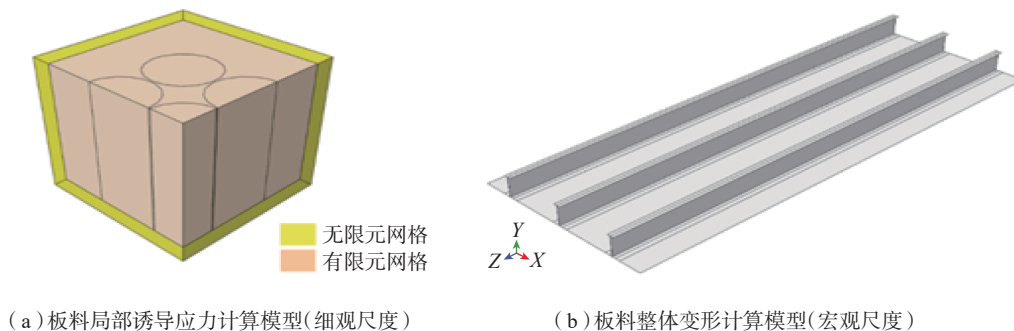


图5 两种尺度的有限元模型

Fig.5 Samples of two dimensions of FEM model

研究成果<sup>[14]</sup>:

$$K = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{\alpha+3}} \sqrt{Z} \quad (4)$$

式中,  $\alpha$  为内能转化为热能的比例系数,  $Z$  为冲击波在约束层和靶材之间传播的复阻抗, 由冲击波在约束层中传播的阻抗  $Z_c$  和冲击波在靶材中传播的阻抗  $Z_t$  共同确定:

$$\frac{2}{Z} = \frac{2}{Z_c} + \frac{2}{Z_t} \quad (5)$$

在工程应用中,  $K$  根据实际工况取固定值。当靶材为铝合金、吸收层为黑色 PVC 胶带、约束层为水流时,  $K=1.375$ 。

在激光喷丸过程中, 材料应变速率可达到, 此时通常用 Johnson-Cook 本构模型描述材料的动态屈服行为, 其流动应力计算公式如下:

$$\bar{\sigma} = \left[ A + B(\bar{\epsilon}^{pl})^n \right] \left[ 1 + C \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0}\right) \right] \quad (6)$$

式中,  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $n$  为材料参数,  $\bar{\epsilon}^{pl}$  为等效塑性应变,  $\dot{\epsilon}^{pl}$  为塑性应变率,  $\dot{\epsilon}_0$  为参考应变率。

## 试验设计

### 1 激光冲击试验与残余应力测量

为验证残余应力有限元计算结果, 利用 2024-T351 铝合金设计并进行了一系列激光冲击和残余应力测量试验。将 50mm 厚铝合金板材切割为 100mm×100mm 尺寸的正方形试件, 在每个试件中心 30mm×30mm 的区域内进行激光喷丸处理, 激光喷丸处理后的试件如图 7 所示。采用块状试件, 且只在试件中心较小区域进行激光冲击处理, 原因在于构建一种接近半无限体的试验条件, 尽可能约束材料的弹性回复, 使材料内部的残余应力场接近诱导应力, 这样测量得到的残余应力可以近似认为是诱导应力。

以激光能量、激光光斑直径、激光喷丸次数和光斑搭接率为参数设

计试验, 试验编号及参数如表 1 所示。其中编号 0、50 表示不同的搭接率, 搭接率表示两个相邻光斑之间重叠部分的比率, 如图 8 所示, 搭接率  $v$  可按式 (7) 计算。故 0 搭接率表示光斑之间为相切的关系, 50% 搭接率表示光斑

圆心间距等于光斑半径。

$$v = \frac{A}{D} \quad (7)$$

残余应力测试试验设备为 PROTOLXRD 型 X 射线衍射应力测试仪, 靶材为 Cr 靶, 准直管尺寸为

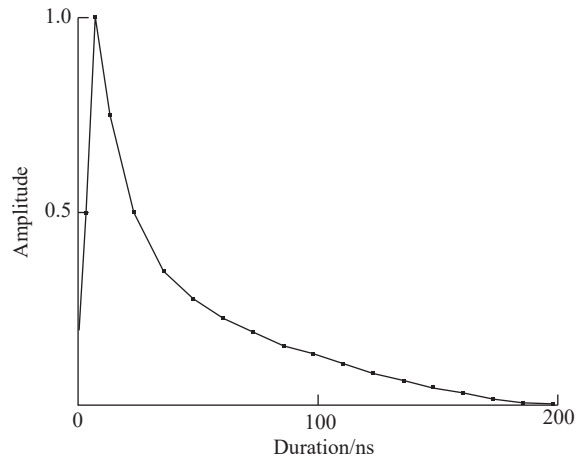


图6 激光冲击压力随时间变化曲线  
Fig.6 Pressure-time curve



图7 激光喷丸处理后试件  
Fig.7 A laser-treated test piece

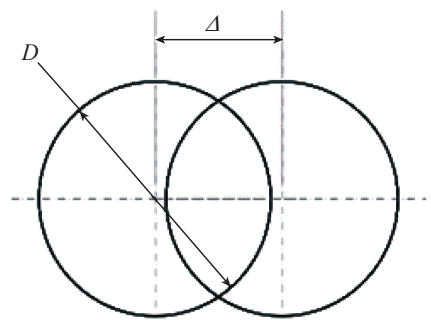


图8 搭接率定义  
Fig.8 Definition of overlapping ratio

表1 激光喷丸试验参数设置  
Table1 Parameters of LPF experiments

试验编号	激光喷丸工艺参数			
	激光能量 / J	冲击次数 / 次	光斑直径 / mm	搭接率 / %
0-1	2	1	1	0
0-2	2	2	2	0
0-3	4	2	2	0
50-1	2	1	1	50
50-2	2	2	2	50
50-3	4	2	2	50

$\Phi 2$ 。通过 PROTO 8818-V3 型电解抛光机进行电解腐蚀剥层,以测量深度方向的应力分布情况,电解质为饱和 NaCl 溶液。通过控制电解电压和电解液流速,可以获得光亮整洁的表

面,以保证测量结果的准确性。

图 9 为 6 组试验和模拟的应力值随深度变化情况,可以看出测量结果与模拟结果基本一致,这表明诱导应力的有限元计算结果是比较可靠

的。通过多项式拟合,可以在一定程度上消除测量值的波动,得到一个统计意义上的应力分布曲线及其置信区间。模拟值基本分布在 95% 置信区间内,表明有 95% 把握可以认为

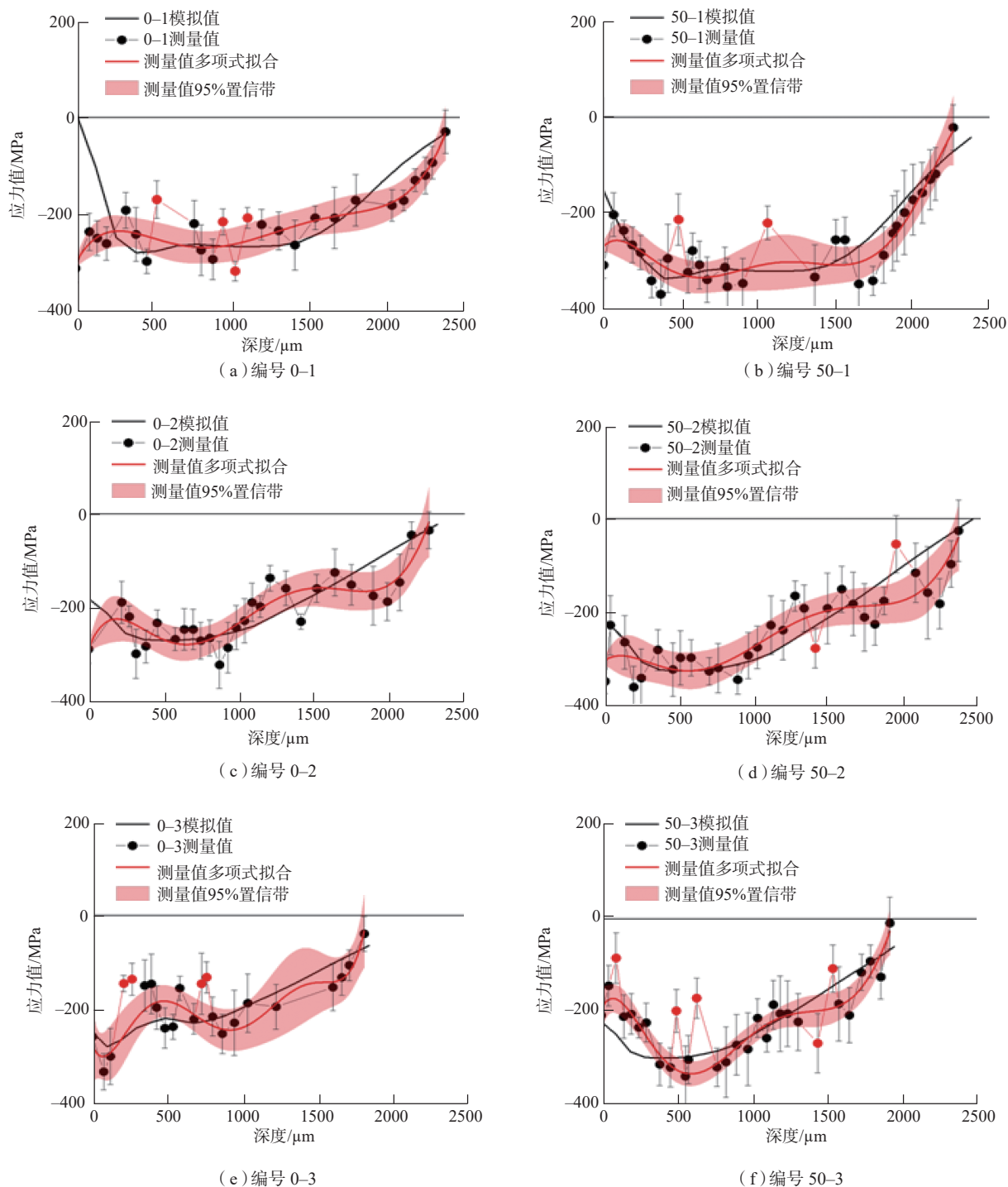


图9 激光喷丸残余应力测量结果与模拟结果

Fig.9 Measured and simulated results of residual stresses

模拟值和测量值具有一致性。

对比曲线可以看出,随着搭接率增大,总体上应力值也增大,但应力层深度变化不大。实测值与模拟值在深度为 500~1800 $\mu\text{m}$  范围内基本保持一致,但是在 0~500 $\mu\text{m}$  范围内和大于 2000 $\mu\text{m}$  时偏差较大。在表面处,由于材料晶粒极度细化,测量值误差较小,相对误差通常在 10% 以内,可以认为测量值是准确的,因此可以判断,在这一范围内模拟结果不够准确;而在大于 2000 $\mu\text{m}$  的区域,由于试验中电解腐蚀表面会逐渐成为一个曲面且曲率越来越大,这将导致测量误差增大,同时此时应力值较小,相对误差很大,也将导致测量值和模拟值的偏离。通过多项式拟合,可以在一定程度上消除测量值的波动,得到一个统计意义上的应力分布曲线及其置信区间。

布曲线及其置信区间。

## 2 单筋件激光喷丸成形试验

基于对激光喷丸应力场的分析,对工字形截面 2024-T351 铝合金单筋件也进行了激光喷丸成形试验,单筋件长度为 1200mm。根据其结构特征,在不同的区域采用了不同的工艺参数组合,如图 10 所示,以实现精确控形,确保变形协调。蒙皮区激光能量为 6J,光斑直径 2mm,脉冲宽度 10ns,冲击次数为 4 次;加厚区激光能量为 6J,光斑直径 1mm,脉冲宽度 10ns,冲击次数为 4 次。弦向光斑搭接率为 50%,展向光斑间距为 3.6mm。喷丸处理后使用数显半径规测量工件曲率半径,半径规由固定长度 300mm 的跨距和分度值 0.02mm 的百分表组成。

通过直接应力法对工字形截面单筋件进行了成形模拟,试验和模拟结果如图 11 所示,模拟计算得到的工字形截面单筋件最大挠度为 13.09mm,计算其曲率半径为 13.85m;试验测量得到的曲率半径为 13.5m,比较接近。

## 结论

本文基于多尺度的模拟思想,建立了一种壁板件激光喷丸成形有限元模拟方法,并通过试验证明了此方法可行可靠,可以为实际生产工艺规划提供参考。

## 参考文献

- [1] BRAISTED W R, BROCKMAN R A. Finite element simulation of laser shock peening[J]. International Journal of Fatigue, 1999, 21(7): 719-724.
- [2] 杜建钧, 周建忠, 杨超君, 等. ABAQUS 在板料激光喷丸成形模拟过程中的应用 [J]. 应用激光, 2005, 25(6): 371-373.  
DU Jianjun, ZHOU Jianzhong, YANG Chaojun, et al. Application of ABAQUS in simulation process of laser peening forming of sheet metal[J]. Applied Laser, 2005, 25(6): 371-373.
- [3] 杜建钧, 周建忠, 杨超君, 等. 基于 ABAQUS 的激光喷丸成形数值模拟 [C]// 第十七届全国激光学术会议论文集. 绵阳, 2005: 427-430.  
DU Jianjun, ZHOU Jianzhong, YANG Chaojun, et al. Laser peening forming numerical

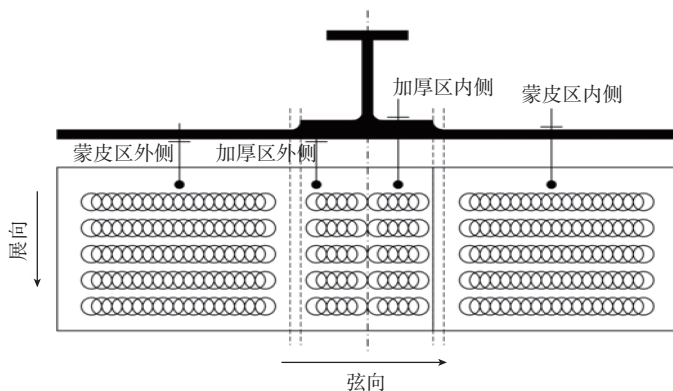


图10 工字形截面单筋试件示意图 (“o”表示喷丸点)  
Fig.10 I-shaped test piece (a “o”represents a laser spot)

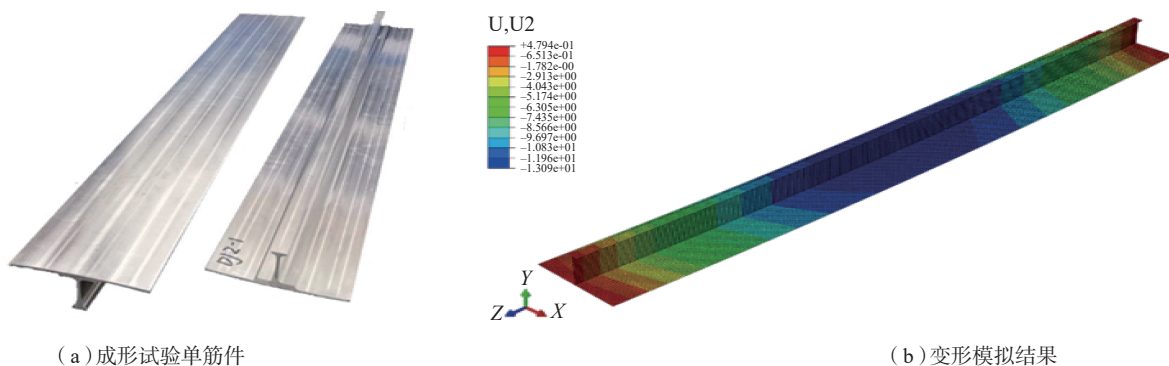


图11 激光喷丸成形试验单筋件和变形模拟结果  
Fig.11 H-shaped test pieces in LPF experiment and simulation result

simulation based on ABAQUS[C]// Proceedings of the 17th National Conference on Laser. Mianyang, 2005: 427-430.

[4] 周建忠, 倪敏雄, 张永康, 等. 金属板料激光喷丸成形理论研究与数值模拟[J]. 中国激光, 2007, 34(2): 288-294.

ZHOU Jianzhong, NI Minxiong, ZHANG Yongkang, et al. Theoretical investigation and finite element simulation of laser peen forming of metal plate[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(2): 288-294.

[5] 张兴权. 金属板料激光喷丸成形机制研究与数值分析[D]. 镇江: 江苏大学, 2007.

ZHANG Xingquan. Study of mechanism and numerical analysis on forming 3D shape of plate by laser peening[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2007.

[6] 张兴权, 张永康, 顾永玉, 等. 激光喷丸诱导的残余应力的有限元分析[J]. 塑性工程学报, 2008, 15(4): 188-193.

ZHANG Xingquan, ZHANG Yongkang, GU Yongyu, et al. Finite element simulation of residual stress induced by laser peening[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 15(4): 188-193.

[7] WANG Y N, FAN Y J, VUKELIC S, et al. Energy-level effects on the deformation mechanism in microscale laser peen forming[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2007, 9(1): 1-12.

[8] DING H, SHEN N G, LI K Q, et al. Experimental and numerical analysis of laser peen forming mechanisms of sheet metal[C]// Proceedings of ASME Conference on ASME 2014 International Manufacturing Science and Engineering Conference Collocated With the JSME 2014 International Conference on Materials and Processing and the 42nd North American Manufacturing Research Conference, 2014.

[9] PENCE C, DING H, SHEN NG, et al. Experimental analysis of sheet metal micro-bending using a nanosecond-pulsed laser[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 69(1): 319-327.

[10] YOCOM C J, ZHANG X, LIAO Y L. Research and development status of laser peen forming: A review[J]. Optics and Laser Technology, 2018, 108: 32-45.

[11] HU Y X, HAN Y F, YAO Z Q, et al. Three-dimensional numerical simulation and

experimental study of sheet metal bending by laser peen forming[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2010, 132(6): 061001.

[12] 丁华, 李克勤. 基于 ABAQUS 的激光喷丸成形有限元仿真[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2014, 28(11): 24-31.

DING Hua, LI Keqin. FEM simulation of laser peen forming based on ABAQUS[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2014, 28(11): 24-31.

[13] HFAIEDH N, PEYRE P, SONGHB, et al. Finite element analysis of laser shock peening of 2050-T8 aluminum alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2015, 70: 480-489.

[14] PEYRE P, FABBRIO R, MERRIEN P, et al. Laser shock processing of aluminium alloys. Application to high cycle fatigue behaviour[J]. Materials Science and Engineering: A, 1996, 210(172): 102-113.

通讯作者: 王永军, 副教授, 主要从事金属塑性成形方面的教学和科研工作, E-mail: wyongjun@nwpu.edu.c.

## Multiscale FEM Simulation Technology of Laser Peen Forming

LÜ Jiayang<sup>1</sup>, WANG Yongjun<sup>1</sup>, WANG Junbiao<sup>1</sup>, GAO Guoqiang<sup>1,2</sup>, WANG Qiang<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. AVIC Xi'an Aircraft Industry (Group) Company Ltd., Xi'an 710089, China;

3. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**[ABSTRACT]** As an advanced metal plastic forming and surface treatment process, laser peen technology has a broad application prospect in aerospace industry. The energy density of laser shock is stronger than that of shot peening, which enables LSP to form sheet metal with larger stiffness, such as integrated panels on airplane. In this research, a multiscale FEM simulation method of laser peen forming (LPF) was established to calculate the laser induced stress field and to predict the deformed curvature of workpieces. The prediction results have been verified through LSP experiments on square 2024-T351 block test pieces and typical H-shaped beams, which proves the simulation method is effective.

**Keywords:** Laser peen forming; Multiscale method; Finite element simulation; Integrated panel

(责编 大漠)