

激光喷丸成形单曲率几何效应研究*

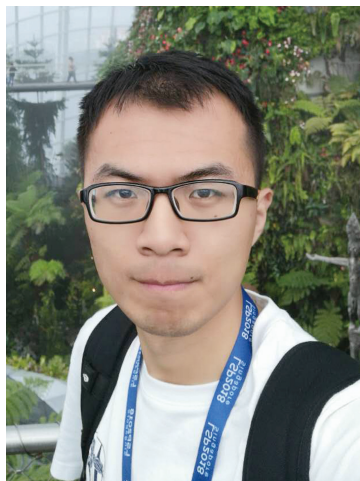
解宇飞, 胡永祥, 姚振强

(上海交通大学机械与动力工程学院机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

[摘要] 针对壁板零件激光喷丸成形应用中的几何效应,以单曲率圆柱面板件为对象,进行基于固有应变建模方法的有限元仿真分析,并进行激光喷丸成形试验验证;提出以非平板件与平板件变形偏差百分比作为几何效应衡量指标,分析了轴线长度、板材厚度、截面弧长、截面半径等典型几何参数对激光喷丸成形效果的影响规律。结果表明,当轴线长度大于截面弧长两倍时,偏差百分比与轴线长度基本无关;其他参数一定时,偏差百分比分别随截面半径的增大、截面弧长的减小、板材厚度的增大而减小。

关键词: 激光喷丸成形;几何效应;单曲率;固有应变;偏差百分比

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.23/24.059



解宇飞

硕士研究生,研究方向为激光喷丸成形加工技术。

激光喷丸成形是一种新兴的金属壁板类零件塑性成形技术,具有工艺可控性高、表面质量好、形状适应性强等突出特点,尤其适用于小曲率复杂型面结构的成形加工,在航空航天领域壁板构件的生产中有着广阔的应用前景。2002年,美国学者 Hackel 等^[1]在其专利中最早提出激光喷丸成形的概念。2011年,美国 MIC 公司使用激光喷丸成形技术成功实现波音 747-8 飞机机翼壁板的成形制造,标志着该技术进入工业应用阶段^[2]。在这期间,国内外学者针对激光喷丸成形技术开展了大量的研究工作,主要集中在其物理机制、工艺规律和应用拓展等方面^[3-6],但关于激光喷丸几何效应的研究目前仍罕有报道。

几何效应是指由于工件几何形状不同而引起成形效果差异的现象。几何形状是决定板材抗变形能力的

重要影响因素,几何效应在多种板料成形工艺的研究中受到广泛关注。1996年,奥克兰大学 Zhu 等^[7]研究了截面几何参数对梯形槽辊轧成形效果的影响。2004年,鄂大辛^[8]在其研究中指出板坯的长宽比影响着矩形盒冲压成形所能达到的拉深极限。2011年,Shi 等^[9]分析了激光热成形中加工变形与板材几何参数的关系,发现几何效应是控制成形精度的重要因素。2018年,智利学者 Navarrete 等^[10]研究圆形板、环形板、矩形板的激光热成形规律,指出板材形状对弯曲角度有显著影响。类似地,对于激光喷丸成形技术进行板件几何效应影响的研究同样十分必要。

本文面向壁板零件成形应用需求,开展激光喷丸单曲率几何效应研究,利用基于固有应变理论的仿真建模方法,分析非平面初始形状板件与

* 基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB1102705); 航天先进技术联合研究中心技术创新项目(USCAST2015-26)。

平面板件的喷丸变形差异,探究典型几何参数对激光喷丸成形效果的影响规律,并进行相应的试验验证。

激光喷丸成形几何效应

激光喷丸成形技术利用激光短脉冲诱导产生的高压等离子体作为冲击能量来源,使金属表面产生一定深度的塑性应变层,引入沿深度方向梯度分布的不对称残余压应力,从而使板件产生一定的弯曲变形。激光喷丸成形的效果主要取决于所用工艺参数、板件材料性能和板件几何形状等因素。其中,板件几何形状的影响在复杂型面壁板的加工过程中尤为常见:一方面,复杂型面的成形往往需要进行双面喷丸加工^[11-12],第一面喷丸后所产生的中间变形势必会在一定程度上影响第二面喷丸的效果;另一方面,对于大型壁板零件的加工,成形误差普遍存在,使得校形处理成为壁板加工的常规流程,由于成形误差的随机性导致待校形工件的初始几何各不相同。因此,了解几何效应的影响是实现壁板精确成形的必要前提。

为了对几何效应的作用机理有更加清晰的把握,有必要从单曲率几何的影响规律着手,为复杂曲面几何效应的研究建立基础。如图1所示,本文所述单曲率板件为圆柱面的一部分,即截面为圆弧形且轴线为直线的单向弯曲构件。单曲率板件的几何形状可用4个几何参数来确定,包

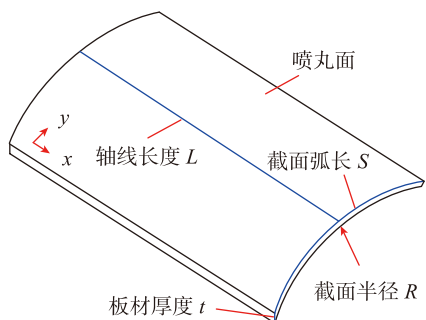


图1 单曲率板件几何参数

Fig.1 Geometric parameters of single-curved specimens

括截面弧长 S 、截面半径 R 、板材厚度 t 以及轴线长度 L 。为方便后续讨论,将轴线方向记为 x 方向,轴线横切方向记为 y 方向。本文所关注的主要是截面几何对板材轴线方向弯曲变形的影响,而对板材横截面上的变形暂不研究。

基于固有应变方法的几何效应仿真分析

几何效应研究所涉及变量数目较多、范围较大,需要大量的数据样本作为支撑,若仅以试验为研究手段,不仅时间成本巨大,而且试验过程中干扰因素众多,难以获得一致性结果。数值模拟作为一种高效的分析工具,为激光喷丸成形几何效应分析提供了可靠的研究途径。2012年, Hu 等^[13]提出了一种基于固有应变理论的仿真建模方法,可高效准确地预测激光喷丸成形板件变形情况。固有应变可以看作所有非弹性应变的总和,包括塑性应变、冷热不均引起的热应变等^[14]。在激光喷丸工艺中,激光烧蚀所引起的热效应十分微弱,因此固有应变可等同于冲击作用所引入的塑性应变。固有应变的大小直接反映激光喷丸强度,与工艺参数密切相关。本研究中,仿真分析中所采用的固有应变由前期标定所得^[15],且与试验所用工艺参数相对应,平面两个方向的固有应变沿板厚的分布规律曲线如图2所示,分别记为 ε_{x0}^* 和 ε_{y0}^* ,并将其作为基准固有应变分

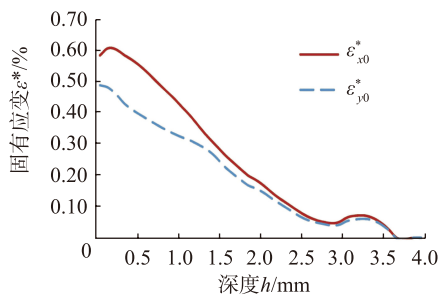


图2 基准固有应变分布模型

Fig.2 Reference eigenstrain distribution model

布。仿真中对于板件的模拟是通过分层壳单元模型来实现的。如图3所示,将整个板件沿深度方向分为若干层,每一层根据其深度分别施加不同的固有应变,从而模拟图2的固有应变分布规律。

利用固有应变建模方法,基于分层壳单元仿真模型,进行了如表1所示的系列激光喷丸成形几何效应仿真分析。为便于参数化计算,定义固有应变系数 K_e 为每组仿真实际采用固有应变与基准固有应变的比值,轴线长度系数 K_L 为轴线长度与截面弧长的比值,截面半径系数 K_R 为截面半径与截面弧长的比值,相应参数关系为:

$$\varepsilon_x^* = K_e \cdot \varepsilon_{x0}^*, \varepsilon_y^* = K_e \cdot \varepsilon_{y0}^*, L = K_L \cdot S, R = K_R \cdot S \quad (1)$$

在表1所列各组仿真中, A组用于分析固有应变大小对几何效应的影响规律,以排除激光喷丸工艺参数这一变形干扰因素。B₁~B₃组用于模拟不同几何参数组合情况下模型的变形情况,以分析各几何参数对激光喷丸成形的作用规律。仿真计算结束后,提取模型板面轴向中心线的弯曲轮廓,作为轴向变形的分析依据。

激光喷丸成形试验

为验证几何效应的影响规律,设计并进行了如表2所示的激光喷丸成形试验。其中, C₁~C₃组用于探究轴线长度对轴向变形的影响, D₁~D₃组用于探究板材厚度、截面弧长和截面半径对轴向变形的影响。

试验所用试样先由线切割从相应厚度平板切取设计尺寸板面,而

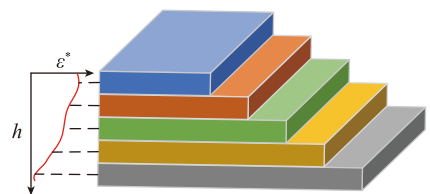


图3 分层壳单元模型

Fig.3 Layered shell element model

后采用压弯成形的的方法弯曲成如图1所示的圆柱面。试样材料为6061-T6铝合金,所有试样在压弯成形后进行退火处理以消除初始应力。退火温度为190℃,保温时间4h。为排除加工误差和退火导致的应力变形回弹影响,表2中所列试样截面半径均为退火后实测数值。由于试样为曲面板件,为避免夹持造成试样变形,采用如图4所示的多点式柔性夹具,以适应不同板件形状。试验所用激光器为波长1064nm的Nd:YAG激光器,脉冲宽度15ns,单脉冲能量设定为11J,光斑直径4mm,光斑搭接率20%。采用黑色胶带作为吸收层,水膜作为约束层。喷丸过程中光路固定,由六轴工业机器人带动试样实现如图4所示的喷丸路径。试验后,

使用三维形貌仪测量试样板面轴向中心线中间段100mm范围内(图4红色标记线)的变形轮廓,作为试样变形结果的分析依据,如图5所示,以试验组D₂为例,将激光喷丸处理后的试样整齐叠放,可明显看出各板件的变形差异。

结果分析与讨论

1 几何效应分析指标

弧弓高是评价激光喷丸成形板件变形量的常用指标,但同一板件在不同喷丸强度下,其变形弧弓高必然有所差异。为了明确反映几何效应单一因素的作用规律,需要建立一种新的评价指标,以排除工艺参数对几何效应分析的影响。本文提出“偏差百分比 η ”作为分析指标,其定义

如式(2)所示。

$$\eta = \frac{h_0 - h}{h_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中, h 为板面轴向中心线中间段100mm范围内(图4红色标记线)的变形弧弓高, h_0 为相同板面尺寸平板(即 $R = +\infty$)在相同条件下的变形弧弓高。需要指出的是,偏差百分比的大小不反映实际变形量,而是用于衡量非平板件与平板件的变形差异程度,其数值越大表明几何效应的影响越大。图6展示了A组仿真的成形结果,可以看出,若直接以弧弓高作为分析指标,3种不同固有应变条件下的结果曲线相互分离,说明不同工艺参数下无法得到一致性的结果。若以偏差百分比作为分析指标,则3条结果曲线相互重合。因此,所提出的偏差百分比分析指标能够有效剔除工艺参数的影响,单纯反映几何效应的作用效果。在后续的分析中,均以偏差百分比作为几何效应分析指标。

表1 几何效应仿真分析方案

Table 1 Geometry effect simulation analysis scheme

组别	固有应变系数 K_c	板材厚度 t/mm	截面弧长 S/mm	轴线长度系数 K_L	截面半径系数 K_R
A	0.6, 0.8, 1.0	3	100	4	1,2,3,5,7,10,15,20,30, 平板
B ₁	1.0	3	100,200,300, 400,500	0.5,1,1.5,2,3,4	1,2,3,5,7,10,15,20,30,50, 75,100, 平板
B ₂		4	100,130,200, 300,400,500		
B ₃		5	100,200,300, 400,500		

表2 激光喷丸成形试验方案

Table 2 Experimental scheme of laser peen forming

组别	板材厚度 t/mm	截面弧长 S/mm	轴线长度系数 K_L	截面半径 R/mm
C ₁	4	100	1, 1.5, 2, 2.5, 3	500, 平板
C ₂	4	130	1, 1.5, 2, 2.5, 3	650, 平板
C ₃	5	100	1, 1.5, 2, 2.5, 3	500, 平板
D ₁	4	100	2.5	103, 295, 522, 700, 864, 1010, 1125, 2400, 2500, 4000, 平板
D ₂	4	130	2.5	164, 540, 698, 900, 1310, 1510, 2000, 2780, 3950, 6260, 平板
D ₃	5	100	2.5	76, 230, 420, 490, 645, 860, 870, 1200, 1330, 2850, 平板

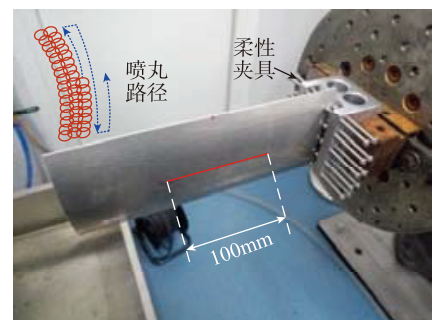


图4 装夹方式与喷丸方案

Fig.4 Clamping method and peening strategy

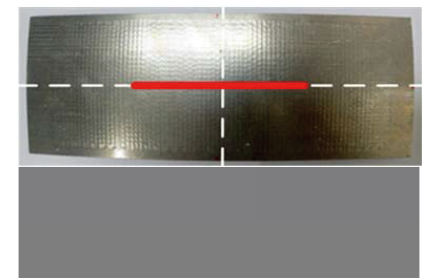


图5 试验组D₂激光喷丸变形形貌

Fig.5 Deformation morphology of group D₂ after LPF

2 轴线长度的影响

为反映轴线长度 L 的影响规律,从 $B_1 \sim B_3$ 组仿真中选取其他 3 个几何参数 (t, S, R) 的 5 种不同组合形式,分别绘制相应条件下偏差百分比随轴线长度系数的变化曲线,结果如图 7 所示。由图 7 可知,尽管 (t, S, R) 参数组合各不相同,但 5 条曲线具有类似的变化趋势:当 $K_L < 2$ 时,当 K_L 增大时,偏差百分比随之增大;当 $K_L > 2$ 时,曲线趋于稳定,偏差百分比基本不随 K_L 的变化而波动。此外,试验组 $C_1 \sim C_3$ 的 (t, S, R) 参数组合与其中 3 条仿真曲线相同,将 $C_1 \sim C_3$ 组试验结果同时反映于图 7 中,可看出试验与仿真结果有较好的一致性。之所以出现这样的规律,原因是本研究主要关注横截面几何形状对轴向变形的影响,在满足 $K_L > 2$ 的条件下,该问题可近似看作梁的平面弯曲问题,而当截面形状一定时,梁的截面抗弯刚度与

其长度无关。在后续的讨论中,将统一在 $K_L > 2$ 的条件下分析截面几何参数 (t, S, R) 的作用效果。

3 截面几何参数的影响

如图 8 所示,以 B_2 组 ($t=4$) 仿真结果为例,分析截面弧长 S 与截面半径 R 的影响规律。由图 8 可知,截面弧长一定时,偏差百分比随着截面半径增大而减小,且在半径较小阶段减小较快,半径达到一定数值后逐渐稳定于 0,即几何效应的影响程度随截面半径的增大而减弱,曲线的下降速率与截面弧长 S 密切相关。在截面半径相同时,截面弧长越大,则偏差百分比越大,几何效应越显著。图 8 中, D_1, D_2 试验组分别与 $S=100\text{mm}, S=200\text{mm}$ 仿真对应,试验与仿真结果较为吻合,验证了以上规律的有效性。

图 9 展示了 $B_1 \sim B_3$ 仿真组中 $S=100\text{mm}$ 时偏差百分比随截面半径的变化曲线,以及 D_1, D_3 组的试验结果。

其中, D_1, D_3 试验组分别与图 9 中 $t=4\text{mm}, t=5\text{mm}$ 的曲线相对应,试验与仿真结果有较强的一致性。当 S 为其其他数值时,具有相同的规律趋势。由图 9 可知,随着板材厚度增大,曲线整体向下偏移,说明板厚增大时,相同截面半径下非平面板件相对于平面板件的激光喷丸成形效果差异程度更小。

结论

(1) 所提出的偏差百分比概念能够排除工艺参数的干扰,可作为衡量几何效应影响的有效分析指标。

(2) 在轴线长度 L 与截面弧长 S 满足 $L/S > 2$ 条件下,偏差百分比不再受轴线长度变化的影响。

(3) 在轴线长度 L 与截面弧长 S 满足 $L/S > 2$ 条件下,当其他参数一定时,增大截面半径 R 、减小截面弧长 S 、增大板材厚度 t 均可降低几何效应的影响程度。

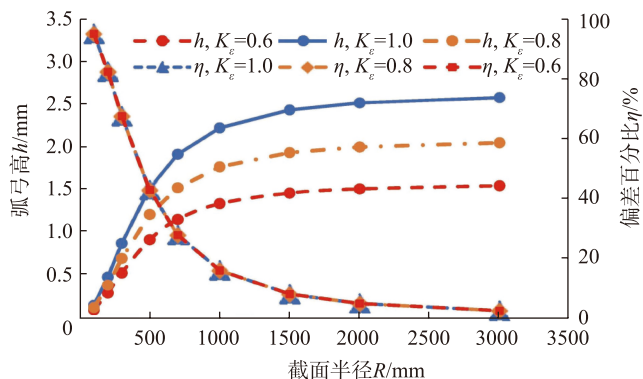


图6 两种分析指标下的A组仿真结果

Fig.6 Simulation results of group A under two different analysis indicators

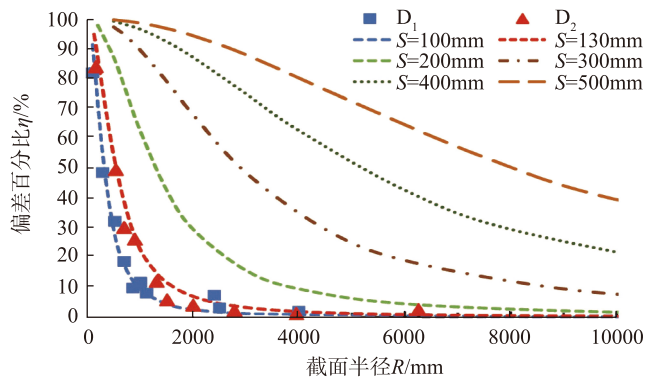


图8 截面半径和截面弧长的影响规律

Fig.8 Effect law of sectional radius and arc length

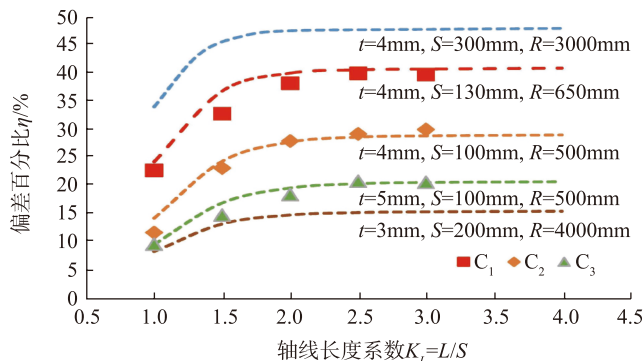


图7 轴线长度的影响规律

Fig.7 Effect law of axial length

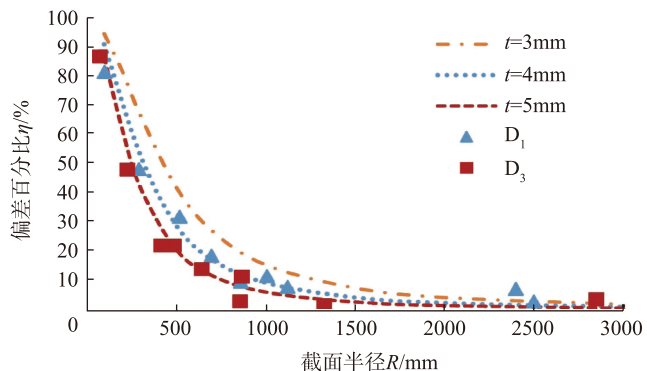


图9 板材厚度的影响规律

Fig.9 Effect law of plate thickness

以上结论均是针对单曲率几何效应而言,对于复杂双曲率板件的几何效应,仍需进一步深入研究。

参考文献

- [1] HACKEL L, HARRIS F. Contour forming of metals by laser peening: EP, US 6410884 B1[P]. 2002-06-25.
- [2] 方刚,姚振强,胡永祥. 激光喷丸成形板料预加载建模[J]. 机械设计与研究, 2013, 29(2): 80-83.
- FANG Gang, YAO Zhenqiang, HU Yongxiang. Modeling research for plate pre-loading of laser peen forming[J]. Machine Design and Research, 2013, 29(2): 80-83.
- [3] EDWARDS K R, CAREY C, EDWARDSON S P, et al. Laser peen forming for 2D shaping and adjustment of metallic components[C].//Proceedings of the 5th Laser Assisted Net Shape Engineering, Bamberg, 2007.
- [4] 周建忠,张永康,周明,等. 激光冲击成形技术的研究[J]. 激光技术, 2002, 26(6): 478-480.
- ZHOU Jianzhong, ZHANG Yongkang, ZHOU Ming, et al. Study on technique of laser shock forming of metal sheet[J]. Laser Technology, 2002, 26(6): 478-480.
- [5] HU Y, XU X, YAO Z, et al. Laser peen forming induced two way bending of thin sheet metals and its mechanisms[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(7): 1-7.
- [6] SAGISAKA Y, YAMASHITA K, YANAGIHARA W, et al. Microparts processing using laser cutting and ultra-short-pulse laser peen forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 219:230-236.
- [7] ZHU S D, PANTON S M, DUNCAN J L. The effects of geometric variables in roll forming a channel section[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture, 1996, 210(22): 127-134.
- [8] 鄂大辛,水野高爾. 矩形盒拉深成形中的几何形状效应[J]. 锻压技术, 2004, 29(3): 30-33.
- E Daxin, TAKAJI M. Geometric shape effect of rectangular case drawing forming[J]. Forming & Stamping Technology, 2004, 29(3): 30-33.
- [9] SHI Y, HU J, DONG C. Analysis of the geometric effect on the forming accuracy in laser forming[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B. Journal of Engineering Manufacture, 2011, 225(10): 1792-1800.
- [10] NAVARRETE Á, CELENTANO D. Effect of workpiece geometry using circular scan patterns in sheet laser forming processes[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(3): 1-12.
- [11] KOPP R, SCHULZ J. Flexible sheet forming technology by double-sided simultaneous shot peen forming[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2002, 51(1): 195-198.
- [12] 尚建勤,曾元松. 喷丸成形技术及未来发展与思考[J]. 航空制造技术, 2010, 53(16):26-29.
- SHANG Jianqin, ZENG Yuansong. Shot forming technology and its development trend and thinking[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(16):26-29.
- [13] HU Y, GRANDHI R V. Efficient numerical prediction of residual stress and deformation for large-scale laser shock processing using the eigenstrain methodology[J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 206(15):3374-3385.
- [14] 李志. 基于固有应变理论的激光喷丸成形建模方法与工艺规律研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- LI Zhi. Bending deformation of laser peen forming: experiments and eigenstrain modelling[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [15] 杨荣雪. 激光喷丸成形固有应变获得及带筋壁板成形预测[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- YANG Rongxue. Inverse eigenstrain determination for geometry prediction of integral panel by laser peen forming[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017.

通讯作者: 胡永祥, 博士、副教授, 研究方向为激光喷丸强化与成形技术, E-mail: huyx@sjtu.edu.cn。

Single Curvature Geometry Effect on Laser Peen Forming

XIE Yufei, HU Yongxiang, YAO Zhenqiang

(State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

[ABSTRACT] To investigate the geometry effect on laser peen forming (LPF) for panel shaping, finite element simulation is performed with single-curved cylindrical specimens based on the eigenstrain model, and LPF experiments are conducted to verify the simulation results. The normalized deviation between the deformations of non-planar specimen and planar plate is proposed as the indicator to evaluate the geometry effect, based on which the effect of typical geometric parameters on LPF is analyzed including axial length, plate thickness, sectional arc length and sectional radius. The results show that the normalized deviation is irrelevant to the axial length when axial length is more than twice as the arc length. Moreover, the normalized deviation is observed to decrease with the increasing sectional radius, the decreasing arc length or the increasing plate thickness, respectively, when other parameters are specified.

Keywords: Laser peen forming; Geometry effect; Single curvature; Inherent strain; Normalized deviation

(责编 古系)