

2024 铝合金异形件纳秒激光喷丸成形的实验研究

饶宵¹, 叶云霞^{1,2}, 赵雳¹, 任旭东^{1,2}, 李琳³

¹江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013;

²江苏大学激光技术研究所, 江苏 镇江 212013;

³曼彻斯特大学机械、航空与土木工程学院, 曼彻斯特 M13 9PL, 英国

摘要 通过激光喷丸成形实验研究了不同工艺参数对 2024 铝合金单曲率件及 S 形双曲率异形件的变形方式和变形量的影响规律, 分析了 S 形双曲率异形件的制造方法, 并实验获得了三维扭曲件。结果表明, 当增大激光单脉冲能量和减小试样厚度时, 试样容易发生凹面成形, 反之, 试样容易发生凸面成形。增大冲击区面积和光斑搭接率会增大试样的变形量, 但不会改变其变形方式。激光喷丸成形 2024 铝合金 S 形双曲率异形件和激光喷丸成形单曲率件的规律一致。为了获得 2024 铝合金 S 形双曲率异形件, 薄板材可采用“凸面成形+凸面成形”的方式, 厚板材可采用“凹面成形+凹面成形”的方式。

关键词 激光技术; 激光喷丸成形; 激光诱导冲击波; 应力梯度; 异形件

中图分类号 TN249 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.021407

Experimental Study on Special-Shaped Parts of 2024 Aluminum Alloys by Nano-Laser Peen Forming

Rao Xiao¹, Ye Yunxia^{1,2}, Zhao Li¹, Ren Xudong^{1,2}, Li Lin³

¹School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

²Institute of Laser Technology, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

³School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, The University of Manchester, Manchester M13 9PL, UK

Abstract The effects of different process parameters on the deformation mode and deformation amount of single-curvature forming parts and S-shaped double-curvature special-shaped parts of 2024 aluminum alloys are studied by the laser peen forming experiments, the manufacturing methods of S-shaped double-curvature special-shaped parts are analyzed, and the three-dimensional distortion part is obtained in experiments. The results show that, if increasing the laser pulse energy or decreasing the sample thickness, the concave deformation of samples is more likely to occur, otherwise the convex deformation occurs. The deformation amount of sample increases when the shock area and the coverage rate increase, but the deformation mode dose not change. The formation regularity of S-shaped double-curvature special-shaped parts is consistent with that of single-curvature forming parts. In order to obtain S-shaped double-curvature special-shaped parts of 2024 aluminum alloys, a "concave+concave" deformation mode can be adopted for thin plates, while for thick plates, the "convex+convex" deformation mode can be adopted.

Key words laser technique; laser peen forming; laser induced shock wave; stress gradient; special-shaped parts

OCIS codes 140.3390; 320.7090; 320.5550; 320.4240

1 引言

机械喷丸成形是制造飞机蒙皮、船舶钢板件、火

箭燃料箱等结构件的传统方法之一,但是机械喷丸成形技术工艺参数多,成形精度控制困难^[1]。激光喷丸成形是在激光冲击强化的基础上衍生出来的,

收稿日期: 2017-08-19; 收到修改稿日期: 2017-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(51205172, 51175237)、江苏省自然科学基金(BK20171297)、上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室开放基金(MSV-2015-17)

作者简介: 饶宵(1990—),男,硕士研究生,主要从事激光冲击加工方面的研究。E-mail: 923502087@qq.com

导师简介: 叶云霞(1978—),女,博士,副教授,主要从事激光加工方面的研究。E-mail: yeyunxia@ujs.edu.cn

它是一种利用激光诱导冲击波实现金属板材弯曲成形的新技术。激光喷丸成形技术能够实现板材的弯曲成形,同时具有激光冲击强化实现表面改性的优点。激光喷丸成形技术具有非接触加工、无模具、成形量可控等优点,能在表面形成残余应力以提高结构件的抗疲劳性、表面耐磨性和耐腐蚀性^[2-5]。因此,激光喷丸成形技术在航空航天、船舶、车辆等领域拥有广阔的应用前景。

Hackel 等^[6-7]利用激光诱导冲击波实现了金属厚板逆着光路方向的弯曲成形,即实现了凸面成形。Zhou 等^[8]研究了激光喷丸次数、光斑搭接率、试样厚度对 6065 铝合金凸面成形变形量的影响。张永康等^[9-11]研究了激光能量、板材厚度、喷丸条间距、激光冲击次数对 LY12CZ 铝合金凸面成形变形量的影响。Wang 等^[2]发现,改变激光能量会使铜箔的宏观变形从凸面成形转变为凹面成形。Hu 等^[12]指出,在激光喷丸成形过程中,应力梯度的存在导致板材发生凸面成形,激光的强冲击作用使得板材发生凹面成形,且通过减小板材厚度或增加激光能量,可实现板材连贯地从凸面成形转变为凹面成形。虽然学者们对激光喷丸成形技术已进行了较为广泛的研究,而实际零部件多数为多曲率、扭曲的异形件,关于异形件的激光喷丸成形制造方法和工艺研究鲜有报道。

本文以 2024 铝合金为实验对象,系统地研究了激光单脉冲能量、板材厚度、冲击区面积、光斑搭接率等对板材单曲率变形方式和变形量的影响规律。同时,分析了 S 形双曲率异形件的制造方法,并通过实验研究了关键工艺参数对 2024 铝合金 S 形双曲率异形件变形方式和变形量的影响。最后,通过选择适当的加工参数和冲击路径得到了三维扭曲件。

2 激光喷丸成形原理

激光喷丸成形原理如图 1 所示。一束高功率短脉冲激光穿过约束层照射至吸收层,吸收层吸收激光能量快速汽化形成高温、高压等离子体,等离子体继续吸收能量迅速升温膨胀之后,爆炸形成高压冲击波,高压冲击波使得板材表面产生局部塑性变形,冲击波继续向板材内部传播。冲击波破坏了材料内部力系平衡,导致板材发生宏观弯曲变形,板材变形方式有凸面成形和凹面成形。

3 实验方法

采用法国 Thales 公司的 GAIA R 型 Nd³⁺:YAG

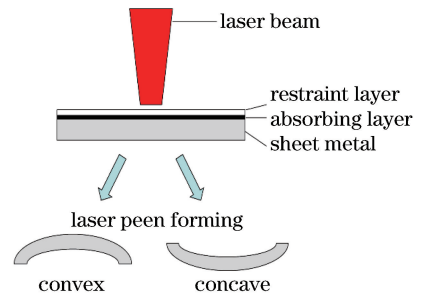


图 1 激光喷丸成形原理图

Fig. 1 Schematic of laser peen forming

激光器进行激光喷丸成形单曲率实验,其波长为 1064 nm,脉宽约为 15 ns,单脉冲能量为 1~6 J,脉冲重复频率为 1~5 Hz。激光器输出光束经过透镜聚焦后,在靶材表面形成直径约为 3 mm 的光斑。采用西安天瑞达光电技术有限公司生产的 SGR-60-II 型 Nd³⁺:YAG 激光器进行 S 形双曲率异形件激光喷丸成形实验,其参数与 Thales 公司的激光器基本相同。

实验材料选用 2024 铝合金。板材的长为 100 mm,宽为 20 mm,厚度分别为 1, 2, 3 mm。激光冲击前,将试样用乙醇擦拭干净并贴上 0.1 mm 厚的 3M 黑胶布作为吸收层,以厚度约为 2 mm 的流水作为约束层。冲击过程中,试样采用单边夹持方式,如图 2 所示。

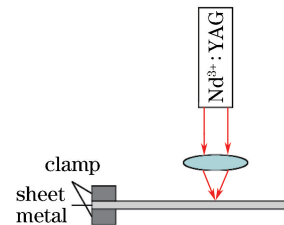


图 2 激光喷丸成形加工示意图

Fig. 2 Working diagram of laser peen forming

实验中用弧弓高来衡量试样的变形程度,其测量方式如图 3 所示。其中, d 为板材厚度, D 为垫块厚度, w 为垫块长度, H 为弯曲板材与垫块之间最大高度, h 为弧弓高,并规定凹面成形的弧弓高为正,凸面成形的弧弓高为负,测量中采用的垫块长度为 40 mm。

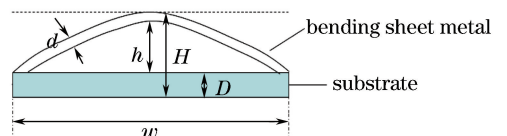


图 3 弧弓高测量示意图

Fig. 3 Schematic of arc height measurement

4 分析与讨论

4.1 单曲率件成形

4.1.1 单曲率件的获得

单曲率件成形的激光冲击方式和光斑搭接如图

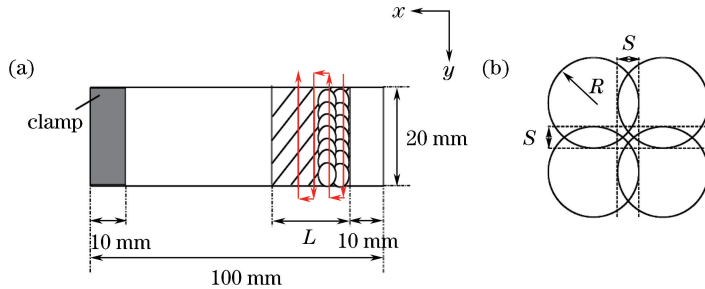


图4 单曲率件成形示意图。(a)激光冲击方式;(b)光斑搭接

Fig. 4 Forming diagram of single-curvature parts. (a) Laser shock mode; (b) spot overlap

光斑搭接率定义为

$$\eta = S/R, \quad (1)$$

式中 η 为光斑搭接率, R 为光斑半径, S 为光斑的搭接距离。

通过选择合理的激光参数,可以获得凹面成形件和凸面成形件,实验中所获得的典型单曲率件如图5所示, d_1 、 d_2 、 d_3 为板材厚度。图中厚度为 1 mm 的板材采用的工艺参数为:激光能量 2 J,光斑搭接率 50%,冲击区面积 30 mm×20 mm;厚度为 3 mm 的板材采用的工艺参数为:激光能量 4 J,光斑搭接率 50%,冲击区面积 30 mm×20 mm。

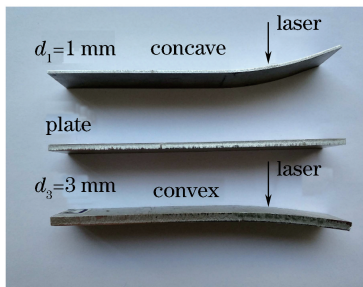


图5 单曲率件激光喷丸成形图

Fig. 5 Images of single-curvature parts formed by laser peen forming

4.1.2 工艺参数对单曲率件成形的影响

4.1.2.1 激光能量与板材厚度

激光能量与板材厚度对单曲率件弧弓高的影响如图6所示。由图6(a)可见,厚度为 1 mm 的板材在激光能量较小时的变形方式为凸面成形,在激光能量较大时的变形方式为凹面成形;随着激光能量的增加,变形方式由凸面成形转变为凹面成形,凹面成形的弧弓高随激光能量的增加而增大。由图6(b)可

4所示,冲击区面积为 $L \times 20$ mm。当研究冲击区面积对试样变形量的影响规律时,三种试样的 L 分别为 18, 24, 30 mm,其余实验中试样的 L 为 30 mm。

知,厚度为 2 mm 和 3 mm 的板材的变形方式是凸面成形,其中厚度为 3 mm 的板材的凸面成形弧弓高随激光能量的增加而增大,厚度为 2 mm 的板材的凸面成形弧弓高随激光能量的增加先增大后减小。

激光喷丸成形弯曲机制如图7所示,其中 z 轴方向为板材厚度方向。应力梯度机制在板材的凸面成形中起主导作用,冲击弯曲机制在板材的凹面成形中起主导作用^[12]。当激光能量较小或板材厚度较大时,激光诱导冲击波在板材中传输,并在深度方向快速衰减;冲击波不能穿透板材,但在板材深度方向形成了不均匀的应力分布,即产生了应力梯度。应力梯度会产生一个弯矩 M ,当 $|M| < 0$ 时,板材发生凸面成形;随着激光能量的增加,激光诱导冲击波在板材内传播的深度越大,应力分布越不均匀,应力梯度越显著,凸面成形的变形量越大。当激光能量较大或板材厚度较小时,激光诱导冲击波穿透板材且冲击波没有明显的衰减,在板材深度方向没有产生应力梯度。然而,激光在冲击区提供了一个顺着光路向下运动的惯性矩,惯性矩会产生一个 $|M| > 0$ 的弯矩使得板材发生凹面成形;随着激光能量的增加,激光冲击产生的向下运动惯性矩越大,凹面成形的变形量越大。应力梯度机制和冲击弯曲机制会产生耦合作用,当凸面成形的变形量达到最大值时,增加激光能量或减小板材厚度会加强冲击弯曲机制的作用并削弱应力梯度机制的作用,导致凸面成形的变形量减小。当冲击弯曲机制的作用进一步加强,板材变形方式会由凸面成形转变为凹面成形。同一条激光扫描线上相邻光斑的相互影响使得绕激光扫描线(y 方向)的合成弯矩得到加强而其

他方向(x 方向)的合成弯矩没有得到加强,因此,板

材在合成弯矩的作用下绕着激光扫描线方向弯曲。

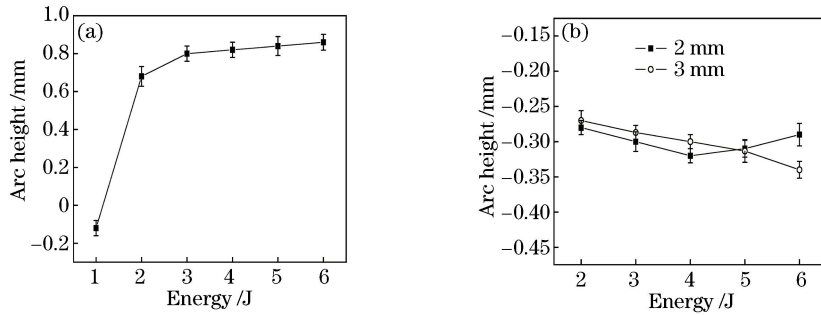


图 6 不同厚度板材的单曲率件弧弓高随激光能量的变化。(a) $d_1=1$ mm;(b) $d_2=2$ mm; $d_3=3$ mm

Fig. 6 Arc heights of single-curvature parts with different thickness plates versus laser energy.

(a) $d_1=1$ mm; (b) $d_2=2$ mm; $d_3=3$ mm

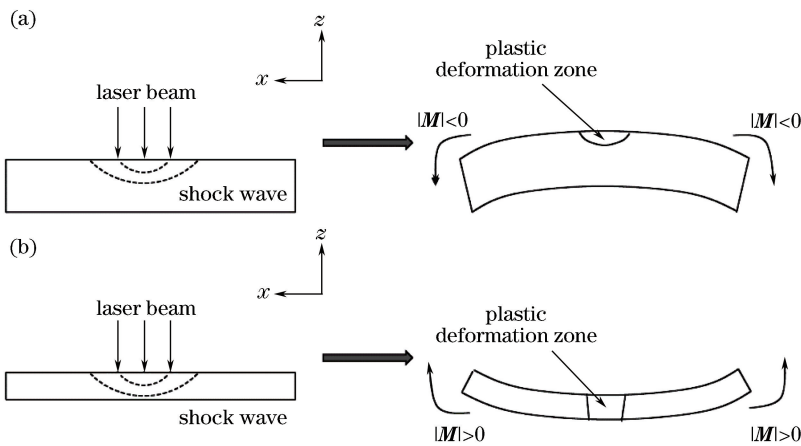


图 7 激光喷丸成形弯曲机制。(a)应力梯度机制;(b)冲击弯曲机制

Fig. 7 Bending mechanisms of laser peen forming. (a) Stress gradient mechanism; (b) shock bending mechanism

4.1.2.2 冲击区面积

当板材的厚度为 2 mm,激光能量为 4 J 时,冲击区面积的大小对单曲率件弧弓高的影响如图 8 所示,其中 E 为激光能量。可以发现,随着冲击区面积的增大,凸面成形的变形量增大。这是因为当激光能量相同时,冲击区面积增大,相应的激光扫描线数量增加,绕激光扫描线方向的合成弯矩增大,变形量增

大,但合成弯矩的性质不变。因此,增大光斑搭接率可以增大板材的变形量,但不会改变其变形方式。

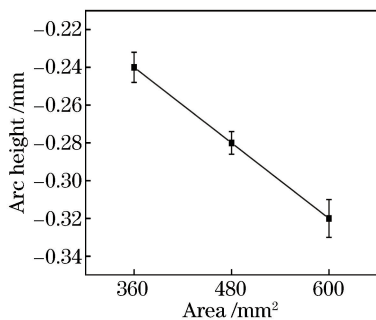


图 8 冲击区面积对单曲率件弧弓高的影响

Fig. 8 Effect of shock area on arc height of single-curvature part

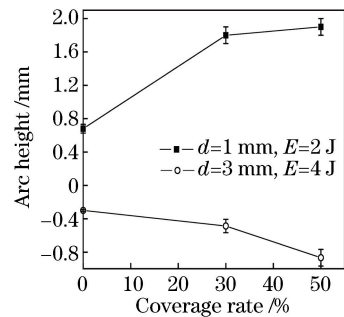


图 9 搭接率对单曲率件弧弓高的影响

Fig. 9 Effect of coverage rate on arc height of single-curvature part

4.1.2.3 光斑搭接率

光斑搭接率对单曲率件弧弓高的影响如图 9 所示。可以发现,随着光斑搭接率的增大,厚度为 1 mm 和 3 mm 的板材的弧弓高都增大。这是因为搭接率的增大使得激光扫描线条数增加且每条扫描

线上的光斑数增加,则绕激光扫描线方向的合成弯矩增大,变形量就增大,但合成弯矩的性质不变。因此,增大光斑搭接率可以增大板材的变形量,但不会改变其变形方式。

4.2 S形双曲率异形件成形

4.2.1 S形双曲率异形件的成形方法

激光喷丸成形S形双曲率异形件的方法有凸面成形(A)+凸面成形(B)、凹面成形(A)+凹面成形(B)、凸面成形(A)+凹面成形(B)、凹面成形(A)+凸面成形(B)四种不同的组合,其中A和B表示形成曲率的两个冲击区。

由单曲率件成形的规律可知,凸面成形所需的激光能量较小,凹面成形所需的激光能量较大。对于厚板材,如果用凹面成形来获得弯曲曲率,则需施加较大的激光能量;而对于薄板材,如果用凸面成形来获得弯曲曲率,工业大能量激光器会处于不稳定的阈值工作状态。因此,薄板材建议用“凹面成形+凹面成形”的变形方式,厚板材建议采用“凸面成形+凸面成形”的变形方式。为获得S形双曲率异形件,厚度为1 mm的板材采用“凹面成形(A)+凹面成形(B)”方式,厚度为2 mm和3 mm的板材采用“凸面成形(A)+凸面成形(B)”方式,如图10所示,实验中冲击区A在板材正面,冲击区B在板材背面。

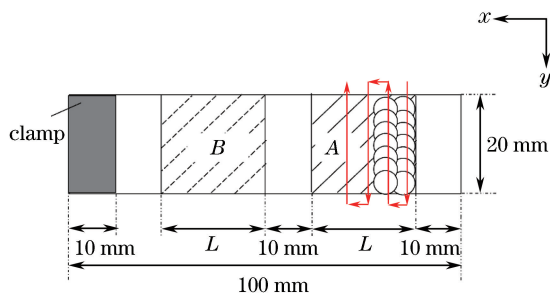


图10 S形双曲率异形件的成形示意图

Fig. 10 Forming diagram of S-shaped double-curvature special-shaped parts

典型的S形双曲率异形件如图11所示。厚度为1 mm的板材采用的工艺参数为:激光能量6 J,光斑搭接率0%,冲击区面积30 mm×20 mm;厚度为3 mm的板材采用的工艺参数为:激光能量4 J,光斑搭接率50%,冲击区面积30 mm×20 mm。

4.2.2 工艺参数对S形双曲率异形件成形的影响

4.2.2.1 激光能量与板材厚度

激光能量与板材厚度对S形双曲率异形件弧弓高的影响如图12所示。可以看出,冲击区A和B

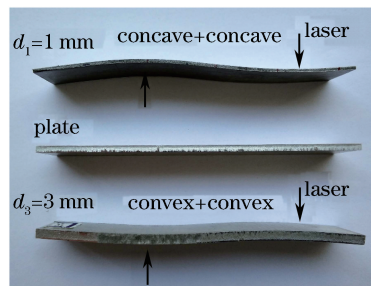


图11 典型的S形双曲率异形件图

Fig. 11 Typical images of S-shaped double-curvature special-shaped parts

的弧弓高基本相同,且成形规律和单曲率件的成形规律一致,即厚度为1 mm的板材凹面成形的变形量随着激光能量的增加而增大,厚度为2 mm的板材凸面成形的变形量随着激光能量的增加先增大后减小,厚度为3 mm的板材凸面成形的变形量随激光能量的增加而增大。

4.2.2.2 冲击区面积

当铝合金板厚度为2 mm,激光能量为4 J时,冲击区面积大小对S形双曲率异形件弧弓高的影响如图13所示。冲击区A和B的弧弓高基本相同,成形规律和单曲率件的成形规律一致,即随着冲击区面积的增加,凸面成形的变形量增大。

4.2.2.3 光斑搭接率

光斑搭接率对S形双曲率异形件弧弓高的影响如图14所示。冲击区A和冲击区B的弧弓高基本相同,成形规律和单曲率件的成形规律一致,厚度为3 mm的板材凸面成形的变形量随光斑搭接率的增加而增大。

对比图12(a)和图6(a)、以及图12(c)和图6(b)可见,虽然相同厚度板材的单曲率件和S形双曲率异形件的变形量变化规律相似,但是它们的弧弓高数值有显著差别。当激光能量较小时,相同激光能量下板材单曲率件的凹面成形和凸面成形的变形量均比S形双曲率异形件的大。这是因为除了单脉冲能量、脉冲宽度和靶材表面光斑直径等因素外,激光器输出模式、调Q激光器晶体漏光和放大自发辐射能量^[13]等因素也会影响激光冲击加工效果。因此,评价激光冲击加工的性能还需要更准确的指标体系。

4.3 三维扭曲件的成形

根据单曲率件凸面成形的规律,当激光能量为4 J时,厚度为2 mm的试样中形成的凸面成形最显著,增大冲击区面积和光斑搭接率能进一步增大板

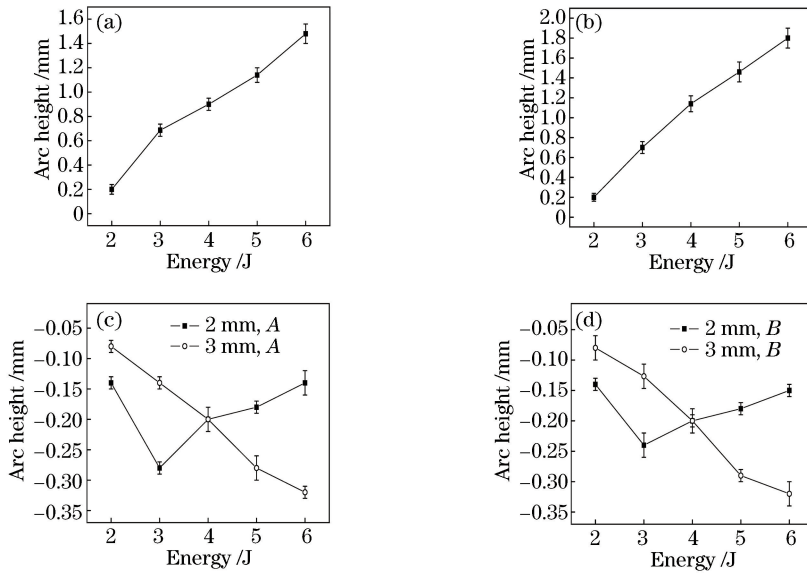


图 12 不同厚度板材的 S 形双曲率异形件弧弓高随激光能量的变化。(a) $d_1 = 1$ mm, 冲击区 A; (b) $d_1 = 1$ mm, 冲击区 B; (c) $d_2 = 2$ mm、 $d_3 = 3$ mm, 冲击区 A; (d) $d_2 = 2$ mm、 $d_3 = 3$ mm, 冲击区 B

Fig. 12 Arc heights of S-shaped double-curvature special-shaped parts with different thickness plates versus laser energy. (a) $d_1 = 1$ mm, shock zone A; (b) $d_1 = 1$ mm, shock zone B; (c) $d_2 = 2$ mm, $d_3 = 3$ mm, shock zone A; (d) $d_2 = 2$ mm, $d_3 = 3$ mm, shock zone B

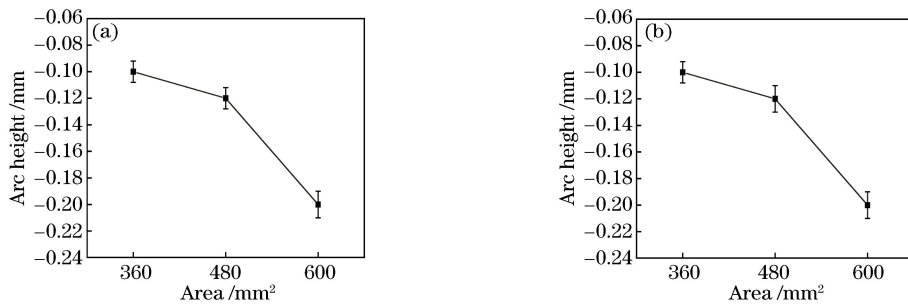


图 13 冲击区面积对 S 形双曲率异形件不同冲击区弧弓高的影响。(a) 冲击区 A; (b) 冲击区 B

Fig. 13 Effect of shock area on arc heights of S-shaped double-curvature special-shaped parts in different zones.

(a) Shock zone A; (b) shock zone B

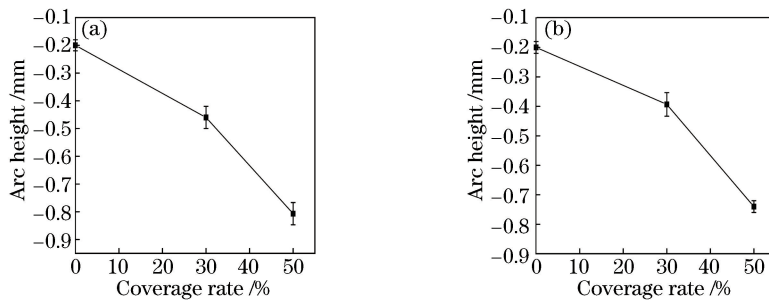


图 14 搭接率对 S 形双曲率异形件不同冲击区弧弓高的影响。(a) 冲击区 A; (b) 冲击区 B

Fig. 14 Effect of coverage rate on arc heights of S-shaped double-curvature special-shaped parts in different zones.

(a) Shock zone A; (b) shock zone B

材的变形量;同时,板材是绕激光扫描线方向弯曲,因此推测当激光扫描线与 y 方向成一定夹角时,板材绕着激光扫描线弯曲,可获得三维扭曲的凸面形

状。在板材厚度为 2 mm、激光能量为 4 J 和搭接率为 50% 的条件下进行三维扭曲件激光喷丸成形,冲击区面积和冲击路径如图 15 所示。激光冲击后三

维扭曲件试样如图 16 所示,其中 a 、 b 、 c 和 d 代表平板的四个顶点,扭曲件与平板的 a 、 b 、 c 三个点重合, d 处没有重合且形成一个张角。沿图 15 所示的测量线方向测量其弧弓高,结果为 1.28 mm。图 6(b)中厚度为 2 mm 的板材在激光能量为 4 J,冲击区面积为 30 mm×20 mm,搭接率为 0 条件下的弧弓高仅为 0.32 mm。由此可见,增大冲击区面积和光斑搭接率能显著增大板材的弧弓高。

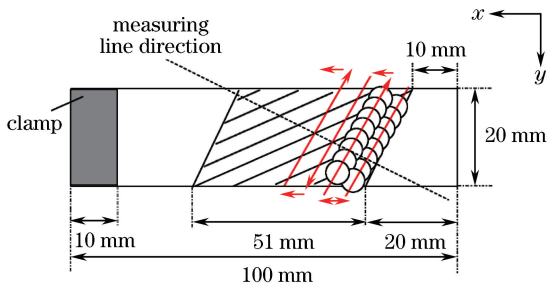


图 15 激光喷丸成形三维扭曲件示意图

Fig. 15 Schematic of three-dimensional distortion part formed by laser peen forming

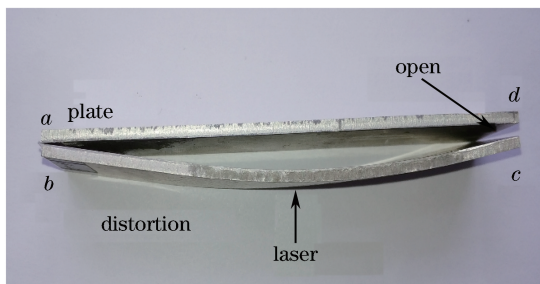


图 16 激光喷丸成形三维扭曲件

Fig. 16 Three-dimensional distortion part formed by laser peen forming

5 结 论

实验研究了激光喷丸成形中工艺参数对 2024 铝合金单曲率件和 S 形双曲率异形件的变形方式和变形量的影响规律,分析了 S 形双曲率异形件的制造方法,并制得了三维扭曲件,得到以下结论。

1) 当增大激光脉冲能量和减小试样厚度时,试样容易发生凹面成形;反之,则容易发生凸面成形。冲击区面积和光斑搭接率的增大会使得试样的变形量增大,但是不会改变其变形方式。

2) 为了获得 S 形双曲率异形件,薄板材可采用“凹面成形+凹面成形”的变形方式,厚板材可采用“凸面成形+凸面成形”的变形方式。激光喷丸成形 S 形双曲率异形件的规律和激光喷丸成形单曲率件的规律一致。

3) 通过选择合适的工艺参数和冲击路径,获得了弧弓高为 1.28 mm 的扭曲异形件。

4) 激光冲击加工的性能评价还需要更准确的指标体系。

5) 在实现板材整体变形时,还需考虑局部塑性变形对板材成形质量的影响。

参 考 文 献

- [1] Han Z R, Qi G G, Zhang L Y. State analysis of airplane big skin manufacture technology[J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2008, 25(3): 1-5.
韩志仁, 祁桂根, 张凌云. 飞机大型蒙皮制造技术现状分析[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2008, 25(3): 1-5.
- [2] 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.
- [3] Zhu R, Zhang Y K, Sun G F, *et al.* Numerical simulation of residual stress fields in three-dimensional flattened laser shocking of 2024 aluminum alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(8): 0802007.
朱然, 张永康, 孙桂芳, 等. 三维平顶光束激光冲击 2024 铝合金的残余应力场数值模拟[J]. 中国激光, 2017, 44(8): 0802007.
- [4] Wang F, Zuo H, Zhao L, *et al.* Surface quality and property of copper treated by laser shock peening[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 041410.
王峰, 左慧, 赵雳, 等. 激光冲击强化铜的表面质量和性能[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 041410.
- [5] Li Y Q, Meng C J, Wang X D, *et al.* Corrosion resistance property of 316L stainless steel welding joints treated by laser shock peening [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(6): 061402.
李玉琴, 孟长军, 王学德, 等. 激光冲击强化 316L 不锈钢焊接接头的耐腐蚀性能[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 061402.
- [6] Hackel L, Harris F. Contour forming of metals by laser peening: US6410884B1[P]. 2002-06-25.
- [7] Hackel L, Halpin J M, Harris F B. Pre-loading of components during laser peenforming: US6670578B2 [P]. 2003-12-30.
- [8] Zhou J Z, Huang S, Fan Y J, *et al.* Dynamical

- simulation and experimental study on laser peen forming of 6061-T6 aluminum alloy plate [C]. The 3rd Pacific International Conference on Application of Laser and Electro-Optics, 2008: 646-651.
- [9] Zhang Y K, Zhang X Q, Zhou J Z, *et al.* Deformation of aluminum alloy LY12CZ plate by laser shot peening [J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(10): 1417-1421.
张永康, 张兴权, 周建忠, 等. LY12CZ 铝合金激光喷丸变形 [J]. 中国激光, 2006, 33(10): 1417-1421.
- [10] Zhang X Q, Zhang Y K, Zhou J Z, *et al.* Experimental research metal sheet forming by laser shot peening [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2007, 14(5): 62-66.
张兴权, 张永康, 周建忠, 等. 基于激光喷丸的板料成形试验研究 [J]. 塑性工程学报, 2007, 14(5): 62-66.
- [11] Zhang X Q, Zhang Y K, Zhou J Z, *et al.* Research on plastic curvature of plate by laser shock waves [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(1): 249-252.
张兴权, 张永康, 周建忠, 等. 金属板料激光冷塑性弯曲的研究 [J]. 航空学报, 2007, 28(1): 249-252.
- [12] Hu Y X, Xu X X, Yao Z Q, *et al.* Laser peen forming induced two way bending of thin sheet metals and its mechanisms [J]. Journal of Applied Physics, 2010, 108(7): 073117.
- [13] Guan H B, Ye Y X, Wu Z, *et al.* Effects of long pulse-width stray light on shock wave induced by laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(7): 0703007.
管海兵, 叶云霞, 吴忠, 等. 长脉冲杂光对激光诱导冲击波的影响 [J]. 中国激光, 2011, 38(7): 0703007.