

2024-T351 铝合金薄板在橡胶支撑下的 激光冲击成形

李 民, 纪看看, 刘 涛, 段士伟, 童靳于, 陈 彬, 张兴权

安徽工业大学机械工程学院, 安徽 马鞍山 243002

摘要 基于 ABAQUS 有限元分析软件, 研究了 2024-T351 铝合金薄板在聚氨酯橡胶支撑下的激光冲击成形过程, 分析了橡胶垫块的厚度、直径、硬度对薄板成形的影响, 并实验验证了模拟结果。研究表明, 薄板的成形形状为半球形; 当橡胶厚度在 1.5~3 mm 范围内变化时, 厚度越大越有利于薄板的成形; 薄板的成形结果与橡胶直径无明显关联; 当橡胶的硬度在 40~70 HA 范围内变化时, 硬度越小越有利于薄板的成形。模拟与实验结果具有良好的 consistency。

关键词 激光技术; 激光冲击成形; 仿真; 变形深度; 聚氨酯橡胶

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.101406

Laser Shock Forming of 2024-T351 Aluminum Alloy Sheets Supported by Rubber

Li Min, Ji Kankan, Liu Tao, Duan Shiwei, Tong Jinyu, Chen Bin, Zhang Xingquan

School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243002, China

Abstract Based on the finite element analysis software of ABAQUS, the laser shock forming process of 2024-T351 aluminum alloy sheets under the support of a polyurethane rubber is studied. The effects of thickness, diameter and hardness of rubber on the metal sheet forming is also analyzed. An experiment is carried out to verify the simulated results. The study results show that the final shape of the deformed sheet is hemispherical. A great thickness of the rubber is conducive to the metal sheet forming when the thickness is in the range of 1.5-3 mm. The metal sheet forming result has no obvious correlation with the rubber diameter. A small hardness of the rubber is conducive to the metal sheet forming when the hardness is in the range of 40-70 HA. The simulated and experimental results have good consistency.

Key words laser technique; laser shock forming; simulation; deformation depth; polyurethane rubber

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引 言

激光冲击成形是一种集强化和成形于一体的新兴塑性成形技术, 具有成形时间短、应变率高等特点, 在微电子、医疗器械和航空航天等领域有着广泛应用。张永康等^[1]研究了加工系统中各种参数与板料变形量的关系, 为参数的优化、板料变形过程的有效控制提供了参考。戴毅斌等^[2]研究了板材在激光多点冲击后的变形情况, 揭示了板材的最大变形量随激光能量、搭接率和光斑直径的变化特性。吴立志等^[3]研究并验证了

收稿日期: 2017-04-26; **收到修改稿日期:** 2017-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(51675002)、安徽省自然科学基金(1708085ME110)、安徽工业大学研究生创新研究基金(2016070, 2015044)

作者简介: 李 民(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光塑性成形方面的研究。E-mail: Leem0828@163.com

导师简介: 段士伟(1984—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事冲击动力学方面的研究。

E-mail: swduan@ahut.edu.cn(通信联系人)

激光驱动飞片撞击薄板成形的可行性。张青来等^[4]分别在 20 °C 和 200 °C 下展开了激光冲击 AZ31 镁合金板材成形的研究,发现激光冲击温成形可使板材具有更稳定的残余压应力。Wang 等^[5]将激光辐照于橡胶表面附着的靶材,利用获得动量的橡胶驱动薄板发生变形,研究表明,橡胶作为冲模,可以增加薄板的成形深度。在已有的激光冲击成形的报道中,薄板的塑性变形基本以刚性凹模为支撑,凹模需要用特制的刀具加工,成本较高,成形过程中薄板材料的塑性流动易在凹模的圆角处引发失效^[6]。Browne 等^[7]发现,在模腔中使用软质缓冲垫能够适当减少板材在成形过程中的失效,有助于提高成形质量。Nagarajan 等^[8-9]相继研究并验证了在橡胶垫的支撑下,激光冲击薄板成形的可行性。然而,关于具有不同厚度、直径及硬度的软质缓冲垫对激光冲击薄板成形结果的影响研究还鲜有报道。

本文以 2024-T351 航空铝合金和聚氨酯橡胶作为研究对象,利用激光冲击橡胶支撑下的薄板成形,分别研究了薄板和橡胶的成形过程以及橡胶参数对薄板变形的影响。

2 数值模拟

激光冲击作用机理如图 1 所示。在金属薄板的表面涂抹一层不透明的吸收层(黑漆、铝箔等),在吸收层的表面覆盖一层透明的约束层(水、K9 玻璃等)。当高能激光透过约束层辐照到吸收层上时,吸收层的材料瞬间气化,并电离产生等离子体,等离子体吸收激光能量后发生爆炸,在薄板表面产生 GPa 量级的冲击波,对薄板表面施加压力脉冲,并相继在薄板和橡胶内部诱导应力波,当应力波的压力超过薄板的动态屈服极限时,薄板就会产生塑性变形。

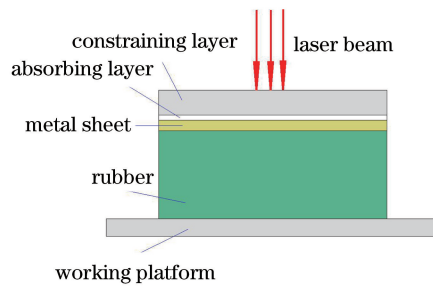


图 1 激光冲击作用机理示意图

Fig. 1 Schematic of laser shock mechanism

2.1 有限元模型

ABAQUS 有限元软件常用于模拟激光冲击成形的整个过程^[2,10],其建立的模型如图 2 所示,上层是直径为 15 mm 且厚度为 0.2 mm 的金属薄板,下层是直径为 20 mm 且厚度为 1.5 mm 的橡胶。模拟采用 C3D8R 实体单元划分六面体网格,为了提高计算精度,节约计算成本,采用中心密、四周疏的网格划分方法。沿薄板径向的三个区域内的单元长度分别为 0.05,0.1,0.2 mm,沿薄板轴向的单元长度为 0.05 mm;沿橡胶径向的薄板接触区域和非接触区域内的单元长度分别为 0.1 mm 和 0.2 mm,轴向的单元长度为 0.15 mm。总有限单元的个数为 153712。采用面与面罚函数定义薄板与橡胶间的接触和摩擦,摩擦系数设为 0.25^[11]。

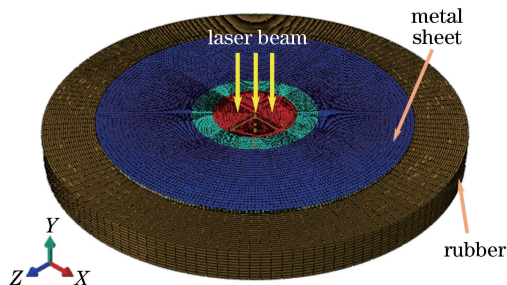


图 2 激光冲击成形有限元模型

Fig. 2 Finite element model of laser shock forming

已有研究^[12]表明,在无模的激光冲击成形过程中,薄板的塑性变形范围仅限于激光辐照区域附近,其他区域仍然保持原貌。因此,薄板的边缘区域在Y方向上的移动被限制,进而约束橡胶受到冲击后的弹起,且橡胶底面的节点被施加全约束。

在ABAQUS软件的Explicit模块中模拟金属薄板和橡胶的动态响应过程,将计算结果导入到Standard模块中,模拟薄板在激光高速冲击后产生的回弹,最终获得稳定的薄板成形结果。

2.2 冲击波加载

激光冲击波的峰值压力大小和时空分布是模拟过程中的首要问题。为提高冲击波的压力和延长冲击波的作用时间,分别采用铝箔和K9玻璃作为吸收层和约束层。激光冲击波的峰值压力的表达式^[13-14]为

$$P_{\max} = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha + 3}} \sqrt{Z} \sqrt{I_0}, \quad (1)$$

式中 α 为热能与内能之间的转化系数,通常取为0.15; Z 为折合的声阻抗; I_0 为激光功率密度。 Z 的表达式为

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}, \quad (2)$$

式中 Z_1 和 Z_2 分别为吸收层和约束层的声阻抗。铝箔的声阻抗 Z_1 为 $1.38 \times 10^6 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$,K9玻璃的声阻抗 Z_2 为 $1.14 \times 10^6 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 。当激光功率密度为 $1.1 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 时,对应的激光冲击波的峰值压力为2.5 GPa。根据上述计算公式和激光冲击过程中的约束模型理论^[12],模拟所采用的冲击波压力加载曲线,结果如图3所示。

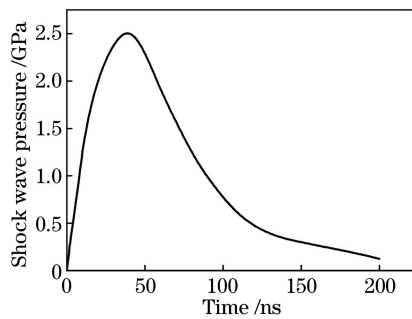


图3 冲击波压力加载曲线

Fig. 3 Loading curve of shock wave pressure

2.3 金属材料模型

激光冲击过程中,材料的应变率高达 $10^6 \sim 10^7 \text{ s}^{-1}$,原本在准静态条件下取得的材料的本构关系不再适用。JC(Johnson-Cook)模型反映了应变和应变率对材料屈服极限的影响,在高速冲击中被广泛应用^[2,5,15],其关系式为

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right], \quad (3)$$

式中 σ 为材料的屈服应力, A 、 B 、 C 为材料的参数, ϵ 为等效塑性应变, n 表征材料应变硬化的参数, $\dot{\epsilon}$ 和 $\dot{\epsilon}_0$ 分别为材料的塑性应变率和准静态载荷下的参考应变率。薄板采用2024-T351航空铝合金,其在JC模型中的主要参数^[16]为: $A = 369 \text{ MPa}$, $B = 684 \text{ MPa}$, $C = 8.3 \times 10^{-3}$, $n = 0.73$, $\dot{\epsilon}_0 = 1$ 。

2.4 橡胶材料模型

橡胶发生大变形时,应力与应变呈非线性关系。假定橡胶是超弹性材料,常用的Mooney-Rivlin表达式^[5,17]为

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial W}{\partial \epsilon_{ij}}, \quad (4)$$

$$W = \sum_{k+m=1}^n C_{km} (I_1 - 3)^k + (I_2 - 3)^m + \frac{1}{2} K (I_3 - 1)^2, \quad (5)$$

式中 σ_{ij} 为 Kirchhoff 应力张量; ε_{ij} 为 Green 应变张量; i, j, k, m 皆为常数; I_1, I_2, I_3 分别为弹性材料在长度、表面积和体积上的相对变化; W 为应变能参数; C_{km} 为超弹常数, 它直接影响橡胶材料受力后的反弹情况; K 为体积弹性模量; 当材料不可压缩时, $I_3 = 1$ 。此外, 采用参数 C_{10} 和 C_{01} 来描述橡胶的弹性性能, 聚氨酯橡胶在 Mooney-Rivlin 模型中所需的参数^[17-18]见表 1。模拟采用的橡胶的邵氏硬度为 70 HA。

表 1 聚氨酯橡胶机械参数

Table 1 Mechanical parameters of polyurethane rubber

Hardness /HA	C_{10} /MPa	C_{01} /MPa	Poisson ratio
40	0.230	0.107	0.49
50	0.302	0.076	0.49
70	0.736	0.184	0.49

3 模拟结果

薄板在激光冲击波作用下发生了动态响应, 由于板的厚度很薄, 应力波的传播时间极短, 因此很难把应力波从上表面传播到下表面的过程表达出来。金属板在不同时刻所受的动态应力如图 4 所示, 其中图 4(a1)~(a8)所示为金属薄板在不同时刻的动态应力云图, 图 4(b1)~(b8)所示为橡胶垫块在不同时刻的动态应力云图。15 ns 时, 薄板内的动态 von Mises 应力为 457 MPa, 已经超过薄板的动态屈服强度(369 MPa), 但薄板未发生塑性变形, 这是由于激光诱导的塑性波尚未穿过薄板, 仍需要一段时间才能达到薄板的底部。34 ns 时, 薄板内的 von Mises 应力达到 465 MPa, 此时橡胶内部已经产生了应力波, 橡胶内的 von Mises 应力为 1×10^{-3} MPa。1300 ns 时, 薄板的冲击区域附近出现了应力集中现象, 其 von Mises 应力达到 586 MPa。3200 ns 时, 薄板内的 von Mises 应力达到 671 MPa, 此时应力波已穿过薄板底面, 传播到橡胶中, 橡胶中的 von Mises 应力为 83 MPa。4800 ns 时, 薄板冲击区域附近的 von Mises 应力减少到 586 MPa, 此刻应力波已经传播到橡胶底部, 橡胶内的 von Mises 应力达到 147 MPa。图 4(b2)~(b5)展示了应力波完整地穿过橡胶垫块的过程。由图 4(a5)、(a6)可以看出, 薄板发生了明显的反弹现象。11300 ns 时, 反弹后橡胶的 von Mises 应力减少为 21 MPa。19201 ns 时, 薄板内的 von Mises 应力高达 700 MPa, 此时橡胶内的 von Mises 应力为 8 MPa。之后, 铝合金薄板经过若干次微小的振荡反弹, 30000 ns 时, 薄板中的 von Mises 应力降低到 453 MPa, 且接近于薄板的动态屈服强度, 薄板的成形过程结束。由于薄板自身的塑性变形和四周边界约束的共同作用, 橡胶内部的能量难以完全释放, 此时橡胶内的 von Mises 应力为 7 MPa。

4 实验验证

4.1 实验准备

2024-T351 铝合金薄板的厚度为 0.4 mm, 用线切割方法在铝板上切出直径为 15 mm 的圆形试样, 再用 SiC 砂纸打磨去掉试样表面的加工纹理, 以改善其表面粗糙度, 直至厚度为 0.2 mm。在厚度为 1.5 mm 的聚氨酯橡胶上切割直径为 20 mm 的圆形橡胶试样。在薄板试样的表面贴上一层厚度为 100 μ m 的专用铝箔, 再覆盖一块厚度为 4.5 mm 的 K9 玻璃。用中孔直径为 10 mm 的压边圈将薄板和橡胶试样固定在模具上。实验采用调 Q 型 Nd:YAG 激光器, 波长为 1064 nm, 光斑直径为 3 mm, 频率为 8 Hz, 设置激光单脉冲能量为 2 J。

4.2 实验结果

实验结束后, 除去薄板试样表面残留的铝箔, 在日本 OLYMPUS 公司生产的 DSX150 型超景深显微镜下观察薄板表面的成形情况。图 5 所示为薄板与橡胶的表面形貌图, 由图 5(a)、(b)可以看出, 实验后橡胶表面无明显损伤, 验证了聚氨酯橡胶的高强度、耐磨等特性。从图 5(c)中可以看到, 薄板表面没有发生烧蚀、损坏, 这是因为在激光辐照的极短时间内, 铝箔作为吸收层, 避免了激光对金属材料表面的直接辐照。图 5(d)所示为冲击区微观形貌放大图。

图 6 所示为变形薄板的二维轮廓曲线图。综合图 5(c)、(d)及图 6 不难看出, 薄板的成形形状为半球形。模拟得出的轮廓曲线较为光滑, 因为光斑内的激光功率密度是均匀的, 所产生的冲击波的压力也是均匀

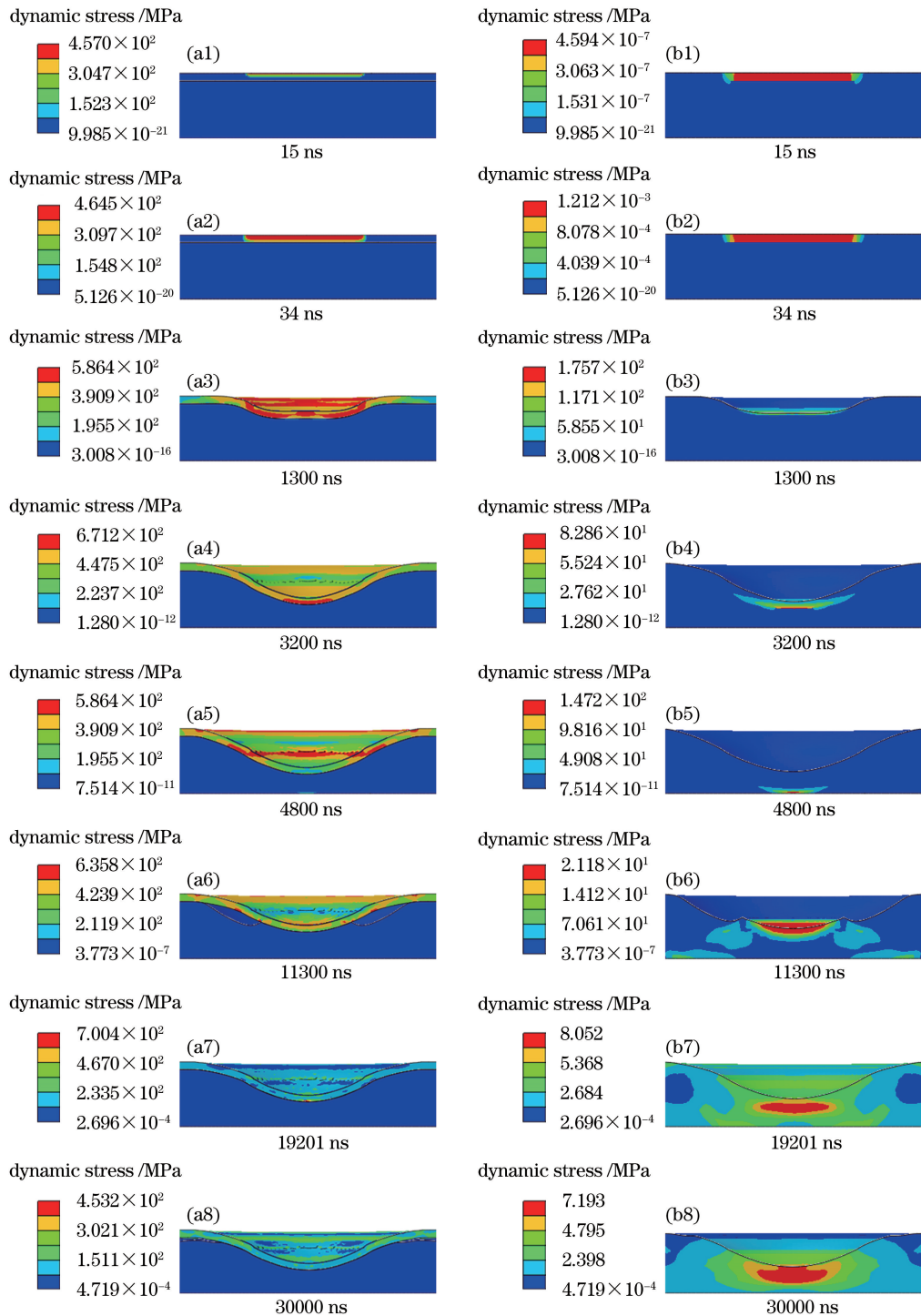


图4 不同时刻金属薄板与橡胶的动态应力云图。(a)金属薄板;(b)橡胶

Fig. 4 Dynamic stress cloud pictures of metal sheet and rubber at different moments. (a) Metal sheet; (b) rubber

的,而实验中激光斑内的光强不均匀,产生的冲击波的压力亦不均匀。由图6还可观察到,实验中测得的轮廓线深度略大于模拟的,可能是由于实验中橡胶试样的实际性能参数与橡胶模型的拟合参数存在偏差,但两种曲线总体上差别不大,且趋势一致,证明了模拟比较符合实际情况。

5 橡胶参数对成形的影响

在模拟结果得到实验验证的基础上,采用上述模型,用数值模拟的方法进一步研究橡胶垫块的厚度、直

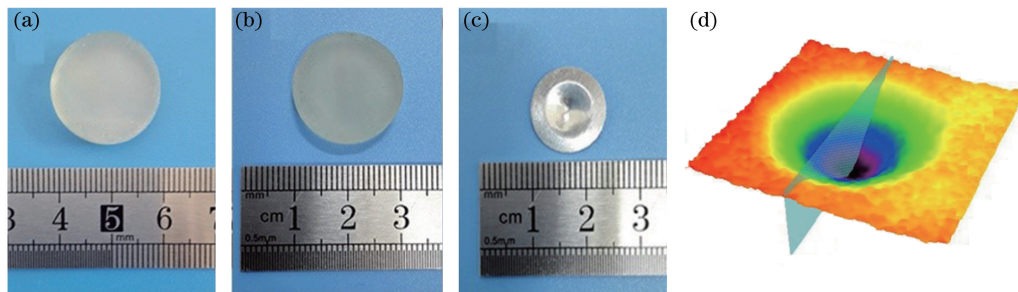


图5 橡胶与金属薄板表面形貌。(a)实验前橡胶;(b)实验后橡胶;(c)变形金属薄板;(d)冲击区微观形貌放大图
Fig. 5 Surface morphologies of rubber and metal sheet. (a) Rubber before experiment; (b) rubber after experiment; (c) deformed metal sheet; (d) magnified microscopic topography of impact region

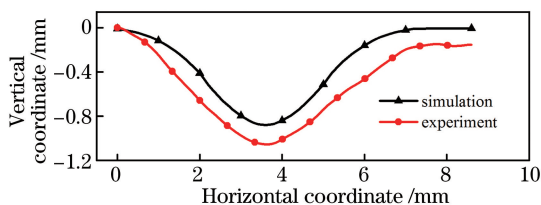


图6 变形金属薄板的二维轮廓曲线

Fig. 6 Two-dimensional contour curve of deformed metal sheet

径及硬度对薄板成形结果的影响。

5.1 橡胶厚度

为研究橡胶垫块的厚度对薄板成形的影响,分别对厚度为 1.5, 2, 3 mm 的橡胶垫块支撑下的薄板变形进行研究,薄板和橡胶的其他尺寸如上述所述,模拟的结果如图 7 所示。由图 7(a)可以看出,随着橡胶垫块厚度的增加,薄板的最大变形深度从 0.89 mm 增加到 0.93 mm,因为总刚度与橡胶垫块的厚度成反比,厚度为 3 mm 的橡胶垫块的总刚度较小,有利于薄板成形。如图 7(b)所示,三块薄板在前 8000 ns 内的变形曲线是相同的,以 8000 ns 时刻薄板的成形深度作为基准, a 为厚度为 1.5 mm 的橡胶垫块支撑下的薄板的垂向位移幅值,随着橡胶垫块厚度从 1.5 mm 增大到 3 mm,薄板的垂向位移幅值从 0.134 mm 减少到 0.066 mm,说明橡胶对薄板的缓冲作用增强,证明厚度为 3 mm 的橡胶垫块更有助于薄板成形。

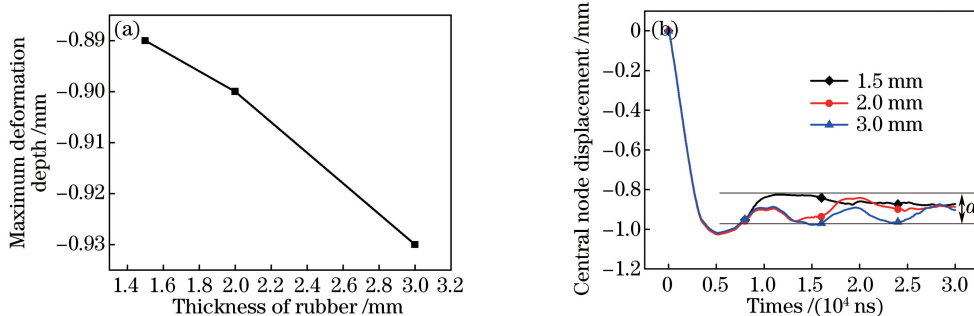


图7 橡胶厚度对金属薄板成形的影响。(a)薄板的最大变形深度;(b)中心节点的位移

Fig. 7 Effect of rubber thickness on metal sheet forming. (a) Maximum deformation depth of sheet; (b) displacement of central node

5.2 橡胶直径

采用峰值压力为 2.5 GPa 的激光冲击波,对相同薄板在不同直径橡胶垫块支撑下的激光冲击成形过程进行了数值模拟,薄板的成形结果如图 8 所示。由图 8(a)可以看出,当橡胶垫块的直径从 15 mm 增大到 30 mm 时,薄板的最大变形深度先是小幅增长,后又小幅下降,在此过程中薄板的变形深度波动很小。如图 8(b)所示,在不同直径橡胶垫块的支撑下,三种薄板中心节点的振荡曲线保持一致,说明在激光冲击成形的

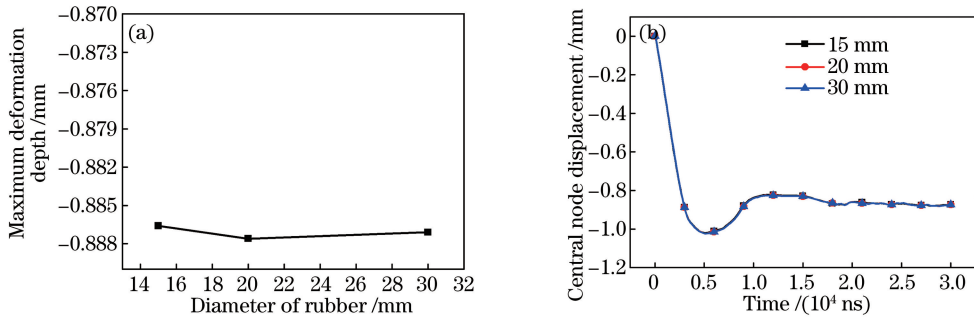


图 8 橡胶直径对金属薄板成形的影响。(a)薄板的最大变形深度;(b)中心节点的位移

Fig. 8 Effect of rubber diameter on metal sheet forming. (a) Maximum deformation depth of sheet; (b) displacement of central node

过程中,橡胶垫块的直径变化对薄板的成形没有明显影响。

5.3 橡胶硬度

采用相同的薄板,并设置激光冲击波的峰值压力为 2.5 GPa,在邵氏硬度分别为 40,50,70 HA 的橡胶垫块的支撑下,薄板的变形结果如图 9 所示。由图 9(a)可以看到,随着橡胶垫块硬度的增加,薄板的最大变形深度从 1.04 mm 减小到 0.88 mm,这是因为硬度为 40 HA 的橡胶垫块的弹性模量(应力与应变之比)较小,薄板在变形过程中遇到的阻力小,容易成形。由图 9(b)可以看出,在 0~10000 ns 范围内,三种不同硬度橡胶垫块支撑的薄板有着相似的变形趋势,同时可以看出,硬度分别为 40 HA 和 50 HA 的两个橡胶垫块对薄板的成形起着相似的缓冲作用。分别以 5000 ns 时刻薄板的变形深度作为基准, b 为硬度为 40 HA 的橡胶垫块支撑下的薄板的垂向位移幅值,当橡胶垫块的硬度从 40 HA 增大到 70 HA 时,薄板的垂向位移幅值从 0.144 mm 增加到 0.197 mm,说明橡胶对薄板的缓冲作用减弱,证明硬度为 40 HA 的橡胶垫块更利于薄板的成形。

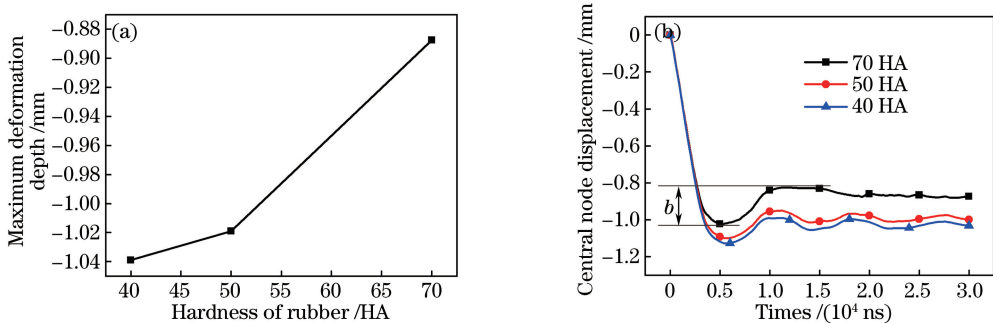


图 9 橡胶硬度对金属薄板成形的影响。(a)薄板的最大变形深度;(b)中心节点的位移

Fig. 9 Effect of rubber hardness on metal sheet forming. (a) Maximum deformation depth of sheet; (b) displacement of central node

6 结 论

研究了激光冲击橡胶支撑下的薄板和橡胶的成形过程,分析了橡胶参数对薄板变形的影响。在峰值压力为 2.5 GPa 的激光冲击波的作用下,薄板内残余的 von Mises 应力为 453 MPa,橡胶内残余的 von Mises 应力为 7 MPa。厚度为 0.2 mm 且直径为 15 mm 的金属薄板在橡胶的支撑下完成冲击成形后,薄板的成形形状为半球形。厚度为 3 mm 的橡胶垫块更有利于薄板的成形,橡胶垫块的直径对薄板的变形不会产生明显影响,而邵氏硬度为 40 HA 的橡胶垫块更有利于薄板的成形。研究结果有利于优化橡胶参数,对其他激光冲击成形实验也有借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] Zhang Yongkang, Gao Li, Yang Chaojun. Theoretical analysis and experiment on deformation of TA2 sheet under laser shock[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(9): 1282-1287.
张永康, 高立, 杨超君. 激光冲击 TA2 板料变形的理论分析和实验研究[J]. 中国激光, 2006, 33(9): 1282-1287.
- [2] Dai Yibin, Fan Yujie, Li Mingyao, *et al.* Study on numerical simulation of multi-micro laser shock forming[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(s): 50-56.
戴毅斌, 樊玉杰, 李明尧, 等. 多点激光微冲击成形的数值模拟研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(s): 50-56.
- [3] Wu Lizhi, Shen Ruiqi, Xu Jiao, *et al.* Research advance in laser-driven flyer technology[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(2): 219-228.
吴立志, 沈瑞琪, 徐姣, 等. 激光驱动飞片技术的研究进展[J]. 兵工学报, 2010, 31(2): 219-228.
- [4] Zhang Qinglai, Wu Tiedan, Zhang Bingxin, *et al.* Experimental research of warm laser shock forming of AZ31 magnesium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0903002.
张青来, 吴铁丹, 张冰昕, 等. AZ31 镁合金激光冲击温成形实验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0903002.
- [5] Wang X, Du D Z, Zhang H, *et al.* Investigation of microscale laser dynamic flexible forming process-simulation and experiments[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2013, 67: 8-17.
- [6] Zheng C, Sun S, Song L B, *et al.* Dynamic fracture characteristics of $Fe_{78}Si_9B_{13}$ metallic glass subjected to laser shock loading[J]. Applied Surface Science, 2013, 286: 121-125.
- [7] Browne D J, Battikha E. Optimisation of aluminium sheet forming using a flexible die [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 55(3-4): 218-223.
- [8] Nagarajan B, Castagne S, Wang Z K. Mold-free fabrication of 3D microfeatures using laser-induced shock pressure[J]. Applied Surface Science, 2013, 268: 529-534.
- [9] Nagarajan B, Castagne S, Wang Z K. Investigation of copper foil thinning behavior by flexible-pad laser shock forming [J]. Key Engineering Materials, 2013, 535/536: 306-309.
- [10] Zhang X Q, Chen L S, Li S Z, *et al.* Investigation of the fatigue life of pre- and post-drilling hole in dog-bone specimen subjected to laser shot peening[J]. Materials and Design, 2015, 88: 106-114.
- [11] Ramezani M, Ripin Z, Ahmad R. Sheet metal forming with the aid of flexible punch, numerical approach and experimental validation[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2010, 3(3): 196-203.
- [12] Ye Y X, Feng Y Y, Lian Z C, *et al.* Mold-free fs laser shock micro forming and its plastic deformation mechanism[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 67: 74-82.
- [13] Fabbro R, Peyre P, Berthe L, *et al.* Physics and applications of laser-shock processing[J]. Journal of Laser Applications, 1998, 10(6): 265-279.
- [14] Zhang X Q, She J P, Li S Z, *et al.* Simulation on deforming progress and stress evolution during laser shock forming with finite element method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 220: 27-35.
- [15] Zhang Xingquan, Zhang Yan, Duan Shiwei, *et al.* Numerical simulation of dynamic response of round rod subjected to laser shocking[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0903009.
张兴权, 章艳, 段士伟, 等. 圆杆在激光冲击作用下动态响应的数值模拟[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0903009.
- [16] Lesuer D R. Experimental investigations of material models for Ti-6Al-4V titanium and 2024-T3 aluminum[R]. Lawrence Livermore National Laboratory, 2000.
- [17] Belhassen L, Koubaa S, Wali M, *et al.* Numerical prediction of springback and ductile damage in rubber-pad forming process of aluminum sheet metal[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2016, 117: 218-226.
- [18] Irthia I K, Green G. Evaluation of micro deep drawing technique using soft die-simulation and experiments[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(5/6/7/8): 2363-2374.