

激光驱动复合飞片加载金属箔板的成形能力

王 霄 刘 辉 沈宗宝 周建忠 胡 杨 杜道忠 刘会霞

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 激光驱动飞片加载金属箔板成形技术是一种新型微成形技术,其飞片的结构和性能是影响该技术成形能力和质量的主要因素之一。通过 Spitlight 2000 Nd:YAG 激光器探究了复合飞片(主要由黑漆吸收层、聚酰亚胺隔热层和铝飞片组成)对激光驱动飞片加载金属箔板成形性能的影响。实验结果表明复合飞片能够增大工件的最大成形深度,同时工件形貌中心与模具中心的对中性更好,证明复合飞片在成形过程中对冲击波具有增压和均压作用,能够提高该技术的成形能力和质量。讨论了复合飞片提高成形能力和质量的原因,同时探究了激光能量和聚酰亚胺薄膜厚度对成形性能的影响。

关键词 激光技术;微成形;复合飞片;激光驱动飞片;成形能力

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0503006

Forming Ability of the Metal Foil Forming by Laser-Driven Multi-Layered Flyer

Wang Xiao Liu Hui Shen Zongbao Zhou Jianzhong Hu Yang
Du Daozhong Liu Huixia

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

Abstract Metal foil forming by laser-driven flyer is a novel high-speed micro-forming technology. The structure and performance of the flyer are the main factors affecting the forming ability and the workpiece quality of this technology. A series of experiments are carried out by a Spitlight 2000 Nd:YAG laser in order to investigate the effects of the multi-layered flyer [composed of absorbing layer (black acrylic paint), insulating layer (polyimide film) and aluminum flyer] on the formability of metal foil forming by laser-driven flyer. Experimental results show that the multi-layered flyer can increase the maximum deformation depth of the workpiece and attain better consistency of the workpiece and the mold. Therefore, the multi-layered flyer can magnify and equalize the shock wave pressure in the forming process, which leads to the improvement in forming ability and workpiece quality. The reasons for the improvement of the forming quality using multi-layered flyers are discussed. The effects of the laser energy and the polyimide film thickness on forming ability are also studied.

Key words laser technique; micro-forming; multi-layered flyer; laser-driven flyer; forming ability

OCIS codes 140.3390; 140.3430; 350.7420; 310.6845

1 引 言

激光驱动飞片技术在 20 世纪 70 年代后期由美国 Sandia 实验室首先提出^[1],在激光起爆、材料超应变、空间科学以及动态高压加载等研究领域得到广泛应用^[2~6]。近年来,随着激光技术的快速发展,激光驱动飞片已经成为一项重要的动态高压加载技

术^[7~11]。王霄等^[12~15]将激光驱动飞片技术应用于金属箔板微成形中,提出了一种新型的激光间接冲击成形技术,这项技术已经应用于微拉深^[16]、微冲裁^[17]以及微压印^[18]等加工中。

在激光驱动飞片加载金属箔板成形技术中,飞片的结构和性能是影响成形性能的重要因素。Liu

收稿日期: 2012-12-27; 收到修改稿日期: 2013-01-21

基金项目: 国家自然科学基金(51175235)、江苏省自然科学基金(BK2012712)和江苏高校优势学科建设工程资助课题。

作者简介: 王 霄(1963—),男,教授,主要从事激光加工与数字化设计制造技术等方面的研究。

E-mail: wx@ujs.edu.cn

等^[16~18]在成形实验中采用铝箔作为单层飞片,在飞片迎光面可以喷涂黑漆以增加激光利用率。单层飞片由于激光能量耦合效率较低会导致激光功率需求增大;同时不能避免激光空间强度分布不均匀及等离子体中 X 射线和超热电子对飞片的烧蚀等问题,难以保证驱动飞片获得较好的平面性和完整性,影响成形质量。

为了避免飞片存在的上述问题,有必要在激光驱动飞片加载金属箔板成形技术中研究高性能的复合飞片^[19,20],其结构主要由吸收层、隔热层和飞片组成。复合飞片在激光驱动飞片的其他应用领域引起了广泛重视。Farnsworth^[19]将复合飞片(Al/Al₂O₃/Al)用于激光起爆技术中,认为飞片结构能够显著影响飞片性能,数值模拟和实验结果均表明复合飞片作为高性能炸药的起爆器时比单层飞片表现出更好的性能。Trott 等^[21,22]利用类似飞片探究激光驱动飞片的动态性能,实验证明氧化铝可以减少激光对飞片的烧蚀和等离子体侵蚀,复合飞片具有更好的平面性和结合性,同时能够获得更高的速度。为研究压缩物质的状态方程,Kadono 等^[23]采用了一种三层飞片(2 μm Al/90 μm 聚酰亚胺(PI)/1 μm Ta),激光烧蚀铝层产生等离子体,驱动钽飞片高速飞行,实验记录显示飞片速度达到 8 km/s 以上;后续实验利用改进的飞片[2 μm Al/90 μm PI/4~8 μm Ta]^[24]以提高钽飞片的平面性。以往的研究证明复合飞片中吸收层主要吸收激光能量以产生等离子体,隔热层主要用于减小预热以减轻对飞片表面的烧蚀,驱动飞片的速度和平面性一般优于单层飞片,因此可以推断复合飞片在激光驱动飞片加载金属箔板成形技术中的成形能力和成形质量应优于单层飞片。

本文探究了激光驱动复合飞片加载金属薄板成形技术的成形性能,并且根据冲击波的传播特性,在飞片设计时结合了阻抗失配效应^[25,26]。采用 Spitlight 2000 Nd:YAG 激光器进行了成形对比实验。讨论了采用复合飞片时获得更高成形能力和成形质量的原因,同时分析了激光能量和聚酰亚胺薄膜厚度对成形性能的影响。

2 激光驱动复合飞片加载金属箔板成形实验

激光驱动复合飞片加载金属箔板成形作为一种新型微成形技术,其主要过程如下:当激光辐照在复合飞片的吸收层时,沉积的激光能量导致吸收层瞬

间蒸发、气化以及电离,形成高温高压的等离子体,等离子体继续吸收激光能量,在约束层和隔热层之间快速膨胀,形成的高压冲击波从吸收层向隔热层传播,最终到达飞片并将其高速驱动出去。飞片在激光脉冲持续时间内继续吸收激光能量并将其转化为动能,在飞行腔中加速向前飞行,经过在飞行腔中的运动后飞片速度趋于稳定,然后与工件发生碰撞。碰撞瞬间飞片的动能迅速释放并向工件内部转移,在工件内产生一个向前传播的冲击波,当冲击波峰值压力超过工件材料的动态屈服极限时,工件将发生高速塑性变形,在高压冲击波和模具的双重限制作用下,工件实现成形。

实验采用短波长的 Spitlight 2000 型 Nd:YAG 激光器(激光波长为 1064 nm,脉冲宽度为 8 ns,最大单脉冲能量为 2 J,重复频率为 1~10 Hz),激光束为准高斯分布。激光驱动复合飞片加载金属箔板成形实验装置图如图 1 所示,激光能量通过光学能量计(Gentec-eo)进行测量,输出能量可控,光斑大小可调。激光光斑直径通过调节离焦量来控制,离焦量指光斑聚焦点与工件之间的距离,当聚焦点在工件上方时为正值,焦点在工件下方时为负值;实验所需光斑直径为 1 mm,因此离焦量选择 -10 cm。激光驱动复合飞片加载金属箔板成形装置主要由约束层、复合飞片靶、飞行腔、工件和模具组成。

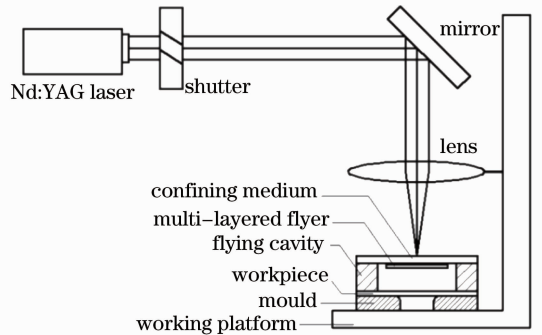


图 1 激光驱动复合飞片加载金属箔板成形实验装置图
Fig. 1 Experimental configuration for the metal foil forming by laser-driven multi-layered flyer

进行对比试验,第一组采用复合飞片,第二组是以往实验采用的单层飞片^[16~18]。K9 玻璃因为其较高的透光率、声阻抗以及较好的刚度被选作约束层,尺寸为 $\Phi 40 \text{ mm} \times 1.56 \text{ mm}$ 。吸收层多要求采用反射率低、激光吸收率较高的非金属材料,实验选择黑漆做吸收层。飞行腔的作用是为飞片提供飞行空间,使飞片能够达到最大速度并保持稳定状态,同时飞行腔还起到压边的作用,选择厚度为 170 μm 的

医用玻璃作为飞行腔。聚酰亚胺膜具有优良的力学性能以及耐高温、耐腐蚀等性能,同时聚酰亚胺的冲击阻抗较小,可以在复合飞片中更好地发挥阻抗失配效应,选用杜邦公司生产的厚度为 $100\ \mu\text{m}$ 的聚酰亚胺膜作为隔热层。实验采用德国 LPKF-ProtoMat-C60 型电路板雕刻机来加工模具,利用微铣刀在印刷电路板上加工出直径为 $1\ \text{mm}$ 的圆孔,然后加工半径为 $0.1\ \text{mm}$ 的倒角。

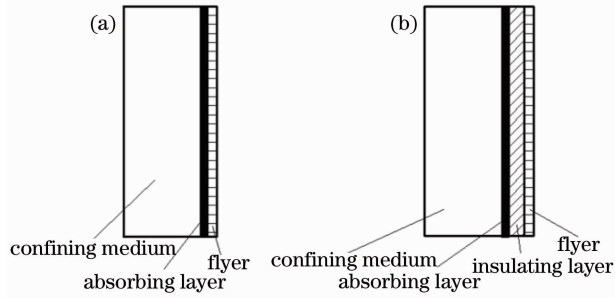


图 2 对比试验中的飞片结构示意图。

(a) 单层飞片; (b) 复合飞片

Fig. 2 Diagram of the flyers in the comparative experiments.

(a) Single-layered flyer; (b) multi-layered flyer

单层飞片结构如图 2(a) 所示,单层飞片表面涂上相同厚度的黑漆以保证激光吸收效率的一致性。复合飞片选择黑漆作为吸收层,聚酰亚胺作为隔热层,铝作为飞片,如图 2(b) 所示。隔热层和飞片之间的接触面质量非常重要,两者需要紧紧粘接在一起,采用玻璃胶硅酮作为复合飞片中飞片与隔热层之间的粘接剂,在聚酰亚胺薄膜未涂黑漆一面

和铝箔之间均匀涂抹一层硅酮,用压延法得到膜层结合均匀牢固的复合飞片,然后利用纯净水将 K9 玻璃和聚酰亚胺膜涂有黑漆的一面进行粘结。实验中飞片材料选用纯度为 99.99% 的铝箔,厚度为 $20\ \mu\text{m}$,其主要力学性能为:屈服强度 $\sigma_{0.2} = 145\ \text{MPa}$,弹性模量 $E = 69\ \text{GPa}$,剪切强度 $\tau = 100\ \text{MPa}$ 。因为铜的塑性好、变形抵抗力较低,在微机电系统(MEMS)中得到了广泛应用,实验选择厚度为 $25\ \mu\text{m}$ 的铜箔作为工件。

3 实验结果与讨论

采用德国蔡司公司 AxioCSM700 真彩色共聚焦扫描显微镜对成形工件进行局部细微测量。激光能量为 $1020\ \text{mJ}$ 的激光驱动飞片微成形工件的表面形貌如图 3 所示,图 3(a) 为采用复合飞片时的工件轮廓图,图 3(b) 为采用单层飞片的工件轮廓图。图 4 显示的是激光能量为 $1020\ \text{mJ}$ 时激光驱动复合飞片的成形工件三维(3D)表面形貌图。通过对比发现,采用复合飞片的成形工件形貌中心与模具中心的对中性较好,工件成形更均匀对称,成形质量较高。分析产生这种结果的原因:首先是复合飞片中的聚酰亚胺隔热层,可以减小等离子体中的超热电子和 X 射线对飞片的预热,避免了飞片被烧蚀;同时,聚酰亚胺薄膜可以减轻等离子体膨胀的不均匀性,使飞片获得较好的平面性和完整性;此外,在冲击波从吸收层到飞片的传播过程中,聚酰亚胺薄膜可以起到一定的均压作用,使传播到飞片的冲击波更加均匀。

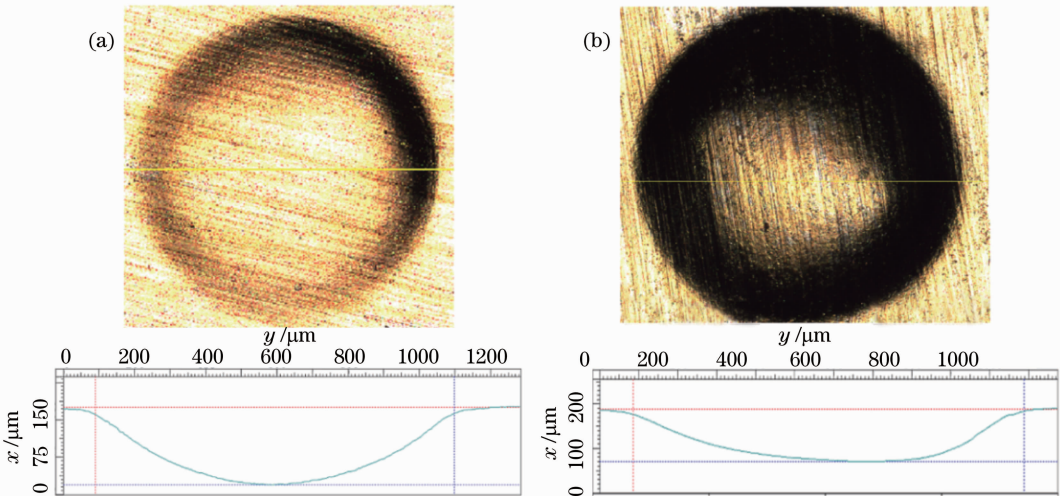


图 3 成形工件的二维形貌图。(a) 采用复合飞片的工件; (b) 采用单层飞片的工件

Fig. 3 Two-dimensional microtopography of formed workpiece. (a) Workpiece adopting multi-layered flyer; (b) workpiece adopting single-layered flyer

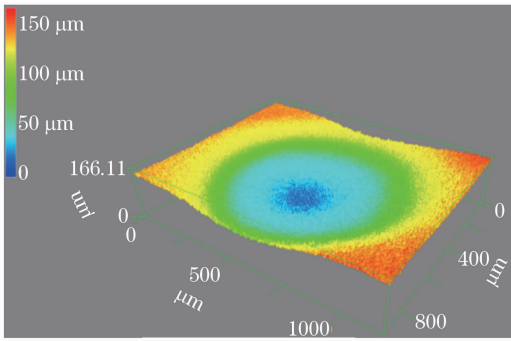


图 4 采用复合飞片的成形工件 3D 形貌图
Fig. 4 3D microtopography of formed workpiece adopting multi-layered flyer

观察对比实验中工件成形深度可以发现,采用复合飞片时工件的最大成形深度达到 $154\ \mu\text{m}$,而采用单层飞片时工件最大成形深度为 $117\ \mu\text{m}$,表明复合飞片可以提高激光驱动飞片加载金属薄板成形技术的成形能力。现讨论激光驱动复合飞片中的增压机理。从冲击动力学角度分析可知^[27],冲击波在传播过程中,在不同介质的分界面处会发生波的反射和透射现象。由于复合飞片中隔热层和飞片冲击阻抗(指冲击波速度 D 与材料初始密度 ρ_0 的乘积)不同,冲击波在两者中传播时将会产生阻抗失配效应,当入射冲击波到达隔热层和飞片的分界面时,由于飞片的冲击阻抗大于隔热层的冲击阻抗,一方面向飞片透射一个增强的冲击波 D_2 ,同时向隔热层中反射一个冲击波 D_1^* ^[26,28],因此产生冲击波的增压效果,使飞片速度进一步增大。冲击波的反射、透射过程如图 5 所示。

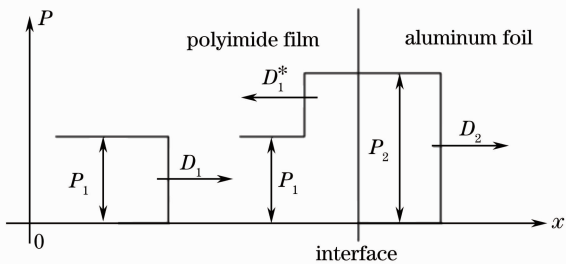


图 5 冲击波在聚酰亚胺和铝箔中的反射与透射示意图
Fig. 5 Reflection and transmission diagram of shock wave at the interface of polyimide film and aluminum foil

结合 $P-u$ (P 表示介质的压力, u 表示介质的粒子速度)图进一步分析冲击波在复合飞片的隔热层和飞片界面间产生增压效果的原因。在 $P-u$ 平面中,用抛物线来表示隔热层中入射冲击波的压力 P 与粒子速度 u 的关系,如果冲击波波阵面前方隔热层粒子速度为零,则该曲线会通过坐标原点,如图 6 中的曲线 I 所示;同样对于飞片,其透射冲击波也

可以用通过坐标原点的一条抛物线表示,如曲线 II 所示。在冲击波从隔热层向飞片传播的过程中,由于飞片的冲击阻抗大于隔热层的冲击阻抗,反射波为加载冲击波,其终点应该落在以反射波前方状态为初态的新的 Hugoniot 线上;如果忽略因为反射冲击波传播所引起的熵增,可近似认为隔热层中反射冲击波的冲击 Hugoniot 线与入射冲击波的 Hugoniot 线成镜像对称关系;坐标值为 (P_1, u_1) 的 A 点是隔热层中入射波 D_1 波阵面上的动力学参量,过点 A 作曲线 I 的镜像反射线 I' 就是反射波 D_1^* 的 Hugoniot 线。根据分界面两侧的压力和粒子速度连续的特点,这条反射曲线 I' 与曲线 II 交于 B 点, B 点对应的冲击波压力 P_2 就代表了飞片中的冲击波压力^[28,29]。由图 6 可以看出,当冲击波从隔热层向飞片传播时,后者的冲击波压力得到了增强,即实现了在激光驱动飞片加载金属箔板成形技术中复合飞片的增压效果。

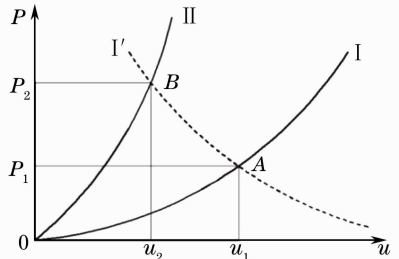


图 6 冲击波在隔热层与飞片界面中的 $P-u$ 示意图
Fig. 6 $P-u$ diagram of shock wave in the interface of insulating layer and flyer

为进一步探究激光驱动复合飞片加载金属箔板成形技术的成形能力,进行了不同激光能量下的成形实验。为产生良好的成形效果,激光能量不能过大或者过小,太大的激光能量可能导致材料塑性变形超过材料的成形极限,造成工件破裂;太小的激光能量不能产生足够能量的冲击波,工件不能获得理想的成形效果。在激光能量为 $675\sim 1690\ \text{mJ}$ 范围内工件能够产生明显的塑性变形。激光能量分别为 $675, 1020, 1380, 1690\ \text{mJ}$ 时的工件最大变形量如图 7 所示,可以明显看出复合飞片在工件最大成形深度上不同程度优于单层飞片,说明相同条件下复合飞片可以提高成形能力。此外,工件的最大成形深度随着激光能量的增加而近似线性增大,但两组的增加程度不同。分析认为这是因为入射冲击波的压力随着激光能量的增加而增大,复合飞片中的阻抗失配效应越来越明显,增强了增压效果。在激光能量为 $1690\ \text{mJ}$ 时,复合飞片的最大成形深度为 $197\ \mu\text{m}$,实验数据表明复合飞

片是在目前实验条件下提高激光驱动飞片加载金属箔板成形能力的一个重要方法。

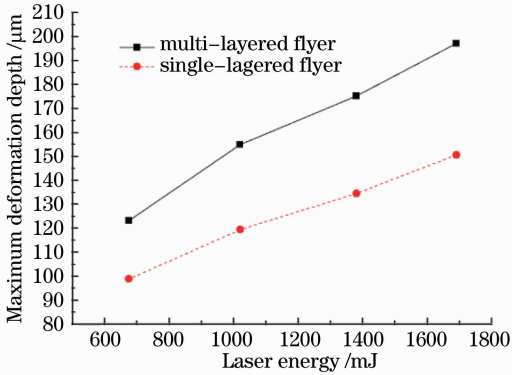


图7 激光能量与工件成形深度的关系图

Fig. 7 Relation curves of laser energy and forming depth of workpiece

根据冲击波的传播特点,复合飞片中不同厚度的聚酰亚胺薄膜会对阻抗失配效应产生影响。选取了 $50\ \mu\text{m}$ 和 $100\ \mu\text{m}$ 两种不同厚度的聚酰亚胺薄膜进行实验,分别在 675、1020、1380 mJ 三种激光能量下观察工件的成形效果。两种厚度下工件最大成形深度与激光能量的关系如图 8 所示,可以判断出采用隔热层厚度为 $50\ \mu\text{m}$ 的复合飞片时工件最大成形深度较大,但是通过观察工件的成形形貌发现,采用隔热层厚度为 $100\ \mu\text{m}$ 的复合飞片靶时工件成形形貌更加均匀,由此推断采用隔热层厚度为 $50\ \mu\text{m}$ 的复合飞片靶所驱动飞片速度更高,但是飞片稳定性相对较差。由于受到现有材料供应限制,未能进一步深入探讨,但可以推断隔热层应该存在一个最佳厚度以最大限度地发挥阻抗失配效应。

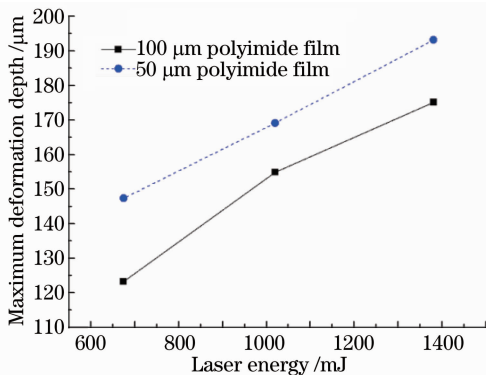


图8 隔热层厚度与工件成形深度的关系图

Fig. 8 Relation curves of the thickness at thermal insulating layer and forming depth of workpiece

如果隔热层厚度小于该最佳厚度,冲击波到达隔热层-飞片界面时仍处于增长阶段,冲击波能量很大一部分并没有转化为飞片动能,而是由反射冲击

波传到隔热层,经过一段时间后对飞片进行二次冲击。因此,冲击波在隔热层-飞片界面的多次反射过程中对飞片造成多次冲击加速,飞片获得了更高的最终速度,但是多次加速后飞片的稳定性和平面性较差。当隔热层厚度大于最佳厚度时,冲击波到达隔热层和飞片界面时,阻抗失配效应作用完全,冲击波压力大于烧蚀压力但是不能持续^[26~28],因为冲击波一部分进入飞片继续传播,一部分反射回隔热层,两部分压力相同;反射回去的冲击波到达激光烧蚀面时,由于在激光烧蚀面上压力只能维持在烧蚀压大小,冲击波将在此卸载并向飞片方向传播卸载波,卸载波将快速通过隔热层和飞片,并可能先于冲击波到达飞片,造成冲击波的衰减,使作用在飞片上的冲击波压力小于阻抗失配效应时的压力值^[28]。

4 结 论

实验结果表明复合飞片能够提高激光驱动飞片加载金属薄板成形的成形能力,同时采用复合飞片成形的工件成形质量更高,因此可以看出复合飞片更加适合激光驱动飞片微成形技术。在 675 ~ 1690 mJ 范围内不同激光能量下的成形实验表明工件的成形能力随着激光能量的增加而近似线性增大,而与单层飞片相比,在高的激光能量下复合飞片成形能力增加幅度更大,这与在高能量下复合飞片增压效果更明显有关。讨论了不同聚酰亚胺薄膜厚度对工件成形的影响,采用 $50\ \mu\text{m}$ 厚度聚酰亚胺的复合飞片的成形能力更高,但是工件成形质量不如 $100\ \mu\text{m}$,可以推断隔热层应该存在一个最佳厚度以最大限度地发挥阻抗失配效应,但还需进一步制作不同厚度的材料进行探讨。

参 考 文 献

- 1 P. Krehl, F. Schwirzke, A. W. Cooper. Correlation of stress-wave profiles and the dynamics of the plasma produced by laser irradiation of plane solid targets[J]. *J. Appl. Phys.*, 1975, **46**(10): 4400~4406
- 2 D. L. Paisley. Confined plasma ablation for shock physics, plate launch, and material dynamics[C]. *SPIE*, 2006, **6261**: 62611Y
- 3 S. Cogan, E. Shirman, Y. Haas. Production efficiency of thin metal flyers formed by laser ablation[J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **97**(11): 113508
- 4 R. Royal, C. Stein, C. Miglionico *et al.*. Laboratory simulation of hypervelocity debris [J]. *International J. Impact Engineering*, 1995, **17**(4-6): 707~718
- 5 D. C. Swift, D. L. Paisley, K. J. McClellan *et al.*. Equation of state of solid nickel aluminide[J]. *Phys. Rev. B*, 2007, **76**(13): 134111~134125
- 6 S. Katz, E. Grossmana, I. Gouzmana *et al.*. Response of composite materials to hypervelocity impact[J]. *International J.*

- Impact Engineering, 2008, **35**(12): 1606~1611
- 7 H. S. Niehoff, F. Vollertsen. Non-thermal laser stretch-forming[J]. *Adv. Mater. Res.*, 2005, **6-8**: 433~440
- 8 H. Gao, C. Ye, G. J. Cheng. Deformation behaviors and critical parameters in microscale laser dynamic forming [J]. *J. Manufacturing Science and Engineering*, 2009, **131**(5): 051011
- 9 Y. Fan, Y. Wang, S. Vukelic *et al.*. Wave-solid interactions in laser-shock-induced deformation processes[J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **98**(10): 104904
- 10 C. Gary, J. P. Daniel, M. Zhou. Microstructure and mechanical property characterizations of metal foil after microscale laser dynamic forming[J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **101**(6): 063108
- 11 J. K. Di, M. Zhou, J. Li *et al.*. Micro-punching process based on spallation delamination induced by laser driven-flyer [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2012, **258**(7): 2339~2343
- 12 Wang Xiao, Yang Kun, Liu Huixia *et al.*. Research and numerical simulation on metal foil forming under laser driven flyer [J]. *J. Plasticity Engineering*, 2009, **16**(1): 25~30
王 霄, 杨 昆, 刘会霞等. 激光驱动飞片加载金属箔板成形及数值模拟[J]. *塑性工程学报*, 2009, **16**(1): 25~30
- 13 Fan Jinrong, Huang Shu, Zhou Jianzhong *et al.*. Analysis and expectation of microscale laser shock forming [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(1): 010003
范金荣, 黄 舒, 周建忠等. 激光微冲击成形技术分析与发展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(1): 010003
- 14 Liu Huixia, Yang Kun, Wang Yun *et al.*. Research on micro-forming experiment of metal foil under laser driven flyer loading method[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1292~1295
刘会霞, 杨 昆, 王 匀等. 激光驱动飞片加载金属箔板成形实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1292~1295
- 15 Wang Xiao, Yang Kun, Liu Huixia *et al.*. Loading mechanism of metal foil forming under laser driven flyer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1569~1574
王 霄, 杨 昆, 刘会霞等. 激光驱动飞片加载金属箔板成形的加载机制[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1569~1574
- 16 H. X. Liu, Z. B. Shen, X. Wang *et al.*. Numerical simulation and experimentation of a novel laser indirect shock forming[J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, **106**(6): 063107
- 17 H. X. Liu, Z. B. Shen, X. Wang *et al.*. Feasibility investigations on a novel micro-embossing using laser-driven flyer [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2012, **44**(6): 1987~1991
- 18 H. X. Liu, H. J. Wang, Z. B. Shen *et al.*. The research on micro-punching by laser-driven flyer [J]. *International J. Machine Tools & Manufacture*, 2012, **54-55**: 18~24
- 19 A. V. Farnsworth, Jr.. Laser acceleration of thin flyers[C]. American Institute of Physics Conference Proceedings, 1996, **370**: 1225~1228
- 20 H. R. Brierley, D. M. Williamson, T. A. Vine. Improving laser-driven flyer efficiency with high absorptance layers[C]. American Institute of Physics Conference Proceedings, 2011, **1426**: 315~318
- 21 W. M. Trott. Investigation of the dynamic behavior of laser-driven flyers [C]. American Institute of Physics Conference Proceedings, 1994, **309**: 1655~1658
- 22 A. M. Frank, W. M. Trott. Investigation of thin laser-driven flyer plates using streak imaging and stop motion microphotography[C]. American Institute of Physics Conference Proceedings, 1996, **370**: 1209~1212
- 23 T. Kadono, M. Yoshida, E. Takahashi. Flyer acceleration by a high-power KrF laser with a long pulse duration[J]. *J. Appl. Phys.*, 2000, **88**(5): 2943~2947
- 24 T. Kadono, M. Yoshida, N. K. Mitani. Flyer acceleration experiments using a KrF laser system with a long pulse duration and pressure and thickness of isobaric zone induced in impacted materials[J]. *Laser and Particle Beams*, 2001, **19**(4): 623~630
- 25 A. Benuzzi, M. Koenig, J. Krishnan *et al.*. Dynamics of laser produced shocks in foam-solid targets[J]. *Physics of Plasmas*, 1998, **5**(8): 2827~2829
- 26 K. A. Tanaka, M. Hara, N. Ozaki *et al.*. Multi-layered flyer accelerated by laser induced shock waves [J]. *Physics of Plasmas*, 2000, **7**(2): 676~670
- 27 Jing Fuqian. Guidance of Experimental Equation of State (Second edition)[M]. Beijing: Science Press, 1999. 59~61
经福谦. 实验物态方程导引(第二版)[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 59~61
- 28 Dimitri Batani, Antinio Balducci, Wigen Nazarov *et al.*. Use of low-density foams as pressure amplifiers in equation-of-state experiments with laser-driven shock waves[J]. *Phys. Rev. E*, 2001, **63**(4): 046410
- 29 Luo Guoqiang. Quasi-Isentropic Compressive Characteristics of W-Mo-Ti-Mg System Flyer-Plate with Graded Wave Impedance [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2004. 10~16
罗国强. W-Mo-Ti-Mg 系波阻抗梯度飞片材料的准等熵压缩特性. [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2004. 10~16

栏目编辑: 韩 峰