

激光冲击铜箔飞片及其复合成形研究

周建忠 高彬* 黄舒 刘会霞 陈寒松 杨晶 左立党 安中伟

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 提出了一种激光冲击形成飞片,进而驱动飞片直接成形工件的复合工艺。结合剪切模具,使用波长 1064 nm 的 Nd:YAG 平顶型短脉冲激光束,在厚度为 50 μm 的铜箔上冲击得到高质量飞片,利用高速飞片直接在成形模具上进行塑性成形,获得了具有良好成形效果的胀形件和环形剪切件。对激光冲击驱动飞片复合成形的机理和性能进行了探讨,并对实验过程中出现的现象及问题进行了初步分析。作为一种高效冲压成形方法,不仅拓展了激光微冲击成形技术的应用领域,也为激光驱动飞片加载金属薄板成形微结构等研究提供了参考。

关键词 激光技术;飞片成形;激光冲击;复合成形

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0703009

Research on Laser Shock Induced Composite Forming of Copper Foil Flyer

Zhou Jianzhong Gao Bin Huang Shu Liu Huixia Chen Hansong
Yang Jing Zuo Lidang An Zhongwei

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

Abstract A composite technology using laser driven flyer to form parts is proposed. Combined with the shearing mould, a top-hat Nd:YAG laser pulse (with 1064 nm wavelength) is used to shock copper foil with the thickness of 50 μm for getting high-quality flyer. The bulging parts and the ring parts with good forming property are finally obtained by high-speed flyer by means of forming mould. The mechanism and performance of laser driven flyer forming technology are studied, furthermore, the phenomenon and problems in the experiments are explored. This composite technology not only expands the application field of laser micro-forming, but also provides reference value on the research of forming microstructure of metal sheet under laser driven flyer.

Key words laser technique; flyer forming; laser shock; composite forming

OCIS codes 140.3430; 140.3390; 140.3538

1 引 言

激光驱动飞片技术的研究始于 20 世纪 70 年代后期,最初是为了引发热核反应^[1~3]。随着激光技术的迅猛发展,激光驱动飞片技术逐渐成为一种重要的动高压加载技术^[4,5]。在 1989 年 Paisley^[6]对激光驱动飞片进行了研究,之后美国圣地亚国家实验室 Lawrence 等^[7]基于激光驱动飞片过程中的能量守恒和动量守恒原则,导出了一种激光驱动飞片运动的格尼(Gurney)模型。日本无机材料研究所

的 He 等^[8]利用调 Q Nd:YAG 激光器驱动 10 μm 厚的铝箔,获得飞片速度达到 13 km/s。国内激光驱动飞片方面的研究工作大多是由中国工程物理研究所开展的,2002 年,谷卓伟等^[9]利用小型激光器在能量 100~300 mJ 范围内成功驱动了厚度 5.5 μm ,直径 0.5~0.8 mm 的铝飞片,最高速度达到 6.6 km/s。2009 年曹燕等^[10]分析了激光能量、脉宽、聚焦光斑和飞片厚度等参数与飞片速度的关系,并提出了提高飞片速度的主要途径等。

收稿日期: 2012-03-02; **收到修改稿日期**: 2012-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(51175235)、江苏省自然科学基金(BK2009219)、江苏省高校自然科学基金重大基础研究项目(08KJA460002)、高等学校博士学科点专项科研基金(200802990004)和江苏省优势学科建设项目(2011)资助课题。

作者简介: 周建忠(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事激光先进制造技术方面的研究。E-mail: zhoujz@ujs.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: gb3015@163.com

激光驱动飞片技术可以用于模拟微流星体/空间碎片对航天器外露材料/部件的超高速撞击,开展撞击累积损伤效应与材料性能退化的研究,是进行航天器在轨寿命预估和空间碎片防护研究的重要技术手段^[10];江苏大学将激光驱动飞片技术引入微成形领域,利用激光驱动高速飞片与工件材料发生碰撞实施动高压加载,当加载的峰值压力超过材料动态屈服强度时,将使得材料在微型凹模内产生超快塑性变形,从而实现工件在微模具中精确成形^[11]。

已有文献对激光驱动飞片技术的研究大多集中在获得高速飞片,或者将其作为一种动高压加载机制引入成形领域,对如何获得具有良好平整性及完整性的高质量飞片研究较少,且对飞片本身成形能力的相关研究鲜有报道。本文在对现有激光驱动高速飞片及激光动态冲压成形技术^[4,5,12,13]分析的基础上,利用高功率短脉冲激光诱导的高压冲击波作为微冲头剪切铜箔靶材得到高速飞片,同时借助成形模具将飞片进行动态冲压成形,从而实现脉冲激光剪切铜箔与飞片直接冲压成形的复合工艺。利用1~4 J的单脉冲激光剪切并驱动直径2 mm、厚度50 μm的铜箔飞片,结合成形模具将获取的高速飞片进行动态冲压成形,最终获得了具有良好成形质量的飞片冲压胀形件以及环形剪切件。在实验的基础上,探讨了激光驱动飞片直接成形的机理和性能,并对实验过程中出现的现象及问题进行了初步分析。

2 激光驱动飞片及其成形原理

2.1 激光驱动飞片的获得

Stein 等^[14]对比分析了不同空间分布激光对发射飞片完整性的影响,得出激光光束空间分布为平顶型或近平顶型的激光有利于发射出完整的飞片。平顶型激光作用到飞片表面容易产生平面冲击波,可将飞片平行驱动出去而不被撕碎;而激光光束空间分布存在强区的激光不能发射出完整飞片,事实上用这类激光发射的飞片在飞行过程中已经破碎^[14,15]。因此本文选用平顶型脉冲激光作为冲击光源,其功率密度 I_0 与脉冲宽度 τ 、单次脉冲能量 E 及光斑直径 d 之间的换算关系式为

$$I_0 = \frac{4E}{\pi d^2 \tau} \quad (1)$$

图1为脉冲激光剪切金属靶材并驱动飞片示意图。利用聚焦后的平顶型脉冲激光照射到金属靶材表面的吸收层上,吸收层吸收激光能量并迅速气化膨胀,随着激光能量的继续吸收而形成高温高压等离子体,并在靶材表面产生高压冲击波,即激光驱动的爆轰波,由于受到约束层的约束作用,等离子体向外膨胀产生的高压爆轰波沿着激光入射方向作用在靶材上,对靶材形成强大的剪切力,当剪切力大于靶材的剪切强度并持续作用一段时间时,靶材将沿剪切模具刃口发生剪切变形断裂而获得飞片,在爆轰波驱动下沿飞行腔高速飞出。

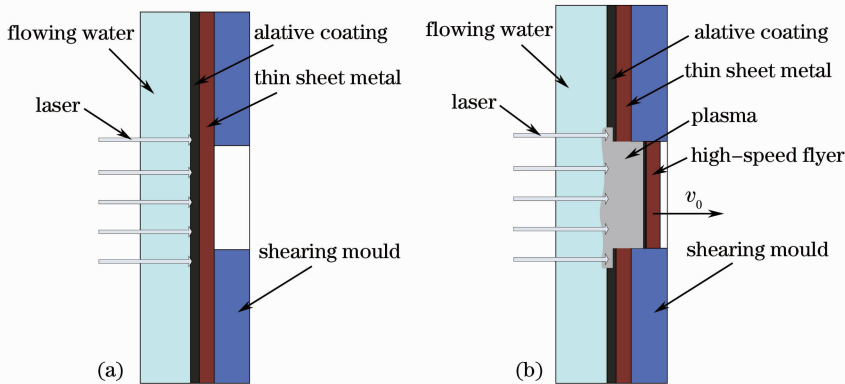


图1 脉冲激光剪切金属薄板并驱动飞片示意图。(a)脉冲激光剪切金属薄板;(b)等离子体驱动飞片

Fig.1 Schematic diagram of pulse laser shearing sheet metal and driving flyer. (a) Pulse laser shearing sheet metal; (b) plasma driving flyer

2.2 激光驱动飞片直接成形

图2为高速飞片成形示意图。激光驱动高速飞片通过飞行腔后与成形模具发生撞击,由于成形模具的约束作用,高速飞片会受到一个反向的动态加载压力,若加载的峰值压力超过飞片材料的动态屈

服极限,将使飞片在成形模具内产生超快塑性变形,成形飞片胀形件;若加载的峰值压力大于飞片材料强度极限,将使飞片在成形模具的刃口处发生剪切断裂,成形环形剪切件,从而实现了脉冲激光剪切驱动飞片及利用飞片成形的复合加工工艺。

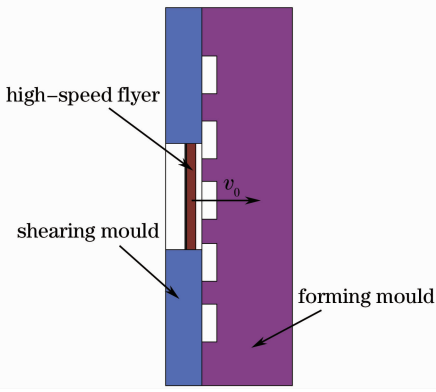


图2 高速飞片成形示意图

Fig. 2 Schematic diagram of high-speed flyer forming parts

3 激光驱动飞片及其复合成形机制

在具有约束模式下的激光冲击过程中, R. Fabbro 等^[16]建立了激光冲击波传播的一维模型, 并对冲击波峰值压力进行估算:

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

式中 $\frac{Z}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}$, 为折合声阻抗, 其中 Z_1, Z_2 为水和铜箔靶材的声阻抗, 分别为 $0.165 \times 10^7 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $4.18 \times 10^7 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; α 为内能转化为热能部分的系数, 一般取 $0.10 \sim 0.15$ 。为了能够获得高速飞片, 要求激光加载的冲击波峰值压力高于靶材的剪切强度极限, 同时低于剪切模具的屈服极限, (1), (2)式对激光能量、冲击靶材及剪切模具等的选取具有指导意义。

激光驱动飞片的过程包括能量吸收层的烧蚀、气化、电离以及冲击波的形成、传播和剪切靶材等, 理论分析过程相对复杂。假定激光驱动飞片的过程是激光首先烧蚀材料并形成等离子体, 然后等离子体膨胀推动飞片运动。如果将等离子体膨胀视为炸药的起爆, 并忽略等离子体对激光的屏蔽, 则激光驱动飞片可以类似炸药驱动飞片, 进而将激光驱动飞片模型进行简化, 研究激光加载功率与飞片运动终点速度之间的相互关系, 基于此模型, Lawrence 等^[7]创建了激光驱动飞片运动的 Gurney 模型。模型中假设等离子体在约束空间内的膨胀速度是线性分布的, 等离子体的动量积分也只限于约束空间内, 且激光驱动飞片过程中遵守能量守恒和动量守恒原则, 则有透明介质约束下飞片运动的终点速度与激光功率密度的换算关系式^[14]为

$$v_0 = \sqrt{\frac{3E_g}{3x_0/(2x_d) - 1}}, \quad (3)$$

式中 v_0 为飞片的最终速度, x_0 为飞片与能量吸收层的原始厚度, x_d 为能量吸收层在激光辐射下的气化厚度, E_g 为沉积在飞片中的 Gurney 能, 且有^[14]:

$$E_g = \frac{I_0 \tau (1-r)}{\rho} - \frac{\varepsilon_d}{\mu_{\text{eff}} \rho} \left[1 + \ln \frac{\mu_{\text{eff}} I_0 \tau (1-r)}{\varepsilon_d} \right], \quad (4)$$

$r, \rho, \varepsilon_d, \mu_{\text{eff}}$ 分别为激光能量损失系数、能量吸收层密度、能量吸收层气化能及有效吸收系数。 μ_{eff} 的计算式为^[14]

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{\mu_a}{1 + k\mu_a \rho (\beta\tau)^{1/2}}, \quad (5)$$

μ_a, k, β 分别为真实吸收系数、调节系数(估算热传导引起的能量耗散)和热扩散系数, 利用(3)~(5)式可以根据激光能量密度计算飞片的最终速度。

引用史建国等^[17]创建的金属板料激光冲孔模型, 将激光冲孔分为冲击波形成、靶材塑性变形、冲塞和柱塞飞离 4 个阶段, 假定在靶材发生整体塑性变形前, 等离子体冲击波将其全部冲量传递给靶材, 使其获得一个初速度, 冲击波作用结束后靶材在惯性作用下运动变形, 当冲塞的移动距离大于靶材厚度时冲塞脱离靶材并形成飞片。冲塞的移动距离等于靶材厚度时, 可以求得一个飞片初始最小极限速度 v_1 ^[17], 表达式为

$$v_1 = \sqrt{\frac{2\tau_y h}{r\rho_t}}, \quad (6)$$

式中 τ_y 为靶材的剪切强度极限, h 为靶材厚度, r 为剪切模具半径, ρ_t 为靶材密度。

激光驱动飞片成形的实质是高速运动飞片与成形模具之间碰撞产生的动态压力致使飞片发生塑性变形, 因此飞片初始速度直接决定飞片本身的成形能力。借鉴高速碰撞动力学理论, 飞片发生塑性变形的必要条件是高速飞片与成形模具碰撞产生的压力要大于飞片的动态屈服极限^[15], 可得到激光驱动飞片进行成形时的最小极限速度计算公式^[18]:

$$v_{\text{PA}} = \sqrt{\frac{\sigma_{\text{st}}^{\text{D}}}{\rho_t}}, \quad (7)$$

式中 $\sigma_{\text{st}}^{\text{D}}$ 为靶材的动态屈服极限。

同时当飞片的碰撞速度增大到某一速度 v_{HA} 时, 碰撞界面产生的压力会远远超过飞片材料强度极限, 从而影响成形件的表面质量甚至使得成形件发生破损。因此必须限定飞片的最大极限速度^[18]为

$$v_{HA} = \sqrt{K_t/\rho_t}, \quad (8)$$

式中 K_t 为靶材的压缩体积模量。

结合(3)~(8)式可以预测不同飞片初始最小极限速度 v_1 下,不同的飞片速度 v_0 对应的冲击结果,如表 1 所示。

表 1 激光驱动飞片成形预测结果

Table 1 Prediction results of laser driven flyer forming

Prerequisite	No flyer	No parts	Can get flyer, complete parts	Broken parts
$v_1 < v_{PA}$	$v_0 < v_1$	$v_1 \leq v_0 < v_{PA}$	$v_{PA} \leq v_0 < v_{HA}$	$v_0 \geq v_{HA}$
$v_{PA} \leq v_1 < v_{HA}$	$v_0 < v_1$	—	$v_1 \leq v_0 < v_{HA}$	$v_0 \geq v_{HA}$
$v_1 \geq v_{HA}$	$v_0 < v_1$	—	—	$v_0 \geq v_1$

4 成形实验及结果

为了便于实验,同时保证剪切刃口处的压力加载能够均匀一致,获得平整性较好的高速飞片,要求光斑直径大于剪切模具通孔直径,且采用平顶型激光脉冲。选用江苏大学激光技术研究所的法国

GAIA 大功率短脉冲平顶型 Nd:YAG 激光器(脉冲宽度 10 ns,波长 1064 nm,最大脉冲能量 12.5 J),聚焦圆形光斑直径 5 mm;采用厚度为 50 μm 的纯铜作为待冲击靶材,平均抗拉强度和屈服强度分别为 240 MPa 和 60 MPa;流水和黑漆分别作为约束层和能量吸收层;剪切模具及成形模具均采用厚度为 0.4 mm 的定制合金钢薄板加工通孔得到,屈服强度 540 MPa。测量仪器采用德国蔡司生产的 AxioCamERc5s 显微镜和真彩色共聚焦扫描显微镜 AxioCSM700。

理论分析表明,不同飞片初始速度 v_0 对最终的成形结果有关键影响,同时在其他条件不变的情况下,初始速度与激光功率密度存在对应关系,因此可以考虑通过对激光功率密度的调节来控制飞片的成形结果。在其他实验条件不变的情况下,主要研究脉冲激光能量对飞片成形结果的影响,表 2 给出了在剪切模具孔径 2 mm,成形模具孔径 1 mm 的条件下,不同脉冲激光能量对应的冲击成形结果。

表 2 成形结果

Table 2 Forming results

Pulse energy /J	1.0	1.5	2.0	4.0
Power density /(GW/cm^2)	0.51	0.76	1.02	2.04
Plasma peak pressure of shock wave /MPa	711	871	1005	1422
Results	No flyer	Bulging parts	Ring parts	Mold damage

图 3 为选用剪切模具直径 1.75 mm,单次能量 2.5 J 时得到的铜箔靶材冲孔后形貌。图中剪切后的铜箔靶材并未发生扭曲变形,图 3(a)为靶材受冲

击正面具有优异的剪切刃口;图 3(b)为靶材的反面冲击效果,可以看到一个明显的拉伸断裂毛刺区;图 3(c)是测量得到的拉伸区域,宽度 48 μm 左右。

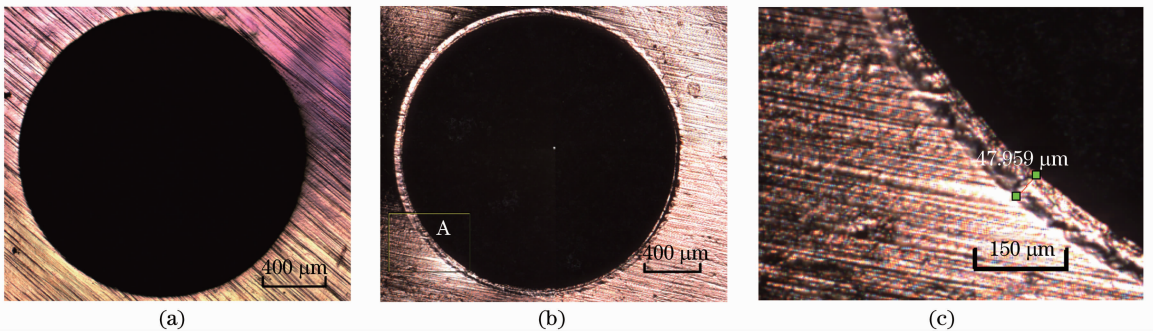


图 3 铜箔靶材剪切后表面形貌。(a)冲孔正面形貌;(b)冲孔反面形貌;(c) A 区局部放大图

Fig. 3 Surface morphology of sheared copper foil. (a) Front morphology of punching;

(b) back morphology of punching; (c) local enlarging graphs of A region

图 4 为脉冲激光能量 1.5 J,剪切模具孔径 2 mm,成形模具孔径 1 mm 时,获得的激光驱动飞片胀形件。从图中看出,成形件具有良好的成形效果,成形特征明显,表面质量优异,成形刃口处光滑过渡,不存在拉裂现象。这表明在合适的工艺参数

下,激光驱动高速飞片具有很好的成形能力,可满足微小尺度金属飞片的动态成形要求。

图 5 为脉冲激光能量 2 J 时,获得的激光驱动飞片环形件。此时成形效果良好,环形件较平整,剪切刃口毛刺较少。这表明在合适的工艺参数下,激

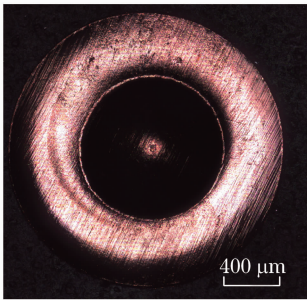
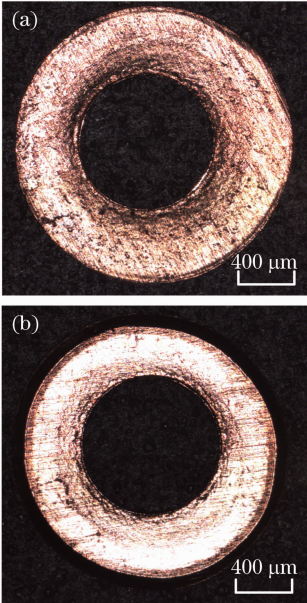


图4 激光驱动飞片胀形件

Fig. 4 Forming bulging parts under laser driven flyer

图5 激光驱动飞片环形件。(a) 环形件正面；
(b) 环形件反面Fig. 5 Forming ring parts under laser driven flyer. (a)
Front morphology of ring parts; (b) back
morphology of ring parts

光驱动高速飞片同时能够满足微小尺度飞片环形件的成形要求。

通过激光冲击飞片复合成形实验结果,可以预测在能够进行飞片复合成形的条件下,飞片成形的最小极限速度与最大极限速度之间存在一个中间速度 v_{MA} ,当飞片碰撞速度 v_0 满足条件 $(v_1, v_{PA})_{max} \leq v_0 < v_{MA}$ 时,激光驱动飞片成形胀形件;当飞片碰撞速度 v_0 满足条件 $v_{MA} \leq v_0 \leq v_{HA}$ 时,激光驱动飞片成形环形件。

5 结 论

1) 提出了一种脉冲激光冲击驱动飞片复合成形工艺,分析了激光驱动飞片复合成形机制,探索了在获得高质量飞片的同时,进行高速飞片冲击复合

成形的工艺方法,并通过实验验证了激光驱动铜箔飞片进行复合成形的可行性。

2) 激光驱动飞片的初始速度对高速飞片的成形结果具有决定性影响,在其他条件不变的情况下,可以通过激光能量控制飞片速度,进而控制飞片的最终成形效果。通过设计合适的加工参数,实现了激光驱动高速飞片的复合成形,获得了较好的实验效果,得到了飞片冲压胀形件以及环形剪切件。

3) 激光冲击驱动飞片复合成形技术可实现微小尺度金属飞片的多步冲压成形,为微塑成形提供了工艺手段。但工艺参数如脉冲激光能量、靶材厚度、剪切模具及成形模具特性等,对成形性能和精度等结果的影响,有待进一步深入研究。

参 考 文 献

- 1 P. Grehl, 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 R. Decoste, S. E. Bodner, B. H. Ripin *et al.*. Ablative acceleration of laser-irradiated thin-foil targets[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1979, **42**(25): 1673~1677
- 3 S. Cogan, E. Shirman, Y. Haas. Production efficiency of thin metal flyers formed by Laser ablation[J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **97**(11): 113508~113513
- 4 Zhang Xingquan, Zhang Yongkang, Zhou Jianzhong *et al.*. Characteristics of deformation of plate by laser peening under the elastic pre-loading condition[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1095~1110
张兴权, 张永康, 周建忠等. 弹性预加载下板料激光喷丸成形特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1095~1110
- 5 Hu Lingling, Zhou Jianzhong, Yang Xiaodong *et al.*. Numerical simulation of laser bending of Al_2O_3 ceramic slice[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1631~1635
胡玲玲, 周建忠, 杨小东等. 激光弯曲陶瓷片的数值模拟[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1631~1635
- 6 D. L. Paisley. Laser-driven miniature flyer plates for shock initiation of secondary explosives[R]. Albuquerque: American Physical Society Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter, 1989. 5
- 7 R. J. Lawrence, W. M. Trott. Theoretical analysis of a pulsed laser-driven hypervelocity flyer launcher [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, **14**: 439~449
- 8 Hongliang He, Takamichi Kobayashi, Toshimori Sekine. Time-resolved measurement of the launch of laser-driven foil plate[C]. AIP Conf. Proc. Shock Compression in Condensed Matter, 2002, **620**(1): 1339~1342
- 9 Gu Zhuowei, Sun Chengwei. Experimental research on hypervelocity flyer driven by mini size laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **29**(5): 407~410
谷卓伟, 孙承伟. 小型脉冲激光器驱动高速飞片的实验研究[J]. *中国激光*, 2002, **29**(5): 407~410
- 10 Cao Yan, Gong Zizheng, Dai Fu *et al.*. Theoretical analysis on the velocity of laser-driven flyer [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2009, **26**(4): 307~311
曹燕, 龚自正, 代福等. 激光驱动飞片速度的理论分析[J]. *航天器环境工程*, 2009, **26**(4): 307~311
- 11 Liu Huixia, Yang Kun, Wang Xiao *et al.*. Research on

- mechanism of metal foil forming under laser driven flyer[J]. *The Chinese Mechanical Engineering*, 2009, **20**(7): 865~868
 刘会霞, 杨 昆, 王 霄等. 激光驱动飞片加载金属箔板成形机理研究[J]. 中国机械工程, 2009, **20**(7): 865~868
- 12 Zhou Jianzhong, Zhang Yongkang, Zhou Ming *et al.*. Theoretical analysis on deformation of sheet metal under one laser shot loading[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(1): 135~138
 周建忠, 张永康, 周 明等. 单次激光冲击下板料变形的理论分析[J]. 中国激光, 2005, **32**(1): 135~138
- 13 Zhou Jianzhong, Ni Minxiong, Zhang Yongkang *et al.*. Theoretical investigation and finite element simulation of laser peen forming of metal plate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 288~294
 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
- 14 C. Stein, R. Roybal, P. Tlomak *et al.*. A review of hypervelocity debris testing at the air force research laboratory [J]. *Space Debris*, 2000, **2**(4): 331~356
- 15 Dai Fu, Gong Zizheng, Cao Yan *et al.*. Experiment study on technologies for laser-driven flyer hypervelocity launch[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(12): 3011~3014
 代 福, 龚自正, 曹 燕等. 激光驱动飞片超高速发射技术实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2010, **22**(12): 3011~3014
- 16 R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard *et al.*. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry [J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(2): 775~784
- 17 Shi Jianguo, Zhang Yongkang, Gu Yongyu *et al.*. Study on sheetmetal punched by laser shock waves[J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(6): 639~645
 史建国, 张永康, 顾永玉等. 金属板料激光冲孔成形技术研究 [J]. 激光技术, 2007, **31**(6): 639~645
- 18 Ma Xiaoqing, Han Feng. High-Speed Impact Dynamics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998
 马晓青, 韩 峰. 高速碰撞动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998

栏目编辑: 宋梅梅