

激光冲击成形研究进展

季忠 刘韧 孙胜

(山东大学材料科学与工程学院, 山东 济南 250061)

摘要 激光冲击成形(LPF)技术利用激光与物质相互作用时产生的等离子体冲击波进行塑性变形,它结合了激光冲击强化与塑性成形的优点,在大型复杂曲面零件成形、微机电系统结构元器件制造、装配、整形等领域具有深远应用前景。介绍了LPF的历史背景,根据变形模式将其分为凸面成形和凹面成形两大类,分析了成形机理和技术优势。在几何形状、材料性质、成形缺陷、分析手段等方面,阐述了其研究现状,并就其存在的主要问题和研究动态进行了深入讨论,指出了发展过程中面临的机遇和挑战。

关键词 塑性成形; 激光冲击成形; 激光喷丸成形; 板材; 微成形

中图分类号 TN249

OCIS 140.3460 140.3538

文献标识码 A

Advances in Laser Peen Forming

Ji Zhong Liu Ren Sun Sheng

(School of Materials Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)

Abstract Laser peen forming (LPF) is a novel technology in which the plastic deformation is caused by plasma shock waves generated in the interaction of the laser beam and the target. It combines the advantages of laser shock peening with plastic forming, and has great potentials in many fields such as large complex surfaces forming, micro-mechanical components manufacturing, packaging and adjusting. The historical background of laser peen forming processes was reviewed, the deformation models of the processes were divided into convex and concave types, and then their forming mechanisms and characteristics were analyzed in detail. The geometric forms, material natures, forming defects during LPF and the analytical techniques for LPF were summarized. The focus of debate, opportunities and challenges with the development of this technology were also discussed.

Key words plastic forming; laser peen forming; laser shock forming; sheet metal; microforming

1 引言

根据变形过程中的主要驱动力,激光诱发的材料塑性成形技术可以分为两大类:一是基于连续或脉冲激光的热效应所导致的热应力进行的塑性成形,称为激光热应力成形,通常直接称之为激光成形(LF);二是基于脉冲激光诱发的等离子体爆炸所致的冲击波进行的塑性成形,称为激光冲击成形(LPF)、激光动态成形(LDF),或非热激光成形。激光冲击成形源于1964年, Frank Neuman^[1]对金属受到高功率脉冲激光冲击所形成的凹坑的研究。1969年, N. C. Anderholm^[2]证实靶材表面沉积上一层铝膜,并用透明材料阻碍等离子体的膨胀,可以强化冲击效果。1972年, J. D. O'Keefe等^[3]在实验中观察到脉冲激光照射板材时产生的等离子体爆炸可使铝箔和不锈钢板产生宏观塑性变形,并从应力波的角度对变形过程和变形机理进行了深入研究。2001年, M. A. Meyers等^[4]研究了单晶铜在激光冲击时的塑性变形行为,分析了位错产生机制、位错密度与冲击波压力的关系。但至此人们并没有将激光冲击作为主动的金属塑性成形手段。

一个重要的变革发生在2002年, Hackel Lloyd等^[5,6]提出用激光冲击来进行板料塑性成形的原理和方法,同期周建忠等^[7~9]从工艺实验、数值模拟、理论推导方面获得了系列成果。M. Geiger等^[10]用高速相机拍摄到金属箔弯曲过程中的等离子体云,分析认为箔片发生弯曲是热应力和等离子体冲击的双重结果。

收稿日期: 2009-07-05; **收到修改稿日期:** 2009-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(50775131)、教育部留学回国人员科研启动基金和山东省自然科学基金(Y2007F55)资助课题。

作者简介: 季忠(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事金属塑性成形及多尺度多物理场数值模拟方面的研究。

E-mail: jizhong@sdu.edu.cn

本文彩色效果详见中国光学期刊网(www.opticsjournal.net)相关文献。

2004年, Y. Fan等^[11~13]完成了超薄板材的微弯曲,并将其成形方法称为激光微冲击成形(μ LPF)。Gary J. Cheng等^[14,15]进一步扩展了激光冲击成形工艺。K. R. Edwards等^[16,17]研究了激光冲击所致的弯曲工艺及变形组织,并与激光热应力成形进行了对比,发现激光冲击时热影响区明显减轻更适宜于高精度成形。J. L. Ocaña等^[18]研究了Nd:YVO₄激光冲击50 μ m厚的悬臂不锈钢板梁的变形情况,发现整体变形量是光斑处的局部凹面变形和板梁宏观弯曲变形的复合。为了避免激光直接作用于变形体时可能产生的烧蚀等现象,以获得更好的表面质量,K. Okada等^[19,20]采用激光驱动飞片加载完成了金属箔的塑性成形。在工程应用方面,2008年已有关于采用Livermore的技术成形波音747-8新型飞机复杂曲面机翼以及进行微机电系统结构元器件整形的报道^[21]。

由于借助于模具来完成的传统塑性成形并不能完全满足现代生产模式的变化,特别是近年来微机电系统的迅猛发展,因此,以激光成形为代表的新型塑性成形方法和理论是目前非常活跃的研究领域。本文阐述了激光冲击成形的变形模式和机理,在工艺实验、理论研究等方面,对该技术的研究现状和存在的问题进行了深入分析,并结合作者在微冲击成形方面的研究成果对发展趋势提出了自己的见解。

2 机理与特点

2.1 机理

2.1.1 凸面成形与凹面成形

超过某个阈值强度的脉冲激光照射材料表面时,将会产生等离子体,等离子体进一步吸收激光能量而爆炸,并在材料表面形成冲击波压力。如果该压力达到材料的动态屈服极限,则会使材料产生塑性变形,如图1所示。为了提高材料对激光能量的吸收率,防止材料表面烧蚀,并且更易形成等离子体,常在材料表面涂覆能量吸收层(如镀膜或黑漆)。能量吸收层外常覆盖约束层(如水或玻璃),以阻碍等离子体的膨胀,提高冲击波的峰值压力并延长其作用时间,强化等离子体爆炸时对材料的冲击作用,使冲击波压力更多地朝向材料表面。由于等离子体对激光束的屏蔽作用,激光冲击成形的本质主要体现为冲击波的力效应而不是激光辐照的热效应。

在不同的工艺条件下,材料在激光冲击时会表现出不同的变形模式。就板材而言,在接受单点激光冲击时的变形模式与机械喷丸成形类似^[12]。如图1(c)所示,当冲击面上的材料流动大于板材背面的材料流动时,塑性区主要集中在冲击面附近,愈靠近板材背面,塑性区愈小,冲击区域的塑性变形使该区域的表面积增大,并导致压应力,从而使板材产生面向激光束的拱曲,称之为凸面成形。而对于较薄的板材,激光冲击时的塑性区域易于贯穿整个厚度方向,板材背面的材料流动大于冲击面的材料流动,或二者近似,此时则产生背离激光束的凹面成形,如图1(d)所示。无论是凸面成形还是凹面成形,其宏观形状可以表现为二维弯曲,也可以是三维的凹陷或突起。

以二维弯曲成形为例,激光冲击时的整体变形量 α_f 由两部分构成,如图2所示。其一,在冲击面形成的局部塑性区所造成的内部横向压应力引起的反向弯曲变形 α_p (属凸面成形, α_p 取负值)。其二,激光冲击时纵向冲击力对板材所形成的宏观正向弯曲变形 α_m (属凹面成形, α_m 取正值),此时,即使板材下方没有刚性支撑,但由于冲击力的加载区域比较小,而加载速度又非常高,所以距离光斑较远处的板材处于弹性变形、或刚性移动、或相对静止状态,因此 α_m 的形成类似于用机械力进行的三点折弯过程。如果这个变形是纯弹性的,其变形量以0计。显然, $\alpha_f = \alpha_p + \alpha_m$ 。当 $|\alpha_p| \leq |\alpha_m|$ 时, α_f 为正值,板材最终表现为凹面成形,如图2(a)所示;当 $|\alpha_p| \geq |\alpha_m|$ 时, α_f 为负值,则呈凸面成形,如图2(b)所示。激光冲击所致的纵

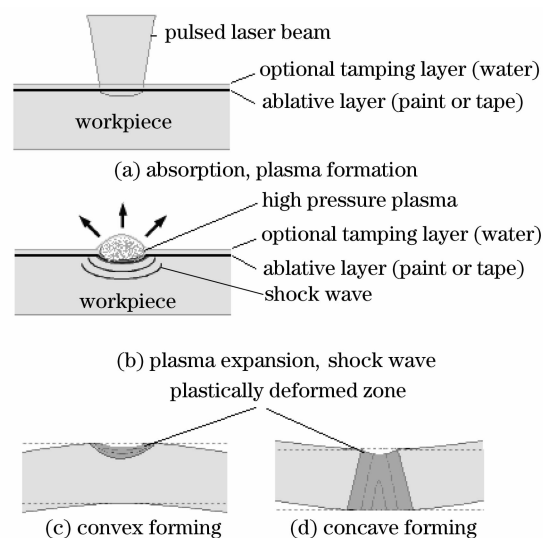


图1 激光冲击成形的机理

Fig. 1 Mechanism of laser shock forming

向载荷、横向压应力、板材的弯曲力矩、惯量等因素,共同决定了板材变形的方向和幅度。

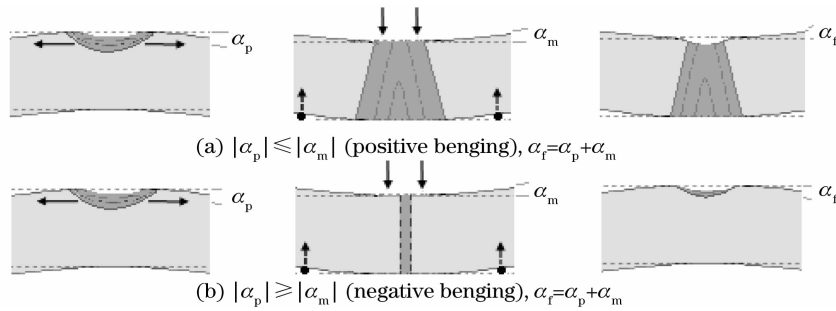


图 2 凸面成形与凹面成形的合成

Fig. 2 Combination of convex forming and concave forming

2.1.2 复杂变形模式

除了单一的凸面成形和凹面成形外, K. Kondo 等^[22]在 1981 年发现机械喷丸成形还存在更为复杂的变形形态。激光冲击成形也是如此。图 3 是用有限元法计算得到的,两端受约束的板材在激光冲击力作用下的两种复杂变形模式,称为带局部凸面的凹面成形和带局部凹面的凸面成形。图 4 为后者的成形过程示意图。复杂变形模式可以发生在多次冲击、板材边缘受到夹持约束、且光斑边缘与夹具有足够距离(或光斑直径小于凹模直径)的情况下。当板材受到激光冲击,并且产生凹面成形的过程中,约束端必然产生向上的弯矩以抵抗这种凹面成形,同时,这个向上的弯矩还可以促使凸面成形的产生和发展。如果板材弹性较好而产生鼓荡,或板材继续受到激光冲击,在冲击力和向上的弯矩的综合作用下,中心区域就有可能出现凸面成形,并叠加在初始的凹面形状上,最终形成带局部凹面的凸面成形。显然,带局部凹面的凸面成形中,其凹面部分往往是在变形过程的初期形成的。同理,带局部凸面的凹面成形中,凸面部分的形成也是如此。

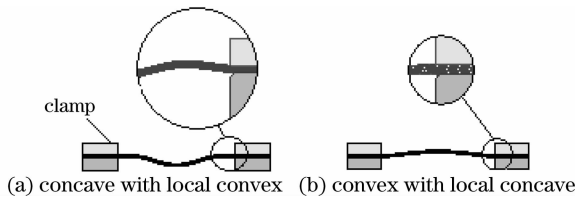


图 3 复杂变形模式

Fig. 3 Complex deformation types

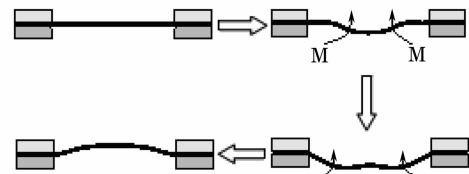


图 4 带局部凹面的凸面成形过程

Fig. 4 Forming process of convex with local concave

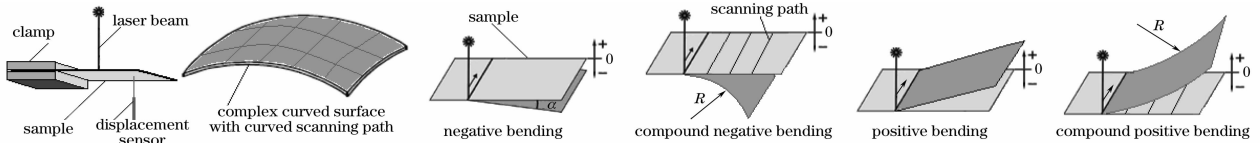


图 5 弯曲及复合弯曲成形

Fig. 5 Bending and compound bending

2.1.3 弯曲及复合弯曲

图 2 在板材很窄的情况下,可以由点光源或线光源进行单点冲击来完成^[10,12,23,24]。当板材宽度较大,一

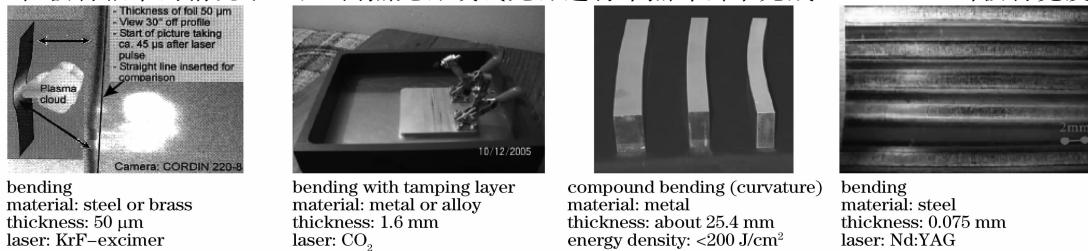


图 6 弯曲及复合弯曲成形的零件

Fig. 6 Bending and compound bending samples

个光斑不能覆盖板材的宽度范围时,可以采用按一定路径进行逐点冲击的方式进行成形^[16,17]。按复杂的路径进行逐点冲击,可以获得复杂形状的曲面,如图5所示。为了施加约束层以提高冲击效果,可以将板材浸在水槽中^[17],也可以喷上蒸馏水形成流动的水幕。图6为采用激光冲击成形制造的弯曲及复合弯曲件^[5,6,10,17,25]。

2.1.4 拉深与胀形

通过适当的工艺参数,并借助于凹模的作用,图2所示的纵向冲击力所形成的凹面变形量可以远远大于横向压应力引起的凸面变形量。此时,激光冲击可以用来进行板材的拉深和胀形^[7,26~28],或称激光冲压,其工艺过程如图7所示^[29,30]。与传统冲压成形类似,如果板材的毛坯足够大,或通过压边圈施加的压边力足够大,在等离子体爆炸过程中,只有凹模孔内的材料发生塑性流动,并通过板材的减薄实现凹面成形,此为胀形过程。如果板材的塑性流动也发生在凹模孔外的突缘区,并随着变形过程进行流向凹模孔内,则为拉深成形。如果凹模孔的下端是完全开放的,其拉深件或胀形件的形状通常为筒形或近似球形;如果凹模孔下端封闭(可带透气孔),则可得到与封闭面轮廓吻合的形状。图8为激光冲击成形的拉深件和胀形件^[4,15,27,31]。

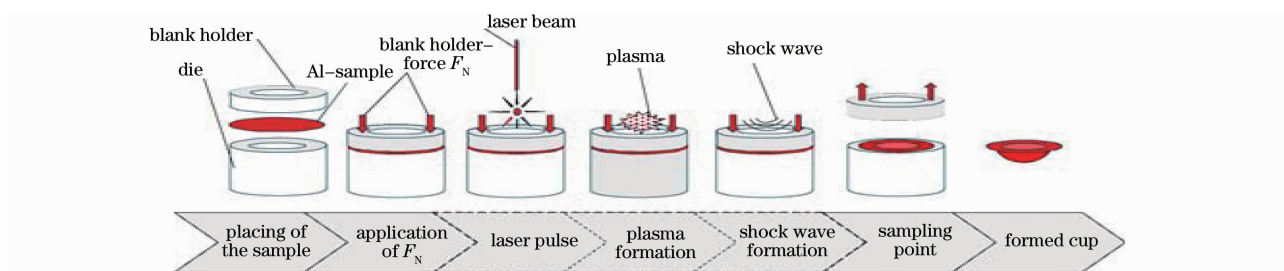


图7 激光拉深与胀形原理

Fig. 7 Principle of laser deep drawing and bulging

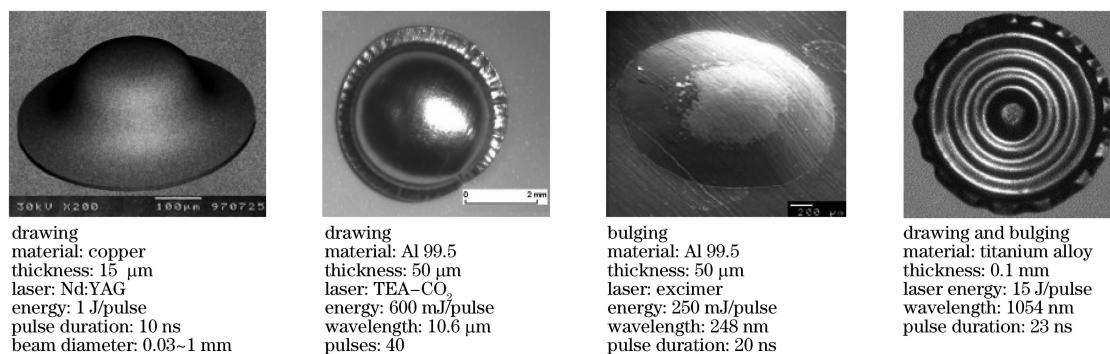


图8 激光拉深及胀形件

Fig. 8 Laser deep drawn and bulged parts

2.1.5 冲压式渐进成形

2002年,周建忠等^[7]设想采用冲压式渐进成形的方式制造大型复杂零件,其原理类似于成形锤成形法^[32]。如图9所示,首先将欲得到的三维零件按等高线分为一系列的二维形状,然后采用单点步进的激光冲击方式,冲击点按等高线运动,进行逐层成形。对各冲击点搭接处形成的局部凸起,再进行补冲整形,最后得到所要求的形状和尺寸。针对特别复杂的零件,可在板材底部施加活动支撑作为移动凹模,并通过移动凹模的仿形,来提高成形精度。但目前未见采用该方法进行实际加工的报道。

2.1.6 其他

作为激光拉深与胀形技术的一种变体,还有一种通过激光驱动飞片进行冲击成形的方法,这种方法是利用飞片与零件的撞击取代激光与零件的直接作用,在进行塑性成形和冲击强化的同时,保证零件表面不被烧

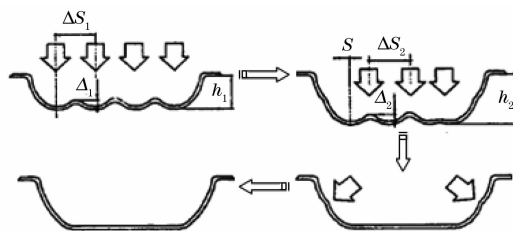


图9 冲压式渐进成形示意图

Fig. 9 Incremental laser peen forming

蚀。该方法需要添加飞片层,并在凹模顶部设置飞行腔,以使飞片产生足够惯量,如图 10 所示。研究表明,其成形能力能够高于激光直接冲击成形^[20]。

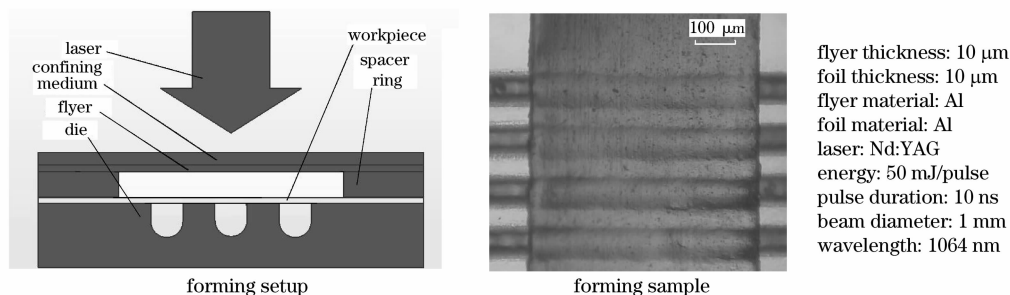


图 10 激光驱动飞片进行冲击成形

Fig. 10 Shock forming by laser driven flyer loading

在微电子行业中,表面涂层有时会使基材产生内应力并导致基材变形,此时可用短脉冲激光有选择性地烧蚀部分涂层使之快速等离子体化,以使其内应力产生释放,从而达到零件整形的目的^[24],如图 11 所示。类似技术在微电子行业的另一项应用是零件的微装配^[33],如图 12 所示。首先将欲装配的零件阵列通过一个烧蚀层固定在透明的载体上,将载体及零件阵列与另外的零件阵列上下对正,然后通过激光照射使烧蚀层气化,并借助等离子体的喷射所产生的压力作用,将零件阵列与透明载体分离,并将欲装配的零件阵列装配在下方的另一个零件阵列上。

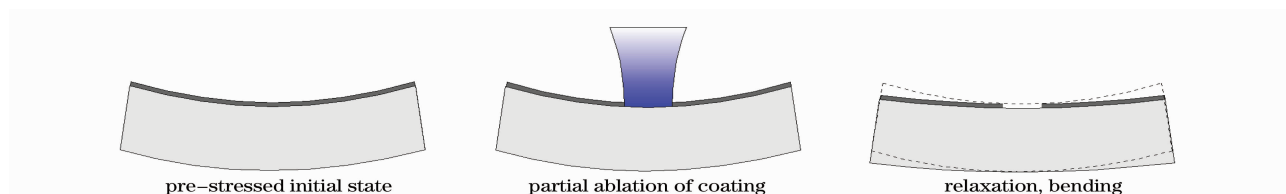


图 11 通过烧蚀预应力涂层进行零件微整形

Fig. 11 Micro adjustment by ablation of pre-stressed coating

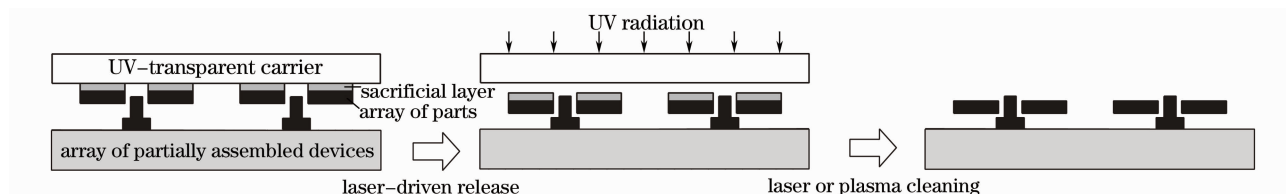


图 12 激光辅助装配过程

Fig. 12 Laser assisted assembly process

2.2 技术特点

1) 激光冲击成形属无模或半模成形。激光束作为柔性冲头能使板材达到高成形精度和对异形凹模的高覆模性,同时避免微成形中最棘手的凸模制造、间隙保证、行程控制以及凸模与板材间的摩擦等问题。

2) 属高应变率成形(大于 10^5 s^{-1})。成形速度快,同时由于惯性效应和率相关的材料本构行为的变化,与准静态成形相比,材料的成形极限明显提高^[34]。材料在微尺度时由于晶粒数量的减少往往呈现低可成形性,因而激光微冲击成形是目前微塑性成形领域的一个重要方向。

3) 利用等离子体爆炸诱发的力效应而非热效应进行成形,避免了激光热应力成形时,因剧烈温度梯度导致的不良组织和性能,同时由于应力波前沿所引起的大量位错和严重塑性变形,反而能使组织结构均匀和细化^[12,14,26,34]。

4) 由于一次激光冲击(或单脉冲冲击)的变形量通常很小,因此,激光冲击成形往往是多脉冲在固定点或沿某条路径连续冲击的结果,因而属渐进式成形方式,具有较好的可控性。

5) 继承了激光冲击强化和塑性成形技术的优点,在材料表面能够形成残余压应力,因而显著提高零件

的硬度、耐磨性、耐腐蚀性和疲劳寿命^[6,34~36]。

6) 所适用的材料类型多,可以加工硅等金属材料,也可加工铝、铜、钛、铁等金属基材料^[37]。

7) 工艺范围广,加工柔性大。通过采用不同形状凹模或按不同路径进行渐进成形,可以制造简单弯曲件、复杂曲面的异形件、轴对称或非轴对称的拉深及胀形件等。

8) 能够进入常规工具无法进入,或无操作空间的区域进行加工成形。在微零件的精细成形、微装配、或装配后微零件的整形上具有其独特性^[23]。

3 工 艺

3.1 工艺因素

激光冲击成形的工艺因素主要包括激光参数、工艺条件和材料特征 3 大类。

1) 激光参数主要指所用激光器类型、激光波长 λ 、激光能量 E 、脉冲宽度 τ 、冲击次数、冲击频率、光斑大小如直径 d 、功率密度 I_0 、光斑内的能量分布等,且存在

$$I_0 = 4E/(\pi d^2 \tau), \quad (1)$$

当 I_0 达到某个阈值强度时,才能产生高压等离子体,其形成的冲击波峰值压力 P_{\max} 可以表示为^[38]

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

式中 $Z=1/Z_1+1/Z_2$, Z_1 和 Z_2 分别为材料及约束层的冲击波阻抗, α 为相关系数。

一般认为,冲击波压力的加载遵循两条函数曲线:其一是时间分布曲线 $P(t)$,一般认为与示波器记录的激光脉冲信号曲线基本一致,且约束模式下冲击波压力的作用时间大约为激光脉冲宽度 t_p 的 2~3 倍。当 $t=0$ 时,压力值 $P(0)=0$;在 t 时刻,压力值为 $P(t)$;在 $t=0.6t_p$ 时,压力值达到峰值 P_{\max} ;当 $t=1.2t_p$ 时, $P(t)$ 衰减为 $P_{\max}/2$;当 $t=3t_p$ 时, $P(t)$ 恢复为 0^[39]。第二条函数曲线是空间分布曲线 $P(r)$,对于高斯光,沿板材表面法向作用于板材表面^[37]时,

$$P(r,t) = P(t) \exp[-r^2/(2R^2)], \quad (3)$$

式中 R 为光斑半径, r 为离光斑中心的距离。

根据材料力学原理,单次激光冲击时圆板的胀形高度 w 可以表示为^[26]

$$w = \frac{t(3 \ln a - 1)R_0}{m(3R_0 - a)} (P_m - P_0) \left(1 - \frac{r}{R_0}\right) t^2, \quad (4)$$

式中 $P_0 = \frac{3(\ln a - 1)h^2}{2(3 \ln a - 1)a^2} \sigma_s$, $a=2R$, R_0 为模孔半径, h 为板材厚度, σ_s 为屈服应力, m 为板材质量。 P_m 为等效冲击载荷,它必须大于某临界值 P_0 。对于多次冲击成形,变形量与冲击次数呈近似线性关系,但第一个脉冲可达总成形高度的 60%^[27],如图 13 所示。

对于移动光源所致的冲击成形,激光参数还包括扫描速度、扫描路径、扫描次数等。图 14 为不同的能量密度下扫描次数与弯曲角度的关系^[40],可见,在相同扫描次数下,弯曲角度随能量密度的增大而增大。Manfred Dirscherl 等^[41]发现,对于不同的材料,弯曲角度随扫描速度的增大而减小,如图 15 所示。虽然(2)式并没有体现冲击波压力峰值与激光波长及脉冲宽度的相关性,但实验表明,采用长波长的激光束,利于增加变形量,如图 16 所示^[40]。

2) 工艺条件包括在板材表面所施加的约束层及能量吸收层的材料和厚度、板材的夹持条件、压边力、凹模直径及形状等。由(2)式可知,冲击波的峰值压力与约束层声阻抗的平方根成正比。约束层的厚度有合适范围,太薄易被击穿,太厚则会消耗过多能量。H. Schulze

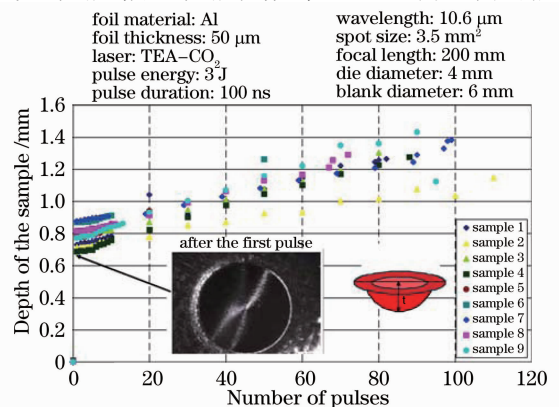


图 13 脉冲次数与成形高度的关系

Fig. 13 Influence of the number of pulses on dome depth

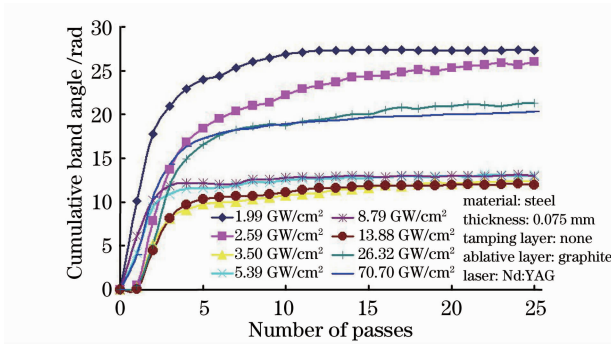


图 14 能量密度与弯曲角度的关系

Fig. 14 Comparison of energy density on the bending angle

Niehoff 等^[27]用波长为 248 nm 的准分子激光(脉宽 20 ns, 功率密度 6.4 GW/cm², 脉冲能量 250 mJ), 冲击 50 μm 厚的 Al 99.5 板材, 没有采用约束层时, 得到的工件是顶端有尖峰的不均匀形状, 并产生破裂。当采用 2 mm 厚的蒸馏水作约束层时, 工件形状规则且获得更大的变形量, 但由于此时激光束要穿过不同介质, 应注意调整激光束的离焦量。能量吸收层也有合适厚度, 太薄会将板材烧蚀, 太厚过多吸收激光能量, 影响冲击效果。G. J. Cheng 等^[42]研究了能量吸收层材料、厚度对冲击波压力及靶材变形的影响, 发现应变率随吸收层厚度增长直至不再改变, 表明其存在饱和厚度, 超过这个厚度时峰值压力(应变率)与厚度无关, 小于饱和值时, 位错增殖速度随厚度增大而加快。他们还发现, 用波长为 248 nm 的准分子激光(脉宽 30 ns, 功率密度 4 GW/cm²)冲击硅靶材, 当用厚度为 0.2 mm 的铜箔作为吸收层时, 冲击波峰值压力可达 22 GPa, 用同样厚度的铝箔时, 其值为 16.5 GPa, 显然, 铜箔的冲击效果要比铝箔的好。Kenneth Edwards 等^[25]研究了激光冲击成形时能量吸收层的烧蚀情况, 用波长为 1064 nm 的 Nd:YAG 激光, 扫描带有 7 μm 厚的石墨涂层的钢板, 发现第 1 次激光扫描后石墨层减薄 3.855 μm, 5 次扫描后石墨层完全烧蚀。

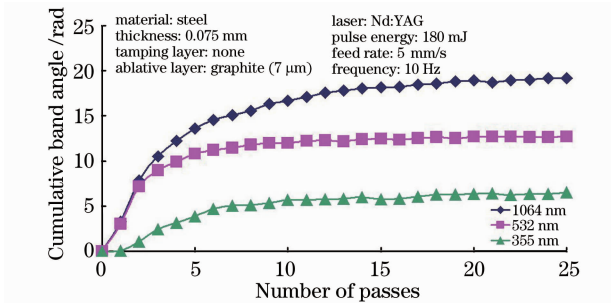


图 16 激光波长与弯曲角度的关系

Fig. 16 Comparison of wavelength for laser peen forming

H. Schulze Niehoff 等^[15]研究了压边力与拉深比的关系, 发现与传统冲压成形类似, 过小的压边力可能造成起皱, 反之则可产生破裂, 如图 17 所示。但在其有限的实验中, 并未发现变形量与凹模直径间的规律^[27]。

3) 材料特征包括材料的几何参数、力学性能等, 如板材的厚度等几何尺寸、板材的形状、材料密度、泊松比、弹性模量、硬化指数、屈服强度等。图 18 为测得的不同厚度板材在相同工艺参数下的变形情况, 厚度小的板材变形量大^[43], 这与(4)式的规律基本一致。Frank Vollertsen 等^[29]研究了厚度均为 50 μm 的不锈钢、铜、铝箔的激光冲击成形, 发现在相同工艺参数下, 其变形量依次增大, 说明不锈钢比铜和铝更难进行冲击成形, 但抗破裂的能力也更强。但是, 对于微尺度的激光冲击成形, 在高应变率下不同初始组织(如晶粒度)材料的组织转变和力学行为, 还缺乏足

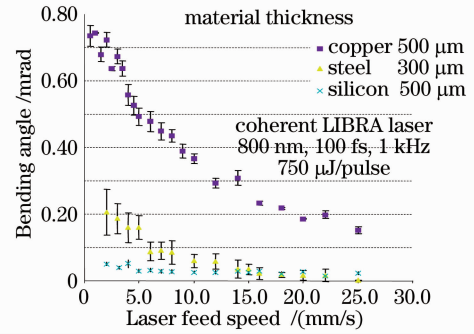


图 15 扫描速度与弯曲角度的关系

Fig. 15 Comparison of feed speed on the bending angle

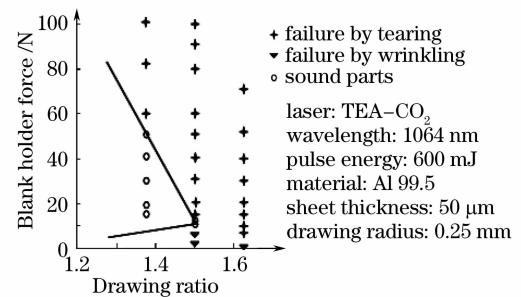


图 17 激光拉深时的工艺窗口

Fig. 17 Process window for laser deep drawing

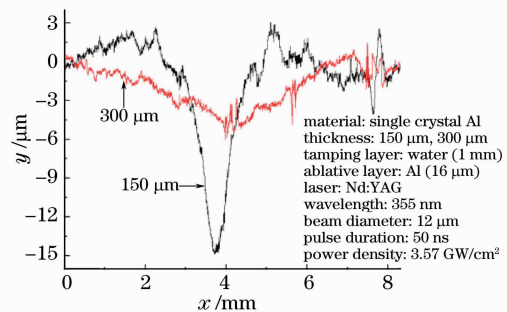


图 18 厚度为 150 μm 和 300 μm 的板材的变形

Fig. 18 Curvature measurement for 150 μm and 300 μm samples

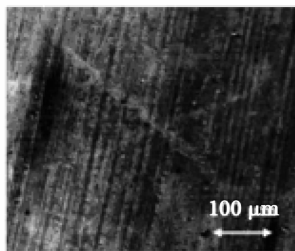
够的分析数据^[14]。表 1 汇总了有关激光冲击成形实验的一些典型技术参数。

表1 激光冲击成形实验典型参数
Table 1 Typical processing parameters reported for laser peen forming

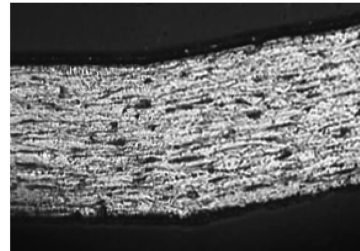
Forming type	Material	Sample thickness / μm	Tamping layer	Ablative layer	Laser type	Power density /(GW/cm^2)	Pulse duration /ns	Beam size / μm	Wave Length /nm	Laser power / μJ	Ref.
Bending	Pure copper	100	Water (3mm)	Aluminum foil (16 μm)	Nd :YAG	4.95	50	12	355	280	11
Bending	Copper	100	Water (1mm)	Aluminum foil (16 μm)	Nd :YAG	3.57/4.95	50	12	355	202/280	12
Bending	Single crystal aluminum	150/200/300	Water (1mm)	Aluminum foil (16 μm)	Nd :YAG	3.57/4.95	50	12	355	202/280	43
Bending	Steel	75	None	Graphite (~10 μm)	Nd :YAG	4.8/5.8 /6.5	5~10	650/700	355/532/1064	1.8 $\times 10^5$	16
Bending	Stainless steel	50	Air	None	Nd :YAG		9.4	350	1064	3.3 $\times 10^3$ /~1.05 $\times 10^5$	18 /23
Drawing	Aluminum	50	None	None	TEA-CO ₂				10640	6 $\times 10^5$	15
Stretching drawing	Aluminum/ stainless steel	25/50	Water (0/2mm)	None	TEA-CO ₂	1	80		10640	1.5 $\times 10^6$	27
Stretching drawing	Aluminum/ copper/ stainless steel	20/50	None	None	TEA-CO ₂		100	~2 $\times 10^3$	10640	3 $\times 10^6$	29
Bulging	Aluminum/ stainless steel	250/410/630/760	Plexiglas /fused silica	Aluminum ($\leq 1\mu\text{m}$)	Neodymium	0.92~1.7	50/55 /105	(6~7.5) $\times 10^3$			3
Bulging	Copper	15	Water	Black painting (~20 μm)	Nd :YAG		10	~500		$\leq 1\times 10^6$	14 /28
Bulging	Steel (304/40Cr)	600/800					20	7 $\times 10^3$ /5 $\times 10^3$		1.76 $\times 10^7$ /3.05 $\times 10^7$	7
Bulging	Titanium (TA2)	400			Nd :YAG		20		1064	3.5 $\times 10^7$	50

3.2 组织与性能

H. Schulze Niehoff 等^[27]通过 TEA-CO₂ 激光(脉冲宽度 80 ns,波长 10640 nm,功率密度 1 GW/cm²)冲击 50 μm 厚的铝箔,发现铝箔表层未呈现明显烧蚀迹象,如图 19 所示。K. R. Edwards 等^[40]用 Nd:YAG 激光(脉冲宽度 8 ns,波长 1064 nm,功率 4 W),以速度 5 mm/s 扫描冲击 0.075 mm 厚的钢板,也未发现板料微观组织的



laser: TEA-CO₂
wavelength: 1064 nm
pulse duration: 80 ns
power density: 1 GW/cm²
pulse energy: 1500 mJ
material: Al 99.5
sheet thickness: 50 μm
water height: 0 mm
defocussing: 0 mm



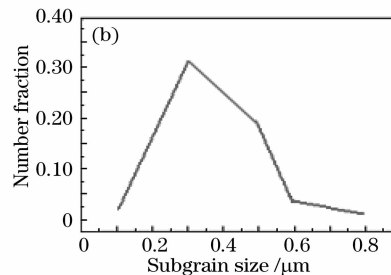
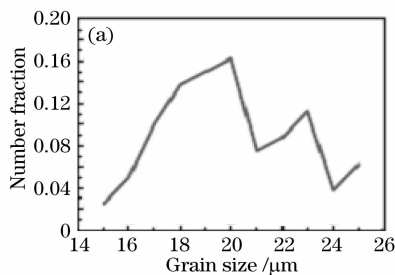
material: steel
thickness: 0.075 mm
tamping layer: none
ablative layer: graphite (7 μm)
laser: Nd:YAG
wavelength: 1064 nm
pulse duration: 8 ns
power: 4 W
feed rate: 5 mm/s

图 19 铝箔用 CO₂ 激光冲击后的表面形貌

图 20 激光冲击成形后的组织形态

Fig. 19 Micrograph of an aluminum foil with CO₂ laser treatment

Fig. 20 Micro structure of laser peen forming sample



material: copper
thickness: 15 μm
laser: Nd:YAG
energy: 1 J/pulse
pulse duration: 10 ns
beam diameter: 0.03~1 mm
before LPF, the sample was annealed at 200 $^{\circ}\text{C}$ for 1 h

图 21 激光冲击成形前(a),后(b)晶粒度变化

Fig. 21 The grain size before LPF (a) and after LPF (b)

改变,如图 20 所示。这说明激光冲击成形属冷成形范畴。Gary J. Cheng 等^[28]则发现,用 Nd:YAG 激光(脉冲能量 1 J,脉冲宽度 10 ns)对厚度为 15 μm 的铜箔进行激光拉深成形后,材料的晶粒明显细化,并且微观硬度得到提高,如图 21,22 所示,并认为冲击后的亚晶结构和晶粒尺寸分布与初始晶粒度无关,只与激光冲击状况有关,位错密度增长率与应变率成比例^[42]。Youneng Wang 等^[43,44]运用电子背散射衍射(EBSD)观察波长为 355 nm 的 Nd:YAG 激光(脉冲宽度 50 ns,功率密度 3.57 GW/ cm^2)冲击厚度为 150 μm 和 300 μm 单晶体铝箔,发现激光冲击后的晶格旋转量在板材上下表面是不对称的,下表面主要表现为整体变形带来的斜度,且材料厚度越大晶粒旋转量越小。

3.3 残余应力

Y. Wang 等^[12]发现,在凸面成形时,板材冲击面及其背面均保持残余压应力,但在凹面成形时,冲击面受残余拉应力,背面则受残余压应力,如图 23 所示,此时,激光冲击成形能够提高材料的抗疲劳性能。Gray J. Cheng 等^[28]在研究激光拉深时发现,拉深后的零件在上下表面均呈现残余拉应力,如图 24 所示,但尚没有关于该工况下零件抗疲劳性能的研究结论。Chen Hongqiang 等^[45]通过 X 射线衍射(XRD)及有限元模拟(FEM)发现,用 Nd:YAG 激光(波长 355 nm,光斑直径 12 μm ,脉冲宽度 50 ns,功率密度 4 GW/ cm^2 ,3 mm 厚的水作约束层,多晶铝箔作吸收层)冲击 5 mm 厚的单晶铝,距光斑中心 20 μm (约 2 个光斑直径)之内,残余压应力约为 $-80 \sim -100$ MPa,但在这个尺寸范围之外,其值迅速衰减到数兆帕。

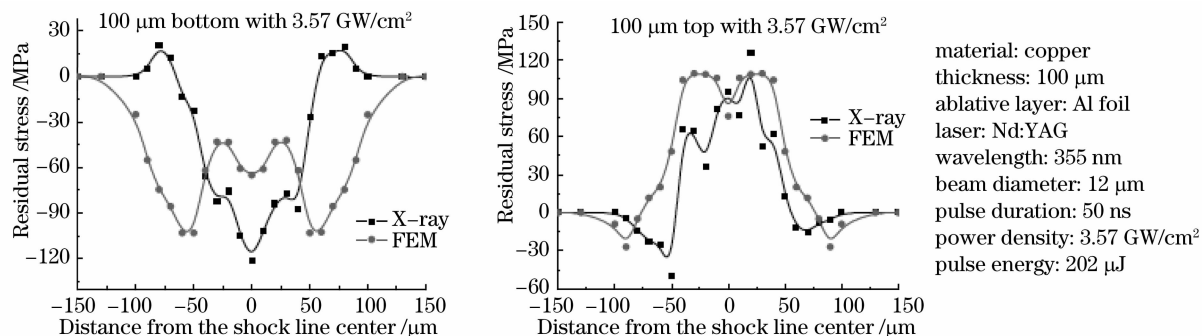


图 23 凹面成形时的残余应力

Fig. 23 Residual stress after laser peen forming (concave)

3.4 成形缺陷

激光冲击成形的缺陷包括冲偏、顶部裂纹、边缘撕裂、起皱、表面烧蚀、表面冲击痕迹、因光束与板材不垂直造成的冲击歪斜等^[15,27,40],如图 25 所示。顶部裂纹通常由于多次冲击时变形量过大,特别是能量吸收层烧蚀而失去保护作用造成的。而边缘撕裂常因凹模圆角太小,或冲击波压力与凹模孔形成剪切,或压边力太大致使材料不能流入凹模孔而形成。起皱源于材料往凹模孔流入过程中,由于周向压应力所造成的材料厚向失稳,可通过增加压边力而克服。

4 数值模拟

材料受到高速冲击时的变形状况,很多学者在各种简化前提下求出了解析式^[26,46~48]。但是,数值模拟

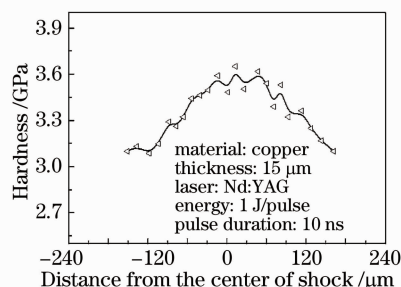


图 22 激光冲击后材料的微观硬度

Fig. 22 Hardness distribution after laser peen forming

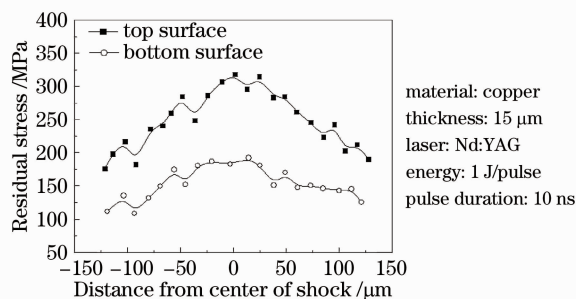


图 24 激光拉深后的残余应力分布

Fig. 24 Residual stress distribution after laser peen forming (drawing)

依然是激光冲击成形最有力的分析手段^[12,37,49~51]。

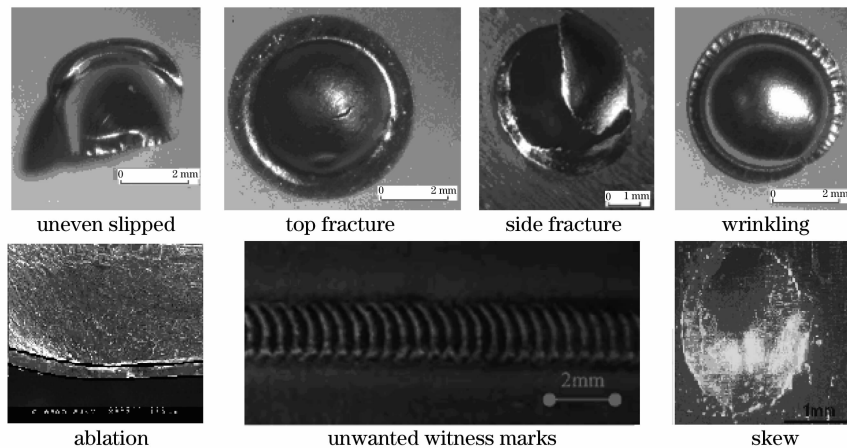


图 25 激光冲击成形的常见缺陷

Fig. 25 Defects during laser peen forming

用有限元法模拟时存在几个关键问题：1) 等离子体爆炸时产生的冲击力加载；2) 材料的本构关系选择；3) 高应变率下材料的原始参数获取；4) 加载结束后卸载过程的处理方法。

目前几乎均将冲击力按(2)式,(3)式或类似表达式施加于光斑处的材料表面上,载荷的时间曲线一般遵循图 26 所示的形状^[52]。对于多晶材料,其本构关系一般采用率相关的 Johnson-Cook 模型,其流动应力 σ 的表达式为^[53]

$$\sigma = (A + B\bar{\epsilon}^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}) \left[1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^{m'} \right], \quad (5)$$

式中 A, B, C, n 为用户定义的常量, $\bar{\epsilon}^p$ 为等效塑性应变, $\dot{\epsilon}$ 为应变率, m' 为温度敏感系数, T, T_0, T_m 分别为实验温度、室温和材料的熔点。

对于单晶体,则采用 Yajun Fan 等^[54,55] 推导并由 J. W. Kysar^[56] 修正的立方晶格单晶的本构关系, P. Savage 等^[57] 又在此关系的基础上更多地考虑了率相关性。由于激光冲击是一个高速的动态加载过程,目前的文献多采用 Abaqus 或 Ls-dyna 软件包,用动力显式算法分析其加载过程,然后用隐式算法分析其卸载过程。图 27 为用 Abaqus 进行的激光冲击成形有限元模拟结果^[39,49,50,58]。

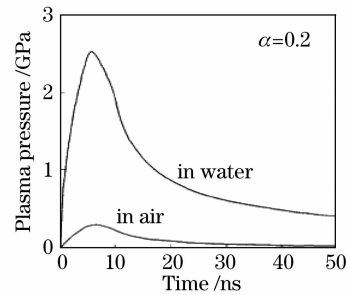


图 26 激光诱发的等离子冲击力

Fig. 26 Pressure of laser induced plasma

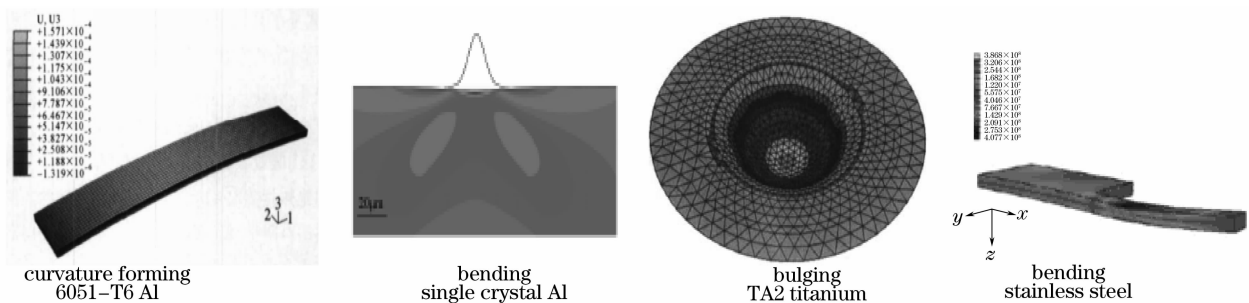


图 27 激光冲击成形有限元模拟

Fig. 27 FEM simulation for laser peen forming

5 存在的主要问题

激光冲击成形是多物理量综合作用的过程,其中涉及能量转换、爆炸力学、弹塑性冲击动力学、组织转变

等,对微冲击成形还存在尺度效应和梯度效应等问题,无论是其几何形状还是力学行为,都表现出非常复杂的非线性,在研究方法及研究结论等方面还存在着很多争议。

1) 在几何形状的演变方面,一般认为,当激光能量较大时,在板材厚度方面能够产生更深的塑性区,从而更易产生凹面成形。但 Y. Wang 等^[12]观察到 100 μm 厚的铜板用波长 355 nm,脉宽 50 ns,功率密度 3.57 GW/cm^2 的脉冲激光照射时,能够形成 0.11° 的背向激光束的凹面,而当功率密度增加为 4.95 GW/cm^2 时,反而呈现 0.14° 的朝向激光束的凸面成形。H. Schulze Niehoff 等^[27]通过大量实验发现,相同的工艺参数下,铝板比钢板获得更大的胀形量,但当钢板的厚度变化 1 倍时(25 μm 和 50 μm),其变形量反而没有明显变化。按一般的理解,在多次脉冲冲击下,由于板材边界条件的明显变化,冲击次数应与变形量呈非线性关系,但据观察,用脉冲宽度为 80 ns 的 TEA-CO₂ 激光(功率密度 1 GW/cm^2 ,脉冲能量 1500 mJ)使 50 μm 厚的 Al 99.5 铝箔发生激光冲击拉深,无论采用 4 mm 孔径的凹模还是 11 mm 孔径的凹模,从第 1 次冲击直至第 100 次冲击,工件的高度随脉冲次数近乎线性增加。K. R. Edwards 等^[16]用波长 355, 532 及 1064 nm 的脉冲激光照射 75 μm 厚的钢板时,发现其变形量随波长增大而增大,但在冲击次数较少时,后两种波长所对应的变形量并未显示明显差异。另外,发现钢板经多次脉冲冲击后,弯曲角达到一定角度后便不再增加。Peter Bechtold 等^[24,41]发现材料的初始应力状态(预应力)对变形量及变形趋势有显著影响。显然,由于问题本身的复杂性以及相关研究才刚刚开始,人们对激光冲击成形中的几何演变过程还没有形成规律性的认识,有的甚至得出相互矛盾的结论,对于这些有趣的现象,尚未见到有说服力的解释。

2) 在板材性质的演变方面,人们依然缺乏规律性的认识。Y. Wang 等^[12]认为,根据工艺条件的不同,激光冲击时板材受辐射面可能是残余压应力也可能是拉应力,背离激光面通常是残余压应力并具有高的疲劳强度。这点对于厚板的宏观成形很易理解,而对于拉深或胀类的微冲击成形,板厚尺寸很小,目前的研究尚不能很好地回答残余应力的产生机理及其分布形式等科学问题,是否、何时、如何能得到期望的应力状态,以及 Gary J. Cheng 等^[28]所发现的板材两个表面均呈拉应力时的抗疲劳强度等工程问题。H. Schulze Niehoff 等^[15,27,29]通过实验注意到 50 μm 厚的铝箔的拉深破裂与起皱,铜箔(厚度 50 μm)、不锈钢箔(厚度 20 μm 及 50 μm)在多次激光冲击胀形时的破裂现象。作者在研究过程中也发现,激光拉深与胀形时,至少存在 3 种类型的破裂现象:工件顶部最大拉应变处产生的破裂;激光光斑处板材受到冲击剪切产生的破裂;板材在凹模入口处产生的破裂,但都还没有形成相应的判据。Charles S. Montross 等^[35]发现,用 3.5 GPa 的冲击波压力轰击 6061-T6 铝板时,前 4 次冲击均能提高材料硬度,第 5 次例外,而当冲击波压力为 6 GPa 时,1~5 次冲击均能提高硬度值。他们从 Hugoniot 弹性极限和动态屈服强度的角度做了定性解释,但不能对这类阈值问题进行定量或半定量描述。

3) 在以数值模拟为代表的分析手段方面,研究人员利用基于 Mie-Grüneisen 状态方程导出的一维冲击波压力进行加载,采用不考虑热效应的高应变率下的本构方程,用宏观连续介质有限元方法,模拟了激光冲击诱发的应力和应变。G. J. Cheng 等^[42]同样采用一维模型分析了硅晶体激光冲击时的位错增殖。但是,在激光冲击成形(尤其是拉深或胀形等凹面成形以及多次冲击成形)过程中,等离子体在光束方向存在大的

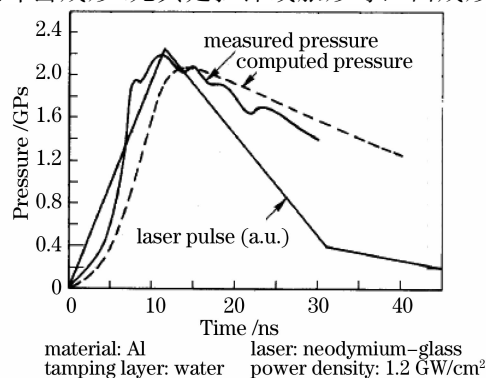


图 28 计算及测试得到的压力曲线

Fig. 28 Computed and measured pressure curves

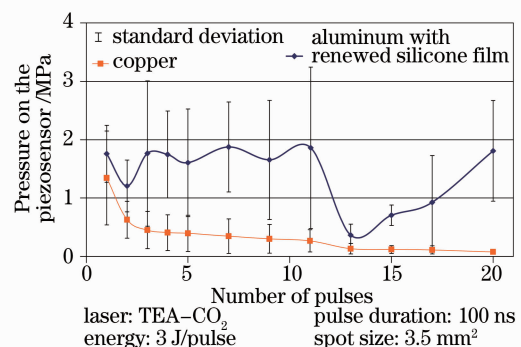


图 29 压力与冲击次数关系曲线

Fig. 29 Pressure versus number of pulses

膨胀空间,而在径向与光斑大小属于同一数量级,其膨胀处于一个半封闭的空间中,理应受到更大的约束,因此冲击波的空间分布应是三维的^[59,60]。Benxin Wu等^[47,61]观察到冲击波的后半幅并不是单调平滑递减,而是在时间域呈锯齿状分布,这种波形是等离子体爆炸的力学性质决定的,还是等离子体与板材的变形耦合形成,它是否会对模拟结果产生影响尚不得而知,如图28所示。但F. Vollertsen等^[29]发现冲击次数与压力值存在更复杂的关系,如图29所示。另外,作为一个动态成形过程,不同的加载时间会计算得到不同的变形量,而目前几乎所有的有限元分析中,都将加载时间设定为脉冲宽度的2~3倍,并没有一个确定的加载时间值,而这个时间值直接决定了卸载后隐式分析的启动时刻,并对变形量的计算值产生根本影响。再者,目前还少有关于激光冲击成形中振动问题的分析结论^[62,58]。特别重要的是,即便认为脉冲冲击时材料中沉积的能量不足以引起相变和再结晶,但初始晶粒的大小和形状、晶界、以及剧烈微塑性成形时因位错增殖和位错反应所致的晶粒碎化不应被忽略。因此,激光冲击成形的精确计算模型理应体现出二维或三维冲击波、率

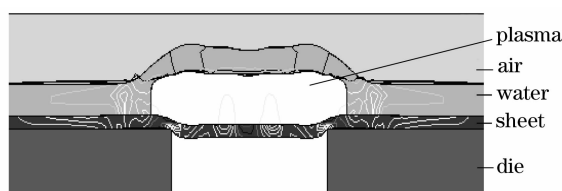


图30 通过爆炸模拟冲击成形

Fig. 30 Simulation of plasma exploding

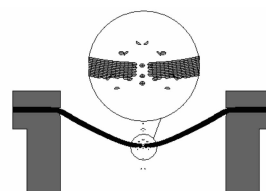


图31 破裂过程数值模拟

Fig. 31 Numerical simulation of fracture

相关、尺度效应和位错反应的耦合作用机制。另外,虽然激光冲击成形的主要驱动力是冲击波压力,因而几乎所有数值分析均基于温度无关模型,但是,高能量激光与板材的反复作用并不是一个绝热过程^[63,64]。但目前尚没有综合考虑以上各因素的数值模拟结果。对于激光冲击成形的破坏行为,目前也少有相关的破坏机理及数值分析结果。图30为作者模拟等离子体的爆炸及其与金属板、水约束层、以及约束层之上的空气耦合作用的数值分析结果。图31为对激光冲击所导致的工件顶部破裂的数值分析。

6 结论与展望

1) 实践已经证明,激光冲击成形是一种非常有效的塑性成形手段,在大型复杂曲面钣金件成形,微机电系统结构元器件制造、装配、整形等领域具有其独特性及深远的应用前景。

2) 需要进一步按照金属塑性成形工艺的研究规范,按弯曲、拉深、胀形、复杂曲面成形等进行分类,系统研究各种因素对工艺过程、变形量、微观组织、材料性能的影响,并形成数据表及工艺规范。

3) 通过基础理论和实验,研究烧蚀、破裂、起皱等各种缺陷形成的极限条件,建立相关判据模型,并进行量化。

4) 激光冲击成形与材料的初始应力状态关系密切,这将影响其工艺重复性。因此针对各种成形过程,有必要深入研究坯料的不同预应力状态对成形过程的影响。

5) 研究激光冲击成形过程中热效应的大小,研究多次(多脉冲)冲击成形过程中的振动问题,以及对整形和装配的影响。

6) 除了进一步研究能量吸收层及约束层的材料、厚度、施加方式以强化冲击效果外,应当从激光推进的研究成果中,汲取有价值的方法和结论^[65]。

7) 加强高应变下材料性能及其失效准则的研究,为数值模拟提供足够可靠的原始参数。

8) 由于激光冲击成形经常用于微塑性成形,因此,除了Johnson-Cook模型、单晶体位错动力学模型外,应大力研究考虑尺度效应的多晶体的晶体塑性有限元模型^[66]。

9) 除了深入研究冲击波压力曲线以获得精确的加载时间外,应积极探索直接模拟等离子体的爆炸,并将等离子体和板材作为一个完整的振动系统,通过流固耦合等方式,精确模拟变形过程^[67]。

10) 研究特定板材的最优化激光冲击成形条件,以更好地实现零件形状和性能的控制,从而推动高应变率微塑性成形理论体系的形成以及脉冲激光和现代制造技术的发展^[68]。

参 考 文 献

- 1 Frank Neuman. Momentum transfer and cratering effects produced by giant laser pulses[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1964, **4**(9): 167~169
- 2 N. C. Anderholm. Laser-generated stress waves[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1970, **16**(3): 113~115
- 3 J. D. O'Keefe, C. H. Skeen, C. M. York. Laser-induced deformation modes in thin metal targets[J]. *J. Appl. Phys.*, 1973, **44**(10): 4622~4626
- 4 M. A. Meyers, F. Gregori, B. K. Kad *et al.*. Plastic deformation in laser-induced shock compression of monocrystalline copper[J]. *AIP Conf. Proc.*, 2002, **620**(1): 619~622
- 5 Hackel Lloyd, Harris Fritz. Contour forming of metals by laser peening[P]. U. S. 6410884, 2002-06-25
- 6 Hackel Lloyd, Haolin Chen. Laser peening-a processing tool to strength metals or alloys to improve fatigue lifetime and retard stress-induced corrosion cracking[R]. *Laser Science and Technology*, 2003
- 7 Zhou Jianzhong, Zhan Yongkang, Yang Jichang *et al.*. A new technique on plastic forming of metal sheet by laser shock wave [J]. *China Mechanical Engineering*, 2002, **13**(22): 1938~1940
周建忠,张永康,杨继昌等. 基于激光冲击波的板料塑性成形新技术[J]. *中国机械工程*, 2002, **13**(22): 1938~1940
- 8 Jianzhong Zhou, Yujie Fan, Shu Huang *et al.*. Numerical simulation on laser peen forming of sheet metal [C]. *Mater. Sci. Forum*, 2008, **575/578**(Part 1): 572~578
- 9 Huang Shu, Zhou Jianzhong, Chen Yibin *et al.*. Theoretical and experimental study on laser compound forming of plate [J]. *Key Eng. Mater.*, 2008, **375-376**: 343~347
- 10 M. Geiger, F. Meyer-Pittroff. Laser beam bending of metallic foils[C]. *SPIE*, 2002, **4426**: 187~190
- 11 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
- 12 Y. Wang, Y. Fan, S. Vukelic *et al.*. Energy level effects on deformation mechanism in micro-scale laser peen forming[J]. *SME J. Manuf. Process.*, 2007, **9**(1): 1~12
- 13 Y. Wang, J. W. Kysar, Y. L. Yao. Analytical solution of anisotropic plastic deformation induced by micro-scale laser shock peening[J]. *Mechanics of Mater.*, 2008, **40**: 100~114
- 14 Gary J. Cheng, Daniel Pirzada, Zhou Ming. Microstructure and mechanical property characterizations of metal foil after microscale laser dynamic forming[J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **101**(6): 063108
- 15 H. Schulze Niehoff, Z. Hu, F. Vollertsen. Mechanical and laser micro deep drawing[J]. *Key Eng. Mater.*, 2007, **344**: 799~806
- 16 K. R. Edwards, G. Dearden, K. G. Watkins *et al.*. Laser peen forming of thin sheet ferrous materials[C]. Photon '06 Conference, Institute of Physics, Manchester, 2006
- 17 Elijah Kannatey-Asibu Jr., Bhumika Lathia. Laser forming by shock peening[J]. *Transactions of NAMRI/SME*, 2007, **35**: 401~407
- 18 J. L. Ocaña, M. Morales, C. Molpeceres *et al.*. Laser shock microforming of thin metal sheets[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2009, **225**(10): 5633~5636
- 19 K. Okada, K. Wakabayashi, H. Takenaka. Experimental technique for launching miniature flying plates using laser pulses [J]. *Int. J. Impact Eng.*, 2003, **29**(1/10): 497~502
- 20 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
- 21 Boeing awards MIC laser peening contract to form 747.8 wing section[EB/OL]. (2008-01-14)[2008-01-14]
- 22 K. Kondo, S. Tsuzuki, A. Kato. Investigations on peen forming (2nd Report; on the forming mechanism)[C]. Conf. Proc., ICSP-1, 1981. 565~572
- 23 J. L. Ocaña, M. Morales, C. Molpeceres *et al.*. Short pulse laser microforming of thin metal sheets for MEMS manufacturing [J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2007, **254**: 991~1001
- 24 Peter Bechtold, Michael Schmidt. Non-thermal micro adjustment using ultrashort laser pulses [J]. *J. Laser Micro/Nanoeng.*, 2007, **2**(3): 183~188
- 25 Kenneth Edwards, Stuart P. Edwardson, Chris Carey *et al.*. Laser peen forming for 2D shaping and micro adjustment [C]. ICALEO, 2007. 156~165
- 26 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
- 27 H. Schulze Niehoff, F. Vollertsen. Non-thermal laser stretch-forming [J]. *Adv. Mater. Res.*, 2005, **6-8**: 433~440
- 28 Gary J. Cheng, Daniel Pirzada. Characterizations on microscale laser dynamic forming of metal foil [C]. ASME International Conference on Manufacturing Science and Engineering, 2006. 1~7
- 29 Frank Vollertsen, Hendrik Schulze Niehoff, Hanna Wielage. On the acting pressure in laser deep drawing [J]. *Prod. Eng.*, 2009, **3**(1): 1~8
- 30 Gary J. Cheng. System and method of laser dynamic forming[P]. US0039933, 2007-02-22
- 31 Gu Yongyu, Zhang Xingquan, Shi Jianguo *et al.*. Investigation of inverse deformation in laser shock forming with half die [J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(1): 95~97
- 顾永玉, 张兴权, 史建国 等. 激光半模冲击成形中板料反向变形现象研究[J]. 激光技术, 2008, **32**(1): 95~97
- 32 L. Vihtonen, A. Puzik, T. Katajarinne. Comparing two robot assisted incremental forming methods: incremental forming by pressing and incremental hammering[J]. *Int. J. Mater. Forming*, 2008, **1**(S1): 1207~1210
- 33 Andrew S. Holmes. Laser fabrication and assembly processed for MEMS[C]. *SPIE*, 2001, **4274**: 297~306
- 34 F. Vollertsen, H. Schulze Niehoff. State of the art in micro forming [J]. *Int. J. Machine Tools Manuf.*, 2006, **46**(11): 1172~1179
- 35 Charles S. Montross, Tao Wei, Lin Ye. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review [J]. *Int. J. Fatigue*, 2002, **24**(10): 1021~1036
- 36 A. M. Korsunsky. On the modeling of residual stresses due to surface peening using eigenstrain distributions [J]. *J. Strain Anal.*, 2005, **40**(8): 817~824
- 37 Zhang Wenwu, Yao Y. Lawrence, I. C. Noyan. Microscale laser shock peening of thin films, part 1: experiment, modeling and simulation [J]. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 2004, **126**(2): 10~17
- 38 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
- 39 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
- 40 K. R. Edwards, C. Garey, S. P. Edwrdson *et al.*. Laser peen forming for 2D shaping and adjustment of metallic components [C]. LANE, 2007. 569~580
- 41 Manfred Dirscherl, Gerd Esser, Michael Schmidt. Ultrashort pulse laser bending [J]. *J. Laser Micro/Nanoengineering*, 2006, **1**(1): 54~60
- 42 G. J. Cheng, M. A. Shehadeh. Dislocation behavior in silicon crystal induced by laser shock peening: a multiscale simulation approach [J]. *Scripta Materialia*, 2005, **53**(9): 1013~1018
- 43 Youneng Wang, Yajun Fan, Jeffrey W. Kysar *et al.*. Microscale laser peen forming of single crystal [J]. *J. Appl. Phys.*, 2008, **103**(6): 063525
- 44 Youneng Wang, Hongqiang Chen, Jeffrey W. Kysay *et al.*. Response of thin films and substrate to micro scale laser shock peening[J]. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 2007, **129**(3): 485~496
- 45 Chen Hongqiang, Wang Youneng, Kysar Jeffrey W. *et al.*. Advances in microscale laser shock peening[J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2004, **9**(5): 506~518
- 46 Zhou Nan. A simple analysis model for the hypervelocity cratering of semi-infite targets by projectile[J]. *Int. J. Impact Eng.*, 1999, **23**(1): 989~994
- 47 Benxin Wu, Yung C. Shin. From incident laser pulse to residual stress: a complete and self-closed model for laser shock peening[C]. ASME International Conference on Manufacturing Science and Engineering, 2006. 1~12
- 48 Korsunsky A. M.. On the modeling of residual stresses due to surface peening using eigenstrain distributions[J]. *J. Strain Analysis*, 2005, **40**(8): 817~824
- 49 Sinisa Vukelic, Youneng Wang, Jeffrey W. Kysar *et al.*. Dynamic material response of aluminum single crystal under micro scale laser shock peening[J]. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 2009, **131**(3): 031015~031024
- 50 F. Wang, Z. Q. Yao, J. Hu *et al.*. Experimental research and numerical simulation of laser shock forming of TA2 titanium sheet[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2006, **19**(5): 347~354
- 51 Abul Fazal M. Arif. Numerical prediction of plastic deformation and residual stresses induced by laser shock processing[J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 2003, **136**(1-3): 120~138
- 52 Yuji Sano, Naruhiko Mukai, Koki Okazaki *et al.*. Residual stress improvement in metal surface by underwater laser

- irradiation[J]. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, 1997, **B121**(1-4): 432~436
- 53 G. R. Johnson, W. H. Cook. A constitutive model and data for metal subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]. International Symposium on Ballistics, The Hague, The Netherlands, 1983
- 54 Yajun Fan, Youneng Wang, Jeffrey W. Kysar *et al.*. Microscale laser peen forming of single crystal: dynamic deformation and anisotropy [J]. *Trans. NAMRI/SME*, 2007, **35**: 383~390
- 55 Y. Huang. A user-material subroutine incorporating single crystal plasticity in the ABAQUS finite element program, Mech. Report 178[R]. Division of Applied Sciences, Harvard University, Cambridge, MA, 1991
- 56 J. W. Kysar. Addendum to A User-Material Subroutine Incorporating Single Crystal Plasticity in the ABAQUS Finite Element Program, Mech Report 178[R]. Division of Engineering and Applied Sciences, Harvard University, Cambridge, MA, 1997
- 57 P. Savage, B. P. O. Donnell, P. E. McHugh *et al.*. Coronary stent strut size dependent stress-strain response investigated using micromechanical finite element models[J]. *Ann. Biomed. Eng.*, 2004, **32**(2): 202~211
- 58 J. L. Ocaña, M. Morales, C. Molpeceres *et al.*. Numerical modeling and experimental characterization of short pulse laser microforming of thin metal sheets[C]. Multi-Material Micro Manufacture, Dimov S and Menz W (Eds.), Cardiff, UK, Whittles Publishing Ltd. 2008. 1~4
- 59 F. Veloso, H. Chuaqui. Laser-produced annular plasmas[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, **77**(6): 063506
- 60 A. Sasoh, T. Ohtani, K. Mori. Pressure effect in a shock-wave-plasma interaction induced by a focused laser pulse[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **97**(20): 205004
- 61 B. P. Fairand, A. H. Clauer. Laser generation of high-amplitude stress waves in materials [J]. *J. Appl. Phys.*, 1979, **50**(3): 1497~1502
- 62 Hsieh Shen Hsieh, Jehnming Lin. Laser-induced vibration during pulsed laser forming [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2004, **36**(6): 431~439
- 63 Thord Thorslund, Franz Josef Kahlen, Aravinda Kar. Temperatures, pressures and stresses during laser shock processing [J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2003, **39**(1): 51~71
- 64 Benxin Wu, Yung C. Shin. A self-closed thermal model for laser shock peening under the water confinement regime configuration and comparisons to experiments [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **97**(11): 113517
- 65 David A. Gonzales, Robert P. Baker. Micropropulsion using a Nd:YAG microchip laser[C]. *SPIE*, 2002, **4760**: 752~765
- 66 Liu Jing, Liu Ren, Ji Zhong *et al.*. Numerical analysis for micro laser peen forming based on grain and grain boundary element[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 291~295
- 刘 晶,刘 韧,季 忠 等. 基于晶粒晶界有限元的激光微冲击成形数值分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 291~295
- 67 S. Juodkakis, K. Nishimura, S. Tanaka *et al.*. Laser-induced microexplosion confined in the bulk of a sapphire crystal: evidence of multimegabar pressures[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **96**(16): 166101
- 68 M. Geiger, R. Plettke, H. Hagenah. Multi-objective optimization of actuator system design for laser micro adjustment[J]. *Prod. Eng.*, 2009, **3**(2): 181~188