

文章编号: 0258-7025(2006)09-1282-06

激光冲击 TA2 板料变形的理论分析和实验研究

张永康, 高立, 杨超君

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 金属板料的激光冲击成形技术是利用高能激光诱导的高幅冲击波的力效应,而非热效应实现金属板料的塑性成形技术。对单次激光冲击下 TA2 板料的变形过程进行了理论分析,通过对激光冲击波载荷作用下板料变形过程的理论分析,建立了激光冲击板料变形的数学模型,得到了板料变形量与加工系统中各种参数之间的相互关系,为加工过程中各种参数的合理优化、板料变形过程的有效控制和实现大面积金属板料的激光冲击成形提供了理论依据。利用高功率钕玻璃激光冲击波装置,从影响板料变形的几个因素出发,选取了三种实验方案,对单次激光冲击下板料的理论变形量进行了实验验证。实验结果表明,依据本数学模型计算得到的理论变形量与实验实测数据较为接近,从而验证了用于计算单次激光冲击下板料变形理论的正确性和预测板料变形的实用性。

关键词 激光技术;激光冲击;塑性变形;数学模型;金属板料

中图分类号 TN 249;TG 156.99 **文献标识码** A

Theoretical Analysis And Experiment on Deformation of TA2 Sheet Under Laser Shock

ZHANG Yong-kang, GAO Li, YANG Chao-jun

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

Abstract Laser shock forming of metal sheet is a novel technique by applying a compressive shock wave on the surface of the metal. It is a mechanical not a thermal process. In this paper, the deformation of TA2 sheet has been analyzed under single-time laser shock loading. By the theoretical analysis, a mathematical model of sheet deformation has been constituted, the relationship between the sheet deformation and the various parameters such as laser energy, sheet thickness and so on has been discussed. This model can be used to optimize the manufacturing parameters, to effectively control sheet forming and can provide theoretical basis for carrying out the large-scale laser shock forming of metal sheet. Considering some factors of affecting sheet forming, three experimental projects have been actualized in virtue of the high-power Nd:glass laser shock device. Experimental results show that the theoretical deformation amount is comparatively approximate to the experimental results, so the correctness and validity of the theory used to calculate the theoretical sheet-deformation amount under single-time laser shock loading have been validated.

Key words laser technique; laser shock; plastic deformation; mathematical model; metal sheet

1 引言

激光冲击成形是近年来出现的一种柔性洁净的无模成形新方法。初步实验研究表明,激光冲击成形是利用高能激光诱导的高幅冲击波压力的力效

应,而非热效应实现金属板料的塑性成形^[1~6],在国防工业、航空航天等生产领域具有广阔的应用前景。为控制激光冲击板料成形过程,必须对激光冲击板料的变形进行理论分析,探讨激光能量-冲击波压力-变形量之间的相互关系。本文提出一种可用于

收稿日期:2005-11-02;收到修改稿日期:2006-04-04

基金项目:国家自然科学基金(50475127,50275068)和国家 863 技术课题(2002AA421120)资助项目。

作者简介:张永康(1963—),男,江苏张家港人,江苏大学机械工程学院教授,工学博士,主要从事激光光学效应的先进制造与检测方面的研究。E-mail: ykzhang@ujs.edu.cn

定量地确定激光能量-冲击波压力-变形量之间的相互关系的新方法,即在实验的基础上借助于 Origin 软件的曲线拟合功能建立冲击波压力随时间变化的函数关系,据此建立板的冲量与板的动能之间的关系,再利用能量原理建立板的动能与板的塑性变形之间的关系。

2 激光冲击板料变形的压力分析

图 1 为激光冲击板料变形原理图。冲击波的压力大小及其分布对板料变形及其轮廓形状有很大影响。为了提高激光冲击波的峰值压力,延长压力的作用时间,在激光冲击成形中采用能量吸收层加约束层的能量转换体技术,把激光能量转变成冲击波机械能,使板料在激光冲击波的力效应作用下变形。

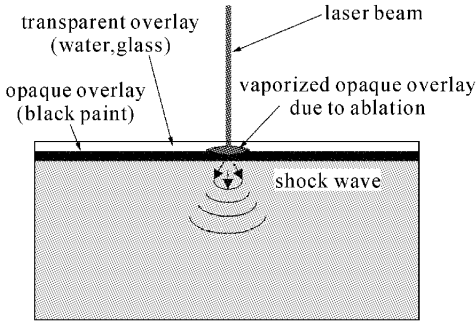


图 1 激光冲击原理图

Fig. 1 Sketch map for sheet deformation under laser shock

对于高强激光冲击靶面时所产生的冲击波压力的估算,许多学者都已进行了较为深入的研究^[7],针对为提高激光冲击波峰压而广泛采用的约束模式,L. Berthe 等^[8]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了估算。冲击波的峰值压力表示为^[8]

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

α 为内能转化为热能的系数, $\alpha = 0.25$; I_0 为入射激光功率密度, $I_0 = 3.12 \text{ GW/cm}^2$; Z 为靶材与水约束层之间的冲击波声阻抗,定义为

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_{\text{target}}} + \frac{1}{Z_{\text{water}}}, \quad (2)$$

$Z_{\text{target}}, Z_{\text{water}}$ 分别为靶材和水约束层的声阻抗。对于铝靶,取值为

$$\begin{aligned} Z_{\text{target}} &= 1.38 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}, \\ Z_{\text{water}} &= 0.165 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}, \end{aligned}$$

将 $Z_{\text{target}}, Z_{\text{water}}$ 值代入 (2) 式, 得 $Z = 0.3 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 将 α, I_0, Z 代入 (1) 式, 得 $P = 2.638 \text{ GPa}$ 。

3 板料塑性变形过程

塑性力学的研究表明,对于板料在任意边界条件下的塑性变形问题,目前尚无精确的解析解表示。而薄圆板的轴对称变形问题,则可利用 Tresca 屈服条件,借用理想刚塑性模型来分析。

本文与前人^[3]所建立的理论与不同之处有二:

其一,利用能量理论,为了增加计算的精度放弃了理想刚塑性模型而采用考虑硬化行为的弹塑性本构模型。

其二,不用薄圆板,代之以边界条件更为复杂的方板作为激光冲击变形分析的对象。

先考虑薄圆板在单次激光脉冲作用下的变形。模型简化为:一厚度为 h , 半径为 R_0 的薄圆板料四周被夹紧,上面轴对称地作用有一直径为 $2R$ 的横向载荷。如图 2 所示。

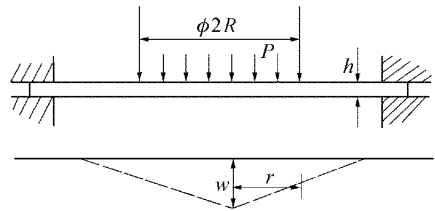


图 2 板料变形示意图

Fig. 2 Sketch map of sheet deformation

采用能量理论,设薄圆靶板在激光冲击作用下的总塑性应变能为 E_p , 则其微分为

$$dE_p = \int_{\Omega} (\sigma_r d\epsilon_r + \sigma_{\theta} d\epsilon_{\theta}) d\Omega, \quad (3)$$

其中 $d\epsilon_r$ 及 $d\epsilon_{\theta}$ 为应变增量, σ_r 为径向应力分量, σ_{θ} 为切向应力分量, r, θ 为极坐标, 积分域遍及薄板的全体积。

设板在冲击下产生挠度为 $w(r, t)$, 于是

$$\epsilon_r = \frac{1}{2} \left(\frac{dw}{dr} \right)^2; \quad \epsilon_{\theta} = 0, \quad (4)$$

又根据薄板的假定,有圆板法向应力分量 $\sigma_z = 0$ 及其法向的应变分量 $\epsilon_z = 0$, 故有屈服条件

$$\sigma_r^2 - \sigma_r \sigma_{\theta} + \sigma_{\theta}^2 = \sigma_d^2, \quad (5)$$

假定靶板为线性硬化材料,有

$$\sigma_d = \sigma_j + E^p \epsilon_r, \quad (6)$$

其中 E^p 为切线模量; σ_j 为 $\epsilon_r = 0$ 的初始屈服应力。

将(6)式代入(5)式,则有

$$\sigma_r^2 - \sigma_r\sigma_\theta + \sigma_\theta^2 = (\sigma_j + E^p\epsilon_r)^2, \quad (7)$$

根据弹性范围内的应力应变关系,由 $\epsilon_\theta = 0$, 得 $\sigma_\theta = \nu\sigma_r$, 其中 ν 为泊松比。

假定这一弹性关系同样满足于屈服条件,则由(7)式,有

$$\sigma_r = \frac{\sigma_j + E^p\epsilon_r}{\sqrt{1-\nu+\nu^2}}, \quad (8)$$

将(8)式及 $\epsilon_\theta = 0$ 代入(3)式,得

$$dE_p = \int_\Omega \frac{\sigma_j + E^p\epsilon_r}{\sqrt{1-\nu+\nu^2}} d\epsilon_r d\Omega, \quad (9)$$

积分(9)式得(从 $\epsilon_r = 0$ 积分到 $\epsilon_r = \epsilon_r$)

$$E_p = \frac{1}{\sqrt{1-\nu+\nu^2}} \int_\Omega (\sigma_j\epsilon_r + \frac{1}{2}E^p\epsilon_r^2) d\Omega, \quad (10)$$

因 $d\Omega = 2\pi hrdr$, 于是(10)式可以写成

$$E_p = \frac{2\pi h}{\sqrt{1-\nu+\nu^2}} \int_0^{R_0} (\frac{1}{2}E^p\epsilon_r^2 + \sigma_j\epsilon_r) r dr, \quad (11)$$

再将(4)式代入(11)式,并注意到靶板变形的应变能由激光诱导的等离子体所产生的冲击波施加于靶板的冲量转化而来,记此冲量为 I , 并记板的由此冲量转化而来的动能为 E , 因此

$$-\int_0^{R_0} \left(\frac{dw}{dr}\right)^4 r dr + \frac{4\sigma_j}{E^p} \int_0^{R_0} \left(\frac{dw}{dr}\right)^2 r dr - \frac{4(1-\nu+\nu^2)^{1/2}}{E^p\pi h} E = 0, \quad (12)$$

单点冲击实验后,采用 Taylor Hobson 轮廓测量仪测量冲击区的变形形貌,发现其变形量几乎成指数衰减曲线变化,观测到

$$w(r) = w_0 e^{-r}, \quad (13)$$

其中 w_0 为冲击中心的最大位移。

当激光光斑半径 R 与圆板的几何半径 R_0 相比很小时,可把 R_0 视为无穷大,则有

$$\int_0^{R_0} \left(\frac{dw}{dr}\right)^4 r dr = w_0^4 \int_0^\infty e^{-4r} r dr = \frac{1}{16} w_0^4,$$

$$\int_0^{R_0} \left(\frac{dw}{dr}\right)^2 r dr = w_0^2 \int_0^\infty e^{-2r} r dr = \frac{1}{4} w_0^2,$$

故由(12)式,得

$$w_0^4 + \frac{16\sigma_j}{E^p} w_0^2 - \frac{64\sqrt{1-\nu+\nu^2}}{E^p\pi h} E = 0. \quad (14)$$

4 板料所获得的冲量和动能

由于激光脉冲的作用时间仅为纳秒量级,激光诱导的冲击波的时空分布又十分复杂,故其宏观力学效应可用冲量表征。靶的冲量与靶表面压力的时

空分布有关,要精确计算板料所获得的能量就必须精确计算激光冲击波施于板料的冲量,而要精确计算冲量就必须确定激光冲击波随时间变化的准确函数关系。文献[8]在实验的基础上,已确定了冲击波压力随时间变化的图形,必须据此建立冲击波压力随时间变化的准确函数关系。

把冲击波压力随时间的变化分成两部分,升压部分和降压部分。分别用 Origin 软件对这两部分函数曲线进行拟合,以期找出冲击波压力随时间变化的函数关系。拟合所得的函数关系为

$$\text{升压阶段 } P = A + Bt + Ct^2 + Dt^3, \quad (15)$$

其中, $A = 0.11, B = 0.23, C = -0.008, D = 0.00011$ 。

$$\text{降压阶段 } P = A_1 e^{-t/c_1} + A_2 e^{-(t-c_0)^2/w_1}, \quad (16)$$

其中, $A_1 = 1.345, c_1 = 55.785, A_2 = 1.892, c_0 = 31.73, w_1 = 350.44$ 。

因为只有当冲击波压力 P 大于板料的动态屈服强度 σ_d 时板才发生塑性变形,所以必须找出板发生塑性变形所对应的时间。由图 3 可看出时间大致为 105 ns 左右。

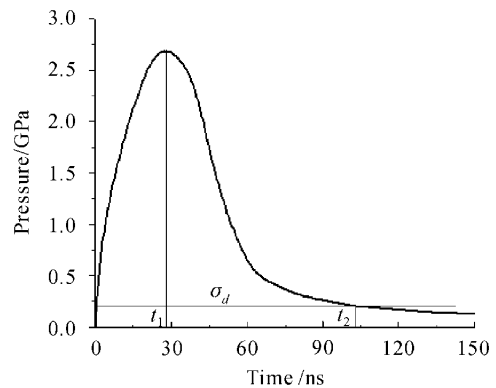


图 3 冲击波压力图

Fig. 3 Shock wave pressure graph

为了积分的方便,把积分区间分成两部分,即 $0 \sim t_1$ 和 $t_1 \sim t_2$ 。

设激光束模式是轴对称的, r 为靶表面上离开激光束中心的距离,在激光冲击成形中,由于激光光强在激光光斑区域内可看成是均匀分布的,则板料受到的冲量可表示为

$$I = \int_0^{t_1} \int_0^R P 2\pi r dr dt + \int_{t_1}^{t_2} \int_0^R P 2\pi r dr dt, \quad (17)$$

其中, t_1 取与冲击波峰值压力相对应的时间,约为 27 ns; t_2 约为 105 ns; R 取 4 mm; P 分别取如(15)

和(16)式的函数关系式。积分(17)式得

$$I = \pi R^2 \cdot \left[\int_0^{t_1} (A + Bt + Ct^2 + Dt^3) dt + \int_{t_1}^{t_2} (A_1 e^{-t/c_1} + A_2 e^{-(t-c_0)^2/w_1}) dt \right] = \pi R^2 \cdot \left[At_1 + \frac{1}{2} Bt_1^2 + \frac{1}{3} Ct_1^3 + \frac{1}{4} Dt_1^4 \right] + \pi R^2 A_1 c_1 (e^{-t_1/c_1} - e^{-t_2/c_1}) + \pi R^2 A_2 \sqrt{\pi w_1} \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \times \int_{t_1}^{t_2} e^{-\left[\sqrt{\frac{2}{w_1}}(t-c_0)\right]^2/2} d\left[\sqrt{\frac{2}{w_1}}(t-c_0)\right],$$

令 $x = \sqrt{\frac{2}{w_1}}(t - c_0)$, 则有

$$I = \pi R^2 \left[\left(At_1 + \frac{1}{2} Bt_1^2 + \frac{1}{3} Ct_1^3 + \frac{1}{4} Dt_1^4 \right) + A_1 c_1 (e^{-t_1/c_1} - e^{-t_2/c_1}) \right] + \pi R^2 A_2 \sqrt{\pi w_1} \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\sqrt{\frac{2}{w_1}}(t_1-c_0)}^{\sqrt{\frac{2}{w_1}}(t_2-c_0)} e^{-x^2/2} dx$$

令 $\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}$, 则有

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2} dt, \quad (18)$$

因为 $\varphi(x)$ 是标准正态分布, $\Phi(x)$ 的函数值可以查表求得, 则有

$$I = \pi R^2 \left[\left(At_1 + \frac{1}{2} Bt_1^2 + \frac{1}{3} Ct_1^3 + \frac{1}{4} Dt_1^4 \right) + A_1 c_1 (e^{-t_1/c_1} - e^{-t_2/c_1}) \right] + \pi R^2 A_2 \sqrt{\pi w_1} \left\{ \Phi \left[\sqrt{\frac{2}{w_1}}(t_2 - c_0) \right] - \Phi \left[\sqrt{\frac{2}{w_1}}(t_1 - c_0) \right] \right\}, \quad (19)$$

把 $A = 0.11, C = -0.008, A_1 = 1.345, A_2 = 1.892, B = 0.23, D = 0.00011, c_1 = 55.785, w_1 = 350.44, R = 4$ mm 代入(19)式, 得

$$I = 4213755 + 2486845 = 0.0067 \text{ N} \cdot \text{s},$$

根据冲量与动量的关系式, 有

$$I = \int_0^T F dt = \int_0^T \rho S v dt = \int dm v = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^R \rho h r dr, \quad (20)$$

ρ 为靶材的密度, m 为参与变形的板料质量, S 为冲击波压力的作用面积。

实验观测到 $w(r) = w_0 e^{-r}$, 因此有

$$v = v_0 e^{-r}, \quad (21)$$

其中, v_0 为光斑中心处的质点速度。把 $v = v_0 e^{-r}$ 代入(20)式, 得

$$I = \int dm v = 2\pi \rho h v_0 \int_0^R r e^{-r} dr, \\ v_0 = I / (2\pi \rho h \int_0^R r e^{-r} dr), \\ v = v_0 e^{-r} = I e^{-r} / (2\pi \rho h \int_0^R r e^{-r} dr), \quad (22)$$

薄板的动能 E 与板的冲量 I 的关系为

$$E = \int \frac{1}{2} dm v^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{I}{2\pi \rho h} \right)^2 \iint \rho h r e^{-2r} dr d\theta = \frac{I^2}{4\pi \rho h} \int_0^R r e^{-2r} dr. \quad (23)$$

例如, 取 LD31 为计算对象, 把 $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3, h = 0.0005 \text{ m}, R = 0.004 \text{ m}, I = 0.0067 \text{ N} \cdot \text{s}$ 代入(23)式, 求得: $E = 16.8 \text{ J}$ 。

把 $E = 16.8 \text{ J}$ 代入(14)式, 有

$$w_0^4 + \frac{16\sigma_j}{E^p} w_0^2 - \frac{64 \sqrt{1-\nu+\nu^2}}{E^p \pi h} 16.8 = 0, \quad (24)$$

把 $\sigma_j = 0.145 \text{ GPa}, E^p = 27 \text{ GPa}, \nu = 0.33, h = 0.5 \text{ mm}$ 代入(24)式, 化简后得

$$w_0^4 + 0.086 w_0^2 - 22.26 = 0, \quad (25)$$

求解(25)式可得: $w_0 = 2.16 \text{ mm}$, 此即板的最大变形量。

从(23)和(24)式可以看出, 板料产生变形的前提是作用在板料上的冲击波载荷 P 必须大于某一临界阈值 P_0 。板料变形量及轮廓形状除与材料本身的性能有关外, 还与板料的厚度 h , 参与变形的板料质量 m , 冲击波压力的作用面积 S , 作用时间 t 等多种参量有关。

5 激光冲击板料变形的实验研究

实验在钨玻璃高功率激光冲击波装置上进行。激光的波长为 $1.054 \mu\text{m}$, 脉宽约 23 ns , 能量 35 J 左右, 有效光斑直径为 8 mm , 脉冲的重复率为 0.5 Hz 。

为了验证所推导的用于计算单次激光冲击下板料变形的理论公式的准确程度, 从影响板料变形的几个因素出发, 例如材料、厚度以及板的几何形状和尺寸等, 选取了三种实验方案, 即:

1) 保持板的几何尺寸: 长 \times 宽 \times 高 = $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 不变, 分别选取 LD31 锻铝合金, SUS304 不锈钢以及 TA2 纯钛这三种材料进行冲击。

2) 分别选取厚度为 $0.3 \text{ mm}, 0.5 \text{ mm}, 0.7 \text{ mm}$, 直径为 60 mm 的 SUS304 圆形不锈钢板进行冲击。

3) 选取厚度均为 0.5 mm , 几何形状分别为直径 60 mm 的 TA2 圆板, 长宽均为 60 mm 的 TA2 方

板以及长×宽=100 mm×60 mm的 TA2 矩形板。实验所用材料的物理和力学性能如表 1 所示。

试样被夹持在两个开孔压板之间。材料表面事先经抛光处理,实验中在板料试样表面涂敷一层 50 μm 厚的黑漆作为能量吸收层,以产生等离子体爆炸形成激光冲击波,同时保护板料表面不受激光

热损伤。黑漆层表面使用厚度大约为 3 mm 的流动水层作为约束层,以提高冲击波的压力。实验后表面的黑漆用丙酮洗去并用酒精擦洗干净。使用轮廓测量仪对冲击区域的变形形貌进行测量,三种冲击方案下板料的最大理论和实际变形量如表 2 所示。

表 1 实验材料的物理和力学性能

Table 1 Physical and mechanical property of experimental materials

Sample materials	Thickness / mm	Mechanical property		Physical property		
		Yield limit / MPa	Elastic modulus / GPa	Tangent modulus E^p / GPa	Density / (kg/m ³)	Posion ratio ν
LD31	0.5	145	71	27	2700	0.33
TA2	0.5	600	107.8	36	4500	0.34
SUS304	0.3~0.7	≥210	194	84	7850	0.25

表 2 单次激光冲击下实验材料的最大理论和实际变形量

Table 2 Theoretical maximum and practical deformation amount of experimental materials under single-time laser shock loading

Materials	Thickness / mm			Materials	Sheet shape		
SUS304	0.3	0.5	0.7	TA2	Round sheet ($\phi = 60$ mm)	Square sheet (60 mm×60 mm)	Rectangular sheet (100 mm×60 mm)
Diameter (60 mm)	Theoretical deformation amount			Thickness (0.5 mm)	Theoretical maximum deformation amount / mm		
	2.05	1.74	1.37		1.96	1.96	1.96
	Practical deformation amount				Practical deformation amount / mm		
	1.98	1.71	1.33		1.93	1.91	1.915
Materials	length×width×height / (mm×mm×mm)				Theoretical deformation / mm	Practical deformation amount / mm	
LD31	60×60×0.5				2.16	2.12	
SUS304	60×60×0.5				1.74	1.68	
TA2	60×60×0.5				1.96	1.91	

6 结 论

1) 建立了激光冲击板料的物理模型,得到了高能脉冲激光冲击下,板料所获得的冲量、动量和动能估算式,直观地反映了所获冲量、动量和动能大小与靶材特性、能量转换体(吸收层和约束层)性能以及激光功率密度之间的相互关系。

2) 通过对单次激光冲击下板料变形的理论分析,建立了板料变形量与激光冲击波压力、材料性能和作用时间等参数之间的关系,为分析各种参数对成形过程的影响提供了理论依据。

3) 单次激光冲击成形中激光板料变形量理论公式的建立,为加工过程中各种参数的合理优化,板料变形过程的有效控制,分析和实现大面积金属板料的激光冲击成形提供了理论依据。

4) 从表 2 中所列的板料变形量的理论值和实验值相比可以看出:在板的厚度、板形和板料发生变化的任何一种情况下,依据本文所建立的板料变形理论计算得到的理论值和实验值都较为接近,特别是对于圆板;板的几何尺寸越大,理论值和实验值越接近。这是因为板的几何尺寸越大,激光光斑直径与板的几何尺寸相比就越小,从而把实际边界条件当成无限大处理所带来的误差也就越小。

5) 所建立的单次激光冲击下板料变形的理论与参考文献[3]中所建立的板料变形理论相比,由于借助于能量理论,第一次采用更符合实际变形情况的弹塑性本构模型代替刚塑性模型,并且使处理方板和矩形板边界条件成为可能,从而使本文所建立的板料变形理论与参考文献[3]中所建立的板料变

形理论相比具有更好的精确性和更大的适应性。

参 考 文 献

1 Zhou Jianzhong, Zhang Yongkang, Liu Huixia *et al.*. Experiments and FEM analysis of LD31 sheet deforming by pulsed laser shocking [J]. *Applied Laser*, 2004, **24**(6):339~341
周建忠,张永康,刘会霞等. 脉冲激光冲击 LD31 薄板变形的实验和数值模拟[J]. *应用激光*, 2004, **24**(6):339~341

2 Zhou Jianzhong, Zhang Yongkang, Yang Jichang *et al.*. 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

3 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

4 Ping Gong, Rongqing Tan, Zhiping Tang *et al.*. Experimental investigation of the effects of laser parameters on laser propulsion [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(9):538~540

5 Li Zhiyong, Zhu Wenhui, Zhou Guangquan *et al.*. Experimental study of the effects of PMMA confinement laser-induced shock waves [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(2):118~122
李志勇,朱文辉,周光泉等. 实验研究有机玻璃约束层对激光冲击波的影响[J]. *中国激光*, 1997, **A24**(2):118~122

6 Wenwu Zhang, Y. Lawrence Yao. Microscale laser shock processing—modeling, testing, and microstructure characterization [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2001, **3**(2):128~143

7 Wenwu Zhang, Y. Lawrence Yao. Micro scale laser shock processing of metallic components [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2002, **124**(2):370~377

8 L. Berthe, R. Fabbro, P. Peyre *et al.*. Shock waves from a water-confined laser-generated plasma [J]. *J. Appl. Phys.*, 1997, **82**(6):2826~2832



征 订 启 事

《中国激光》增刊

第十七届全国激光学术会议于 2005 年 10 月 19~22 日在四川绵阳富乐山大酒店召开。本次会议由中国光学学会与中国电子学会联合主办。共有 350 多名来自高校、研究所以及公司激光领域的研究人员参加了本次会议。

本次大会共收到论文 330 篇,《中国激光》将其中的优秀论文 126 篇汇编成册,以增刊形式出版了《第十七届全国激光学术会议论文集》,为广大激光工作者提供了一份有价值的参考资料。

按照研究方向,论文集分为激光物理、非线性光学、高能固体激光与超短脉冲激光、新型激光器、激光技术及晶体材料、激光应用、光束传输、激光薄膜及元器件等专栏。较全面地反映了近年来我国激光科学技术研究、应用和产业化的最新成果,显示了激光科学技术对国家十一五规划、国家 863 计划、国家 973 计划、重大项目、国家基金和产业发展等方面的重要作用与贡献。

论文集共计 462 页,进口雅光纸精印,定价 100 元。欢迎订阅。

《光学手册》

这是我国编写的第一本基础性大型光学手册。本书顾问为著名光学专家龚祖同,主编为李景镇。

本书为 16 开,1541 页,定价 100 元。全书有 2700 多个公式,1400 余幅插图和 400 多个数据表格,230 万字。是“一本兼顾光学工作者和非光学科技工作者的参考书”(引自王大珩院士为本书的题词)。本书能使读者在较短时间内全面了解某门光学分科的主要内容,查阅公式、数据省时省力。

电话:021-69918427 电子信箱:gexiaohong@siom.ac.cn
地址:上海 800-211 信箱 邮政编码:201800 联系人:葛晓红