

文章编号: 1001-3806(2008)01-0037-03

基于激光冲击波三维无损打标的数值模拟

王 伟, 张永康*, 鲁金忠, 殷苏民

(江苏大学 江苏省光子制造科学与技术重点实验室, 镇江 212013)

摘要: 为了研究激光冲击波打标后标记区域的残余应力分布与材料变形情况, 基于 ANSYS/LS-DYNA 建立了激光冲击波打标的三维有限元模型, 通过激光诱导的冲击波加载, 进行了打标的数值模拟。模拟结果表明, 激光冲击波作用后的标记区域网格形成了与载荷直径相仿的凹坑, 其残余应力均表现为压应力, 并随着形变量的逐渐增加, 在标记中心残余压应力达到最大值; 材料厚度方向的残余压应力随着材料厚度的增加而不断减小, 在 1mm~1.4mm 深度范围内载荷的作用效果不明显。这一结果可用于指导激光冲击波三维无损打标残余应力场的理论分析及其实验研究。

关键词: 激光技术; 激光打标; 激光冲击波; ANSYS/LS-DYNA; 残余应力

中图分类号: TN249 文献标识码: A

Numerical simulation of 3-D nondestructive marking based on laser shock wave

WANG Wei, ZHANG Yong-kang, LU Jin-zhong, YAN Su-min

(Jiangsu Provincial Key Laboratory for Science and Technology of Photon Manufacturing, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract In order to study the distribution of residual stress and distortion, a FEM model of marking by means of laser shock waves was established based on ANSYS/LS-DYNA. By loading the shock waves induced by laser, a numerical simulation of marking was carried out. The simulated results showed that the mesh of marking area acted by laser shock waves formed a crater with dimension similar to the diameter of the load, and its residual stress was compressive stress. As the amount of the deformation increased gradually, the residual compressive stress in the center of marking area reached the maximum; the residual compressive stress along the thickness of the material declined as the thickness increased, and the loading effect was not obvious in the depth of 1mm~1.4mm. The results are applicable in theoretical analysis and experimental research of residual stress field of 3-D nondestructive marking based on laser shock wave.

Key words laser technique; laser marking; laser shock wave; ANSYS/LS-DYNA; residual stress

引 言

激光冲击波无损打标是打标领域的一项新技术。与传统的打标技术相比, 它存在材料去除, 也不会改变标记区域的化学性质, 同时会产生较大的残余压应力, 有利于提高零件的抗疲劳寿命。因此, 激光冲击波无损打标技术不但不影响零件的使用, 还可以在一定程度上提高零件的抗疲劳性能。这一优势决定了这项技术在航空航天关键零部件打标上有广泛的应用前景。

2001年, 美国利弗莫尔国家重点实验室 BRENT 等人申报了激光喷丸打标专利^[1], 就是利用激光冲击波力效应打标。国内江苏大学的学者首先在这方面展开了研究。但这些只局限于理论与实验方面的研究, 而运用有限元模拟激光冲击波无损打标的研究迄今为止尚未见相关文献报道。

ANSYS/LS-DYNA 软件是大型的通用有限元分析软件之一, 它将 ANSYS 在前后处理方面以及 LS-DYNA 在动力分析方面的优点有机结合起来, 可方便地建立有限元模型分析。后处理器可以直观地将计算结果以彩色等值、矢量图和梯度等多种形式显示出来。LS-DYNA 是功能齐全的非线性显式分析程序包, 可求解各种几何非线性、材料非线性和接触问题。其显式算法特别适合于分析各种非线性结构冲击动力学问题, 如爆炸、结构碰撞等^[2]。因此, 选用 ANSYS/LS-DYNA 软件来模拟激光冲击波应力打标的残余应力场是非常合适的。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50675089); 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2005054); 江苏省高校自然科学基金资助项目 (06KJB46001805KJD460045); 江苏省高校研究生科技创新计划资助项目 (XM2006-45)

作者简介: 王 伟 (1980-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光冲击波无损打标方向的研究。

* 通讯联系人。E-mail: ykzhang@ujs.edu.cn

收稿日期: 2006-11-22 收到修改稿日期: 2007-04-12

作者从激光冲击波应力打标数值模型的建立、网格划分、激光诱导的冲击波载荷加载等方面,详细分析激光冲击波应力打标的有限元模拟过程,探讨了板料形变量与残余应力场的定性关系,并着重研究了模型的残余应力的分布。

1 有限元模拟

1.1 模型建立

板料模型尺寸为 12mm × 12mm × 2mm,材料为 2024 铝,密度 $\rho = 2.77 \times 10^3 \text{ kg/cm}^3$,弹性模量 $E = 72.5 \text{ GPa}$ 泊松比 $\nu = 0.33$ 。对于有限元模拟来讲,网格划分至关重要。网格划分太密,计算量加大,对硬件设施要求较高,计算时间长;网格划分太疏,影响计算结果的精度。为了能准确地反映激光冲击残余应力场的分布规律,需要在激光束冲击及与其相邻的区域内采取较密的有限元网格来保证足够的计算精度;同时为了避免过多的网格引起的计算时间过长,在其它区域可以采用较粗的网格来划分。

因激光冲击波本身的特点,非线性、大变形,同时材料的应变率非常高,可达 $10^6 \text{ s}^{-1} \sim 10^7 \text{ s}^{-1}$,因此,在选择单元类型和材料模型时一定要考虑到这些特点,既要能够反映板料的变形特点,又要考虑到材料屈服时的应变率影响。故模拟中采用 solid164 八节点六面体单元,该单元是 LS-DYNA 中的特有单元,三维的显式结构实体。

1.2 激光诱导的冲击波加载

激光冲击波应力打标时,由高功率密度、短脉冲激光作用于涂覆在板料上的吸收层和约束层,产生高压脉冲。这一冲击模型能够提高冲击波压力,保护工件不受热损伤,并能提高激光冲击波压力和作用时间。但由于等离子体爆炸产生的冲击波机理十分复杂,很难准确计算冲击波的峰值压力以及其随时间变化的曲线。模拟中,一般预设一定的加载曲线(见图 1),将激光脉冲产生的压力参数化,使模拟载荷沿着指定曲线变化^[3]。

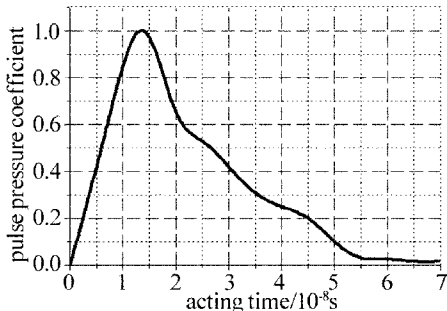


Fig 1 Pressure pulse induced by laser shock wave

激光冲击波的持续时间大约是激光脉宽的 2 倍 ~ 3 倍^[4],激光脉宽大约 23ns 因此模拟中设定冲击波持

续时间为 70ns 峰值压力一般按文献 [5] 中的公式进行估算:

$$P_{max} = \sqrt{\frac{A(\gamma - 1)I_0 Z_0 Z_{c0} \rho}{(2\gamma - 1)(K_a Z_{c0} + K_c Z_{i0})}} \quad (1)$$

式中, p_{max} 为激光脉冲产生的峰值压力; A 为吸收指数, $0.80 \sim 0.95$; γ 为等离子体的绝热指数, 1.67 ; Z_0, Z_{c0} 分别为靶材和约束层材料的声阻抗 [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; K_a, K_c 分别为与能量吸收层和约束层密度有关的参量 (kg/m^3); ρ (kg/m^3) 可看作约束层材料、能量吸收层和工件材料气化蒸气的综合体; I_0 为激光功率密度 (W/m^2),可按下式进行估算:

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

式中, E 为激光束能量 (J); α 为吸收系数,约等于 0.8 ; d 表示激光光斑直径。

1.3 边界条件的设定与加载单元的选择

激光冲击波应力打标时,板料的变形主要集中在标记区域。为了不影响零件的使用同时保证标记易于识别,一般标记区域的深度控制在微米级。边界条件的设定直接影响到板料对加载的响应情况。实验中,需用使用夹具将板料的边缘压紧,但考虑到变形主要发生在标记区域的板厚方向,因此模拟时只限制板料底面的自由度。加载单元的选择需要熟练应用 ANSYS 提供的选择功能,同时考虑到光斑的实际大小。因加载形状直接影响最终结果,可适当选取不同的加载形状进行对比分析。本次模拟选用的是近似圆形光斑,光斑直径大约 4mm。

2 模拟结果分析

2.1 板料变形情况

图 2a 为板料激光打标后的变形图,在标记区域网

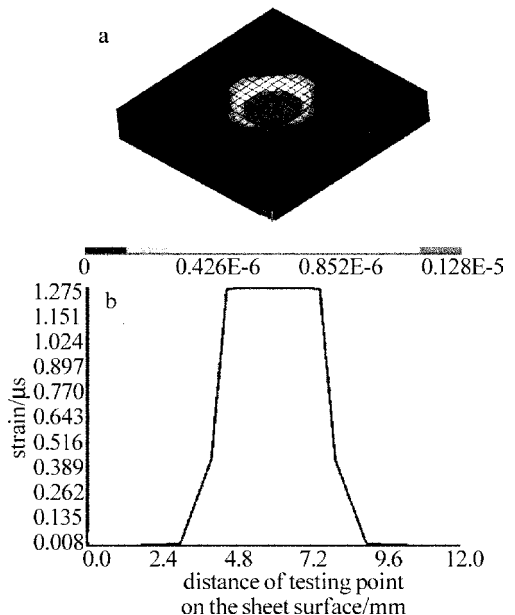


Fig 2 Deformation distribution of plate

格发生明显的变形,形成与载荷直径相仿的凹坑,凹坑边缘深度逐渐过渡,标记比较清晰。图中凹坑即为受到冲击载荷后板料变形最大的区域,这一区域向外层发展,颜色逐渐变淡,说明板料变形越来越小。由于板料变形发生在极短的时间内,变形区内的显微组织将发生明显变化。板料受到激光冲击处理后,冲击区域的位错密度增加、表面硬度的提高和表面粗糙度下降^[6];REN 等人^[7]发现,激光冲击强化后,冲击区表层的晶粒尺寸明显小于冲击之前的晶粒尺寸,激光冲击能够细化晶粒,抑制了疲劳裂纹的成核,提高了铝合金的疲劳寿命。这些也是激光冲击波应力打标能改善铝合金性能的主要原因之一。

图 2b 为沿板料截面方向形变曲线,受到载荷分布的影响,板料变形存在 3 个不同的变化区域:过渡区域、突变区域和最大变形区域。在过渡区域内,板料变形趋势缓慢,并不是简单的线性关系,这主要受到材料塑性流动性能的影响;突变区域内,由于板料同时受到板料表面拉的作用和冲击载荷压的作用,即在这一区域板料受到剪切力的作用,作用时间将近 70ns 导致板料变形呈近似线性关系,因此这一区域容易产生微细裂纹,面积的大小主要受到材料性质与冲击载荷的大小和作用的影响;最大变形区域内,板料不再受到表面拉力的影响,只受冲击载荷的压力,直径大约 3mm,这一区域的大小与冲击载荷的面积有直接关系。

2.2 板料残余应力分布

图 3a 为板料标记后的残余应力分布图,标记的中心区域形成了高值的残余压应力分布区域,这一区域边缘残余应力逐渐过渡至基体为拉、压应力状态。显然,中心区域激光冲击的强化效果非常明显。模拟过

程中发现载荷越大,残余压应力越大,实验中需要考虑到板料的屈服极限,以免在板料变形区域形成微细裂纹。图 3b 为沿板料横截面方向残余应力变化曲线,在标记边缘和标记中心区域附近都存在一个相对缓慢的变化过程,随着向板料中心的靠近,变形速度加快,在接近最大变形区域时变形放慢,在标记中心附近存在一个圆形区域,直径大约 1.8mm,这一区域内残余压应力达到最大值,将近 -194MPa 。

图 4 为板料中心沿板厚方向残余应力变化曲线,残余压应力变化较快,直至深度 1mm 左右,接着开始缓慢变化,这说明直至板料深度 1mm 处载荷的作用效果较为明显,1mm ~ 1.4mm 深度范围内载荷的作用效果逐渐减弱。板厚方向残余应力的分布情况主要与板料本身的机械性能、板料厚度以及载荷大小有关。

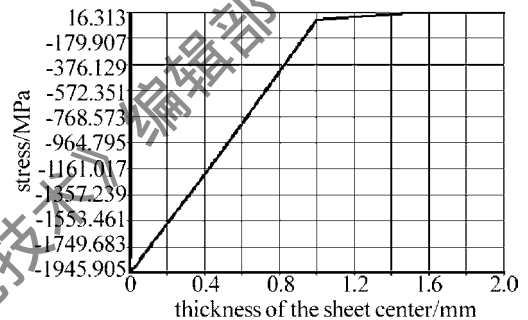


Fig 4 Distribution of residual stress on the thickness

根据文献[8],经激光冲击强化后材料表面会形成 $-14\text{MPa} \sim -237\text{MPa}$ 以上的残余压应力,影响层深度能达到 1mm ~ 2mm。图 3b 中残余压应力最大值将近 -194MPa 。图 4 中影响深度大约 1mm,表明数值模拟结果与先前实验结果相符合,说明本文中所建立的数值模拟方法具有一定的可行性,能较好地模拟激光冲击波无损打标时板料的应力应变情况。

对比图 2b、图 3b,形变量与残余应力存在一定的关系,随着形变量的增加,残余应力值逐渐变大,即激光冲击打标过程中存在激光冲击强化,产生残余压应力可以平衡板料使用过程中的拉应力,延缓疲劳裂纹的产生和扩展速度,验证了文献[9]中的相关说法。此外,最大变形区域比最大压应力区域更大,将近 2 倍。

3 结束语

综合考虑板料参数及激光冲击波打标过程的各种因素的影响,利用 ANSYS/LS-DYNA 建立了激光冲击波应力打标的三维有限元模型。通过该有限元模拟可以掌握激光冲击波应力打标过程中板料变形和残余应力的分布情况,取得了与实验结果比较一致的效果,对激光冲击波打标的实验具有一定的指导意义。目前激

(下转第 43 页)

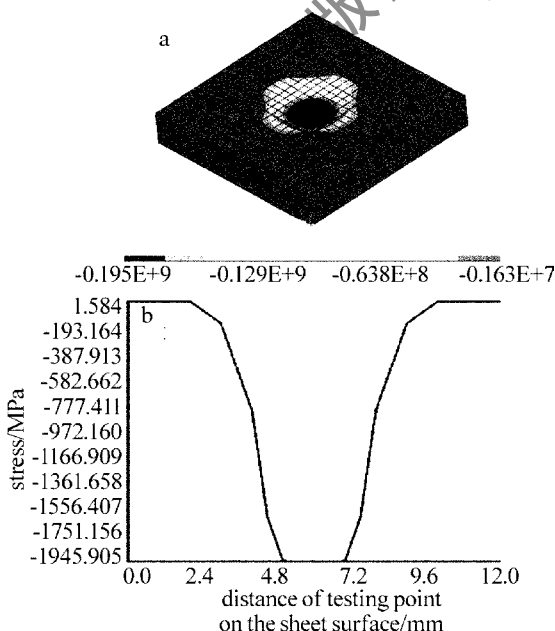


Fig 3 Distribution of residual stress

得知: 板经激光冲击后在 1, 2 方向均产生了残余压应力, 以冲击路径处的残余压应力为最大, 由于板呈不规则的五边形, 故整块板的残余应力也呈不规则分布。

3 结 论

对于钛合金这一类用传统的加工工艺难以成形的材料, 采用激光冲击这一新颖先进的加工手段, 只要控制好用于冲击的激光参数和冲击路径, 就可以使板料发生事先设定的小曲率变形。

建立在激光冲击加载下、板料应力应变场数学物理模型基础之上的数值模拟, 在一定程度上揭示了激光冲击过程的成形机理, 解释了激光参数、板料几何尺寸、以及冲击次数和轨迹对最终成形的复杂影响。因此, 数值模拟技术为优化激光加工工艺参数、精确控制板料的小曲率成形、获得渴望的残余应力大小和分布, 从而使板料可控成形以取得最佳加工效果提供了有效手段。

实验数据和仿真结果在一定程度上接近表明以上建立的模型和加载方式以及所采用的算法是比较正确的; 但两者之间存在的误差也说明在仿真过程中使用的本构模型以及冲击波压力的大小测定还有不尽人意之处, 已获得的实验和仿真数据为对所使用的本构模型以及冲击波压力的大小测定作进一步的修正提供了充分的依据。

参 考 文 献

[1] GAO L Theoretic and experimental studies on deformation of TA2

sheet metal by laser shock [J]. Laser Technology, 2007, 31(1): 89-91(in Chinese).

- [2] GE T, ZHANG Y K, LU J Zh Intensifying experiment of Dangerous section of engine flying hammer under laser shock [J]. Journal of Jiangsu University, 2006 14(3): 1-4(in Chinese).
- [3] ZHOU J Zh, ZHANG Y K, ZHOU M. Study on technique of laser shock forming of metal sheet [J]. Laser Technology 2002, 26(6): 478-480(in Chinese).
- [4] HUA Y Q, CHEN R F, YANG J Ch Study on the theoretical thickness of the free limiting layer and experiments in laser shock processing [J]. Laser Technology 2002 28(2): 150-152(in Chinese).
- [5] ZHOU J Zh, ZHANG Y K, YANG J Ch New technique on plastic forming of metal sheet by laser shock wave [J]. China Mechanical Engineering 2002, 13(22): 1938-1941(in Chinese).
- [6] ZHOU J Zh. Method and equipment of three dimensional high anti counterfeiting and undamaged identifier produced by laser shock China 200510037968 2 [P]. 2005-03-04(in Chinese).
- [7] FONG A X A sort of compound restricting layer for the use of laser shock China 200510037965 9 [P]. 2005-03-04(in Chinese).
- [8] ZHOU J Zh, ZHANG Y K, ZHOU M. Theoretical analysis on deformation of sheet metal under one laser shot loading [J]. Chinese Journal of Lasers 2005 32(1): 135-138(in Chinese).
- [9] ZHANG W W, YAO L M Microscale laser shock processing modeling testing and microstructure characterization [J]. Journal of Manufacturing Processes 2001, 3(2): 128-143
- [10] ZHANG W W, YAO L M Micro scale laser shock processing of metallic components [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering 2002 1(24): 370-377
- [11] BERTHE L, FABBRO R, PEYRE P. Shock waves from a water confined laser generated plasma [J]. Appl Phys 1997, 82(6): 2826-2832
- [12] MALE A T, CHEN Y W, LI P J Plasma jet forming of sheet metal shapes [J]. Materials Science and Technology 2001, 17(1): 115-120

(上接第 39 页)

光冲击方面的研究很多, 但大多集中在板料的残余应力分布和总体变形情况, 板料的局部成形机理、残余应力与变形关系等方面还需要进一步地研究。

同时模拟中存在一些问题: 实际打标过程中, 激光束的能量分布不均匀, 但在模拟中近似将载荷当作是均匀的; 激光诱导的冲击波加载曲线的实际变化情况; 板料在高应变率作用下的塑性成形理论相对缺乏^[10]等。上述问题还有待进一步的研究, 以便使数值模拟结果与实验更好地结合起来。

参 考 文 献

- [1] BRENT D C, LOYDA H L, FRITZ H. Identification marking by means of laser peening USA, Wo0161619 [P]. 2001-08-23
- [2] SHANG X J, SU JY. ANSYS/LS-DYNA dynamic analysis methods and its application [M]. Beijing China Water Conservancy Press 2005 14-18(in Chinese).
- [3] DU J J, ZHOU J Z, YANG Ch J *et al* Application of ABAQUS in simulation process of laser peen forming of sheet metal [J]. Applied Laser 2005 25(6): 371-373(in Chinese).
- [4] PEYRE P, FABBRO R. Laser shock processing a review of the phys-

ics and applications [J]. Optical and Quantum Electronics 1995 27(12): 1213-1229.

- [5] ZHOU J Z, ZHANG Y K, ZHOU M, *et al* Theoretical analysis on deformation of sheet metal under one laser shot loading [J]. Chinese Journal of Lasers 2005 32(1): 135-138(in Chinese).
- [6] ZHANG H, TANG Y X, YU C Y, *et al* The effects of laser shock processing on the fatigue properties of 2024 aluminum alloy [J]. Transactions of Metal Heat Treatment 1999, 20(2): 57-62(in Chinese).
- [7] REN N F, YANG J C, CAI L, *et al* Effects of laser shocking on the mechanical properties of metals [J]. Laser Technology, 1998, 22(4): 235-238(in Chinese).
- [8] PEYRE P, FABBRO R, BERTHE L, *et al* Laser shock processing of materials Physical processes involved and examples of applications [J]. Journal of Laser Applications 1996 16(8): 135-141
- [9] ZHANG Y K, YIN S M, ZHOU J Z, *et al* Method and device of 3-D nondestructive and high anti counterfeiting markings by laser shock wave China 200510037968 2 [P]. 2005-03-08(in Chinese).
- [10] LU J Zh, ZHANG Y K, KONG D J *et al* Study on residual stresses distribution and fabricating of nondestructive laser marking based on liquid crystal mask [C] // Proceedings of the 7th ICDFM 2006 International Conference on Frontiers of Design and Manufacturing Guangzhou Guangdong University of Technology Press 2006 515-518 (in Chinese).