

激光冲击钛合金薄壁件动态响应及残余拉应力形成机制

田乐¹, 聂祥樊¹, 罗思海¹, 王育虔², 何卫锋¹✉, 李一鸣¹, 李翔¹

(1. 空军工程大学等离子体动力学重点实验室, 西安, 710038; 2. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038)

摘要 为探究激光冲击薄壁件时残余拉应力的形成机制, 利用 ABAQUS 软件对 0.5 mm 钛合金薄壁件激光冲击条件下的冲击波作用规律和材料动态响应规律展开研究。结果表明, 冲击波在薄壁件内反射时交替形成高数值拉伸波和压缩波, 在压缩波和拉伸波的耦合作用下应力分布混乱并呈现“多峰”特点, 形成了峰值为 426 MPa、厚度达 0.125 mm 的拉应力层, 且最大残余拉应力位于表面处。基于冲击波反射规律揭示了薄壁件中残余拉应力的形成机制, 并通过增加试件厚度以降低反射拉伸波强度发现 5 mm 厚试件内最大残余拉应力仅为 70 MPa, 且表面处的拉应力转化为了压应力, 从而提出了通过导波等方式控制应力波反射强度的薄壁件残余应力调控方法。

关键词 激光冲击强化; 残余拉应力; 薄壁件; 冲击波

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.03.002

中图分类号 V231.9; TN249 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)03-0007-06

Dynamic Response and Residual Tensile Stress Formation Mechanism of Titanium Alloy Thin-Walled Piece in Laser Shock Peening

TIAN Le¹, NIE Xiangfan¹, LUO Sihai¹, WANG Yuqian², HE Weifeng¹✉, LI Yiming¹, LI Xiang¹

(1. Key Laboratory of Science and Technology on Plasma Dynamics, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: To investigate the residual tensile stress formation mechanism of thin-walled piece in laser shock peening, the shock wave propagation law and the dynamic respond law of 0.5mm titanium alloy thin-walled piece are analyzed by ABAQUS software. The results show that when in reflecting in the thin-walled piece, the shock wave forms high-intensity tensile wave and compression wave in turn. The stress distribution in depth is disordered under the action of tensile wave and compression wave, and is characterized by multiple peaks. The tensile stress field is located within 0.125mm beneath the surface and the residual tensile stress up to 426 MPa appears on the surface. The formation mechanism of residual tensile stress is revealed based on the shock wave reflection law. The maximum residual tensile stress is only 70 MPa in the 5mm thick plate and tensile stress at the surface translates into compressive stress by reducing the intensity of reflected tensile wave. Therefore, based on the principle of controlling the reflection wave pressure, a method of stress field regulation by exporting shock wave is proposed.

收稿日期: 2017-01-09

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1102600)

作者简介: 田乐(1995-), 男, 河南漯河人, 硕士生, 主要从事航空部件修复和表面强化技术研究. E-mail: dreamcatcher_le@163.com

通信作者: 何卫锋(1977-), 男, 湖南桃江人, 教授, 博士生导师, 主要从事航空发动机结构表面工程、强度研究. E-mail: hehe_coco@163.com

引用格式: 田乐, 聂祥樊, 罗思海, 等. 激光冲击钛合金薄壁件动态响应及残余拉应力形成机制[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(3): 7-12. TIAN Le, NIE Xiangfan, LUO Sihai, et al. Dynamic Response and Residual Tensile Stress Formation Mechanism of Titanium Alloy Thin-Walled Piece in Laser Shock Peening[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(3): 7-12.

Key words: laser shock peening; residual tensile stress; thin-walled piece; shock wave

随着航空发动机性能要求的不断提高,零部件朝着轻量化的趋势发展,其中压气机钛合金叶片越来越薄,且弯扭程度不断加大^[1-2],在不改变其设计外形的前提下提高疲劳性能的需求十分迫切^[3]。激光冲击强化是一种可显著提升部件疲劳强度的新型表面处理技术^[4-7],其原理是材料在激光诱导冲击波的作用下发生塑性变形,形成高数值、大深度的残余压应力。但是,已有研究表明激光冲击强化薄壁件时极易引入有害的残余拉应力^[8-9]。Cellard等^[10]对Ti-17钛合金的实验研究发现薄壁件表面经冲击处理后会出现残余拉应力;Dorman等^[11]研究了激光冲击对铝合金薄板残余应力的影响,发现在1 GW/cm²和3 GW/cm²的功率密度下冲击表面分别会残留44 MPa和65 MPa的拉应力;印成等^[12]以0.5 mm厚AZ31B镁合金薄板为对象研究了冲击强化时材料的动态响应与残余应力分布情况,发现在冲击区域内形成了残余拉应力;罗开玉等^[13]对AM50镁合金1 mm板料双面对冲的研究发现对冲后深度方向呈现压应力和拉应力交错分布的状态,激光冲击未起到强化作用;Ocaña^[14]和凌祥等^[15-16]也发现了相似的现象。以上研究结果表明,薄壁件经激光冲击强化后会残余拉应力,难以达到提高其疲劳性能的要求。因此,激光冲击条件下薄壁件的响应规律及拉应力形成机制是指导薄壁件强化工艺设计的关键。

1 激光冲击薄壁件动态响应

1.1 材料本构模型

本文选用常用于制造航空发动机风扇叶片和压气机盘等部件的TC4钛合金材料为研究对象,基本性能参数见文献[17]。本构模型采用在高速冲击、爆炸冲击等高应变率条件下广泛应用的Johnson-Cook本构模型(J-C模型)^[18-19],由于激光冲击强化过程中水约束层和保护层的作用,可忽略激光的热效应。因此J-C本构方程为:

$$\sigma_y = (A + B\epsilon^n)[1 + C \ln(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0)] \quad (1)$$

式中:A为材料屈服强度;B为加工硬化模量;n为硬化系数;C反映了材料的应变率硬化效应; ϵ 为塑性应变; $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$ 为无量纲塑性应变率; $\dot{\epsilon}_0$ 取为1。J-C本构模型参数见文献[20]。

1.2 有限元模型

压气机叶片进、排气边厚度较小,位于0.3~1 mm之间,建立5 mm×5 mm×0.5 mm的TC4钛

合金激光冲击有限元模型,用于研究薄壁件中激光冲击波的传播耦合规律。为消除表面波在周向界面反射时对轴向应力波传播造成的影响,模型四周布置无限单元CIN3D8作为无反射边界条件;中部布置六面体弹塑性有限单元C3D8R,用于确定材料内的动态应力,从而表征冲击波的反射过程,见图1(a)。

为对比高数值反射波对不同厚度试件残余应力场的影响并为薄壁件应力场调控提供指导,建立厚度为5 mm的有限元模型模拟靶材。由于采用单点冲击方案,为提高计算效率选定大小为2.5 mm×2.5 mm×5 mm的1/4对称立方体模型。模型对称面和冲击面外的其它方向布置无限单元CIN3D8作为无反射边界,从而消除应力波反射的影响,并于对称面处施加对称边界条件;其余部分布置为有限单元C3D8R,见图1(b)。

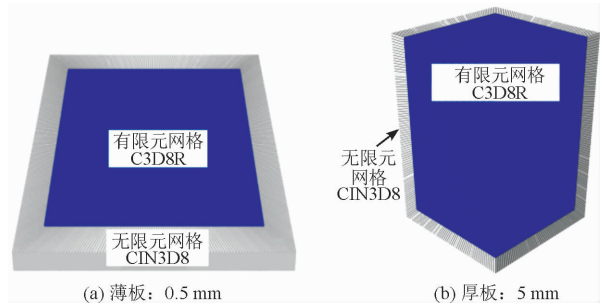


图1 TC4钛合金有限元模型

Fig. 1 Finite element model of TC4 specimen

根据冲击动力学理论,当冲击波压力超过金属材料的Hugoniot弹性极限时,材料才会发生塑性变形。近似采用一维应变冲击压缩条件,材料的Hugoniot弹性极限^[21]表示为:

$$\sigma_{HEL} = (K/2G + 2/3)\sigma_{0.2} \quad (2)$$

式中: σ_{HEL} 为Hugoniot弹性极限;K为体积模量;G为剪切模量。可求得TC4钛合金的Hugoniot弹性极限为2.8 GPa。

激光诱导冲击波是能量的载体,其压力载荷是冲击波与材料相互作用的重要初始条件,是决定冲击波在材料内传播规律和应力场分布特征的关键因素。根据课题组相应研究^[22],利用光子多普勒测速仪测试自由面的粒子速度,反向推算获得激光诱导冲击波特征,图2为冲击波压力时空分布曲线,时间分布上将其简化为三角波进行定义,压力脉宽达到68 ns,上升时间2 ns;空间分布为高斯分布,利用如式(3)时空分布形式对激光冲击载荷进行定义:

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

式中: $P(r, t)$ 为t时刻某点冲击波压力;r为距光斑

中心的距离; R 为光斑半径。

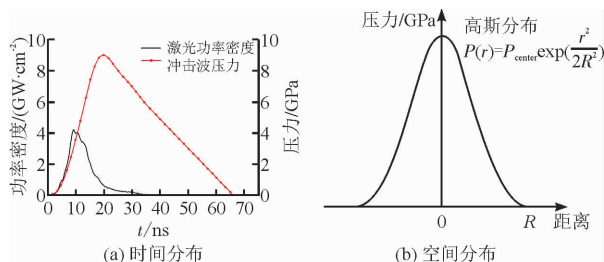


图 2 激光束能量时空分布示意图

Fig. 2 The time and spatial energy distribution of laser beam

由于 TC4 钛合金的弹性极限为 2.8 GPa,且激光冲击钛合金时冲击波峰值压力一般位于 4~6 GPa,故本文将冲击波压力设定为 5 GPa,采用单面单点冲击,激光波长 1 064 nm,光斑直径 2.6 mm。

1.3 钛合金薄壁件自由面反射规律

激光冲击强化主要利用冲击波的力效应使材料发生高应变率 ($>10^6/s$) 动态响应、产生塑性变形,从而残留高数值残余应力并引起微观组织细化,因此激光诱导冲击波的传播规律以及材料的动态响应规律是首先要关注的问题^[23-24]。激光冲击薄壁件时由于试件厚度较薄使得冲击波不断反射,材料在入射波和反射波的耦合作用下发生多次塑性变形。将冲击波第 1 次到达冲击背面与表面时的反射过程作为第 1 波程,冲击波对材料的作用主要发生在第 1 波程中^[25-26],后续的传播特性与第 1 波程相似,因此主要以第 1 波程为例进行分析。

冲击波首先在冲击背面发生反射,见图 3~4。第 95 ns 时加载波波前到达冲击背面并开始反射,峰值压力衰减至 $-3\ 847.88\ \text{MPa}$ ($>\sigma_{\text{HEL}}$)。第 115 ns 后激光诱导冲击波经自由面反射后形成同等强度的拉伸波,使材料产生拉应力,冲击背面处反射过程趋于完成。由图 4 可知,由于冲击加载波为三角波,反射拉伸波与入射压缩波在距反射面约 0.1 mm 的距离内耦合叠加,使得该区域内的应力幅值低于 Hugoniot 弹性极限,所以该区域内未产生塑性变形。第 120 ns 后冲击波压力幅值超过弹性极限且为拉伸波,所以薄壁件轴向压缩塑性应变降低,在拉伸波的持续作用下,反射面区域内材料塑性应变发生反向,形成拉伸塑性应变。

冲击波在冲击背面反射后逐渐向表面传播并再次发生反射,见图 5~6。拉伸波于 175 ns 时抵达冲击面开始反射过程,反射过程于 218 ns 时完成。与背面处的反射过程类似,入射波伴随着衰减到达冲击表面发生反射,应力波再次改变符号,且在距表面 0.1 mm 内反射耦合使应力低于材料的弹性极限,轴向塑性应变分布不发生改变。

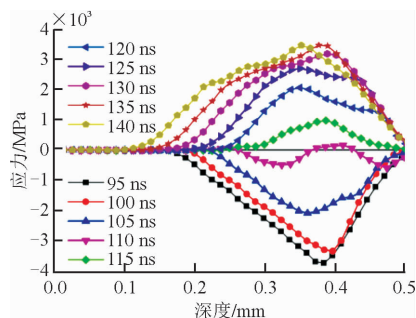


图 3 背面反射时轴向应力趋势

Fig. 3 The variation of axial stress in the first reflection

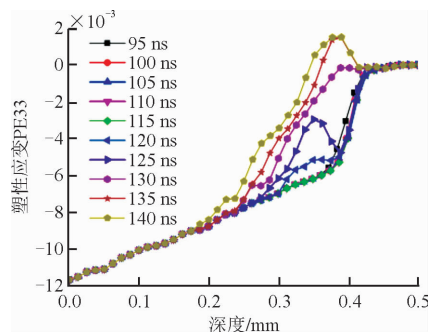


图 4 背面反射时轴向塑性应变趋势

Fig. 4 The variation of axial plastic strain in the first reflection

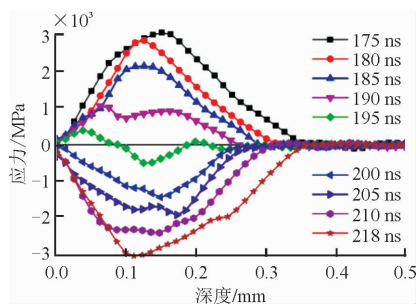


图 5 表面反射时轴向应力趋势

Fig. 5 The variation of axial stress in the second reflection

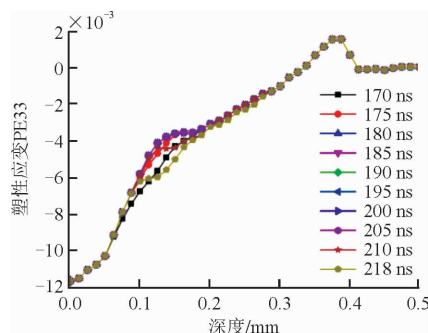


图 6 表面反射时轴向塑性应变趋势

Fig. 6 The variation of axial plastic strain in the second reflection

通过以上分析可知,第 1 波程持续时间为 0~218 ns,冲击波在第 1 波程中先后在背面和表面发生反射使应力波符号改变,交错形成拉伸波和压缩

波,2种波在自由面附近发生耦合,材料在拉伸波和压缩波的交互作用下发生多次塑性变形。由应力波理论可知,应力波由材料A传播至材料B发生反射时满足以下关系:

$$F = \frac{\sigma_R}{\sigma_I} = (\rho_B C_B - \rho_A C_A) / (\rho_A C_A + \rho_B C_B) \quad (4)$$

式中: F 为应力波反射系数; σ_I 、 σ_R 分别为入射波、反射波的应力; $Z = \rho C$ 为材料声阻抗, ρ 为材料密度, C 为冲击波在材料内的传播速度。激光冲击钛合金时,由于空气声阻抗远远小于钛合金声阻抗,相差5个数量级,所以反射系数 $F \rightarrow -1^+$,即反射波应力符号与入射波相反且幅值较大,所以在薄壁件背面和表面反射时应力波符号均发生了改变,形成了高强度的拉伸波和压缩波。

1.4 钛合金薄壁件塑性变形规律

由以上分析可知,反射波与入射波在距反射面约0.1 mm处耦合叠加,材料在耦合波系的作用下形成复杂的塑性变形和应力场,并最终产生宏观变形。因此,选取距薄壁件表面0.12 mm处的A处和B处进一步研究薄壁件内的塑性变形规律,见图7。

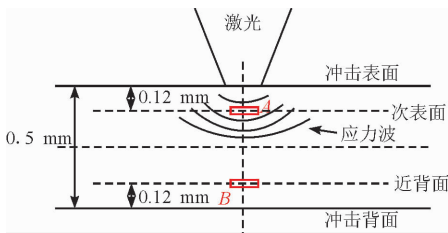


图7 材料塑性变形分析关键位置示意图

Fig.7 The key position for the plastic strain analysis

以冲击波的第1波程(0~218 ns)为例进行分析,A、B两处的塑性变形过程见图8。首先,冲击波从第33 ns开始作用于A处,在塑性压缩波的作用下A处先于B处形成-0.01的压缩塑性应变;此后冲击波沿深度方向继续传播,第76 ns时塑性压缩波到达B处并引起压缩塑性应变。由于冲击波在传播过程中存在衰减,使得B处的压缩塑性应变为-0.005,小于A处的塑性应变。然后,冲击波在背面反射形成了拉伸波并先后作用于B处和A处。根据Bauschinger效应^[27],B处材料在压缩加载后将发生应变硬化,压缩屈服应力提高,从而使得反向加载时拉伸屈服应力降低,导致材料在较低强度拉伸波作用下产生较大拉伸塑性应变,B处塑性应变符号改变。最后,拉伸波传播至A处虽也引起了拉伸塑性应变,但由于A处的压缩塑性应变较大且拉伸波发生了进一步衰减,使得A处在第1波程结束时仍残余压缩塑性应变。第1波程结束后,应力波以压缩波形式从冲击表面继续传播,A处和B处再

次产生压缩塑性应变,在后续耦合波系的作用下,最终于A处形成了拉伸塑性变形,而B处则残余压缩塑性变形。

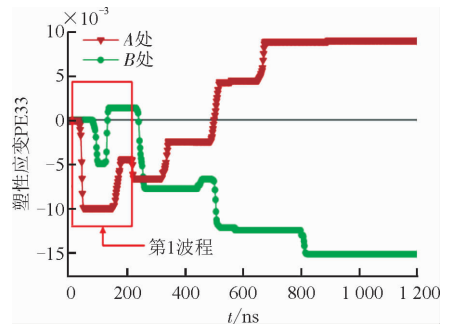


图8 材料关键位置塑性应变趋势

Fig.8 The plastic strain of the key position

2 残余应力分布特征与调控方法

2.1 残余应力场分布

图9为薄壁件深度方向的应力应变场分布情况,冲击表面处形成了峰值0.0165的拉伸塑性应变,而背面形成了峰值0.0328的压缩塑性应变。由于薄壁件内塑性应变分布无良好梯度特征,所以残余应力分布也相对紊乱,表面处形成了最大为426 MPa的残余拉应力,且截至0.125 mm深度内均为残余拉应力区,冲击背面则形成了最大为-805 MPa的残余压应力,显然不符合工程应用需要。

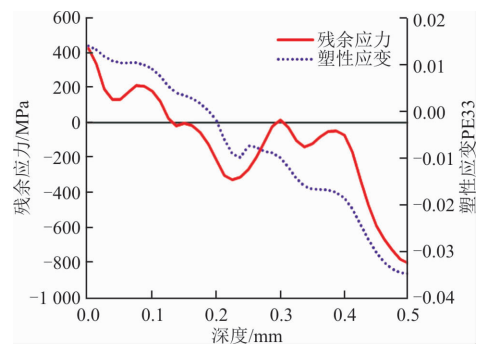


图9 薄壁件深度方向塑性应变和残余应力分布

Fig.9 The plastic strain and residual stress distribution in depth direction of the thin-walled piece

2.2 残余应力调控方法

为进一步探究反射波在不同厚度试件中对残余应力场的影响,建立图1(b)有限元模型,采用与0.5 mm薄壁件相同的激光冲击参数,对厚度为5 mm的钛合金试件进行激光冲击强化数值模拟。

如图10所示,与薄壁件残余应力场结果对比,厚试件的残余应力分布具有良好的梯度特征,且残余拉应力较小。试件表层0.6 mm深度内形成了压应力层,峰值-538 MPa位于0.065 mm深度处,压

应力随着深度的增加逐渐减小;在 0.6~2 mm 深度处虽形成了残余拉应力层,但最大拉应力仅为 70 MPa,较 0.5 mm 薄壁件中的 426 MPa 有明显降低,该结果与文献^[28]中理论相符。因此,可通过控制冲击波在薄壁件内的反射过程,尽量降低拉伸波强度甚至避免反射拉伸波的出现,从而消除薄壁件中的残余拉应力、实现对应力场的有效调控。

然而实际应用中不可能通过增加试件厚度以减弱反射波的影响,所以借助该思路,可在航空发动机叶片等薄壁件的冲击背面加一种与其声阻抗相匹配的透波材料使冲击波尽量透射出去,从而降低反射波强度,达到薄壁件应力场调控的目的。

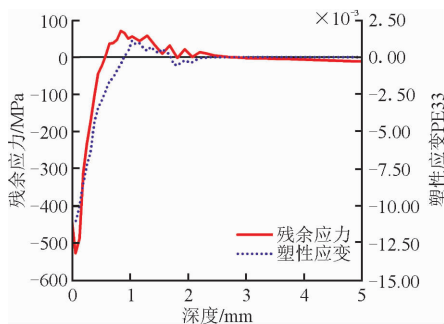


图 10 5mm 厚试件深度方向塑性应变和残余应力分布

Fig. 10 The plastic strain and residual stress distribution in depth direction of the 5mm thick plate

3 结论

1) 薄壁件内残余应力分布混乱并呈现“多峰”特点,距表面 0.125 mm 深度内为拉应力区,最大残余拉应力 426 MPa 位于冲击表面,峰值达 -805 MPa 的残余压应力位于背面处。

2) 冲击波在薄壁件内反射系数 $F \rightarrow -1^+$, 反射时应力波符号改变并交替形成了高强度拉伸波和压缩波。材料在压缩波作用后发生了应变硬化、拉伸屈服应力降低,使得材料在反射拉伸波作用下更易产生拉伸塑性应变,最终在压缩波和拉伸波的交替作用下形成了残余拉应力。

3) 通过降低反射拉伸波强度,厚试件内残余拉应力降至 70 MPa,且试件表层形成了 0.6 mm 厚的残余压应力层。所以,提出基于导波等方式的应力场调控方法,为薄壁件激光冲击强化工艺优化提供思路。

参考文献(References):

[1] LI P Y, HUANG S K, XU H F, et al. Numerical Simulation and Experiments of Titanium Alloy Engine Blades Based on Laser Shock Processing[J]. Aero-

space Science and Technology, 2015, 40:164-170.

[2] 薛丁元,何卫锋,焦阳,等. 微激光冲击提高 TC17 钛合金高周疲劳性能研究[J]. 激光与红外, 2016, 46(10):1189-1194.

XUE D Y, HE W F, JIAO Y, et al. Study on High Cycle Fatigue Performance of TC17 Titanium Alloy Improved by Micro-Scale Laser Shock Processing[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(10):1189-1194. (in Chinese)

[3] MA Z, LI Y H, WANG C. Investigation of Laser Shock Peening on Aero-Engine Compressor Rotor Blade[J]. Key Engineering Materials, 2008, 373-374: 404-407.

[4] 李应红. 激光冲击强化理论与技术[M]. 北京:科学出版社,2013.

LI Y H. The Theory and Technology of Laser Shock Peening[M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)

[5] GE M Z, XIANG J Y. Effect of Laser Shock Peening on Microstructure and Fatigue Crack Growth Rate of AZ31B Magnesium Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 680:544-552.

[6] 陆莹,赵吉宾,乔红超. TiAl 合金激光冲击强化工艺探索及强化机制研究[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 125-130.

LU Y, ZHAO J B, QIAO H C. Investigation of Technical and Strengthening Mechanism Research of TiAl Alloy by Laser Shock Peening[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(10): 125-130. (in Chinese)

[7] 周建忠,王呈栋,黄舒,等. 6061-T6 铝合金紧凑拉伸试样激光喷丸强化后的疲劳裂纹扩展性能研究[J]. 中国激光, 2011, 38(7):0703009.

ZHOU J Z, WANG C D, HUANG S, et al. Study on Fatigue Crack Growth Performance of 6061-T6 Aluminum Alloy after Laser Shot Peening[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(7): 0703009. (in Chinese)

[8] SAGISAKA Y, KAMIYA M, MATSUDA M, et al. Thin-Sheet-Metal Bending by Laser Peen Forming with Femtosecond Laser[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210: 2304-2309.

[9] MORALES M, PORRO J A, GARCIA-BALLESTEROS J J, et al. Effect of Plasma Confinement on Laser Shock Microforming of Thin Metal Sheets[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(12): 5408-5412.

[10] CELLARD C, RETRAINTA D, FRANCOISA M, et al. Laser Shock Peening of Ti-17 Titanium Alloy: Influence of Process Parameters[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 532:362-372.

[11] DORMAN M, TOPARLI M B, SMYTH N, et al. Effect of Laser Shock Peening on Residual Stress and

- Fatigue Life of Clad 2024 Aluminium Sheet Containing Scribe Defects[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2012, 548:142-151.
- [12] 印成, 冯爱新, 曹宇鹏, 等. 激光冲击波加载 AZ31B 镁合金薄板动静态响应实验研究[J]. *应用激光*, 2014, 34(6):562-566.
- YIN C, FENG A X, CAO Y P, et al. Experimental Research of Dynamic and Static Respond of AZ31B Magnesium Alloy Sheet by Laser Shock Wave[J]. *Applied Laser*, 2014, 34(6): 562-566. (in Chinese)
- [13] 罗开玉, 陈起, 吕刺, 等. 双面激光同时冲击 AM50 镁合金板料的厚度分析[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 65-70.
- LUO K Y, CHEN Q, LV C, et al. Thickness Analysis of Two-sided Simultaneous Laser Shock Processing on AM50 Mg Alloy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(1):65-70. (in Chinese)
- [14] OCAÑA J L, CORREA C, GARCÍA-BELTRÁN A, et al. Laser Shock Processing of Thin Al2024-T351 Plates for Induction of Through-Thickness Compressive Residual Stresses Fields[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 223:8-15.
- [15] LING X, PENG W W, MA G. Influence of Laser Peening Parameters on Residual Stress Field of 304 Stainless Steel[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2008, 130(2):021201-021208.
- [16] 彭薇薇, 凌祥. 激光冲击残余应力场的有限元分析[J]. *航空材料学报*, 2006, 26(6):30-37.
- PENG W W, LING X. Residual Stress Field Induced by Laser Peening: A Finite Element Analysis[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2006, 26(6): 30-37. (in Chinese)
- [17] LUO K Y, LU J Z, WANG Q W, et al. Residual Stress Distribution of Ti-6Al-4V Alloy under Different ns-LSP Processing Parameters[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 285: 607-615.
- [18] JOHNSON G R, COOK W H. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures[C]. *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics Hague the Netherlands Publishers*, 1983.
- [19] 彭鸿博, 张宏建. 金属材料本构模型的研究进展[J]. *机械工程材料*, 2012, 36(3):5-10.
- PENG H B, ZHANG H J. Research Development of The Constitutive Models of Metal Materials[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2012, 36(3): 5-10. (in Chinese)
- [20] 李玉杰, 陈东林, 熊笏琦, 等. TC4 钛合金板材激光冲击强化动态应力波传播特性的数值模拟与实验[J]. *塑性工程学报*, 2011, 18(4):79-84.
- LI Y J, CHEN D L, XIONG L Q, et al. Numerical Simulation and Experimental Investigation on The Transient Transmission of Stress Wave of TC4 Material During Laser Shock Processing[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2011, 18(4):79-84. (in Chinese)
- [21] 谭华. 实验冲击波物理导引[M]. 北京:国防工业出版社, 2007.
- TAN H. Introduction to Experimental Shock-Wave Physics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [22] 聂祥樊. 钛合金薄叶片激光冲击超高应变率动态响应与强化机理研究[D]. 西安:空军工程大学, 2015.
- NIE X F. Dynamic Response And Strengthening Mechanism of Titanium Alloy Thin Blade under Laser Shock Loading at Ultra-High Strain Rates[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2015. (in Chinese)
- [23] 胡永祥. 激光冲击处理工艺过程数值建模与冲击效应研究[D]. 上海:上海交通大学, 2008.
- HU Y X. Research on The Numerical Simulation and Impact Effects of Laser Shock Processing[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [24] 廖培育, 王声波, 盛晶晶, 等. 实验研究脉冲强激光在钛合金靶中诱导的冲击波[J]. *应用激光*, 2007, 27(2):110-112.
- LIAO P Y, WANG S B, SHENG J J, et al. Experimental Study of High-power Pulsed Laser Induced Shock Waves in Ti Alloy Target[J]. *Applied Laser*, 2007, 27(2):110-112. (in Chinese)
- [25] 郭伟国, 李玉龙, 索涛. 应力波基础简明教程[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2007.
- GUO W G, LI Y L, SUO T. Stress Wave Concise Guide[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2007. (in Chinese)
- [26] 王礼力. 应力波基础[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.
- WANG L L. Foundation of Stress Wave[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (in Chinese)
- [27] 陈明祥. 弹塑性力学[M]. 北京:科学出版社, 2007.
- CHEN M X. Elasticity and Plasticity[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
- [28] ZHAO J F, ZHOU J Z, HUANG S, et al. Numerical Simulation on Fatigue Crack Growth of Metal Sheet Induced by Laser Shot Peening[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2009, 23:1646-1651.