

激光冲击波加载金属材料中心压应力缺失效应

王 波, 陈东林, 周留成, 何卫锋

(空军工程大学 航空航天工程学院, 陕西 西安 710038)

摘 要: 纳秒脉冲、千兆瓦级激光辐照金属材料产生高压等离子体冲击波, 作用于金属材料表面并向内传播, 产生残余压应力场。但在单次冲击加载时, 残余压应力场中心出现的残余压应力值小于加载边缘, 应用理论分析和实验测试的方法解释了这一过程, 并结合激光诱导冲击波 Fabbro 方程和 TC4 钛合金动态响应模型, 建立了不同形式冲击波加载 TC4 钛合金的数值仿真模型, 分析了冲击波压力、作用时间和加载形式对中心压应力缺失的影响。

关键词: 强激光; 冲击波; 残余压应力缺失; 数值计算

中图分类号: TG665 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)11-3521-06

Central residual compressive stress drop on metal materials after laser induced shock wave

Wang Bo, Chen Donglin, Zhou Liucheng, He Weifeng

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The high pressure plasma shock wave induced by nanosecond pulse and 1 000 MW laser irradiation on the metal materials will propagate into the materials and impart residual compressive stresses. But when shock wave was singly loaded, the lower residual stress at the center of the loading zone compared to those away from the center will be induced. This process is proved by theorems and experiments. Moreover, the Fabbro equation of plasma shock wave and dynamic response of TC4 titanium alloy was calculated in the numerical model of different shock wave loading, the influence of the shock wave pressure, the actuation duration and the loading shape on residual stress drop at the center was discussed.

Key words: intense laser; shock wave; residual compressive stress drop; numerical simulation

收稿日期: 2014-03-05; 修订日期: 2014-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(51205406)

作者简介: 王波(1988-), 男, 硕士生, 主要从事装备损伤修复与表面强化技术相关方面的研究。Email: wblovewo5@sina.com

导师简介: 陈东林(1965-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事机械装备失效分析与防护相关方面的研究。Email: happyzle@163.com

0 引言

研究材料在超高应变率冲击波($\epsilon > 10^6$)加载下动力响应是材料动力学中历来十分关注的课题。其中,强激光与材料相互作用产生高强度、超高应变率冲击波对金属材料进行强化得到广泛研究^[1-2]。纳秒脉冲、千兆瓦级激光辐照在材料上时,在约束层作用下会产生高强度压力等离子体冲击波,作用于金属表面并向内部传播。当冲击波的峰值压力超过被处理材料 Hugoniot 弹性极限时,材料发生塑性变形并在表层形成很大的残余压应力,同时细化微观组织,可有效提高材料的抗疲劳、耐磨损和抗应力腐蚀等性能,这种技术被称为激光冲击强化^[3-6]。在这一过程中,激光冲击波在材料表面诱发的残余应力场分布对金属材料的力学性能有着重要的影响。

在一些数值仿真和试验中报道,冲击波一次加载诱导的残余应力场在靶材表面径向分布情况是,冲击区域残余压应力峰值并不出现在冲击波加载区域(激光光斑)的几何中心,而是在出现于加载区域的较边缘处,这种在冲击波加载几何中心表现为压应力缺失的现象称之为“残余应力洞”。这种现象的出现不仅不利于激光能量的充分利用,更会造成冲击区域残余应力场的分布不均匀,极端情况下,会在表面出现极大影响材料疲劳强度的拉应力,这些都会对激光冲击处理效果造成极为不良的影响。国内外学者对残余应力洞进行了一定的探索和研究,1996年 P. Peyre^[7]等人实验研究 7075-T7351 铸造铝合金的激光冲击强化处理工艺时就发现在同等工艺参数下,圆形光斑的“残余应力洞”现象比方形光斑严重,初步推断是由于冲击加载区域的边界效应引起的,国内胡永祥等人^[7-8]也对残余应力洞现象做了一定的研究。均认为这种现象的产生是因为在冲击区域边缘会同时产生诸如 Rayleigh 波和切变应力波等表面波,这些表面波向激光冲击区域的中心汇聚,从而引起这一局部的反向塑性应变,降低此处的表面残余压应力水平。

文中以钛合金 TC4 为研究对象,首先从实验对冲击波加载几何中心表现为压应力缺失这一现象进行验证,而后从理论分析和数值仿真等方面展开研究,将进一步分析单次冲击波加载中“残余应力洞”

产生原因及过程,完善和深化不同冲击波加载对这一过程的影响机制,对研究金属材料在超高应变率冲击波的动态响应这一普遍物理过程也有一定理论意义。

1 实验

材料吸收激光能量发生一系列物理化学反应,产生一个高温高压的等离子吸收层,激光能量在等离子体吸收层被电子继续吸收转化为内能,同时等离子体迅速向周围空气膨胀,压缩周围空气,形成冲击波,作用于金属表面并向内传播对材料改性^[8-12]。改变激光能量、光斑形状和脉宽可改变冲击波能量、压力分布和作用时间。在这个过程中,一个约束层(水,玻璃)施加于金属表面,可以更好提高约束等离子体向外膨胀,提高冲击波作用于金属表面压力,为保护金属材料不被激光直接烧蚀,吸收保护层贴于金属表面,通常为铝箔,黑漆和胶带。

在该实验中,激光冲击参数为,能量 3 J,激光波长 1 064 nm,脉宽 10 ns,圆光斑且直径 3.4 mm,此时功率密度 3.3 GW/cm²,单次冲击,水为约束层,铝箔为吸收保护层。

选用的实验材料为 TC4 钛合金,是一种 $\alpha+\beta$ 两相高强度钛合金,具有高强度、高塑性、淬透性好和可焊接等优点,广泛用于制造飞机结构零件。TC4 板材厚为 3 mm,在一些研究中,2 mm 以上厚度的板材可消除板材底面反射波影响。残余应力测试采用 X 射线衍射法,采用 Proto-LXRD 型 X 射线衍射仪进行残余应力测试,采用 Ti 靶,衍射面为(302),测试执行标准为 ASTM E975-84。实验结果如图 1 所示。

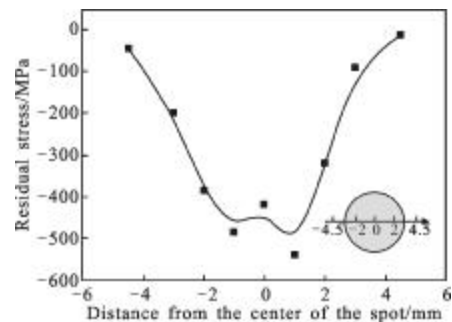


图 1 单光斑冲击下的残余应力分布

Fig.1 Distribution of residual stress on the surface of sample

图 1 为靶材表面沿光斑径向的分布。光斑中心的残余压应力约为 420 MPa,峰值压力出现在离光斑

中心 1 mm 处, 约为 540 MPa, 说明在单次冲击中 TC4 钛合金残余应力场存在中心压应力缺失现象。

2 仿 真

激光诱导冲击波对金属材料强化主要由两个典型的过程组成:激光诱导等离子体爆轰波产生冲击压力;靶材在瞬态冲击压力作用下的动态响应。前者是等离子体产生与形成的复杂物理过程,后者是高速、高应变率的材料动态响应力学过程,也是文中研究重点。假设吸收层能够很好地保护工件不受任何热影响,则两个过程可看作相互独立,相互之间通过冲击压力联系。所以,仿真也可分为两部分加以考虑:(1)激光诱导等离子体爆轰波压力的计算;(2)靶材动态响应仿真模型的建立。通过改变激光冲击参数,调整为不同的冲击波加载方式,采用显示动力学有限元算法对冲击波作用过程仿真,得到不同形式冲击波加载对“残余应力洞”的产生过程和分布规律,同时与实验结果验证,以其得到不同冲击波的影响机制。

2.1 激光诱导等离子体爆轰波压力的计算

冲击波是材料塑性变形的直接因素,激光凝聚加热靶物质,引起靶中的热应力、熔融、汽化和烧蚀,靶蒸气等离子体吸收入射激光,其膨胀运动的反冲引起冲量、应力波甚至很强的冲击波,法国 Fabbro^[13]对该过程提出的冲击波模型为:

$$P_{max}(GPa)=0.01\sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}}\sqrt{Z\cdot A\cdot I} \quad (1)$$

式中: α 为效率系数; A 为吸收率; I 为激光的输出功率密度; Z 为约束层与涂覆层的折合阻抗, $\frac{2}{Z}=\frac{1}{Z_{涂覆}}+\frac{1}{Z_{水约束层}}$ 。应用此模型,约束层为水、涂覆层铝箔时,算得 $Z=0.926\times 10^6\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,同时根据试验测试,获得了激光功率密度对应的爆轰波压力峰值,如表 1 所示。

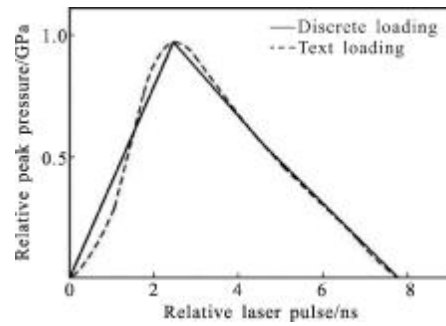
表 1 不同功率密度对应的爆轰波压力

Tab.1 Shock wave pressure of different power densities

Power density/GW·cm ⁻²	3.2	4.2	6.0
Peak pressure/GPa	2.6	3.2	3.7

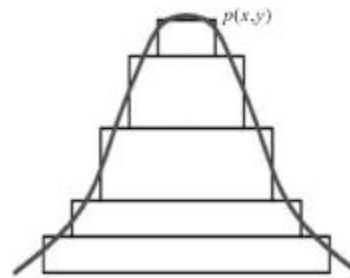
时空分布特性,在得到对应的爆轰波压力后同时对脉冲激光的时间分布特征一般通过脉冲宽度来衡量。脉冲宽度 τ (以下简称脉宽,FWHM)是指半功

率点之间的时间间隔。根据 Fabbro^[13]等人的研究结果,激光诱导等离子体爆轰波的作用时间大约为激光脉宽的 2~3 倍,甚至更长。根据激光脉宽作用时间内以及激光作用结束后的变化规律,对靶面受到的压力-时间历程曲线进行简化,如图 2(a)所示。激光诱导爆轰波压力呈高斯分布的因素加以考虑,如图2(b)所示。



(a) 爆轰波时间历程曲线

(a) Pressure and time distribution of surface shock waves



(b) 爆轰波压力呈高斯分布

(b) Shock wave pressure fits Gaussian distribution

图 2 冲击波压力加载形式

Fig.2 Curves of shock waves loading

2.2 TC4 钛合金动态响应模型

J-C 模型是最为常用的反应材料动态性能的本构模型^[14],J-C 模型的公式是基于实验得到的,流动应力表示为:

$$\sigma_y=(A+B\varepsilon^n)(1+C\ln\varepsilon^*)[1-(T^*)^m] \quad (2)$$

式中: ε 表示塑性应变; $\varepsilon^*=e/\varepsilon_0$ 是无量纲塑性应变率; $T^*=(T-T_0)/(T_m-T_0)$ 为无量纲温度; T_0 为室温; T_m 为材料熔点;常数 A 、 B 和 n 反映了材料的应变硬化特征; C 反映应变率对材料性能的影响; m 反映温度软化效应。综合考虑实现的难易程度和实用性,在激光冲击处理过程中,由于靶材表面的吸收层(通常为铝箔)保护材料不受热作用,即认为激光冲击是单纯的力效应,忽略其热效应,并且根据其是中等冲击强度而忽略冲击引起的温度效应,于是就可以将 J-C

模型简化为:

$$\sigma_y = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \varepsilon^*) \quad (3)$$

TC4 钛合金 J-C 模型参数^[15], 如表 2 所示。

表 2 TC4 钛合金 J-C 模型参数

Tab.2 J-C model parameters of TC4 titanium alloy

Performance parameters	Unit
Density/kg·m ⁻³	4 500
Modulus of elasticity/GPa	110
Poisson ratio	0.342
A/MPa	950.228
B/MPa	603.382 5
n	0.199 2
C	0.019 8

2.3 求解参数

(1) 时间步长及单元尺寸

在文中, 设定时间步长为 0.2, 此时获得的步长可获得较光滑的压力曲线, 与实际情况吻合较好。在单元尺寸的选取中, 对于冲击区域内部, 采用 0.05 mm 尺寸, 而对于冲击区域外的部分, 采用 0.2 mm 尺寸。这样设计在保证不影响计算精度的同时, 极大缩短了计算时间。

(2) 动态振荡的阻尼

在真实的激光冲击强化过程中, 应力波在靶材内部的传播会因为塑性应变中的耗散和体积粘滞性的影响而逐渐衰弱。在数值计算中, 为了尽量反映真实情况, 会在模型中加入阻尼, 以限制模型的非真实振荡。加入的阻尼主要为体粘性和材料阻尼两种方式。体粘性, 采用默认的体粘性系数 BV1。材料阻尼, 最佳的阻尼值应取模型第一阶固有频率的两倍。模型的固有频率可以在 ANSYS 隐式程序中通过模态分析得到。

3 结果和讨论

冲击波与材料相互作用后, 最终在材料中形成稳定残余应力场。通过改变激光功率密度, 脉宽和光斑形状可调整冲击波压力, 作用时间和加载区域, 不同冲击波加载下, 金属材料响应结果也有所不同。

3.1 冲击波加载形状的影响

冲击波加载形状可由激光光斑形状调整。激光光斑有圆形、方形两种。两种光斑的区别不仅在于形状的差别, 诱导的冲击波也有区别, 对应到数值仿真中, 则考虑成加载区域和能量压力加载的区别。

圆形光斑前文已有介绍, 此处只分析方形光斑。

对于方形光斑的情况, 美国 2001 年的高周疲劳科学技术计划, 已有研究。具体做法是通过在激光束前加入适当的棱镜组, 以改变光斑的输出形状, 使之成为方形。并且通过调整后输出的方形光斑, 其内部的能量近似均匀分布, 仅在光斑的边缘处才会呈现陡峭的减小(见图 3)。所以, 在仿真建模中对于方形光斑的加载情况, 可以将光斑内的爆轰波压力分布简化为均匀分布。时间分布特性依旧采用图 5 中时间特性。

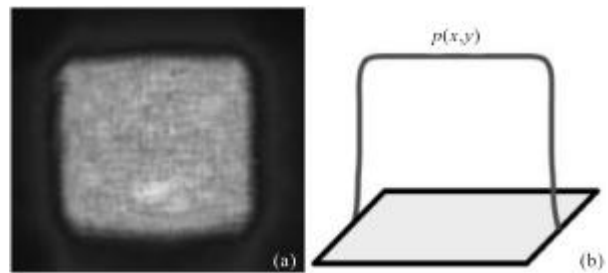


图 3 方形光斑的能量分布

Fig.3 Distribution of laser energy in rectangular spot

选用激光脉宽为 10 ns, 功率密度为 4.2 GW/cm² 的激光冲击参数做圆形、方形两种光斑形状的对比分析。此处参数与文中实验所采用功率密度相近。加载方式如图 4 所示。

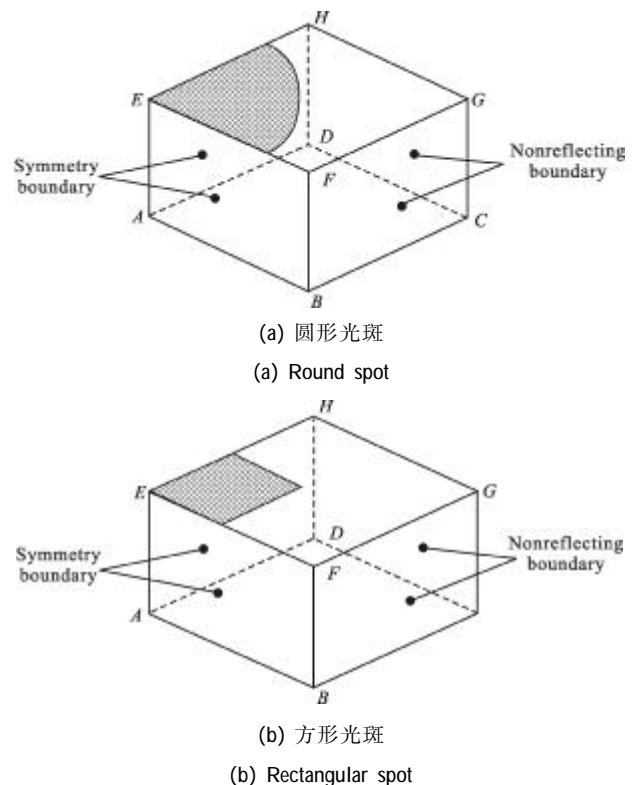


图 4 冲击波仿真模型示意图

Fig.4 Finite element model of shock wave

读取动能衰减为零时的靶材表面径向应力结果,如图 5 所示。

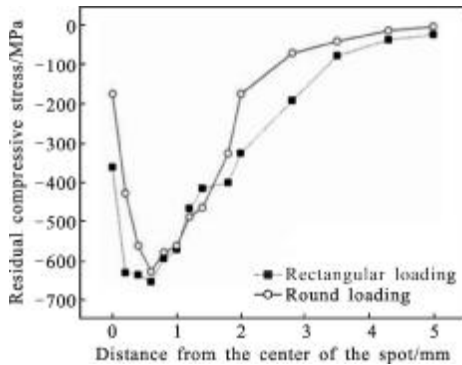


图 5 方形光斑和圆形光斑 X 轴残余应力分布
Fig.5 Effect of spot shape on residual stress drop

两种加载方式仿真结果表明,在被冲击的上表面会产生残余压应力,出现了残余压应力洞现象。在圆形加载中,加载区域中心处残余压应力值为 172 MPa,峰值出现在离中心区域约 0.6 mm 处,值为 626 MPa,在光斑的边缘处为 316 MPa,离光斑中心 5 mm 处残余应力值降到 0 MPa 左右,模拟结果和文中实验结果在趋势上是一致,说明仿真结果具有合理性。方形加载中表面的最大压应力约为 650 MPa,与圆形光斑情况相当,而光斑中心的残余压应力约为 460 MPa,从中心到表层残余压应力变化梯度较小,一定程度上改善了中心压应力缺失现象。

由文中分析可知,激光诱导冲击波加载为局部加载,材料表面光斑中心处的微元在表面卸载波的作用下发生反向塑性加载,导致了中心压应力的缺失。在表面选取距离光斑中心最近的节点,并读取零到 1 000 ns 时间历程中的径向速度进行分析,如图 6 所示。

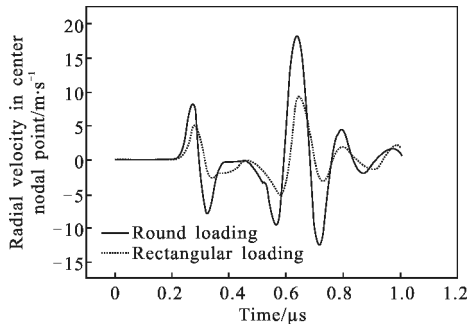


图 6 圆形加载和方形加载中心节点的径向速度-时间
Fig.6 Time evolution curve of radial velocity in center nodal point at different spot shape

由图可看出,冲击波圆形加载下的最大反向速度为 12.6 m/s,而方形加载的最大反向速度为 5.2 m/s。方形光斑的表面稀疏波速度较慢,强度较弱,从而“残余应力洞”现象不会如圆形加载下严重。分析原因认为,圆形加载中心边界中的任意一点都关于圆心对称,从而冲击载荷边界产生的稀疏波将会完全向光斑中心汇聚,因而稀疏波的强度较大;而方形加载下冲击载荷边界不具有圆心对称的特性,产生的稀疏波向中心汇聚的过程中一部分会相互抵消掉,从而表面稀疏波强度相对较弱。

3.2 激光脉宽的影响

激光脉冲持续时间变化后,爆轰波压力的作用时间也就随之改变。一般规律为激光脉冲越大,冲击波持续时间也越长。加载结束后,中心节点的残余应力和最大的反向速度如图 7 所示,15 ns 和 20 ns 时的稀疏波速度相当,约为 14.9 m/s,脉宽为 10 ns 的较弱为 12.6 m/s,在最后稳定的残余应力场中,加载中心单元的压应力缺失现象以 10 ns 表现最弱,15 ns、20 ns 时较严重。

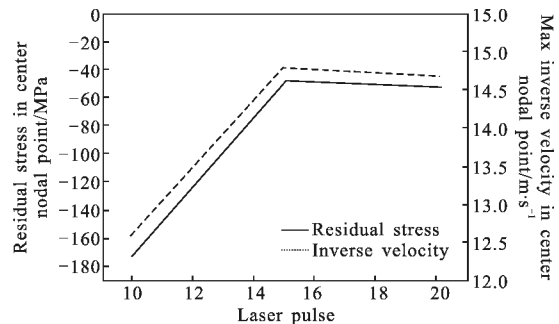


图 7 不同脉宽下光斑中心的残余应力和节点反向速度
Fig.7 Both residual stress and inverse velocity in center of spot at different laser pulse

在不改变激光能量下,延长冲击波作用时间会加剧“残余应力洞”现象。

3.3 功率密度的影响

按照 Fabbro 模型计算不同激光功率密度下对应的冲击波压力,进行单次圆形光斑加载。

不同功率密度下,靶材表面径向残余应力分布如图 8 所示。分析可得,表面残余压应力峰值随着功率密度增加而变大,功率密度为 3.2 GW/cm² 时,在表面形成的峰值残余压应力为 607 MPa,中心残余压应力值为 170 MPa,变化梯度为 72%;而当功率密度增加到 4.2 GW/cm² 时,峰值残余压应力增加至 780 MPa,而中心残余压应力值为 165 MPa,变化梯度为 79%;当功率密度再增加到 6.0 GW/cm² 时,表面峰值残余

应力基本没有变化,而此时中心残余应力为136 MPa,变化梯度为 83%。随着功率密度增加,残余应力变化梯度也随之增加,残余应力洞表现更加明显。分析原因认为,冲击波压力的增加,导致卸载时表面稀疏强度增加,形成的反向塑性变形量大,致使残余压应力变化梯度增加。

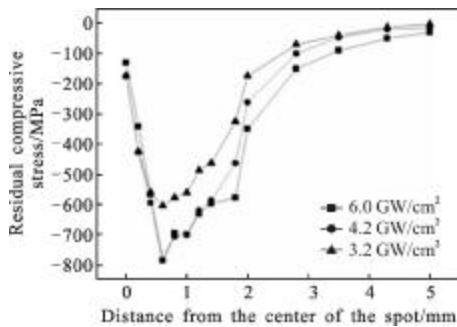


图 8 不同激光功率密度下靶材表面径向残余应力分布

Fig.8 Distribution of residual stress on the surface of sample at different power density

4 结 论

文中对激光诱导冲击波加载金属材料中心压应力缺失现象进行了相关研究,结果表明:

(1) “残余应力洞”现象发生在冲击波卸载反向加载过程,具体原理为在一个激光脉冲消失后,激光诱导等离子体爆轰波冲击下发生塑性应变的部分受到周围未变形的部分的限制,而发生的反向的塑性变形,在 TC4 钛合金激光诱导冲击波改性的实验中,也观察到这一现象。

(2) 通过改变冲击波压力、作用时间和光斑形状研究不同加载条件下冲击波对中心压应力缺失的影响。方形光斑的边界受到约束产生的稀疏波向光斑中心汇聚时会有一部分相互抵消,中心压应力缺失效应比圆形光斑弱;增大冲击波压力和延长冲击波加载时间会增强表面稀疏波,中心节点的反向速度会增加到某一量值,会增大中心压应力缺失效应。

参考文献:

[1] Ren Xudong, Zhang Tian, Jiang Dawei, et al. Effects of laser shock processing and aluminizing on microstructure and properties of 12CrMoV alloy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 241-244. (in Chinese)
 [2] Kong Dejun, Zhou Chaozheng, Wu Yongzhong. Mechanism on residual stress of 304 stainless steel by laser shock

processing[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 376-340. (in Chinese)

- [3] He Weifeng, Li Yinghong, Li Qipeng. The effects of laser shock peening on fatigue life in Ni-based Superalloy [J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 135: 209-214.
 [4] Li Wei, He Weifeng, Li Yinghong, et al. Effects of laser shock processing on vibration fatigue properties of K417 material[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(8): 2197-2201. (in Chinese)
 [5] Zhou Lei, Li Yinghong, Wang Cheng, et al. Laser shock peening for LY2 alloy [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(8): 1780-1784. (in Chinese)
 [6] Charles S, Zhang Yongkang, Zhang Shuyi. Investigation of surface qualities of laser shock-processes zones and the effect on the fatigue life of aluminum alloy [J]. *Surface & Coatings Technology*, 1997, 92: 104-109.
 [7] Peyre P, Fabbro R, Merrien P, et al. Laser shock processing of aluminum alloys. Application to high cycle fatigue behavior [J]. *Materials Science & Engineering*, 1996, A210 (1-2): 102-113.
 [8] Hu Yongxiang, Gong Chunming, Yao Zhenqiang, et al. Investigation on the non-homogeneity of residual stress field induced by laser shock peening [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2009, 203: 3503-3508.
 [9] Peng Weiwei, Ling Xiang. Residual stress field induced by laser peening: a finite element analysis [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2006, 26(16): 12-19. (in Chinese)
 [10] Palanco S, Conesa S, Laserna J J. Acoustic and optical emission during laser-induced plasma formation [J]. *Spectrochim Acta Part B: Atom Spectrosc*, 2004, 59: 1395-1401.
 [11] Gregg D W, Thomas S J. Momentum transfer produced by focused laser giant pulses [J]. *Journal of Applied Physics*, 1966, 27(6): 2787-2789.
 [12] Bian Baomin, Yang ling. Study of the laser-induced plasmas and the kinematics of shock waves in air by away intense explosion[J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, 51(4): 809-813.
 [13] Berthe L, Fabbro R. Wavelength dependent of laser shock-wave generation in the water-confinement regime[J]. *J Appl Phys*, 1997(7): 7552-7555.
 [14] 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: 541-547.
 [15] Amarchintal H K, Grandhi R V, K Langer, et al. Material model validation for laser shock peening process simulation [J]. *Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2009, 17: 1-15.