

# 强激光加载下的 TC4 钛合金失效行为研究

范宁<sup>1\*</sup>, 姚红兵<sup>2\*\*</sup>, 叶霞<sup>1</sup>, 丛嘉伟<sup>1</sup>, 朱卫华<sup>2</sup>

<sup>1</sup>江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013;

<sup>2</sup>河海大学理学院, 江苏 南京 210098

**摘要** 为了探究金属失效与金属靶材厚度的关系,使用纳秒激光诱导冲击波,获得高压冲击压强。建立了该激光诱导的冲击波加载下 TC4 钛合金靶材的力学仿真模型,根据计算结果预测 TC4 靶材损伤情况。根据仿真模型,进行对应的激光加载实验,分析实验结果,并与模拟的结果作对比。当靶材厚度为 0.05 mm,纳秒激光脉宽为 10 ns,单脉冲能量为 7 J,频率为 1 Hz,光斑直径为 5 mm 时,仿真结果预判靶材发生损伤,实验结果和模拟结果一致。

**关键词** 激光光学; 纳秒激光; 有限元分析; 失效分析

中图分类号 TN241

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.161403

## Failure Behavior of TC4 Titanium Alloy Under Strong Laser Loading

Fan Ning<sup>1\*</sup>, Yao Hongbing<sup>2\*\*</sup>, Ye Xia<sup>1</sup>, Cong Jiawei<sup>1</sup>, Zhu Weihua<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

<sup>2</sup>College of Science, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China

**Abstract** A shock wave induced by a nanosecond laser was used to obtain the high shock pressure to explore the relationship between metal failure and metal target thickness. A TC4 titanium mechanical simulation model under the laser-induced shock wave loading was constructed herein based on the calculation results. The damage of the TC4 target was predicted depending on the calculation results. The corresponding laser loading experiment was performed according to the simulation model. The experimental results were analyzed and compared with the simulated results. The results show that when the target thickness is 0.05 mm, the nanosecond laser pulse width is 10 ns, the single pulse energy is 7 J, the frequency is 1 Hz, and the spot diameter is 5 mm. The simulation results also predicts the target damage, and the experimental results are consistent with the simulation results.

**Key words** laser optics; nanosecond laser; finite element analysis; failure analysis

**OCIS codes** 140.3330;320.7090; 320.4240

## 1 引言

高应变率下金属靶材的层裂损伤行为<sup>[1]</sup>的研究,涉及内容十分复杂,涵盖不同尺度,同时也是一个多学科交叉性研究,需要从力学、物理学、材料学等多方面进行解释。由于理论的缺乏和设备的不足,早期实验室中对于金属材料的层裂特性研究常采用炸药<sup>[2]</sup>、轻气炮<sup>[3]</sup>等传统的加载方式,以及分析断面等宏观检测手段。20 世纪 60 年代,随着激光

器的出现及其应用技术的大力发展,利用超短脉冲激光与金属物质的相互作用<sup>[4-6]</sup>可以产生峰值压强极大的应力波,这为金属材料层裂损伤研究提供了新思路<sup>[7]</sup>。此外,国内外研究人员先后将仿真软件引入失效分析研究中<sup>[8-11]</sup>。

基于上述研究内容,本文使用纳秒激光诱导冲击波产生的力学效应作为破坏源,采用模型仿真与实验相结合的方法进行以不同厚度 TC4 钛合金作为靶材的冲击研究,并最终获得 TC4 靶材损伤现

收稿日期: 2019-02-17; 修回日期: 2019-03-13; 录用日期: 2019-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(51775253,61505071)、江苏省自然科学基金(BK201505266)、江苏大学引进人才科研启动项目(15JJDG036,15JJDG037)

\* E-mail: 1198973528@qq.com; \*\* E-mail: alenyao@126.com

象,可为工业生产中金属材料的强化与加工提供更好的指导作用。

## 2 数值仿真

采用 ABAQUS 建立纳秒激光加载下的 TC4 钛合金的三维仿真模型。由于 TC4 钛合金具有很好的弹性和延展性且不属于壳范畴,因此选用 Johnson-Cook 损伤模型,具体表达式为

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \epsilon^*) [1 - (T^*)^m], \quad (1)$$

$$T^* = (T - T_0) / (T_m - T_0), \quad (2)$$

式中: $\epsilon$  表示塑性应变; $\epsilon^* = \epsilon / \epsilon_0$  表示无量纲塑性应变率; $T^*$  为无量纲温度; $T_0$  为室温; $T_m$  为材料的熔点; $A, B, C, n, m$  分别为模拟靶材 TC4 钛合金的屈服强度、硬化系数、应变率敏感系数、软化指数、硬化指数,分别为 875 MPa、793 MPa、0.011、0.386、0.710。模拟单脉冲纳秒激光参数为:重复频率 1 Hz,激光光斑直径 5 mm,单脉冲能量 7 J,脉宽 10 ns。模拟靶材粘覆黑胶带和 K9 玻璃。根据 Fabbro 公式<sup>[12]</sup>估算激光峰值压强为 5.496 GPa。为了减少运算量,将冲击模型 1/4 作为研究对象,模型长宽取 20 mm×20 mm,靶材厚度分别取 0.050, 0.080, 0.100, 0.030, 0.500, 0.800 mm。对于激光加载区域及可变区域采用扫掠网格尽可能细化,对于无用区域作粗化处理,以减少计算量。

## 3 实验

金属靶材的失效损伤源自于靶材内部的晶粒滑移,晶粒滑移经过扩展形成微裂纹并最终形成靶材的断裂,从而导致靶材彻底失效。这种靶材失效行为与靶材本身的材质有关,靶材的屈服强度和层裂强度是靶材发生形变和损伤失效行为的重要参数。根据最大应力瞬间断裂准则<sup>[13]</sup>,当应力等于或大于材料层裂强度,可发生层裂。TC4 钛合金屈服强度为 875 MPa,层裂强度为 975 MPa。

实验中使用纳秒激光作为加载源,其诱导冲击波的机理如图 1 所示,在靶材表面涂覆吸收层和约束层,当激光透过吸收层照射到靶材上时,吸收层吸收激光气化后电离产生等离子体,等离子体继续吸收激光产生爆炸引发冲击波,在约束层限制作用下进一步增强,产生超高冲击压强。由于吸收层和约束层可以隔绝激光光热效应,此时激光加载金属靶材的过程可视为“冷加工”。

靶材表面进行抛光预处理,粘覆黑胶带和 K9 玻璃,单脉冲纳秒激光波长为 1064 nm,单脉冲能量

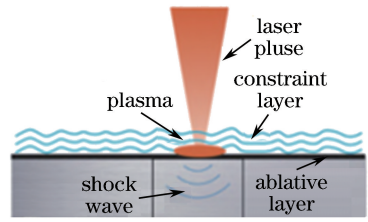


图 1 激光诱导冲击波示意图

Fig. 1 Diagram of laser induced shock wave

为 7 J,脉宽为 10 ns,重复频率为 1 Hz,光斑直径调节范围为 0.5~10.0 mm。根据实验环境设计一种对靶材进行四边夹持的夹具装置,如图 2 所示,为减少实验过程中夹具对实验结果的影响,夹具与靶材接触面使用软性材料进行隔离。使用纳秒激光对靶材进行单点单脉冲冲击,将靶材样片回收后利用大景深电子显微镜和微距照相机对靶材进行后期检测和拍照。

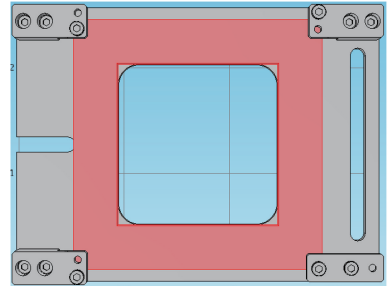


图 2 夹具设计示意图

Fig. 2 Diagram of jig design

## 4 分析与讨论

### 4.1 模拟结果分析

图 3 给出靶材表面位移与靶材厚度关系示意图,横坐标为靶材表面某点到光斑中心点处的距离,纵坐标为靶材的位移量。根据靶材表面位移,可以获得靶材在激光加载下的形变状况。根据仿真模型计算结果,在激光参数一致的情况下,靶材厚度越

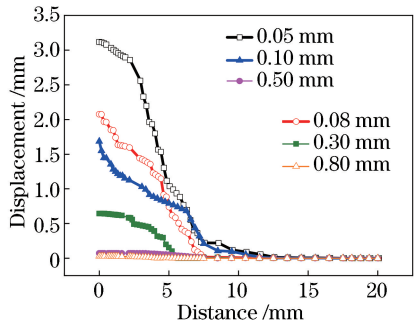


图 3 靶材表面位移图

Fig. 3 Target surface displacement

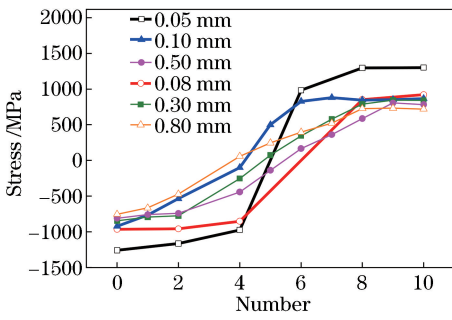


图4 厚度方向应力图

Fig. 4 Stress distribution in thickness direction

小,靶材表面凹坑深度越大,形变范围越大。厚度方向上,应力波的传播对于靶材的层裂起决定性作用<sup>[14]</sup>,因此,靶材厚度方向上应力分布决定了靶材是否发生形变和层裂行为。图4给出靶材厚度方向上应力与靶材厚度关系示意图,模型厚度方向上

均匀划分10个单元,图中横坐标表示单元数,纵坐标为应力。图5为靶材表面应力分布示意图。横坐标为靶材表面点到激光光斑中心的距离,纵坐标为应力。结合图3~5可知,当靶材厚度为0.05 mm时,靶材厚度方向最大应力为1259 MPa,超过层裂损伤值,且靶材表面位移量远远大于靶材厚度,故预判靶材发生失效损伤。且激光光斑范围内的靶材内部残余应力均达到靶材层裂强度,因此预判损伤范围直径为5 mm。当靶材的厚度为0.08~0.30 mm时,靶材内部的最大应力分别为966.0,921.7,846.0 MPa,预判靶材发生形变。当厚度大于0.5 mm时,最大压应力低于靶材的屈服强度,且靶材表面位移相对于靶材厚度可以忽略不计,因此靶材表面不会发生失效损伤或形变,激光作用于靶材的表现为激光强化作用。

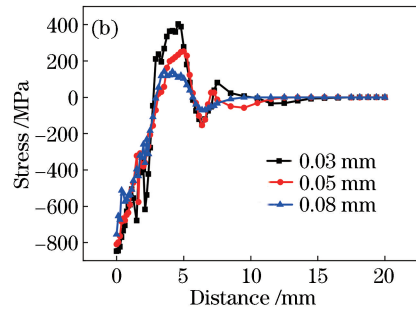
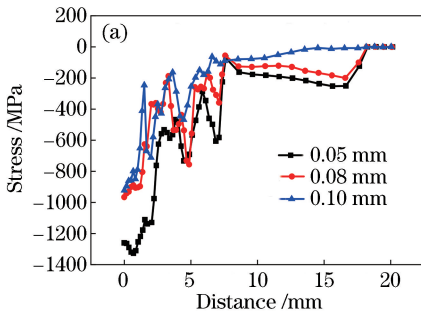


图5 靶材表面应力图。(a)厚度为0.05~0.1 mm;(b)厚度为0.3~0.8 mm

Fig. 5 Stress distributions of target. (a) Thickness is 0.05-0.1 mm; (b) thickness is 0.3-0.8 mm

#### 4.2 实验结果分析

纳秒激光单脉冲能量为7 J,脉宽为10 ns,靶材厚度为0.05 mm。调整激光光斑直径,获得靶材失效损伤,如图6所示。其中图6(a)~(c)激光光斑

直径分别为3,4,5 mm。靶材均发生局部失效损伤,且失效区域直径与作用靶材表面的激光光斑直径一致。实验结果与靶材厚度为0.05 mm的仿真模型预判结果一致。

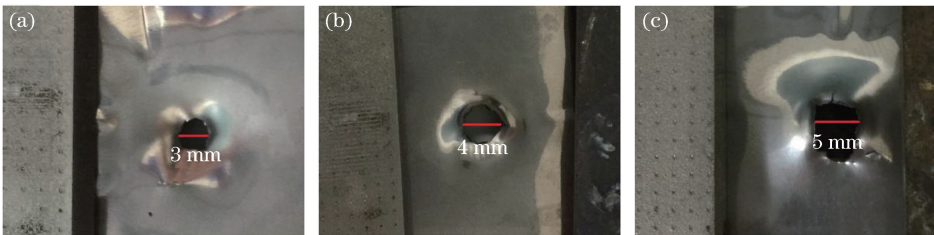


图6 靶材局部失效损伤图。(a)激光光斑直径为3 mm;(b)激光光斑直径为4 mm;(c)激光光斑直径为5 mm

Fig. 6 Pictures of local failure and damage of target. (a) Laser spot diameter is 3 mm; (b) laser spot diameter is 4 mm; (c) laser spot diameter is 5 mm

纳秒激光单脉冲能量7 J,脉宽10 ns,光斑直径5 mm,靶材厚度为0.1 mm,改变对靶材的约束条件,获得靶材形貌如图7所示,其中:图7(a)靶材约束条件为黑胶带和K9玻璃,凹坑深度1.852 mm;图7(b)约束条件为单独放置K9玻璃,凹坑深度

0.951 mm;图7(c)不对靶材进行处理且激光加载1次,凹坑深度为0.055 mm;图7(d)不对靶材进行处理且激光加载4次,凹坑深度为0.058 mm。在加载激光参数一致的情况下,当靶材表面粘覆黑胶带和K9玻璃时,激光诱导的冲击波的峰值压强最大,且

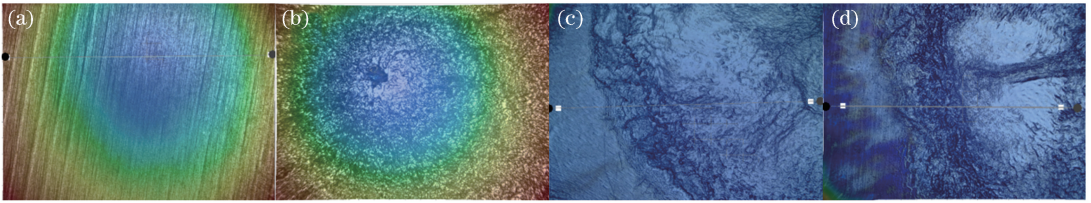


图7 激光加载后靶材形貌图。(a)靶材粘覆黑胶带和K9玻璃;(b)靶材表面仅覆盖K9玻璃;(c)靶材不作处理,激光加载1次;(d)靶材不作处理,激光加载4次

Fig. 7 Topographies of target after laser loading. (a) Target covered with black tape and K9 glass; (b) target covered with K9 glass; (c) target covered with nothing in case of loading laser for once; (d) target covered with nothing in case of loading laser for 4 times

根据图7(a),靶材表面出现大形变,为激光的“冷加工”作用。其他3组实验靶材表面呈现纳秒激光热烧蚀现象,尤其图7(d)中多次冲击的靶材凹坑周围出现明显的烧蚀焦斑。这3组实验中回收的靶材表面也发生形变,但与激光冲击形变有区别,如图8所示,8(a)为激光在吸收层和约束层的作用下诱导冲击波造成靶材形变的凹坑示意图,凹坑呈弧线状,形变范围比激光光斑直径大;图8(b)为激光热烧蚀作用下靶材形变凹坑示意图,凹坑呈火山口状,形变范围与激光光斑直径一致。实际上,当激光直接作用到靶材时,激光的热作用使得靶材表面发生温度变化,该区域内靶材的体积发生膨胀和收缩,当这个过程不能自由发生时,靶材中就会出现附加应力,此时靶材形变为激光作用于靶材的热效应产生的热应力所致。

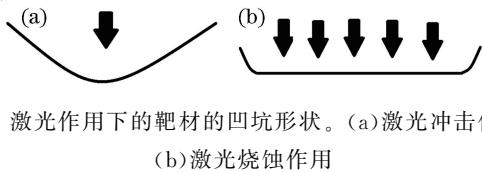


图8 激光作用下的靶材的凹坑形状。(a)激光冲击作用;(b)激光烧蚀作用

Fig. 8 Pit shapes of target under action of laser. (a) Laser impact; (b) laser ablation

根据仿真模型,进行相应实验:纳秒激光单脉冲能量7 J,脉宽10 ns,重复频率1 Hz,光斑直径5 mm,并对回收靶材进行检测。图9为靶材形变的实验结果与仿真结果的对比实验图,其中横坐标为靶材的厚度,纵坐标为靶材的形变量。仿真结果与实验结果略有出入,但实验结果与仿真结果均显示,在纳秒激光冲击条件一致时,靶材厚度越大,形变量越小。而当靶材厚度为0.05 mm时,实验回收的靶材出现局部失效损伤造成坑深数据无意义,而仿真结果仅为形变积累的过程,因此模拟结果与实际结果有出入。

在激光加工的实际应用中,板材的损伤失效和

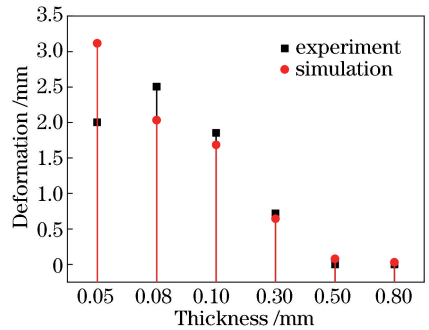


图9 靶材形变的实验结果与仿真结果的对比示意图  
Fig. 9 Comparison between experimental results and simulation results of target deformation

成形与很多因素有关:激光加工参数、材料特性参数、加工工艺、板材厚度等。靶材失效损伤的产生是由靶材本身材料层裂强度和屈服强度所决定。而在激光参数、靶材材料和靶材约束方式一致的条件下,根据姚振强提出的理论<sup>[15]</sup>,靶材中心点处形变量与靶材厚度成反比,且除靶材极薄和极厚情况,靶材厚度越小,形变越敏感,而本实验结果验证了该理论。

## 5 结 论

TC4钛合金作为目前应用最广泛的钛合金材料之一,具有强度高、耐腐蚀等优点。其屈服强度和层裂强度较为接近,这种特性决定了TC4钛合金不易发生形变。纳秒激光与金属材料的作用机理目前已经得到充分研究,并且被广泛应用于激光加工领域。高能激光加载下的钛合金靶材的失效损伤行为与厚度有关,在相同的纳秒激光加工参数下,TC4钛合金靶材厚度越小,越容易发生形变,甚至损伤。因此工业生产中,根据靶材的厚度合理选择加工参数可以有效规避失效损伤,提高经济效益。

## 参 考 文 献

[1] Hopkinson B. A method of measuring the pressure

- produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1914, 213: 437-456.
- [2] Yang Y, Peng Z Q, Guo Z L, *et al.* Spall behavior of high purity copper under sliding detonation [J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2016, 34(1): 32-37, 58.  
杨扬, 彭志强, 郭昭亮, 等. 滑移爆轰条件下高纯铜的层裂行为 [J]. *材料科学与工程学报*, 2016, 34(1): 32-37, 58.
- [3] Liu X N, Yang S Y, Wen X, *et al.* Phase transition and spallation of Ti-6Al-4V alloy under shock wave [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2010, 34(3): 325-330.  
刘小楠, 杨世源, 温霞, 等. 冲击波作用下 Ti-6Al-4V 合金层裂及相变研究 [J]. *稀有金属*, 2010, 34(3): 325-330.
- [4] Dong Y, Wang D, Wei Z, *et al.* Numerical simulation and experimental study of temperature evolution of Si-APD irradiated by long-pulse laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(5): 0514005.  
董渊, 王頔, 魏智, 等. 长脉冲激光辐照 Si-APD 温度演化过程的数值模拟与实验研究 [J]. *光学学报*, 2018, 38(5): 0514005.
- [5] Zhu R, Zhang Y K, Sun G F, *et al.* Numerical simulation of residual stress fields in three-dimensional flattened laser shocking of 2024 aluminum alloy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(8): 0802007.  
朱然, 张永康, 孙桂芳, 等. 三维平顶光束激光冲击 2024 铝合金的残余应力场数值模拟 [J]. *中国激光*, 2017, 44(8): 0802007.
- [6] Rao X, Ye Y X, Zhao L, *et al.* Experimental study on special-shaped parts of 2024 aluminum alloys by nano-laser peen forming [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 021407.  
饶宵, 叶云霞, 赵雳, 等. 2024 铝合金异形件纳秒激光喷丸成形的实验研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 021407.
- [7] Zhai S D, Li Y H, Peng J X, *et al.* Spall behavior of pure aluminum under plate-impact and high energy laser shock loadings [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(6): 767-773.  
翟少栋, 李英华, 彭建祥, 等. 平面碰撞与强激光加载下金属铝的层裂行为 [J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(6): 767-773.
- [8] Yao H B, Yu W L, Gao Y, *et al.* Numerical simulation of transient response process of L2 aluminum sheet by laser loading high-speed forming [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(6): 0614001.  
姚红兵, 于文龙, 高原, 等. 数值模拟激光加载 L2 铝板材高速成形瞬态响应 [J]. *光子学报*, 2014, 43(6): 0614001.
- [9] Jiang W, Li Y Z, Liu J X, *et al.* Modeling of metallic shear failure by void-based meso-damage model [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 43(1): 24-29.  
姜薇, 李亚智, 刘敬喜, 等. 基于微孔洞细观损伤模型的金属剪切失效分析 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(1): 24-29.
- [10] Seaman L, Curran D R, Shockey D A. Computational models for ductile and brittle fracture [J]. *Journal of Applied Physics*, 1976, 47(11): 4814-4826.
- [11] Sun B P, Duan Z P, Zhang H Y, *et al.* Experiment and numerical simulation on ignition of charge by fragment impact [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(5): 456-462.  
孙宝平, 段卓平, 张海英, 等. 破片撞击装药点火实验和数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(5): 456-462.
- [12] Fabbro R, Fournier J, Ballard P, *et al.* Physical study of laser-produced plasma in confined geometry [J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, 68(2): 775-784.
- [13] Rinehart J S. Some quantitative data bearing on the scabbing of metals under explosive attack [J]. *Journal of Applied Physics*, 1951, 22(5): 555-560.
- [14] Huang Y, Jiang Y F, Jin H, *et al.* Propagation of shock wave induced by ring laser and its effect on spalling [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(3): 301-305.  
黄宇, 姜银方, 金华, 等. 环形激光诱导冲击波的传播及其对层裂的影响 [J]. *激光技术*, 2013, 37(3): 301-305.
- [15] Wang F. Theoretical and experimental research on laser shock forming [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008: 15-37.  
王飞. 脉冲激光冲击成形的理论与实验研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008: 15-37.