

# 激光冲击强化钛合金材料数值模拟

宣宏林

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:**航空发动机叶片工作环境相对严苛,合理运用表面处理技术,能在不改变叶片材料的前提下,提高叶片的抗外物损伤与疲劳性能。基于 ANSYS/LS-DYNA 和 LS-PREPOST 有限元软件开展激光冲击强化钛合金材料的数值仿真研究。通过残余应力分布和表面形貌变化的比较,分析激光冲击强化过程对钛合金材料的影响。结果表明:激光冲击强化处理可使外物损伤模型冲击处发生塑性应变,引入残余应力,达到强化目的。

**关键词:**激光冲击强化;钛合金;残余应力

中图分类号:TP391.9 文献标志码:B 文章编号:1671-5276(2023)06-0116-03

## Numerical Simulation of External Damage of Titanium Alloy Materials Strengthened by Laser Shock

XUAN Honglin

(College of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** The working environment of aero-engine blade is relatively strict, but the reasonable application of surface treatment technology can improve the damage resistance and fatigue performance of the blade without changing the blade material. Based on ANSYS/LS-DYNA and LS-PREPOST finite element software, the numerical simulation of laser shock strengthening titanium alloy materials was carried out. The effect of laser shock hardening on titanium alloy was discussed by comparing the distribution of residual stress and the change of surface morphology. The results show that laser shock strengthening can reduce the plastic strain and residual stress, achieving reinforcement goals.

**Keywords:** laser shock strengthening; titanium alloy; residual stress

## 0 引言

在航空发动机叶片受到高频疲劳载荷作用下,裂纹会迅速扩展,导致疲劳断裂发生,影响航空发动机可靠性及安全性能。因此在保证基体材料不变的前提下,采用表面强化技术用以大幅提高航空发动机叶片的结构强度、延长其使用寿命显得尤为重要。传统表面强化技术主要有喷丸强化技术(shot peening),是利用高速弹丸流对靶材表面进行冲击,使之发生塑性变形并形成用以抵消部件工作载荷的残余压应力层,达到提高靶材疲劳性能的目的。激光冲击强化技术(laser shock peening)作为一种新型表面强化技术,利用高功率密度、短脉冲激光辐射靶材表面时产生的 GPa 级压应力冲击波对靶材进行冲击,可形成相对喷丸强化更深的残余压应力层,达到更好的表面强化效果<sup>[1-2]</sup>。同时,由于不同于喷丸强化的实体冲击,激光辐射可使靶材表面形貌和表面粗糙度变化更小。另外,由于激光光斑直径可设置,辐射位置相对喷丸强化可灵活调节,如燕尾型榫槽等空间狭窄部位。因此,激光冲击强化技术在针对航空发动机领域具有极大的发展前景。激光冲击强化原理如图 1 所示。

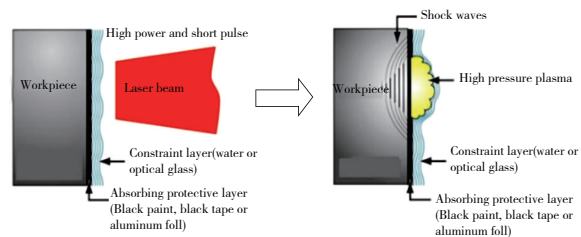


图 1 激光冲击强化原理

由于激光冲击强化主要由激光诱导等离子体冲击波产生冲击压力和靶材在瞬态冲击压力作用下的动态响应两部分组成,因此对激光冲击强化数值仿真研究分为对靶材施加脉冲载荷计算的显式部分和对靶材动态响应仿真模型分析的隐式部分,且激光冲击强化需要 GW 级功率密度和 ns 级冲击时间,对其进行试验研究操作具有一定困难,因此本文以具有强度高、耐腐蚀等特性的钛合金材料作为研究对象,基于 ANSYS/LS-DYNA 和 LS-PREPOST 有限元分析软件开展激光冲击强化钛合金材料的数值仿真研究。

## 1 有限元分析方法

本文以 TC4 合金 (Ti-6Al-4V) 叶片为研究对象, 建立 20 mm×20 mm×3 mm 尺寸的钛合金材料模型, 并将其划分为冲击区 (10 mm×10 mm) 与非冲击区, 如图 2 所示。

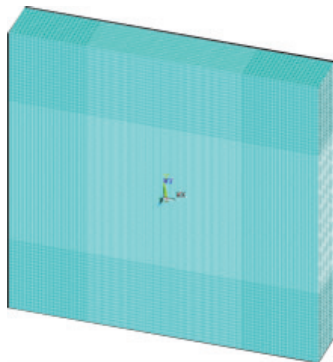


图 2 钛合金材料网格模型

在显示动力学分析过程中, 关于材料动态响应本构模型的选择影响到最终分析结果<sup>[3]</sup>, 本文仅考虑激光冲击强化数值仿真研究, 不存在大应变率仿真过程, 且不考虑材料热效应带来的影响, 因此使用 Plastic - Kinematic (P-K) 模型即可满足要求。

由于激光冲击强化仿真过程中, 冲击结束后冲击波仍在模型中传播, 因此需要延长求解时间以保证模型震荡完全, 减小误差。因此将激光冲击强化仿真过程求解时间设置为 500 000 ns。本文中模型的激光冲击区位于模型中心, 当模型受到激光冲击的时候会沿半径方向快速传播, 遇到边界时会反射引起模型内应力波震荡, 因此需要在模型四周及地面设置非反射边界条件, 同时为保证外物冲击过程中分析残余应力分布时不受模型变形影响, 将模型除冲击面以外各面设置全自由度约束。

激光冲击强化数值仿真一般将激光诱导产生的冲击波模拟成脉冲载荷施加到模型上。采用 FABBRO 等推导的激光冲击强化峰值压力估算式, 计算对应的冲击波峰值压力<sup>[4]</sup>, 如式(1)一式(3)所示。

$$P = 0.01 \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}} \cdot \sqrt{ZI_0} \quad (1)$$

$$\frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \quad (2)$$

$$I_0 = \frac{4\gamma E}{\pi d^2 \tau} \quad (3)$$

式中:  $\alpha$  为等离子体内部热能与内能的比值, 一般情况下取值为 0.1;  $Z_1$ 、 $Z_2$  分别为靶材吸收层声阻抗和约束层声阻抗, 本文数值仿真选择黑胶带作为吸收层用于吸收激光能量, 选择水作为约束层用于限制等离子体膨胀, 使冲击波的能量能更多地作用于靶材, 计算后得出靶材约束层和吸收层的折合声阻抗  $Z = (0.908 \times 106) \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $I_0$  为激光功率密度,  $\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}$ ;  $E$  为激光能量,  $\text{J}$ ;  $\gamma$  为等离子体的等熵指数, 一般情况下取值为 0.7;  $d$  为激光光斑直径,  $\text{cm}$ ;  $\tau$  为激光脉冲宽度,  $\text{s}$ 。由此带入数据后计算得出的激

光冲击波峰值压力的单位为 GPa。因此激光冲击波峰值压力大致等于激光功率密度的平方根。

从式(1)一式(3)可以看出, 激光冲击强化峰值压力受激光能量、激光光斑直径、激光脉冲宽度等因素影响。本文主要研究上述各种参数变化对激光冲击强化结果的影响, 因此本文选取不同激光能量值 3 J、4 J、5 J, 不同脉冲宽度值 10 ns、15 ns、20 ns, 不同光斑直径值 2 mm、4 mm、6 mm。

当激光脉冲宽度为 10 ns、光斑直径为 2 mm 时, 模型所对应的激光冲击波峰值压力如表 1 所示。

表 1 不同激光能量大小冲击波峰值压力

激光能量/J	3	4	5
最大峰值压力/GPa	5.2	6.0	6.7

当激光能量为 3 J、激光光斑直径为 2 mm 时, 模型所对应的激光冲击波峰值压力如表 2 所示。

表 2 不同激光脉冲宽度冲击波峰值压力

脉冲宽度/ns	10	15	20
最大峰值压力/GPa	5.2	4.3	3.7

当激光能量为 3 J、激光脉冲宽度为 10 ns 时, 模型所对应的激光冲击波峰值压力如表 3 所示。

表 3 不同激光光斑直径冲击波峰值压力

光斑直径/mm	2	4	6
最大峰值压力/GPa	5.2	2.6	1.7

研究表明, 在激光冲击强化仿真过程中, 激光冲击波在时间上呈现准高斯分布, 且激光冲击波在模型上的作用时间约为脉冲宽度的 2~3 倍, 因此将激光冲击波压力模拟成的脉冲载荷时间历程曲线普遍简化成三角形函数对称分布方式。以脉冲宽度 10 ns, 脉冲载荷施加时间为 30 ns 为例, 0~15 ns 时, 冲击波压力线性达到峰值; 15~30 ns 时, 冲击波压力沿线性减小到 0, 如图 3 所示。

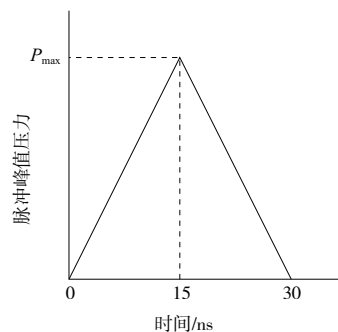


图 3 激光冲击波压力随时间分布模型

在激光冲击强化仿真过程中, 激光冲击波在空间上的分布往往被简化成均匀分布, 但这会带来不可忽视的误差, YAO 等在 FABBRO 纵向半经验模型的基础上, 认为在激光冲击强化仿真过程中, 激光冲击波压力沿激光光斑半径方向呈现高斯函数分布形式<sup>[5]</sup>, 如式(4)所示。

$$P(x, y, t) = P_0(t) \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{2R^2}\right] \quad (4)$$

式中:  $P_0(t)$  为激光冲击波压力随时间分布曲线;  $R$  为激光光斑半径;  $(x, y)$  为激光冲击区域以冲击中心为原点任意一点的坐标值。

## 2 有限元结果分析

### 2.1 残余应力分布

本文通过模型表面沿半径方向各单元中心的残余应力分布进行有限元结果分析。激光冲击强化数值仿真结果如图 4 所示, 各单元中心残余应力分布曲线如图 5 所示。

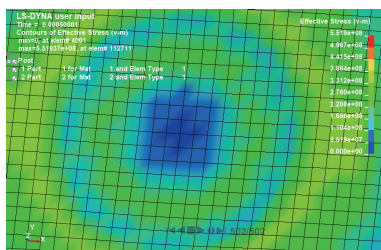


图 4 激光冲击强化数值仿真结果

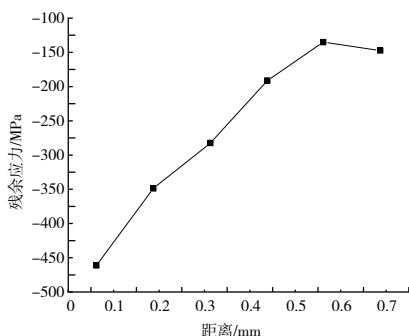


图 5 模型表面残余应力分布

由图 5 可知, 模型冲击处残余压应力为  $-461.25$  MPa, 且残余压应力以冲击处为中心随半径增加而减小, 原因是激光冲击波在空间呈现高斯分布, 随半径增加冲击波峰值压力减小, 因此相应残余压应力随之减小。该残余应力分布趋势与北京航空航天大学孙汝剑等<sup>[6]</sup>的研究结果相近。

### 2.2 表面形貌变化

激光冲击强化也会对模型表面形貌变化产生影响, 本文模型厚度为  $3$  mm, 冲击中心处节点到底端节点距离为  $2.935$  mm, 经计算激光冲击强化所导致模型表面的凹坑深度为  $0.065$  mm, 凹坑直径为  $2.5$  mm, 如图 6 所示。由于激光冲击强化原理是等离子体短时间快速膨胀并受约束作用, 从而在靶材表面形成远超靶材自身屈服强度的 GPa 级瞬态冲击压力, 使靶材表面产生塑性应变并发生动态屈服, 符合陆莹等<sup>[7]</sup>总结的激光冲击强化本质: 激光冲击强化在靶材表面通过塑性变形存储变形能, 从而形成残余应

力场。因此靶材表面形貌会产生一定变化。

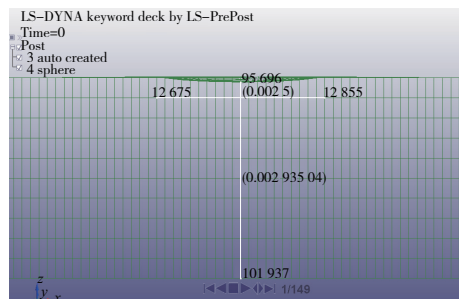


图 6 激光冲击强化后模型表面形貌变化

## 3 结语

本文基于 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件, 针对钛合金材料开展了激光冲击强化数值仿真研究, 讨论了影响激光冲击强化结果的 3 个主要工艺参数, 并估算了相应的激光冲击波峰值压力, 确定了激光冲击波时空分布模型。分析结果表明:

1) 模型表面残余压应力以冲击处为中心随半径增加而减小, 符合激光冲击波空间高斯分布状态, 即随半径增加, 激光冲击波峰值压力减小, 导致相应残余压应力随之减小;

2) 激光冲击强化会使模型表面出现凹坑, 形成残余应力, 本质在于激光冲击强化使靶材表面产生塑性应变并发生动态屈服, 并在靶材表面通过塑性变形存储变形能, 从而形成残余应力场, 因此靶材表面形貌会产生一定变化。

### 参考文献:

- [1] 李东霖, 何卫锋, 游熙, 等. 激光冲击强化提高外物打伤 TC4 钛合金疲劳强度的试验研究[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 122-130.
- [2] LUO S H, NIE X F, ZHOU L C, et al. High cycle fatigue performance in laser shock peened TC4 titanium alloys subjected to foreign object damage[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(3): 1466-1474.
- [3] 刘保果, 孙护国, 陈庆贵. 压气机钛合金叶片外物损伤规律数值仿真研究[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(1): 132-135.
- [4] PEYRE P, FABBRO R, MERRIEN P, et al. Laser shock processing of aluminium alloys. Application to high cycle fatigue behaviour[J]. Materials Science and Engineering: A, 1996, 210(1/2): 102-113.
- [5] ZHANG W W, YAO Y L, NOYAN I C. Microscale laser shock peening of thin films, part 1: experiment, modeling and simulation[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, 126(1): 10-17.
- [6] 孙汝剑, 朱颖, 郭伟, 等. 激光冲击强化对 TC17 表面形貌及残余应力场影响的有限元数值模拟研究[J]. 塑性工程学报, 2017, 24(1): 187-193.
- [7] 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.

收稿日期: 2022-06-28