

doi: 10.3788/gzxb20124106.0713

# 强激光对燃烧室壳体的热-力毁伤研究

罗积军, 徐军, 侯素霞, 曾震武, 赵云芳, 袁博

(第二炮兵工程大学, 西安 710025)

**摘要:**基于 ANSYS 有限元软件, 按有无内压作用, 分别对激光辐照下燃烧室壳体的温度场、热应力、应变与损伤进行了计算与分析. 分析表明, 壳体的温度场分布与光束的功率分布一致, 光斑中心温度最高. 壳体中应力最大值不在光斑中心, 而是位于光斑边缘处, 在壳体吸收的激光功率密度超过  $1\ 000\ \text{W}/\text{cm}^2$  时, 壳体中应力大于材料的强度极限, 壳体均会发生软化. 在存在内部燃气压力的情况下, 壳体应力会产生局部集中, 沿壳体环向表面通过光斑中心中轴线区域很有可能裂口; 相比较无内压的壳体, 存在内压的壳体中的应力和产生的形变均大于无内压时的壳体. 因此, 为达到相同的毁伤效果, 在存在内压的情况下, 可以适当的降低激光的辐照强度.

**关键词:**强激光; 燃烧室壳体; 毁伤

**中图分类号:** O473

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2012)06-0713-5

## 0 引言

在激光反导研究中, 强激光与发动机壳体的作用是相关研究工作中的重点. 在导弹发动机燃烧室工作过程中, 燃烧室内充满高温高压的燃气, 高压燃气对壳体挤压形成壳体中的应力场; 同时, 在激光辐照下壳体也将产生热应力场, 两种应力共同作用于壳体. 因此, 壳体内压将对激光对壳体的作用效果产生重要影响<sup>[1]</sup>. 文献[2-7]对激光作用于壳体的情况有所研究, 但对于激光辐照内压壳体的毁伤研究较少. 本文将研究强激光与火箭发动机燃烧室的金属壳体的作用, 分析激光辐照壳体产生的热应力对壳体的损伤机理, 并着重对比研究内压作用壳体与无内压作用壳体受激光辐照时的响应及破坏情况.

## 1 火箭发动机燃烧室

燃烧室壳体是由不同形状的壳体和各种连接件构成的半封闭式压力容器, 是激光毁伤过程中的主要攻击目标. 在激光辐照壳体前, 壳体由于燃烧室中火工品的燃烧, 在内部会有一个高压环境, 这样会在壳体中形成最初的内压应力场. 该应力场是激光辐照产生毁伤的基础, 在激光辐照过程中, 这一压应力会与激光热应力进行耦合叠加, 对导弹发动机壳体造成更加严重的破坏.

在内压作用下的光壳中, 有轴向应力  $\sigma_1$  和环向应力  $\sigma_2$  的作用如图 1<sup>[8]</sup>.

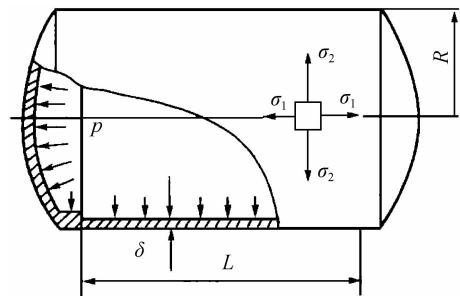


图 1 燃烧室壳体示意图

Fig. 1 The schematic diagram of combustion chamber case

$$\sigma_1 = pR/2\delta \quad (1)$$

$$\sigma_2 = pR/\delta \quad (2)$$

式中  $p$  为壳体内压.

## 2 壳体中的热应力

在激光与金属壳体作用时, 辐照在壳体表面的激光能量会逐步沉积在壳体表面, 经过热传导在壳体中形成温度场. 金属壳体受热膨胀, 在周围材料的整体约束下, 壳体中会形成热应力场, 从而会导致壳体产生形变, 壳体产生损坏.

在激光辐照壳体时, 材料的温度变化是一个瞬态热传导问题. 材料内的瞬态温度场分布  $T$  可用经典傅里叶热传导方程来表示为<sup>[9]</sup>

基金项目: 第二炮兵工程大学创新基金(No. XY2011JJB07)资助

第一作者: 罗积军(1974-), 男, 副教授, 硕士, 主要研究方向为激光应用技术. Email: ljj\_luo@sohu.com

收稿日期: 2011-11-27; 修回日期: 2012-02-15

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + (1-R)\alpha I_0 e^{-\alpha r} \quad (3)$$

式中,  $\rho$ 、 $c$ 、 $k$  分别为材料的密度、定压比热容和热导率, 可以与位置及温度有关;  $R$  为材料表面对激光的反射率;  $\alpha$  为材料对激光的吸收系数;  $I_0$  是材料表面光斑处激光束强度的时空分布。

在温度场产生的同时, 材料发生着膨胀, 但是由于材料整体的约束, 壳体中产生了相应的应力和应变. 壳体中的应变分为两部分, 一部分为应力产生的, 另一部分是温度产生的, 于是 Hooker 定律可以写成

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_1 &= \frac{1}{E}(\sigma_1 - \nu\sigma_2) + \alpha T \\ \epsilon_2 &= \frac{1}{E}(\sigma_2 - \nu\sigma_1) + \alpha T \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

### 3 有限元分析与计算

本文在处理激光辐照壳体材料的热-力毁伤时, 采用了 ANSYS 11.0 有限元软件进行计算与分析. 在实际的激光辐照导弹壳体的过程中, 由于导弹的高速飞行与光束出射方向的稳定控制中的误差、大气的折射、湍流等等因素的影响, 激光在照射到导弹发动机上时很可能不会垂直照射到导弹表面. 为此, 本文对光束在导弹上的辐照区域做了少许的偏离设置. 光束沿  $x$  方向辐照到壳体表面, 光斑中心偏离轴线 0.25 m, 光斑半径  $r=0.05$  m,  $\alpha I_0$  为壳体表面吸收的激光功率. 吸收系数  $\alpha$  一般随不同的材料和不同的功率而变化, 为了便于计算与分析, 取  $\alpha I_0$  分别为  $1\ 000\ \text{W}/\text{cm}^2$ ,  $1\ 200\ \text{W}/\text{cm}^2$ ,  $1\ 500\ \text{W}/\text{cm}^2$ .

高斯光束对壳体的辐照作用, 采用热流进行表面加载, 运用函数编辑器实现加载过程中激光功率的高斯分布, 辐照光束的热流表达式为

$$I_{\text{heat flux}} = \alpha I_0 \exp\left(\frac{-2[(z+0.25)^2 + y^2]}{r^2}\right) \quad (5)$$

有限元分析时, 先进行温度场计算, 而后调入热分析结果计算热应力, 获得热应力分析文件. 在进行热-力耦合分析时, 采用了间接耦合方法. 在调入热应力分析文件基础上, 再施加内压载荷 6 MPa, 尔后求解得出热-力耦合的结果.

文章中所采用的壳体材料为抚钢研制的仿 D6AC 钢<sup>[10]</sup>, 其密度  $\rho=7\ 870\ \text{kg}/\text{m}^3$ .

模型选自于角度为  $60^\circ$  的一段壳体, 壳体半径为 0.5 m, 厚度为 2.5 mm, 激光光斑辐照在壳体外表面, 辐照示意图如图 2. 模型选择 SOLID70 三维热单元进行模型的网格划分, 网格划分结果如图 3.

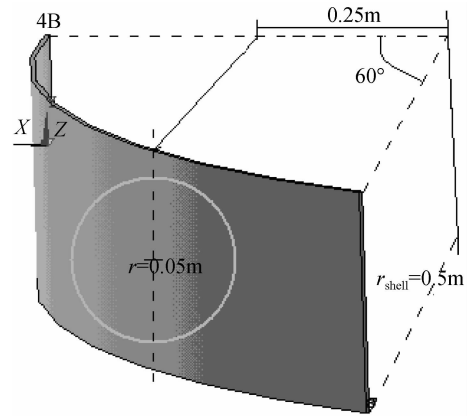


图 2 壳体模型

Fig. 2 Model of the shell

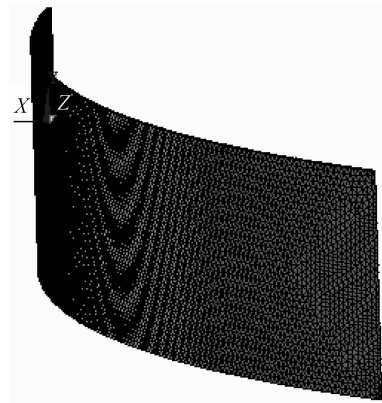


图 3 网格划分图

Fig. 3 Meshing result of the shell

在进行热应力分析时, 通过网格转换, 将 SOLID70 换为 SOLID185 三维结构单元. 在热-力耦合分析过程中, 壳体内压 6 MPa 加载于壳体内壁表面. 设定激光辐照时间为 1 s, 计算步长 0.1 s, 进行瞬态分析与计算. 分别获得功率为  $1\ 000\ \text{W}/\text{cm}^2$ ,  $1\ 200\ \text{W}/\text{cm}^2$ ,  $1\ 500\ \text{W}/\text{cm}^2$  时的温度场, 应力场与应变图, 见图 4~8. 计算时取 von Mises 判据为屈服准则.

图 4(a)~(c) 分别为壳体吸收激光功率密度为  $1\ 000\ \text{W}/\text{cm}^2$ ,  $1\ 200\ \text{W}/\text{cm}^2$ ,  $1\ 500\ \text{W}/\text{cm}^2$  时, 壳体的温度场分布图. 从图中可以看到壳体最高温度位于光斑辐照中心, 距离光斑中心越远温度越低, 且壳体的最高温度随激光功率的增加而升高. 对应不同激光功率密度的壳体, 最高温度分别为  $1\ 080^\circ\text{C}$ 、 $1\ 231^\circ\text{C}$ 、 $1\ 456^\circ\text{C}$ . 在温度达到  $1\ 456^\circ\text{C}$  时, 壳体很有可能将要或者已经发生熔融.

图 5(a)~(c) 为无内压辐照时壳体的热应力. 从图中可以明显地看出随着壳体对激光的吸收功率密度的提升, 壳体中的热应力也逐渐增大. 对应不同的功率, 等效热应力最大值分别为  $1\ 420\ \text{MPa}$ 、

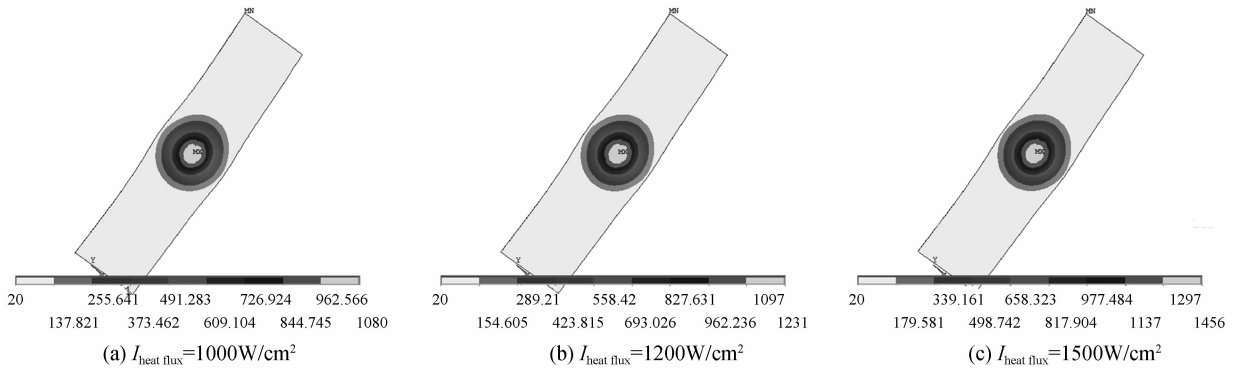


图 4 温度场  
Fig. 4 The temperature field

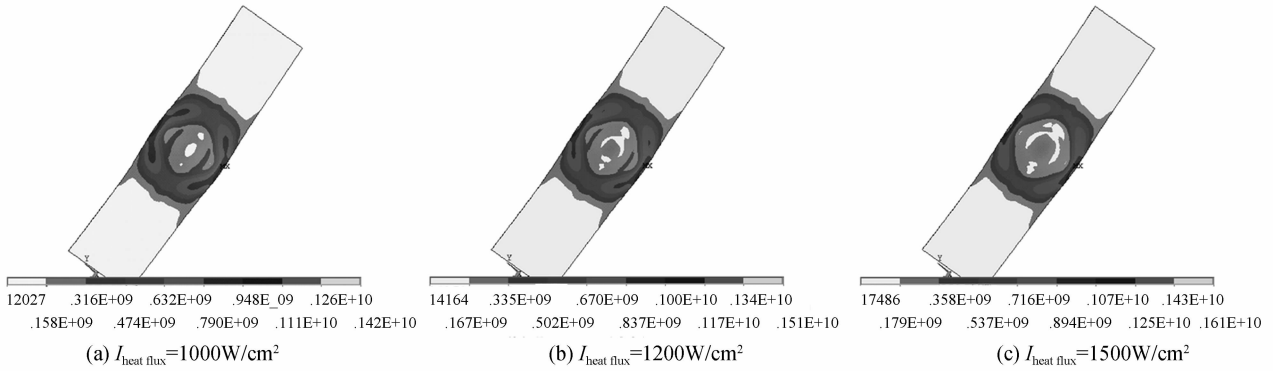


图 5 无内压时的等效应力图  
Fig. 5 The von mises stress on the shell without internal pressure

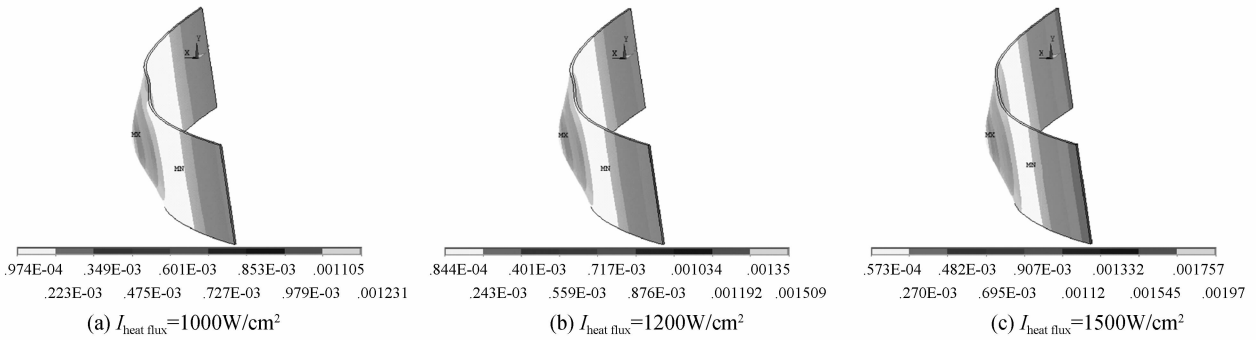


图 6 无内压时的应变图  
Fig. 6 The strain on the shell without internal pressure

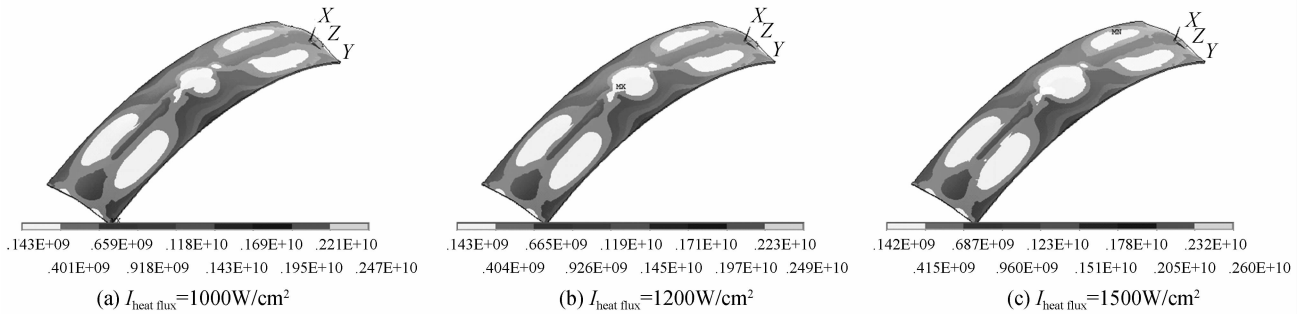


图 7 6 MPa 内压作用下热-力耦合等效应力图  
Fig. 7 The von mises stress on the shell with internal pressure 6 MPa

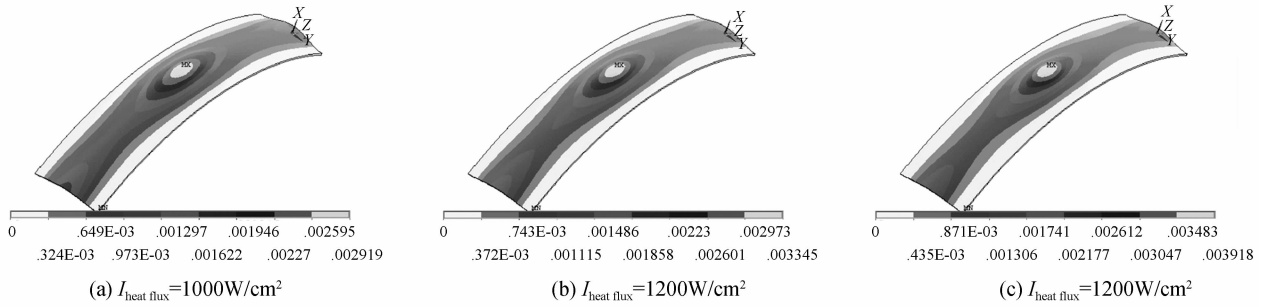


图 8 6 MPa 内压作用下热-力耦合应变图

Fig. 8 The strain on the shell with internal pressure 6 MPa

1 510 MPa、1 610 MPa. 从文献[11]中可以得知, 仿 D6AC 钢常温下的强度极限为 1 233 MPa, 而且材料的强度极限随温度的升高而降低. 在 973℃ 时, 强度极限为 72 MPa. 从而利用 von Mises 判据可以得知, 壳体在上述三种吸收功率下产生的等效热应力均大于材料的强度极限, 在这三种功率的辐照下壳体均会因为壳体的热应力而产生损伤. 从图 5, 还可以知道, 壳体在激光辐照下产生的热应力场分布是不均匀的, 壳体中应力最大的区域在光斑边缘处, 这是因为光斑边缘处壳体在辐照时温度较低, 未发生软化, 而光斑中心已经软化.

图 6(a)~(c) 为无内压激光辐照下的壳体形变, 最大形变分别为 1.231 mm、1.509 mm、1.97 mm. 通过对比这三张图, 可以知道壳体的形变量随激光功率的增大而增大, 而且发生最大形变的区域均在光斑中心处, 而且所产生的形变是迎着激光向外突出的. 这是由于壳体软化最先发生在壳体的表面, 在热应力作用和内部未软化壳体的约束下, 软化壳体只能向外突出.

飞行状态中的导弹发动机壳体会承载着内部燃气压力(本文中设燃烧室内燃气压力为 6 MPa), 继而壳体中会形成应力场. 这一内压应力场是激光辐照时的壳体已经具备的状态. 在激光辐照时, 壳体内压应力与热应力会产生耦合叠加. 图 7(a)~(c) 为热-力耦合等效应力场, 与图 5(a)~(c) 中无内压的应力场明显不同. 在图 7(a)~(c) 中, 对应不同功率密度, 壳体的最大等效应力分别为 2 470 MPa、2 490 MPa、2 600 MPa, 均大于材料强度极限, 且大于无内压应力作用下的相应最大应力. 这表明壳体在内压与激光联合作用下更易产生毁伤. 因此, 为达到毁伤效果, 在有内压作用下, 可以适当降低激光功率. 与此同时, 最大应力所处位置仍为光斑边缘处. 相比较无内压作用时的应力场, 还可以发现壳体中应力分布发生了较大变化, 壳体表面的环向中轴线上产生了应力集中, 沿壳体环向表面通过光斑中心中轴线区域很有可能裂口. 对比图 8(a)

~(c) 和图 6(a)~(c), 可得对应相同功率, 在存在内压时, 壳体的形变将更大, 对应最大形变分别为 2.919 mm、3.345 mm、3.918 mm, 所产生的形变近似无内压作用时的两倍.

## 4 结论

由计算结果可以得到如下结论:

1) 激光辐照下壳体的温度场分布与光束的功率分布一致, 光斑中心温度最高, 而且当壳体吸收的激光功率密度超过 1 000 W/cm<sup>2</sup> 后, 壳体均会发生软化.

2) 壳体中应力最大值分布于光斑边缘. 在壳体吸收的激光功率密度超过 1 000 W/cm<sup>2</sup> 时, 壳体中应力大于材料的强度极限. 激光辐照区域的壳体的形变向外突出.

3) 在存在内部燃气压力的情况下, 壳体应力会产生局部集中, 沿壳体环向表面通过光斑中心中轴线区域很有可能裂口. 在一定程度上可以说, 壳体形变增大的后果就是局部的爆裂破坏. 而且, 为达到相同的毁伤效果, 在存在内压的情况下, 可以适当降低激光的辐照强度.

### 参考文献

- [1] ZENG Zhen-wu, XU Jun, LUO Ji-jun, *et al.* Damage mechanism analysis on solid rocket motor irradiated by intense laser[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, **31**(12): 76-79. 曾震武, 徐军, 罗积军, 等. 强激光辐照导弹发动机毁伤机理分析[J]. *应用光学*, 2010, **31**(12): 76-79.
- [2] JI Yun-jing, TONG Chao-xia, BIAN Bao-min, *et al.* Mechanism study on potential signal in laser-induced Cu target [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(12): 2187-2191. 纪运景, 童朝霞, 卞保民, 等. 激光烧蚀金属靶诱导靶电势效应的机理研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(12): 2187-2191.
- [3] WANG Yu-heng, HAN Feng, LIU Yu, *et al.* Evaluation of pressurized cylindrical shell damage induced by high energy laser irradiation (II)——distribution feature of fracture parameters subjected to local thermal loading[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2009, **32**(5): 548-553. 王玉恒, 韩峰, 刘钊, 等. 激光辐照充压壳体的破坏评价(II)——局部热载作用下断裂参数的分布特性[J]. *固体火箭技术*, 2009, **32**(5): 548-553.
- [4] WANG Yu-heng, LIU Feng. Numerical simulation on similarity of thermal-mechanical effects of cylindrical shells

- subjected to inner pressure and irradiated by intense laser (I) [J]. *Laser Journal*, 2008, **29**(5): 62-63.
- 王玉恒, 刘峰. 强激光辐照充压圆柱壳体热力效应的相似性数值模拟(I)[J]. 激光杂志, 2008, **29**(5): 62-63.
- [5] WANG Yu-heng, LIU Feng, WANG Li-jun, *et al.* Numerical simulation of Thermal-mechanical effects on metal cylindrical shell irradiated by laser beam [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(S3): 435.
- 王玉恒, 刘峰, 王立君, 等. 激光辐照金属圆柱壳体热力学效应模拟[J]. 红外与激光工程, 2008, **37**(S3): 435.
- [6] ZHANG Jia-lei, TAN Fu-li, TONG Yan-jin. Numerical simulation of failure energy threshold of internally pressured cylindrical shell under laser irradiation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(5): 991-995.
- 张家雷, 谭福利, 全延锦. 激光辐照下充压柱壳的破坏能量阈值数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2010, **22**(5): 991-995.
- [7] LIU Feng, CHEN Yu-sheng, WU Zhen-sen, *et al.* Estimation of laser beam-parameters based on damage configuration of a cylindrical shell subjected to internal pressure[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, **34**(6): 797-803.
- 刘峰, 陈雨生, 吴振森, 等. 基于充压柱壳损伤形态的靶面激光参量估计[J]. 中国激光, 2007, **34**(6): 797-803.
- [8] 拉夫洛夫 Л·Н. 固体火箭发动机结构[M]. 关正西, 译. 北京: 中国宇航出版社, 2006: 104-105.
- [9] 孙承伟. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 32.
- [10] SHAO Yuan-pei, JI Shi-fan. Calculation and analysis of laser destruction for engine of Patriot missile [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 1999, **28**(6): 41-46.
- 邵元培, 计世藩. 对“爱国者”导弹发动机激光破坏的计算分析[J]. 红外与激光工程, 1999, **28**(6): 41-46.
- [11] LIU Feng, CHEN Yu-sheng, WU Zhen-sen, *et al.* Estimation of laser beam-parameters based on damage configuration of a cylindrical shell subjected to internal pressure[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, **34**(6): 797-803.
- 刘峰, 陈雨生, 吴振森, 等. 基于充压柱壳损伤形态的靶面激光参量估计[J]. 中国激光, 2007, **34**(6): 797-803.

## Thermal and Dynamics Damage in Combustion Chamber Case under High Power Laser

LUO Ji-jun, XU Jun, HOU Su-xia, ZENG Zhen-wu, ZHAO Yun-fang, YUAN Bo  
(The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** According to internal pressure effect and without internal pressure effect, the temperature field, thermal stress, strain and the damage of the combustion chamber case under the laser irradiation, are calculated and analyzed respectively, based on the finite element analysis software ANSYS. Analysis results show that, the distribution of the shell temperature field and beam power is identical, and the maximum temperature is at the center of spot. The maximum stress is not in the center, but is located in the flare edge. If the shell absorption of laser power density is larger than  $1\ 000\ \text{W}/\text{cm}^2$ , the stress of the shell will be greater than limited stress and the shell will soften. In the presence of internal gas pressure condition, shell stress produces a local focus, along the circumferential surface by laser spot center axis region crack probably. Compared with no internal pressure shell, the stress and deformation produced by the shell with internal pressure are greater. In order to achieve the same damaging effects, in the circumstances of exist internal pressure, the laser radiation intensity can be appropriately reduced.

**Key words:** High power laser; Combustion chamber case; Damage