

文章编号: 0258-7025(2002)09-0783-04

# 强激光辐照下充内压圆柱壳的 破坏阈值和破坏时间

郭少锋, 陆启生, 陈金宝, 程湘爱, 江厚满

(国防科技大学理学院定向能技术研究所, 湖南长沙 410073)

**提要** 建立了强激光辐照下充压圆柱壳热力学响应的物理模型和数值计算模型, 求解了激光产生的非线性温度场。在此基础上, 考虑塑性和屈服强度的温度相关性, 求解了非线性的应力场, 计算了两种不同类型圆柱壳在高功率连续 CO<sub>2</sub> 激光作用下的破坏阈值, 给出了破坏时间与功率密度的关系以及壳体破坏的危险区域。

**关键词** 强激光, 圆柱壳, 破坏阈值, 破坏时间

中图分类号 TN 241 文献标识码 A

## Damage Threshold and Damage Time of Cylindrical Shells with Inner Pressure under Intensive Laser Loading

GUO Shao-feng, LU Qi-sheng, CHEN Jin-bao, CHENG Xiang-ai, JIANG Hou-man

(Institute of Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073)

**Abstract** Damage mechanism of shells with inner pressure that are exposed to high power CW CO<sub>2</sub> laser is studied here. The physics model and numerical solution model of thermal and mechanical responding is described. The finite element method is used to simulate nonlinear temperature and stress profile. Two types of shells are considered and the laser power density is varied from 400 W/cm<sup>2</sup> to 1500 W/cm<sup>2</sup>. The damage times are presented and the damage areas are plotted.

**Key words** intense laser, cylindrical shell, damage threshold, damage time

## 1 引 言

充内压壳体是激光破坏机理研究中的一种典型预应力结构。许多实际问题都可以简化为强激光辐照下充压壳体的热力学响应问题。研究这种特殊结构的温度场演化、弹塑性行为以及屈服、断裂, 具有十分重要的作用。

强激光破坏机理的研究, 目前只能立足于兆瓦级激光器。根据低阈值杀伤机理, 必须利用结构的预应力的薄弱环节。对于充压壳体来说, 预应力就是指内压。在强激光的辐照下, 壳体表面吸收一定比率的能量, 局部以较大的升温率升至足够高的温度。受照区的材料一方面产生热软化, 材料强度降低, 另一方面不均匀的温度场产生附加的热应力场

和热变形场, 由于壳体本身还承受着很强的内压作用, 在较低功率密度激光的辐照下就有可能泄压、失效甚至造成外壳撕裂。

充压壳体对强激光的响应牵涉到材料非线性、几何非线性和弹塑性, 以及与应变率有关的耦合效应, 是一个非常复杂的过程。国内外已经在这方面进行了不少的研究<sup>[1, 2]</sup>, 但都是单一激光功率密度下的热力学响应, 没有研究破坏时间和激光功率密度之间的函数关系, 没有明确标出危险区域。我们建立了上述过程的简化数值计算模型, 求解了激光产生的非线性温度场, 在此基础上, 考虑塑性和屈服强度的温度相关性, 求解了非线性的应力场。针对两种不同类型的壳体, 分别给出了结构破坏所需的时间与激光功率密度的关系, 标出了破坏区域。

## 2 理论基础

### 2.1 温度场

连续波激光作用下壳体的热响应可用耦合的热传导基本方程及其定解条件来描述,这里把壳体看作各向同性的均匀介质。

耦合温度场由以下方程描述<sup>[3]</sup>

$$K \nabla^2 T = \rho c_p \dot{T} + \frac{\alpha E T}{1 - 2\nu} \dot{u}_{i,i}$$

$$\text{热流输入边界: } K(\nabla T) \cdot \vec{n}^0 = -\bar{q}$$

其中,  $K, \rho, c_p, E, \nu$  和  $\alpha$  分别为热传导系数、密度、比热、杨氏模量、泊松比和热膨胀系数;  $u_i$  为弹性体的位移;  $\vec{n}^0$  为边界法向的单位矢量;  $\bar{q}$  为输入的热流,这里为壳体表面吸收的激光功率密度。由于壳体表面吸收的激光能量远大于辐射和对流损失的能量,所以我们在计算中忽略了辐射和对流的边界条件。

### 2.2 力场

#### 2.2.1 内压分析

假设圆柱壳长为  $l$ , 半径为  $r$ , 壳厚为  $d$ , 内压为  $P_i$ , 则根据经典弹性力学理论, 该壳体的应力状态为:

$$\text{径向正应力: } \sigma_r \approx P_i, \text{ 环向正应力: } \sigma_\theta \approx \frac{r}{d} P_i,$$

$$\text{轴向正应力: } \sigma_z \approx \frac{r}{2d} P_i$$

当我们感兴趣的壳体半径和厚度之比足够大时, 单由内压产生的应力就可能接近屈服强度。事实上, 工作状态时的圆柱壳结构的设计裕度都不高, 一般为 2, 这说明没有激光加载时内压产生的等效应力已达断裂强度的一半。

#### 2.2.2 弹塑性分析

激光作用到充压壳体上, 壳体的应力场是弹塑性的, 而不仅仅是弹性的。在基本方程和各边界条件中, 材料参数依赖于温度。我们选择了等效应力破坏准则, 而断裂强度也是依赖于温度的。

$$\text{平衡方程: } \sigma_{ij,j} + f_i = 0$$

$$\text{几何方程: } \varepsilon = \text{lr}(U), U = R^{-1}F$$

$$\text{本构方程: } \sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}^e,$$

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^\theta$$

$$\delta_{ij}^\theta = \alpha \theta \delta_{ij}$$

在塑性计算中, 采用的是 Von Mises 屈服准则。

对强激光辐照的壳体, 由于材料在高温区发生热软化, 其力学的强度下降, 壳体在内压作用下, 光斑辐照区域发生了较大的变形, 故使用双线性等向

强化模型, 它的屈服准则可用下式表示

$$F = \frac{3}{2} [\{s\}^T \{s\}]^{1/2} - \sigma_y = 0$$

这里  $\sigma_{ij}$  为应力张量;  $\varepsilon, U, R$  和  $F$  分别为对数应变、右变形张量、旋转张量及变形梯度张量;  $\theta$  为温度增量;  $\varepsilon_{ij}^e, \varepsilon_{ij}^p$  和  $\varepsilon_{ij}^\theta$  分别为弹性应变、塑性应变和温度应变; 应力偏量  $\{s\} = \{\sigma\} - \sigma_m [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]^T, \sigma_m = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3, \sigma_y$  是屈服强度。

#### 2.2.3 破坏准则

随着辐照时间的增加, 壳体的温度不断升高, 应力不断加大, 而材料强度却不断下降, 总有一个时刻, 壳体上某点域将在内压和激光的联合作用下首先开裂, 从而引起整个壳体的破坏。我们不研究破坏的后期行为, 只关心在选定的破坏准则下, 壳体何时达到破坏状态。通用的点破坏准则有最大拉应力准则和等效应力 (Mises 应力) 准则, 考虑到我们进行的是弹塑性分析, 故选用后者。

等效应力破坏准则:  $\sigma_e \leq \sigma_b(T), \sigma_e$  和  $\sigma_b$  分别为等效应力和材料强度。

$$\sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_3 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]^{1/2}, \sigma_1, \sigma_2 \text{ 和 } \sigma_3 \text{ 是三个方向的主应力; } \sigma_b \text{ 是温度的函数, 一般随着温度的升高而下降。}$$

## 3 数值计算

### 3.1 有限元法和 ANSYS 软件

对以上非线性问题进行解析求解存在很大的困难, 我们选用了有限元方法进行数值计算。有限元法是工程技术领域内常用的数值模拟方法, 它的基本思想是将问题的求解域化为一系列单元, 单元之间仅靠节点连接。单元内部点的待求量可由单元节点量通过选定的函数关系插值求得。由于单元形状简单, 易于由平衡关系或能量关系建立节点量之间的方程式, 然后将各个单元方程“组集”在一起而形成总体代数方程组, 计入边界条件后即可对方程组进行求解。单元划分越细, 计算结果就越精确。

ANSYS 是一个大型的有限元程序商业软件, 它在热分析、结构分析以及耦合场分析方面已经发展得相当成熟。熟练地使用 APDL 语言<sup>[4]</sup>, 可以灵活地对程序进行控制, 实现复杂载荷的加载、自动搜索破坏时间等功能。我们运用 APDL 语言编制程序, 针对两种由实际问题抽象出的不同类型的充压圆柱

壳进行了分析。

### 3.2 A1 型壳体的破坏

A1 型壳体直径为 1000 mm, 长度为 3000 mm, 壳体厚度为 4 mm, 壳体材料的热力学性能参数取值如表 1 所示。试验测得 A1 型壳体表面对 10.6 μm 的

CO<sub>2</sub> 激光的能量耦合系数约为 31.6%。壳体内平均工作压强为 5 MPa。假设光斑半径为 200 mm 的激光束照射到圆柱壳中部 根据对称性和圣维南原理, 问题可简化为如下模型(如图 1)。

表 1 热力学性能参数表

Table 1 Thermal and mechanical properties of particular steel considered

Temp. /°C	Thermal conductivity /W/m°C	Specific heat /J/kg°C	Ther. exp. coef. /10 <sup>-6</sup> /°C	Young's modulus /×10 <sup>3</sup> MPa	Hardening modulus /×10 <sup>3</sup> MPa	Yield Strength /MPa	Fracture Strength /MPa
20	27.74	470.1	10.00	210.9	31.1	1100.0	1389.0
100	28.99	516.1	10.50	194.0	24.0	932.0	1147.0
300	30.47	643.7	11.92	180.7	21.4	875.0	1000.0
500	29.60	750.1	12.90	135.0	16.5	653.3	801.0
700	26.98	847.2	13.53	50.3	8.0	170.7	219.7
900	24.59	859.2	13.73	30.5	2.0	65.0	90.7

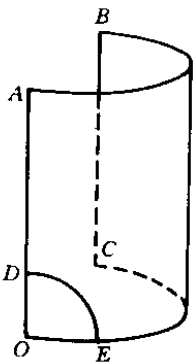


图 1 充压圆柱壳的简化计算模型

Fig.1 Simplified calculation model for internally pressurized cylinder shell

这里, 我们选取了原完整求解区域的四分之一进行计算, 且在轴向 Z 只取了 700 mm, 图中 ODE 为激光辐照区。OA, OC, BC 边为对称边界条件, 即 OA, BC 边环向位移  $V = 0$ ,  $\theta_z = 0$ ,  $\theta_y = 0$ ; OC 边轴向位移  $W = 0$ ,  $\theta_x = 0$ ,  $\theta_y = 0$ ; AB 边加拉力  $F = 312.5$  MPa, 面 OCBA 上加压力  $P = 5$  MPa,  $F$  和  $P$  都是内压产生的。

耦合效应的实质是局部高温区的存在使激光辐照区域周围由于热膨胀而使其力场发生变化, 反过来, 应变率又会影响温度的变化。对金属材料而言, 其耦合系数很小<sup>[31]</sup>, 且激光加载时间只有几秒, 我们可以将温度场和应力场的求解进行解耦处理, 即首先求解非线性的瞬态温度场, 在此基础上再求解应力场。

计算时只考虑激光光斑为均匀分布的情况。图 2 所示为当激光功率密度在 400 ~ 1500 W/cm<sup>2</sup> 范围内变化时, 所对应的壳体破坏时间。

当连续输出的功率密度为 1000 W/cm<sup>2</sup> 时, 计算

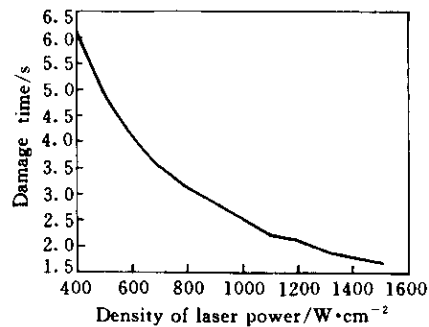


图 2 A1 型圆柱壳的破坏时间曲线

Fig.2 Damage time curve versus laser intensity for shell of model A1

得壳体的破坏时间为 3.4 s。图 3 给出了破坏区域(空白区域)。

### 3.3 A2 型壳体的破坏

A2 型圆柱壳直径为 880 mm, 长度为 5500 mm, 壳体厚度为 3.8 mm, 壳体材料与 A1 相同, 只是表面有相当程度的氧化。实验测得 A2 型圆柱壳表面对 CO<sub>2</sub> 激光的能量耦合系数为 38.4%。壳体内平均工作压强为 6.5 MPa。

图 4 所示为当激光功率密度在 400 ~ 1500 W/cm<sup>2</sup> 范围内变化时, 所对应的壳体破坏时间。当连续输出的功率密度为 1000 W/cm<sup>2</sup> 时, 计算得壳体的破坏时间为 2.5 s。图 5 给出了破坏区域(空白区

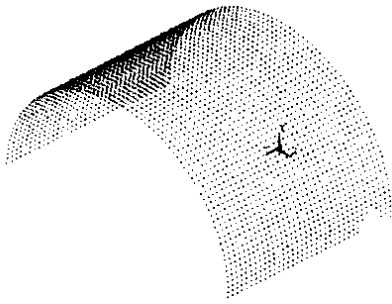


图3 1000 W/cm<sup>2</sup> 激光辐照下 A1 型圆柱壳 3.4 s 时的破坏区域示意

Fig.3 Damage area of shell A1 irradiated by laser with intensity 1000 W/cm<sup>2</sup>, duration 3.4 s

域)。

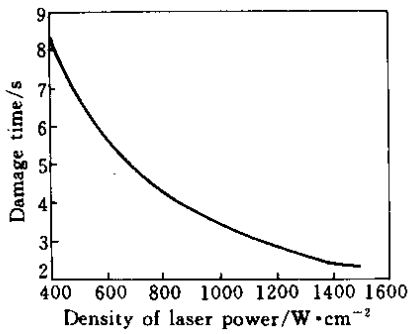


图4 A2 型圆柱壳的破坏时间曲线

Fig.4 Damage time curve versus laser intensity for shell of model A2

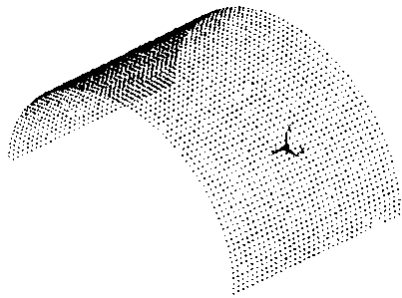


图5 1000 W/cm<sup>2</sup> 激光辐照下 A2 型圆柱壳 2.5 s 时的破坏区域示意

Fig.5 Damage area of shell A2 irradiated by laser with intensity 1000 W/cm<sup>2</sup>, duration 2.5 s

## 4 结果分析

从计算结果看,温升的最高点在光斑中心,而等效应力的最大值出现在光斑边缘。破坏位置出现在何处是温升导致的热软化与不均匀的温度场导致的应力场演化相互竞争的结果,而不能简单地认为破坏一定首先在光斑中心发生或一定首先出现在光斑边缘。一般而言,对高斯光束辐照的情况,光斑中心

最可能首先遭到破坏,而对均匀光束,危险点则更靠近光斑边缘。

比较而言,A2 型圆柱壳更易遭到破坏。一方面是由于它具有更大的预应力,另一方面是因为它对激光的热耦合系数更大。

当入射激光功率密度在 400 W/cm<sup>2</sup> 到 1500 W/cm<sup>2</sup> 的范围内变化时,壳体破坏时刻所对应的最高温升却基本维持不变,对 A1 型圆柱壳来说,这个值约为 550℃,对 A2 型圆柱壳来说约为 520℃。同时,每种圆柱壳还都对应着一个能量阈值,在我们关心的激光功率密度范围内,可以看作是一个常数,从图 2、4 可知,对 A1 型圆柱壳来说,这个值约为  $4.3 \times 10^6$  J,对 A2 型圆柱壳来说约为  $3.2 \times 10^6$  J。“破坏温度”和能量阈值可以看作是充压圆柱壳破坏的重要指标。

## 5 结 语

本文所研究的是连续激光对大型预应力结构的破坏问题,对于连续波激光的破坏,目前还只能立足于大光斑、低功率密度、高能量的破坏模式,激光器出光时间一般是几秒甚至更长的时间,最可能的破坏机理是热力联合作用下结构材料的热软化和热爆裂。我们建立了强激光辐照下充压圆柱壳热力学响应的物理模型和数值计算模型,计算了两种不同类型圆柱壳在高功率连续 CO<sub>2</sub> 激光作用下的温度场和应力场,研究了结构破坏所需的时间与激光功率密度的关系以及壳体破坏的危险区域,提出以破坏温度和能量阈值作为衡量充压圆柱壳结构抗激光能力的重要指标,为以后的实验工作提供了参考。

## 参 考 文 献

- 1 Ji Zheng, Liu Yong-gang. A thermal failure numerical model of internally pressured cylinder shell under laser irradiation [J]. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 1996, 8(1): 44~49 (in Chinese)
- 2 Zhao Jianheng, Zhang Guanren, et al.. A numerical simulation to the deformation of an internally pressured cylinder tank under intensive laser irradiation [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics* (高压物理学报), 1996, 10(4): 262~268 (in Chinese)
- 3 Wang Hong-gang. Introduction to Thermal-Elastics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1989 (in Chinese)
- 4 ANSYS, Inc. ANSYS Workbook Release 5.4, Third edition. SAS, IP Inc., 1997