

文章编号: 1001-3806(2010)05-0697-04

## 光强分布对激光辐照下柱壳热力学行为的影响

张家雷, 谭福利, 王伟平

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 绵阳 621900)

**摘要:** 高功率激光对承力结构的破坏机理研究, 可以拓展激光技术的应用范围。为了研究光束强度分布对激光辐照下柱壳热力学行为, 采用有限元方法建立充压柱壳的热力学模型, 先保持激光辐照总功率相等, 将几种典型激光束进行分析比较, 并研究了充压柱壳在各种光束辐照下的热力学响应。结果表明, 光强分布对圆柱壳的温度、应力以及位移场分布具有重要影响, 在不同光强分布的激光束辐照下圆柱壳将具有不同的破坏模式和破坏时刻。

**关键词:** 激光技术; 圆柱壳; 光强分布; 应力

**中图分类号:** TN246 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.05.033

### Influence of beam intensity distribution on the thermal and mechanical behavior of cylindrical shells under laser irradiation

ZHANG Jia-lei, TAN Fu-li, WANG Wei-ping

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The research of the failure mechanism of load-carrying construction under high-power laser irradiation can expand the field of laser application. In order to investigate the influence of beam intensity distribution on the thermal-mechanical behavior of cylindrical shells under laser irradiation, firstly the thermal-mechanical model of the cylindrical shell was constructed by means of finite element method. Taking total laser power equal, several typical distributions were analyzed and compared. Then thermal-mechanical response of the internal pressured cylindrical shell under different laser irradiation was studied. Numerical results indicate that intensity distribution has a significant effect on temperature, stress and displacement fields of cylindrical shell. The cylindrical shells irradiated by laser beams with different intensity have different failure mode and failure time.

**Key words:** laser technique; cylindrical shell; intensity distribution; stress

## 引言

强激光辐照可以使材料及其结构发生破坏, 并且不同种类的激光束将诱导材料结构发生不同类型的破坏, 比如高能短脉冲激光可以使金属表面迅速熔化、气化以及喷溅, 形成高温高压的等离子体; 而低功率连续波激光可以使结构局部发生热软化, 诱导承力结构破坏, 这种连续激光诱导承力结构破坏的方式具有重要的工程应用价值。圆柱壳是一种典型的激光辐照靶目标<sup>[1]</sup>, 激光辐照下承力圆柱壳的破坏机理和破坏模式研究已有大量文献发表, 包括试验研究、理论分析和数值计算<sup>[2-6]</sup>, 代表性工作有: CHEN 和 LI 等人<sup>[2-3]</sup>开展了轴压柱壳在连续激光辐照下的屈曲破坏试验; ZHAO 等人<sup>[4-5]</sup>采用数值方法研究了强激光辐照下充压柱壳的结构变形, 分析了柱壳在激光辐照下的爆裂

断口; TAN 等人<sup>[6]</sup>讨论了激光辐照下充压柱壳热断裂的可能性。由于圆柱壳破坏问题涉及到复杂的物理力学过程, 其破坏机理仍有待深入研究。

实际激光束强度有不同的空间分布, 即使功率、脉宽和束宽等参量相同, 剖面形状不同的光束在圆柱壳中产生的温度场也可能有较大差别, 这将影响激光对圆柱壳的加热效率, 从而导致柱壳辐照区域进入塑性状态的时刻不同, 即在某些激光束强点造成裂纹首先萌生, 因此, 激光束光强分布将直接影响到柱壳的破坏时刻和破坏模式。文献中大多考虑光束强度均匀分布或高斯分布<sup>[4,6]</sup>, 实际激光束采用不同阶次的超高斯光束描述更为合理, 特别是化学激光光束分布形式。WANG 和 LÜ 等人<sup>[7]</sup>对激光强度空间均匀分布、高斯、超高斯以及平顶高斯光束进行了分析比较, 研究了各种光束辐照下 30CrMnSiA 钢材料靶面的热效应, 发现对于激光加热金属薄板而言, 在功率、光斑相同条件下不同光束分布对温升分布影响较大。作者采用参考文献[7]中给出的各种激光束分布模型, 研究不同光强分布的激光束辐照下充压圆柱壳的热力学响应, 获得

作者简介: 张家雷(1980-), 男, 硕士, 助理研究员, 从事强激光辐照效应方面的研究。

E-mail: zhangjialei21@163.com

收稿日期: 2009-09-30; 收到修改稿日期: 2010-02-21

圆柱壳的温度、应力和位移场分布,从而为分析实际激光辐照下圆柱壳的失效机理奠定基础。

## 1 光束强度分布以及圆柱壳热力学模型

### 1.1 光束强度分布模型

如图1所示,圆柱壳受到内压 $p_0$ 作用,激光束辐

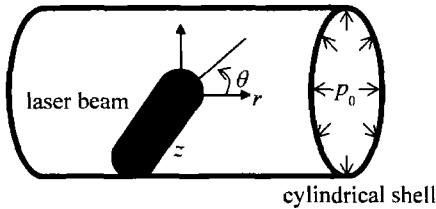


Fig.1 Cylindrical shell under laser irradiation

照在圆柱壳表面,激光束为柱对称分布,在柱坐标系 $(r, \theta, z)$ 下光强分布与 $\theta$ 无关。激光总功率为 $P$ ,光束分布形式包括均匀分布、高斯分布、超高斯分布以及平顶高斯分布,其激光半径分别为 $r_u, r_G, r_s$ 和 $r_f$ ,激光功率密度为 $I(r)$ 。

下面考虑这几种典型的激光束光强分布形式,即:光强均匀分布:

$$I_u(r) = \begin{cases} I_u, & (r \leq r_u) \\ 0, & (r > r_u) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $r_u$ 为均匀分布激光束光斑半径。

高斯分布:

$$I_G(r) = I_G \exp\left(-2 \frac{r^2}{r_G^2}\right) \quad (2)$$

式中,高斯光斑半径 $r_G$ 为强度降为中心值 $e^{-2}$ 时的坐标值。当 $r_G \rightarrow \infty$ 时,高斯分布退化为均匀分布。

超高斯分布:

$$I_s(r) = I_s \exp\left[-2 \left(\frac{r}{r_s}\right)^{N_s}\right] \quad (3)$$

式中, $N_s$ 为超高斯光束的阶数( $N_s \geq 2$ )。当 $N_s = 2$ 时,超高斯分布退化为高斯分布; $N_s \rightarrow \infty$ 时,超高斯分布退化为均匀分布。超高斯光斑半径 $r_s$ 为强度降为中心值 $e^{-2}$ 时 $r$ 的坐标值。

平顶高斯分布:

$$I_f(r) = I_f \exp\left[-2 \frac{(N_f + 1)r^2}{r_f^2}\right] \left\{ \sum_{k=0}^{N_f} \left[ \frac{(N_f + 1)r^2}{r_f^2} \right]^k \frac{1}{k!} \right\}^2 \quad (4)$$

式中, $N_f$ 为平顶高斯光束的阶数( $N_f \geq 0$ ),由于超高斯光束和平顶高斯光束可以具有十分接近的强度分布<sup>[7]</sup>,因此这里只考虑超高斯分布情况。

光束填充因子 $\eta$ 是平均光强与最大光强的比值,它反映了光强的空间分布差异,常用于评价光束质量。本文将激光能量集中在光斑半径之内考虑,则激光

总功率可以表示为:

$$P = \int_0^{r_0} I(r) 2\pi r dr \quad (5)$$

将(1)式~(3)式代入(5)式,即不同光束的 $I(r)$ 代入(5)式,便可得到不同光束的功率密度 $I(r)$ 和光束填充因子。

对于均匀分布:

$$\begin{cases} I_u(r) = \frac{P}{\pi r_0^2} \\ \eta_u = 1 \end{cases} \quad (6)$$

对于高斯分布:

$$\begin{cases} I_G(r) = \frac{P}{\pi r_0^2 (1 - e^{-2})} \exp\left(-2 \frac{r^2}{r_0^2}\right) \\ \eta_G = 0.43 \end{cases} \quad (7)$$

对于超高斯分布:

$$\begin{cases} I_s(r) = \frac{N_s P}{2^{(1-\frac{2}{N_s})} \pi r_0^2 \Gamma\left(2, \frac{2}{N_s}\right) \Gamma\left(\frac{2}{N_s}\right)} \exp\left[-2 \left(\frac{r}{r_0}\right)^{N_s}\right] \\ \eta_s = 2^{(1-\frac{2}{N_s})} \Gamma\left(2, \frac{2}{N_s}\right) \Gamma\left(\frac{2}{N_s}\right) / N_s \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\Gamma\left(2, \frac{2}{N_s}\right)$ 为不完全伽玛函数。

作者假设激光束为低功率密度的连续波激光,光斑半径 $r_0 = 3.0\text{cm}$ ,激光总功率设置为 $P = 12500\text{W}$ ,激光平均功率密度为 $442.3\text{W/cm}^2$ ,则不同形式的光强分布如图2所示,而超高斯光束填充因子与阶次的关

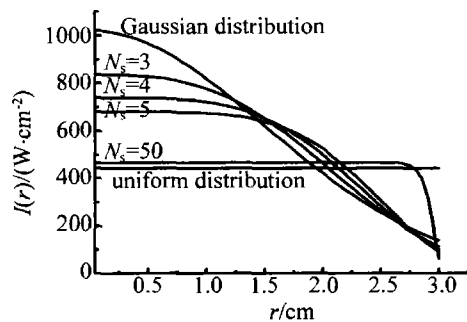


Fig.2 The comparison of beam intensity distribution

系如图3所示。从图中可以看出随着阶次增加,超高

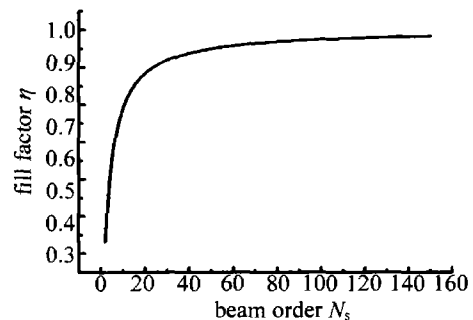


Fig.3 The relationship between super-Gaussian fill factor and beam order  
斯光束强度分布逐渐由高斯分布向均匀分布变化,光束

填充因子从 0.43 上升到 1。后面采用上面的激光参量来研究典型激光束对充压柱壳热力学行为的影响。

### 1.2 充压柱壳的热力学模型

圆柱壳截面内半径为 90mm,总长度为 450mm,壳体厚度为 1mm,柱壳承受固定大小的工作内压 6MPa。壳体材料选用 30CrMnSiA 钢,这是一种高强度的合金钢,其密度为  $7750\text{kg/m}^3$ ,热力学性能参量

Table 1 Thermophysics parameters of shell varying with temperature

$\theta/^\circ\text{C}$	20	100	200	300	400	500	600	700	800	1200
$\kappa/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	27.63	29.30	30.56	30.56	30.56	29.51	28.67	27.21	25.33	24.61
$c/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	473.1	519.1	581.9	644.7	699.1	766.1	841.5	910.1	975.0	1040

Table 2 The mechanical parameters of shell varying with temperature

$\theta/^\circ\text{C}$	20	100	200	300	400	500	600	700	800	1200
$E/10^3\text{MPa}$	201.7	195.0	191.7	181.7	170.0	140.0	90.0	47.3	36.7	33.5
$E_t/10^3\text{MPa}$	25.5	23.7	22.2	20.3	18.8	17.3	14.8	8.2	2.6	1.8
$\sigma_s/\text{MPa}$	1100	1032	940	885	803	673	387	167	95	65
$\sigma_b/\text{MPa}$	1215	1155	1115	1080	961	760	475	222	135	85
$\alpha/(10^{-6}\text{K}^{-1})$	11.00	11.00	11.72	12.92	13.62	13.90	14.22	14.53	13.43	12.73

金属材料对激光能量的吸收系数与其温度有重要的关系。高温下金属材料对激光的吸收系数比常温下更大,吸收的激光能量更多。考虑不同温度下壳体材料对激光的吸收系数变化,可以更加准确预测激光辐照下

Table 3 Absorption coefficient of shell varying with temperature

$\theta/^\circ\text{C}$	20	200	300	400	500	600	700	800	1200
$\alpha$	0.25	0.35	0.5	0.6	0.65	0.7	0.72	0.75	0.78

在定义了准确的材料热力学性能参量以及材料对激光的吸收系数后,作者在 ANSYS 软件中建立柱壳的有限元模型,如图 4 所示。根据光束分布的对称性以

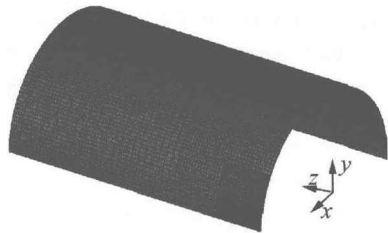


Fig. 4 The finite element model of cylindrical shell

及模型受力方式的对称性,将模型简化为 1/4 部分,并对该模型施加合理的压力载荷,定义对称边界条件。柱壳模型采用实体单元,沿着壳体厚度方向划分 8 个单元来保证厚度方向的温度计算精度。由于模型计算规模较大,因此需要对有限元单元划分进行优化处理,保证在光束辐照区域以及周边有足够的单元数目。计算过程包含两个步骤,首先进行激光热流作用下柱壳的瞬态热分析,然后计算在某个辐照时刻柱壳结构的热应力分布,具体算法见参考文献[6]。

## 2 激光辐照下充压柱壳热力学响应

### 2.1 不同光束辐照下充压柱壳的温度场

不同光束辐照 1.0s 后柱壳下表面的温度场分布

如表 1 和表 2 所示<sup>[8]</sup>,壳体材料本构关系采用考虑温度因素的双线性等向强化模型,其中  $\kappa$  为热传导系数, $c$  为比热容, $E$  为弹性模量, $E_t$  为切线模量, $\sigma_s$  为屈服强度, $\sigma_b$  为强度极限, $\alpha$  为材料热膨胀系数,从表中可以看出材料在  $400^\circ\text{C} \sim 700^\circ\text{C}$  温度范围内热力学性能发生了剧烈的变化,材料强度在该温度范围内大幅度下降。

壳体的温度场,表 3 中给出了壳体材料在不同温度下的激光能量吸收系数  $\alpha$ ,吸收系数从常温条件下的 0.25 增加到高温条件下的 0.78,在后面的数值计算中通过修正入射激光功率密度来反映吸收系数的影响。

如图 5 所示。从图中可见,均匀分布光束导致光斑内

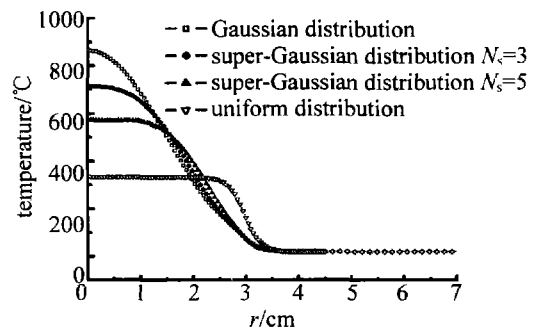


Fig. 5 Temperature distributions of cylindrical shell under different laser beam

部温度几乎相同,在光斑边缘处温度有突变趋势;高斯分布光束使得光斑中心温度最高,在光斑边缘处温度平缓过渡;超高斯光束随着  $N_s$  的增大,壳体温度变化趋势逐渐由高斯情况向均匀情况转变。光束填充因子小的光束使得光斑局部区域快速加热,材料在高温下对激光的吸收系数更大,因此,进一步加快了激光强区材料的温升速率。

### 2.2 不同光束辐照下充压柱壳的应力场

光束强度分布差异导致了壳体光斑内部加热效率的差异,并影响壳体热应力分布。不同光束辐照下壳体环向应力分布如图 6 所示,激光辐照时间为 1.0s。可以看出,光束强度分布对应力分布影响很大,高斯分

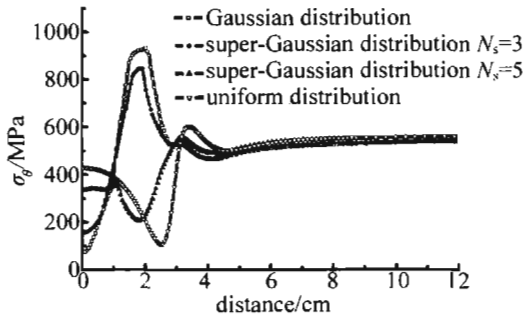


Fig. 6 The hoop stress distribution of cylindrical shell under different laser beam

布光束的应力在光斑边缘处没有明显的突变,而均匀分布光束的应力在光斑边缘处有突变趋势。超高斯光束随着  $N_s$  的增大,应力分布趋势由高斯情况向均匀情况转变。光斑中心的应力数值不大,这主要是因为光斑中心温度较高,材料提前进入塑性状态。图 7 中给

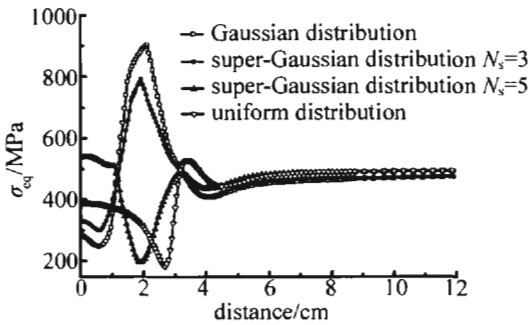


Fig. 7 The equivalent stress distribution of cylindrical shell under different laser beam

出了不同光束辐照下壳体等效应力  $\sigma_{eq}$  分布情况,可以看出等效应力和环向应力分布趋势类似。

### 2.3 不同光束辐照下充压柱壳的位移场

充压柱壳的位移场反映了柱壳的热变形情况,对于预测柱壳的破坏形貌具有重要意义。图 8 中给出了

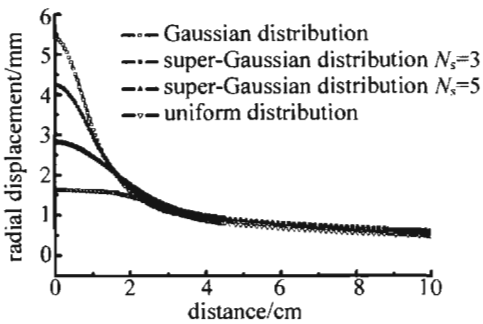


Fig. 8 The displacement distribution of cylindrical shell under different laser beam

不同光束辐照下柱壳径向位移沿着柱壳轴向的分布。可以看出,随着光束填充因子从小变大,光斑中心的膨

胀位移也从大变小,即高斯分布光束导致壳体鼓包最严重,而均匀分布光束在光斑内部的膨胀位移接近,超高斯光束导致的壳体位移介于二者之间。高斯分布光束将导致光斑中心首先失效,而均匀分布光束可导致光斑辐照区域的壳体整体失效,即导致大面积的爆裂。

### 3 结论

作者采用数值方法研究了激光辐照下充压柱壳的热力学响应。结果表明,光束强度分布对承力柱壳的热力学行为具有重要影响,光束填充因子小的激光束将导致壳体局部被快速加热,提前进入塑性状态,从而导致该局部区域提前发生破坏;而光束强度接近于均匀分布的光束将对壳体均匀加热,并使光斑边缘处壳体的温度、应力和位移发生突变。因此,光强分布差异将导致充压柱壳具有不同的热力学响应,并影响壳体最终的破坏模式和破坏时刻。

#### 参考文献

- [1] SUN C W. Laser irradiation effect [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002:242-254 (in Chinese).
- [2] CHEN Y Z, LI S Zh. Buckling failure of the axially compressed cylindrical shell irradiated by CW CO<sub>2</sub> laser beam [J]. High Power Laser and Particle Beams, 1995, 7(3): 404-408 (in Chinese).
- [3] LI S, CHEN Y, ZHANG G J, *et al.* The failure of shells subjected to internal pressure and irradiated by CW CO<sub>2</sub> laser beam [C]//Plasma-dynamics and Lasers Conference, 25th. Colorado Springs, CO, USA: AIAA, 1994:2641-2646.
- [4] ZHAO J H, ZHANG G R, LIU X F. The deformation numerical simulation of internally pressured cylinder shell under high power laser [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1996, 10(4): 262-268 (in Chinese).
- [5] ZHAO J H, SUN Ch W, LI S Zh. Fractographic analysis of aluminum cylindrical shells damaged by inner pressure and surface laser irradiation [J]. High Power Laser and Particle Beams, 1998, 10(1): 113-117 (in Chinese).
- [6] TAN F L, ZHAO J H, LI Y Ch. Probability analysis on thermal fracture of the internally pressured cylinder shell irradiated by laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(8): 977-980 (in Chinese).
- [7] WANG W P, LÜ B D, LUO Sh R. Influence of laser spacial profile on laser heating material [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2001, 13(3): 313-316 (in Chinese).
- [8] The Editing Committee of Engineering Material Application Manual. Engineering material applied manual [M]. Beijing: Chinese Metrology Press, 1988:208-232 (in Chinese).