

文章编号: 0258-7025(2007)06-0797-07

基于充压柱壳损伤形态的靶面激光参数估计

刘 峰^{1,2}, 陈雨生², 吴振森¹, 王立君², 王玉恒²

(¹ 西安电子科技大学理学院, 陕西 西安 710071; ² 西北核技术研究所第五研究室, 陕西 西安 710024)

摘要 为了在实验室设计激光辐照金属充压柱壳的损伤形态, 对壳体损伤形态相关的靶面激光参数估计问题进行了研究。在忽略沿柱壳壁面热传导的条件下, 给出了壳壁温度分布的解析表达式; 根据随温度变化的材料力学参量和内压载荷, 分析了壳体激光加热区内热裂纹的生成、稳定扩展和失稳扩展, 推导出了壳体发生三种损伤形态的靶面激光参数估计表达式。针对 30CrMnSi 钢壳体进行了数值计算分析, 数值结果与实验现象基本一致。研究表明, 在给定目标特性条件下, 充压柱壳激光辐照效应的损伤形态可以通过选择激光器参数来实验设计。

关键词 激光技术; 靶面激光参数; 热效应; 损伤形态; 充压柱壳

中图分类号 TN 249; O 343.6 **文献标识码** A

Estimation of Laser Beam-Parameters Based on Damage Configuration of a Cylindrical Shell Subjected to Internal Pressure

LIU Feng^{1,2}, CHEN Yu-sheng², WU Zhen-sen¹, WANG Li-jun², WANG Yu-heng¹

¹School of Science, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

²The Fifth Laboratory, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China

Abstract In order to design the damage configuration of a cylindrical shell subjected to internal pressure and irradiated by laser beam in the laboratory, the estimation method of laser parameters on the shell-wall surface related to the damage configurations is theoretically studied. Neglecting the heat conduction in the direction of shell-wall surface, an analytical expression of temperature profile is obtained for the cylinder shell under laser-irradiation. According to the mechanical properties varying with temperature and internal pressure, analyses of the thermal crack formation, the thermal crack growth and the crack running are carried out. The laser parameters expression on the target surface is derived for the three kinds of damage configurations. Numerical calculation is performed for a 30CrMnSi-steel cylindrical shell, the numerical results accord with the experiment phenomenons. The results show that given the cylindrical shell properties and internal pressure, the damage configuration can be experimentally designed by the laser parameters choice.

Key words laser technique; laser parameters on target surface; thermal effect; damage configuration; cylindrical shell with internal pressure

1 引言

激光对内压载荷金属壳体的损伤主要有: 局部熔穿或撕裂引起的内压卸载方式和热裂纹失稳扩展导致的整体爆裂方式。这两种损伤方式包含了与靶面激光束参数密切相关的三种损伤形态, 即局部熔

穿、局部撕裂和整体爆裂。虽然对激光辐照效应已进行广泛的研究^[1~5], 但对受载荷壳体损伤形态与壳体壁面入射激光参数的关联性的研究不多, 这不仅给激光辐照效应实验设计、实验结果的预测带来非常大的不确定性, 同时还关系到效应实验的安全

收稿日期: 2006-11-06; 收到修改稿日期: 2007-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(60371020)和国防预研项目(513110203)资助课题。

作者简介: 刘 峰(1962—), 男, 陕西人, 研究员, 博士研究生, 主要从事强激光大气传输及辐照效应的理论和数值模拟研究。E-mail: liufeng-laser@163.com

导师简介: 吴振森(1946—), 男, 湖北人, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为目标光学和电磁散射特性、激光大气传输与激光应用等。E-mail: wuzhs@mail.xidian.edu.cn

性防护问题。实验结果表明,受内压载荷壳体的损伤形态,主要取决于激光加热壳壁能否在壳壁上形成热裂纹,热裂纹增长能否迅速贯穿产生卸载,以及热裂纹的长度能否迅速变得不稳定而快速扩展等复杂的物理—力学过程。因此,获取受载荷壳体损伤形态与壳体壁面入射激光参数的关系,是一个既有应用价值、又非常困难的研究课题。在文献[6]中,作者从激光加热旋转壳体的热效率角度,对激光辐照时间的选择做过一些研究,获得了有意义的结论。

基于激光辐照充压壳体效应实验设计的需求,在忽略沿壳壁热传导的近似条件下,利用积分变换法给出靶上温度分布的解析表达式,根据壳壁材料力学参量随温度变化和内压加载,分析推导激光加热壳体发生三种损伤形态对应的靶上激光参数(光斑尺寸、峰值强度、激光驻留时间)的表达式,从而获得与壳体损伤形态相关的、半定量的靶面激光参数估计方法,并与实验测量结果进行比较。研究结果对受内压载荷壳体的激光辐照效应实验设计和激光器参数选择有应用价值。

2 激光辐照壳体的损伤分析

2.1 壳壁的激光加热分析

从环形窗口发射的激光束的远场光斑图样是环状的夫朗和费衍射图形,中心亮的圆斑为艾里斑,周围是相对较弱的圆环,艾里斑中心部分可以用高斯分布很好地描述,这种近似描述对于有小波前误差和抖动的近衍射极限光束甚至更好。所以,入射光束分布用高斯型分布描述为

$$I(r) = I_0 \exp\left(-\frac{r^2}{2r_1^2}\right), \quad (1)$$

式中 I_0 为中心激光强度, r 为束截面上任一点离光轴的距离, r_1 为相对强度下降到 $1/\sqrt{e} = 0.607$ 的 r 值。当激光垂直入射到柱壳表面时,若在壳体表面定义直角坐标系:光斑中心为坐标原点, x 轴沿柱壳轴向, y 轴沿柱壳周向, z 轴沿柱壳径向向内,柱壳表面的光斑分布为

$$I_{\text{on}}(x, y) = I_0 \cos\left(\frac{y}{R}\right) \exp\left[-\frac{x^2 + R^2 \sin^2(y/R)}{2r_1^2}\right], \\ -L/2 < x < L/2, -\pi R/2 < y < \pi R/2 \quad (2)$$

式中 R 为壳体内半径, L 为柱壳高度。

当辐照期间的热扩散长度远小于光斑尺寸时,可以忽略光斑外的横向热扩散,而只分析光斑内的

温度分布,即假设满足 $2x_d \gg 2\sqrt{\alpha t}$, $2y_d \gg 2\sqrt{\alpha t}$ (τ 为激光辐照时间, α 为材料热扩散系数),热传导问题就变成厚度方向的一维问题,利用积分变换法得到加热过程的近似解析解为^[7]

$$T(x, y, z, t) = T_0 + \\ I_a(x, y) \left\{ \frac{t}{\rho C_p h} + \frac{h}{k} \left[\frac{3(h-z)^2 - h^2}{6h^2} \right] - \right. \\ \left. \frac{2h}{\pi^2 k} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 \alpha t}{h^2}\right) \cos\left[\frac{n\pi(h-z)}{h}\right] \right\}, \quad (3)$$

式中 $I_a(x, y) = (1 - R_L) I_{\text{on}}(x, y)$ 为吸收的激光强度, R_L 为靶面反射系数, ρ, C_p, h 分别为材料的密度、比热和导热系数、壳壁厚度。括号内包含三个主要项:第一项只是时间的函数,反映的是加热区内壳体厚度上的平均温度;第二项只是径向坐标 z 的函数,反映的是壳体厚度上的温度分布;第三项是无穷级数的求和,是时间和径向坐标 z 的函数,反映的是壳壁厚度上温度分布的扰动,主要由边界面热波反射引起,辐照时间达到秒量级时这一项与第一、第二项相比可以忽略不计。因此

$$T(x, y, z, t) = T_0 + \\ I_a(x, y) \left\{ \frac{t}{\rho C_p h} + \frac{h}{k} \left[\frac{3(h-z)^2 - h^2}{6h^2} \right] \right\}, \quad (4)$$

壳体厚度上的平均温度和平均温升速率为

$$T_{\text{avg}}(x, y, t) = T_0 + \dot{T}_{\text{avg}}(x, y) t, \\ \dot{T}_{\text{avg}}(x, y, t) = \frac{I_a(x, y)}{\rho C_p h}, \quad (5)$$

式中材料热扩散系数 $\alpha = k/\rho C_p$ 。

当激光加热壳体温升达到材料熔化温度时,会导致壳壁材料的熔化烧蚀。由于光束为高斯分布,因此壳体光斑中心的温升最高,熔化首先从这一点开始。设迎光面热斑中心开始熔化的时间为 t_m , 相应的熔化等效温度为 $T'_m = T_m + \frac{L_m}{C_p}$, T_m 为熔点温度。则根据(4)式可以求得开始熔化的时间为

$$t_m = \rho C_p h \left[\frac{T'_m - T_0}{I_a(0, 0)} - \frac{h}{3k} \right], \quad (6)$$

熔化的初始时刻,背光面热斑中心的温度为

$$T(0, 0, h, t_m) = T'_m - \frac{h}{2k} I_a(0, 0), \quad (7)$$

对于稳态熔化烧蚀,熔化开始后背光面热斑中心的温度为

$$T(0, 0, h, t_m) = T'_m - \frac{h}{2k} I_a(0, 0) \left[1 - \frac{S(t - t_m)}{h} \right], \quad (8)$$

式中 $S(t-t_m)$ 为熔化烧蚀层厚度, 因此可以得到壳壁光斑中心的熔穿时间近似为

$$t_{BT} = \frac{\rho h C_p (T'_m - T_0)}{I_a(0,0)}. \quad (9)$$

2.2 壳体的力学损伤分析

2.2.1 壳体材料强度的软化

激光辐照引起壳壁材料局部温升, 强度降低, 当熔化开始时强度降为零。材料强度降低一般伴随着塑性和断裂韧性的增加, 即更大的抵抗裂纹和破裂能力。这里给出三个与壳体力学损伤分析相关的特性参数随温度的变化关系, 这些参数关系通常由实验确定。根据文献[5,8]中的分析可知, 对于类似钢这样的金属材料, 强度参数随温度的变化可以近似表示为

$$\begin{aligned} \sigma_s(T) &= \sigma_{s0} - \mu_s(T - T_0), \\ \sigma_b(T) &= \sigma_{b0} - \mu_b(T - T_0), \\ K_c(T) &= K_{c0} \left(\frac{T_m - T_0}{T_m - T} \right)^{1/4}, \end{aligned} \quad (10)$$

式中 $\sigma_{s0}, \sigma_{b0}, K_{c0}$ 分别为常温 T_0 下材料的屈服强度、抗拉强度和断裂韧性, K_c 为材料的断裂韧性。

2.2.2 内压加载下的应力

当薄壁金属柱壳受内压时, 柱壳壁受纯二维拉应力的作用, 忽略弯曲应力(剪应力)^[9]。当柱壳是薄壳 ($h < R/50$) 时, 从前表面到后表面的整个壳壁上拉应力近似是均匀的。设内压加载为 P , 壳体内半径为 R , 壁厚为 h 。则对不可压缩材料壳体大的周向应力 σ_y , 轴向应力 σ_x 为

$$\sigma_y = \frac{PR}{h}, \quad \sigma_x = \frac{PR}{2h}. \quad (11)$$

对特定结构的壳体, 在壳体设计时通常用爆破压来衡量其承载能力。根据金属壳体破坏的第四准则, 得到壳体的爆破压为 $P_M = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{h}{R} \sigma_{b0}$, 令 $\eta_p = P/P_M$, η_p 可以称为内压载荷参数。则(11)式可以写为

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{P}{P_M} \sigma_{b0} \approx 1.155 \eta_p \sigma_{b0}, \\ \sigma_x &= \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{P}{P_M} \sigma_{b0} \approx 0.577 \eta_p \sigma_{b0}, \end{aligned} \quad (12)$$

这样, 壳体所受的环向应力和轴向应力, 就表示为内压载荷参数 η_p 和材料常温下断裂强度 σ_{b0} 的函数。

2.2.3 热裂纹的生成与热扩展

当高斯激光加热柱壳壁时, 壳壁温度分布也近似为高斯型。根据(10)式给出的壳壁材料强度公式, 温度最高部位材料强度最低, 壳壁最薄弱点是热

斑中心点 ($x = y = 0$), 也是壳壁初始裂纹生成部位^[1,2]。同时, 在内压和热应力的联合作用下, 壳壁受热斑区域发生鼓包、壁厚变薄、弯曲, 其总效应会使鼓包区的环向应力增加, 进而对裂纹的形成产生影响。当满足 $\sigma_s(0,0,t) < \sigma_y < \sigma_b(0,0,t)$ 时, 可以定义为产生裂纹的条件。采用参数化处理裂纹形成条件, 初始裂纹生成的临界拉应力设为

$$\sigma_c = f_c \sigma_b, \quad f_{sb} \leq f_c \leq 1 \quad (13)$$

式中 $f_{sb} = \sigma_s/\sigma_b$ 为壳体材料屈服强度与极限强度之比; f_c 为初始裂纹形成的应力分数, 是鼓包过程的函数, 由实验数据确定; 形成初始裂纹的拉应力是 (x, y, t) 的函数, 受热斑中心最小。裂纹生成满足的条件为

$$\sigma_b(0,0,t) \leq \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\eta_p}{f_c} \sigma_{b0}. \quad (14)$$

由于壳壁迎光面沿轴向 (x 轴) 的温度分布为 $T(x,0,0,t) = T_0 + I_a(x,0) \left(\frac{t}{\rho C_p h} + \frac{h}{3k} \right)$, 因此热斑中心形成表面裂纹的时刻为

$$t_c = \rho C_p h \left[\frac{(f_c - 1.155 \eta_p) \sigma_{b0}}{(f_c \mu_b) I_a(0,0)} - \frac{h}{3k} \right], \quad (15)$$

这样, 可以得到

1) 裂纹沿轴向热扩展的长度和扩展速率为

$$\begin{aligned} c_x &= \sqrt{2} r_1 \sqrt{\ln \left[\frac{(f_c \mu_b) I_a(0,0)}{(f_c - 1.155 \eta_p) \sigma_{b0}} \left(\frac{h}{3k} + \frac{t}{\rho C_p h} \right) \right]}, \\ \dot{c}_x &= \frac{r_1^2}{c_x} \left[1 / \left(1 + \frac{h}{3kt} \right) \right], \end{aligned} \quad (16)$$

轴向达到临界裂纹尺度 c^* 的时间

$$t_{cX}^* = \rho C_p h \left[\frac{(f_c - 1.155 \eta_p) \sigma_{b0}}{(f_c \mu_b) I_a(c^*,0)} - \frac{h}{3k} \right], \quad (17)$$

2) 裂纹沿径向向内热扩展的长度和速率为

$$\begin{aligned} c_z &= h - \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{6hk \frac{(f_c - 1.155 \eta_p) \sigma_{b0}}{(f_c \mu_b) I_a(0,0)} + h^2 - \frac{6kt}{\rho C_p}}, \\ \dot{c}_z &= \frac{k}{\rho C_p (h - c_z)}, \end{aligned} \quad (18)$$

径向形成通透型裂纹的时间

$$t_{cT} = \rho C_p h \left[\frac{(f_c - 1.155 \eta_p) \sigma_{b0}}{(f_c \mu_b) I_a(0,0)} + \frac{h}{6k} \right]. \quad (19)$$

2.2.4 热裂纹的失稳扩展

受内压载荷容器裂纹扩展的驱动力有两部分, 即壳体所受的环向应力和壳壁鼓胀引起裂纹附近的径向压力。类似于受拉伸载荷平板的处理方法, 用断裂韧性参数 K_c 取代临界断裂应力 σ_c^* (σ_c^* 依赖于裂纹长度, K_c 独立于裂纹长度), 根据线弹性断裂力学理论得到裂纹失稳扩展的临界应力^[10]

$$\sigma_c^* = \frac{K_c}{(\pi c \phi)^{1/2}} M^{-1}, \quad (20)$$

式中 $\phi = \varphi(\sigma_c^* / \bar{\sigma})$ 为塑性修正因子, 在 $\sigma_c^* / \bar{\sigma} \geq 0.6$ 时有意义; $\bar{\sigma}$ 为裂纹尖端的平均塑性流体应力; M 为鼓胀变形因子。从(20)式可以得到与拉应力加载相对应的临界裂纹长度, 临界裂纹尺寸为

$$c^*(T) = \frac{K_c^2(T)}{\pi \phi M^2 \bar{\sigma}_y^2}. \quad (21)$$

在 G. T. Hahn 的文章中^[10], 针对韧性和脆性铝、钢充压圆柱壳体, 导出了包括较大直径和厚度范围壳体的 M, ϕ 塑性修正因子, 对于薄壁圆柱壳体 ($h < R/50$)

$$M = \sqrt{1 + 80.5 \left(\frac{c}{R}\right)^2 \tanh\left(\frac{R}{50h}\right)},$$

$$\phi = \left(\frac{2\bar{\sigma}}{\pi M \sigma_c^*}\right)^2 \ln \left[\sec^2 \left(\frac{\pi M \sigma_c^*}{2\bar{\sigma}} \right) \right]. \quad (22)$$

可见, 引起壳体轴向热裂纹失稳扩展的临界裂纹尺度 $c^*(T)$, 除与材料特性、结构尺度、内压加载有关外, 与靶面激光参数也密切相关。

3 基于损伤形态的靶面激光参数

3.1 损伤形态对应的靶面辐照光参数

通过实验研究获得了激光辐照下壳体三种损伤形态的宏观图像, 如图 1 所示, 并进行了实验测量研究。基于上面对激光辐照内压加载壳体损伤过程分析, 建立损伤形态与靶面激光参数之间的关联关系, 讨论激光辐照时间满足 $\tau \geq \max(t_{BT}, t_{CT}, t_{CX}^*)$ 时, 可能发生的三种损伤形态分别所需满足的激光功率密度、高斯光斑尺寸和激光辐照时间的尺度问题。

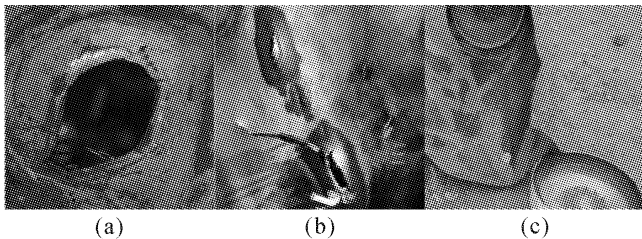


图 1 充压壳体的激光辐照损伤形态宏观图像

(a) 熔穿卸载; (b) 撕裂卸载; (c) 爆裂破坏

Fig. 1 Pictures of damage configuration of a cylindrical shell subjected to internal pressure and irradiated by laser beam

(a) melting-through; (b) ripping; (c) bursting

3.1.1 熔穿卸载

高能激光辐照下发生的熔穿卸载, 要求满足熔

穿时间 t_{BT} 比形成通透性裂纹的时间 t_{CT} 和发生裂纹失稳扩展的时间 t_{CX}^* 要短。所以, 可以导出实现熔穿卸载的激光参数为

$$I_a(0,0) > I_{cr}, \quad r_1 < r_{cr-1}, \quad \tau \geq t_{BT}, \quad (23)$$

3.1.2 热撕裂卸载

如果产生的热裂纹迅速向内扩展并形成通透性裂纹, 而此时的轴向裂纹长度仍小于临界裂纹尺寸, 则发生撕裂卸载, 即满足 $t_{CT} < t_{BT}, t_{BT} < t_{CX}^*$ 时产生撕裂卸载。所以, 可以导出实现撕裂卸载的激光参数为

$$I_a(0,0) < I_{cr}, \quad r_1 < r_{cr-2}, \quad \tau \geq \tau_{cr-1}, \quad (24)$$

3.1.3 爆裂卸载

如果在辐照时间内, 形成的轴向热裂纹长度超过临界裂纹尺寸, 而未发生穿透卸载, 则会发生整体爆裂, 其满足的时间尺度条件为 $t_{BT} > t_{CT} \geq t_{CX}^*$ 或 $t_{CT} > t_{BT} \geq t_{CX}^*$ 。则发生爆裂损伤的激光参数为

$$I_a(0,0) < I_{cr}, \quad r_1 \geq r_{cr-2}, \quad \tau \geq \tau_{cr-2}, \quad (25a)$$

或

$$I_a(0,0) > I_{cr}, \quad r_1 \geq r_{cr-1}, \quad \tau \geq \tau_{cr-2}. \quad (25b)$$

在(23)~(25)式中

$$I_{cr} = \frac{6k}{h} \left[(T'_m - T_0) - \left(\frac{f_c - 1.155\eta_p}{f_c} \frac{\sigma_{b0}}{\mu_b} \right) \right], \quad (26a)$$

$$r_{cr-1} = \frac{c^*}{\sqrt{2}} \left\{ \ln \left\{ \left[(T'_m - T_0) + \frac{h}{3k} I_a(0,0) \right] \times \frac{f_c}{f_c - 1.155\eta_p} \frac{\mu_b}{\sigma_{b0}} \right\} \right\}^{-1/2},$$

$$r_{cr-2} = \frac{c^*}{\sqrt{2}} \left\{ \ln \left[\frac{h}{2k} I_a(0,0) \frac{f_c}{f_c - 1.155\eta_p} \frac{\mu_b}{\sigma_{b0}} + 1 \right] \right\}, \quad (26b)$$

$$\tau_{cr-1} = \rho C_p h \left[\frac{1}{I_a(0,0)} \frac{f_c - 1.155\eta_p}{f_c} \frac{\sigma_{b0}}{\mu_b} + \frac{h}{6k} \right],$$

$$\tau_{cr-2} = \rho C_p h \left[\frac{1}{I_a(c^*,0)} \frac{f_c - 1.155\eta_p}{f_c} \frac{\sigma_{b0}}{\mu_b} - \frac{h}{3k} \right]. \quad (26c)$$

3.2 靶面激光参数的敏感性分析

3.2.1 对 f_c 的敏感性

从 3.1 节的分析可知, 三种损伤形态对应的靶面激光参数中, 裂纹形成应力分数 f_c 的影响主要表现为包含 $\zeta(f_c, \eta_p) = 1.155\eta_p / f_c$ 因子项的影响, ζ 反映了热斑区形变后的无量纲等效环向应力。根据敏感性分析方法, 敏感性系数 $\psi(f_c)^{[11]}$ 为

$$\psi(f_c) = \frac{\partial \zeta}{\partial f_c} f_c = 1.155 \frac{\eta_p}{f_c}, \quad (27)$$

f_c 的变化尺度为 $\Delta f_c = 1.0 - f_{sb} \geq 0$; 壳体材料和结构尺度、内充压给定时 η_p 给定 ($\eta_p < 1$)。可见, 当 $\zeta(f_c, \eta_p)$ 在 f_c 的取值范围对 f_c 的变化不敏感时, 可以取 $f_c = 1.0$ 。对于高强度合金钢压力容器, 这一条件较易满足。

3.2.2 对内压 P 的敏感性

由 3.1 节的分析可知, 三种损伤形态对应的靶面激光参数中, 内压载荷的影响主要表现为对 $\zeta(f_c, \eta_p)$ 和临界裂纹尺度 $c^*(T)$ 的影响, 此外 $c^*(T)$ 又影响到 $I_a(c^*, 0)$ 。根据 (12), (21) 式, $\sigma_c^*/\bar{\sigma}$ 较大时, 忽略内压载荷参数 η_p 对塑性修正因子 ϕ 和鼓胀变形因子 M 的贡献, 则发生热裂纹失稳扩展的临界裂纹尺度与 η_p 的关系为

$$c^*(T) = \left[\frac{K_c^2(t)}{\pi \phi M^2} \frac{3}{4 \sigma_{b0}^2} \right] \frac{1}{\eta_p^2}, \quad (28)$$

表 1 30CrMnSi 材料的热学特性

Table 1 Thermal properties of 30CrMnSi-steel

Temperature / °C	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900
$K / (\text{W/m} \cdot \text{°C})$	27.6	29.30	30.56	30.56	30.56	29.51	28.67	27.21	25.33	24.61
$C / (\text{J/kg})$	473.1	519.1	581.9	644.7	699.1	766.1	841.5	*	*	*
$\rho / (\text{kg/m}^3)$	7.75 × 10 ³									

* * are the measuring values which are not given by literature [8].

根据文献[8]给出的 30CrMnSi 钢屈服强度 σ_s 和断裂强度 σ_b 随温度的变化数据, 以 500~700 °C 温度范围内为基准进行线性拟合, 得到的表达式为

$$\begin{aligned} \sigma_s &= 1207.267 - 1.31044(T - T_0) \quad (\text{MPa}) \\ \sigma_b &= 1380.664 - 1.46038(T - T_0) \quad (\text{MPa}), \end{aligned} \quad (30)$$

其中 $\sigma_{b0} = 1079 \text{ MPa}$, $\sigma_{s0} = 834 \text{ MPa}$ 。30CrMnSi 钢在常温下的断裂韧性^[7] $K_{c0} = 1085 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 而 K_c 随温度的变化实验结果很难得到, 按照 (10) 式中的第三式近似描述为

$$K_c = K_{c0} \left(\frac{1380}{1400 - T} \right)^{1/4}. \quad (31)$$

则, 可以分开来对 η_p 分析敏感性

$$\psi_1(\eta_p) = \frac{\partial \zeta(f_c, \eta_p)}{\partial \eta_p} \eta_p = -1.155 \frac{\eta_p}{f_c}, \quad (29a)$$

$$\psi_2(\eta_p) = \frac{\partial c^*(T)}{\partial \eta_p} \eta_p = - \left[\frac{K_c^2(T)}{\pi \phi M^2} \frac{2}{4 \sigma_{b0}^2} \right] \frac{2}{\eta_p^2}, \quad (29b)$$

$$\psi_3(\eta_p) = \frac{\partial I_a(c^*, 0)}{\partial \eta_p} \eta_p = -2I_a(c^*, 0) \frac{c^*}{r_1^2} \psi_2(\eta_p), \quad (29c)$$

可见, 确定的壳体材料、结构, 内压载荷参数 η_p 对损伤形态和激光参数选择有决定性的影响。

4 数值计算结果与分析

为了利用实验结果验证导出的三种损伤形态下的靶面激光估计表达式, 用 (23)~(27) 式进行数值计算比较。选择壳体材料为 30CrMnSi, 壳体尺寸为: 直径 $\phi 400 \text{ mm}$, 长度 800 mm , 壁厚 2 mm 。表 1 给出了 30CrMnSi 钢的热物理特性随温度的变化^[8]。

下面以与实验条件近似相同的计算条件, 利用 (23)~(27) 式进行数值计算, 比较三种损伤形态发生的时间尺度, 验证导出的靶面激光参数估计表达式。

4.1 壳体熔穿卸载

计算条件为壳体内压载荷参数 $\eta_p = 0.185$, 吸收的峰值激光强度 $\alpha I_{\max} \approx 2.2 \text{ kW/cm}^2$, 用 (23)~(27) 式计算的结果见表 2。

表 2 熔穿卸载靶面激光参数估计

Table 2 Estimation of the laser parameters for melting-through damage configuration

	Melting-through	Ripping	Bursting
Critical size of crack runing $2c^* / \text{cm}$		34.0	
Laser facula radius r_1 / cm	<10.0	<12.0	>12.0
Average temperature at laser facula center $T_{\text{avg}} / \text{°C}$	1400.0	×	~1164.0
Laser dwell time for cylinder damage t_d / s	~0.46	~0.68	~0.35

* * represents that there is no ripping damage configuration.

理论分析表明,由于内压载荷参数 η_p 较小、承载余量很大,达到失稳扩展的热裂纹临界尺度也很大,接近壳体半径。当靶面光斑半径 <10.0 cm时,壳壁熔化的速率大于裂纹沿径向扩展的速率,形成的表面裂纹很快就完全熔化掉了,很难形成通透性裂纹,因此不会发生撕裂或爆裂损伤。实验获得的

损伤图像中,壳体卸载时间 t_d 约为 0.4 s,与估计值基本一致。

4.2 壳体撕裂卸载

计算条件为内压载荷参数 $\eta_p = 0.083$,吸收的峰值激光强度 $\alpha I_{\max} \approx 0.44$ kW/cm²,利用(23)~(27)式计算的结果见表3。

表3 撕裂卸载靶面激光参数估计

Table 3 Estimation of the laser parameters for ripping damage configuration

	Melting-through	Ripping	Bursting
Critical size of crack runing $2c^*$ /cm		78.0	
Laser facula radius r_1 /cm	<25.0	<56.0	>56.0
Average temperature at laser facula center T_{avg} /°C	1400.0	~ 965.0	813.0
Laser dwell time for cylinder damage t_d /s	~ 3.8	~ 2.03	~ 1.7

表4 爆裂损伤靶面激光参数估计

Table 4 Estimation of the laser parameters for bursting damage configuration

	Melting-through	Ripping	Bursting
Critical size of crack runing $2c^*$ /cm		1.5	
Laser facula radius r_1 /cm	<0.45	<1.43	>1.43
Average temperature at laser facula center T_{avg} /°C	1400.0	~ 589.0	~ 520.0
Laser dwell time for cylinder damage t_d /s	~ 7.9	~ 2.61	~ 2.3

由于内压加载很低,形成热裂纹失稳扩展的临界尺度相当大,不可能形成爆裂损伤;且由于靶面辐照光束峰值强度不太高,熔穿所需温升约为 1400 °C,所需的激光照射时间较长,而撕裂卸载的材料软化温度约为 560 °C。实验中获得撕裂损伤形态,壳体卸载时间 t_d 约为 2.0 s,位于估计结果的范围内。

4.3 壳体爆裂分析

计算条件为内压载荷参数 $\eta_p = 0.506$,吸收的峰值激光强度 $\alpha I_{\max} \approx 0.21$ kW/cm²,利用(23)~(27)式计算的结果见表4。

由于内压载荷参数较大,使得形成热裂纹失稳扩展的临界尺度大大降低。同时,光斑尺寸的要求很易满足发生热裂纹失稳扩展的条件。实验中的壳体爆裂现象,爆裂时间 t_d 约为 2.3 s,与理论估计结果符合很好。

化温度 T'_m 三个参数,获得了三种损伤形态所对应的靶面激光参数的估计表达式。数值计算结果不仅可以较好地解释实验结果,而且为根据损伤目标设计靶面激光参数提供了一条途径。研究表明,对于靶面高斯型光束分布,充压壳体的破坏形态虽然主要决定于内压载荷参数,但实验前可以通过对靶面激光束参数估计,设计充压柱壳的损伤形态。

由于激光辐照充压壳体的损伤过程、损伤机制非常复杂,本文在给出靶面激光参数的估计表达式时,为了方便求解引入了一些假设条件。因此,针对靶面激光参数选择和激光器指标确定这一课题,需要做进一步研究、探索新的估计方法,同时要对估计的参数进行可靠性分析。

致谢 感谢西北核技术研究所第十一研究室激光效应组提供了有用的实验数据和损伤图像,使作者的研究结果得到验证;感谢刘晶儒研究员给予的指导。

5 结 论

基于靶面高斯型激光束分布,对充压壳体的辐照损伤过程进行了热力学响应描述。通过引入壳体内压载荷参数 η_p 和裂纹形成的应力分数 f_c ,等效熔

参 考 文 献

- 1 Tang Zhiping. 3D discrete meso-element simulation of failure processes for cylindrical shell subjected to inner pressure and surface laser irradiation [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2001, 21(1):1~7
唐志平. 激光辐照下充压柱壳失效的三维离散元模拟[J]. 爆炸

- 与冲击, 2001, **21**(1):1~7
- 2 Jianheng Zhao, Chengwei Sun, Yonghua Yuan *et al.*. Crack formation on the cylindrical shell damaged by inner pressure and surface laser irradiation [C]. 30th Plasmadynamics and Lasers Conference, 1999, AIAA:99-3548
 - 3 V. V. Deryushev, V. V. Bendyukov, A. I. Kostogolov *et al.*. Criterion analysis of the fracture of cylindrical shell structures loaded by internal pressure induced by localized thermal impacts [J]. *Strength of Materials*, 1997, **29**(5):481~486
 - 4 Kevin L. Zondervan, Lt Derek W. Beck. Approximate closed-form expression for the probability of burst of a pressurized metal cylinder irradiated by a high-energy laser [C]. 33rd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, 2002, AIAA: 2002-222
 - 5 Sun Chengwei. Effects of Laser Radiation [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 191~260
孙承伟. 激光辐照效应[M]. 北京:国防工业出版社, 2002. 191~260
 - 6 Liu Feng, Chen Yusheng, Wu Zhensen *et al.*. Analysis of the laser parameters choice for a rotational thin cylinder shell under CW-laser irradiation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1053~1059
 - 刘 峰,陈雨生,吴振森 等. 强激光加热旋转薄柱壳的参数选择分析[J]. 光学学报, 2007, **27**(6):1053~1059
 - 7 Liu Feng, Wu Zhensen, Wang Yuheng *et al.*. Heating efficiency repetitive frequency intensity laser-irradiated cylinder [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4):461~466
刘 峰,吴振森,王玉恒 等. 重复频率激光辐照圆柱壳体的加热效率[J]. 中国激光, 2006, **33**(4):461~466
 - 8 China Engineering Material Applied Handbooks Editor Committee. Engineering Material Applied Handbooks: Framework-Steel and Stainless-Steel [M]. Beijing: China Standard Press, 1988. 58
工程材料实用手册编辑委员会. 工程材料实用手册 结构钢 不锈钢[M]. 北京:中国标准出版社, 1988. 58
 - 9 Wang Zhen, Hu Yongqiang. Solid Rocket Engine [M]. Beijing: Space Navigation Press, 1993. 165~193
王 铮,胡永强. 固体火箭发动机[M]. 北京:宇航出版社, 1993. 165~193
 - 10 G. T. Hahn. Criteria for crack extension in cylindrical pressure vessels [J]. *International J. Fracture Mechanics*, 1969, **5**(3): 187~210
 - 11 O. M. Alifanov. Inverse Heat Transfer Problems [M]. New York: Spring-Verlag Berlin Heidelberg, 1994

《中国激光》“综述”栏目征稿启事

《中国激光》创刊 30 多年以来,以反映我国激光领域的研究进展和成果为己任,见证了中国激光领域的发展历程和重大突破,在读者中树立了较高的学术地位,形成了较为成熟的办刊风格。近年来,激光研究的领域取得了令人瞩目的成就,在我国科技体系与国民经济中占据了越来越重要的地位,为了给广大研究人员提供更丰富、更全面的信息,应部分读者的要求,本刊增辟“综述”栏目,刊发综述类文章,反映激光领域热点专题的研究进展或动态。

具体要求:综述应尽可能就激光领域的研究热点结合最新的研究成果进行论述,涉及范围不需太大,但必须要有一定的深度和时间性,能反映出这一专题的历史背景、研究现状和发展趋势。文章必须有作者自己的研究经验或体会,所介绍的工作应尽量适合国内已开展的工作或将要开展工作的需要。

综述的写作格式一般包括四部分,即引言、正文、结论、参考文献。

引言,要用简明扼要的文字说明写作的目的、必要性、有关概念的定义,综述的范围,阐述有关问题的现状和动态,以及目前对主要问题争论的焦点等。引言一般以 200~300 字为宜,不宜超过 500 字。

正文,是综述的重点,应能较好地表达综合的内容。正文主要包括论据和论证两个部分,通过提出问题、分析问题和解决问题,比较不同学者对同一问题的看法及其理论依据,进一步阐明问题的来龙去脉和作者自己的见解。当然,作者也可从问题发生的历史背景、目前现状、发展方向等提出文献的不同观点。正文的重要部分应包括作者自己的工作实践。正文部分可根据内容的多少分为若干个小标题分别论述。

结论,是对综述正文部分作扼要的总结,作者应对各种观点进行综合评价,提出自己的看法,指出存在的问题及今后发展的方向和展望。

参考文献,是综述的重要组成部分。一般参考文献的多少可体现作者阅读文献的广度和深度,应以最近 3~5 年内的最新文献为主。

文章篇幅一般在 1 万字左右,一经录用,从速发表,稿酬从优。

《中国激光》编辑部