

# 激光辐照玻璃纤维/环氧树脂复合材料的力学剥蚀研究

彭国良 张相华 高银军 闫辉

西北核技术研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024

**摘要** 根据实验现象,提出了计算力学剥蚀的模型和判据,将剥蚀过程分解为材料分层和层内断裂两个过程:对分层过程利用激光辐照玻璃纤维/环氧树脂复合材料的热力学模型计算,对层内断裂过程用板壳模型计算。利用实验结果验证了模型的合理性,计算结果表明,力学剥蚀过程极大地降低了烧蚀穿孔所需的能量,对激光辐照效应影响很大;功率密度较低时,烧蚀效率较高。

**关键词** 激光光学;力学剥蚀;激光辐照;玻璃纤维/环氧树脂复合材料;板壳模型

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0106001

## Research to Mechanics Erosion Effect of Laser Irradiating Glass/Epoxy Composites

Peng Guoliang Zhang Xianghua Gao Yinjun Yan Hui

State Key Laboratory Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology,  
Xi'an, Shaanxi 710024, China

**Abstract** Basing the experiment phenomenon, a model and criterion for simulating mechanics erosion process have been developed for laser irradiating glass/epoxy composite. The mechanics erosion process has been divided into two processes of delamination and layer fracture. A thermo mechanical model can be used until composite delamination appears. Then plates and shell theory can be used for simulating layer fracture. The experiment results agree well with the simulation value, and that shows the model is reasonable. The simulation results indicate that the mechanics erosion process is very important for laser ablation effect, and the ablation energy can be reduced greatly by the process; the ablation efficiency can be higher with lower laser intense.

**Key words** laser optics; mechanics erosion; laser irradiate; glass/epoxy composite; plates and shells model

**OCIS codes** 140.3330; 140.3390; 160.2750

## 1 引言

玻璃纤维/环氧树脂复合材料具有高比强度、高比模量等特点,在航天航空领域得到了广泛的应用,目前正在逐步取代黑色金属、有色金属等传统材料,成为轻质化结构的重要材料之一。随着高能激光技术的发展,研究玻璃纤维增强复合材料在激光辐照下的烧蚀效应具有重要意义。

实验中发现,在气流作用下激光烧蚀过程中材料有大片脱落的现象,这种现象可能是力学剥蚀引起的。力学剥蚀可分为点剥蚀和片状剥蚀两大类:点剥蚀指的是材料以小颗粒的形式损失质量,属于微观力学范畴;片状剥蚀中材料以整片脱落的形式损失质量,以宏观力学方法描述为主。对于力学剥蚀问题,已有研究集中于点剥蚀,对片状剥蚀研究较少,对于激光烧蚀下材料的片状脱落问题,国内外尚未报道。文献[1]研究

收稿日期: 2014-07-25; 收到修改稿日期: 2014-08-06

作者简介: 彭国良(1985—),男,硕士,助理研究员,主要从事激光辐照效应的数值模拟方面的研究。

E-mail: pgl02@163.com

了高温高压气流作用下的复合材料的热烧蚀和点剥蚀;文献[2]研究了材料外表面均匀受热时热解气体造成的壳体分层和失稳;国内方面的剥蚀研究集中于点剥蚀<sup>[3-4]</sup>,研究方法上以实验方法为主。本文主要研究激光烧蚀玻璃纤维/环氧树脂复合材料平板过程中的片状力学剥蚀行为。

## 2 计算模型

### 2.1 温度场及内压计算模型

激光辐照下玻璃纤维/环氧树脂复合材料的温度  $T$  和内部热解气体压强  $p_g$  可由文献[5]中的方法得到。

温度控制方程:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + c_g \rho_g V \cdot \nabla T - \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \frac{\partial \rho}{\partial t} - q_{\text{laser}} = 0, \quad (1)$$

热分解方程:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = A(1-f)^m e^{-E/RT}, \quad (2)$$

热解气体压强的控制方程包括以下三个方程:

热解气体质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g V) = -\frac{\partial \rho}{\partial t}, \quad (3)$$

渗流方程:

$$-\kappa \nabla p_g = \rho_g V, \quad (4)$$

状态方程:

$$p_g = \rho_g RT, \quad (5)$$

式中  $\rho_g$ 、 $V$ 、 $c_g$  分别为热解气体的密度、速度及热容,  $\rho$ 、 $c$  分别为复合材料的密度及热容,  $Q$  为分解潜热,  $R$  为气体常数,  $A$ 、 $m$ 、 $E$  为热解参数,  $k$  为复合材料的热导率,  $\kappa$  为气体渗透率,  $q_{\text{laser}}$  为体吸收的激光热源,  $f$  为树脂分解度, 定义为

$$f = \frac{\rho_v - \rho}{\rho_v - \rho_c}, \quad (6)$$

式中  $\rho_v$  为原始材料的密度,  $\rho_c$  为焦化材料的密度。

### 2.2 力学剥蚀模型

玻璃纤维增强复合材料激光辐照过程中生成大量气体产物,这些气体在材料内部的聚集会产生很大的内压。

在无外力载荷存在时,借用土力学中有效应力的概念可得到平衡方程为<sup>[6]</sup>

$$\sigma_{ij,j} = (\sigma_{ij}^e - \alpha_{ij} p_g \delta_{ij})_{,j} = 0, \quad (7)$$

式中  $\sigma$  为总应力,  $\sigma^e$  为有效应力,  $\sigma_{ij}$  为狄拉克函数,  $\alpha$  为 biot 系数, 满足

$$\alpha_{ij} = \delta_{ij} - C_{ijkl} S_{klmm}^s, \quad (8)$$

式中  $C$  为无内部气体时的弹性张量,  $S^s$  为材料压实无孔时的柔度张量。一般情况下,可取  $\alpha$  等于孔隙率  $\varphi$ 。

考虑热应变及树脂基体热解导致的化学收缩,有效应力可用下式计算

$$\sigma_{ij}^e = C_{ijkl} (e_{kl} - \beta_{kl} \Delta T - \zeta_{kl}), \quad (9)$$

式中  $e$  为总应变,  $\beta$  为热膨胀系数,  $\Delta T$  为温度变化量,  $\zeta$  为热化学收缩量,可表示为

$$\zeta_{kl} = d_{kl} f, \quad (10)$$

式中  $d$  为树脂完全分解时的热化学收缩量,文献[7]给出  $d_1=0.01$ ,  $d_2=0.16$ 。

玻璃纤维/环氧树脂复合材料的强度为<sup>[7]</sup>

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{i,\max} = \sigma_i^0 g(T, f), \quad i = r, z \\ g(T, f) = f \exp \left\{ -b \left[ \frac{T}{T_0} - 1 + \beta(t) \right] \right\} + (1-f)d \end{array} \right. \quad (11)$$

式中  $\sigma_i^0$  为常温下原始材料的强度,  $\beta(t)$  为蠕变项, 对强激光辐照过程来说, 由于作用时间短, 可以忽略材料蠕变;  $T_0$  为室温, 取 300 K;  $b, d$  为材料常数。对材料径向,  $\sigma_r^0 = 200 \text{ MPa}$ ,  $b=0.3, d=0$ ; 对厚度方向,  $\sigma_z^0 = 10 \text{ MPa}$ ,  $b=0.7, d=0.1$ 。

图 1 为玻璃纤维/环氧树脂复合材料的激光烧蚀图像, 其中(a)、(b)、(c)为大动态相机拍摄的烧蚀过程中的材料形貌, (d)为烧蚀完以后的图片。图 1(a)中材料分层鼓起, 图 1(b)中表面层破裂脱落, 图 1(c)中内部层破裂脱落。由于材料面内强度远大于厚度方向的强度, 在内压和表面气流作用下的剥蚀可分为两个过程, 即首先厚度方向失效, 材料分层鼓起, 然后层内断裂剥蚀。这与实验中观察到的现象也是一致的。

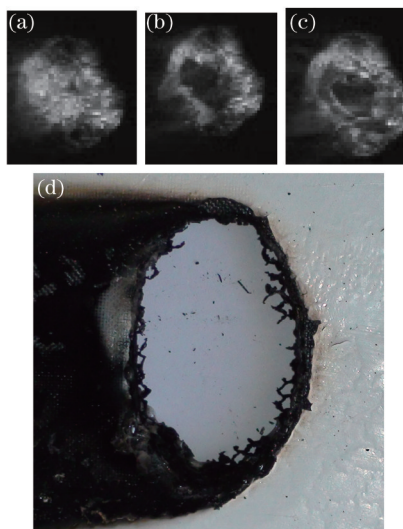


图 1 玻璃纤维/环氧树脂复合材料的激光烧蚀图像。(a) 分层; (b) 表面层脱落; (c) 内部层脱落; (d) 烧穿  
Fig.1 Laser ablation picture of glass/epoxy composites. (a) Delamination; (b) surface layer break off; (c) inner layer break off; (d) burn-through

对于分层失效, 其判据为

$$\sigma_z = \sigma_{z, \max}, \quad (12)$$

式中  $\sigma_z$  为厚度方向正应力,  $\sigma_{z, \max}$  为厚度方向的强度。一般情况下, 应利用(7)~(10)式求数值解得到应力, 再利用(12)式判断是否出现分层。对于材料厚度较小且剪切模量较小的情形, 可近似为

$$\sigma_z \approx p_g \varphi, \quad (13)$$

式中  $\varphi$  为孔隙率。

对于层内断裂, 其判据为

$$\sigma_r = \sigma_{r, \max}, \quad (14)$$

式中  $\sigma_r$  为径向正应力,  $\sigma_{r, \max}$  为面内强度。

材料分层后, 可利用板壳理论计算层内应力, 如图 2 所示。对均匀光斑辐照, 分层与未分层交接的过渡区在光斑边缘, 其刚度相差很大, 可将分层与未分层交接的过渡区简化为固支边界。

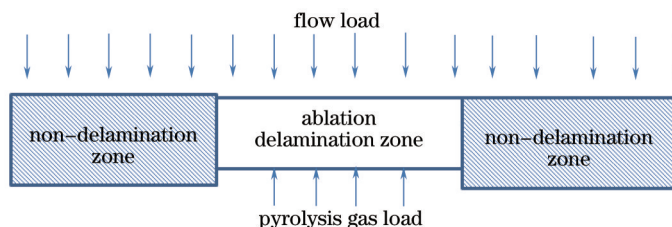


图 2 分层后的计算模型示意图  
Fig.2 Compute model sketch after delamination

圆板内的热应力为

$$\sigma_t = -\frac{E\beta\Delta T}{1-\nu}, \quad (15)$$

式中  $\beta$  为热膨胀系数,  $\Delta T$  为温度变化,  $E$  为弹性模量,  $\nu$  为泊松比。由叠加原理, 圆板的最大应力为

$$\sigma_{r,\max} = \sigma_{r,\text{flat}} + \sigma_t. \quad (16)$$

另一方面, 不考虑热应力时, 作为一级近似, 在小挠度假设下, 固支圆板应力极值为

$$\sigma_{r,\text{flat}}(r=a) = \frac{3pa^2}{4t^2}, \quad (17)$$

挠度值为

$$\omega = \frac{p}{64D}(a^2 - r^2)^2, \quad (18)$$

平均挠度:

$$\bar{\omega} = \frac{2\pi \int_0^a \omega r dr}{\pi a^2} = \frac{pa^4}{192D}, \quad (19)$$

式中  $a$  为圆板半径, 对于均匀光斑, 由于横向热传导很小, 可近似为光斑半径,  $t$  为层厚度, 由发生分层的位置决定,  $D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$  为板的刚度,  $E$ 、 $\nu$  分别为弹性模量和泊松比,  $p$  为板的载荷, 即

$$p = p_g - p_{\text{flow}}, \quad (20)$$

式中  $p_{\text{flow}}$  为外界气压, 可取值为

$$p_{\text{flow}} = p_0 + \frac{1}{2}\rho_0 v^2, \quad (21)$$

式中  $p_0$  为大气压,  $\rho_0$  为大气密度,  $v$  为风速。

分层后内部气压可表示为

$$p_g = \frac{p_{g0} l \varphi}{\bar{\omega}} + \frac{RT \int \Delta(\rho v) dt}{\bar{\omega}}, \quad (22)$$

式中等式右边第一项代表刚分层时分层界面上气体的贡献, 第二项为从内部流入到分层界面气体的贡献,  $p_{g0}$  表示分层时当地的气体压强,  $l$  表示孔隙的特征长度 ( $\sim 10^{-4}$  m),  $\varphi$  为孔隙率,  $\Delta(\rho v)$  为分层位置上下表面气体流量之差, 由式可得

$$\Delta(\rho v) = (-\kappa \nabla p)_{\text{down}} - (-\kappa \nabla p)_{\text{up}}, \quad (23)$$

式中下标 down 表示分层下表面, 下标 up 表示分层上表面。

### 2.3 材料参数

对于玻璃纤维/环氧树脂复合材料, 热学参数为<sup>[5]</sup>

$$\begin{cases} \rho = 1589 - 448f \\ c = (1235 + 2.58\theta)(1-f) + f(1442 + 0.3372\theta), \\ c_g = 3100 \end{cases} \quad (24)$$

热导率  $k = 0.4f + 1.1(1-f)$ , 分解热  $Q = 996$  J/g。对于热解参数, 与实验结果的最佳拟合为  $A = 7200$ ,  $m = 1$ ,  $E/R = 8200$  K<sup>-1</sup>。

渗透率为<sup>[7-8]</sup>

$$\kappa = \exp(-43.2 + 100\varphi), \quad (25)$$

式中  $\varphi$  为孔隙率, 满足  $\varphi = 0.2f + 0.05(1-f)$ 。

弹性参数为<sup>[7-8]</sup>

$$\begin{cases} E_1 = E_f a_1, E_2 = E_m a_2, G_{12} = G_m a_2 \\ a_1 = (1-f) \exp\left[-0.3\left(\frac{T-T_0}{T_0}\right)\right] \\ a_2 = (1-f) \exp\left[-0.7\left(\frac{T-T_0}{T_0}\right)\right] + 0.1f \\ E_f = 20 \text{ GPa}, E_m = 2 \text{ GPa}, G_m = 0.72 \text{ GPa} \end{cases}, \quad (26)$$

式中  $T_0$  为室温, 取值为 300 K。

热膨胀系数为  $\beta_1 = 2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,  $\beta_2 = 20 \times 10^{-6}(1-f) + 4 \times 10^{-6} f \text{ (K}^{-1})$ 。

### 3 结果与讨论

如不考虑力学剥蚀, 仅考虑热烧蚀, 当烧蚀进行到一定程度, 材料非常薄时, 由于辐射散热的影响, 材料将进入热平衡状态。在材料非常薄时, 材料沉积的激光能量可近似为

$$q_{\text{laser}} \approx (1-r)I_0\mu h, \quad (27)$$

式中  $h$  为剩余材料厚度,  $\mu$  为吸收系数,  $r$  为反射率。热烧蚀时材料温度为升华温度, 考虑到前后两个表面, 辐射散热损失的能量为

$$q_{\text{rad}} = 2\varepsilon\sigma T_s^4, \quad (28)$$

热平衡时材料厚度为

$$h = \frac{2\varepsilon\sigma T_s^4}{(1-r)I_0\mu}, \quad (29)$$

代入相关参数可得, 功率密度为  $500 \text{ W/cm}^2$  时, 剩余厚度约为  $0.04 \text{ mm}$ 。即如果不考虑力学剥蚀, 激光功率密度为  $500 \text{ W/cm}^2$  时材料无法烧穿, 这与实验观测不符, 实验中  $500 \text{ W/cm}^2$  辐照  $5 \text{ s}$  时材料已烧穿。因此, 力学剥蚀过程在材料烧穿过程中是必然存在的。

图 3 给出了仅考虑热烧蚀时, 烧蚀质量达到光斑区域质量的一半所需的时间随功率密度的变化。从图 3 中可以看出, 仅考虑热烧蚀时, 由于玻璃纤维复合材料吸收系数较低, 透光性好, 激光能量沉积效率低, 另一方面, 玻璃的升华潜热很大, 升华温度也较高, 导致的辐射散热损失不可忽略, 因此烧蚀所需能量非常大, 需要的烧蚀时间也很长。

为验证剥蚀模型的正确性, 做了材料烧蚀实验。实验用的材料尺寸为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$ , 表面气流速度为  $30 \text{ m/s}$ 。利用大动态相机测量了材料穿孔时间, 并与计算结果作比对, 如图 4 所示。图 4 给出了烧穿时间随功率密度的变化, 从图中可以看出, 考虑力学剥蚀以后, 材料很快烧蚀穿孔, 功率密度越大, 穿孔时间越短。对比图 3, 力学剥蚀过程让复合材料在热解过程中就由于热解气体的压力而解体, 所需的能量大大减少。因此, 力学剥蚀在激光烧蚀玻璃纤维/环氧树脂复合材料过程中是非常重要的因素, 不可忽略。图 5 给出了功率密度为  $1000 \text{ W/cm}^2$  时, 材料开始分层时刻的应力分布。从图中可以看出, 材料分层时的内部气

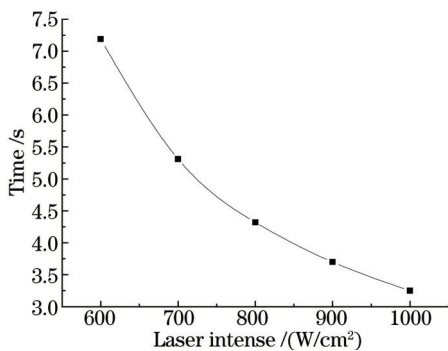


图 3 热烧蚀一半质量所需的时间随功率密度的变化

Fig.3 Time of a half mass loss by thermal ablation versus laser intense

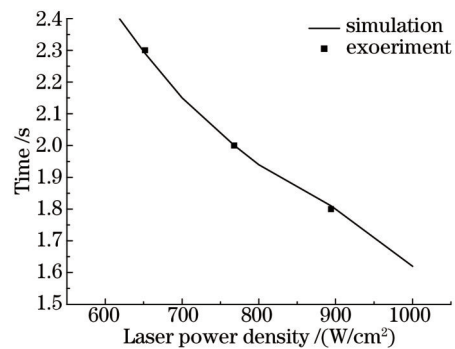


图 4 烧穿时间随功率密度的变化

Fig.4 Burn-through time versus laser intense

压较大,刚分层时的气压就足以导致层内破裂,因此分层后很快破裂。这与实验中观测到的现象相符,实验中分层过程并不明显,很快过渡到层裂阶段。

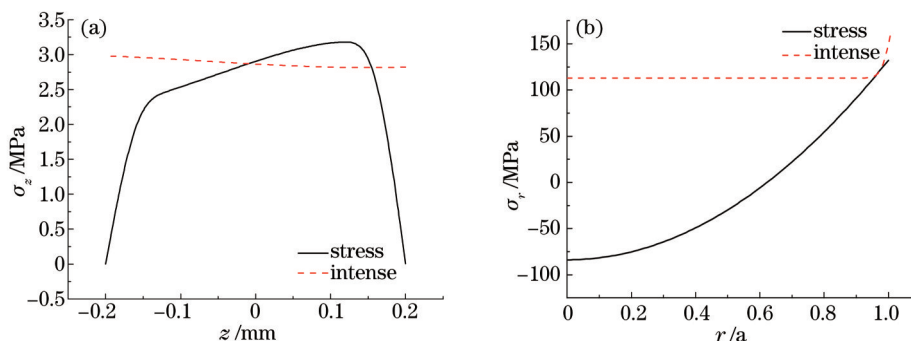


图5 激光功率密度  $1000 \text{ W/cm}^2$  辐照  $1.4 \text{ s}$ 。(a) 厚度方向应力分布; (b) 分层时径向应力分布

Fig.5 Laser power density  $1000 \text{ W/cm}^2$  and irradiation time  $1.4 \text{ s}$ . (a) Thick direction stress distributing before delamination; (b) radial direction stress distributing at delamination time

图6给出了烧穿所需能量随功率密度的变化。由图可知,功率密度越大,烧穿所需的能量越大,烧蚀效率越低。这是由于力学剥蚀是由于树脂热解造成的,功率密度越大,材料升温速率就越大,热解曲线向高温方向漂移,即热解温度更高,导致消耗的能量更多。

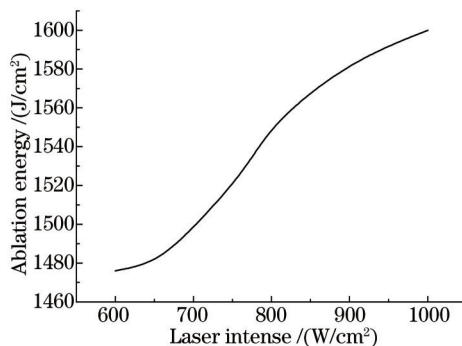


图6 烧穿能量随功率密度的变化

Fig.6 Burn-through energy versus laser intense

## 4 结 论

通过观察和分析激光辐照玻璃纤维/环氧树脂复合材料的烧蚀过程,提出了力学剥蚀过程的计算模型和方法,并将计算结果与实验结果进行比较,验证了模型的合理性。力学剥蚀过程在激光烧蚀导致玻璃纤维/环氧树脂复合材料穿孔过程中必然存在。相对于热烧蚀,力学剥蚀过程能大大降低烧蚀所需的能量,对激光辐照效应影响很大。在包含力学剥蚀时,烧穿能量将随功率密度增大而增大,因此较低功率密度时烧蚀效率更高。

## 参 考 文 献

- 1 Y I Dimitrienko. Modeling of erosion combustion of energetic materials in high-enthalpy flows[J]. Combustion and Flame, 1997, 111 (3): 161-174.
- 2 Y I Dimitrienko. Thermomechanical behaviour of composite materials and structures under high temperatures: 1. Structures[J]. Composites Part A, 1997, 28A: 463-471.
- 3 Li Gan, Tang Wenhui, Ran Xianwen, *et al.*. The grainy denudation in heat shield[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 27 (6): 747-750.  
李 干, 汤文辉, 冉宪文, 等. 热防护中的粒状剥蚀问题研究[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(6): 747-750.
- 4 Li Li, Yang Tao, Liu Wei. Erosion analysis of silica/phenolic insulation in solid-rocket ramjet afterburner[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2011, 34(4): 470-473.

- 李 理, 杨 涛, 刘 巍. 固体火箭冲压发动机补燃室掺混段硅基绝热层冲蚀分析[J]. 固体火箭技术, 2011, 34(4): 470-473.
- 5 Peng Guoliang, Du Taijiao, Liu Feng, *et al.*. The simulation study of laser energy coupling coefficient in the process of ablating glass/epoxy composite material[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0203001.
- 彭国良, 杜太焦, 刘 峰, 等. 激光烧蚀玻璃纤维/环氧树脂复合材料的能量耦合率模拟研究[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0203001.
- 6 R M Sullivan, N J Salamon. A finite element method for the thermochemical decomposition of polymeric materials-II. Carbon phenolic composites[J]. Int J Engng Sci, 1992, 30(7): 939-951.
- 7 Y I Dimitrienko. Thermomechanical behaviour of composite materials and structures under high temperatures: 1. Materials[J]. Composites Part A, 1997, 28(5): 453-461.
- 8 Y I Dimitrienko. Internal heat-mass transfer and stresses in thin-walled structures of ablating materials[J]. Int J Heat Mass Transfer, 1997, 40(7): 1701-1711.

栏目编辑: 张浩佳