

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

彭国良 杜太焦 刘 峰 张相华

(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 提出了一种计算玻璃纤维/环氧树脂复合材料激光烧蚀过程中能量耦合率的模型, 并通过对激光辐照玻璃纤维/环氧树脂复合材料的数值模拟计算了烧蚀过程中的激光透射率及表面温度, 与实验结果吻合较好。结果表明, 利用该模型可以计算玻璃纤维/环氧树脂复合材料激光烧蚀过程中的能量耦合率。利用该模型进一步计算了不同激光强度下耦合系数的变化规律, 计算结果表明, 对玻璃纤维/环氧树脂复合材料的激光烧蚀, 激光的吸收方式存在体吸收向面吸收转变的过程; 激光强度越大, 能量耦合率增大到稳定值所需时间越短, 体吸收向面吸收转变的过程越快。

关键词 激光技术; 玻璃纤维/环氧树脂复合材料; 激光能量耦合率; 激光烧蚀; 激光强度

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0203001

Simulation Study of Laser Energy Coupling Coefficient in the Process of Ablating Glass Fiber/Epoxy Composites

Peng Guoliang Du Taijiao Liu Feng Zhang Xianghua

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

Abstract A model is given out for computing energy coupling coefficient in the process of laser ablating glass fiber/epoxy composites. By the simulation of laser irradiating glass fiber/epoxy composites, laser transmission and the front surface temperature are obtained in the ablation process, which agree well with the experimental results. The result indicates that energy coupling coefficient in the process of laser irradiating glass fiber/epoxy composites can be computed by the proposed model. Besides, the change law of energy coupling coefficient with different laser intensities is computed with the proposed model. The computed result indicates that laser energy absorption mechanism changes from bulk absorption to surface absorption. More intensive laser beam causes that energy coupling coefficient increases more quickly and the conversion process from bulk absorption to surface absorption is faster.

Key words laser technique; glass fiber/epoxy composites; laser energy coupling coefficient; laser ablation; laser intensity

OCIS codes 140.3295; 140.3330; 140.3425

1 引 言

树脂基复合材料在航天航空领域得到了广泛的应用, 目前正逐步取代黑色金属、有色金属等传统材料, 成为轻质化结构的主要材料。随着激光技术的发展, 研究树脂基复合材料与激光的相互作用机理就越来越重要。现在国内外研究烧蚀复合材料物理

机制^[1-4]的较多, 而对于材料对激光能量吸收的理论研究则关注较少, 文献[5]用实验方法研究了树脂的反射特性, 文献[6]研究了激光透射焊接树脂板材的工艺, 文献[7]提出了一种计算激光能量沉积的方法, 但需要通过调节参数以符合实验结果, 不利于工程应用。由于树脂基复合材料的激光烧蚀过程中会

收稿日期: 2013-06-21; **收到修改稿日期**: 2013-08-26

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLIM1102)

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: pg102@163.com

产生大量热解产物,会污染测量仪器,导致直接能量耦合率的测量也较难进行。

本文以玻璃纤维/环氧树脂复合材料为例,提出了一种计算玻璃纤维/环氧树脂复合材料激光烧蚀过程中能量耦合率的模型,不需要经验参数。利用该模型计算了烧蚀过程中的激光透射率及表面温度,并与实验结果进行了对比,验证了模型的合理性。

2 激光能量耦合率计算模型

激光在玻璃纤维/环氧树脂复合材料中为体吸收,可等效为内热源,假设激光沿 z 轴入射,热源表达式为

$$q_{\text{laser}}(z, t) = \mu I(z, t), \quad (1)$$

式中 μ 为吸收系数, z 代表材料位置, t 为时间, I 为当地的激光强度,计算公式为

$$I(z, t) = (1 - R) I_0(t) \exp\left(-\int_{z_0}^z \mu dz\right), \quad (2)$$

式中 R 为反射率, I_0 为入射激光强度, z_0 为入射面位置。透射率 T 定义为

$$T = \int_s \frac{I_{\text{back}}}{I_0} ds = \int_s (1 - R) \exp\left(-\int_{z_0}^{z_{\text{back}}} \mu dz\right) ds, \quad (3)$$

式中 z_{back} 为背表面的位置, s 为激光辐照面积。

如图 1 所示, z_{char} 为光束在焦化材料中的传输距离, z_{ori} 为光束在原始未焦化材料中的传输距离。烧蚀过程中可将材料看作焦化材料与原始未焦化材料的组合。设焦化材料所占的体积比为 f , 对假想的每一光束而言, 其传播可视为一维问题, 故

$$\begin{cases} \frac{z_{\text{char}}}{z_{\text{char}} + z_{\text{ori}}} = f \\ \frac{z_{\text{ori}}}{z_{\text{char}} + z_{\text{ori}}} = 1 - f \end{cases}, \quad (4)$$

透射的光束强度为

$$\begin{aligned} I_{\text{back}} &= (1 - R) I_0 \exp(-\mu_{\text{char}} z_{\text{char}}) \exp(-\mu_{\text{ori}} z_{\text{ori}}) = \\ &= (1 - R) I_0 \exp(-\mu_{\text{char}} z_{\text{char}} - \mu_{\text{ori}} z_{\text{ori}}) = \\ &= (1 - R) I_0 \exp\{-[\mu_{\text{char}} f + \mu_{\text{ori}}(1 - f)](z_{\text{char}} + z_{\text{ori}})\}, \end{aligned} \quad (5)$$

故复合的吸收系数可表示为

$$\mu = f\mu_{\text{char}} + (1 - f)\mu_{\text{ori}}, \quad (6)$$

式中 μ_{char} 为焦化材料的吸收系数, μ_{ori} 为原始未焦化材料的吸收系数。

文献[7]给出的对波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 的激光原始未焦化材料的吸收系数为

$$\mu_{\text{ori}} = \begin{cases} 360 \text{ m}^{-1}, & \theta < 380 \text{ K} \\ \left[360 - \frac{160}{140}(\theta - 380)\right] \text{ m}^{-1}, & 380 \text{ K} \leq \theta \leq 520 \text{ K} \\ 200 \text{ m}^{-1}, & \theta > 520 \text{ K} \end{cases} \quad (7)$$

式中 θ 为材料温度, 焦化材料的吸收系数为 $1.21 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$ 。值得注意的是, 对于存在透射的材料, 由于存在内部界面的多重反射, 一般来说反射率、透射率等光学参数与厚度有关, 但文献[8]的研究结果表明, 对于玻璃纤维/环氧树脂复合材料, 当厚度超过 0.6 mm 时, 光学参数会趋于稳定。

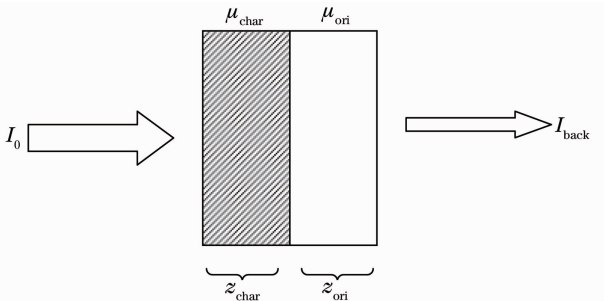


图 1 复合材料中激光传输示意图

Fig. 1 Sketch of laser transmission in composite

反射率的计算遵循类似的规律, 即表面焦化后反射率取焦化材料的反射率, 焦化前取原始材料反射率, 过渡状态通过插值计算, 即

$$R = [1 - f(z_0)]R_{\text{ori}} + f(z_0)R_{\text{char}}, \quad (8)$$

式中 $R_{\text{ori}} = 0.3$ 为原始未焦化材料的反射率, $R_{\text{char}} = 0.1$ 为焦化材料的反射率^[6], $f(z_0)$ 表示表面焦化材料所占的体积比。

得到反射率和透射率以后, 激光与材料的能量耦合率为

$$\alpha = 1 - R - T. \quad (9)$$

3 树脂基复合材料激光烧蚀的计算模型

3.1 控制方程

树脂基复合材料的激光烧蚀包含了材料的热解, 其控制方程^[9]包括质量守恒方程:

$$\nabla \cdot (\rho_g V) = -\frac{\partial \rho}{\partial t}, \quad (10)$$

热分解方程：

$$\frac{\partial f}{\partial t} = A(1-f)^m \exp(-E/R_g \theta), \quad (11)$$

能量守恒方程：

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} + c_g \rho_g V \cdot \nabla \theta - \nabla \cdot (k \nabla \theta) + Q \frac{\partial \rho}{\partial t} - q_{\text{laser}} = 0, \quad (12)$$

式中 $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x} \quad \frac{\partial}{\partial y} \quad \frac{\partial}{\partial z} \right)$ 为梯度算符, ρ_g 、 V 、 c_g 分别为热解气体的密度、速度及比热容, ρ 、 c 分别为复合材料的密度及比热容, Q 为分解潜热, A 、 m 、 E 为材料热解参数, 分别表示指前因子、反应阶和活化能, R_g 为气体常数, k 为复合材料的热导率, q_{laser} 为体吸收的激光热源, θ 为材料温度。

考虑辐射及对流, 边界条件为

$$k \frac{\partial \theta}{\partial \mathbf{n}} = \varepsilon (\theta^4 - \theta_\infty^4) + h(\theta - \theta_\infty), \quad (13)$$

式中 \mathbf{n} 代表法向, ε 为材料表面发射率, σ 为斯特藩-玻耳兹曼常数, θ_∞ 为环境温度, h 为对流换热系数。材料表面发射率可取为 0.9^[6], 对流换热系数由经验公式给出：

$$Nu = \frac{hx}{\lambda_{\text{air}}} = 0.332 (Pr)^{1/3} (Re)^{1/2}, \quad (14)$$

式中 Nu 、 Pr 、 Re 分别为努塞尔数、普朗特数、雷诺数, λ_{air} 为气体热导率, x 为沿表面的吹风方向的

长度。

3.2 材料参数

复合材料密度、比热容及热导率均可用混合率表示为

$$\begin{cases} \rho = \rho_v(1-f) + \rho_c f \\ c = c_v(1-f) + c_c f, \\ k = k_v(1-f) + k_c f \end{cases}, \quad (15)$$

式中 ρ_v 为原始材料的密度, ρ_c 为焦化材料的密度。对于玻璃纤维/环氧树脂复合材料^[9-10]：

$$\begin{cases} \rho = 1589 - 448f \\ c = (1235 + 2.58\theta)(1-f) + f(1442 + 0.3372\theta). \\ c_g = 3100 \end{cases}, \quad (16)$$

热导率 $k = 0.4f + 1.1(1-f)$, 材料热解参数^[10]为 $A = 8.0 \times 10^{39}$, $m = 2$, $E = 515 \text{ kJ/mol}$, $Q = 996 \text{ J/g}$ 。

4 结果与讨论

为与实验结果进行对比, 计算条件为材料半径 4 cm, 均匀光斑半径为 1.85 cm, 无表面气流。图 2 给出了不同条件下透射率计算结果与实验测量结果的比较。其中图 2(a) 的计算条件为激光强度 $I = 500 \text{ W/cm}^2$, 材料厚度 $l = 1.59 \text{ mm}$; 图 2(b) 的计算条件为激光强度 400 W/cm^2 , 材料厚度为 1.59 mm ; 图 2(c) 的计算条件为激光强度 500 W/cm^2 , 材料厚度为 6.35 mm 。从图中可以看出, 计算结果与实验

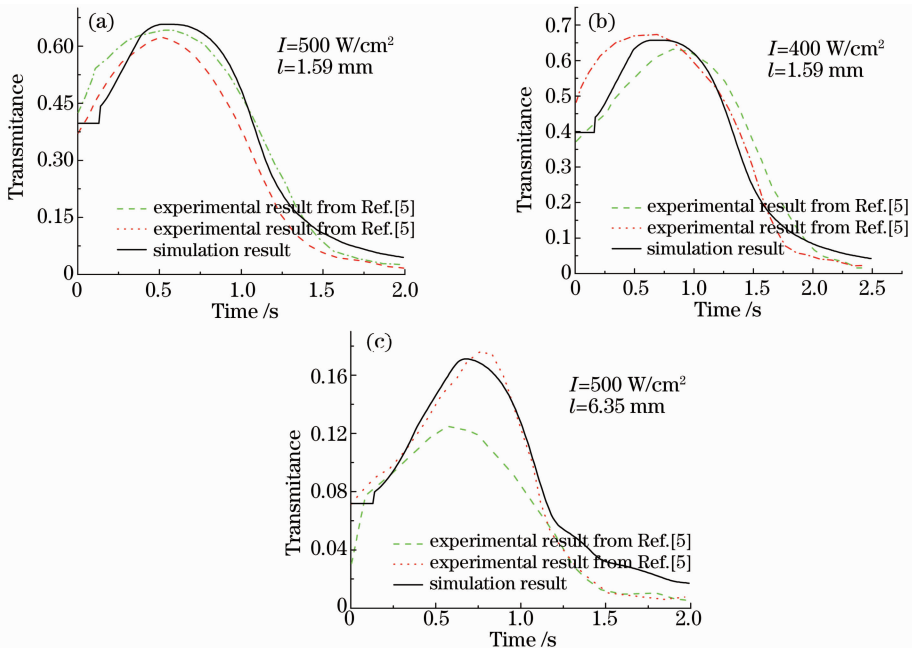


图 2 激光透射率随辐照时间的变化

Fig. 2 Variations of laser transmittance versus irradiating time

测量结果符合得较好,表明本文的模型是可信的。辐照过程中,透射率曲线先上升,对应材料在发生热解反应之前,树脂升温使树脂与玻璃纤维间气隙消除,整体匀化,呈胶体状态,对于入射激光来说相当于提高了整体纯度,从而使透射率增强;辐照一定时间后,树脂开始热解,材料逐步焦化,由于焦化材料对激光的强吸收,使得透射率快速下降。在材料厚度相同时,功率密度为 500 W/cm^2 时对应的透射率最大值出现在 0.5 s 左右,而功率密度为 400 W/cm^2 时对应的透射率最大值出现在 0.7 s 左右,即激光强度越大,温升越快,对应的透射率最大值所需的辐照时间越短。在功率密度相同时,材料厚度越大,透射率越低,达到透射率最大值所需的辐照时间也会变长。

图3给出了材料厚度为 6.35 mm 、表面气流速率为 0.9 Ma 、激光功率密度为 500 W/cm^2 时的前表面温度计算结果与实验结果的对比。从图中可以看出,温度场计算结果也基本符合。这也进一步证明了模型的合理性。

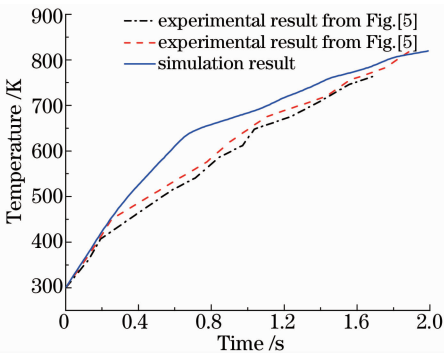


图3 材料前表面温度随辐照时间的变化

Fig. 3 Variation of front surface temperature versus irradiating time

图4给出了材料厚度为 1.59 mm 时,不同激光强度下激光的能量耦合率随辐照时间的变化。由图中可以看出,由于焦化材料能量耦合率较高,激光功率密度较高时,材料焦化速率较快,能量耦合率快速达到峰值,而功率密度较低时,材料焦化速率较慢,能量耦合率需要较长时间才能达到峰值。由于焦化材料吸收率较高,对应的趋肤深度较浅,可视为面吸收,而未焦化材料吸收率较低,激光易透过,可视为体吸收。辐照开始时,能量耦合率较低,此时可认为激光能量的沉积方式为体吸收;辐照一段时间后,能量耦合率较高,对应于表面焦化材料所占比重较大,大部分能量沉积在表层,只有较少的能量到达材料内部,此时可认为激光能量的沉积方式为面吸收。对于玻璃纤维/环氧树脂材料,辐照初始阶段需按体

吸收来处理激光能量的耦合,辐照到某个阶段以后,可按面吸收来处理激光能量的耦合,并且激光强度越大,从体吸收到面吸收所需的时间越短。

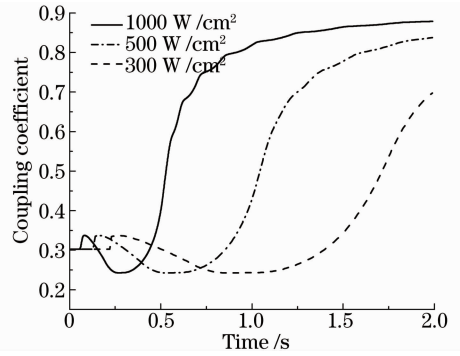


图4 不同激光强度下耦合率随辐照时间的变化

Fig. 4 Variation of coupling coefficient versus irradiating time with different laser intensities

5 结 论

阐述了激光烧蚀玻璃纤维/环氧树脂复合材料过程中的能量耦合率计算模型,并通过与实验结果的对比验证了模型的合理性。利用模型计算了玻璃纤维/环氧树脂复合材料激光烧蚀过程中的能量耦合率变化规律,表明烧蚀时激光的吸收方式存在体吸收向面吸收转变的过程:辐照初始阶段需按体吸收来处理激光能量的耦合,辐照到某个阶段以后,可按面吸收来处理激光能量的耦合,并且激光强度越大,能量耦合率增大到稳定值所需时间越短,体吸收向面吸收转变越快。

参 考 文 献

- 1 Zeba parkar, Chris Mangun. Ablation characteristics of an aromatic thermosetting copolyester/carbon fiber composite[J]. J Composite Materials, 2012, 46(15): 1819—1830.
- 2 Zhang Zhenyu. Thermo-Mechanical Behavior of Polymer Composites Exposed Fire[D]. Virginia: Balcksburg, 2010.
- 3 Huang Yongguang, Liu Shibing, Long Lianchun. Observation on the process of continuous wave Nd:YAG laser ablation on carbon fiber composite material [J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(12): 2042—2046.
- 4 黄永光, 刘世炳, 龙连春. Nd:YAG 连续激光烧蚀碳纤维复合材料的观测[J]. 中国激光, 2008, 35(12): 2042—2046.
- 5 Ahmad Reza Bahramian, Mehrdad Kokabi. Ablation and thermal degradation behaviour of a composite based on resol type phenolic resin: process modeling and experimental[J]. Polymer, 2006, 47(10): 3661—3673.
- 6 Wu Lixiong, Ye Xisheng, Wang Lijun, et al.. Reflectance of epoxy/organsilicone composite coating at $1.3 \mu\text{m}$ under laser irradiation[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0814002.
- 7 吴丽雄, 叶锡生, 王立君, 等. 激光作用下环氧/硅树脂复合涂层的 $1.3 \mu\text{m}$ 反射特性研究[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0814002.
- 8 Lei Jianbo, Wang Zhen, Wang Yunshan, et al.. Experiment study of laser transmission welding of polymethylmethacrylate

- [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0103006.
- 雷剑波, 王 镇, 王云山, 等. 激光透射焊接聚甲基丙烯酸甲酯试验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0103006.
- 7 Vladimir V Semak. Modeling of laser charring and material removal in fiber glass material[J]. J Directed Energy, 2006, 2: 5—21.
- 8 Chen Linzhu. Experiment Research of Laser Ablation Effect of Honeycomb Composite Material[D]. Xi'an: Northwest Institute of Nuclear Technology. 2010.
- 陈林柱. 蜂窝夹层复合材料激光烧蚀实验研究[D]. 西安: 西北核技术研究所, 2010.
- 9 Summers P. Predicting Compression Failure of Fiber-Reinforced Polymer Laminates During Fire [D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2010.
- 10 Yu Bai, Thomas Keller. Time dependence of material properties of FRP composites in fire[J]. J Composite Materials, 2009, 43 (21): 2469—2483.

栏目编辑: 宋梅梅