

激光辐照树脂基复合材料的一维温度场模拟

王以忠 赵国民

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 为了解决激光辐照树脂基复合材料时热解热和移动热解面给温度场求解带来的难题,通过修正处理相变问题的热焓法,建立了连续激光辐照树脂基复合材料的一维温度场模型,简化了求解过程。在此基础上采用“历史最高温度点追踪法”对热焓法模型进行了进一步修正,使之能够解决脉冲激光辐照复合材料时温度双向变化与热解过程不可逆之间的矛盾,从而对脉冲激光辐照的情况也能适用。用有限差分方法进行离散后,编写了 FORTRAN 程序求得数值解。计算结果与实验结果基本相符,最后模型分析了脉冲激光参量对树脂基复合材料温升的影响。

关键词 激光应用; 温度场模拟; 相变热焓法; 树脂基复合材料; 脉冲激光

中图分类号 TN249 文献标识码 A

One-Dimensional Thermal Pattern Simulation of Resin Based Composites Subjected to Pulse Laser Beam

Wang Yizhong Zhao Guomin

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract One-dimensional (1D) temperature field model is built to simulate the effects of resin based composites subjected to continuous laser beam. “Phase change enthalpy method” is put forward to deal with the problem of additional heat absorbed during resin decomposition and moving decomposition surface, which simplifies the solving process; then, the model is adjusted using “highest historical temperature pursue method” to revise the model of enthalpy method, which settles the argument between bidirectional change of temperature and irreversible decomposition process. Then, FORTRAN compute program is compiled after discretizing the equations with difference method. Results from calculation and references agree well. Using the model, the relationship between laser parameters and composites temperature is studied at last.

Key words laser application; temperature pattern simulation; phase change enthalpy method; resin based composites; pulse laser

1 引 言

在研究激光与物质相互作用时,被辐照材料的温度场分布往往是需要获取的重要结果,求解温度场通常采用的方法是根据傅里叶定律建立关于温度的偏微分方程,至于偏微分方程的求解方法则因激光的特性或材料的性质而异。

对于连续激光与物质相互作用的温度场模拟,国内外已经做了不少工作,当激光辐照的是金属一类连续、均匀、各向同性、成分简单的材料时,由于温

度场的偏微分方程形式比较简单,计算时也比较容易,有些简化的情况甚至可以得到准确的解析解^[1,2];而当连续激光辐照的是树脂基复合材料时,考虑到树脂发生热解引入移动热解面和热解热,用求解相变问题的显热容法^[3]或热焓法^[4]模拟计算取得了较好的效果。脉冲激光由于其脉冲持续时间短,热扩散长度短,对光斑周围环境的热扩散和热破坏小,在微结构加工、生物医学^[5]等领域受到越来越多的关注,但是关于加载脉冲激光的温度场模拟并

作者简介: 王以忠(1982—),男,山东人,硕士研究生,主要从事激光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail: wangyizhong-007@163.com

导师简介: 赵国民(1963—),男,河南人,教授,硕士生导师,主要从事激光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail: gmzhao@nudt.edu.cn

不多见。

本文主要工作就是建立连续/脉冲激光辐照树脂基复合材料的一维热焓法模型,用该模型求解复合材料还未发生表面烧蚀时的温度场。

2 物理模型

首先,建立复合材料热解的热焓法模型,热焓法的基本思想是在热传导方程中引入热焓 h ,使之包含表征内能增加的焓 h_c 和表征热解的焓 h_e ,这样热解热源项就不再显式地出现在热传导方程中,而是隐含于热焓 h 中,设热解温度区间为 (T_1, T_2) ,建立原点在背面, x 轴沿厚度方向指向前表面的直角坐标系,则热焓法基本控制方程为

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (1)$$

$$h(T) = h_c(T) + h_e(T), \quad (2)$$

$$h_c(T) = \int_{T^0}^T c(\xi) d\xi, \quad (3)$$

$$h_e(T) = \begin{cases} 0, & T < T_1 \\ \frac{Q}{(T_2 - T_1)}(T - T_1), & T_1 \leq T \leq T_2 \\ Q, & T > T_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中 ρ 为材料密度, k 为热导率, c 为比热,都是温度的函数, Q 为热解热。

热解过程与相变过程的相似性使得上面的相变热焓法可以用于解决复合材料热解问题,但是热解与相变还有一个显著的不同点,即相变是可逆的,而热解是不可逆的,所以上面的相变热焓法只适用于温度单调变化的连续激光辐照情况^[6],而对于温度可能双向变化的脉冲激光辐照情况不适用。

为了解决这一问题,对热焓法模型进行修正,采用的方法是在程序中设置一个始终跟踪历史最高温度的参量 T_h ,由 T_h 来确定热焓中热解热的值。

(4)式修改为

$$h_e(T) = \begin{cases} 0, & T_h < T_1 \\ \frac{Q}{(T_2 - T_1)}(T_h - T_1), & T_1 \leq T_h \leq T_2 \\ Q, & T_h > T_2 \end{cases} \quad (5)$$

另外,由于脉冲激光辐照时温度振荡变化,计算 $h_c(T)$ 时,比热的积分路径不是单调变化的,所以在后面的差分计算时,把整个计算时间划分为许多小的时间步长,相应比热的温度积分路径 (T^0, T)

也划分为一些子路径 (T^j, T^{j+1}) ,当时间步长很小时,子路径可以是单调变化的,这样,比热在路径 (T^0, T) 上的积分就可以视为在所有子路径上积分的累加

$$h_c(T) = \int_{T^0}^T c(\xi) d\xi = \int_{T^0}^{T^1} c(\xi) d\xi + \int_{T^1}^{T^2} c(\xi) d\xi + \dots + \int_{T^n}^T c(\xi) d\xi, \quad (6)$$

另外,初始条件为

$$T^0 = T_a. \quad (7)$$

边界条件:

激光辐照面

$$k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = Q_i, \quad T_{\text{surf}} < T_b, \quad (8)$$

$$Q_i = \alpha I + hr(T_a - T_{\text{surf}}) + \sigma \varepsilon (T_a^4 - T_{\text{surf}}^4), \quad (9)$$

背面绝热。

式中 α 为复合材料对激光的吸收系数, I 为激光功率密度, T_b 为碳纤维的气化温度, T_a 为环境温度, T_{surf} 为材料表面温度, (9) 式右边的三项分别为激光辐照、对流、辐射形式的表面热交换。

激光功率密度 I 的值是周期性变化的,取第一个脉冲开始辐照的时刻作为 $t = 0$ 时刻,对脉宽为 τ , 频率为 f 的脉冲激光

$$I = \begin{cases} I_p, & \frac{n}{f} \leq t \leq \frac{n}{f} + \tau \\ 0, & \frac{n}{f} + \tau < t < \frac{n+1}{f} \end{cases} \quad (10)$$

I_p 为激光功率密度, $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$, N 为辐照的总脉冲数。

3 差分格式

对以上建立的一维模型等距划分网格,用有限差分方法对热传导方程进行离散化,以差分代替微分。用上标表示时间节点,下标表示空间节点,任意三个相邻节点采用下标 w, p, e ,其中 $j+1$ 时间节点时 p 节点处的温度是当前考察的温度,得到离散的热传导方程

$$h_p^{j+1} = a_w T_w^{j+1} + a_p T_p^{j+1} + a_e T_e^{j+1} + h_p^j, \quad (11)$$

式中 $a_w = \frac{K_w R}{\rho_w}$; $a_e = \frac{K_e R}{\rho_e}$; $a_p = -\frac{K_w R}{\rho_w} - \frac{K_e R}{\rho_e}$;

$$R = \frac{\Delta t}{\Delta x^2}.$$

用插值法计算 K_e, K_w , 对均分网格

$$K_e = \frac{k_p + k_e}{2}; \quad K_w = \frac{k_p + k_w}{2}.$$

对前表面,取虚拟节点 $m+2$,使其到 $m+1$ 点的距离与 m 点到 $m+1$ 点的距离相等,由边界条件(8)式得到

$$k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{m+1} = k \frac{T_{m+2} - T_{m+1}}{\Delta x} = Q_i, \quad (12)$$

联立(11)式 p 在 $m+1$ 点的表达式与(12)式消去 T_{m+2} 得到

$$h_{m+1}^{j+1} = a_w T_m^{j+1} + a_p T_{m+1}^{j+1} + a_e \left(\frac{Q_i \Delta x}{k} + T_{m+1}^{j+1} \right) + h_{m+1}^j. \quad (13)$$

后表面的边界条件同法处理可以得到

$$h_1^{j+1} = a_w T_1^{j+1} + a_p T_1^{j+1} + a_e T_2^{j+1} + h_1^j. \quad (14)$$

联立(11)式 p 分别取节点 $2 \sim m$ 时的 $m-1$ 个方程和(13)式、(14)式共 $m+1$ 个方程组成的方程组,并用(2)式、(5)式、(6)式确定的反向表达式进行迭代求解,直到求得收敛的 $T_i^{j+1}, i=1,2,\dots, m+1$,即为 $j+1$ 时间节点处的温度场分布。

4 实验与结果

4.1 模型验证

按照上面介绍的方法对物理方程离散后编写了 FORTRAN 程序,求得了温度场的数值解,并与激光辐照实验的测量结果进行了对比。

用 Nd 玻璃热容激光器辐照碳纤维增强环氧树脂基复合材料样品,实验 1 样品尺寸为 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$,激光频率为 0.5 Hz ,辐照时间为 10 s ,脉冲功率密度为 23 kW/cm^2 ;实验 2 样品尺寸为 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm}$,激光频率为 2 Hz ,辐照时间为 10 s ,脉冲功率密度为 21 kW/cm^2 ;脉冲激光器光斑直径为 22 mm ,脉宽为 0.3 ms 。实验所用样品的表面积稍大于光斑面积,但由于样品很薄,在考察区域不超出光斑范围时并不明显影响一维效果。

模拟计算中需要的热物性参量为^[7]:

热解温度区间(T_1, T_2)为($343 \text{ }^\circ\text{C}, 510 \text{ }^\circ\text{C}$);未热解材料和热解后材料的密度 $\rho_1 = 1.60 \text{ g/cm}^3$, $\rho_2 = 1.16 \text{ g/cm}^3$;比热 $c_1 = 1.9 \text{ J/(g} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$, $c_2 = 2.9 \text{ J/(g} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$;未热解复合材料的热导率随温度变化较明显,取线性变化,在 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $343 \text{ }^\circ\text{C}$ 处的热导率 $k_0 = 1.202 \text{ W/(m} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$, $k_1 = 0.311 \text{ W/(m} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$,炭化层的热导率 $k_2 = 0.186 \text{ W/(m} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$;在热解温度区间密度、比热和热导率都取线性变化;环氧树脂的热解热 $Q = 996 \text{ J/g}$;空气对流系数 $h_r =$

$10 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$;环境温度 $T_a = 28 \text{ }^\circ\text{C}$;未烧蚀材料表面对激光的吸收系数 $\alpha = 0.8$;表面发射率 $\epsilon = 0.92$ 。

实验 1、2 测量结果与对应模拟结果对比如图 1、图 2 所示。

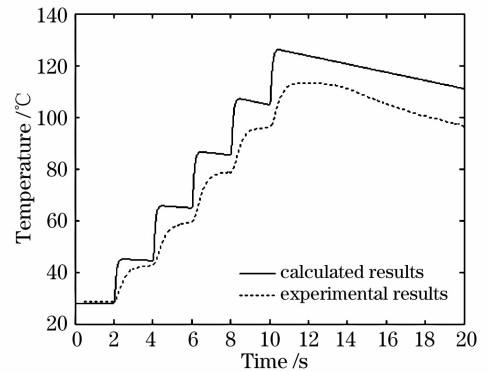


图 1 0.5 Hz 脉冲激光辐照时材料背面温度
Fig. 1 Back surface temperature of 0.5 Hz pulse laser irradiation

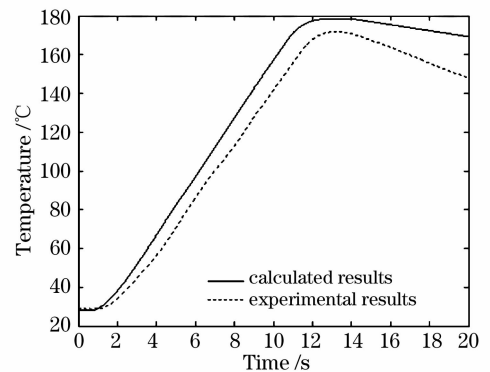


图 2 2 Hz 脉冲激光辐照时材料背面温度
Fig. 2 Back surface temperature of 2 Hz pulse laser irradiation

实验 1 样品较薄,激光频率较低,所以脉冲之间有明显的温度缓变区,温度变化呈台阶状;实验 2 样品较厚,脉冲频率较高,由于脉冲之间的温度积累效应,背面温升的速率变化不大。

对比发现,模拟计算温度值与实验测量值吻合较好。下面的算例就是用本热焓法模型进行模拟计算,利用模拟结果分析脉冲激光参量对树脂基复合材料烧蚀效果的影响。

4.2 模拟分析

模拟所用的复合材料热物性参量同前面的计算,复合材料厚度 0.5 mm ,辐照时间都是 10 s 。各组激光参量如表 1 所示,在保证总辐照能量密度 E 相同的前提下,模拟分析不同的脉冲功率密度 I_p ,频率 f ,脉宽 τ ,对辐照效果的影响。

表1 脉冲激光辐照复合材料效果模拟分析

Table 1 Effects of resin based composites subjected to pulse laser beam simulations

Number	$I / (\text{kW}/\text{cm}^2)$	f / Hz	τ / ms	$E / (\text{J}/\text{cm}^2)$
1	0.5	2.0	2	20
2	20	0.5	0.2	20
3	0.5	20	0.2	20

如图3(a)所示,激光脉冲2与3的脉宽相同。2的脉冲功率密度高,在较短的时间内使辐照样品获得相对较多的能量,辐照面附近温升远超过了树脂热解温度,树脂热解吸收了大量的热量,同时热解后热导率变小^[8],使得传导到背面的热量变少,所以

图3(b)中,脉冲激光2辐照的样品背面温升反而低一些;在频率较高的脉冲激光3的辐照下样品辐照面温升远没有达到树脂热解温度,所以辐照面没有热解发生,传导到背面的热量较多,背面温升也高。

如图4(a)所示,脉冲激光1和3的脉冲功率密度相同,1的脉宽较宽,辐照面温升较3高,但二者都未能使辐照面树脂发生热解,所以如图4(b)所示,背面温升相差不大。激光1辐照的样品背面温升稍低,可能是因为该样品辐照面温度高,辐射散失了更多的热量。

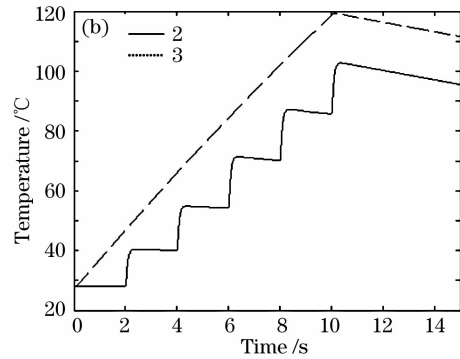
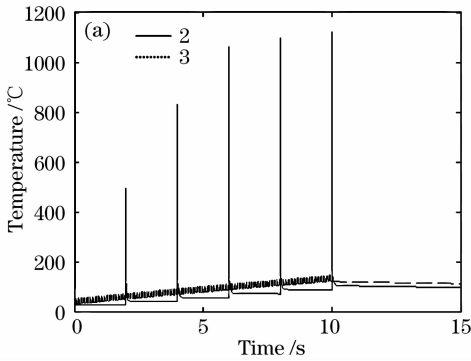


图3 脉冲功率密度和频率对复合材料升温的影响

Fig. 3 Power density and frequency' effects to temperature rising of composites

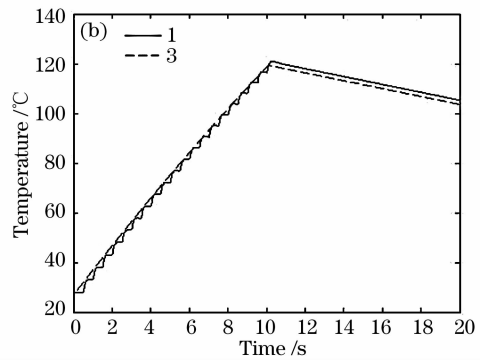
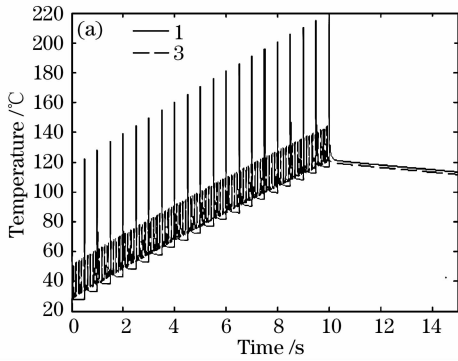


图4 脉宽和频率对复合材料升温的影响

Fig. 4 Pulse width and frequency' effects to temperature rising of composites

5 结 论

综合以上分析,可以总结出如下结论:

- 1) 本文建立的热焓法模型可用于连续/脉冲激光辐照树脂基复合材料的一维温度场模拟,模拟计算结果与实验结果符合较好;
- 2) 脉冲激光的脉冲功率密度相对脉宽和频率对复合材料辐照面温升影响更显著;
- 3) 复合材料辐照面树脂基体热解将显著影响背面温升。

参 考 文 献

- 1 Yin Xianhua, Zu Jifeng, Hou Liqun *et al.*. Two-dimensional thermal effects in crystal slab heat capacity laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 771~776
尹宪华,祖继锋,侯立群等. 板条热容激光器的二维热特性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 771~776
- 2 Huang Feng, Niu Yanxiang, Wang Yuefeng *et al.*. Calculation of thermal and mechanical effect induced by laser in optical window materials[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 576~580
黄峰,牛燕雄,汪岳峰等. 光学窗口材料激光辐照热-力效应的解析计算研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4): 576~580
- 3 C. A. Griffis, J. A. Nemes, F. R. Stonesifer *et al.*. Degradation in strength of laminated composites subjected to

- intense heating and mechanical loading [J]. *J. Composite Materials*, 1986, **20**: 216~235
- 4 D. Pelletier, J. Borggaard, J. F. Hetu. A continuous sensitivity equation method for conduction and phase change Problems[R]. AIAA 2000-0881, 38th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2000. 10~13
- 5 Xianzeng Zhang, Shusen Xie, Qing Ye *et al.*. Wavelength dependence of soft tissue ablation by using pulsed lasers [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(4): 235~237
- 6 Yu Gang, An Yongqing, Hu Youjuan. Enthalpy solution of conduction phase change during laser processing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(10): 931~936
- 虞 钢,安永强,胡幼娟. 激光加工中传热相变问题的焓解法 [J]. *中国激光*, 2000, **A27**(10): 931~936
- 7 J. K. Chen, C. T. Sun, C. I. Chang. Failure analysis of a graphite/epoxy laminate subjected to combined thermal and mechanical loading [J]. *J. Composite Materials*, 1985, **19**: 408~423
- 8 C. A. Griffis, R. A. Masumura, C. I. Chang. Thermal response of graphite epoxy composite subjected to rapid heating [J]. *J. Composite Materials*, 1981, **15**: 427~439