

# 激光辐照层合板的数值模拟与试验对比

朱 凯 龙连春

(北京工业大学机电学院, 北京 100124)

**摘要** 对激光辐照复合材料层合板的应力应变进行模拟分析, 获得了应力应变场分布及其变化规律。数值模拟首先获得试件各点随激光辐照时间变化的温度场, 然后将温度场导入并分析了试件的热应力和热应变。结果显示: 沿纤维方向应力由中心的最大拉应力过渡到距光斑边缘约 5 mm 处的最大压应力后逐渐减小; 垂直纤维方向应力在光斑内及其附近均是压应力; Mises 应力在光斑中心处最大并随各位置到中心距离的增大而减小。热冲击使各点应力在辐照初期产生波动, 光强越大, 波动的时间点越早。为了验证数值分析模型, 在激光辐照的复合材料层合板正面光斑周围粘贴应变片, 用动态应变仪测试多点的应变并与数值结果进行对比, 数值模拟应变与实测应变吻合较好, 最大相对误差为 18.4%。

**关键词** 激光技术; 复合材料; 热应力; 数值模拟; 应变测量

**中图分类号** TN249; TB332

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201239.0103004

## Numerical Simulation and Experiment Contrast about Laminated Plate under Laser Irradiation

Zhu Kai Long Lianchun

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology,  
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract** Through the simulation of laminated plate irradiated by laser, the distribution of stress and strain is found. Firstly, temperature field is gotten through numerical simulation, and then the thermal stress and strain are obtained by inputting the temperature field to the analysis model. The result shows that stress along the fiber decreases after the transition from the maximum tensile stress at the center point to the minimum compressive stress at the point about 5 mm away from the edge of the laser spot; stress perpendicular to the fiber is always compressive stress in the laser spot and the surrounding area; Mises stress reaches the maximum at the center point and decreases with the increase of the distance to the center point. Thermal strike causes the fluctuation, and the larger the laser intensity, the earlier the fluctuation happens. In order to verify the numerical model, the strain gauges are stuck around the laser spot on the front face of laminated plate under laser irradiation. The strains of the points are tested with dynamic strain instrument. The strain of simulation coincides with experiment nicely, the maximum relative error is 18.4% between the simulation and experiment results.

**Key words** laser technique; composite material; thermal stress; numerical simulation; measurement of strain

**OCIS codes** 140.3330; 140.6510; 350.1820

## 1 引言

碳纤维/环氧树脂基复合材料因其具有高比强度、耐腐蚀、高韧性等特点被应用于汽车、航空航天、

国防等领域<sup>[1]</sup>, 在这些领域中碳纤维复合材料板的激光加工和激光辐照响应研究得到了越来越多的重视。激光辐照复合材料结构产生局部急剧升温、材

收稿日期: 2011-06-27; 收到修改稿日期: 2011-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(10972013) 资助课题。

作者简介: 朱 凯(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光辐照复合材料结构响应方面的研究。

E-mail: missedboy@126.com

导师简介: 龙连春(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事多学科分析与优化及超常环境下材料和结构的力学行为等方面的研究。E-mail: longlc@bjut.edu.cn

料熔融、烧蚀、气化等现象,损伤破坏机理复杂。以往的研究工作多以实验观测为主、辅以数值模拟分析。在实验研究方面,文献[2~4]探讨用连续或脉冲激光对复合材料板钻孔的现象和规律,分析主要参数的影响。Pan 等<sup>[5]</sup>以实验为基础,研究激光切割复合材料时的热影响区及热损伤程度。黄国君等<sup>[6,7]</sup>针对复合材料试件受力载荷及激光辐照联合作用的情况总结试件破坏阈值和机理。黄永光等<sup>[8]</sup>对激光辐照复合材料结构的烧蚀过程进行了观测,发现在低功率密度(50 W/cm<sup>2</sup>)激光辐照下主要是表面烧蚀。在数值模拟分析方面,马良等<sup>[9]</sup>针对激光立体成形工艺进行了有限元模拟,张剑等<sup>[10]</sup>用三维有限元模型分析了材料板的热变形,并通过实例验证了模型的准确性;强希文等<sup>[11]</sup>用数值方法和解析方法研究了不同激光参数与温度及热应力的关系;姜银方等<sup>[12]</sup>通过有限元模拟方法研究了激光冲击材料表面形成残余应力洞的机理;Lachaud 等<sup>[13]</sup>从微观、细观及宏观角度模拟了复合材料激光烧蚀的物理化学过程。

目前针对复合材料层合板在激光光斑辐照下的研究多集中在响应结果的观测与模拟方面<sup>[14]</sup>,对于结构响应基础的应力应变场的研究相对较少。本文对碳纤维/环氧树脂基复合材料层合板在激光光斑辐照下的应力应变进行了研究,获得了应力应变场变化规律及其与光斑半径等参数间的关系。

## 2 层合板热应力分析基本理论

考虑变形为无限小的单连通或多连通连续介质。在任一时刻  $t$ , 物体任一点  $x$  处的热及力学响应可由绝对温度  $T = T(x_k, t)$ 、位移场  $u_i = u_i(x_k, t)$ 、应力张量  $\sigma_{ij} = \sigma_{ij}(x_k, t)$ 、无限小应变张量  $\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}(x_k, t)$ 、单位质量的体力  $f_i = f_i(x_k, t)$ 、单位质量的内能  $e = e(x_k, t)$ 、单位质量获得的热源能量  $r = r(x_k, t)$ 、单位质量的熵  $S = S(x_k, t)$ 、热流向量  $h_i = h_i(x_k, t)$  和质量密度  $\rho = \rho(x_k, t)$  等 32 个状态变量来描述。 $i, j, k$  均取值为 1、2、3, 并遵循张量求和约定。上述状态变量满足以下关系式:

质量守恒

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

线动量守恒

$$\frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} + \rho f_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}, \quad (2)$$

角动量守恒

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji}, \quad (3)$$

能量守恒

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} = \sigma_{ij} \frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial t} - \frac{\partial h_i}{\partial x_i} + \rho \frac{\partial r}{\partial t}, \quad (4)$$

熵增不等式

$$\rho \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial (h_i/T)}{\partial x_i} - \rho \frac{1}{T} \frac{\partial r}{\partial t} \geq 0, \quad (5)$$

傅里叶定律

$$h_i = -k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j}, \quad (6)$$

几何方程

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (7)$$

式中  $k_{ij}$  为热传导系数。除此之外因具体分析的问题不同还可能有与非弹性变形相关的材料内变量演化方程。

由上述基本方程组可以推导出各向异性的热传导方程为

$$\beta_{ij} T \frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial t} + \alpha_v \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) - \rho \frac{\partial r}{\partial t} = 0, \quad (8)$$

式中  $\beta_{ij}$  为应力-温度系数。

涉及温度与变形的胡克定律,即 Duhamel-Neumann 定律为

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ij}^R + D_{ijkl} \epsilon_{kl} - \beta_{ij} (T - T_0), \quad (9)$$

式中  $D_{ijkl}$  为弹性模量张量,  $T_0$  为初始温度。

(2)、(7)、(8)和(9)式连同相应的初始、边界条件就构成了各向异性的热弹性体热力耦合分析的控制方程。

在具体的求解过程中可以进行简化,省略方程组中部分温度-变形的耦合项,单独由热传导初值、边值问题求得温度场,然后将温度场换算成为已知载荷,再求解物体变形运动控制方程,进而得到整个热-力问题的解。

在激光辐照层合板分析中,在板的厚度方向上可以将热传导模型简化为一维进行求解,即每一层根据激光能量的空间分布规律近似按照傅里叶传热方式向下传导。求解随时间变化的温度运用增量法<sup>[15]</sup>,利用先求得的节点温度,再转化为力载荷进行求解。

对于本文所用模型,热物性参数随材料温度升高而变化,为了保证分析精度,需要将分析过程划分为较小的步长进行计算,在每个步长内可近似用静态温度场的方法进行应力应变求解。

### 3 激光辐照复合材料层合板热应力数值模拟分析

#### 3.1 模型建立及参数选取

分析所用材料的性质参考 T300/AG80。层合板厚 1.5 mm,共 10 层,铺层方向为 $[\pm 45^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ]_s$ 。纤维纵向热传导系数  $9.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,横向热传导系数  $0.95 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。用 Abaqus 有限元软件的八节点双线性二次热壳单元建立层合板分析模型,考虑到铺层方式关于板厚中心对称,将具有相同铺层方向的第 5 和第 6 层合并成一层,即第 5 层。用 Fortran 编写表面激光热加载程序。激光功率密度均为  $50 \text{ W}/\text{cm}^2$ ,辐照时间 5 s,按照激光光斑半径为 10、20 和 30 mm 三种情况对模型编号为 1#、2# 和 3# 试件,各光斑中心位于试件第 1 层的表面中心,在各试件第 1 层及第 9 层光斑外施加自由换热边界条件。有限元模型如图 1 所示,模型尺寸  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$ ,4 个角点施加垂直于板面的位移约束,模型中垂直方向为有 4 个  $0^\circ$  铺层的方向,称为试件的  $0^\circ$  方向,与  $0^\circ$  方向垂直的水平方向为试件的  $90^\circ$  方向。弹性模量试验测定值见文献[16]表 2-1,热物性参数参考文献[17]。

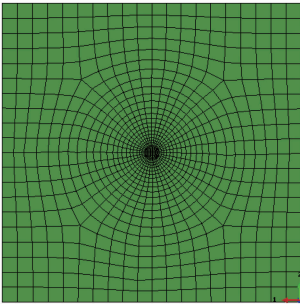


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite element model

#### 3.2 激光辐照层合板应力场分析

由于不同半径光斑辐照后在板的各层内应力分布情况相似,以各试件第 5 层为例分析层合板在激

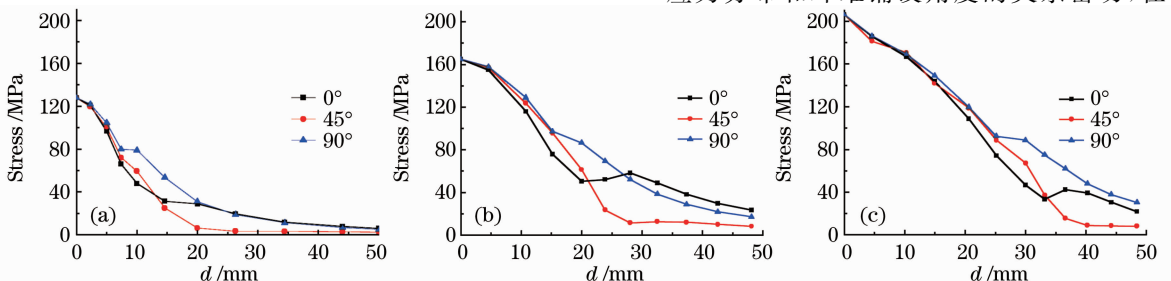


图 4 各试件第 5 层 Mises 应力。(a) 1#; (b) 2#; (c) 3#

Fig. 4 Mises stress of every sample's fifth layer. (a) 1#; (b) 2#; (c) 3#

光辐照 5 s 时的各层应力分布,该层纤维铺设角度为  $0^\circ$  方向,垂直于纤维的方向为  $90^\circ$  方向,在各模型第 5 层从光斑中心向外选取这两个方向路径上应力的变化情况整理如图 2、3 所示。

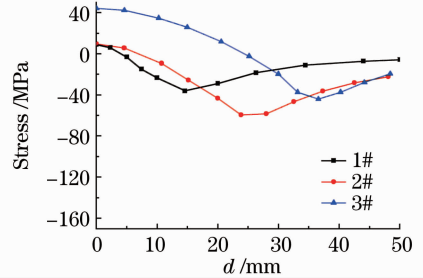


图 2 试件第 5 层纤维方向应力

Fig. 2 Stress along the fiber of samples' fifth layer

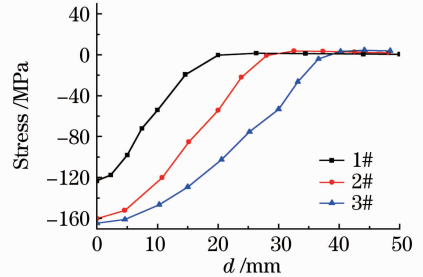


图 3 试件第 5 层垂直纤维方向应力

Fig. 3 Stress perpendicular to the fiber of samples' fifth layer

由于纤维方向和垂直纤维方向的热传导及热膨胀性能差别很大,因此从图 2、3 中可看出两个方向路径上的应力变化有很大差异。图 2 为纤维方向的应力分布,图中光斑中心处均为拉应力,从光斑中心沿纤维方向向外,拉应力逐渐减小并过渡到压应力,到光斑外距光斑边缘约 5 mm 处,达到最大压应力,而后再逐渐减小。图 3 为垂直纤维方向的应力分布。由于材料在该方向的热膨胀系数大,光斑及其附近范围内的应力均为压应力,最大压应力在光斑中心位置。

应力分布和纤维铺设角度的关系密切,在考虑

材料受激光辐照的响应时,在试件的 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 三个方向的路径上 Mises 应力也有差异,并且这种差异在光斑边缘附近最明显(图 4)。这是由于垂直纤维方向的热膨胀系数远大于纤维方向的热膨胀系

数,并且层合板外围材料对膨胀有约束作用。较大的应力分布在以纤维方向和垂直于纤维方向为轴的十字状区域内(图 5)。

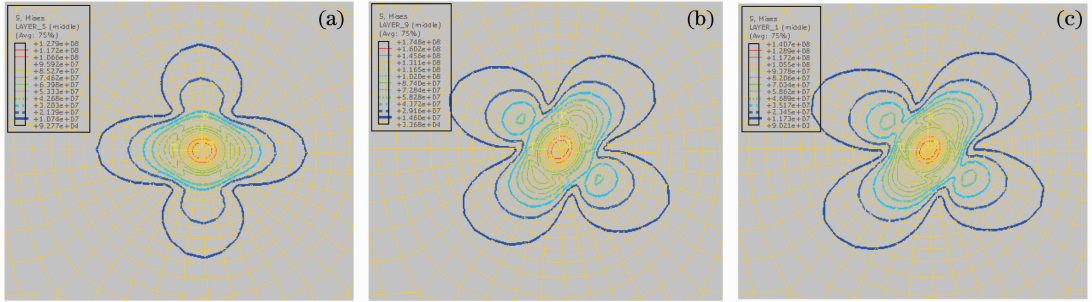


图 5 1# 试件 Mises 应力等值线。(a) 第 5 层;(b) 前表面;(c) 后表面

Fig. 5 Isoline chart of Mises stress in sample 1#. (a) The fifth layer; (b) front face; (c) back face

各层的最大应力在板的中心位置(即光斑中心),该位置应力从辐照面(第 1 层)沿板厚方向在各层中的分布情况如图 6 所示。可以看出,在各试件中最大应力并不是出现在辐照表层,而是出现在沿板的横向(即试件 $90^\circ$ 方向)铺层的第 4 层,这是由各层材料的各向异性导致的。

稳定。在冲击过程结束后,各点的应力都会随时间增加而增大,并且增大的趋势也是按照 1:2:3 等比例变化。光强越大,同一点产生的应力也越大。

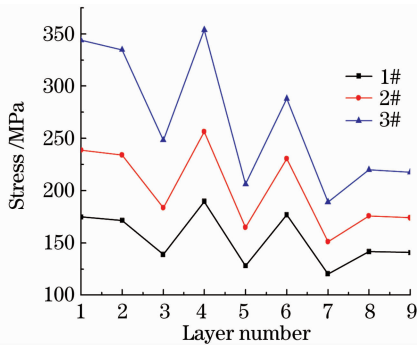


图 6 试件各层中心 Mises 应力

Fig. 6 Mises stress in the center of all layers of the samples

### 3.3 激光光强对应力场的影响

激光器各种参数的改变对层合板应力的影响最终都将表现在不同光强对层合板的影响上,因此分析不同光强辐照下层合板的应力对研究激光参数改变引起的结构响应尤为重要。以 1# 试件第 5 层光斑中心和  $1/2$  光斑半径上  $0^\circ$ 、 $90^\circ$  方向的 3 个点的应力随时间变化为例来分析(图 7~9),激光光斑的功率密度按照 1:2:3(即 50、100、150  $\text{W}/\text{cm}^2$ )设置。

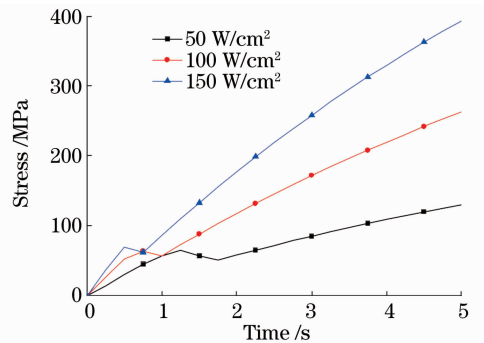


图 7 光强对光斑中心点应力影响

Fig. 7 Effect of laser intensity on Mises stress in the center point

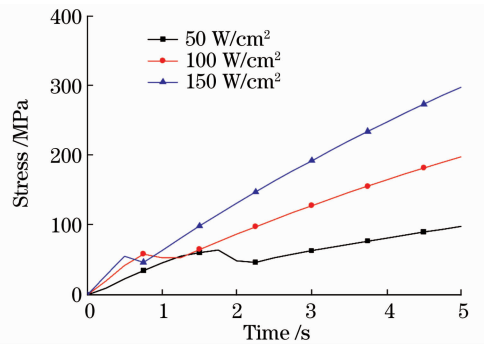


图 8 光强对光斑内纵向点应力影响

Fig. 8 Effect of laser intensity on Mises stress in vertical direction within the spot

从图 7~9 可以看出,在光斑内所取的 3 个点的应力在 3 种光强下都会在照射开始  $0.5\sim 2$  s 内的不同时刻产生应力波动,这是由激光照射开始时在层合板中产生的热冲击造成的,并且光强越大这种冲击造成应力波动的时间点越早。照射初期,各层之间的温差变化剧烈,随着辐照时间增加,逐渐趋于

## 4 激光辐照复合材料层合板应变的试验验证

为了解数值模拟分析的准确性,将数值模拟中

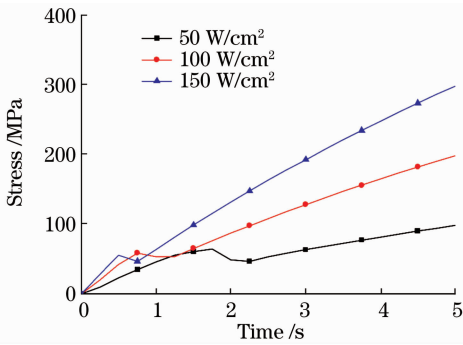


图9 光强对光斑内横向点应力影响

Fig. 9 Effect of laser intensity on Mises stress in horizontal direction within the spot

所用材料层合板加工成同样尺寸的试件进行试验测试,取得激光辐照面应变场分布变化情况,并同数值模拟中相应应变片位置点的应变进行对比。激光辐照时热量从试件光斑向外传导,使试验中各应变片受热膨胀而影响试验数据的准确性。为了消除温升对应变的影响,相应的试验数据处理方法参考文献[18]。试验用Nd:YAG连续输出激光器,激光波长1064 nm。所用应变片型号为BX120-2AA。应变仪采用IMC公司的CRONOS-PL2-DIO型动态应变仪系统,对激光辐照下的复合材料层合板进行应变测量。为表达方便,对应变片进行编号,如图10所示。以光斑半径最小的1#试件辐照面的贴片位置及编号为基础,当光斑半径扩大并照射到外围应变片位置时,在相应试件上将光斑内该圈应变片取消,其余应变片贴片位置及编号不变。

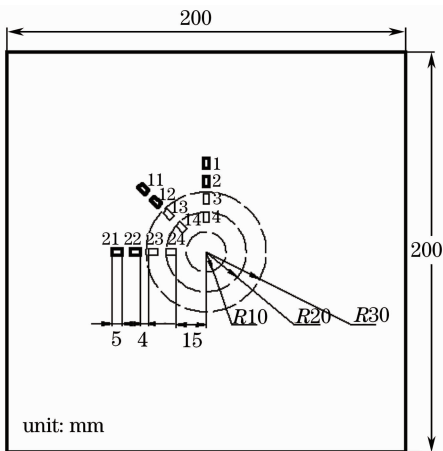


图10 贴片示意图

Fig. 10 Distribution map of strain gauges

数值模拟与试验测试值吻合较好,其中最外侧应变的模拟值与实测值吻合最好,相对误差均在5%以内。随着测试点的位置逐渐接近光斑中心,模拟值与实测值间的相对误差逐渐增加,但多数点的

误差仍在10%以内,其中最大相对误差为18.4%。从三个方向选取的3个点的实测应变与模拟应变随时间变化情况如图11所示。

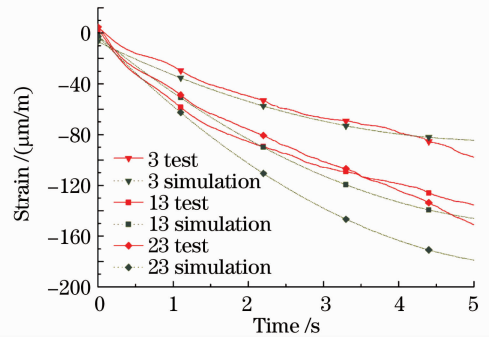


图11 数值模拟应变与测试应变对比

Fig. 11 Strain comparison between test and simulation

## 5 结论

1) 在每一铺层内,沿纤维方向的应力在光斑中心位置为拉应力,从中心向外拉应力逐渐减小并转变为压应力,在光斑边缘外的5 mm处压应力达到最大值,而后逐渐减小。垂直纤维方向的应力在光斑及其附近范围内均为压应力,且光斑中心位置有最大压应力。光斑中心处的Mises应力最大,各方向上的点的Mises应力均随到光斑中心的距离增加而逐渐减小。

2) 激光辐照的初期,热冲击使各点的应力产生波动,光强越大,波动的时间点越早。

3) 数值模拟结果与试验测试应变进行了对比,多数点应变吻合较好,距光斑中心最近的同心圆位置上的点误差最大,最大相对误差为18.4%。

## 参考文献

- Chen Ping, Yu Qi, Sun Ming *et al.*. Advances in high performance FRTP composites [J]. *Fiber Composites*, 2005, **22**(2): 52~57  
陈平,于祺,孙明等.高性能热塑性树脂基复合材料的研究进展[J]. *纤维复合材料*, 2005, **22**(2): 52~57
- W. S. O. Rodden, S. S. Kudesia. A comprehensive study of the long pulse Nd:YAG laser drilling of multi-layer carbon fibre composites[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **210**(3-6): 319~328
- T. Hirogaki, E. Aoyama, H. Inoue. Laser drilling of blind via holes in aramid and glass/epoxy composites of multi-layer printed wiring boards[J]. *Composites*, 2001, **32**(7): 963~968
- T. O. Young, D. Driscoll. Impact of Nd:YAG laser drilled holes on the strength and stiffness of laminar flow carbon fibre reinforced composite panels[J]. *Composites*, 2002, **33**(1): 1~9
- C. T. Pan, H. Hoehng. The anisotropic heat-affected zone in the laser grooving of fiber-reinforced composite material[J]. *J. Mater. Process. Technol.*, 1996, **62**(1-3): 54~60
- Huang Guojun, Yang Zhixing, Duan Zhuping. Investigation on the fracture threshold of woven carbon-fiber/epoxy plates under mechanical loading and heating by incident laser beams[J]. *High*

- Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(6): 677~681
- 黄国君, 杨治星, 段祝平. 激光-载荷联合作用下碳纤维/环氧树脂板的断裂阈值研究[J]. *强激光与粒子束*, 1999, **11**(6): 677~681
- 7 Chen Ming, Long Lianchun, Liu Shibing *et al.*. Destruction of composite material under tensile pre-stressing and laser irradiation [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2010, **27**(2): 412~417
- 陈明, 龙连春, 刘世炳等. 激光辐照与拉伸预应力作用下复合材料试件的破坏研究[J]. *应用力学学报*, 2010, **27**(2): 412~417
- 8 Huang Yongguang, Liu Shibing, Long Lianchun *et al.*. 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
- 黄永光, 刘世炳, 龙连春等. Nd:YAG 连续激光烧蚀碳纤维复合材料的过程观测[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 2042~2046
- 9 Ma Liang, Huang Weidong, Yu Jun *et al.*. Parametric finite element model of temperature/stress field evolution by metal laser solid forming[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(12): 3226~3232
- 马良, 黄卫东, 于君等. 金属激光立体成形热应力场参数化有限元模型[J]. *中国激光*, 2009, **36**(12): 3226~3232
- 10 Zhang Jian, Li Sijian. Thermal stress of composite laminated structure with a large number of layers [J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 1997, **18**(4): 359~364
- 张剑, 李思简. 复合材料大层层数合板热变形热应力有限元分析[J]. *固体力学学报*, 1997, **18**(4): 359~364
- 11 Qiang Xiwen, Zhang Jianquan, Liu Feng *et al.*. Thermal stress damage of semiconductors induced by laser beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **27**(8): 709~713
- 强希文, 张建泉, 刘峰等. 强激光辐照半导体材料的温升及热应力损伤的理论研究[J]. *中国激光*, 2000, **27**(8): 709~713
- 12 Jiang Yinfang, Lai Yanling, Zhang Lei *et al.*. Investigation of residual stress hole on a metal surface by laser shock [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(8): 2073~2079
- 姜银方, 来彦玲, 张磊等. 激光冲击材料表面残余应力洞形成规律与分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(8): 2073~2079
- 13 J. Lachaud, Y. Aspa, L. Gerard. Analytical modeling of the steady state ablation of a 3D C/C composite [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, **51**(9-10): 2614~2627
- 14 Sun Chengwei. Response of Laser Irradiation [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 202~260
- 孙承伟. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 202~260
- 15 Chen Yanbei, Lu Jian, Ni Xiaowu. Temperature and thermal stress fields during the laser irradiating a metal plate [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2007, **35**(s1): 129~132
- 陈彦北, 陆建, 倪晓武. 激光作用金属板材的温度场和热应力场[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2007, **35**(s1): 129~132
- 16 Chen Ming. Response Analysis and Experimental Test of Composite Structure Irradiated by Laser [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010, 13~14
- 陈明. 激光辐照下复合材料结构的响应分析与试验测试[D]. 北京: 北京工业大学, 2010, 13~14
- 17 Zhang Junhua, Sheng Zuming, Sun Jitong. Missile and Launch Vehicle Composite Structure Design Guidelines [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1999. 14~35
- 张骏华, 盛祖明, 孙继桐. 导弹和运载火箭复合材料结构设计指南[M]. 北京: 宇航出版社, 1999. 14~35
- 18 Yin Fuyan. Correction technique for high temperature strain gauge under transient heating conditions [J]. *Structure & Environment Engineering*, 2005, **32**(1): 36~42
- 尹福炎. 瞬态加热条件下高温应变计测量误差修正方法[J]. *强度与环境*, 2005, **32**(1): 36~42

栏目编辑: 韩峰