第 33 卷 第 1 期 2022 年 1 月

DOI:10.16136/j.joel.2022.01.0317

基于激光热弹效应的碳纤维增强树脂复合材料 缺陷检测机理研究

葛 进1,程小劲1*,尚建华2

(1.上海工程技术大学机械与汽车工程学院,上海 201620; 2.东华大学信息科学与技术学院,上海 201620)

摘要:碳纤维增强树脂基复合材料(carbon fiber reinforced resin polymer,CFRP)在周期载荷作用下 产生的基体裂纹、纤维断裂等微损伤的累积会严重影响 CFRP 的力学性能,微损伤尺寸较小且位 置分散,传统的无损检测方法难以准确识别。激光超声检测技术具有非接触、检测速度快、测量 范围广等优点,特别是结合激光的远距离激励和大角度入射的优势,在大尺寸、曲面形式结构材 料的损伤检测方面有巨大的潜力。本文基于激光热弹效应,在分析激光作用到 CFRP 后的温度、 应力和位移场分布的基础上,对 CFRP 内部超声波的产生过程和传播特性进行了系统研究。并通 过对 CFRP 中不同处存在缺陷时的超声波回波信号的分析比较,得到缺陷位置与回波信号特性之 间的对应关系,从而实现从回波信号特征反演出 CFRP 中缺陷位置的关键信息。

关键词:激光超声;热弹效应;碳纤维增强树脂基复合材料(carbon fiber reinforced resin polymer, CFRP);损伤检测

中图分类号:TB332;TG115.28 文献标识码:A 文章编号:1005-0086(2022)01-0083-08

Study of defect detection mechanism of carbon fiber reinforced polymer based on laser thermoelastic effect

GE Jin¹, CHENG Xiaojin^{1*}, SHANG Jianhua²

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 2. School of Information Science & Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: The accumulation of micro-damage such as matrix crack and fiber fracture in carbon fiber reinforced polymer (CFRP) under cyclic loading will seriously affect the mechanical properties of CFRP. The size of micro-damage is small and the locations of micro-damage are scattered, which are difficult to be accurately identified by traditional nondestructive testing methods. Laser ultrasonic detection technology has the advantages of non-contact, fast detection speed, wide measurement range, et al. Especially combined with the advantages of laser long distance excitation and large angle incidence, it has a great potential in the damage detection of large size and curved structure materials. Based on the thermoelastic effect of laser, the generation process and propagation characteristics of ultrasonic wave in CFRP are systematically studied on the basis of analyzing the distribution of temperature, stress and displacement field after laser is applied to CFRP. Through the analysis and comparison of ultrasonic echo signals with defects in different places in CFRP, the corresponding relationship between defect position and echo signal characteristics is obtained, so as to realize the reverse performance of the key information of defect position in CFRP from the echo signal characteristics.

Key words: laser ultrasound; thermoelastic effect; carbon fiber reinforced polymer (CFRP); damage detection

 ^{*} E-mail:xjcheng@sues.edu.cn
 收稿日期:2021-05-13 修订日期:2021-05-19
 基金项目:国家自然科学青年基金(51403034)资助项目

碳纤维增强树脂基复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP) 是以碳纤维为增强体,以 树脂为基体,经过复合成型制成的结构材料。与 传统的金属材料相比,CFRP具有密度小、比强度/ 比刚度高、耐腐蚀、抗疲劳、耐高温、便于设计及易 于大面积整体成型加工等优点^[1]。CFRP 的优异 性能使得其在军事、民用等多个领域里得到了广 泛的应用。2019年全球碳纤维复合材料市场报告 表明,CFRP用量排名前四的领域分别为风电(约 26%)、航空航天(约23%)、体育休闲(约14%)和 汽车(约11%)^[2]。然而,CFRP是由碳纤维、基体 和界面组成,其细观结构是一个复杂的、不均匀 的、各向异性的多相体系,因此在 CFRP 的生产、 加工和工作过程中,易产生缺陷和损伤,常见的 CFRP 缺 陷 有 孔 隙、分 层、脱 粘、夹 杂、微 裂 纹 等^[3]。缺陷和损伤的存在会显著降低 CFRP 材料 的承载力和服役寿命,给构件的工作安全带来隐 患。因此,需要在 CFRP 材料服役前和在役过程 中对其进行无损检测。

目前用于复合材料无损检测的方法主要有 X 射线检测法、脉冲红外热成像法、微波检测法、声 发射法、涡流检测法及超声检测法等[4]。针对复 杂的大尺寸曲面结构,如航空件机翼等,这些常见 的无损检测方法都难以实现高效的无损检测[5]。 20世纪90年代后,随着复合材料的快速发展,激 光超声技术在复合材料缺陷检测中的应用潜力得 到越来越多研究人员的关注。TITTMANN 等^[6] 在研究复合材料中激光超声的波形和频谱的基础 上,分析了检测过程中噪声对灵敏度的影响,并讨 论了激光超声用于复合材料分层缺陷检测的可行 性。WRIGHT 等^[7]采用透射法对碳纤维复合材 料孔隙缺陷进行 C-Scan 检测,得到了缺陷的形状 和分布特征。在国内,许伯强[8]采用有限元法建 立了层状材料的脉冲激光热弹性激发检测的理论 模型,通过理论分析和数值计算研究了激光超声 的产生和传播过程以及激光超声波的波形特征。 杜丽婷等[9]研究了激光超声激励技术,并在表面 未经过处理的不同厚度复合材料中进行了激光超 声的激励实验。袁玲等[10]提出色散曲线包含弹 性性质变化趋势的信息,为材料仅表面弹性性质 的反演分析提供了理论基础。周正干等[11,12]采用 Nd:YAG 脉冲激光器和双波混合激光干涉测量仪 的激光超声检测系统,利用穿透法对碳纤维树脂 基复合材料内部分层缺陷进行了激光超声C扫描 检测,得到缺陷的形状、位置和分布特征,同时还

将激光超声技术用于航空复合材料的分层、层状 粘接结构、材料表面缺陷、焊点等的检测。

综上所述,激光超声检测技术为 CFRP 的实时、无损检测提供了一种新的检测方法。尤其是 针对曲面形式的航空层合结构,该技术满足未来 无损检测高自动化程度和高扫查效率的发展方 向。国内外的研究人员已针对激光超声检测复合 材料缺陷方面做了一定的研究,并取得了很多有 意义的成果。但对于在周期载荷作用下会产生基 体裂纹和纤维断裂等微损伤的检测,相关研究较 少,这类微损伤的累积严重影响复合材料的力学 性能和使用寿命。本文基于热弹效应,并借助有 限元分析软件 COMSOL 中的热-固耦合物理场, 建立了二维的激光超声无损检测模型,分别对单 层的树脂材料和双层的碳纤维复合材料进行了激 光超声微损伤机理的研究。

2 理论模型

图1所示的是激光超声激发的 CFRP 双层模型 图,碳纤维复合材料的上表层为各向同性的树脂层, 下层为各向异性碳纤维层。当脉冲激光作用到树脂 层后,会在其内部形成一个温度场,这个热源会导致 材料发生瞬态的应力场,从而产生激光超声,应力场 的膨胀和收缩会在材料内部各个方向传播,逐渐由 树脂层传递到碳纤维层。



图 1 激光超声激发的 CFRP 双层模型图 Fig. 1 Double layer model of CFRP excited by laser ultrasound

多层碳纤维增强树脂复合材料的内部热传导可 以用经典热传导方程来表示^[13]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \big[\rho_i c_i T_i(r, z, t) \big] = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \big[r k_i \frac{\partial T_i(r, z, t)}{\partial r} \big] + \frac{\partial}{\partial z} \big[k_i \frac{\partial T_i(r, z, t)}{\partial z} \big], \qquad (1)$$

式中, $\partial T_i(r,z,t)$ 为t时刻材料i的不同位置处的瞬时温度变化情况, ρ_i 为材料的密度, c_i 为材料的比热

容, k_i 为材料的热传导系数, i 表示第i 层的材料 参数。

对于复合材料来说,光学穿透效应的存在会导 致激光辐射进入材料内一定深度,材料对激光能量 吸收随着入射深度呈指数衰减。激光的光学穿透深 度与材料本身属性,激光波长有关。当激光照射在 材料表面时,热源Q可表示为:

 $Q = \beta(1-R)I_0 e^{-\beta t} f(r)g(t),$ (2) 式中,β为材料的吸收系数(1/β为光学穿透深度),R 是材料的表面反射系数, I_0 是入射光的光强,对于本 文选取1064 nm 波长的激光,其 CFRP 的吸收率为 0.8^[14]。f(r)是激光脉冲的空间分布,g(t)是激光脉 冲的时间分布:

$$f(r) = \exp(-\frac{r^2}{r_0^2}),$$
 (3)

$$g(r) = \frac{t}{t_0} \exp(-\frac{t}{t_0})_{0}$$
(4)

在相邻两层界面处需要满足温度和热流连续,即:

$$T_{i}(r,z,t) = T_{i+1}(r,z,t), z = \sum_{j=1}^{i} h_{j}, \qquad (5)$$
$$-k_{i} \frac{\partial T_{i}(r,z,t)}{\partial z} = -k_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}(r,z,t)}{\partial z}, z = \sum_{j=1}^{i} h_{j}. \qquad (6)$$

对树脂材料来说,初始条件为:

$$-k\frac{\partial T(r,z,t)}{\partial z}\Big|_{z=0,h} = 0.$$
⁽⁷⁾

碳纤维和金属在吸收激光能量的情况相似,由 于趋肤效应,只发生在材料的表面,则初始条件为:

$$-k\frac{\partial T(r,z,t)}{\partial z}\Big|_{z=0} = Q_{\circ}$$
(8)

当材料被激光辐射后,在热弹机制下,会在材料 被照射区域的表面产生温度变化,并且自上而下形 成温度梯度差场,由于局部区域温升不均匀,会在材 料内部产生应力场和位移场。基于热弹理论,在热 弹性体中满足 Navier-Stokes 方程^[15]:

$$(\lambda_{i} + 2\mu_{i}) \nabla (\nabla \cdot U_{i}) - \mu_{i} \nabla \times \nabla \times U_{i} - \alpha_{i} (3\lambda_{i} + 2\mu_{i}) \nabla T_{i}(r, z, t) = \rho_{i} \frac{\partial^{2} U_{i}}{\partial_{z}^{2}}, \qquad (9)$$

式中,λ_i、μ_i分别表示材料 *i* 的 Lame 常数;*α_i* 表示材料 *i* 热膨胀系数。其上下表面应满足应力的自由边界条件:

$$n \cdot \left[\sigma_{1} - (3\lambda_{1} + 2\mu_{1})\alpha_{1}T_{1}(r, z, t)I\right] = 0, z = 0,$$
(10)
$$n \cdot \left[\sigma_{N} - (3\lambda_{N} + 2\mu_{N})\partial_{N}T_{N}(r, z, t)I\right] = 0,$$

$$z = \sum_{i=1}^{N} h_i, \qquad (11)$$

式中,*n* 表示垂直表面的单位向量,*I* 表示单位张量,*o* 表示应力张量。其初始条件如下:

$$U_{i}(\boldsymbol{r},\boldsymbol{z},t)\left|_{t=0} = \frac{\partial U_{i}(\boldsymbol{r},\boldsymbol{z},t)}{\partial t}\right|_{t=0} = 0. \quad (12)$$

3 分析与讨论

直接求解热传导和热弹方程是较为困难的,使 用有限元方法模拟由激光产生的超声波在样品体内 的传播是近年来迅速发展起来的数值技术,它不仅 能对复杂结构和介质中的声场分布进行模拟,而且 能够建立激光输入参数和产生的超声波特征之间的 定量关系。表 1、2、3 为计算中用到的复合材料板、 光源和模型等主要参数。

表1给出了碳纤维环氧树脂复合材料板的机械和热学特性参数。在分析中采用的激光源(如表2 所示):使用点光源,激光的波长为1064 nm,脉冲宽 度为14 ns,重复频率为20 Hz,单次脉冲的能量为 3 mJ。激光作用的函数可以等效为时间分布和空间 分布的函数,激光脉冲在空间上服从高斯分布,激光 光源半径取15 μ m,脉冲激光的上升时间取10 ns。 材料测量点与脉冲激光作用中心的距离,取1 mm。 CFRP的模型参数(如表3 所示):采用的双层 CFRP 的长 M_2 为 50 mm,宽度 H_1 为 30 mm,其中树脂层 厚度 H_2 为 10 mm,碳纤维层 H_3 为 20 mm,探针距 离边界的距离 M_1 为 10 mm。

表 1 碳纤维环氧树脂复合材料板主要参数 Tab, 1 Main parameters of CFRP

Material	Carbon fiber	Epoxy
Conductivity/W • (m • K^{-1})	{12,12,15}	0.2
Density/kg • m^{-3}	1 500	1 200
Young's modulus/GPa	{30,30,10}	3.5
Poisson's ration	0.32	0.35
Expansion/K	$\{1, 1, 1, 2\} \times 10^{-6}$	2×10^{-5}
Specific heat/J ${\mbox{\cdot}}\ (\mbox{kg} {\mbox{\cdot}}\ \mbox{K})^{-2}$	1 500	981

表 2 光源参数

Га b. 2	Light	source	parameters

Parameter	Numerical value
Wavelength	1064 nm
Pulse width	14 ns
Repetition rate	20 Hz
Single pulse energy	3 mJ
Rise time of pulse laser	10 ns
Radius of light source	$15 \ \mu m$

表 3 模型参数 Tab. 3 Model parameters

Parameter	Symbol	Numerical value
Length	M_2	50 mm
Width	H_1	30 mm
Thickness of resin layer	H_2	10 mm
Thickness of carbon fiber layer	$H_{\scriptscriptstyle 3}$	20 mm
Probe distance	M_1	10 mm

3.1 树脂内部超声波的产生

基于上述模型及理论,给整个模型赋予树脂材 料参数,便可得到激光作用于树脂内部超声波产生 的温度、二维应力波、表面应力及应力位移图,如图 2 所示。从图 2(a)中,可以明显看出,只有激光照射区 域及激光中心小范围内有明显的温升,其温度最高 处可达413K,远离照射区域温度并未发生明显变 化。图 2(b)则为图 2(a)截取部分的温度等值线放大 图,可以看出激光作用于树脂上表面时在 1.7E-7S 的实时温度情况,其中线条为温度等值线,能够看出 其温度最高达到了 430.18 K,处于激光入射的正中 心处,其往下传播温度不断地降低,正是这种热的变 化产生了超声波。在图 2(c)中能够清楚地看到 3 种 不同模式的声波:横波(S wave)、纵波(L wave)、表 面波(R wave)。传播速率最快的是纵波的波阵面, 大约是横波波面的两倍,传播最慢的是表面波,纵波 虽然传播速率快,但其振幅小于横波。图 2(d)为材 料表面应力,树脂的局部表面吸收激光能量后,温度 升高产生局部热膨胀,进而产生瞬态应力,图 2(e)则 为其位移场,在 1.6×10⁻⁶ s 时,其 Y 方向位移达到 了最大值,而随后就逐渐往趋近平衡位置,并且围绕 其上下波动,持续较长一段时间,这是产生的反射回



图 2 树脂内部超声波的产生:(a)整体温度分布;(b)截取部位温度分布; (c)二维应力波;(d)表面应力;(e)应力位移图

- Fig. 2 Generation of ultrasonic wave in resin: (a) Overall temperature distribution;
 - (b) Temperature distribution of the intercepted part;
 - (c) Two dimensional stress wave; (d) Surface stress;

(e) Stress displacement diagram

波导致的。最终应力消失,回归最初状态。

3.2 超声波在双层 CFRP 内的传播

超声波在双层 CFRP 中的传播主要是经历了两种不同属性的材料。首先超声波的传播发生在树脂层,然后由树脂层向下传播,经过树脂与碳纤维的结合处,最后再传递至各向异性的碳纤维层。由于层数增加,超声波在任意一层均发生复杂的多重反射现象,因此相比单层介质,多层介质中的声波传播更为复杂。

在结合处由一种材料向另一种材料过渡,这中 间波形会发生较大的改变。如超声波在树脂和双层 CFRP 中的 Y 方向位移对比图 3 所示,首先在传播 的初期,两种材料的传播曲线图很相似,但是在1.2 ×10⁻⁶ s 时,波形开始出现了变化,双层 CFRP 出现 了小范围的上下波动,说明此时超声波正从树脂层 传递至碳纤维层,因为波形发生突变,两种材料的本 身属性的不同导致超声波的传播发生了改变。在 1.6×10⁻⁶ s 时两超声波都到达了 Y 方向上位移最 大值,但是双层 CFRP 稍弱于单层树脂的位移,这是 超声波在经过了树脂层后进入各向异性的碳纤维层 发生了一部分的反射和折射导致能量有所损耗,表 现为其Y方向上的位移相对减少。而 1.8×10⁻⁶ s 反射回的波双层 CFRP 的波峰明显高于单层树脂, 这是因为声速在碳纤维中的传播速度明显高于树 脂, 目Y方向位移相对较小,导致其反射后Y方向上 的位移明显大于树脂。在后续的波形变化中,也都 是双层 CFRP 的振幅明显高于树脂材料,波形变化 也较为明显。



Fig. 3 Comparison of *Y*-direction displacement in resin and double-layer CFRP



选择 0.5×0.2 mm 大小的缺陷,缺陷分布示意

图如图 4 所示,分别设置在碳纤维复合材料的不同 位置。图 5(a)—(d)给出了碳纤维复合材料不同位 置的缺陷仿真超声信号,探针处得到的材料 Y 方向 上的位移。其中 L、R、Rr、SR 信号峰分别表示纵波、 表面波、脉冲回波、缺陷底端的反射横波的Y方向上 的位移。通过图 5(b)的对比可以看出:当缺陷出现 在树脂层表面时,L波的峰值不变,但是到达时间相 对于无缺陷 L 波有延迟, R 波、Rr 波和 SR 波都会提 前到达且峰值小于无缺陷图,这是由于缺陷存在于 材料表面,波的传播会很快受到影响,具体表现为激 光产生的应力波遇到缺陷会立刻发散开来,反射回 来的波会对正常传播的波有抵消,导致了波的能量 降低,表现为峰值变小。由图 5(c)可以发现,L 波和 R 依旧保持原状,但 Rr 波峰值会降低,SR 波的峰值 会减小,可见当缺陷介于两种不同材料之间时,随着 深度增加,两种材料对于能量的传输效率不同,反射 波能量会有所降低。对于图 5(d),L 波也基本不变, 但是 R 波和 Rr 波的峰值变小, SR 波到达时间有些 许滞后,此处 R 波峰值变小的主要原因是缺陷回波 导致的。

观察到以上波形,发现对于缺陷出现的位置,Rr 波出现的时间具有很明显的反应,针对这种情况,增 加多次仿真实验,缺陷的大小不变,只改变缺陷出现 的深度。从树脂层表面开始,每次加深 0.1 mm,进 行了 10 组数据,记录了不同缺陷深度 Rr 波出现的 时间,如表 4 所示。

通过上述表格分析,能够看出对于缺陷所处的 位置和深度主要依靠 Rr 波出现的时间,相比较无缺 陷的波形, Rr 波出现在 1.5×10⁻⁶ s之前,也就是无 缺陷 Rr 波出现之前,可以判定缺陷出现在树脂层, Rr 波相比无缺陷滞后到达,且处于1.5×10⁻⁶ s至 2×10⁻⁶ s时间内,可以判断缺陷出现在树脂和碳纤



图 4 缺陷分布示意图 Fig. 4 Defect distribution diagram







维交接处, Rr波出现在2×10⁻⁶ s之后, 可以判断缺陷出现在碳纤维层。依靠 Rr 波出现的时间, 可以反演出缺陷出现的部位。

表 4 不同缺陷深度 *Rr* 波出现的时间 Tab. 4 Appearance time of *Rr* wave at different defect depth

Defect location	Defect depth	The occurrence time of Rr wave
Resin layer	0.1 mm	1.36×10^{-6} s
Resin layer	0.2 mm	$1.41 \times 10^{-6} s$
Resin layer	0.3 mm	$1.43 \times 10^{-6} s$
Resin layer	0.4 mm	$1.44 \times 10^{-6} s$
Junction of two materials	0.5 mm	$1.52 \times 10^{-6} s$
Junction of two materials	0.6 mm	$1.61 \times 10^{-6} s$
Carbon fiber	0.7 mm	2.21 \times 10 ⁻⁶ s
Carbon fiber	0.8 mm	2.33 $\times 10^{-6}$ s
Carbon fiber	0.9 mm	2.40 $\times 10^{-6}$ s
Carbon fiber	1.0 mm	2.44 $\times 10^{-6}$ s

3.4 不同激光参数

1) 光斑大小

激光光斑的大小是通过改变其激光半径得以实现,保持激光功率等其他参数不变,然后分别进行了以 5 µm、10 µm、15 µm 和 20 µm 为半径的光斑照射 到材料表面进行仿真,不同激光半径位移场如图 6 所示。



从光斑大小的对比,首先看到的是光斑越大,复 合板吸收的能量越多,产生的超声波越强。并且,可 以看到底面中心处的纵波峰与峰之间的强度的衰减 随着光斑的增大而变小。

2) 能量大小

能量的大小是通过改变激光的入射功率来实现 的,同样采取相同的参数,这里只改变功率密度,分 别采取1000 W/m^2 、5000 W/m^2 、10000 W/m^2 、 50000 W/m² 的功率密度来进行仿真,不同功率的位 移温度变化如图 7 所示。从图 7(a)可以看出,随着

 $\times 10^{\circ}$ 390 1.0 $1\ 000\ W/m^2$ $1 \ 000 \ W/m^2$ 380 Displacement field, Y component/m 0.8 5 000 W/m² $5\ 000\ W/m^2$ 370 10 000 W/m² 0.6 $10\ 000\ W/m^2$ 50 000 W/m² 0.4 360 50 000 W/m² [emperature/K 350 0.2 340 0.0 330 -0.2 320 -0.4 310 -0.6 300 -0.8 -1.0290 0.0 0.5 1.0 1.5 2.5 3.5 2.0 3.0 0.0 0.5 1.0 2.0 3.0 1.5 2.5 Time/s $\times 10^{-6}$ Time/s $\times 10^{-6}$ (a)



4 结 论

本文基于热弹效应,借助有限元软件,对激光作 用到 CFRP 后的温度、应力和位移场分布进行了详 细分析。在此基础上,系统研究了 CFRP 内部超声 波的产生和传播,并对不同位置出现缺陷的超声回 波信号进行了比对分析。研究结果表明,超声波在 树脂材料中传播速率低于碳纤维材料,并且反射衰 减更强。通过对超声回波信号的分析比较发现,当 缺陷位于树脂表层时,相对于无缺陷时,L波有延迟, R 波、Rr 波和 SR 波都会提前到达且峰值减小。当 缺陷位于树脂和碳纤维层之间时,L波和 R 依旧保 持原状,但是 Rr 和 SR 波的峰值会降低。缺陷位于 碳纤维层内部时,L波基本不变,但是 R 波和 Rr 波 的峰值变小,SR 波到达时间滞后。Rr 波出现的时间 与缺陷的深度有密切的对应关系,当树脂层存在缺 陷时, Rr 波出现在 1.5×10⁻⁶ s 之前, 树脂和碳纤维 交接处出现缺陷时, Rr 波出现的时间在 1.5×10⁻⁶ s 至 2×10^{-6} s 之间, 而碳纤维层出现缺陷时, Rr 波出 现的时间在 2×10^{-6} s 之后。因此,可以根据 Rr 波 出现的时间反演出缺陷的位置信息。

参考文献:

- [1] ZHANG H Y, LIU M. Development and application of carbon fiber composites [J]. Application of Engineering Plastics, 2015, 43(11): 132-135. 张菡英,刘明.碳纤维复合材料的发展及应用[J].工程 塑料应用,2015,43(11):132-135.
- [2] YANG X D, GU F, CHEN X. Performance improvement of carbon fiber reinforced epoxy composite sports equipment[J]. Key Engineering Materials, 2021, 871: 228-233.
- [3] DU S Y. Advanced composite materials and aerospace [J]. Journal of Composite Materials, 2007, 24(1): 1-12. 杜善义.先进复合材料与航空航天[J].复合材料学报, 2007,24(1):1-12.
- [4] WANG X Y, QIAN H. Evaluation of major defects and NDT technology in advanced composite materials [J]. NDT,



能量功率的增加,波形没有发生太大变化,但是波的

强度发生了明显的改变。比如,在 0.5×10⁻⁶ s 时,

50000 W/m² 的强度约为 10000 W/m² 的 5 倍,基本

着功率密度增高,可以看到温度明显的差别,1000

W/m² 由于功率较小,只对材料产生 10 K 以内的温

升,而 50 000 W/m²则产生了超过 100 K 的温升,而

外层的树脂至少需要573 K才能被热解,此功率密度

图 7(b)为随着能量增加材料表面温度分布。随

上是强度随着能量呈比例增加。

不会造材料损伤。

```
• 90 •
```

2006,(4):1-7.

王小永,钱华.先进复合材料中的主要缺陷与无损检测 技术评价[J].无损探伤,2006,(4):1-7.

- [5] SHI D H, CHEN Y K, SUN J F, et al. Laser ultrasonic technology and its application in nondestructive testing[J].
 Laser Journal, 2004, 25(5):1-4.
 施德恒,陈玉科,孙金锋,等.激光超声技术及其在无损检测中的应用概况[J].激光杂志, 2004, 25(5):1-4.
- [6] TITTMANN B R,LINEBARGER R S,ADDISON J R C. Laser-based ultrasonics on Gr/Epoxy composite[J]. Journal of Nondestructive Evaluation,1990,9(4):229-238.
- [7] WRIGHT W M D, HUTCHINS D A, GACHAGAN A, et al. Polymer composite material characterization using a laser/air-transducer system[J]. Ultrasonics, 1996, 34:825-833.
- [8] XU B Q. Finite element simulation of laser ultrasonic and inversion of material parameters by neural network method for layered materials[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004:12-15. 许伯强. 层状材料的激光超声有限元模拟和神经网络方 法反演材料参数的研究[D]. 南京:南京理工大学, 2004:12-15.
- [9] DU L T,LIU S P,XIE K W,et al. Study on laser ultrasonic excitation technology [J]. Nondestructive Testing, 2005, 27(6):286-287.

杜丽婷,刘松平,谢凯文等.激光超声激励技术研究[J]. 无损检测,2005,27(6):286-287.

[10] YUAN L, SHEN Z H, NI X W, et al. Numerical analysis of laser excited ultrasonic in materials with gradient change of near surface elastic properties[J]. Journal of Physics, 2007,56(12):7058-7063.

袁玲,沈中华,倪晓武,等.激光在近表面弹性性质梯度 变化的材料中激发超声波的数值分析[J].物理学报, 2007,56(12):7058-7063. [11] ZHOU Z G, SUN G K, LI Z, et al. Application of laser ultrasonic testing technology in composite material testing
[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2012, 17(6):119-122.
周正干,孙广开,李征,等.激光超声检测技术在复合材
對於测电的应用[1] 除尔流理工士学学报, 2012, 17

料检测中的应用[J].哈尔滨理工大学学报,2012,17(6):119-122.

- [12] ZHOU Z, ZHANG K, ZHOU J, et al. Application of laser ultrasonic technique for non-contact detection of structural surface-breaking cracks[J]. Optics & Laser Technology, 2015,73:173-178.
- [13] ZHANG Y. Study on ultrasonic excitation in 3 μm laser and its composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology.2019:30-32.
 张晔.3 μm 波段激光及其复合材料内超声波激励的研 究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019:30-32.
- [14] DICX,SUNYJ,WANGF,et al. Simulation of temperature field in laser cutting carbon fiber composites[J].Laser Technology,2020,44(5):628-632.
 底才翔,孙艳军,王菲等.激光切割碳纤维复合材料的温度场仿真[J].激光技术,2020,44(5):628-632.
- [15] ZUO O Y, WU M P, TANG Y H. Numerical simulation of laser ultrasonic crack detection based on COMSOL[J]. Laser and Infrared, 2020, 50(10): 1164-1171. 左欧阳,武美萍,唐又红. 基于 COMSOL 的激光超声裂 纹检测数值模拟研究[J]. 激光与红外, 2020, 50(10): 1164-1171.

作者简介:

程小劲 (1978-),男,博士,副研究员,硕士研究生导师,主要从事激 光光电子技术、激光检测技术等相关方面的研究.