

利用激光冲击波检测碳纤维材料中的粘接质量

谷卓伟^{1,2} Mathieu Pertont¹ Silvio E. Krugert¹ Martin Lord¹
Alain Blouint¹ Jean-Pierre Monchalint¹

(¹ 加拿大国立研究院工业材料所, 75 de Mortagne blvd, Boucherville, Quebec, Canada, J4B 6Y4)
² 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 碳纤维增强复合材料(CFRP)由于具有出色的力学性能而越来越多地受到关注,但是由于对这种材料粘接结构缺乏有效的无损检测方法而导致其应用受到了局限。发展了一种基于激光冲击波的碳纤维增强复合材料粘接质量无损检测方法。对于一个碳纤维增强复合材料粘接结构,当激光作用在样品表面时,会产生一个冲击波在其中传播,冲击波到达样品后表面时会反射一个稀疏波,并在材料内部形成拉伸。在适当的激光强度下,好的粘接质量将不会受影响;而差的粘接质量将会造成损伤。实验过程中,对样品自由面的速度历史进行了测量,该信号可以反映粘接层的内部损伤情况。这一结论也通过对回收样品的激光超声检测得到了证实。这项技术的发展将使未来碳纤维增强复合材料粘接结构的在线检测成为可能。

关键词 无损检测技术;激光冲击波;粘接质量;碳纤维增强复合材料

中图分类号 TN249;TG115.28 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0308002

Bonding Quality Detection of Composite Structure by Laser Shock Wave

Gu Zhuoweit^{1,2} Mathieu Pertont¹ Silvio E. Krugert¹ Martin Lord¹
Alain Blouint¹ Jean-Pierre Monchalint¹

¹ Industrial Materials Institute, National Research Council of Canada,
75 de Mortagne blvd, Boucherville, Quebec, Canada, J4B 6Y4

² Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract The carbon fiber reinforced polymer (CFRP) is more and more attractive because of its excellent mechanical performances, while the application of CFRP is limited because the non-destructive evaluation method is still not well done. A method based on shock waves produced by a pulsed laser is applied to the evaluation of bond quality of CFRP plates joined by an adhesive layer. A laser shock wave can cause a tension when it propagates through the adhesive/plate interface. A good bond will be unaffected by a certain level of shock wave stress whereas a weaker one will be damaged. In the experiments, the sample surface velocities are optically measured with an interferometer. The signals give a signature of well-bond or bad ones, and are used to obtain an estimate of the bond strength. Results show that the proposed test is able to differentiate bond quality. Laser-ultrasonic measurements made on shocked samples also confirm that weak bonds are revealed by the laser shock wave. The development of this technique will probably make the on line evaluation of CFRP structure possible in the future.

Key words nondestructive evaluation technique; laser shock wave; adhesive bonding quality; carbon fiber reinforced polymer

OCIS codes 120.1880; 160.1245; 120.3180; 120.4630

收稿日期:2010-05-24; 收到修改稿日期:2010-11-01

基金项目:中国留学基金委(CSC)资助课题。

作者简介:谷卓伟(1969—),男,博士,研究员,主要从事脉冲激光力学行为及材料高压物性等方面的研究。

E-mail: guzhw@yahoo.com.cn

1 引 言

碳纤维增强复合材料(CFRP)由于具有出色的力学性能包括极高的强度/密度比、高强度、高韧性、易于加工等特性而受到广泛关注,已经越来越多地应用于航空工业中,像美国的新一代军用飞机如F22等采用的CFRP材料达到30%以上。目前,对于CFRP零件之间一般采用铆钉或粘接的方式连接。采用黏合剂粘接方式被证明是一种很好的方法,可以使应力分布更为均匀,由于没有铆钉的打孔,抗断裂和疲劳性能更好。但遗憾的是,由于粘结强度的检测问题使这一方法的推广受到了局限。

采用常规的无损检测方法包括超声波,X射线等可以实现对材料内部的缺陷进行检测。但这种方法仅能针对存在明显缺陷的零部件。对于粘接技术,存在这样一种状况:由于表面污染或粘结剂性能的变化等,粘结层内部并没有明显缺陷,但粘接层的强度很低,这种状况用通常的无损检测技术是无法应对的。

目前,一种新型的复合材料粘接质量检测技术正在蓬勃发展中。利用一束脉冲激光作用在材料表面,会在材料表面产生一个冲击波向内传播,当到达后自由界面时,会反射一个稀疏波,并在材料内部实现拉伸。在适当的激光强度下,好的粘接质量将不会受影响;而差的粘接质量将会造成损伤(开裂)并被探测。这种技术是一种无接触测量技术,不受材料形状、表面等因素的影响。这一方法未来有可能发展成为一种快速的复合材料粘接结构在线检测技术。由于应力脉宽的影响,这项技术过去都应用于膜层与基底材料的结合强度检测^[1~9]。近年来,随着激光技术的发展和航空业的迫切需求,这一技术开始应用于大尺寸复合材料粘接结构的检测^[10]。

本文研制了一种CFRP材料的弱粘接结构样品。利用脉宽8 ns的激光脉冲分别对单个CFRP板(8层)和由两块CFRP板构成的弱粘接样品进行了加载实验,利用光学法布里-珀罗(F-P)干涉仪对样品的自由面速度历史进行了测量,并利用激光超声技术对冲击后的样品进行了检测。实验结果显示,利用这种技术可以检测CFRP板构成的弱粘接样品,利用得到的自由面速度历史可以简单估计弱粘接的强度。

2 实验原理及布局

弱粘接样品检测实验布局如图1所示。实验采

用一台调Q Nd:YAG激光器,脉宽8 ns,最大能量2 J,波长1064 nm,激光束空间分布为高斯分布,激光聚焦光斑3 mm。为了避免材料表面的损伤,增加激光耦合效率,材料表面贴有保护层并覆盖一层水,如图1所示。与直接辐照相比,这样可以获得更高幅度的冲击波。更重要的是,这样可以延长应力脉冲的宽度。利用一台单频、长脉冲的Nd:YAG激光器用于速度的诊断。检测光斑400 μm。反射的检测光被送入F-P干涉仪^[11],得到样品自由面的速度历史。加载激光和检测激光通过一台信号发生器进行同步控制。

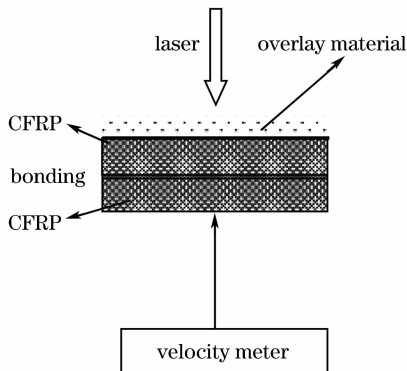


图1 激光加载粘接样品实验示意图
Fig.1 Experimental configuration of laser shock bonding samples

当激光脉冲辐照在材料表面时,由于烧蚀会在材料表面产生一个冲击波并向内传播。图2为这一过程中的波系示意图。冲击波传播经过样品厚度,在后自由面反射为稀疏波。入射的冲击波后面也紧跟着一个稀疏波,两个稀疏波在材料内部相交,形成一个拉伸区。最大拉伸应力区的位置取决于加载脉冲

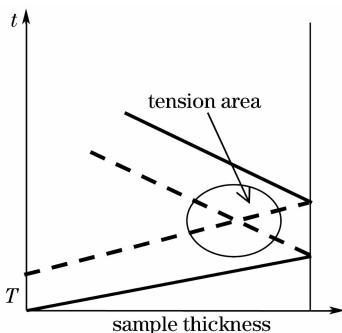


图2 脉宽T的冲击波在材料中传播的时空关系
(实线和虚线分别代表压缩波和稀疏波)

Fig.2 Time-space diagram of a shock wave propagation with duration T (the solid and dashed lines represent the compression wave and the tensile wave respectively)

的宽度及冲击波在材料内的传播。针对粘结强度检测,理想情况下最大拉伸区应发生在粘接层区域。

3 实验结果

本文的目的是测量利用粘合剂粘接两块碳纤维复合材料板的粘接强度。复合材料板包含8层,层之间按照一定的角度 $0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ$ 的顺序叠成,厚度约为1.5 mm。这种各向均匀的 CFRP 板是由加拿大国立研究院空间研究所(IAR-NRC)提供的。弱粘接样品是利用粘接剂 Loctite Hysol EA 9394 epoxy 粘接的,材料表面没有做特殊处理。研究中测量了碳纤维板内层之间的强度及两板之间的弱粘接强度。

3.1 CFRP 单板实验结果

为了更好地研究两块 CFRP 板的弱粘接情况,首先开展了单个 CFRP 板的加载实验,测量单个 CFRP 板的内部强度,并更好地理解冲击波在该材料内部的传播和材料的损伤。图 3 为实验得到的不同激光能量下样品自由面的速度历史。可以看出,与激光能量密度 14.2 J/cm^2 情况相比,能量密度 16.9 J/cm^2 下的速度历史周期显著增加。这可能是由于在 16.9 J/cm^2 条件下材料内部发生了损伤,材料声速发生了变化,延迟了第二个波的到达。从自由面速度剖面,最大速度和第一个下降的最小速度的差称为“回退速度”,根据声学近似^[12],这个量可以用来估计材料的内部强度

$$\sigma = \rho_0 C_1 \Delta u / 2, \quad (1)$$

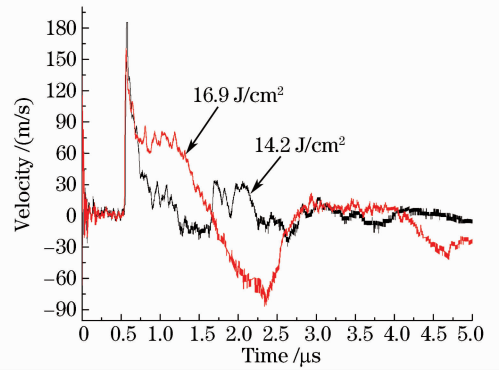


图 3 不同激光能量下复合材料单板(8层)的自由面速度

Fig. 3 Back surface velocities of single 8-ply composite plate under different laser energies

式中 σ 为层裂强度, ρ_0 为材料初始密度 (1.52 g/cm^3), C_1 为材料纵波声速 (2.84 km/s), Δu 为回退速度量 (235 m/s)。由(1)式可以得到材料内部层间强度约为 0.51 GPa 。

激光冲击后样品的激光超声检测结果如图 4 所示。图 4(a)为 C 扫描结果,(b),(c)为 B 扫描结果。所谓 C 扫描是指对整个面的面扫描;B 扫描是指沿左面图中虚线的断层扫描。从 C 扫描结果可以看出在激光能量密度 14.2 J/cm^2 以下,材料内部没有损伤;在激光能量密度 16.9 J/cm^2 以上,材料内部均发生了损伤。从 B 扫描结果可以确定损伤的位置。实验表明,材料的损伤位置均发生在样品的最后一层粘接层处,损伤为平面开裂。这一结论也被微焦点工业 CT 扫描结果所证实,如图 5 所示。

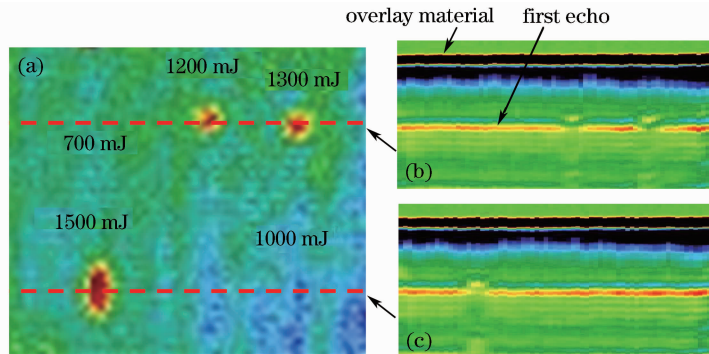


图 4 不同激光能量加载下复合材料样品的激光超声检测。(a) C 扫描,(b),(c) B 扫描

(激光能量 700,1000,1200,1300,1500 mJ 分别对应激光能量密度为 9.9,14.2,16.9,18.4,21.2 J/cm^2)

Fig. 4 Laser-ultrasonic inspection of the plate after laser shock for different laser pulse energies. (a) C-scan image, (b), (c) B-scan result (laser energies of 700, 1000, 1200, 1300 and 1500 mJ are corresponded to laser energy densities of 9.9, 14.2, 16.9, 18.4 and 21.2 J/cm^2)

3.2 CFRP 材料弱粘接样品

在实验中,对由两块复合材料板构成的弱粘接样品进行了激光加载实验。这种弱粘接样品是利用

粘接剂 Hysol EA9394 实现的,粘接时样品表面未进行特别处理,样品厚度约 3.1 mm。实验前,对样品进行了激光超声检测,如图 6(a)所示。可看出样

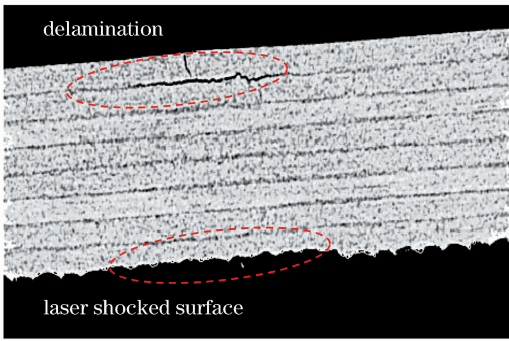


图 5 激光冲击后样品的 X 射线 CT 扫描结果
Fig. 5 Microfocus X-ray computer tomography image of the composite plate shocked by laser

品的粘接区是不均匀的,存在一些带缺陷的区域。因此在实验中,选取没有缺陷的区域(如图中的圆圈处)进行实验。对加载后的样品进行了激光超声测量,C 扫描和 B 扫描结果分别如图 6(b)和(c)所示。从 C 扫描的结果看出,在激光能量密度 16.9 J/cm^2 时,弱粘接样品内部发生了损伤。从 B 扫描结果看出,损伤发生在两板中间的粘接处。图 7 为实验得到的弱粘接样品的自由面速度历史。可以看出,激光能量密度 16.9 J/cm^2 速度信号的振荡幅度明显高于能量密度 14.2 J/cm^2 的情况。其回退速度量约为 107 m/s ,按照(1)式,其粘接强度约为 0.23 GPa 。

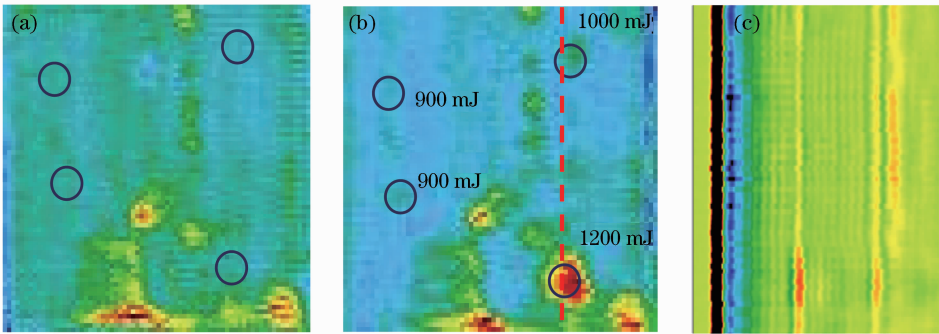


图 6 弱粘接样品的激光超声检测。(a) 冲击前的 C 扫描,(b) 冲击后的 C 扫描,(c) 沿(b)中虚线的 B 扫描
(激光能量 900,1000,1200 mJ,分别对应激光能量密度为 $12.7, 14.2, 16.9 \text{ J/cm}^2$)

Fig. 6 Laser-ultrasonic inspection of the weakly bonded sample. (a) C-scan before laser shock, (b) C-scan after laser shock, (c) corresponding B-scan along the red-dashed line in figure (b) (laser energies of 900, 1000, 1200 mJ are corresponded to laser energy densities of $12.7, 14.2, 16.9 \text{ J/cm}^2$)

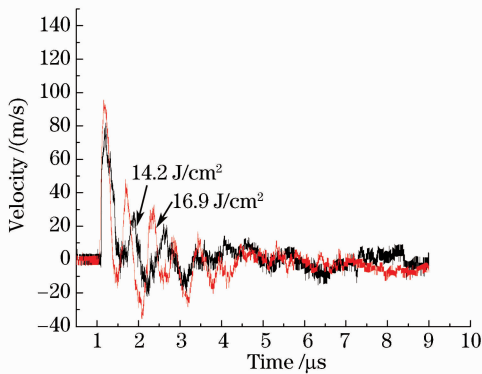


图 7 不同能量下弱粘接样品的自由面速度
Fig. 7 Back surface velocity signals of 8 plies and 8-ply weak bonding sample at different laser energies

合材料弱粘接样品的粘接质量检测。这一技术未来有可能发展成为大规模的工业在线检测技术,将大大推动复合材料在航空业的推广和应用。尽管如此,这项技术距离工业的实用化还有一定的距离。由于复合材料材质的不均匀性,材料内部结构的复杂性等,使得测量的样品自由面速度信号往往十分复杂,重复性较差,给在线检测的判断造成困难。另外,针对弱粘接试件,需制定一定的量化标准。

致谢 激光超声检测是由 Neron Christian 和 Gabriel Charlebois 完成的。

参 考 文 献

- 1 J. Yuan, V. Gupta. Measurement of interface strength by the modified laser spallation technique. I. Experiment and simulation of the spallation process [J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, **74**(4):2388~2396
- 2 V. Gupta, J. Yuan. Measurement of interface strength by the modified laser spallation technique. II. Applications to metal/ceramic interfaces [J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, **74**(4):2397~2404
- 3 J. Yuan, V. Gupta, A. Porin. Measurement of interface strength by the modified laser spallation technique. III.

4 结 论

发展了一种激光冲击波检测复合材料粘接质量的技术和方法。配合激光速度测量技术和激光超声技术,可以实现对复合材料弱粘接结构的检测。利用窄脉宽的纳秒级激光实现了对厚度 $2\sim 3 \text{ mm}$ 的复

- Experimental optimization of the stress pulse [J]. *J. Appl. Phys.*, 1993, **74**(4):2405~2410
- 4 G. I. Kanel, S. V. Razorenov, A. V. Utkin. Spallation in Solids under Shock-Wave Loading: Analysis of Dynamic Flow, Methodology of Measurements, and Constitutive Factors. In: L. Davison, D. E. Grady, M. Eds. Shahinpoor. High-Pressure Shock Compression of Solids II. Dynamic Fracture and Fragmentation [M]. New York: Springer-Verlag, 1996. 1~24
- 5 S. Logunov, I. Kouzmina, M. Winningham *et al.*. Use of laser spallation to measure the adhesion of optical fiber coatings [J]. *J. Appl. Polymer Science*, 2004, **93**(5):2459~2468
- 6 R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard *et al.*. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry [J]. *J. Appl. Phys.*, 1990, **68**(2):775~784
- 7 Lei Ma, Yundong Zhang, Nana Wang *et al.*. Nonlinear optical properties of polyaniline composite materials [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(10):599~600
- 8 Yin Sumin, Cheng Chang, Feng Aixin *et al.*. Testing method of the laser scratching based on image acquisition system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6):947~951
- 殷苏民,程 昌,冯爱新等. 界面结合强度的激光划痕综合检测装置的设计[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6):947~951
- 9 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
- 10 R. H. Bossi. NDE developments for composite structures [C]. *Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2006, **820**:965~971
- 11 M. Arrigoni, J. P. Monchalain, A. Blouin *et al.*. Laser Doppler interferometer based on a solid Fabry-Perot etalon for measurement of surface velocity in shock experiments [J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, **20**(1):015302~015309
- 12 S. Cochran, D. Banner. Spall studies in uranium [J]. *J. Appl. Phys.*, 1977, **48**(7):2729~2737