

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.08.021

碳纤维编织复合材料拉伸变形测量及声发射监测^{*}

张燕南¹, 赵文政¹, 雒新宇², 庞艳荣¹, 周伟¹

(1. 河北大学无损检测研究所, 河北保定 071002; 2. 承德石油高等专科学校资产与后勤管理处, 河北承德 067000)

摘要: 采用声发射和数字图像相关互补技术, 结合破坏断口微结构特征, 研究碳纤维编织复合材料的损伤变形与失效机理。在复合材料试件拉伸加载的同时, 实时获取变形特征和损伤声发射信号, 分析复合材料力学响应与位移场、声发射特征的关系。结果表明, 复合材料试件实时拉伸位移场、损伤破坏过程的声发射相对能量、撞击累积数及幅度等特征参数反映了复合材料表面变形与内部损伤演化过程。复合材料试件断裂时出现较多高持续时间、高幅度、高相对能量的声发射信号, 宏观断口平齐, 表现为脆性断裂。

关键词: 碳纤维; 编织复合材料; 声发射; 数字图像技术

中图分类号: TB302.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)08-0097-04

Tensile Deformation Measurement and Acoustic Emission Monitoring of Carbon Fiber Braided Composite

Zhang Yannan¹, Zhao Wenzheng¹, Luo Xinyu², Pang Yanrong¹, Zhou Wei¹

(1. Non-destructive Testing Laboratory, Hebei University, Baoding 071002, China;

2. Assets and Logistics Administration Section, Chengde Petroleum College, Chengde 067000, China)

Abstract: The damage deformation and failure mechanism of carbon fiber braided composites were studied by using acoustic emission and digital image correlation complementary technique combining with breaking fracture microstructure. The relationship between the tensile mechanical response and the damage deformation, displacement field and acoustic emission characteristics of the composites was analyzed by obtaining the damage displacement information and the real-time acoustic emission signal at the same time as the tensile loading of the composite specimen. The results show that the real-time tensile displacement fields, acoustic emission characteristics such as relative energy, cumulative hits and amplitude are correlated with the surface deformation and internal damage evolution of the composites. Obvious acoustic emission signals with high duration, high amplitude and high relative energy are generated leading to the failure of the composite specimen. The macroscopic fracture surface of the damaged composite is flat and exhibits brittle fracture.

Keywords: carbon fiber; braided composite; acoustic emission; digital image correlation

碳纤维编织复合材料具有高的比强度、比模量、耐疲劳和耐腐蚀等优越性能, 广泛应用于航空航天、能源等领域^[1]。由于复合材料制造过程影响因素较多, 导致其力学性能相对分散, 力学演化与破坏行为不明确。因此, 进一步研究碳纤维编织复合材料的损伤变形、动态演化行为与失效机理, 对提高复合材料结构的可靠性与安全性具有重要的现实意义。

针对碳纤维编织复合材料力学行为方面的研究, 国内外学者已开展大量工作。康雄建等^[2]对形状记忆四枚缎纹碳纤维编织复合材料进行单轴和低速循环拉伸试验, 结果表明拉伸强度、拉伸弹性模量与编织密度和材料成型工艺有关。R. Parimala等^[3]在环氧基体中添加不同比例的碳纳米纤维, 发现在环氧树脂/双轴碳编织纤维复合材料中添加质量分

数为0.5%的碳纳米纤维时能有效改善其力学性能。

声发射技术能够实时、动态监测复合材料内部损伤的起始与扩展, 有效分析复合材料的损伤和破坏行为。李亚娟等^[4]利用声发射技术实时监测了复合材料Ⅱ型分层损伤过程, 将复合材料分层损伤演化分为预分层裂纹尖端区域微损伤累积和分层不稳定扩展两个基本过程。K. Asamene等^[5]通过对两种碳纤维增强复合材料的声发射衰减行为进行对比, 发现频率分量的变化与声发射源、传感器相对位置、传感器数量和类型有关。数字图像相关技术能

^{*} 国家自然科学基金项目(11502064), 河北省自然科学基金项目(E2016201019), 河北大学校级项目(799207217089)

联系人: 周伟, 博士, 教授, 主要从事复合材料实验力学及声学无损检测技术研究

收稿日期: 2017-05-17

够实现物体表面微变形的全场、非接触测量。郝文峰等^[6]基于数字图像相关方法,研究了不同载荷作用下复合材料层合板层间全场位移和应变分布,证实该技术能够实现复合材料层合板层间变形与应变分布的精确测量。陈金龙等^[7]利用三维数字图像相关技术研究了含圆形分层损伤碳纤维四点弯曲力学行为,实现屈曲临界载荷的初步估算。Pan Bing等^[8]运用单高速摄像机 SCHS 立体-DIC 技术的系统,揭示了在瞬时弹道冲击下碳纤维增强塑料板的变形行为和失效机理。此外,同时利用声发射技术与数字图像相关方法研究复合材料的变形与破坏行为,能很好地反映微裂纹的萌生及扩展行为^[9-10]。

笔者采用声发射技术和数字图像相关方法,全程监测碳纤维编织复合材料损伤演化及破坏过程,实时获取损伤变形位移场和损伤过程中声发射特征信号,并结合复合材料试件断口微观形貌,揭示碳纤维编织复合材料的损伤破坏及失效机理,为碳纤维编织复合材料结构安全评价和健康监测提供依据。

1 实验部分

1.1 原材料

碳纤维编织复合材料厚度为 (4.6 ± 0.1) mm,经加工最终获得 5 个 $180 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 的复合材料试件。为避免试验机夹具损坏复合材料试件的夹持部位,降低机械噪声信号对实验的影响,在复合材料试件两端粘贴长度为 40 mm 的铝加强片。在试件的中间区域喷涂 $30 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 人工散斑,用于复合材料试件全场变形的测量。

1.2 仪器和设备

万能拉伸试验机: CMT5305 型,深圳新三思有限公司;

声发射仪器: DS2-8A 型,北京软岛科技有限公司;

CMOS 相机: MER-500-7UM-L 型,中国大恒(集团)有限公司;

扫描电子显微镜(SEM): JEOL JSM-7500F 型,日本电子株式会社。

1.3 实验方法

在万能拉伸试验机进行复合材料试件力学性能测试,加载速率为 0.5 mm/min 。加载过程中,利用两个声发射传感器进行信号采集,采样频率为 2.5 MHz。经过多次预实验,将声发射信号的初始采集门槛提高到 10 mV。复合材料试件散斑区域用卤素冷光源照明,当拉伸载荷达到 3 kN 以后,每隔 1

kN 进行一次图像采集,直至试件断裂。试件破坏断口形貌利用 SEM 进行观察。

2 结果与讨论

2.1 复合材料拉伸力学行为

复合材料试件拉伸失效载荷均值和标准偏差分别为 52.2 kN 和 4.6 kN,计算可得拉伸强度均值为 580 MPa。复合材料试件典型拉伸载荷-声发射相对能量-时间曲线如图 1 所示。从图 1 可以看出,试件力学性能曲线整体趋于线性变化;随拉伸载荷的增加,复合材料损坏不断累积,其中包括初始损伤和试件在拉伸过程中产生的次生损伤,伴随碳纤维断裂和基体裂纹扩展与损伤演化,最终导致试件断裂。

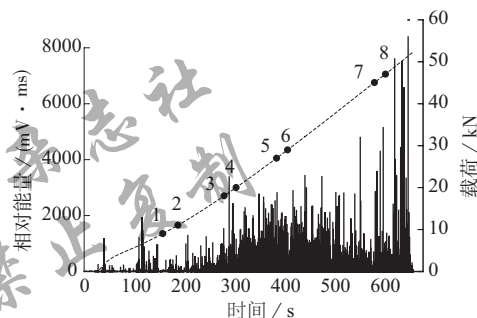
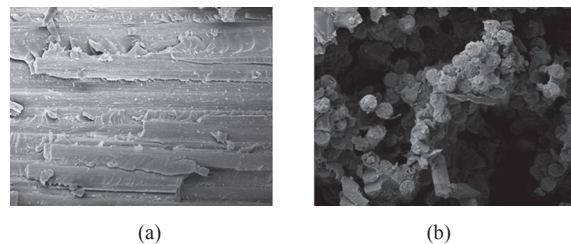


图1 复合材料试件拉伸载荷-相对能量-时间曲线

复合材料试件破坏断面的 SEM 微观形貌如图 2 所示。从图 2a 可以看出,碳纤维编织复合材料断面较平滑,带有大小不等的基体碎块,呈现为脆性开裂。结合图 2b,纤维束断裂较为平齐,表现为明显的纤维脆性断裂与少量的纤维拔出。



(a) 基体开裂; (b) 纤维断裂

图2 复合材料试件破坏断面的 SEM 照片

2.2 拉伸加载下复合材料声发射响应

结合图 1 可以看出,复合材料加载前期,损伤较少,声发射相对能量水平低。随着载荷的增加,声发射事件明显增多,其相对能量也呈现上升趋势,预示复合材料试件内部微损伤不断累积。在 550 s 左右,试件内部损伤累积严重,基本接近复合材料承受的极限值。高相对能量声发射信号的出现,预示着复合材料试件的最终失效,同时伴有碳纤维的断裂。

试件断裂时相对能量峰值为 $15\,641\text{ mV}\cdot\text{ms}$ 。

复合材料典型试件拉伸加载过程声发射信号幅度-撞击累积数-时间关系如图3所示。试件加载前期,受噪声等因素影响,只出现少量幅度 $2\,000\text{ mV}$ 以下的声发射信号。随载荷增加,较高幅度声发射信号增多,出现一部分 $2\,000\sim 6\,000\text{ mV}$ 的声发射信号;随着损伤的不断积累,撞击累积数迅速增加,峰值幅度以 $0\sim 6\,000\text{ mV}$ 为主,伴随部分 $6\,000\sim 10\,000\text{ mV}$ 高幅度声发射信号,最大峰值幅度值为 $9\,994.6\text{ mV}$,这些高幅度声发射信号与碳纤维编织复合材料的最终失效破坏有关。

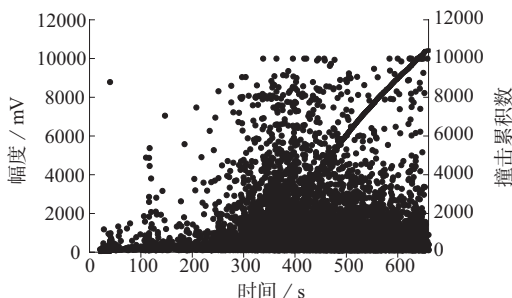


图3 复合材料试件拉伸声发射幅度-撞击累积数-时间关系

图4为典型复合材料试件拉伸过程持续时间-幅度-时间变化关系图。试件加载前期,声发射特征信号的持续时间和幅度均处于较低水平;结合图1,在此阶段相对能量也较低。随着拉伸载荷增加,声发射信号的持续时间随时间呈递增趋势,出现持续时间为 $5\,000\sim 10\,000\text{ }\mu\text{s}$ 的声发射信号。直至复合材料试件破坏时,声发射信号持续时间达到峰值。

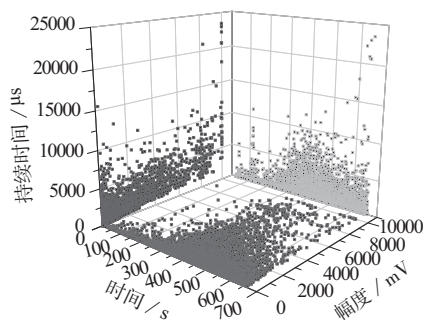
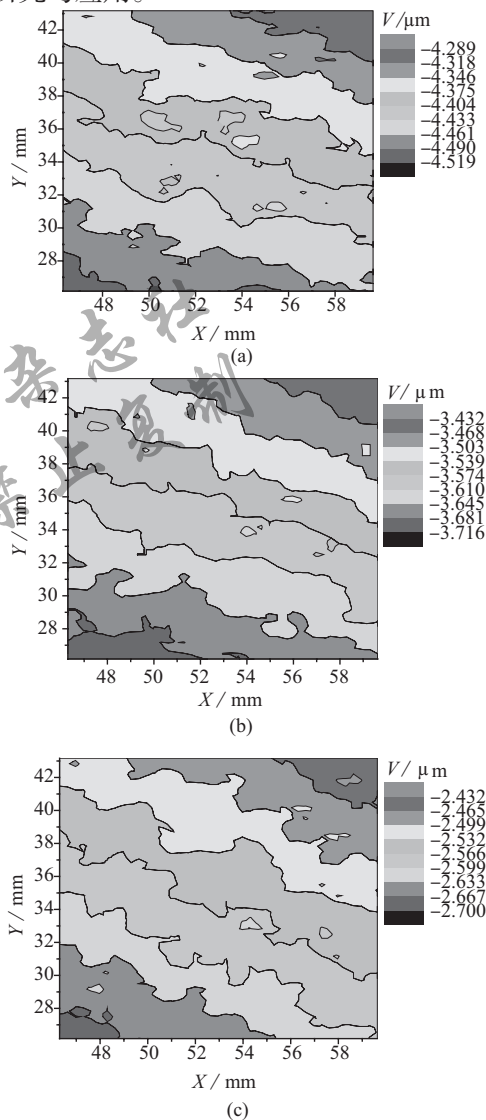


图4 复合材料试件持续时间-幅度-时间关系图

2.3 复合材料试件全场位移场分析

根据图1典型复合材料拉伸载荷曲线,选择 $9\sim 11\text{ kN}$, $27\sim 29\text{ kN}$ 和 $45\sim 47\text{ kN}$ 3个载荷变化阶段进行拉伸方向全场位移分析,得到复合材料试件拉伸方向位移场变化如图5所示。从图5a可以看出,载荷从 9 kN 增加到 11 kN ,拉伸方向位移场呈倾斜的梯度分布,这是因为编织复合材料纵向纤维承受

主要载荷,横向与纵向纤维的交叉影响所致。与图5a相比,相同载荷增量,图5b和图5c对应的拉伸方向位移场变化呈递减趋势。随着载荷增加,纵向承载纤维与基体泊松比失配,此过程同时伴随着损伤演化,导致复合材料刚度和声发射信号的变化。这表明声发射与数字图像相关方法相结合的测试技术手段,可用于碳纤维编织复合材料变形与损伤监测的研究与应用。



载荷: a— $9\sim 11\text{ kN}$; b— $27\sim 29\text{ kN}$; c— $45\sim 47\text{ kN}$

图5 复合材料试件拉伸方向位移场变化

3 结论

碳纤维编织复合材料试件实时拉伸位移场、损伤破坏过程的声发射相对能量、撞击累积数及幅度等特征参数反映了复合材料表面变形与内部损伤演化过程。复合材料拉伸破坏纤维束断裂较为平齐,表现为明显的纤维脆性断裂与少量的纤维拔出。高

持续时间、高幅度、高相对能量的声发射信号的出现预示复合材料的最终失效破坏。碳纤维编织复合材料纵向纤维承受主要载荷,横向与纵向纤维的交叉导致拉伸方向位移场呈倾斜的梯度分布。声发射和数字图像相关方法相结合的测试技术手段,可以监测碳纤维编织复合材料的变形与损伤演变行为,用于碳纤维编织复合材料的结构健康监测。

参考文献

- [1] 钟崇岩,曹海建,李娟,等. 编织形式对三维全五向编织复合材料拉伸性能的影响[J]. 玻璃钢/复合材料,2013(2):8-12.
Zhong Chongyan, Cao Haijian, Li Juan, et al. Influence of braided forms on tensile strength of three-dimensional full five-directional braided composites[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2013(2):8-12.
- [2] 康雄建,房光强,张大旭,等. 形状记忆四枚缎纹编织复合材料拉伸力学性能试验研究[J]. 上海航天,2016,33(5):63-70.
Kang Xiongjian, Fang Guangqiang, Zhang Daxu, et al. Experimental study of tensile mechanical properties of 4-harness satin weave reinforced shape memory polymer composites[J]. Aerospace Shanghai, 2016, 33(5):63-70.
- [3] Parimala R, Jabaraj D B. A study on nanophased biaxial carbon braided composites[J]. Materials Today Proceedings, 2016, 3(6):2268-2277.
- [4] 李亚娟,周伟,刘然,等. 复合材料Ⅱ型分层损伤演化声发射监测[J]. 玻璃钢/复合材料,2015(1):54-58.
Li Yajuan, Zhou Wei, Liu Ran, et al. Acoustic emission monitoring on mode II delamination damage evaluation of composite material[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2015(1):54-58.
- [5] Asamene K, Hudson L, Sundaresan M. Influence of attenuation on acoustic emission signals in carbon fiber reinforced polymer panels[J]. Ultrasonics, 2015, 59:86-93.
- [6] 郝文峰,郭广平,陈新文. 基于数字图像相关方法的复合材料层间剪切性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2015(1):54-58.
Hao Wenfeng, Guo Guangping, Chen Xinwen. Characterization of interlaminar shear properties for composite materials using digital image correlation[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2015(1):54-58.
- [7] 陈金龙,宫文然,李峰,等. 含分层损伤复合材料层合结构在弯曲载荷作用下的屈曲问题研究[J]. 中国科学:技术科学, 2015(5):464-470.
Chen Jinlong, Gong Wenran, Li Feng, et al. Buckling behaviour of delaminated composite panels under four-point bending[J]. Scientia Sinica Technologica, 2015(5):464-470.
- [8] Pan Bing, Yu Liping, Yang Yongqi, et al. Full-field transient 3D deformation measurement of 3D braided composite panels during ballistic impact using single-camera high-speed stereo-digital image correlation[J]. Composite Structures, 2016, 157:25-32.
- [9] 杨志,卢博远,吕智慧,等. 循环加载下复合材料交界面变形与破坏实验研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2016(9):5-11.
Yang Zhi, Lu Boyuan, Lyu Zhihui, et al. Experimental study on deformation and failure of composite material bonding interface under cyclic loading[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2016(9):5-11.
- [10] Carvelli V, D'Ettorre A, Lomov S V. Acoustic emission and damage mode correlation in textile reinforced PPS composites[J]. Composite Structures, 2017, 163:399-409.

盛禧奥 MAGNUM ABS 树脂开拓 3D 打印新应用

盛禧奥与德国著名 3D 打印公司 ADVANC3D Materials 合作,为该公司的 3D 打印丝状材料提供原材料。

3D 打印市场发展迅速,目前塑料在全球 3D 打印材料市场占据最大份额。这次盛禧奥与 ADVANC3D Materials 合作,为 3D 打印提供的材料包括: MAGNUM ABS 树脂及医疗级树脂, EMERGE PC/ABS 高级树脂。针对当前 3D 打印常用的直径 1.75 mm 及 2.85 mm 的卷轴丝状材料,盛禧奥均可提供。

盛禧奥材料能为 3D 打印原材料带来支持,不仅因它具备 3D 打印材料所需的优异弹性,而且能够满足不同行业对于 3D 打印产品的不同需求,包括: 针对医疗行业的生物相容性; 食品包装行业需符合的欧美食品接触规定; 多种市场都需要的阻燃性、哑光及高光泽。

盛禧奥产品及市场经理表示,3D 打印是未来科技的发展趋势。可以更低成本快速制作复杂又独特的零部件,及作高度定制化的小规模生产。尤其在医疗设备方面,使用 3D 打印技术能在不需要任何特定生产设备的条件下,制造功能

繁复的医疗器材。实现低成本高效率优势,就是盛禧奥未来 3D 打印材料的发展方向。
(工程塑料网)

吉林地方标准《生物降解塑料零售包装袋通用技术要求》发布实施

由吉林省产品质量监督检验院起草的《生物降解塑料零售包装袋通用技术要求》正式发布,并于 8 月 12 日实施。

该标准将生物降解塑料零售包装袋细化分为购物袋、连卷袋、平口袋、提携袋。该标准的技术指标合理、先进,达到了国内先进水平,与国际标准接轨。有业内人士表示,该标准的发布实施,有利于规范生物降解塑料零售包装袋生产、销售和推广应用,对于促进该省生物物质产业的发展具有重要意义。

据了解,在吉林省发展和改革委员会及吉林省质监局的指导下,由吉林省产品质量监督检验院牵头,成立了《生物降解塑料零售包装袋通用技术要求》地方标准制定工作组。

据介绍,促进生物降解塑料零售包装袋生产将给相关企业带来可观的经济效益;同时,生产生物降解塑料所需玉米、秸秆等原材料,能够解决农业种植废弃物问题,符合国家可持续发展的战略。
(工程塑料网)