

预浸料的超薄化对碳纤维/环氧树脂复合材料拉伸破坏行为的影响

张正, 李世超, 张金纳, 王朝阳, 巴文兰, 吴海宏*

(河南工业大学 机电工程学院, 郑州 450000)

摘要: 采用自主研发的碳纤维(CF)宽展设备, 将 12K CF 宽展预浸制备成 0.02 mm 和 0.10 mm 厚的 CF/环氧树脂(EP)预浸料, 利用模压工艺制成 1 mm 厚的单向层合板。利用万能试验机、声发射装置和高速照相机组成的集成系统测试其抗拉强度、加载过程中试样内部的损伤情况及断裂破坏时样品宏观形貌的变化。用 SEM 观测其拉伸断口形貌。分别用超景深显微镜、金相显微镜观测记录 CF/EP 复合材料预浸料和单向层合板中 CF 的排布状态以表征薄层化过程中 CF 和 EP 的分布状态对 CF/EP 复合材料拉伸性能的影响。结果表明: 薄 CF/EP 复合材料预浸料中 CF 的排布更加均匀。制成的 CF/EP 复合材料单向层合板试样中层间树脂富集区的尺度明显小于厚 CF/EP 复合材料预浸料制成的试样, 试样的抗拉强度提高了 15%; 薄 CF/EP 复合材料预浸料制成层合板试样的拉伸宏观断口形貌中分层劈裂现象减少, 集束性增强, 微观断口形貌中未发现横贯横截面的穿透裂纹。

关键词: 预浸料; 超薄化; 碳纤维; 复合材料; 拉伸破坏

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2020)04-0800-08

Effect of ultra-thinning of prepreg on tensile failure behavior of carbon fiber/epoxy resin composites

ZHANG Zheng, LI Shichao, ZHANG Jinna, WANG Chaoyang, BA Wenlan, WU Haihong*

(College of Mechanical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: The self-developed carbon fiber wide-spreading equipment was used to pre-dip 12K carbon fiber(CF) into wide CF/epoxy(EP) prepreg with 0.02 mm and 0.10 mm thickness, and the unidirectional laminate of 1 mm thickness was fabricated by molding process. The integrated system including universal testing machine, acoustic emission device and high-speed camera was used to test the tensile strength, the damage inside the sample during loading and the macroscopic morphology of the sample during fracture failure. The tensile fracture morphology was observed by SEM. The super-depth microscope and metallographic microscope were used to observe the arrangement of CF in CF/EP composite prepreg and unidirectional laminate to characterize the influence of CF and EP distribution on the tensile properties of CF/EP composites during thinning. The results show that the CF is more uniform in the thin CF/EP composite prepreg, and the scale of the inter-layer resin enrichment zone in the CF/EP composite unidirectional laminate is much smaller than the laminate made of thick CF/EP composite prepreg. The tensile strength of CF/EP composites sample is increased by 15%. The delamination and splitting phenomenon of the laminate made of thin CF/EP composite prepreg is reduced in the macroscopic fracture morphology, and the clustering property is enhanced. No penetration cracks across the cross section are found in the micro fracture morphology of laminate made of thin CF/EP composite prepreg.

Keywords: prepreg; ultra-thin; carbon fiber; composites; tensile failure

收稿日期: 2019-04-26; 录用日期: 2019-05-26; 网络出版时间: 2019-06-28 16:00

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190628.001>

基金项目: 国家自然科学基金(51373048); 国家自然联合基金(U1604253)

通讯作者: 吴海宏, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为碳纤维复合材料结构-功能一体化 E-mail: hhwu@haut.edu.cn

引用格式: 张正, 李世超, 张金纳, 等. 预浸料的超薄化对碳纤维/环氧树脂复合材料拉伸破坏行为的影响[J]. 复合材料学报, 2020, 37(4): 800-807.

ZHANG Zheng, LI Shichao, ZHANG Jinna, et al. Effect of ultra-thinning of prepreg on tensile failure behavior of carbon fiber/epoxy resin composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(4): 800-807 (in Chinese).

碳纤维(CF)/环氧树脂(EP)复合材料因其高比强度、高比刚度在航空航天、汽车、能源等领域有着广泛的应用^[1-5]。近年来,薄CF/EP复合材料预浸料制成的层合板因其在一次破坏、极限强度和疲劳寿命等方面优于常规厚度CF/EP复合材料预浸料制成的层合板而迅速引起复合材料行业的关注^[6-7]。姚佳伟等^[8]用厚度分别为0.063 mm的超薄CF/EP复合材料预浸料和0.125 mm的常规预浸料制成层合板试样,对其进行基础力学性能测试。结果表明,薄层化提高了复合材料宏观拉伸性能,降低了弯曲和层间剪切性能。YUAN等^[9]从复合材料力学的角度,提出了一个树脂剪切非线性和纤维旋转位错的理论模型,模拟了超薄预浸料角度铺层CF/EP复合材料的假塑性力学行为,发现超薄预浸料诱发复合材料假塑性变形行为机制。Sihn等^[10]的实验结果表明,薄层复合材料对静态、疲劳和冲击载荷均有延迟甚至抑制裂纹萌生和层间开裂的作用。在最近的微观力学计算研究中,Arteiro等^[11]研究了超薄层原位增强效应,结果表明,厚预浸料制成的层合板加载时会引起横向裂纹的突然扩展,薄预浸料层合板中裂纹的扩展速率大大降低,并且没有完全穿透厚度方向。此外,超薄预浸料制成层合板的拉伸、压缩、冲击和疲劳行为与常规厚度层合板相比也有所不同。R. Amacher等^[12]对采用M40 JB系列CF丝束的超薄与常规CF预浸料层板的拉伸性能、开孔拉伸/压缩、弯曲、面内剪切、冲击等基础力学性能进行了较全面的对比研究,结果表明薄层化后的层板的拉伸强度提高了10%,具有良好的抗疲劳特性。同时,通过试验对比研究发现,用薄预浸料制成的层合板具有更高的抗裂纹萌发和扩展的能力,力学性能也有比较明显的改善。

目前,大多数公开文献中关于CF/EP复合材料预浸料薄层化研究的最小厚度为0.04 mm。当预浸料厚度小于0.04 mm时,制成层合板的微观结构将发生进一步的变化,如纤维在空间排布层数减少,层间树脂层相应变薄甚至消失,树脂富集区的尺度及其分布状态发生改变等。为探究这些因素对CF/EP复合材料力学行为的影响,本文从超薄预浸料形成的微观结构效应角度出发,研究CF/EP复合材料预浸料的超薄化对层合板拉伸过程中裂纹的萌生、扩展及破坏后断口形貌的影响,为实现CF/EP复合材料的进一步高性能化提供基础。

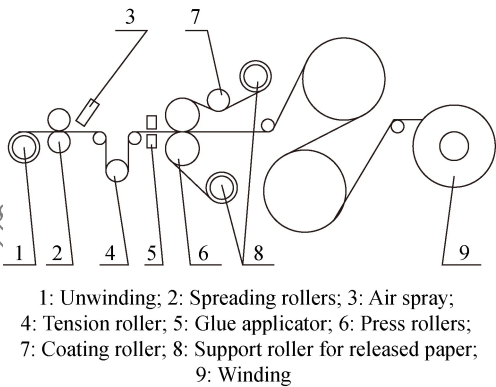
1 实验材料及方法

1.1 原材料

本实验采用日本东丽12K T700SC CF,密度为1.8 g/cm³,电阻率为0.6×10⁻³ Ω·cm,直径为7.0 μm,抗拉强度为4 900 MPa,拉伸模量为230 GPa,伸长率为2.1%。通过控制多级气动展纱系统中压缩空气的流量、流速和CF张力的大小,将12K CF分别均匀宽展到10 mm和40 mm宽,宽展后的CF如图1(a)所示。采用中航复材科技有限公司的AGMP 3513 EP浸渍宽展后的CF,制备厚度分别为0.02 mm和0.10 mm的CF/EP复合材料预浸料,两种预浸料的纤维质量分数分别为51.3wt%和52.0wt%。CF/EP复合材料预浸料制备工艺过程如图1(b)所示。



(a) Carbon fiber (CF) after wide-spreading



(b) Prepreg production process

图1 碳纤维(CF)/环氧树脂(EP)预浸料的制备

Fig.1 Production of carbon fiber(CF)/epoxy resin(EP) prepreg

1.2 样品制备

采用热压成型工艺制备CF/EP复合材料单向层合板,超薄CF/EP复合材料预浸料和常规厚度CF/EP复合材料预浸料的铺层方式分别为[0]₅₀和[0]₁₀;铺放预浸料时逐层压实以降低层合板试样的孔隙率,每层宽度方向的拼接位置错开。固化工艺

过程为室温下抽真空，真空度为 -87 Pa ，以 $2^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速率升温，温度达到 90°C 时加压至 1 MPa ，继续升温至 135°C ，保温保压 60 min 。保压过程结束后，以不大于 $1^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速度冷却至室温，2 种层合板的厚度均为 $(1\pm0.02)\text{ mm}$ ，显微镜法测得两种层合板试样的纤维体积分数分别为 $53.3\text{ vol}\%$ 和 $54.0\text{ vol}\%$ 。制备的层合板如图 2(a) 所示。然后，将层合板水切割成尺寸为 $250\text{ mm}\times15\text{ mm}$ 的试样。分别用型号为 $1000\sim3000$ 的砂纸打磨层合板试样的横截面和侧面，消除因水切割震动误差对样品加载条件下裂纹萌生和扩展行为的影响。采用厚度为 1.5 mm 的 6061 铝合金片材作为加强片，EP 胶黏合，粘贴前用型号为 1000 的砂纸打磨铝合金片材和层板的粘贴部位以提高粘接效果。制备的拉伸试样如图 2(b) 所示。

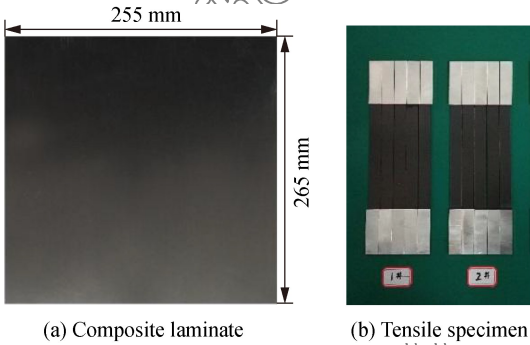


图 2 CF/EP 复合材料层合板及拉伸试样
Fig. 2 CF/EP composite laminates and tensile specimens

1.3 测试方法

力学性能测试在万能试验机上进行。试验机上集成了 SAEU2S 声发射系统以监测拉伸过程中试样内部纤维的断裂，在试样上对称布置两个谐振式声发射传感器，间距为 100 mm ；用型号为 Acute-eye-1 hs-M-1900 的超高速照相机跟踪记录试样断裂时宏观形貌的变化，拍摄帧频为 $5\,000\text{ 帧}/\text{s}$ 。测试系统如图 3 所示。测试前，将试样放在 80°C 的真空干燥箱中干燥 1 h 以消除含湿量对实验结果的影响。每一组实验测试 5 个样品，实验结果为 5 个样品的平均值。

用超景深显微镜观察 CF/EP 复合材料预浸料中纤维排布状态以表征预浸料的质量；用金相显微镜观察记录 CF/EP 复合材料层合板试样垂直于纤维方向的横截面的初始微观结构；采用透明网格法统计计算金相试样中不同尺度树脂富集区所占的比例，每组试样的统计样本为 15 个。样品制备过程

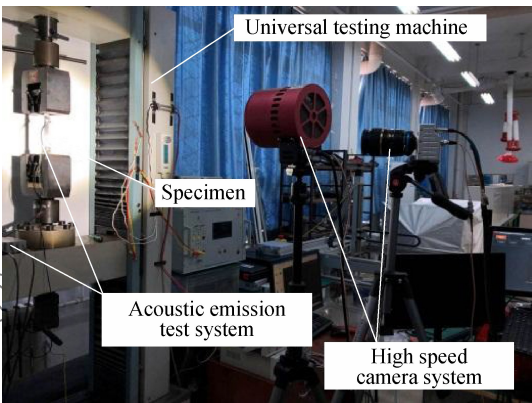


图 3 力学性能测试集成系统
Fig. 3 Integrated system for testing mechanical properties

为采用 EP 冷镶嵌样品，应用 $600\sim3000$ 型号砂纸进行粗磨、细磨，最后依次用 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 的 Al_2O_3 抛光液进行抛光制备金相试样。用 SEM 观察 CF/EP 复合材料层合板试样拉断后横截面的微观形貌。

2 结果与讨论

2.1 CF/EP 复合材料预浸料的初始微观形貌

两种不同厚度 CF/EP 复合材料预浸料中纤维排布的初始形貌如图 4 所示。可以看出，超薄 CF/EP 复合材料预浸料中 CF 的排布状态比较理想，基本与加载方向平行一致，而常规厚度 CF/EP 复合材料预浸料中 CF 的排布存在较明显的交叉和偏

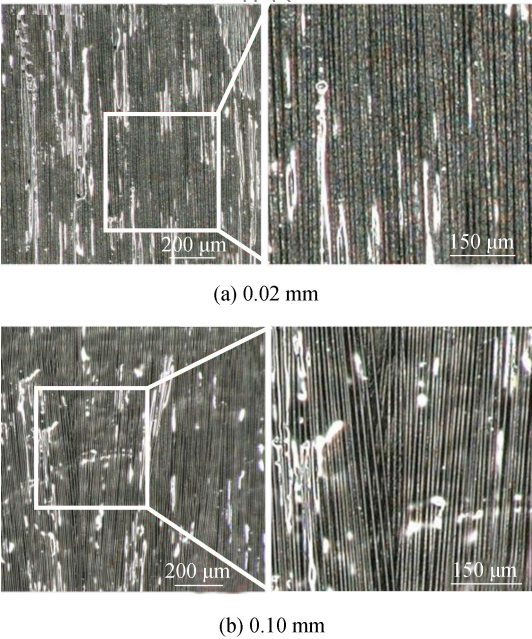
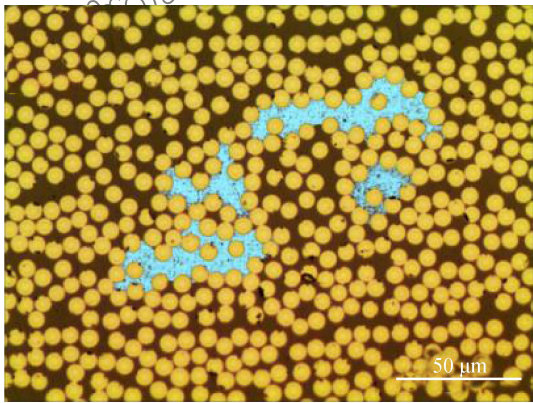


图 4 两种厚度 CF/EP 复合材料预浸料中 CF 初始排布状态
Fig. 4 Initial arrangements of CF in CF/EP composite prepreps of two thicknesses

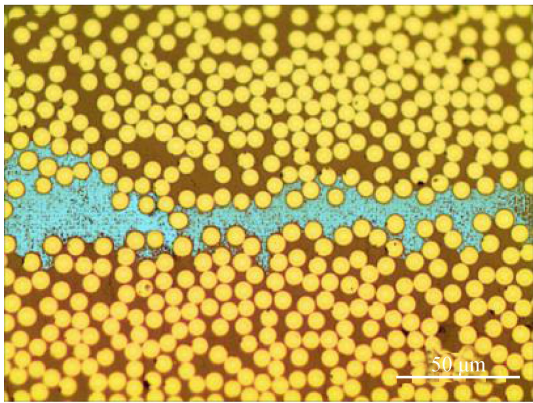
转。理论上, 0.02 mm 厚单层 CF/EP 复合材料预浸料在厚度方向上排列 1~2 层 CF, 0.10 mm 厚 CF/EP 复合材料预浸料则排列 9~10 层 CF。在 CF/EP 复合材料预浸料的制备过程中, 厚 CF/EP 复合材料预浸料由于纤维层数较多, 不同纤维层所受张力存在差异使 CF/EP 复合材料预浸料中纤维受力不均匀性增大, 导致单层预浸料中纤维容易出现交叉、偏转和损伤等情况^[13-15]。

2.2 CF/EP 复合材料层合板初始微观形貌

超薄 CF/EP 复合材料预浸料和常规厚度 CF/EP 复合材料预浸料制备的层合板试样横截面的微观结构如图 5 所示。可以看到, 由薄 CF/EP 复合材料预浸料制成的层合板中纤维和树脂分布比较均匀。而厚 CF/EP 复合材料预浸料制成的层合板中树脂富集区的面积和比例显著增大, 其层间树脂层的厚度较薄预浸料制成的层合板明显增大。通过透明网格法统计计算了由不同厚度 CF/EP 复合材料预浸料制成的层合板中树脂富集区的面积及比例,



(a) 0.02 mm



(b) 0.10 mm

图 5 不同厚度 CF/EP 复合材料预浸料制成层合板的横截面微观结构
Fig. 5 Cross-sectional microstructures of laminates made of different thicknesses of CF/EP composite prepreps

结果如图 6 所示。可以看出, 薄 CF/EP 复合材料预浸料制成试样横截面中面积为 39、78、117、312、624、702 μm^2 的树脂富集区的平均数量分别为 8、2、1、1、1、1, 分别占树脂富集区总面积的 14.0%、7.0%、5.2%、14.0%、28.4%、31.4%。而在厚 CF/EP 复合材料预浸料试样中尽管只观察到 4 种面积的树脂富集区, 面积为 39 μm^2 和 78 μm^2 的树脂富集区的平均数量也为 8 和 2, 但是另外两种树脂富集区的面积很大, 分别达到了 1 170 μm^2 和 1 794 μm^2 。由于它们的面积很大, 因此分别占到了树脂富集区总面积的 33.9% 和 51.7%。这表明薄 CF/EP 复合材料预浸料制成的层合板中树脂富集区的分布比厚 CF/EP 复合材料预浸料制成的层合板更均匀, 树脂富集区的尺度也更小。

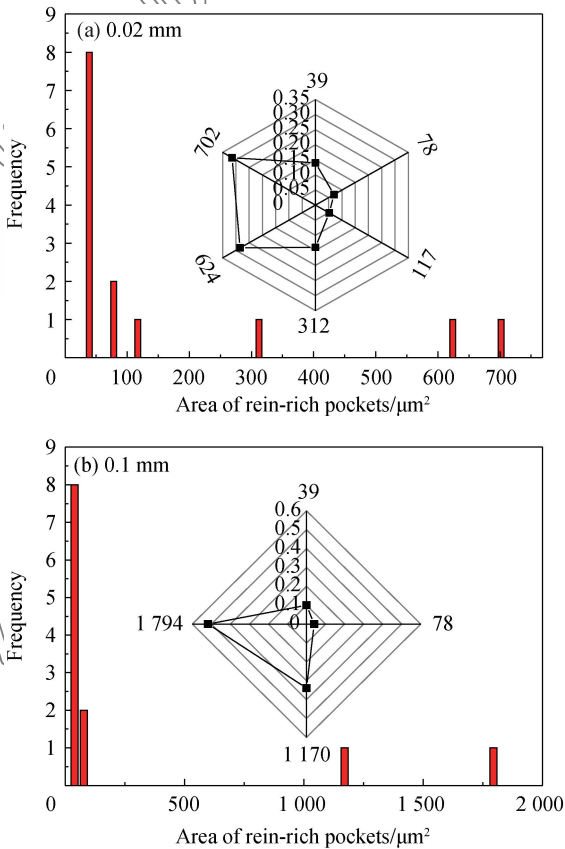


图 6 不同厚度 CF/EP 复合材料预浸料制成层合板中树脂富集区面积统计

Fig. 6 Area statistics of resin-rich areas in laminates made of different thicknesses of CF/EP composite prepreps

2.3 CF/EP 复合材料层合板力学性能

图 7 为用两种厚度 CF/EP 复合材料预浸料制成层合板试样的应力-应变曲线。可以看出, 随着

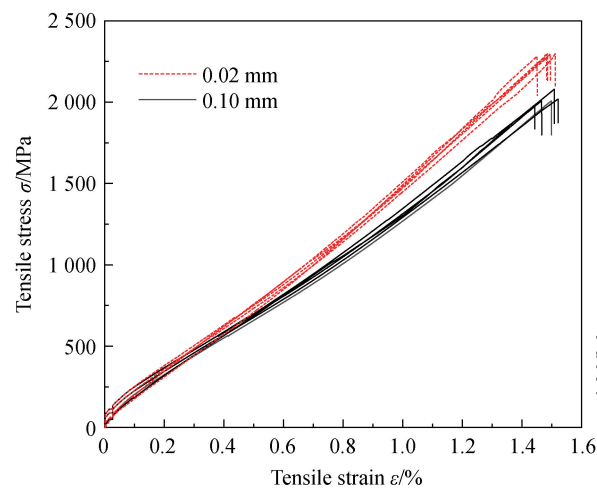


图 7 CF/EP 复合材料层合板试样的拉伸应力-应变曲线
Fig. 7 Tensile stress-strain curves of CF/EP composite laminate samples

外部载荷的增大，在相同应变水平下，薄 CF/EP 复合材料预浸料制成的层合板试样可以承受更高的载荷，这是由于其内部纤维的排布和树脂分布更加均匀，纤维偏转和树脂富集区等缺陷大大减少，避免了由于基体裂纹和纤维基体间的界面脱粘导致的相同应变水平下应力变小，使其具有更大的刚度^[16-17]。厚 CF/EP 复合材料预浸料制成的层合板试样抗拉强度平均为 2 000 MPa，而薄 CF/EP 复合材料预浸料制成的层合板试样平均抗拉强度提高了 15%，达到了 2 300 MPa；图 8 为用两种厚度 CF/EP 复合材料预浸料制成层合板试样在拉伸测试过程中由声发射设备监测到的试样内部纤维断裂和层间开裂的结果。可以看出，薄 CF/EP 复合材料预浸料制成的层合板试样整个测试过程持续时间为

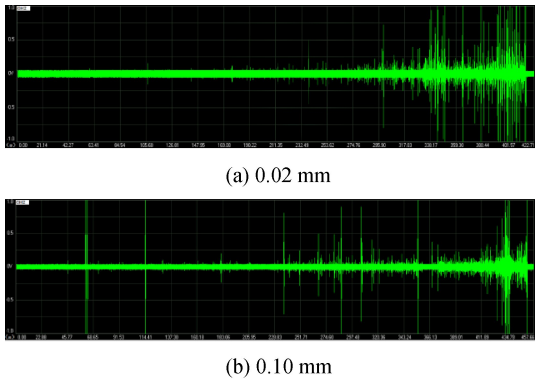


图 8 不同厚度 CF/EP 复合材料预浸料制成层合板试样声发射测试结果

423 s，在 290 s 后逐渐出现连续的由纤维断裂引起的波形；厚 CF/EP 预浸料制成的层合板试样整个测试过程持续时间为 457 s，在 65 s 和 114 s 出现两次明显波形，在 230 s 后出现连续的由纤维断裂和层间开裂引起的波形。这说明薄 CF/EP 复合材料预浸料制成的层合板在承受外部载荷时具有更好的抵抗层间开裂和纤维断裂的能力^[18-20]；这是由于薄 CF/EP 复合材料预浸料本身厚度较小，层间树脂层和层内树脂富集区的尺度更小，因而在受到外部载荷时层合板内部应力的分布更加均匀，其在服役过程中抵抗裂纹萌生和扩展的能力得到提高。

2.4 CF/EP 复合材料层合板的断裂形貌

图 9 为用两种厚度 CF/EP 复合材料预浸料制成层合板试样断裂破坏时宏观形貌的变化过程。可以看出，薄 CF/EP 复合材料预浸料制成的层合板试样以横向断裂为主，断口宏观形貌的集束性较高，没有观测到沿厚度方向的分层开裂现象。虽然在 CF/EP 复合材料中纤维的性能远高于树脂基体，但是基体可以起到均衡、分散载荷、保护纤维的作用。因此基体的破坏对整个层合板的破坏有重要影响^[21]。对于超薄 CF/EP 复合材料预浸料层合板而言，由于树脂富集区尺度较小，使纤维和树脂均匀分布，承受外部载荷时应力分布均匀，提高了其承载能力。而厚 CF/EP 复合材料预浸料制成的层合板试样在拉伸破坏时，不仅有横向基体的开裂，而且有明显的层间开裂现象，这使其断口宏观形貌呈爆炸式分布。这与其层间存在如图 5 所示的较大尺度的树脂富集区有关。由于树脂性能薄弱，裂纹一旦形成，便会在大尺寸的树脂富集区中产生应力集中，导致裂纹迅速扩展。图 8 也证实了厚 CF/EP 复合材料预浸料层合板中裂纹的早期形成与快速扩展的过程。这些结果表明减小 CF/EP 复合材料预浸料的厚度可以明显降低层合板试样裂纹的萌生和扩展速率，提高其断裂稳定性^[17, 22]。

断裂后 CF/EP 复合材料层合板试样横截面的微观形貌如图 10 所示。可以看到，薄 CF/EP 复合材料预浸料制成层合板试样中纤维从基体中拔出的长度小于厚 CF/EP 复合材料预浸料制成层合板，说明纤维与树脂基体界面结合良好，在其断口形貌中可以观察到短小、细密的小裂纹。这是由于超薄 CF/EP 复合材料预浸料层合板中的树脂富集区尺度小，裂纹的扩展受周围纤维的阻碍，或转向或停止扩展。相比薄 CF/EP 复合材料预浸料制成层合

Fig. 8 Acoustic emission test results of laminates made of different thicknesses of CF/EP composite prepregs

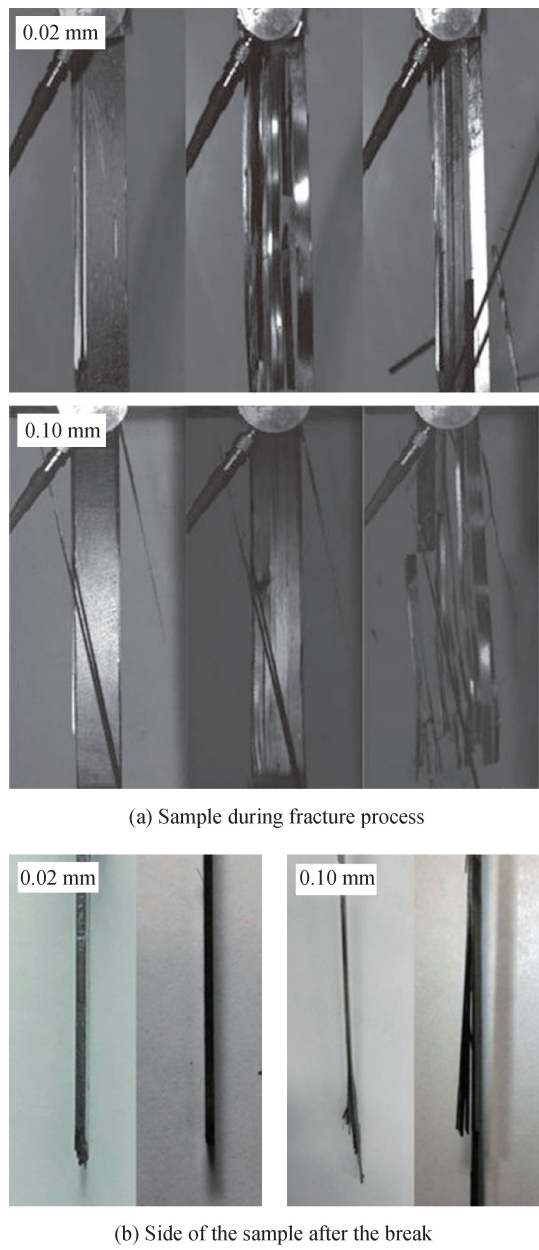


图9 不同CF/EP复合材料层合板试样断裂破坏时宏观形貌
Fig. 9 Macroscopic morphologies of fractures of different CF/EP composite laminates

板试样的断后截面, 厚 CE/EP 复合材料预浸料制成层合板试样的断后截面中出现了穿透性的大裂纹, 断裂后纤维从树脂基体拔出后留下的孔洞数量明显增加, 如图 10(b) 所示。这是由于厚 CF/EP 复合材料预浸料制成层合板试样中存在浸润较差的纤维束和尺度较大的树脂富集区导致的^[23]。进一步证明 CF/EP 复合材料预浸料的薄层化可以改善层合板中 EP 对 CF 的浸润性, 提高其承载能力。

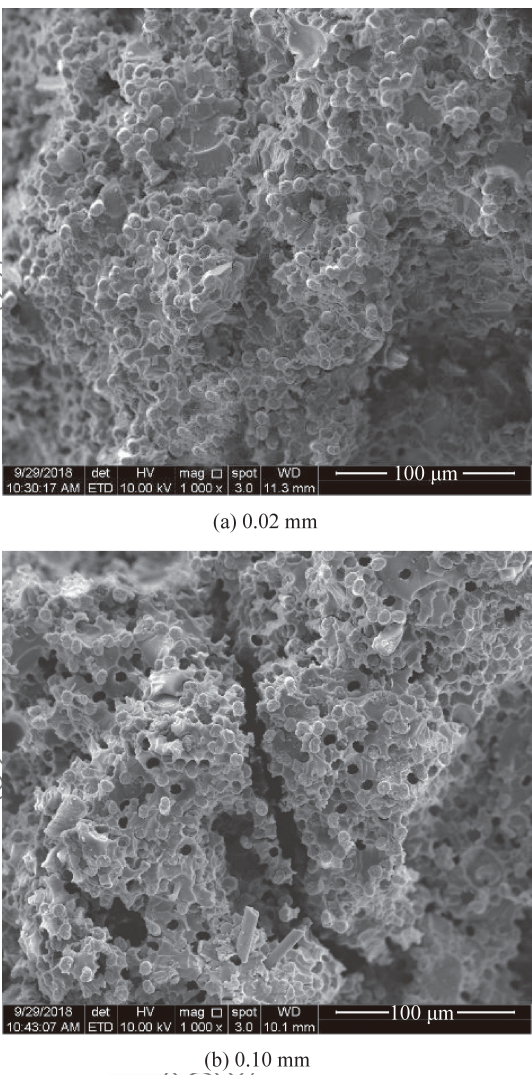


图10 断裂后CF/EP复合材料层合板试样横截面的微观形貌
Fig. 10 Micromorphologies of cross-sections of CF/EP composite laminate specimens after fracture

3 结 论

(1) 相对于常规厚度的碳纤维(CF)/环氧树脂(EP) 复合材料预浸料, 超薄 CF/EP 复合材料预浸料由于其单层内 CF 层数较少, 树脂对纤维的浸润均匀程度增加, 使树脂富集区尺度变小, 纤维排列的均匀度提高, 这提高了材料对裂纹扩展的抵抗能力, 使其抗拉强度比厚 CF/EP 复合材料预浸料制成的层合板提高 15%。

(2) CF/EP 复合材料预浸料的薄层化使层合板中树脂富集区尺度变小, 承受外部载荷时层合板内部应力分布更加均匀, 可以有效抑制层合板服役过程中裂纹的萌生和快速扩展, 显著提高试样抵抗拉伸载荷作用的能力。

(3) 超薄 CF/EP 复合材料预浸料制成的单向层合板的拉伸破坏以横向基体开裂为主;而厚预浸料制成的层合板的拉伸破坏既有横向基体开裂,也有厚度方向的分层开裂。

参考文献:

- [1] 张晓虎, 孟宇, 张伟. 碳纤维增强复合材料技术发展现状及趋势[J]. 纤维复合材料, 2004(1): 50-54.
ZHANG Xiaohu, MENG Yu, ZHANG Wei. Development status and trend of carbon fiber reinforced composite materials technology[J]. Fiber Composite Materials, 2004(1): 50-54 (in Chinese).
- [2] 董慧民, 益小苏, 安学锋, 等. 纤维增强热固性聚合物基复合材料层间增韧研究进展[J]. 复合材料学报, 2014, 31(2): 273-285.
DONG Huimin, YI Xiaosu, AN Xuefeng, et al. Research progress in interlayer toughening of fiber-reinforced thermosetting polymer matrix composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(2): 273-285 (in Chinese).
- [3] 彭公秋, 杨进军, 曹正华, 等. 碳纤维增强树脂基复合材料的界面[J]. 材料导报, 2011, 25(7): 1-4.
PENG Gongqiu, YANG Jinjun, CAO Zhenghua, et al. Interface of carbon fiber reinforced resin matrix composite[J]. Materials Review, 2011, 25(7): 1-4 (in Chinese).
- [4] 崔建国, 张文生, 蒋丽英, 等. 飞机复合材料结构损伤的预测方法[J]. 材料科学与工程学报, 2016, 34(5): 755-760.
CUI Jianguo, ZHANG Wensheng, JIANG Liying, et al. Prediction method for structural damage of aircraft composites[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2016, 34(5): 755-760 (in Chinese).
- [5] 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.
DU Shanyi. Advanced composite materials and aerospace[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12 (in Chinese).
- [6] 罗云烽, 孙永春, 段跃新, 等. 薄化层大丝束碳纤维复合材料性能研究[J]. 航空制造技术, 2010, 53(20): 75-78.
LUO Yunfeng, SUN Yongchun, DUAN Yuexin, et al. Study on properties of thinned layer large tow carbon fiber composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, 53(20): 75-78 (in Chinese).
- [7] 刘军, 朱星名, 胡伯仁, 等. 基于超声引导法的薄层化碳纤维性能研究[J]. 热加工工艺, 2014, 8(5): 108-119.
LIU Jun, ZHU Xingming, HU Boren, et al. Study on properties of thin layered carbon fiber based on ultrasound guided method[J]. Thermal Engineering, 2014, 8(5): 108-119 (in Chinese).
- [8] 姚佳伟, 贾紫娇, 牛一凡. 超薄 T700/环氧树脂预浸料力学性能研究及微观结构表征[J]. 塑料工业, 2017, 45(11): 104-106.
YAO Jiawei, JIA Zijiao, NIU Yifan. Mechanical properties and microstructure characterization of ultrathin T700/epoxy prepreg[J]. Plastics Industry, 2017, 45(11): 104-106 (in Chinese).
- [9] YUAN Y, WANG S, YANG H, et al. Analysis of pseudo-ductility in thin-ply carbon fiber angle-ply laminates[J]. Composite Structures, 2017, 180: 876-882.
- [10] SIHN S, KIM R Y, KAWABE K, et al. Experimental studies of thin-ply laminated composites[J]. Composites Science and Technology, 2007, 67: 996-1008.
- [11] ARTEIRO A, CATALANOTTI G, XAVIER J, et al. Notched response of non-crimp fabric thin-ply laminates[J]. Composites Science and Technology, 2013, 79(5): 97-114.
- [12] AMACHER R, CUGNONI J, BOTSIS J, et al. Thin ply composites: Experimental characterization and modeling of size-effects[J]. Composites Science and Technology, 2014, 101: 121-132.
- [13] WILSON S D R. Lateral spreading of fiber tows[J]. Journal of Engineering Mathematics, 1997, 32(1): 19-26.
- [14] 黄博, 苑寿同, 薛嘉伦. 碳纤维气疏扰动展纤器展纤过程仿真与实验[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(12): 19-25.
HUANG Bo, YUAN Shoutong, XUE Jialun. Simulation and experiment of fiber-optic process of fiber-optic airflow stimulator[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(12): 19-25 (in Chinese).
- [15] REN F, YU Y, CAO M H, et al. Effect of pneumatic spreading on impregnation and fiber fracture of continuous fiber-reinforced thermoplastic composites[J]. The Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2017, 36(21): 1554-1563.
- [16] 李稳, 陈蔚, 汤立群, 等. 基于纤维束增强树脂基复合材料测试的单向层合板层间剪切性能的预估方法[J]. 复合材料学报, 2018, 35(10): 199-209.
LI Wen, CHEN Wei, TANG Liqun, et al. Prediction method for interlaminar shear properties of unidirectional laminates based on fiber bundle reinforced resin matrix composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(10): 199-209 (in Chinese).
- [17] 林强, 王玖, 党万腾, 等. 超薄碳纤维预浸料制备复合材料力学性能研究[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2018, 37(3): 236-241, 277.

- LIN Qiang, WANG Jiu, DANG Wanteng, et al. Study on mechanical properties of composites prepared by ultrathin carbon fiber prepreg[J]. Journal of Chengdu University of Technology(Natural Science Edition), 2018, 37(3): 236-241, 277 (in Chinese).
- [18] 夏丽刚, 李爱菊, 阴强, 等. 碳纤维表面处理及其对碳纤维/树脂界面影响的研究[J]. 材料导报, 2006(S1): 254-257.
- XIA Ligang, LI Aiju, YIN Qiang, et al. Carbon fiber surface treatment and its effect on carbon fiber/resin interface[J]. Materials Review, 2006(S1): 254-257 (in Chinese).
- [19] 康欣然, 朱书华, 何梦临, 等. 超薄预浸料复合材料国内外发展现状和趋势[J]. 航空工程进展, 2016, 7(1): 7-16.
- KANG Xinran, ZHU Shuhua, HE Menglin, et al. Development status and trend of ultrathin prepreg composites at home and abroad[J]. Progress in Aeronautical Engineering, 2016, 7(1): 7-16 (in Chinese).
- [20] 周伟, 孙诗茹, 冯艳娜, 等. 风电叶片复合材料拉伸损伤破坏声发射行为[J]. 复合材料学报, 2013, 30(2): 240-246.
- ZHOU Wei, SUN Shiru, FENG Yanna, et al. Acoustic emission behavior of tensile damage and damage of wind power blade composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(2): 240-246 (in Chinese).
- [21] 刘玲, 黄争鸣, 周烨欣, 等. 超细纤维增强复合材料 I 型层间断裂韧性分析[J]. 复合材料学报, 2007, 24(4): 166-171.
- LIU Ling, HUANG Zhengming, ZHOU Yexin, et al. Analysis of fracture toughness of type I interlayer of ultrafine fiber reinforced composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(4): 166-171 (in Chinese).
- [22] 张小琦. 纤维增强复合材料变形与损伤的细观力学分析[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- ZHANG Xiaoqi. Micromechanical analysis of deformation and damage of fiber reinforced composites [D]. Chongqing: Southwest University, 2013 (in Chinese).
- [23] 杨平军, 袁剑民, 何莉萍. 碳纤维表面改性及其对碳纤维/树脂界面影响的研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(7): 129-136.
- YANG Pingjun, YUAN Jianmin, HE Liping. Research progress on surface modification of carbon fiber and its influence on carbon fiber/resin interface[J]. Materials Review, 2017, 31(7): 129-136 (in Chinese).