

紫外-冷凝老化对碳纤维/环氧树脂 复合材料性能的影响

刘瑜¹, 盛德星², 王辉³, 王玲^{3*}, 李茜³, 胡涛³, 李永³

(1.中国兵器工业标准化研究所, 北京 100089; 2.工业和信息化部电子第五研究所, 广州 511350;
3.西南技术工程研究所 装备环境效应与防护重庆市重点实验室, 重庆 400039)

摘要: **目的** 研究碳纤维/环氧树脂基复合材料在紫外光和冷凝环境条件下的老化特征及性能变化。**方法** 采用紫外-冷凝交替的加速试验对 3233/CF3011/52 复合材料进行加速老化研究, 借助力学试验机、扫描电镜 (SEM)、DMA 等技术手段, 观测研究老化前后复合材料的力学性能、微观形貌、玻璃化转变温度等变化。**结果** 随着老化时间的延长, 3233/CF3011/52 复合材料表面发黄, 局部纤维裸露更加明显, 弯曲强度呈下降趋势, 且老化 83 d 后, 弯曲强度下降约 50%, 基体树脂的纳米压痕深度有所增大。复合材料的储能模量下降了约 1 GPa, 内耗增大, 玻璃化转变温度随老化时间呈先增大、后降低的趋势。**结论** 3233/CF3011/52 复合材料的弯曲强度随老化时间的延长而下降, 并且断口形貌中纤维拔出痕迹更加明显, 表明紫外-冷凝交替作用对复合材料的纤维/树脂界面产生了一定程度破坏。老化前期, 紫外辐射能量使树脂基体继续交联, 一定程度上提高了复合材料的玻璃化转变温度, 而老化过程中水分子对树脂的增塑作用, 以及光老化降解使得基体树脂硬度下降, 材料的玻璃化转变温度降低。

关键词: 复合材料; 碳纤维; 紫外-冷凝; 老化特征; 断口形貌; 力学性能

中图分类号: TJ55 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9242(2025)01-0196-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.01.020

Effect of UV Condensation Aging on Properties of Carbon Fiber/Epoxy Resin Composites

LIU Yu¹, SHENG Dexing², WANG Hui³, WANG ling^{3*}, LI Qian³, HU Tao³, LI Yong³

(1. China Ordnance Industry Standardization Research Institute, Beijing 100089 China; 2. Fifth Institute of Electronics, Ministry of Industry and Information Technology, Guangzhou 511350 China; 3. Chongqing Key Laboratory of Equipment Environmental Effects and Protection, Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The work aims to study the aging characteristics and performance changes of carbon fiber/epoxy resin composites under ultraviolet light and condensation environmental conditions. The accelerated aging of 3233/CF3011/52 composites was studied by UV condensation alternating acceleration test. Techniques such as mechanical testing machines and SEM/DMA were applied to observe and study the changes in mechanical properties, microstructure, and glass transition temperature of compos-

收稿日期: 2024-09-09; 修订日期: 2024-11-06

Received: 2024-09-09; Revised: 2024-11-06

引文格式: 刘瑜, 盛德星, 王辉, 等. 紫外-冷凝老化对碳纤维/环氧树脂复合材料性能的影响[J]. 装备环境工程, 2025, 22(1): 196-202.

LU Yu, SHENG Xingxing, WANG Hui, et al. Effect of UV Condensation Aging on the Properties of Carbon Fiber/Epoxy Resin Composites[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(1): 196-202.

*通信作者 (Corresponding author)

ites before and after aging. As the aging time prolonged, the surface of 3233/CF3011/52 composites turned yellow, and local fiber exposure became more obvious. The bending strength showed a decreasing trend, and the bending strength after 83 days of aging decreased by about 50%. The nanoindentation depth of the matrix resin also increased; The storage modulus of composite materials decreased by about 1 GPa. The internal friction increased, and the glass transition temperature showed a trend of first increasing and then decreasing with aging time. The bending strength of 3233/CF3011/52 composites decrease with the prolongation of aging time, and the fiber pull-out marks in the fracture morphology are more obvious, indicating that the alternating action of UV condensation causes a certain degree of damage to the fiber/resin interface of the composite material; In the early stage of aging, UV radiation energy causes the resin matrix to continue cross-linking, which to some extent increases the glass transition temperature of the composite material. However, during the aging process, the plasticizing effect of water molecules on the resin and photo aging degradation lead to a decrease in the hardness of the matrix resin and a decrease in the glass transition temperature of the material.

KEY WORDS: composites; carbon fibre; UV condensation; aging characteristics; fracture morphology; mechanical property

碳纤维增强树脂基复合材料因比强度和比模量高,耐环境性能和化学稳定性好,以及可设计性等诸多优点,在航空航天、交通运输、基础设施等诸多领域或方向得到应用^[1-4]。然而,在实际使用过程中,特别是严酷的环境条件下,复合材料可能会受到多种环境因素的综合影响作用,如光辐射、水分、氧气、盐雾、温度及其变化等。其中,紫外光、水分对碳纤维增强树脂基复合材料的影响作用尤为明显^[5-9],长期累积作用会导致其性能/功能劣化,影响其服役安全性和使用寿命。研究树脂基复合材料的老化特征及性能变化对复合材料的使用和腐蚀控制具有重要指导作用和意义。目前,关于碳纤维增强树脂基复合材料的紫外老化、吸湿老化研究较多。Nguyen 等^[10]研究发现,紫外老化对手糊成形工艺制作的碳纤维环氧树脂基复合材料的拉伸强度没有影响。Pérez-Pacheco 等^[11]研究了碳纤维增强 EP 复合材料在 3 种不同湿度(22%、25%、95%)环境条件下的拉伸性能和失效模式,对比分析了吸湿对复合材料性能的影响。张凤玲等^[12]研究了 T300/QY8911 复合材料的吸湿行为及其对力学性能的影响,发现其玻璃化转变温度随着吸湿率的增加而下降,拉伸强度随着湿热处理时间的延长呈现下降趋势,但压缩强度变化不大。相关研究结果表明^[7-13],紫外辐射和凝露综合作用对纤维增强复合材料的性能影响比单个因素更大。本文以 3233/CF3011/52 碳纤维增强环氧树脂基复合材料为研究对象,研究了紫外光-冷凝交替作用下复合材料的表观性能、纳米压痕硬度、动态力学性能等变化,分析紫外光、水分等因素对复合材料性能的影响作用,为复合材料的使用与防护提供参考。

1 试验

1.1 样品

试验样品为 3233/CF3011/52 碳纤维增强环氧树脂基复合材料,参考 ASTM D7264,采用热压罐方式

制备复合材料弯曲试样,样品尺寸为 160 mm×13 mm。

1.2 加速试验条件

将试样放入 QUV/SPRAY 紫外光老化试验箱中开展老化试验,并定期取样进行检测,试验方法参考 GB/T 14522,具体试验条件见表 1。对加速试验前后复合材料样品进行表观性能、弯曲强度、红外光谱等测试,对比分析 3233/CF3011/52 碳纤维增强环氧树脂基复合材料的性能变化特征和规律。

表 1 加速老化试验条件
Tab.1 Condition of accelerated aging test

| 暴露段 | 荧光紫外灯类型 | 辐照度/ (W·m ⁻² ·nm) | 控制 波长/nm | 黑板温度计 温度/℃ |
|--------|---------|---------------------------------|-------------|---------------|
| 4 h 光照 | UVB-313 | 0.71±0.02 | 310 | 60±3 |
| 4 h 冷凝 | — | — | — | 50±3 |

1.3 性能测试

采用美特斯工业系统有限公司的高低温电子拉力试验机测试复合材料三点弯曲强度。采用美国 TA 仪器公司生产的 Q800 型动态热分析仪测试复合材料的动态力学性能,测试采用双悬臂梁测试模式,测试频率为 1 Hz,升温速率为 4 K/min,从室温升至 200 ℃。采用 NanoTest Vantage 纳米压痕仪测试老化前后复合材料的硬度变化值。采用 Quattro-S 场发射扫描电镜观察复合材料试验前后的微观形貌。

2 结果与分析

2.1 表观形貌

3233/CF3011/52 碳纤维增强环氧树脂基复合材料实验室加速试验前后的宏观形貌变化如图 1 所示。可以看出,试验前,复合材料表面较为平整,0°和 90°方向的碳纤维交织结构纹路较为清晰,无明显裂纹、

气孔等缺陷。随着老化时间的延长,试样表面发黄变色,并且颜色逐渐加深。这可能是由于表层树脂在紫外光等作用下发生光氧化反应,发生降解,形成新的发色基团,导致表面变色。同时,试样表面原有的清晰交织纹路逐渐模糊,局部表面出现碳纤维裸露现象。试验至 60 d 时,裸露出的发亮发白的碳纤维占试样表面 30%左右,表明复合材料试样表层树脂已发

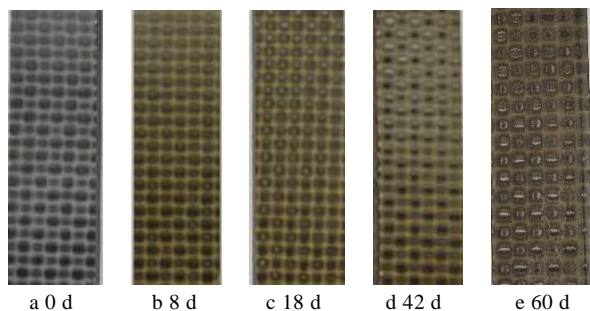


图 1 复合材料加速试验条件下的宏观形貌
Fig.1 Macroscopic morphology of composites after accelerated aging test

生一定程度的老化降解,出现表层树脂粉化和剥落。

3233/CF3011/52 碳纤维增强环氧树脂基复合材料加速老化试验不同时间的表面微观形貌如图 2 所示。由图 2 可见,老化前,复合材料表面较为平整,有少量微孔,树脂将碳纤维完全包裹。试验 18 d 的复合材料,表面变得粗糙不平,局部树脂脱落,微孔有所增大和增多,并出现较为明显的局部纤维裸露现象。试验至 83 d,复合材料表面的局部纤维裸露面积和程度加剧,裸露纤维表面几乎没有树脂(见局部放大图),这也使得宏观上复合材料表面局部发白发亮。复合材料表面形貌的变化主要是由于在紫外光、水分、温度的持续作用下,其表面发生光老化并形成产物,同时表面微孔/微裂纹的增多又促进了水汽的渗透扩散,水分由于毛细作用和尖端效应会渗入并逐渐破坏碳纤维与基体树脂的界面^[14-16]。随着老化试验时间的延长,纤维/树脂界面结合力进一步下降,树脂和表面老化产物逐渐剥落,导致局部纤维逐渐裸露,并越发光洁。

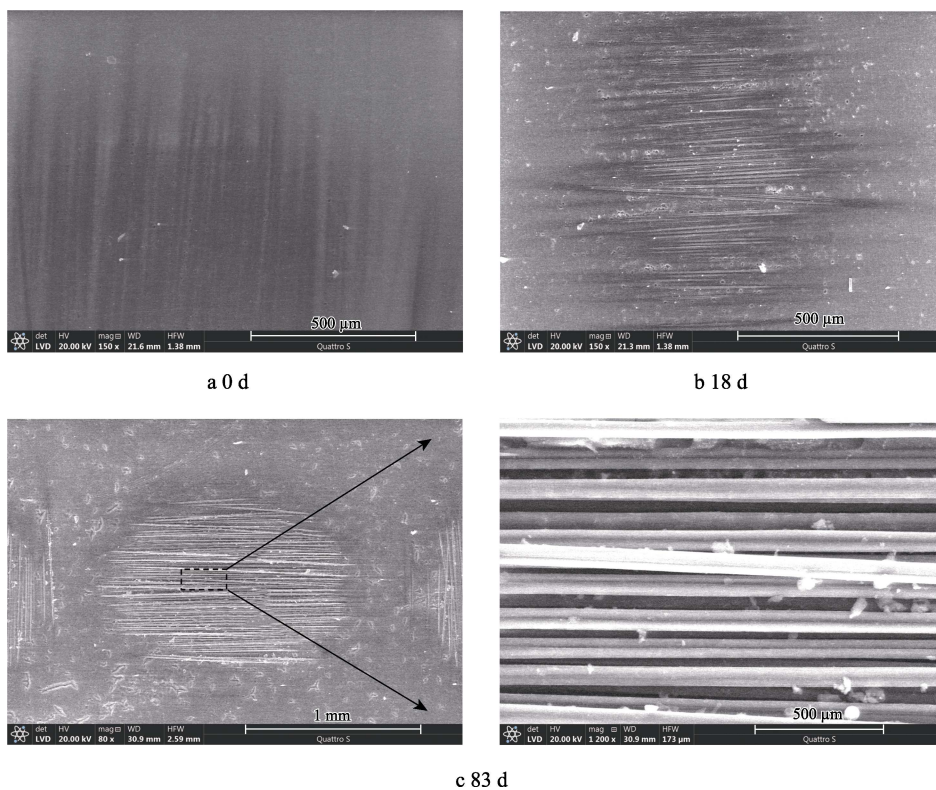


图 2 3233/CF3011/52 复合材料不同老化时间的微观形貌
Fig.2 Microscopic morphology of 3233/CF3011/52 composites at different aging time

2.2 弯曲性能

3233/CF3011/52 碳纤维增强环氧树脂基复合材料弯曲强度随时间的变化规律如图 3 所示。复合材料原始状态的弯曲强度约 528 MPa,随着加速试验时间的延长,弯曲强度整体呈下降趋势。其中,加速试验早期(30 d 内),弯曲强度有所波动,但整体变化不

明显。试验至 42 d 时,环氧树脂基复合材料的弯曲强度明显下降,下降了约 46%。之后至 83 d 时,弯曲强度下降幅度趋于平缓。分析认为,随着紫外光、冷凝等因素的持续作用,复合材料表面逐渐产生微裂纹、基体树脂老化脱落,同时冷凝过程中水汽渗透扩散一定程度上减弱了复合材料层间结合,导致在弯曲应力作用下复合材料表面发生断裂破坏的力减小。由于

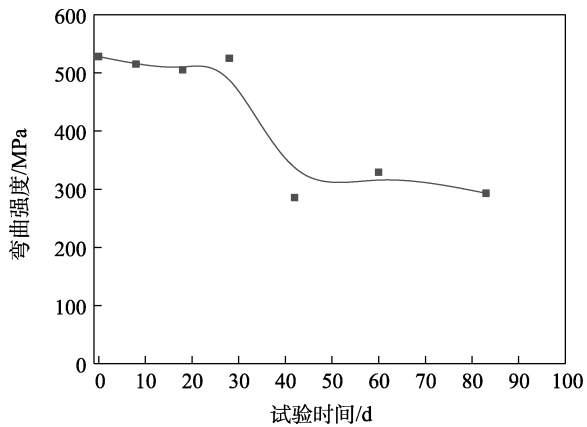


图 3 复合材料加速试验条件下弯曲强度随时间的变化

Fig.3 Changes in yield strength over time under accelerated aging test for composites

复合材料老化特别是光老化通常对材料表面影响显著, 并缓慢向内部发展, 随试验时间进一步延长, 材料表面老化对整体力学性能变化的影响减小, 表现为弯曲强度变化不明显。

3233/CF3011/52 复合材料紫外-冷凝加速老化前后的弯曲断面形貌如图 4 所示。可见, 加速老化前, 复合材料的断面相对较为整齐, 并且纤维表面附有大量的基体树脂, 表明碳纤维与基体树脂界面结合较为牢固, 其破坏形式主要为纤维拉断破坏。老化后, 复合材料破坏断面更为参差不齐, 能够明显观察到碳纤维从基体树脂中拔出的痕迹, 碳纤维表面比较光滑, 并且有树脂脱落。表明基体树脂与碳纤维的界面结合力在紫外-冷凝交替循环作用下遭到破坏减弱, 纤维与基体出现脱黏, 破坏形式为纤维断裂和纤维/基体界面失效, 导致复合材料的宏观力学性能下降。

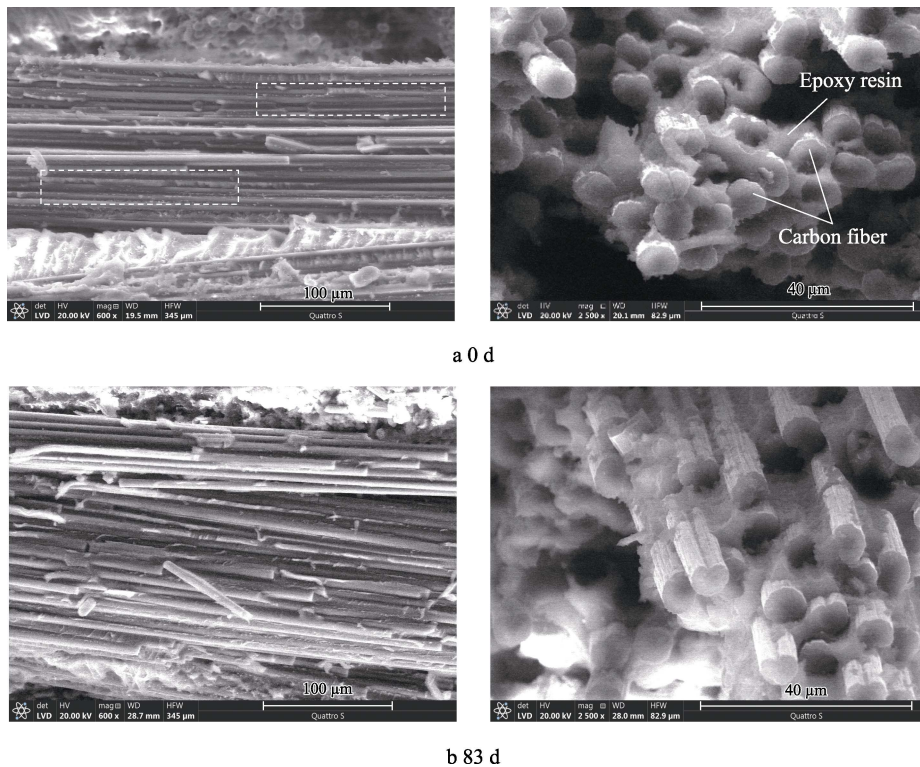


图 4 3233/CF3011/52 复合材料老化 83 d 前后的 SEM 照片

Fig.4 SEM photographs for fractures of 3233/CF3011/52 composites before and after aging for 83 d

2.3 纳米压痕硬度

将老化前后的复合材料试样表面进行打磨抛光, 直至在显微镜下能清晰辨别纤维轮廓, 选取基体树脂部位进行纳米压痕测试。重点测试分析了复合材料试验早期的性能变化特征, 3233/CF3011/52 复合材料老化试验前后的纳米压痕载荷-位移曲线如图 5 所示。可以看出, 随着加载力的逐渐增大, 压入复合材料样品的深度也随之增加。当载荷达到最大值时, 位移也达到最大值, 即最大压痕深度。随后快速卸载, 下压深度逐渐减小, 并最终回至一个固定值。此时的深度

为残留压痕深度, 表明复合材料表面留下了永久的塑性变形。

对比不同老化时间的复合材料纳米压痕载荷-位移曲线可知, 相对于老化前状态, 3233/CF3011/52 复合材料老化后的纳米压痕载荷-位移曲线整体向右偏移。其中, 老化前, 3233/CF3011/52 复合材料的最大下压深度约 418 nm, 老化 18、42 d 的最大下压深度分别为 974、510 nm 左右, 即老化后复合材料的最大下压深度有不同程度的增大, 呈现先显著增大、后降低的变化趋势。同时, 复合材料残余压痕深度的变化规律与最大下压深度一致, 表明完全卸载后复

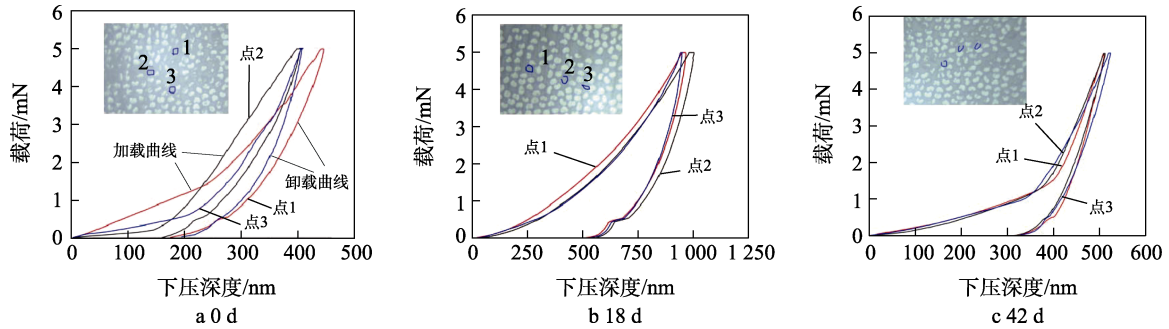


图 5 3233/CF3011/52 复合材料老化试验前后的纳米压痕载荷-位移曲线

Fig.5 NanoTest Vantage load displacement curve of 3233/CF3011/52 composites before and after accelerated aging test

合材料表面产生了不同程度的塑性变形。纳米压痕测试中的压痕深度可表征材料的坚硬程度，能够反映复合材料基体树脂抵抗局部变形的能力。老化前后 3233/CF3011/52 复合材料的最大下压深度和残余压痕深度变化，表明基体树脂抵抗外物压入表面的能力下降。这可能是由于加速试验中的冷凝过程会在复合材料表面形成水膜，进入复合材料的水会对基体树脂产生作用，引起结构松弛、分子链断链等，导致硬度下降。紫外光使得部分未完全固化树脂进一步交联，树脂交联程度增加及后固化反应完成对硬度增大起到了有益作用，使得基体树脂硬度有所增加。

2.4 动态力学性能

3233/CF3011/52 复合材料紫外-冷凝老化不同时间的储能模量-温度曲线和损耗因子-温度曲线如图 6 所示。可以看出，随着老化时间的增加，3233/CF3011/

52 复合材料的储能模量（包括室温模量和高温模量）均有所下降，特别是室温模量下降更为明显，下降了约 1 GPa。室温模量一般反映物理老化结果，而高温模量与交联密度有关^[17-18]，表明紫外-冷凝交替循环作用对复合材料结构产生了影响。从 3233/CF3011/52 复合材料试验前后的损耗因子曲线变化可知，随着老化时间的增加， $\tan\delta$ 峰的峰值增大，并且 $\tan\delta$ 峰向低温方向略有偏移，表明复合材料的内耗增大，玻璃化转变温度降低。碳纤维增强环氧树脂基复合材料的内耗主要归结于界面的不完善和树脂基体的能量耗散^[19-20]，在紫外-冷凝交替循环作用下，扩散至复合材料内部的水分子对基体树脂有增塑作用，并对碳纤维产生一定的剪切力。加之交替循环过程中温度变化引起界面应力变化等，导致复合材料基体/纤维界面遭到一定程度破坏，从老化前后复合材料断面形貌也可以证实这一点。界面性能下降，树脂基体与碳纤维产生摩擦，内耗增大，内耗峰高度增加。

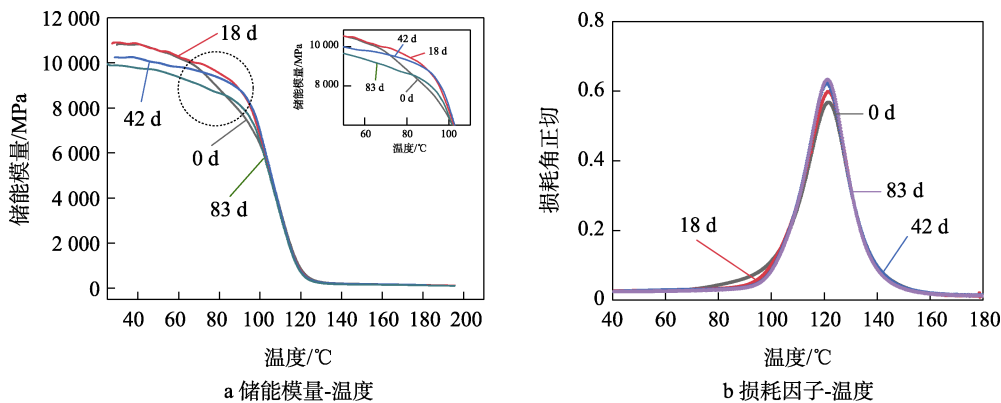


图 6 3233/CF3011/52 复合材料加速老化试验前后的动态力学性能曲线

Fig.6 Dynamic mechanical property curves of 3233/CF3011/52 composites before and after accelerated aging test: a) energy storage modulus-temperature; b) lose factor-temperature

复合材料玻璃化转变温度的确定可以由 DMA 数据按几种不同的方式来确定，如采用起始点、中点、切线交点等，不同方式确定的玻璃化转变温度可能存在差别^[21]。对于复合材料层压板，从工程角度，通常关注材料的最初软化，因此储能模量台阶变化的起始温度被广泛接受，作为复合材料层压板的玻璃化转变

温度^[22]。根据 3233/CF3011/52 复合材料不同老化时间的储能模量曲线得到的玻璃化转变温度见表 2，可见复合材料的玻璃化转变温度随着试验时间的延长，整体呈现先增加、后降低的变化趋势，试验 42 d 的复合材料的玻璃化转变温度较初始状态升高了 2 °C 左右，试验 83 d 复合材料的玻璃化转变温度又有所

下降。这主要是由于在加速试验过程中, 复合材料受到紫外光、水分等交替持续作用^[1,23], 试验初期在环境因素特别是紫外光作用下, 部分树脂基体发生了后固化反应, 即发生了继续交联, 使得分子链段运动受阻, 玻璃化温度有所上升。随着试验时间的进一步延长, 一方面复合材料表面的基体树脂因光氧化作用发生老化降解, 分子链断裂; 另一方面, 水分逐渐渗入复合材料内部, 对基体树脂产生增塑作用, 会增大分子链间距, 同时水分子与基体中的某些极性基团作用, 破坏了原有的交联结构^[24], 导致复合材料玻璃化转变温度下降。

表 2 不同老化时间下 3233/CF3011/52 复合材料的玻璃化转变温度

Tab.2 Glass transition temperature of 3233/CF3011/52 composites at different aging time

| 试验时间/d | 计算获得的玻璃化转变温度/℃ |
|--------|----------------|
| 0 | 92.5 |
| 18 | 92.3 |
| 42 | 94.6 |
| 83 | 92.6 |

3 结论

1) 在紫外-冷凝环境作用下, 3233/CF3011/52 复合材料表层树脂剥落, 并出现明显的局部纤维裸露, 弯曲强度随老化时间呈下降趋势, 老化 83 d 的弯曲强度下降约 50%。老化后, 断口形貌中纤维拔出的痕迹更加明显, 表明加速老化一定程度上破坏了纤维/树脂的界面性能。

2) 老化后复合材料基体树脂的纳米压痕深度有所增大, 扩散进入复合材料内部的水分子对基体树脂产生物理和化学作用, 导致硬度下降。

3) 老化后复合材料的内耗增大, 储能模量下降了约 1 GPa, 玻璃化转变温度随老化时间呈先增大、后降低的趋势。前期紫外老化一定程度上提高了复合材料的玻璃化转变温度, 而水分子的增塑作用以及树脂光老化降解使玻璃化转变温度降低。

参考文献:

[1] 郭健, 张天翼. 海军航空器用树脂基复合材料海洋环境老化行为的研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(5): 102-108.
GUO J, ZHANG T Y. Research Overview on Aging Behaviours of Resin Matrix Composites for Naval Aircrafts in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(5): 102-108.

[2] WANG S C, ZHANG J, LIU L, et al. Evaluation of Cooling Property of High Density Polyethylene (HDPE)/Titanium Dioxide (TiO₂) Composites after Accelerated Ultra-

violet (UV) Irradiation[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2015, 143: 120-127.

[3] DE SOUZA RIOS A, DE AMORIM W F, DE MOURA E P, et al. Effects of Accelerated Aging on Mechanical, Thermal and Morphological Behavior of Polyurethane/Epoxy/Fiberglass Composites[J]. Polymer Testing, 2016, 50: 152-163.

[4] ALMEIDA J H S, SOUZA S D B, BOTELHO E C, et al. Carbon Fiber-Reinforced Epoxy Filament-Wound Composite Laminates Exposed to Hygrothermal Conditioning[J]. Journal of Materials Science, 2016, 51(9): 4697-4708.

[5] LIU L L, ZHAO Z H, CHEN W, et al. An Experimental Investigation on High Velocity Impact Behavior of Hygrothermal Aged CFRP Composites[J]. Composite Structures, 2018, 204: 645-657.

[6] 李涛, 曲艳双, 周秀燕, 等. 复合材料老化性能影响因素的研究[J]. 纤维复合材料, 2015, 32(2): 22-25.
LI T, QU Y S, ZHOU X Y, et al. Study in the Impacting Factors of Composite Aging Properties[J]. Fiber Composites, 2015, 32(2): 22-25.

[7] SAADAMANESH H, TAVAKKOLIZADEH M, OSTOFINEJADM M. Environmental Effects on Mechanical Properties of Wet Lay-up Fiber-Reinforced Polymer[J]. ACI Materials Journal, 2010, 107(3): 267.

[8] 刘治国, 贾明明, 王晓刚, 等. 某型复合材料加速腐蚀与大气腐蚀当量关系分析[J]. 装备环境工程, 2018, 15(1): 66-69.
LIU Z G, JIA M M, WANG X G, et al. Equivalent Relation between Accelerated Corrosion and Atmospheric Corrosion of Composite Material[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(1): 66-69.

[9] HULATT J, HOLLAWAY L, THORNE A. Preliminary Investigations on the Environmental Effects on New Heavyweight Fabrics for Use in Civil Engineering[J]. Composites Part B: Engineering, 2002, 33(6): 407-414.

[10] NGUYEN T C, BAI Y, ZHAO X L, et al. Effects of Ultraviolet Radiation and Associated Elevated Temperature on Mechanical Performance of Steel/CFRP Double Strap Joints[J]. Composite Structures, 2012, 94(12): 3563-3573.

[11] PÉREZ-PACHECO E, CAUICH-CUPUL J I, VALADEZ-GONZÁLEZ A, et al. Effect of Moisture Absorption on the Mechanical Behavior of Carbon Fiber/Epoxy Matrix Composites[J]. Journal of Materials Science, 2013, 48(5): 1873-1882.

[12] 张凤玲, 宋体杰, 马克明, 等. T300/QY8911 复合材料湿热行为的研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(2): 32-35.
ZHANG F L, SONG T J, MA K M, et al. Hydrothermal Behaviors of T300/QY8911 Composites[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(2): 32-35.

[13] 杨曙兰, 刘伟庆, 方园. 复合材料型材在紫外-凝露和自然环境下老化机制[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2017, 39(5): 97-103.
YANG S L, LIU W Q, FANG Y. Ageing Mechanism of Composite Pultruded Profiles in UV-Condensation and

- Nature Ageing Environments[J]. Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition), 2017, 39(5): 97-103.
- [14] 袁应立, 王继辉. 两种玻璃纤维增强复合材料体系的湿热老化研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(10): 79-84.
YUAN Y L, WANG J H. Study on Hydrothermal Aging of Two Kinds of Glass Fiber Reinforced Composite[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2017(10): 79-84.
- [15] 王国建, 孙耀宁, 蒋万乐. 玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料在温湿和紫外辐照环境中的老化行为[J]. 机械工程材料, 2018, 42(9): 11-15.
WANG G J, SUN Y N, JIANG W L. Aging Behavior of Glass Fiber Reinforced Epoxy Resin Composite in Warm-Wet and Ultraviolet Irradiation Environment[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2018, 42(9): 11-15.
- [16] 乔琨, 朱波, 高学平, 等. 紫外老化对碳纤维增强环氧树脂复合材料性能的影响[J]. 功能材料, 2012, 43(21): 2989-2992.
QIAO K, ZHU B, GAO X P, et al. Influence of Artificial Accelerating UV Aging on Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composite[J]. Journal of Functional Materials, 2012, 43(21): 2989-2992.
- [17] 陈跃良, 王安东, 卞贵学, 等. 海洋环境下 G827/3234 复合材料老化机制及当量加速关系[J]. 复合材料学报, 2018, 35(12): 3304-3312.
CHEN Y L, WANG A D, BIAN G X, et al. Aging Mechanism and Equivalent Acceleration Relationship of G827/3234 Composite in the Marine Environment[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2018, 35(12): 3304-3312.
- [18] 刘成臣, 王浩伟, 鲁国富, 等. 复合材料在海洋大气环境中的加速环境谱及当量化[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(7): 692-696.
LIU C C, WANG H W, LU G F, et al. Accelerated Corrosion Environment Spectrum and Equivalent Relation of Composite Materials in Ocean Atmospheric Environment[J]. Corrosion & Protection, 2014, 35(7): 692-696.
- [19] HANG Y, ZHU X, MEI Z, et al. Experimental Study on Natural Ageing Character of T300/Epoxy Composite under Marine Environmental Load[J]. Journal of Materials Engineering, 2011, 40(12): 25-28.
- [20] TAO L I, YAN Q U, ZHOU X, et al. Study in the Impacting Factors of Composite Aging Properties[J]. Fiber Composites, 2015, 46(6): 564-569.
- [21] CMH-协调委员会. 复合材料手册-4-金属基复合材料[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2017: 272.
CMH-17 Coordination Committee. Composite Material Handbook[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2017: 272.
- [22] RIESEN R, 陆立明. 热固性树脂[M]. 上海: 东华大学出版社, 2009: 232.
RIESEN R, LU L M. Thermosets[M]. Shanghai: Donghua University Press, 2009: 232.
- [23] 许燕杰, 肇研, 汤冰洁, 等. UVA 紫外辐射对室内碳纤维增强环氧树脂基复合材料性能的影响[J]. 复合材料学报, 2013, 30(2): 63-69.
XU Y J, ZHAO Y, TANG B J, et al. Effects of UVA Irradiation on Properties of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Resin Composites Indoor[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2013, 30(2): 63-69.
- [24] 高坤, 史汉桥, 孙宝岗, 等. 湿热老化对玻璃纤维/环氧树脂复合材料性能的影响[J]. 复合材料学报, 2016, 33(6): 1147-1152.
GAO K, SHI H Q, SUN B G, et al. Effects of Hydro-Thermal Aging on Properties of Glass Fiber/Epoxy Composites[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2016, 33(6): 1147-1152.