

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.05.019

风电叶片用碳 / 玻层内混杂复合材料湿热老化性能

肖远航¹, 陆承志¹, 王国军², 陈亚飞², 阳泽濠¹, 张辉¹, 赵大文²

(1. 东华大学材料科学与工程学院, 纤维材料改性国家重点实验室, 上海 201620; 2. 上海电气风电集团股份有限公司, 上海 200240)

摘要: 为研究风电叶片用层内混杂碳纤维和玻璃纤维织物增强环氧树脂复合材料在湿热环境下的性能变化, 采用真空辅助树脂灌注 (VARI) 成型工艺制备碳 / 玻层内混杂复合材料层压板, 研究了 VARI 成型层内混杂复合材料在湿热老化后的界面结构与力学性能的变化规律。结果表明, 湿热老化后的层内混杂复合材料中的环氧树脂发生部分水解, 树脂含量显著降低, 出现明显的基体脱粘现象; 碳 / 玻界面处的空隙增大, 层内混杂复合材料的界面结合降低; 碳 / 玻混杂比与复合材料中水的扩散系数呈现明显的负相关; 碳 / 玻混杂比提高, 老化初始阶段复合材料的 0° 拉伸强度、0° 压缩弹性模量和弯曲弹性模量均有所提高。随着湿热老化时间的增加, 碳 / 玻层内混杂复合材料的部分力学性能在下降到一定程度时会趋于稳定。

关键词: 风电叶片复合材料; 碳 / 玻层内混杂; 混杂比; 湿热老化; 力学性能

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)05-0113-08

Hygrothermal Aging Performance of Carbon/Glass Fiber Inner-ply Hybrid Composites for Wind Turbine Blades

Xiao Yuanhang¹, Lu Chengzhi¹, Wang Guojun², Chen Yafei², Yang Zehao¹, Zhang Hui¹, Zhao Dawen²

(1. State Key Laboratory for Modification of Chemical Fibers and Polymer Materials, School of Materials Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Shanghai Electric Wind Power Group Co., Ltd., Shanghai 200240, China)

Abstract : In order to study the performance changes of hybrid carbon fiber and glass fiber fabric reinforced epoxy resin composites for wind turbine blades under hygrothermal environment, vacuum-assisted resin infusion (VARI) molding process was used to prepare carbon/glass inner-ply hybrid composite laminates. The changes of interface structure and mechanical properties of VARI formed carbon/glass inner-ply hybrid composites after hygrothermal aging were studied. The results show that the epoxy resin in the inner-ply hybrid composites after hygrothermal aging is partially hydrolyzed, the resin content is significantly reduced, and the matrix debonding phenomenon is obvious; the void at the carbon/glass interface increases and the interfacial bonding of the hybrid composites decreases. There is a significant negative correlation between the carbon/glass hybrid ratio and the diffusion coefficient of water in the composites. With the increase of carbon/glass hybrid ratio, the 0° tensile strength, 0° compressive modulus and flexural modulus of the composites are improved during the initial stage of aging. With the increase of hygrothermal aging time, some mechanical properties of the carbon/glass hybrid composites tend to be stable when they decrease to a certain extent.

Keywords : wind turbine blade composite; carbon/glass inner-ply hybrid; hybrid ratio; hygrothermal aging; mechanical property

风能是一种清洁能源,我国正在加快发展风机发电等新能源。风机发电主要是依靠风电叶片对风能的捕捉,而其捕捉效率与叶片长度的二次方成正比^[1]。单一开展风电叶片大型化的研究已经与风机容量的增长需求无法充分匹配,兼顾轻量化、低成本

和高性能化正成为现代先进风电叶片材料新的发展方向^[2]。传统玻璃纤维 (GF) 已经无法满足风电叶片大型化发展对增强材料刚度等力学性能的需求。相比之下,碳纤维 (CF) 因具有远高于 GF 的拉伸强度与模量,在国外广泛应用于风电叶片的制造。然

基金项目: 上海市科技创新行动计划项目 (18DZ1101000)

通信作者: 赵大文, 硕士, 副总工程师, 从事叶片设计工作

收稿日期: 2022-02-10

引用格式: 肖远航, 陆承志, 王国军, 等. 风电叶片用碳 / 玻层内混杂复合材料湿热老化性能 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(5):113-120.

Xiao Yuanhang, Lu Chengzhi, Wang Guojun, et al. Hygrothermal aging performance of carbon/glass fiber inner-ply hybrid composites for wind turbine blades[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(5):113-120.

而,CF的价格远高于GF,并且其制造难度也较高。CF/GF(碳/玻)混杂织物对CF和GF起到了一个优势互补的作用,使得叶片材料具有更强的可设计性^[3]。因此,以层内编织的碳/玻混杂织物为增强相,通过真空辅助树脂灌注(VARI)成型工艺制备层内混杂复合材料,既可以沿用风电叶片的传统成型工艺,并降低材料成本,同时又解决了GF耐久性低的问题。

最近几年,已有很多学者开展风电叶片用碳/玻混杂复合材料结构与性能的研究。马腾等^[4]研究了碳/玻层内混杂复合材料拉伸失效机制与复合材料碳/玻混杂比(体积比)以及混杂类型的影响关系,发现在混杂类型一致时,碳/玻混杂比为1.5:1时复合材料的拉伸性能较好。曾帅等^[5]研究了不同混杂类型和不同碳/玻混杂比的层内混杂复合材料拉伸性能的变化及破坏模式,得出纤维与树脂间的界面结合强度只与材料厚度方向上界面的不同形式有关。许经纬等^[6]研究了风电用碳/玻混杂复合材料的静态性能受高低温影响的变化规律,发现在特定温度下复合材料的拉伸、弯曲与层间剪切强度提高,而同温度下的混杂复合材料的力学性能优于单一纤维增强复合材料。通常来说,风电叶片在服役环境中不可避免地会长时间受到水汽和温度的影响,复合材料发生腐蚀失效,危害风电机组使用安全。因此研究混杂复合材料风电叶片的湿热老化行为是十分必要的,但目前的研究多针对混杂复合材料静力学性能或纯GF复合材料的湿热老化性能,针对碳/玻混杂复合材料湿热老化研究较少。

笔者通过VARI成型制备碳/玻层内混杂织物增强环氧树脂复合材料,研究复合材料在湿热老化后的界面结构与力学性能的变化规律,发现湿热老化对混杂复合材料的界面产生严重破坏,而复合材料的部分力学性能在下降到一定程度时会趋于稳定。

1 实验部分

1.1 主要原料

CF:SYT45S-24K,中复神鹰碳纤维股份有限公司;

GF:ECT-468G-2400,重庆国际复合材料股份有限公司;

风电叶片真空灌注专用环氧树脂:2511-1A,上纬(天津)风电材料有限公司;

固化剂:2511-1BS,上纬(天津)风电材料有限公司。

1.2 主要仪器及设备

真空烘箱:NJ303-12型,慈溪市峻航电器设备有限公司;

恒温水浴锅:HW-308型,江苏奈乐仪器设备制造有限公司;

树脂收集装置:RCA-244型,江苏世尔特环保设备有限公司;

场发射扫描电子显微镜(FESEM):JSM-7500F型,日本电子株式会社;

树脂镶嵌机:MT-1H型,特鲁利(苏州)材料科技有限公司;

金相显微镜:Axiove型,德国卡尔·蔡司集团;

电子万能试验机:LD23型,深圳市兰博三思材料检测有限公司。

1.3 碳/玻层内混杂复合材料的制备

碳/玻层内混杂单向织物为课题组自行设计,委托宜兴市中碳科技有限公司采用CF和GF编织而成,碳/玻混杂比分别为1:2,1:1和2:1。采用配套的固化剂对风电叶片真空灌注专用环氧树脂进行固化,树脂与固化剂的质量比为1:1。

图1为采用VARI工艺制备混杂复合材料层合板的流程图。整个复合材料脱泡与灌注过程温度均维持在40℃,复合材料的固化工艺为:以5℃/min升温速率提高到95℃恒温2h促进分子链运动,然后再以8℃/min升温速率提高到130℃并恒温0.5h进行固化,固化完全后的层合板纤维体积分数约为40%。采用上述工艺分别制备三种不同碳/玻混杂比的碳/玻层内混杂复合材料层合板,并按照相关标准加工成一定规格的试样,用于力学性能等相关测试。

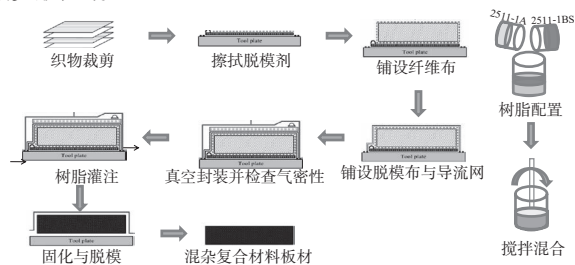


图1 VARI工艺制备混杂复合材料层合板流程图

1.4 湿热老化试验

将上述工艺制备的碳/玻混杂复合材料试样置于80℃的恒温水浴锅中,进行不同阶段的吸湿性能测试。对湿热老化前后的试样进行静态力学性能测试,用金相显微镜与FESEM分析其界面结构与失效行为。

1.5 性能测试与表征

吸湿性能测试中试样尺寸为 50 mm×50 mm,测试方法参考 ASTM D5229/D5229M-2014,为使结果准确,每组取 5 个试样的平均值作为结果。

经过时间 t 样品的吸湿率按式 (1) 计算:

$$W = [(M_t - M_0) / M_0] \times 100\% \quad (1)$$

式中: W ——样品吸湿率, %;

M_0 ——样品初始质量, g;

M_t ——样品不同吸湿阶段的质量, g。

采用 FESEM 观察复合材料在拉伸破坏后的界面形貌;采用树脂镶嵌机对试样金相镶嵌,然后通过金相显微镜观察试样横截面 CF 与 GF 的界面形貌。

通过电子万能试验机分别按 ASTM D3039-2014 测试碳/玻层内混杂复合材料的 0° 与 90° 拉伸性能(平行与垂直于纤维方向)、按 ASTM D6641-2014 测试其 0° 压缩性能、按 ASTM D7264-2015 测试其弯曲性能、按 ASTM D2344-2016 测试其层间剪切性能。按标准要求,具有两个及以上的重复单元数目为有效样品(如碳/玻混杂比为 2:1 的混杂复合材料重复单元构成为 CF\GF\CF,重复单元宽度为 7.5 mm),为了实现样品的可重复性及便于对比,在满足重复单元数的同时要保证样品的宽度一致。

2 结果与讨论

2.1 碳/玻层内混杂复合材料的吸湿性能

湿热老化的不同阶段碳/玻层内混杂复合材料吸湿率随时间的变化结果如图 2 所示。

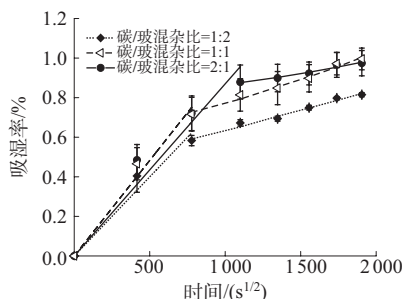


图2 不同碳/玻混杂比的层内混杂复合材料的吸湿率曲线与分段线性拟合

从图 2 可以看出,在微裂纹的毛细作用与树脂吸湿的作用下^[7-8],碳/玻层内混杂复合材料符合典型的两阶段吸湿模型。在水吸收的第一阶段,GF 含量较高的复合材料吸湿率较低,而 CF 含量较高的复合材料吸湿率较高。在水吸收的第二阶段,出现了明显的转折点,这可能与层内混杂复合材料在

湿热老化中期吸湿膨胀效应的减弱以及水分输运通道的饱和和有关^[9]。在这个阶段,复合材料的吸湿速率明显下降。但水分已经严重侵蚀到复合材料内部,可能会进一步产生二次吸湿作用^[10]。碳/玻混杂比增加至 2:1,水吸收的转折点推迟,复合材料吸湿率较高。这可能是因为 CF 直径更小,与环氧树脂构成的界面更多,增加了水分子在碳/玻界面处的扩散路径^[11],使得层内混杂复合材料吸湿率提高。经 42 d 的湿热老化后,除吸湿速率降低外,在不同碳/玻混杂比的复合材料中并未观察到明显的吸湿饱和现象。

为研究不同碳/玻混杂比层内混杂复合材料在湿热老化阶段的吸湿规律,进一步对吸湿率曲线进行了分段线性拟合。从图 2 可以看出, Fick 第二定律可适用于层内混杂复合材料水吸收的第一阶段,因此通过式 (2) 可计算出该阶段的吸湿参数,定量表征不同混杂比碳/玻层内混杂复合材料的水吸收与扩散行为^[12]:

$$D = \pi \left(\frac{h}{4M_m} \right)^2 \left(\frac{M_2 - M_1}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}} \right)^2 \quad (2)$$

式中: D ——样品的扩散系数, mm^2/s ;

h ——样品的厚度, mm;

M_m ——第一阶段样品的平衡吸湿率, %;

M_1, M_2 ——样品在不同时段的吸湿率, %;

t_1, t_2 ——样品处理时长, s;

$\frac{M_2 - M_1}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}}$ ——第一阶段样品的吸湿率曲线斜率 k 。

表 1 为不同碳/玻混杂比复合材料在第一阶段的吸湿参数。从表 1 可以看出,碳/玻混杂比与复合材料中水的扩散系数呈现明显的负相关,说明 GF 含量增加可以加快水分在层内混杂复合材料中的扩散。

表 1 不同混杂比碳/玻层内混杂复合材料的吸湿参数

碳/玻 混杂比	第一阶段平衡 吸湿率/%	斜率 ($\times 10^{-6}$)	扩散系数/ ($10^{-6} \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	相关系数 R^2
1:2	0.58	799.407	3.433	0.987
1:1	0.72	965.483	2.698	0.993
2:1	0.88	793.559	1.539	0.961

2.2 湿热老化对碳/玻层内混杂复合材料静态力学性能的影响

(1) 拉伸强度。

图 3 展示了湿热老化各阶段中不同碳/玻混杂比的层内混杂复合材料试样 0° 拉伸强度结果。从图 3 观察得到,随着老化时间的增加,层内混杂复合材料的拉伸强度总体上维持稳定的下降趋势,并

未出现明显的恒定,但碳/玻混杂比为2:1的复合材料0°拉伸强度始终保持最高。在湿热老化相同时间后,CF含量最低的层内混杂复合材料0°拉伸强度随时间下降最快。经过42 d的湿热老化处理,碳/玻混杂比为1:2,1:1和2:1的层内混杂复合材料0°拉伸强度分别为809.3,966.0 MPa和1047.4 MPa,保留率分别为72.94%,83.11%和82.28%。层内混杂复合材料的0°拉伸强度主要受增强纤维强度影响,一方面CF与GF的拉伸强度超过复合材料的界面强度一个量级,而湿热老化造成复合材料的强度退化通常是由纤维/基体的界面损伤引起^[13],因此层内混杂复合材料的0°拉伸强度相对湿热老化时间的变化较为缓慢;另一方面,CF拉伸强度与拉伸弹性模量远超前于GF,可以承受更高的拉伸载荷而不发生破坏,故在湿热老化前后,提高碳/玻混杂比有利于提升复合材料的0°拉伸强度及其保留率。

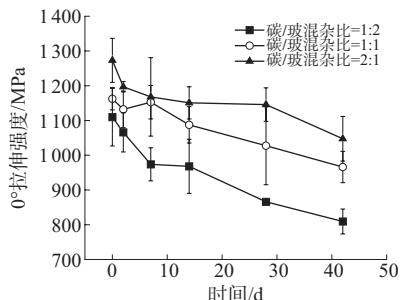


图3 湿热老化不同阶段层内混杂复合材料的0°拉伸强度

图4展示了湿热老化各阶段不同碳/玻混杂比的层内混杂复合材料90°拉伸强度结果。观察图4发现,在老化处理的初期,不同混杂比复合材料的90°拉伸强度都出现了小幅提高,这可能是因为湿热环境下环氧树脂发生了后固化作用,但随后树脂吸湿与内应力膨胀机理占据主导地位,材料90°拉伸强度急剧降低。经过14 d的湿热老化处理,层内混杂复合材料90°拉伸强度下降趋势变缓,继续湿热老化至42 d,减缓现象更明显,复合材料的90°

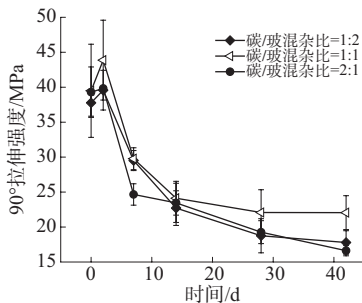


图4 湿热老化不同阶段层内混杂复合材料的90°拉伸强度

拉伸强度已开始趋于稳定。湿热老化42 d后,碳/玻混杂比为1:2,1:1和2:1的层内混杂复合材料90°拉伸强度分别17.8,22.1 MPa和16.6 MPa,保留率分别为47.12%,55.87%和42.31%。可以看出,在CF和GF用量接近时,混杂复合材料表现出较高的性能保留率。

(2) 压缩性能。

图5展示了湿热老化各阶段不同碳/玻混杂比的层内混杂复合材料的0°压缩强度结果。观察图5发现,在湿热老化的初期,层内混杂复合材料的0°压缩强度就发生急剧降低,经过14 d的湿热老化处理,复合材料的0°压缩强度开始缓慢下降,在老化42 d后,复合材料的0°压缩强度逐渐趋于稳定。湿热老化42 d后,碳/玻混杂比为1:2,1:1和2:1的层内混杂复合材料0°压缩强度分别为369.4,342.8 MPa和350.8 MPa,保留率分别为74.18%,65.73%和64.34%。一般来说,界面结合强度是单向复合材料0°压缩强度的主要影响因素^[14]。在湿热老化初期,水在环氧树脂中的溶胀和塑化作用使得复合材料在薄弱处生成缺陷并不断拓展,复合材料的界面结合作用削弱,当树脂不能向纤维均匀连续地传递压缩载荷时,复合材料的0°压缩强度加速下降。

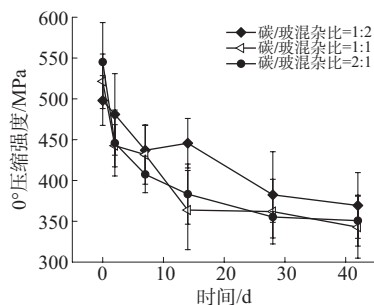


图5 湿热老化不同阶段层内混杂复合材料的0°压缩强度

图6展示了湿热老化各阶段不同碳/玻混杂比的层内混杂复合材料0°压缩弹性模量结果。从图6可以看出,不同混杂比的层内混杂复合材料在湿热老化处理的初期,0°压缩弹性模量均出现了小幅上升。这可能是湿热环境促使环氧树脂发生了后固化效应,分子链的交联点增加,交联网络更加密集,这有利于吸湿过程中树脂膨胀内应力的耗散与释放,使得层内混杂复合材料的刚性提升,0°压缩弹性模量小幅提高。随湿热老化时间的进一步增加,其0°压缩弹性模量又逐渐下降最终趋于稳定。湿热老化42 d后,碳/玻混杂比为1:2,1:1和2:1

的层内混杂复合材料 0° 压缩弹性模量分别为 75.8, 81.5 MPa 和 100.2 MPa, 保留率分别为 98.80%, 99.10% 和 92.81%。可以发现,不同混杂比层内混杂复合材料 0° 压缩弹性模量受湿热老化处理的影响较小,复合材料刚性得到较好的保持。

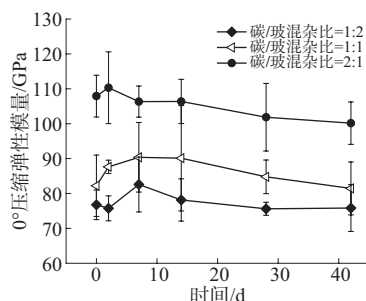


图6 湿热老化不同阶段层内混杂复合材料的 0° 压缩弹性模量

(3) 弯曲性能。

图7展示了湿热老化各阶段不同碳/玻混杂比的层内混杂复合材料弯曲强度结果。从图7观察到,湿热老化初期,复合材料的弯曲强度下降迅速,老化7 d之后,复合材料的弯曲强度开始缓慢降低,经过42 d的湿热老化处理,材料的弯曲强度依然存在一定下降空间。这可能是因为层内混杂复合材料中水分子的扩散逐渐饱和,微裂纹内的水分子与溶解其中的小分子持续产生向外的渗透压,暂时阻碍了湿热老化对层内混杂复合材料界面粘结的持续破坏^[15],样品内部应力得到重新分布,使得弯曲强度降至稳定的时间推迟。碳/玻混杂比为1:2,1:1和2:1的层内混杂复合材料弯曲强度最终分别为674.9,756.9 MPa和714.6 MPa,保留率分别为52.31%,62.76%和64.87%。通常来说,弯曲强度与复合材料的层间结合强度相关。环氧树脂在薄弱处受水的作用产生部分溶胀,首先会降低树脂强度,同时也会削弱其对纤维的支撑能力,使其在承受较低弯曲载荷时就发生破坏。此外,还会产生内应力引发分层失效,影响外部载荷在复合材料中的稳定分布,两种因素共同导致复合材料弯曲强度下降^[16]。

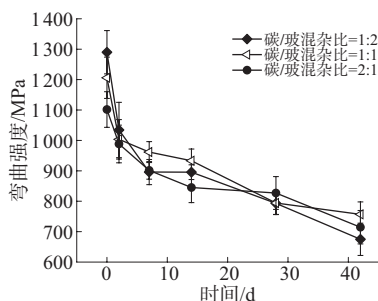


图7 湿热老化不同阶段层内混杂复合材料的弯曲强度

图8展示了湿热老化各阶段不同碳/玻混杂比的层内混杂复合材料弯曲弹性模量结果。从图8观察到,与图6碳/玻层内混杂复合材料 0° 压缩弹性模量变化相类似,在湿热老化的完整周期内,层内混杂复合材料的弯曲弹性模量同样表现为先小幅增加后小幅降低最后趋于稳定的趋势。经过42 d的湿热老化处理,碳/玻混杂比为1:2,1:1和2:1的层内混杂复合材料弯曲弹性模量分别为66.2, 75.7 MPa和86.2 MPa,保留率分别为93.45%, 92.39%和94.98%。总的来说,湿热老化处理后层内混杂复合材料的刚性变化不大。模量保留率保持较高的原因可能是因为增强纤维不吸湿或被认为吸湿较少,湿热老化对纤维模量造成的损失较小,而树脂模量的变化对复合材料弯曲弹性模量变化的影响很小。

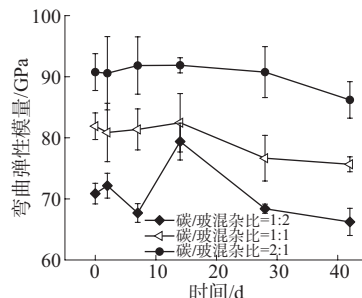


图8 湿热老化不同阶段层内混杂复合材料的弯曲弹性模量

(4) 层间剪切性能。

图9展示了湿热老化各阶段不同碳/玻混杂比的层内混杂复合材料的层间剪切强度结果。将图9与拉伸、压缩和弯曲性能的湿热老化结果相比较发现,随着老化的进行,混杂复合材料的层间剪切强度下降得更快,并且更早地趋于稳定。在老化42 d后,碳/玻混杂比为1:2,1:1和2:1的层内混杂复合材料的层间剪切强度分别为37.0,36.2 MPa和39.0 MPa,保留率分别为58.72%,54.88%和62.68%。在湿热老化过程中,环氧树脂浸泡吸湿,由于水分子的塑化作用,在固化交联的分子链中充

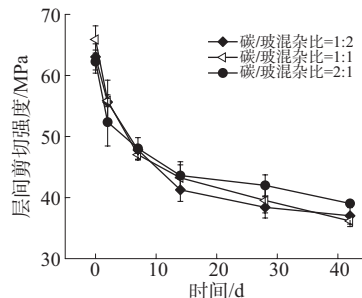


图9 湿热老化不同阶段层内混杂复合材料的层间剪切强度

分接触、扩散和渗透,增加了分子间的距离,破坏了树脂基体间的氢键和范德华力,显著降低大分子之间的作用力,使其强度降低。此外,纤维的吸湿膨胀程度远低于环氧树脂,这可能会诱使复合材料发生局部微脱粘,也会影响其层间剪切强度。

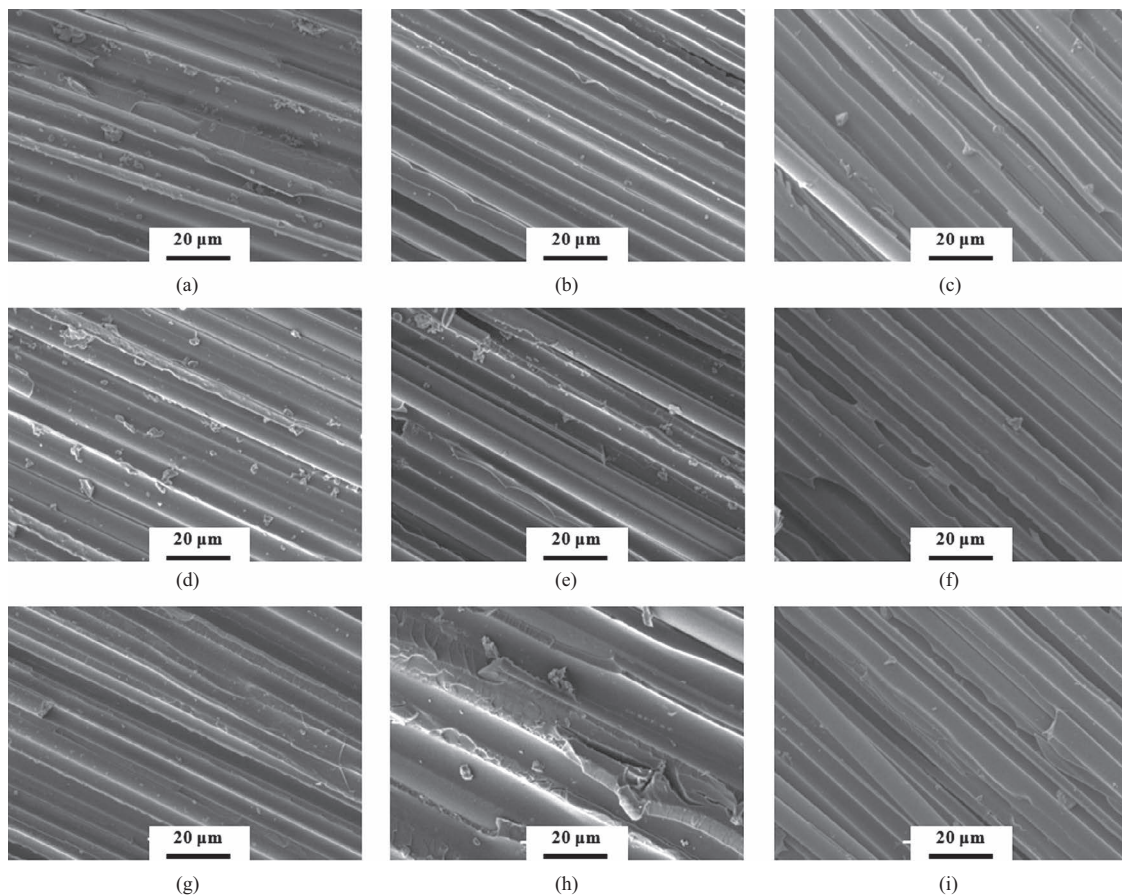
2.3 湿热老化处理后的碳/玻层内混杂复合材料拉伸断裂形貌分析

图 10 是不同碳/玻混杂比层内混杂复合材料在不同湿热老化阶段拉伸断面的 FESEM 照片。结合图 10a、图 10d 和图 10g 可以看出,未老化的不同碳/玻混杂比复合材料拉伸断裂面内环氧树脂与纤维结合紧密。虽然复合材料断面中都观察到不同程度的界面脱粘,但纤维表面仍有相当一部分树脂粘附,几乎没有观察到纤维拔出与基体气孔缺陷的破坏现象,表明 VARI 工艺中环氧树脂可以充分浸润 CF 与 GF 织物。

随着湿热老化时间增加至 7 d,如图 10b、图 10e 和图 10h 所示,复合材料的树脂含量明显下降,纤维表面上粘附的树脂开始脱落,更多裸露的光滑

纤维拔出。此时,纤维之间开始出现脱粘产生的缝隙并在界面处逐渐拓展,复合材料层间结合强度受到破坏。这是因为一方面微裂纹的毛细作用使树脂吸湿,使纤维与树脂的界面上发生溶胀而产生内应力,造成了树脂脱落与界面脱粘,这可能会使材料性能大幅下降。另一方面,与图 1 吸湿率的两段变化相对应,空隙的出现提供了外部水分向内部输送的通道,提高了水分向混杂复合材料内扩散的速度,水分的集中输送又会加速增加裂纹附近的内应力,从而提高了材料的吸湿速率,加速了混杂复合材料的界面失效^[17]。

湿热老化 42 d 后,可以观察到图 10c、图 10f 和图 10i 中纤维间的间距明显增加,这说明水分进入复合材料内部,诱使了纤维与基体层的界面脱粘,削弱了界面结合强度。但与图 2b、图 2e 和图 2h 中老化 7 d 后的复合材料相比,环氧树脂的脱落与含量下降并不是很明显,说明此时水分的输送已经达到饱和状态,这可能会导致混杂复合材料的性能降低趋势逐渐趋于平缓。



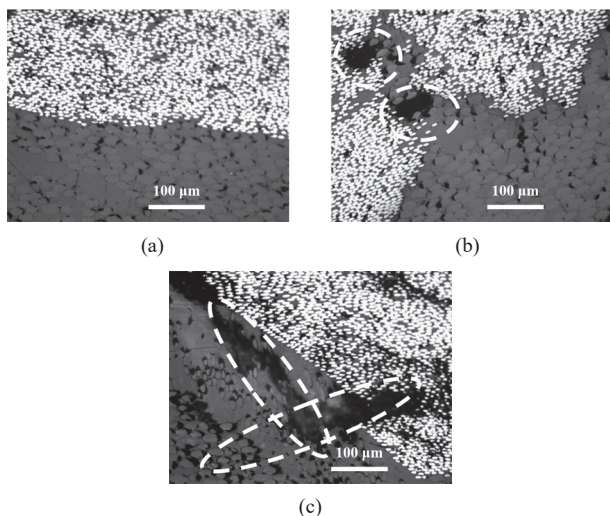
碳/玻混杂比为 1:2 的老化时间: a—0 d; b—7 d; c—42 d; 碳/玻混杂比为 2:1 的老化时间: d—0 d; e—7 d; f—42 d; 碳/玻混杂比为 1:1 的老化时间: g—0 d; h—7 d; i—42 d

图 10 不同碳/玻混杂比的层内混杂复合材料在不同湿热老化阶段的 90° 拉伸断面 FESEM 照片

此外,在湿热老化处理相同时间后,随着碳/玻混杂比提高,层内混杂复合材料的拉伸断面变得更加粗糙。如图 10f、图 10h 所示,复合材料断面出现了明显的树脂锯齿状开裂与纤维断裂现象。这说明试样在抵抗塑性变形时产生了较高的拉伸断裂功,表明提高碳/玻混杂比有利于提升复合材料的拉伸强度。

2.4 湿热老化处理后的碳/玻层内混杂复合材料界面形貌分析

图 11 为碳/玻混杂比为 1:1 的层内混杂复合材料在不同湿热老化时间段的横截面金相显微镜照片。从图 11a 可以看出,未老化处理的复合材料中 CF, GF 与树脂的界面结合效果较好,纤维束与树脂均匀间隔分布,未观察到明显的脱粘现象。老化 7 d 后,如图 11b 圆圈框内所示,CF 与 GF 交界处出现不规则孔洞,在 GF/树脂的界面中也出现了多条裂纹。这可能是因为 GF 耐水性低于 CF,水分子溶解 GF 表面的碱金属,产生缺陷与微裂纹,加速了水分向相对薄弱的界面处输送,引发树脂溶胀与脱粘。在老化 42 d 后,如图 11c 所示,层内混杂复合材料的界面层发生进一步的破坏,CF 与 GF 交界处破坏的孔洞相互连接,组成了尺寸在 100 μm 左右的裂缝。与图 10c、图 10f 和图 10i 相对应,纤维与树脂的界面发生明显的脱粘现象,削弱了混杂复合材料的界面结合强度,使其力学性能显著降低。



a—老化 0 d; b—老化 7 d; c—老化 42 d

图 11 碳/玻混杂比为 1:1 的层内混杂复合材料在不同湿热老化时间段的横截面金相显微镜照片

3 结论

采用 VARI 工艺制备 CF 和 GF 层内混杂的复

合材料层合板,系统分析了湿热老化后层内混杂复合材料层合板的结构与性能。结果表明:

(1) 湿热老化后的试样由于树脂基体的塑化和水分子的溶胀与渗透作用使得层内混杂复合材料中的树脂发生部分水解,树脂含量明显变少,纤维与基体脱粘,内部空隙变大,纤维与树脂的界面发生严重破坏。

(2) 在 80℃ 恒温水浴锅中处理 42 d 的条件下,水在碳/玻层内混杂复合材料中的扩散系数随碳/玻混杂比的增加有下降趋势。

(3) 混杂复合材料中 CF 用量增加,0° 拉伸强度、0° 压缩弹性模量和弯曲弹性模量均有所提高。随着湿热老化时间的增加,碳/玻层内混杂复合材料的部分力学性能在下降到一定程度时会趋于稳定。

参考文献

- [1] 张瑞刚,王冰佳,王杰彬,等.海上风电叶片行业优点及发展阻碍分析[J].船舶工程,2020,42(1):523-525.
Zhang Ruigang, Wang Bingjia, Wang Jiebin, et al. Advantages and development obstacles of offshore wind turbine blade industry[J]. Ship Engineering, 2020, 42(1):523-525.
- [2] 郭小锋,齐剑峰,黄鑫祥,等.玻碳混杂低风速风电叶片结构优化及性能分析[J].复合材料科学与工程,2020(6):25-29.
Guo Xiaofeng, Qi Jianfeng, Huang Xinxiang, et al. Structural design optimization and performance analysis of glass-carbon hybrid low wind speed wind turbine blades[J]. Composites Science and Engineering, 2020(6):25-29.
- [3] 张娜,龙春光,何宏燕,等.碳纳米纤维纸-玻纤/环氧树脂复合材料对风力发电叶片的影响[J].复合材料学报,2013,30(1):90-95.
Zhang Na, Long Chunguang, He Hongyan, et al. Effect of carbon nano-fiber paper-glass fiber/epoxy composite used for wind turbine blade[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(1):90-95.
- [4] 马腾,李炜.单向碳/玻璃纤维层内-层间混杂复合材料拉伸破坏模式研究[J].玻璃钢/复合材料,2015(12):87-93.
Ma Teng, Li Wei. Study of the tensile failure modes of unidirectional carbon fiber/glass fiber inner ply-inter ply hybrid composites[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2015(12):87-93.
- [5] 曾帅,贾智源,侯博,等.碳纤维-玻璃纤维层内混杂单向增强环氧树脂复合材料拉伸性能[J].复合材料学报,2016,33(2):297-303.
Zeng Shuai, Jia Zhiyuan, Hou Bo, et al. Tensile properties of unidirectional carbon fiber-glass fiber hybrid reinforced epoxy composites in layer[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(2):297-303.
- [6] 许经纬,顾媛娟.碳/玻混杂纤维增强复合材料的拉-拉疲劳性能的研究[J].复合材料科学与工程,2020(4):39-45.

- Xu Jingwei, Gu Aijuan. Study on tension-tension fatigue performance for carbon/glass hybridized fabric reinforced composites[J]. *Composites Science and Engineering*, 2020(4):39-45.
- [7] 王挺挺. 碳纤维增强环氧树脂复合材料结构阻尼一体化研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- Wang Tingting. Study on integration design of structural damping of carbon fiber reinforced epoxy matrix composites[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [8] Dave R S, Loos A C. Processing of composites[M]. Munich: Car Hanser Verlag GmbH & Co KG, 2000: 270-278.
- [9] 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 Yingli, Wang Jihui. Study on hygrothermal aging of two kinds of glass fiber reinforced composites[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2017(10):79-84.
- [10] 李承高, 郭瑞, 王俊琦, 等. CFRP@GFRP 混杂复合材料杆体在水浸泡环境下的性能演化[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(10):3 290-3 301.
- Li Chenggao, Guo Rui, Wang Junqi, et al. Property evolution of CFRP@GFRP hybrid composite rod exposed in the distilled water[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(10):3 290-3 301.
- [11] 张晓云, 曹东, 陆峰, 等. T700/5224 复合材料在湿热环境和化学介质中的老化行为[J]. *材料工程*, 2016, 44(4):82-88.
- Zhang Xiaoyun, Cao Dong, Lu Feng, et al. Aging behavior of T700/5224 composite in hygrothermal environment and chemical media[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2016, 44(4):82-88.
- [12] Shen C H, Springer G S. Moisture absorption and desorption of composite materials[J]. *Journal of Composite Materials*, 1976, 10(1):2-20.
- [13] 郭稳学, 郑锡涛. 湿热环境下复合材料层压板强度性能研究[J]. *结构强度研究*, 2001(1):55-60.
- Guo Wenxue, Zheng Xitao. Study on strength properties of composite laminates in humid and hot environment[J]. *Journal Of Structural Strength Research*, 2001(1):55-60.
- [14] 杨瑞, 刘叶垚, 王恭喜, 等. 多向玻碳纤维混杂复合材料的拉伸性能[J]. *合成树脂及塑料*, 2018, 35(5):78-82.
- Yang Rui, Liu Yeyao, Wang Gongxi, et al. Tensile mechanics of multidirectional glass-carbon hybrid fiber materials[J]. *China Synthetic Resin and Plastics*, 2018, 35(5):78-82.
- [15] 苏英贤, 孙耀宁, 刘伟, 等. GFRP 层合板在湿热环境和碱性腐蚀介质中的老化行为[J]. *合成纤维*, 2021, 50(5):52-57.
- Su Yingxian, Sun Yaoning, Liu Wei, et al. Aging behavior of GFRP laminates in hydrothermal environment and alkaline corrosive media[J]. *Synthetic Fiber In China*, 2021, 50(5):52-57.
- [16] 过梅丽, 肇研, 谢令. 航空航天结构复合材料湿热老化机理的研究[J]. *宇航材料工艺*, 2002(4):53-56.
- Guo Meili, Zhao Yan, Xie Ling. Study on hygrothermal ageing mechanisms of aerospace structural composites[J]. *Aerospace Materials Technology*, 2002(4):53-56.
- [17] Tsai Y I, Bosze E J, Barjasteh E, et al. Influence of hygrothermal environment on thermal and mechanical properties of carbon fiber/fiberglass hybrid composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2009, 69(34):432-437.

(上接第 106 页)

- [13] 田书竹, 陶永亮. 模具排气系统设计探讨[J]. *模具制造*, 2020, 20(12):39-42.
- Tian Shuzhu, Tao Yongliang. Discussion on the design of mold exhaust system[J]. *Die & Mould Manufacture*, 2020, 20(12):39-42.
- [14] 刘方方, 张维合. 汽车后视镜座大型精密注塑模设计[J]. *中国塑料*, 2020, 34(6):87-91.
- Liu Fangfang, Zhang Weihe. Design of large precision injection mold for rearview mirror base of automobile[J]. *China Plastics*, 2020, 34(6):87-91.
- [15] 曾蕾. 推板与直顶联合顶出机构推出网骨深腔塑料制品[J]. *技术与市场*, 2021, 28(4):85-86.
- Zeng Lei. Push plate and straight push-off mechanism push out the plastic products of net bone deep cavity[J]. *Technology and Market*, 2021, 28(4):85-86.