

湿热环境下碳纤维环氧树脂复合材料拉伸性能研究

杜永, 马玉娥

(西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072)

摘要:为了研究不同铺层对TG800/E207碳纤维环氧树脂复合材料吸湿特性和拉伸性能的影响,制备了 $[0]_{16}$, $[90]_{16}$, $[\pm 45]_{4s}$ 和 $[+45/0/0/-45/-45/0/0/+45]_s$ 4种铺层的复合材料层板,分析了复合材料在80℃,90%RH环境中的吸湿动力学曲线、吸湿损伤形貌、破坏形貌、载荷位移曲线及其强度退化。结果表明: TG800/E207复合材料层板的吸湿曲线呈现多阶段现象。当吸湿时间达到1608h时,吸湿趋于平衡; $[90]_{16}$ 的吸湿量最低,其最终吸湿量仅为0.806%; $[+45/0/0/-45/-45/0/0/+45]_s$ 的吸湿量最高,其最终吸湿量为0.876%。与室温干态(RTD)条件下相比,室温湿态(RTW)条件下这4种铺层复合材料层板破坏载荷分别降低了13.80%,27.36%,10.70%和25.60%。 $[90]_{16}$ 的最终吸湿量最低但其拉伸强度退化最为严重。

关键词:碳纤维环氧树脂复合材料;湿热环境;吸湿量;拉伸性能;破坏形貌

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 1000-2758(2022)01-0033-07

因其高强度、高刚度和低比重等优异的性能,碳纤维增强复合材料被广泛应用于航空航天等领域^[1-2]。航空航天材料在服役过程中不可避免地受到环境因素如温度、湿度、化学腐蚀和紫外线辐射等的影响^[3]。其中温度和湿度对复合材料的影响最为显著,导致其力学性能大幅降低甚至提前失效破坏^[4-6]。

由于碳纤维基本不存在吸湿行为^[7],湿热环境中的水分主要被基体吸收。吸湿后材料的局部密度发生变化^[8],基体的吸湿和水解导致分子量降低,最终导致纤维/基体界面分层降低了材料的宏观力学性能^[9-12]。在复合材料吸湿特性的研究中,应用最广泛的是Fickian模型^[13]。随着研究的进一步深入,一些学者发现复合材料的吸湿过程呈现出阶段性^[14]:当吸湿量小于饱和吸湿率60%时,吸湿行为仍满足Fickian模型;当吸湿量大于饱和吸湿率60%时,显示出non-Fickian现象^[15-16]。

在湿热环境对复合材料力学性能影响的研究中,主要的影响因素是温度和湿度以及纤维和树脂的类型。Guermazi等^[17]对比了湿热环境下碳纤维

环氧树脂基、玻璃纤维环氧树脂基及混杂纤维复合材料的吸湿特性和力学性能退化,发现湿热环境中水分和温度引起复合材料基体塑化,从而导致复合材料的模量和强度降低。相比于玻璃纤维环氧树脂基复合材料,碳纤维环氧树脂基复合材料的强度和模量下降较小。杨旭东等^[18]研究了3种湿热环境下CFRP层合板的吸湿特性和性能退化机理,发现树脂基体上的亲水基团在85℃,85%RH的湿热环境中仅与水分子通过氢键形成分子间缔合而未发生化学反应,CFRP层板力学性能退化与化学变化无关。Kumar等^[19]发现碳纤维/环氧复合材料层合板的力学性能对吸湿较为敏感,复合材料浸泡1个月之后,其纵向拉伸强度下降了25%~30%,继续浸泡强度基本保持不变,横向拉伸强度随着吸湿时间的增加呈快速下降趋势,面内剪切强度的变化规律表现为先增加后减小的趋势。

现有文献主要集中在不同温度、湿度和树脂类型对碳纤维复合材料吸湿特性和力学性能的影响^[20-22],而对不同铺层角度吸湿特性和力学性能的研究较少。故本文针对TG800/E207碳纤维增强环

收稿日期: 2021-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(91860128,11572250)资助

作者简介: 杜永(1992—),西北工业大学博士研究生,主要从事复合材料结构力学和结构强度研究。

通信作者: 马玉娥(1975—),女,西北工业大学教授,主要从事复合材料结构力学和强度研究。e-mail: ma.yu.e@nwpu.edu.cn

氧树脂基复合材料,制备了 $[0]_{16}$, $[90]_{16}$, $[\pm 45]_{4s}$ 和 $[+45/0/0/-45/-45/0/0/+45]_s$ 4种铺层的试样,研究了湿热环境下复合材料铺层角度对其吸湿特性和力学性能退化的影响。

1 试验材料及试验方法

1.1 试验材料

选用 $[0]_{16}$, $[90]_{16}$, $[\pm 45]_{4s}$ 和 $[+45/0/0/-45/-45/0/0/+45]_s$ 4种铺层的 TG800/E207 碳纤维环氧树脂复合材料为试验对象,预浸料纤维含量为 $67\% \pm 2\%$,在 125°C 条件下固化而成,单层厚度为 0.125 mm 。

1.2 试验方法

为了精确控制吸湿试验所需要的温度和湿度,在恒温恒湿环境箱中进行吸湿试验。根据 ASTM D5229^[23]测试标准要求,加速吸湿试验的最高温度应至少比湿态玻璃化转变温度(T_g)低 25°C ,E207环氧树脂的湿态玻璃化转变温度为 110°C ,因此吸湿试验的温度设置为 80°C ,相对湿度为 90% 。试验过程中,使用精度为 0.1 mg 的FA2104B电子分析天平,每隔 24 h 测量一次试验件质量,当试验件前后2次测量的质量变化小于万分之一时,认为试验件在 80°C , $90\%\text{RH}$ 环境中达到吸湿饱和平衡。

根据 ASTM D3039 试验标准^[24],采用电子万能试验机进行拉伸性能试验,加载速率为 1 mm/min 。试验在 23°C 干态(RTD)和 23°C 湿态(RTW)2种条件下进行,每种铺层的试样各3件,使用显微镜观察破坏形貌。对比2种环境下的试验结果,比较和讨论湿热处理对不同铺层碳纤维/环氧复合材料拉伸性能的影响。

2 结果与讨论

2.1 湿热试验结果

2.1.1 吸湿动力学曲线

为了得到湿热环境下复合材料吸湿曲线,根据(1)式对吸湿结果进行处理,并对不同铺层试验件的吸湿曲线进行对比。

$$M_t[\%] = \frac{W_t - W_0}{W_0} \cdot 100 \quad (1)$$

式中: M_t 为试验件吸湿 t 小时后的吸湿率; W_0 和 W_t

分别为未吸湿和吸湿 t 小时后的试验件质量。

图1为不同铺层角度的复合材料层合板吸湿曲线。可以看出TG800/E207碳纤维环氧树脂复合材料的吸湿曲线呈现出多阶段现象。通过(2)式可以计算出每一阶段的吸湿速率 R 。表1列出了各铺层复合材料层板第一、二和三阶段的吸湿速率。

$$R = \frac{M_1 - M_2}{\sqrt{t_1} - \sqrt{t_2}} \quad (2)$$

式中, M_1 和 M_2 分别是吸湿时间为 t_1 和 t_2 时的吸湿量。

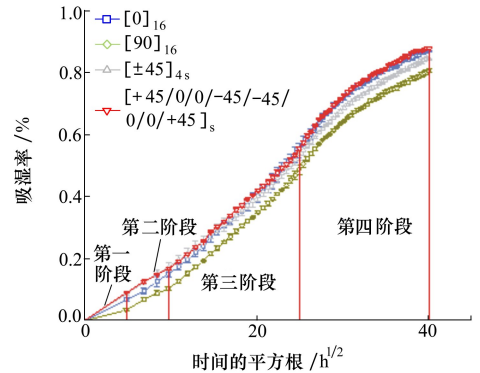


图1 不同铺层角度的复合材料层合板吸湿曲线

表1 各阶段吸湿速率

阶段	吸湿速率			
	$[0]_{16}$	$[90]_{16}$	$[\pm 45]_{4s}$	$[+45/0/0/-45/-45/0/0/+45]_s$
第一	2.97×10^{-3}	1.45×10^{-3}	1.98×10^{-3}	3.50×10^{-3}
第二	1.17×10^{-3}	0.96×10^{-3}	1.51×10^{-3}	1.51×10^{-3}
第三	7.69×10^{-4}	7.39×10^{-4}	6.99×10^{-4}	7.03×10^{-4}

图1中铺层角度的不同导致趋于平衡时的吸湿量不同,但各铺层试样的吸湿曲线趋势大致相同。各铺层试样的吸湿曲线数据为3件试样的平均值,误差均小于 0.027% ,数据分散性较小,如图1所示。吸湿曲线可以根据吸湿时间划分为4个阶段。第一阶段:吸湿时间小于 24 h ;第二阶段,吸湿时间为 $24 \sim 96\text{ h}$;第三阶段,吸湿时间为 $96 \sim 648\text{ h}$;第四阶段,吸湿时间为 $648 \sim 1\ 608\text{ h}$ 。前3个阶段复合材料层板的吸湿量与时间的平方根均呈线性关系,第四阶段复合材料层板的吸湿量随吸湿时间的增加而逐渐趋于平衡。当吸湿时间达到 $1\ 608\text{ h}$ 时,复合材料层板达到最终吸湿, $[0]_{16}$, $[90]_{16}$, $[\pm 45]_{4s}$ 和 $[+45/0/0/-45/-45/0/0/+45]_s$ 的最终吸湿量分别为 0.870% , 0.806% , 0.843% 和 0.876% 。 $[90]_{16}$, $[\pm 45]_{4s}$ 和 $[+45/0/0/-45/-45/0/0/+45]_s$ 复合材料

层板的最终吸湿量与 $[0]_{16}$ 复合材料层板相比,分别相差 -7.36% 、 -3.10% 和 0.69% 。

从表 1 可以看出,同一铺层复合材料层板的吸湿速率随着吸湿时间的增加而减少。这是由于在吸湿过程中,水分子首先进入复合材料内部的空隙和裂纹等缺陷^[20];然后水分子与树脂中的高分子结合,使树脂膨胀变形,纤维/基体界面产生分层,树脂内部产生微裂纹^[18],提供吸湿空间;最后树脂中的高分子会发生化学变化,并且再次固化产生大量的亲水基^[25],进一步吸湿。

2.1.2 湿热损伤模式

图 2 为吸湿过程中的复合材料层板损伤形貌。从图 2a)中可以看出,4 种铺层复合材料层板表面没

有明显的分层、裂纹或其他损伤。在图 2b)中,4 种铺层复合材料层板都出现轻微的分层现象,这是由于碳纤维和树脂基体的湿热膨胀系数不同,在湿热环境中,两者的膨胀变形差异导致复合材料纤维/基体界面分层。在图 2c)中,除了微分层明显增加外,还出现了一些微孔,说明随着吸湿时间的增加,水分子和树脂基体的高分子进一步结合,使树脂产生水解、断链、交联结构破坏等变化,造成宏观上树脂的破坏。 $[90]_{16}$ 试样还出现了沿 Z 方向的轻微分层,这是由 $[90]_{16}$ 试样的铺层方向决定的。在图 2d)中,吸湿平衡时损伤情况更为严重,说明吸湿损伤随着吸湿时间的增加而进一步增加。

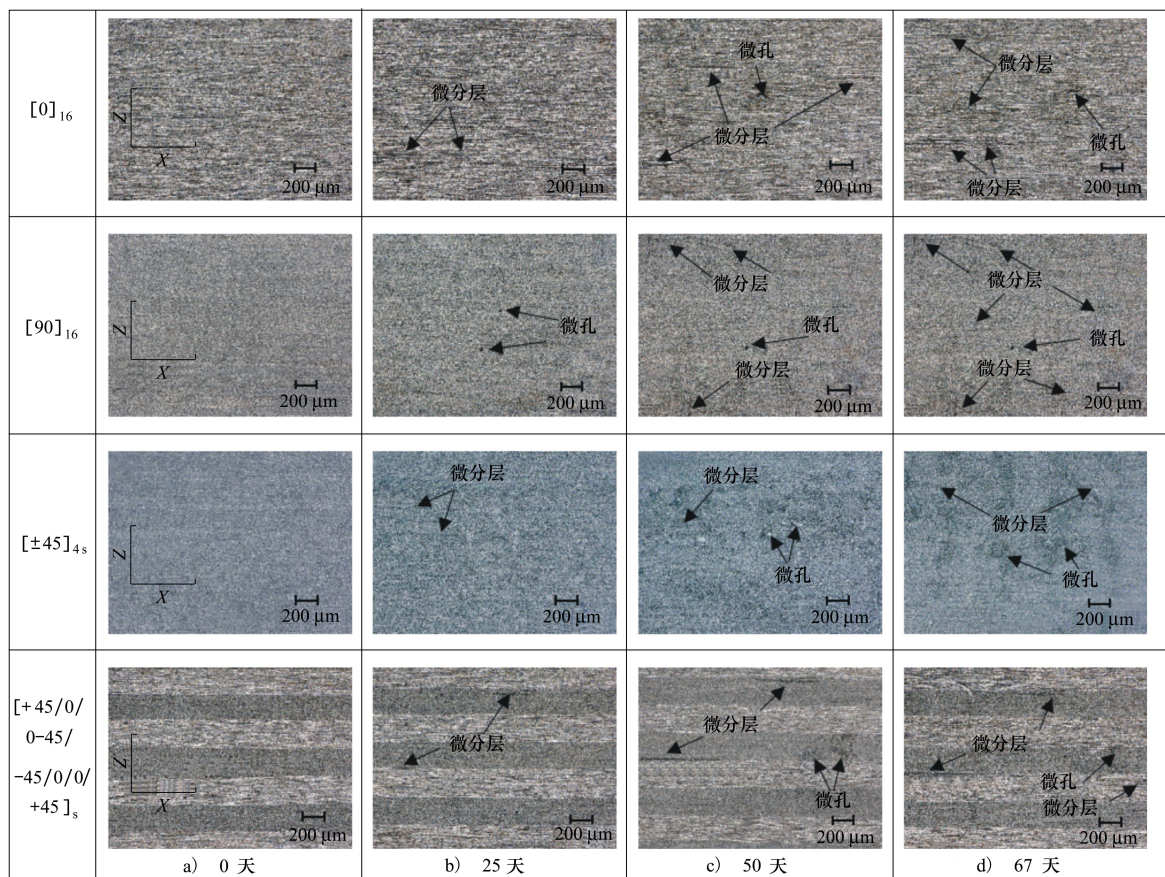


图 2 吸湿过程中的损伤演化

2.2 拉伸试验结果

2.2.1 拉伸破坏形貌分析

图 3 为 23°C 干态 (RTD) 和 23°C 湿态 (RTW) 条件下 4 种铺层复合材料层板的破坏形貌。从图 3a) 可以看出,在 RTD 条件下 $[0]_{16}$ 复合材料层板的纤维断裂面较为平齐,在靠近夹持端处存在层间分层

和界面脱胶。说明在拉伸断裂过程中,大部分的纤维是同时断裂,纤维/基体界面没有大范围破坏,界面粘接性能良好。从图 3b) 可以看出,在 RTW 条件下 $[0]_{16}$ 复合材料层板断口处纤维束拔出,纤维/基体界面分层现象严重。说明在 RTW 条件下纤维/基体界面性能明显下降,界面失效后载荷传递不均,

部分纤维首先断裂导致纤维束拔出,最终导致复合材料层板破坏。从图 3c)可以看出,在 RTD 条件下 $[90]_{16}$ 复合材料层板的失效模式为基体拉伸断裂,层板表面光滑,没有可见损伤,断口处有少许纤维束粘连。从图 3d)可以看出,在 RTW 条件下 $[90]_{16}$ 复合材料层板的主要失效模式仍为基体拉伸断裂,但层板表面出现裂纹和孔洞等损伤模式,断口处纤维束粘连明显增多。这是由于在 RTW 条件下扩散进复合材料的水分子与树脂基体中高分子结合,使得基体溶胀,体积增大,最终形成裂纹和孔洞。从图 3e)可以看出,在 RTD 条件下 $[\pm 45]_{4s}$ 复合材料层板的主要失效模式是分层和纤维断裂,且纤维断裂主要集中在上下表面处的纤维层,而层板中间的纤维层主要为分层失效,纤维层较为完整。从图 3f)可

以看出,在 RTW 条件下 $[\pm 45]_{4s}$ 复合材料层板中各纤维层均出现严重的分层损伤以及纤维和基体断裂,上下表面的纤维层呈现毛刺状形貌,各纤维层已完全破坏,说明湿热环境下纤维/基体界面粘接性能完全退化。从图 3g)和 3h)可以看出,在 RTD 和 RTW 条件下 $[+45/0/0/-45/-45/0/0/+45]_s$ 复合材料层板的主要失效模式均为分层和纤维断裂,且在 RTW 环境下层板的纤维断裂和分层现象更加严重,这一点与 $[\pm 45]_{4s}$ 复合材料层板相似。但不同之处在于 $[+45/0/0/-45/-45/0/0/+45]_s$ 复合材料层板各纤维层并未完全破坏,这主要是由于 0° 纤维层在其中承担了一部分载荷,而湿热环境只是引起 0° 纤维层的分层,但对其强度影响较小,这一情况与 $[0]_{16}$ 复合材料层板的破坏模式相吻合。

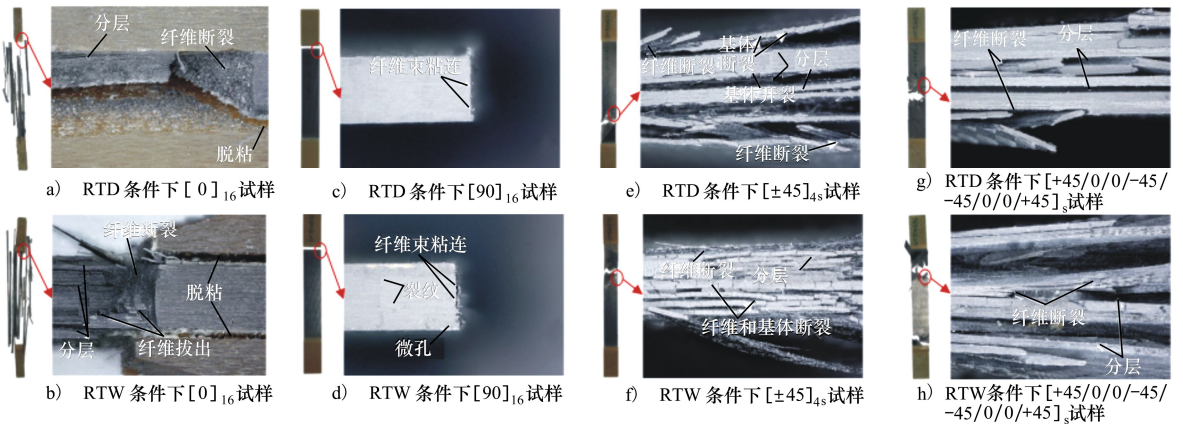


图3 不同铺层层合板在 RTD 和 RTW 环境下拉伸断口形貌

2.2.2 载荷位移曲线

图 4 为 23°C 干态 (RTD) 和 23°C 湿态 (RTW) 条件下 4 种铺层复合材料层板的载荷位移曲线。从图 4a) 中可以看出,在 RTD 条件下 $[0]_{16}$ 复合材料层板的载荷位移曲线呈线性增长,且斜率大于 RTW 条件下的曲线。但是当加载到 45 kN 时,RTW 条件下曲线开始偏折,斜率降低,对应复合材料层板最外层纤维层产生损伤,这是由于湿热环境中复合材料的最外层首先达到并始终处于吸湿平衡状态,也说明 $[0]_{16}$ 复合材料层板的损伤也是由外向内逐层产生的。从图 4b) 中可以看出,2 种条件下 $[90]_{16}$ 复合材料层板的载荷位移曲线趋势相同,均是在载荷达到峰值后发生突降。这是由于 $[90]_{16}$ 复合材料层板的失效模式为基体拉伸断裂,而碳纤维吸湿能力有限,水分扩散主要在树脂基体内。从图 4c) 中可以看

出,在初期加载阶段, $[\pm 45]_{4s}$ 复合材料层板的载荷位移曲线呈线性增加,2 种条件下曲线基本重合;随着载荷的进一步增加,进入损伤阶段,曲线斜率降低,且 RTW 条件下的曲线斜率小于 RTD 条件下斜率,说明在此阶段 RTW 条件下层板的承载能力小于 RTD 条件下的承载能力;在最终失效阶段,RTD 条件下层板在载荷达到峰值后发生突降,但 RTW 条件下层板的曲线发生轻微波动后发生突降,说明在载荷峰值后 RTW 条件下层板的破坏并不是所有纤维层同时破坏,仍有一部分纤维层可以承载,只是承载能力不足所以很快便发生载荷突降。从图 4d) 中可以看出,2 种条件下 $[+45/0/0/-45/-45/0/0/+45]_s$ 复合材料层板的载荷位移曲线趋势相同,且与 $[90]_{16}$ 复合材料层板类似,RTW 条件下的曲线斜率小于 RTD 条件下的斜率。

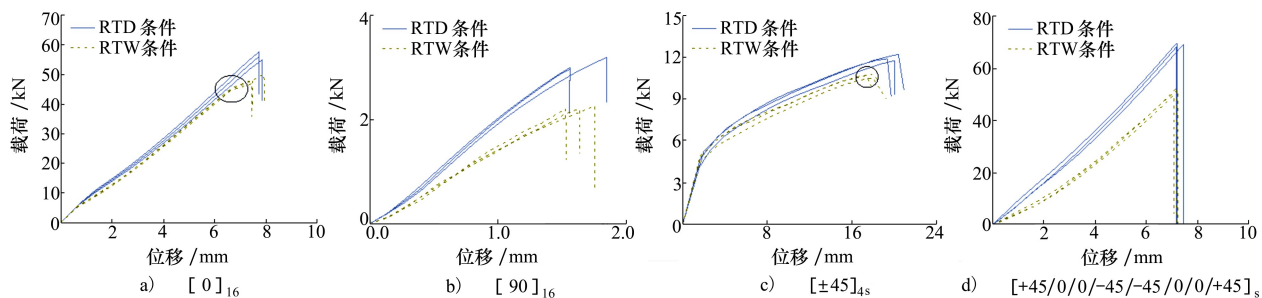


图 4 在 RTD 和 RTW 环境中复合材料层合板载荷-位移曲线

表 2 为 23℃ 干态 (RTD) 和 23℃ 湿态 (RTW) 条件下 $[0]_{16}$, $[90]_{16}$, $[\pm 45]_{4s}$ 和 $[+45/0/0/-45/-45/0/0/+45]_s$ 复合材料层板的失效载荷和失效位移的对比,其中失效载荷和失效位移均为 3 个有效数据的平均值。可以看出在 RTW 条件下 $[0]_{16}$, $[90]_{16}$, $[\pm 45]_{4s}$ 和 $[+45/0/0/-45/-45/0/0/+45]_s$ 复合材料层板的失效载荷相比 RTD 条件分别降低了 13.80%, 27.36%, 10.70% 和 25.60%; 失效位移分别降低了 1.93%, 1.20%, 10.69% 和 1.51%。其中 $[90]_{16}$ 的失效载荷降低最多且最终吸湿量最小,如图 1 所示,这是由于湿热环境中水分主要引起树脂基体的性能退化,而 $[90]_{16}$ 试验件的失效模式为基体拉伸断裂。

表 2 2 种条件下 4 种铺层复合材料层板的破坏载荷和破坏位移比较

试样	条件	失效载荷/ kN	失效位移/ mm
$[0]_{16}$	RTD	56.25	7.78
	RTW	48.49	7.63
$[90]_{16}$	RTD	3.07	1.66
	RTW	2.23	1.64
$[\pm 45]_{4s}$	RTD	11.96	19.92
	RTW	10.68	17.79
$[+45/0/0/-45/-45/0/0/+45]_s$	RTD	69.03	7.27
	RTW	51.36	7.16

3 结 论

1) 湿热环境中 TG800/E207 碳纤维/环氧复合材料层板的吸湿曲线呈现多阶段性,同一铺层复合材料层板的吸湿速率随着吸湿时间的增加而减少;其各阶段吸湿速率和最终吸湿量受铺层的影响,与 $[0]_{16}$ 复合材料层板相比, $[90]_{16}$ 、 $[\pm 45]_{4s}$ 和 $[+45/0/0/-45/-45/0/0/+45]_s$ 复合材料层板最终吸湿量分别相差 -7.36%, -3.10% 和 0.69%。 $[90]_{16}$ 的最终吸湿量最低,仅为 0.806%; $[+45/0/0/-45/-45/0/0/+45]_s$ 的最终吸湿量最高,为 0.876%。

2) 在吸湿试验中,碳纤维和树脂基体的湿热膨胀差异导致试样表面出现轻微的分层和微孔等损伤,且随着吸湿时间的增加吸湿损伤逐渐增加。

3) RTD 条件下复合材料层板纤维/基体界面性能明显强于 RTW 条件下的界面性能, $[0]_{16}$, $[90]_{16}$, $[\pm 45]_{4s}$ 和 $[+45/0/0/-45/-45/0/0/+45]_s$ 复合材料层板的主要失效模式分别为纤维断裂、基体断裂和分层。

4) 与 RTD 条件下复合材料的失效载荷和失效位移相比,RTW 条件下复合材料层板的失效载荷和失效位移减小, $[0]_{16}$, $[90]_{16}$, $[\pm 45]_{4s}$ 和 $[+45/0/0/-45/-45/0/0/+45]_s$ 的失效载荷分别降低了 13.80%, 27.36%, 10.70% 和 25.60%; 失效位移分别降低了 1.93%, 1.20%, 10.69% 和 1.51%。其中 $[90]_{16}$ 的失效载荷下降最多且最终吸湿量最小,所以湿热环境对 $[90]_{16}$ 层板的力学性能影响最大。

参考文献:

- [1] BENKHEDDA A, TOUNSI A, ADDA BEDIA E A. Effect of temperature and humidity on transient hygrothermal stresses during moisture desorption in laminated composite plates[J]. Composite Structures, 2008, 82(4): 629-635
- [2] 李国丽, 彭公秋, 钟翔屿. 国产高性能碳纤维表征分析及复合材料力学性能研究[J]. 材料工程, 2020, 48(10): 74-81

- LI Guoli, PENG Gongqiu, ZHONG Xiangyu. Characterization of domestic high performance carbon fibers and mechanical properties of carbon fibers reinforced matrix composites [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2020, 48 (10): 74-81 (in Chinese)
- [3] 管清宇, 李卫平. 湿热环境对 7781/CYCOM 7701 玻璃纤维/环氧复合材料典型力学性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2018, 35(12): 3288-3297
- GUAN Qingyu, LI Weiping. Effect of hygro-thermal condition on typical mechanical property of 7781/CYCOM 7701 fiberglass/epoxy composite[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2018, 35(12): 3288-3297 (in Chinese)
- [4] YANG Q, LI X, SHI L, et al. The thermal characteristics of epoxy resin: design and predict by using molecular simulation method[J]. *Polymer*, 2013, 54(23): 6447-6454
- [5] EFTEKHARI M, FATEMI A. Tensile behavior of thermoplastic composites including temperature, moisture, and hygrothermal effects[J]. *Polymer Testing*, 2016, 51: 151-164
- [6] 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
- [7] JOHAR M, KANG H S, CHONG W W F, et al. A further generalized thickness-dependent non-Fickian moisture absorption model using plain woven epoxy composites[J]. *Polymer Testing*, 2018, 69: 522-527
- [8] HAGIHARA H, WATANABE R, SHIMADA T, et al. Degradation mechanism of carbon fiber-reinforced thermoplastics exposed to hot steam studied by chemical and structural analyses of nylon 6 matrix[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 112: 126-133
- [9] SCIDA D, ABOURA Z, BENZEGGAGH M L. The effect of ageing on the damage events in woven-fibre composite materials under different loading conditions[J]. *Composites Science and Technology*, 2002, 62(4): 551-557
- [10] 李敏, 张宝艳. 5428/T700 复合材料的耐湿热性能[J]. *纤维复合材料*, 2006(1): 3-4
- LI Min, ZHANG Baoyan. Study on hygrothermal-resistant properties of 5248/T700 composite system[J]. *Fiber composites*, 2006 (1): 3-4 (in Chinese)
- [11] WON J P, LEE S J, KIM Y J, et al. The effect of exposure to alkaline solution and water on the strength-porosity relationship of GFRP rebar[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2008, 39(5): 764-772
- [12] 牛一凡, 李璋琪, 朱晓峰. 全湿热场下碳纤维/环氧树脂复合材料弯曲性能及寿命预测[J]. *复合材料学报*, 2020, 37 (1): 104-112
- NIU Yifan, LI Zhangqi, ZHU Xiaofeng. Flexural properties and life-time estimation of carbon fiber/epoxy composite under hygro-thermal conditions[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(1): 104-112(in Chinese)
- [13] SANG L, WANG Y, WANG C, et al. Moisture diffusion and damage characteristics of carbon fabric reinforced polyamide 6 laminates under hydrothermal aging[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 123: 242-252
- [14] BAO L, YEE A F, LEE C Y C. Moisture absorption and hygrothermal aging in a bismaleimide resin[J]. *Polymer*, 2001, 42 (17): 7327-7333
- [15] WONG K J, LOW K O, ISRAR H A, et al. Thickness-dependent non-Fickian moisture absorption in epoxy molding compounds [J]. *Microelectronics Reliability*, 2016, 65: 160-166
- [16] ZHOKH A, STRIZHAK P. Crossover between Fickian and non-Fickian diffusion in a system with hierarchy[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2019, 282: 22-28
- [17] GUERMAZI N, BEN TARJEM A, KSOURI I, et al. On the durability of FRP composites for aircraft structures in hygrothermal conditioning[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 85: 294-304
- [18] 杨旭东, 安涛, 邹田春, 等. 湿热环境对碳纤维增强树脂基复合材料力学性能的影响及其损伤机理[J]. *材料工程*, 2019, 47(7): 84-91
- YANG Xudong, AN Tao, ZOU Tianchun, et al. Effect of hygrothermal environment on mechanical properties and damage mechanism of CFRP[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2019, 47(7): 84-91(in Chinese)
- [19] KUMAR S B, SRIDHAR I, SIVASHANKER S. Influence of humid environment on the performance of high strength structural carbon fiber composites[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 498(1): 174-178
- [20] 谭翔飞, 谭鹏达, 何宇廷, 等. 航空碳纤维增强树脂基复合材料加筋壁板吸湿行为[J]. *材料工程*, 2018, 46(12): 61-69
- TAN Xiangfei, TAN Pengda, HE Yuting, et al. Moisture behavior of aeronautic carbon fiber reinforced resin composite stiffened

panel[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(12): 61-69(in Chinese)

- [21] KHAY M, NGO A D, GANESAN R. Experimental investigation and phenomenological modeling of hygrothermal effect on tensile fatigue behavior of carbon/epoxy plain weave laminates[J]. Journal of Composite Materials, 2018, 52(27): 3803-3818
- [22] SALES R C M, DE SOUSA A F, BRITO C B G, et al. Analysis of hygrothermal effects on mixed mode I/II interlaminar fracture toughness of carbon composites joints[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020, 97: 102477
- [23] Standard test method for moisture absorption properties and equilibrium conditioning of polymer matrix composite materials[S]. ASTM D5229/D5229M-14
- [24] Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials[S]. ASTM D3039/D3039M-00
- [25] TOSCANO A, PITARRESI G, SCAFIDI M, et al. Water diffusion and swelling stresses in highly crosslinked epoxy matrices[J]. Polymer Degradation and Stability, 2016, 133: 255-263

Effect of hygrothermal environment on tensile properties of carbon fiber epoxy resin composites

DU Yong, MA Yu'e

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: $[0]_{16}$, $[90]_{16}$, $[\pm 45]_{4s}$ and $[+45/0/0/-45/-45/0/0/+45]_s$ were fabricated to study the influence of the different ply lay-up on the moisture absorption and tensile properties of TG800/E207 carbon fiber epoxy resin composite laminates at a hygrothermal environment of 80°C and 90%RH. Moisture absorption curves, damage morphology after moisture absorption, fracture morphology, load-displacement curves and strength degradation were analyzed. The results show that the moisture absorption curves of TG800/E207 composite laminates present multi-stage phenomenon. The moisture adsorption reached equilibrium at a moisture absorption time of 1 608 hours. The equilibrium moisture content of $[90]_{16}$ is the lowest and its saturated moisture content is only 0.806%; the equilibrium moisture content of $[+45/0/0/-45/-45/0/0/+45]_s$ is the highest and its saturated moisture absorption rate is 0.876%. The failure load of $[0]_{16}$, $[90]_{16}$, $[\pm 45]_{4s}$ and $[+45/0/0/-45/-45/0/0/+45]_s$ samples decreased by 13.8%, 27.36%, 10.7% and 25.6%, respectively. The saturated moisture absorption of $[90]_{16}$ is the lowest, but its tensile strength degradation is the most serious.

Keywords: carbon fiber epoxy resin composites; hygrothermal environment; moisture absorption content; tensile property; fracture morphology

引用格式: 杜永, 马玉娥. 湿热环境下碳纤维环氧树脂复合材料拉伸性能研究[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(1): 33-39
 DU Yong, MA Yu'e. Effect of hygrothermal environment on tensile properties of carbon fiber epoxy resin composites[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40(1): 33-39 (in Chinese)