

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201712127

高低温交变湿热环境下外加载荷对不同孔隙率 CFRP 拉伸力学性能影响

贾 近¹, 姜 明², 肖海英¹, 张东兴¹

(1. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001; 2. 上海复合材料科技有限公司, 上海 201112)

摘 要: 通过高低温交变加速湿热循环试验及有限元模拟,研究了孔隙率和外加载荷对 CFRP 层合板湿热拉伸力学性能及界面破坏机理的影响。通过控制模压压力,制备出 3 种孔隙率的层合板;加载载荷分别为层合板最大弯曲载荷的 30%、40% 和 60%。结果表明,孔隙率的增大是导致 CFRP 层合板湿热老化后拉伸性能大幅下降的主要原因,孔隙率越大,湿热拉伸强度下降越多。外加载荷能加速纤维与树脂基体界面脱粘,使材料湿热拉伸性能进一步下降,而且对不同孔隙率的层合板影响程度不一样,其中影响最大的是孔隙率为 0.08 的层合板,其次是孔隙率 0.04 的层合板,影响最小的是孔隙率为 0.11 的层合板。并且载荷越大,影响也越大,但其对材料湿热拉伸性能的影响远不如孔隙率的影响大。使用 ABAQUS 软件建立有限元模型,计算得到了层合板的各层拉伸应力分布,结果发现湿热循环导致 90°层承受的拉伸应力上升,因此容易发生基体开裂及纤维/基体界面脱粘,导致力学性能下降,这一结果与试验结果相一致。计算得到的拉伸力学强度变化趋势与试验结果相一致。

关键词: CFRP; 孔隙率; 弯曲载荷; 湿热环境; 力学性能

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2019)05-0023-09

Influence of external loading on tensile mechanical properties of CFRP with different porosity under high and low temperature alternating humidity-heat environment

JIA Jin¹, JIANG Ming², XIAO Haiying¹, ZHANG Dongxing¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Shanghai Composites Science & Technology CO., Ltd, Shanghai 201112, China)

Abstract: The effects of porosity and external loading on hygrothermal tensile mechanical properties and interfacial failure mechanism of CFRP laminates were studied by high and low temperature alternating accelerated hygrothermal cyclical test and finite element simulation. 3 kinds of laminates with different porosities were prepared by controlling molding pressure. The load on specimen was 30%, 40% and 60% of the maximum bending load of laminates, respectively. The results showed that the increase of porosity was the main reason leading to the sharp decrease of tensile properties of CFRP laminates after hot-humid aging. The greater the porosity was, the more hygrothermal tensile strength decreased. The external load could accelerate the debonding of the interface between fibers and resin matrix, further degraded the hygrothermal tensile strength of the composites, and had different effects on the laminates with different porosity. Among of them, the most influential one was the laminate with porosity of 0.08, the second was the laminate with porosity of 0.04, and the least was the laminate with porosity of 0.11. And the greater the load, the greater the impact, but the influence of load on the hygrothermal tensile properties of the laminates was far less than that of the porosity. ABAQUS software was employed to simulate tensile properties of composite specimen. The tensile stress distribution of the laminates was investigated, and it was found that the tensile stress increased at 90 degree layer due to the hydrothermal cycle. Therefore, the matrix cracking and fiber/matrix interface debonding were prone to occur, resulting in the decrease of mechanical properties, which was consistent with the experimental results. The variation trend of tensile mechanical strength calculated by the ABAQUS software was consistent with the experimental results.

Keywords: CFRP; porosity; bending load; hygrothermal environment; mechanical properties

收稿日期: 2017-12-20

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(E201311)

作者简介: 张东兴(1961—),男,教授;

贾 近(1976—),女,高级工程师

通信作者: 贾 近, jiajin@hit.edu.cn

碳纤维增强聚合物基复合材料(简称 CFRP)具有比重小、比强度高、比模量高、耐高温、抗疲劳及耐化学腐蚀性能好等优点而广泛应用于飞行器的主、次受力构件及特殊部位的功能件^[1-3]。飞行器用复

合材料在运输、贮存、发射或飞行过程中要面临如温度、湿度、复杂的外载荷等特殊环境,这些环境因子以不同的机制作用于复合材料,造成其降质退化直至损坏变质^[4-9]。例如,在超音速飞机飞行时,所用的复合材料要承受长期的温度在 $-55 \sim 130^{\circ}\text{C}$ 与湿度在 $0 \sim 80\% \text{ RH}$ 交变的环境,经历多次飞行循环结束后,飞机进入维修护理期,在超音速飞机整个飞行服役期间,复合材料处于温度与湿度交变的湿热循环中^[10-13]。并且,由于 CFRP 制备工艺的特殊性,通常会形成孔隙、夹杂、分层等制造缺陷,其中,孔隙是复合材料结构中最常见的缺陷之一。大量的研究表明,孔隙会使 CFRP 在服役期间,因湿热等环境因素而加速材料性能的退化^[14-16]。目前国内外大多数学者多采用水浸、湿热试验箱等简单的恒温恒湿加速试验方法研究复合材料的湿热性能,试验湿热环境没有真实体现飞行器实际服役环境,同时未考虑外载荷的影响,得到的试验结果在实际应用上具有很大的局限性^[17-19]。

因此,本文以含孔隙的碳纤维增强环氧树脂基复合材料(CF/EP)层合板为研究对象,基于材料服役期间的吸湿状态和内应力状态,通过模拟超音速飞机服役环境的高低温交变加速湿热循环试验,并结合有限元分析方法,研究湿热交变环境下孔隙率和外加载荷对 CFRP 层合板拉伸力学性能及界面破坏机理的影响,为 CFRP 在先进飞机中的应用提供理论设计依据。

1 试 验

1.1 试验材料及试样制备

本试验原材料采用东丽公司生产的碳纤维增强环氧树脂(T700/3234)预浸料,纤维体积分数为 60% 。层合板采用手工铺层、铺层方式为 $(0, 90)_s$, 尺寸为 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$, 预浸料层数为 20 层。层合板采用硫化机模压成型,通过控制固化压力(0.1 MPa 、 0.3 MPa 、 0.5 MPa)制备出 3 种孔隙率(11% 、 8% 、 4%)的 CFRP 层合板。

对制备好的 CFRP 试样施加不同大小的弯曲载荷。由于飞机结构用复合材料的承载一般为其设计许用载荷的 80% ,而加载吸湿会导致力学性能下降约 20% 左右^[20],因而复合材料承受的载荷不得超过 60% ,因此本试验加载载荷最大设为 60% 。本文采用自制的弯曲载荷加载装置(见图 1),分别对试样施加其弯曲破坏强度的 30% 、 40% 和 60% 。将加有载荷的试样进行高低温湿热老化试验,研究外加载荷对不同孔隙率层合板湿热老化性能的影响。

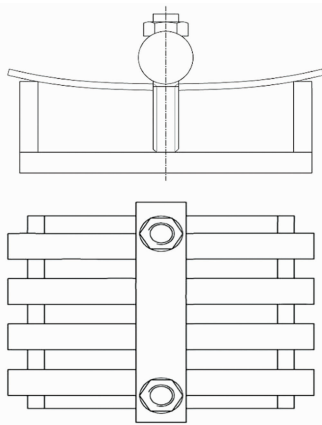


图 1 自制弯曲载荷加载装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of self-made bending load loading device

1.2 高低温交变湿热老化试验

将试样置于图 2 所示高低温交变湿热循环老化试验环境中,模拟真实飞行服役环境对材料性能的影响。

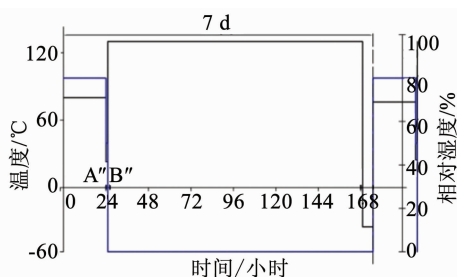


图 2 CF/EP 层合板的加速湿热老化循环工艺(黑色线代表温度,蓝色线代表相对湿度)

Fig. 2 CF/EP laminates accelerated hygrothermal cycle process (black line represents temperature, blue line represents relative humidity)

模拟过程分为吸湿和干燥两个过程。首先将试样置于 80°C , 相对湿度为 $80\% \text{ RH}$ 的湿热环境中 24 h,然后将温度和相对湿度调整为 23°C , $50\% \text{ RH}$,放置 1 h,至此吸湿过程完成。接着进行干燥,将温度调整为 130°C ,放置 144 h,然后将温度调整到 -35°C ,放置 6 h,干燥过程结束,此过程为 1 个循环周期,共做 8 个周期循环试验,来模拟超音速飞机经历 2 400 次飞行循环(64 000 h 飞行时间)所经历的服役环境。在每次循环结束后,取出试样,进行性能检测。

1.3 孔隙率检测方法

根据 GB/T 3365—2008《碳纤维增强塑料孔隙含量和纤维体积含量试验方法》采用金相显微镜测定层合板的孔隙率,沿垂直于纤维轴向的横截面各取 3 个试样,试样尺寸 $20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,高为试样厚度。孔隙率计算公式为

$$X = \frac{N_V \cdot A_g}{A} \quad (1)$$

式中: X 为孔隙含量; N_V 为试样孔隙所占格子数; A_g

为每格面积,单位为平方毫米(mm^2); A 为试样截面面积,单位为平方毫米(mm^2).

根据式(1),得到三种层合板的孔隙率分别是 11%、8%、4%,为方便描述,后文简写成 0.11、0.08、0.04.

1.4 扫描电镜检测

采用扫描电子显微镜(STEREDSCAN-240)对拉伸试样破坏断面形貌进行分析.

1.5 固化度检测

依据 GB/T2576—2005《纤维增强塑料树脂不可溶分含量试验方法》检测层合板的固化度. 由于固化度与孔隙率之间关系不大^[21-22],故选取孔隙率为 0.08 的层合板每周期取 3 个试样测试,取其平均值作为所测 CFRP 层合板试样的固化度值.

1.6 拉伸力学性能试验

根据 GB/T3354—1999《定向纤维增强塑料拉伸性能试验方法》对 CF/EP 层合板进行拉伸试验,拉伸试样尺寸为 $230\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 2\text{ mm}$,采用电子万能材料 Instron 试验机,试样的加载速度为 2 mm/min ,每组 5 个试样,取平均值.

2 有限元模拟方法

采用 ABAQUS 软件对层合板进行湿热拉伸试验模拟,建立层合板和加强片模型,并将二者组合到一起,加强片的尺寸为 $30\text{ mm} \times 25\text{ mm}$,层合板上表面两个加强片的距离为 170 mm ,加强片的模型为刚体,即不可变形. 层合板的拉伸试验模型见图 3. 层合板失效准则采用二维 Hashin 失效准则,表达式如下:
纤维压缩破坏:

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 \geq 1 \quad \sigma_1 \geq 0. \quad (2)$$

式中 X_T 为复合材料层合板纵向拉伸强度.

纤维拉伸破坏:

$$\left(\frac{\sigma_1}{X_C}\right)^2 \geq 1 \quad \sigma_1 \leq 0. \quad (3)$$

式中 X_C 为复合材料层合板压缩强度.

基体拉伸或剪切破坏:

$$\left(\frac{\sigma_2}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 \geq 1 \quad \sigma_2 \geq 0. \quad (4)$$

式中 Y_T 为复合材料层合板横向拉伸强度.

基体压缩或剪切破坏:

$$\left(\frac{\sigma_2}{Y_C}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 \geq 1 \quad \sigma_2 \leq 0. \quad (5)$$

式中: Y_C 为复合材料层合板横向压缩强度, S_{12} 为层合板两个方向上的剪切强度.

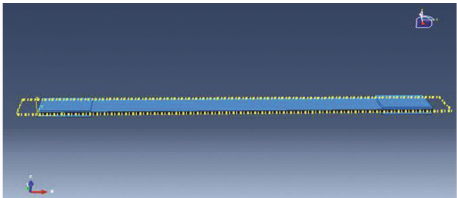


图 3 层合板的拉伸试验模型

Fig. 3 Tensile test model of laminates

层合板的长和宽分别为 230 mm 和 25 mm ,为使层合板和加强片之间不发生滑动,它们之间采取“tie”进行绑定. 在划分网格时,层合板采用连续壳模型,单元类型是 SC8R,加强片为实体,单元类型是 C3D8R. 层合板拉伸试验网格模型见图 4.

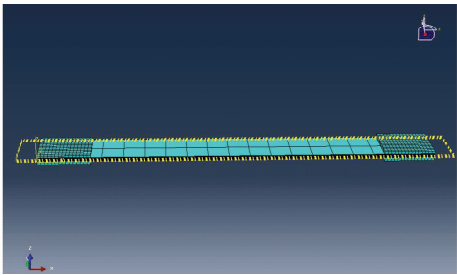


图 4 层合板的拉伸网格模型

Fig. 4 A tensile mesh model of laminates

建模完成后进行,将层合板的一端设置为固支约束,另一端设置为试验标准规定的 2 mm/min 的速度进行拉伸,得到层合板各层拉伸应力大小和层合板拉伸应力-层数分布图. 在此基础上添加不同湿热周期拉伸模量(如图 5(b)、6(b)),模拟得到不同湿热周期的拉伸强度.

3 结果与讨论

3.1 孔隙率对 CFRP 层合板湿热拉伸力学性能的影响

三种孔隙率层合板在经过 8 个高低温湿热老化循环周期后拉伸力学性能的变化如图 5 所示(图中 0.04、0.08、0.11 分别代表三种孔隙率层合板). 由图 5 可以看出,在循环初期(2、4 周期),三种孔隙率层合板的拉伸强度及模量较湿热老化前下降均较快,且孔隙率越大,拉伸强度及模量下降越快;湿热循环进行到 4~8 周期时,拉伸强度及模量下降均趋缓,分析原因是因为在高温下,复合材料中未充分固化的环氧树脂有可能发生了二次固化反应,使材料性能略有改善. 孔隙率最小(0.04)的层合板,在经过 8 个湿热循环周期后,其拉伸强度只下降了 22.2%,而孔隙率最大(0.11)的层合板在湿热循环 2 周期后,其拉伸强度就下降了 27.8%,在循环 8 个周期后,下降达 60.0%,说明层合板孔隙率的大小对其湿热拉伸力学性能影响很大.

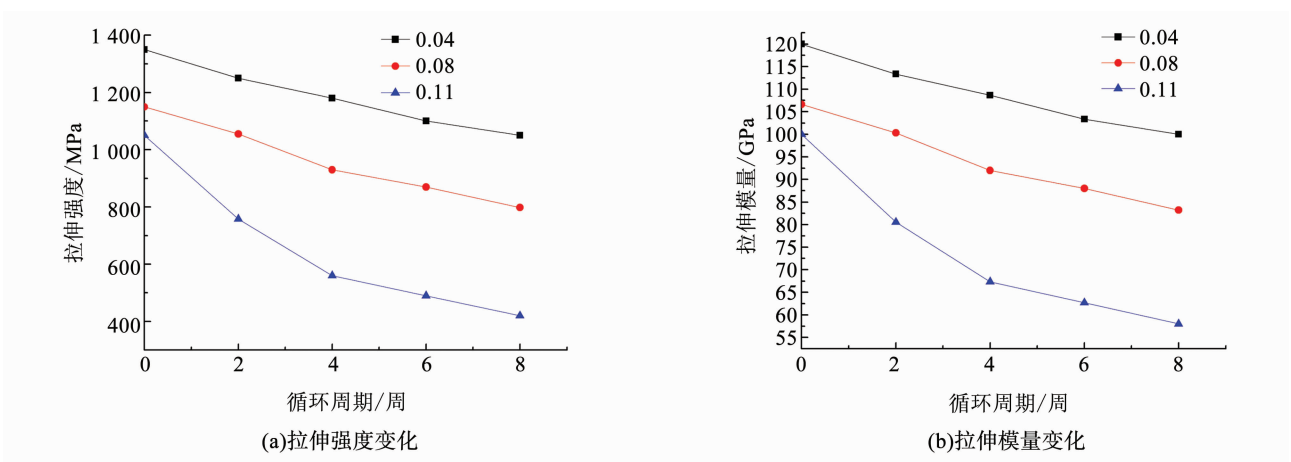


图 5 三种孔隙率的层合板经过 8 个湿热循环周期拉伸性能变化

Fig. 5 Tensile properties of laminates with three porosities after 8 hygrothermal cycles

3.2 弯曲载荷对不同孔隙率层合板湿热拉伸力学性能的影响

不同孔隙率的弯曲受载试样经不同湿热循环周

期后的拉伸强度变化曲线如图 6 所示(图中 0、30%、40%、60% 分别代表层合板所受的弯曲载荷),对应的强度变化如表 1 所示。

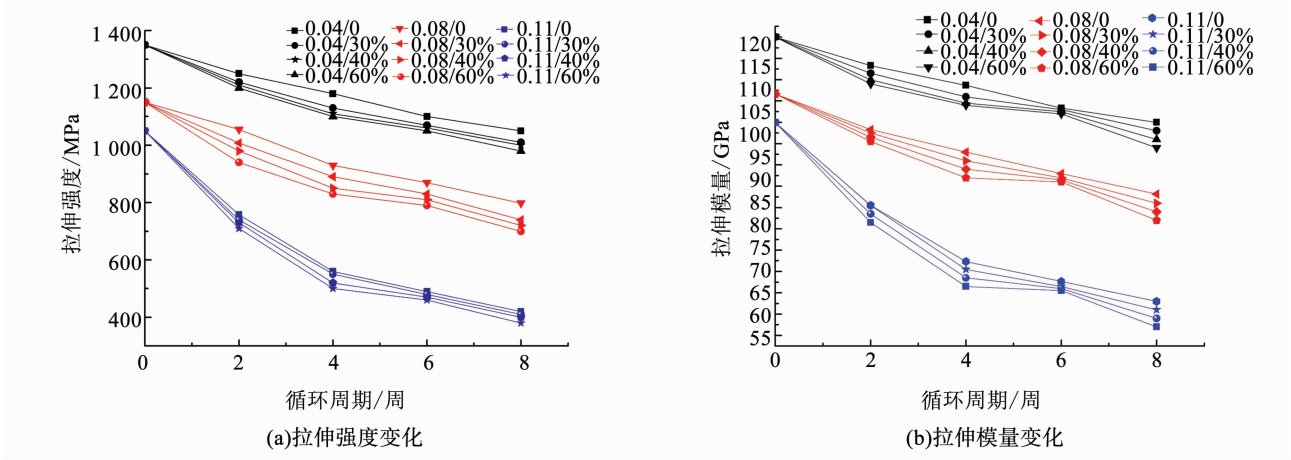


图 6 不同湿热循环周期及弯曲载荷作用下不同孔隙率层合板拉伸强度变化曲线

Fig. 6 Variation of tensile strength of laminates with different porosities under different hygrothermal cycles and bending loads

表 1 不同湿热循环周期及弯曲载荷作用下不同孔隙率层合板拉伸强度变化

Tab. 1 Tensile strength changes of laminates with different porosities under different hygrothermal cycles and bending loads

周期	孔隙率	未加载时拉伸强度	加载 30% 时拉伸强度	加载 40% 时拉伸强度	加载 60% 时拉伸强度
		相对于初始值下降百分比/%	相对于初始值下降百分比/%	相对于初始值下降百分比/%	相对于初始值下降百分比/%
2	0.11	27.8	29.5	30.5	32.4
	0.08	8.3	12.3	14.8	18.3
	0.04	7.4	9.3	10.4	11.1
4	0.11	46.7	47.6	50.5	52.4
	0.08	19.1	22.6	26.1	27.8
	0.04	12.6	16.3	17.8	18.5
6	0.11	53.3	54.3	55.2	56.2
	0.08	24.3	27.8	29.6	31.3
	0.04	18.5	20.7	21.5	22.2
8	0.11	60.0	60.9	61.9	63.8
	0.08	30.6	35.6	37.3	39.1
	0.04	22.2	25.1	25.9	27.4

从图 6 及表 1 可看出,随着高低温湿热循环周期的增加,三种孔隙率层合板在不同弯曲载荷作用下,其拉伸强度与模量均呈现出下降的趋势,并且受载越大,强度及模量下降也越大. 分析原因是因为,试样在弯曲载荷作用下,虽然上表面受压应力,削弱了复合材料的吸湿,但下表面受拉应力,加速了复合材料的吸湿. 并且外载荷会促进复合材料中裂纹的生成和扩展,从而促进复合材料吸湿,使碳纤维和树脂基体的湿热膨胀不匹配性加剧,在界面上产生内应力,当应力达到一定量级后就会引发界面脱粘和分层,进一步促进了吸湿,因此外载荷作用下复合材料的吸湿过程是一个自加速的恶性循环,恶性循环的最终结果是加剧了复合材料力学性能下降. 并且弯曲载荷越高,对材料作用越强,其拉伸强度下降越严重.

从表 1 可以看出,三种孔隙率层合板在未受载时,其力学性能随湿热周期的增加,下降很快;而加载后的层合板力学性能虽然进一步下降,但相比未加载层合板,其下降程度并不大. 例如:孔隙率为 0.11 的层合板未受载时,力学性能在湿热老化 8 周期后下降 60.0%;而受载 30% 时,力学性能下降 60.9%,只比未受载时多下降了 0.9%;受载 60% 时,力学性能下降 63.8%,也只比未受载时下降了 3.8%. 即便是受加载影响最大的孔隙率为 0.08 的层合板,湿热循环 8 周期后,受载 30% 时,其力学性能相对未加载试样多下降 5.0%;受载 60% 时,力学性能相对未加载试样多下降 8.5%.

从表 1 还可以看出,外载荷对三种孔隙的层合板拉伸性能影响最大的是孔隙率为 0.08 的层合板,其次是 0.04,影响最小的是 0.11. 这是因为孔隙率低的层合板内部缺陷少,加载产生的裂纹及增加的吸湿量较少,因此力学性能相对下降较小. 而随着孔隙率的增大(0.08),复合材料基体和界面上微裂纹及吸湿量增多,从而吸湿自加速现象明显,加剧材料力学性能的下降. 但当孔隙率进一步增大(0.11)时,由于材料本身吸湿量剧增,加载增加的吸湿量对材料力学性能的影响反而不如孔隙率低的层合板大. 因此可见,孔隙率的增大是导致 CFRP 层合板湿热老化后拉伸性能下降的主要原因,外加载荷虽然能进一步加大力学性能的下降,但影响程度相对较小,并且对不同孔隙率的层合板影响程度不一样.

从图 6 和表 1 还可看出,湿热循环 4~6 周期时,孔隙率为 0.11 和 0.08 的层合板加载 40% 和 60% 弯曲载荷时,拉伸强度下降明显趋于平缓,孔隙率为 0.04 的层合板在这段周期相较其他周期下降趋势也明显减小. 这是因为 4~6 周期时,加载 40%

和 60% 的层合板的固化度明显提高了(见图 7),而加载 30% 虽然也提高了,但是没有加载 40% 和 60% 的明显. 分析原因是由于弯曲载荷使层合板上表面受到压力作用,从而使树脂基体分子间间隙变小,官能团之间更容易发生相互作用,后固化现象明显. 并且载荷越大,这种作用越明显. 由于后固化减少了层合板内部残余应力,提高纤维与树脂的粘结力,因此在湿热循环进行到 4~6 周期时,3 种孔隙率的层合板加载 40% 和 60% 时,拉伸强度变化比较平缓.

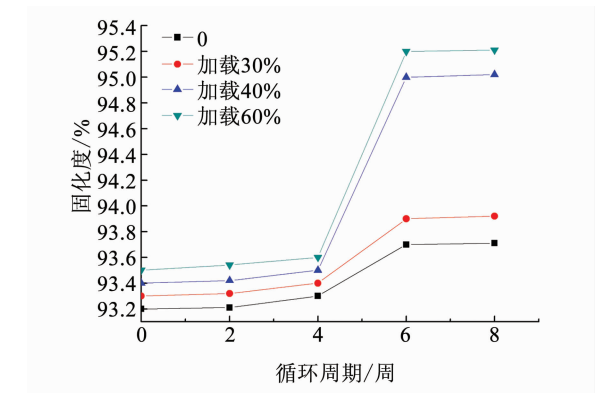


图 7 层合板固化度随湿热循环周期变化

Fig. 7 Curing degree of laminates varies with the period of hygrothermal cycles

3.3 孔隙及弯曲加载对湿热老化后层合板界面性能的影响

图 8 为不同循环周期未受载试样拉伸破坏断面的 SEM 照片(图中 C0 为没有经过湿热循环,C4、C8 分别为经过 4 个、8 个湿热循环周期),图 9 为不同孔隙率弯曲受载试样在 0、4、8 个湿热循环周期后拉伸破坏断面的 SEM 照片.

3.3.1 孔隙对湿热老化后层合板界面性能的影响

从图 8 和图 9 可以看出,未经湿热老化处理的试样,其拉伸破坏形式主要为脆性断裂、分层及基体开裂三种,纤维拔出现象很少(图 8(a)~(c)及图 9(a)~(c)),说明纤维与基体界面粘接性能很好. 经过 4 个周期的湿热循环后,三种孔隙层合板的拉伸断面处受到的破坏比湿热老化前要明显严重(图 8(d)~(f)),破坏形式除了脆性断裂、分层及基体开裂外,还出现了纤维拔出(图 9(d)、(j)),在树脂基体中能看到纤维拔出留下的凹坑及孔洞,但纤维拔出长度较短,裸露纤维表面粘附少量的树脂,断口附近树脂碎块较多,表明湿热造成了纤维/树脂界面脱粘,图 9 可看出,孔隙率小(0.04)的试样界面脱粘比较轻微,因此拉伸强度下降较小(12.6%);而孔隙率越大,纤维/基体界面脱粘就越严重,因此拉伸强度下降很多,孔隙率最大(0.11)的试样,其拉伸强度下降达到 46.7%. 可见湿热循

环导致了层合板界面脱粘,从而引起材料力学性能下降.

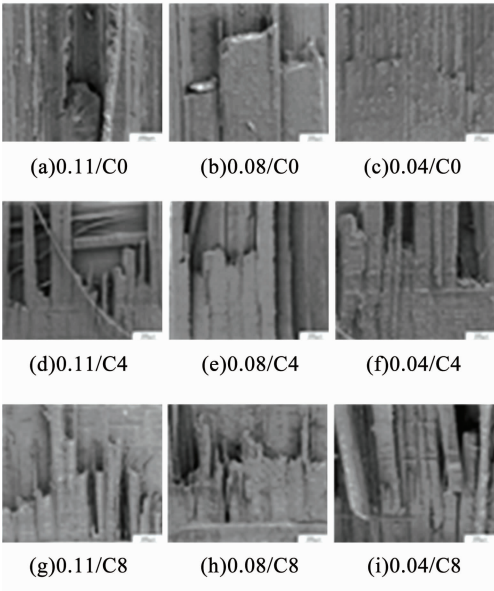


图 8 不同湿热循环周期未卸载试样拉伸破坏断面 SEM 照片
Fig. 8 SEM photographs of tensile failure sections of unloaded specimens in different hygrothermal cycles

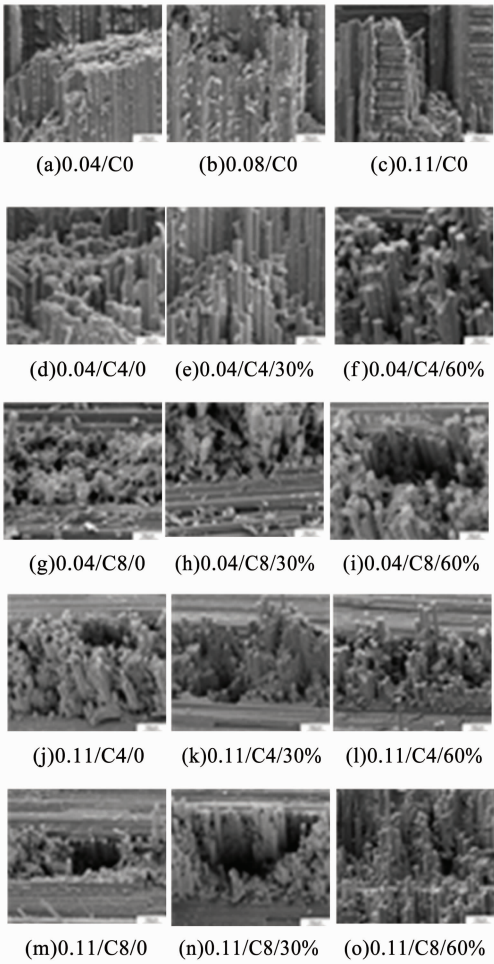


图 9 不同孔隙率湿热受载试样拉伸破坏断面 SEM 照片
Fig. 9 SEM photographs of tensile failure cross sections of specimens with different porosities in different hygrothermal cycles

经过 8 个周期的湿热循环后,三种层合板的拉伸断口破坏程度更加严重,拉伸断口处的纤维拔出现象明显,并且孔隙率越大,纤维拔出的越多(图 8(g) ~ (i),图 9(g)、(m)). 对低孔隙率(0.04)的层合板来说,其断口破坏主要形式仍然是脆性断裂、分层及基体开裂,但伴随有较多的纤维/树脂界面脱粘,因此导致拉伸强度比循环 4 周期的强度下降了 10.98%. 而较高孔隙率的两种层合板,纤维/树脂界面脱粘已成为主要的拉伸破坏形式之一,因此导致拉伸强度较循环 4 周期时下降较多. 特别是孔隙率最大(0.11)的试样,其拉伸强度比 4 周期时下降了 24.95%,可见孔隙含量对材料湿热力学性能影响很大. 分析原因认为,层合板在高温吸湿过程中,水分子扩散进入复合材料内部,由于纤维与基体的湿热膨胀系数不同而产生内应力;而孔隙率越大的层合板吸收的水分越多,水分子越容易扩散进入纤维与基体界面,从而产生内应力越大. 当该应力达到一定数量级超过纤维/基体界面粘结力时,就会造成界面脱粘,降低界面的承载能力,并且基体吸水增塑,其对碳纤维的支撑作用削弱,也会进一步影响应力传递,导致纤维/基体界面粘接强度下降. 因此随着湿热周期的增加,孔隙率越大的层合板,纤维与基体界面脱粘越严重,拉伸强度下降越多.

3.3.2 弯曲加载对不同孔隙率层合板湿热老化后界面性能的影响

从图 9 可看出,孔隙率较低(0.04)的层合板,在循环 4 个周期后,受载 30% 的试样拉伸破坏形式较未受载试样没有明显改变,而受载 60% 的试样,纤维拔出数量明显增多,拔出长度也较长,并且纤维表面粘附树脂较少,说明发生了较多的纤维与基体界面脱粘. 在循环 8 个周期后,三种不同受载(0、30% 和 60%)试样拉伸破坏断口形貌很相似,均出现较多的大孔洞,孔洞处的破坏形式主要是纤维与树脂脱粘,并且随着弯曲载荷增大,纤维拔出数量增多、长度增大,界面脱粘现象更严重. 分析原因是因为弯曲载荷加速了基体和界面上微裂纹的形成与扩展,从而导致纤维与基体界面粘接强度下降,最终导致拉伸强度下降. 从表 1 可以看出,对低孔隙率(0.04)的层合板来说,湿热循环 4 周期后,加载 30% 的试样拉伸强度较未受载试样只下降了 3.7%,加载 60% 试样的拉伸强度相对未加载下降 5.9%;湿热循环 8 周期后,加载 30% 的试样拉伸强度较未受载试样只下降 2.9%,加载 60% 试样的拉伸强度相对未加载下降 5.2%. 从图 9 及表 1 还可以看出,对高孔隙率(0.11)的层合板来说,弯曲载荷对其湿热拉伸断口形貌及力学性能的影响与低孔

隙率的类似. 可见, 对不同孔隙层合板来说, 加载 30% 对其湿热老化后的力学性能影响均较小, 但随着载荷的增大, 其对层合板湿热老化后力学性能的影响也逐渐增大.

总的来说, 对含孔隙的湿热受载层合板来说, 孔隙含量是影响层合板湿热拉伸性能的主要因素, 孔隙率越大, 纤维与树脂基体界面脱粘越严重, 湿热拉伸强度下降越多. 外加载荷能加速纤维与树脂基体界面脱粘, 使材料湿热拉伸性能进一步下降, 但其对材料湿热拉伸性能的影响远不如孔隙率的影响大.

3.4 CFRP 层合板湿热拉伸力学性能有限元分析

模拟得到未湿热老化层合板各层拉伸应力大小和层合板拉伸应力-层数分布图(分别如图 10 及图 12(a)所示). 在此基础上添加湿热循环 4 周期后材料的拉伸模量试验数据(如图 5(b))得到的模拟结果如图 11 及图 12(b)所示. 最后, 添加不同湿热周期拉伸模量(如图 5(b)、6(b)), 模拟得到不同湿热周期的拉伸强度, 并模拟了孔隙率为 0.11、加载 60% 层合板的拉伸强度, 最后将模拟结果与实验结果进行了比较, 见图 13.

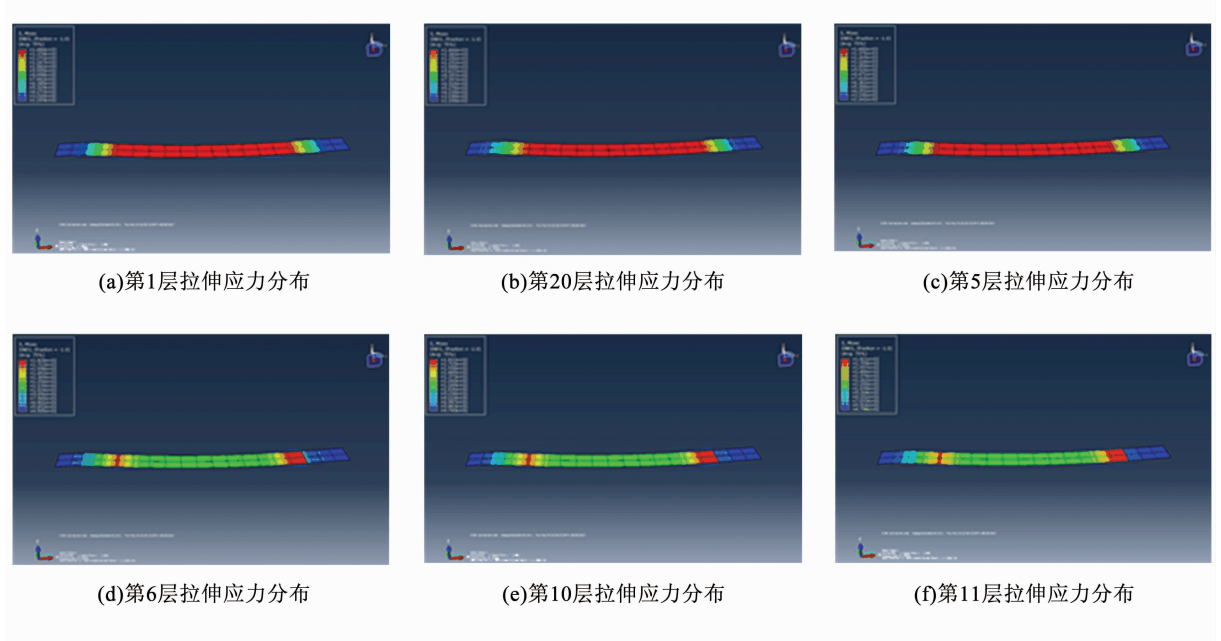


图 10 未湿热老化层合板拉伸应力各层应力分析

Fig. 10 Stress analysis of tensile stress layers of non-hydrothermal aging laminates

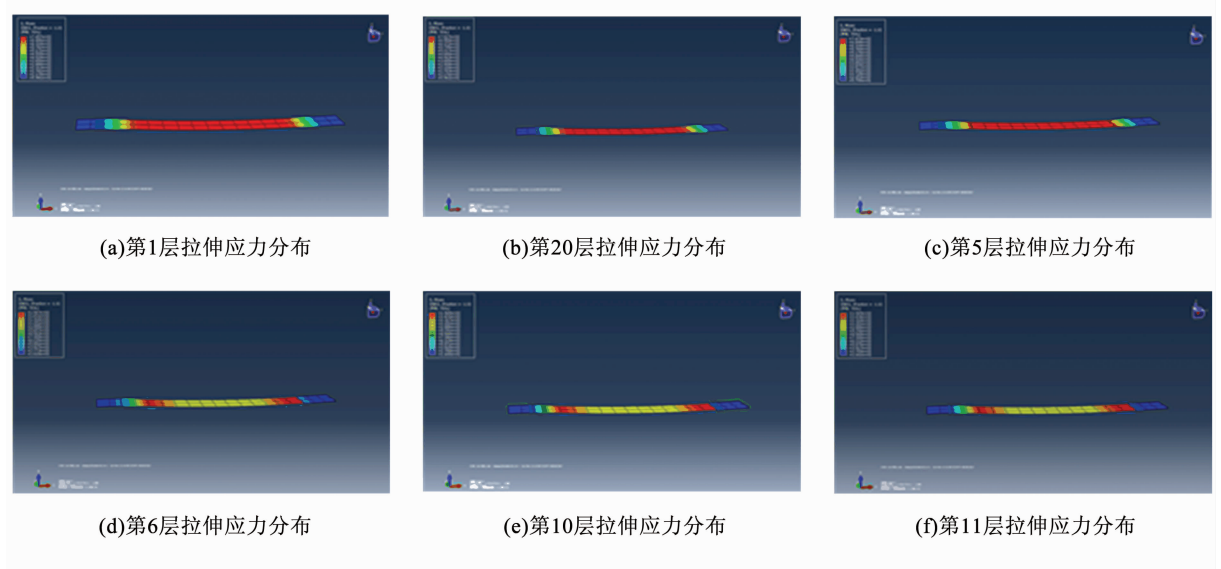
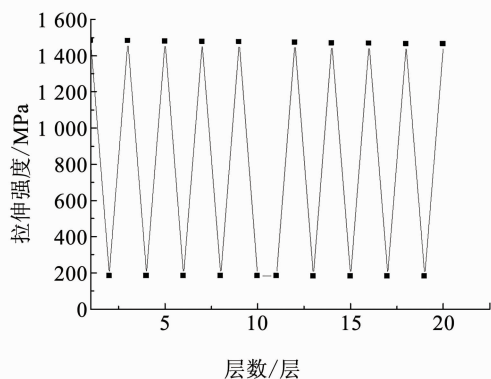
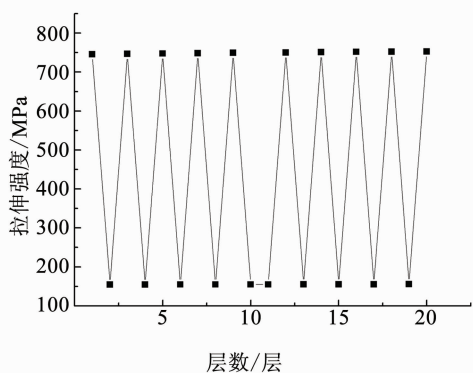


图 11 湿热循环 4 周期后层合板拉伸应力各层应力分析

Fig. 11 Stress analysis of tensile stress of layers of laminates after 4 hydrothermal cycles



(a) 未湿热老化层合板层数与应力关系曲线



(b) 湿热循环4周期后层合板层数与应力关系曲线

图 12 层合板拉伸应力-层数分布

Fig. 12 Tensile stress-layer number distribution of laminates

从图 10 及图 12(a) 可以看出, 未湿热老化层合板第 1 层的拉伸应力大小为 1 484.2 MPa (与试验值的 1 350.6 MPa 相差不大), 与第 1 层对称的第 20 层的拉伸应力大小为 1 464.3 MPa, 层合板的第 10 层拉伸应力大小为 182.2 MPa, 而第 11 层拉伸应力大小为 182.1 MPa, 从数值上可以看出层合板对称层应力相近, 除中间两层铺层方向相同, 因此应力相近外, 其余相邻两层 (0° 层与 90° 层) 拉伸应力相差很大. 从图 10(a) 可以看出 0° 层所受最大拉伸应力主要集中于层合板的中部, 而 90° 层所受最大拉伸应力在试样两端靠近加强片的位置. 0° 层所受最大拉伸应力是 90° 层的 8.2 倍, 这是因为 0° 铺层纤维方向与拉伸方向平行, 而 90° 层纤维与拉伸方向垂直, 未湿热老化时, CF/基体界面粘接性能好, 传载能力强, 0° 层纤维承担了绝大部分拉伸应力, 因此试样的拉伸强度主要受 0° 层的 CF 控制.

从图 11 及图 12(b) 可以看出, 湿热循环 4 周期后, 0° 层相对 90° 层承载能力下降, 此时 0° 层所受最大拉伸应力仅为 90° 层的 4.8 倍. 这是因为层合板经湿热老化后, 界面破坏严重, 有效传载能力下降,

从而导致 90° 层受到拉伸应力上升, 而 90° 层拉伸性能是由基体及 CF/基体界面强度决定, 其抗拉性能远小于 0° 层, 因此很容易发生基体开裂及纤维/基体界面脱粘, 从而导致整个层合板拉伸性能下降.

从图 13 可看出, 在 8 个湿热循环周期内, 模拟得到的结果与试验结果相一致, 虽然模拟得到的拉伸强度稍大于试验值, 但误差不大.

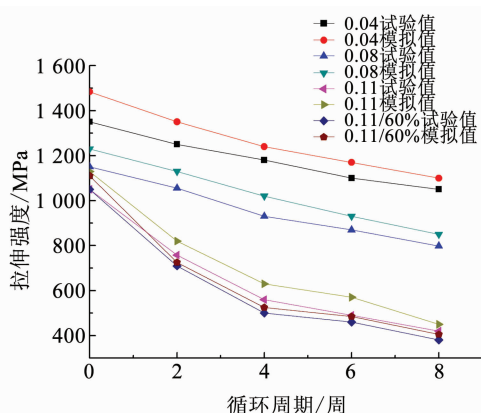


图 13 三种孔隙率的层合板拉伸性能试验值与模拟值

Fig. 13 Experimental values and simulation values of tensile properties of laminates with three porosities

4 结 论

1) 孔隙率是影响层合板湿热拉伸性能的主要因素, 孔隙率越大, 湿热拉伸强度下降越多. 外加载荷能加速纤维与树脂基体界面脱粘, 使材料湿热拉伸性能进一步下降, 但其对材料湿热拉伸性能的影响远不如孔隙率的影响大.

2) 外载荷对三种孔隙层合板拉伸性能影响最大的是孔隙率为 0.08 的层合板, 其次是孔隙率 0.04 的层合板, 影响最小的是孔隙率 0.11 的层合板, 并且载荷越大, 影响越大. 加载 30% 对三种孔隙率层合板性能影响均较小, 循环 4 周期后, 相对未加载试样, 拉伸强度最多下降 3.7%, 循环 8 周期后, 相对未加载试样, 拉伸强度最多下降 5.0%; 加载 60% 则影响较大, 循环 4 周期后, 相对未加载试样, 拉伸性能最多下降 8.7%, 循环 8 周期后, 相对未加载试样, 拉伸性能最多下降 8.5%.

3) CFRP 层合板未湿热老化时, CF/基体界面粘接性能好, 传载能力强, 0° 层承担了大部分的拉伸应力 (1 484.2 MPa), 为 90° 层所受应力 (182.1 MPa) 的 8.2 倍. 湿热循环 4 周期后, 0° 层所受最大拉伸应力 (752.7 MPa) 为 90° 层所受应力 (155.6 MPa) 的 4.8 倍. 湿热老化导致 CFRP 界面破坏严重, 有效传载能力下降, 90° 层承受的应力上升, 易发生基体开裂及纤维/基体脱粘, 导致整个层合板拉伸性能下降.

参考文献

- [1] 刘柳. 抗高冲击载荷 CFRP 层合结构力学性能研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016
LIU Liu. Mechanical property study of CFRP laminates subjected to high impact compressive loads[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016
- [2] 易增博. 碳纤维增强环氧树脂基复合材料的制备及力学性能研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015
YI Zengbo. Study on preparation and mechanical property of carbon fiber reinforced epoxy resin composites[D]. Lanzhou: lanzhou Jiao-tong University, 2015
- [3] Kim C, Chi H C, Son I, et al. Effect of microscale oil penetration on mechanical and chemical properties of carbon fiber-reinforced epoxy composites[J]. Journal of Industrial & Engineering Chemistry, 2017. 61: 112. DOI:10.1016/j.jiec.2017.12.007
- [4] WANG, HONGXIAO, XIAOHUI ZHANG, and YUGANG DUAN. Effects of drilling area temperature on drilling of carbon fiber reinforced polymer composites due to temperature-dependent properties[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 96. 5-8(2018): 2943. DOI:10.1007/s00170-018-1810-7
- [5] BRUNNER A J, STELZER S, PINTER G, et al. Cyclic fatigue delamination of carbon fiber-reinforced polymer-matrix composites: Data analysis and design considerations[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 83: 293. DOI:10.1016/j.ijfatigue.2015.10.025
- [6] PARK H S, CHOI M Y, KWON K A, et al. Study on the performance of infrared thermal imaging light source for detection of impact defects in CFRP composite sandwich panels[J]. Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, 2017, 37(2): 91. DOI: 10.7779/JKSNT.2017.37.2.91
- [7] LI P, XU W Y. The diagnosis of manufacturing defects in composite material radome based on antenna's far field data[J]. Materials Research Innovations, 2016, 19(sup5): S5-277. DOI:10.1179/1432891714Z.0000000001092
- [8] MERINO-PÉREZ J L, ROYER R, MERSON E, et al. Influence of workpiece constituents and cutting speed on the cutting forces developed in the conventional drilling of CFRP composites[J]. Composite Structures, 2016, 140: 621. DOI:10.1016/j.compstruct.2016.01.008
- [9] XU C, MUDUNURU M K, NAKSHATRALA K B. Material degradation due to moisture and temperature. Part 1: Mathematical model, analysis, and analytical solutions[J]. Continuum Mechanics & Thermodynamics, 2016, 45(9): 1. DOI:10.1007/s00161-016-0511-4
- [10] BATUWITAGE C, FAWZIA S, THAMBIRATNAM D, et al. Durability of CFRP strengthened steel plate double-strap joints in accelerated corrosion environments[J]. Composite Structures, 2017, 160: 1287. DOI:10.1016/j.compstruct.2016.10.101
- [11] XIE Z, XIE J, GUO Y, et al. Durability of CFRP-Wrapped concrete exposed to hydrothermal environment[J]. International Journal of Civil Engineering, 2018, 16(5): 527. DOI:10.1007/s40999-017-0159-x
- [12] TAN J L Y, DESHPANDE V S, FLECK N A. Failure mechanisms of a notched CFRP laminate under multi-axial loading[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015(77): 56. DOI:10.1016/j.compositesa.2015.06.005
- [13] GHAFOORI E, MOTAVALLI M. Lateral-torsional buckling of steel I-beams retrofitted by bonded and un-bonded CFRP laminates with different pre-stress levels: experimental and numerical study[J]. Construction and Building Materials, 2015, 76: 194. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.11.070
- [14] YANG Y, SNEED L, SAIHDI M S, et al. Emergency repair of an RC bridge column with fractured bars using externally bonded pre-fabricated thin CFRP laminates and CFRP strips[J]. Composite Structures, 2015, 133: 727. DOI:10.1016/j.compstruct.2015.07.045
- [15] HE Y, TIAN G, PAN M, et al. Impact evaluation in carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates using eddy current pulsed thermography[J]. Composite Structures, 2014, 109: 1. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.10.049
- [16] 陈德雄, 林有希, 林华. 碳纤维复合材料钻削加工分层缺陷研究进展[J]. 工具技术, 2016, 50(4): 3. DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2016.04.001
CHEN Dexiong, LIN Youxi, LIN Hua. Research progress of delamination in drilling process of carbon fiber reinforced polymer composites[J]. Tool Engineering, 2016, 50(4): 3. DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2016.04.001
- [17] TENG J G, FEMNANDO D, YU T. Finite element modelling of debonding failures in steel beams flexurally strengthened with CFRP laminates[J]. Engineering Structures, 2015, 86: 213. DOI:10.1016/j.engstruct.2015.01.003
- [18] LIN Y, GIGLIOTTI M, LAFARIE-FRENOT M C, et al. Experimental study to assess the effect of carbon nanotube addition on the through-thickness electrical conductivity of CFRP laminates for aircraft applications[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 76: 31. DOI:10.1016/j.compositesb.2015.02.015
- [19] ABRY J C, BOCHARD S, CHATEAUMINOIS A, et al. In situ detection of damage in CFRP laminates by electrical resistance measurements[J]. Composites Science and Technology, 1999, 59(6): 925. DOI:10.1016/S0266-3538(98)00132-8
- [20] 孙旋, 童明波, 陈智, 等. 碳纤维织物布层压复合材料湿热环境疲劳后剩余压缩强度[J]. 复合材料学报, 2016, 33(3): 535. DOI:10.13801/j.cnki.fhclxb.20150709.002
SUN Xuan, TONG Mingbo, CHEN Zhi, et al. Residual compressive strength after fatigue of carbon fiber fabric composite laminates in hy-drothermal environment[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(3): 535. DOI:10.13801/j.cnki.fhclxb.20150709.002
- [21] SCHUERMAN M, GAFFURI M, HORST P. Multidisciplinary pre-design of supersonic aircraft[J]. Ceas Aeronautical Journal, 2015, 6(2): 207. DOI: 10.1007/s13272-014-0140-1
- [22] HSIAO H. Compression-after-impact strength and surface morphology in toughened composite materials[J]. International Journal of Fracture, 2012, 176(2): 229. DOI:10.1007/s10704-012-9736-9

(编辑 苗秀芝)