

Study on Hygrothermal Properties of Composite Material Covered with Carbon Nanotube Buckypaper on Double Sides

Qingsheng Huo^{1,2}, Jiaqi Jin¹

¹School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang Liaoning

²School of Mechanical Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun Liaoning

Email: jinjq612@126.com, 280086133@qq.com

Received: Apr. 27th, 2019; accepted: May 10th, 2019; published: May 21st, 2019

Abstract

The application environment of composites has great influence on the performance of materials, and the hygrothermal environment is the most common one. Therefore, it is necessary to study the characteristics of composites in the hygrothermal environment. In this paper, the accelerated wet-thermal aging test of composites covered with carbon nanotube buckypaper on double sides was carried out by boiling method. The experimental results show that the hygroscopicity of double-sided carbon nanotube buckypaper composites increases in accordance with Fick's second law at the initial stage of hydrothermal treatment. Within the time range of 0~29.5 h, the moisture absorption rate increased linearly, and then the moisture absorption rate did not increase linearly, but slowed down and gradually stabilized. Saturated moisture absorption rate reached 1.7% when the time of hydrothermal treatment was 221.5 h. The composites without carbon nanotube buckypaper on the surface also showed the same trend. Saturated moisture absorption rate was 1.705% at 173.5 h, water molecular diffusion coefficient was 0.381 mm²/s and moisture absorption rate was 0.17 s⁻¹. The test results of interlaminar shear strength and flexural strength show that the mechanical properties of the two materials decrease with the increase of heat treatment time.

Keywords

Carbon Nanotube Buckypaper, Composites, Mechanical Properties, Hygrothermal Properties

双面包覆碳纳米纸复合材料的湿热性能研究

霍庆生^{1,2}, 金嘉琦¹

¹沈阳工业大学机械工程学院, 辽宁 沈阳

²辽宁石油化工大学机械工程学院, 辽宁 抚顺

Email: jinjq612@126.com, 280086133@qq.com

收稿日期: 2019年4月27日; 录用日期: 2019年5月10日; 发布日期: 2019年5月21日

摘要

复合材料的应用环境对材料本身的性能等都有着极大的影响, 而其中又以湿热环境最为常见, 所以研究其在湿热环境下的特性是很有必要的。本文使用水煮法对双面包覆碳纳米纸复合材料进行加速湿热老化试验。实验结果表明: 双面包覆碳纳米纸复合材料在湿热处理的初期, 吸湿率的增长符合Fick第二定律。湿热处理在0~29.5 h时间范围内, 其吸湿率呈线性增加, 随后吸湿率增长不再呈线性增长, 而是速度减慢并逐渐趋于平稳, 在湿热处理时间为221.5 h时达到饱和, 饱和吸湿率为1.7%。面层不含碳纳米纸的复合材料也呈现相同变化趋势, 在173.5 h时达到饱和, 饱和吸湿率为1.705%, 水分子扩散系数为0.381 mm²/s, 吸湿速率为0.17 s⁻¹。层间剪切强度与弯曲强度的测试结果表明: 二者的力学性能均随着湿热处理时间的增加而降低。

关键词

碳纳米纸, 复合材料, 力学性能, 湿热性能

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

碳纤维增强环氧树脂基复合材料是目前最为常见的一种高性能复合材料, 因其力学性能优异并具备高比强度、高模量、耐腐蚀、密度小、耐高温等特点而应用广泛, 在航空航天、军事、汽车等很多领域我们都能看到它的身影[1] [2]。而如果在碳纤维增强环氧树脂基复合材料面层加入碳纳米纸则能够使其具备隐身、防雷击等性能, 这就使其能够在军用、工程等领域的应用更为广泛[3] [4] [5]。在工程应用中这种新型复合材料的主要障碍之一是聚合物基质材料受水分影响而发生降解。并且一般军用飞行器会长期受到湿热这样的外界因素影响, 其力学性能、结构稳定性、耐久性等特点会被限制, 甚至影响其使用寿命, 这就要求人们对此类材料在湿热环境下的损伤机理进行研究, 并将其作为预测复合材料使用寿命的理论基础。想要得到复合材料在湿热环境中的力学性能变化规律, 吸湿率是一个重要的参考因素[6] [7] [8] [9]。

复合材料结构会在不同情况下老化失效, 复合材料的老化可分为三种: 吸湿老化、自然老化和环境老化。近些年来, 由于湿热环境具有普遍性, 复合材料的湿热性能研究也越来越受到重视。例如, Ray B C 认为复合材料在湿热条件下吸收水分而膨胀扩张, 纤维与基体之间的胶粘结构被破坏, 界面完整性降低, 从而使其结构稳定性被破坏, 进而导致复合材料各项性能(包括强度、刚度等)降低[10]。檀琳琳[11]通过实验得到, 碳纤维增强环氧树脂复合材料的界面和力学性能受湿热环境影响明显, 湿热导致其老化速度加快, 而且有涂层的材料要比没有涂层材料的老化慢得多。Yanmei Li 等人通过研究双马来酰亚胺树脂的湿热扩散性得到结论, 影响材料力学性能和机械性能的关键因素就是其网络结构和氢键的性质[12], 树脂基复合材料的湿热性能的影响也具有相似的机理。

本文重点研究了无碳纳米纸复合材料与双面包覆碳纳米纸复合材料的吸湿行为与性能, 探讨了湿热

环境下复合材料的吸收率、湿热特性对其力学性能的影响。从吸湿率、层间剪切强度, 复合材料层合板弯曲和变形的湿热性能研究出发, 为建立纤维增强树脂基复合材料湿热性能的研究提供实验依据。

2. 实验

2.1. 碳纳米纸的制备

碳纳米纸制备过程如图 1 所示, 具体如下:

- 1) 使用电子天平称量 500 mg 的碳纳米管, 误差不超过 0.005 g。
- 2) 再使用针管抽取 5 ml 的曲拉通。将碳纳米管与曲拉通依次倒入研钵中, 研磨一段时间直至其表面呈光滑状态。
- 3) 量筒量取 500 ml 去离子水, 分 3 次将其冲洗干净。
- 4) 将冲洗下来的液体用搅拌器搅拌 2.5 h 使其分散均匀。
- 5) 放入超声仪中超声, 进行超声处理 1 h。
- 6) 使用离心机将其离心 10 min。
- 7) 用抽滤机抽滤, 使用大量去离子水冲洗干净, 大概四个小时抽滤完毕。
- 8) 烘干, 将烘箱温度升至 80℃ 后放入烘干 3 h, 备用。



Figure 1. Preparation process of carbon nanotube buckypaper
图 1. 碳纳米纸制备流程

2.2. 双面包覆碳纳米纸复合材料层压板的制备

实验使用热压法制备双面包覆碳纳米纸复合材料, 首先将上下模具都均匀地涂上一层脱模剂防止环氧树脂固化后将上下模具粘住无法脱模。在下模板上放一块吸胶毡, 再将脱模布铺在上面, 然后将一片碳纳米纸放在脱模布上, 再在碳纳米纸上顺着碳纤维的方向铺上碳纤维环氧树脂预浸料(共计 24 层), 然后将另一片碳纳米纸铺在上面, 需要注意的是上下两张碳纳米纸应对齐, 这样方便样条的裁剪, 然后同样的在上面铺上脱模布和吸胶毡, 最后将上模板放上压好。铺层如图 2 所示。

压片机预热到 120 ℃ 后将铺层放入并施以 5 MPa 的压强使其固化 4 h 后停止加热, 待其自然冷却降温到室温后再取出然后将复合材料板裁成 30 mm × 6 mm × 3 mm、40 mm × 15 mm × 3 mm 样条。除此之外, 为了作对比实验, 还需使用相同的方法制备不含碳纳米纸的碳纤维环氧树脂基复合材料层合板, 并剪裁成对比样条, 同样是 30 mm × 6 mm × 3 mm、40 mm × 15 mm × 3 mm 的尺寸。

2.3. 湿热实验

首先将复合材料样条放入 90℃ 恒温烘箱中烘干, 待其质量不变后称量质量记录并将其编号备用。采用水煮吸湿法进行湿热试验, 即预留下含双面包覆碳纳米纸与不含碳纳米纸的复合材料样条各十个后, 将其余样条均置于 90℃ 恒温水槽中(其中水槽中应使用去离子水)。为减小水分蒸发, 可在恒温水槽上方

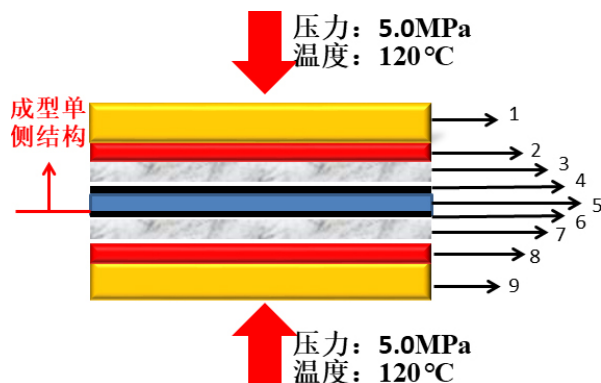


Figure 2. Preparation process of double sides carbon nanotube buckypaper composite: 1, 9-template; 2, 8-absorbent felt; 3, 7-demoulding cloth; 4, 6-carbon nano-paper; 5-composite laminate

图 2. 双面包覆碳纳米纸复合材料铺层示意图: 1、9-模板; 2、8-吸胶毡; 3、7-脱模布; 4、6-碳纳米纸; 5-复合材料层压板

盖一层保鲜膜。由于本实验还要进行力学性能测试, 所以将 $30\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的双面包覆碳纳米纸与不含碳纳米纸的复合材料样条各 5 个作为主样条进行吸湿测试, 其余样条做跟踪实验, 待主样条吸湿达到饱和状态即可结束实验。实验开始后, 由于样条刚开始时吸湿速度会比较快, 吸湿率呈直线上升, 所以开始 5 个半小时后就取出主样条测量其质量变化, 需要注意的是应在样条表面没有多余水分后再测量, 之后每天都将样条取出测量其质量, 待其吸水幅度逐渐减小后每隔三天取出主样条测量其质量并记录下来, 一直到样条吸水后质量增加为前一次测量质量的 0.05% 后就可以看作样条达到吸湿饱和状态。

2.4. 湿热实验

待主样条吸湿率分别达到 0.3%、1.0%、1.4%、1.6% 后取出跟踪样条各 5 个进行层间剪切强度测试。样条尺寸为 $30\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 。按照式(1)计算:

$$\tau_c = \frac{3p_b}{4bh} \quad (1)$$

式中: τ_c 为试样剪切强度(MPa); p_b 为破坏载荷或最大载荷(N); b 为试样宽度(mm); h 为试样厚度(mm)。

同样的, 主样条吸湿率达到 0.3%、1.0%、1.4%、1.6% 后取出跟踪样条各 5 个采用三点弯曲法进行弯曲强度测试。样条尺寸为 $40\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 。按照式(2)计算:

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (2)$$

式中: σ 为试样弯曲强度(MPa); F 为破坏载荷(N); L 为跨距(mm); b 为试样宽度(mm); h 为试样厚度(mm)。

3. 结果与讨论

3.1. 吸湿行为的研究结果

经过不同时间的吸湿处理后, 使用电子天平称量其吸收水分后的重量, 再利用式(3)计算出复合材料的吸湿率:

$$M(t) = \frac{w_t - w_0}{w_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: w_t 为试样吸水 t 小时后质量; w_0 为试样干重。

经过式(3)计算得到表 1, 并绘制出吸湿率 M 与吸水时间 t 以及与 $t^{1/2}$ 的关系图, 见图 3。

Table 1. Hygroscopicity of composites

表 1. 复合材料吸湿率

湿热处理时间(t/h)	湿热处理时间($t^{1/2}/h^{1/2}$)	双面包覆碳纳米纸/复合材料吸湿率(%)	面层不含碳纳米纸复合材料吸湿率(%)
0	0	0	0
5.5	2.35	0.2901	0.2911
29.5	5.43	0.9598	1.1760
53.5	7.314	1.2072	1.3442
77.5	8.803	1.3760	1.5506
101.5	10.075	1.5230	1.6024
125.5	11.203	1.6056	1.6621
149.5	12.227	1.6286	1.6818
173.5	13.72	1.6800	1.7050
197.5	14.053	1.6820	—
221.5	14.883	1.7000	—

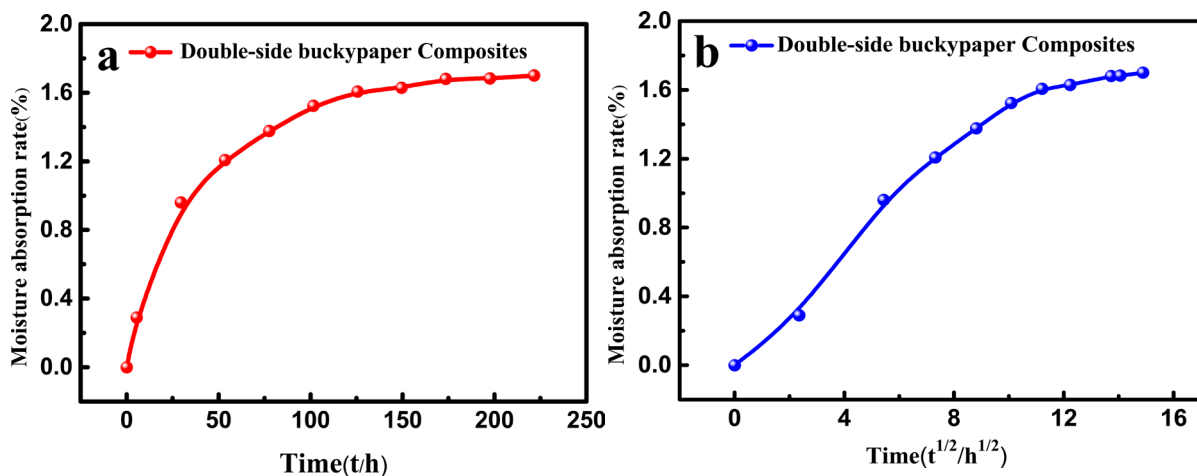


Figure 3. (a) Hygroscopicity curve for double-side buckypaper composites; (b) Curve for $t^{1/2}$

图 3. (a) 双面包覆碳纳米纸复合材料吸湿曲线; (b) 吸湿率 M 与 $t^{1/2}$ 的关系曲线

通过图 3(a)可以看出, 在实验开始初期, 双面包覆碳纳米纸复合材料经过 90℃ 的湿热处理后, 在 29.5 h 之内材料的吸湿率随着处理时间的增长呈直线上升趋势, 而在随后的 192 h 之内其吸湿速度则是随着时间的增加一直在降低, 吸湿率增长逐渐减慢, 直到最后逐渐趋于平缓近似不变。最后在湿热处理时间达到 221.5 h 时吸湿曲线已经近似趋于平稳, 也就是说复合材料在 221.5 h 时吸湿达到饱和状态。可以得出结论: 双面包覆碳纳米纸复合材料饱和吸湿率为 1.70%。由图 3(b)可以看出, 可将整个吸湿过程分为两个部分, 其中第一部分: 在湿热处理 29.5 h 之前复合材料的吸湿率 M 与吸湿时间之间近似呈线性变化, 这样就可以认为复合材料吸湿速率符合 Fick 第二定律; 而在第二部分: 在湿热处理 29.5 h 之后复合材料样条的吸湿率则不再是呈线性变化, 偏离了原本的线性轨迹, 逐渐减缓甚至是趋于平稳, 不再满足 Fick 第二定律。造成这种现象的原因是: 在第一阶段时由于复合材料内部的各种裂缝、孔隙等缺陷以及环氧

树脂的吸水性能会导致水分的大量快速吸收, 而在第二阶段复合材料的吸水过程就变得更加复杂, 其中还包含了材料内部的一些化学反应, 导致水分子的扩散不再是呈线性增加。

同样的, 经过式(3)计算并绘制出不含碳纳米纸的复合材料的吸湿率 M 与吸水时间 t 以及与 $t^{1/2}$ 的关系图, 见图 4。

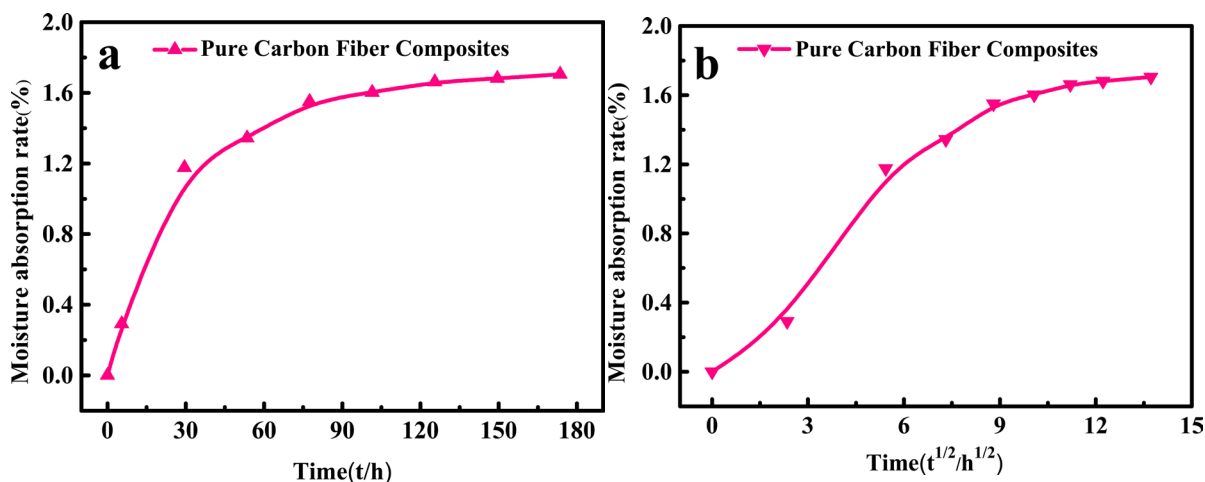


Figure 4. (a) Hygroscopicity curve for double-side buckypaper composites; (b) Curve for $t^{1/2}$

图 4. (a) 面层不含碳纳米纸的复合材料吸湿曲线; (b) 吸湿率 M 与 $t^{1/2}$ 的关系曲线

从图 4(a)中可以看出在实验开始的前 29.5 h, 复合材料的吸湿率在经过湿热处理后增殖迅速, 吸湿率随着处理时间的增长线性增长, 此后复合材料吸湿增长速度呈明显的下降趋势, 在 221.5 h 时近似不变, 达到饱和吸湿率 1.705%。同时通过图 4(b)分析也可以得知, 面层不含碳纳米纸的复合材料在 90℃ 的湿热环境下其吸湿率随时间的变化同样也是分为两个阶段, 第一阶段: 复合材料样条经过湿热处理 29.5 h 之前吸湿率增长快速, 复合材料吸湿速率符合 Fick 第二定律; 而在湿热处理的第二阶段: 复合材料吸湿率随时间增长逐渐减缓并趋于平稳, 此时复合材料吸湿率不再满足 Fick 第二定律。

图 5 为两种样条吸湿率 M 与吸湿时间 t 和 $t^{1/2}$ 的曲线对比图。从图中可以看出, 在湿热处理的前 5.5 h 两种材料的吸湿率增长速度相近, 而在之后的试验中随着时间的增加面层不含碳纳米纸的复合材料吸湿速度明显要大于双面包覆碳纳米纸复合材料, 并且要早于双面的材料达到吸湿饱和。由符合 Fick 定律的第一阶段的曲线可得到: 双面包覆碳纳米纸复合材料的吸湿速率为 0.15 s^{-1} , 而不含碳纳米纸的复合材料吸湿速率为 0.17 s^{-1} ; 双面包覆碳纳米纸复合材料的水分子扩散系数为 $0.312 \text{ mm}^2/\text{s}$, 而面层不含碳纳米纸的复合材料水分子扩散系数为 $0.381 \text{ mm}^2/\text{s}$; 双面包覆碳纳米纸复合材料饱和吸湿率为 1.70%, 面层不含碳纳米纸的复合材料的饱和吸湿率为 1.705%, 二者的饱和吸湿率近似相等。产生这种现象的原因是在复合材料表面的碳纳米纸对于吸湿速率产生了一定的影响, 导致双面包覆碳纳米纸复合材料的吸湿速率要小一些。

3.2. 力学性能研究结果

研究复合材料湿热性能的一个重要手段就是测试其力学性能, 因为随着湿热处理时间的增长, 水分子进入树脂基体, 分子间链发生断裂, 基体发生溶胀, 甚至在材料的内部还会发生化学反应, 环氧树脂与碳纤维, 碳纳米纸之间的界面性能都渐渐遭到破坏, 这些都会集中地体现在复合材料的力学性能上。分别对双面包覆碳纳米纸复合材料与面层不含碳纳米纸的复合材料的层间剪切强度和弯曲强度进行了测试与分析。

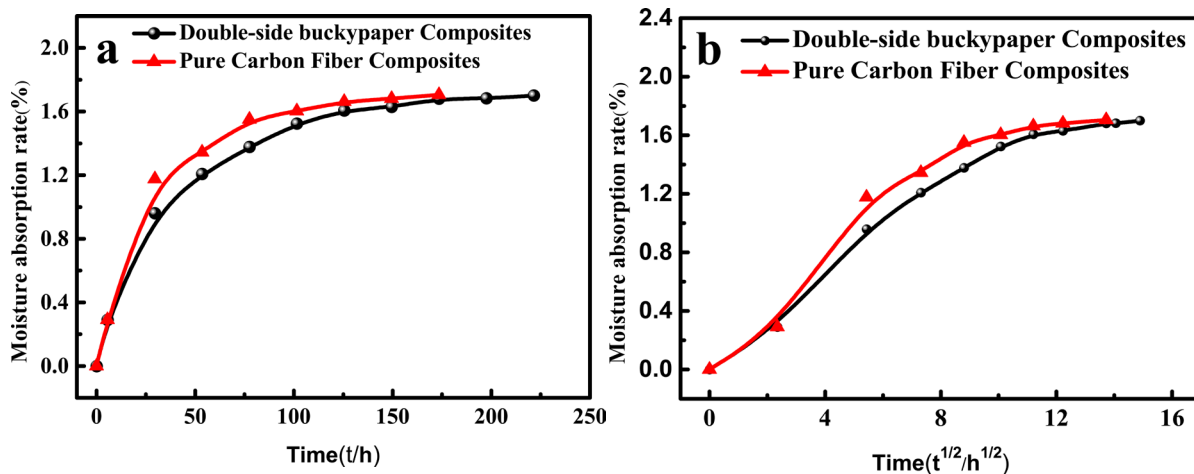


Figure 5. (a) Comparison curve of hygroscopicity M and time; (b) Curve for $t^{1/2}$
 图 5. (a) 复合材料吸湿率 M 与吸湿时间 t 对比曲线; (b) 吸湿率 M 与 $t^{1/2}$ 的关系曲线

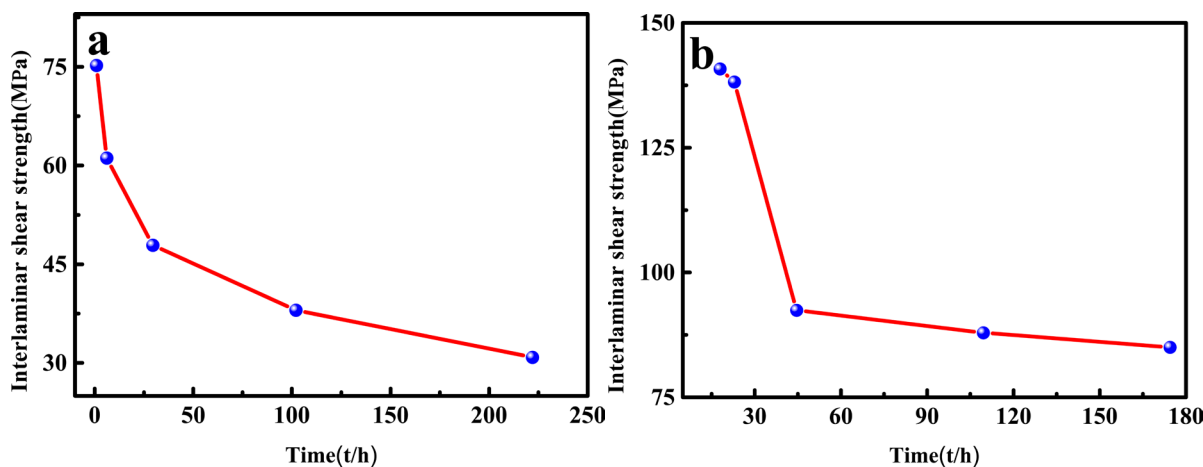


Figure 6. (a) Interlaminar shear strength of double-side carbon nanotube buckypaper composites; (b) Interlaminar shear strength of composites without carbon nanotube buckypaper
 图 6. (a) 双面包覆碳纳米纸复合材料层间剪切强度; (b) 面层不含碳纳米纸的复合材料层间剪切强度

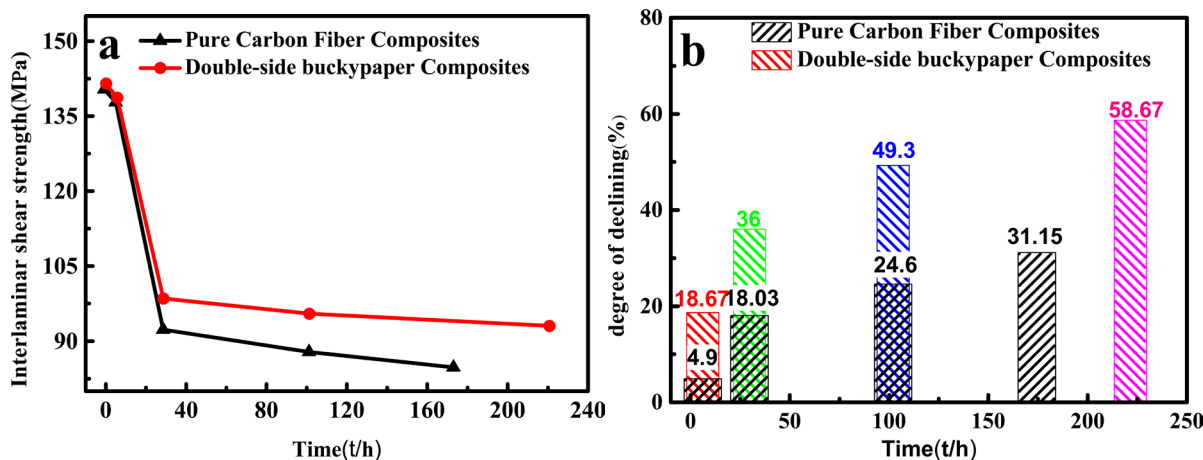


Figure 7. (a) Comparison curves of interlaminar shear strength of two composites; (b) Contrast curves of interlaminar shear strength decline between two composites
 图 7. (a) 两种复合材料层间剪切强度对比曲线; (b) 两种复合材料层间剪切强度下降幅度对比曲线

从图 6 中可以看出, 两种复合材料的剪切强度都是随着湿热处理时间的增长而降低。双面包覆碳纳米纸复合材料在实验初期未进行湿热处理时的剪切强度为 75 MPa, 而在吸湿时间 221.5 h, 达到饱和吸湿率时剪切强度降到了 31 MPa, 剪切强度下降幅度为 58.67%; 而面层不含碳纳米纸的复合材料在实验初期未进行湿热处理时的剪切强度为 61 MPa, 而在吸湿时间 173.5 h, 达到饱和吸湿率时剪切强度就降到了 42 MPa, 剪切强度下降幅度为 31.15%。而从图 7 中可以看出, 双面包覆碳纳米纸复合材料的层间剪切强度下降要快于面层不含碳纳米纸的复合材料, 并且下降幅度也要更大。造成这种现象的原因就是: 水分子进入到材料的内部, 破坏基体使其老化、发生化学反应并降解, 造成复合材料的剪切强度大幅下降。

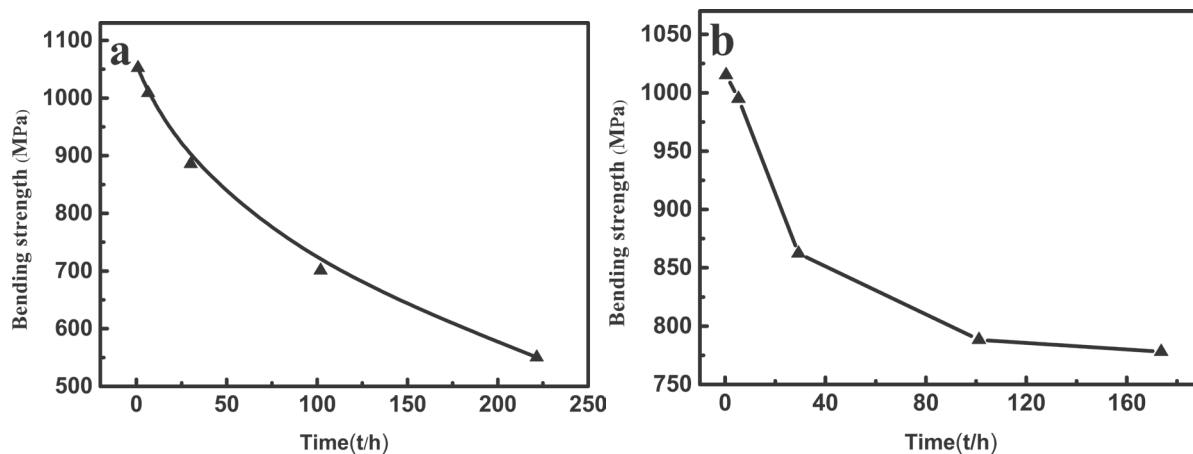


Figure 8. (a) Bending strength of double-side carbon nanotube buckypaper composites; (b) Bending strength of composites without carbon nanotube buckypaper

图 8. (a) 双面包覆碳纳米纸复合材料弯曲强度; (b) 面层不含碳纳米纸的复合材料弯曲强度

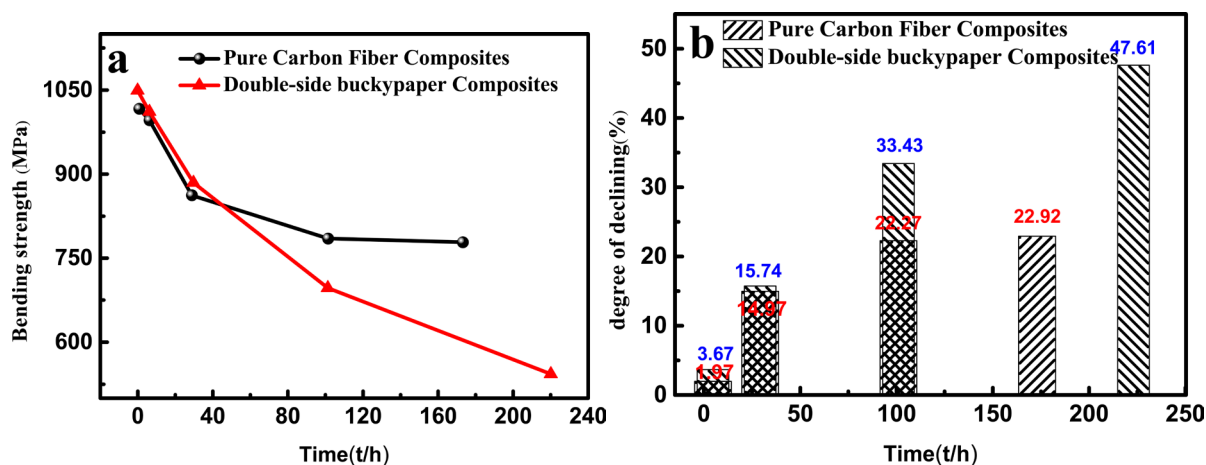


Figure 9. (a) Comparison curves of bending strength of two composites; (b) Contrast curves of bending strength decline between two composites

图 9. (a) 两种复合材料弯曲强度对比曲线; (b) 两种复合材料弯曲强度下降幅度对比曲线

由图 8 可以看出, 两种复合材料的弯曲强度都是在随着湿热处理时间的增加而降低, 双面包覆碳纳米纸/复合材料未经湿热处理的样条弯曲强度为 1060 MPa, 而在湿热处理 221.5 h 后, 样条达到吸湿饱和后的弯曲强度为 548 MPa, 可以得出弯曲强度下降幅度为 47.6%; 面层不含碳纳米纸的复合材料未经湿热处理的弯曲强度为 1014 MPa, 在吸湿 173.5 h 达到吸湿饱和后材料的弯曲强度下降为 781.6 MPa, 材料弯曲强度下降幅度为 22.9%。而从图 9 中可以看出, 双面包覆碳纳米纸/复合材料的弯曲强度下降速度要

快于面层不含碳纳米纸的复合材料, 并且下降幅度也要更大一些, 造成这种现象的原因是: 水分子进入树脂基体, 破坏碳纤维与基体之间的界面粘接性, 材料内部发生化学反应, 分子间链段断裂, 造成复合材料的弯曲性能下降。

4. 结论

本文对于双面包覆碳纳米纸复合材料湿热性能进行了研究, 并以面层不含碳纳米纸的复合材料湿热性能作为对比。通过对材料力学性能的测试来表达复合材料的湿热性能变化规律。以复合材料吸湿率、层间剪切强度、弯曲强度为主要研究方向, 得到以下结论:

1) 双面包覆碳纳米纸复合材料吸湿率随着湿热处理时间的增加而上升, 分为两个阶段, 第一阶段为线性阶段, 吸湿率呈线性上升, 第二阶段为化学反应阶段, 吸湿率上升速度减慢, 并逐渐趋于平缓。双面包覆碳纳米纸复合材料的饱和吸湿率为 1.7%, 总湿热处理时间为 221.5 h, 水分子扩散系数为 $0.312 \text{ mm}^2/\text{s}$, 吸湿速率为 0.15 s^{-1} ; 面层不含碳纳米纸的复合材料的饱和吸湿率为 1.705%, 总湿热处理时间为 173.5 h, 水分子扩散系数为 $0.381 \text{ mm}^2/\text{s}$, 吸湿速率为 0.17 s^{-1} 。双面包覆碳纳米纸/复合材料吸湿速度要略小于面层不含碳纳米纸的复合材料。

2) 双面包覆碳纳米纸复合材料在实验初期未进行湿热处理时的剪切强度为 75 MPa, 达到饱和吸湿率时剪切强度就降到了 31 MPa, 下降幅度为 58.67%; 面层不含碳纳米纸的复合材料在实验初期未进行湿热处理时的剪切强度为 61 MPa, 达到饱和吸湿率时剪切强度降到了 42 MPa, 下降幅度为 31.15%。

3) 双面包覆碳纳米纸复合材料未经湿热处理的样条弯曲强度为 1046 MPa, 样条达到吸湿饱和后的弯曲强度为 548 MPa, 下降幅度为 47.6%; 面层不含碳纳米纸的复合材料未经湿热处理的弯曲强度为 1014 MPa, 达到吸湿饱和后材料的弯曲强度下降为 781.6 MPa, 下降幅度为 22.9%。

基金项目

国家自然科学基金, U1733123。

参考文献

- [1] Reed, H., Leckey, C.A.C., Dick, A., Harvey, G. and Dobson, J. (2018) A Model Based Bayesian Solution for Characterization of Complex Damage Scenarios in Aerospace Composite Structures. *Ultrasonics*, **82**, 272-288. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2017.09.002>
- [2] Talebitooti, R. and Zarastvand, M.R. (2018) Vibroacoustic Behavior of Orthotropic Aerospace Composite Structure in the Subsonic Flow Considering the Third Order Shear Deformation Theory. *Aerospace Science and Technology*, **75**, 227-236. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2018.01.011>
- [3] Patole, S.P., Arif, M.F. and Kumar, S. (2018) Polyvinyl Alcohol Incorporated Buckypaper Composites for Improved Multifunctional Performance. *Composites Science and Technology*, **168**, 429-436. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.10.010>
- [4] Qu, B., Zhuo, D.X., Wang, R., Wu, L.X. and Cheng, X.Y. (2018) Enhancement of Mechanical Properties of Buckypapers/Polyethylene Composites by Microwave Irradiation. *Composites Science and Technology*, **164**, 313-318. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2018.06.002>
- [5] Tarfaoui, M., El Moumen, A., Boehle, M., et al. (2019) Self-Heating and Deicing Epoxy/Glass Fiber based Carbon Nanotubes Buckypaper Composite. *Journal of Materials Science*, **54**, 1351. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2917-9>
- [6] Shan, M.J., Zhao, L.B., Hong, H.M., Liu, F.R. and Zhang, J.Y. (2018) A Progressive Fatigue Damage Model for Composite Structures in Hygrothermal Environments. *International Journal of Fatigue*, **111**, 299-307. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.02.019>
- [7] Sharma, N., Mahapatra, T.R. and Panda, S.K. (2018) Numerical Analysis of Acoustic Radiation Responses of Shear Deformable Laminated Composite Shell Panel in Hygrothermal Environment. *Journal of Sound and Vibration*, **431**, 346-366. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.06.007>
- [8] Cheng, X.Q., Zhang, Q., Zhang, J., Guo, X. and Niu, Z.R. (2019) Parameters Prediction of Cohesive Zone Model for

-
- Simulating Composite/Adhesive Delamination in Hygrothermal Environments. *Composites Part B: Engineering*, **166**, 710-721. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.03.002>
- [9] Rahnema, S., Rafiee, R. and Maleki, M. (2019) The Influence of Hygrothermal Environments on the Stress Concentration in Unidirectional Composite Lamina. *Mechanics of Materials*, **129**, 332-340. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2018.12.010>
- [10] Mahato, K.K., Dutta, K. and Ray, B.C. (2018) Static and Dynamic Behavior of Fibrous Polymeric Composite Materials at Different Environmental Conditions. *Journal of Polymers and the Environment*, **26**, 1024. <https://doi.org/10.1007/s10924-017-1001-x>
- [11] 檀琳琳. 防水涂层对碳纤维增强树脂基复合材料湿热老化影响研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2012.
- [12] Li, Y.M., Miranda, J. and Sue, H.-J. (2001) Hygrothermal Diffusion Behavior in Bismaleimide Resin. *Polymer*, **42**, 7791-7799. [https://doi.org/10.1016/s0032-3861\(01\)00241-5](https://doi.org/10.1016/s0032-3861(01)00241-5)

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-086X, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>
期刊邮箱: nat@hanspub.org