

Effects of Hygrothermal Behavior on Properties of Carbon Nanotube Buckypaper Composites

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. 7th, 2019; accepted: Apr. 19th, 2019; published: Apr. 26th, 2019

Abstract

Due to the universality of the humid-thermal service environment and the seriousness of the effect of moisture absorption on the mechanical properties of resin matrix composites, composites have attracted wide attention. In this paper, the hydrothermal aging behavior of carbon nanotube buckypaper composites was studied by accelerated aging method. The results show that the change of hygroscopicity of composites conforms to Fick's second law at the initial stage of hydrothermal treatment. With the increase of hygroscopicity, the interlaminar shear strength and flexural strength of composites decrease. In dry state, the interlaminar shear strength and flexural strength of unilateral carbon nanotube buckypaper composites are significantly higher than those of composites without carbon nanotube buckypaper, and the difference decreases with the increase of moisture absorption.

Keywords

Hygrothermal, Composite Materials, Mechanical Properties, Carbon Nanotubes

湿热行为对碳纳米纸复合材料的性能影响

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7日; 录用日期: 2019年4月19日; 发布日期: 2019年4月26日

摘要

复合材料由于湿热服役环境存在的普遍性以及吸湿对树脂基复合材料力学性能影响的严重性, 一直受到广泛的关注。本文采用加速老化法, 对碳纳米纸复合材料进行了湿热老化行为的研究。研究表明: 复合材料吸湿率的变化在湿热处理初期符合Fick第二定律。随着吸湿率的增加, 复合材料层间剪切强度和抗弯强度均有降低的趋势。干态时单面碳纳米纸复合材料层间剪切强度和抗弯强度均明显大于无碳纳米纸复合材料, 随着吸湿率增大, 差值逐渐减小。

关键词

湿热, 复合材料, 力学性能, 碳纳米管

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

复合材料由于湿热服役环境存在的普遍性以及吸湿对树脂基复合材料力学性能影响的严重性, 一直受到广泛的关注[1]。为保证复合材料结构的完整性和使用安全性, 世界各国对复合材料湿热环境下的力学、物理行为都给予了高度重视, 并将复合材料湿热环境下的力学性能作为衡量其耐久性和损伤容限的参量予以考虑和研究, 而要研究复合材料在湿热环境中的性能变化, 首先必须了解其在湿热环境条件下的吸湿特点[2] [3] [4]。复合材料的吸湿是一个缓慢的湿度弥散过程, 实际上是复合材料经受吸湿、温度和应力联合作用而产生的退化过程, 其退化机制作用于纤维、基体及两者界面并引起物理 - 化学变化。同时, 由于复合材料自身具有组分多元性、结构多重性、失效模式多样性, 这些特点使得复合材料性能演化分析十分复杂。对于树脂基复合材料, 湿热环境条件对复合材料力学性能的影响非常明显, 可导致复合材料的强度和刚度下降。复合材料吸湿率的大小受环境温度、相对湿度、材料体系、层压板厚度和基体含湿量等因素的影响。对于碳纳米纸复合材料, 由于复合材料组元的复杂多样性, 其湿热行为也将更加复杂, 因此需要对此进行系统详细的研究, 探索湿热环境对其性能的影响规律[5] [6]。

N. G. Berry 等人研究了吸湿性对端羟基聚丁二烯改性环氧树脂基复合材料热机性能的影响, 通过DMA 分析研究了吸湿行为对复合材料玻璃化转变温度的影响, 复合材料的吸湿行为受到端羟基聚丁二烯所导致的微观结构的影响[7]。Nakai 等人以环氧树脂为基体, 玻璃纤维织物为增强材料, 研究了复合材料在 80℃ 水中浸泡时间对其吸收率及力学性能的影响, 实验得出所有复合材料的吸湿率随着浸泡时间的增加而增加, 总体趋势是前 8 小时快速吸水, 随后趋势逐渐变缓, 同时吸收率伴随着温度的升高而逐渐增大。在较高的温度下, 水分子运动的速度加快, 扩散速度加快, 从而加速了扩散[8]。Gupta 等人的研究对象是玻璃纤维增强环氧树脂复合材料, 在不同的织物形式、条件、边缘、载荷条件下进行测试, 考虑了材料的吸水膨胀, 表面粗糙度等对吸湿率的影响。在湿热的环境下, 水分子的扩散引起内部应力变化, 导致材料内部相互作用发生改变。从本质上说是环境的变化, 引起纤维基体之间的不匹配[9]。Sunil, K. 和 Karad 等从峰值温度参数、热效应、水分含量的增加、复合材料的吸湿性能、树脂的结构(不同的环氧基团)等的影响来研究氰酸酯改性环氧树脂复合材料的吸湿性能[10]。王占彬等对 T300/双马树脂和

T300/环氧复合材料分别进行了 80℃ 热老化、80℃ 水浸、80℃, RH85% 和 80℃, RH85%, $UV = 0.35 \text{ W/m}^2$ 四种加速条件下老化 1000 h 后的力学性能试验。虽然聚合物复合材料加速老化有了很大的进步, 但若要在实际工程应用中发挥重要作用, 还需要进一步的研究[11]。

本文重点研究了两种碳纤维增强复合材料(无碳纳米纸复合材料与单面碳纳米纸复合材料)的吸湿行为, 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: 用天平称取 500 mg 碳纳米管, 并加入 5 ml 表面活性剂曲拉通; 然后将二者混合, 并放入研钵中进行研磨, 研磨时间在 1 h 左右, 碳纳米管和曲拉通充分混合; 用 500 ml 蒸馏水清洗研钵中的碳纳米管和曲拉通混合物, 并在自动搅拌器上进行搅拌 2.5 h; 将搅拌后的混合液放入超声波粉碎器中进行超声处理 1 h; 然后将超声处理后的混合液进行放入离心机中离心 10 min; 最后提取离心后的上清液进行抽滤, 将离心后剩余的混合液继续搅拌、超声、离心并提取上清液后抽滤。

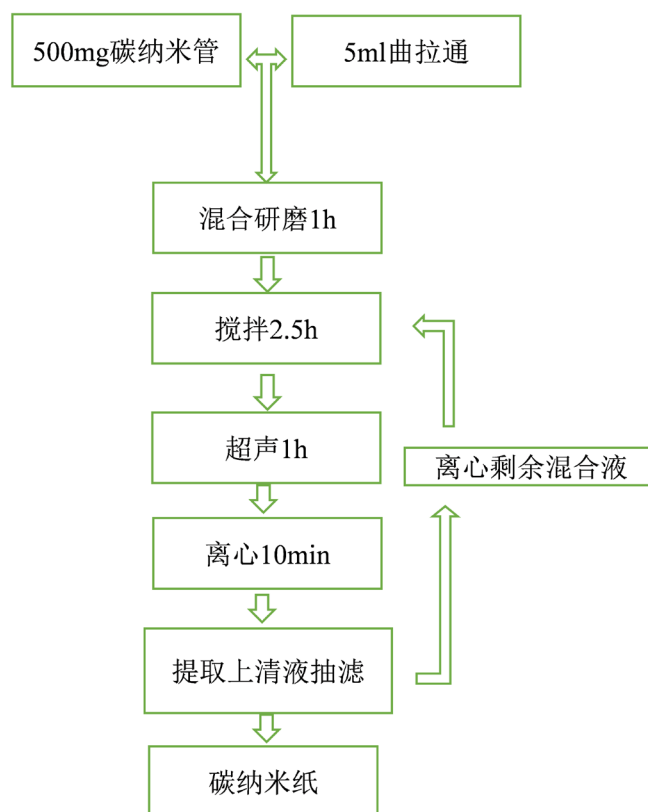


Figure 1. Flow chart for preparation of carbon nanotube buckypaper

图 1. 碳纳米纸制备流程图

2.2. 碳纳米纸复合材料层压板的制备

用平板硫化机制备复合材料层压板: 采用模压工艺制备复合材料层压板, 复合材料层压板的真空袋制备工艺如图 2 所示。

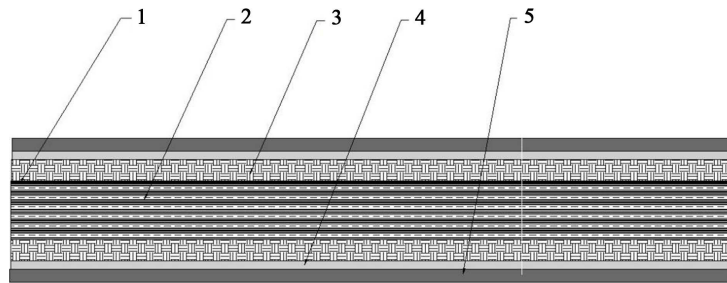


Figure 2. Manufacturing process chart of composite laminates: (1) Carbon nanotube buckypaper; (2) Carbon fiber epoxy; (3) Rubber absorbing material; (4) Demoulding cloth; (5) Press plate of flat vulcanize
图 2. 复合材料层压板制备工艺图: (1) 碳纳米纸; (2) 碳纤维环氧树脂; (3) 吸胶材料; (4) 脱模布; (5) 平板硫化机压板

对于无碳纳米纸复合材料, 按照纤维方向平铺 24 层碳纤维环氧树脂复合材料, 然后依据图 2 所示, 铺好吸胶材料及脱模布。对于单面碳纳米纸复合材料, 同样按照纤维方向平铺 24 层碳纤维环氧树脂复合材料, 并在最后一层表面铺置一层碳纳米纸, 然后依据图 2 所示, 铺好吸胶材料及脱模布, 准备进行模压。

将平板硫化机模具由室温升至 $120^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$; 将制备好的待成型碳纤维环氧树脂复合材料放入平板硫化机压模, 并合并上下模具, 然后加压至 10 MPa, 保温 2.5 h, 最后保压降温到室温。然后取出压制好的复合材料, 去除吸胶材料及脱模布。

2.3. 湿热实验

为测试不同吸湿率下两种复合材料的层间剪切性能及弯曲性能, 需要进行多组试样湿热试验, 并对不同组的试样进行相应的测试, 具体试样分组如表 1 所示: 除工程干态外, 另测试四个不同吸湿率下的力学性能。其中, 层间剪切强度试样尺寸为 $30\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 3\text{ mm}$, 每组测试五个试样, 并取平均值。弯曲测试试样尺寸为 $40\text{ mm} \times 153\text{ mm}$, 每组测试五个试样, 并取平均值。DMA 试样尺寸为 $30\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 3\text{ mm}$, 需 1 个试样。如表 1 所示: 每种复合材料共需 55 个试样, 其中尺寸为 $30\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的 30 个, 尺寸为 $40\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的 25 个。

Table 1. Grouping of samples for hygrothermal test
表 1. 湿热试验试样分组

试样尺寸	试样编号	测试类型	试样尺寸	试样编号	测试类型
$30 \times 6 \times 3$ (单位: mm)	1~6	层间剪切强度/DMA	$40 \times 15 \times 3$ (单位: mm)	1~5	抗弯强度
	7~12			6~10	
	13~18			11~15	
	19~24			16~20	
	25~30			21~25	
总计	30			25	

湿热实验开始后, 每天称量样品质量, 并计算每天样品吸湿率。称重时将试样取出, 用湿布包裹, 冷却至室温, 然后用干布擦干样品, 然后立即称重, 称重后记录数据并立即放回, 并记录时间。连续三次的水分增量称重小于 0.05% 的日常质量增加(或 0.02%), 这被认为是样品达到平衡(或饱和)的水分状态, 停止计时, 计算时间扣除测量时间。

2.4. 剪切与弯曲性能测试

在万能拉伸试验机上进行层间剪切强度和抗弯强度测试；其中层间剪切强度试样尺寸为 30 mm × 6 mm × 3 mm，跨距为 15 mm，加载速率为 2 mm/min；弯曲试样尺寸为 40 mm × 15 mm × 3 mm，跨距为 32 mm，加载速率为 1 mm/min。不同吸湿率下每组测试五个试样取平均值。

并利用公式(1)计算试样层间剪切强度：

$$ILSS = \frac{3P_b}{4bh} \quad (1)$$

其中： $ILSS$ 为层间剪切强度/MPa， P_b 为试验力/N， b 为试样宽度/mm， h 为试样厚度/mm。

用公式(2)计算试样抗弯强度：

$$\sigma_b = \frac{3P_b L}{2bh^2} \quad (2)$$

其中： σ_b 为抗弯强度/MPa， P_b 为试验力/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. 湿热行为的研究结果

图 3 分别为两种不同状态复合材料在湿热处理过程中，吸湿率与湿热处理时间以及时间平方根的关系曲线；从图 3 中可以看出，无碳纳米纸复合材料在 100℃ 的去离子水中湿热处理时，在 100 小时内，随湿热处理时间的增加复合材料的吸湿率逐渐上升，当湿热处理时间超过 100 小时以后，复合材料的吸湿率曲线上开始变得缓慢，可见，复合材料在湿热处理初期的吸湿率明显高于后期，随着处理时间的延长，吸湿率的变化趋势趋于平缓。复合材料试样在 173.5 小时到达饱和吸湿，饱和吸湿率为 1.82%。从图 3 中可以看出，无碳纳米纸复合材料在湿热处理初期(150 h 以内)，吸湿率与湿热处理时间 $t^{1/2}$ 近似成线性关系，从而表明无碳纳米纸复合材料在湿热处理初期的吸湿过程符合 Fick 第二定律，而当湿热处理时间超过 100 h 以后，吸湿曲线出现偏离线性的情况，说明在此以后，复合材料中水分子的扩散行为已偏离了 Fick 行为，Fick 定律不再适用于此阶段对复合材料的吸湿规律。

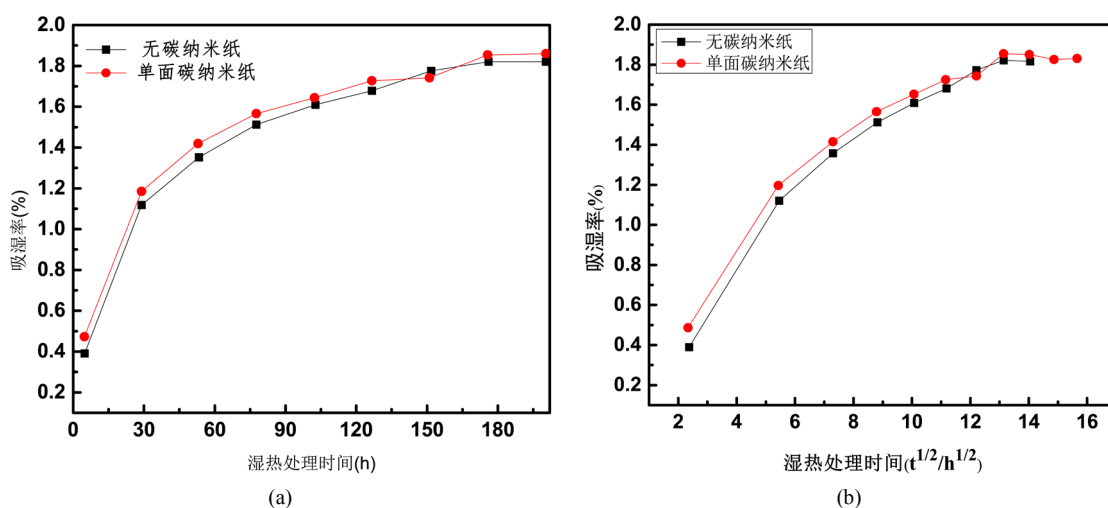


Figure 3. Curve of hygroscopicity varying with hydrothermal time: (a) Relationship between moisture absorption rate and t ; (b) Relationship between moisture absorption rate and $t^{1/2}$

图 3. 吸湿率随湿热时间变化曲线：(a) 吸湿率与 t 的关系；(b) 吸湿率与 $t^{1/2}$ 的关系

另外, 还可以看出, 单面碳纳米纸复合材料吸湿行为与无碳纳米纸复合材料无明显差别, 100 小时内, 复合材料的吸湿率随湿热处理时间增加而逐渐上升, 超过 150 小时以后, 吸湿率上升过程趋于缓慢。复合材料在湿热处理 173.5 小时后, 达到饱和吸湿状态, 其饱和吸湿率为 1.84%。从图 3(b)中可以看出, 单面碳纳米纸复合材料在湿热处理初期(100 h 以内), 吸湿率与湿热处理时间 $t/2$ 也近似成线性关系, 从而表明单面碳纳米纸复合材料在湿热处理初期的吸湿过程符合 Fick 第二定律。在湿热处理时间超过 100 h 以后, 由于也出现了偏离线性的情况, 说明在经过此时间以后, 水分子在单面碳纳米纸复合材料中的扩散行为偏离了 Fick 行为, Fick 定律也不再适用于此阶段单面碳纳米纸复合材料的吸湿规律。

对比图 3 两条曲线可明显发现: 在吸湿初始阶段(100 h 以内)单面碳纳米纸复合材料吸湿速率均高于无碳纳米纸复合材料, 随着湿热的进行, 100 h 之后, 无碳纳米纸复合材料吸湿速率开始大于单面碳纳米纸复合材料, 即吸湿时间超过 100 h 之后, 不同状态下的复合材料吸湿速率均有不同程度降低, 但单面碳纳米纸复合材料吸湿速率降幅高于无碳纳米纸复合材料, 且最终单面碳纳米纸复合材料吸湿率达到饱和和所用的时间略大于无碳纳米纸复合材料。

出现上述现象的原因与试验中所用的试样有关。吸湿试验所用试样尺寸为 $30\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 3\text{ mm}$, 试样从经过模压后的原始复合材料板上切下, 其中上、下两面较为密集, 而侧面由于存在裸露的碳纤维, 因此相对于上下面而言较为疏松, 所以在湿热初始阶段, 吸湿优先通过侧面进行, 随着湿热的进行, 当从试样侧面进入材料内部的水分达到饱和之后, 水分进入材料主要通过上、下面, 而覆有碳纳米纸的试样在碳纳米纸一侧能够在一定程度上减缓吸湿速率, 因此在湿热后期, 单面碳纳米纸复合材料吸湿速率开始小于无碳纳米纸复合材料。

3.2. 力学性能研究结果

纤维增强树脂基复合材料在湿热使用条件下, 由于水分子对复合材料的渗透, 随着时间的延长, 会对树脂基体以及纤维与基体之间的界面产生较大程度的影响, 导致复合材料基体产生增塑效应、分子链断裂, 复合材料的界面粘结力降低等一系列不利的变化, 上述微观变化在宏观上表现为复合材料的力学性能出现相应的变化, 本节进一步研究了湿热条件对复合材料宏观力学性能的影响规律。

以纤维作为复合材料的增强材料时, 进入复合材料的水分子会与纤维产生发生化学作用, 从而对复合材料的最终性能产生影响。复合材料中的纤维和进入的水分子接触后, 会和水分子发生化学反应, 从而导致纤维强度降低, 复合材料的强度也会随之下降; 同时, 基体与纤维之间界面的破坏程度与材料吸湿率密切相关。为研究两种复合材料在不同吸湿率下的力学性能, 分别选取两种复合材料不同时长湿热处理的试样进行层间剪切强度和弯曲性能测试, 并根据前述的公式计算不同复合材料在不同吸湿率下的层间剪切强度和抗弯强度。

3.2.1. 层间剪切强度

分别选取两种复合材料不同时长湿热处理的试样进行层间剪切强度测试, 试样编号及湿热处理时间、吸湿率如表 2 所示。

图 4 对应表 2 层间剪切强度随吸湿率的变化规律。如图所示, 随着吸湿率的增大, 两种复合材料层间剪切强度均呈现降低的趋势。其中工程干态下无碳纳米纸复合材料的层间剪切强度为 59.5 MPa, 单面碳纳米纸复合材料的层间剪切强度为 71.6 MPa; 湿热处理 5.5 h 时, 无碳纳米纸复合材料的层间剪切强度为 51.3 MPa, 相对于工程干态降低了 8.2 MPa, 降幅为 13.8%; 单面碳纳米纸复合材料的层间剪切强度为 62.7 MPa, 相对于工程干态降低了 8.9 MPa, 降幅为 12.4%。随着湿热的进行, 两种复合材料层间剪切强度均不断降低, 但降幅逐渐减小, 其中湿热时间为 101.5 h 和 173.5 h 两种状态下, 复合材料层间剪切强度无明显变化, 无碳纳米纸复合材料降幅分别为 22.3%和 25.0%, 碳纳米纸复合材料降幅分别为 44.3%和

45.4%。说明湿热时间超过 100 h 后, 材料吸水率逐渐达到饱和, 水分对复合材料力学性能的影响到达最大。

Table 2. Interlaminar shear strength of composites at different moisture absorption rates

表 2. 不同吸湿率下复合材料层间剪切强度

试样编号		湿热时间/h	吸湿率/%	层间剪切强度/MPa
1#		0	0	59.5
2#		5.5	0.40	51.3
3#	无碳纳米纸	28	1.12	50.2
4#		101.5	1.61	46.2
5#		173.5	1.82	41.9
1#		0	0	71.6
2#		5.5	0.47	62.7
3#	单面碳纳米纸	28	1.18	49.9
4#		101.5	1.64	39.9
5#		173.5	1.84	39.1

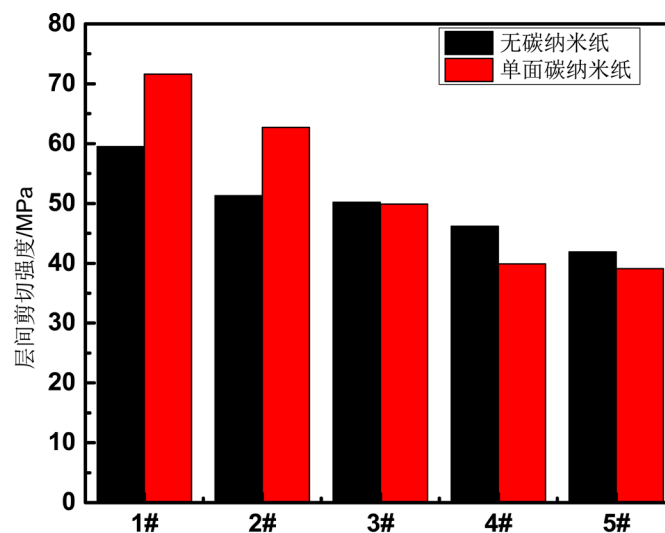


Figure 4. Effect of hygroscopicity on interlaminar shear strength of composites

图 4. 吸湿率对复合材料层间剪切强度的影响

3.2.2. 抗弯强度

分别选取两种复合材料不同时长湿热处理的试样进行抗弯强度测试, 试样编号及湿热处理时间、吸湿率如表 3 所示。

图 5 对应表 3 复合材料抗弯强度随吸湿率的变化规律。如图所示, 随着吸湿率的增大, 两种复合材料抗弯强度均呈现降低的趋势。其中工程干态下无碳纳米纸复合材料的抗弯强度为 1020 MPa, 单面碳纳米纸复合材料的抗弯强度为 1082 MPa; 湿热处理 5.5 h 时, 无碳纳米纸复合材料的抗弯强度为 790 MPa, 相对于工程干态降低了 230 MPa, 降幅为 22.5%; 单面碳纳米纸复合材料的弯曲强度为 1074 MPa, 相对

于工程干态降低了 8.0 MPa, 降幅为 0.74%, 可以看出, 在湿热初始阶段, 单面碳纳米纸复合材料弯曲强度降幅显著低于无碳纳米纸复合材料。随着湿热的进行, 两种复合材料弯曲强度呈现出不同的变化规律, 如图 5 所示: 随着湿热的进行, 无碳纳米纸复合材料抗弯强度趋于稳定, 在 800 MPa 附近波动, 湿热 173.5 h 达到饱和吸湿率后, 弯曲强度最低为 748 MPa, 相对于工程干态降低了 272 MPa, 降幅为 26.6%。而单面碳纳米纸复合材料弯曲强度随吸湿率的增大不断降低, 且在初始阶段降幅较低, 当湿热时间超过 100 h 后, 弯曲强度降幅较大。湿热 173.5 h 达到饱和吸湿率后抗弯强度最低为 767 MPa, 相对于工程干态降低了 315 MPa, 降幅为 29.1%。

Table 3. Bending strength of composites with different hygroscopicity
表 3. 不同吸湿率下复合材料抗弯强度

试样编号		湿热时间/h	吸湿率/%	抗弯强度/MPa
1#		0	0	1020
2#		5.5	0.40	790
3#	无碳纳米纸	28	1.12	876
4#		101.5	1.61	810
5#		173.5	1.82	748
1#		0	0	1082
2#		5.5	0.47	1074
3#	单面碳纳米纸	28	1.18	999
4#		101.5	1.64	814
5#		173.5	1.84	767

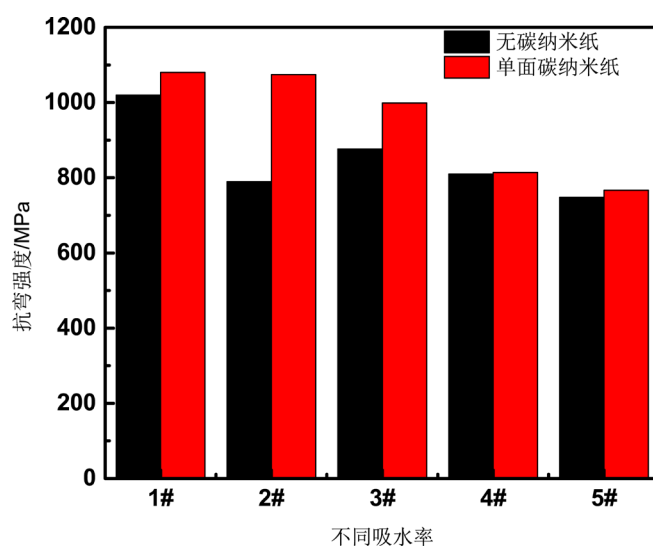


Figure 5. Effect of hygroscopicity on flexural strength of composites
图 5. 吸湿率对复合材料抗弯强度的影响

3.2.3. 单面碳纳米纸对复合材料性能的影响

为分析单面碳纳米纸对复合材料力学性能的影响, 分别提取两种复合材料在不同吸湿率下层间剪切强度和弯曲强度数据, 并绘制成曲线图。

图 6 为两种复合材料在不同吸湿率下力学性能变化规律: 随着湿热时间的增加, 两种复合材料的层间剪切强度和弯曲强度均呈现明显的下降趋势; 湿热初始阶段, 单面碳纳米纸复合材料的层间剪切强度明显大于无碳纳米纸复合材料, 随着湿热的进行, 湿热时间超过 30 h 时, 单面碳纳米纸复合材料的层间剪切强度开始低于无碳纳米纸复合材料; 说明在湿热初始阶段单面碳纳米纸复合材料的层间剪切强度降幅要大于无碳纳米纸复合材料。

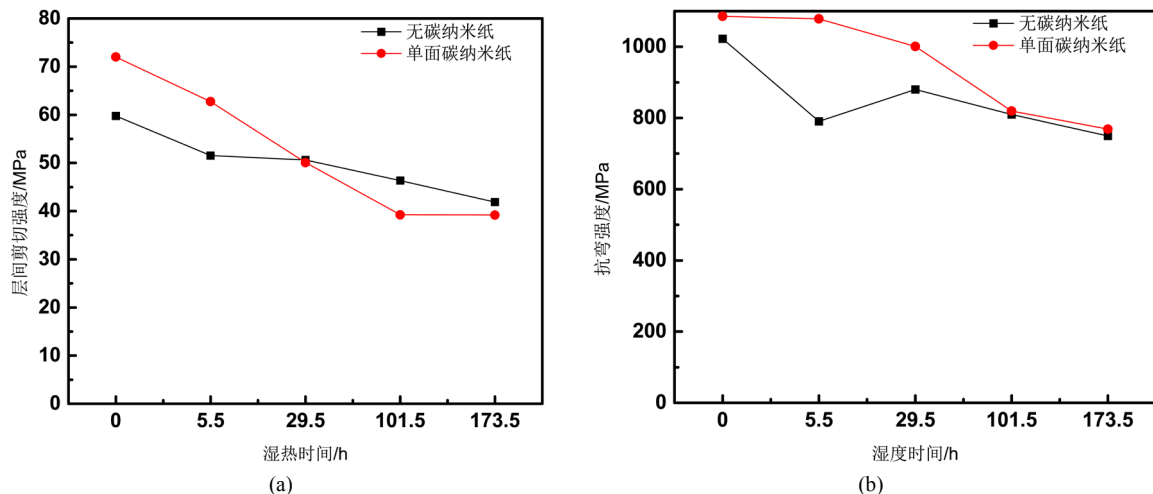


Figure 6. Comparison of mechanical properties of two kinds of composites under different moisture absorption rates

图 6. 两种复合材料在不同吸湿率下力学性能对比

单面碳纳米纸复合材料的抗弯强度始终大于无碳纳米纸复合材料; 湿热 5.5 h~100 h 之内抗弯强度降幅较大, 随后趋于平稳, 饱和吸湿率下抗弯强度为 767 MPa。

4. 结论

1) 本文采用加速老化法, 在高温下对无碳纳米纸复合材料和单面碳纳米纸复合材料的两种复合材料进行了湿热老化行为的研究。研究表明: 两种复合材料吸湿率的变化在湿热处理初期符合 Fick 第二定律。在 100 小时内, 两种复合材料的吸湿率随湿热处理时间的增加逐渐上升, 湿热处理时间超过 100 小时以后, 复合材料的吸湿率曲线上升趋势趋缓。无碳纳米纸复合材料试样在 173.5 小时吸湿率达到饱和, 饱和吸湿率为 1.82%, 吸湿速率为 $1.61 \times 10^{-1}/s$ 。单面碳纳米纸复合材料试样在 173.5 小时吸湿率达到饱和, 饱和吸湿率为 1.84%, 吸湿速率为 $1.64 \times 10^{-1}/s$ 。

2) 随着吸湿率增加, 两种复合材料层间剪切强度和抗弯强度均有降低的趋势。干态时单面碳纳米纸复合材料层间剪切强度和抗弯强度均明显大于无碳纳米纸复合材料, 随着吸湿率增大, 差值逐渐减小。其中干态时无碳纳米纸和单面碳纳米纸复合材料层间剪切强度分别为 59.5 MPa 和 71.5 MPa, 饱和吸湿率时分别为 41.9 MPa 和 39.1 MPa。干态时无碳纳米纸和单面碳纳米纸复合材料抗弯强度分别为 1020 MPa 和 1082 MPa, 饱和吸湿率时分别为 748 MPa 和 767 MPa。

基金项目

国家自然科学基金, U1733123。

参考文献

[1] 赵培晔, 崔超, 赵云峰, 赵伟栋, 潘玲英. 湿热老化对石英纤维/聚酰亚胺复合材料力学和介电性能影响研究[J].

- 中国胶粘剂, 2019(3): 19-22.
- [2] 谢伟, 窦鹏鹏, 薛展. 湿热环境下复合材料层合板本构模型研究及其应用[J]. 航空工程进展, 2019, 10(1): 62-72.
- [3] 管清宇, 李卫平. 湿热环境对 7781/CYCOM7701 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.
- [4] 冯振宇, 解江, 迟琪琳, 牟浩蕾, 巩天琛. 湿热环境对复合材料单向板拉伸性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2018, 34(11): 37-43.
- [5] 李洋洋. 空气热循环对 T700/HT280 复合材料力学性能的影响[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2018.
- [6] 张凤玲, 宋体杰, 马克明, 王静. 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.
- [7] Berry, N.G., Almeida, J.R.M., Barcia, F.L. and Soares, B.G. (2007) Effect of Water Absorption on the Thermal-Mechanical Properties of HTPB Modified DGEBA-Based Epoxy Systems. *Polymer Testing*, **26**, 262-267. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2006.10.009>
- [8] Kishida, T., Nakai, Y. and Ebihara, K. (2001) Hydroxypropyl-Distarch Phosphate from Tapioca Starch Reduces Zinc and Iron Absorption, But Not Calcium and Magnesium Absorption, in Rats. *The Journal of Nutrition*, **131**, 294-300. <https://doi.org/10.1093/jn/131.2.294>
- [9] Tagliavia, G., Porfiri, M. and Gupta, N. (2012) Influence of Moisture Absorption on Flexural Properties of Syntactic Foams. *Composites Part B: Engineering*, **43**, 115-123. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.06.016>
- [10] Karad, S.K. and Jones, F.R. (2005) Mechanisms of Moisture Absorption by Cyanate Ester Modified Epoxy Resin Matrices: The Clustering of Water Molecules. *Polymer*, **46**, 2732-2738. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.01.047>
- [11] 王占彬, 张天骄, 范金娟, 黄超. T300/648 复合材料的湿热老化行为[J]. 机械工程材料, 2015, 39(7): 44-47 + 57.

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: 2160-7613, 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: ms@hanspub.org