复合材料学报 第24卷 第3期 6月 2007年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 24 No. 3 June 2007

文章编号: 1000-3851(2007)03-0018-05

盐雾环境对玻璃纤维增强树脂基复合材料力学性能的影响

刘建华*, 赵 亮, 李松梅, 胡建平, 宫兆合
(北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 采用中性盐雾条件模拟海洋大气环境进行加速老化试验, 评价玻璃纤维增强环氧改性酚醛树脂基复合材料(GFRP)在海洋气候中的耐久性。通过该复合材料经盐雾老化后的质量变化和纵向拉伸强度、横向拉伸强度、压缩强度、层间剪切强度的变化, 结合湿热老化机理, 研究其老化规律。结果表明, 随着老化时间的增加, 复合材料的吸湿量增加, 力学强度下降, 压缩和层间剪切曲线表现出塑性特征。吸湿最初阶段对力学性能影响最大, 纵向拉伸强度、横向拉伸强度、压缩强度、层间剪切强度分别下降到56.1%、54.7%、54.0%、61.0%。其中拉伸强度变化趋势最稳定, 更适用于评价该复合材料的老化程度。

关键词: 玻璃纤维; 树脂; 复合材料; 盐雾; 力学性能
中图分类号: TB332 **文献标识码**: A

Effect of salt spray on mechanical properties of glass fiber reinforced polymer composites

LIU Jianhua*, ZHAO Liang, LI Songmei, HU Jianping, GONG Zhaohe
(School of Materials Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The accelerated salt-spray test was used to simulate a marine environment and determine the durability of glass fiber reinforced polymer (GFRP) composites in marine environments. Aging behavior after exposure in salt-spray environment was studied by changes in mass gain and mechanical properties including tension, compression and interlaminar shearing strength. The mass gain increases and the mechanical properties decrease with the aging time. Curves of the compression and interlaminar shearing test show more plastic than the original ones. Mechanical properties decrease quickly in the initial period of moisture absorption. The longitude tensile strength, transverse tensile strength, compression strength and interlaminar shearing strength decrease to 56.1%, 54.7%, 54.0%, 61.0%, respectively. The tensile strength is more steady and more suitable for evaluating the aging degree of the composites.

Keywords: glass fiber; resins; composites; salt spray; mechanical properties

复合材料由于比强度高、比拉伸模量高、热膨胀系数低、比传统金属材料更耐腐蚀等优点而广泛应用于飞机部件。但复合材料对潮湿敏感, 其力学性能在潮湿环境中的降低不可忽略。国内外关于玻璃纤维树脂基复合材料耐久性的研究表明, 吸湿后复合材料力学性能大多表现为: 湿时软韧, 干时硬脆; 湿时拉伸断裂伸长率增大, 但拉伸强度、弯曲强度、硬度等均会明显降低[1]。潮湿、盐、热、低温以及UV辐射等各种环境中, 使复合材料的弯曲和拉伸强度下降最多的是海洋环境[2-4]。海洋大气环境具有湿热的特点, 含有的NaCl等多种盐分具有腐蚀性, 可以用盐雾环境来模拟。为了评价复合材料在海洋环境中的耐久性, 本文中研究了盐雾作用下复合材料吸湿行为和力学性能随时间的变化, 增重率与力学性能之间的关系。

1 实 验

1.1 试验材料

力学试样所用层合板材料从国外进口, 基体为环氧改性酚醛树脂, 增强相为E-玻璃纤维平纹编织布。试样的代号及尺寸见表1, 每项力学性能测试取5个平行试样。

收稿日期: 2006-08-10; **收修改稿日期**: 2006-10-20
基金项目: 国防型号项目
通讯作者: 刘建华, 教授, 研究方向为材料物理与化学 E-mail: liujh@buaa.edu.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 试样的代号与尺寸

Table 1 Symbol and dimension of GFRP samples

Mechanical properties/ MPa	Symbol	Dimension/ mm
Longitude tensile strength	A	250 ×12.5 ×5
Transverse tensile strength	B	250 ×12.5 ×5
Compressive strength	C	30 ×10 ×5
Interlaminar shearing strength	D	50 ×10 ×5

1.2 盐雾试验

盐雾试验参照 GJB 150.11 - 86 进行。为了较好地模拟海洋大气环境，采用中性盐雾条件，试验溶液为质量分数 5 %的分析纯 NaCl 的水溶液，温度为 35 ℃。连续喷雾 60 天，分别取未经老化的试样和老化 8、16、40、60 天后的试样，测量其增重率并进行力学试验。

1.3 性能测试

用电子天平测量试样老化前后的质量变化，老化前记录各试样的初始质量 W_0，将盐雾老化 t 小时后的试样置于室温空气中，待表面水分蒸发后(约 10 min)记录重量 W_t，计算增重率：

$$R(t) = \frac{W_t - W_0}{W_0} \times 100\ \% \qquad (1)$$

所有力学试验均在万能材料试验机(MTS)上进行，拉伸试验参照 GB 1447 - 83 进行，压缩试验参照 GB 1448 - 83 进行，层间剪切试验参照 GB 3357 - 82 进行。

2 结果与讨论

2.1 增重率

图 1 给出了玻璃纤维增强复合材料试样经盐雾老化不同时间后，增重率的变化曲线。由图可见，从初始到 16 天期间所有试样质量均逐渐增加；在 16 天至 40 天时 A、B、D 试样的增重率变化趋于平缓，而 C 试样增重率仍在增加；40 天至 60 天时 A、B、D 试样又开始增重，而 C 试样的增重率却有所下降。总体来看，增重率从大到小依次是 C > D > B > A，即试样体积越小，其质量的变化越大。原因可以解释为，体积小的试样水分渗透到试样内部所需时间较短，所以在相同时间内，小体积试样的增重率变化更快一些。对于体积相同的 A、B 试样，其增重率的差别应来源于内部纵横纤维比例的不同，因为纤维织纹会影响复合材料的湿扩散行为[5]。

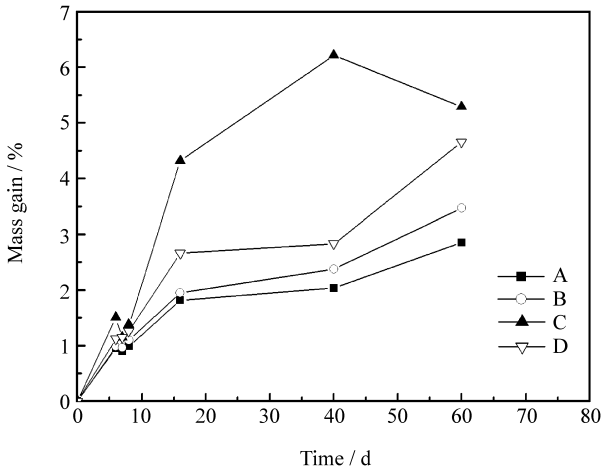

图 1 玻璃纤维增强树脂基复合材料试样增重率随盐雾老化时间的变化

Fig. 1 Mass gain of GFRP samples versus salt-spray aging time

引起增重的另一原因是盐雾在试样表面的沉积，但由于 NaCl 浓度较低，而且离子体积比水分子大，NaCl 很难像水分子一样扩散到试样内部[6]。所以盐的沉积只能作为次要因素，当水分的吸收接近饱和后，盐在表面累积的效果才显现出来。

2.2 力学性能

2.2.1 力学曲线形状与老化时间的关系

根据文献报道[1]，玻纤增强环氧改性酚醛树脂的拉伸应力-应变曲线属于硬而脆型，即弹性模量大、屈服强度中等(或无屈服点)、断裂强度中等、断裂伸长小。试验结果符合这一特征，拉伸曲线没有屈服点，最大应力发生在断裂点，断裂时的力为断裂拉伸强度。为了更清楚和更准确，横坐标用时间取代应变值，因为试样伸长率很小(约为 1 %)，而加载速度不变的情况下，夹具的位移与时间成正比；纵坐标用载荷值取代应力值，因为加载过程中试样截面积变化很小，可以忽略。

考虑到复合材料力学性能数据的分散性，仅以个别拉伸性能指标评价材料老化或仅以一个平均值来概括变化趋势，有时会得出片面的、错误的结论。图 2 为盐雾老化 8 天后，测得的纵向拉伸、横向拉伸、压缩和层间剪切性能曲线，同一力学性能的 5 个平行试样曲线重合得很好，特别是拉伸曲线，几乎完全重合，因而所得的平均值也有较高的可靠性。

图 3 为经盐雾老化 0、8、16、40、60 天后同一力学性能试验得到的载荷-时间曲线的比较。随着

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

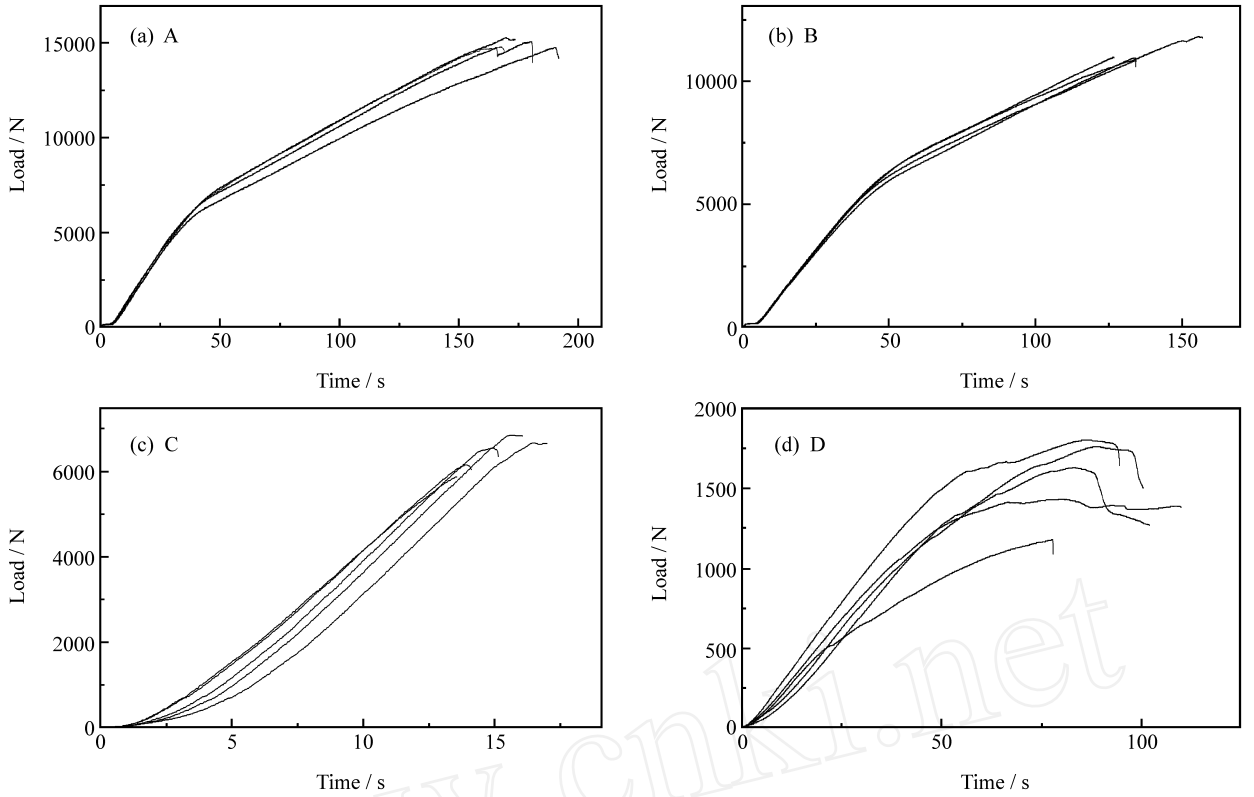

图 2　玻璃纤维增强树脂基复合材料盐雾老化 8 天后平行试样的力学性能曲线

Fig. 2　Mechanical test curves of GFRP parallel samples after salt spraying for 8 days

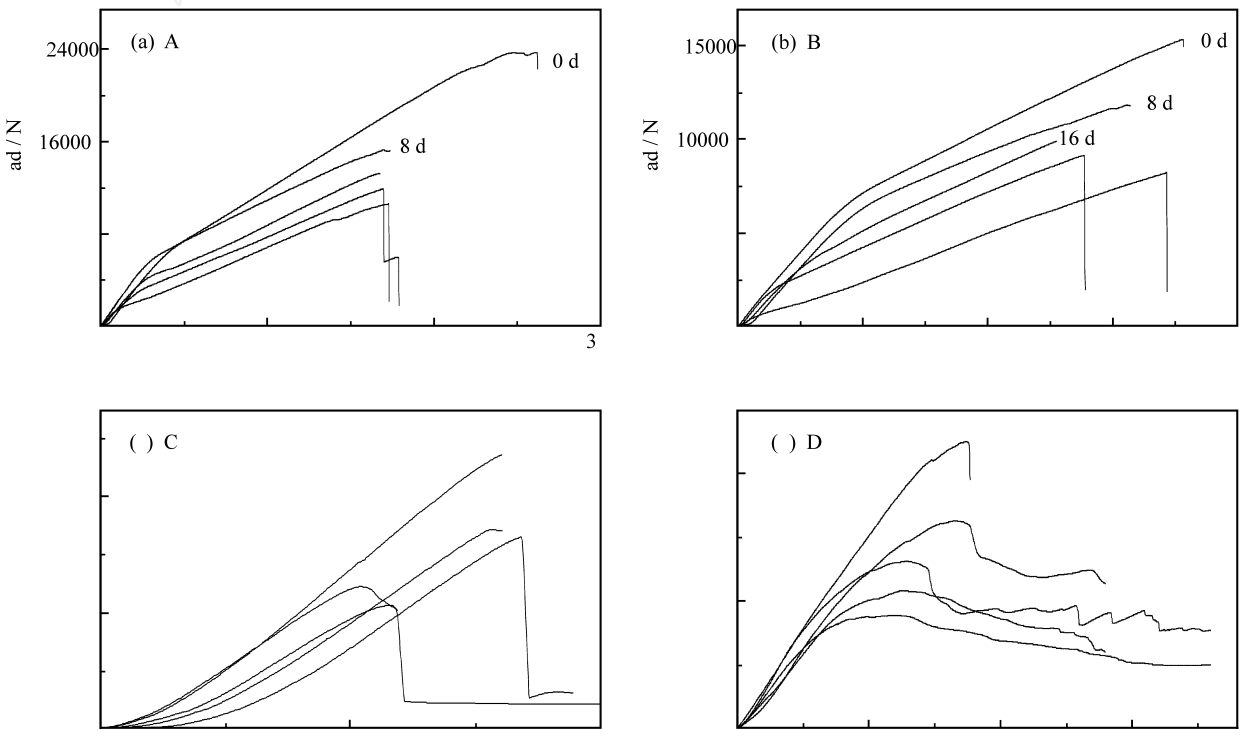

图 3　玻璃纤维增强树脂基复合材料力学性能曲线随盐雾时间的变化

Fig. 3　Changes in mechanical curves of GFRP after different salt-spraying periods

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2 盐雾老化的玻纤增强树脂基复合材料强度及强度保持率的变化

Table 2 Change in strength and strength retention of GFRP after salt-spray aging

Time/d	A		B		C		D	
	Strength/MPa	Strength retention/ %	Strength/MPa	Strength retention/ %	Strength/MPa	Strength retention/ %	Strength/MPa	Strength retention/ %
0	256.43	100.0	195.25	100.0	135.74	100.0	22.31	100.0
8	190.14	74.2	150.69	77.2	104.16	76.7	19.03	85.3
16	169.23	66.0	133.11	68.2	107.16	79.0	12.99	58.2
40	148.70	58.0	114.86	58.8	79.42	58.5	13.56	60.8
60	143.72	56.1	106.74	54.7	73.30	54.0	13.61	61.0

老化时间的延长，拉伸试验力-时间曲线沿着断裂拉伸强度不断减少的方向发展，而压缩强度和层间剪切强度也都呈下降趋势。老化 8 天后力学性能显著下降，老化 8、16、40、60 天后的曲线之间差别就不很显著，力学性能的下降比较平缓，可见吸湿的最初阶段对力学性能影响最大，也就是说水分的吸收是复合材料力学性能下降的主要原因。

由曲线形状的变化可以看出水对复合材料的作用：拉伸曲线主要反映纤维的性能，其形状变化不大，说明纤维几乎没有受到盐雾的侵蚀；未老化试样的压缩和剪切曲线比较直，发生破坏后强度几乎是垂直于时间轴下降的，随着老化时间的增加，曲线变得圆滑，强度达到最大值后逐渐下降，在剪切强度曲线上还出现较平缓的台阶，这两项力学性能反映基体性能的变化，说明水对树脂基体起了增塑的作用。

2.2.2 力学性能指标与老化时间的关系

表 2 为盐雾老化不同时间后复合材料的纵向拉伸强度、横向拉伸强度、压缩强度和层间剪切强度值和强度保持率值。可以看出，老化 60 天后复合材料的纵向、横向拉伸强度分别下降到 56 %和 55 %，压缩强度下降到 54 %，层间剪切强度下降到 61 %。

拉伸强度随老化时间增加呈指数下降，层间剪切强度开始下降很快，而后稍有上升，压缩强度在下降过程中略有波动。根据文献报道，硬而脆的塑料，其拉伸强度随老化时间的延长而下降，可直接根据下降程度评价老化[1]。从试验结果看，玻璃纤维增强环氧改性酚醛树脂拉伸强度的变化比较稳定和有规律，更适合作为该复合材料盐雾老化程度的评价指标。

2.3 盐雾老化后复合材料各项指标的综合比较

分别用每个试样的拉伸强度、压缩强度和层间剪切强度对其增重率作图得到图 4，可以看出这些点的分布是有规律的，随着吸湿量的增加，复合材料的力学性能呈下降趋势。从力学指标来看，该复合材料纵向拉伸强度最大，然后依次是横向拉伸强度、压缩强度和层间剪切强度；强度值的变化范围由大到小也是同样的顺序，但由前面的讨论可知这 4 个力学强度的保持率相差并不多。

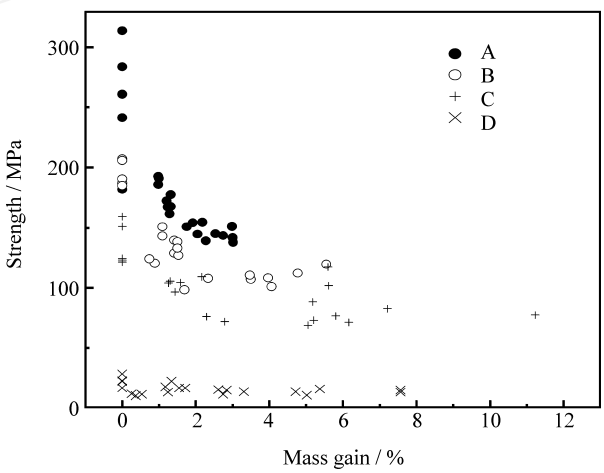

图 4 玻璃纤维增强树脂基复合材料增重率与力学性能的关系

Fig. 4 Mechanical properties versus mass gain of GFRP

增重率的变化范围依次是 C > D > B > A，这是由试样尺寸和内部纤维排列的差别造成的。增重率达到 2 %左右以前，力学性能下降明显，之后虽然增重率继续增加，但力学性能变化不大，可能是水分扩散已达到饱和，而水的进一步侵蚀还需更长时间。

3 结 论

(1) GFRP 试样的增重主要由水分的吸收引起，其次还有盐雾在试样表面的沉积。

(2) 力学性能曲线属于硬而脆型，纵向拉伸强

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

度最大，经盐雾老化后，由于水对基体的增塑效果使压缩和剪切强度曲线略显韧性特征，对拉伸曲线的形状影响不大；各平行试样的拉伸强度曲线重合性最好。

(3) 力学性能随盐雾老化时间的增加而下降，且老化初期下降速度最快；压缩和层间剪切强度变化不规则，拉伸强度的变化呈指数趋势。

(4) 拉伸强度更适合作为该复合材料盐雾老化的评价指标。

(5) 力学性能随吸湿量的增加而下降，吸湿量达到一定程度后力学性能随老化时间的变化不明显。

参考文献：

[1] 化工部合成材料研究院，金海化工有限公司. 聚合物防老化实用手册 [M]. 北京：化学工业出版社，1999：90-174.

[2] Jamond R M, Hoffard T A, Novinson T, Malvar L J. Composites in simulated marine environments, SP-2083-SHR [R]. Port Hueneme, CA: Naval Facilities Engineering Service Center, 2000.

[3] Malvar L J, Jamond R M, Hoffard T A, Novinson T. GFRP composites in simulated marine environments [C] // 2nd International Conference on Durability of FRP Composites for Construction. Montreal, Quebec, Canada: [s. n.], 2002: 191-202.

[4] Caceres A, Jamond R M, Hoffard T A, Malvar L J. Salt-fog accelerated testing of glass fiber reinforced polymer composites, TR-2215-SHR [R]. Port Hueneme, California: Naval Facilities Engineering Service Center, 2002.

[5] Tang X D, Whitcomb J D, Li Y M, Sue H J. Micromechanics modeling of moisture diffusion in woven composites [J]. Composites Science and Technology, 2005, 65: 817-826.

[6] d'Almeida J R M. Effects of distilled water and saline solution on the interlaminar shear strength of an aramid/epoxy composite [J]. Composites, 1991, 22(6): 448-450.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net