

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.09.022

不同水环境下碳纤维增强 EP 复合材料的吸湿老化

邹在平¹, 孟兵¹, 何文佩², 王李蓉¹, 廖元凯¹

(1. 成都航空职业技术学院, 先进复合材料成型技术应用研究中心, 成都 610100; 2. 四川航天长征装备制造有限公司, 成都 610100)

摘要: 对碳纤维增强环氧树脂 (EP) 复合材料在常温水、80℃高温水和浓度为 5% 的盐水三种水环境中的吸湿老化行为进行了综合对比试验。通过测试吸水率、拉伸强度、硬度和玻璃化转变温度 (T_g) 探索了该复合材料在不同水环境中的性能变化规律, 同时, 使用傅立叶变换红外光谱 (FTIR) 仪和扫描电子显微镜 (SEM) 对老化机理进一步研究。结果表明, 不同水环境下试样的初期吸水过程均符合 Fick 定律, 80℃高温水中样品的吸水率和吸水速率明显大于常温水及浓度 5% 的盐水环境。与干态空白样品相比, 水环境下样品的拉伸强度、硬度和 T_g 均出现了不同程度的下降, 其中常温水及 5% 盐水环境中样品的性能变化趋势一致且相对较小, 而高温水环境对样品力学性能和热性能的影响十分显著。FTIR 分析表明, 不同水环境下浸泡的样品并未发生显著的化学反应, SEM 形貌观测, 证明了样品在吸湿老化后界面结合出现不同程度的下降, 这与力学性能测试结果保持一致。

关键词: 树脂基复合材料; 水环境; 吸湿老化; 力学性能

中图分类号: TQ323.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)09-0116-05

Hygroscopic Aging of Carbon Fiber Reinforced EP Resin Composites in Different Water Environment

Zou Zaiping¹, Meng Bing¹, He Wenpei², Wang Lirong¹, Liao Yuankai¹

(1. Applied Research Center of Advanced Composite Manufacturing Technology, Chengdu Aeronautic Polytechnic, Chengdu 610100, China;

2. Sichuan Aerospace Long March Equipment Manufacturing Co. Ltd., Chengdu 610100, China)

Abstract: The hygroscopic aging behavior of carbon fiber reinforced epoxy resin composites in three water environments, i.e. normal temperature water, 80℃ water and 5wt% saline water, was comprehensively compared. The changing laws of the properties of the composites in different water environments were explored through the tests of water absorption, tensile strength, hardness and glass transition temperature (T_g). At the same time, the aging mechanism of the composites was studied by using Fourier Transform Infrared spectroscopy (FTIR) and scanning electron microscopy (SEM). The results show that the initial water absorption process of samples in different water environments conforms to Fick's law. The water absorption ratio and absorbent rate of samples in 80℃ water are obviously higher than those in normal temperature water and 5wt% saline water. Compared with the dry blank samples, the tensile strength, hardness and T_g of the samples in the water environment decreases in varying degrees. The changes of the properties of the samples in normal temperature water and 5wt% saline water are consistent and relatively small, while the effects of high temperature water on the mechanical and thermal properties of the samples are significant. FTIR shows that the samples immerses in different water environments do not undergo significant chemical reactions. The observation of SEM shows that the interface bonding of the samples decreases in varying degrees after hygroscopic aging, which is basically consistent with the results of mechanical properties testing.

Keywords: resin matrix composite; water environment; hygroscopic aging; mechanical property

碳纤维增强环氧树脂 (EP) 复合材料凭借其优异的综合性能, 已经广泛应用于航空航天等高端工业领域^[1-3]。经过多年的发展, 碳纤维复合材料已成

为一个相对成熟的体系, 学术界和工业界除了关注其强度模量等关键性能指标以外, 也逐渐对其耐久性问题开展了深入研究。

基金项目: 四川省教育厅自然科学重点项目 (15ZA0342; 18ZA0035), 成都航空职业技术学院自然科学研究项目 (061838)

通讯作者: 邹在平, 助理教授, 主要研究方向为复合材料性能改性与设计 E-mail: zpz925@126.com

收稿日期: 2019-06-21

引用格式: 邹在平, 孟兵, 何文佩, 等. 不同水环境下碳纤维增强 EP 复合材料的吸湿老化 [J]. 工程塑料应用, 2019, 47(9): 116-120, 143.

Zou Zaiping, Meng Bing, He Wenpei, et al. Hygroscopic aging of carbon fiber reinforced EP resin composites in different water environment[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(9): 116-120, 143.

在实际使用过程中,碳纤维复合材料制件常常接触到各类不同的水环境,因此不可避免地会受到诸如高湿、湿热和盐雾等因素的影响,这会带来性能的降低,甚至导致结构失效直至破坏^[4-8]。国内外学者对碳纤维复合材料在不同水环境中的服役老化行为进行了较为广泛的研究, E. Pérez-Pacheco 等^[9]将碳纤维增强 EP 复合材料分别放置于 22%RH、25%RH 和 95%RH 3 种湿度环境中,全面研究了吸湿老化对样品拉伸强度和失效模式的影响。许良等^[10]探索了湿热环境下碳纤维复合材料的拉-压性能,结果表明试样在吸湿后树脂基体出现了一定的破坏,并有少量纤维拔出。吸湿后试样的压缩强度保持率为 69%,玻璃化转变温度比干态空白样下降了 33℃。王琦等^[11]则对碳纤维复合材料采用盐雾条件模拟海洋环境进行加速老化试验,结果表明,复合材料的吸湿率逐渐增加,表现出塑性特征,试样的层间剪切强度与弯曲强度均出现了约 10% 的下降。

关于碳纤维复合材料吸湿老化的研究层出不穷,但是大部分研究都是针对单一水环境的,鲜有将多种水环境集中于同一试验中进行综合对比,使用常温水(25℃)、5% 盐水(25℃)和 80℃ 高温水模拟复合材料服役中具有一定代表性的三种水环境,系统对比了碳纤维复合材料在不同水环境中的服役老化情况,以期提供更有对比意义的实验数据,并进一步研究吸湿老化机理,为碳纤维复合材料制件的实际使用提供一定的理论参考。

1 实验部分

1.1 原材料与试样制备

选用国产 EP/碳纤维预浸料单向带,单层厚度约 0.11 mm。试样采用真空袋-烘箱工艺制备,135℃ 下固化 3 h,试样铺层方式为 [0]₂₀,尺寸为 250 mm × 25 mm × 2.2 mm。由于复合材料离散型较大,所有试样均采用同一批次材料,并在同一真空袋体系中固化。

1.2 仪器及设备

扫描电子显微镜(SEM):HITACHI SU3500 型,5.00 kV,日本日立公司;

傅立叶变换红外光谱(FTIR)仪:Spectrum-2 型,美国珀金埃尔默公司;

差示扫描量热(DSC)仪:Perkin Elmer DSC4000 型,美国珀金埃尔默公司;

分析天平:A13C 型,美国 OHAUS 公司;

烘箱:DHG-9240 型,成都晟杰科技有限公司;

真空泵:JP-90H,珠海市万泰机电有限公司;

巴氏硬度计:934-1 型,沈阳天星试验仪器有限公司;

万能试验机:HY-10080 型,上海衡翼精密仪器有限公司。

1.3 实验方法

实验开始前,先把试样放在 80℃ 的烘箱中干燥至工程干态。留取空白样品,按照 GB/T 1462-2005 将一定数量的试样分别放进常温水(25℃)、5% 盐水(25℃)和 80℃ 高温水中进行浸泡实验,定时取出样品进行相关测试。

1.4 测试与表征

吸水率按照 GB/T 1462-2005 进行测量,前 3 天每日测量 3 次,随后测试频率逐渐降低,直至吸湿饱和,每次取样 5 个计算平均值;

巴氏硬度根据 GB 3854-2005 测量,每次测量 10 个点取平均值;

拉伸强度按照 GB/T 1447-2005 测试,每次取样 5 个,拉伸速率为 5 mm/min;

SEM 分析:SEM 观察试样微观形貌,并拍照;

FTIR 分析:采用 ATR 法在 FTIR 仪上进行,扫描范围 650~4 000 cm⁻¹;

玻璃化转变温度(T_g)测试:在 DSC 仪上进行,空白参比盘中放入相应比例的碳纤维丝,温度为 25~180℃,升温速率为 20℃/min。

2 结果与讨论

2.1 吸湿行为

碳纤维复合材料在不同水环境中的吸水率与老化时间(t)及老化时间平方根($t^{1/2}$)的关系如图 1 和图 2 所示。

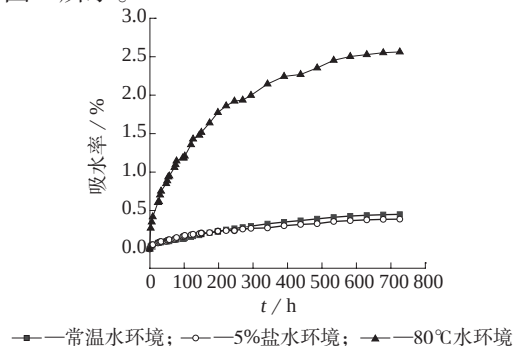


图 1 碳纤维增强 EP 复合材料不同水环境下

吸水率与老化时间的关系曲线

由图 1 可知,所有试样吸水率均呈现前期上升明显、后期趋向稳定的态势。样品在吸湿初期,主要

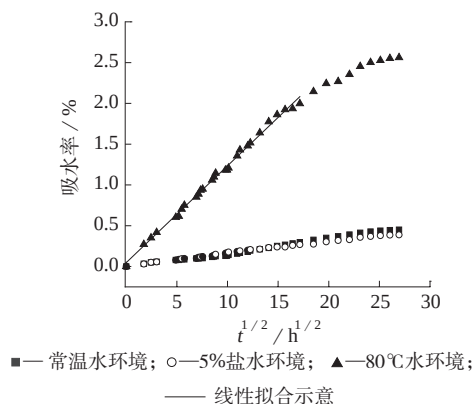


图2 碳纤维增强EP复合材料不同水环境下吸水率- $t^{1/2}$ 关系曲线
通过树脂基体以及复合材料的制造缺陷吸收水分,因此吸湿率增加较快。由图2可以看出,该过程的吸湿率与 $t^{1/2}$ 呈现线性关系,表明在吸水初期水分扩散行为主要是物理过程,符合Fick第二定律^[12]。对于吸湿后期,吸水率趋于平衡,由于树脂基体与界面在各类水环境中产生了一系列不可逆的物理化学变化,导致这一阶段水分扩散情况偏离了Fick定律。

通过对图2中各曲线的线性部分进行拟合可得到吸水初期的吸水速率(直线斜率),再根据Fick第二定律即可计算出不同水环境中碳纤维复合材料的初期吸水参数^[13],具体数据见表1。

表1 不同水环境中碳纤维增强EP复合材料的初期吸水参数

试样浸泡环境	平衡吸水率 / %	吸水速率 / ($h^{-1/2}$)	扩散系数 / ($mm^2 \cdot h^{-1}$)
常温水(25℃)	0.45	1.81×10^{-4}	1.81×10^{-3}
5wt% 盐水(25℃)	0.39	1.46×10^{-4}	1.61×10^{-3}
80℃高温水	2.56	1.19×10^{-3}	4.00×10^{-3}

从表1可以看出,试样在80℃水环境中的吸湿率、吸湿速率和扩散系数均明显高于其它两种情况。这是因为较高的温度下水分子扩散会显著增加,导致试样的吸水速率高于常温环境;另一方面,高温会增加树脂基体中的自由体积,扩大裂纹等缺陷的尺寸,并加速树脂基体的老化分解与界面结合能力的退化,从而吸收更多的水分,最终使得平衡吸湿率远大于其它两种情况。另外,从以上数据还可以发现,常温水环境中试样的吸湿率要略大于5%盐水环境,这是由于盐水环境中 Na^+ 和 Cl^- 离子的大小与质量均比水分子大,不易被材料吸收,而且由于这些离子的存在,降低了水分子向试样扩散的驱动力^[14],但总体两者差别不大。综上所述,该复合材料的初期吸湿主要是水分的渗透与扩散,水环境温度的影响十分显著。

2.2 力学性能与热性能

复合材料吸湿老化在宏观上常表现为力学性能和热性能的下降,因此,笔者着重对碳纤维增强EP复合材料在老化前后的拉伸强度、硬度和 T_g 进行测试。图3和图4分别为不同水环境下碳纤维增强EP复合材料的拉伸强度和硬度随老化时间的变化情况。从图3可看出,复合材料在各类水环境中的拉伸强度都呈现前期快速下降、后期逐渐稳定的趋势,这与吸湿行为的特征相对应。80℃高温水环境中试样的拉伸强度下降明显,从干态试样的1824.46 MPa最终降到1062.01 MPa,衰减幅度达到41.79%。而常温水环境和5%盐水环境中试样的拉伸强度变化趋势比较一致,均下降大概25%左右。

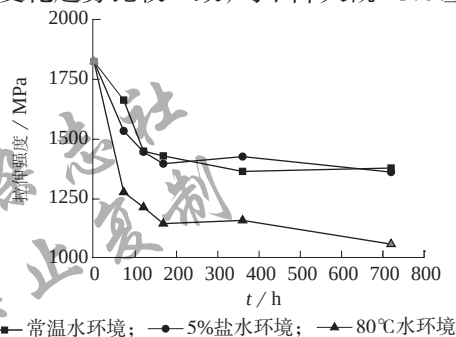


图3 碳纤维增强EP复合材料不同水环境下不同老化时间的拉伸强度

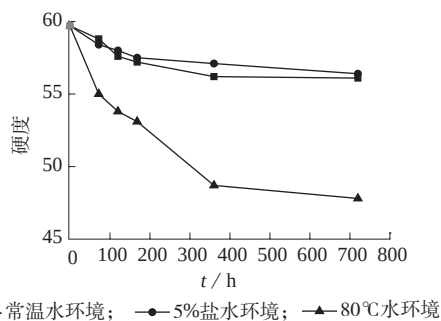


图4 碳纤维增强EP复合材料在不同水环境下不同老化时间的硬度

碳纤维增强EP复合材料吸湿对于碳纤维本身没有太大影响,试样拉伸强度下降的原因主要是界面结合力的退化。树脂吸水溶胀体积增加,而碳纤维几乎不存在湿膨胀,因此材料吸水后在界面处产生一定的湿应力,另外,水渗入界面中的微缺陷会使裂纹进一步扩展,从而减弱纤维与基体间的粘接力,最终降低了复合材料的界面性能。如果在高温水环境下,湿热老化带来更加显著的热应力和湿应力,甚至造成界面和树脂中的化学键断裂,使得复合材料的拉伸强度下降更加明显。

巴氏硬度可用于考察复合材料在经历老化实

验后的力学性能。从图 4 可以看出,不同水环境下试样的硬度随着吸湿老化时间的增加而减小,这主要是由于树脂基体吸湿带来的溶胀与塑化作用。80℃高温水环境中,试样最终硬度比干态试样低了 20%;常温水环境和 5% 盐水环境中的试样硬度均出现了小幅度的下降,但整体来看,后者的下降程度要略小于前者,这是因为盐水环境中复合材料吸湿率要稍微小于纯水环境,带来的树脂基体的溶胀塑化作用也相对较少。另外,通过以上分析表明,材料老化后的拉伸强度可以间接表征界面性能的好坏,而硬度测试可间接说明树脂基体的溶胀塑化情况。因此,从图 3 和图 4 还可以推断出,这种碳纤维增强 EP 复合材料吸湿老化所带来的界面性能退化主要发生在吸湿初期的前 200 h 以内,而树脂基体的溶胀塑化作用可持续至大约 350 h。

除了力学性能,材料吸湿老化后的热性能也是十分重要的性能指标,碳纤维增强 EP 复合材料在不同水环境中浸泡 720 h 后的 T_g 见图 5。

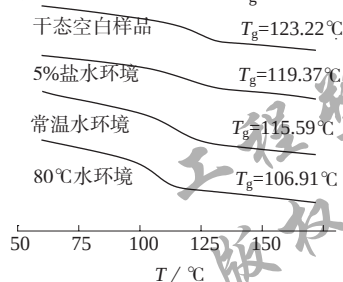


图 5 碳纤维增强 EP 复合材料在不同水环境下浸泡 720 h 后的 DSC 曲线

从图 5 可看出,试样经过 720 h 的吸湿老化后, T_g 均出现不同程度的降低。其中,与干态试样相比,80℃水环境下老化试样的 T_g 下降了 16.31℃,5% 盐水环境和常温水环境中试样的 T_g 变化幅度相对较小。碳纤维增强 EP 复合材料的 T_g 主要与树脂基体有关,试样在吸湿老化后 T_g 出现降低,主要是由于树脂基体吸水后发生塑化和溶胀,自由空间增大,分子链的运动能力增加,这种情况在高温水环境下更加显著,而且高温还可能导致树脂基体发生化学降解,交联网络破坏,因此 T_g 下降得比较严重。另外,从图 5 还能看出,5% 盐水环境下老化的试样的 T_g 要高于常温水环境中的试样,这是因为 5% 盐水环境中,试样的吸水率相对偏低,树脂基体的溶胀水平低于常温水环境,这与硬度测试中的情况保持一致。

2.3 吸水老化机理分析

复合材料的吸湿老化是一系列复杂物理化学

作用的综合表现,其中的化学作用主要是指水分和热量造成的树脂或者界面上的化学降解,从而使得复合材料性能发生改变。为了判断复合材料的吸湿老化过程是否发生显著的化学反应,笔者采用 FTIR 仪对干态试样和经过 720 h 浸泡的试样进行测试分析,相关图谱见图 6。

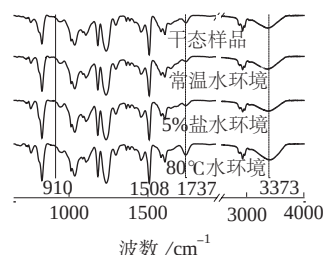


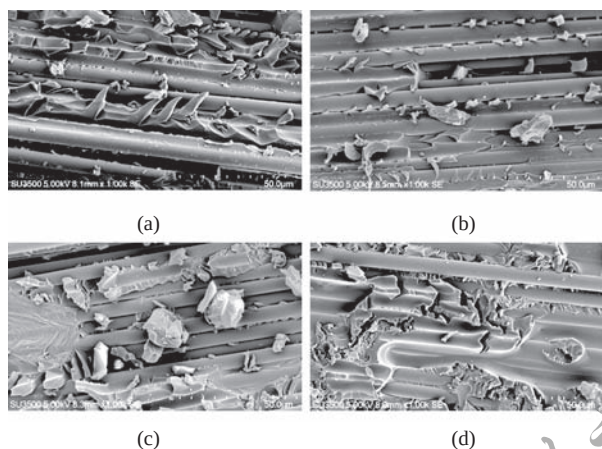
图 6 碳纤维增强 EP 复合材料试样在不同环境下的 FTIR 谱图

图 6 中树脂基体的主要特征峰包括 910 cm^{-1} 处的环氧基团吸收峰和 1508 cm^{-1} 处的对位取代苯基吸收峰。由于苯基在固化和浸泡过程中基本不会发生变化,因此以 1508 cm^{-1} 处的峰作为基准进行归一化处理。从图 6 可以看出,各个试样中 910 cm^{-1} 处的环氧基团吸收峰基本消失并没有发生变化,说明所有试样制备时已经完全固化,在老化过程中不存在后固化现象。另外,常温水环境和 5% 盐水环境中浸泡后的试样,其 FTIR 谱图与干态试样相比几乎没有区别,说明浸泡过程中并未发生显著的化学反应。对于 80℃水环境中老化的试样,谱图中 1737 cm^{-1} 处的羰基吸收峰和 3373 cm^{-1} 处的羟基吸收峰出现了轻微的变化,说明在高温水环境下长期浸泡,树脂基体中羰基和羟基含量有所增加,表明发生了一定的化学反应,但是数量不大。

因此,不同水环境引起的复合材料吸湿老化主要还是物理作用。一方面,水分通过扩散与渗透作用进入树脂基体内部,引起链段的微布朗运动,使分子间距增大,表现为树脂基体的溶胀和材料塑性的提高;另一方面,进入复合材料界面的水分,其尖端效应会扩大纤维与树脂的间距,并使微缺陷进一步扩张,再加上界面上湿应力与热应力的共同作用,界面性能出现明显退化^[15]。

总之,复合材料的力学性能和热性能降低综合反映了各类水环境对树脂基体、纤维和界面的影响,但由于碳纤维本身的性能受环境影响极小,因此复合材料在吸湿老化后的性能变化主要是由树脂基体和界面决定。图 7 为拉伸测试后各试样的 SEM 照片。图 7a 为干态试样中树脂大量残留在纤维上,表

明两者呈现良好的结合状态;图 7b 和图 7c 中,纤维表面相对光滑,纤维之间的树脂发生明显破坏,说明常温水环境和 5% 盐水环境对复合材料的界面性能产生了一定消极影响;图 7d 中显示纤维表面光滑,很多纤维已经脱离树脂包裹,只留下大量凹痕,这表明 80℃ 水环境对于复合材料的界面性能影响巨大,界面结合力显著减小。以上变化规律与试样的拉伸性能测试结果相匹配。



a—干态试样; b—常温水环境;
c—5% 盐水环境; d—80℃ 高温水环境

图 7 干态试样与 720 h 浸泡试样拉伸破坏后的微观 SEM 照片

3 结论

(1) 碳纤维增强 EP 复合材料在不同水环境下的吸水率均呈现前期上升明显、后期趋向稳定的态势。80℃ 水环境下试样的平衡吸水率和扩散系数均明显大于常温水环境和 5% 盐水环境,分别达到了 2.56% 和 $4.00 \times 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{h}$ 。复合材料吸湿主要为渗透与扩散作用,吸湿老化过程中并未发生显著的化学反应。

(2) 样品的拉伸性能随着老化时间的增加而逐渐减小,常温水环境和 5% 盐水环境中试样的拉伸强度均下降了 25% 左右,而 80℃ 高温水环境中试样的拉伸性能降幅达到 41.79%。试样的拉伸性能与材料界面结合力直接相关,水环境温度对于材料界面性能影响较大。

(3) 随着浸泡老化时间的增加,试样的硬度和 T_g 均出现了一定的下降,特别是 80℃ 高温水环境中,试样在经历 720 h 的浸泡后,硬度下降了 20%, T_g 则下降了 16.31℃,这表明树脂基体出现了明显的溶胀塑化作用。

参考文献

[1] 马立敏,张嘉振,岳广全,等. 复合材料在新一代大型民用飞机中

的应用[J]. 复合材料学报,2015,32(2):317-322.

Ma Limin, Zhang Jiazhen, Yue Guangquan, et al. Application of composites in new generation of large civil aircraft[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2015, 32(2):317-322.

[2] 郑志才,王尚,田雅萍,等. 多壁碳纳米管在国产碳纤维增强环氧树脂复合材料中应用[J]. 工程塑料应用,2018,46(5):38-41.

Zheng Zhicai, Wang Shang, Tian Yaping, et al. Application of multi-walled carbon nanotubes in domestic epoxy resin / carbon fiber composites[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(5):38-41.

[3] 郭帅,杨旭静,方文俊,等. 快速固化环氧树脂 / 碳纤维复合材料的性能[J]. 工程塑料应用,2017,45(4):12-16.

Guo Shuai, Yang Xujing, Fang Wenjun, et al. Properties of rapid curing epoxy resin / carbon fiber composites[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(4):12-16.

[4] Liu Lulu, Zhao Zhenhua, Chen Wei, et al. An experimental investigation on high velocity impact behavior of hygrothermal aged CFRP composites[J]. Composite Structures, 2018, 204:645-657.

[5] Jin Ping, Wang De, Tan Xiaoming. Review of hygrothermal effects on carbon fiber-reinforced composite materials[J]. Advanced Materials Research, 2012, 490-495:3611-3615.

[6] Almeida J H, Souza S, Samia D, 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] 巩天琛,邹田春,冯振宇. 湿热环境对 CFRP 复合材料性能影响研究进展[J]. 材料导报,2016(S1):320-323.

Gong Tianchen, Zou Tianchun, Feng Zhenyu. Effect of hygrothermal condition on the properties of carbon fiber reinforced polymers: A Review[J]. Materials Review, 2016(S1):320-323.

[8] Figliolini A M, Carlsson L A. Mechanical properties of carbon fiber / vinylester composites exposed to marine environments[J]. Polymer Composites, 2014, 35(8):1559-1569.

[9] Pérez-Pacheco E, Cauich-Cupul J I, Valadez-González A, et al. Effect of moisture absorption on the mechanical behavior of carbon fiber / epoxy matrix composites[J]. Journal of Materials Science, 2013, 48(5):1873-1882.

[10] 许良,费昂强,马少华,等. 湿热环境下复合材料层板拉-压性能[J]. 材料工程,2018,46(3):124-130.

Xu Liang, Fei Bingqiang, Ma Shaohua, et al. Tensile and compress property of composite laminate in hygrothermal environment[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(3):124-130.

[11] 王琦,檀琳琳,王洁. 碳纤维环氧复合材料盐雾老化试验研究[J]. 装备环境工程,2011,8(5):39-42.

Wang Qi, Tan Linlin, Wang Jie. On salt fog weathering of carbon fiber epoxy composite material[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(5):39-42.

(下转第 143 页)

- [3] 谭逸伦,赵海珠,吴雨凡,等.微胶囊化次磷酸铝阻燃玻璃纤维增强 PA 6[J].合成树脂及塑料,2014,31(3):21-24.
Tan Yilun, Zhao Haizhu, Wu Yufan, et al. Microencapsulated aluminum hypophosphite flame-retardant glass fiber reinforced PA 6[J]. Synthetic Resin and Plastic, 2014, 31(3):21-24.
- [4] 赵永真.次磷酸铝阻燃剂的改性进展[J].广州化工,2018,46(3):13-15,38.
Zhao Yongzhen. Modification research progress on aluminium hypophosphite flame retardant[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2018, 46(3):13-15, 38.
- [5] Eslami A, Hosseini S G, Asadi V. The effect of microencapsulation with nitrocellulose on thermal properties of sodium azide particles[J]. Progress in Organic Coatings, 2009, 65(2):269-274.
- [6] Wu Qiang, Lu Jianping, Qu Baojun. Preparation and characterization of microcapsulated red phosphorus and its flame-retardant mechanism in halogen-free flame retardant polyolefins[J]. Polymer International, 2003, 52(8):1 326-1 331.
- [7] 赵永真,袁文聪,尤瑶瑶,等.微胶囊包覆改性次磷酸铝阻燃剂的制备与表征[J].矿冶工程,2018,38(5):141-143.
Zhao Yongzhen, Yuan Wencong, You Yaoyao, et al. Preparation and characterization of microencapsulated aluminum hypophosphite as flame retardants[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2018, 38(5):141-143.
- [8] 胡清华,张旗,刘诗,等.次磷酸铝微胶囊的制备与表征[J].武汉工程大学学报,2019,41(2):137-141.
Hu Qinghua, Zhang Qi, Liu Shi, et al. Preparation and characterization of aluminum hypophosphite microcapsules[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2019, 41(2):137-141.
- [9] 胡权,刘学清,彭莎,等.微胶囊化次磷酸铝的制备及表征[J].化学与生物工程,2016,33(11):45-47,51.
Hu Quan, Liu Xueqing, Peng Sha, et al. Synthesis and characterization of microencapsulated aluminum hypophosphite[J]. Chemistry and Bioengineering, 2016, 33(11):45-47, 51.
- [10] 洪晓东,韦宝权,梁兵.微胶囊无卤阻燃剂的研究进展[J].高分子通报,2012(7):51-56.
Hong Xiaodong, Wei Baoquan, Liang Bing. Research advances of microcapsule non-halogen flame retardant[J]. Polymer Notification, 2012(7):51-56.
- [11] 王方明,管福成,冯钠,等.三聚氰胺氰尿酸盐阻燃 PA6 复合材料性能研究[J].塑料工业,2013,41(4):96-98,112.
Wang Fangming, Guan Fucheng, Feng Na, et al. Flame retardant effect of melamine cyanurate on the properties of PA6 composites[J]. China Plastics Industry, 2013, 41(4):96-98, 112.
- [12] 肖媛芳,许家友.红磷改性 MCA 阻燃 PA6 性能研究[J].工程塑料应用,2016,44(1):45-48.
Xiao Yuanfang, Xu Jiayou. Research on properties of flame retardant PA6 with red phosphorus modified MCA[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(1):45-48.
- [13] 肖媛芳,许家友,邓海铭. MCA-ADEPH 磷-氮协同阻燃剂的制备及其对 PA6 阻燃性能的影响[J].功能材料,2017,48(6):6 165-6 170.
Xiao Yuanfang, Xu Jiayou, Deng Haiming. Preparation of phosphorus-nitrogen synergistic flame retardant MCA-ADEPH and its effects on flame retardancy of PA6[J]. Journal of Functional Materials, 2017, 48(6):6 165-6 170.
- [14] 李飞,姜国伟,孙春荣,等.无卤阻燃聚对苯二甲酸丙二酯的研究[J].工程塑料应用,2017,45(5):1-6.
Li Fei, Jiang Guowei, Sun Chunrong, et al. Study on halogen-free flame retardant PTT[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(5):1-6.
- [15] 宁军.2016~2017 年世界塑料工业进展(II)[J].塑料工业,2018,46(4):1-19,50.
Ning Jun. Progress of the world's plastics industry in 2016-2017(II)[J]. China Plastics Industry, 2018, 46(4):1-19, 50.

(上接第 120 页)

- [12] 冯振宇,解江,迟琪琳,等.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):41-47.
Feng Zhenyu, Xie Jiang, Chi Qilin, et al. Influence of hygrothermal environment on tensile property of unidirectional composite laminates[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2018, 34(11):41-47.
- [13] 回丽,王勇刚,许良,等.考虑水浸温度影响的复合材料吸湿动力学模型[J].材料工程,2016,44(11):83-87.
Hui Li, Wang Yonggang, Xu Liang, et al. Moisture absorption model of composites considering water temperature effect[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(11):83-87.
- [14] 吕小军,张琦,项民,等.环境因素对复合材料力学性能的影响[J].中国腐蚀与防护学报,2007,27(2):97-100.
Lyu Xiaojun, Zhang Qi, Xiang Min, et al. Influence of environmental factors on the mechanical properties of composites[J]. Journal of Chinese Society For Corrosion and Protection, 2007, 27(2):97-100.
- [15] 袁应立,王继辉.两种玻璃纤维增强复合材料体系的湿热老化研究[J].玻璃钢/复合材料,2017(10):79-84.
Yuan Yingli, Wang Jihui. Study on hydrothermal aging of two kinds of glass fiber reinforced composite[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2017(10):79-84.