

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.03.017

游艇用玻纤-碳纤混杂增强复合材料耐盐雾研究及寿命预测

李萌^{1,2}

(1. 广东省珠海市质量计量监督检测所, 广东珠海 519000; 2. 国家船舶及海洋工程装备材料质量监督检验中心, 广东珠海 519000)

摘要:制备游艇用玻纤-碳纤混杂增强 2597PT 不饱和树脂复合材料,应用人工加速老化方法,对其进行盐雾老化实验,研究其在三种盐雾条件下(盐度 6%, 温度 50℃; 盐度 6%, 温度 25℃; 盐度 3%, 温度 50℃)的性能演变规律,建立其对应的寿命模型并进行寿命预测。研究表明:材料盐雾老化后与老化前相比,特征官能团的吸收峰位置未发生变化;随着老化时间的增加,材料力学性能均呈现下降的趋势,且在盐度 6%, 温度 50℃条件下老化最为严重;在 G. M. Gunyaev 剩余强度理论基础上,采用 origin 对其进行非线性拟合,得到老化最严重的盐雾环境(即温度 50℃、盐度 6%)下材料剩余拉伸强度公式,相关系数 $R^2=0.99$, 结合 CCS《材料与焊接规范》2018 版要求,预测此材料在盐度 6%, 温度 50℃条件下可安全使用约 2000 d。

关键词:玻纤-碳纤混杂增强复合材料; 盐雾老化; 力学性能; 寿命预测

中图分类号: TQ327 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2019)03-0085-07

Salt Spray Resistance and Prediction of Carbon Fiber-Glass Fiber Hybrid Reinforced Composites for Yachts

Li Meng^{1,2}

(1. Guangdong Zhuhai Supervision Testing Institute of Quality and Metrology, Zhuhai 519000, China;

2. National Quality Supervising Test Center for Materials of Ship and Marine Engineering Equipment, Zhuhai 519000, China)

Abstract: Carbon-glass hybrid reinforced 2597PT unsaturated resin composites for yachts were prepared. Salt spray aging experiments were carried out by artificial accelerated aging method. The evolution law of the performance under three salt spray conditions (salinity 6%, temperature 50℃; salinity 6%, temperature 25℃; salinity 3%, temperature 50℃) was studied, and the corresponding life model was established and life prediction was carried out. The results show that there is no change in the position of absorption peaks of characteristic functional groups before and after aging in three salt spray environments, and the mechanical properties of materials decrease gradually with the extension of aging time in three salt spray environments, and the most serious aging is at salinity of 6% and temperature of 50℃. On the basis of G.M.Gunyaev's residual strength theory, the non-linear fitting of origin was used to obtain the formula of residual tensile strength of materials under the most severe aging salt fog environment (temperature 50℃, salinity 6%). The correlation coefficient $R^2=0.99$. Combining with the requirements of the 2018 edition of 《The Code for Materials and Welding》of CCS, the above-mentioned material was predicted. It can be used for about 2000 days.

Keywords: carbon-glass fiber reinforced composite reinforced composites; salt fog aging; mechanical performance; life prediction

纤维增强复合材料(俗称玻璃钢)是由树脂、纤维两个相互独立物理相组成的一种固体产物^[1]。凭借其比强度高^[2]、比弹性模量大^[3]、优异的耐腐蚀性能、较好的力学性能,广泛应用于公园游览艇、小型渔船、高速游艇、湖泊观光艇、海上巡逻艇等小型船舶建造中。随着国家对环境要求逐步重视以及高

速游艇的出现,材料性能优化以及节能减排成为游艇企业面临的巨大挑战,传统玻璃纤维增强复合材料弊端逐渐显现。目前,国内游艇企业巨头太阳鸟游艇尝试用玻纤-碳纤混杂增强环氧树脂的方法制备高性能复合材料,不仅具有增强材料力学性能的目的,同时降低试板厚度,实现材料的高效设计和多

基金项目: 广东省质量技术监督局科技计划项目(2017PZ10)

通讯作者: 李萌,工程师,硕士,主要从事纤维增强复合材料研发与检测工作 18928088172@163.com

收稿日期: 2018-12-29

引用格式: 李萌. 游艇用玻纤-碳纤混杂增强复合材料耐盐雾研究及寿命预测[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(3):85-91.

Li Meng. Salt spray resistance and prediction of carbon fiber-glass fiber hybrid reinforced composites for yachts[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(3):85-91.

功能化。然而,玻璃钢复合材料基体树脂多为热固性高分子材料,户外环境中的风沙雪雨、温度、湿度、太阳光等等都会影响其结构、力学性能等。张承双等^[4]采用干法缠绕工艺方法制备聚苯并恶唑(PBO)纤维与碳纤维混杂增强复合材料,研究热空气对其力学性能影响,研究表明:经热空气老化九十天后,拉伸强度、压缩强度分别下降13%,7%,储能模量向低温方向移动,损耗模量向高温方向移动。金鑫等^[5]研究碳纤维增强环氧树脂复合材料的热降解行为,研究表明:碳纤维的加入使得环氧树脂降解活化能提高27 kJ/mol,说明碳纤维的存在使得环氧树脂分子链段变得更稳定。朱坤坤等^[6]采用玻璃纤维、苧麻纤维混杂增强乙烯基树脂,对其进行水浸泡、盐雾老化和紫外老化等一系列老化实验,研究表明:水浸泡对其强度影响最大,紫外老化对其强度影响最小。

基于国内外较少从事玻纤-碳纤混杂增强复合材料盐雾老化相关研究数据,及其在海洋环境下由于温度差诱导海水蒸发而带来的腐蚀老化,导致材料性能降低,给高速游艇的日常使用带来较高安全风险。笔者拟在国家船舶及海工质检中心现有实验室条件下,应用不同条件下的人工加速盐雾老化试验,探索不同盐雾条件下材料性能变化规律以及老化时间对其力学性能、结构性能影响,建立其不同盐雾环境条件下的剩余强度寿命模型,同时,结合中国船级社《材料与焊接规范》对游艇用复合材料性能要求,达到快速预测玻纤-碳纤混杂增强复合材料在游艇上安全使用寿命、降低安全事故的目的。

1 实验部分

1.1 主要原材料

液体不饱和聚酯树脂:2597PT,长兴化学材料(珠海)有限公司;

玻纤:包括玻纤短切毡以及玻纤正交布两种,其中,玻纤短切毡的规格为 $(300 \pm 20) \text{ g/m}^2$,玻纤正交布规格为 $(600 \pm 30) \text{ g/m}^2$,泰广玻纤有限公司;

碳纤:碳纤正交布,其规格为 200 g/m^2 ,中复神鹰公司。

1.2 主要设备及仪器

恒温干燥箱:DHG-9240型,上海一恒科学仪器有限公司;

万能电子拉力试验机:UTM5504型,深圳市三思试验仪器有限公司;

摆锤冲击试验机:PTM1400-B1型,深圳市三思试验仪器有限公司;

拉向引伸仪:EAS-050M型,Reliant工业有限公司;

压向引伸仪:EAS-025M型,Reliant工业有限公司;

傅立叶变换红外光谱测试(FTIR)仪:Tracer-100型,日本岛津公司;

扫描电子显微镜(SEM):Quanta250型,FEI公司;

盐雾老化试验箱:CCT1100型,Q-Lab公司。

1.3 实验步骤

(1)玻纤-碳纤混杂增强复合材料制备及盐雾老化试验流程图。

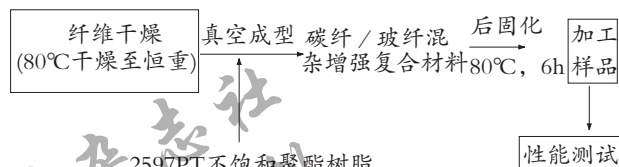


图1 玻纤-碳纤混杂增强复合材料制备与测试流程图

本次实验中用到的玻纤-碳纤混杂增强复合材料,采用真空袋成型方式,采用铺层方式为玻纤短切毡/碳纤维正交布/玻纤短切毡/玻纤正交布/玻纤正交布/玻纤正交布/玻纤正交布短切毡/碳纤维正交布/玻纤短切毡,纤维规格详见1.1,共计10层纤维,设计厚度约5 mm。

(2) 盐雾老化试验。

所有测试样品均按 0° 纤维方向取样、加工。按测试项目加工测试样品,将加工好的测试样品置于GB/T 1446-2005标准实验环境(温度: $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$,相对湿度: $50\% \pm 5\%$)下放置至少24 h。

样品状态调节完毕后,将其置于盐雾试验箱进行老化实验,本研究进行三组不同条件的盐雾老化,A组盐度(“盐溶液浓度”的简称,质量分数,下同)6%,实验温度 50°C ;B组盐度6%,实验温度 25°C ;C组盐度3%,实验温度 50°C ,相对湿度不控制,但均大于50%。其中,盐雾老化试验参数参考GJB 150.11A-2009。

1.4 玻纤-碳纤混杂增强复合材料老化前后性能测试

(1) FTIR 测试。

盐雾老化结束后,取出老化样品,用滤纸除去表面杂质,并用冷风机吹干表面水分,立即将样品

置于温度为 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$, 相对湿度为 $(50 \pm 5)\%$ 的标准环境下放置不少于 24 h, 然后进行测试。采用衰减全反射 (ATR) 测定方法, 选取样品光滑表面作为测试部位, 将其放在 ATR 棱镜上, 从样品后侧加压, 使样品与棱镜均匀接触。测试方法参考 GB/T 6040-2002。

(2) 力学性能测试。

样品处理方法同上。其中, 拉伸性能测试方法参考 GB/T 1447-2005; 压缩性能测试方法参考 GB/T 1448-2005; 弯曲性能测试方法参考 GB/T 1449-2005, 每组性能均测试 5 个平行样, 计算其算术平均值, 所有力学性能结果均保留三位有效数字。

(3) SEM 测试。

样品处理方法同上。采用塑料摆锤冲击试验机冲击样品缺口背面, 选取平整部位置于 SEM 铜台, 并用导电胶固定, 断面喷金 30 s 后进行断面观察。

2 结果与讨论

2.1 不同条件盐雾老化前后材料 FTIR 分析

图 2 为玻纤-碳纤混杂增强复合材料盐雾老化前、盐雾老化 (温度 50°C 、盐度 6%; 温度 25°C 、盐度 6%; 温度 50°C 、盐度 3%) 50 天后的 FTIR 谱图。

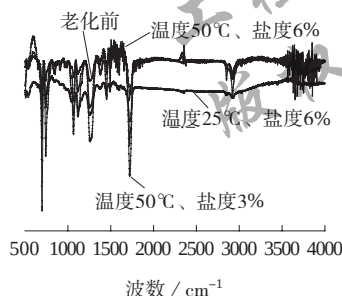


图 2 盐雾老化前后混杂增强复合材料 FTIR 谱图

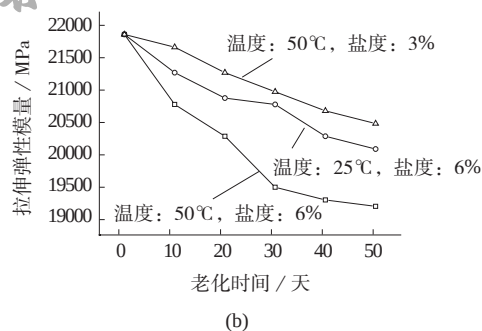
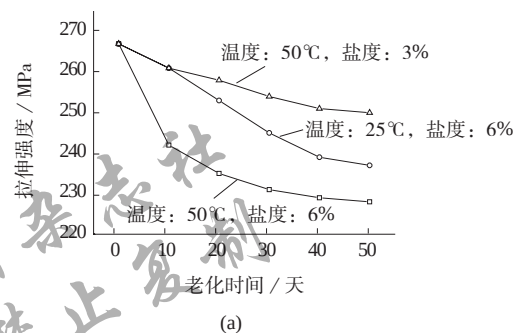
从图 2 可以发现: 盐雾老化前后, 特征官能团的吸收峰位置未发生任何变化, 1750 cm^{-1} 处是不饱和聚酯树脂中碳基的吸收峰, 2960 cm^{-1} 处、 2920 cm^{-1} 处是 C—H 键的伸缩振动, 1100 cm^{-1} 处是酯基中 C—O 键的特征吸收峰。对比老化前后材料的红外谱图, 盐雾老化后材料在 1750 cm^{-1} 处碳基的吸收峰透光率均增强, 这是由于盐雾老化后材料中酯基断裂所致^[7-8]。

2.2 不同盐雾环境老化前后材料力学性能分析

(1) 不同盐雾老化条件下材料拉伸性能。

图 3 为在不同盐雾老化条件下, 盐度、温度以及老化时间对玻纤-碳纤混杂增强复合材料拉伸强度

以及拉伸弹性模量的影响。研究图 3 中拉伸强度、拉伸弹性模量随老化时间的变化规律, 不难发现, 在上述三组盐雾老化条件下, 复合材料的拉伸强度、拉伸弹性模量均随着老化时间的延长而逐步降低, 且在老化初期性能降低幅度较大。这是由于随着老化时间的增加, 其内部缺陷逐渐增多, 基体树脂与纤维间相互作用力削弱所致, 同时, 在老化初期, 由于浓度差的因素, 水分子、溶质分子等沿着材料内部微孔扩散至材料内部, 同时随着外部因素 (如盐浓度、温度等) 的改变, 溶质分子等从材料内部扩散至材料表面, 如此往复循环下, 材料内部微孔逐渐减少, 破坏作用逐渐减弱^[9-10]。



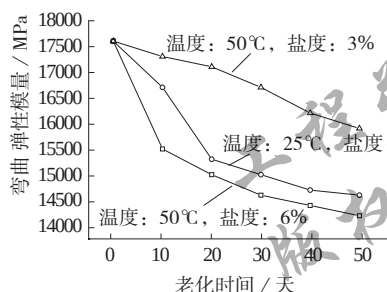
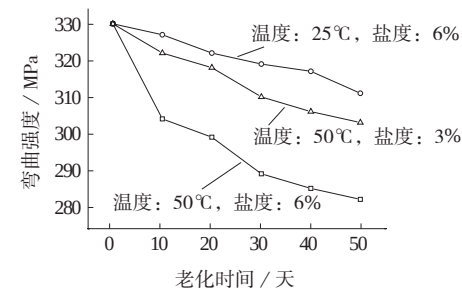
a—拉伸强度; b—拉伸弹性模量

图 3 不同盐雾环境及老化时间时混杂增强复合材料的拉伸性能

对比图 3 中曲线变化规律发现, 老化温度 50°C 、盐度为 6% 条件下材料拉伸性能老化最严重, 老化温度 25°C 、盐度为 6% 条件下的老化次之, 老化温度 50°C 、盐度为 3% 条件下的老化最轻。在相同老化温度 (50°C) 条件下, 6% 盐度条件下材料拉伸强度、拉伸弹性模量下降幅度均大于 3% 盐度条件下, 由此可见老化中盐度会加速玻纤-碳纤混杂增强复合材料的老化; 在相同盐度 (6%) 条件下, 50°C 条件下材料拉伸强度、拉伸弹性模量下降幅度均大于 25°C 条件下性能下降幅度, 可见老化温度会加速其老化; 研究图 3 中曲线变化趋势, 发现盐度因素对其拉伸性能的老化大于温度对其老化的影响。

(2) 不同盐雾老化条件下材料弯曲性能。

图4为在不同盐雾老化条件下,盐度、温度以及老化时间对玻纤-碳纤混杂增强复合材料弯曲强度以及弯曲弹性模量的影响。研究图4中不同盐雾老化条件下曲线变化趋势不难发现:随着盐雾老化时间的增加,不同盐雾条件下材料的弯曲强度、弯曲弹性模量均下降;老化温度50℃、盐度为6%条件下的材料弯曲强度老化最严重,老化温度50℃、盐度为3%条件下的老化次之,老化温度25℃、盐度为6%条件下的老化最轻。



a—弯曲强度; b—弯曲弹性模量

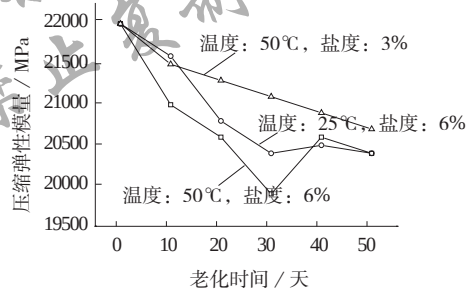
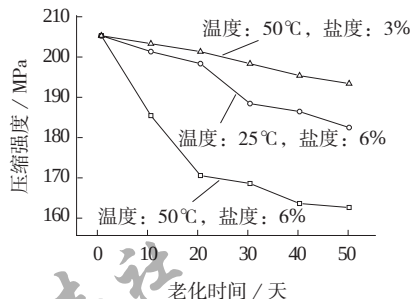
图4 不同盐雾环境及老化时间时混杂增强复合材料的弯曲性能

对比图4中曲线变化规律发现:1)在相同老化温度(50℃)条件下,盐度的增加会加速对材料弯曲强度、弯曲弹性模量的老化;2)在相同老化盐度(6%)条件下,温度的升高会加速对材料弯曲强度、弯曲弹性模量的老化;3)老化温度对材料弯曲强度的影响大于盐度的影响;4)盐度对材料弯曲弹性模量的影响大于温度的影响。

(3) 不同盐雾老化条件下材料压缩性能。

图5为在不同盐雾老化条件下,盐度、温度以及老化时间对碳纤/玻纤混杂增强复合材料压缩强度以及压缩弹性模量的影响。研究图5中不同盐雾老化条件下曲线变化趋势不难发现:随着盐雾老化时间的增加,不同盐雾条件下材料的压缩强度、压缩弹性模量基本呈现下降趋势;在老化温度50℃、

盐度为6%条件下,材料压缩强度、压缩弹性模量分别下降21.0%,7.27%;在老化温度25℃、盐度为6%条件下,材料压缩强度、压缩弹性模量分别下降11.2%,7.27%;在老化温度50℃、盐度为3%条件下,材料压缩强度、压缩弹性模量分别下降5.85%、5.91%。可见老化温度50℃、盐度为6%条件下的材料压缩强度老化最严重,老化温度25℃、盐度为6%条件下的老化次之,老化温度50℃、盐度为3%条件下的老化最轻。



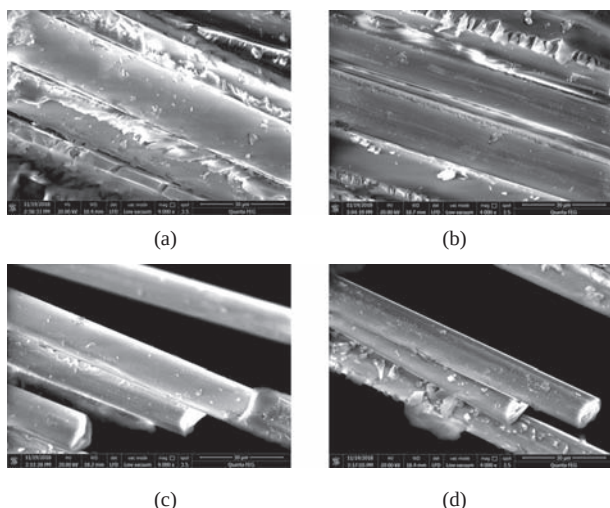
a—压缩强度; b—压缩弹性模量

图5 不同盐雾环境及老化时间时混杂增强复合材料的压缩性能

对比图5中曲线变化规律发现:1)在相同老化温度(50℃)条件下,盐度的增加会加速对材料压缩强度、压缩弹性模量的老化;2)在相同老化盐度(6%)条件下,温度的升高会加速对材料压缩强度、压缩弹性模量的老化;3)盐度对材料压缩强度、压缩弹性模量的影响大于温度的影响。

2.3 不同条件下盐雾老化前后材料SEM分析

图6为不同盐雾老化前后材料断面SEM照片。其中,图6中1#为玻纤-碳纤混杂增强复合材料老化前SEM照片,由1#可以看出,基体树脂紧紧包覆于纤维表面,说明选用基体树脂与纤维间具较好相容性。从图中2#,3#,4#可以发现,不同条件下的盐雾老化后,纤维表面树脂层均减少,被拔出基体树脂的纤维表面光滑,说明盐雾老化会削弱树脂与纤维间的粘结强度^[11-12]。



老化条件: a—老化前; b—50℃, 6% 盐雾老化 50 d; c—25℃, 6% 盐雾老化 50 d; d—50℃, 3% 盐雾老化 50 d

图6 盐雾老化前后混杂增强复合材料断面 SEM 照片 (×4000)

3 玻纤-碳纤混杂增强复合材料使用寿命模型建立及其寿命预测

3.1 混杂增强复合材料使用寿命模型建立依据

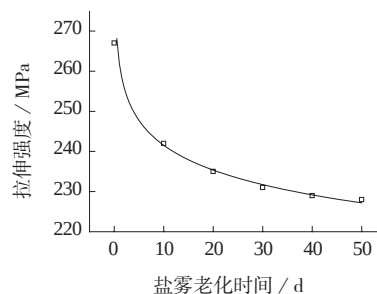
玻纤-碳纤混杂增强复合材料凭借其优异的力学性能、良好的蠕变特性、较好的电绝缘性能,引起游艇企业以及相关复合材料工作者的关注,为了更好地了解其在海洋环境下的老化规律,了解其在海洋环境下应用规律,更好地应用于游艇、渔船、巡逻艇等小型船舶建造领域,对其进行盐雾老化研究是必要的,掌握其在盐雾环境下的性能演变规律并快速预测其使用寿命具有重要的现实意义。

M. Gunyaev 等学者研究发现,以聚合物为基体的复合材料的老化过程包括两个互不干涉、相对独立的可逆、不可逆过程,对于暴露于无任何负荷条件下的聚合物基复合材料,可近似采用力学性能的强度变化表征聚合物基复合材料的性能演变规律^[13],建立剩余强度模型,提出剩余强度经验公式^[14-15],并采用剩余强度经验公式对聚合物基复合材料使用寿命进行预测^[16-17],该方法可以快速预测其使用寿命。剩余强度公式如下:

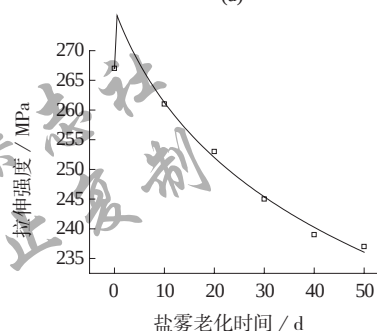
$$Y = Y_0 + a(1 - e^{-bt}) - c \ln(1 + dt) \quad (1)$$

(1) 式中, Y 为聚合物基复合材料盐雾老化后剩余强度值; Y_0 为聚合物基复合材料盐雾老化前强度值; a 为聚合物基复合材料与外部环境相互作用系数; b 为表征聚合物基复合材料固化程度系数; t 为盐雾老化时间; c 为聚合物基复合材料抗裂纹扩展系数; d 为聚合物基复合材料抗外部环境侵蚀系数。

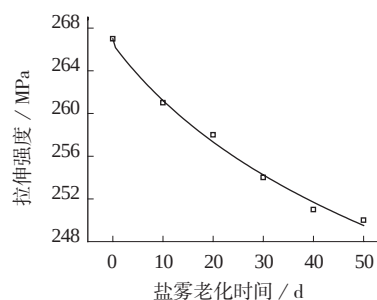
分别选取不同条件下盐雾老化后拉伸强度值为例建立寿命模型,采用 origin 软件对其不同老化条件下拉伸强度数据进行非线性拟合,分别拟合得到不同条件下盐雾老化后其剩余拉伸强度公式。图 7 为不同盐雾老化后剩余拉伸强度与老化时间拟合曲线。



(a)



(b)



(c)

a—温度 50℃、盐度 6% ; b—温度 25℃、盐度 6% ; c—温度 50℃、盐度 3%

图7 不同盐雾老化后剩余拉伸强度与老化时间拟合曲线

在温度 50℃、盐度 6% 老化条件下,剩余拉伸强度公式:

$$Y = Y_0 + 18.54(1 - e^{-1.67 \times 10^{-11}t}) - 9.38 \ln(1 + 8.61t)$$

拟合拉伸强度曲线见图 7a, 相关系数 $R^2=0.99$,

可靠性较高;

在盐雾老化温度 25℃、盐度 6% 老化条件下,剩余拉伸强度公式:

$$Y = Y_0 + 10.00(1 - e^{-366.81t}) - 23.15 \ln(1 + 0.10t)$$

拟合拉伸强度曲线见图 7b, 相关系数 $R^2=0.97$,

可靠性较高;

在温度 50℃、盐度 3% 老化条件下,剩余拉伸强度公式:

$$Y = Y_0 - 0.52(1 - e^{-173.59t}) - 14.96 \ln(1 + 0.04t)$$

拟合拉伸强度曲线见图 7c, 相关系数 $R^2=0.97$, 可靠性较高。

3.2 玻纤-碳纤混杂增强复合材料寿命预测

为了较好控制游艇用纤维增强塑料性能指标, 提高游艇企业纤维增强塑料制作水平, 中国船级社要求对拟入级游艇船体最薄处材料进行检验, 满足《材料与焊接规范》2018 版最低性能要求。由于此规范中缺少碳纤维名义纤维含量定义说明, 本次计算近似采用相同规格碳纤维名义含量等同相同规格玻璃纤维的原则, 并按下列公式计算其总名义玻璃纤维含量 $M^{[17]}$:

$$M = \frac{N}{\frac{N_1}{M_1} + \frac{N_2}{M_2} + \dots + \frac{N_n}{M_n}} \quad (2)$$

式中: $N_1, N_2, \dots, N_n$ 为不同增强材料单位面积质量, 单位为 g; $N=N_1+N_2+\dots+N_n$, 为所有增强材料单位面积总质量, 单位为 g; $M_1, M_2, \dots, M_n$ 为在不同成型条件下每个铺层的名义玻纤含量 (质量百分比), 单位为 %。

其中, 真空成型短切毡名义玻纤含量为 36%, 真空成型正交布名义玻纤含量为 58%, 根据玻纤-碳纤铺层工艺计算, 得到本次试验制备的材料的名义玻纤含量约为 49.0%, 并按《材料与焊接规范》中相关要求, 计算其性能要求最低值 (约为 190 MPa)。

根据以上老化数据, 三种不同条件下的盐雾老化中, 温度 50℃、盐度 6% 老化条件下老化最为严重, 故选取此条件对其进行寿命预测。采用 origin 对其拉伸强度数据进行非线性拟合, 拟合温度 50℃、盐度 6% 老化条件下, 剩余拉伸强度公式, 当 $t=2000$ d 时, 得到剩余拉伸强度为 194 MPa, 此计算值与规范要求最低值比较接近。

4 结论

(1) 盐雾老化前后, 特征官能团的吸收峰位置未发生任何变化。

(2) 在不同的盐雾老化条件下, 材料力学性能均随着盐雾老化时间的增加而降低, 且在盐雾老化初期性能降低幅度较大。

(3) 在 G. M. Gunyaev 剩余强度基础上, 采用 origin 对其拉伸强度数据进行非线性拟合, 拟合得

到温度 50℃、盐度为 6% 老化条件下的剩余拉伸强度公式:

$$Y = Y_0 + 18.54(1 - e^{-1.67 \times 10^{11}t}) - 9.38 \ln(1 + 8.61t)$$

相关系数 $R^2=0.99$; 在老化温度 25℃、盐度 6% 老化条件下, 剩余拉伸强度公式:

$$Y = Y_0 + 10.00(1 - e^{-366.81t}) - 23.15 \ln(1 + 0.10t)$$

相关系数 $R^2=0.97$; 在温度 50℃、盐度 3% 老化条件下, 剩余拉伸强度公式:

$$Y = Y_0 - 0.52(1 - e^{-173.59t}) - 14.96 \ln(1 + 0.04t)$$

相关系数 $R^2=0.97$ 。

(4) 结合中国船级社 (CCS)《材料与焊接规范》2018 版要求, 对本研究中玻纤-碳纤混杂增强复合材料最低拉伸强度进行计算, 拉伸强度最低值为 190 MPa, 在老化最严重的盐雾环境 (即温度 50℃、盐度 6%) 下进行寿命预测, 预测此材料在上述条件下可使用约 2000 天。

参考文献

- [1] 周祖福. 复合材料学 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 1995.
Zhou Zufu. Composites Science [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 1995.
- [2] 王耀先. 复合材料力学与结构设计 [M]. 上海: 华东理工大学出版社, 2012.
Wang Yaoxian. Mechanics and structural design of composite materials [M]. Shanghai: East China University of Technology Press, 2012.
- [3] 刘清, 朱四荣, 梁娜. 不同铺层角度玻璃钢长期蠕变性能的研究 [J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2017(5):53-56.
Liu Qing, Zhu Sirong, Liang Na. Study on long-term creep behavior of FRP at different layer angles [J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2017 (5):53-56.
- [4] 张承双, 包艳玲, 刘宁, 等. 热空气老化对 PBO/T700 层间混杂复合材料力学性能的影响 [J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2017(1):25-29.
Zhang Chengshuang, Bao Yanling, Liu Ning, et al. Effects of hot air aging on mechanical properties of PBO / T700 interlaminar hybrid composites [J]. Fiber Reinforced Plastics / composites, 2017 (1):25-29.
- [5] 金鑫, 隋刚, 杨小平. T700 碳纤维 / 环氧树脂复合材料热降解试验研究 [J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2017(11):56-61.
Jin Xin, Sui Gang, Yang Xiaoping. Thermal degradation of T700 carbon fiber / epoxy resin composites [J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2017 (11):56-61.
- [6] 朱坤坤, 倪爱清, 王继辉. 苧麻 / 玻璃纤维混杂复合材料的老化研究及寿命预测 [J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2016(5):48-54.
Zhu Kunkun, Ni Aiqing, Wang Jihui. Aging research and life prediction of ramie / glass fiber hybrid composites [J]. FRP /

- Composites, 2016 (5):48–54.
- [7] 魏屈平, 倪爱清, 张鸿, 等. 氙灯加速老化对聚酯纤维 / PVC 柔性复合材料力学性能影响的研究 [J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2017(9):82–88.
- Wei QuPing, Ni AiQing, Zhang Hong, et al. The study of accelerated aging of artificial xenon arc lamp on the bursting and tearing properties of polyester fiber / PVC flexible composite[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2017(9):82–88.
- [8] Wei Quping, Ni AiQing, Zhang Hong, et al. Study on the effect of accelerated aging of xenon lamp on the mechanical properties of polyester fiber / PVC flexible composites[J]. Fiber Reinforced Plastics / composites, 2017 (9):82–88.
- [9] 刘观政, 李地红, 黄力刚, 等. 玻璃钢在盐雾环境中腐蚀机制和性能演变规律的实验研究 [J]. 玻璃钢 / 复合材料, 2008(1):35–40.
- Liu Guanzheng, Li Dihong, Huang Ligang, et al. Experiments on corrosion mechanism and performance evolution rule of GFRP in salt steam environment[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2008(1):35–40.
- [10] 蒋竟. 玻璃钢在盐雾环境中腐蚀机制和性能演变规律的试验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- Jiang Jing. Experimental research on corrosion mechanism and properties evolution of FRP in salt-fog environment[D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2007.
- [11] Zheng Z Y, Li Y, Yang W D. Absorption properties of natural fiber-reinforced sandwich structures based on the fabric structures[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2013, 32 (20):1 561–1 568.
- [12] Rahaman A, Kar K K. Carbon nanomaterials grown on E-glass fibers and their application in composite[J]. Composites Science & Technology, 2014, 101 (8):1–10.
- [13] 叶宏军, 詹美珍, 古尼耶夫, 等. T300/4211 复合材料的使用寿命评估 [J]. 材料工程, 1995(10): 3–5.
- Ye Hongjun, Zhan Meizhen, 古. Г. М., et al. In-service durability prediction of T300 / 4211 composites[J]. Journal of Materials Engineering, 1995(10): 3–5.
- [14] 肇研, 梁朝虎. 聚合物基复合材料自然老化寿命预测方法 [J]. 航空材料学报, 2001(2): 55–58.
- Zhao Yan, Liang ZhaoHu. The estimating method of atmospheric aging age on polymer matrix composites[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2001(2): 55–58.
- [15] 乔海霞, 顾东雅, 曾竟成. 聚合物基复合材料加速老化方法研究进展 [J]. 材料导报, 2007(4): 48–51.
- Qiao Haixia, Gu Dongya, Zeng Jingcheng. Accelerated aging methods of polymeric composites and the state of the art[J]. Materials Review, 2007(4): 48–51.
- [16] Fan Z, Santare M H, Advani S G. Interlaminar shear strength of glass fiber reinforced epoxy composites enhanced with multi-walled carbon nanotubes[J]. Composites Part A, 2008, 39(3): 540–554.
- [17] 赵洋. 海水和紫外环境下 GFRP 性能演变规律的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- Zhao Yang. Study on the evolution of GFRP performance in seawater and ultraviolet environment[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
-
- (上接第 84 页)
- [6] Behzadi S, Jones F R. Yielding behavior of model epoxy matrices for fiber reinforced composites: effect of strain rate and temperature[J]. Journal of Macromolecular Science Part B, 2005, 44(6):993–1 005.
- [7] Khan M Z S, Simpson G, Townsend C R. A comparison of the mechanical properties in compression of two resin systems[J]. Materials Letters, 2002, 52(3):173–179.
- [8] Chen Weinong, Lu Frank, Cheng Ming. Tension and compression tests of two polymers under quasi-static and dynamic loading[J]. Polymer Testing, 2002, 21(2):113–121.
- [9] 王绪财, 彭刚, 冯家臣, 等. 应变率对乙烯基酯树脂压缩力学行为影响的研究 [J]. 工程塑料应用, 2010, 38(5):59–61.
- Wang Xucai, Peng Gang, Feng Jiachen, et al. Effect of strain rate on compressive behavior of vinyl ester resin[J]. Engineering Plastics Application, 2010, 38(5):59–61.
- [10] Fard M Y, Liu Yingtao, Chattopadhyay A, et al. Characterization of epoxy resin including strain rate effects using digital image correlation system[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2012, 25(2):308–319.
- [11] 安静波, 王仲莉. 不饱和聚酯浇铸体拉伸性能与固化度的关系 [J]. 热固性树脂, 1998(2):26–28.
- An Jingbo, Wang Zhongli. The relation of the tensile property of unsaturated polyester casting matrix to its curing degree[J]. Thermosetting Resin, 1992(2):26–28.
- [12] 刘卓峰, 冯学斌, 肖加余, 等. 低粘度环氧树脂浇铸体性能与固化度的关系 [J]. 材料导报, 2009, 23(20):26–28.
- Liu Zhuofeng, Feng Xuebin, Xiao Jiayu, et al. Relation of the property of a low viscosity epoxy resin casting matrix to its degree of cure[J]. Materials Review, 2009, 23(20):26–28.
- [13] Rudolf R. Thermosets[M]. Shanghai: Donghua University Press, 2009, 91–94.
- [14] Kalidindi S R, Abusafieh A, El-Danaf E. Accurate characterization of machine compliance for simple compression testing[J]. Experimental Mechanics, 1997, 37(2):210–215.