

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.01.022

纤维增强树脂基复合材料芯模拟湿热老化性能

毛南平¹, 陈中伟², 卞荣³, 陈科技³, 王志伟², 张玉庆²

(1. 国网宁波供电公司, 浙江宁波 315000; 2. 中复碳芯电缆科技有限公司, 江苏连云港 222000;

3. 浙江省电力有限公司经济技术研究院, 杭州 310000)

摘要: 为研究碳纤维导线主要受力载体——碳纤维复合芯棒在湿热、高温等环境下性能的变化, 通过湿热老化和热暴露试验, 从失重率、拉伸强度、弯曲强度以及玻璃化转变温度(T_g)等方面分析了复合芯棒性能的衰减情况, 并通过模型预测了碳纤维导线的使用寿命。结果表明, 湿热老化后芯棒的 T_g 和拉伸强度有所降低, 弯曲强度有所提高; 热暴露试验中, 随着热暴露时间的增加, 芯棒的 T_g 略微降低, 拉伸强度基本无变化, 质量略微减少; 通过模型得出碳纤维复合芯在156.5℃的环境中经过40年, 其性能才衰减30%失效, 所以在正常使用条件下, 碳纤维导线使用寿命可以得到保障。

关键词: 碳纤维复合芯棒; 输电线路; 热暴露; 湿热老化; 玻璃化转变温度; 力学性能

中图分类号: TQ32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)01-0114-06

Properties of Fiber Reinforced Resin Matrix Composite Cores Simulating Wet and Hot Aging

Mao Nanping¹, Chen Zhongwei², Bian Rong³, Chen Keji³, Wang Zhiwei², Zhang Yuqing²

(1. State Grid Ningbo Power Supply Co., Ltd., Ningbo 315000, China; 2. China Carbon Core Cable Technology Co., Ltd., Lianyungang 222000, China; 3. Economic and Technological Research Institute of Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract: In order to study the performance changes of carbon fiber composite cores—the main force carriers of carbon fiber wires under hot and humid environment, the attenuation of composite cores was analyzed from the aspects of weight loss rate, tensile strength, bending strength and glass transition temperature (T_g) through hygrothermal aging and heat exposure test, and the service life of carbon fiber conductors was predicted through the model. The results show that the T_g and tensile strength of the mandrel decrease and the bending strength increases after hygrothermal aging. In the heat exposure test, with the increase of the heat exposure time, T_g of mandrel decreases slightly, tensile strength basically remains unchanged, and mass decreases slightly. According to the model, the performance of the carbon fiber composite core only attenuates 30% to failure after 40 years at 156.5℃. Therefore, the service life of the carbon fiber conductor can be guaranteed under normal service conditions.

Keywords: carbon fiber composite core; transmission lines; heat exposure; hygrothermal aging; glass transition temperature; mechanical property

碳纤维复合芯软铝型导线是一种新型节能增容架空输电导线, 该导线在力学性能、热学和电气性能等方面均优于传统导线, 具有载流量大、耐高温、能耗低、耐腐蚀、档距大、弧垂小、寿命长等特点, 这使其在换线不换塔的旧线路增容改造工程与全寿命周期经济性的新建线路工程上很有优势。

碳纤维增强树脂基复合芯棒应用于输电线路

导线承力结构, 复合芯棒吸湿会对其耐温性能和力学性能产生不利影响, 因此湿热是影响复合芯棒的一个重要的环境因素, 需要着重考虑。复合芯棒湿热性能评估往往采用加速的湿热试验条件, 过去的研究中湿热条件选取并不一致, 吸湿温度和时间变化范围很大, 导致所得数据无法进行直接对比, 甚至在定性规律上也会有很大差异, 这不利于复合芯棒

基金项目: 国网浙江省电力有限公司科技项目 (5211YJ180013)

通信作者: 陈中伟, 主要研究方向为复合材料 E-mail: chenzhongwei@lzfip.com

收稿日期: 2020-10-19

引用格式: 毛南平, 陈中伟, 卞荣, 等. 纤维增强树脂基复合材料芯模拟湿热老化性能 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(1): 114–119.

Mao Nanping, Chen Zhongwei, Bian Rong, et al. Properties of fiber reinforced resin matrix composite cores simulating wet and hot aging[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(1): 114–119.

湿热性能的科学评价和长期使用寿命的预测分析。

近年来,国内一些企业掌握了碳纤维复合导线的关键生产技术,但在老化性能及老化评估方面还有很多工作需要开展。由于碳纤维导线发展和使用时间较短,包括欧美、日韩在内的发达国家对其老化机理的研究尚处于起步阶段,国内还未开始系统性研究,没有形成统一的老化寿命评估标准和依据。美国 CTC 公司、日本东丽公司对复合芯棒的老化寿命研究仅仅是利用了阿列纽斯模型进行高温热老化寿命估算,并没有考虑环境因素(湿热、化学、机械张力)对其寿命的影响^[2]。

笔者通过湿热老化和热暴露试验,从失重率、拉伸强度、弯曲强度以及玻璃化转变温度(T_g)等方面分析了复合芯棒性能的衰减情况,并通过模型预测了碳纤维导线的使用寿命。

1 碳纤维增强树脂基复合材料老化机理

碳纤维导线长期暴露在外环境,既要承受导线的高温运行,也要遭受雨水环境的侵蚀。碳纤维芯棒吸湿后会膨胀,导致 T_g 降低、线膨胀系数增大,层间强度下降。水分子进入到界面可以使界面脱粘,引起树脂溶胀,这样界面会产生横向应力,破坏界面,并沿着界面进入纤维,破坏纤维的组织结构。一般情况下,吸湿不会引起碳纤维复合芯发生明显的轴向性能变化,而径向压缩、层间剪切等性能会发生明显变化,高温条件下也会发生明显的变化。另外,吸收的水分子还会弱化氢键的作用,诱发芯棒产生裂纹并使之扩大^[3-4]。

碳纤维芯棒受温度影响的机理主要有两方面:一是纤维和基体的受热膨胀不匹配,树脂受到高温分解,分子链断裂重组,导致微小裂纹增加,降低复合芯棒层间剪切强度;二是较高的工作温度引起芯棒内部的热应力,以及温度超过其 T_g 时,基体的塑性增加,导致基体膨胀,并且减弱界面的化学和摩擦结合力,也会降低界面强度和界面应力状态^[5-6]。

2 碳纤维复合芯棒湿热老化试验

2.1 试验样品

碳纤维复合芯棒由碳纤维、玻璃纤维、环氧树脂等材料高温固化而成,准备 F1B-8.00 和 F1B-9.50 芯棒各 15 根,芯棒主要技术参数见表 1。

2.2 试验步骤

湿热环境影响碳纤维芯棒是湿度与温度的协同作用。由于复合芯棒中的碳纤维不吸湿,玻璃纤维的耐水性能优良,所以湿热环境主要通过树脂基

表 1 芯棒主要技术参数

项目	F1B-8.00	F1B-9.50
直径/mm	8.00 ± 0.05	9.50 ± 0.05
拉伸强度/MPa	≥ 2 100	≥ 2 100
拉伸弹性模量/GPa	≥ 110	≥ 110
线膨胀系数/ K^{-1}	≤ 2.0×10^{-6}	≤ 2.0×10^{-6}
密度/($g \cdot cm^{-3}$)	≤ 2.0	≤ 2.0
卷绕(55 d , 1 圈)	不开裂、不断裂	不开裂、不断裂
扭转(170 d , 360°)	表层不开裂	表层不开裂
T_g (DMA 法)/°C	≥ 190	≥ 190
高温拉伸强度 (160°C × 401 h)/MPa	≥ 95%RTS(极限 拉伸强度)	≥ 95%RTS
紫外光老化性能 (1 008 h)	表面不发黏,无裂纹和 龟裂现象,纤维不裸露	表面不发黏,无裂纹和 龟裂现象,纤维不裸露
盐雾试验(240 h)	表面不出现腐蚀产物 和缺陷	表面不出现腐蚀产物 和缺陷

体、纤维与树脂界面影响其性能。温度和湿度对芯棒性能的作用效果存在有利和不利的一面,树脂或界面的破坏以及树脂的后固化作用,主导作用决定了芯棒性能的变化^[7-9]。按照 GB/T 2423.4-2008 设计如下湿热老化试验:①环境温度为 $(25 \pm 3)^\circ C$, 试验箱内相对湿度 ≥ 95%;② 12 h+12 h 循环,试验箱温度分别设置 60, 80, 100 °C,应在 2.5 ~ 3.5 h 达到设定高温值,保温至 12 h;③降温,应在 3 h ~ 6 h 内降至 $(25 \pm 3)^\circ C$,并保温直至 24 h 一个循环结束。

2.3 性能测试

(1) 失重率。

失重率按公式 (1) 进行计算。

$$TG_t = \frac{W_t - W}{W} \times 100\% \quad (1)$$

式中: TG_t ——在 t 温度下的失重率;

W_t —— t 温度下试验样品的质量;

W ——试验前样品的质量。

(2) 拉伸强度。

准备 70D 标距(D 为芯棒直径)+400 mm 长的复合芯棒并用 100 ~ 400 目砂纸打磨芯棒两端 200 mm 长位置,安装好碳纤维复合芯专用金具后进行试验。

(3) 弯曲强度。

加载压头置于跨距的中点,分别对各个试样连续加载,直到表面纤维破裂或试样挠度达到 1.5 倍高度时试验终止。记录破坏载荷或挠度达到 1.5 倍高度的最大载荷。

(4) T_g 。

按照 GB/T 29324-2012 采用动态热机械分析

(DMA)法测定 T_g 。

2.4 测试结果

表2示出试样不同温度湿热处理后的性能。由表2可看出,湿热老化后复合芯棒的失重率很小。拉伸强度有所下降,主要是因为水分对纤维的影响是不可逆的影响,表现为由腐蚀引起纤维强度的损失^[10]。湿热处理温度60℃时,弯曲强度略微降低。湿热处理温度80℃时影响最大,弯曲强度最低。但

是100℃湿热处理时弯曲强度增高,超过了初始试样的弯曲强度,主要因为在芯棒的基体与纤维界面之间,由于高温导致的膨胀会使芯棒产生内应力,弯曲强度也会增加。湿热老化后芯棒的 T_g 降低,主要是因为水分的存在可以使树脂基体发生溶胀现象,促使基体大分子间的间距增加,因而使基体分子内刚性基团的活性增加,从而使吸水后复合材料的 T_g 下降^[11]。

表2 不同湿热温度处理后的性能

项目	原始样品		60℃湿热处理		80℃湿热处理		100℃湿热处理	
	F1B-8.00	F1B-9.50	F1B-8.00	F1B-9.50	F1B-8.00	F1B-9.50	F1B-8.00	F1B-9.50
失重率/%	0	0	0.037	0.032	0.028	0.026	0.040	0.034
拉伸强度/MPa	2 686	2 672	2 660	2 535	2 593	2 447	2 597	2 594
弯曲强度/MPa	669	654	660	647	652	609	693	662
T_g /℃	210	217	205	211	211	210	209	209

3 碳纤维复合芯棒热暴露试验

3.1 试验过程

按照 ASTM B987/B987M-2017 进行试验。将芯棒分别静置在160℃和180℃空气循环烘箱中暴露52周,每周测试芯棒失重,每月测试一次芯棒拉伸强度。

3.2 外观及性能分析

图1为不同温度下芯棒热暴露3月后外观变化,图2~图4为质量、拉伸强度和 T_g 变化。



图1 不同温度下芯棒热暴露3月后外观
a—160℃; b—180℃

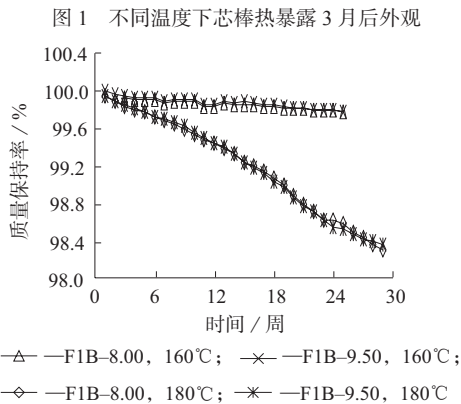


图2 质量随时间的变化

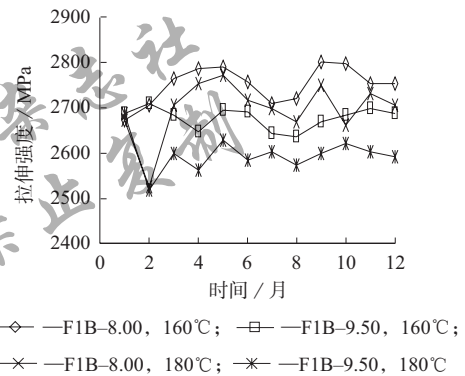


图3 拉伸强度随时间的变化

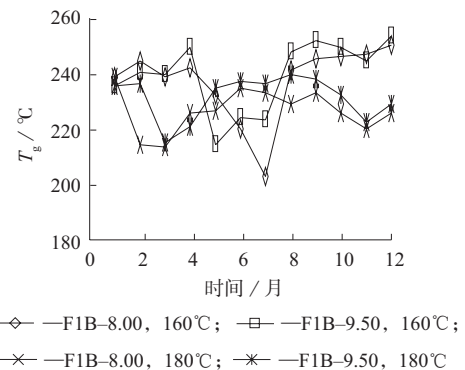


图4 T_g 随时间的变化

可以看出,在热暴露过程中,芯棒质量逐渐减少。温度越高,失重速度越快,这可能是芯棒树脂中的小分子受热分解挥发。观察160℃和180℃处理的芯棒表面,发现经过多次循环后,180℃芯棒表面树脂的粉化和填料的剥落,引起较大的质量变化。随着热暴露时间的延长,芯棒拉伸强度除了小范围的上下波动,并未发现明显的下降趋势,F1B-8.00

规格的芯棒拉伸强度甚至还出现上升的趋势。在 160℃或 180℃环境下,经历长达 12 个月热暴露试验后,芯棒的拉伸强度衰减不到 10%,说明芯棒力学性能稳定,可能需要更长时间的试验来总结其老化规律。从芯棒 T_g 随热暴露时间的变化曲线可知,随着热暴露时间延长,不同规格以及不同温度处理下,芯棒 T_g 均会出现一个极小值,并且随着热暴露温度的提高,出现该极小值的时间越短,这说明提高芯棒的使用温度,会促进芯棒中树脂基体结构的老化降解。树脂基体在热氧老化中所发生的交联密度变化或物理老化,在热固性树脂体系的老化过程中,如果忽略残余低分子物的挥发和脱湿,可能使复合材料的 T_g 提高,而交联网络的热氧降解会使 T_g 降低^[12]。从 T_g 随时间变化的曲线还可以看出,在老化温度为 160℃时,前 3 个月芯棒的 T_g 出现升高趋势,说明此时间段内树脂基体后固化起主要作用,交联网络密度增加,从而导致了 T_g 的提高;在 3~6 个月, T_g 出现下降趋势,说明此时间段内树脂基体的热氧老化起主要作用,交联网络的热氧降解使 T_g 降低;但在第 6 个月之后, T_g 又出现提高的趋势,可能是由于树脂基体中小分子物质向材料外的迁移和挥发,该过程延缓了树脂基体的热氧老化。但随着老化温度升高到 180℃,这个过程也会加快,树脂基体的热氧老化又起主要作用,会使碳纤维芯棒的 T_g 呈下降趋势。

4 碳纤维复合芯导线性能变化规律与老化模型

在碳纤维复合芯导线线路运行过程中,导线电流的潮汐变化会引起导线温度的变化,导线温度的变化直接导致复合芯附近湿度的变化。同时,天气因素、风力大小也会直接影响复合芯的温湿度场。

复合材料的寿命预测问题受多种环境因素的影响,根据老化过程中出发点的不同和描述参数的不同,大致可将聚合物基复合材料腐蚀寿命预测的方法分为三大类:一是根据动力学原理建立的阿伦尼乌斯模型;二是 Y·M·古尼耶夫等建立的剩余强度模型;三是基于应力松弛理论建立的应力松弛时间模型。

(1) 阿伦尼乌斯模型。

阿伦尼乌斯模型源于对动力学曲线模型的研究,该模型的外推在橡胶材料的老化寿命研究中得到广泛应用^[13]。阿伦尼乌斯模型是从相交的分子或原子间化学反应而发生性能失效现象,得出表征橡胶性能退化率与温度活化能间的关系,见式(2)。

$$\frac{\partial M}{\partial t} = A_0 \exp \frac{\Delta E}{KT} \quad (2)$$

其中: M ——橡胶性能退化参量;

t ——时间;

A_0 ——常数;

ΔE ——失效机理活化能;

K ——玻尔兹曼常数, 1.38×10^{-23} J/K;

T ——热力学温度。

(2) 剩余强度模型。

Y·M·古尼耶夫等认为,聚合物基复合材料的老化过程中存在可逆和不可逆的性能变化。既对材料性能有着正面的影响,增强材料;也对材料性能有负影响,损伤材料^[14]。在这种理论基础之上,对暴露于环境中的热固性复合材料而言,假设其正面影响与负面影响均是相互独立的,那么这种情况下由不可逆变化造成的相应强度变化可用式(3)表示。

$$S_a = S_{a0} + \eta_a(1 - e^{-\lambda_{at}}) - \beta_a \ln(1 + \theta_{at}) \quad (3)$$

式中: S_a ——复合材料老化一定时间后的强度值;

S_{a0} ——复合材料的初始强度值;

η_a, β_a ——材料常数;

$\lambda_{at}, \theta_{at}$ ——材料基体影响状态参数。

(3) 应力松弛时间模型。

松弛时间是指材料完成一个松弛过程需要的时间,而一个完整的松弛过程指聚合物从一个平衡状态通过分子的运动达到与外力相适应的一个新的平衡状态的过程。早在研究玻璃纤维增强复合材料的破坏动力学过程中就发现了材料的破坏速率主要是由两个方面的因素来决定,一是材料表面微裂纹的大小;二是材料与环境介质之间的相互参数^[15]。材料溶胀后体积变化的应力松弛时间模型可用式(4)表示。

$$\tau = \tau_0 a x^{-f} \exp\left(-\frac{b\sigma}{RT}\right) \left(\ln V_2^{-\frac{1}{3}}\right) \frac{B}{2.303 f_0} (T - T_0) \exp\left(\frac{f_0}{af}\right) + (T - T_0) \quad (4)$$

式中: τ, τ_0 ——溶胀后、溶胀前的松弛时间;

x ——环境相对湿度;

f ——环境介质与材料之间相互作用的参数;

σ ——老化剩余应力;

R ——气体常数;

V_2 ——溶胀后聚合物的体积膨胀率;

f_0 ——反应速度常数;

T_0 ——初始环境温度;

a, b, B ——常数。

(4) 性能参数退化方程。

假设试样初始性能参量为 M_0 , 时间 t 对应的性能参量为 M_t , 当温度 T 恒定时, 试样性能随时间的变化可用式 (5) 表示。

$$M_t = M_0 + A_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{KT}\right)t \quad (5)$$

从上式可知, 当材料所处的环境温度 T 一定时, 材料的性能与时间 t 线性相关。因此, 可以对复合材料在一定温度下劣化后的性能与其所经历的老化时间进行线性拟合, 令 $x=t$, $y=M_t$, 设其拟合关系为 $y=a+bx$ 。

但由于环氧复合材料性能的离散性, 其性能的相关值并不一定准确落于其线性拟合的回归方程上, 因此 $a=M_0$ 为待定系数; $b=\exp(-\Delta E/KT)$ 。通过最小二乘法并采用 MATLAB 编程对数据进行计算并拟合, 160℃复合芯拉伸强度拟合结果见图 5。

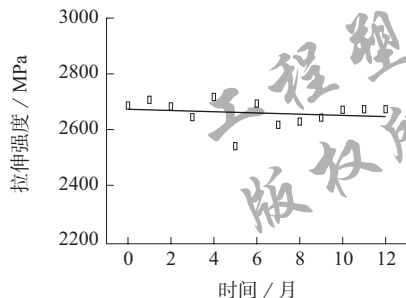


图 5 复合芯拉伸强度变化拟合曲线

得到: $a=2672.86$, $b=-2.1984$ 。由此, 材料在 160℃性能劣化方程为:

$$M_t = 2672.86 - 2.1984t \quad (6)$$

同理, 对材料在 180℃和 200℃温度下的数据进行拟合, 结果见图 6、图 7。

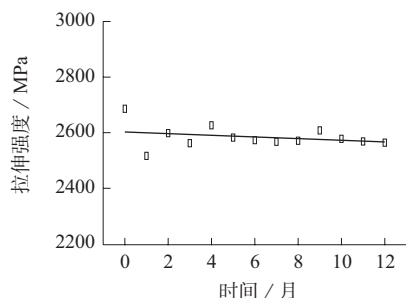


图 6 复合芯拉伸强度变化拟合曲线

材料在 180℃性能劣化方程为:

$$M_t = 2602.63 - 2.9814t \quad (7)$$

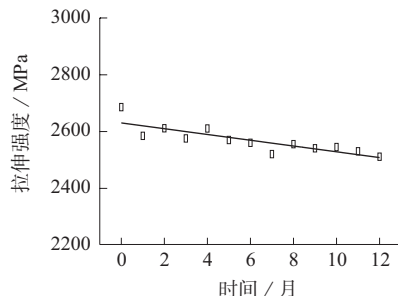


图 7 复合芯拉伸强度变化拟合曲线

在 200℃性能劣化方程为:

$$M_t = 2630.50 - 10.1658t \quad (8)$$

对于复合芯而言, 为了提高安全系数, 选定以拉伸强度下降 30% 作为老化性能失效的临界值。根据上述复合芯在 160, 180, 200℃性能劣化方程, 可得到复合芯在这三个温度下性能降低 30% 所要经历的时间。

由于温度高于 100℃时, 复合芯表面的湿度很低, 因此可以当作纯热老化, 复合芯的热老化方程可用式 (9) 表示。

$$\ln t = a + b/T \quad (9)$$

通过对复合芯在 160, 180, 200℃性能降低 30% 时所经历的时间等数据, 采用最小二乘法可以推出回归方程, 回归方程可表示为 $y=a+bx$ 形式, 其中 $x=1/T$, $y=\ln t$, 即可得出复合芯热寿命方程模型。

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} = 2.2097 \times 10^{-3} \quad (10)$$

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^n \frac{y_i}{n} = 5.2261 \quad (11)$$

计算其斜率 b 如下:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n \bar{x} \bar{y}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n \bar{x}^2} \quad (12)$$

Y 轴截距 a 为:

$$a = \bar{y} - b \bar{x} \quad (13)$$

按照上述理论方程, 复合芯热寿命方程为:

$$\ln t = -12.5238 + 8032.9 / T \quad (14)$$

对上述复合芯老化寿命曲线作图, 如图 8 所示。从图 8 可以看出, 碳纤维复合芯在 156.5℃的环境中经过 40 年, 其性能才衰减 30% 到失效。

5 结语

(1) 湿热老化后芯棒的 T_g 和拉伸强度有所降低,

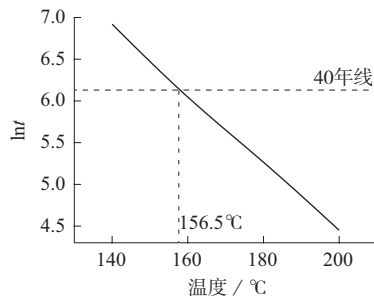


图8 复合芯老化寿命曲线

弯曲强度有所提高;

(2) 随着热暴露时间的增长,芯棒的 T_g 略微降低,拉伸强度基本无变化,质量略微减少;

(3) 通过模型得出碳纤维复合芯在 156.5℃ 的环境中经过 40 年,其性能才衰减 30% 失效,所以在正常使用条件下,碳纤维导线使用寿命可以得到保障。

参考文献

- [1] 何州文,陈新,杨长龙,等. 碳纤维复合芯架空输电导线 [M]. 北京:中国电力出版社,2017:1-6.
He Zhouwen, Chen Xin, Yang Changlong, et al. Carbon fiber composite core overhead transmission wires[M]. Beijing:China Electric Power Press,2017:1-6.
- [2] 杨长龙,李瑞,陈玲,等. 碳纤维复合芯架空导线长期运行老化后性能研究 [J]. 腐蚀科学与防护技术,2019,31(3):365-370.
Yang Changlong, Li Rui, Chen Ling, et al. Performance Variation of aluminum conductor with carbon fiber composite core after long-term service[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2019,31(3):365-370.
- [3] 王莉莉. 碳纤维/乙烯基酯树脂拉挤复合材料的环境老化行为研究 [D]. 北京:北京化工大学,2004.
Wang Lili. Effects of environment on pultruded carbon fiber/vinyl ester resin composite[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology,2004.
- [4] 过梅丽,肇研,谢令. 航空航天结构复合材料湿热老化机理的研究 [J]. 宇航材料工艺,2002(4):53-56.
Guo Meili, Zhao Yan, Xie Ling. Study on hygrothermal ageing mechanisms of aerospace structural composites[J]. Aerospace Materials Technology,2002(4):53-56.
- [5] 郭旭,黄玉东,曹海琳. 玻璃纤维/甲基硅树脂复合材料高温及耐湿热性能的研究 [J]. 航空材料学报,2004,24(4):45-48.
Guo Xu, Huang Yudong, Cao Hailin. Study on high-temperature and moist resistant properties of glass fiber/methylsilicone composites[J]. Journal of Aeronautical Materials,2004,24(4):45-48.
- [6] 管国阳. 湿热环境下复合材料的混合型层间断裂韧性 [D]. 西安:西北工业大学,2001.
- Guan Guoyang. The mixed-mode interlaminar fracture toughness of composites laminate on hygrothermal conditions[D]. Xi'an:Northwest University of Technology,2001.
- [7] 任超. 苧麻/聚乙烯复合材料热氧老化性能与机理 [D]. 南京:南京林业大学,2009.
Ren Chao. Study on thermo-oxidative aging of the ramie fiber/polyethylene composites properties and its mechanism[D]. Nanjing:Nanjing Forestry University,2009.
- [8] 周萌. GFRP 与 BFRP 复合材料的湿热耐久性性能研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
Zhou Meng. Study on hygrothermal ageing of glass and basalt fiber based FRP composites[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2013.
- [9] 沈辉. 环氧树脂固化体系的湿热老化性能研究 [D]. 武汉:武汉理工大学,2009.
Shen Hui. Study on wet and hot aging performance of epoxy resin curing system[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology, 2009.
- [10] 张婷. 复合材料的耐腐蚀、耐老化研究 [D]. 武汉:武汉理工大学,2012.
Zhang Ting. Study on corrosion resistance and aging resistance of composite materials[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology, 2012.
- [11] 李波. 湿热老化对环氧树脂复合材料电学性能影响研究 [D]. 武汉:武汉理工大学,2010.
Li Bo. Study on the effect of hydrothermal on electrical properties of epoxy resin composites[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology,2010.
- [12] 曹东. 三种碳纤维复合材料环境适应性研究 [D]. 北京:北京航空航天大学,2012.
Cao Dong. Study on environmental adaptability of three kinds of carbon fiber composite materials[D]. Beijing:Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2012.
- [13] 曾玮. 碳纤维缠绕复合材料 NOL 环的湿热老化行为 [D]. 北京:北京化工大学,2008.
Zeng Wei. The hygrothermal aging and lifetime prediction of carbon fiber filament-wound NOL rings[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology,2008.
- [14] Karbhari V M. Dynamic mechanical analysis of the effect of water on E-glass-vinylester composites[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites,2006,25(6):631-644.
- [15] Shu L, Cao J, Wu L, et al. Effects of the contour of DC insulators on icing flashover process and flashover voltage[C]//International conference on properties & applications of dielectric materials. IEEE Xplore,2003.