

# 老化对风电叶片用环氧树脂性能的影响

卢 敏<sup>1</sup>, 唐先贺<sup>2</sup>

(1. 湖南工业大学 包装新材料与技术重点实验室, 湖南 株洲 412007;  
2. 株洲时代新材料科技股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

**摘 要:** 采用差式扫描量热法、红外光谱分析法、静态力学分析法测试了树脂浇注体老化前后的玻璃化转变温度  $T_g$  和力学强度参数, 并对环氧树脂浇注体的老化机理进行了分析。结果表明: 经 240 h 湿热和盐雾老化后力学强度参数值和  $T_g$  都下降了, 而经 240 h 冷热循环老化后力学强度参数值和  $T_g$  均有所提高。老化机理分析表明: 湿热和盐雾老化后, 树脂浇铸体由于水分子的浸入, 产生了增塑效果, 导致力学性能和  $T_g$  下降; 而冷热老化后, 树脂发生后固化反应, 分子链交联密度进一步增大, 因此, 力学性能和  $T_g$  均提高。

**关键词:** 环氧树脂; 老化; 力学性能; 玻璃化转变温度

中图分类号: TQ323.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2011)04-0033-04

## Effects of Aging on Properties of Epoxy Resin for Wind Turbin Blade

Lu Min<sup>1</sup>, Tang Xianhe<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of New Materials and Technology for Packaging, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China; 2. Zhuzhou Times New Materials Technology Co., Ltd, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract :** By means of DSC, FITR and static mechanic tests, determined the glass transition temperature  $T_g$  and mechanical properties of epoxy resin castings before and after aging. The results showed that the mechanical properties and  $T_g$  decreased after 240 h hydrothermal aging and salt-spray test, while after 240 h thermal circulation aging, the mechanical properties and  $T_g$  increased. The aging mechanism analysis showed that after hydrothermal aging and salt-spray aging,  $T_g$  and mechanical properties decreased owing to the plasticization caused by water molecules immersion, while after thermal circulation aging, the  $T_g$  and mechanical properties increased because of cross-linking density caused by post-curing.

**Keywords :** epoxy resin; aging; mechanical properties; glass transition temperature

## 0 引言

风能作为一种清洁的可再生能源, 其开发潜力已被世界各国所认可。在发电机功率确定的条件下, 如何提高发电效率, 以获得更大的风能, 一直是风力发电追求的目标。叶片是风力发电机组有效捕获风能的关键部件, 而捕风能力的提高与叶片尺寸参数(如形状、长度和面积等)有着密切的关系, 叶

片尺寸的大小又主要依赖于制造叶片材料。风机叶片多为复合材料, 主要包括增强材料、基体材料、夹层泡沫、胶黏剂和各种辅助材料。目前, 叶片基体材料主要是环氧树脂和不饱和聚酯树脂, 环氧树脂由于其优良的力学性能、耐热性能、与纤维界面的黏结性能及成型工艺性能而成为风机叶片最为主要的基体材料<sup>[1-5]</sup>。风力发电机厂大多建在环境较恶劣的地方, 而叶片的服役寿命要求达到 20~30 年, 因

收稿日期: 2011-04-08

作者简介: 卢 敏(1987-), 女, 湖南攸县人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为复合材料性能及应用,

E-mail: lumin.0828@163.com

此选材很重要。通过人工加速老化来评估叶片基体材料的性能,对叶片材料选择、结构设计具有重要意义。本文拟对经过湿热、盐雾、冷热老化后的树脂性能进行研究。

## 1 试验部分

### 1.1 试验材料与试样制作

环氧真空灌注树脂:环氧值为51,美国陶氏化学公司生产;固化剂:胺类,美国陶氏化学公司生产。按 $m(\text{树脂}):m(\text{固化剂})=100:32$ 将环氧树脂和固化剂混合,搅拌均匀后抽真空30 min,导入模具固化。固化工艺:70℃/5 h+25℃/12 h。

### 1.2 试验测试

#### 1.2.1 老化试验

1) 湿热试验。试验设备为广州爱斯佩克环境仪器有限公司生产的2-SL-02YAW型高低温湿热试验箱,按GB/T 1740—2007要求进行试验。将试样置于老化试验箱中,温度85℃,湿度95%,连续湿热老化240 h,取出试样进行性能测试。

2) 盐雾试验。试验设备为高铁检测仪器(中国)有限公司生产的GT-7004-L盐水喷雾试验机,盐雾试验参照GB/T 10125—1997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为10%的分析纯NaCl水溶液,试验温度为35℃,连续喷雾240 h。

3) 冷热循环试验。试验设备为广州爱斯佩克环境仪器有限公司生产的2-SL-02YAW型高低温湿热试验箱。试验条件为:-60℃/3 h+80℃/3 h,循环240 h。

#### 1.2.2 性能测试

1) 差示扫描量热法(differential scanning calorimeter, DSC)分析。试验设备为德国NETZSCH公司生产的STA 449C型差示扫描量热仪(DSC)。试验条件:测试时的升温速率为5℃/min,温度范围为30~300℃,在氮气气氛下进行。

2) 静态力学分析。测试设备为深圳高品检测设备有限公司生产的GP-TS2000S型电子式万能材料试验机,树脂浇注体的拉伸、弯曲性能按GB/T 2568—1995和GB/T 2570—1995试验方法进行测试。拉伸、弯曲过程加载速度为2 mm/min,每组分别测试8个试样,取平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 DSC分析

通过DSC分析得到环氧树脂老化前后的玻璃化

转变温度 $T_g$ 的关系曲线如图1所示。

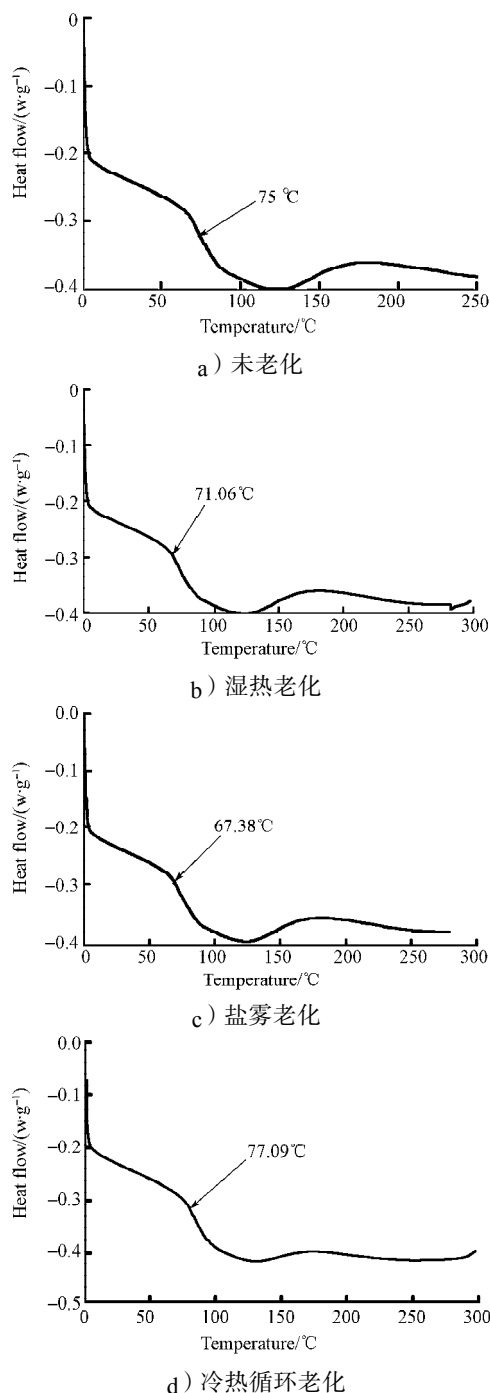


图1 玻璃化转变温度 $T_g$ 曲线

Fig. 1 The curve of glass transition temperature  $T_g$

据图1中分图a)可看出,树脂未老化时的玻璃化转变温度为75℃。经过240 h的湿热和盐雾老化后,由于水的增塑作用,导致玻璃化转变温度有所下降。分图b)显示,湿热老化后 $T_g$ 为71.36℃,与老化前相比玻璃化转变温度下降了5℃左右;分图c)显示,盐雾老化后 $T_g$ 为67.38℃,比老化前下降了8℃左右。经过240 h冷热循环老化后,引起了环氧树

脂的后固化,使其相对分子质量增加,导致  $T_g$  提高到了 77.09  $^{\circ}\text{C}$ 。

## 2.2 力学性能分析

环氧树脂老化前和经 240 h 老化后的力学性能测试结果见表 1。经 240 h 湿热老化后弹性模量和弯曲模量分别下降了 14% 和 20%; 经 240 h 盐雾老化后弹性模量和弯曲模量则分别下降了 15% 和 10%, 最大载荷延伸率也稍有下降。其原因可能是浇注体存在许多极性官能团,水对于这些极性官能团来说是一种增塑剂,使得强度和模量有所下降;其次由于样品成型过程中存在微小的缺陷(如空隙、气泡),水分子和化学介质的介入导致缺陷有所增大,因此,导致拉伸强度有所下降。经 240 h 冷热交替循环老化后,弹性模量降低了 16%,弯曲模量稍有下降,但拉伸强度、最大载荷延伸率和弯曲强度都提高了。提高的原因主要归结于冷热循环过程中浇注体进行了后固化,环氧基进一步与固化剂交联反应形成大分子链,因此,导致力学性能有所提高。

表1 老化后树脂浇铸体的力学性能参数

Table 1 The parameters of mechanic properties of resin castings after aging

材料 状态	力学性能参数 /MPa				最大载荷 延伸率 /%
	弹性 模量	拉伸 强度	抗弯 强度	弯曲 模量	
未老化	3 146.62	66	105	3 139.83	6.99
盐雾老化	2 670.05	65	99	2 818.99	6.85
湿热老化	2 714.12	65	100	2 512.85	8.00
冷热老化	2 648.31	71	109	3 059.04	7.87

## 2.3 红外光谱分析

环氧树脂老化前后的红外光谱如图 2 所示。与未老化前相比,经 240 h 盐雾、湿热和冷热老化后,环氧树脂浇注体的官能团发生了变化,导致光谱分布发生了变化。未老化前在 2 960  $\text{cm}^{-1}$  处出现的一  $\text{CH}_3$  反对称伸缩振动峰,经盐雾老化后该吸收峰值增大,而经湿热老化和冷热老化后峰值减小。在 2 870  $\text{cm}^{-1}$  处出现的一  $\text{CH}_3$  对称伸缩振动峰,经 240 h 湿热老化后消失不见。在 1 100  $\text{cm}^{-1}$  处出现的主链醚  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$  不对称伸缩振动吸收峰<sup>[6]</sup>,其强度经盐雾老化后得到加强,而湿热和冷热老化后吸收峰减弱。2 930  $\text{cm}^{-1}$  处的一  $\text{CH}_2$  吸收峰经湿热老化后得到加强。3 410  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰为羧基中的一  $\text{OH}$  吸收峰,经盐雾和湿热老化后该吸收峰变宽变强。1 100  $\text{cm}^{-1}$  处的  $\text{C}-\text{O}$  伸缩振动峰经湿热和盐雾老化后加强了。1 250 和 840  $\text{cm}^{-1}$  处出现的环醚对称和反对称伸缩振动吸收峰<sup>[7]</sup>,经老化后并未出现较大变化。

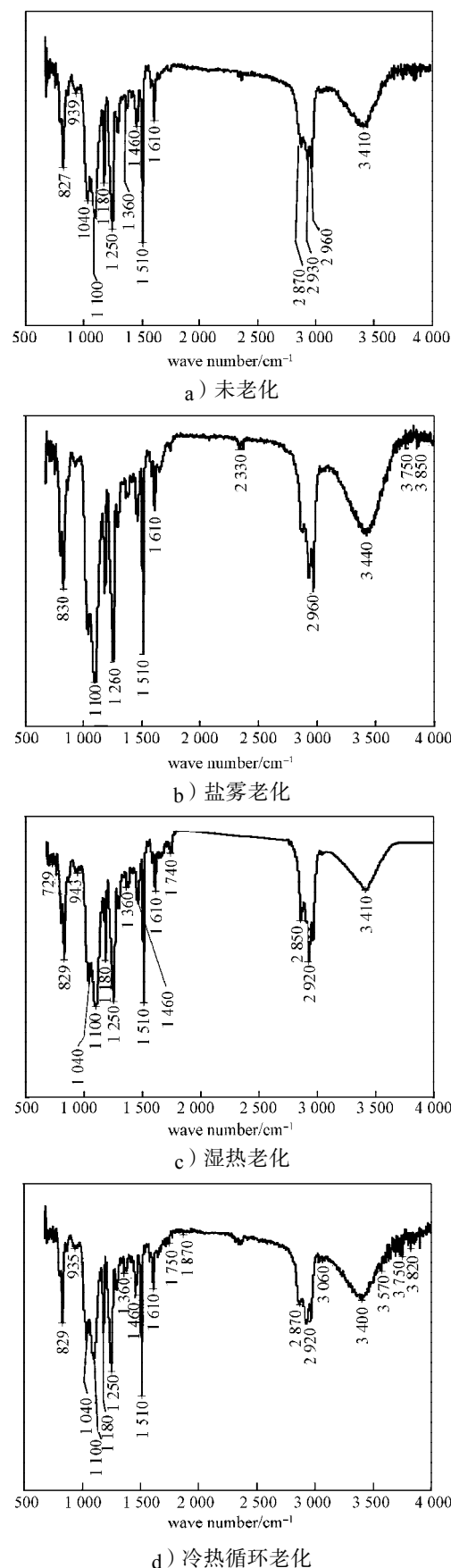


图2 老化前后红外光谱图

Fig. 2 The FTIR of aged and unaged

### 3 结论

经过 240 h 湿热、盐雾、冷热老化后环氧树脂的玻璃化转变温度、力学性能、官能团与老化前相比都发生变化, 试验证明老化对树脂的各项性能产生了影响。具体归纳如下:

1) 经过 240 h 湿热、盐雾、冷热老化后, 浇注体的玻璃化转变温度发生变化。湿热、盐雾老化后  $T_g$  分别降低 5 和 8℃; 而冷热老化后  $T_g$  增加了。

2) 经过 240 h 湿热、盐雾、冷热老化后, 浇注体的弹性模量和弯曲模量都有所下降, 湿热老化后的弹性模量和弯曲模量下降了 14% 和 20%; 盐雾老化后下降了 15% 和 10%; 冷热老化后弯曲模量下降了 16%。湿热和盐雾老化后的拉伸强度和弯曲强度都降低了, 而冷热老化后提高了。

研究结果表明: 湿热和盐雾老化后的树脂浇铸体性能下降, 会使叶片的使用寿命缩短, 因此需要在叶片表面喷涂涂料, 保护叶片。

#### 参考文献:

- [1] 刘卓峰, 肖加余, 曾竟成, 等. 低粘度环氧树脂 VIMP 工艺性能研究[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(5): 20-24.  
Liu Zhuofeng, Xiao Jiayu, Zeng Jingcheng, et al. A Study of Processing Properties of an Epoxy Resin System Used in VIMP[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2008, 30(5): 20-24.
- [2] 陶志强, 陈伟明, 王俊峰, 等. 新型高强高韧环氧基体树脂体系研究[J]. 宇航材料工艺, 2007(6): 25-28.  
Tao Zhiqiang, Chen Weiming, Wang Junfeng, et al. Novel Strengthened and Toughened Epoxy Matrix Resins[J]. Aerospace Materials & Technology, 2007(6): 25-28.
- [3] 谢鸿峰, 刘承果, 袁钻如, 等. 高性能环氧树脂/碳纳米管复合物的热分析研究[J]. 高分子学报, 2008(4): 332-336.  
Xie Hongfeng, Liu Chengguo, Yuan Zuanru, et al. Thermoanalytical Studies of High Performance Epoxy/Carbon Nanotube Composites[J]. Acta Polymerica Sinica, 2008(4): 332-336.
- [4] Deno Barlong, Chiu Wenyen, Lin Kingfu, et al. Thermal Degradation Behavior of Epoxy Resin Blended with Propyl Ester Phosphazene[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2001, 81: 1161-1174.
- [5] Delor-Jestin F, Drouin D, Cheval P-Y, et al. Thermal and Photochemical Ageing of Epoxy Resin Influence of Curing Agents[J]. Polymer Degradation and Stability, 2006, 91(6): 1247-1255.
- [6] 袁剑民, 邓剑如, 蒋卫和. 新型环氧稀释剂环己二醇-1, 2 二缩水甘油醚的合成[J]. 热固性树脂, 2004, 19(5): 24-26.  
Yuan Jianmin, Deng Jianru, Jiang Weihe. Synthesis of A Novel Epoxide Diluent-Cyclohexanediol-1,2 Diglycidyl Ether[J]. Thermosetting Resin, 2004, 19(5): 24-26.
- [7] 荆煦瑛, 陈式棣. 红外光谱实用指南[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1992: 49-51.  
Jing Xuying, Chen Shili. A Practical Guide to Infrared Spectrum[M]. Tianjin: Tianjin Science & Technology Press, 1992: 49-51.

(责任编辑: 李玉珍)