

双酚 A 环氧树脂改性氧化双环戊二烯体系 固化动力学分析及其性能研究*

吕文丽^{1,2}, 肖加余¹, 徐旺生², 曾竟成¹, 刘 钧¹, 蒋卫和³

(1. 国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 武汉工程大学 化工与制药学院, 湖北 武汉 430073;

3. 湖南岳阳昌德化工实业有限公司, 湖南 岳阳 414004)

摘要: 氧化双环戊二烯(CDR-0122)环氧树脂固化物的耐热性较好,但脆性大。采用不同质量分数的环氧(E-51)改性 CDR-0122。对不同的改性体系进行 DSC 分析,确定其活化能、反应级数和最佳固化工艺。对改性的 CDR-0122 环氧树脂固化物进行力学性能和耐温性能测试。结果表明:当加入 E-51 的质量分数为 30% 时,CDR-0122 的树脂体系的综合性能最优。相比改性前,改性后的树脂体系活化能略有下降,并且其拉伸强度和弯曲强度分别提高了 52.38% 和 54.77%,但玻璃化转变温度略有下降。

关键词: 氧化双环戊二烯; E-51; 改性; 力学性能; 耐温性能;

中图分类号: TN248 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2012)03-0038-06

Curing dynamics analysis and properties of acycloaliphatic modified by bisphenol A (E-51) epoxy resin

LV Wenli^{1,2}, XIAO Jiayu¹, XU Wangsheng², ZENG Jingcheng¹, LIU Jun¹, JIANG Weihe³

(1. College of Aerospace and Materials Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Chemical Engineering and Pharmacy, University of Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China;

3. Changde Chemical Corporation Limited, Yueyang 414004, China)

Abstract: Acycloaliphatic(CDR-0122) epoxy resin has good heat-resistance, but it is characterized by being brittle. CDR-0122 modified with different mass fraction of epoxy (E-51) were studied. First, DSC analysis was carried out to determine the activation energy, reaction order and the best curing procedure of the modified resin. Then mechanical property and heat-resistance property of the cured modified resin were tested. The results showed that, compared with the unmodified CDR-0122, the activation energy of the modified resin system decreased slightly, and its tensile strength and flexural strength increased by 52.38% and 54.77%, respectively, but the glass transition temperature decreased slightly. Considering all aspects of performance, the system of CDR-0122 modified with 30 wt% E-51 is the best one.

Key words: acycloaliphatic; epoxy; modification; mechanics property; heat-resistance

随着近代科学技术的发展,运载火箭、导弹和航天飞机等空间运载工具以及飞机、汽车和船舶等交通工具都朝着可靠性好、寿命长和能耗低的方向发展。这些新的设计思想对树脂基复合材料的性能,特别是耐高温性能提出了更高的要求^[1]。作为复合材料基体的树脂除了要具备耐高温性能外,还需要良好的力学性能、耐疲劳和耐冲击性能等。单纯的耐热性好而其他综合性能不好的树脂,其使用价值不大。

氧化双环戊二烯(CDR-0122)是一种特种耐高温树脂,但同时 CDR-0122 环氧树脂的固化物脆性较大,限制了它的广泛应用。因此,协调

好环氧树脂固化体系韧性和耐高温性之间的矛盾,在保证它耐热性变化不大或提高的情况下增强其韧性,对扩大其应用领域具有很大的实用意义。现阶段,国内对 CDR-0122 环氧树脂的应用研究比较少,而国外已广泛应用于军工、航空等关键领域,但核心技术保密,公开的文献较少。

环氧树脂基体的增韧方法主要有两种^[2]:①在环氧树脂中加入橡胶弹性体分散相来增韧。②用热固性树脂连续贯穿于环氧树脂网络中形成互穿网络、半互穿网络结构来增韧。其中橡胶弹性体增韧改性环氧树脂是以牺牲耐热性和刚性为代价。本文采用第二种方法,通过热固性环氧树脂

* 收稿日期:2011-07-16

基金项目:国家部委基金项目

作者简介:吕文丽(1986—),女,湖北荆州人,博士研究生, E-mail: 276191477@qq.com;

肖加余(通信作者),男,教授,博士,博士生导师, E-mail: jiyaxiao@tom.com

E-51 来改性 CDR-0122, 由于两者同为环氧树脂, 它们的相容性很好, 且 E-51 引入的羟基增强其交联反应提供强的韧性并维持耐热性基本不变。同时树脂的交联程度和固化效果直接决定着固化物的性能, 因此, 在树脂和固化剂体系确定的前提下, 选取最佳固化工艺条件以获得具有最佳固化性能的研究就显得尤为重要。树脂的固化反应动力学研究是确定其最佳固化工艺条件较为直接和有效的途径。为此, 本文利用不同配比的 E-51 改性 CDR-0122 环氧树脂, 并对树脂体系的固化反应动力学进行研究, 以此来确定其最佳的固化工艺条件。然后测试浇铸体的拉伸性能、弯曲性能以及玻璃化转变温度。

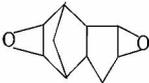
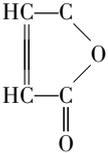
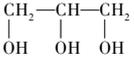
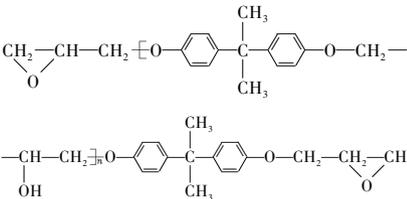
1 实验部分

1.1 原材料

CDR-0122 环氧值为 1.20 ~ 1.22, 白色粉末, 产自湖南岳阳昌德化工有限公司; E-51 环氧值为 0.51 ~ 0.54, 淡黄色粘稠液体, 产自湖南岳阳石油化工总厂; 顺酐纯度 $\geq 99.5\%$, 分析纯, 白色粉末, 产自天津博迪化工股份有限公司; 甘油纯度 $\geq 99.0\%$, 分析纯, 无色透明粘稠液体, 产自天津市大茂化学试剂厂。结构式见表 1。

表 1 原材料结构式

Tab. 1 Chemical structures of materials

Name	Chemical structures
CDR-0122	
顺酐	
甘油	
E-51	

1.2 样品制备和测试方法

1.2.1 浇铸体制备

将环氧树脂 CDR-0122 与固化剂顺酐、促进剂甘油按质量比 100 : 51 : 7.5 混合后, 在 60℃ 下

加热溶解、减压脱泡。然后加入 E-51 与固化剂顺酐的混合物, 其中 E-51 环氧树脂改性剂分别按质量分数为 10%、20%、30%、40% 和 50% 加入, 而混合物中的环氧树脂 E-51 与固化剂顺酐按质量比 100 : 49.2 加入。搅拌混匀后再倾入已涂有脱模剂的预热模具中。按程序升温固化, 固化完后冷却至室温。

1.2.2 浇铸体固化制度的确定

采用德国 NETZSCH 公司产 DSC 200 F3 型差示扫描量热仪对样品的放热情况进行动态 DSC 监测, 确定固化工艺。用量为 5 ~ 10mg, 升温速率 $\beta = dT/dt$ 分别为 5、10、15、20℃/min。

1.2.3 力学性能测试:

按照 GB/T 2570-1995 测试弯曲性能; 按照 GB/T 2568-1995 测试拉伸性能。

1.2.4 玻璃化转变温度(T_g)

采用 DSC 200 F3 型差示扫描量热仪对样品的放热情况进行动态的 DSC 监测, 用量为 5 ~ 10mg, 对树脂固化物按 10℃/min 的升温速率进行 DSC 扫描, 测试固化物的玻璃化转变温度。

2 结果与讨论

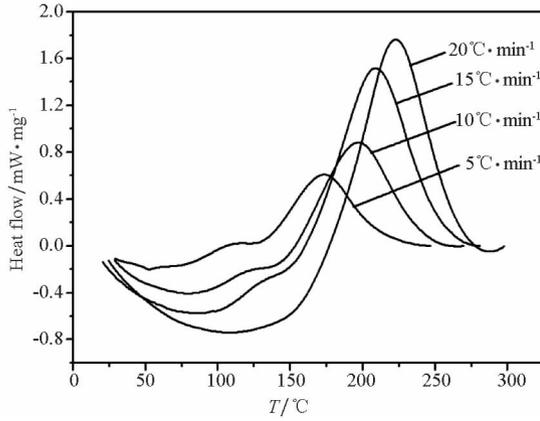
2.1 DSC 分析

采用 DSC 200 F3 型差示扫描量热仪对不同质量比 E-51 改性的 CDR-0122 样品的放热情况进行动态的 DSC 监测^[3-6], 升温速率 $\beta = dT/dt$ 分别为 5、10、15、20℃/min。在选定的升温速率下, 不同质量分数 E-51 改性的动态 DSC 曲线如图 1。

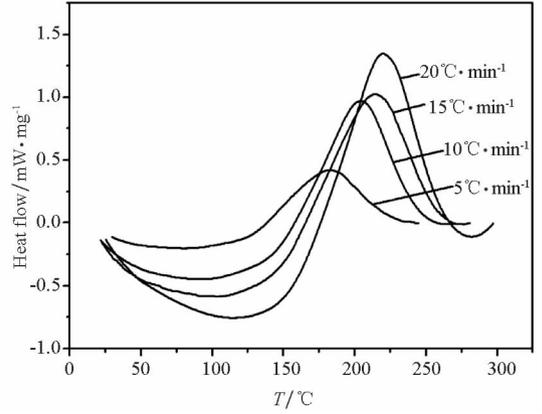
由图 1 可知, 每个波峰的起始温度 T_i 、峰值温度 T_p 及终止温度 T_f 的值。同一配比的树脂体系固化反应的起始温度 T_i 、峰值温度 T_p 及终止温度 T_f 均随升温速率的增大而向高温方向移动。而不同配比的树脂体系在同一升温速率下随着 E-51 量的增加, 反应的放热峰相差较大, 但起始温度 T_i 、峰值温度 T_p 和终止温度 T_f 相差不大。当 CDR-0122 树脂未改性 (E-51 为 0) 时, 升温速率为 5、10、15℃/min 时的峰形是双峰, 峰形随升温速率 β 的加快而逐渐变小, 定义第 1 个波峰为 μ_1 , 第 2 个波峰为 μ_2 ; 而当升温速率为 20℃/min 时的峰形为单峰。这是由于当升温速率过快时, 第 1 步和第 2 步反应趋于同时进行, 使两个峰的区别显现得不是特别明显, 因此未改性时的树脂体系可以认为具有两个放热峰, 是两步反应。它的反应机理是首先醇与酸酐反应生成含酯键的羧酸; 然后羧酸与环氧基开环反应, 生成含羟基的中

间化合物;中间化合物中的羟基既可以再与酸酐反应生成含酯键的羧酸化合物,并且两者均可与环氧基反应。而加入 E-51 后均呈单峰。这是因为未用 E-51 改性时,CDR-0122 环氧树脂不含羟基,它直接与酸酐的反应速度非常慢,它的反

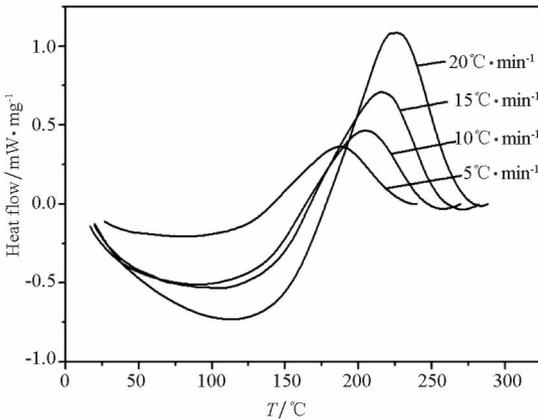
应机理是先由多元醇与酸酐反应后,再与环氧基反应。而通过 E-51 改性后,由于 E-51 与 CDR-0122 的相容性很好,环氧基和羟基赋予了其相互反应的活性,使反应一步完成。



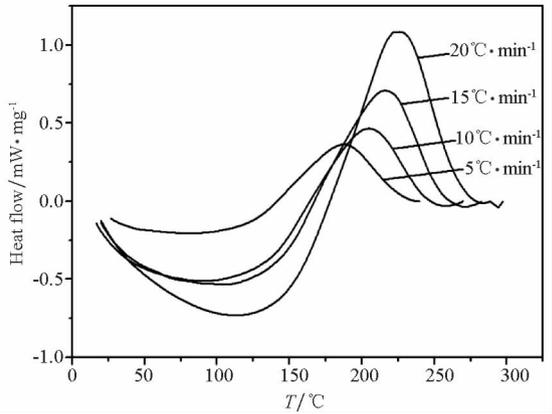
(a) 0% E-51



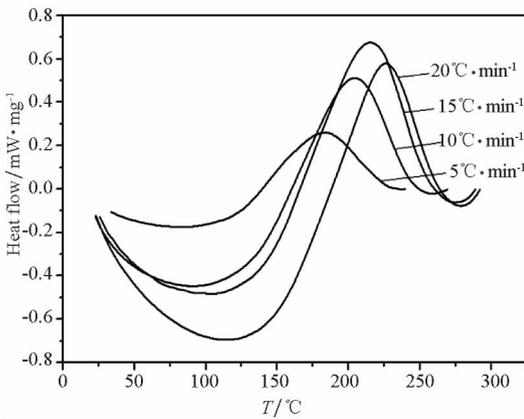
(b) 10% E-51



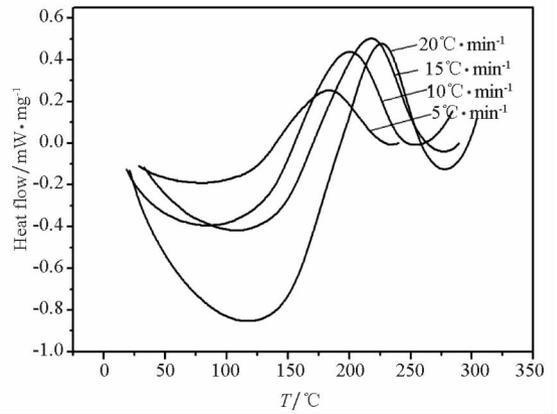
(c) 20% E-51



(d) 30% E-51



(e) 40% E-51



(f) 50% E-51

图 1 不同质量分数 E-51 改性 CDR-0122 树脂体系在不同升温速率下的动态 DSC 曲线

Fig. 1 Dynamic DSC curves of CDR-0122 of modified resin system with different mass fraction of E-51 resin

2.1.1 活化能的确定

活化能是表征体系聚合反应进行难易程度的量度。通常化学反应的活化能 E_a 大致在 40 ~

400 $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 一般来说, $E_a < 40 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 则反应在室温以下即可以瞬时完成, 若 $E_a > 100 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, 则要适当地进行加热, 反应才能进行。

E_a 越大,能迅速完成反应要求的温度也越高^[3]。

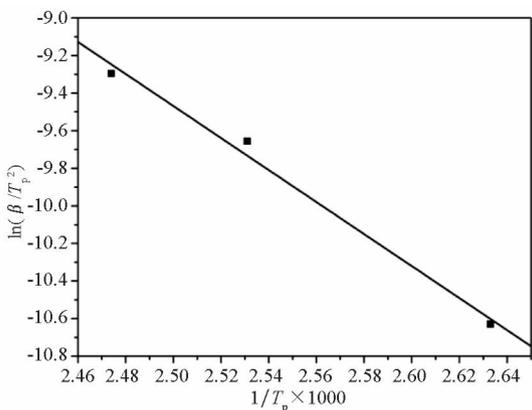
本实验通过 DSC 热分析数据来计算固化反应动力学参数,用 DSC 法研究固化动力学有多种计算动力学参数的方法,其中比较常用的是 Kissinger 方法。对于环氧树脂的动态固化反应 Kissinger 方程为

$$\ln \frac{\beta}{T_p^2} = \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T_p} + \ln \frac{AR}{E_a} \quad (1)$$

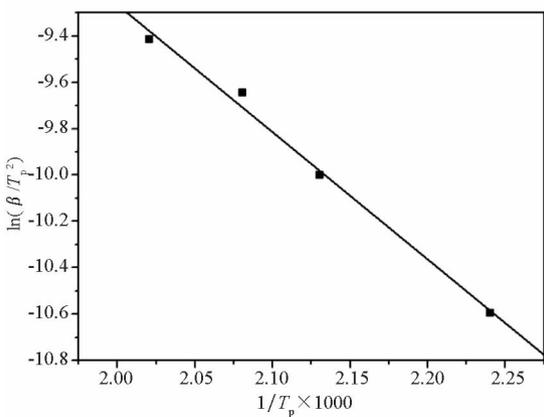
式中 β 为等速升温速率 ($K \cdot \min^{-1}$), R 为气体常数 $8.314J/mol$, T_p 为峰值温度, A 和 E_a 分别为表观频率因子和反应活化能。

由式(1)可知频率因子:

$$A = \frac{\beta E_a \exp(E_a/RT_p)}{RT_p^2} \quad (2)$$



(a) μ_1



(b) μ_2

图2 未改性树脂体系 $\ln(\beta/T_p^2)$ 与 $1/T_p$ 的关系曲线

Fig. 2 The relationship between $\ln(\beta/T_p^2)$ and $1/T_p$ of unmodified resin system

由上式(1)易知 $\ln(\beta/T_p^2)$ 与 $1/T_p$ 存在线性关系,将 5、10、15、20 $^{\circ}C/min$ 升温速率下的值进行线性拟合,见图 2 和 3。由式(1)和图 2、3 可知直线的斜率即为 $-E_a/R$,则易求得不同量 E-51 改性体系的活化能见表 2 和表 3。改性前 μ_1 的活

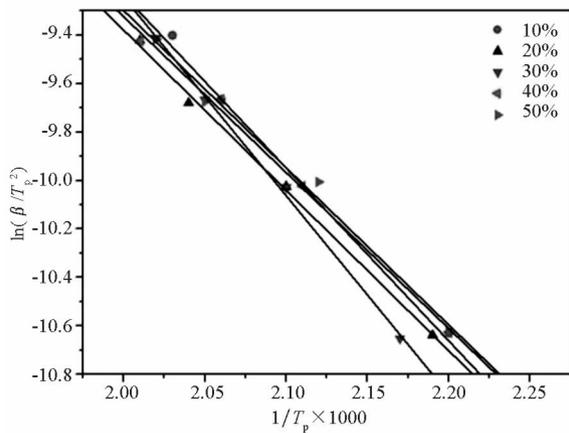


图3 不同质量分数 E-51 改性树脂体系 $\ln(\beta/T_p^2)$ 与 $1/T_p$ 的关系曲线

Fig. 3 The relationship between $\ln(\beta/T_p^2)$ and $1/T_p$ of modified resin system with different mass fraction of E-51 活化能为 $60.376 kJ \cdot mol^{-1}$, μ_2 的活化能为 $45.652 kJ \cdot mol^{-1}$; E-51 改性后的活化能相比未改性时略有下降。这是由于 E-51 含有一定量的羟基,在一定程度上赋予了树脂体系相互反应的活性。由所求得的结果可知活化能较大,所以该体系需要高温固化。

表2 未改性树脂体系的反应活化能 E_a

Tab. 2 Activation energy (E_a) of unmodified resin system

	μ_1	μ_2
$E_{a1}/kJ \cdot mol^{-1}$	60.376	45.652

表3 改性后树脂体系的活化能 E_a

Tab. 3 Activation energy (E_a) of modified resin system

$m_{E-51}/$	10/100	20/100	30/100	40/100	50/100
$m_{CDR-0122}$					
$E_a/$	59.809	54.997	60.108	53.484	53.925
$kJ \cdot mol^{-1}$					

2.1.2 反应级数的确定

用 Crane 经验方程可以求出固化反应级数, Crane 方程表示为

$$\frac{d \ln(\beta)}{d(1/T_p)} = - \left(\frac{E_a}{nR} + 2T_p \right) \quad (3)$$

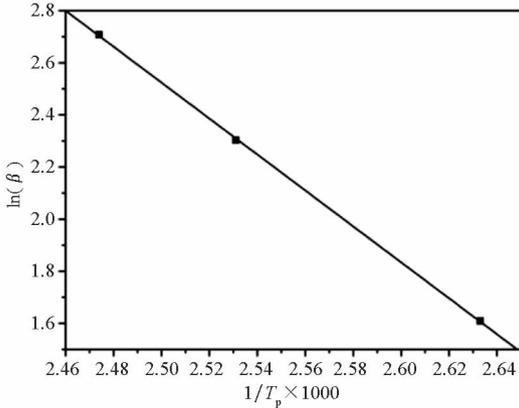
式中 β 为等速升温速率 ($^{\circ}C \cdot \min^{-1}$), R 为气体常数 $8.314J/mol$, T_p 为峰值温度, n 和 E_a 分别为反应级数和反应活化能。

当 $E_a/nR \gg 2T_p$ 时,可将 $2T_p$ 省略,因而可以得到下式:

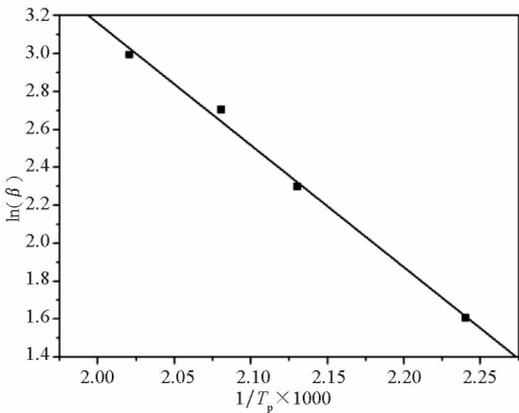
$$\frac{d \ln(\beta)}{d(1/T_p)} \approx - \frac{E_a}{nR} \quad (4)$$

即 $\ln\beta$ 与 $1/T_p$ 之间存在一定的线性关系,将

5、10、15、20 °C /min 升温速率下的值进行线性拟合如图 4 和图 5。由图可知, $\ln\beta$ 与 $1/T_p$ 的线性关系显著, 则拟合直线的斜率为 $-E_a/nR$, 由所求得的活化能可求出不同量 E-51 改性的树脂体系的固化反应级数 n , 结果见表 4 和表 5。由结果可知反应级数相差都不大, 均趋于 1 级反应。



(a) μ_1



(b) μ_2

图 4 未改性树脂体系 $\ln(\beta)$ 与 $1/T_p$ 的关系曲线

Fig. 4 The relationship between $\ln(\beta)$ and $1/T_p$ of unmodified resin system

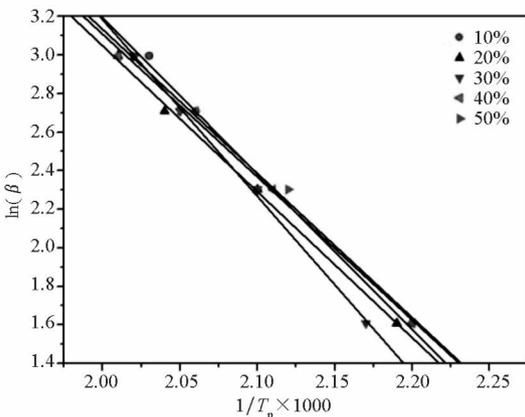


图 5 不同质量分数 E-51 改性树脂体系 $\ln(\beta)$ 与 $1/T_p$ 的关系曲线

Fig. 5 The relationship between $\ln(\beta)$ and $1/T_p$ of modified resin system with different mass fraction of E-51

表 4 未改性树脂体系的反应级数 n

Tab. 4 Reaction order (n) of unmodified resin system

	μ_1	μ_2
n	0.903	0.853

表 5 改性后树脂体系的反应级数 n

Tab. 5 Reaction order (n) of modified resin system

$m_{E-51}/m_{CDR-0122}$	10/100	20/100	30/100	40/100	50/100
n	0.905	0.874	0.894	0.868	0.868

2.1.3 固化制度的确定

最佳固化工艺的外推法是对固化体系进行多次不同升温速率的扫描, 分别以每个放热峰的起始温度 T_i 、峰值温度 T_p 和终止温度 T_c 为纵坐标, 以升温速率 β 为横坐标进行线性拟合, 固化反应温度 (T) 与固化升温速率 (β) 呈线性关系, 通过 $T-\beta$ 外延法得到该直线与 Y 轴的交点, 该交点的纵坐标即是外推出的升温速率 $\beta=0$ 时的起始温度、峰值温度和终止温度。运用外推法得到体系的固化制度见表 6。

表 6 改性前后树脂体系的固化制度

Tab. 6 Solidify system of unmodified and modified resin system

$m_{E-51}/m_{CDR-0122}$	Solidify system
0/100	79.27°C + 103.80°C + 121.66°C + 143.61°C + 169.94°C + 207.94°C
10/100	126.84°C + 180.65°C + 219.91°C
20/100	123.24°C + 180.01°C + 220.08°C
30/100	120°C + 177.13°C + 221.36°C
40/100	115.2°C + 169.9°C + 212.6°C
50/100	118.65°C + 176.82°C + 220.41°C

2.2 浇铸体基本性能分析

按照表 6 的固化制度对 CDR-0122 改性前后的预聚体进行固化, 然后测其浇铸体的拉伸性能、弯曲性能和固化产物的玻璃化转变温度^[7-11]。结果见表 7。其中优选树脂浇铸体的拉伸应力-应变曲线和三点弯曲载荷下的浇铸体载荷-位移曲线见图 6 和图 7。

表7 E-51 含量对 CDR-0122 环氧树脂基本性能的影响

Tab.7 Influences of the mass fraction of E-51 on the properties of CDR-0122 epoxy resin

$m_{E-51}/m_{CDR-0122}$	Bending strength/MPa	Bending modulus/GPa	Tensile strength/MPa	Tensile modulus/GPa	$T_g/^\circ\text{C}$
0/100	77.23	4.16	36.77	3.39	253.90
10/100	110.98	3.28	38.91	3.21	251.89
20/100	99.12	3.69	52.11	3.14	248.38
30/100	117.68	3.41	56.91	3.11	246.98
40/100	113.27	2.90	46.83	2.98	234.74
50/100	114.83	3.53	46.14	3.02	197.08

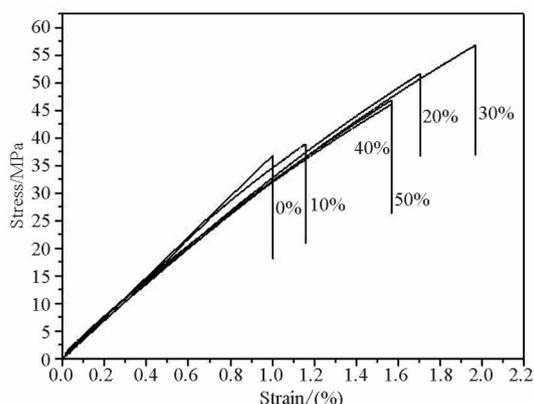


图6 优选浇铸体的拉伸应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of resin casts

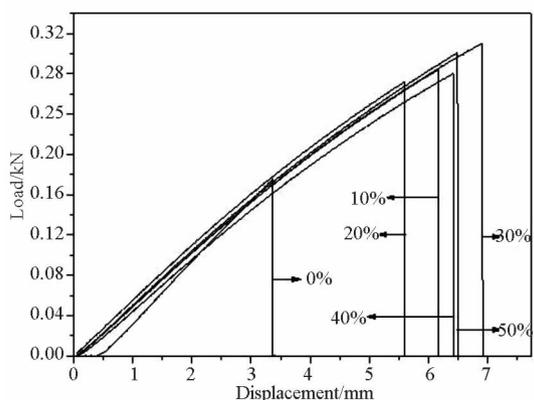


图7 三点弯载下的优选浇铸体载荷-位移曲线

Fig.7 Load-displacement curves of resin casts under three point bending

由表7、图6和图7可知,当加入质量分数30% E-51时,树脂体系的拉伸和弯曲性能最好,弯曲强度和拉伸强度分别提高了52.38%和54.77%,而弯曲模量和拉伸模量均下降。由图6可知CDR-0122树脂浇铸体的应力-应变曲线近乎为一直线,其断裂为脆性断裂;而E-51改性CDR-0122后的树脂浇铸体拉伸应力-应变曲线显示出一定的非线性,是塑性断裂,表明E-51改性后的树脂浇铸体韧性有所提高。由图7可知CDR-0122树脂浇铸体载荷-位移曲线也

近乎为一条直线,表明弯曲性能较差,断裂延伸率低,为一种高脆性基体,需要适当改性。而添加一定量E-51后的CDR-0122树脂体系,浇铸体的载荷-位移曲线呈现弧度状,弯曲强度、弯曲极限绕度都明显提高,表明E-51改性后的树脂浇铸体韧性有所提高。加入少量的E-51改性时玻璃化转变温度下降并不明显,但当E-51的加入量超过30%时玻璃化转变温度明显下降。这说明一定量的E-51树脂改性CDR-0122后不仅具有良好的耐热性,且具备较好的力学性能。这主要是由于CDR-0122本身的刚性较强,随着改性树脂E-51的加入,增加了交联点间的分子量,形成了刚性和柔性链接并存的交联网络结构。当受到外力作用时,由于CDR-0122体系的脆性得到了改善,抵抗开裂的能力增强,因此体系呈现较高的力学性能。

3 结论

(1)未改性的树脂体系有两个波峰,分两步进行反应;改性后的树脂体系只有一个波峰,反应一步完成。当加入30% E-51时树脂体系的活化能为 $68.108 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$,反应级数为0.894。树脂体系的活化能较大,适合高温固化。它的固化制度可定为 $120^\circ\text{C} + 177.13^\circ\text{C} + 221.36^\circ\text{C}$ 。

(2)当用30% E-51改性时,树脂体系固化物的力学性能最好,弯曲强度和拉伸强度分别为117.68 MPa和56.91 MPa,相比未改性时分别提高了52.38%和54.77%,但玻璃化转变温度相比改性前也下降了4.8 $^\circ\text{C}$,为255.01 $^\circ\text{C}$ 。综合考虑各方面的性能,确定当加入E-51的质量分数为30%时,CDR-0122的树脂体系最好,不仅固化物的力学性能较高,而且耐温性能也较好。

参考文献 (References)

- [1] Wani M F, Gandhi O P. Development of maintainability index for mechanical system[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1999, 65: 259 - 270.
- [2] 黎放, 杨元, 杨建军. 装备维修性设计参数综合评估方法[J]. 工程设计学报. 2008, 15(1): 11 - 16.
LI Fang, YANG Yuan, YANG Jianjun. Integrative evaluation on parameters of maintainability design of mechanical equipment[J]. Journal of Engineering Design, 2008, 15(1): 11 - 16. (in Chinese)
- [3] Slavila C A, Decreuse C, Ferney M. Fuzzy approach for maintainability evaluation in the design process [J]. Concurrent Engineering, 2005, 13: 291 - 299.
- [4] Chen L, Cai J G. Using vector projection method to evaluate maintainability of mechanical system in design review [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2003, 81: 147 - 154.
- [5] 国防科学技术工业委员会. GJB/Z91—1997 维修性设计手册[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
The committee of National Defense Scientific and Technical Industry. GJB/Z91 - 1997 maintainability design manual[S]. Beijing: Standards Press of China, 1997. (in Chinese)
- [6] 甘茂治, 吴真真. 维修性设计与验证[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.
GAN Maozhi, WU Zhenzhen. Maintainability design an evaluation [M]. Beijing: Defense Industry Press, 1995. (in Chinese)
- [7] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000.
ZHAO Keqin. Set pair analysis and its preliminary applications [M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [8] 杨俊杰, 周建中, 方仍存, 等. 基于集对分析的不确定多属性决策方法[J]. 控制与决策. 2008, 23(12): 1423 - 1426.
YANG Junjie, ZHOU Jianzhong, FANG Rengcun, et al. Uncertain multi-attribute decision making methods based on set pair analysis [J]. Control and Decision, 2008, 23(12): 1423 - 1426. (in Chinese)
- [9] Chiou H K., Tzeng G H. Fuzzy multiple-criteria decision-making approach for industrial green engineering [J]. Environmental Management. 2002, 30(6): 816 - 830.
- [10] 刘英平, 杨素君, 陈晓霞. 不确定信息的机械产品设计方案评价方法[J]. 机械科学与技术. 2008, 27(7): 946 - 949.
LIU Yingping, YANG Sujun, CHEN Xiaoxia. Study of evaluation method for mechanical product design schemes with uncertainty information [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering. 2008, 27(7): 946 - 949. (in Chinese)

(上接第 43 页)

参考文献 (References)

- [1] Mohammad M, Fangming D, Naiffer R, et al. Increased flexural modulus and strength in SWNT/epoxy composites by a new fabrication method [J]. Polymer, 2006, 47 (1): 293 - 298.
- [2] Varley R J, Hodgkin J H, Hawthorne D G. Toughening of a trifunctional epoxy system: Part VI [J]. Polymer, 2001, 42: 3847 - 3858.
- [3] 李晓丹, 王维, 郭淑齐, 等. 耐高温树脂的固化动力学分析及其力学性能[J]. 纤维复合材料, 2009, 24(4): 24 - 26.
LI Xiaodan, WANG Wei, GUO Shuqi, et al. The analysis of curing kinetics of heat resistant resin and research of its composites performances [J]. Fiber Composites, 2009, 24(4): 24 - 26. (in Chinese)
- [4] 代晓青, 肖加余. 等温 DSC 法研究 RFI 用环氧树脂固化动力学研究 [J]. 复合材料学报, 2008, 25 (4): 18 - 23. (in Chinese)
DAI Xiaqing, XIAO Jiayu. Curing kinetics of epoxy resin for RFI process using isothermal DSC [J]. Acta Materiate Compositae Sinica, 2008, 25(4): 18 - 23. (in Chinese)
- [5] Barton J M. The application of differential scanning calorimetry (DSC) to the study of epoxy resin curing reactions [J]. Advances in Polymer Science, 1985, 72: 1 - 11.
- [6] 谢旻, 顾轶卓, 李敏, 等. 碳纤维/双马树脂预浸料固化过
程动态力学性能 [J]. 复合材料学报, 2010, 27(4): 52 - 58.
XIE Min, GU Yizhuo, LI Min, et al. Dynamic mechanical analysis of the curing of carbon fiber/bismaleimide resin prepreg [J]. Acta Materiate Compositae Sinica, 2010, 27(4): 52 - 58. (in Chinese)
- [7] Yun N G, Won Y W, Kim S C. Toughening of carbon fiber/epoxy composite by inserting polysulfone film to form morphology spectrum [J]. Polymer, 2004, 45(20): 6953 - 6958.
- [8] Mimura K, Ito H, Fujioka H. Improvement of thermal and mechanical properties by control of morphologies in PES modified epoxy resins [J]. Polymer, 2000, 41 (12): 4451 - 4459.
- [9] Catalani A, Bonicelli M G. Kinetics of the curing reaction of a diglycidyl ether of bisphenol A with a modified polyamine [J]. Thermochemica Acta, 2005, 438(1): 126 - 129.
- [10] Li P, Yang X P, Yu Y H, et al. Cure kinetics, microheterogeneity, and mechanical properties of the high-temperature cure of vinyl ester resins [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2003, 92(2): 1124 - 1133.
- [11] Kamal M R, Sourour S. Kinetics and thermal characterization of thermoset cure [J]. Polymeric Materials Science and Engineering, 1973, 13: 59 - 64.