

## 石英/双酚 E 型氰酸酯复合材料的制备与性能\*

杨金水<sup>1</sup>, 李娟<sup>2</sup>, 魏凯耀<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学 航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 中南林业科技大学 材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410004)

**摘要:**采用实验方法研究双酚 E 型氰酸酯树脂的黏度和固化特性,揭示催化剂对双酚 E 型氰酸酯树脂固化特性的影响规律;采用树脂传递模塑和真空导入模塑工艺制备石英纤维/双酚 E 型氰酸酯复合材料,并考察其力学性能。结果表明,双酚 E 型氰酸酯树脂室温至 90 °C 范围内的黏度小于 300 mPa·s,凝胶时间大于 10 h,起始固化温度、固化温度和终止固化温度分别为 186 ± 5 °C, 235 ± 5 °C 和 286 ± 5 °C;固化特征温度随着催化剂含量的增加而降低,直至催化剂饱和,其饱和范围为 0.02% ~ 0.03%,可使双酚 E 型氰酸酯树脂体系的固化温度降低约 60 °C,从而避免爆聚,实现液相法成型其复合材料;真空导入模塑工艺制备的石英纤维/双酚 E 型氰酸酯复合材料的力学性能明显优于树脂传递模塑制备试样。

**关键词:**复合材料;双酚 E 型氰酸酯树脂;石英纤维;黏度;固化

**中图分类号:**TB332 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2016)01-026-08

## Preparation and properties of quartz fiber/bisphenol - E isocyanate ester composites

YANG Jinshui<sup>1</sup>, LI Juan<sup>2</sup>, WEI Kaiyao<sup>1</sup>

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

2. Central South University of Forestry and Technology, College of Materials Science and Engineering, Changsha 410004, China)

**Abstract:** The viscosity and curing characteristics of bisphenol - E cyanate ester resin were studied through experiments to reveal the influence of catalyst on the curing mechanism of the cyanate ester resin. Quartz fiber/bisphenol - E cyanate ester composites were fabricated by RTM (Resin Transfer Molding) and VIMP (Vacuum Infusion Molding Process) processes to investigate its mechanical properties. Results show that the viscosity of the resin system is less than 300 mPa·s and its gel time is more than 10 h from room temperature to 90 °C. The temperatures of initial curing, curing and final curing of the resin system are 186 ± 5 °C, 235 ± 5 °C and 286 ± 5 °C respectively. And the curing characteristic temperature decreases with the increasing content of the catalyst until the catalyst saturates with the range from 0.02% to 0.03%, which can cause the curing temperature of the resin system decreased by nearly 60 °C. Therefore, it is very important to avoid implosion and to fabricate the quartz fiber/cyanate ester composites by liquid composite molding successfully. The mechanical properties of VIMP manufactured sample is obviously higher than that of RTM fabricated sample.

**Key words:** composite; bisphenol-E cyanate ester resin; quartz fiber; viscosity; curing

隐身技术已被当今世界先进国家视为一项重点开发的军事高新技术。隐身复合材料是隐身材料发展的一个重要方向。例如,20世纪70年代末,美国第一代隐身飞机 F-117A 所使用的隐身复合材料占 10%,其主要是通过以多面体为特征的隐身外形和吸波涂料达到隐身目的。90年代末,F-22 先进战斗机隐身复合材料的使用率达到了 60%,这说明隐身复合材料的发展在很大程度上影响着整个武器装备隐身技术的未来<sup>[1]</sup>。作为 21 世纪的主导材料,隐身复合材料是世界强

国竞相发展的核心技术,也是我国的重点发展领域。

石英/氰酸酯<sup>[2-3]</sup>复合材料是一种高性能隐身复合材料,但其广泛应用受制于氰酸酯易爆聚、成型困难,且氰酸酯在常温下通常为固态,只能采用模压工艺,制备工艺性能差,固化温度高,加剧了石英/氰酸酯复合材料成型的难度<sup>[4-10]</sup>。随着科学技术的发展,具有低黏度特性的双酚 E 型氰酸酯问世,其在常温下呈液态,黏度低,可以采用低成本的液相法制备复合材料,这在制备技术上

\* 收稿日期:2015-09-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51303208,51403235)

作者简介:杨金水(1982—),男,云南临沧人,讲师,博士, E-mail:55514102@qq.com

是一种新的尝试,国内外没有相关研究报道。

采用液相法制备石英纤维增强双酚 E 氰酸酯复合材料,揭示了双酚 E 型氰酸酯树脂黏度与固化反应机理的关系、催化剂对固化性能的影响规律。

## 1 实验

### 1.1 原材料

所用树脂为江苏省江都市吴桥树脂厂提供的双酚 E 型氰酸酯,其基本性能参数详见表 1。催化剂为天津市光复精细化工研究所生产的二月桂酸二丁基锡,室温(25℃)下为浅黄色透明状液体。

表 1 双酚 E 型氰酸酯树脂的基本性能参数

Tab. 1 Property parameters of bisphenol - E cyanate ester resin

性能指标	数值
分子量	264.28
颜色	淡黄色液体
水分/%	<0.1
氯离子含量/mg · kg <sup>-1</sup>	<10
凝胶时间/(200℃/min)	>25
黏度/(25℃/mPa · s)	100 ~ 150
介电常数/MHz	<3
介电损耗正切值/MHz	<0.005
玻璃化转变温度/℃	>240
分解温度/℃	>450

增强材料为湖北菲利华石英玻璃股份有限公司提供的 B 型石英玻璃纤维斜纹布,经纬密 16 × 14 根/cm,厚 0.14 mm,面密度为 135 ± 5 g/m<sup>2</sup>,基本性能参数详见表 2。

表 2 石英纤维的基本性能参数

Tab. 2 Property parameters of quartz fiber

密度/ g · cm <sup>-3</sup>	面密度/ g · m <sup>-2</sup>	介电 常数/ 10 GHz	节电损耗 正切值/ 10 GHz	拉伸 强度/ GPa	杨氏 模量/ GPa
2.49	135 ± 5	3.80	0.000 2	3.60	78.0

### 1.2 双酚 E 型氰酸酯树脂的黏度特性测试

采用上海地学仪器研究所提供的 SNB - 2 数显旋转黏度计,测试双酚 E 型氰酸酯树脂的黏度,记录室温下树脂黏度随时间的变化关系,考察

双酚 E 型氰酸酯树脂的黏度 - 时间特性。

恒温水浴加热条件下,测试并记录树脂黏度随温度的变化关系,考察双酚 E 型氰酸酯树脂的黏度 - 温度特性。

### 1.3 双酚 E 型氰酸酯树脂的 DSC 分析

差示扫描量热(Differential Scanning Calorimetry, DSC)分析仪器为梅特勒 - 托利多公司提供的 DSC1/700/DSC sensor/HC - 100 差示扫描量热仪。试验前先打开测试仪器预热 1 h,并用光谱纯铜对差示扫描量热仪进行能量和温度校正。试验时,所有测试均在氮气气氛中进行,氮气流量为 40 ml/min,同时打开冷却箱。

测试 2℃/min, 5℃/min, 8℃/min, 10℃/min, 15℃/min 和 20℃/min 升温速率下双酚 E 型氰酸酯树脂的动态 DSC 曲线,分析树脂体系固化特性;为了考察催化剂对双酚 E 型氰酸酯树脂体系固化特性的影响规律,测试了催化剂(二月桂酸二丁基锡)比例为 0.01%, 0.02% 和 0.03% 时双酚 E 型氰酸酯树脂体系的动态 DSC 曲线。

### 1.4 石英/双酚 E 型氰酸酯复合材料的制备

采用两种典型的液相法复合材料制备技术:树脂传递模塑工艺(Resin Transfer Molding, RTM)和真空导入模塑工艺(Vacuum Infusion Molding Process, VIMP)制备石英/双酚 E 型氰酸酯复合材料层合板,并按标准切割成拉伸、弯曲和短梁剪切测试试样。

石英纤维铺层数均为 18,设计纤维体积分数为 56%,RTM 制备复合材料试样的成型模具为双面刚性的成型模具,如图 1 所示。VIMP 制备复合材料试样的成型模具为一面刚性模具和一面柔性真空袋膜,刚性模具面采用平板模具即可,真空袋膜需具有耐高温性能,从而避免在高温固化时袋膜破损,导致工艺失败。

### 1.5 石英/双酚 E 型氰酸酯复合材料的力学性能测试

#### 1.5.1 石英/氰酸酯复合材料的拉伸性能测试

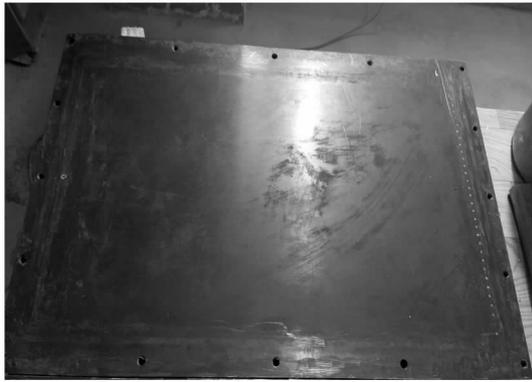
石英/双酚 E 型氰酸酯复合材料拉伸性能测试参考国家标准 GB/T1447 - 2005“纤维增强塑料拉伸性能试验方法”。测试仪器为美特斯工业有限公司生产的 CMT - 5105 电子万能试验机,采用 100 KN 传感器,拉伸试样标距为 100 mm,测试速度为 2.0 mm/min。测试结果取 5 个以上有效试样的平均值。

#### 1.5.2 石英/氰酸酯复合材料的弯曲性能测试

石英/双酚 E 型氰酸酯复合材料弯曲性能测



(a) 上盖板  
(a) Upperside



(b) 下盖板  
(b) Underside

图 1 RTM 工艺制备复合材料的模具

Fig.1 RTM mold for composite sample fabrication

试参考国家标准 GB/T1449 - 2005 “纤维增强塑料弯曲性能试验方法”。测试仪器仍为美特斯工业有限公司生产的 CMT - 5105 电子万能试验机, 采用 10KN 传感器, 跨距为试样厚度的 16 倍, 测试速度为 2.0 mm/min。测试结果取 5 个以上有效试样的平均值。

1.5.3 石英/氰酸酯复合材料的短梁剪切性能测试

石英/双酚 E 型氰酸酯复合材料短梁剪切性能测试参考美标 ASTM D 2344/D 2344M - 00 “Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates I”。测试仪器同样为美特斯工业有限公司生产的 CMT - 5105 电子万能试验机, 采用 10KN 传感器, 跨距为试样厚度的 4 倍, 测试速度为 1.0 mm/min。测试结果取 5 个以上有效试样的平均值。

1.5.4 SEM 分析

采用 FEI Quanta - 200 环境扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 分析复合材

料弯曲试样破坏断面的微观形貌。测试前试样断面采用喷金处理, 样品室真空度达到标准要求后, 等待几分钟后加载 20 kV 扫描电压, 选择样品区域进行精细调节和扫描测试。

2 结果与讨论

2.1 双酚 E 型氰酸酯树脂体系的黏度特性

采用液相法制备石英/双酚 E 型氰酸酯复合材料, 为保证树脂充分浸渍纤维增强材料, 需要了解树脂体系的黏度特性, 其中最为重要的是树脂体系的黏度 - 时间和黏度 - 温度特性。

双酚 E 型氰酸酯树脂体系室温 (18℃) 黏度随时间的变化曲线如图 2 所示。由图 2 可知, 双酚 E 型氰酸酯树脂室温 (18℃) 起始黏度约为 260 mPa · s, 随着时间的增加黏度逐渐下降, 2.5 h 后降至约 228 mPa · s, 且趋于平衡。

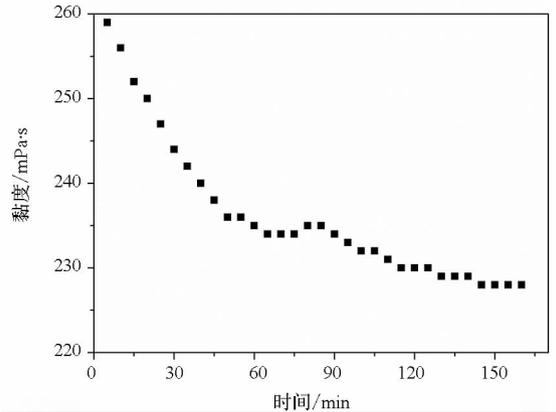


图 2 双酚 E 型氰酸酯树脂体系黏度 - 时间特性曲线  
Fig.2 Viscosity-time characteristic curve of bisphenol - E cyanate ester resin

双酚 E 型氰酸酯树脂的黏度 - 温度特性曲线如图 3 所示。由图 3 可知, 40℃ 前树脂黏度随温度升高而迅速下降; 40℃ 至 60℃, 黏度下降速率变低; 60℃ 之后, 黏度变化趋于稳定。室温至 90℃, 远低于双酚 E 型氰酸酯树脂的固化起始温度, 因此温度升高的作用是增大树脂体系分子链段活动能力, 宏观表现为体系黏度降低。

综上所述, 双酚 E 型氰酸酯树脂具有液相法制备复合材料的低黏度, 以及足够的低黏度保持时间。

2.2 双酚 E 型氰酸酯树脂体系的固化特性

2.2.1 双酚 E 型氰酸酯树脂体系 DSC 分析

不同升温速率 2℃/min, 5℃/min, 8℃/min, 10℃/min, 15℃/min 和 20℃/min 下双酚 E 型氰酸酯树脂体系的动态 DSC 曲线如图 4 所示。由图 4 可知, 树脂体系固化反应放热峰为单峰, 峰

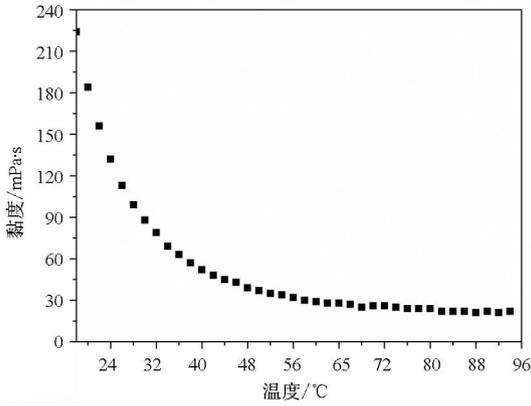


图 3 双酚 E 型氰酸酯树脂体系黏度 - 温度特性曲线  
Fig. 3 Viscosity-temperature characteristic curve of bisphenol - E cyanate ester resin

值随升温速率增加而增高。固化特征温度(固化反应的起始温度  $T_i$ 、放热峰值温度  $T_p$  和终止温度  $T_f$ ) 随升温速率的增大向高温方向移动,但起始温度  $T_i$  差异较小。

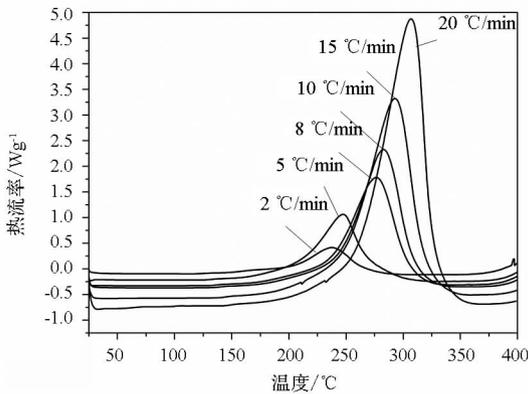


图 4 双酚 E 型氰酸酯树脂体系的动态 DSC 曲线  
Fig. 4 Dynamic curves of bisphenol - E cyanate ester resin

对动态 DSC 曲线进行峰的综合分析处理,可得不同升温速率下树脂体系固化特征温度,见表 3。由表 3 可知,不同升温速率下树脂体系的固化反应放热量  $H_R$  基本相同,平均值约为  $824.45 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

表 3 双酚 E 型氰酸酯树脂动态 DSC 曲线特征温度  
Tab. 3 Characteristic temperature of dynamic DSC curves for bisphenol - E cyanate ester resin

升温速率 $\delta / \text{°C} \cdot \text{min}^{-1}$	$T_i / \text{°C}$	$T_p / \text{°C}$	$T_f / \text{°C}$	$H_R / \text{J} \cdot \text{g}^{-1}$
2	184.27	236.95	285.35	848.27
5	190.39	247.35	298.42	822.77
8	196.82	276.64	317.33	834.64
10	198.54	282.66	321.15	810.85
15	209.88	292.90	330.28	811.50
20	232.07	306.84	337.87	818.68

根据表 3 所示的固化特征温度,采用外推法

(如图 5 所示)可求得升温速率  $\delta$  为 0 时体系的特征温度,即等温固化的特征温度,详见表 4。

表 4 双酚 E 型氰酸酯树脂体系的等温固化特征温度  
Tab. 4 Characteristic temperature of isothermal curing for bisphenol - E cyanate ester resin

树脂体系	$\delta / \text{°C} \cdot \text{min}^{-1}$	$T_i / \text{°C}$	$T_p / \text{°C}$	$T_f / \text{°C}$	$T_{\text{pre-c}} / \text{°C}$	$T_c / \text{°C}$	$T_{\text{post-c}} / \text{°C}$
双酚 E 型 氰酸酯	0	186.75	235.02	286.60	$186 \pm 5$	$235 \pm 5$	$286 \pm 5$

由表 4 可知,双酚 E 型氰酸酯树脂体系的最佳预固化温度  $T_{\text{pre-c}}$ 、固化温度  $T_c$  和后固化温度  $T_{\text{post-c}}$  分别为  $186 \pm 5 \text{ °C}$ 、 $235 \pm 5 \text{ °C}$  和  $286 \pm 5 \text{ °C}$ 。

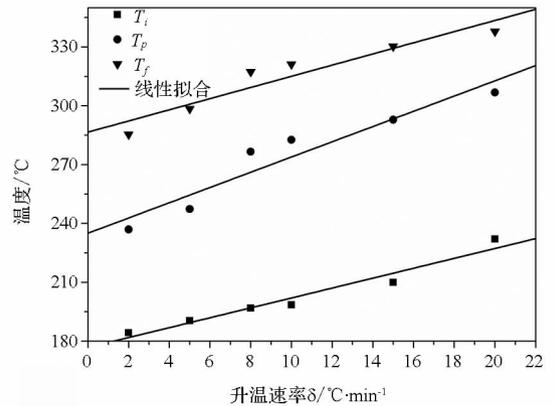


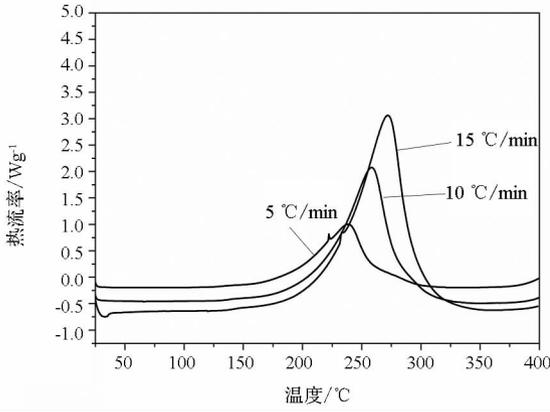
图 5 双酚 E 型氰酸酯树脂体系特征温度与升温速率的变化关系  
Fig. 5 Relationship between characteristic temperature and heating rate

### 2.2.2 催化剂对双酚 E 型氰酸酯树脂体系固化特性的影响

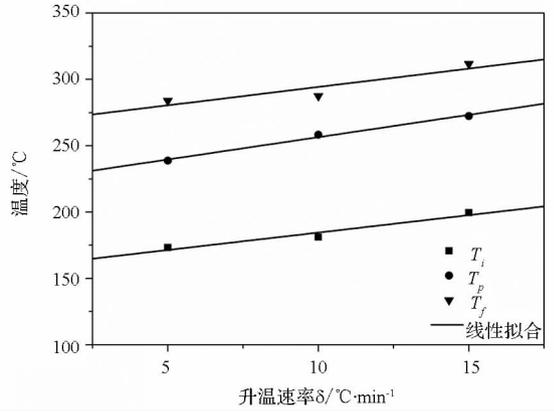
催化剂(二月桂酸二丁基锡)质量含量为 0.01%、0.02% 和 0.03% 时,双酚 E 型氰酸酯树脂体系的动态 DSC 曲线和固化特征温度 - 升温速率的关系曲线如图 6 所示。采用外推法,可得不同催化剂条件下该树脂体系的固化放热量和等温固化特征温度,如表 5 所示。

由表 5 可知,双酚 E 型氰酸酯树脂体系的等温固化特征温度随催化剂含量的增加而降低。催化剂含量小于 0.02% 时,特征温度降低幅度较大,催化剂对树脂固化反应的促进作用较明显;催化剂含量由 0.02% 增加到 0.03% 时,固化特征温度仅降低 2 ~ 8°C,表明催化剂含量为 0.02% ~ 0.03% 时已趋于饱和。

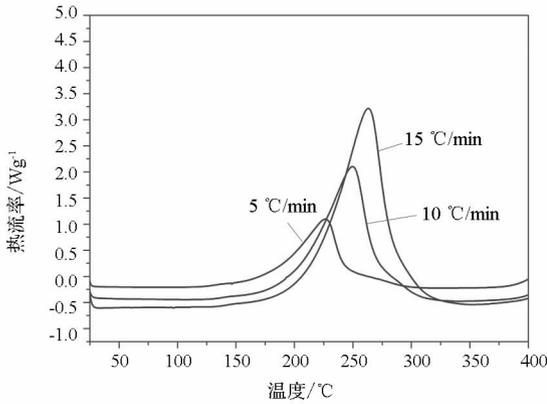
由表 5 还知,催化剂含量为 0.02% ~ 0.03% 时双酚 E 型氰酸酯树脂体系的预固化温度降低了近 60°C,这对该树脂体系的固化工艺和避免固化过程中发生爆聚具有重要意义。



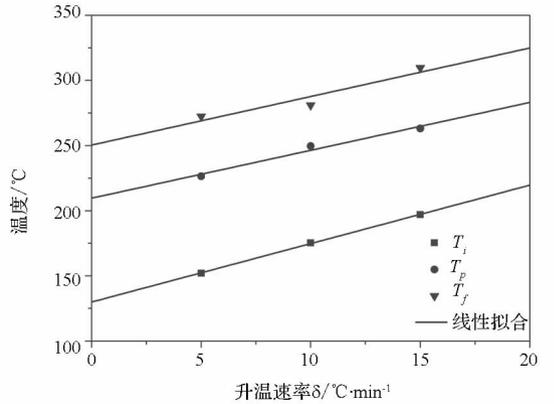
(a) 0.01% 催化剂  
(a) 0.01% catalyst



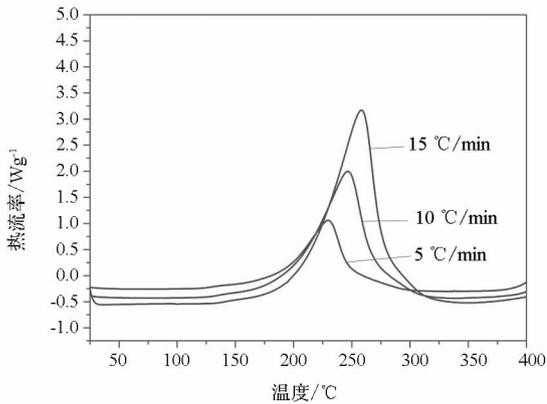
(b) 0.01% 催化剂  
(b) 0.01% catalyst



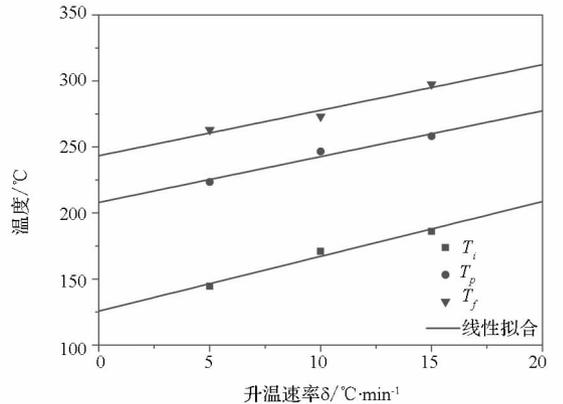
(c) 0.02% 催化剂  
(c) 0.02% catalyst



(d) 0.02% 催化剂  
(d) 0.02% catalyst



(e) 0.03% 催化剂  
(e) 0.03% catalyst



(f) 0.03% 催化剂  
(f) 0.03% catalyst

图 6 同催化剂条件下双酚 E 型氰酸酯树脂体系的动态 DSC 曲线和固化特征温度

Fig. 6 Dynamic DSC curves and characteristic temperatures of bisphenol - E cyanate ester resin with 0.01% , 0.02% , 0.03% catalyst

表 5 双酚 E 型氰酸酯 + 催化剂树脂体系的等温固化特征温度

Tab. 5 Characteristic temperature of isothermal curing for bisphenol - E cyanate ester resin with catalyst

树脂体系	$H_R / J \cdot g^{-1}$	$T_i / ^\circ C$	$T_p / ^\circ C$	$T_f / ^\circ C$	$T_{pre-c} / ^\circ C$	$T_c / ^\circ C$	$T_{post-c} / ^\circ C$
双酚 E 型氰酸酯	824.45	186.75	235.02	286.60	186 ± 5	235 ± 5	286 ± 5
双酚 E 型氰酸酯 + 0.01% 催化剂	807.04	160.06	221.91	270.08	160 ± 5	221 ± 5	270 ± 5
双酚 E 型氰酸酯 + 0.02% 催化剂	811.97	129.70	208.05	253.83	129 ± 5	208 ± 5	253 ± 5
双酚 E 型氰酸酯 + 0.03% 催化剂	798.50	123.85	206.15	245.82	123 ± 5	206 ± 5	245 ± 5

### 2.2.3 双酚 E 型氰酸酯树脂体系的固化制度

综上所述,所选择的催化剂(二月桂酸二丁基锡)含量为 0.02% 的双酚 E 型氰酸酯树脂体系作为制备石英/双酚 E 型氰酸酯复合材料的基体材料体系。

为避免爆聚,制定合适的固化制度,采用抽丝法考察双酚 E 型氰酸酯 + 0.02% 催化剂树脂体系的凝胶时间随温度变化关系,如图 7 所示。

由图 7 可知,100 ℃ 时该体系凝胶时间约为 10 h;120 ℃ 时,减少到 1.5 h;150 ℃ 时,仅有 16 min,且发生爆聚。

根据凝胶时间的测试结果,通过实验确定双酚 E 型氰酸酯 + 0.02% 催化剂树脂体系的固化制度为 100 ℃/2h + 110 ℃/5h + 200 ℃/8h 时,采用液相法制备复合材料能够有效避免双酚 E 型氰酸酯发生爆聚,获得性能优异的复合材料制品。

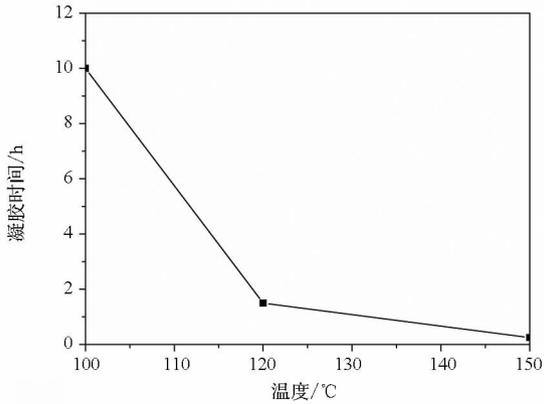


图 7 双酚 E 型氰酸酯 + 0.02% 催化剂体系的凝胶时间 - 温度曲线

Fig. 7 Relationship between gel time and temperature for bisphenol - E cyanate ester + 0.02% catalyst

## 2.3 石英纤维/双酚 E 型氰酸酯树脂复合材料的力学性能

### 2.3.1 石英/双酚 E 型氰酸酯复合材料的拉伸性能

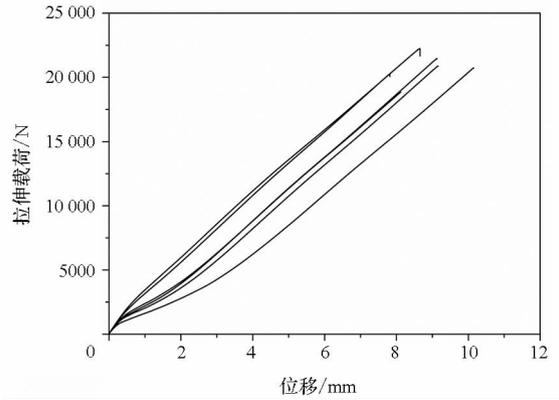
采用 RTM 和 VIMP 制备的石英纤维/双酚 E 型氰酸酯复合材料的拉伸载荷 - 位移曲线(1 组 6 个有效试样)分别如图 8(a) 和图 8(b) 所示,拉伸性能测试结果见表 6。

表 6 石英/双酚 E 型氰酸酯复合材料的拉伸性能

Tab. 6 Tensile properties of quartz fiber/ bisphenol - E cyanate ester composites

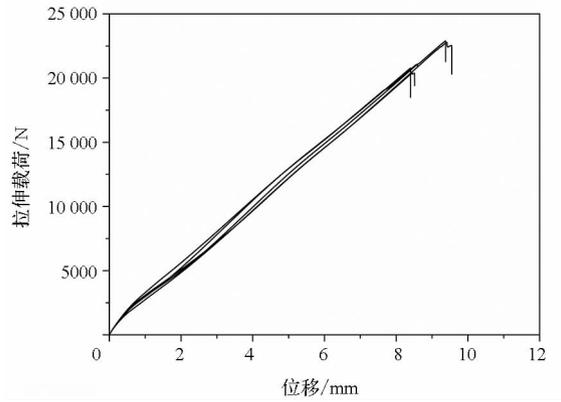
成型工艺	RTM	VIMP
拉伸模量/GPa	11.0	15.6
拉伸强度/MPa	273.2	376.2

由表 6 可知,VIMP 试样的拉伸模量和拉伸强度比 RTM 试样分别大了 4.6GPa 和 103MPa,超幅约为 42% 和 38%,原因可能是 VIMP 试样的纤维体积分数相对较高,且真空脱泡作用减少了试样内部缺陷。



(a) RTM 试样

(a) RTM sample



(b) VIMP 试样

(b) VIMP sample

图 8 石英/双酚 E 型氰酸酯复合材料的拉伸载荷 - 位移曲线

Fig. 8 Tensile load-displacement curves of quartz fiber/ bisphenol - E cyanate ester composites

### 2.3.2 石英/双酚 E 型氰酸酯复合材料的弯曲性能

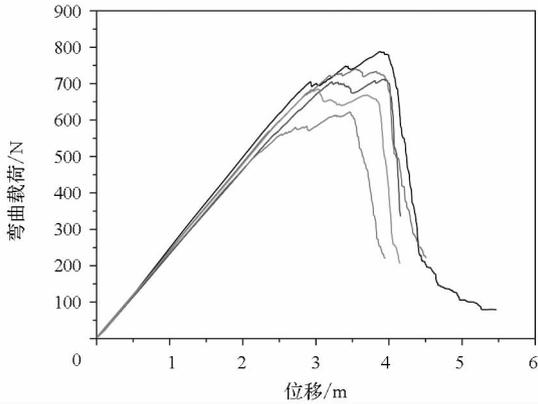
石英纤维/双酚 E 型氰酸酯复合材料典型的弯曲载荷 - 位移曲线(1 组 6 个有效试样)分别如图 9(a) 和图 9(b) 所示,弯曲性能测试结果见表 7。

表 7 石英/双酚 E 型氰酸酯复合材料的弯曲性能

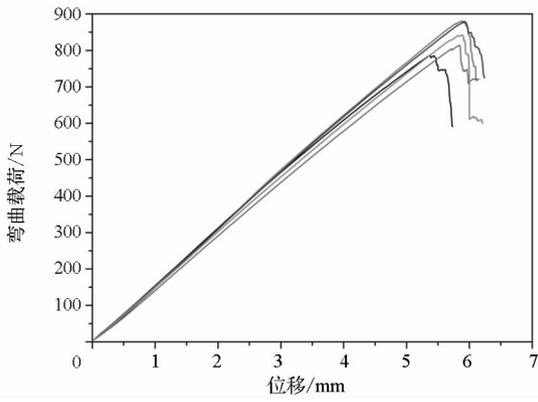
Tab. 7 Flexural properties of quartz fiber/ bisphenol - E cyanate ester composites

成型工艺	RTM	VIMP
弯曲模量/GPa	10.3	16.9
弯曲强度/MPa	468.0	499.7

由表 7 可知, VIMP 试样的弯曲模量和弯曲强度比 RTM 试样分别大 6.6 GPa 和 31.7 MPa, 增幅约为 64% 和 6.8%。



(a) RTM 试样  
(a) RTM sample



(b) VIMP 试样  
(b) VIMP sample

图 9 石英/双酚 E 型氰酸酯复合材料的  
弯曲载荷 - 位移曲线

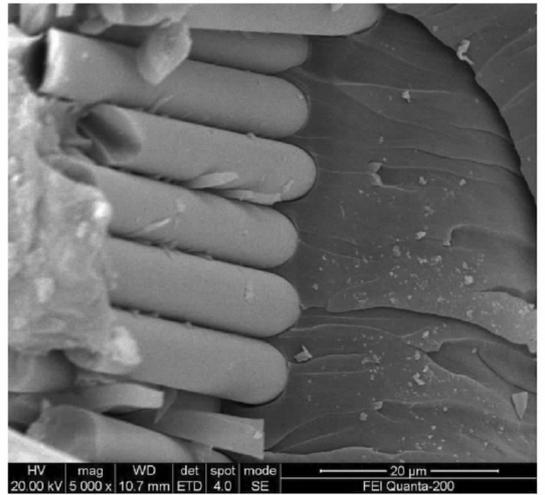
Fig.9 Flexural load-displacement curves of quartz  
fiber/ bisphenol - E cyanate ester composites

### 2.3.3 石英/双酚 E 型氰酸酯复合材料的剪切性能

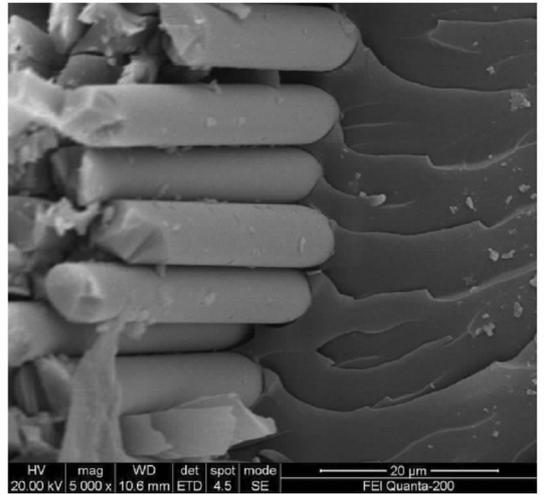
采用 RTM 和 VIMP 制备的石英纤维/双酚 E 型氰酸酯复合材料的短梁剪切强度分别为 53.6 MPa 和 62.8 MPa, VIMP 试样的短梁剪切强度比 RTM 试样大 9.2 MPa, 增幅约为 17%。

石英/双酚 E 型氰酸酯复合材料的 SEM 微观形貌如图 10 所示。从图 10 中可看出, 断裂截面中树脂部分有比较明显的齿状裂痕, 说明树脂自身的强度较好, 采用本文确定的固化制度制备的石英/双酚 E 型氰酸酯复合材料具有良好的固化性能。

从图中还可看出, VIMP 试样断面树脂基体的破坏齿痕比 RTM 试样更为明显, 且齿痕更深, 有效验证了上述力学性能测试结果。



(a) RTM 试样  
(a) RTM sample



(b) VIMP 试样  
(b) VIMP sample

图 10 石英/双酚 E 型氰酸酯复合材料的 SEM 微观形貌  
Fig.10 SEM images of quartz fiber/ bisphenol - E  
cyanate ester composites

## 3 结论

1) 室温至 90 °C 范围内, 双酚 E 型氰酸酯树脂体系的黏度小于 300 mPa · s, 且具有足够的低黏度保持时间, 适合于液相法成型制备复合材料。

2) 100 °C 条件下, 双酚 E 型氰酸酯 + 0.02% 催化剂树脂体系的凝胶时间约为 10 h; 120 °C 时, 减少到 1.5 h; 150 °C 时, 仅 16 min, 且发生爆聚。

3) 双酚 E 型氰酸酯树脂体系的起始固化温度、固化温度和终止固化温度分别为 186 ± 5 °C, 235 ± 5 °C 和 286 ± 5 °C; 随着催化剂二月桂酸二丁基锡含量的增加, 双酚 E 型氰酸酯树脂体系的固化特征温度均呈下降趋势; 催化剂含量在 0.02% ~ 0.03% 范围内达到饱和, 可使双酚 E 型

氰酸酯树脂体系的固化温度降低近 60℃,从而有效避免氰酸酯发生爆聚。

4)采用 RTM 和 VIMP 制备石英纤维/双酚 E 型氰酸酯复合材料,测试其拉伸、弯曲和短梁剪切性能。结果表明,VIMP 试样与 RTM 试样相比,其拉伸模量和拉伸强度分别大了 4.6 GPa 和 103 MPa,增幅约为 42% 和 38%;弯曲模量和弯曲强度分别大了 6.6 GPa 和 31.7 MPa,增幅约为 64% 和 6.8%;短梁剪切强度则大了 9.2 MPa,增幅约为 17%。

## 参考文献 (References)

- [1] 孟新强. 国外雷达隐身和红外隐身技术的发展动向与分析[J]. 飞航导弹, 2005(6):7-11.  
MENG Xinqiang. Development trend and analysis of foreign radar stealth and infrared stealth technology [J]. Winged Missiles Journal, 2005(6): 7-11. (in Chinese)
- [2] 赵磊, 梁国正, 秦华宇, 等. 氰酸酯树脂在宇航复合材料中的应用[J]. 宇航材料工艺, 2000, 30(2): 17-21.  
ZHAO Lei, LIANG Guozheng, QIN Huayu, et al. Applications of cyanate ester resin in aerospace composites[J]. Aerospace Materials & Technology, 2000, 30(2):17-21. (in Chinese)
- [3] 孟季茹, 赵磊, 梁国正, 等. 氰酸酯树脂在高透波雷达天线罩中的应用[J]. 工程塑料应用, 2000, 28(8): 16-18.  
MENG Jiru, ZHAO Lei, LIANG Guozheng, et al. Application of cyanate resin in radome [J]. Engineering Plastics Application, 2000, 28(8): 16-18. (in Chinese)
- [4] Prokopec R, Humer K, Maix R K, et al. Characterization of advanced cyanate ester/epoxy insulation systems before and after reactor irradiation[J]. Fusion Engineering and Design, 2010, 85(2): 227-233.
- [5] Dinakaran K, Kumar R S, Alagar M. Bismaleimides modified Bisphenoldicyanate-epoxy matrices for engineering applications [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2005, 20(2): 299-315.
- [6] Zeng M F, Sun X D, Yao X D. Modification of cyanate ester resin by hydroxyl-terminated liquid butadiene-acrylonitrile rubber and free volume properties of their composites [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 115(1): 338-345.
- [7] Suman N J, Pathak S K, Tammishetti S. Assessment of bismaleimide modified cyanate ester as matrix resin for elevated service temperature carbon composite applications[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2005, 24(10): 1105-1114.
- [8] Iijima T, Kaise T, Tomoi M. Modification of cyanate ester resin by soluble polyimides [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2003, 88(1):1-11.
- [9] Zhang X A, Gu A J, Liang G Z, et al. Liquid crystalline epoxy resin modified cyanate ester for high performance electronic packaging [J]. Journal of Polymer Research, 2011, 18(6): 1441-1450.
- [10] 李文峰, 梁国正, 陈淳, 等. 酚醛型氰酸酯与双酚 A 型环氧共固化反应的 FTIR 研究[J]. 高分子学报, 2006(6): 804-809.  
LI Wenfeng, LIANG Guozheng, CHEN Chun, et al. Study on novolac cyanate ester CO-cured with epoxy E-51 [J]. Acta Polymerica Sinica, 2006(6): 804-809. (in Chinese)