

引用格式:姚卓君,周涛,张浩洋,等.无溶剂缠绕环氧改性氰酸酯树脂的制备与性能[J].材料工程,2026,54(2):294-301.  
YAO Zhuojun,ZHOU Tao,ZHANG Haoyang, et al.Preparation and properties of epoxy modified cyanate ester resin for solvent free winding[J].Journal of Materials Engineering,2026,54(2):294-301.

# 无溶剂缠绕环氧改性氰酸酯树脂的制备与性能

姚卓君<sup>1,2</sup>,周 涛<sup>1,2</sup>,张浩洋<sup>1,2</sup>,戴晶滨<sup>1,2</sup>,黄文煜<sup>1,2</sup>,王晓蕾<sup>1,2\*</sup>

(1 上海复合材料科技有限公司,上海 201112;

2 上海航天树脂基复合材料工程技术研究中心,上海 201112)

**摘要:**采用间苯二酚二缩水甘油醚(RDGE)对双酚E氰酸酯/双酚A氰酸酯/乙酰丙酮铜共混体系进行改性,制备了无溶剂缠绕环氧改性氰酸酯树脂。研究了RDGE含量对树脂的工艺性能和固化物的力学、热机械、介电、吸湿性能的影响。结果表明:RDGE改性无溶剂缠绕氰酸酯树脂25℃下黏度为430 mPa·s,适用于无溶剂缠绕工艺,且施工窗口长达1个月。RDGE对氰酸酯的固化反应具有催化作用,改性树脂体系的固化温度为180℃,后处理温度为240℃。加入的RDGE与氰酸酯反应生成的恶唑烷酮环增强了树脂固化物的韧性,同时为保持缠绕工艺性而等量减少双酚E氰酸酯导致增韧效果被部分抵消,RDGE含量为20%时树脂固化物的力学性能最优,拉伸强度和模量分别为78.45 MPa和3.50 GPa,断裂伸长率为2.77%,弯曲强度和模量分别为152.49 MPa和3.48 GPa,此时树脂固化物的耐湿性能有所上升,100℃水煮100 h的吸水率为1.60%,但玻璃化转变温度、介电性能有所下降, $T_g$ 为247℃,7~15 GHz频率范围内的介电常数为3.04~3.05,介电损耗角正切为0.013~0.014。

**关键词:**环氧改性氰酸酯树脂;无溶剂;缠绕;力学性能

**doi:** 10.11868/j.issn.1001-4381.2024.000827 **CSTR:** 32421.14.j.issn.1001-4381.2024.000827

**中图分类号:** TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2026)02-0294-08

## Preparation and properties of epoxy modified cyanate ester resin for solvent free winding

YAO Zhuojun<sup>1,2</sup>,ZHOU Tao<sup>1,2</sup>,ZHANG Haoyang<sup>1,2</sup>,DAI Jingbin<sup>1,2</sup>,  
HUANG Wenyu<sup>1,2</sup>,WANG Xiaolei<sup>1,2\*</sup>

(1 Shanghai Composites Science & Technology Co.,Ltd.,Shanghai 201112,China;

2 Shanghai Engineering Research Center of Aerospace Resin Based Composite,Shanghai 201112,China)

**Abstract:** A solvent-free epoxy modified cyanate ester resin for winding is prepared by modifying bisphenol E cyanate ester/bisphenol A cyanate ester/acetylacetone copper blend with resorcinol diglycidyl ether (RDGE). The influence of RDGE content on the processability of the resin and the mechanical, thermomechanical, dielectric, and moisture absorption properties of cured resin is investigated. The results show that the viscosity of the resin at is 430 mPa·s @ 25 °C, which is suitable for solvent-free winding. The processing window lasts for up to one month. RDGE has a catalytic effect on the curing reaction of cyanate esters. The curing temperature of the modified resin is 180 °C, and the post-treatment temperature is 240 °C. The oxazolidinone ring generated by the reaction between RDGE and cyanate ester enhances the toughness of the cured resin, while reducing BECy by an equal amount to maintain the processability of the winding process partially offsets the toughening effect. The mechanical properties of the resin cured material reach their maximum at an RDGE content of 20%, with tensile strength and modulus of 78.45 MPa and 3.50 GPa, elongation at break of 2.77%, and bending strength and modulus of 152.49 MPa and 3.48 GPa, respectively. At this point, the moisture resistance of cured resin has improved, with a water absorption rate of 1.60% after 100 h of boiling at 100 °C. However, the glass transition temperature and dielectric properties

have decreased, with a  $T_g$  of 247 °C. The dielectric constant in the frequency range of 7-15 GHz is 3.04-3.05, and the dielectric dissipation factor is 0.013-0.014.

**Key words:** epoxy modified cyanate ester resin; solvent free; winding; mechanical property

复合材料纤维缠绕工艺是将浸渍树脂胶液的连续纤维或布带,缠绕到芯模上,然后固化、脱模获得制品的一种成型工艺,具有可设计性好、生产效率高等优点<sup>[1-4]</sup>。纤维缠绕工艺广泛应用于航空航天结构件制造当中,典型制件包括卫星桁架的杆件、火箭燃料贮箱等<sup>[5-7]</sup>。氰酸酯树脂是分子结构中含有两个或两个以上氰酸酯官能团(—OCN)的热固性树脂,兼具优异的力学、耐热、介电、吸湿、固化收缩等性能,被广泛应用于航空航天行业的复合材料制造<sup>[8-14]</sup>。

目前航天结构件用氰酸酯树脂通常都是由双酚 A 氰酸酯作为主体,室温下为固态或半固态,需要用溶剂溶解才能用于湿法缠绕工艺。然而溶剂的引入一方面会造成环境污染,另一方面溶剂挥发会导致复合材料的树脂含量难以精确控制,从而影响制品的成型质量<sup>[15]</sup>。

双酚 E 氰酸酯树脂是一种新型的室温下为稀液态的氰酸酯树脂,适合作为无溶剂缠绕氰酸酯树脂配方的基体使用<sup>[16-17]</sup>。杨金水等<sup>[18]</sup>采用双酚 E 氰酸酯树脂作为主体、二月桂酸二丁基锡作为催化剂,制备了 18 °C 下黏度为 260 mPa·s 的液态氰酸酯树脂体系,采用树脂传递模塑工艺(resin transfer molding, RTM)和真空导入模塑工艺(vacuum infusion molding process, VIMP)制备了石英纤维复合材料,研究了树脂的固化特性和复合材料的力学性能;赵凯等<sup>[19]</sup>将双酚 A 氰酸酯、双酚 E 氰酸酯复配并进行预聚处理,再入二月桂酸二丁基锡作为催化剂,发现两种氰酸酯按 50:50 质量比混合时,25 °C 下黏度为 800 mPa·s,采用湿法缠绕工艺制备了碳纤维复合材料 NOL 环并测试了复材的力学性能,制备的树脂在室温下放置 20 天后出现了氰酸酯结晶析出现象。然而,上述两篇文献均没有研究树脂固化物本身的性能。

环氧增韧是一种常用的氰酸酯增韧方法,有助于提高树脂体系的力学性能,提高复合材料的承载能力<sup>[20-23]</sup>。目前环氧增韧氰酸酯树脂的研究主要集中于环氧增韧双酚 A 氰酸酯树脂当中,对环氧树脂改性双酚 E 氰酸酯/双酚 A 氰酸酯树脂混合体系的研究较少。

本工作采用双酚 E 氰酸酯树脂、双酚 A 氰酸酯、乙酰丙酮铜制备了氰酸酯树脂体系,然后在上述体系中引入间苯二酚二缩水甘油醚对树脂体系进行改性。系统研究了间苯二酚二缩水甘油醚含量对树脂的工

艺性、固化特性,对固化物的力学性能、热机械性能、介电性能、吸湿性能的影响。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验材料

双酚 E 氰酸酯单体(bisphenol E cyanate, BECy),纯度 $\geq 99\%$ ,25 °C黏度 80 mPa·s,自制;双酚 A 氰酸酯单体(bisphenol A cyanate, BACy),纯度 $\geq 99\%$ ,25 °C下为白色固体粉末,熔点 69~71 °C,自制;间苯二酚二缩水甘油醚(resorcinol diglycidyl ether, RDGE),纯度 $\geq 99\%$ ,25 °C黏度 80 mPa·s,络合高新材料(上海)有限公司;乙酰丙酮铜(copper acetylacetonate, CuAA),纯度 $\geq 99\%$ ,25 °C下为蓝色固体粉末,上海信帆生物科技有限公司。BECy、BACy、RDGE 的结构式如图 1 所示。

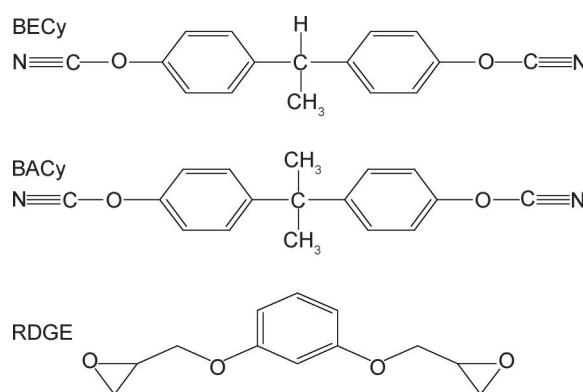


图1 BECy、BACy和RDGE的分子结构式  
Fig.1 Structures of BECy, BACy, and RDGE

### 1.2 树脂及其固化物的制备

将BACy加热熔融,在200 °C下预聚一定时间,得到80 °C黏度为1400 mPa·s的预聚物,简称BACy-P。将BACy-P和BECy在70 °C下搅拌均匀,得到混合物。将CuAA加入BECy当中,在室温下高速剪切分散,得到分散液。将CuAA与BECy的分散液、BACy-P和BECy的混合物、RDGE按表1所示比例混合,在室温下搅拌均匀,得到树脂配方。为使各树脂体系25 °C下具有相同的黏度,加入RDGE时等量地减少了BECy。

将上述树脂分别按180 °C/4 h的程序进行固化,并按240 °C/2 h的程序进行后处理,得到树脂固化物,

表1 树脂配方构成

Table 1 Formula composition of resins

Formula	CE/EP=	CE/EP=	CE/EP=	CE/EP=
	10/0	9/1	8/2	7/3
BECy	75	65	55	45
BACy-P	25	25	25	25
RDGE	0	10	20	30

分别命名为CE/EP=10/0-C、CE/EP=9/1-C、CE/EP=8/2-C和CE/EP=7/3-C。

### 1.3 测试与表征

采用旋转黏度计进行树脂黏度测试,采用流变仪进行树脂流变测试,采用差示扫描量热仪进行树脂固化特性测试,采用傅里叶红外衰减漫反射光谱分析仪进行树脂及其固化物的红外测试。树脂固化物的力学性能采用电子万能材料试验机参考GB/T 2567—2008执行,采用发射扫描电子显微镜表征树脂固化物的断面形貌。树脂固化物的热机械性能采用动态热机械分析仪进行测试,介电性能采用微波矢量网络分析仪进行测试,吸湿性能参考GB/T1034—2008采用100℃沸水煮法进行测试。

## 2 结果与分析

### 2.1 树脂的工艺性能

湿法缠绕工艺中,树脂的最佳工艺黏度为200~800 mPa·s,黏度过低会导致纤维无法良好挂胶,而黏度过大会导致树脂无法充分浸润纤维<sup>[19]</sup>,同时考虑到缠绕的实际施工过程,要求树脂在混合后具有足够的操作窗口期。树脂配方的黏度如表2所示,可以看出,四种树脂在新制备时25℃下的黏度完全一致,在25℃下均具有不低于1个月的缠绕施工窗口期,可满足各类缠绕件的施工周期要求。制备的四种树脂在上述施工窗口期内均未出现固体结晶析出,一方面是由于对BACy进行了适当程度的预聚,另一方面极性环氧树脂的加入也对氰酸酯的结晶起到了抑制作用。

表2 树脂的黏度

Table 2 Viscosity data of resins

Sample	Viscosity/(mPa·s)		
	25℃	25℃×7 d	25℃×1 month
CE/EP=10/0	430	490	710
CE/EP=9/1	430	490	730
CE/EP=8/2	430	500	770
CE/EP=7/3	430	510	800

图2为树脂配方的DSC曲线,特征数据如表3所示。可以看出,BECy的起始固化温度 $T_i$ 为173.4℃、峰值固化温度 $T_p$ 为261.9℃,BACy-P的 $T_i$ 为180.7℃、 $T_p$ 为255.5℃,两者具有相似的反应特征温度。在两种氰酸酯的混合物中加入乙酰丙酮铜后,混合体系CE/EP=10/0的 $T_i$ 降低至112.0℃,说明CuAA对氰酸酯的固化反应具有较好的催化效果。进一步地,将CE/EP=10/0中的部分BECy替换为RDGE后,混合体系CE/EP=8/2的 $T_i$ 进一步降低至101.8℃,说明RDGE对氰酸酯的固化反应也有催化作用;此外,RDGE部分替换BECy后,DSC曲线由单峰变为双峰,说明混合体系固化过程中发生了新的化学反应。通过CE/EP=10/0、CE/EP=8/2树脂的特征温度确定树脂的固化制度为180℃/4 h,后处理制度为240℃/2 h。

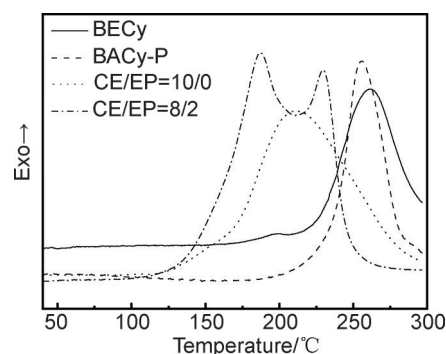


图2 树脂配方的DSC曲线

Fig.2 DSC curves of resins

表3 树脂配方的DSC数据

Table 3 DSC data of resins

Sample	$T_i$ /℃	$T_p$ /℃
BECy	173.4	261.9
BACy-P	180.7	255.5
CE/EP=10/0	112.0	211.4
CE/EP=8/2	101.8	187.4/229.7

树脂配方的固化反应机理如图3所示,红外谱图如图4所示。CE/EP=10/0树脂经180℃固化4 h后2235 cm<sup>-1</sup>和2270 cm<sup>-1</sup>处的氰酸酯基二重吸收峰消失,1556 cm<sup>-1</sup>和1565 cm<sup>-1</sup>处出现三嗪环的吸收峰,说明体系中的两种氰酸酯发生聚合生成了三嗪环;CE/EP=8/2树脂经180℃固化4 h后2235 cm<sup>-1</sup>和2270 cm<sup>-1</sup>处的氰酸酯基二重吸收峰、916 cm<sup>-1</sup>处的环氧基吸收峰消失,1556 cm<sup>-1</sup>和1565 cm<sup>-1</sup>处出现三嗪环的吸收峰、1698 cm<sup>-1</sup>和1750 cm<sup>-1</sup>处出现恶唑烷酮的吸收峰,说明固化过程中除发生了氰酸酯的三嗪环化反应外,RDGE还与氰酸酯发生了恶唑烷酮环化反应。

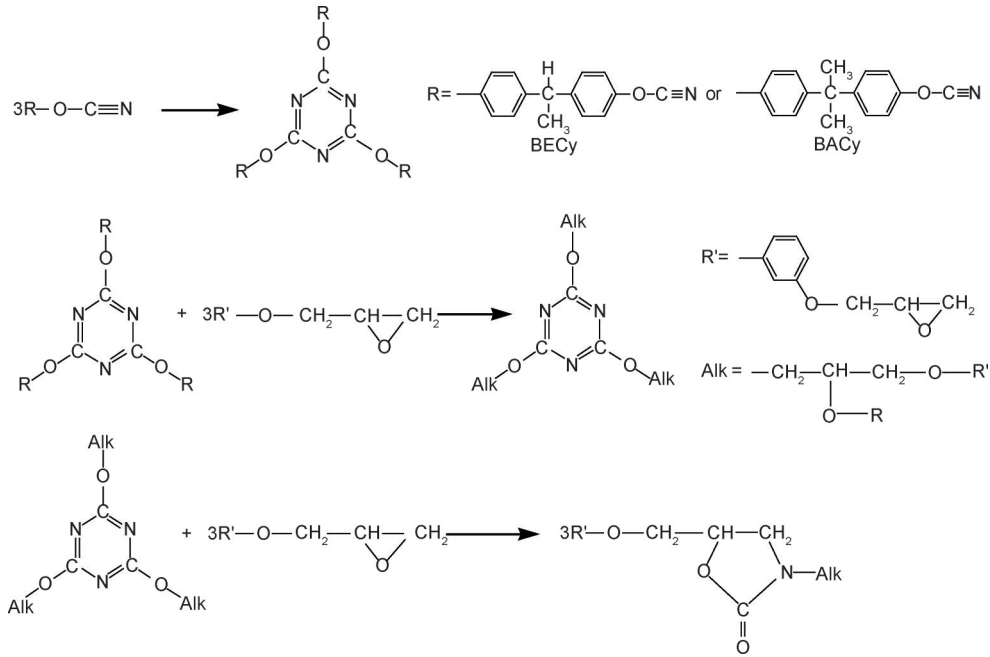


图 3 树脂配方的固化反应机理  
Fig.3 Reaction mechanism of esters

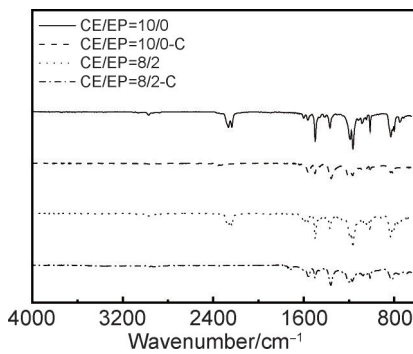


图 4 树脂及固化物的红外谱图  
Fig.4 Infrared spectra of uncured and cured resins

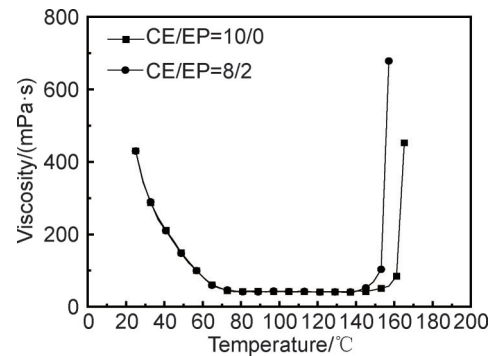


图 5 树脂配方的流变性能  
Fig.5 Rheological properties of resins

图 5 为树脂配方的流变曲线,树脂的黏度随温度上升先下降后上升。在升温初期树脂的分子间运动随着温度的上升而加剧,导致黏度下降;当温度升至接近起始固化温度  $T_i$  时,分子间运动加剧导致的黏度下降与固化交联导致的黏度上升形成竞争,导致树脂黏度下降趋缓直至进入平台期;当温度进一步上升后,固化交联导致的黏度上升占据主导地位,使树脂的黏度迅速上升。在  $130^\circ\text{C}$  前,两种树脂的流变曲线几乎完全重合,CE/EP=10/0 树脂的拐点温度为  $146^\circ\text{C}$ ,CE/EP=8/2 树脂的拐点温度为  $138^\circ\text{C}$ ,说明 CE/EP=8/2 的反应活性略高于 CE/EP=10/0,这与图 2 中的 DSC 曲线的结果是一致的。

### 2.2 树脂固化物的力学性能

树脂配方固化物的拉伸及弯曲性能如图 6 所示。可以看出,随着 RDGE 含量的增大,树脂固化物的力

学性能先上升后下降。在 RDGE 含量 20% 时,树脂固化物的力学性能达到最大值,拉伸强度和模量分别为  $78.45\text{ MPa}$  和  $3.50\text{ GPa}$ ,断裂伸长率为 2.77%,弯曲强度和模量分别为  $152.49\text{ MPa}$  和  $3.48\text{ GPa}$ ,相比于未加入 RDGE 时拉伸强度提高了 11.9%、断裂伸长率提高了 10.4%、弯曲强度提高了 8.0%。在 RDGE 含量 10% 时,树脂体系的增韧效果并不显著,而在 REGE 含量 30% 时,树脂体系的力学性能反而略有下降。

张增平等<sup>[24]</sup>研究了不同环氧树脂对 BACy 的增韧效果,发现树脂体系固化物韧性随环氧树脂添加量的变化规律不尽相同,在环氧树脂含量  $\leq 40\%$  范围内,E20/BACy 体系的弯曲强度随 E20 含量的增大先上升后下降,在 E20 含量 20% 时达到最大值,而 E51/BACy 体系的弯曲强度随 E51 含量的增大而上升,两

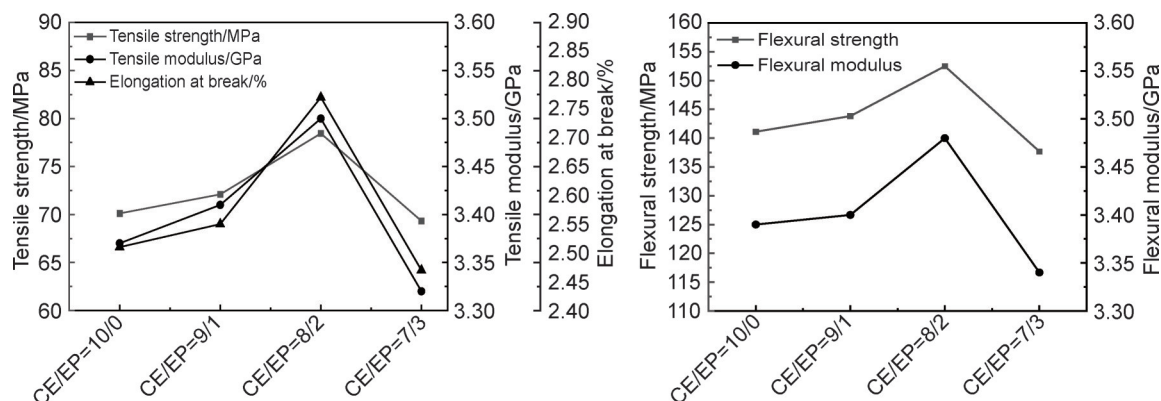


图6 树脂固化物的拉伸性能(a)和弯曲性能(b)

Fig.6 Tensile properties (a) and flexural properties(b) of cured resins

种体系在环氧含量20%时弯曲强度分别较纯BACy提高了40%和37.7%。

本工作的树脂体系中, BECy与BACy分子结构具有高度相似性, 仅中心C原子上连接的基团不同, BECy与BACy固化时均发生三嗪环化反应, 混合体系CE/EP=10/0具有较好的拉伸和弯曲性能。在树脂体系中加入RDGE后, 环氧树脂与氰酸酯树脂反应生成的恶唑烷酮环降低了氰酸酯树脂自聚生成的三嗪环的交联密度, 从而提高了树脂固化物的韧性; 另一方面, 为保持改性树脂体系的缠绕工艺性, 在加入

RDGE的同时等量地减少了BECy, 而BECy的拉伸和弯曲性能高于BACy, 因此在CE/EP=9/1、CE/EP=8/2、CE/EP=7/3三种树脂体系中, 加入RDGE对树脂体系的增韧效果与减少BECy对树脂体系力学性能的负面影响产生了部分的相互抵消, 导致改性树脂体系的力学性能随RDGE含量的增大而先上升后下降。

从图7所示的树脂固化物断面形貌SEM图可以看出, 改性后CE/EP=8/2-C的断面存在大量剪切带和韧窝, 呈典型的韧性断裂特征, 与改性前CE/EP=10/0-C的断面形貌较为类似。

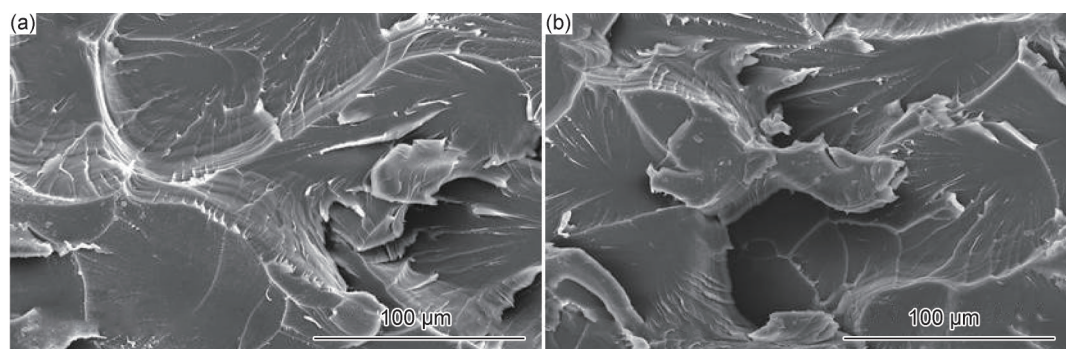


图7 树脂固化物的断面形貌SEM图 (a)CE/EP=10/0-C;(b)CE/EP=8/2-C

Fig.7 Cross-sectional SEM images of cured resins (a)CE/EP=10/0-C;(b)CE/EP=8/2-C

### 2.3 树脂固化物的热机械性能

图8为树脂固化物的DMA曲线, 以 $\tan\delta$ 曲线的峰值温度作为树脂固化物的玻璃化转变温度 $T_g$ 。可以看出, 随着树脂体系中RDGE含量的增大, 树脂固化物的储能模量呈现出更快的下降趋势, CE/EP=10/0-C的 $T_g$ 为252℃, 而CE/EP=9/1-C、CE/EP=8/2-C、CE/EP=7/3-C的 $T_g$ 分别为251、247、242℃。恶唑烷酮环结构的耐热性不如三嗪环, 因此在树脂体系中加入RDGE后导致固化物的玻璃化转变温度有所下降。

### 2.4 树脂固化物的介电性能

树脂固化物在7~15 GHz频率范围内的介电性能如图9所示。随着树脂体系中RDGE含量的增大, 树脂固化物的介电常数增大、介电损耗角正切增大。CE/EP=10/0-C的介电常数为2.98~2.99, 介电损耗角正切为0.010~0.011, 在高频段范围内表现出了优异且稳定的介电性能, 这是由于固化物中的三嗪环结构高度对称、加上高度位阻, 很少量的极性基团只能在很小的范围内旋转, 使其固化物的极性极低<sup>[25]</sup>。在树脂体系中加入RDGE后, 固化物中部分三嗪环与环氧基团反应生成了恶唑烷酮环, 破坏了分子结构的对

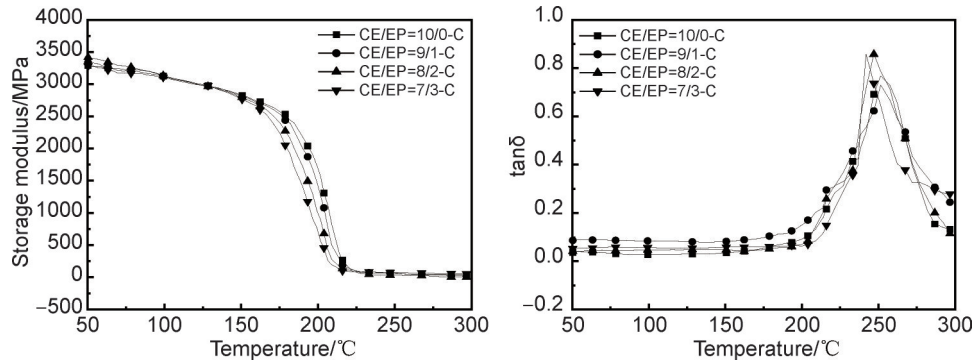


图 8 树脂固化物的 DMA 曲线 (a) 储能模量; (b) 损耗角正切  
Fig.8 DMA curves of cured resins (a) storage modulus; (b) tanδ

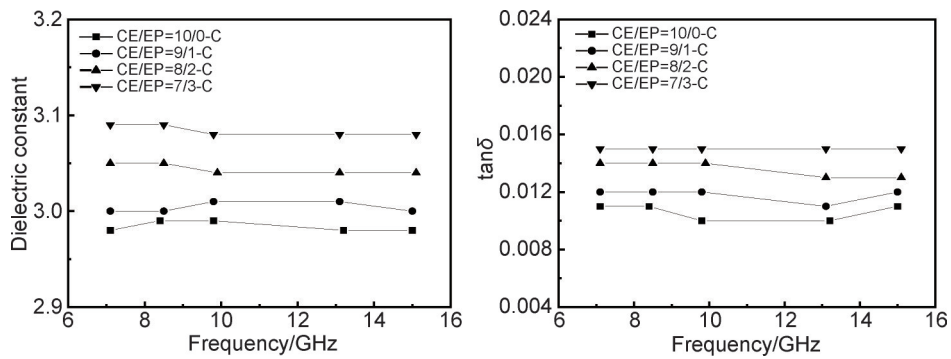


图 9 树脂固化物的介电性能 (a) 介电常数; (b) 损耗角正切  
Fig.9 Dielectric properties of cured resins (a) dielectric constant; (b) tanδ

称性, 因而使介电性能有所下降, CE/EP=9/1-C 的介电常数为 3.00~3.01, 介电损耗角正切为 0.011~0.012, CE/EP=8/2-C 的介电常数为 3.04~3.05, 介电损耗角正切为 0.013~0.014, CE/EP=7/3-C 的介电常数为 3.08~3.09, 介电损耗角正切为 0.015。

### 2.5 树脂固化物的吸湿性能

图 10 为树脂固化物的吸水率曲线。可以看出, 随着树脂体系中 RDGE 含量的增大, 树脂固化物的吸水率逐渐减小。在 100 °C 沸水中浸泡 100 h 后, CE/EP=10/0-C 的吸水率为 1.87%, 而在树脂体系中加入 RDGE 后, CE/EP=9/1-C、CE/EP=8/2-C、CE/EP=

7/3-C 同等条件下的吸水率分别为 1.71%、1.60%、1.54%。这是由于纯氰酸酯体系中的二氰脲酯结构具有较大的自由体积, 经 RDGE 改性后生成的恶唑烷酮环减小了这种自由体积<sup>[24]</sup>。

### 3 结论

(1) 间苯二酚二缩水甘油醚 (RDGE) 改性双酚 E 氰酸酯/双酚 A 氰酸酯/乙酰丙酮铜混合树脂体系 25 °C 下的黏度为 430 mPa·s, 适用于无溶剂缠绕工艺, 施工窗口期长达 1 个月。

(2) RDGE 对氰酸酯树脂的固化反应具有催化作用, 降低了树脂体系的起始固化温度, RDGE 改性氰酸酯树脂体系的固化制度为 180 °C/4 h, 后处理制度为 240 °C/2 h。

(3) 加入的 RDGE 与氰酸酯在高温下反应生成恶唑烷酮环, 提高了树脂固化物的韧性, 同时为保持缠绕工艺性而等量减少双酚 E 氰酸酯导致增韧效果被部分抵消。RDGE 含量为 20% 时, 树脂体系具有最佳力学性能, 拉伸强度和模量分别为 78.45 MPa 和 3.50 GPa, 断裂伸长率为 2.77%, 弯曲强度和模量分别为 152.49 MPa 和 3.48 GPa。

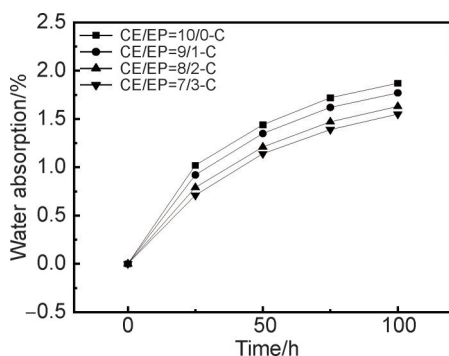


图 10 树脂固化物的吸湿性能  
Fig.10 Water absorption of cured resins

(4)加入RDGE后,树脂固化物的耐湿性能有所上升,但玻璃化转变温度、介电性能有所下降。树脂体系固化物达到最佳力学性能时,100℃水煮100h的吸水率为1.60%, $T_g$ 为247℃,7~15GHz频率范围内的介电常数为3.04~3.05,介电损耗角正切为0.013~0.014。

### 参考文献

- [1] 霍红宇,姚鑫,高亮,等.高性能连续纤维增强热塑性预浸料及复合材料制备工艺研究进展[J].材料工程,2025,53(3):44-53.  
HUO H Y, YAO X, GAO L, et al. Research progress in preparation technology of high performance continuous fiber reinforced thermoplastic prepreg and its composites [J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(3): 44-53.
- [2] TELE D, WAKHARE N, BHOSALE R, et al. A review of design and development of filament winding machine for composite materials [J]. International Journal of Current Engineering and Technology, 2016, 6: 74-77.
- [3] 陈建中.复合材料缠绕制品发展情况报告[J].玻璃钢/复合材料,2012(3):94-96.  
CHEN J Z. Report on the development of composite wound products [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2012(3): 94-96.
- [4] 李默宇,梁胜彪,孟庆云,等.碳纤维湿法缠绕用高模量高韧性环氧树脂基体[J].玻璃钢/复合材料,2009(2):72-77.  
LI M Y, LIANG S B, MENG Q Y, et al. Toughness epoxy resin with high modulus for carbon fiber wet filament winding [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2009(2): 72-77.
- [5] AZEEM M, YA H H, ALAM M A, et al. Application of filament winding technology in composite pressure vessels and challenges: a review [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 49: 103468.
- [6] 蔡金刚,于柏峰,杨志忠,等.我国纤维缠绕技术及产业发展历程与现状[J].玻璃钢/复合材料,2014(9):42-51,18.  
CAI J G, YU B F, YANG Z Z, et al. Development course and present situation of fiber winding technology and industry in China [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014(9): 42-51, 18.
- [7] 罗睿,李勇,还大军,等.直升机复合材料传动轴缠绕设计制备及接头连接研究进展[J].航空材料学报,2021,41(3):52-65.  
LUO R, LI Y, HUAN D J, et al. Research progress on structural design, manufacturing technology and connection mode of filament wound composite transmission shaft for helicopter [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2021, 41(3): 52-65.
- [8] 乔海涛,包建文,钟翔宇,等.氰酸酯树脂的改性与固化特性的热分析[J].航空材料学报,2019,39(6):63-72.  
QIAO H T, BAO J W, ZHONG X Y, et al. Modification and thermal analysis for curing properties of cyanate-ester resin [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2019, 39(6): 63-72.
- [9] GOYAL S, COCHRAN E W. Cyanate ester composites to improve thermal performance: a review [J]. Polymer International, 2022, 71(5): 583-589.
- [10] LI S, ZHU Y, WANG Y, et al. Cyanate ester resin based composites with high toughness and low outgassing performances [J]. Composites Communications, 2021, 23: 100574.
- [11] 祝保林.氰酸酯树脂性能研究[M].北京:科学出版社,2016.  
ZHU B L. Study on properties of cyanate ester resin [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [12] 许培俊,吴帆,朱真,等.基于聚醚砜/氰酸酯半互穿树脂体系的碳纤维复合材料性能研究[J].复合材料学报,2022,39(6):2639-2648.  
XU P J, WU F, ZHU Z, et al. Research on carbon fiber composite properties based on (polyether sulfone)/cyanate ester semi-interpenetrating resin system [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(6): 2639-2648.
- [13] ZHANG Z, YU Z. Investigation on mechanical properties and thermal expansibility of epoxy resin copolymerization modified cyanate ester under medium-low temperature curing process [J]. Polymers for Advanced Technologies, 2024, 35(1): e6195.
- [14] 李文峰,辛文利,梁国正,等.氰酸酯树脂的固化反应及其催化剂[J].航空材料学报,2003,23(2):56-62.  
LI W F, XIN W L, LIANG G Z, et al. Cure reaction of cyanate ester resins and the catalyst [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2003, 23(2): 56-62.
- [15] 贾力伟,李武胜,康永胜.复合材料干法缠绕成型技术探索研究[J].科技视界,2024(12):93-96.  
JIA L W, LI W S, KANG Y S. Research on dry winding technology of composite materials [J]. Science & Technology Vision, 2024(12): 93-96.
- [16] 何鲁林.氰酸酯树脂的发展概况[J].航空材料学报,1996,16(4):54-61.  
HE L L. General development of the cyanate resin [J]. Journal of Aeronautical Materials, 1996, 16(4): 54-61.
- [17] 刘清田.一种无溶剂缠绕氰酸酯树脂体系及其制备方法和应用:CN202010543144.7[P].2022-12-02.
- [18] 杨金水,李娟,魏凯耀.石英/双酚E型氰酸酯复合材料的制备与性能[J].国防科技大学学报,2016,38(1):26-33.  
YANG J S, LI J, WEI K Y. Preparation and properties of quartz fiber/bisphenol-E isocyanate ester composites [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(1): 26-33.
- [19] 赵凯,高伟,陈书华.湿法缠绕成型T700碳纤维/氰酸酯树脂复合材料力学性能研究[J].玻璃钢/复合材料,2019(2):91-95.  
ZHAO K, GAO W, CHEN S H. Mechanical properties of T700 carbon fiber/cyanate ester composites fabricated by wetting winding [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2019(2): 91-95.
- [20] LIANG G, ZHANG M. Enhancement of processability of cyanate ester resin *via* copolymerization with epoxy resin [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2002, 85(11): 2377-2381.
- [21] MATHEW D, REGHUNADHAN NAIR C P, NINAN K N. Bisphenol A dicyanate-novolac epoxy blend: cure characteristics, physical and mechanical properties, and application in composites [J]. Journal of Applied Polymer Science, 1999, 74(7): 1675-1685.
- [22] 徐志财,侯燕,刘志林,等.超支化环氧树脂改性氰酸酯树脂及其性能[J].高分子材料科学与工程,2022,38(4):144-151.

- XU Z C, HOU Y, LIU Z L, et al. Cyanate ester resin modified with hyperbranched epoxy resin and its properties [J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2022, 38(4): 144-151.
- [23] 欧秋仁, 嵇培军, 肖军, 等. 国产 T800 碳纤维用氰酸酯树脂开发及其复合材料性能[J]. *材料工程*, 2019, 47(8): 125-131.
- OU Q R, JI P J, XIAO J, et al. Cyanate ester for domestic T800 carbon fiber and its composites properties[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2019, 47(8): 125-131.
- [24] 张增平, 梁国正, 任鹏刚, 等. 环氧改性氰酸酯树脂研究[J]. *航空材料学报*, 2006, 26(4): 100-104.
- ZHANG Z P, LIANG G Z, REN P G, et al. Studies on epoxies resins modified cyanate [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2006, 26(4): 100-104.
- [25] 薛洁, 管清宝, 刘萍, 等. 新型耐高温氰酸酯/磷酸铝复合材料的研究[J]. *航空材料学报*, 2012, 32(5): 79-85.
- XUE J, GUAN Q B, LIU P, et al. Study on novel heat resistant cyanate ester/phosphate aluminum composite[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2012, 32(5): 79-85.

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3707800)

收稿日期: 2024-12-10; 录用日期: 2025-01-24

通讯作者: 王晓蕾(1980—), 女, 研究员, 博士, 研究方向为航天复合材料领域新材料新工艺, 联系地址: 上海市闵行区召楼路3636号上海复合材料科技有限公司(201112), E-mail: wangxiaolei7777@163.com

(本文责编: 解 宏)