

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.02.008

含萘环二胺改性BMI树脂的制备和性能

王威, 王义师, 孔国强, 王昭硕, 杨传超, 周赞民, 王坤, 刘书畅

(山东非金属材料研究所, 济南 250031)

摘要: 针对双马来酰亚胺(BMI)树脂固化后交联密度大而引起的脆性大的问题,通过合成一种含萘环和醚键的二元胺化合物(DAN),用DAN和二苯甲烷型双马来酰亚胺(BDM)进行预聚,然后将不同质量分数的预聚物加至BDM/二烯丙基双酚A(DABPA)二元体系中,形成DAN/BDM/DABPA三元体系,来达到对BMI树脂增韧的目的。采用核磁共振氢谱和傅里叶变换红外光谱对合成过程中的中间产物和目标产物进行结构表征,证明DAN被成功合成;采用差示扫描量热(DSC)法分析了三元体系的固化行为,研究结果表明共混物体系有着相似的固化行为;采用不同升温速率下的DSC确定了共混物的固化工艺参数,具体参数为:180 °C/2 h+210 °C/2 h+240 °C/4 h+260 °C/2 h。测试结果表明共混体系的冲击强度随预聚物的加入先增加后降低,加入预聚物质量分数3%的体系冲击强度达到了25.9 kJ/m²;共混体系的弯曲强度随着预聚物的加入也呈现先增加后降低的趋势,加入预聚物质量分数为6%的体系的弯曲强度达到了128.2 MPa。用热重分析法分析了共混体系固化物的热稳定性,预聚物质量分数为6%和9%的共混体系的800 °C残炭率均高于未加预聚物的体系,但加入预聚物的共混体系失重5%的温度降低。

关键词: 双马来酰亚胺;增韧;改性;萘环;热稳定性

中图分类号: TQ322.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)02-0058-07

Preparation and properties of BMI resin modified by diamine containing naphthalene

WANG Wei, WANG Yishi, KONG Guoqiang, WANG Zhaoshuo, YANG Chuanchao, ZHOU Zanmin, WANG Kun, LIU Shuchang
(Shandong Institute of Non-Metallic Materials, Jinan 250031, China)

Abstract : To solve the brittleness problem caused by high crosslinking density of bismaleimide (BMI) resin after curing, a diamine compound (DAN) containing naphthalene ring and ether bond was synthesized and prepolymerized with DAN and diphenylmethane bismaleimide (BDM). Then, the different mass fractions of prepolymers were added to the binary system of BDM and diallyl bisphenol A (DABPA) to form a terpolymer system of DAN/BDM/DABPA to toughen BMI resin. Nuclear magnetic resonance spectroscopy and Fourier transform infrared spectroscopy were used to characterize the structure of intermediate products and target products, which proved that DAN was successfully synthesized. Differential scanning calorimetry (DSC) was used to observe the curing behavior. The results show that the curing behavior of the blends is similar. The curing process of the blends was determined by DSC curves at different heating rates, and the specific curing process is 180 °C/2 h+210 °C/2 h+240 °C/4 h+260 °C/2 h. The test results show that with the addition of prepolymer, the impact strength first increase and then decrease, and the impact strength of the blended system with 3% prepolymer content reach 25.9 kJ/m². The bending strength also show the same trend, and the bending strength of the blended system with 6% prepolymer mass fraction reach 128.2 MPa. Thermogravimetric analysis was used to analyze the thermal stability of the cured material of the blend system. The residual carbon content of the system with 6% and 9% prepolymer mass fraction is higher than that of the system without prepolymer at 800 °C, but the temperature with 5% weight loss of the three systems is slightly lower than that of the system without prepolymer.

Keywords : bismaleimide ; toughening ; modification ; naphthalene ; thermal stability

通信作者: 孔国强, 研究员, 博士, 研究方向为树脂基复合材料

收稿日期: 2024-12-05

引用格式: 王威, 王义师, 孔国强, 等. 含萘环二胺改性BMI树脂的制备和性能[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(2): 58-64.

WANG Wei, WANG Yishi, KONG Guoqiang, et al. Preparation and properties of BMI resin modified by diamine containing naphthalene[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(2): 58-64.

双马来酰亚胺(BMI)树脂是一种重要的热固性树脂,具有优异的性能,其综合性能介于环氧树脂和聚酰亚胺树脂之间,在航空航天、机械、电子等领域有着非常广泛的应用^[1-5]。传统的BMI树脂分子链短且含有大量刚性结构导致固化后交联密度大,因此BMI树脂在具有优异耐热性的同时又存在韧性差的缺点,这种缺点也成为了阻碍BMI树脂进一步应用的主要问题。如何在保持BMI树脂优异性能的基础上对其进行增韧改性,成为了越来越多研究者们努力的方向^[6-9]。

大多数BMI树脂的增韧改性方法都是从降低BMI树脂固化后交联密度的角度出发,例如烯丙基化合物增韧^[10]、二元胺增韧^[11]和内扩链增韧^[12]等。其中二元胺化合物增韧BMI树脂是一种比较早的增韧方法,也称BMI的外扩链增韧^[13]。由于羰基的吸电子作用,使得马来酰亚胺环中的双键高度缺电子进而具有高反应活性,二元胺中的伯胺和仲胺都可以与BMI发生加成反应。二元胺化合物增韧BMI树脂的原理就是利用BMI的活性双键与二元胺化合物发生Michael加成反应使BMI扩链从而降低固化后的交联密度^[14-16]。

闫红强等^[17]合成了一种含萘环和醚键的BMI(BMPN),笔者在此基础上,合成了BMPN的中间产物即含萘环和醚键结构的二元胺(DAN),省略了二元胺与马来酸酐反应和脱水环化的步骤,增加了将DAN与二苯甲烷型双马来酰亚胺(BDM)预聚后改性BDM/二烯丙基双酚A(DABPA)体系的步骤,并根据预聚物质量分数的不同制备了四种体系,分别对四种体系的性能进行了研究。

1 实验部分

1.1 主要原材料

无水 K_2CO_3 、乙二醇甲醚、 $FeCl_3$:分析纯,天津市大茂化学试剂厂;

DABPA(工业纯)、2,7-二羟基萘(分析纯):上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

对硝基氯苯:分析纯,山东科源生化有限公司;

活性炭:分析纯,上海国药集团化学试剂有限公司;

水合肼($N_2H_4 \cdot H_2O$):分析纯,成都科隆化学品有限公司;

N,N' -二甲基甲酰胺(DMF):分析纯,天津市富宇精细化工有限公司;

甲苯:分析纯,烟台远东精细化工有限公司;

BDM:工业纯,洪湖市双马新材料科技有限公司。

1.2 主要仪器和设备

核磁共振波谱仪:Bruker Avance-500,德国布鲁克公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Nicolet™ iS20,美国赛默飞世尔公司;

差示扫描量热(DSC)仪:Netzsch DSC 204,德国耐驰热分析公司;

热重(TG)分析仪:Netzsch STA 449C,德国耐驰热分析公司;

简支梁冲击试验机:MZ-2054,江苏明珠试验机械有限公司;

万能试验机:WOW1000,河北中博锐科仪器制造有限公司。

1.3 共混体系的制备

1.3.1 含萘环的二硝基化合物(DNN)的合成

将0.05 mol 2,7-二羟基萘、0.1 mol对硝基氯苯和0.1 mol无水 K_2CO_3 加入到连有冷凝装置、温度计和磁力搅拌装置的500 mL三口烧瓶中,然后在烧瓶中加入150 mL DMF和10 mL甲苯,在140 °C反应8 h后将温度加热至150 °C反应1 h,除去多余的甲苯。反应结束后趁热过滤以除去反应液中的无机盐,将滤液倒入烧杯中静置10 h后有固体沉淀析出,抽滤后保留滤渣,将滤渣倒入盛有去离子水的烧杯中,并用玻璃棒不断搅拌进行水洗,经多次水洗后放烘箱在60 °C下烘干得到DNN,产率为89.6%。DNN合成机理如图1所示。

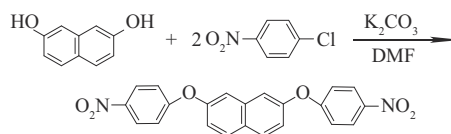


图1 DNN合成机理

Fig. 1 Synthesis mechanism of DNN

1.3.2 DAN的合成

将0.05 mol的DNN加入到带有 N_2 进出口、冷凝装置、滴液漏斗、温度计和磁力搅拌装置的500 mL三口烧瓶中,然后加入150 mL乙二醇甲醚、3 g $FeCl_3$ 和10 g活性炭,升温到95 °C之后用滴液漏斗逐滴加入30 mL水合肼,然后在 N_2 氛围下反应8 h。反应结束后趁热过滤以除去反应液中的无机物,待滤液降至室温之后用旋转蒸发仪在70 °C下进行旋

蒸,旋蒸后将浓缩的液体倒入去离子水中后析出大量固体,析出的固体先经过醇洗然后进行多次水洗后放烘箱在60℃下烘干得到DAN,产率为71.4%。DAN合成机理如图2所示。

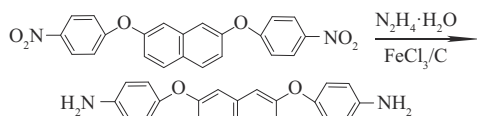


图2 DAN合成机理

Fig. 2 Synthesis mechanism of DAN

1.3.3 DAN/BDM 预聚物的制备

将DAN和BDM按照1:2的物质的量比(质量比为17.1:35.8)配置,然后在150℃下预聚20 min,并在预聚过程中不断搅拌,预聚结束后将预聚物倒入锡纸盒中待用,待预聚物冷却到室温直至完全失去流动性后将预聚物在研钵中研磨成粉末。

1.3.4 DAN/BDM/DABPA 共混体系的制备

将BDM和DABPA按照1:0.87的物质的量比加入到烧杯中,然后加入质量分数为0%,3%,6%和9%的DAN/BDM预聚物粉末,形成DAN/BDM/DABPA混合物,四种体系分别命名为BDM/DP, 3%DB-BDM/DP, 6%DB-BDM/DP, 9%DB-BDM/DP。在150℃的温度下将四种混合物融化,期间不断搅拌使其混合均匀,然后放到真空烘箱中脱泡30 min,脱泡结束后按180℃/2 h+210℃/2 h+240℃/4 h+260℃/2 h的工艺固化。

1.4 分析与表征

1.4.1 核磁共振氢谱(¹H-NMR)分析

采用¹H-NMR仪对合成产物DNN和DAN进行分析,溶剂为氘代二甲基亚砷(DMSO-d₆),内标为四甲基硅烷(TMS)。

1.4.2 FTIR 分析

采用FTIR仪分析合成产物DNN和DAN官能团的变化,用KBr压片法制样,测试范围为500~4 000 cm⁻¹,分辨率为4 cm⁻¹。

1.4.3 DSC 分析

采用DSC仪分析DAN/BDM/DABPA的固化行为和固化工艺,升温速度为10,15,20℃/min,气氛为N₂氛围,测试温度范围为30~400℃。

1.4.4 力学性能测试

按照GB/T 2567-2021对树脂的弯曲性能和冲击性能进行测试,树脂的弯曲性能采用万能试验机测试,尺寸为80 mm×15 mm×4 mm。冲击强度采用

简支梁冲击试验机测试,测试样品为无缺口试样,尺寸为80 mm×10 mm×4 mm。每种力学性能测试样品不少于五个,结果取平均值。

1.4.5 TG 分析

采用TG分析仪对体系的热性能进行分析,每种体系取10 mg左右样品,气氛为N₂氛围,升温速度为10℃/min,测试温度范围为30~800℃。

2 结果与讨论

2.1 ¹H-NMR 分析

图3为DNN的¹H-NMR谱图,DNN共有五种不同的氢质子共振吸收峰。 $\delta=8.28$ 处的峰为DNN苯环上a处氢质子的峰,由于硝基的强吸电子作用的影响,使得与其相邻苯环的核外电子云密度下降,因此a处氢质子的峰出现在最低场。 $\delta=7.22$ 处的峰为DNN苯环上b处氢质子的峰,由于醚键的给电子的共轭效应,使得b处氢质子的峰出现在最高场。萘环中c,d氢质子的峰分别出现在 $\delta=7.68, 7.38$ 处,由于萘环中e处受醚键给电子共轭作用的影响较小,因此峰出现在较低场^[18]。a~e五处峰对应积分面积分别为1.95,1.95,0.98,1.00和1.02,峰面积之比约等于2:2:1:1:1。经¹H-NMR分析,合成产物与目标产物为同一结构。

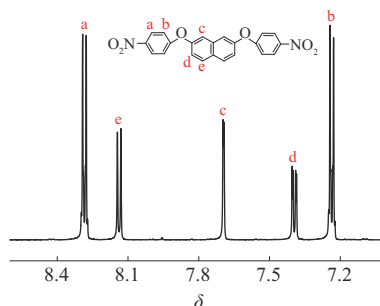
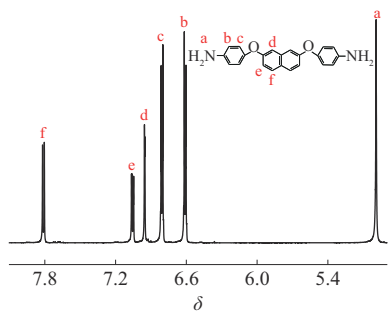


图3 DNN的¹H-NMR谱图

Fig. 3 ¹H-NMR spectra of DNN

图4为DAN的¹H-NMR图,DAN共有六种不同的氢质子的共振吸收峰。 $\delta=5.00$ 处的峰为a处氨基的峰,氨基和醚键都有供电子的共轭作用,使得与氨基和醚键相连的苯环中的氢质子峰向高场移动,但是氨基的供电子能力大于醚键的供电子能力,因此与氨基相邻的b处的氢质子出现在更高场($\delta=6.61$),c处的峰出现在 $\delta=6.81$ 处。萘环中d,e,f处氢质子的峰分别出现在 $\delta=6.96, \delta=7.05$ 和 $\delta=7.81$ 处^[19]。a~f六处峰对应积分面积分别为2.06,2.02,1.98,1.07,1.03,1.00,峰面积之比约等于2:2:2:1:1:1。经¹H-NMR分析,合成产物与目标产物为同一结构。

图4 DAN的¹H-NMR谱图Fig. 4 ¹H-NMR spectra of DAN

2.2 FTIR 分析

图5为DNN和DAN的FTIR谱图,在 $1\,506\text{ cm}^{-1}$ 处和 $1\,337\text{ cm}^{-1}$ 处分别对应硝基($-\text{NO}_2$)的不对称和对称伸缩振动吸收峰, $1\,233\text{ cm}^{-1}$ 处为醚键($\text{C}-\text{O}-\text{C}$)的伸缩振动峰, $3\,005\sim 3\,091\text{ cm}^{-1}$ 为芳环上碳氢键($\text{C}-\text{H}$)的伸缩振动的弱峰。相比于DNN的FTIR谱图,DAN谱图中原先存在的硝基的振动峰彻底消失,而在 $3\,326\sim 3\,442\text{ cm}^{-1}$ 处出现了新的氨基特征吸收峰,其余位置峰基本无变化,表明DNN中存在的硝基被成功还原成氨基^[20]。

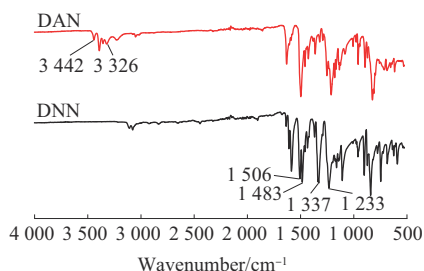


图5 DNN和DAN的FTIR谱图

Fig. 5 FTIR spectra of DNN and DAN

2.3 共混物固化行为分析

图6为四种不同预聚物质量分数的DAN/BDM/DABPA共混体系的DSC曲线,可以看出预聚物的加入没有改变固化机理,四种体系主放热峰温度范围都在 $190\sim 300\text{ }^\circ\text{C}$,主放热峰峰值温度都在 $255\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,主要有预聚物中残余的“ $-\text{NH}-$ ”“ $-\text{NH}_2$ ”与BMI中碳碳双键的Michael加成反应、烯丙基双键与双马双键的“Ene”双烯加成反应、产生的中间体与双马双键的Diels-Alder反应。随着预聚物的加入,主放热峰峰值温度向高温方向移动,主要原因可能是预聚物的加入导致体系黏度增大。随着预聚物的加入,反应开始温度降低,可能是由于预聚物的加入破坏了分子链结构的规整性,二元胺中醚键的存在也会增加分子链的自旋性使分子间碰撞

的机会大大增加,此外预聚物中伯胺和仲胺基团的存在增加了反应位点也是放热开始温度降低的原因之一。

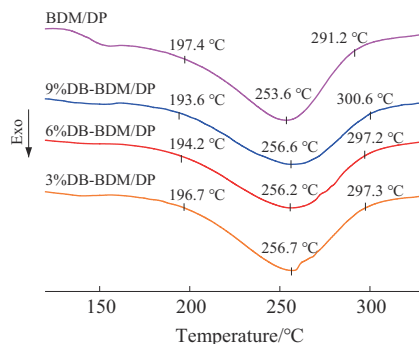


图6 四种共混体系的DSC曲线

Fig. 6 DSC curves of four blend systems

2.4 共混物固化工艺

树脂的固化工艺对树脂的最终性能有着重要影响,树脂的固化工艺可以通过在不同升温速率下的DSC曲线获得,一般用温度(T)-升温速率(β)外推法来确定具体参数,即用不同 β 下共混体系的温度特征参数进行曲线拟合,计算 β 为0时的反应开始温度(T_i)、反应峰值温度(T_p)和反应结束温度(T_f),分别作为体系的凝胶温度(T_{gel})、固化温度(T_{cure})和后处理温度(T_{treat})。由图6可知,四种共混树脂体系固化反应温度接近,有着相似的固化行为,因此分析3%DB-BDM/DP的固化工艺即可。图7是3%DB-BDM/DP在不同升温速度下的DSC曲线,由图7可知随着升温速率的提高,固化反应峰温度升高,这是由于随着升温速率的加快,内部分子运动来不及响应出现了热滞后现象^[21],升温速率越快,热滞后越明显,相应的 T_i , T_p 和 T_f 列于表1。

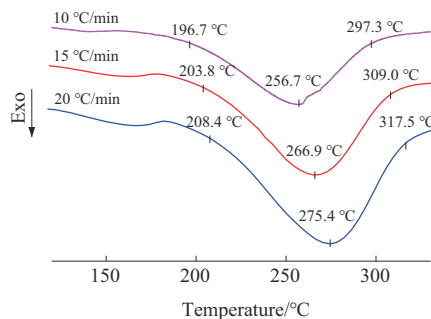


图7 3%DB-BDM/DP在不同升温速率下的DSC曲线

Fig. 7 DSC curves of 3% DB-BDM/DP at different heating rates

图8为3%DB-BDM/DP固化特征温度与 β 的拟合直线,3%DB-BDM/DP的 T_{gel} , T_{cure} 和 T_{treat} 分别为 185.4 , 238.3 , $277.6\text{ }^\circ\text{C}$,因此根据理论所得数据及

表 1 3%DB-BDM/DP在不同升温速率下DSC曲线的特征峰温度
Tab. 1 Characteristic peak temperature on DSC curve of 3%DB-BDM/DP at different heating rates

$\beta/({}^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1})$	$T_i/{}^{\circ}\text{C}$	$T_p/{}^{\circ}\text{C}$	$T_f/{}^{\circ}\text{C}$
10	196.7	256.7	297.3
15	203.8	266.9	309.0
20	208.4	275.4	317.5

Notes: β is heating rate; T_i is initial reaction temperature; T_p is peak reaction temperature; T_f is end reaction temperature.

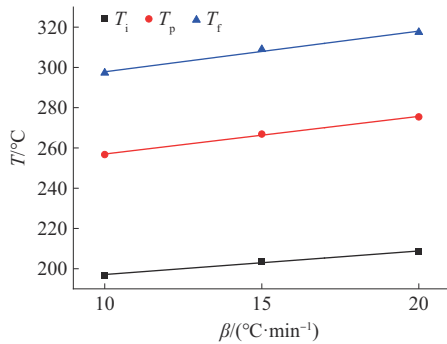


图 8 3%DB-BDM/DP 固化特征温度与 β 的拟合直线
Fig. 8 Fitting lines of 3%DB-BDM/DP curing characteristic temperature and β

实验经验,确定共混物的固化工艺 180 °C/2 h+210 °C/2 h+240 °C/4 h+260 °C/2 h。

2.5 固化程度分析

图9是3%DB-BDM/DP在180 °C/2 h+210 °C/2 h+240 °C/4 h+260 °C/2 h固化工艺下固化前后的FTIR谱图。687 cm^{-1} 和3 100 cm^{-1} 为马来酰亚胺环中碳碳双键的特征吸收峰,可以看出固化后这两处的峰基本消失不见,说明BMI基本完全参与反应^[22]。3 457 cm^{-1} 处的小尖峰为氨基的特征吸收峰,固化后此处峰消失,说明氨基完全参与反应,综上,按照180 °C/2 h+210 °C/2 h+240 °C/4 h+260 °C/2 h的固化工艺对共混体系进行固化,固化效果良好。

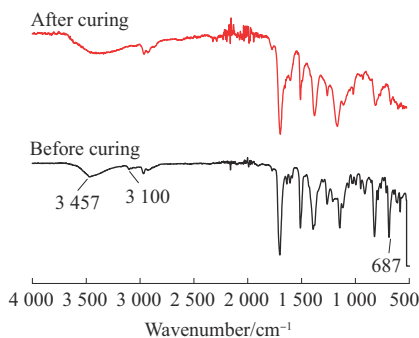


图 9 3%DB-BDM/DP 固化前后的 FTIR 谱图
Fig. 9 FTIR spectra of 3%DB-BDM/DP before and after curing

2.6 力学性能分析

图 10 是不同预聚物质量分数的固化物冲击强

度,三种改性体系的冲击强度相比于不加预聚物的体系都有明显提高。随着预聚物质量分数的增加,固化物的冲击强度先增加后降低,当预聚物质量分数为3%时,固化物的冲击强度为25.9 kJ/m^2 ,比不加预聚物的体系提升77.4%。冲击强度先增加后降低的主要原因是因为二元胺分子链较长,降低了固化物的交联密度,而且二元胺中含有柔性醚键,提高了分子链的自旋性,但是随着预聚物质量分数的增多,脱泡过程中树脂体系黏度增大导致固化过程中出现大量缺陷,导致冲击强度降低。

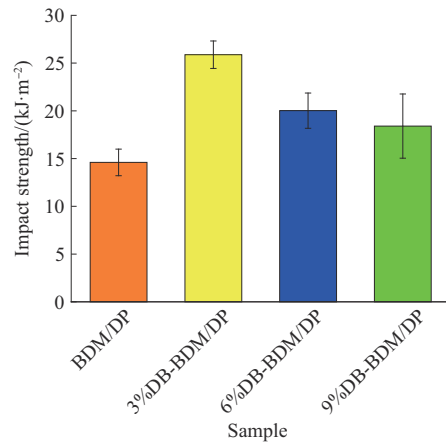


图 10 四种体系固化物的冲击强度
Fig. 10 Impact strength of cured materials of four systems

图 11 是不同预聚物质量分数的固化物弯曲强度,三种改性体系的弯曲强度相比于不加预聚物的体系都得到提高。随着预聚物质量分数的增加,固化物的弯曲强度也是先提高后降低,当预聚物的质量分数为6%时,弯曲强度为128.2 MPa,比不加预聚物的体系提高13.5%。弯曲强度先提高后降低的主要原因是,二元胺中含有萘环和苯环的刚性结构

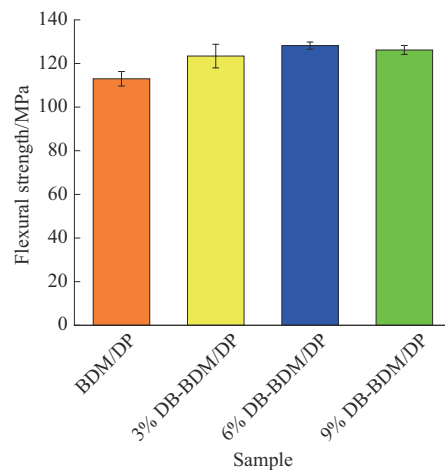


图 11 四种体系固化物的弯曲强度
Fig. 11 Bending strength of cured materials of four systems

会使弯曲强度提高,但是随着预聚物质量分数的提高,会使得树脂的黏度增大,不利于气泡的排出和内部热量的释放,使得固化物内部缺陷增多。

2.7 热稳定性分析

图 12 为四种体系固化后 TG 曲线,表 2 为四种体系的 TG 曲线特征参数,可以看出相对于 BDM/DP 体系,加入预聚物后固化物失重 5% 的温度($T_{5\%}$)稍有降低,四种体系的 $T_{5\%}$ 分别为 415.3, 409.1, 410.2, 410.4 $^{\circ}\text{C}$,这是由于二元胺 DAN 分子链较长且含有柔性醚键,在高温时,长链结构和柔性键分解较快;三种加入预聚物的体系在 800 $^{\circ}\text{C}$ 的残炭率(Y_c)随着预聚物质量分数的提高而提高,这是由于随着预聚物的增加,体系中刚性基团的比例会增加,因此高温 Y_c 会有所增加,其中 6%DB-BDM/DP 和 9%DB-BDM/DP 的 Y_c 高于 BDM/DP 的 Y_c 。

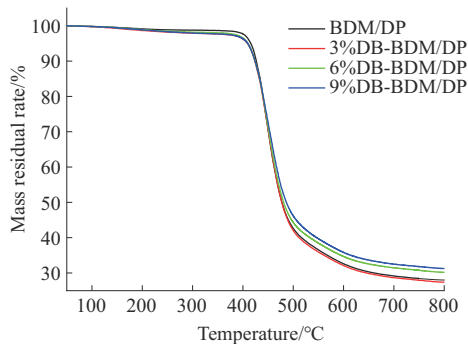


图 12 四种体系固化物的 TG 曲线

Fig. 12 TG curves of cured materials of four systems

表 2 四种体系的 TG 曲线特征参数

Tab. 4 TG curve characteristic parameters of four systems

Sample	$T_{5\%}/^{\circ}\text{C}$	$T_{10\%}/^{\circ}\text{C}$	$Y_c(800^{\circ}\text{C})/\%$
BDM/DP	415.3	425.9	27.6
3%DB-BDM/DP	409.1	424.0	27.2
6%DB-BDM/DP	410.2	423.8	30.1
9%DB-BDM/DP	410.4	424.1	31.2

Notes: $T_{5\%}$ is temperature corresponding to a weight loss of 5%; $T_{10\%}$ is temperature corresponding to a weight loss of 10%; Y_c is residual carbon ratio.

3 结论

成功合成了 DAN,并用 DAN 和 BDM 进行预聚,用预聚物对 BDM/DABPA 体系进行增韧,相比其它改性方法,此改性方法可以使改性体系的冲击强度得到有效提升,且可以保持 BDM 树脂良好的热稳定性,相关结论如下。

(1)用 DSC 分析了改性树脂体系的固化行为,四种体系有着相似的固化行为,预聚物加入后,共混

体系的主放热峰峰值温度都向高温方向移动。

(2)根据非等温 DSC 法确定了改性树脂体系的固化工艺,最终确定共混物的固化工艺为 180 $^{\circ}\text{C}/2\text{ h}+210^{\circ}\text{C}/2\text{ h}+240^{\circ}\text{C}/4\text{ h}+260^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ 。

(3)随着预聚物质量分数的提高,改性树脂的冲击强度和弯曲强度都是先增加后降低,3%DB-BDM/DP 的冲击强度最大,达到了 25.9 kJ/m^2 ,比不加预聚物的体系提高了 77.4%;6%DB-BDM/DP 的弯曲强度最大,达到了 128.2 MPa,比不加预聚物的体系提高 13.5%。

(4)加入预聚物的体系比不加预聚物的体系的 $T_{5\%}$ 有所降低,但依然有着很高的 $T_{5\%}$,6%DB-BDM/DP 和 9%DB-BDM/DP 的 800 $^{\circ}\text{C}$ 残炭率都高于 BDM/DP 体系。

以上结果充分说明了 DAN 和 BDM 预聚物改性 BDM/DABPA 体系的冲击韧性相较于传统的 BDM/DABPA 体系得到了较大幅度的提升,且 TG 测试结果表明该改性体系有着良好的耐热性,有望作为高性能树脂基复合材料的树脂基体在航空航天领域得到应用。

参考文献

- [1] 李蓓蓓,杨菊香,刘振,等.双马来酰亚胺树脂的改性及其应用进展[J].塑料,2022,51(5):55-59,140.
LI Beibei, YANG Juxiang, LIU Zhen, et al. Research progress in modification and application of bismaleimide resin[J]. Plastics, 2022, 51(5):55-59, 140.
- [2] ZHU J L, XIA Y Q, LIU L Z, et al. Comparative study of the kinetic behaviors and properties of aromatic and aliphatic bismaleimides[J]. Thermochimica Acta, 2024, 737. DOI: 10.1016/j.tca.2024.179768.
- [3] YANG J B, BAI Y R, SUN J S, et al. Recent advances of thermosetting resin and its application prospect in oil and gas drilling and production engineering[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 230. DOI:10.1016/j.geoen.2023.212222.
- [4] DASH R, KOMMU P, KUMARI N, et al. Structural characterization of fillers of inorganic materials in bismaleimide resins[J]. Journal of Polymer Engineering, 2023, 43(3):199-209.
- [5] DYER W E, KUMRU B. Polymers as aerospace structural components: How to reach sustainability? [J]. Macromolecular Chemistry and Physics, 2023, 224(24). DOI:10.1002/macp.202300186.
- [6] JIANG X, CHU F K, ZHOU X, et al. Construction of bismaleimide resin with enhanced flame retardancy and mechanical properties based on a novel DOPO-derived bismaleimide monomer[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2022, 614. DOI:10.1016/j.jcis.2022.01.152.
- [7] 张子龙.生物基烯丙基化合物改性双马来酰亚胺树脂的研究[D].

- 无锡:江南大学,2022.
- ZHANG Zilong. Study on modification of bismaleimide resin by bio-based allyl compounds[D]. Wuxi:Jiangnan University,2022.
- [8] RICHAUD E,DELOZANNE J. Thermal oxidation of diallylbisphenol A-bismaleimide networks. Comonomer effect and kinetic modelling[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2024, 219. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2023.110628.
- [9] 赵立伟,杨海东,王德志,等. 双马来酰亚胺树脂增韧改性研究进展[J]. *材料导报*, 2022, 36(20):262–268.
- ZHAO Liwei, YANG Haidong, WANG Dezhi, et al. Research progress in toughness modification of bismaleimide resin[J]. *Materials Reports*, 2022, 36(20):262–268.
- [10] WANG K X, WANG Y Y, CHEN P, et al. Novel bismaleimide resins modified by allyl compound containing liquid crystalline structure[J]. *Advances in Polymer Technology*, 2018, 37(1): 281–289.
- [11] LIU C, QIAO Y, LI N, et al. Toughened of bismaleimide resin with improved thermal properties using amino-terminated Poly (phthalazinone ether nitrile sulfone)s[J]. *Polymer*, 2020, 206. DOI:10.1016/j.polymer.2020.122887.
- [12] 陈平,熊需海,夏连连,等. 链延长型芳杂环双马来酰亚胺树脂的合成及性能[J]. *高分子学报*, 2017(3):399–410.
- CHEN Ping, XIONG Xuhai, XIA Lianlian, et al. Synthesis and properties of chain-extended bismaleimides with aromatic heterocycle structure[J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2017(3):399–410.
- [13] OUYANG Y, ZHANG X, SHI J, et al. Diamine-modified bismaleimide for toughening of UV-cured epoxy acrylate coating[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2024, 313. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2023.128703.
- [14] 王威,王义师,孔国强,等. 双马来酰亚胺树脂的增韧改性研究进展[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(11):165–170.
- WANG Wei, WANG Yishi, KONG Guoqiang, et al. Research progress in toughness modification of bismaleimide resin[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(11):165–170.
- [15] MASAHIRO O, MITSUHIRO S. Reprocessable bismaleimide-diamine thermosets based on disulfide bonds[J]. *Reactive and Functional Polymers*, 2020, 146. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym. 2019.104404.
- [16] ZOU Q, XIAO F, GU S Q, et al. Toughening of bismaleimide resin based on the self-assembly of flexible aliphatic side chains [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019, 58(36): 16 526–16 531.
- [17] 闫红强,王华清,程捷,等. 含醚键和萘环结构双马来酰亚胺的合成与表征[J]. *高分子材料科学与工程*, 2011, 27(11):1–3.
- YAN Hongqiang, WANG Huaqing, CHENG Jie, et al. Synthesis and characterization of the bismaleimide containing ether linkage and naphthalene[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2011, 27(11):1–3.
- [18] 王棋. 双马来酰亚胺树脂的合成、改性及复合材料研究[D]. 自贡:四川轻化工大学,2022.
- WANG Qi. Synthesis and modification of bismaleimide resins and study of composite materials[D]. Zigong: Sichuan University of Science and Engineering, 2022.
- [19] 刘淋泽,夏益青,罗岑怡,等. 含米氏酸型双马来酰亚胺的合成及结构表征[J]. *塑料工业*, 2022, 50(10):41–46.
- LIU Linze, XIA Yiqing, LUO Cenyi, et al. Synthesis and structural characterization of meldrum's acid containing bismaleimide [J]. *China Plastics Industry*, 2022, 50(10):41–46.
- [20] 刘思扬. 含氰基和Cardo结构双马来酰亚胺的设计合成与复合材料的性能[D]. 大连:大连理工大学,2018.
- LIU Siyang. Synthesis of bismaleimides containing cardo and cyano groups and properties of cardo and cyano their composites [D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2018.
- [21] LIU Y, WANG J, XU S A. Synthesis and curing kinetics of cardanol-based curing agents for epoxy resin by in situ depolymerization of paraformaldehyde[J]. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 2014, 52(4):472–480.
- [22] 周赞民,李根臣,孔国强,等. 含苯并咪唑结构双马来酰亚胺的合成与表征[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(3):132–139.
- ZHOU Zanmin, LI Genchen, KONG Guoqiang, et al. Synthesis and characterization of bismaleimide containing benzimidazole structure[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(3): 132–139.