

新型双马来酰亚胺单体结构与树脂性能关系研究

马如飞¹ 丁江楠² 潘翠红³ 赵志国¹ 周恒²

(1 成都飞机设计研究所, 成都 610041)

(2 中国科学院化学研究所, 北京 100190)

(3 中航复合材料有限责任公司, 北京 101300)

文 摘 为了改善双马树脂的工艺性能和力学性能,本文设计合成了含有刚性双酚芴(FDABMI)、侧基(PIDABMI)、醚键(34ODABMI)、酰胺键(34DABABMI和33DABABMI)、砜基(44DDSBMI和33DDSBMI)、扩链(BAPSBMI)等结构的八种新型双马来酰亚胺单体(双马单体),旨在探讨不同结构双马单体与性能的构效关系。同时,采用二烯丙基双酚A(DABPA)作为改性剂,通过与新型双马单体熔融共聚制备了双马树脂。测试结果为扩链结构和含有侧甲基结构的双马单体BAPSBMI、PIDABMI的熔点显著降低,分别为74℃和70℃;33ODABMI和BDM制备的双马树脂具有相似的玻璃化温度(T_g),约250℃,扩链单体BAPSBMI制备的双马树脂的 T_g 最低,为230℃;34ODABMI和33DDSBMI制备的双马树脂的弯曲模量分别为4.1MPa和4.5MPa,相比BDM提高了14%和25%。结果显示分子结构设计与性能密切相关,树脂的 T_g 主要与双马单体中桥基基团的长短有关,间位取代的双马单体具有更高的弯曲模量。

关键词 双马单体,熔点,耐热性,力学性能

中图分类号:TB332

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2025.01.008

Study on Relationship Between Structure of Novel Bismaleimide Monomer and Resin Properties

MA Rufe¹ DING Jiangnan² PAN Cuihong³ ZHAO Zhiguo¹ ZHOU Heng²

(1 Chengdu Aircraft Design&Research Institute, Chengdu 610041)

(2 Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

(3 AVIC Composite Corporation Ltd., Beijing 101300)

Abstract In order to improve the processing and mechanical properties of bismaleimide resin, eight novel types of bismaleimide monomers (hereinafter referred to as “bismaleimide monomers”) with structures containing rigid bisphenol fluorene (FDABMI), side group (PIDABMI), ether bond (34ODABMI), amide bond (34DABABMI and 33DABABMI), sulfone group (44DDSBMI and 33DDSBMI) and chain extension (BAPSBMI) were prepared, aiming to explore the structure-performance relationship of bismaleimide monomers with different structures. At the same time, diallyl bisphenol A (DABPA) was used as modifier to prepare bismaleimide resin by melting copolymerization with new type of bismaleimide monomers. The results show that the melting points of BAPSBMI and PIDABMI with extended chain structure and side methyl structure decreases significantly to 74 °C and 70 °C, respectively. The glass transition temperature of the resin prepared by 33ODABMI and BDM is similar, about 250 °C, while the bismaleimide resin prepared with the chain extension monomer BAPSBMI has the lowest T_g of 230 °C. The flexural modulus of 34ODABMI and 33DDSBMI are 4.1 MPa and 4.5 MPa, respectively, which are 14% and 25% higher than that of BDM. The results show that molecular structure design is closely related to performance, and the glass transition temperature of the resin is mainly related to the length of the bridging group in the bismaleimide monomer. The bismaleimide monomers with meta-substitution have higher flexural modulus.

Key words Bismaleimide monomer, Melting point, Heat resistance, Mechanical properties

0 引言

双马来酰亚胺(简称“双马”,BMI)单体是以马来

收稿日期:2023-12-07

第一作者简介:马如飞,1982年,工学硕士,高级工程师,主要从事航空复合材料研究工作。E-mail:ccjmxm@163.com

酰亚胺为活性端基的一类双官能团化合物,可与多种不饱和单体(常见的如二烯丙基双酚A)共混共聚得到高性能双马热固性树脂。双马树脂因其优异的耐高温、耐湿热、绝缘阻燃、良好的力学性能等特点,广泛应用于军工、航空航天、电子等领域^[1-4]。

BMI单体的制备方法可分为三种:(1)以二甲基甲酰胺(DMF)、二甲基乙酰胺(DMAc)或N-甲基吡咯烷酮(NMP)等强极性溶剂作为反应介质,乙酸钠为催化剂,乙酸酐为脱水剂,经脱水反应得到BMI单体。该方法得到的产品杂质含量高,需经过重结晶才能使用;(2)以丙酮为反应介质,金属盐或三乙胺等为催化剂,乙酸酐为脱水剂。该方法虽然反应温和,生产易于控制,但反应体系不均匀,局部容易产生过热引起反应中双键聚合导致产品质量不稳定;(3)以甲苯/DMF、甲苯/DMAc等混合溶剂作为反应介质,苯磺酸或对甲苯磺酸为脱水剂,采用共沸蒸馏脱水法合成BMI单体。该合成过程为均相,产品产率高、产品质量稳定^[5-7]。

目前,国内外应用最多的BMI单体仍是二苯甲烷型双马单体(BDM),其原料易得、成本低廉且综合性能优良^[8-9]。近年来,一些院校、研究机构等也在积极探索新型BMI的合成。从分子结构设计出发,用不同结构的二胺与马来酸酐合成出多种类型BMI单体。JIANG等^[10]合成了含DOPO基团的双马单体,显著提升了双马树脂的阻燃性能;XU等^[11-12]合成了系列含有双酚芬结构的双马单体,其具有优异的耐热性能,5%热分解温度为486℃,玻璃化转变温度高达336℃;刘淋泽等^[13]合成了含米氏酸型双马来酰亚胺;武元娥等^[14]以1,2'-双(4-氨基苯氧基)乙烷和1,6'-己二胺为原料分别与马来酸酐反应合成了1,2'-双(4-马来酰亚胺基苯氧基乙烷)和1,6'-双马来酰亚胺基乙烷两种BMI单体;朱玉珑等^[15]用含醚键结构的芳香族二元胺1,3-双(3-氨基苯氧基)苯与马来酸酐反应合成了133BAPB型BMI单体;崔天放等^[16]为了改善树脂的工艺性,合成了叔丁基改性双马来酰亚胺单体;ZHANG等^[17]合成了含氟双马来酰亚胺单体,其具有优异的介电性能,1GHz下,介电常数和介电损耗分别为2.99和0.005。以上文献提到的新BMI单体中,作者多数只表征了其纯度、产率、工艺性能,对其耐热、力学等宏观性能关注少。

为深入理解双马树脂的单体结构与树脂耐热和力学等性能之间的关系,本文以不同分子结构的二元胺为原料,采用共沸蒸馏脱水法设计合成了八种新型双马单体。进一步将不同单体与二烯丙基双酚A熔融共聚,制备得到多种新型双马树脂固化物。并系统表征其工艺性能、耐热性能和力学性能,得出单体结构与性能构效关系。

1 实验

1.1 原材料

3,4-二氨基二苯醚(34ODA)(工业级,现代东方科技发展有限公司);3,3'-二氨基二苯砜(33DDS)(化学纯,罗恩试剂);4,4'-二氨基二苯砜(44DDS)(化学纯,阿拉丁试剂);4,4'-双(4-氨基苯氧基)二苯砜(BAPS)(工业级,现代东方科技发展有限公司);双胺芬(FDA)(化学纯,罗恩试剂);5(6)-氨基-1-(4-氨基苯基)-1,3,3-三甲基茚满(PIDA)(工业级,现代东方科技发展有限公司);3,4'-二氨基苯酰替苯胺(34DABA)(工业级,现代东方科技发展有限公司);3,3'-二氨基苯酰替苯胺(33DABA)(工业级,现代东方科技发展有限公司);N,N-二甲基乙酰胺(DMAc)(分析纯,康科德科技有限公司);顺丁烯二酸酐(MA)(分析纯,阿拉丁试剂);对甲苯磺酸(PTSA)(分析纯,现代东方科技发展有限公司);甲苯(MB)(分析纯,现代东方科技发展有限公司);二烯丙基双酚A(DABPA)(工业级,莱州市莱玉化工有限公司);二苯甲烷型双马来酰亚胺(BDM)(工业级,沁阳市天益化工有限公司)。所用八种二胺的分子结构如图1所示。

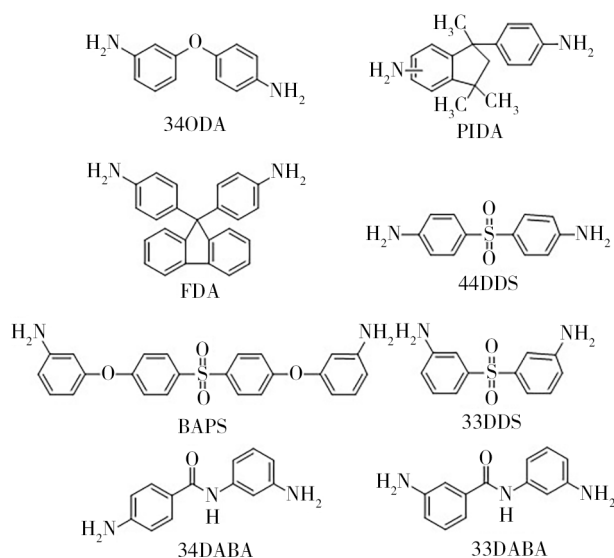


图1 不同类型二胺

Fig. 1 Different types of diamines

1.2 BMI单体的合成

BMI单体的合成反应通式如图2所示。反应历程分为三步。(1)酰亚胺合成:在三口瓶中,加入顺丁烯二酸酐、DMAc、甲苯,逐滴加入二胺的DMAc溶液,控制滴加速度,使温度不超过10℃,滴加完毕后,25℃下反应3h。(2)双马单体合成:向上述体系中加入对甲苯磺酸,加热至沸腾并分水至水分不流出,降至常温。(3)后处理:除去甲苯溶剂,析出物用去离子水洗涤三遍,乙醇洗涤一遍,抽滤,80℃真空干燥,得

到最终产物。八种不同结构的BMI单体结构式如图3所示。八种单体的命名为3,4ODABMI、PIDABMI、

FDABMI、4,4DDSBMI、BAPSBMI、3,3DDSBMI、3,4DABABMI、3,3DABABMI。

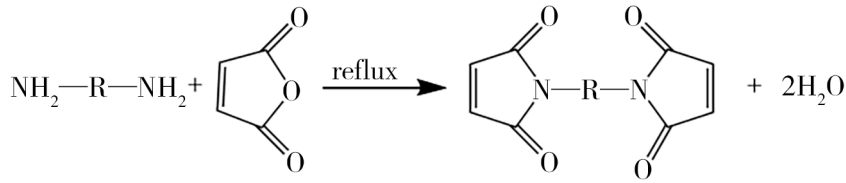


图2 BMI单体合成反应式

Fig. 2 Synthesis reaction formula of BMI monomer

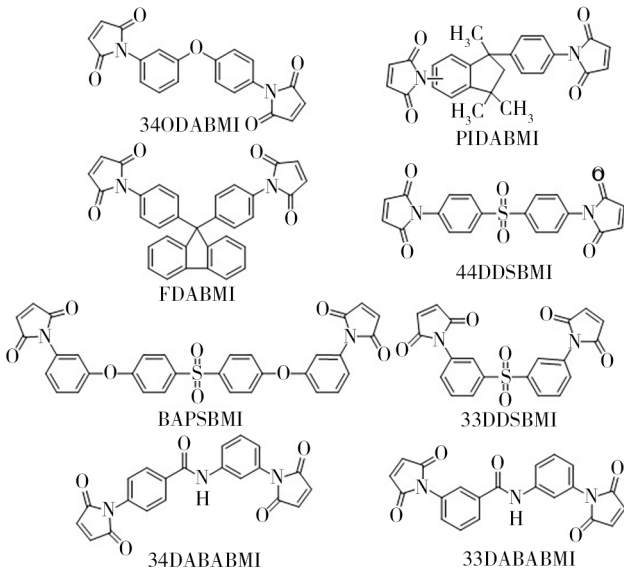


图3 不同类型BMI单体

Fig. 3 Different types of BMI monomers

1.3 测试与表征

¹H-NMR测试采用Bruker Avance III 400 HD核磁共振波谱仪,以氘代DMSO为溶剂,TMS(四甲基硅烷)为内标;差示扫描量热分析(DSC)测试采用Mettler Toledo DSC 822e型差示扫描量热分析仪,以N₂为测试氛围,流速为50 mL/min,升温速率为10 °C/min;动态热机械性能(DMA)测试采用NetzschDMA242E分析仪,N₂氛围,流速50 mL/min,升温速率为5 °C/min;热重分析(TGA)测试采用Netzsch STA449F5热分析仪,N₂保护,流速50 mL/min,升温速率为10 °C/min;冲击强度采用承德市金建检测仪器有限公司的电子简支梁冲击试验机测试,试样为无缺口试样,样条尺寸为80 mm×10 mm×4 mm,跨距为60 mm;弯曲强度和弯曲模量采用Instron5567力学性能测试仪测试,样条尺寸为80 mm×10 mm×4 mm,跨距为60 mm。冲击强度、弯曲强度和弯曲模量测试均参考标准GB/T 2567—2021。

2 结果与讨论

2.1 结构表征

分别对八种BMI单体进行了核磁氢谱测试。图4~11为不同BMI单体的¹H-NMR谱图。

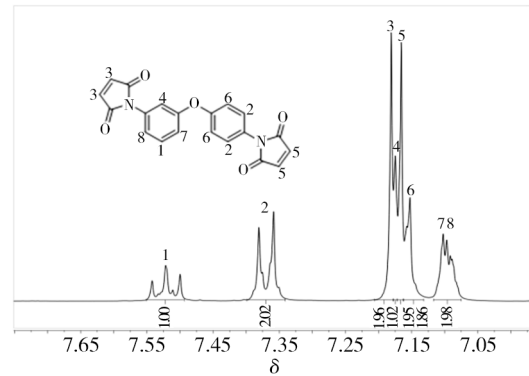


图4 34ODABMI-¹H-NMR谱图

Fig. 4 ¹H-NMR spectrum of 34ODABMI

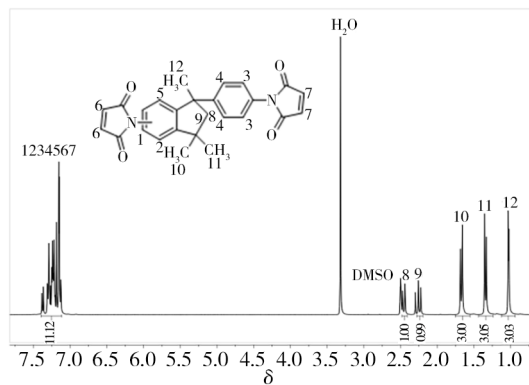


图5 PIDABMI-¹H-NMR谱图

Fig. 5 ¹H-NMR spectrum of PIDABMI

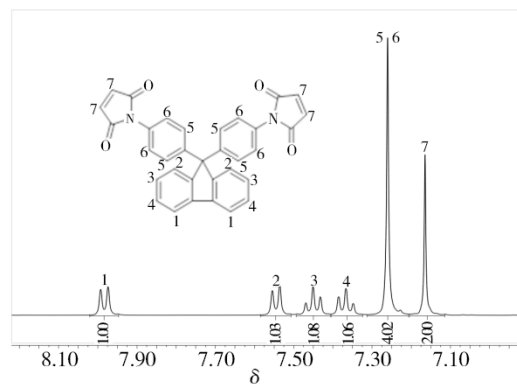


图6 FDABMI-¹H-NMR谱图

Fig. 6 ¹H-NMR spectrum of FDABMI

从核磁图中可以看出,氢谱无杂峰,BMI单体中不同位置氢质子的个数比与对应氢谱中的面积比一致。因此,所合成的单体与预期单体的结构一致。

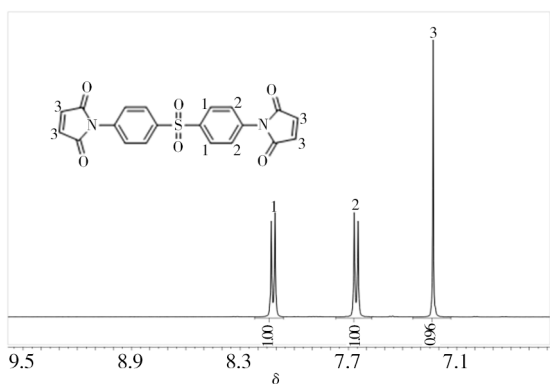


图7 44DDSBMI-¹H-NMR谱图
Fig. 7 ¹H-NMR spectrum of 44DDSBMI

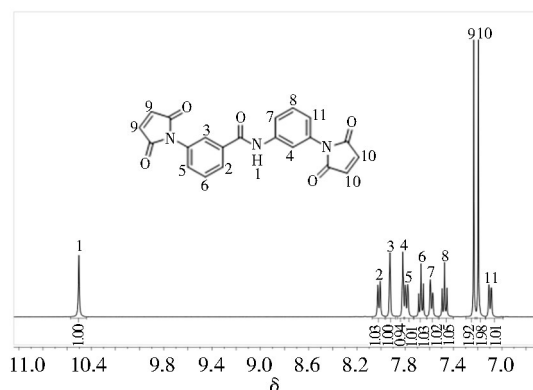


图11 33DABABMI-¹H-NMR谱图
Fig. 11 ¹H-NMR spectrum of 33DABABMI

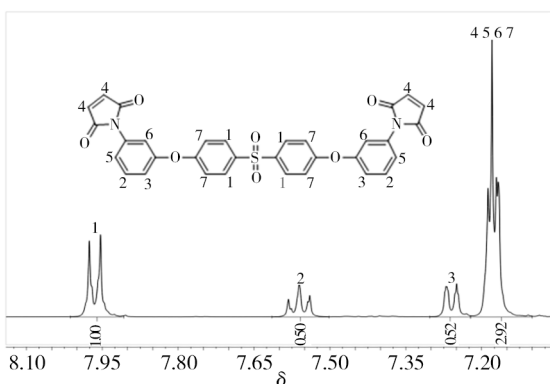


图8 BAPSBMI-¹H-NMR谱图
Fig. 8 ¹H-NMR spectrum of BAPSBMI

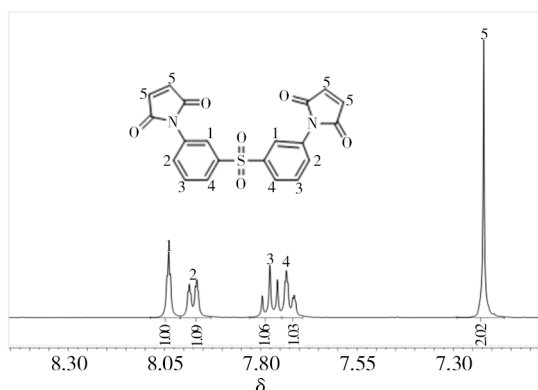


图9 33DDSBMI-¹H-NMR谱图
Fig. 9 ¹H-NMR spectrum of 33DDSBMI

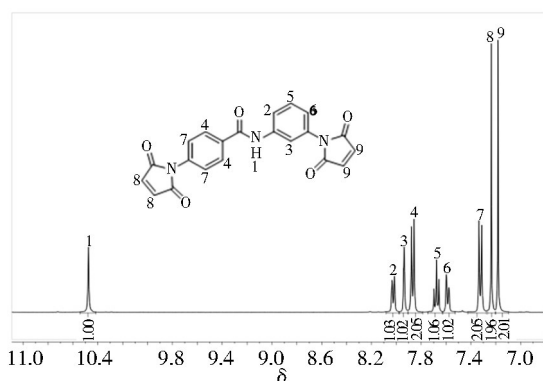


图10 34DABABMI-¹H-NMR谱图
Fig. 10 ¹H-NMR spectrum of 34DABABMI

同时,分别对八种BMI单体进行了红外测试。图12为不同BMI单体的红外谱图。从红外谱图中可以看出,1 712 cm^{-1} 处为酰亚胺基团R—C(O)—N(R)—C(O)—R上的C=O不对称振动特征峰,1 390 cm^{-1} 为C—N—C特征峰,表明生成了酰亚胺五元环,得到了酰亚胺结构。在3 500~3 300 cm^{-1} 区间未发现二胺上—NH₂特征峰,1 865 cm^{-1} 与1 785 cm^{-1} 未发现马来酸酐上五元酸酐特征峰,表明原料反应完全。

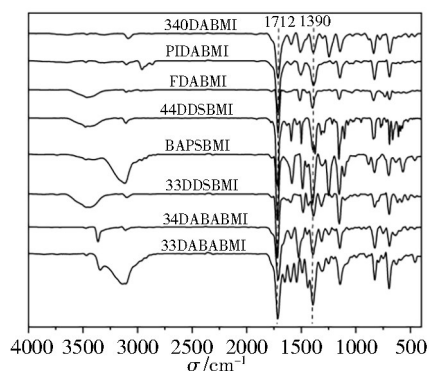


图12 不同BMI单体的红外谱图

Fig. 12 Infrared spectra of different BMI monomers

2.2 单体的熔点表征

采用DSC研究了BMI单体的热固化行为,图13为八种不同BMI单体的DSC测试曲线,并跟BDM做了对比。

将DSC图中各个BMI单体的熔点、起始固化温度(T_i)、固化峰值温度(T_p)、单位质量固化放热量(Δ

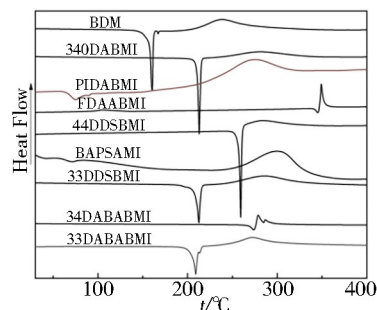


图13 不同BMI单体的DSC曲线

Fig. 13 DSC curves of different BMI monomers

H)列于表1中。

表1 不同BMI单体固化行为特征数据

Tab. 1 Data on solidification behavior characteristics of different BMI monomers

| BMI单体 | 熔点/ $^{\circ}\text{C}$ | $T_i^5/^{\circ}\text{C}$ | $T_p^5/^{\circ}\text{C}$ | $\Delta H/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$ |
|-----------|------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|
| BDM | 160 | 207 | 238 | 162 |
| 34ODABMI | 212 | 240 | 280 | 85 |
| PIDABMI | 74 | 233 | 273 | 63 |
| FDABMI | 345 | 347 | 349 | 74 |
| 44DDSBMI | 258 | 260 | 284 | 94 |
| BAPSBMI | 70 | 253 | 302 | 137 |
| 33DDSBMI | 212 | 246 | 285 | 93 |
| 34DABABMI | 273 | 280 | 290 | 104 |
| 33DABABMI | 209 | 248 | 273 | 115 |

从表1数据中可以看出PIDABMI和BAPSBMI各自具有较低的熔点,分别为74和70 $^{\circ}\text{C}$,远低于BDM(160 $^{\circ}\text{C}$)。这是因为PIDABMI中含有多个甲基取代基,甲基破坏了分子的对称性,再加上PIDABMI本身为同分异构体,分子间混乱度较大导致结晶度降低,熔点降低。BAPSBMI中含有双硫醚键型柔性链段,硫醚键型链段可有效降低单体的熔点^[18]。降低双马树脂单体的熔点可显著提高双马树脂加工成型的工艺性。FDABMI含有双酚苄结构,分子刚度最大,所以其熔点最高,为345 $^{\circ}\text{C}$ 。从44DDSBMI和33DDSBMI、34DABABMI和33DABABMI两对双马树脂单体比较中可以看出,间位取代的双马树脂单体具有更低的熔点,例如44DDSBMI和33DDSBMI的熔点分别为258和212 $^{\circ}\text{C}$,这主要是间位取代结构具有顺反空间构象,分子链堆砌规整度比对位结构低。

2.3 双马共混物及其固化物制备

双马树脂常用改性剂为二烯丙基双酚A(DABPA)^[19]。将DABPA分别与BDM及八种新型BMI单体以摩尔比1:1在130~160 $^{\circ}\text{C}$ 下共混。结果发现BDM、34ODABMI、33DDSBMI、BAPSBMI、PIDABMI可溶于DABPA,熔融后形成均相体系;44DDSBMI、FDABMI、33DABABMI、34DABABMI不溶于DABPA,提高熔融温度亦不溶解,未获得均相改性双马树脂,后续未做性能评价。将得到的五种双马共混物分别命名为D-BMI、D-34ODABMI、D-33DDSBMI、D-BAPSBMI、D-PIDABMI。将五种双马共混物置于模具中,放入真空烘箱,150 $^{\circ}\text{C}$ 下脱气15~30 min。随后,将模具移入程序升温烘箱进行分段固化,得到双马树脂。固化过程为:180 $^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ →200 $^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ →220 $^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ →250 $^{\circ}\text{C}/5\text{ h}$ 。将得到的双马树脂加工成指定样条尺寸,分别进行了TGA、DMA、

冲击强度、弯曲强度的性能测试。

2.4 热重分析

采用TGA研究了新型双马树脂的热性能。图14为固化树脂的TGA测试曲线,表2给出了TGA曲线的特征参数。从表中可以看出,D-PIDABMI表现出最高的 T_d^5 ,说明侧甲基的存在提高树脂工艺性能的同时不会降低树脂的耐热性能。而醚键的存在不利于 T_d^5 的提高,例如D-34ODABMI和D-BAPSBMI体系的 T_d^5 比D-BDM低20和3 $^{\circ}\text{C}$ 。D-33DDSBMI表现出最低的 T_d^5 ,这主要是因为33DDSBMI的反应活性低,从DSC图中可以看出其固化峰值温度为285 $^{\circ}\text{C}$,较BDM高了近50 $^{\circ}\text{C}$ 。低反应活性致使其在250 $^{\circ}\text{C}$ 的固化过程中未反应完全,交联密度低,从而带来 T_d^5 低。

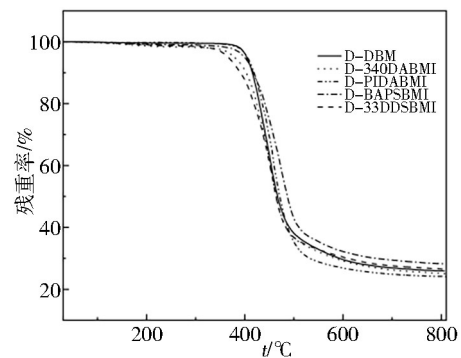


图14 不同D-BMI树脂的TGA曲线

Fig. 14 TGA curves of different D-BMI resins

表2 D-BMI树脂固化物TGA曲线的典型参数

Tab. 2 Typical parameters of TGA curve for D-BMI resins

| D-BMI | $T_d^5/^{\circ}\text{C}$ | $T_d^{10}/^{\circ}\text{C}$ | 800 $^{\circ}\text{C}$ 残碳率/% |
|------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| D-BDM | 403 | 415 | 26 |
| D-34ODABMI | 380 | 403 | 25 |
| D-PIDABMI | 406 | 419 | 24 |
| D-BAPSBMI | 400 | 418 | 28 |
| D-33DDSBMI | 366 | 391 | 27 |

2.5 DMA分析

DMA是另一种方便、准确、直观地评价材料耐热性能的方法。将上述制备的五种新型双马树脂进行DMA测试,结果在表3中列出。从表3中可以看出,四种新型双马树脂的 T_g 均低于对比例D-BDM。从分子结构角度来看,BDM中两个马来酰亚胺键之间的桥基最短,更容易获得交联密度高,分子链段堆砌紧密的聚集态。但是,D-34ODABMI和D-PIDABMI依然表现出较高的耐热性,其 T_g 分别为276和280 $^{\circ}\text{C}$ 。BAPSBMI属于内扩链双马树脂单体,交联点间分子链变长导致制备的双马树脂交联密度降低,所以其具有最低的 T_g ,为230 $^{\circ}\text{C}$ 。将图15中不同双马树脂的储能模量拐点温度和Tan δ 峰值温度列于表3。

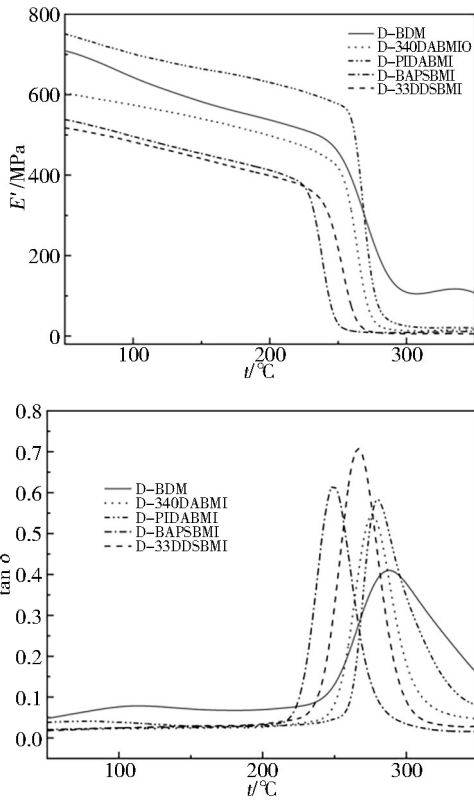


图 15 不同D-BMI树脂的DMA曲线

Fig. 15 DMA curves of different D-BMI resins

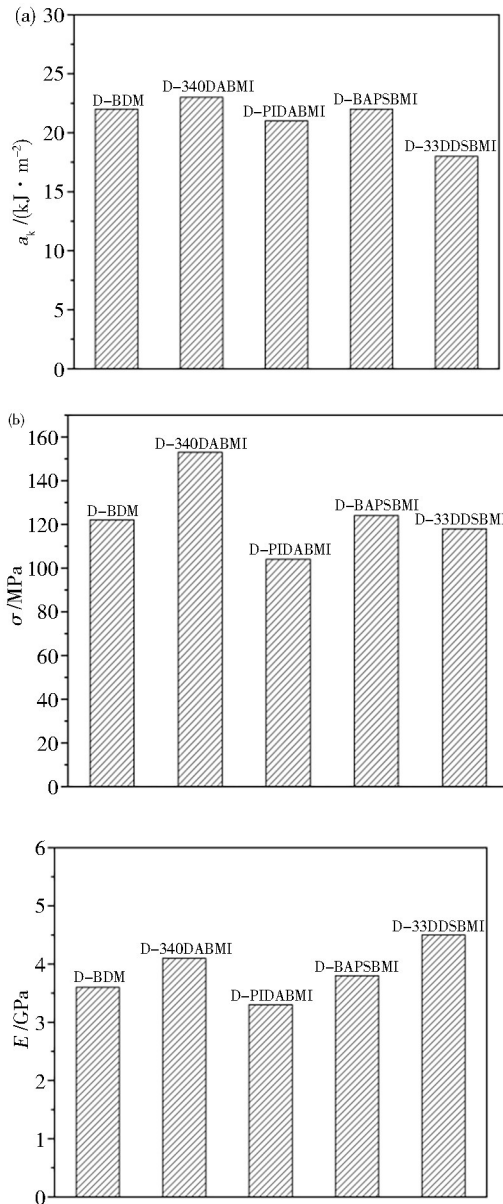
表 3 不同D-BMI树脂的储能模量拐点和tanδ峰值温度
Tab. 3 Modulus inflection point and tanδ of different D-BMI resins peak temperature

| D-BMI | 储能模量拐点/°C | tanδ峰值温度/°C |
|------------|-----------|-------------|
| D-BDM | 252 | 287 |
| D-340DABMI | 255 | 276 |
| D-PIDABMI | 261 | 280 |
| D-BAPSBMI | 230 | 249 |
| D-33DDSBMI | 242 | 267 |

2.6 力学性能测试

四种新型双马树脂和D-BDM树脂浇铸体冲击强度和弯曲性能测试结果如图16所示。

将图16中不同双马树脂的力学数据列于表4。从表4中可以看出,四种新型双马树脂的冲击强度几乎没有差别。比较突出的是D-340DABMI的弯曲强度高达153 MPa,相比比例D-BDM提高了25%。弯曲测试过程中,材料需承受拉、压、剪切等作用,是一个综合的受力过程。弯曲性能与材料的刚度、交联密度等均有关联。340DABMI分子结构中两个交联点间的距离与BDM接近,由于柔性链段醚键的存在,整体分子刚度略有下降,故在弯曲测试这种复杂受力条件下,表现出优异的力学性能。同时,从表4中可以看出,D-340DABMI和D-33DDSBMI具有高的弯曲模量,分别为4.1和4.5 GPa,这主要是因为间位化学结构的材料体系存在顺反



注:(a)Impact strength;(b)Flexural strength;(c)Flexural modulus。

图 16 不同双马树脂的力学性能

Fig. 16 Mechanical properties of different bismaleimide resins

两种空间构象,具有更高的堆砌效率,自由体积减小,体系模量升高。

表 4 不同双马树脂的力学数据

Tab. 4 Mechanical data of different bismaleimide resins

| D-BMI | $a_k/(kJ \cdot m^{-2})$ | σ/MPa | E/GPa |
|------------|-------------------------|--------------|---------|
| D-BDM | 22 | 122 | 3.6 |
| D-340DABMI | 23 | 153 | 4.1 |
| D-PIDABMI | 21 | 104 | 3.3 |
| D-BAPSBMI | 22 | 124 | 3.8 |
| D-33DDSBMI | 18 | 118 | 4.5 |

3 结论

采用共沸蒸馏脱水法制备了八种新型BMI单体,并通过核磁共振氢谱和红外测试表征了其分子结构。

研究表明,分子结构中引入扩链结构和侧甲基结构可以降低双马单体的熔点,提高双马的工艺性能;间位取代的双马单体具有更低的熔点。在分子结构中引入刚性基团如双酚芬、砜基、酰胺键等结构,导致双马单体的加工性能很差,而且无法与改性剂相熔,难以制备双马树脂。同时,DMA 研究结果表明双马树脂的耐热性能主要与双马单体两个马来酰亚胺环间桥基链段长短有关。另外,本研究发现间位取代可提高树脂的弯曲模量。通过分子结构设计,新型双马单体可以改善双马树脂的工艺性能、耐热性能和力学性能。本文研制的双马单体可为后续高性能双马树脂及其复合材料的开发提供关键原材料。

参考文献

- [1] 谭光军,张小娟,钟家春,等. 低介电烯丙基聚砜改性双马来酰亚胺树脂复合材料的性能研究[J]. 塑料工业,2022,50(8):57-62.
- TAN G J, ZHANG X J, ZHONG J C, et al. Study on properties of low dielectric constant allyl polysulfone modified bismaleimide resin composites[J]. China Plastics Industry, 2022, 50(8): 57-62.
- [2] 计怡,刘琦,冯渊博,等. 耐高温双马来酰亚胺树脂研究进展[J]. 粘接,2016,37(7):39,40-45.
- JI Y, LIU Q, FENG Y B, et al. Research progress of high temperature resistant bismaleimide resin[J]. Adhesion, 2016, 37(7): 39, 40-45.
- [3] 李金亮,高小茹. 改性双马来酰亚胺树脂预浸料性能研究[J]. 民用飞机设计与研究,2020(1):121-124.
- LI J L, GAO X R. Study on the properties of prepreg based on modified bismaleimide resin[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2010(1): 121-124.
- [4] 余红雅,关少聪,李竞舟,等. 基于磷化处理和双马来酰亚胺包覆铁粉的高性能磁粉芯的工艺优化[J]. 复合材料学报,2023,40(4):2216-2223.
- YU H Y, GUAN S C, LI J Z, et al. Process optimization of high-performance soft magnetic composite based on phosphate and bismaleimide coated iron powders[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(4): 2216-2223.
- [5] 李小丽. 新型改性双马来酰亚胺树脂的研究[D]. 郑州: 郑州大学,2010.
- LI X L. Research on new modified bismaleimide resin[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010.
- [6] 白文科,丙酮法制备双酚 A 型双马来酰亚胺工艺优化研究[J]. 能源化工,2023,44(1):35-38.
- BAI W K. Preparation of BPA-BMI by acetone method[J]. Energy Chemical Industry, 2023, 44(1): 35-38.
- [7] 彭瑞江,鲁云华,迟海军,等. 两种双马来酰亚胺的合成及其表征[J]. 化工新型材料,2013,41(12):147-148,155.
- PENG R J, LU Y H, CHI H J, et al. Synthesis and characterization of two kinds of bismaleimides[J]. New Chemical Materials, 2013, 41(12): 147-148, 155.
- [8] 刘俊宁. 双马来酰亚胺树脂的改性及应用[J]. 热固性树脂,2008,23(4):46-49.
- LIU J N. Modification and application of bismaleimide resin[J]. Thermosetting Resin, 2008, 23(4): 46-49.
- [9] 李爽,赵雄燕,孙占英,等. 双马来酰亚胺树脂的研究进展[J]. 塑料科技,2014,42(6):122-126.
- LI S, ZHAO X Y, SUN Z Y, et al. Research progress in bismaleimide resin[J]. Plastics Science and Technology, 2014, 42(6): 122-126.
- [10] 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(15): 629-641.
- [11] XU J L, CHEN P, MA S J, et al. Synthesis and properties of novel bismaleimide containing allyl group and twisted structure[J]. Thermochimica Acta, 2024, 732: 179661
- [12] XU J L, CHEN P, MA S J, et al. Synthesis and thermal properties of novel bismaleimides containing cardo and oxazine structures and the thermal transition behaviors of their polymer structures[J]. Thermochimica Acta, 2023, 719: 179401
- [13] 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 L Z, XIA Y Q, LUO C Y, et al. Synthesis and structural characterization of meldrum's acid containing bismaleimide[J]. China Plastics Industry, 2022, 50(10): 41-46.
- [14] 武元娥,鲁云华,赵世图,等. 两种双马来酰亚胺的合成及表征[J]. 绝缘材料,2014,47(3):8-12.
- WU Y E, LU Y H, ZHAO S T, et al. Synthesis and characterization of two kinds of bismaleimides [J]. Insulating Materials, 2014, 47(3): 8-12.
- [15] 朱玉珑,虞鑫海. 新型含醚键双马来酰亚胺的合成[J]. 绝缘材料,2005,38(5):6-8.
- ZHU Y L, YU X H. Synthesis of novel ether-linked bismaleimides[J]. Insulating Materials, 2005, 38(5): 6-8.
- [16] 崔天放,于维,张丽,等. 新型叔丁基改性双马来酰亚胺树脂的合成[J]. 功能材料,2013,44(24):3558-3560.
- CUI T F, YU W, ZHANG L, et al. The synthesis of a new type of tert-butyl-modified bismaleimide resin[J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44(24): 3558-3560.
- [17] ZHANG Y, LYU J J, LIU Y J. Preparation and characterization of a novel fluoride-containing bismaleimide with good processability[J]. Polymer Degradation and Stability, 2012, 97(4), 626-631.
- [18] 赵立伟,杨海冬,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):258-264.
- ZHAO L W, YANG H D, WANG D Z, et al. Research progress in toughness modification of bismaleimide resin [J]. Materials Review, 2022, 36(20): 258-264.
- [19] 陈晓利. 双马来酰亚胺树脂的改性研究[J]. 合成材料老化与应用,2009,38(4):44-49.
- CHEN X L. Research in modification and reaction mechanism of bismaleimide resin[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2009, 38(4): 44-49.