

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.11.024

双马来酰亚胺树脂的增韧改性研究进展

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:双马来酰亚胺(BMI)树脂由于其优异的性能被广泛应用于航空航天等领域,在近些年受到越来越多研究者的关注。介绍了BMI树脂在使用过程中存在的问题,其中BMI树脂分子链短且存在大量刚性基团使得固化后交联密度大,导致固化物韧性差,成为了制约BMI树脂使用的最大问题。重点介绍了BMI树脂的增韧改性方法,包括二元胺类化合物改性、烯丙基化合物改性、橡胶改性、热塑性树脂改性、热固性树脂改性、无机纳米粒子改性和合成新型BMI等。最后根据现有增韧方法所存在的问题,对未来BMI树脂增韧方向发展提出了展望。

关键词:双马来酰亚胺;增韧;改性;耐热性;复合材料;进展

中图分类号: TQ322.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)11-0165-06

Research progress in toughness modification of bismaleimide resin

WANG Wei, WANG Yishi, KONG Guoqiang, WANG Zhaoshuo, YANG Chuanchao, ZHOU Zanmin, WANG Kun, LIU Shuchang

(Shandong Nonmetallic Materials Institute, Jinan 250031, China)

Abstract : Bismaleimide (BMI) resin has been widely used in aerospace and other fields due to its excellent performance and has attracted more and more attention from researchers in recent years. But the traditional BMI resin cannot be directly used due to its poor toughness and high melting point, so it is necessary to be modified. In this paper, the basic situation of bismaleimide resin (BMI) is briefly introduced. The main modification methods of BMI are reviewed, including modification of binary amine compound, allyl compound, rubber, thermoplastic resin, thermosetting resin, nanoparticle modification and synthesis of new BMI. In addition, the views on the future development of BMI are expressed.

Keywords : bismaleimide resin ; toughening ; modification ; high temperature resistance ; composites ; progress

先进树脂基复合材料(APC)是以作为基体的有机高分子材料和作为增强体的高性能纤维通过一定工艺复合而成的一类新型材料,APC具有质量轻、高强度、高模量和抗疲劳性强等特点。当今世界的第五代战斗机在飞行性能上具有高机动的特点,因此第五代战斗机中合金和金属材料的用量较以往大幅下降,而APC的用量大幅增加,例如我国的第五代战斗机J-20上大量使用了APC,美国的第五代隐身战斗机F-22复合材料的用量达到了25%,F-35的复合材料用量更是达到了35%。APC在民用领域也有着广泛的应用并且正在不断发展,例如国产大飞机C919的后机身后段、平尾、垂尾、方向舵等承力部位均使用了APC。波音-787飞机的结构部件上,复合材料的质量占比高达50%,此外APC还在汽车、船舶、发电等领域有着广泛的应用^[1-7]。目前主要的APC树脂基体有环氧树脂(EP)、双马来酰亚胺树脂(BMI)、聚酰亚胺树脂(PI)等^[8]。

双马来酰亚胺(BMI)是由两个马来酰亚胺(MI)基团封端的一类性能优异的双官能团化合物,大多数的BMI树脂的热分解温度大于450℃,BMI树脂还具低吸湿率、耐辐射和价格相对低廉等特点^[9-11]。BMI树脂在航空航天领域有着非常广泛的应用,例如美国F16、F22和F35等当下主力战斗机的主承力部件中大量使用了BMI树脂基复合材料,国外关于BMI树脂的研究开始较早,目前BMI树脂基复合材料已经发展到第三代,第三代BMI树脂基复合材料的压缩后冲击强度已经由第一代的150 MPa提升到315 MPa。国内对BMI树脂的研究开始于上世纪90年代,目前BMI树脂基复合材料已经应用于我国一些飞行器上的航空发动机舱、机翼和蒙皮等关键部件中。近年来,我国也成功研制了第三代BMI树脂基复合材料(AC631/CCF800H),AC631/CCF800H复合材料可以在150℃的湿热环境中长时间使用,其综合力学性能高于美国先进战斗机中广泛应用的5250-1/IM7,并满

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:2024-08-26

引用格式: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.

足自动铺丝的工艺需求^[12-14]。

传统双马来酰亚胺分子链较短且含有较多刚性基团,固化后交联密度高,这种分子结构使BMI树脂具有优秀耐热性能的同时也具有韧性差的缺点。未改性的双马树脂存在固化物韧性差、工艺性差和溶解性差等缺点,其中韧性差是限制其使用的最大原因。如何在保证双马来酰亚胺树脂优异耐热性的基础上对其增韧,成为了许多国内外学者努力的方向^[15-16]。

1 双马来酰亚胺增韧改性方法

由于双马树脂的韧性较差,目前对双马树脂的改性主要体现在增韧方面。双马树脂增韧改性的方法主要有二元胺类化合物改性、烯丙基化合物改性、橡胶改性、热塑性树脂改性、热固性树脂改性、无机纳米粒子改性和合成新型BMI等^[17]。

1.1 二元胺类化合物改性

二元胺对双马树脂改性也叫双马树脂外扩链改性,这种方法是比较早被应用于双马树脂增韧改性的方法,也是比较容易实现的一类改性方法。二元胺类化合物改性的机理是二元胺中的氨基与BMI中酰亚胺环上的高活性双键发生Michael加成反应后扩链,降低固化后的交联密度从而使双马树脂的韧性得以提高^[18]。用这种方法会使BMI树脂固化后交联密度大大降低从而达到增韧的目的,但是仅用二元胺增韧会导致树脂的黏度较大,不利于加工成型,因此通常需要加入其它改性剂配合使用。

Liu等^[19]合成了一种含酚酞结构的二元胺化合物并和二苯甲烷型双马树脂(BDM)发生加成反应扩链,根据二元胺与BDM不同的化学计量比生成三种扩链产物(PM2, PM3, PM4),用综合性能最好的PM2对BDM/二烯丙基双酚A(BDM/DABPA)体系改性,当加入PM2的质量分数为5%时,冲击强度提高121.3%;通过对三元体系固化物的扫描电子显微镜表征分析可知,随着PM2的加入,体系由脆性断裂面转变为韧性断裂面。

Liu等^[20]合成了一种氨基封端的聚二氮杂萘酮醚脲(PPENS-DA),用PPENS-DA改性BDM/DABPA树脂体系,制备了PPENS-DA/BDM/DABPA三元共混体系,研究了PPENS-DA含量和PPENS-DA中氰基含量对树脂体系性能的影响。研究表明,随着氰基含量为75%的PPENS-DA(PPENS-DA75)的加入,树脂的冲击强度先升高后降低,当PPENS-DA75含量为10份时,树脂的冲击强度达到3.98 kJ/m²,比不改性体系提高65.1%;氰基含量为75份时,树脂的增韧效果最好,PPENS-DA75的冲击强度比PPENS-DA0提高25.5%。

二元胺和EP配合对双马树脂进行改性也是很经典的一种BMI增韧方法,EP可以提高材料的加工工艺性能还可以与体系产生互穿网络结构,进一步提高BMI树脂的韧性。杨菲等^[21]合成了一种含硅的二胺(p-APDS),将p-APDS和EP(E-54)搭配对BDM改性,改性后浇铸体的冲击强度和弯曲

强度分别达到38.52 kJ/m²和120.51 MPa,相对于二氨基二苯砜(DDS)/EP改性BDM体系均得到提高。

1.2 烯丙基化合物增韧改性

烯丙基化合物对BMI树脂的共混增韧改性是目前最成熟、应用范围最广的BMI改性方法。烯丙基化合物改性BMI的反应共分两步,首先BMI和烯丙基化合物通过Ene反应形成1:1中间体,然后通过Diels-Adler反应进一步交联^[22]。DABPA是最常见的应用于BMI树脂增韧的改性剂,目前很多对BMI树脂的改性实际上都是基于BDM/DABPA树脂体系进行的改性。用烯丙基化合物对BMI树脂增韧不仅可以获得力学性能良好的改性树脂,而且预聚物易溶、加工成型性好,是非常优秀的一类BMI树脂改性剂^[23-26]。

Wang等^[26]合成了一种液晶型二烯丙基化合物(BAOBE),并用不同物质的量配比的BAOBE和DABPA改性BDM,当BAOBE与DABPA的物质的量比为4:6时,改性树脂的弯曲强度达到156 MPa,比DABPA改性的树脂提高19.2%;当BAOBE与DABPA的物质的量比为5:5时,改性树脂的冲击强度达到15.6 kJ/m²,比DABPA改性的树脂提高90.5%,且通过断裂面SEM图观察到加入BAOBE后固化物断裂面由平滑的脆性断裂面变为粗糙的韧性断裂面。

Liu等^[27]合成了一种含酰胺结构的二烯丙基化合物(ADMH),并制备了BDM/DABPA/ADMH三元体系,根据ADMH与DABPA的质量比不同得到四个体系。研究表明,加入ADMH的质量分数为4.8%的树脂体系(1-BDA)拥有最好的综合性能,通过动态热机械分析(DMA)图谱可知,1-BDA的玻璃化转变温度(T_g)相比于0-BDA几乎没有变化,但1-BDA的弯曲强度、冲击强度和拉伸强度都达到最大值,分别为164 MPa, 28.7 kJ/m²和66 MPa,比不加ADMH的体系提高了10.96%, 12.43%和66%。

Lyu等^[28]合成了三种分别由三氟甲基、甲基和氢原子取代的苯并噁嗪结构的烯丙基化合物(BOZ-F, BOZ-C, BOZ-A),并用三种烯丙基化合物改性BDM/DABPA树脂,三个体系命名为BDM-F, BDM-C, BDM-A。研究表明, BDM-A, BDM-C, BDM-F的800 °C残炭率提高, BDM-F的800 °C残炭率达到42.5%。改性剂的加入可以同时提高体系的弯曲强度及其模量, BDM-C的弯曲强度和弯曲模量最大,分别为136.02 MPa和4.14 GPa; BDM-A改性树脂的冲击强度最大,达到了18.01 kJ/m²。

胡睿等^[29]以二烯丙基双酚A(DP)和EP(E-51)为主要原料合成了一种烯丙基酚氧树脂,并用这种烯丙基酚氧树脂和DP改性BMI,制备了五种不同烯丙基酚氧树脂含量的浇注体。当烯丙基酚氧树脂的含量为70份时,树脂的力学性能达到最优,冲击强度达到了23.31 kJ/m²,相比于纯DP改性的BMI树脂,加入烯丙基酚氧树脂后的树脂体系力学性能有较大提升。

1.3 橡胶增韧改性

橡胶具有比较低的 T_g ,使其在常温下保持高弹态。用于

改性双马树脂的橡胶改性剂通常带有可以与BMI反应的活性基团,从而在体系中生成嵌段结构,大大提高树脂的韧性,目前使用最多的是含活性端基的液态丁腈橡胶^[30]。橡胶增韧BMI树脂的增韧机制为银纹-剪切带理论,固化时,橡胶相和双马树脂相会形成“海岛”状的两相结构。当受外力作用时,橡胶相会作为应力集中点诱发银纹和剪切带产生,从而吸收冲击能量提高树脂的韧性^[31]。这种增韧方法可以大幅提高树脂韧性,但是对树脂耐热性损失较大。

杨海冬等^[32]用端乙烯基丁腈橡胶对BDM/DP体系改性,研究表明,当端乙烯基橡胶的加入量为5%时,改性树脂体系有最好的综合性能,其失重5%的温度达到了420℃,通过DMA曲线测得 T_g 为241℃,比不加乙烯基橡胶的体系降低5℃。加入5%乙烯基橡胶改性剂的体系的冲击强度为23.17 kJ/m²,比未改性体系提高3.41 kJ/m²;应变能释放率(G_{IC})为338.5 J/m²,比未改性体系提高78.2 J/m²。

Wang等^[33]通过活性端乙烯基丁腈橡胶(VTBN)对*N,N*-(4-甲基-1,3-亚苯基)双马来酰亚胺/2,2-双[4-(4-马来酰亚胺苯氧基)苯基]丙烷/二烯丙基双酚A(BTM/BMPP/DABPA)体系改性。研究表明,随着VTBN的加入,固化物的冲击强度先增加后降低,加入6% VTBN的树脂(VTBN-6)冲击强度达到了12.32 kJ/m²,比不加VTBN的体系提高了45.6%,VTBN-6的平面应变断裂韧性 K_{IC} 和应变能释放率 G_{IC} 分别增加了48.7%和26%,断裂面SEM图也由脆性断裂面变为韧性断裂面。

1.4 热塑性树脂增韧改性

热塑性树脂增韧BMI是近年来研究较多的改性方法,采用耐热性好的热塑性树脂可以在保证BMI优异耐热性的基础上有效改善其韧性。目前热塑性树脂增韧BMI机理有三种:一是裂纹钉锚机制;二是半互穿网络机制;三是共聚机制。例如目前国内的QY8911-II等树脂就运用了热塑性树脂增韧的方法,常用的对BMI改性的热塑性树脂有聚醚酰亚胺、聚醚酮和聚醚砜等^[34]。热塑性树脂可以大幅提高BMI树脂韧性,但是热塑性树脂分子链之间不存在加热后交联固化的现象,因此如何在改性之后保证体系有良好的耐热性也是一大难题。

Babkin等^[35]用四种热塑性聚酰亚胺(Siltem, Ultem, P84, Extrem)对BMI进行改性,研究表明,通过扫描电子显微镜观察到可溶性聚醚酰亚胺Siltem, Ultem和Extrem在固化过程中发生相分离现象。Ultem改性后的体系断裂韧性提高最为明显,当加入10%和15%的Ultem时 G_{IC} 分别增加179%和322%,但弯曲强度和拉伸强度会有所下降。

Chen等^[36]用浓硫酸去改性聚醚醚酮(PEEK),得到磺化聚醚醚酮(SPEEK),以BDM为基体,二烯丙基双酚A(BBA)和双酚A二烯丙基醚(BBE)作为活性稀释剂,SPEEK为改性剂,制备了SPEEK/BBA-BBE-BDM共混体系,并对SPEEK/BBA-BBE-BDM体系的性能进行研究。结果表明,随着SPEEK的加入体系的弯曲性能和冲击性能都呈现先增加后

降低的趋势,当SPEEK的加入量为5%时,体系的冲击强度为15.74 kJ/m²,比基体树脂提高66.21%。当SPEEK的加入量为5%时,体系的热分解温度为460℃,比基体树脂高15℃。

刘思扬等^[37]用不同量端羟基聚醚砜(PES-OH)改性BMI树脂,研究了PES-OH加入量对树脂体系性能的影响。结果表明,PES-OH可以有效改善BMI树脂的韧性,当PES-OH的质量分数为10%时,改性树脂的拉伸强度、弯曲强度和断裂伸长率达到最大值,分别为97.1 MPa,156 MPa和3.1%,比不加PES-OH的体系提升40%,27%,72%。

1.5 热固性树脂增韧改性

利用热固性树脂对BMI树脂增韧是通过两种树脂活性官能团之间的反应形成互穿网络结构(IPN),IPN由两个或多个聚合物网络组成,这些聚合物网络相互穿插可以提高树脂的韧性、改善阻尼性能等^[38]。目前常用的对BMI树脂增韧改性的热固性树脂有氰酸酯树脂、EP和苯并噁嗪树脂等。热固性树脂改性BMI可以结合两种树脂各自的优异性能,在保持BMI树脂优异耐热性能的同时提高其韧性。

双马树脂/氰酸酯树脂(BMI/CE)聚合而成的体系被称为BT树脂,在印制电路板基板领域有着广泛应用。BT树脂具有优异的耐湿热性、耐化学腐蚀性和低介电常数^[39]。侯晓蒙等^[40]采用CE对DABPA/BMI树脂进行增韧改性,研究了CE含量对BMI力学和耐温性能的影响。研究表明,当BMI/DABPA与CE的质量比为1:0.5时,树脂的综合性能最佳,冲击强度达到最大值为3.60 kJ/m²,弯曲强度为85.27 MPa,热分解温度为430℃左右。

EP是比较早应用在BMI改性的热固性树脂,EP具有良好的刚度、强度、加工成型性和黏结性等特点,用EP改性BMI可以提高树脂的加工成型性,体系可以形成互穿网络结构,这种网络体系的形成可以提高树脂的韧性^[41-43]。Wu等^[43]制备了环氧/双马/氰酸酯(TDE-85/BMI/BADCy)三元体系,研究了不同含量的TDE-85对体系性能的影响。研究表明,当TDE-85含量为20%时,共混物的冲击强度和弯曲强度达到最大值,分别为13.5 kJ/m²和148 MPa,分别是BMI/BADCy树脂的1.46倍和1.41倍。

苯并噁嗪(BOZ)树脂具有耐热性好、吸水率低、固化过程无小分子释放的特点,在电子、航空航天等领域有着很广泛的应用^[45-46]。周如金等^[47]用不同质量分数的BOZ树脂改性BMI树脂,体系的冲击强度随着BOZ树脂含量的提高不断增加,但是热分解温度随着BOZ的加入而降低。根据固化物断面的SEM图可知,随着BOZ树脂的加入断面转变为韧性断裂。Wang等^[48]用不同质量分数的BOZ改性BMI/BADCy,制备了三元共混物,研究表明,加入BOZ质量分数10%的树脂体系(PBOZ10)力学性能达到最优,PBOZ10的冲击强度达到20.3 kJ/m²,比BMI/BADCy树脂提高70%,弯曲性能也大幅提高。扫描电子显微镜(SEM)分析表明,三元体系的断裂面具有明显的韧性断裂特征。

1.6 无机纳米粒子改性

将纳米粒子加入到BMI树脂体系中可以有效提高BMI树脂的力学性能及耐热性,其增韧机理为无机纳米粒子可作为应力集中点,吸收冲击带来的能量并阻止裂纹的传播。纳米粒子存在表面惰性,在改性前通常要对其进行表面处理如接枝一些能与树脂反应的活性官能团,目前常用的增韧改性的纳米粒子主要有碳纳米管、纳米SiO₂、石墨烯和晶须等^[49-50]。用合适的表面处理剂处理纳米粒子可以使纳米材料与树脂结合性良好,进而使树脂体系的耐热性和力学性能提升,但纳米粒子加入过多会导致微粒的团聚从而形成一些缺陷结构,不利于性能的提升。

Yang等^[51]利用聚乙烯吡咯烷酮(PVP)对单壁碳纳米管(SWCNTs)进行非共价改性,用PVP处理后的SWCNTs去改性BMI树脂,研究了功能化SWCNTs对BMI树脂性能的影响。研究表明,PVP处理后的SWCNTs在N-甲基吡咯烷酮(NMP)中分散性良好;加入质量分数为0.015%的SWCNTs的改性树脂的冲击强度、弯曲强度和弯曲模量达到最大值,分别为17.11 kJ/m², 149.50 MPa和4.31 GPa,比纯树脂提高了52.9%, 24.2%, 33.1%,且复合材料的热稳定性也得到提高。

Zhang等^[52]用硅烷偶联剂(MPS)对纳米二氧化硅(SNPs)进行表面处理,然后用改性纳米二氧化硅(OSNPs)对EP-BMI-DDM三元体系进行改性,研究表明,当OSNPs的质量分数为2%时,体系的拉伸强度、弯曲强度和冲击强度分别提高79.1%, 28.0%, 45.6%,且体系的热稳定性得到提高。

Jiang等^[53]用环氧硅烷表面处理氧化石墨烯,然后用经表面处理的氧化石墨烯(ES-GO)改性BMI树脂,并制备了玻璃纤维增强改性树脂复合材料,研究了ES-GO对改性树脂及复合材料性能的影响。研究表明,改性树脂的T_g随着ES-GO含量的增加而增加。加入0.3% ES-GO的改性树脂冲击强度和弯曲强度达到最大,分别提高了144%和20%。断裂面SEM图显示加入ES-GO后,改性树脂的断裂面由脆性断裂变为韧性断裂。此外,相比不加ES-GO的复合材料,玻璃纤维增强改性树脂复合材料的弯曲强度和层间剪切强度提高25%~35%。

党婧等^[54]用硅烷偶联剂KH-560改性过的SiC颗粒-SiC晶须(SiC_p-SiC_w)为填料制备了SiC_p-SiC_w/BMI复合材料。当SiC_p-SiC_w中SiC_p:SiC_w的质量比为1:3,且SiC_p-SiC_w的加入量为10%时,复合材料的冲击强度达到15.3 kJ/m²,比不加SiC_p-SiC_w的BMI树脂提高26.6%。还对比了不用KH-560改性的SiC_p-SiC_w的增韧效果,结果表明,用KH-560处理过的SiC_p-SiC_w增韧效果更好。

1.7 合成新型BMI

合成新型BMI主要是通过设计两个马来酰亚胺基团中间的“-R-”来实现的,也叫内扩链改性。由于传统的BMI分子链较短且存在大体积刚性结构使得其韧性较差,故可以通过在两个马来酰亚胺基团中间引入一些柔性链段和特殊功

能的基团来增加分子链长度、降低固化后的交联密度并带来一些特殊功能^[55]。通过合成新型BMI,把一些带有特殊功能的基团引入到BMI单体分子当中,进而可以更直接地获取BMI树脂的一些功能,也是近年来研究比较多的改性方法。

XU等^[56]合成了三种含苯并噁嗪结构的BMI,三种BMI树脂同时拥有苯并噁嗪树脂和BMI树脂优异的性能。由于刚性基团和大侧基的存在增加了活化能,也大大改善了热稳定性和溶解性。三种单体在多种溶剂中均表现出良好的溶解性,且在430℃都保持了很高的热稳定性,800℃的残炭率分别为68%, 60%和62%。在经高温处理后,三种BMI内部分子链发生了重排,形成了聚苯并噁嗪树脂,聚苯并噁嗪树脂的分解温度为510℃,800℃时残炭率达到80%。

周赞民等^[57]合成了一种含单苯并咪唑BMI(BZ-BMI)和一种含邻苯并咪唑的BMI(OBZ-BMI),制备了BZ-BMI/DABPA, OBZ-BMI/DABPA和BDM/DABPA树脂浇注体,并测试三种体系的力学性能。BZ-BMI有着更好的热稳定性,其热分解温度和高温残炭率均高于OBZ-BMI。BZ-BMI/DABPA体系的冲击强度较BDM/DABPA体系的冲击强度降低17.3%,而OBZ-BMI/DABPA体系则提高20.6%。

Jiang等^[58]等成功合成了一种含磷杂环和脂肪族长链结构的BMI(MADQ),并制备了不同MADQ含量的MADQ/BDM/DABPA共混体系(BMI, BMI/MADQ-1, BMI/MADQ-3, BMI/MADQ-5),研究了MADQ含量对树脂体系性能的影响。研究表明,随着MADQ的加入初始热分解温度会降低,但所有样品的初始热分解温度都超过400℃,保持了很高的热稳定性。冲击强度随着MADQ的加入先升高后下降,BMI/MADQ-3体系的冲击强度为8.27 kJ/m²,相比与纯BMI提升90.1%,并保持了很高的拉伸性能。

2 结论与展望

由于BMI树脂的韧性差,纯BMI树脂难以直接使用,需要对其改性,主要讨论了国内外BMI树脂的几种主要改性方法,BMI树脂经过几十年的发展已经有一系列的改性方法,但是每种方法都或多或少存在着一些问题,随着对BMI树脂研究的深入,未来BMI树脂增韧将朝着以下几个方向发展。

(1) BMI树脂增韧剂的研发将朝着保证BMI树脂优异耐热性不损失和提高韧性的同时改善BMI树脂的加工工艺性、溶解性能和降低改性成本的方向发展,并且实现改性树脂性能的可控化。

(2) 未来将会有越来越多的新型BMI树脂单体出现,在设计这些新型BMI单体时会把分子链长链结构和一些柔性基团引入到BMI结构当中,从根本上提升BMI树脂的韧性,在兼顾提升BMI树脂韧性的同时,还会通过在单体结构中引入一些具有特殊功能的官能团带给BMI树脂一些特定的功能。

(3) 共混改性依然是BMI树脂改性的主流方法,通过将BMI树脂和其他与BMI树脂有良好相容性的树脂共混得到

多组分共混体系,例如耐高温热塑性树脂、新型烯丙基化合物和二元胺化合物等,共混体系可以吸收每个组分共同的优势也可以弥补单一增韧手段带来的不足,从而达到提升BMI树脂性能的目的。

参考文献

- [1] HARLE S M. Structures, 2024, 60. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.105881.
- [2] HSISSOU R, SEGHIRI R, BENZEKRI Z, et al. Composite Structures, 2021, 262. DOI:10.1016/j.compstruct.2021.113640.
- [3] 秦铭泽,等.热加工工艺,2024,53(6):6-9.
QIN Mingze, et al. Hot Working Technology, 2024, 53(6):6-9.
- [4] 江永泉.民用飞机设计与研究,2024(1):157-158.
JIANG Yongquan. Civil Aircraft Design & Research, 2024(1):157-158.
- [5] 檀甜甜,等.航空精密制造技术,2021,57(3):14-18.
TAN Tiantian, et al. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2021, 57(3):14-18.
- [6] KANGISHWAR S, et al. Polymer Bulletin, 2023, 80(1):47-87.
- [7] HSISSOU R, et al. Composite Structures, 2021, 262. DOI:10.1016/j.compstruct.2021.113640.
- [8] 赵淼.工程塑料应用,2024,52(4):188-192.
ZHAO Miao. Engineering Plastics Application, 2024, 52(4):188-192.
- [9] YANG J B. et al. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 230. DOI:10.1016/j.geoen.2023.212222.
- [10] DASH R, et al. Journal of Polymer Engineering, 2023, 43(3):199-209.
- [11] DYER W E, et al. Macromolecular Chemistry and Physics, 2023, 224(24). DOI:10.1002/macp.202300186.
- [12] 杨海冬,等.化工新型材料,2021,49(10):10-14.
YANG Haidong, et al. New Chemical Materials, 2021, 49(10):10-14.
- [13] 李伟东,等.合成纤维,2024,53(6):27-34.
LI Weidong, et al. Synthetic Fiber in China, 2024, 53(6):27-34.
- [14] 张洋,等.科技与创新,2019(1):52-53.
ZHANG Yang, et al. Science and Technology & Innovation, 2019(1):52-53.
- [15] 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.
- [16] Xu J L. et al. Journal of Applied Polymer Science, 2023, 140(42). DOI:10.1002/app.54547.
- [17] ZHOU X. et al. Composites Part B:Engineering, 2022, 233. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.109653.
- [18] OUYANG Y F, et al. Materials Chemistry and Physics, 2024, 313. DOI:10.1016/j.matchemphys.2023.128703.
- [19] LIU S Y, et al. High Performance Polymers, 2018, 30(5):527-538.
- [20] LIU C, et al. Polymer, 2020, 206. DOI: 10.1016/j.polymer.2020.122887.
- [21] 杨菲,等.中国胶黏剂,2014,23(7):33-36.
YANG Fei, et al. China Adhesives, 2014, 23(7):33-36.
- [22] RICHAUD E, et al. Polymer Degradation and Stability, 2024, 219. DOI:10.1016/j.polymdegradstab.2023.110628.
- [23] ZHANG Z L, et al. Polymer Degradation and Stability, 2021, 193. DOI:10.1016/j.polymdegradstab.2021.109717.
- [24] EMMANUEL R, et al. Polymer Degradation and Stability, 2024, 219. DOI:10.1016/j.polymdegradstab.2023.110628.
- [25] WANG K X, et al. Advances in Polymer Technology, 2018, 37(1):281-289.
- [26] ZHANG Y H, et al. Reactive and Functional Polymers, 2023, 193. DOI:10.1016/j.reactfunctpolym.2023.105740.
- [27] LIU X Y, et al. High Performance Polymers, 2020, 32(6):631-644.
- [28] LYU J J, et al. Reactive & Functional Polymers, 2023, 191. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2023.105673.
- [29] 胡睿,等.工程塑料应用,2013,41(9):10-14.
HU Rui, et al. Engineering Plastics Application, 2013, 41(9):10-14.
- [30] 杨海冬,等.化工新型材料,2021,49(10):10-14.
YANG Haidong, et al. New Chemical Materials. 2021, 49(10):10-14.
- [31] 赵立伟,等.材料导报,2022,36(20):262-268.
ZHAO Liwei, et al. Materials Reports, 2022, 36(20):262-268.
- [32] 杨海冬,等.化学与黏合,2014,36(1):20-23.
YANG Haidong, et al. Chemistry and Adhesion, 2014, 36(1):20-23.
- [33] WANG D Z, et al. High Performance Polymers, 2017, 29(10), 1199-1208.
- [34] 周侠.磷腈阻燃增韧双马来酰亚胺复合材料的设计及其性能研究[D].合肥:中国科学技术大学,2023.
ZHOU Xia. Design and performance study of phosphazene flame-retardant and toughened bismaleimide composites[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023.
- [35] BABKIN V A, et al. Polymers for Advanced Technologies, 2016, 27(6):774-780.
- [36] CHEN Y, et al. Journal of Materials Science:Materials in Electronics, 2019, 30(2):991-1000.
- [37] 刘思扬,等.合成材料老化与应用,2021,50(1):11-13.
LIU Siyang, et al. Synthetic Materials Aging and Application, 2021, 50(1):11-13.
- [38] SREEHARI H, et al. Polymer, 2022, 252. DOI: 10.1016/j.polymer.2022.124950.
- [39] LI X D, et al. Materials Today Communications, 2021, 29. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2021.102802.
- [40] 侯晓蒙. BMI树脂基复合材料的制备及性能研究[D].石家庄:河北科技大学,2018.
HOU Xiaomeng. Preparation and properties of BMI resin and its composites[D]. Shijiazhuang:Hebei University of Science & Tech-

- nology, 2018.
- [41] LIMA T A, et al. *Innovation and Emerging Technologies*, 2023, 10. DOI:10.1142/S2737599423300039.
- [42] 董雅卓,等. *工程塑料应用*, 2022, 50(5):170–174.
DONG Yazhuo, et al. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(5):170–174.
- [43] GONG Y N, et al. *Materials Today Communications*, 2024, 39. DOI:10.1016/j.mtcomm.2024.109233.
- [44] WU G, et al. *Thermochimica Acta*, 2012, 537:44–50.
- [45] LI X K, et al. *Progress in Organic Coating*, 2024, 192. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2024.108506.
- [46] 赵威,等. *工程塑料应用*, 2023, 51(5):159–164.
ZHAO Wei, et al. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(5): 159–164.
- [47] 周如金,等. *玻璃钢/复合材料*, 2018(12):21–27.
ZHOU Rujin, et al. *Fiber Reinforced Plastics/composites*, 2018(12):21–27.
- [48] WANG Y Q, et al. *Polymer*, 2015, 77:354–360.
- [49] LI J, et al. *Polymers for Advanced Technologies*, 2022, 33(12): 4 041–4 052.
- [50] 孙亮亮,等. *化学推进剂与高分子材料*, 2023, 21(4):32–37.
SUN Liangliang, et al. *Chemical Propellants & Polymeric Materi-*
als, 2023, 21(4):32–37.
- [51] YANG C, et al. *Diamond and Related Materials*, 2023, 137. DOI: 10.1016/j.diamond.2023.110089.
- [52] ZHANG G, et al. *Polymer Engineering and Science*, 2019: 274–283.
- [53] JIANG H, et al. *Materials*, 2020, 13(17). DOI: 10.3390/ma13173836.
- [54] 党婧,等. *复合材料学报*, 2017, 34(2):263–269.
DANG Jing, et al. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2017, 34(2): 263–269.
- [55] 马亚辉. *含金刚烷结构双马来酰亚胺树脂的合成与改性研究* [D]. 沈阳:沈阳化工大学, 2022.
MA Yahui. *Synthesis and modification of bismaleimides resin with Adamantane Structure*. [D]. Shenyang: Shenyang University of Chemical Technology, 2022.
- [56] XU J, et al. *Thermochimica Acta*, 2023, 719. DOI: 10.1016/j.tca.2022.179401.
- [57] 周赞民,等. *工程塑料应用*, 2024, 52(3):132–139.
ZHOU Zanmin, et al. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(3):132–139.
- [58] JIANG X, et al. *Journal of colloid and interface science*, 2022, 614:629–641.