

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.01.007

高韧性环氧树脂的制备及在复合材料中的应用

甘顺昌, 曾亮, 蒋庆庚, 刘文浩, 杨海洋, 黄安民, 彭超义

(株洲时代新材料科技股份有限公司, 湖南株洲 412007)

摘要: 为探究不同纳米核壳增韧粒子对环氧树脂及其复合材料性能的影响, 选用了3种纳米核壳增韧剂与自制的改性酸酐固化剂结合, 制备出具有高韧性的环氧灌注树脂组合料。在固化前, 对比测试了所制环氧树脂组合料的外观、密度、黏度和环氧值, 发现黏度受增韧剂的影响尤为显著。利用差示扫描量热分析仪和万能材料试验机测试了环氧树脂固化物在不同温度下的力学性能和热性能。通过扫描电子显微镜(SEM)分析了树脂增韧的机理。采用真空灌注工艺, 将环氧树脂制备成高韧性环氧树脂/玻璃布复合材料, 并测试了复合材料在不同温度条件下的性能。结果显示, 使用纳米核壳增韧剂的改性树脂的玻璃化转变温度超过140℃, 显示出良好的耐热性。特别是采用增韧剂MX125的树脂, 在-50℃的低温下, 拉伸强度达到96.2 MPa, 冲击强度为36 kJ/m²。对比测试不同纳米粒子含量的改性树脂, 发现当纳米粒子质量分数约为15%时, 改性树脂的冲击韧性达到最佳。SEM观察树脂断面的微观结构表明, 当树脂受到冲击发生断裂时, 纳米粒子会在树脂断面的表面形成空穴或残留颗粒, 有助于提高树脂的韧性。

关键词: 环氧树脂; 纳米核壳增韧剂; 合成树脂; 复合材料; 改性

中图分类号: TQ322 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)01-0044-06

Preparation and application in composites of high toughness epoxy resin

GAN Shunchang, ZENG Liang, JIANG Qinggeng, LIU Wenhao, YANG Haiyang, HUANG Anmin, PENG Chaoyi

(Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China)

Abstract : To investigate the effects of different nano core-shell toughening particles on the properties of epoxy resins and their composites, three nano core-shell toughening agents were selected and combined with a homemade modified anhydride curing agent to prepare epoxy infusion resin composites with high toughness. Before curing, the appearance, density, viscosity and epoxy value of the prepared epoxy resin composites were comparatively tested, and it is found that the viscosity is particularly affected by the toughening agents. The mechanical and thermal properties of the epoxy cured composites were tested at different temperatures using a differential scanning calorimetric analyser and a universal materials testing machine. The mechanism of resin toughening was analysed by scanning electron microscopy (SEM). The epoxy resins were prepared into high toughness epoxy resin/glass cloth composites by vacuum infusion process, and the properties of the composites at different temperatures were tested. The results show that the glass transition temperature of the modified resins using nanocore-shell tougheners exceeds 140℃, showing good heat resistance. In particular, the resin using MX125 as the toughening agent achieves a tensile strength of 96.2 MPa and an impact strength of 36 kJ/m² at a low temperature of -50℃. Comparative testing of modified resins with different nanoparticle contents reveal that the impact toughness of the modified resins is optimal when the mass fraction of nanoparticles is 15wt%. SEM observation of the microstructure of the resin section show that when the resin is fractured by impact, the nanoparticles form cavities or residual particles on the surface of the resin section, which helps to improve the toughness of the resin.

Keywords : epoxy resin ; nano core-shell toughening agent ; synthetic resin ; composite; modification

环氧树脂具有良好的力学性能、介电性能、黏接性能以及化学稳定性, 其固化物具备较低的收缩率和热膨胀系数, 尺寸稳定性相对较好, 与玻璃纤维、碳纤维、凯夫拉纤维等补强材料可制备成性能

通信作者: 杨海洋, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事高性能高分子材料研究及工程化应用; 彭超义, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事高分子复合材料研究及工程化应用

收稿日期: 2024-11-11

引用格式: 甘顺昌, 曾亮, 蒋庆庚, 等. 高韧性环氧树脂的制备及在复合材料中的应用[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(1): 44-49.

GAN Shunchang, ZENG Liang, JIANG Qinggeng, et al. Preparation and application in composites of high toughness epoxy resin[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(1): 44-49.

优异的复合材料,是一种重要的热固性工程材料,应用极为广泛^[1-2]。但是,未改性环氧树脂固化物质脆且容易开裂,往往通过橡胶弹性体增韧改性^[3-4]、热塑性塑料增韧改性^[5-8]、互穿网络增韧改性^[9-10]、纳米无机物增韧^[11]改性等手段改善环氧树脂的韧性,但是一般改性方式会降低环氧树脂的玻璃化转变温度。因此,如何平衡环氧树脂的耐热性与韧性一直是环氧树脂改性研究领域的重点和难点之一。

纳米核壳增韧剂是由甲基丙烯酸甲酯(PMMA)组成外壳,丁二烯橡胶(PBR)、丁二烯苯乙烯橡胶(SBR)或有机硅橡胶(SIL)等高弹性、低模量材料组成内核形成的尺寸直径约100 nm的核壳橡胶粒子。将纳米核壳增韧剂粒子均匀分布在环氧树脂中,高弹性的内核使环氧树脂固化物在受到外力冲击时保持较好的韧性和耐冲击性;与环氧树脂相容性较好的PMMA能保证环氧树脂仍具备较高的玻璃化转变温度,换言之,通过合理的纳米核壳增韧手段,可在保持环氧树脂玻璃化转变温度不明显降低的前提下使环氧树脂具备较好的韧性和耐冲击性,即赋予环氧树脂较好的综合性能^[12-15]。

笔者选取了几种不同弹性内核的纳米核壳增韧剂,结合自制的增韧固化剂,研究了不同内核的核壳增韧粒子对该环氧树脂体系综合性能的影响,并对其热性能和力学性能进行了较为详细的对比分析。选择出较为合适的纳米增韧剂后制备出高温和低温下综合性能都较为均衡的环氧灌注树脂,并采用真空灌注工艺制备环氧树脂/玻璃布复合板,对所制备的复合板在不同温度条件下进行测试,发现所开发的环氧灌注树脂在较宽温度区间内都具备较高的弯曲强度和弯曲模量,特别是在低温下具有较好的冲击韧性,说明该树脂体系可满足在不同温度条件下复合材料的应用要求,可应用于新能源、航空航天和国防军事等特殊领域,具备较好的市场应用前景。

1 实验部分

1.1 主要原材料

双酚A型环氧树脂:DER332,工业级,美国Olin Corporation公司;

双酚F型环氧树脂:DER354,工业级,美国Olin Corporation公司;

脂环族环氧树脂:Syna-Epoxy21,工业级,南通新纳希新材料有限公司;

稀释剂:LS-622,工业级,湖北绿色家园材料技术股份有限公司;

甲基四氢邻苯二甲酸酐:工业级,濮阳惠成电子材料股份有限公司;

1,2,4-苯三甲酸酐、聚丙二醇(PPG 1000):化学纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

三苯基磷:分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

固化促进剂:自制;

丁苯橡胶内核纳米核壳增韧剂:MX125,日本钟渊化学工业株式会社;

丁二烯橡胶内核纳米核壳增韧剂:MX154,日本钟渊化学工业株式会社;

有机硅内核纳米核壳增韧剂:MX960,日本钟渊化学工业株式会社;

稀释剂(1,4-丁二醇二缩水甘油醚):安徽新远科技股份有限公司;

无碱玻璃布:常州普泰玻纤制品有限公司。

1.2 主要仪器及设备

旋转黏度计:LVDV- II Pro,美国博勒飞Brookfield(中国)有限公司;

万能材料试验机:Z100,Zwick(中国)有限公司;

简支梁冲击试验机:KRT-2022C,昆山科瑞特试验仪器有限公司;

数显邵氏硬度计:HTS-800D,上海奕纵精密仪器有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪:DSC 3,梅特勒托利多国际有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):JSM-6610LV,日本电子株式会社。

1.3 高韧性环氧灌注树脂制备

(1)高韧性环氧灌注树脂组分制备:将70质量份的高纯度低分子量双酚A型环氧树脂DER332,30质量份的高纯度低分子量双酚F环氧树脂DER354,40质量份的脂环族环氧树脂Syna-Epoxy 21,10质量份的622稀释剂以及质量分数分别为10%、15%和20%不同配方设计的纳米核壳增韧剂(MX125, MX154和MX960)加入反应釜,控温50~60℃加热2 h后再缓慢升温至100~110℃,待树脂体系黏度下降后进行高速剪切分散3~5 h,最后真空脱泡1 h后得高韧性环氧树脂组分,外观为乳白色流动液体。

(2)固化剂制备:在氮气氛围下,向带有冷凝管的反应釜中加入 70~80 质量份的甲基四氢邻苯二甲酸酐、30 质量份的 PPG 1000 和 1.5 质量份 1,2,4-苯三甲酸酐,加热搅拌使原料完全混溶,用针筒取 3 mL 的三苯基磷的乙醚溶液缓慢滴加至上述反应液中,升温至 70~80 ℃,反应 2 h 后滴加一定量的自制促进剂,真空脱泡 1 h 得固化剂,外观为浅黄色澄清透明液体。

1.4 高韧性环氧树脂/玻璃布复合材料的制备

(1)将树脂和固化剂在 40 ℃下恒温加热 30 min 后,按质量比 100:105 称取,搅拌均匀后脱泡,制得所需环氧灌注树脂。

(2)将所制环氧灌注树脂采用真空灌注工艺缓慢注入预铺好的玻璃布中,保持真空度低于-0.1 MPa 进行固化,固化条件为 80 ℃/6 h+130 ℃/10 h。

1.5 测试与表征

黏度测试:采用旋转黏度计,温度控制采用自制水浴循环温度控制系统,按 GB/T 10247-2008 测试。

密度测试:采用比重瓶法,按 GB/T 15223-2008 标准。

硬度测试:采用数显邵氏硬度计,按 GB/T 2411-2018 测试。

玻璃化转变温度测试:采用 DSC 仪,按 ISO 11357-2:2020 测试,玻璃化转变温度取自第二次升温曲线。

力学性能测试:采用万能材料试验机,配备温度恒定箱,环氧灌注树脂和环氧树脂/玻璃布复合板的拉伸性能分别按 GB/T 2567-2021 和 GB/T 1447-2005 进行测试,拉伸速度为 2 mm/min,弯曲性能和断纹剪切强度分别采用 GB/T 1449-2005 和 GB/T 1450.2-2005 进行测试,加载速率为 2 mm/min。

冲击强度测试:采用简支梁冲击试验机,按 GB/T 2567-2021 测试。

树脂断面分析:采用 SEM,在低真空模式加速电压为 10 kV 下进行测试,将样品在液氮中急冻后拗断,在高真空下向脆断面镀金以增加导电性。

2 结果与讨论

2.1 高韧性环氧灌注树脂的基本性能

为对比不同纳米核壳增韧剂对环氧树脂体系的影响,按照增韧剂纳米粒子质量分数 15% 的比例

添加不同类型的纳米核壳增韧剂,并对所制备的环氧灌注树脂基本性能进行对比,将添加 MX125, MX154 和 MX960 增韧剂的环氧灌注树脂分别编号为 1[#]、2[#]和 3[#],纳米粒子质量分数为 0% 的样品编号 4[#](空白组)作为对照,测试数据见表 1。

表 1 环氧灌注树脂基本性能
Tab. 1 Basic properties of epoxy infusion resin

Samples	Appearance	Density/ (g·cm ⁻³)	Viscosity/ (mPa·s)	Epoxy value/ [mol·(100 g) ⁻¹]
1 [#]	Milky white	1.21	5 120	0.501
2 [#]	Milky white	1.22	12 721	0.513
3 [#]	Milky white	1.21	5 031	0.499
4 [#]	Colorless	1.19	2 751	0.620

对 3 种不同增韧剂制备的环氧灌注树脂测试可以发现,由于 3 种增韧剂纳米粒子含量(MX125 25%, MX154 33%, MX960 25%)、环氧当量以及起始黏度的差异,所制备的环氧灌注树脂基本性能在黏度上的差异性较为明显,因此在设计核壳增韧剂添加量时需结合黏度、环氧当量并综合考虑成本等因素。

2.2 高韧性环氧灌注树脂固化物的性能

为对比不同纳米核壳粒子的增韧效果,将 1.3 部分所制备的环氧灌注树脂与固化剂按照 100:105 的质量比进行混合并脱泡,并按照 80 ℃/6 h+130 ℃/10 h 条件进行固化,对环氧灌注树脂固化物性能进行测试,测试数据见表 2。由表 2 可见,3 种树脂都具备较高的玻璃化转变温度,耐热性优异;在-50 ℃低温下该环氧固化物具备较好的强度和韧性,特别是 1[#]树脂在低温下的性能优势明显;平行对比树脂高低温下的性能发现,随着温度升高,3 种树脂的拉伸和弯曲性能都呈明显下降趋势,而冲击韧性却呈明显上升趋势。经过综合性能对比,将以 1[#]树脂为后续测试主体。

2.3 纳米粒子对环氧灌注树脂增韧

为测试 MX125 纳米粒子(丁苯橡胶内核)含量对环氧树脂基本性能的影响,参照 1.3 部分制备了不同纳米粒子含量的环氧树脂,其中纳米粒子质量分数为 0%, 10%, 15%, 20% 的树脂分别标记为 1[#]-1, 1[#]-2, 1[#]-3 和 1[#]-4 号树脂,并将树脂与固化剂按照 100:105 的质量比分别进行混合后脱泡,按照 80 ℃/6 h+130 ℃/10 h 条件固化,对 1[#]-1~1[#]-4 树脂固化物性能测试,测试数据见表 3。由表 3 可见,随着纳米粒子含量的增加,固化物的玻璃化转变温度有一定的升高,这可能是由于纳米粒子的填充有利于缩小分

表2 环氧灌注树脂固化物基本性能
Tab. 2 Basic properties of cured epoxy infusion resin

Items	1 [#]	2 [#]	3 [#]
Appearance	White	White	White
Density/(g·cm ⁻³)	1.22	1.24	1.23
Hardness (Shore D, 25 °C)	81	82	81
Glass transition temperature/°C	144.2	146.5	143.2
Tensile strength/MPa	96.2	84.4	88.2
Tensile modulus/MPa	3 121	3 029	3 018
Elongation at break/%	4.7	4.1	4.1
Flexural strength/MPa	162	143	151
Flexural modulus/MPa	2 902	2 659	2 653
Impact strength (unnotched)/(kJ·m ⁻²)	36(C*)	32(C*)	34(C*)
Tensile strength/MPa	81	72	70
Tensile modulus/MPa	2 621	2 429	2 418
Elongation at break/%	7.1	6.5	6.7
Flexural strength/MPa	122	103	101
Flexural modulus/MPa	2 402	2 259	2 353
Impact strength (unnotched)/(kJ·m ⁻²)	41(C*)	36(C*)	37(C*)
Tensile strength/MPa	66	61	63
Tensile modulus/MPa	2 221	2 029	2 118
Elongation at break/%	7.5	6.7	7.0
Flexural strength/MPa	65	61	60
Flexural modulus/MPa	2 302	2 159	2 253
Impact strength (unnotched)/(kJ·m ⁻²)	55(C*)	43(C*)	49(C*)

Note: C* means forms of complete destruction(the same as in the following table).

子间自由体积,阻碍交联网络在高温下的运动,从而提高了树脂的玻璃化转变温度;由于采用了双酚F环氧树脂和PPG 1000等具备增韧效果的树脂,未添加纳米增韧剂的环氧树脂本身已经具备一定韧性。添加质量分数10%的纳米粒子后,环氧树脂的综合力学性能都有较为明显的提升;在添加质量分数为15%左右时,环氧灌注树脂的拉伸性能、弯曲性能和冲击性能基本达到比较高的水平;添加量继续增加后力学性能不仅未得到明显提升,某些性能甚至有所下降,这可能是由于纳米粒子的团聚和分散问题所引起的。因此,MX125纳米粒子的添加质量分数在15%左右为宜。

为进一步考察纳米粒子在环氧树脂中的微观状态,采用SEM观察环氧树脂断面的微观结构,如图1所示。由图1可见,纳米粒子的添加对环氧树脂断面形貌的影响极大。未添加纳米增韧剂的树脂断面较为光滑,断裂后有产生一定的银纹,但几乎都朝一个方向断裂,没有表现出非常明显的应力分散,呈现出一定的脆性材料的特点;而纳米粒子的加入不仅提高了树脂的玻璃化转变温度,还使树脂断裂面出现明显的改变,SEM照片显示断裂面粗糙且断裂方向分散,裂纹发生了明显的弯曲变形,

表3 不同纳米粒子含量的环氧灌注树脂固化物基本性能
Tab. 3 Basic properties of cured epoxy infusion resin with different nanoparticle contents

Items	1 [#] -1	1 [#] -2	1 [#] -3	1 [#] -4
Appearance	Transparence	White	White	White
Density/(g·cm ⁻³)	1.19	1.20	1.22	1.23
Hardness (Shore D, 25 °C)	86	84	81	79
Glass transition temperature/°C	131.2	135.9	144.2	143.3
Tensile strength/MPa	78.5	91.2	96.2	89.2
Tensile modulus/MPa	3 426	3 215	3 121	2 789
Elongation at break/%	3.2	4.1	4.7	3.9
Flexural strength/MPa	112	145	162	132
Flexural modulus/MPa	2 756	2 867	2 902	2 927
Impact strength (unnotched)/(kJ·m ⁻²)	21(C*)	29(C*)	36(C*)	27(C*)
Tensile strength/MPa	71.3	76.6	81	73.1
Tensile modulus/MPa	2 987	2 598	2 621	2 456
Elongation at break/%	4.2	6.1	7.1	7.3
Flexural strength/MPa	135	123	122	131
Flexural modulus/MPa	2 987	2 798	2 402	2 457
Impact strength (unnotched)/(kJ·m ⁻²)	32(C*)	36(C*)	41(C*)	45(C*)
Tensile strength/MPa	63.2	64.2	66.2	61.1
Tensile modulus/MPa	2457	2378	2221	2243
Elongation at break/%	4.5	6.8	7.5	7.2
Flexural strength/MPa	67	63	65	67
Flexural modulus/MPa	2 678	2 456	2 302	2 289
Impact strength (unnotched)/(kJ·m ⁻²)	37(C*)	42(C*)	55(C*)	56(C*)

这能吸收大量的能量,从而增加材料韧性和强度。

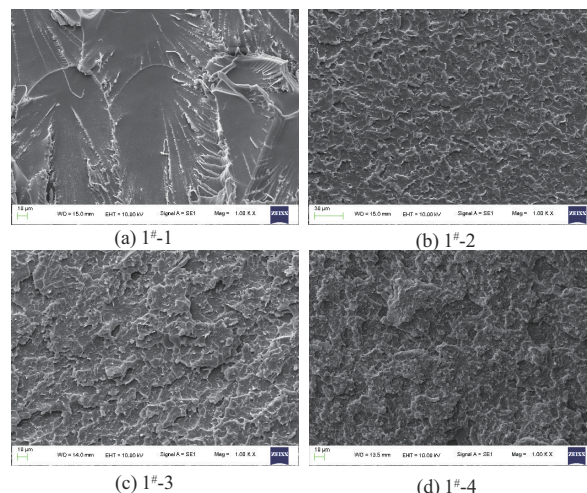


图1 不同纳米粒子含量的环氧树脂断面放大1 000倍的SEM图
Fig. 1 SEM images of fracture surface of epoxy resin with different nanoparticle contents (× 1 000)

进一步放大倍数(10 000倍)观察环氧树脂断面的情况,SEM对比图如图2所示。由图2可见,纳米粒子的添加对环氧树脂断面的影响极为明显。未添加纳米粒子的树脂断面平滑;添加纳米增韧剂

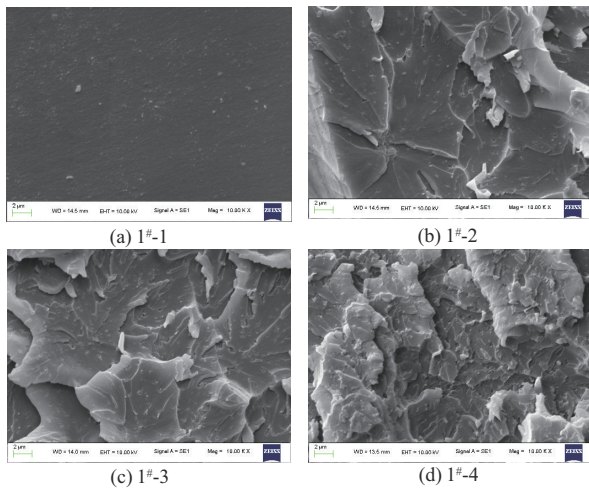


图2 不同纳米粒子含量的环氧树脂断面放大10 000倍的SEM图
Fig. 2 SEM images of fracture surface of epoxy resin with different nanoparticle contents ($\times 10\ 000$)

后,树脂在受到冲击时,树脂中的纳米粒子会被“拉拔”出树脂,在断面表面形成空穴或残留粒子颗粒,这对低温下环氧树脂的增韧增强具有极好的效果,这也解释了纳米增韧剂对环氧树脂低温韧性和强度的影响。

2.4 环氧树脂/玻璃布复合材料的性能

为验证所设计高韧性环氧灌注树脂在复合材料中的应用,选用1#-1,1#-2,1#-3和1#-4四种环氧树脂制备复合材料。补强材料选用通用型玻璃布,复合材料选用真空灌注工艺缓慢注入预铺好的玻璃布中,注入要求的树脂质量后,保持真空度低于 -0.1 MPa 固化,基本流程如图3所示。所制备环氧树脂/玻璃布复合板厚度为 $(2\pm 0.1)\text{ mm}$,树脂质量分数为39%~42%。完成对环氧复合板的加工和尺寸

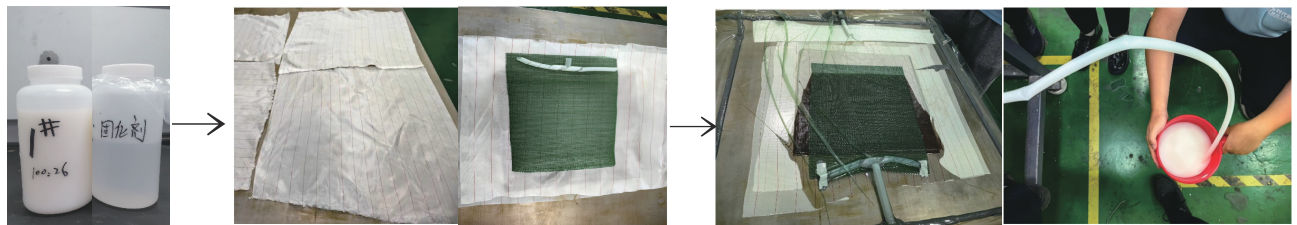


图3 环氧树脂/玻璃布复合板制备的基本流程

Fig. 3 Basic process of preparing epoxy resin/glass cloth composite plate

3 结论

对3种纳米核壳增韧剂进行了初步的选择和对比,得出如下结论。

(1) 3种环氧树脂都具备较高的玻璃化转变温度,且在低温下仍具备很好的强度和韧性;随温度升高,3种树脂拉伸和弯曲性能都呈下降趋势,而冲击韧性上升明显,1#环氧树脂低温下的性能最佳。

量裁后,测试复合板在不同温度下的基本性能,见表4。由表4可知,相比于常温及高温性能,纳米粒子的添加对复合板低温下的性能有明显提升,特别是低温下拉伸性能以及断纹剪切强度明显提高。这可能是由于纳米粒子通过真空灌注进入玻璃布并随着树脂固化后在复合材料中起到很好的增韧的作用,使其低温下的性能明显上升。此外, MX125纳米粒子表面的PMMA外壳可能与玻璃布表面羟基等基团发生协同作用,进一步“加固”树脂、纳米粒子以及玻璃布的相互作用,形成了较好的协同作用,从而进一步提高了复合板的综合性能。

表4 环氧树脂/玻璃布复合板的基本性能

Tab. 4 Basic properties of epoxy resin/glass cloth composite plate

	Items	1 [#] -1	1 [#] -2	1 [#] -3	1 [#] -4
-50 °C	Tensile strength/MPa	653	693	742	676
	Tensile modulus/GPa	24.2	22.1	23.2	21.2
	Elongation at break/%	3.1	4.7	4.3	4.2
	Flexural strength/MPa	853	834	841	832
	Flexural modulus/GPa	24.6	23.0	23.2	21.0
	Punch-type shear strength/MPa	342	398	457	443
23 °C	Tensile strength/MPa	612	687	709	668
	Tensile modulus/GPa	23.1	22.6	22.3	22.3
	Elongation at break/%	2.8	4.1	4.3	4.6
	Flexural strength/MPa	813	841	834	823
	Flexural modulus/GPa	23.3	21.9	22.9	21.8
	Punch-type shear strength/MPa	397	432	467	438
70 °C	Tensile strength/MPa	531	548	563	531
	Tensile modulus/GPa	22.2	21.6	22.2	20.9
	Elongation at break/%	3.7	4.3	4.2	4.7
	Flexural strength/MPa	762	782	799	773
	Flexural modulus/GPa	22.8	21.2	22.3	21.2
	Punch-type shear strength/MPa	346	398	432	397

(2) 对不同纳米粒子含量的树脂断面的微观结构进行观察和分析,发现纳米粒子的添加对环氧树脂的影响明显:未添加纳米粒子的环氧树脂断面平滑;添加纳米增韧剂后,纳米粒子会在环氧树脂断面形成空穴或残留,对低温增韧增强效果明显。

(3) 对环氧树脂/玻璃布复合板测试后发现,纳米粒子的添加对复合板低温下的性能提升明显,特别

是低温拉伸性能以及断纹剪切强度。

(4)所制备的环氧树脂和环氧树脂/玻璃布复合板的低温特性突出,可满足在不同温度条件下对复合材料的应用要求,可应用于新能源、航空航天和国防军事等特殊领域,具备较好的应用前景。

参考文献

- [1] 王晶金,王霞,陈然,等.环酞亚胺化三聚氰胺的制备及其阻燃环氧树脂应用[J].工程塑料应用,2024,52(8):7-12,71.
WANG Jingjin, WANG Xia, CHEN Ran, et al. Preparation of cycloimidized melamine and application of flame-retardant epoxy resin[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(8):7-12, 71.
- [2] 姜思雨,姜春华,周永丽.环氧树脂基生物质复合材料的制备与性能[J].塑料,2024,53(4):45-49,83.
JIANG Siyu, LOU Chunhua, ZHOU Yongli. Preparation and properties of epoxy resin based biomass composite[J]. Plastics, 2024, 53(4):45-49, 83.
- [3] 孙兴祥,叶国芳,童方强,等.液体橡胶增韧改性中温固化环氧树脂研究及其碳纤维复合材料制备技术[J].高科技纤维与应用,2023,48(4):51-59.
SUN Xingxiang, YE Guofang, TONG Fangqiang, et al. Study on medium temperature curing epoxy resin toughened by liquid rubber and the preparation of carbon fiber composite materials[J]. Hi-tech Fiber & Application, 2023, 48(4):51-59.
- [4] 谭延方,赵海鹏,赵亚奇,等.端环氧基聚氨酯增韧改性环氧树脂的制备及性能研究[J].中国胶粘剂,2023,32(8):18-23.
TAN Yanfang, ZHAO Haipeng, ZHAO Yaqi, et al. Preparation and properties of epoxy resin toughened by epoxy-terminated polyurethane[J]. China Adhesives, 2023, 32(8):18-23.
- [5] 王顺,王康宁,陈琦,等.高度可溶性聚酞亚胺增韧聚型环氧树脂[J].工程塑料应用,2021,49(6):8-15.
WANG Shun, WANG Kangning, CHEN Qi, et al. Naphthalene type epoxy resin reinforced with highly soluble polyimide[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(6):8-15.
- [6] 张博文,聚酞亚胺粉末对环氧树脂的改性研究[D].北京:北京化工大学,2021.
ZHANG Bowen. Study on modification of resin by polyimide powder[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2021.
- [7] 史鹏伟,郭品强,汤俊杰,高环氧基功能聚合物对PBAT/PLA复合材料性能的影响[J].工程塑料应用,2022,50(7):140-146,153.
SHI Pengwei, GUO Pinqiang, TANG Junjie. Effect of high epoxy functional polymers on the properties of PBAT/PLA composites[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(7):140-146, 153.
- [8] 李璐瑶,高建峰,徐鼎,等.多元环氧扩链剂改性PLA/PBAT薄膜的制备与性能表征[J].工程塑料应用,2023,51(8):8-14.
LI Luyao, GAO Jianfeng, XU Nai, et al. Preparation and properties of PLA/PBAT films modified with multiple epoxy extenders[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(8):8-14.
- [9] 路思源,陈振斌,刘阳冬,等.生物基环氧端基超支化结构聚合物增韧环氧树脂的研究进展[J].塑料科技,2023,51(11):116-120.
LU Siyuan, CHEN Zhenbin, LIU Yangdong, et al. Research progress in toughening epoxy resins with bio-based epoxy terminal hyperbranched structural polymers[J]. Plastics Science and Technology, 2023, 51(11):116-120.
- [10] 吴伟锋,邱藤,姜磊,等.超支化聚合物增韧环氧树脂及阻尼减振性能研究[J].化工新型材料,2023,51(2):114-119.
WU Weifeng, QIU Teng, JIANG Lei, et al. Study on hyperbranched polymer toughened epoxy resin and the damping performance[J]. New Chemical Materials, 2023, 51(2):114-119.
- [11] 李晓,梅凤策,吴妹,等.(4-氟苄基)二苯基氧化膦阻燃改性环氧树脂的研究[J].现代化工,2024,44(5):212-218.
LI Xiao, MEI Fengce, WU Mei, et al. Study on flame retardant modification of epoxy resin by (4-fluorobenzyl) diphenylphosphine oxide[J]. Modern Chemical Industry, 2024, 44(5):212-218.
- [12] 朱刚建,李文晓.核壳颗粒增韧改性环氧树脂基体研究评述[J].材料导报,2024,38(10):269-277.
ZHU Jiangang, LI Wenxiao. Review on the toughening modification of epoxy resin matrix by core-shell particles[J]. Materials Reports, 2024, 38(10):269-277.
- [13] 邱华,齐署华,王劲,等.核壳聚合物增韧环氧树脂的研究及进展[J].中国胶粘剂,2006,15(6):37-41.
QIU Hua, QI Shuhua, WANG Jin, et al. Research and progress of core-shell polymer toughening epoxy resin[J]. China Adhesives, 2006, 15(6):37-41.
- [14] 王鑫,王德志,刘立柱,等.纳米核壳橡胶的合成及其对EP的增韧改性[J].工程塑料应用,2016,44(8):106-110.
WANG Xin, WANG Dezhi, LIU Lizhu, et al. Synthesis of nano core-shell rubber and its toughening modification on epoxy resin[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(8):106-110.
- [15] 宁娜.纳米核壳粒子的设计制备及其对环氧树脂与碳纤维复合材料增韧机理和性能的研究[D].上海:东华大学,2022.
NING Na. Core/shell nanoparticles-their synthesis and use for epoxy resin and carbon fiber composite toughening[D]. Shanghai: Donghua University, 2022.