

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.06.007

聚酰亚胺改性耐高温透波邻苯二甲腈复合材料制备

王蒙娜, 王志强, 苏韬, 付强

(中国航空工业集团公司济南特种结构研究所高性能电磁窗航空科技重点实验室, 济南 250023)

摘要: 针对耐高温透波邻苯二甲腈树脂韧性低、抗冲击性能差的缺点, 通过热固性邻苯二甲腈与热塑性聚酰亚胺共混形成预聚物, 经高温固化及后热处理制备了聚酰亚胺/邻苯二甲腈共混固化物及石英纤维增强复合材料, 并研究了其工艺性能、热性能、介电性能及力学性能。结果表明, 该热塑性聚酰亚胺与热固性邻苯二甲腈树脂相容, 增韧组分的引入改善了原材料的工艺性能, 共混后在不降低原树脂及复合材料优异介电性能的同时实现了复合材料的增韧增强, 质量失重 5% 时热降解温度 T_{d5} 由 503℃ 提高到 550℃, 复合材料玻璃化转变温度由 461℃ 提高到 491℃, 室温弯曲强度提高了约 16.27%, 层间剪切强度提高了约 18%。冲击后压缩强度由 160 MPa 提高到 194 MPa。

关键词: 邻苯二甲腈; 聚酰亚胺; 透波; 共混改性

中图分类号: TQ323.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)06-0040-06

Preparation of High-Temperature Resistant Wave-Transmitting Phthalonitrile Based Composites Modified by Polyimide

Wang Mengna, Wang Zhiqiang, Su Tao, Fu Qiang

(The Aeronautical Science Key Lab for High Performance Electromagnetic Windows, Research Institute For Special Structures of Aeronautical Composites, Aviation Industry Corporation of China (AVIC), Jinan 250023, China)

Abstract: The poor destructive resistance, low toughness and poor impact resistance of thermosetting phthalonitrile resin has limited the development and further application of it. Focusing on these shortages, prepolymer was blended by thermosetting phthalonitrile resin and thermoplastic polyimide, and glass fiber reinforced polyimide/phthalonitrile blend composites were prepared by high temperature curing and post heat treatment. Technological properties, thermal properties and mechanical properties had been studied. The results show that the thermosetting phthalonitrile resin is compatible with the thermoplastic polyimide. The phthalonitrile resin is modified by blending with the thermoplastic polyimide. The toughening and strengthening of the composites are realized without reducing the excellent dielectric properties and processing properties. After the blending toughening modification, the thermal decomposition temperature of the composite (T_{d5}) is increased from 503℃ to 550℃, and the glass transition temperature of the composite is increased from 461℃ to 491℃. The bending strength and interlaminar shear strength at room temperature are improved by around 16.27% and 18% respectively. In addition, the compression strength after impact (CAI) of composites is increased from 160 MPa to 194 MPa after the blending modification.

Keywords: phthalonitrile; polyimide; wave-transmitting; blending modification

高性能航空电磁窗材料是现代航空通信和飞机反雷达探测的关键材料。除了良好介电性能(介电常数小于 4, 损耗角正切小于 0.01), 航空用透波材料还需要具有优异的热稳定性、力学强度和加工性能, 以抵抗高速飞行中产生的气动热^[1-5]。基体树

脂在复合材料中起着粘结并传递载荷应力的作用, 其耐热性、拉伸性能、耐化学腐蚀性能等是决定复合材料性能的关键因素^[6]。氰基树脂(又称聚邻苯二甲腈树脂)是一类高性能的热固性树脂, 它主要是由邻苯二甲腈(PH)化合物在高温下通过氰基的加

基金项目: 中国航空工业集团公司济南特种结构研究所 2019 年度自研课题基金项目

通讯作者: 王蒙娜, 助理工程师, 硕士, 主要从事耐高温透波树脂基复合材料研究 E-mail: 1534217266@qq.com

收稿日期: 2020-04-03

引用格式: 王蒙娜, 王志强, 苏韬, 等. 聚酰亚胺改性耐高温透波邻苯二甲腈树脂基复合材料制备[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(6):40-45.

Wang Mengna, Wang Zhiqiang, Su Tao, et al. Preparation of high-temperature resistant wave-transmitting phthalonitrile based composites modified by polyimide[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(6):40-45.

成聚合而成。由于其优异的热氧稳定性、化学稳定性、低燃性、低吸水性、优异的介电性能以及良好的加工性,使氰基树脂在航空航天领域具有广泛的应用前景^[7-12]。虽然其高温力学性能已大大优于绝大部分热固性树脂,但仍存在质脆、内应力大、耐冲击性较差等缺点,使其在某些高技术领域的使用受到限制。目前,热固性树脂最常用的改性方法是通过在树脂体系中加入增韧剂来提高固化物的韧性,其中,利用共混技术将韧性差、易加工的热固性树脂与韧性好但难加工的热塑性树脂共混获得互穿(IPN)或半互穿网络(sIPN)的方法是热固性复合材料有效的有效改性方法之一,能够有效提高热固性复合材料的耐微裂纹性能和韧性^[13-15]。选择与热固性树脂结构及耐热等级匹配的热塑性聚合物是获得sIPN并实现共混改性的关键,但由于增韧组分的引入,往往会降低原树脂的工艺性能,这是目前共混改性方法存在的主要问题。

笔者通过引入热塑性聚酰亚胺(TPI)对氰基树脂进行共混改性,在不降低氰基树脂的耐高温性能及介电性能的同时,实现了复合材料的增韧增强,并改善了氰基树脂的工艺性能,拓宽了氰基树脂的应用领域。

1 实验部分

1.1 主要原材料

石英纤维布: QW200B, 湖北荆州菲利华石英玻璃股份有限公司;

氰基树脂: 纯度 99%, 中科院化学所;

TPI: 纯度 99%, 四川自贡中天胜新材料有限公司;

N-甲基吡咯烷酮(NMP)、N,N'-二甲基乙酰胺(DMAc)、N,N'-二甲基甲酰胺(DMF)、四氢呋喃(THF)、丙酮(AC)、二氯甲烷(CH_2Cl_2)、乙酸乙酯(EA): 分析纯, 莱阳经济技术开发区精细化工厂。

1.2 主要设备及仪器

动态热机械分析测试仪(DMA): Q800 型, 美国 TA 公司;

热重(TG)分析仪: Q50 型, 美国 TA 公司;

万能试验机: Instron5942 型, 山东鸿得实业有限公司;

落锤式复合材料冲击试验机: FLLC1401 型, 馥勒仪器科技(上海)有限公司;

高级旋转流变仪: ARG2 型, 美国 TA 公司;

扫描电子显微镜(SEM): JSM25900LV 型, 日本 JEOL 公司。

1.3 样品制备

(1) TPI/氰基树脂共混体系固化物的制备。

将 TPI 溶液分别按照质量分数 0%, 15%, 25% 混入热固性氰基树脂溶液中, 充分搅拌至均一透明溶液, 放入真空烘箱中 100℃ 抽真空 24 h 除去溶剂, 之后在烘箱中进行固化及后热处理, 升温程序: 170℃ / 1 h + 200℃ / 1 h + 250℃ / 4 h + 300℃ / 1 h + 320℃ / 1 h + 350℃ / 2 h + 380℃ / 4 h。缓慢冷却至室温得到固化物粉末样品, 不同 TPI 含量的树脂共混体系, TPI 含量为 0, 15%, 25% 时, 树脂共混体系分别命名为 PI-1-1, PI-2-1, PI-3-1。

(2) 石英纤维增强 TPI/氰基树脂基复合材料的制备。

分别以三种不同 TPI 含量的树脂共混体系为基体, 表面处理后的石英纤维为增强体, 采用湿法制备预浸料, 根据不同树脂体系的流变特性, 对铺贴工艺、固化制度及加压时机进行优选, 调整设备参数, 采用热压罐成型工艺制备复合材料。控制复合材料树脂基体含量为 $38\% \pm 2\%$, 固化后复合材料气孔率 $\leq 2\%$ 。预浸料及复合材料样品如图 1 所示。

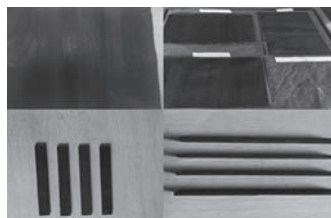


图 1 预浸料及复合材料样品

1.4 性能测试

DMA 测试: 氮气氛围, 采用三点弯曲模式, 玻璃化转变温度(T_g)以损耗角正切峰值($\tan\delta$)对应的温度表示; TG 分析: 氮气氛围, 50 ~ 600℃ 范围内进行测试, 升温速率为 10℃ / min。

力学性能测试: 按照 ASTM D790-2010、ASTM D2344-2016 标准进行弯曲强度、模量及层间剪切强度测试; 复合材料冲击后压缩强度(CAI)测试: 采用落锤式复合材料冲击试验机按照 ASTM D7136-2015 标准进行测试。

介电性能测试采用波导法在 10 GHz 频率下进行测试。

动态流变测试采用高级旋转流变仪进行测试。

复合材料表面形貌采用 SEM 进行观察。

2 结果与分析

2.1 TPI 对氰基树脂工艺性的影响

(1) TPI 对氰基树脂溶解性的影响。

称量 10 mg 固化前树脂共混体系粉末,并分别溶于 1 mL 的 NMP, DMAc, DMF, THF, AC, CH₂Cl₂, EA 中;密封后充分震荡摇匀,室温下(约 20 ℃)静置 24 h 后观测。表 1 是三种树脂体系(PI-1-1, PI-2-1, PI-3-1)在不同溶剂中的溶解性测试结果。

表 1 不同 TPI 含量树脂共混体系的溶解性

样品	溶剂						
	NMP	DMAc	DMF	THF	AC	CH ₂ Cl ₂	EA
PI-1-1	++	++	++	++	++	++	++
PI-2-1	++	++	++	+	+-	+	-
PI-3-1	++	++	++	++	-	-	-

注:++:完全溶解;+:仅有极少量未溶解;+-:有较多未溶解;-:大量未溶解;--:完全不溶解。

从表 1 可以看出,由于 TPI 难溶难熔的特性,TPI 的引入一定程度上降低了氰基树脂在低沸点溶剂(如丙酮)中的溶解度,但在高沸点溶剂(如 THF, DMAc)中仍具有良好的溶解性,为传统湿法制备预浸料及复合材料提供了可能。

(2) TPI 对氰基树脂流变特性影响。

图 2 为三组不同 TPI 含量的树脂混合物体系的熔融黏度随温度的变化曲线。

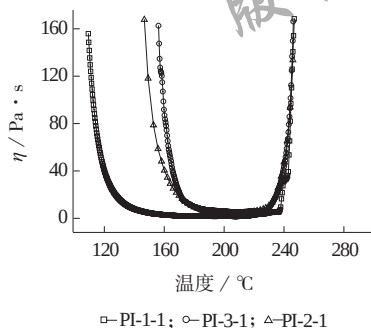


图 2 PI-1-1, PI-2-1, PI-3-1 的黏-温曲线

由图 2 可以看出,随着温度的升高,三条曲线均呈现黏度先下降,随后保持一个平台区,然后上升的趋势,这是由于该氰基树脂在一个较低的温度即可发生熔融,并能在一定的温度区间保持熔融状态,到达固化温度后黏度迅速上升。随着 TPI 的含量的增加,混合物的熔融温度明显变大,最低黏度增高,加工窗口变窄,但 PI-2-1 及 PI-3-1 的最低黏度仍低于 10 Pa·s,加工窗口仍较宽,仍适用于热压罐成型工艺。

2.2 TPI/ 氰基共混物及其复合材料的介电性能

为评价改性后树脂及复合材料的透波性能,笔者通过波导法测量了共混后树脂体系及复合材料在 10 GHz 下的介电常数和损耗角正切,试验结果见表 2。

表 2 不同 TPI 含量树脂共混体系及复合材料的介电性能

样品		介电常数	损耗角正切
PI-1-1	树脂基体	3.20	0.008
	复合材料	3.40	0.010
PI-2-1	树脂基体	3.15	0.007
	复合材料	3.30	0.008
PI-3-1	树脂基体	3.10	0.007
	复合材料	3.25	0.008

由表 2 可知,共混改性后的树脂和复合材料均表现出优异的介电性能,其介电常数和介电损耗均低于纯氰基树脂和复合材料,说明 TPI 的加入保留或提高了原有氰基树脂的介电性能。这可能是由于低极性和低介电常数的 TPI 的引入降低了共混体系的极性,及介电常数、介电损耗,同时,共混结构形成的良好的半互穿结构限制了极性结构在分子链中的取向运动,也会造成共混体系介电性能的提高。

2.3 TPI 对氰基树脂热稳定性的影响

将 PI-1-1、PI-2-1、PI-3-1 三种不同树脂体系固化后在 N₂ 氛围中、50~600 ℃ 范围内进行 TG 测试,升温速率为 10 ℃/min,结果如图 3 所示,对热失重曲线进行分析,分析结果列于表 3。表 3 为不同树脂体系固化物 N₂ 气氛下热失重数据。T_{d5} 和 T_{d10} 分别为质量失重 5% 和 10% 时的热分解温度。

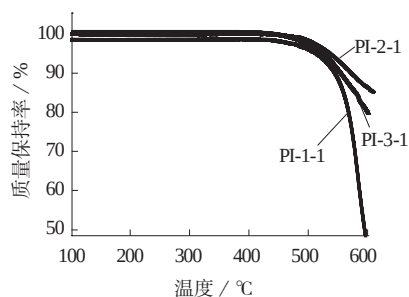


图 3 N₂ 气氛下不同树脂体系固化物热失重

表 3 不同树脂体系固化物 N₂ 气氛下热失重

试样编号	T _{d5} / ℃	T _{d10} / ℃
PI-1-1	503	541
PI-2-1	550	578
PI-3-1	520	552

由图 3 及表 3 可知, N₂ 氛围中三种树脂固化物均具有良好热稳定性,其中, PI-2-1 热稳定性最好,这说明适量 TPI 的引入提高了树脂固化物的热稳定

性,但同时也降低了树脂的交联密度,树脂的热稳定性是各方面因素综合作用的结果,所以 PI-3-1 的热稳定性比 PI-1-1 好,比 PI-2-1 略差。

2.4 TPI 对氰基树脂基复合材料 T_g 的影响

图 4 为以不同树脂共混物体系制备的石英纤维增强复合材料样条的 DMA 谱图,分析结果见表 4。 E' 为损耗弹性模量; $\tan\delta$ 为损耗角正切。

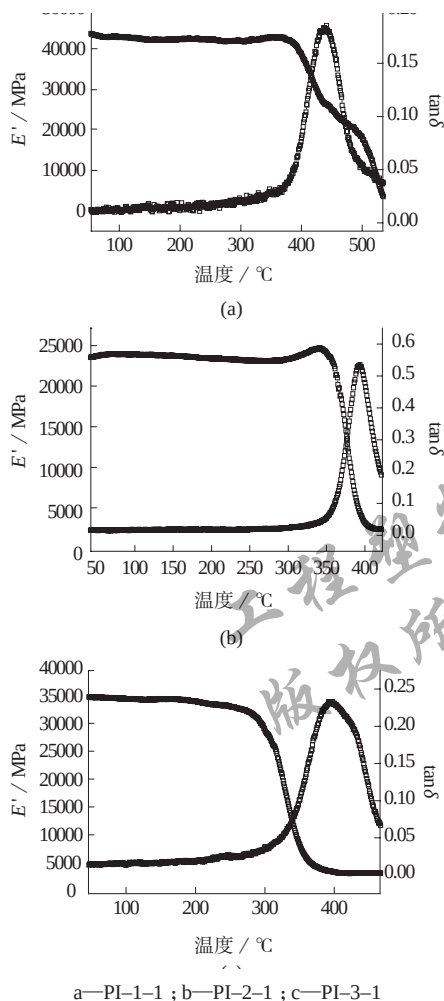


图 4 不同树脂共混物基复合材料 DMA 谱图

表 4 不同树脂共混物基复合材料的 T_g

项目	PI-1-1	PI-2-1	PI-3-1
$T_g / ^\circ\text{C}$	461	491	472

从图 4 及表 4 中数据可以看出,纯氰基树脂基复合材料 T_g 高达 437 $^\circ\text{C}$ 。当添入 TPI 后,共混体系 T_g 较纯氰基树脂有所增加,其中 TPI 含量为 15% 时,体系的 T_g 最高,约为 491 $^\circ\text{C}$,而且 $\tan\delta$ 峰较纯氰基树脂变宽,这是由于 TPI/ 氰基树脂可能形成了互穿网络结构,两个聚合物网络相互协同作用相互缠结,阻碍了链段运动,从而使 $\tan\delta$ 峰变宽。图中 PI-2-1 及 PI-3-1 两条 $\tan\delta$ 曲线在 320 $^\circ\text{C}$ 左右有一

小的肩峰松弛特征,出现了微相分离的特征。

2.5 TPI 对氰基树脂基复合材料力学性能的影响

表 5 为不同混合树脂体系基复合材料部分力学性能测试结果。

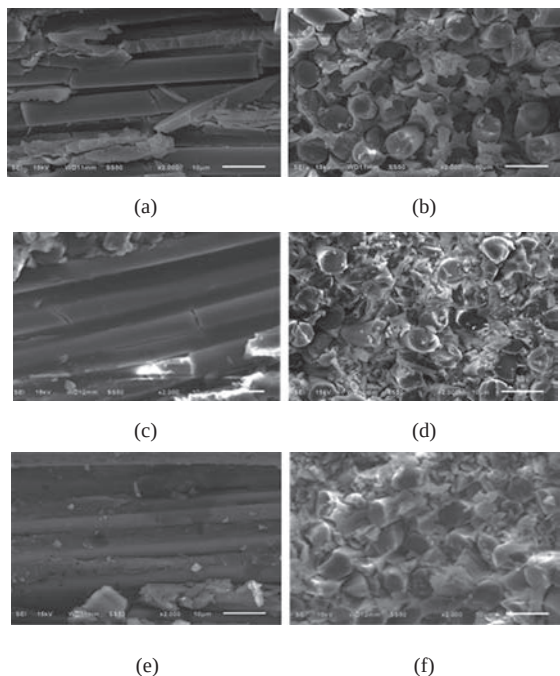
表 5 不同树脂共混物基复合材料力学性能

项目	测试条件	PI-1-1	PI-2-1	PI-3-1
弯曲强度 / MPa	室温	436.26	507.25	440.4
	430 / $^\circ\text{C}$	312.03	359.19	327.20
弯曲弹性模量 / GPa	室温	22.62	24.65	23.16
	430 / $^\circ\text{C}$	20.64	21.04	20.99
层间剪切强度 / MPa	室温	29.90	35.28	30.13
	430 / $^\circ\text{C}$	25.44	28.41	26.50
CAI / MPa	室温	160	194	185

从表 5 可以看出,经添加 TPI 改性后的氰基韧性与强度均有不同程度的提高,并且弯曲强度和弯曲弹性模量呈现先增大后减小现象,其中当 TPI 含量达到 15% 的时候,固化物的室温弯曲强度达到 507.25 MPa,较纯氰基树脂基复合材料提高了 16.27%,430 $^\circ\text{C}$ 弯曲强度达到 359.19 MPa,较纯氰基树脂基复合材料提高了 15.11%,共混改性后复合材料的 CAI 由 160 MPa 提高到 194 MPa,这可能是由于两相分子链段互穿程度较高,或形成了相分离结构,氰基树脂网络提供刚性框架,而 TPI 柔性链段缓冲外界冲击力,从而大大提高了材料的力学性能,而且 TPI 的加入对氰基树脂的弹性模量几乎未造成损失,反而适当 TPI 添加量还可以略微增加复合材料的弯曲弹性模量。

2.6 TPI 对氰基树脂基复合材料改性机理研究

石英纤维增强复合材料的力学性能增强机理非常复杂,与树脂基体、石英纤维增强体和树脂纤维的界面等方面均有关系。图 5 为石英纤维增强 TPI / 氰基树脂复合材料的表面及横截面的微观形貌。图 5a 和图 5d 显示了氰基树脂基复合材料的表面及横截面形态。由图中可见,氰基树脂基复合材料纤维上的树脂覆盖率较低,且存在大量的缝隙。断裂后的树脂碎片较多,说明氰基树脂与纤维的浸润性较差,界面结合强度较弱。如图 5b 和图 5c 所示,添加 TPI 后,PI-2-1 及 PI-3-1 复合材料表面的树脂覆盖率有所提高,整个复合材料结构较为紧凑。如图 5e 和图 5f 所示,添加 TPI 后,PI-2-1 及 PI-3-1 复合材料横截面没有明显树脂空洞或缺陷,树脂与复合材料结合十分紧密。这些界面结构可有效传递应力,防止裂纹产生和扩展,从而提高复合材料力学性能和韧性。



表面形貌: a—PI-1-1; b—PI-2-1; c—PI-3-1

横截面形貌: d—PI-1-1; e—PI-2-1; f—PI-3-1

图5 石英纤维增强TPI/氰基树脂复合材料的表面及横截面微观形貌

将PI-2-1复合材料样品用NMP刻蚀24 h后,材料横截面形貌如图6所示。由图6可见,塑性相在纤维周边形成了连续相,符合“相反转”的结构特征,这种层内“咬合结构”在一定程度上导致了裂纹扩展阻力的成倍增加,提高了复合材料的层间韧性。

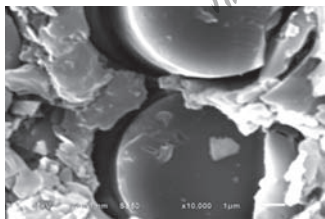


图6 NMP刻蚀后PI-2-1复合材料横截面形貌

3 结论

通过热固性氰基树脂与TPI共混形成预聚物,经高温固化及后热处理制备了TPI/氰基树脂共混体系固化物及石英纤维增强复合材料,并研究了其工艺性能、热性能及力学性能。结果表明:

(1) 该TPI与热固性氰基树脂相容。

(2) TPI的加入保留了原树脂体系及复合材料的优异的介电性能。

(3) 共混后树脂的热稳定性有所提高,热降解温度 T_{d5} 由503℃提高到550℃,复合材料的 T_g 由461℃提高到491℃。

(4) 共混后复合材料的强度及韧性均有所提高,其中,复合材料的室温弯曲强度提高了约16.27%,室温层间剪切强度提高了18%,冲击后压缩强度CAI提高了约21%。

(5) 热固性氰基树脂与热塑性TPI树脂共混后形成了较为典型的相反转结构。

(6) TPI共混改性工艺对氰基树脂及其复合材料起到了有效的增强、增韧改性作用。

参考文献

- [1] 林芳兵,蒋金华,陈南梁,等. 天线罩用透波材料的研究进展[J]. 纺织导报,2017(8):70-74.
Lin Fangbing, Jiang Jinhua, Chen Nanliang, et al. Current research progress in wave transmitting materials for radome [J]. China Textile Leader, 2017(8):70-74.
- [2] 余娟丽,陈磊,吕毅,等. 天线罩用宽频透波材料的发展现状[J]. 宇航材料工艺,2013,43(2):1-7.
Yu Juanli, Chen Lei, Lyu Yi, et al. Progress of broadband wave-transparent materials for radome[J]. Aerospace Materials & Technology, 2013,43(2):1-7.
- [3] 宋长文,颜红侠,李朋博,等. 树脂基透波复合材料研究进展[J]. 塑料工业,2007(10):1-4.
Song Changwen, Yan Hongxia, Li Pengbo, et al. Progress in research of electro-magnetic wave penetrating polymer-matrix composite[J]. China Plastics Industry, 2007(10):1-4.
- [4] 张雄,王义,程海峰,等. 石英纤维透波复合材料的研究进展[J]. 材料导报,2012,26(S1):96-100.
Zhang Xiong, Wang Yi, Cheng Haifeng, et al. Research and development of wave-transparent composites reinforced by silica fibers[J]. Materials Reports, 2012,26(S1):96-100.
- [5] 李欢,刘钧,肖加余,等. 雷达天线罩技术及其电性能研究综述[J]. 材料导报,2012,26(15):48-52.
Li Huan, Liu Jun, Xiao Jiayu, et al. An overview on the technology and electromagnetic performance of radome[J]. Materials Reports, 2012,26(15):48-52.
- [6] Yun N G, Won Y G, In S C, et al. Tough-ending of carbon fiber / epoxy composite by inserting polysulfone film to form morphology spectrum[J]. Polymer, 2004,45:6953-6958.
- [7] Matthew L, Teddy M K, Syed B Q, et al. Direct conversion of highly aromatic phthalonitrile thermosetting resins into carbon nanotube containing solids[J]. Polymer, 2007,48:7484-7489.
- [8] Teddy M K, Dawn D D, et al. High temperature resorcinol-based phthalonitrile polymer[J]. Polymer, 2005,46:4614-4618.
- [9] Irasates, Dhum R R, Allen D J, et al. Molecular origin of unusual physical and mechanical properties in novel phenolic materials

- based on benzoxazine chemistry[J]. Appl Polymer Science, 1998, 70:1 299-1 306.
- [10] 郭祚强. 新型邻苯二甲腈树脂及其透波复合材料的研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- Wu Zuoqiang. Study on novel phthalonitrile resins and wave-transparent composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [11] 张彤, 苯并噁嗪 / 邻苯二甲腈共混树脂的制备及性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- Zhang Tong. Study on novel phthalonitrile resins and wave-transparent composites[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [12] 邹兴强. 含烯丙基邻苯二甲腈树脂合成、改性及复合材料研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- Zou Xingqiang. Synthesis, modification and research of the allyl-fuctional phthalonitrile and its composites[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [13] 李兴建, 白宝仕, 刘升, 等. 具有相分离结构的 PMMA / PEG 半互穿网络形状记忆高分子 [J]. 材料导报, 2020, 34(2):2 142-2 146.
- Li Xingjian, Bai Baoshi, Liu Sheng, et al. PMMA / PEG semi-interpenetrating network shape memory polymer with phase separation structure[J]. Materials Reports, 2020, 34(2):2 142-2 146.
- [14] 李曼曼. 基于半互穿网络体系的三聚氰胺甲醛树脂改性研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- Li Manman. Study on modification of melamine formaldehyde resin based on semi-interpenetrating network system [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.
- [15] 赵占玉. 半互穿网络聚酰亚胺的制备及性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- Zhao Zhanyu. Preparation and properties of semi-interpenetrating polyimide networks[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
-
- (上接第 39 页)
- of mixing conditions and particle sizes of titanium dioxide on mechanical and morphological properties of polypropylene / titanium dioxide composites[J]. Iranian Polymer Journal, 2009, 18(8):607-616.
- [25] 侯俊吉. 聚丙烯泡沫材料的微孔发泡制备工艺及其性能研究 [D]. 济南: 山东大学, 2019.
- Hou Junji. Preparation technology and properties of polypropylene foam by microporous foaming [D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [26] Dai Lu, Wang Xia, Zhang Jieming, et al. Effects of lubricants on the rheological and mechanical properties of wood flour / polypropylene composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136(25):47 667.
- [27] 张国栋. AC / NaHCO₃ 复合发泡剂的改性及在 PVB 发泡材料中的应用研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2013.
- Zhang Guodong. Modification of AC / NaHCO₃ compound foaming agent and its application in PVB foaming material[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2013.
- [28] 白海阔. 聚丙烯微孔材料的泡孔形貌调控及其性能的研究 [D]. 宁波: 宁波大学, 2018.
- Yan Haikuo. Study on pore morphology regulation and properties of polypropylene microporous materials [D]. Ningbo: Ningbo University, 2018.
- [29] 龚维, 何力, 罗筑, 等. 微孔发泡对聚丙烯力学性能的影响 [J]. 现代机械, 2005(6):81-82.
- Gong Wei, He Li, Luo Zhu, et al. Effect of microporous foam on the mechanical properties of polypropylene[J]. Modern Machinery, 2005(6):81-82.
- [30] 段焕德. 微发泡聚丙烯复合材料力学性能的研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2015.
- Duan Huande. Study on mechanical properties of microfoaming polypropylene composites [D]. Guiyang: Guizhou University, 2015.