

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.08.006

含苯并噁唑结构耐高温聚酰亚胺模塑料制备及性能

徐广锐^{1,2}

(1. 上海市塑料研究所有限公司, 上海 201700; 2. 上海计算化学与化工工程技术研究中心, 上海 201100)

摘要: 为提高聚酰亚胺 (PI) 模塑料的耐高温性能, 以 2-(4-氨基苯基)-5-氨基苯并噁唑 (BOA) 和二氨基二苯醚作为混合二胺与均苯四甲酸酐合成聚酰胺酸树脂, 随后通过热亚胺化法制备得到不同噁唑单元添加量的 PI 模塑粉。利用傅立叶变换红外光谱对模塑粉化学结构进行表征, 并考察其在氮气和氧气氛围中的热失重行为。通过热模压方法制备得到含苯并噁唑结构的耐高温 PI 模塑料, 对模塑料室温和 430℃ 高温条件下力学性能进行测试, 并对其高温性能稳定性和尺寸稳定性进行表征分析。结果表明, 通过两步法和热亚胺化法成功将噁唑基团引入到 PI 结构中; 随着 BOA 引入量的增加, 模塑粉耐热氧稳定性显著提升, 模塑料室温拉伸性能有所下降, 压缩性能提升, 但 430℃ 高温下拉伸性能和压缩性能均优于不含 BOA 的模塑料, 且力学性能保持率显著提高; BOA 的引入还提高了 PI 材料高温性能稳定性, 显著降低线性热膨胀系数, 含苯并噁唑结构的 PI 模塑料展现出优越的耐高温性。

关键词: 苯并噁唑; 聚酰亚胺模塑料; 耐高温; 力学性能; 热性能

中图分类号: TQ324 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)08-0036-05

Preparation and Properties of High Temperature Resistant Polyimide Molding Plastics with Benzoxazole Group

Xu Guangrui^{1,2}

(1. Shanghai Plastics Research Institute Co., Ltd., Shanghai 201700, China;

2. Shanghai Computational Chemistry and Chemical Engineering Technology Research Center, Shanghai 201100, China)

Abstract : To improve the high temperature resistance of polyimide (PI) molding plastics, polyamide acids were synthesized from 2-(4-aminophenyl)-5-aminobenzoxazole (BOA), diaminodiphenyl ether and pyromellitic dianhydride, then PI powders containing different amount of benzoxazole units were prepared by thermal imidization subsequently. The chemical structures of PI powders were characterized by Fourier transform infrared spectroscopy and the thermogravimetric behaviors in nitrogen and air were studied using thermogravimetric analysis. The high temperature resistant PI molding plastics with benzoxazole structure were prepared by hot molding pressing process. The mechanical properties of PI molding plastics were tested at room temperature and 430 °C, and the thermal properties were studied. Results showed that, benzoxazole units were successfully introduced into PI structure, and the thermal stability of the PI powders increased significantly with the introduction of BOA monomer in the main chain. With the increase of benzoxazole units, the tensile properties of molding plastics decreased and the compression properties improved at room temperature. However, the mechanical properties of PI containing BOA at 430℃ were superior to those of PI without BOA, exhibiting better high-temperature mechanical property retention. At the same time, the introduction of BOA improved the thermal stability of PI molding compound, significantly reduced the linear thermal expansion coefficient. PI molding compound with benzoxazole groups showed superior high temperature resistance.

Keywords : benzoxazole ; polyimide molding plastics ; high temperature resistance ; mechanical property ; thermal property

聚酰亚胺 (PI) 是一类主链结构中含有酰亚胺环的高分子材料, 具有优异的力学性能和耐高低温稳定性, 同时具有良好的尺寸稳定性和电学性能, 广泛应用于汽车、化工、航空航天和电子电气等诸多领

域^[1-3]。近些年来, 航空航天和电子封装等新技术领域的飞速发展要求其使用的材料具有高耐热性, 并且能够在高温工况条件下长期使用, 这就对 PI 材料的耐高温性能提出更高的要求^[4-5]。一系列研究工

通讯作者: 徐广锐, 工程师, 博士, 主要研究方向为特种工程塑料 E-mail: rayxuguangrui@126.com

收稿日期: 2020-05-12

引用格式: 徐广锐. 含苯并噁唑结构耐高温聚酰亚胺模塑料制备及性能 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(8):36-40, 45.

Xu Guangrui. Preparation and properties of high temperature resistant polyimide molding plastics with benzoxazole group[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(8):36-40, 45.

作表明,通过分子结构设计、在分子主链中引入耐热性能更好的特殊结构单元可以有效提高 PI 材料的耐高温性能^[6-7]。Meng Xiangli 等^[8]以 2,6-二(对氨基苯)苯并[1,2-d;5,4-d']二噁唑为二胺单体与均苯四甲酸酐通过两步法制备 PI 薄膜,该薄膜玻璃化转变温度为 343℃,在空气氛围中的 5% 和 10% 热失重温度分别为 551℃ 和 575℃,展现出良好的热氧稳定性。韩松锋等^[9]将苯并噁唑结构单元的 2-(4-氨基苯基)-5-氨基苯并噁唑(DAPBO)引入到 PI 分子结构中得到 PI 薄膜,DAPBO 含量的增加促进 PI 薄膜的力学性能和热学性能提高,同时显著降低其热膨胀系数。这些研究结果表明,将类似噁唑结构的芳杂环单元引入到 PI 分子主链结构中可以显著改善 PI 材料的耐热性能和力学性能^[10-12]。但目前关于耐高温 PI 材料的研究多集中在薄膜纤维材料领域,耐高温 PI 模塑料的研究较少^[13-14]。大多数研究工作中所采用的二胺单体为实验室自制,原料来源受限,且合成过程较为复杂,不利于开展大规模生产和使用。

笔者利用目前市场现有的含单噁唑环结构的噁唑二胺单体 2-(4-氨基苯基)-5-氨基苯并噁唑(BOA)和二氨基二苯醚(ODA)作为混合二胺与均苯四甲酸酐(PMDA)进行聚合反应,通过两步法和热亚胺化法合成 PI 模塑粉,随后通过热模压成型工艺制得耐高温 PI 模塑材料,并对其性能进行研究。

1 实验部分

1.1 原材料

PMDA:纯度 99%,如皋市乐恒化工有限公司;

ODA:纯度 99.8%,山东冠森高分子材料科技股份有限公司;

BOA:纯度 98%,常州市阳光药业有限公司;

N,N-二甲基乙酰胺(DMAc)、二甲苯:工业级,上海普明化工有限公司,实验前用分子筛干燥除水。

1.2 仪器及设备

傅立叶变换红外光谱(FTIR)仪:Nexus 型,美国 Nicolet 仪器公司;

高温万能材料试验机:Lloyd LR50K 型,英国 Lloyd 仪器公司;

热重分析(TGA)仪:TG 209F 型,德国 Netzsch 仪器公司;

动态热力学分析(DMA)仪:DMA Q800 型,美国 TA 仪器公司;

热机械分析(TMA)仪:TMA Q400,美国 TA 仪

器公司。

1.3 PI 模塑粉的合成

采用两步法和热亚胺化方法制备 PI 模塑粉。在装配有机机械搅拌、氮气保护、分水器和回流冷凝器的反应釜中加入一定量的 DMAc,通 N₂ 保护。按一定比例加入 ODA 和 BOA 二胺混合物,搅拌溶解完全后加入与混合二胺等物质的量比例的 PMDA,反应投料比例见表 1,单体质量为反应体系中总量的 10%。控制反应温度,室温下搅拌反应 3 h 得到黏稠的前驱体聚酰胺酸(PAA)。继续向该反应体系中加入一定量的二甲苯,升温至回流温度并保持 3 h,通过热亚胺化方法得到不同 BOA 含量的 PI 模塑粉。模塑粉合成制备过程如图 1 所示。

表 1 PI 模塑粉样配方

样品名称	n(PMDA)	n(ODA)	n(BOA)	%
PI-BOA-0	100	100	0	
PI-BOA-30	100	70	30	
PI-BOA-50	100	50	50	
PI-BOA-70	100	30	70	
PI-BOA-100	100	0	100	

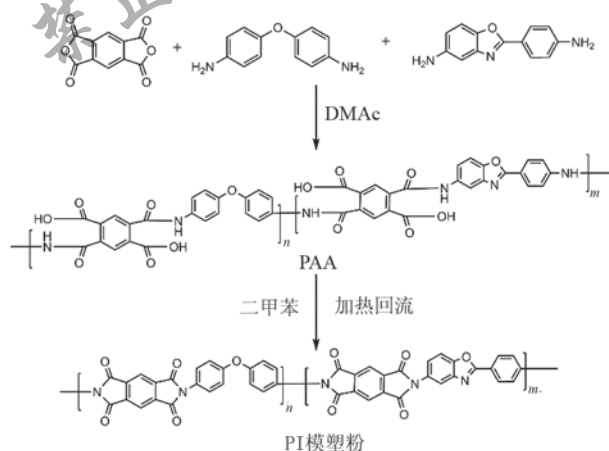


图 1 含 BOA 基团 PI 模塑粉的合成反应方程式

1.4 PI 模塑料的制备

将合成得到的 PI 模塑粉进行过滤、洗涤、干燥脱挥和热处理后加入到模具中,使用热模压成型方法制备 PI 模塑料,其中成型温度 400℃,成型压力 150 MPa。将得到的 PI 模塑料板坯进行机加工得到性能测试样。

1.5 结构表征与性能测试

FTIR 分析:将一定量 PI 模塑粉与溴化钾混合均匀后研磨压片,扫描范围为 4000~400 cm⁻¹。

力学性能测试:参照 ASTM D1708 测试 PI 模塑料室温和 430℃ 高温条件下拉伸性能,工字型样条,样条厚度为 3.2 mm;参照 GB/T 1041 测试模

塑料室温和 430℃ 高温条件下压缩性能,样品尺寸为 10 cm × 10 cm × 4 cm。测试前试样需在测试温度环境中平衡 30 min。

TGA 测试: 氮气和空气氛围, 温度范围 100 ~ 800℃, 升温速率 10℃/min。

DMA 测试: 温度范围 50 ~ 450℃, 升温速率 10℃/min, 氮气气氛, 单悬臂测试模式, 样品尺寸 50 mm × 10 mm × 2 mm。

TMA 测试: 温度范围 50 ~ 400℃, 升温速率 10℃/min, 氮气气氛, 压缩测试模式, 样品尺寸 5 mm × 5 mm × 2 mm。

2 结果与讨论

2.1 PI 模塑粉的合成及结构分析

图 2 为不同 BOA 含量合成制得的 PI 模塑粉红外光谱图。从图 2 可以看出, 三种结构的 PI 模塑粉样品在 1776, 1720, 1376, 722 cm^{-1} 附近均出现明显红外吸收峰, 分别对应酰亚胺化学结构中 C=O 不对称伸缩振动峰、对称伸缩振动峰、C—N 伸缩振动峰以及 C=O 弯曲振动峰, 这也与文献报道结果相一致^[15], 说明所有模塑粉样品基本完成亚胺化转变。此外, 不含 BOA 结构的 PI-BOA-0 模塑粉样品在 1240 cm^{-1} 处有较强的吸收峰, 对应 ODA 结构中醚键特征峰, 随着 ODA 含量减少和 BOA 占比的增加, 此处吸收峰强度逐渐减弱。同时, PI-BOA-100 和 PI-BOA-50 模塑粉样品在 1557 cm^{-1} 位置出现吸收峰, 对应噁唑结构中 C=N—不对称伸缩振动, 并且随着模塑粉样品化学结构中 BOA 占比的增加, 峰强增大; 而在不含 BOA 的 PI-BOA-0 模塑粉样品中没有在该处出现特征峰。

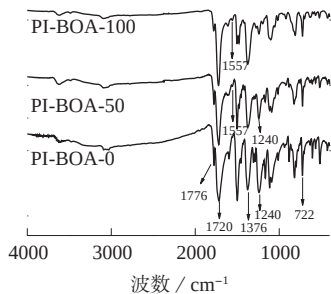
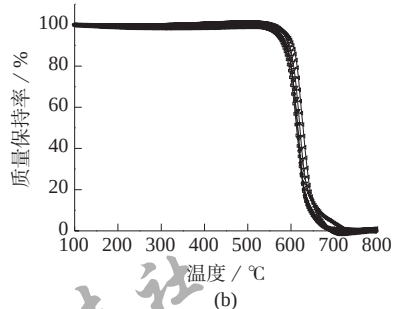
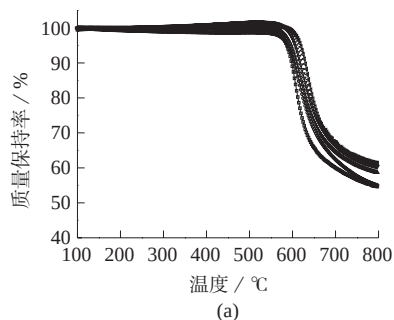


图 2 含 BOA 基团 PI 模塑粉红外光谱图

2.2 PI 模塑粉的热氧稳定性

对合成的不同 BOA 引入量的 PI 模塑粉进行热失重分析, 考察其在氮气和空气氛围中的热稳定性, 测试结果见图 3。5% 热失重温度 ($T_{5\%}$)、10% 热失重温度 ($T_{10\%}$) 及 800℃ 残余量统计数据见表 2。从



—PI-BOA-0; —PI-BOA-30; —PI-BOA-50;
—PI-BOA-70; —PI-BOA-100
a—氮气氛围; b—空气氛围

图 3 含 BOA 基团 PI 模塑粉 TGA 图谱

表 2 PI 模塑粉热失重分析统计结果

样品	氮气氛围			空气氛围 ¹⁾	
	$T_{5\%}/^{\circ}\text{C}$	$T_{10\%}/^{\circ}\text{C}$	800℃残余量/%	$T_{5\%}/^{\circ}\text{C}$	$T_{10\%}/^{\circ}\text{C}$
PI-BOA-0	585	598	54.6	567	582
PI-BOA-30	589	603	55.0	570	585
PI-BOA-50	595	608	58.7	575	588
PI-BOA-70	604	618	60.4	587	595
PI-BOA-100	618	627	61.3	590	603

注: 1) 所有模塑粉样品空气氛围 800℃ 残余量均趋近于 0。

测试结果可以看出, 所有样品在 500℃ 之前均能保持较好的热稳定性。其中, PI-BOA-0 样品, 即不含 BOA 结构的 PI 模塑粉在氮气中 5% 和 10% 热分解温度分别为 585℃ 和 598℃; 随着噁唑基团的引入和占比的增加, 含 BOA 结构 PI 模塑粉的 5% 和 10% 热分解温度逐渐升高, 同时 800℃ 残余量随之增大。当完全使用 BOA 作为单体二胺时, PI-BOA-100 模塑粉在氮气中 5% 和 10% 热分解温度分别为 618℃ 和 627℃, 较不含 BOA 的 PI-BOA-0 样品分别提高了 33℃ 和 29℃, 展现出良好的热稳定性。从图 3b 可以看出, 在空气氛围中, 所有样品的 5% 和 10% 热分解温度与氮气氛围相比有所提前, 5% 和 10% 热分解温度区间分别为 567 ~ 590℃ 和 582 ~ 603℃。随着 BOA 引入量的增加, 样品的热分解温度提高。其中 PI-BOA-100 样品 10% 热分解温度超过 600℃, 相比于不含噁唑基团的 PI-BOA-0 模塑粉提

高了约 21℃, 展现出优异的耐热氧稳定性。实验采用了含单噁唑环结构的二胺单体, 这种单体由于其独特的芳杂环结构自身旋转困难, 刚性较大, 将其引入到 PI 分子主链结构中后, 使得分子链刚性随之增大, 分子链间堆砌更加紧密, 分子间作用力增强, 耐热氧老化稳定性得到提升。

2.3 PI 模塑料的力学性能

不同 BOA 含量所制备的 PI 模塑料在室温和 430℃ 高温条件下的拉伸和压缩性能测试结果见表 3。从表 3 可以看出, 室温条件下 PI 模塑料的拉伸强度随着 BOA 占比的增大而减小, 拉伸强度由 95 MPa 逐渐降低至 72 MPa; 断裂伸长率也有相似的变化趋势, 由 4.50% 降低至 3.32%。而室温压缩强度和压缩模量变化趋势恰好与拉伸性能测试结果相反, 二者均随着 BOA 引入量的增加而增大, 由 PI-BOA-0 材料的 157 MPa 和 1.47 GPa 逐渐增大至 PI-BOA-100 材料的 193 MPa 和 1.85 GPa。这是由于在 PI 分子主链上引入的噁唑结构单元自身刚性较大, 随着 BOA 引入量的增加, PI 分子主链上噁唑结构单元增加, 分子链刚性增强, 链间相互作用力增大, 从而导致材料刚性增加、柔韧性降低, 因此模塑料在拉伸性能测试中易发生脆性断裂而导致拉伸强度降低, 断裂伸长率减小, 这也与文献报道 PI 薄膜分析结果相一致^[3]; 与此同时, 由于 BOA 引入量的增加导致材料刚性增大, 因此材料抗压能力增强, 压缩性能反而随着 BOA 含量的增加而增大。

表 3 PI 模塑料力学性能测试结果

样品	拉伸强度 / MPa		断裂伸长率 / %		压缩强度 / MPa	
	室温	430℃	室温	430℃	室温	430℃
PI-BOA-0	95	19	4.50	4.50	157	41
PI-BOA-30	81	21	3.89	3.81	174	48
PI-BOA-50	80	24	3.06	3.63	182	52
PI-BOA-70	77	24	3.66	3.64	190	57
PI-BOA-100	72	30	3.32	3.40	193	70

从 430℃ 高温性能测试结果可以看出, 和其它聚合物材料一样, PI 模塑料高温条件下力学性能也出现一定的衰减。其中不含 BOA 的 PI 模塑料性能下降最为明显, 而随着 PI 模塑料中噁唑结构单元占比的增加, 性能数据下降趋势减弱, 计算所得 430℃ 高温性能保持率结果见图 4, 其中由 PI-BOA-0, PI-BOA-30, PI-BOA-50, PI-BOA-70, PI-BOA-100 制得的试样分别编号为 1[#], 2[#], 3[#], 4[#], 5[#], 下同。从图 4 可以看出, 不含噁唑环结构的 PI 模塑料拉伸强度和压缩强度 430℃ 时保持率分别为 20.2% 和

25.9%。随着 BOA 引入量的增加, PI 模塑料性能保持率均有明显提升, 当全部使用 BOA 作为二胺单体使用时, PI-BOA-100 模塑料的高温性能保持率分别提升至 41.5% 和 36.4%。从前面的 TGA 测试结果可知, 随着 BOA 含量的增加, 材料热氧稳定性有所提高, 热失重温度升高, 使得 PI 模塑料能在高温条件下具有相对较好的力学性能保持率。力学性能测试结果进一步证明噁唑结构单元的引入有利于提高 PI 模塑料的耐高温氧化稳定性。

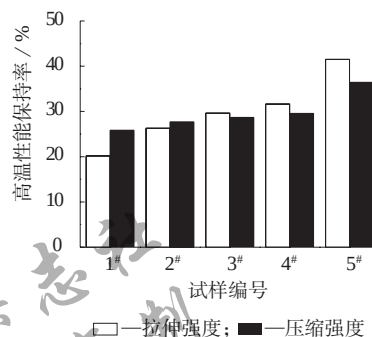
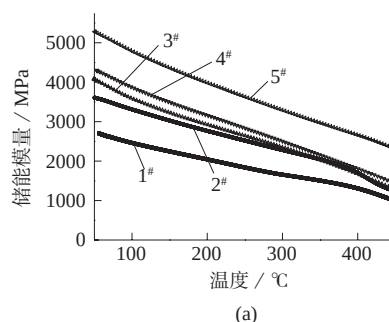


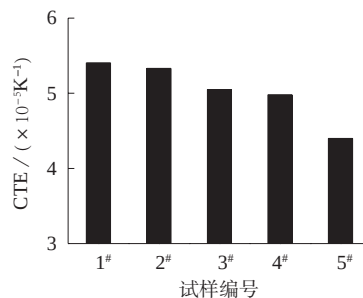
图 4 含 BOA 基团 PI 模塑料 430℃ 高温性能保持率

2.4 PI 模塑料的高温性能稳定性和尺寸稳定性

图 5 为 DMA 测试材料储能模量随温度变化的趋势以及 TMA 测试材料线性热膨胀系数 (CTE) 和温度之间的关系。从图 5a 可以看出, 在 50~450℃ 测试温度区间内, 随着 BOA 添加量增加, PI 模塑



(a)



(b)

a—储能模量; b—CTE

图 5 含 BOA 基团 PI 模塑料的储能模量和 CTE

料的刚性增大,初始储能模量逐渐升高。其中,不含 BOA 的 PI-BOA-0 样品和 BOA 占比为 30% 的 PI-BOA-30 样品在 400℃ 附近储能模量出现较为明显的下降拐点,而噁唑基团占比较高的 PI 模塑料样品储能模量下降趋势平缓,在 450℃ 前未出现明显的下降拐点。这说明噁唑二胺的引入可以有效地提高 PI 材料在高温下的稳定性。从图 5b 可以看出,不含噁唑二胺的 PI 模塑料 50~400℃ 区间 CTE 为 $5.41 \times 10^{-5} / \text{K}$ 。随着噁唑结构的引入和含量的增加,PI-BOA-30, PI-BOA-50, PI-BOA-70 和 PI-BOA-100 模塑料的 CTE 分别降低至 5.33×10^{-5} , 5.05×10^{-5} , 4.98×10^{-5} , $4.40 \times 10^{-5} / \text{K}$ 。由此可以看出,随着 BOA 结构引入量的增加,PI 模塑料的 CTE 不断减小。根据文献报道,提高聚合物分子结构的刚性可以有效降低材料的热膨胀系数^[9,16],实验中,在 PI 分子主链中引入结构更加刚性的噁唑结构单元同样可以明显降低材料的热膨胀系数,提高材料在高温条件下的尺寸稳定性。

3 结论

利用 BOA 和 ODA 作为混合二胺与 PMDA 通过两步法和热亚胺化法合成制备得到不同噁唑单元添加量的 PI 模塑料,随后通过热模压工艺过程制备得到含苯并噁唑结构的耐高温 PI 模塑料。测试结果表明噁唑基团被成功引入到 PI 分子结构中,随着 BOA 引入量的增加,PI 材料耐热氧稳定性逐步提升。含 BOA 基团的模塑料室温拉伸性能有所衰减,但压缩性能有所提高,430℃ 高温力学性能保持率显著增加。噁唑环结构的引入提高了 PI 模塑料的高温性能稳定性和尺寸稳定性,展现出优良的耐高温性能。

参考文献

- [1] 曹红葵. 聚酰亚胺性能及合成方法[J]. 化学推进剂与高分子材料,2008(3):28-30.
Cao Hongkui. Properties of polyimide and its synthesis methods[J]. Chemical Propellants & Polymer Materials,2008(3):28-30.
- [2] Gouzman I, Grossman E, Verker R, et al. Advances in polyimide-based materials for space applications[J]. Advanced Materials, 2019,31(18).doi:10.1002/adma.201807738.
- [3] Scola D A, Vontell J H. High temperature polyimides, chemistry and properties[J]. Polymer Composites, 1988,9(6):443-452.
- [4] 刘仪,莫松,潘玲英,等. 耐高温有机无机杂化聚酰亚胺树脂及其复合材料[J]. 宇航材料工艺,2018,48(3):1-5.
Liu Yi, Mo Song, Pan Lingying, et al. Organic-inorganic hybrid polyimides and their composites with high temperature resistance[J]. Aerospace Materials & Technology, 2018,48(3):1-5.
- [5] 包建文,陈祥宝. 发动机用耐高温聚酰亚胺树脂基复合材料的研究进展[J]. 航空材料学报,2012,32(6):1-13.
Bao Jianwen, Chen Xiangbao. Advance in high temperature polyimide resin matrix composites for aeroengine[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2012,32(6):1-13.
- [6] Lincoln J E, Morgan R J, Curliss D B. Effect of matrix chemical structure on the thermo-oxidative stability of addition cure poly(imide siloxane) composites[J]. Polymer Composites, 2008, 29(6):585-596.
- [7] 宋广亮. 含苯并咪唑和苯并噁唑基团的高性能聚酰亚胺薄膜[D]. 长春: 吉林大学,2014.
Song Guangliang. Preparation and properties of high performance polyimide films based on benzimidazole and benzoxazole groups [D]. Changchun:Jilin University, 2014.
- [8] Meng Xiangli, Jiang Ling, Huang Yudong. Characterization and thermal degradation of polyimide derived from 5-amino-2(p-aminophenyl)-benzoxazole monomer with pyromellitic dianhydride [J]. Advanced Materials Research, 2012, 455-456:806-814.
- [9] 韩松峰,唐必连,青双桂,等. 含苯并噁唑结构聚酰亚胺薄膜的制备与性能研究[J]. 绝缘材料,2019,52(1):1-5.
Han Songfeng, Tang Bilian, Qing Shuangui, et al. Preparation and properties of PI films with benzoxazole structure[J]. Insulating Materials, 2019, 52(1):1-5.
- [10] 孟祥丽,黄玉东,于虹. 含噁唑环均苯型聚酰亚胺的制备和表征[J]. 化学与黏合,2007,29(5):347-350.
Meng Xiangli, Huang Yudong, Yu Hong. Synthesis and characterization of polyimide containing 2,6-benzobisoxazole units[J]. Chemistry and Adhesion, 2007, 29(5):347-350.
- [11] Sun Meng, Chang Jingjing, Tian Guofeng, et al. Preparation of high-performance polyimide fibers containing benzimidazole and benzoxazole units[J]. Journal of Materials Science, 2016, 51(6):2 830-2 840.
- [12] 叶炯英,刘琛,肖庆军,等. BIA 改性聚酰亚胺材料合成与应用研究进展[J]. 科技通报,2009,25(5):624-628.
Ye Jiongying, Liu Chen, Xiao Qingjun, et al. Research progress of synthesis and application of BIA modified polyimide materials [J]. Bulletin of Science and Technology, 2009(5):624-628.
- [13] Dai Xuemin, Bao Feng, Jiao Long, et al. High-performance polyimide copolymer fibers derived from 5-amino-2-(2-hydroxy-4-aminobenzene)-benzoxazole:Preparation, structure and properties[J]. Polymer, 2018, 150:254-266.
- [14] 李振凯,李伟民,马鹏常,等. 含杂环结构的耐高温聚酰亚胺薄膜[J]. 化工时刊,2019,33(4):26-33.
Li Zhenkai, Li Weimin, Ma Pengchang, et al. High temperature resistant polyimide film containing heterocyclic structure[J]. Chemical Industry Times, 2019, 33(4):26-33.

有降低,冲击韧性提高 22% ;

(2) ABS-LS 的动、静摩擦系数差值从 0.08 下降到 0.03,内耗因子提高 33%,在材料发生形变时,能够将更多的机械能转变成内能耗散掉,使材料振动衰减更快;

(3) 在相同载荷和摩擦速度条件下进行摩擦异响实验时,ABS-LS 的噪音响度值和振动加速度降低幅度高达 90% ;显微镜照片表明普通 ABS 在摩擦过程中出现了典型的粘滑现象,而降噪改性的 ABS-LS 粘滑倾向明显降低;载荷和摩擦速度越高,单次粘滑位移越大,粘滑现象越严重。

参考文献

- [1] 顾灿松,邓国勇,何森东.汽车空调系统异响引起的车内噪声研究与解决[J].汽车技术,2008(11):21-23.
Gu Cansong, Deng Guoyong, He Sendong. The analysis and solution to car interior noise caused by abnormal noise from air conditioner[J]. Automotive Technology, 2008(11):21-23.
- [2] 杜力,赵鹏云.中央空调噪声分析及控制研究[J].重庆工商大学学报:自然科学版,2009,26(3):291-294.
Du Li, Zhao Pengyun. Analysis and control of noise in central air conditioning system[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University: Natural Science Edition, 2009, 26(3):291-294.
- [3] 蒋永敏.浅析汽车的吸音隔音材料[J].中国包装工业,2014(2):9-10.
Jiang Yongmin. Analysis of the sound-absorbing and sound-proof materials in automobile[J]. China Packaging Industry, 2014(2):9-10.
- [4] 仇文波.一款微型轿车前门玻璃升降器异响问题的改善[J].汽车工艺与材料,2015(11):10-16.
Qiu Wenbo. An improvement for noisy issue of front regulator of mini passenger vehicle[J]. Automobile Technology & Material, 2015(11):10-16.
- [5] 蒋雄,邱德平.汽车内饰塑料件 NVH 异响改善[J].汽车工程师,2018(4):33-36,39.
Jiang Xiong, Qiu Deping. Improvement of the acoustic performance of vehicle plastic interior parts[J]. Auto Engineer, 2018(4):33-36, 39.
- [6] 江文杰,孙成武.某车型汽车座椅异响问题的研究与解决[J].机械制造,2016(4):44-46.
Jiang Wenjie, Sun Chengwu. Research and solution of abnormal sound of a car seat[J]. Machinery, 2016(4):44-46.
- [7] 鲁加荣,李强,罗明华.一种降噪消音的 PC / ABS 合金材料及其制备方法, CN106751687B[P].2017-05-31.
Lu Jiarong, Li Qiang, Luo Minghua. The invention of PC / ABS alloy material for noise reduction, CN106751687B[P].2017-05-31.
- [8] 刘辉,孙梅荣,张国英,等.基于低频噪声防护的高阻尼硅橡胶改性 ABS 隔音材料的制备[J].合成树脂及塑料,2016,33(1):68-72.
Liu Hui, Sun Meirong, Zhang Guoying, et al. Preparation of high damping silicone runbber modified ABS as low-frequency noise insulating material[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2016, 33(1):68-72.
- [9] 杨波,姚宇,黄海山,等.水性阻尼涂料在轿车上的应用[J].涂料工业,2015(9):81-85.
Yang Bo, Yao Yu, Huang Haishan, et al. Application of waterborne damping coatings in automobile industry[J]. Paint & Coatings Industry, 2015(9):81-85.
- [10] 余朦山,李文龙,孙付宇,等.一种高阻尼降噪 ABS 树脂组合物, CN107177156A[P].2017-09-19.
Yu Mengshan, Li Wenlong, Sun Fuyu, et al. A high damping noise reduction ABS resin composition, CN107177156A[P].2017-09-19.
- [11] 张毅,赵志刚,程方清,等.一种降噪和高强度 PC / ABS 合金及其制备方法, CN109354852A[P].2019-02-19.
Zhang Yi, Zhao Zhigang, Cheng Fangqing, et al. The invention of noise reduction and high strength PC / ABS alloy, CN109354852A[P].2019-02-19.
- [12] Rojsatean J, Larpsuriyakul P, Prakymoramas N, et al. Friction characteristics of self-lubricating ABS under different surface roughnesses and temperatures[J]. Tribology International, 2017, 109:229-237.
- [13] Yoshizawa H, You L C, Israelachvili J. Fundamental mechanisms of interfacial friction.1.Relation between adhesion and friction[J]. J Phys Chem, 1993, 97(16):4 128-4 140.
- [14] Eiss N S, Hanchi J. Stick-slip friction in dissimilar polymer pairs used in automobile interiors[J]. Tribology International, 1998, 31(11):653-659.
- [15] 贺鹏.吸声阻尼聚合物材料的研究进展[J].材料导报,2009, 23(s2):424-427.
He Peng. Advance in damping and underwater acoustic absorption polymer matrix materials[J]. Materials Reports, 2009, 23(s2):424-427.
- [16] Bouissou S, Petit J P, Barquins M. Normal load, slip rate and roughness influence on the PMMA dynamics of sliding 2.Characterisation of the stick-slip phenomenon[J]. Wear, 1999, 215(1-2):137-145.

(上接第 40 页)

- [15] 李丽慧,黄承亚.均苯型聚酰亚胺的合成与性能研究[J].合成材料老化与应用,2006,35(4):21-24.
Li Lihui, Huang Chengya. Synthesis and characterization of poly-
pyromelliticimide[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2006, 35(4):21-24.
- [16] Song Guoliang, Wang Daming, Dang Guodong, et al. Thermal expansion behavior of polyimide films containing benzoxazole unit [J]. High Performance Polymers, 2014, 26(4):413-419.