

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.10.009

PA512对玻纤增强PA56/5T复合材料性能的影响及优化

田国锋, 高永芝, 刘建伟, 单倩, 田盼盼, 常显涛, 丁金娜

(山东东辰瑞森新材料科技有限公司, 济南 250220)

摘要: 采用先成盐后缩聚的方法制备了聚酰胺(PA)56/5T共聚物,研究了PA5T盐含量对共聚物性能的影响,最终以熔点271.2℃的PA56/5T共聚物为主要原料、PA512为改性剂、玻璃纤维为增强剂,通过熔融共混法制备了不同PA512含量的玻璃纤维增强PA56/5T/PA512复合材料,系统研究了PA512的引入对复合材料冲击性能、热变形温度、吸水率以及综合性能的影响。结果表明,随着PA512含量的增加,复合材料的缺口冲击强度显著提升,吸水率和热变形温度则逐渐降低。当PA512质量分数为10%时,复合材料的缺口冲击强度达到11.8 kJ/m²,较未添加PA512的复合材料(7.8 kJ/m²)提升了51.28%;同时,吸水率降至1.35%,降低了8.78%;热变形温度降至230℃,降低了4.96%。当PA512质量分数为6%时,复合材料展现出最优的综合性能,缺口冲击强度达到10.6 kJ/m²,满足指标值不低于10 kJ/m²的要求;热变形温度达到239℃,满足指标值不低于235℃的要求;拉伸强度达到178 MPa、弯曲强度达到276 MPa,保持较高水平;吸水率为1.41%;水解后拉伸强度达到99 MPa,满足指标值不低于80 MPa的要求。PA512质量分数为6%的复合材料综合性能可以满足汽车发动机周边众多零部件的应用要求。

关键词: PA512; PA56/5T; 玻璃纤维增强复合材料; 冲击强度; 吸水率; 热变形温度; 汽车发动机

中图分类号: TQ323.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)10-0064-07

Influence and optimization of PA512 on properties of glass fiber reinforced PA56/5T composites

TIAN Guofeng, GAO Yongzhi, LIU Jianwei, SHAN Qian, TIAN Panpan, CHANG Xiantao, DING Jinna

(Shandong Dongchen Ruisen New Materials Technology Co., Ltd., Jinan 250220, China)

Abstract : Polyamide (PA) 56/5T copolymer was prepared by a method of salt formation followed by polycondensation. The effects of PA5T salt content on the properties of the copolymer were studied. Finally, using PA56/5T copolymer with a melting point of 271.2℃ as the main raw material, PA512 as the modifier, and glass fiber as the reinforcing agent, the glass fiber reinforced PA56/5T/PA512 composites with different PA512 contents were prepared by melt blending. The effects of PA512 introduction on the impact performance, heat deformation temperature, water absorption and comprehensive performances of the composites were systematically studied. The results show that with the increase of PA512 content, the notched impact strength of the composites significantly increases, while the water absorption and heat deformation temperature gradually decrease. When the PA512 content is 10 wt%, the notched impact strength of the composite reaches 11.8 kJ/m², which is 51.28% higher than that (7.8 kJ/m²) of the composite without PA512; meanwhile, the water absorption drops to 1.35%, with a decrease of 8.78%; the heat deformation temperature drops to 230℃, with a decrease of 4.96%. When the PA512 content is 6 wt%, the composite shows the best comprehensive performances, the notched impact strength reaches 10.6 kJ/m², meeting the requirement that the index value is no less than 10 kJ/m²; the heat deformation temperature reaches 239℃, meeting the requirement that the index value is no less than 235℃; the tensile strength reaches 178 MPa and the flexural strength reaches 276 MPa, maintaining a high level; the water absorption rate reaches 1.41%; the tensile strength after hydrolysis reaches 99 MPa, meeting the requirement that the index value is no less than 80 MPa. The comprehensive performances of the composite with 6 wt% PA512 can meet the application requirements of numerous components around the automotive engine.

Keywords : PA512 ; PA56/5T ; glass fiber reinforced composite ; impact strength ; water absorption ; heat deformation temperature ; automotive engine

通信作者: 田国锋, 高级工程师, 主要从事尼龙的聚合及改性应用研究

收稿日期: 2025-07-22

引用格式: 田国锋, 高永芝, 刘建伟, 等. PA512对玻纤增强PA56/5T复合材料性能的影响及优化[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(10): 64-70.

TIAN Guofeng, GAO Yongzhi, LIU Jianwei, et al. Influence and optimization of PA512 on properties of glass fiber reinforced PA56/5T composites[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(10): 64-70.

针对汽车发动机周边材料的性能,一般要求材料的热变形温度(HDT)不低于235℃、缺口冲击强度不低于10 kJ/m²、拉伸强度不低于150 MPa、在125℃水解1 000 h后拉伸强度不低于80 MPa。目前该类周边材料大多采用增强聚酰胺(PA)66材料,但PA66属于石油基材料,具有不可再生性。PA56因其部分原料的可再生性、优异的力学性能得到了广泛的研究和应用^[1-8],但其吸水率高、增强后的耐水解性能差,限制了其作为工程材料在汽车领域的应用^[9]。

资料显示在PA分子主链中导入芳香环可以改善其吸水性大、尺寸稳定性差的缺陷^[10],目前的研究主要集中在以PA5T为主材与PA56共聚的方向上^[11-17],所得材料均为高熔点耐高温PA(熔点通常大于300℃),与PA66的熔点(263℃)存在较大差距,为下游加工(如注塑)配套带来不便。为此,笔者制备了以PA56为主材与PA5T共聚的PA56/5T共聚物材料(目标熔点接近PA66)。但研究发现,玻璃纤维(玻纤)增强后的PA56/5T材料冲击强度偏低。虽然采用马来酸酐接枝聚烯烃弹性体(POE-G-MAH)、马来酸酐接枝三元乙丙橡胶(EPDM-G-MAH)等增韧剂可提升PA56/5T韧性,但会导致HDT显著下降,难以满足发动机周边材料对耐热性的要求,因此,亟需开发一种既能有效增韧,又能最大限度保持HDT的改性PA材料。

PA512是一种生物基长碳链PA材料,通过戊二胺与十二碳二元酸缩聚制得^[18],具有较好的韧性以及较低的吸水率。将其作为增强PA56/5T的增韧改性剂,有望在降低材料的吸水率、提升材料韧性的同时,保持相对较高的HDT。目前,关于PA512作为功能助剂用于提升增强PA56/5T复合材料性能的研究文献较少。为此,笔者以PA56/5T树脂为基体,以PA512为增韧剂对玻纤增强PA56/5T/PA512复合材料进行了研究,系统研究了PA512含量对复合材料力学性能(冲击、拉伸、弯曲)、热性能(HDT)、吸水率及耐水解性能的影响,以期获得满足汽车发动机周边众多零部件应用要求的最佳材料配方。

1 实验部分

1.1 主要原材料

戊二胺:工业级,山东凯赛生物技术有限公司;

己二酸:工业级,山东华鲁恒升化工股份有限公司;

对苯二甲酸:工业级,南京柏睿化工有限公司;

PA512:熔体流动速率为20 g/10 min,测试条件为230℃,2.16 kg,山东东辰瑞森新材料科技有限公司;

玻纤:ECS10-3.0-T435TM,泰山玻璃纤维有限公司。

1.2 主要设备及仪器

成盐釜:KWYF-50L,上海科兴仪器有限公司;

聚合反应釜:CJ(K)-27L,威海新元化工机械有限公司;

注塑机:BL110FE,宁波双马机械工业有限公司;

双螺杆挤出机:HK-36MT,南京科亚化工成套装备有限公司;

高速混合机:L-50,苏州利欣特机电有限公司;

真空干燥箱:DZG-90L,合肥右科仪器设备有限公司;

万能试验机:E43.504,美特斯工业系统(中国)有限公司;

分析天平:ME104E,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;

差示扫描量热仪:DSC3,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;

热变形维卡软化点试验机:ZWK1302-A,美特斯工业系统(中国)有限公司;

冲击试验机:XBZ1010D,上海磐山化工科技有限公司。

1.3 试样制备

1.3.1 PA56盐、PA5T盐的制备

将一定量的戊二胺、蒸馏水投入成盐釜中,加热融化后加入等物质的量比的己二酸,在50~70℃水溶液中反应0.5 h,得到50%浓度的澄清溶液,调节pH值至7.0~7.5,降温至20℃,使PA56盐结晶析出,离心分离,用15℃冷水洗涤2次,真空干燥得到PA56盐。PA5T盐的制备流程和参数与PA56盐相同,将己二酸换成对苯二甲酸即可。

1.3.2 PA56/5T树脂的制备

将PA56盐、PA5T盐、去离子水、亚磷酸按表1配比加入到27 L高压反应釜内。充入氮气置换釜内空气三次。加热升温至210~235℃,保持压力(1.5~2.3 MPa)反应2~3 h(预聚合);开启搅拌,同时缓慢打开放气阀,在1~3 h内将压力均匀降至常压(此过程中升温至270~285℃);保持常压反应10~30 min(后缩聚),充入氮气将熔体压出,经水槽冷

表1 PA56/5T制备配方

Tab. 1 Preparation formula of PA56/5T

Constituent	Sample number					
	0 [#]	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]
PA56 salt	100	95	85	75	65	55
PA5T salt	0	5	15	25	35	45
Deionized water	100	100	100	100	100	100
Phosphorous acid	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

却、切粒机切粒,真空干燥得到PA56/5T树脂。以5T含量表示PA5T盐在PA56盐和PA5T盐中的质量分数,分别为5%,15%,25%,35%,45%。

1.3.3 增强PA56/5T/PA512复合材料的制备

将PA56/5T树脂(120℃真空干燥8h)、PA512树脂(100℃真空干燥8h)按照表2实验配方投入高速混合机中均匀混合,混合物料经双螺杆挤出机熔融共混,同时通过侧喂料口加入玻纤,经水冷、切粒得到不同PA512质量分数的复合材料粒料。双螺杆挤出机工艺参数如下:一区温度为200℃,二区至九区温度范围为280~290℃,机头温度290℃;螺杆转速为260~280 r/min;切粒机转速为285~300 r/min;玻纤加入量保持恒定(质量分数35%)。

表2 玻纤增强PA56/5T/PA512复合材料制备配方(质量分数)

Tab. 2 Preparation formula of glass fiber reinforced PA56/5T/PA512 composites (Mass fraction)

Constituent	Sample number					
	C0 [#]	C1 [#]	C2 [#]	C3 [#]	C4 [#]	C5 [#]
PA56/5T	65	63	61	59	57	55
PA512	0	2	4	6	8	10
Glass fiber	35	35	35	35	35	35

将增强PA56/5T/PA512复合材料粒料在120℃真空干燥箱中烘干8h后,使用注塑机制备标准测试样条。注塑工艺参数为料筒温度270~290℃、模具温度80~100℃、注射压力60~80 MPa、注射+保压时间32 s、冷却时间30 s。

1.4 性能测试

吸水率按GB/T 1034-2008进行测试,试样为直径50 mm、厚度3 mm的圆片,测试条件为在23℃蒸馏水中浸泡24 h。

冲击性能按GB/T 1043.1-2008进行测试,采用V型缺口试样,在23℃、摆锤能量为5.5 J的条件下测定样品的悬臂梁缺口冲击强度。

弯曲性能按GB/T 9341-2008进行测试,测试温度为23℃,速率为2 mm/min。

拉伸强度按GB/T 1040.1-2018进行测试,测试温度为23℃,拉伸速率为20 mm/min。

熔点按GB/T 19466.3-2004进行测试,在氮气条件下,以20℃/min升温速率将温度由30℃升至300℃,恒温3 min,然后以20℃/min降温速率降至30℃,最后再以相同速率升温至300℃,取第二次升温曲线熔融峰温为熔点。

热变形温度按GB/T 1634.1-2019进行测试,试样为长80 mm、宽10 mm、厚4 mm的方片,负荷1.8 MPa。

成型收缩率按GB/T 17037.4-2003进行测试,试样为直径50 mm、厚度3 mm的圆片。

水解后拉伸强度测试:将拉伸样条完全浸没于高压釜内,在125℃去离子水中处理1 000 h,取出样条,擦干表面水分,室温放置2 h后,按上述拉伸强度测试方法进行测试。

2 结果与讨论

2.1 5T含量对PA56/5T性能的影响

不同5T含量下PA56/5T的性能如图1至图5所示。

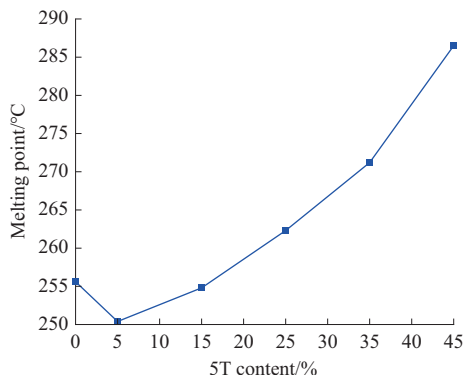


图1 熔点与5T含量的关系曲线

Fig. 1 Relationship curve between melting point and 5T content

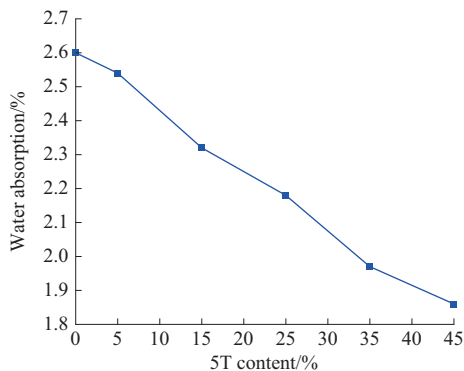


图2 吸水率与5T含量的关系曲线

Fig. 2 Relationship curve between water absorption and 5T content

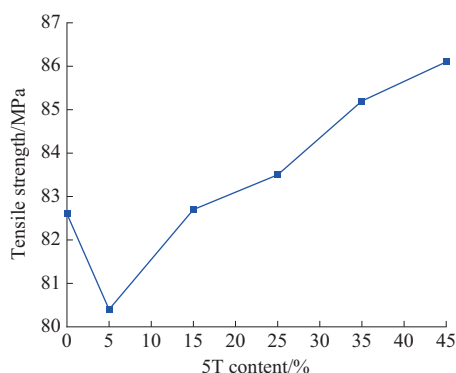


图3 拉伸强度与5T含量的关系曲线

Fig. 3 Relationship curve between tensile strength and 5T content

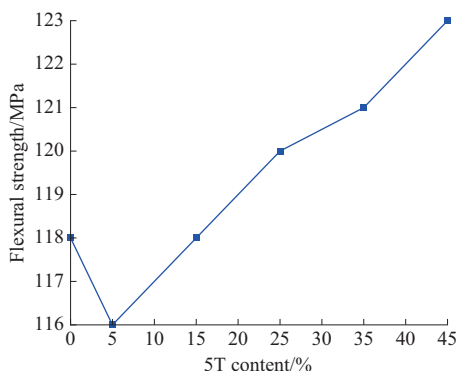


图4 弯曲强度与5T含量的关系曲线

Fig. 4 Relationship curve between flexural strength and 5T content

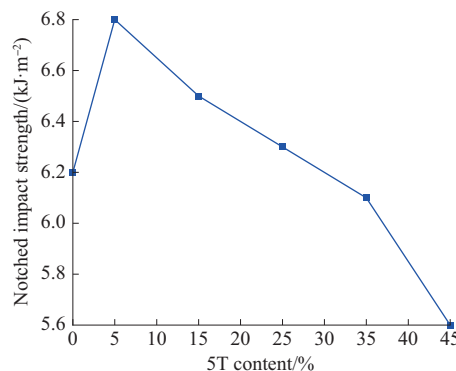


图5 缺口冲击强度与5T含量的关系曲线

Fig. 5 Relationship curve between notched impact strength and 5T content

熔点分析:从图1可见,PA56/5T的熔点随5T含量的增加呈现先降低后升高的趋势。当5T含量为5%时,熔点最低(250.4℃)。随着5T含量增加至15%和25%,熔点分别升至254.8℃和262.3℃,与纯PA56熔点(255.6℃)相当。当5T含量为35%时,熔点达271.2℃,高于PA66熔点(263.3℃)。5T含量为45%时,熔点进一步升至286.5℃。这表明5T单元(含刚性对苯二甲酸结构)的引入显著提高了共聚物的耐热性。

吸水率分析:图2显示,PA56/5T的吸水率随5T含量的增加而显著降低,后期降幅趋缓。当5T含量达到35%和45%时,吸水率分别为1.97%和1.86%,较纯PA56(2.6%)分别降低了24.23%和28.46%,略高于PA66吸水率(1.8%)。这主要是由于芳香环的引入减少了极性酰胺基团的密度和吸水性。

拉伸与弯曲强度分析:从图3、图4可以看出,PA56/5T的拉伸强度与弯曲强度均随5T含量增加呈现先下降后上升的趋势。当5T含量达到35%时,拉伸强度达到85.2 MPa,弯曲强度达121 MPa,均超过纯PA66的相应性能(PA66典型值为拉伸强度80 MPa、弯曲强度110 MPa)。

缺口冲击强度分析:从图5可以看出,PA56/5T的缺口冲击强度随5T含量增加先升高后降低。当5T含量为35%时,缺口冲击强度达到6.1 kJ/m²,略低于PA66(7 kJ/m²)。

综合评估:通过上述分析可以发现,当5T含量为35%时,PA56/5T树脂熔点(271.2℃)接近PA66,拉伸强度和弯曲强度优于PA66,虽然缺口冲击强度(6.1 kJ/m²)稍低于PA66、吸水率(1.97%)略高于PA66,但可通过后续共混增韧(如加入PA512)进行优化。因此,笔者选择4#树脂(5T含量35%)作为玻纤增强复合材料的基体。

2.2 PA512含量对玻纤增强PA56/5T/PA512复合材料缺口冲击强度的影响

不同PA512含量下玻纤增强PA56/5T/PA512复合材料的缺口冲击强度如图6所示。由图6可以看出,随着PA512含量的增加,复合材料的缺口冲击强度逐步升高。当PA512质量分数分别为2%,4%,6%,8%,10%时,复合材料的缺口冲击强度分别为8.5,9.4,10.6,11.1,11.8 kJ/m²,与不加PA512的玻纤

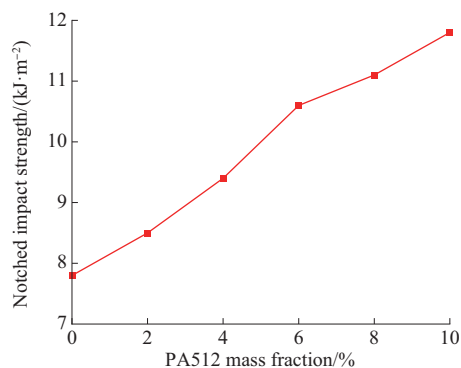


图6 复合材料缺口冲击强度与PA512含量的关系曲线

Fig. 6 Relationship curve between notched impact strength of composite and PA512 content

增强 PA56/5T 缺口冲击强度(7.8 kJ/m^2)相比分别提高了 8.97%, 20.51%, 35.90%, 42.31%, 51.28%。这主要是由以下三方面的原因造成的:一是 PA512 与 PA56/5T 具有相似的酰胺键结构,相容性良好, PA512 能均匀分散在 PA56/5T 基体中,形成强界面结合,当材料受到冲击时,能有效传递应力,减少界面脱黏导致的早期失效;二是 PA512 是长碳链 PA, 其分子链柔顺性远高于含刚性芳香环的 PA56/5T, PA512 的加入削弱了 PA56/5T 基体中原有的强氢键网络密度,降低了基体的脆性,长脂肪链的引入显著增加了共混物分子链的柔顺性和运动能力,使复合材料在受到冲击载荷时,更容易通过分子链的伸展、滑移等方式发生塑性形变,吸收大量冲击能,从而显著提高韧性,避免脆性断裂;三是 PA512 改善了玻纤与树脂基体的界面黏结,有助于冲击能量的传递和耗散,进一步提升了冲击性能。

2.3 PA512 含量对玻纤增强 PA56/5T/PA512 复合材料吸水率的影响

不同 PA512 含量下玻纤增强 PA56/5T/PA512 复合材料的吸水率如图 7 所示。由图 7 可以看出,随着 PA512 含量的增加,复合材料的 24 h 饱和吸水率逐步降低。当 PA512 质量分数分别为 2%, 4%, 6%, 8%, 10% 时,复合材料的吸水率分别为 1.46%, 1.43%, 1.41%, 1.38%, 1.35%, 与不加 PA512 的玻纤增强 PA56/5T 复合材料吸水率(1.48%)相比分别降低了 1.35%, 3.38%, 4.73%, 6.76%, 8.78%。这主要是由以下两方面的原因造成的:一是 PA512 具有很长的疏水性亚甲基链段($-\text{CH}_2-$),其酰胺键密度(单位质量的 $-\text{NH}-\text{CO}-$ 基团数量)远低于 PA56/5T (尤其是含较短己二酸链段的 PA56 部分),加入 PA512 后,共混物整体的极性酰胺基团密度下降,减

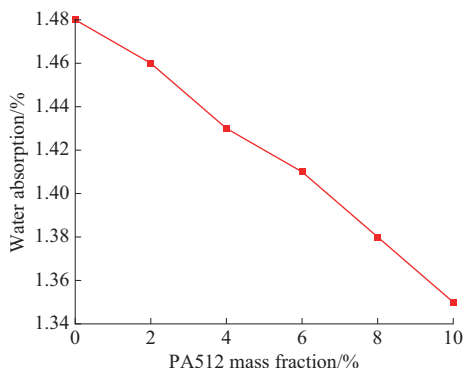


图7 复合材料吸水率与PA512含量的关系曲线

Fig. 7 Relationship curve between water absorption of composite and PA512 content

弱了材料与水分子形成氢键的能力,导致吸水率降低;二是 PA512 的加入打乱了 PA56/5T 基体中较为紧密的氢键网络,使其分布更加分散,减少了局部高极性、高吸水性区域的聚集,从而进一步降低了整体的吸水倾向。

2.4 PA512 含量对玻纤增强 PA56/5T/PA512 复合材料 HDT 的影响

不同 PA512 含量下玻纤增强 PA56/5T/PA512 复合材料的 HDT 如图 8 所示。由图 8 可以看出,随着 PA512 含量的增加,复合材料的 HDT 逐渐降低。当 PA512 质量分数分别为 2%, 4%, 6% 时,复合材料的 HDT 分别为 241, 240, 239 $^{\circ}\text{C}$, 此时复合材料的 HDT 降低并不明显;当 PA512 质量分数分别为 8% 和 10% 时,复合材料的 HDT 分别为 234 $^{\circ}\text{C}$ 和 230 $^{\circ}\text{C}$, 与不加 PA512 的增强 PA56/5T 的 HDT (242 $^{\circ}\text{C}$) 相比分别降低了 3.31% 和 4.96%。添加 PA512 后导致复合材料 HDT 降低的主要原因有以下三点:一是 PA512 的熔点低(210 $^{\circ}\text{C}$)、结晶温度低,本身耐热性与 PA56/5T 相比差,作为共混组分,其较低的耐热性降低了共混物的整体 HDT;二是添加 PA512 后的长脂肪链破坏了 PA56/5T 分子链的规整排列,降低了共混体系的结晶度,结晶区的减少导致复合材料在高温下抵抗变形的能力减弱, HDT 下降;三是 PA512 的加入起到了一定的内部塑化作用,提高了分子链段在高温下的活动能力,使得材料在较低温度下即发生较大的蠕变变形,导致 HDT 降低。

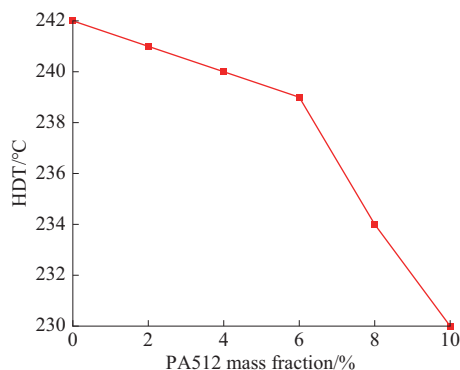


图8 复合材料HDT与PA512含量的关系曲线

Fig. 8 Relationship curve between HDT of composite and PA512 content

2.5 PA512 含量对玻纤增强 PA56/5T/PA512 复合材料综合性能的影响

不同 PA512 含量下玻纤增强 PA56/5T/PA512 复合材料的综合性能见表 3。从表 3 可以看出,当 PA512 质量分数大于等于 8%(C4[#], C5[#]) 时,复合材料

表3 不同PA512含量下增强PA56/5T/PA512复合材料的综合性能

Tab. 3 Comprehensive properties of reinforced PA56/5T/PA512 composites with different PA512 contents

Sample number	HDT/°C	Water absorption/%	Tensile strength/ MPa	Flexural strength/ MPa	Notched impact strength/(kJ·m ⁻²)	Tensile strength after hydrolysis test/MPa
C0 [#]	242	1.48	186	301	7.8	100
C1 [#]	241	1.46	184	296	8.5	100
C2 [#]	240	1.43	181	285	9.4	99
C3 [#]	239	1.41	178	276	10.6	99
C4 [#]	234	1.38	173	264	11.1	96
C5 [#]	230	1.35	170	258	11.8	95

HDT已低于汽车发动机周边材料要求的235℃门槛值,同时,拉伸强度(173,170 MPa)和弯曲强度(264,258 MPa)也呈现较明显下降趋势,综合力学性能有所下降;当PA512质量分数小于等于4%(C1[#],C2[#])时,缺口冲击强度(8.5,9.4 kJ/m²)虽有所提升,但仍低于指标值下限(10 kJ/m²),冲击韧性略显不足,HDT(241,240℃)和强度保持较好。当PA512质量分数为6%(C3[#])时,此配方下复合材料展现出最佳的综合性能平衡:缺口冲击强度达到10.6 kJ/m²,较基础配方(C0[#])提升35.90%,且满足指标值不低于10 kJ/m²的要求,冲击韧性显著提升;耐热性保持良好,HDT为239℃,仅比基础配方(242℃)降低3℃(-1.24%),高于指标值下限(235℃),刚性和强度保持较高水平,拉伸强度为178 MPa、弯曲强度为276 MPa,虽略低于C0[#](分别下降4.3%和8.3%),但仍远高于150 MPa的指标要求;吸水率降至1.41%,较C0[#](1.48%)进一步降低4.73%,水解试验后材料的拉伸强度达到99 MPa,高于指标值下限(80 MPa)。综上所述,C3[#]复合材料(PA512质量分数为6%)的综合性能最优,可以满足汽车发动机周边众多零部件(如进气歧管、发动机罩盖、节温器壳体等)对材料的关键性能要求。

3 结论

(1)随5T含量增加,PA56/5T共聚物的熔点、拉伸强度和弯曲强度均呈先下降后上升的趋势,吸水率逐渐下降,而缺口冲击强度先上升后下降。当5T含量为35%时,PA56/5T共聚物适宜作为玻纤增强复合材料的树脂基体。

(2)PA512作为增韧剂能显著提升玻纤增强PA56/5T复合材料的缺口冲击强度。当PA512质量分数为10%时,缺口冲击强度提升幅度达51.28%,至11.8 kJ/m²。

(3)PA512的引入会降低复合材料的吸水率和HDT,当PA512质量分数为10%时,吸水率降低

8.78%(至1.35%),HDT降低4.96%(至230℃)。

(4)当PA512质量分数为6%时,复合材料具有最优的综合性能。缺口冲击强度达到10.6 kJ/m²(较未添加PA512的提升35.90%),满足指标值不低于10 kJ/m²的要求;HDT达到239℃,满足指标值不低于235℃的要求;拉伸强度达到178 MPa、弯曲强度达到276 MPa,保持较高水平;吸水率降低至1.41%,水解后拉伸强度达到99 MPa,满足指标值不低于80 MPa的要求。故该复合材料可以满足汽车发动机周边众多零部件的应用要求。

参考文献

- [1] 杨昌磊,刘明,何敏,等.生物基尼龙56的应用及改性研究进展[J].上海塑料,2022,50(1):13-19.
YANG Changlei, LIU Ming, HE Min, et al. Research progress on application and modification of bio-based nylon 56[J]. Shanghai Plastics, 2022, 50(1):13-19.
- [2] 李桂丽,何彝昕,冯巧,等.生物基PA56的非等温结晶行为[J].塑料,2024,53(6):129-134.
LI Guili, HE Yixin, FENG Qiao, et al. Non-isothermal crystallization behavior of bio-based PA56[J]. Plastics, 2024, 53(6):129-134.
- [3] 钱思琦,朱瑞淑,张瀚誉,等. PA56/PA6共混体系热性能及流变性能研究[J].合成纤维,2020,49(8):12-19.
QIAN Siqi, ZHU Ruishu, ZHANG Hanyu, et al. Study on the thermal and rheological properties of PA56/PA6 blends[J]. Synthetic Fiber in China, 2020, 49(8):12-19.
- [4] 陈勇伟,王增效,徐莉莉.玻璃纤维增强无卤阻燃生物基PA56的应用评价[J].塑料工业,2023,51(9):114-119.
CHEN Yongwei, WANG Zengxiao, XU Lili. Application evaluation of glass fiber reinforced halogen-free flame-retardant bio-based PA56[J]. China Plastics Industry, 2023, 51(9):114-119.
- [5] 甘典松,刘跃军,欧阳环,等.生物基PA56/512于GF/PA66复合材料轨道扣件的应用[J].工程塑料应用,2024,52(6):117-121,134.
GAN Diansong, LIU Yuejun, OUYANG Huan, et al. Application of bio-based PA56/512 copolymer in track fasteners of GF/PA66 composites[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(6):117-121, 134.
- [6] 石双友,胡志宇,刘东月,等.共聚酰胺56/6的制备与性能[J].塑料,2024,53(5):152-158.

- SHI Shuangyou, HU Zhiyu, LIU Dongyue, et al. Preparation and properties of copolyamide 56/6[J]. *Plastics*, 2024, 53(5): 152–158.
- [7] 李桂丽, 张舒琪, 姜欣, 等. 阻燃PA56复合材料的等温结晶行为和拉伸性能[J]. *化工新型材料*, 2025, 53(4): 151–156, 164.
- LI Guili, ZHANG Shuqi, JIANG Xin, et al. Isothermal crystallization behavior and tensile properties of flame-retardant PA56 composites[J]. *New Chemical Materials*, 2025, 53(4): 151–156, 164.
- [8] 李天娇, 王春红, 岳航, 等. 改性纳米二氧化硅/生物基聚酰胺56复合材料的制备与性能研究[J]. *毛纺科技*, 2024, 52(11): 20–26.
- LI Tianjiao, WANG Chunhong, YUE Hang, et al. Preparation and properties of modified nano-SiO₂/bio-based polyamide 56 composites[J]. *Wool Textile Journal*, 2024, 52(11): 20–26.
- [9] 叶士兵. 生物基尼龙56车用工程应用评价[J]. *合成材料老化与应用*, 2019, 48(3): 6–11.
- YE Shibing. Evaluation of the application of bio-based PA56 in automotive engineering[J]. *Synthetic Materials Aging and Application*, 2019, 48(3): 6–11.
- [10] 彭治汉, 施祖培. 塑料工业手册: 聚酰胺[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- PENG Zhihan, SHI Zupei. Handbook of plastics industry: Polyamide[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2001.
- [11] 游兴华, 陈爽, 杜云慧, 等. PA5T-56低温溶液/固相聚合的制备与表征[J]. *塑料科技*, 2025, 53(1): 10–15.
- YOU Xinghua, CHEN Shuang, DU Yunhui, et al. Preparation and characterization of PA5T-56 by low temperature solution/solid phase polymerization[J]. *Plastics Science and Technology*, 2025, 53(1): 10–15.
- [12] 倪金平, 路丹, 陈林飞, 等. 玻璃纤维增强生物基PA5T/56的制备与性能[J]. *塑料工业*, 2021, 49(3): 32–37.
- NI Jinping, LU Dan, CHEN Linfei, et al. Preparation and properties of glass fiber reinforced bio-based PA5T/56[J]. *China Plastics Industry*, 2021, 49(3): 32–37.
- [13] 杨克俭, 马炼, 陈林飞, 等. 共聚序列结构对生物基共聚尼龙5T/56非等温结晶动力学影响[J]. *工程塑料应用*, 2022, 50(6): 129–135.
- YANG Kejian, MA Lian, CHEN Linfei, et al. Effect of copolymerization sequence structure on non-isothermal crystallization kinetics of bio-based copolymer PA 5T/56[J]. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(6): 129–135.
- [14] 刘冰肖, 赵元博, 崔浩然, 等. 生物基半芳香族PA5T-co-56的制备及性能[J]. *工程塑料应用*, 2025, 53(1): 31–36.
- LIU Bingxiao, ZHAO Yuanbo, CUI Haoran, et al. Preparation and properties of bio-based semi-aromatic PA5T-co-56[J]. *Engineering Plastics Application*, 2025, 53(1): 31–36.
- [15] 张海洋, 郭小炜, 宋云鹤, 等. 生物基半芳香族共聚酰胺PA5T/56与脂肪族聚酰胺PA56的性能对比[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2024, 50(3): 39–44.
- ZHANG Haiyang, GUO Xiaowei, SONG Yunhe, et al. Performance comparison of bio-based semi-aromatic copolyamide PA5T/56 and aliphatic polyamide PA56[J]. *Journal of Donghua University (Natural Science)*, 2024, 50(3): 39–44.
- [16] 王丰, 周亮, 杨汇鑫, 等. 生物基半芳香族聚酰胺PA5T/56的合成及性能研究[J]. *广州化工*, 2024, 52(24): 73–76, 113.
- WANG Feng, ZHOU Liang, YANG Huixin, et al. Synthesis and property study on bio-based semi-aromatic polyamide PA5T/56[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2024, 52(24): 73–76, 113.
- [17] 雪冰峰, 张烨, 张斌, 等. 生物基耐高温PA5T/56的高效制备及表征[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(7): 22–28, 69.
- XUE Bingfeng, ZHANG Ye, ZHANG Bin, et al. Efficiently preparation and characterization of bio-based high temperature resistant PA5T/56[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(7): 22–28, 69.
- [18] 张全福, 王朝进, 亓玉刚, 等. 一种尼龙512的制备方法: CN109575274B[P]. 2020-12-11.
- ZHANG Quanfu, WANG Chaojin, QI Yugang. A preparation method of nylon 512: CN109575274B[P]. 2020-12-11.