

高填充玻璃纤维增强MXD6复合材料的制备及综合性能研究

万超^{1,2}, 李陵洲^{1,2*}, 刘诗^{1,2}, 朱永军^{1,2}, 狄春峰^{1,2}, 郑雄峰^{1,2}

¹湖北合聚高分子材料有限公司, 湖北 荆州

²武汉合聚实业集团有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年9月21日; 录用日期: 2026年10月16日; 发布日期: 2026年10月26日

摘要

为探究玻纤截面形貌对半芳香尼龙复合材料的调控规律, 本文制备60%高填充扁平玻纤与圆玻纤增强MXD6复合材料, 系统研究玻纤形态对材料结构及综合性能的影响。结果表明: 玻纤形貌对MXD6基体官能团结构无影响, 但可差异化调控材料结晶、熔融及热降解性能。圆玻纤体系结晶温度更高, 两种体系均存在双重熔融峰; 扁平玻纤则可提升材料热分解温度与最大分解速率温度, 有效改善复合材料热稳定性。高填充条件下, 扁平玻纤凭借特殊截面结构增大界面接触面积, 突破了传统圆玻纤体系的性能短板, 实现了材料强度、刚性、冲击韧性与加工流动性的协同提升, 同时降低复合材料吸水率, 优化湿热老化性能保持率, 改善了高填充玻纤尼龙成型性与湿热稳定性差的缺陷。研究表明, 仅通过优化玻纤截面形貌即可高效提升高填充MXD6复合材料综合性能, 可为湿热工况下汽车、电子精密薄壁结构件用半芳香尼龙材料的研发与应用提供参考。

关键词

MXD6, 圆玻纤, 扁平玻纤, 力学性能, 吸水率

Preparation and Comprehensive Performance Study of High-Filled Glass Fiber Reinforced MXD6 Composites

Chao Wan^{1,2}, Lingzhou Li^{1,2*}, Shi Liu^{1,2}, Yongjun Zhu^{1,2}, Chunfeng Di^{1,2}, Xiongfeng Zheng^{1,2}

¹Hubei Heju Polymer Materials Co., Ltd., Jingzhou Hubei

²Wuhan Heju Industrial Co., Ltd., Wuhan Hubei

Received: September 21, 2026; accepted: October 16, 2026; published: October 26, 2026

*通讯作者。

文章引用: 万超, 李陵洲, 刘诗, 朱永军, 狄春峰, 郑雄峰. 高填充玻璃纤维增强 MXD6 复合材料的制备及综合性能研究[J]. 材料科学, 2026, 16(10): 153-163. DOI: 10.12677/ms.2026.1610200

Abstract

To explore how the cross-sectional morphology of glass fibers affects semi-aromatic nylon composites, this study prepared MXD6 composites reinforced with 60% highly filled flat and round glass fibers, systematically investigating how fiber shape impacts the material's structure and overall performance. The results show that fiber morphology doesn't affect the functional group structure of the MXD6 matrix, but it can distinctly influence the material's crystallization, melting, and thermal degradation properties. The round glass fiber system has a higher crystallization temperature, and both systems show double melting peaks; flat glass fibers, however, can increase the material's thermal decomposition temperature and the temperature of maximum decomposition rate, effectively improving the thermal stability of the composites. Under high filler conditions, flat glass fibers, due to their unique cross-sectional structure, increase the interfacial contact area, overcoming the performance limitations of traditional round glass fiber systems. This enables a synergistic improvement in strength, rigidity, impact toughness, and processing flow of the materials, while reducing water absorption and optimizing the retention of thermal-humidity aging performance, addressing issues of poor moldability and hydrothermal stability in highly filled glass fiber nylon. The study indicates that simply optimizing the cross-sectional morphology of glass fibers can efficiently enhance the overall performance of highly filled MXD6 composites and can provide a reference for the development and application of semi-aromatic nylon materials in automotive and electronic precision thin-walled structures under humid-heat conditions.

Keywords

MXD6, Round Glass Fiber, Flat Glass Fiber, Mechanical Properties, Water Absorption Rate

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

汽车轻量化发展推动“以塑代钢”在车载结构件领域快速落地，玻纤增强聚酰胺凭借优异的力学与耐热性能，逐步替代部分金属用于各类承载零部件[1]。半芳香族聚酰胺 MXD6 兼具较高模量、低吸水率与良好耐油耐热特性，在高精度汽车结构件中拥有广阔应用前景；但纯 MXD6 力学承载能力有限，通过高含量玻纤填充改性，可进一步提升其刚性与强度，满足重载部件的使用工况[2]。

在玻纤增强聚酰胺改性领域，圆形玻纤与扁平玻纤的性能差异已得到行业与学术界普遍认可。圆形玻纤和树脂基体界面结合良好，增强效率高，可有效提升复合材料拉伸、弯曲性能，是高强改性体系的主流填料；但注塑加工过程中纤维易沿熔体流动方向发生取向，在一定填充条件下材料各向异性显著加剧，制品翘曲变形问题突出[3]。扁平玻纤具备异形截面结构，能够削弱纤维定向排列效应，改善成型收缩不均，显著降低制件翘曲程度，提升尺寸精度[4][5]。另外，有研究表明将两种玻纤复配使用，可以在力学性能和低翘曲之间实现性能平衡[6]。

现有研究大多聚焦于 30%~40% 中低玻纤填充的聚酰胺体系，针对 MXD6 的玻纤增强研究也多集中于 50% 及以下填充比例，60% 超高填充下系统对比圆形玻纤、扁平玻纤对 MXD6 性能影响的相关报道较少。已有研究表明，经高含量玻纤填充改性后的聚酰胺材料可实现较高比强度，在汽车电驱基座、承载支架、冷却系统壳体等重载零部件领域具备以塑代钢的应用潜力。但提升至 60% 超高填充水平后，两种

截面玻纤对 MXD6 力学、吸湿性、尺寸稳定性及热性能的调控规律尚不清晰。

为此, 本文采用 60% (质量分数) 填充量, 分别制备圆玻纤、扁平玻纤增强 MXD6 复合材料, 对比两类玻纤对材料各项性能的影响, 揭示玻纤截面形态的作用机制, 为超高填充 MXD6 在汽车轻量化零部件的配方开发与工程应用提供实验依据。

2. 实验部分

2.1. 主要原料

聚己二酰间苯二甲胺: MXD6 (ZYM5-5001), 中化国际; 玻璃纤维: ECS301HP-3-H、ECS301HP-3-M4 (横截面长宽的比值为 4) 重庆国际复合材料股份有限公司; 玻璃纤维: ECS10-03-568HD, 中国巨石股份有限公司; 增韧剂: W1G, 科艾斯化学有限公司; 抗氧化剂: 四 N,N'-双-(3-(3,5-二叔丁基-4-羟基苯基) 丙酰基) 己二胺: 1098, 德国巴斯夫公司; 抗氧化剂: 亚磷酸三异辛酯: 608, 奇钛化工科技有限公司; 润滑剂: GM-100A, 中蓝晨光化工有限公司; 润滑剂: PETS, 美国龙沙集团。

2.2. 设备与仪器

双螺杆挤出机: TE35, 南京瑞亚挤出机械设备有限公司; 电热鼓风干燥箱: DHQ-9245A, 上海一恒科学仪器有限公司; 注塑机: 90F2V, 东华机械有限公司; 万能拉力试验机: CMT4204, 美斯特工业系统(中国)有限公司; 熔体流动速率试验机: ZRZ1452, 美斯特工业系统(中国)有限公司; 简支梁冲击试验机: ZBC-1251-A, 美斯特工业系统(中国)有限公司; Nicolet 系列傅立叶变换红外光谱仪: IS20, 赛默飞世尔科技(中国)有限公司; 热重分析仪: TGA, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司; 差式扫描量热仪: DSC-3, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司。扫描电子显微镜(SEM): JSM-IT800, 电子株式会社。

2.3. 复合材料制备(表 1)

Table 1. Formulation of MXD6/GF composites (%)

表 1. MXD6/GF 复合材料的配方(%)

材料编号	MXD6	玻璃纤维	增韧剂	抗氧化剂	润滑剂	其他助剂
1#	34.6	60	3	0.4	1.5	0.5
2#	34.6	60	3	0.4	1.5	0.5
3#	34.6	60	3	0.4	1.5	0.5

1#ECS301HP-3-H; 2#ECS301HP-3-M4; 3#ECS10-03-568HD。

将 MXD6 于 80℃~100℃ 下鼓风干燥 3~4 h, 按照配比与其他原材料混合均匀后, 挤出、造粒, 挤出温度 230℃~250℃, 调整螺杆转速和侧喂料转速, 控制玻纤含量, 所得粒料经 80℃~100℃ 下鼓风干燥 3~4 h, 在注塑机上注塑成标准的力学性能测试样条。样条在恒温恒湿箱中放置 24 h 后, 按照国家标准测试。

2.4. 性能测试及表征

2.4.1. 力学性能测试

拉伸强度按 ISO 527 测试, 拉伸速率 50 mm/min; 弯曲强度按 ISO 178 测试, 测试速率 1 mm/min; 简支梁缺口冲击强度按 ISO 179 测试; 熔体质量流动速率(MFR)按 ISO1133 测试。

2.4.2. 红外测试

使用衰减全反射附件, 将复合材料与溴化钾按比例 1:100 及样品取 1~2 mg 进行压片来测试, 测试范

围为 500~4000 cm^{-1} 。

2.4.3. DSC 测试

称取 5~10 mg 干燥试样，在 N_2 保护下，以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率从 100°C 加热到 280°C ，恒温 5min 以消除热历史。然后以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 的降温速率从 280°C 降到 100°C ，记录降温曲线，再以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率从 100°C 升到 280°C ，记录升温曲线。

2.4.4. 热重测试

称取 5~10 mg 干燥试样，在 N_2 保护下，以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率从 30°C 加热到 800°C ，记录升温曲线。

2.4.5. 耐水解性能测试

将拉伸、弯曲和缺口冲击样条分别放在 90° 水浴中水煮 72 h/144 h 和 240 h 后测试力学性能。

2.4.6. 吸水率测试

吸水率按 ISO 62 测试，方法 1： 23°C 冷水中浸泡 24 h/48 h/96 h/192 h 测试四个循环；方法 2：沸水中煮 30 min 后冷水中浸泡 15 min 为一个循环，测试十七个循环。

2.4.7. SEM 表征

将弯曲样条于液氮下脆断，在 80°C 恒温真空中干燥 48 h，表面喷金处理，加速电压 3 kV，分别在 200 倍和 500 倍下观察断面形貌。

3. 结果与讨论

3.1. 不同玻纤增强对 MXD6 材料的结构和热性能影响

3.1.1. 复合材料官能团红外光谱分析

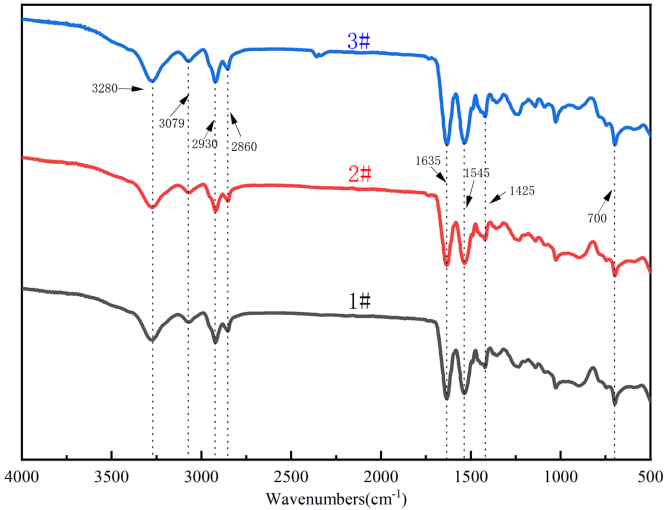


Figure 1. Infrared spectra of different glass fiber reinforced MXD6 materials
图 1. 不同玻纤增强 MXD6 材料红外图谱

如图 1，三种复合材料都包含了 MXD6 吸收峰，如 3280 cm^{-1} 附近为酰胺键 N-H 伸缩振动的特征峰，波数 3079 cm^{-1} 附近处为酰胺键中 N-H 弯曲振动与 C-N 伸缩振动的倍频， 2930 cm^{-1} 和 2860 cm^{-1} 附近处

为亚甲基-CH₂-的伸缩振动吸收峰。1635 cm⁻¹ 处的酰胺 I 峰(C=O 伸缩振动引起)、1545 cm⁻¹ 附近的酰胺 II 峰(N-H 变形振动引起)、1425 cm⁻¹ 处的亚甲基的弯曲振动峰[7]-[9]。1239 cm⁻¹、1028 cm⁻¹ 处为 MXD6 苯环 C-H 面内弯曲振动吸收峰, 700 cm⁻¹、750 cm⁻¹、789 cm⁻¹ 为 MXD6 特有的吸收峰[10], 由此可以看出不同类型的玻纤增强 MXD6 复合材料后, 并未使 MXD6 核心结构发生明显改变。

3.1.2. 复合材料熔融与结晶 DSC 分析

在 60 wt%圆形玻纤与扁平玻纤增强 MXD6 复合材料中, 玻纤截面形态对体系结晶行为、熔融特性及热降解性能均存在一定调控作用。由图 2 中 DSC 测试表明, 1#和 3#号圆形玻纤增强 MXD6 结晶温度高于 2#号扁平玻纤体系, 可能是由于圆形玻纤表面曲率更大、异相成核位点更集中, 可在更高温度下诱导 MXD6 分子链快速规整排列, 成核效率与结晶完善度更优; 而扁平纤维的大截面和平面取向特征在熔体中改变了分子链的运动空间和堆砌方式, 纤维之间的平面堆叠可能在局部形成对分子链扩散的物理限制, 干扰了链段向晶核表面的有序排列, 最终导致晶体完善程度和结晶度小幅下降。熔融曲线均在 222℃与 237℃左右出现双重熔融峰, 其中 237℃对应 MXD6 完善晶区熔融, 222℃为界面受限区不完善微晶熔融; 圆形玻纤体系高温熔融峰占比更高, 进一步印证其结晶更规整。

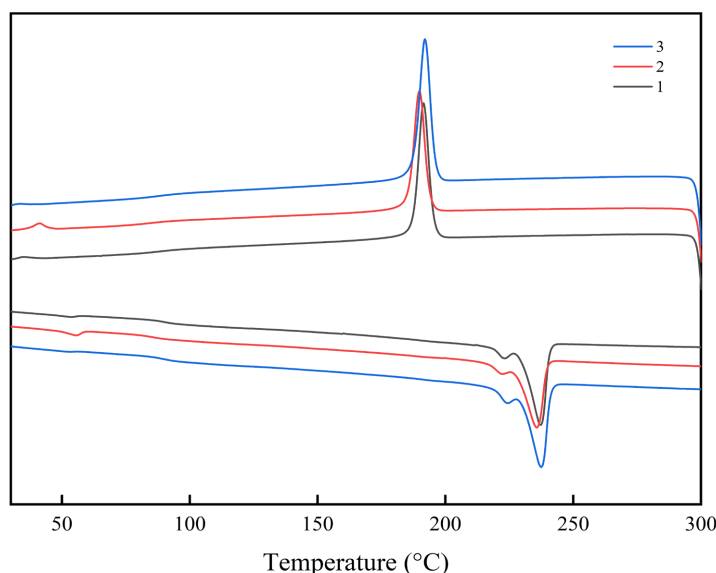


Figure 2. DSC curves of different glass fiber reinforced MXD6 materials

图 2. 不同玻纤增强 MXD6 材料的 DSC 曲线

3.1.3. 复合材料热稳定性能 TGA 分析

由图 3 中 TGA-DTG 曲线结果显示, 1#、3#圆玻纤增强 MXD6 的热分解起始温度均为 396℃, 2#扁平玻纤试样热分解起始温度提升至 402℃, 较圆玻纤体系提高 6℃, 表明同等填充量下扁平玻纤可小幅改善复合材料的热稳定性。扁平玻纤具有更大比表面积, 可与 MXD6 基体形成更广泛的界面相互作用, 束缚高分子链段的热运动; 同时纤维在基体内部形成交错的物理阻隔网络, 抑制热降解小分子向外扩散, 延缓基体热降解进程。DTG 曲线显示三组样品均呈现单一尖锐分解峰, 说明玻纤截面形态不会改变 MXD6 主链断裂的热降解机理。1#、3#圆玻纤试样最大热分解速率温度均为 408℃, 2#扁平玻纤试样最大热分解速率温度达到 415℃, 高于圆玻纤体系。该结果进一步说明扁平玻纤构建的阻隔网络不仅推迟初始降解发生, 同时也提升了材料发生最大降解速率对应的温度, 整体热稳定性能优于圆玻纤改性体系。

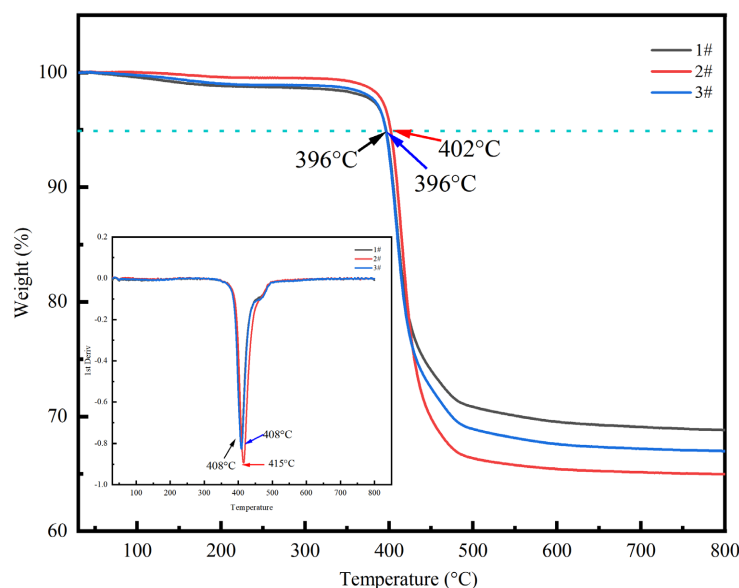


Figure 3. TGA-DTG curves of different glass fiber reinforced MXD6 materials
图 3. 不同玻纤增强 MXD6 材料的 TGA-DTG 曲线

3.2. 不同玻纤增强对 MXD6/GF 复合材料的性能影响

3.2.1. 机械性能

从表 2 中可以看出, 2#扁平玻纤增强体系的拉伸强度(256.2 MPa)、弯曲强度(349.5 MPa)、弯曲模量(21095 MPa)及缺口冲击强度(13.7 kJ/m²)均优于 1#和 3#圆玻纤体系, 同时其熔体流动速率(12.7 g/10 min)也高于两组圆玻纤样品。推测可能是界面应力传递与临界纤维长度两方面造成。研究表明, 在纤维截面积相等的条件下, 非圆形截面纤维的周长始终大于圆形截面纤维, 由此导致扁平玻纤与基体的界面接触面积增大, 界面剪切应力降低, 从而需要更高的外加载荷才能引发界面脱粘与复合材料失效。此外, Thomason 基于 Kelly-Tyson 理论的分析模型指出, 扁平截面纤维的临界纤维长度(L_c)较等截面积圆玻纤可降低最高达 30%, 这意味着在相同纤维长度分布下, 扁平玻纤体系中超过临界长度的有效承载纤维比例更高, 纤维对复合材料强度的贡献更大[11] [12]。

此外, 如图 4(a)扁平玻纤和图 4(b)圆玻纤增强 MXD6 的断面 SEM 图可以看出, 扁平玻纤有一定的扁平比, 其横截面为矩形结构, 具有一定的宽厚比, 在螺杆截切时该截面方向在垂直于熔体流动方向上定向排布, 从而减小了流动方向和垂直于流动方向上的玻纤的分布差异, 从而使得玻纤与树脂界面的面积增大, 因此在复合材料承受外力作用时, 表现出更优异的力学性能。

值得注意的是, 孟凡地等在不同截面类型玻纤增强 PA6 基体中的研究发现, 相同玻纤含量下扁平玻纤体系刚性略低于圆玻纤体系, 而缺口冲击强度和 MFR 较高, 这与本研究中扁平玻纤力学性能全面占优的结果存在差异, 可能是 MXD6 主链含有间苯二亚甲基芳香环结构, 分子链刚性更高。扁平玻纤具备更大的界面接触面积, 能够强化硅烷偶联剂构建的界面相互作用, 硅烷偶联剂通过 Si-O-Si 共价键锚固于玻纤表面, 偶联剂分子另一端的氨基可与 MXD6 分子链上的酰胺基团形成氢键, 有望在纤维表面形成稳定界面晶层, 提升界面剪切强度。同时 MXD6 熔体黏度更高, 更有利于扁平玻纤在加工剪切场中维持扁平截面形态, 充分发挥其高宽厚比承载优势, 实现刚韧协同提升。

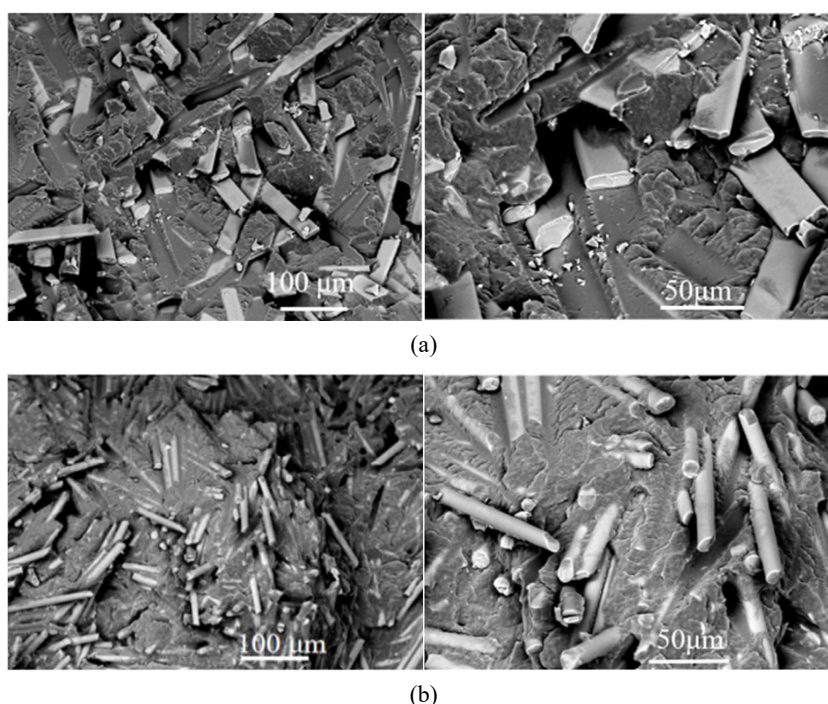
熔体流动速率方面, 2#扁平玻纤体系 MFR 为 12.7 g/10 min, 高于 1# (10.1 g/10 min)和 3# (5.2 g/10 min)。这是由于扁平玻纤类似矩形横截面使其在加工过程中更容易沿平面方向排布流动; 与圆形玻纤相

比，其对熔体的阻挡作用更弱，能够减小共混体系的摩擦阻力。

Table 2. Mechanical properties of MXD6 composites reinforced with different glass fibers

表 2. 不同玻纤增强 MXD6 复合材料力学性能

样品编号	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	弯曲强度/MPa	弯曲模量/MPa	缺口冲击强/ $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$	MFR/g/10 min
1#	240.4	1.7	325.5	19,927	11.9	10.1
2#	256.2	1.9	349.5	21,095	13.7	12.7
3#	254.8	1.7	337.8	19,758	13.0	5.2



(a)和(b)左为 $\times 200$ 倍频下；(a)和(b)右为 $\times 500$ 倍频下

Figure 4. (a) SEM images of the fracture surfaces of MXD6 reinforced with flat glass fibers and (b) MXD6 reinforced with round glass fibers

图 4. (a) 扁平玻纤和(b) 圆玻纤增强 MXD6 的断面 SEM 图

3.2.2. 耐水解性能

表 3~5 中可以看出 1#、2#和 3#复合材料在经过 240 h 水煮后，其拉伸强度和弯曲强度相比常态的拉伸和弯曲强度的保持率不足 50%，但是水煮后缺口冲击比常态的都有大幅度增加。其主要原因可能是：热水环境中水分子不断向复合材料内部扩散，一方面造成偶联剂水解，使玻纤 - 基体界面粘结强度显著衰减；另一方面极性基体吸水发生塑化，长时间热水作用还会诱发高分子链水解降解。玻纤本身在热水环境下力学性能基本稳定，拉伸与弯曲性能高度依赖纤维 - 基体间的界面载荷传递，界面结合力下降后，外加载荷无法有效由基体传递至玻纤，复合材料的承载能力大幅下降，因此拉伸、弯曲强度保持率显著降低；而复合材料的缺口冲击强度随水煮老化时间延长逐步上升，其主要原因是水分子扩散渗入 MXD6 基体的非晶区，与酰胺基团形成氢键，对 MXD6 产生物理水增塑作用[13][14]，提升分子链段运动能力，改善基体本征韧性。

Table 3. Mechanical properties of #1 composite material after water absorption
表 3. 1#复合材料吸水后力学性能

样品编号	拉伸强度/MPa	断裂伸长率%	弯曲强度/MPa	弯曲模量/MPa	缺口冲击强 /kJ·m ⁻²
1#	240.4	1.7	325.5	19927	11.9
1#-1	119.9	3.3	138.3	10348	17.7
1#-2	111.1	3.9	130.2	9700	18.0
1#3	107.7	2.6	141.8	11070	17.7
保持率%	45	/	44	56	/

1#-1: 90℃水浴 72 h; 1#-2: 90℃水浴 144 h; 1#-3: 90℃水浴 240 h。

Table 4. Mechanical properties of #2 composite material after water absorption
表 4. 2#复合材料吸水后力学性能

样品编号	拉伸强度/MPa	断裂伸长率%	弯曲强度/MPa	弯曲模量/MPa	缺口冲击强 /kJ·m ⁻²
2#	256.2	1.9	349.5	21095	13.7
2#-1	152.0	2.7	169.1	11989	18.5
2#-2	130.3	3.2	153.3	11457	19.0
2#3	125.3	2.1	163.4	11948	18.8
保持率%	49	/	47	57	/

2#-1: 90℃水浴 72 h; 2#-2: 90℃水浴 144 h; 2#-3: 90℃水浴 240 h。

Table 5. Mechanical properties of #3 composite material after water absorption
表 5. 3#复合材料吸水后力学性能

样品编号	拉伸强度/MPa	断裂伸长率%	弯曲强度/MPa	弯曲模量/MPa	缺口冲击强 /kJ·m ⁻²
3#	254.8	1.7	337.8	19758	13.0
3#-1	128.2	2.2	144.7	10544	17.1
3#-2	118.5	2.8	139.9	10620	16.6
3#3	121.1	2.5	138.4	10343	19.6
保持率%	48	/	41	52	/

3#-1: 90℃水浴 72 h; 3#-2: 90℃水浴 144 h; 3#-3: 90℃水浴 240 h。

此外，扁平玻纤增强的复合材料 240 h 耐水解力学性能保持率略高于普通玻纤增强的复合材料，推测主要原因是：湿热环境下，水分子渗透纤维 - 基体界面导致偶联层水解，扁平玻纤具有更高的比表面积，能与树脂基体形成更紧密的界面结合，从而能有效阻碍水分子向材料内部的扩散，紧密结合的界面能减少因水分侵入导致的界面脱粘和树脂降解，从而更好地维持材料的整体性，因此扁平玻纤增强的复合材料吸水后的力学性能保持率高于普通玻纤增强的复合材料(图 5)。

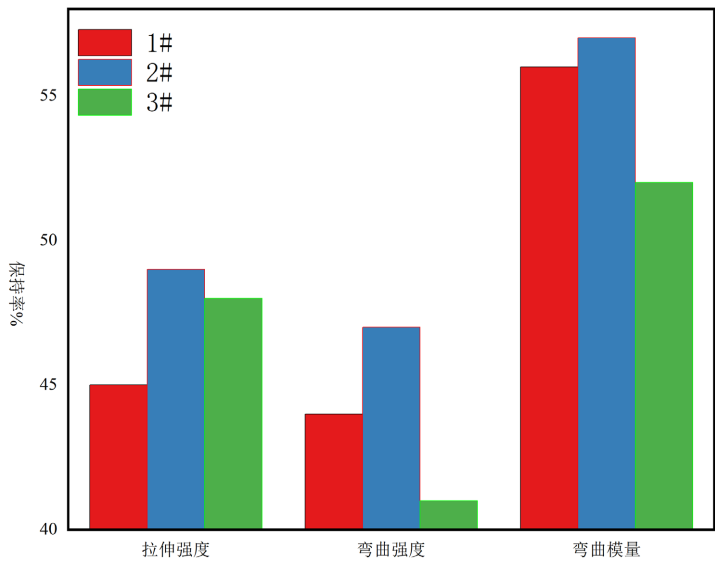


Figure 5. Retention rate of hydrolysis resistance of different glass fiber reinforced MXD6 materials

图 5. 不同玻纤增强 MXD6 材料耐水解性能保持率

3.2.3. 复合材料的吸水率测试

常温冷水浸泡下，两组增强 MXD6 材料吸水率随时间延长逐步上升，且扁平 GF 增强体系吸水率始终低于圆 GF 体系，其主要由于圆 GF 增强 MXD6 因纤维截面各向同性，界面结合均匀性较差，存在更多微缝隙与界面缺陷，水分子更易沿界面扩散进入基体内部。扁平玻纤宽有更高比表面积，与 MXD6 基体形成更大接触界面，界面结合更致密，有效抑制水分子渗透。沸水循环 17 组后，两组材料均未达吸水平衡，但扁平玻纤增强 MXD6 材料的吸水率增幅远低于圆玻纤组。高温会加速水分子运动能力，加剧水分子沿界面扩散与渗透，破坏玻纤与树脂间界面的结合力，成为吸湿快速通道。扁平玻纤与基体界面结合更致密，能有效抑制水分子进入，降低循环老化下的吸湿速率。圆玻纤体系界面结合较弱，湿热作用下界面缺陷快速形成，造成吸水率显著上升(表 6，表 7，图 6)。

Table 6. Method I water absorption measurement%

表 6. 方法一吸水率测定%

类型	23℃水浸泡 24 h 后	23℃水浸泡 48 h 后	23℃水浸泡 96 h 后	23℃水浸泡 192 h
2#	0.131	0.219	0.297	0.398
3#	0.198	0.299	0.385	0.548

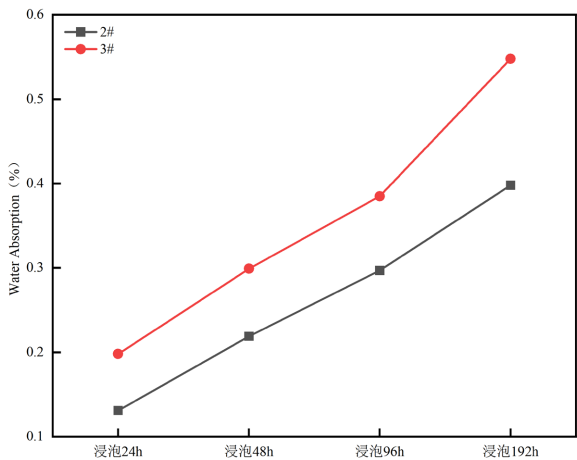
Table 7. Method II water absorption measurement%

表 7. 方法二吸水率测定%

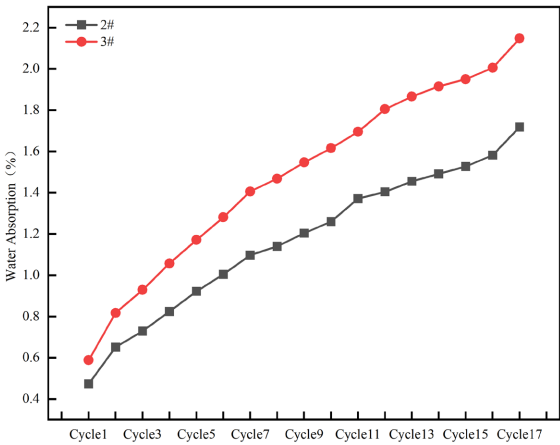
类型	循环 1	循环 2	循环 3	循环 4	循环 5	循环 6	循环 7	循环 8	循环 9
	0.473	0.651	0.729	0.824	0.922	1.004	1.097	1.140	1.204
2#	循环 10	循环 11	循环 12	循环 13	循环 14	循环 15	循环 16	循环 17	
	1.26	1.371	1.404	1.455	1.491	1.527	1.582	1.718	

续表

	循环 1	循环 2	循环 3	循环 4	循环 5	循环 6	循环 7	循环 8	循环 9
3#	0.588	0.817	0.929	1.057	1.171	1.281	1.406	1.468	1.547
	循环 10	循环 11	循环 12	循环 13	循环 14	循环 15	循环 16	循环 17	
	1.616	1.695	1.805	1.866	1.915	1.950	2.005	2.148	



(a) 冷水浸泡吸水率趋势



(b) 沸水煮吸水率趋势

Figure 6. Trend of water absorption rate of different glass fiber reinforced MXD6

图 6. 不同玻纤增强 MXD6 吸水率趋势

4. 结论

(1) 玻纤截面形态不会改变 MXD6 基体的特征官能团,但可实现对复合材料结晶、熔融及热降解行为的定向调控。相较于圆玻纤,扁平玻纤虽然不会改变基体化学结构,但可提升体系热分解温度与最大分解速率温度,赋予材料更优的热稳定性;圆玻纤体系则表现出更高的结晶温度,两种玻纤填充体系均存在双重熔融峰。

(2) 在 60%高填充条件下,扁平玻纤突破传统圆玻纤增强 MXD6 的性能瓶颈,在强度、刚性、冲击韧性与加工流动性上实现协同提升;同时该体系吸水率更低,湿热老化后力学保持率更高。扁平玻纤特殊的截面形态增大纤维-基体界面接触面积,在高填充下兼顾力学增强与薄壁注塑成型性,缓解了高填充玻纤尼龙普遍存在的流动性差、湿热尺寸稳定性不足的工程难题,可应用于汽车发动机周边构件、电子连接器等耐湿热薄壁精密结构件,为高填充半芳香尼龙复合材料的设计提供新的思路。

基金项目

荆州市揭榜制科技项目(2025JA04);湖北省科技人才服务企业项目(2026DJB082)。

参考文献

- [1] 龚梦晴,夏玉洁,武金龙. 玻纤含量对汽车用玻纤增强尼龙复合材料性能的影响[J]. 山东化工, 2024, 53(10): 81-84.
- [2] 蒋爱云,刘学文,闫盼盼,等. 玻纤增强尼龙 MXD6 复合材料制备与性能[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(1): 17-21.
- [3] 孟凡地,吴承然,易琪伟,等. 不同截面类型玻纤增强 PA6 的性能[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(7): 43-48.

-
- [4] 黄锋, 董鑫, 聂丹, 等. 高强度低翘曲 PA6 板专用料研制[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(11): 25-29.
 - [5] 何勇, 彭珂, 曾庆文, 等. 高强度低翘曲 PA66 复合材料的研究[J]. 玻璃纤维, 2016(6): 12-16.
 - [6] 许鸿基, 冯德才, 郑一泉, 等. 圆玻纤和扁平玻纤复配增强 PA6 及其性能研究[J]. 广东化工, 2019, 46(5): 71-73.
 - [7] 李鹤飞. 半芳香族耐高温尼龙 PA6T-66 的制备与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 东华大学, 2022.
 - [8] 朱吴兰. 红外光谱法鉴别不同种类的聚酰胺[J]. 塑料, 2009, 38(3): 114-117.
 - [9] 李洪. 傅立叶红外光谱(ATR)法鉴别尼龙 6 和尼龙 66 [J]. 合成材料老化与应用, 2020, 49(1): 53-54.
 - [10] 伍威, 曹凯凯, 高敬民, 等. 共聚改性尼龙 MXD6 的制备与表征[J]. 塑料工业, 2018, 46(8): 51-54.
 - [11] Thomason, J. (2023) The Influence of Fibre Cross Section Shape and Fibre Surface Roughness on Composite Micromechanics. *Micro*, **3**, 353-368. <https://doi.org/10.3390/micro3010024>
 - [12] Thomason, J., Carlin, A. and Yang, L. (2024) Non-Circular Cross-Section Fibres for Composite Reinforcement—A Review with a Focus on Flat Glass Fibres. *Fibers*, **12**, Article 98. <https://doi.org/10.3390/fib12110098>
 - [13] 杨浩. 长玻璃纤维增强尼龙 6 复合材料的结构与服役行为研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2016.
 - [14] 陈雨玲, 伍玉娇, 蒙日亮. PP/PA6/APP/OMMT 复合材料的湿热老化性能研究[J]. 工程塑料应用, 2010, 38(10): 68-71.