碳纤维增强热塑性酚醛树脂基复合材料的性能研究

方怀山[1],李文学[1],许俊桃[1],卢万丛[2],马雨豪[2],许山山[1,2]*

(1.山东方大新材料科技有限公司,山东 淄博 255049;2.山东理工大学材料科学与工程学院,山东 淄博 255049)

摘　要: 以热塑性酚醛树脂(PF)为基体,以表面改性处理的碳纤维(CF)为增强体制备CF/PF复合材料,系统研究CF含量及成型工艺对复合材料力学性能与界面结合状态的影响。结果表明:改性后的CF与热塑性PF具有良好的界面相容性。随着CF含量的增加,CF/PF复合材料力学性能显著增强。当CF质量分数为8%时,注塑成型得到的CF/PF复合材料拉伸强度达到最大值,为19.06 MPa,较热压成型试样的10.22 MPa提高86.5%。冲击强度也随着CF含量的增加而提高。研究可为热塑性PF基复合材料在高端领域的应用提供潜在价值。

关键词: 热塑性酚醛树脂;复合材料;碳纤维;力学性能

中图分类号: TQ327.3　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1005-3360(2026)09-0024-05

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.09.005

Study on Properties of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Phenolic Resin-based Composites

FANG Huaishan[1], LI Wenxue[1], XU Juntao[1], LU Wancong[2], MA Yuhao[2], XU Shanshan[1,2]*

(1. Shandong Fangda New Material Technology Co. , Ltd. , Zibo 255049, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: Thermoplastic phenolic resin (PF) was employed as the matrix, and surface-modified carbon fiber (CF) was used as the reinforcement to prepare CF/PF composites. The effects of CF content and molding process on the mechanical properties and interfacial bonding state of the composites were systematically investigated. The results indicated that the modified CF exhibited good interfacial compatibility with thermoplastic PF. The mechanical properties of CF/PF composites were significantly enhanced with increasing CF content. When the CF mass fraction reached 8%, the tensile strength of the injection-molded CF/PF composite attained its maximum value of 19.06 MPa, representing an 86.5% increase compared with the 10.22 MPa obtained for the hot-pressed specimen. The impact strength also improved with increasing CF content. The research can provide potential value for the application of thermoplastic PF-based composites in high-end fields.

Keywords: Thermoplastic phenolic resin; Composites; CF; Mechanical properties

热塑性酚醛树脂(PF)作为一种经典的高分子材料,因其具有良好的机械强度和耐高温性能,在汽车制造、建筑建材、航空航天等对耐热性要求较高的领域应用广泛[1-3]。但是PF结构中苯环的存在使酚醛链段刚性较大,导致树脂的抗冲击性和耐湿热性不足,阻碍其在高端装备制造中的规模化应用[4-6]。

传统改性思路多以共混法为核心,通过引入无机填料提升性能[7-9]。无机填料通过无机颗粒的增强效应提升改性树脂的刚性与耐热性,同时降低热膨胀系数(CTE),从而优化尺寸稳定性[10-12]。如MA等[13]对氧化石墨烯(GO)进行

收稿日期Submitted date 2025-08-23;修回日期Revised date 2025-09-15;录用日期Accepted date 2025-10-20

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2022QB159);山东省自然科学基金项目(ZR2022QB173);山东省自然科学基金项目(ZR2022QB082);山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2024TSGC0666)

*联系人,xushanshan@sdut.edu.cn

引用本文:方怀山,李文学,许俊桃,等.碳纤维增强热塑性酚醛树脂基复合材料的性能研究[J].塑料科技,2026,54(9):24-28.

Citation:FANG H S, LI W X, XU J T, et al. Study on properties of carbon fiber reinforced thermoplastic phenolic resin-based composites[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(9): 24-28.

功能化氨基修饰后，制备改性PF复合材料。结果表明：适量的氨基可显著提高PF/GO的机械性能。WANG等[14]采用GO对PF进行改性，改性后复合材料的耐热性大幅提升。由于GO与PF的相容性较差，无机填料易在树脂内形成团聚，使复合材料内部形成应力集中点，降低界面结合性能与力学性能[15-18]。碳纤维(CF)作为高性能增强材料，具有高比强度和比模量的特性[19-21]。与树脂材料共混可赋予复合材料优异的力学强度，且不会显著增加其质量。CF还具有优异的耐热性能、耐腐蚀性能及抗摩擦性能，使CF增强复合材料在复杂恶劣的工作环境中能够稳定运行[22-25]。

本研究选用CF作为增强体，研究CF含量对PF复合材料界面结构及力学性能的影响，以期得到力学性能优异、结构稳定的复合材料。

1 实验部分

1.1 主要原料

热塑性PF，分析纯，山东宝沣新材料有限公司；CF，T700SC，苏州研之德碳纤维复合材料有限公司；硅烷偶联剂，KH560，南京经天纬化工有限公司；脱模剂，分析纯，美国迈克国际有限公司；无水乙醇，分析纯，天津市富宇精细化工有限公司；抗氧化剂，168，东莞市鼎海塑胶化工有限公司。

1.2 仪器与设备

电子分析天平，JC-JA，青岛精诚仪器仪表有限公司；傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)，TENSOR 27，德国Bruker公司；塑料破碎机，SF-180，深圳市博世泰机械有限公司；差示扫描量热仪(DSC)，PT 1000，深圳市世强元件网络有限公司；转矩流变仪，RM-200A，哈尔滨哈普电气技术有限责任公司；电动加硫成型机，XH-406B，锡华检测仪器有限公司；微型注塑机，WZS-100，上海新硕精密机械有限公司；电子万能试验机，WDW-20，吉林冠腾自动化技术有限公司；塑料摆锤冲击试验机，PIT501J-2，深圳万测试验设备有限公司；空气压缩机，LB-638F，潍坊利得机械有限公司；扫描电子显微镜(SEM)，S4800，日立高新公司。

1.3 样品制备

首先，使用马弗炉将CF在300 ℃下烧制1 h，去除CF表面的上浆剂。将硅烷偶联剂溶解于乙醇等有机溶剂中，配制成质量分数为1%的溶液。将预处理后的CF浸入配制好的硅烷偶联剂溶液中，于40 ℃反应2 h。反应结束后，取出CF，用乙醇清洗去除表面未反应的硅烷偶联剂。然后在60 ℃下干燥4 h，得到硅烷改性CF。

表1为CF/PF复合材料的配方。将硅烷改性CF与热塑性PF按照表1配方与抗氧剂放入转矩流变仪内进行混合。温度设置为130 ℃，每组样品的混料时间为5 min。取出置于冷却水中降温，在烘箱内烘干后，得到CF/PF复合材料颗粒，用微型注塑机将其注塑成哑铃形测试样条，测其力学性能。

表1 CF/PF复合材料的配方

Tab.1 Formula of CF/PF composites 单位：%

试样编号	w_{PF}	w_{CF}
M_1	98	2
M_2	96	4
M_3	94	6
M_4	92	8

热压成型试样：使用无水乙醇擦拭模具表面，以去除油污，喷涂脱模剂确保脱模顺畅。将粉碎后的CF/PF复合材料颗粒均匀加入模具中，在温度135 ℃、压力5 MPa条件下预热15 min，保压15 min。使用电动加硫成型机进行热压成型，其间进行多次短暂泄压以排除气泡。保压结束后采用水冷系统将模具降温至60 ℃以下，防止制品因温差应力变形，得到CF/PF复合材料热压板材，再将板材裁剪为宽10 mm左右的样条，用于后续性能测试。

注塑成型试样：使用无水乙醇擦拭模具表面，以去除油污，随后喷涂脱模剂确保脱模顺畅。将空气压缩机连接至微型注塑机，将粉碎后的CF/PF复合材料颗粒加入微型注塑机中。在温度135 ℃、压力5 MPa的条件下注塑，保压20 s后冷却，得到CF/PF复合材料注塑样条。

1.4 性能测试与表征

FTIR测试：用傅里叶变换红外光谱仪对PF和CF/PF复合材料进行测试，测试范围4 000~500 cm^{-1}。

拉伸性能及弯曲性能测试：用电子万能试验机分别测试两种工艺下得到的样条的拉伸强度、断裂伸长率以及弯曲强度。其中，热压成型试样厚度约4 mm，中间平行部分宽度约13 mm；注塑成型试样为厚度4 mm，中间平行部分宽度10 mm的II型哑铃形样条。拉伸速率为100 mm/min；弯曲速率为2 mm/min。

冲击性能测试：使用塑料摆锤冲击试验机分别对两种工艺下得到的样条进行测试，试样尺寸与拉伸性能测试一致。测试前对样条进行开口处理，开口深约为2 mm。

DSC测试：对样品的结晶温度和熔融温度进行测试。升温速率10 ℃/min，测试范围30~250 ℃。

2 结果与讨论

2.1 CF/PF复合材料的结构表征

图1为PF与M_4的FTIR谱图。从图1可以看出，PF在3 292 cm^{-1}处以及M_4在3 299 cm^{-1}处的吸收峰均由酚羟基(—OH)的伸缩振动引起，表明PF以及M_4中均存在—OH官能团。1 593 cm^{-1}与1 507 cm^{-1}处的吸收峰与苯环的振动相关，说明二者均具有苯环结构，这也是PF结构的重要特征之一。1 216 cm^{-1}处的吸收峰对应C—O键的伸缩振动，意味着材料中存在醚键等含C—O的结构。753 cm^{-1}处的吸收峰与苯环上氢原子的面外弯曲振动有关，进一步证实苯环结构的存在。而PF和M_4在500 cm^{-1}和507 cm^{-1}处的吸收峰可能与材料中的一些特殊官能团振动有关。

总体来看，PF和CF/PF复合材料的主要吸收峰位置基本一致，这说明CF在改性过程中并没有破坏PF的主要官能团结构。然而，CF/PF复合材料在部分峰的强度和形状上与PF曲线存在差异。很可能是由于在改性过程中引入的CF与PF发生相互作用，从而改变官能团的振动环境。

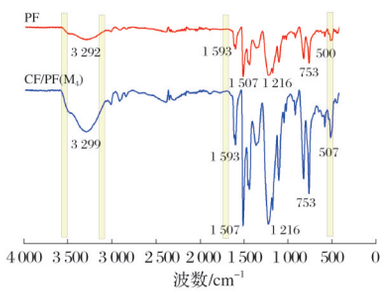


图1 PF与M_4的FTIR谱图

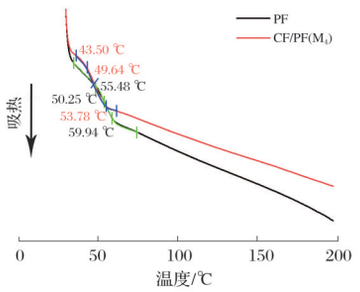
Fig.1 FTIR spectra of PF and M_4

2.2 CF/PF复合材料的热力学性能分析

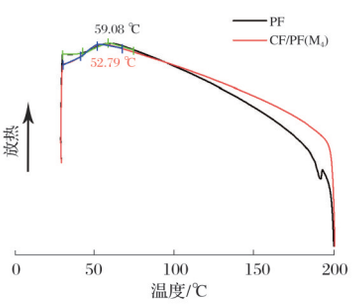
图2为PF与M_4的DSC曲线。总体来看，在温度较低时两者热流放热峰相似，随着温度上升逐渐相差明显。从图2a可以看出，PF的DSC熔融曲线呈现多组吸热特征峰，温度依次为50.25、55.48、59.94 ℃。这一现象与PF的预聚体结构密切相关，多步吸热峰直接反映了PF预聚体分子质量分布的多分散性及交联程度的不均一性。M_4的熔融温度为43.50、49.64、53.78 ℃，各特征熔融温度较PF明显降低，且温度区间向低温偏移。主要归因于CF与PF基体的界面作用，具体体现在以下两个方面：一方面，CF表面的含氧官能团与PF分子链形成化学键合，限制了树脂分子链的自由运动，同时破坏了PF自身的交联网络规整性，抑制了高交联度预聚体的形成；另一方面，CF的填充作用使PF基体中低分子质量片段的分布更集中，导致熔融过程的热转变主要以低交联度片段为主导，最终表现为CF/PF复合材料熔融温度降低以及吸热峰分步特征减弱。从图2b可以看出，PF的结晶温度为59.08 ℃，这一温度特征与PF的分子链规整性及反应活性相关。PF预聚体的线性片段具有一定的分子链规整度，分子链可克服内旋转阻力，实现有序排列并形成局部结晶区。M_4的结晶温度较PF呈现降低现象，表明CF对PF的结晶过程具有抑制作用。具体而言，CF表面的高比表面积及官能团吸附作用使PF分子链被固定在纤维表面形成界面层，该界面层中的分子链难以脱离束缚进行规整排列。

2.3 CF/PF复合材料的表面形貌

图3为M_4的SEM照片。从图3可以看出，CF在PF基体中呈现均匀的分散状态，未观察到明显的纤维团聚现象。在高放大倍数观察下，经偶联剂改性的CF与PF基体间界面结合紧密，无显著空隙存在。这一特征直接证明改性处理能够有效改善CF与PF的相容性。良好的界面相容性可促进应力在纤维与基体间的高效传递，有利于提升CF/PF复合材料的力学性能及综合性能。此外，SEM照片中显示的少量空洞，为样品制备过程中CF被切断后留下的痕迹，属于制样过程中的正常现象，不会对CF/PF复合材料的实际使用性能产生不利影响。



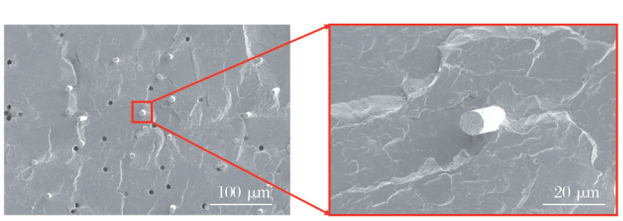
(a) 熔融曲线



(b) 结晶曲线

图2 PF与M_4的DSC曲线

Fig.2 DSC curves of PF and M_4



(a) 1 000× (b) 5 000×

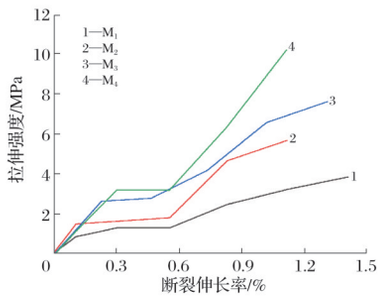
图3 M_4的SEM照片

Fig.3 SEM images of M_4

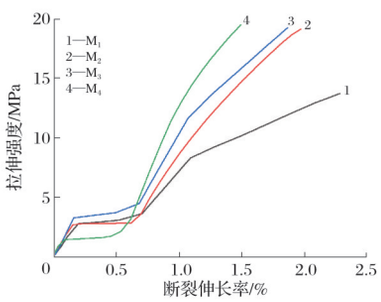
2.4 CF/PF复合材料的力学性能分析

图4为两种工艺下CF/PF复合材料的拉伸性能。总体来看，随着CF质量分数从2%增至8%，CF/PF复合材料的拉伸强度整体呈上升趋势。在断裂伸长率达到一定值时，CF质量分数为8%的样品拉伸强度最高，显著优于CF质量分数为2%的样品，表明增加CF含量可有效提升材料的拉伸强度。从图4a可以看出，在较低断裂伸长率阶段(约0~0.6%)，不同CF含量样品的应力响应差异明显，8% CF(M_4)样品在低断裂伸长率下拉伸强度提升最快。随着断裂伸长率的进一步增加，各样品拉伸强度均持续上升，且CF含量越高，拉伸强度增幅越大，说明高CF含量材料在大变形条件下仍能保持较高的增强效率。值得注意的是，图4b中各样品的拉伸强度较图4a明显提升。该差异可能归因于成型工艺。热压成型过程中虽经多次短暂泄压，但仍有部分气泡残存于树脂内部，拉伸时这些气泡成为应力集中源，导致拉伸强度及断裂伸长率降低；而注塑成型样

品中气泡缺陷较少，因而表现出更高的拉伸强度。



(a) 热压成型



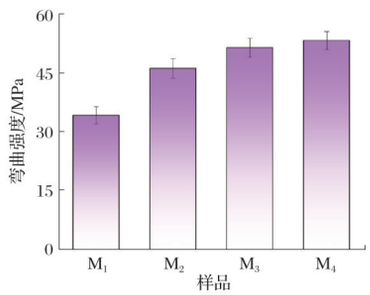
(b) 注塑成型

图 4　两种工艺下 CF/PF 复合材料的拉伸性能

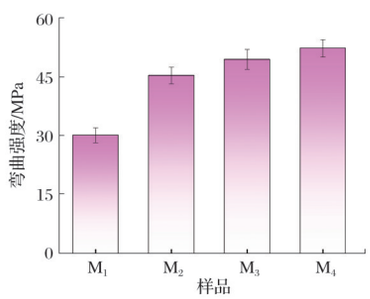
Fig.4 Tensile properties of CF/PF composites under two different processes

图 5 为 CF/PF 复合材料的弯曲强度。从图 5 可以看出，随着 CF 质量分数从 2% 逐步增至 8%，热压成型与注塑成型试样的弯曲强度均呈现出持续上升的趋势，热压成型试样从 34.23 MPa 提高至 53.21 MPa，注塑成型试样从 30.12 MPa 提高至 52.18 MPa。CF/PF 复合材料弯曲强度随 CF 含量增加而提升，可归因于多机制的协同作用。首先，CF 本身具有远优于 PF 基体的高强度与高弹性模量本征特性，作为增强相可直接承担外部弯曲载荷，弥补基体强度短板；其次，随着 CF 含量的增加，复合材料内部参与承力的 CF 数量增多，形成更密集的增强网络，弯曲过程中可通过“裂纹桥接”“纤维拔出”等作用协同承受应力并抑制基体裂纹萌生与扩展；最后，PF 基体既能将 CF 黏结为连续整体，保障载荷在 CF 间的均匀传递并保护 CF 结构完整性，又可与 CF 形成“刚柔并济”的协同效应，借助基体的应力分散作用与 CF 的主承力作用共同优化弯曲性能。综上所述，CF 的本征强化效应、增强网络的密集化以及树脂-纤维协同作用，共同推动了 CF/PF 复合材料弯曲强度的持续增长。

图 6 为 CF/PF 复合材料的冲击强度。从图 6 可以看出，无论是注塑成型还是热压成型，随着 CF 含量的增加，CF/PF 复合材料的冲击强度均呈上升趋势。同时，在相同 CF 含量下，除 M_1 试样外，热压成型样品的冲击强度均高于注塑成型样品。M_1 试样中注塑成型冲击强度略高于热压成型，该差异可能与低 CF 含量下注塑成型的基体致密性更好有关。但两种成型工艺下材料冲击性能均随 CF 含量的增加而增强。原因是 CF 本身具备优异的抗拉强度与韧性，作为增强相可直接参与冲击载荷的承担，有效缓解 PF 基体的应力集中。随着 CF 含量的增加，材料内部形成更密集的 CF 网络，能够显著提升能量耗散效率。同时，CF 与 PF 基体之间形成物理缠结界面，可以确保冲击载荷从基体向 CF 的有效传递，充分发挥 CF 的增强潜力并避免因界面脱黏而引发的过早失效。因此，两种成型工艺制备的 CF/PF 复合材料的冲击强度均随 CF 含量的增加而增强。



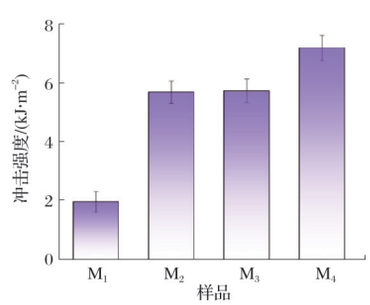
(a) 热压成型



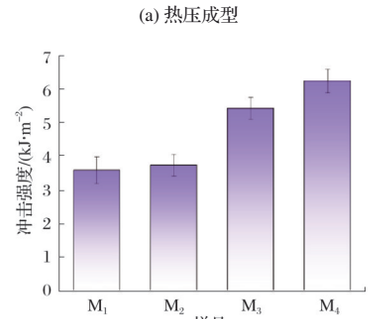
(b) 注塑成型

图 5　CF/PF 复合材料的弯曲强度

Fig.5 Bending strength of CF/PF composites



(a) 热压成型



(b) 注塑成型

图 6　CF/PF 复合材料的冲击强度

Fig.6 Impact strength of CF/PF composites

3 结论

本研究以CF增强热塑性PF为研究对象，研究改性CF与PF间的关系，成功制备力学性能优异的CF/PF复合材料。CF经过硅烷偶联剂改性后能够有效改善增强体与PF基体的界面相容性，对于制备高性能复合材料有积极作用。随着CF含量的增加，复合材料拉伸强度与冲击强度呈持续增强趋势。当CF质量分数为8%时，注塑成型工艺下制备的CF/PF复合材料拉伸强度达到最大值，为19.06 MPa。

综上所述，本研究制备的CF/PF复合材料将树脂基体和增强体的优点结合，成功制备出力学性能优异的复合材料。后续研究可进一步拓展CF表面改性工艺或探索多组分协同增强机制，为复合材料在高端领域的应用提供更多可能。

参考文献

[1] 张红颖, 夏绍灵, 刘聪, 等. 酚醛树脂增韧改性研究进展[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(6): 151-156.

[2] 杨阶桐, 徐雨, 王斌, 等. 热塑性酚醛树脂的改性研究进展[J]. 塑料工业, 2023, 51(1): 12-22.

[3] 王宇翔, 张春辉. 热塑性树脂增韧改性酚醛树脂的制备及其性能研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(9): 7-14.

[4] 孙逊, 姚姗姗, 郑翔. 热固性树脂基导热复合材料的研究进展[J]. 弹性体, 2024, 34(4): 86-90.

[5] LIN C T, LEE H T, CHEN J K. Preparation of vanadium-modified phenolic resin/modified zirconia composites and its applied properties in cubic boron nitride (cBN) grinding wheels[J]. Polymer Composites, 2016, 37(12): 3354-3364.

[6] TANG K H, ZHANG A L, GE T J, et al. Research progress on modification of phenolic resin[J]. Materials Today Communications, 2021, 26: 101879.

[7] 刘聪, 夏绍灵, 许纪贤, 等. 功能化氧化石墨烯改性酚醛树脂微发泡复合材料的制备与性能[J]. 复合材料科学与工程, 2025(4): 109-116.

[8] 韩文彬, 严刚, 葛孚宇, 等. 添加碳纤维/碳纳米管复合填料的橡胶厚制品硫化过程中温度场和硫化程度模拟[J]. 橡胶工业, 2025, 72(5): 323-332.

[9] 赵华坤, 于涛, 程泽非, 等. 纤维增强热固性树脂基复合材料成型过程数值模拟研究进展[J]. 材料工程, 2024, 52(5): 46-56.

[10] 周坤宇, 高丽红, 马壮, 等. 无机填料改性硼酚醛树脂复合涂层的抗激光烧蚀性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2023, 46(3): 1-6.

[11] 李然, 郭安儒, 吴文敬, 等. 纳米无机填料改性酚醛树脂基防热复合材料烧蚀性能研究现状[J]. 复合材料科学与工程, 2020(6): 114-120.

[12] 李辉. 功能化石墨烯改性酚醛树脂及其性能[J]. 合成材料老化与应用, 2023, 52(5): 31-33.

[13] MA S Y, DONG Y B, HE J Y, et al. High mechanical strength and low ablation rate of phenolic resin composites incorporated with polyhedral oligomeric silsesquioxane-modified graphene oxide[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 139(35): e52856.

[14] WANG D, GAO J, XU W F, et al. The synthesis and characterization of the graphene oxide covalent modified phenolic resin nanocomposites [J]. Advanced Materials Research, 2011, 327: 115-119.

[15] 闫曦, 雷世文, 陶则超, 等. 氧化石墨烯/酚醛树脂基泡沫炭的制备和隔热性能研究[J]. 固体火箭技术, 2022, 45(1): 44-49.

[16] NGUYEN T H, VU M T, LE V T, et al. Effect of carbon nanotubes on the microstructure and thermal property of phenolic/graphite composite [J]. International Journal of Chemical Engineering, 2018, 2018: 6329651.

[17] FENG A L, JIA Z R, YU Q, et al. Preparation and characterization of carbon nanotubes/carbon fiber/phenolic composites on mechanical and thermal conductivity properties[J]. Nano, 2018, 13(4): 1850037.

[18] KONADA N K, SUMAN K N S. Damping behaviour of multi-walled carbon nanotubes grafting on carbon fiber reinforced friction material [J]. Journal of the Society of Automotive Engineers Malaysia, 2018, 2 (2): 127-140.

[19] 黄洋, 袁春野, 宋世涛. 碳纤维复合材料在航天领域的应用[J]. 科技展望, 2017, 27(26): 175.

[20] 黎敏荣, 薛平, 贾明印, 等. 纤维增强热塑性树脂复合材料成型技术研究进展[J]. 塑料工业, 2016, 44(11): 5-11.

[21] 李哲, 张德远, 何凤涛, 等. 碳纤维复合材料旋转超声椭圆振动套磨制孔技术研究[J]. 电加工与模具, 2016(5): 56-59.

[22] 张灵静, 陈桦, 蒋建军, 等. 碳纤维增强热固性复合材料回收再利用技术研究进展[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(7): 134-140.

[23] 方圆, 于峰, 李子龙, 等. 聚氯乙烯-碳纤维增强复合材料管混凝土柱-钢筋混凝土环梁T型节点低周反复荷载试验与恢复力特性数值模拟研究[J]. 工业建筑, 2024, 54(6): 160-168.

[24] 方琳, 俞鸣明, 任慕苏, 等. 玻璃纤维增强酚醛树脂复合材料摩擦磨损性能研究[J]. 高科技纤维与应用, 2015, 40(2): 48-52.

[25] 王妍心, 徐静, 钟力生, 等. 碳纤维复合材料芯棒加速热氧老化特性研究[J]. 绝缘材料, 2023, 56(1): 29-33.