玻璃纤维改性阻燃PET复合材料制备与性能研究

赵春全[1],张梓煜[2],谢佩轩[3]

(1.太原学院建筑与环境工程系,山西 太原 030032;2.曼彻斯特大学化学工程系,英国 曼彻斯特 M13 9PL;
3.曼彻斯特大学土木工程与管理系,英国 曼彻斯特 M13 9PL)

摘　要:采用γ-氨丙基三乙氧基硅烷/十六烷基三甲基溴化铵(KH550/CTAB)复配体系对玻璃纤维(GF)进行表面改性,以聚磷酸铵/季戊四醇(APP/PER)环保复配阻燃体系替代传统卤锑阻燃体系。通过熔融共混以及注塑成型工艺制备改性玻璃纤维(CK-GF)增强阻燃聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)复合材料,探究GF及CK-GF含量对复合材料综合性能的影响。结果表明:KH550/CTAB复配改性可在GF表面构建活性界面层,显著提升GF表面粗糙度与润湿性,有效改善GF与PET基体的界面相容性。CK-GF含量对复合材料的力学性能、保温性能及阻燃性能具有关键调控作用。当CK-GF质量分数为15%时,综合性能最佳。此时,复合材料拉伸强度为82.3 MPa,缺口冲击强度为11.2 kJ/m^2,断裂伸长率为4.8%,满足建筑轻型构件韧性要求。该复合材料导热系数低至0.151 W/(m·K),隔热保温性能最优;极限氧指数达33.8%,UL-94阻燃等级达V-0级,符合建筑材料阻燃标准。该复合材料兼具力学承载、隔热保温与防火安全功能,适用于绿色建筑围护结构。

关键词:聚对苯二甲酸乙二醇酯;玻璃纤维;表面复配改性;阻燃性能;建筑复合材料

中图分类号:TQ323.41　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1005-3360(2026)09-0029-05

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.09.006

Study on Preparation and Properties of Glass Fibre Modified Flame-retardant PET Composites

ZHAO Chunquan[1], ZHANG Ziyu[2], XIE Peixuan[3]

(1. Department of Architecture and Environmental Engineering, Taiyuan University, Taiyuan 030032, China; 2. Department of Chemical Engineering, University of Manchester, Manchester M13 9PL, UK; 3. Department of Civil Engineering and Management, University of Manchester, Manchester M13 9PL, UK)

Abstract: A combined surface modification system of γ-aminopropyltriethoxysilane/cetyltrimethylammonium bromide (KH550/CTAB) was adopted to modify glass fibers (GF). An environmentally friendly ammonium polyphosphate/pentaerythritol (APP/PER) flame-retardant system was employed to replace the conventional halogen-antimony flame-retardant system. Modified glass fibers (CK-GF) reinforced flame-retardant poly(ethylene terephthalate) (PET) composites were prepared via melt blending and injection molding. The effects of GF and CK-GF content on the overall performance of the composites were investigated. The results showed that the KH550/CTAB combined modification constructed an active interfacial layer on the GF surface, significantly improving the surface roughness and wettability of GF, and effectively enhancing the interfacial compatibility between GF and the PET matrix. The CK-GF content played a key role in regulating the mechanical properties, thermal insulation performance, and flame retardancy of the composites. At a CK-GF mass fraction of 15%, the composites exhibited optimal overall performance, with a tensile strength of 82.3 MPa, a notched impact strength of 11.2 kJ/m^2, and an elongation at break of 4.8%, meeting the toughness requirements for lightweight building components. The composites exhibited a low thermal conductivity of 0.151 W/(m·K), demonstrating superior thermal insulation performance. The limit oxygen index reached 33.8%, and the UL-94 rating reached V-0, complying with flame-retardant standards for building materials. The composites integrated mechanical load-bearing capacity, thermal insulation, and fire safety, making them suitable for green building envelope structures.

收稿日期Submitted date 2026-05-24;修回日期Revised date 2026-06-30;录用日期Accepted date 2026-07-27

基金项目:太原学院引进人才科研启动经费项目(25TYKY113);太原学院院级科研项目(25TYQN11)

联系人,2024505004@tyu.edu.cn

引用本文:赵春全,张梓煜,谢佩轩.玻璃纤维改性阻燃PET复合材料制备与性能研究[J].塑料科技,2026,54(9):29-33.

Citation:ZHAO C Q, ZHANG Z Y, XIE P X. Study on preparation and properties of glass fibre modified flame-retardant PET composites[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(9): 29-33.

Keywords: PET; GF; Surface compound modification; Flame retardancy; Building composites

聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)是一种综合性能优异的热塑性工程塑料，具备成型精度高、耐候性好、质轻等优势，广泛应用于土木建筑、市政装饰等领域，可制备建筑围护板材、轻型承重构件等配套材料[1-2]。但PET常温下存在缺口敏感性高、韧性差、易燃和易断裂等缺点，无法满足建筑阻燃规范要求，严重限制其应用场景[3-5]。

纤维增强是高分子材料改性的主流技术[6]。其中，玻璃纤维(GF)具有高性价比、耐老化以及耐腐蚀等优点，成为建筑高分子复合材料的核心增强填料[7-8]。未改性GF表面光滑且活性基团匮乏，与PET有机基体界面相容性较差，复合体系易出现界面脱黏及应力集中等问题，无法充分发挥纤维增强效能[9]。表面复配改性可有效活化GF表面，提升表面粗糙度与活性，强化GF与基体的界面结合力，是制备高性能GF增强复合材料的关键工艺[10-12]。

传统PET阻燃改性多采用卤锑复合体系，该复合体系阻燃效率高但燃烧时会释放有毒烟气，不符合现代建筑绿色低碳、安全环保的新发展理念，应用场景严重受限[13-16]。聚磷酸铵/季戊四醇(APP/PER)膨胀型无卤阻燃体系通过凝聚相与气相协同作用发挥阻燃功效。一方面，体系在燃烧时能形成致密炭层，阻隔氧气与热量的传递；另一方面，该体系无有毒气体释放，因而能很好地满足建筑材料的环保阻燃要求[17-18]。

目前，GF改性PET的相关研究多聚焦于单一性能优化，针对建筑用阻燃PET复合材料的界面调控、多性能协同优化研究较少，GF含量对复合材料力学性能、阻燃性能和保温性能的协同调控机制尚不明确。本研究采用γ-氨丙基三乙氧基硅烷/十六烷基三甲基溴化铵(KH550/CTAB)复配体系对GF进行改性，得到CK-GF，以APP/PER为环保阻燃组分，制备不同CK-GF含量的阻燃PET复合材料。结合建筑材料使用工况，系统探究CK-GF的结构特性、表面润湿性及CK-GF含量对复合材料综合性能的影响，揭示界面作用与性能调控机理，旨在制备兼具力学稳定、阻燃环保、隔热节能的一体化PET建筑复合材料。

1 实验部分

1.1 主要原料

PET切片，HP5618，熔体流动速率(MFR)为28 g/10 min，中国石油化工股份有限公司；短切GF，单丝直径为13 μm，长度为3 mm，建筑增强专用级，新乡市天捷玻纤复合材料有限公司；KH550、CTAB，分析纯，上海天美生化仪器设备工程有限公司；APP (聚合度≥1 000)、PER，工业级，德清柯达化工有限责任公司；无水乙醇、浓盐酸，分析纯，郑州惠林化工有限公司；蒸馏水，实验室自制。

1.2 仪器与设备

马弗炉，GL2，天长市科创医疗器械商贸有限公司；恒温磁力搅拌器，DF-155C，天津市永兴科技发展有限公司；真空干燥箱，FZG-4，上海天美科学仪器有限公司；傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)，Nexus 8700，美国TA仪器公司；接触角测量仪，SDJ-01，苏州德菲诺电子有限公司；电子万能试验机，CXN856，郑州市科源机械设备有限公司；冲击试验机，SXD-05，承德市金建检测仪器有限公司；场发射扫描电子显微镜(SEM)，JSM 6701F，美国FEI公司；氧指数测定仪，JF-3，南京江宁分析仪器有限公司；垂直燃烧测试仪，UL94，南京江宁分析仪器有限公司；注塑机，ZS-45，舟山中昌塑料机械有限公司；导热系数测试仪，HC-110，江苏精工仪器制造厂。

1.3 样品制备

1.3.1 CK-GF的制备

将短切GF置于马弗炉中，于480 ℃下热处理2 h，去除表面浸润剂、灰尘及有机杂质，随炉冷却备用[19]。在75 ℃下，采用1 mol/L HCl溶液酸洗GF 4 h，活化GF表面羟基，再用蒸馏水反复冲洗至中性。将GF置于真空干燥箱中，于70 ℃下真空干燥10 h，得到预处理GF (P-GF)[20]。配制质量分数为1.2%的CTAB水溶液，60 ℃恒温搅拌30 min，加入P-GF浸渍5.5 h，然后用去离子水冲洗去除未吸附的助剂并干燥。配制无水乙醇与去离子水体积比为9∶1的混合溶液，加入质量分数为5%的KH550，使其充分水解，加入P-GF浸渍5 h。再用无水乙醇冲洗干净后，于80 ℃下干燥12 h，制得CK-GF。

1.3.2 阻燃PET复合材料制备

表1为复合材料的配方。固定APP/PER阻燃体系总添加质量分数为18% (APP与PER质量比3∶1)，分别掺入质量分数为0、5%、10%、15%、20%的CK-GF与PET切片高速混合均匀。采用熔融共混工艺，双螺杆挤出机各区温度设定为220、235、245、240、230 ℃，螺杆转速为350 r/min，挤出造粒后干燥。通过注塑机制备标准测试试样，对应试样依次标记为GF0、GF5、GF10、GF15和GF20。

表1 阻燃PET复合材料的配方

Tab.1 Formula of flame-retardant PET composites 单位：%

试样编号	w_{PET}	$w_{APP/PER}$	w_{CK-GF}
GF0	82	18	0
GF5	77	18	5
GF10	72	18	10
GF15	67	18	15
GF20	62	18	20

1.4 性能测试与表征

FTIR测试：采用KBr压片法，扫描波数为4 000~500 cm^{-1}，扫描次数30次。

接触角测试：采用座滴法测试改性前后GF与去离子水的表面接触角。每组试样测试5次，取平均值。

力学性能测试：拉伸性能按照GB/T 1040.2—2022进行测试，拉伸速率为5 mm/min，样条尺寸为10 mm×25 mm×3 mm。缺口冲击性能按照GB/T 1843—2008进行测试，试样为V型缺口，样条尺寸为(80.0±2.0) mm×(10.0±0.2) mm×(4.0±0.2) mm。每组测试8个试样，取平均值。

SEM测试：选取冲击试样断面，喷金处理后观察断面微观形貌，分析纤维分散状态、界面结合及断裂机制。

导热性能测试：常温导热系数按照GB/T 10294—2008进行测试，试样尺寸为300 mm×300 mm×3 mm，每组试样测试3次，取平均值。

阻燃性能测试：极限氧指数(LOI)按照GB/T 2406.2—2009进行测试。UL94垂直燃烧按照GB/T 2408—2021进行测试。

2 结果与讨论

2.1 改性前后GF的表面特性分析

2.1.1 FTIR分析

图1为改性前后GF的FTIR谱图。从图1可以看出，P-GF在1 085 cm^{-1}处出现Si—O—Si特征伸缩振动峰；795 cm^{-1}处对应硅酸盐骨架振动峰，符合无碱GF特征结构。GF表面仅含少量活性羟基，无其他有机官能团，表面化学惰性较强[21]。CK-GF在2 928 cm^{-1}和1 724 cm^{-1}处出现甲基、亚甲基C—H伸缩振动特征峰；在1 455 cm^{-1}处出现氨基(—NH_2)特征吸收峰，覆盖了CTAB与KH550的特征官能团[22]。GF表面羟基特征峰强度显著降低，表明改性助剂与GF表面羟基发生化学键合，而非简单物理吸附。综上所述，复配改性体系成功在GF表面构建有机活性界面层，有效破除纤维表面惰性，显著提升GF与PET有机基体的界面相容性。

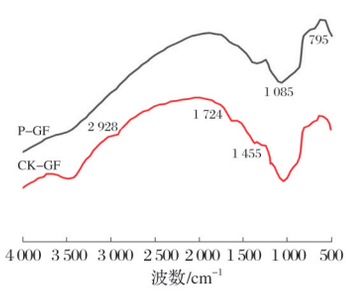


图1 改性前后GF的FTIR谱图

Fig.1 FTIR spectra of GF before and after modification

2.1.2 接触角分析

图2为改性前后GF的接触角。从图2可以看出，在25 ℃时，P-GF的接触角为73.6°，表面润湿性较差，与极性PET基体适配性不足。CK-GF接触角降至37.7°，较P-GF降低48.8%，表面亲水活性大幅提升。

CTAB阳离子基团可通过静电作用吸附于带负电的GF表面，引入亲水有机基团；KH550通过化学键合接枝活性氨基，提升GF表面粗糙度。二者形成协同改性效应，大幅增加GF表面活性位点，消除表面惰性，使熔融PET基体能够充分浸润纤维表面，显著强化两相界面结合力。接触角越小，纤维与基体的浸润贴合效果越好，界面结合强度越高。

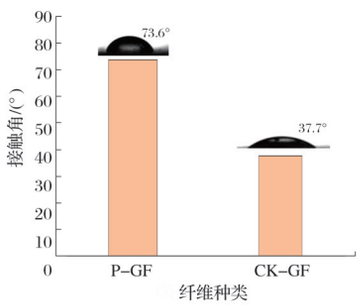


图2 改性前后GF的接触角

Fig.2 Contact angle of GF before and after modification

2.2 阻燃PET复合材料的性能分析

2.2.1 力学性能分析

图3为复合材料的力学性能。从图3可以看出，随着CK-GF含量的增加，复合材料的拉伸强度与缺口冲击强度均呈先升后降的趋势，断裂伸长率呈下降趋势。GF0的拉伸强度为52.0 MPa，断裂伸长率为7.1%。GF5、GF10与GF15的拉伸强度持续增大，分别为65.8、74.5、74.8 MPa。其中，GF15的拉伸强度达到最大值，较GF0提升43.8%。此时，断裂伸长率为4.8%，仍可满足建筑轻型构件的韧性使用要求。GF20的拉伸强度降至72.6 MPa，断裂伸长率降至3.9%。GF0的缺口冲击强度为5.7 kJ/m^2，材料脆性较大，抗冲击能力较弱，难以适应建筑户外和荷载波动等复杂工况。GF15的缺口冲击强度最大，为11.2 kJ/m^2，较GF0提升96.5%。

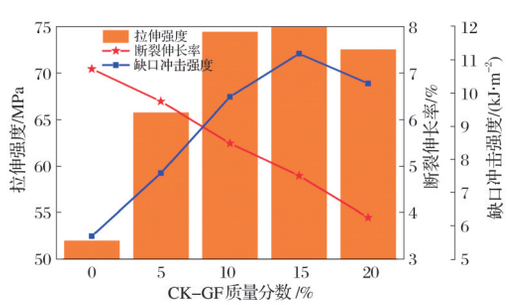


图3 复合材料的力学性能

Fig.3 Mechanical properties of composites

CK-GF能够通过其优异的界面结合力传递并分散荷载，GF自身高强度特性能够有效抵抗拉伸变形，提升复合材料拉伸刚度与强度。当CK-GF含量过高时，CK-GF团聚严重，PET基体无法完全浸润CK-GF，界面空隙和缺陷增多，荷载传递过程中易出现应力集中现象，导致拉伸强度下降。同时，刚性CK-GF占比过高，限制PET分子链柔性运动[23]，使断裂伸长率持续降低，材料韧性略有下降。当CK-GF质量分数超过15%后，CK-GF团聚形成结构缺

陷，裂纹易在缺陷处快速萌生、扩展，无法通过CK-GF耗能充分缓冲冲击荷载，导致缺口冲击强度显著下降。

2.2.2 SEM分析

图4为复合材料断面的SEM照片。从图4可以看出，GF0的断面平整光滑，无明显塑性变形，裂纹扩展路径单一，呈现典型的脆性断裂特征。GF5与GF10的断面逐渐粗糙，出现少量CK-GF拔出痕迹与凹凸结构，CK-GF分散均匀，界面结合良好，能够有效传递并消耗冲击能量，提升材料韧性。GF15的断面粗糙度显著提升，大量CK-GF均匀地嵌于基体中，CK-GF拔出、脱黏痕迹明显，无明显界面脱黏空隙。PET基体与CK-GF贴合紧密，裂纹扩展过程中被CK-GF有效阻隔、偏转，耗能效果最优，力学性能最佳[24]。GF20的断面出现明显CK-GF团聚、堆叠现象，局部存在大量空洞与界面缝隙，CK-GF分散不均，断裂过程中易产生应力集中，裂纹快速蔓延，结构完整性被破坏。

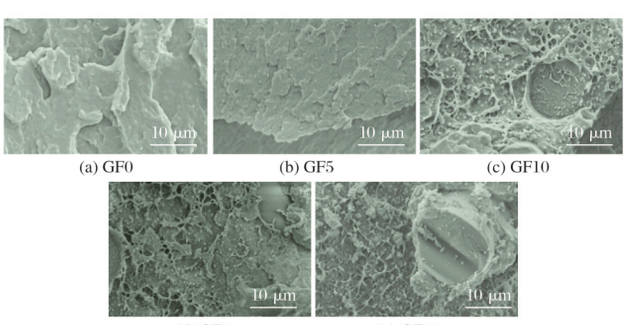


图4 复合材料断面的SEM照片

Fig.4 SEM images of cross-section of composites

2.2.3 保温性能分析

图5为复合材料的导热系数。从图5可以看出，GF0的导热系数为0.186 W/(m·K)，隔热保温性能较差。随着CK-GF含量的增加，复合材料导热系数先降后升，GF15的导热系数最小，为0.151 W/(m·K)，较GF0降低18.8%，说明其保温性能最优。GF20的导热系数小幅回升至0.159 W/(m·K)。

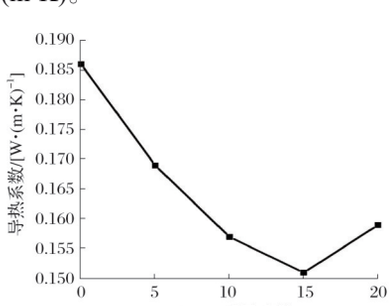


图5 复合材料的导热系数

Fig.5 Thermal conductivity of composites

添加适量CK-GF能够依托自身低热传导特性，有效阻断PET基体内部传热路径，同时其均匀分散可优化基体结晶结构，细化内部孔隙，减少贯通换热通道，削弱固体导热与空气对流换热效应，显著提升材料隔热性能[25]。当CK-GF含量过高时，CK-GF产生团聚堆叠会破坏PET基体结构的连续性，诱发大量微小空洞与孔隙缺陷，从而增加内部空气储存量，加速孔隙对流换热，易形成连续导热通道，使复合材料隔热保温性能下降。

2.2.4 阻燃性能分析

表2为复合材料的阻燃性能。从表2可以看出，纯PET的LOI仅为21.2%，UL94等级为HB级，易燃且燃烧伴随熔融滴落，防火性能较差。GF0的LOI提升至27.5%，UL94等级达到V-0级，显著改善基础阻燃性能。随着CK-GF含量的增加，复合材料的LOI持续升高，阻燃性能稳步优化。GF15的LOI为33.8%，较纯PET提升59.4%。GF20的LOI最高，为34.2%。所有改性试样均保持V-0级阻燃等级，无燃烧滴落现象，满足建筑材料防火使用标准。

APP/PER膨胀阻燃体系受热发生酯化和脱水炭化反应，形成基础膨胀炭层隔绝氧气与热量。CK-GF耐高温且难燃，可作为炭层骨架填充炭层孔隙，提升炭层致密性与稳定性，能够抑制可燃气体释放与火焰传播。纤维可约束PET基体熔融滴落，杜绝滴落引燃风险[8]。随着CK-GF含量的增加，炭层骨架结构逐渐完善，阻燃防护效果持续提升，实现力学性能与阻燃性能的协同优化。

表2 复合材料的阻燃性能

Tab.2 Flame-retardancy of composites

试样编号	LOI/%	UL94等级	燃烧滴落情况
纯PET	21.2	HB	滴落
GF0	27.5	V-0	无滴落
GF5	30.2	V-0	无滴落
GF10	32.1	V-0	无滴落
GF15	33.8	V-0	无滴落
GF20	34.2	V-0	无滴落

2.2.5 燃烧残炭SEM分析

为进一步揭示CK-GF对复合材料阻燃性能的强化机制，分析炭层微观结构与阻燃性能之间的构效关系，对不同CK-GF含量试样燃烧后的残炭形貌进行观测。图6为复合材料燃烧后残炭的SEM照片。

膨胀阻燃复合材料的阻燃性能取决于燃烧后残炭层的连续性、致密性及结构稳定性[26]。从图6可以看出，燃烧后GF0的残炭层稀疏单薄，连续性差，表面存在大量贯通微孔与裂纹，无法形成有效防护屏障，外界氧气与高温热量可快速侵入基体，持续诱导PET热分解并维持燃烧链式反应。引入CK-GF后，复合材料残炭结构显著优化。在GF5与GF10体系中，均匀分散的CK-GF嵌埋于膨胀炭层内部，发挥无机刚性骨架的支撑作用，有效弥补了单一APP/PER膨胀炭层质地松软以及易破碎坍塌的缺陷，残炭孔隙均大幅减少，厚度均匀，阻隔燃烧反应传递能力显著增强。GF15的炭层结构最优，连续平整且致密无缺陷，CK-GF被炭层完整包覆。该杂化复合结构一方面大幅提

升炭层力学强度与热稳定性；另一方面通过致密炭层彻底封堵基体热解气体通道，高效阻隔氧气与热量双向传递，抑制可燃烟气生成，使材料兼具优异的阻燃与抑烟性能[27]。因纤维团聚，GF20的局部团聚导致炭层出现缝隙与孔洞，炭层规整度小幅下降，阻燃性能提升速率放缓，但复合材料仍维持较高的LOI与V-0阻燃等级。因此，15% CK-GF为实现多性能协同最优的配比。

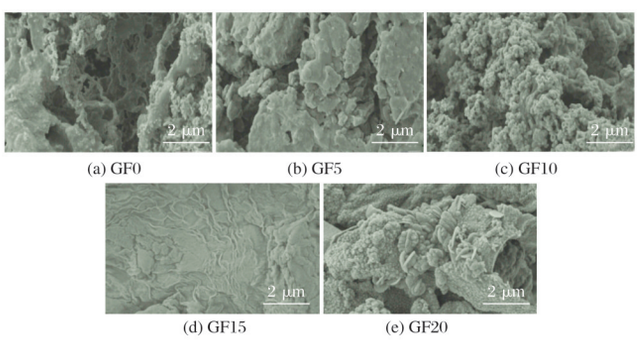


图6 复合材料燃烧后残炭的SEM照片

Fig.6 SEM images of carbon residue after combustion of composites

3 结论

KH550/CTAB复配改性通过化学键合在GF表面构建有机活性界面层，显著降低纤维接触角，提升表面润湿性，从而改善GF与PET基体的界面相容性及复合材料微观结构。CK-GF含量对阻燃PET复合材料综合性能具有关键调控作用。CK-GF在均匀分散于PET基体以通过多重耗能机制实现增韧增强的同时，能够有效优化复合材料隔热保温性能，并与APP/PER阻燃体系协同作用，显著提升燃烧炭层的致密性与稳定性。当CK-GF质量分数为15%时，复合材料的综合力学性能最优，拉伸强度为74.8 MPa、缺口冲击强度为11.2 kJ/m^2，导热系数为0.151 W/(m·K)，导热系数较GF0降低18.8%。此时，基体结构致密、孔隙缺陷少，隔热节能效果优异。GF15复合材料的LOI为33.8%，UL94等级稳定为V-0级，无燃烧滴落现象，防火安全性良好。综上所述，15% CK-GF改性阻燃PET复合材料兼具优异的力学稳定性、隔热节能性与防火安全性，能够实现结构承载、阻燃及保温一体化，有效适配绿色建筑围护构件工程应用，具备良好的推广应用价值。

参考文献

[1] 谭浩东, 罗勇欢, 童鑫, 等. 微波辐照改性聚酯短纤维/天然橡胶复合材料的界面结构与性能研究[J]. 橡胶工业, 2025, 72(1): 3-9.

[2] CHANG S, ZHOU X, XING Z Q, et al. Probing polarity of flame retardants and correlating with interaction between flame retardants and PET fiber[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2017, 498: 343-350.

[3] 闪烁, 王洪海. 生物基呋喃二甲酸(FDCA)共聚PET纤维的制备及其在可降解防护面料中的应用[J]. 塑料科技, 2026, 54(7): 128-132.

[4] XUE B X, PENG Y, QIN R H, et al. Enhancing the flame retardancy and smoke suppression of PET fiber by introducing a new phosphorus-containing organosilicon and iron oxide[J]. The Journal of the Textile Institute, 2022, 113(4): 681-688.

[5] 钱亚辉, 吴宏超. 玻璃纤维/发泡聚丙烯复合材料的制备及性能研究[J]. 塑料科技, 2025, 53(5): 40-44.

[6] 张日芬, 艾相仁. 建筑嵌缝用纤维增强橡胶基密封材料的制备与性能研究[J]. 橡胶工业, 2025, 72(11): 839-843.

[7] 王恒, 朱国伟, 张闯闯. 汽车保险杠用PP/GF/POE复合材料的制备及性能研究[J]. 塑料科技, 2026, 54(5): 89-93.

[8] 王林玉, 王念念, 刘翔. 阻燃PET纤维增强木质复合材料的力学及阻燃特性研究[J]. 塑料科技, 2025, 53(12): 61-65.

[9] 刘增强, 刘焕伟, 李正训. 热水浴激化TA@Fe^{3+}增强TC4/GF-PET界面的变温拉伸剪切强度研究[J]. 塑料科技, 2026, 54(6): 120-126.

[10] 蔡涛, 康鹏, 辛琦, 等. 高强度玻璃纤维对阻燃增强PET性能的影响[J]. 现代塑料加工应用, 2024, 36(2): 21-24.

[11] 赵智奎. 短玻璃纤维增强阻燃PET复合材料的制备与研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2023.

[12] 胡志. 玻纤含量对无卤阻燃玻纤增强聚丙烯阻燃性能的影响[J]. 塑料科技, 2022, 50(12): 38-42.

[13] XUE B X, SONG Y H, PENG Y, et al. Enhancing the flame retardant of polyethylene terephthalate (PET) fiber via incorporation of multi-walled carbon nanotubes based phosphorylated chitosan[J]. The Journal of the Textile Institute, 2018, 109(7): 871-878.

[14] 胡修全. 回收玻璃纤维改性及其对水泥基材料性能增强研究[D]. 保定: 河北大学, 2024.

[15] 张新星, 王庆印, 孙腾, 等. PET共聚阻燃改性研究进展[J]. 精细化工, 2021, 38(1): 34-43.

[16] 刘小忠, 李湘. K-SEP对R-PET/AHP复合材料性能的影响[J]. 塑料科技, 2023, 51(9): 79-83.

[17] 王健, 贾宇辉, 沈瑞冰, 等. 聚磷酸三聚氰胺/季戊四醇膨胀型阻燃剂在天然橡胶中的应用[J]. 合成橡胶工业, 2022, 45(6): 494-499.

[18] 冯猛, 张宝辉, 方宋辉, 等. 季戊四醇协同次磷酸铝阻燃聚乙烯的研究[J]. 塑料科技, 2026, 54(3): 96-99.

[19] 樊家澍, 钱权洲, 王堃, 等. 环氧树脂改性磨碎玻璃纤维增强聚碳酸酯的制备及性能[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2025, 23(6): 49-52.

[20] 朱勇行. 增韧改性环氧玻璃纤维复合绝缘热: 振动老化特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2024.

[21] 齐鹏飞. *N*-甲基吲哚二氢吡唑衍生物和近红外亚铁离子探针的设计与生物学评价[D]. 南京: 南京大学, 2020.

[22] 窦彤彤. 衰减全反射-红外成像结合主成分分析用于聚乳酸/羟基磷灰石复合材料的体外仿生矿化研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2018.

[23] 高珠怡. 电磁屏蔽及导热PBT/PET基碳纳米复合材料的制备与性能[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.

[24] 石振宇, 郑兵, 顾晓华. 石墨烯/异山梨醇改性PET聚酯的制备与性能[J]. 现代塑料加工应用, 2018, 30(1): 26-29.

[25] 吉冯春, 彭志航, 杨鑫, 等. 杂化酚醛树脂/玻璃纤维隔热瓦的制备及性能研究[J]. 复合材料科学与工程, 2025(4): 117-124.

[26] 宗晨阳, 张涛, 殷亚然, 等. 侧基含磷共聚酯的制备与阻燃性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2025, 41(2): 42-52.

[27] 叶佳和. 层状双金属氢氧化物的结构调控及其对PET阻燃抑烟性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2024.