

改性聚碳酸酯/钛酸盐复合材料的 防火性能与安全性分析

杨青¹, 曹凯^{2,3}

(1. 郑州铁路职业技术学院, 河南 郑州 450018; 2. 郑州电力高等专科学校, 河南 郑州 450000;
3. 河南省智能配电通信网优化控制工程技术研究中心, 河南 郑州 450000)

摘要: 研究以聚碳酸酯(PC)为基体, 引入钛酸钾(质量分数0~8%)作为无机功能填料, 联合添加马来酸酐接枝聚烯烃(POE-g-MAH, 质量分数2%)与磷系阻燃剂[9, 10-二氢-9-氧杂-10-磷杂菲-10-氧化物(DOPO)衍生物, 质量分数5%], 采用熔融共混法制备改性PC/钛酸盐阻燃复合材料, 系统研究其阻燃性能、力学性能、热稳定性与电绝缘性能。结果表明: 随着钛酸钾含量的增加, 材料阻燃性能显著提升。添加质量分数6%钛酸钾的T6组极限氧指数(LOI)为32.1%, 通过UL-94 V-0等级, 同时保持较优的拉伸强度(56.9 MPa)、冲击强度(50.6 kJ/m²)与热变形温度(137.8 °C)。T6组的体积电阻率与介电强度分别为 $7.86 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ 和26.0 kV/mm, 具有良好的绝缘性能。T6组在阻燃性能与结构性能之间实现了良好平衡, 具备在电子电气结构件等领域的工程应用潜力。

关键词: 聚碳酸酯; 钛酸钾; 马来酸酐接枝聚烯烃; 防火性能

中图分类号: TB33

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)01-0102-05

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.01.019

Fire Resistance and Safety Analysis of Modified Polycarbonate/Potassium Titanate Composites

YANG Qing¹, CAO Kai^{2,3}

(1. Zhengzhou Railway Vocational and Technical College, Zhengzhou 450018, China; 2. Zhengzhou Electric Power College, Zhengzhou 450000, China; 3. Henan Intelligent Distribution Communication Network Optimization Control Engineering Technology Research Center, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In the study, polycarbonate (PC) was used as the matrix, and potassium titanate (mass fraction 0~8%) was introduced as an inorganic functional filler. Maleic anhydride grafted polyolefin (POE-g-MAH, mass fraction 2%) and a phosphorus-based flame retardant [9, 10-Dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthrene-10-oxide (DOPO) derivative, mass fraction 5%] were incorporated to prepare flame-retardant PC/titanate composites via melt blending. The flame retardancy, mechanical properties, thermal stability, and electrical insulation performance of the composites were systematically investigated. The results showed that the flame retardancy improved significantly with increasing potassium titanate content. The T6 group, with 6% mass fraction of potassium titanate, achieved a limiting oxygen index (LOI) of 32.1% and UL-94 V-0 rating, while maintaining favorable tensile strength (56.9 MPa), impact strength (50.6 kJ/m²), and heat deflection temperature (137.8 °C). The T6 group exhibited good insulation performance, with a volume resistivity of $7.86 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ and dielectric strength of 26.0 kV/mm. The T6 group achieved a favorable balance between flame retardancy and structural performance, indicating its potential for applications in electronic and electrical structural components.

Keywords: Polycarbonate; Potassium titanate; POE-g-MAH; Fire resistance

聚碳酸酯(PC)是一种性能优异的工程塑料, 兼具良好的透明性、耐热性、尺寸稳定性和力学强度^[1-2], 广泛应用

收稿日期 Submitted date 2025-03-11; 修回日期 Revised date 2025-04-16; 录用日期 Accepted date 2025-05-21

联系人, yq0812341@163.com

引用本文: 杨青, 曹凯. 改性聚碳酸酯/钛酸盐复合材料的防火性能与安全性分析[J]. 塑料科技, 2026, 54(1): 102-106.

Citation: YANG Q, CAO K. Fire resistance and safety analysis of modified polycarbonate/potassium titanate composites[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(1): 102-106.

于电子电气、交通运输、建筑和消费电子等领域^[3-4]。然而,虽然PC具有一定的阻燃性,但其在燃烧时仍会产生熔滴并释放出大量的烟雾和热量,难以满足高端应用领域对高阻燃高分子材料的要求^[5],存在较大安全隐患,严重制约其在高安全等级场景中的应用。因此,提高PC材料的阻燃性能成为研究的重要课题。

为了增强PC的阻燃性能,传统方法多采用卤系阻燃剂^[6-7],但其在燃烧过程中可能释放有毒腐蚀性气体,已逐渐被限制使用^[8]。近年来,磷系阻燃剂因其环保、高效的阻燃特性成为主流替代体系^[9-10],尤其是含9,10-二氢-9-氧杂-10-磷杂菲-10-氧化物(DOPO)结构的衍生物在聚合物中的应用效果显著^[11-13]。同时,无机填料的引入亦被证实可通过炭层形成、热隔离与抑烟等机制协同提升材料的阻燃和热稳定性^[14-15]。其中,钛酸盐类无机材料(如钛酸钾)具备高热稳定性、良好的绝缘性与一定的阻燃协同效应^[16-17],成为备受关注的功能性阻燃填料。

然而,钛酸盐在PC基体中的分散性差、界面相容性弱,往往导致力学性能劣化甚至结构脆化^[18],制约其应用效果。为此,本研究引入马来酸酐接枝聚烯烃(POE-g-MAH)作为增容剂,改善钛酸钾与PC基体间的界面结合,同时联合磷系阻燃剂DOPO衍生物,构建具有协同阻燃机制的复合体系。本研究以PC为基体材料,系统考察不同钛酸钾质量分数(0~8%)对复合材料阻燃性能、力学性能、热变形温度及电绝缘性能的影响,旨在开发兼具优良阻燃性与结构稳定性的高性能PC复合材料体系,为其在高安全性工程应用中的推广提供支持。

1 实验部分

1.1 主要材料

PC颗粒, Makrolon® 2805, 德国拜耳材料科技股份有限公司; 钛酸钾, 工业级, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; POE-g-MAH, Lotader AX8900, 阿克苏诺贝尔化学品(中国)有限公司; 磷系阻燃剂, DOPO衍生物, 质量分数 $\geq 98\%$, 麦克林试剂有限公司; 乙醇, 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

双螺杆挤出机, SHJ-25, 南京科亚化工成套装备有限公司; 注塑成型机, MA100I, 宁波海天塑机集团有限公司; 万能材料试验机, Instron 5567, 美国英斯特朗公司; 简支梁冲击试验机, ZBC-50, 济南一诺世纪试验仪器有限公司; 极限氧指数(LOI)测试仪, JF-3, 北京建科试验设备有限公司; 垂直/水平燃烧测试仪, CZF-5, 江苏德泰试验设备有限公司; 热变形维卡软化点测试仪, XRW-300D, 深圳三思纵横科技股份有限公司; 高阻计, ZC36, 北京中测计量检测技术有限公司; 介电强度测试仪, ET2671, 上海精密科学仪器有限公司; 电子天平, 精度0.1 mg, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司; 真空干燥箱, DZF-6050, 上海一恒科学仪器有限公司。

1.3 样品制备

本研究以PC为基体材料, 钛酸钾为无机功能填料, 采用熔融共混法制备改性PC/钛酸盐阻燃复合材料。为改善填料与基体之间的界面相容性, 各组样品中均添加质量分数2%的POE-g-MAH; 同时, 为实现阻燃性能提升, 所有样品中统一添加质量分数5%的DOPO衍生物进行协同阻燃改性。

表1为改性PC/钛酸盐复合材料的配方。将原料置于80℃真空干燥箱中干燥4 h, 以去除水分, 再按设计配方在高速混合机中充分预混, 随后在同向双螺杆挤出机中进行熔融共混(螺杆直径25 mm, 长径比40, 温度区间240~260℃, 转速200 r/min)。挤出物经冷水冷却并切粒得到改性PC复合材料颗粒。所得颗粒于100℃真空干燥2 h, 使用注塑成型机(料筒温度260℃, 模具温度80℃, 保压时间40 s)制备标准测试样条, 用于后续性能评估。

表1 改性PC/钛酸盐复合材料的配方

Tab.1 Formula of modified PC/potassium

编号	titanate composites				单位:%
	W_{PC}	$W_{钛酸钾}$	$W_{POE-g-MAH}$	$W_{DOPO衍生物}$	
T0	93	0	2	5	
T2	91	2	2	5	
T4	89	4	2	5	
T6	87	6	2	5	
T8	85	8	2	5	

1.4 性能测试与表征

垂直燃烧等级测试: 根据UL-94阻燃等级测试标准, 采用水平燃烧(HB)和垂直燃烧(V-0/V-1/V-2)双重方法对不同处理组的阻燃性能进行评价。样条尺寸为125 mm \times 13 mm \times 3 mm, 记录第一次和第二次点燃后的燃烧时间(t_1 和 t_2), 观察是否有滴落物, 滴落物是否引燃棉花。

LOI测试: 采用极限氧指数测定仪依据GB/T 2406.2—2009进行测试。样条尺寸为100 mm \times 10 mm \times 4 mm。

拉伸性能测试: 采用电子万能试验机参考GB/T 1040.2—2022进行测试。试样采用注塑成型, 样条尺寸为165.0 mm \times 13.0 mm \times 3.2 mm, 测试温度为室温, 拉伸速度5 mm/min。

简支梁无缺口冲击试验测试: 依据GB/T 1843—2008进行测试。试样由注塑成型获得, 样条尺寸为80 mm \times 10 mm \times 4 mm, 测试温度为23℃。

热变形温度(HDT)测试: 依据GB/T 1634.2—2019进行测试, 载荷1.80 MPa, 升温速率120℃/h, 样条尺寸为80 mm \times 10 mm \times 4 mm。

体积电阻率测试: 依据GB/T 31838.2—2019进行测试, 测试电压为500 V, 温度(23 \pm 2)℃, 相对湿度(50 \pm 5)%。

介电强度测试: 依据GB/T 1408.1—2016进行测试, 测试电极为25 mm圆形电极, 电压升高速率500 V/s, 介质击

穿厚度为1 mm注塑片。

锥形量热测试:采用ISO 5660—1:2015或ASTM E1354—23,辐射热流35 kW/m²。样条尺寸为100 mm×100 mm×4 mm。

2 结果与讨论

2.1 UL-94垂直燃烧等级分析

UL-94垂直燃烧测试是评估材料在实际火源作用下阻燃能力的重要方法^[9]。表2为UL-94垂直燃烧测试结果。从表2可以看出,T0组在两次点燃后总燃烧时间达25.0 s,伴随显著熔滴并引燃下方棉花,未达到任何阻燃等级。T2组总燃烧时间缩短至16.5 s,虽未引燃棉花,但仍存在滴落现象,仅达到V-2等级。T4组无滴落,总燃烧时间为9.9 s,达到V-1等级,阻燃性能有所改善。阻燃性能的显著改善出现在T6组与T8组,两者总燃烧时间均低于6 s,且无滴落,无引燃现象,成功通过V-0等级。T6组表现为2.8 s与3.1 s的两次燃烧时间,总和仅5.9 s,充分说明在较低填料负载下能够实现优异阻燃效果。

表2 UL-94垂直燃烧测试结果

Tab.2 UL-94 vertical burning test results

编号	t ₁ /s	t ₂ /s	总燃烧时间/s	是否滴落	滴落引燃棉花	阻燃等级
T0	11.8	13.2	25.0	是	是	不合格
T2	7.4	9.1	16.5	是	否	V-2
T4	4.6	5.3	9.9	否	否	V-1
T6	2.8	3.1	5.9	否	否	V-0
T8	2.6	2.8	5.4	否	否	V-0

2.2 LOI分析

LOI反映材料在受控氧气环境下维持燃烧所需的最小氧浓度,是衡量材料本征阻燃性能的重要参数^[20]。图1为LOI测试结果。从图1可以看出,钛酸钾的添加对PC复合材料的LOI具有显著提升作用。其中,未添加钛酸钾的T0组LOI仅为26.4%,表现为易燃特性。随着钛酸钾含量的增加,LOI逐步提高,其中T2、T4、T6和T8组分别达到28.1%、29.7%、32.1%和32.6%。当钛酸钾添加质量分数达到6%及以上时,LOI显著高于30%,表明材料已具备良好的阻燃性能。该提升趋势归因于钛酸钾在燃烧过程中促进了炭层的形成^[21],有效隔绝热量与氧气的扩散,同时抑制了可燃气体的释放。此外,T8组虽获得最高LOI(32.6%),但其LOI较T6组的增加相对较少,且填料含量较高,可能对材料的加工性能和韧性造成一定的不利影响。

2.3 锥形量热测试分析

表3为锥形量热测试结果,其中包括起燃时间(TTI)、热释放速率峰值(pHRR)、总热释放量(THR)、总烟释放量(TSR)及残炭率。从表3可以看出,未添加钛酸钾的T0组TTI仅为42.6 s,pHRR高达428.7 kW/m²,THR达到65.4 MJ/m²,残炭率仅为8.3%,表现出典型PC材料在燃烧

初期热释放快、热量积累大、成炭能力弱的特点。随着钛酸钾含量的增加,复合材料各项热释放指标呈持续改善趋势。T2组和T4组pHRR分别下降至347.3 kW/m²与286.5 kW/m²,THR亦降至57.6 MJ/m²与50.3 MJ/m²,残炭率逐步升至11.7%和14.9%,说明填料在一定程度上延缓了热解过程并促进了炭层生成。当钛酸钾质量分数增至6%(T6组)后,pHRR进一步降至210.2 kW/m²,THR降低至41.7 MJ/m²,TTI延长至52.3 s,残炭率显著升至18.5%。T6组样品在火源作用下的燃烧强度和热释放速率明显降低,表明其具备较好的热稳定性与火焰蔓延抑制能力。T8组pHRR和THR进一步下降至198.6 kW/m²和39.2 MJ/m²,残炭率略升至19.1%,但较T6组提升幅度有限,说明过高填料含量可能带来加工性能及力学性能的权衡问题。图2为热释放速率(HRR)、THR及TSR曲线。

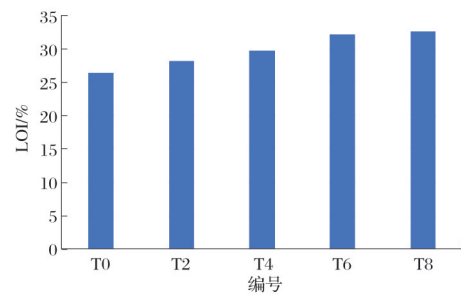


图1 LOI测试结果

Fig.1 LOI test results

表3 锥形量热测试结果

Tab.3 Cone calorimetric test results

编号	TTI/s	pHRR/(kW·m ²)	THR/(MJ·m ²)	TSR/(m ² ·m ²)	残炭率/%
T0	42.6	428.7	65.4	631.43	8.3
T2	45.1	347.3	57.6	541.36	11.7
T4	47.9	286.5	50.3	451.17	14.9
T6	52.3	210.2	41.7	406.07	18.5
T8	53.0	198.6	39.2	383.15	19.1

2.4 拉伸性能分析

图3为拉伸性能测试结果。从图3可以看出,T0组的拉伸强度为61.4 MPa,断裂伸长率为112.6%,表现出典型PC材料的高韧性特点。引入质量分数2%钛酸钾后(T2组),拉伸强度小幅下降至60.2 MPa,断裂伸长率降至106.3%,表明低含量钛酸盐对力学性能的削弱较小。随着钛酸钾含量的进一步提高,拉伸强度下降趋势逐渐加剧,T4组与T6组分别下降至58.7 MPa和56.9 MPa,断裂伸长率则显著下降至94.8%和82.4%,体现出填料增强刚性但抑制塑性变形能力的趋势。当钛酸钾质量分数增至8%(T8组)时,拉伸强度进一步下降至52.8 MPa,断裂伸长率降至68.1%,表明过高无机填料的加入削弱了聚合物链段的连续性,且可能存在颗粒团聚、界面黏结不足等问题,

导致材料脆性明显增加。

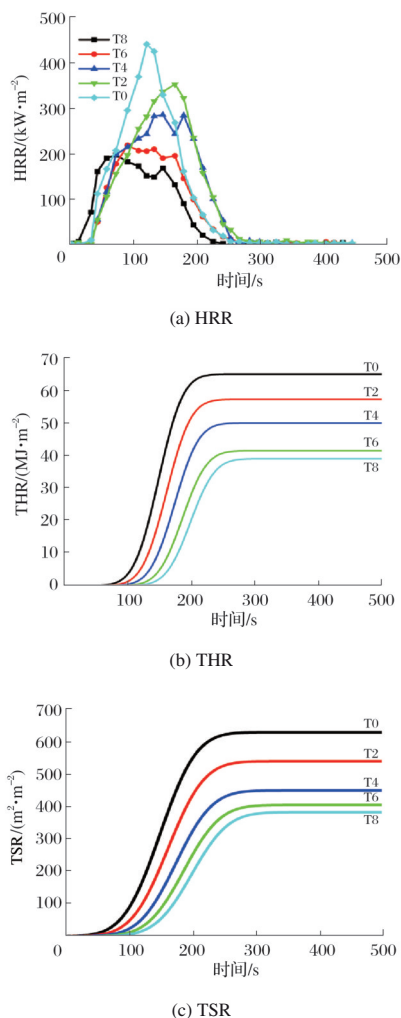


图2 HRR、THR及TSR曲线
Fig.2 HRR, THR and TSR curves

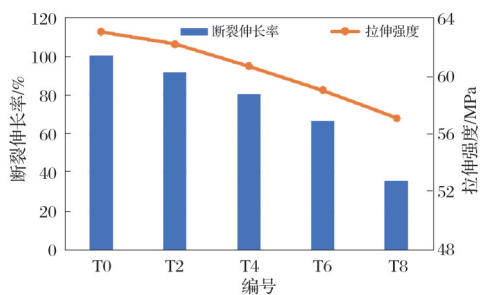


图3 拉伸性能测试结果
Fig.3 Tensile property test results

2.5 无缺口冲击强度分析

冲击强度是衡量材料韧性及其在瞬时载荷作用下吸收能量能力的重要指标^[22]。图4为冲击强度测试结果。从图4可以看出,随着钛酸钾含量的增加,改性PC复合材料无缺口冲击强度呈持续下降趋势:T0组为64.3 kJ/m², T2组和T4组分别下降至59.7 kJ/m²和52.5 kJ/m²,而T6组和T8组则进一步下降至50.6 kJ/m²和39.2 kJ/m²,整体降幅达39.04%。该趋势主要归因于钛酸钾作为刚性无机填

料的掺杂作用,其在基体中形成的刚性颗粒相限制了聚合物链段的运动自由度,从而削弱了材料在冲击过程中的塑性变形能力。同时,高填料负载下填料团聚现象加剧,界面结合能力下降,易形成微裂纹源,导致冲击过程中应力集中,韧性快速损失。尽管如此,T6组在实现显著阻燃性能提升的同时,仍保持50.6 kJ/m²的无缺口冲击强度,仅较未改性PC下降21.3%,未表现出显著脆化,仍处于阻燃工程塑料常用范围之上,满足多数结构件对韧性和抗冲击性的基本要求。相较之下,T8组虽在阻燃方面略有优势,但冲击强度降至39.2 kJ/m²,存在明显脆化风险,不利于实际应用。

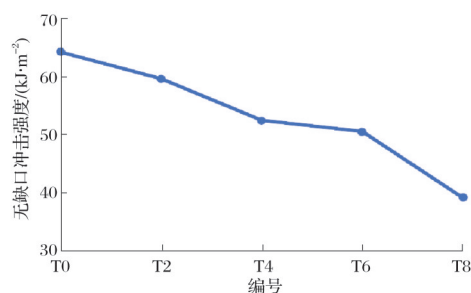


图4 冲击强度测试结果
Fig.4 Impact strength test results

2.6 HDT分析

HDT反映材料在受热载荷作用下抵抗形变的能力,是评估其热稳定性与高温力学性能的重要指标^[23]。图5为HDT测试结果。从图5可以看出,随着钛酸钾含量的增加,改性PC复合材料的HDT稳步提升,其中T0组HDT为130.2 °C, T2组与T4组HDT分别升至132.6 °C与135.4 °C,表现出明显的增强趋势。进一步增加钛酸钾质量分数至6%后,HDT达到137.8 °C,较T0组提升7.6 °C,说明刚性填料的引入显著提高了材料在热载荷下的尺寸稳定性。然而,当钛酸钾质量分数继续增加至8%时,HDT仅小幅上升至138.1 °C,提升幅度趋于饱和,表明高含量钛酸盐对HDT的边际增强效应明显减弱。这一平台效应的产生可能有两方面原因:一是填料在基体中已形成较为连续的刚性网络结构,进一步填充对链段活动限制效果有限;二是高负载下填料分布趋于不均,甚至可能引发轻微团聚。

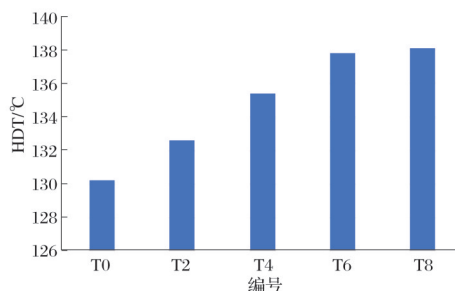


图5 HDT测试结果
Fig.5 HDT test results

2.7 体积电阻率与介电强度分析

体积电阻率与介电强度是评估聚合物复合材料电绝缘性能的关键指标^[24-25]。表4为体积电阻率与介电强度结果。从表4可以看出,随着钛酸钾含量的增加,改性PC复合材料的电绝缘性能略有下降,但整体仍维持在工程应用所要求的高水平范围内。T0组体积电阻率为 $10.20 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$,介电强度为27.3 kV/mm,表现出PC本征的优异绝缘性能。引入少量钛酸钾后(T2组),体积电阻率轻微下降至 $9.50 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$,介电强度仍维持在26.9 kV/mm,说明填料掺杂对电性能影响较小。随着钛酸钾质量分数逐步提高至6%,体积电阻率降至 $7.86 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$,介电强度为26.0 kV/mm,介电强度仅较T0组下降约4.8%,说明材料仍具备良好的介电均匀性与绝缘稳定性。这主要得益于钛酸钾自身具备高电阻特性^[26],同时POE-g-MAH的增容作用提升了界面均匀性^[27],避免了填料团聚所引起的局部漏电风险。

表4 体积电阻率与介电强度结果

Tab.4 Volume resistivity and dielectric strength results

编号	体积电阻率/ $(10^{15} \Omega \cdot \text{cm})$	介电强度/ $(\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1})$
T0	10.20	27.3
T2	9.50	26.9
T4	8.21	26.4
T6	7.86	26.0
T8	6.20	25.2

3 结论

本研究通过熔融共混法制备PC/钛酸钾阻燃复合材料,系统评估钛酸钾含量对材料综合性能的影响。结果表明:添加质量分数6%钛酸钾、2% POE-g-MAH和5% DOPO衍生物的T6组在阻燃性、力学性能、热稳定性及电绝缘性方面均表现优异,兼具阻燃与结构安全性能。

参考文献

- [1] 左言胜. 甲基丙烯酸甲酯-丁二烯核壳结构粒子的构建及其对聚碳酸酯基复合材料的改性研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2025.
- [2] 付文茹. 铝合金/PC异种材料搅拌摩擦对接焊工艺与接头性能研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2024.
- [3] 高卿伟, 韩志群, 殷鹏刚, 等. 异山梨醇及其在生物基聚碳酸酯应用研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2023(10): 150-161.
- [4] 高鑫磊, 王松彬, 邓小春, 等. Fe^{3+} -邻苯二酚功能化纳米 SiO_2 改性聚碳酸酯薄膜的制备及性能[J/OL]. 精细化工, 2025: 1-10. (2025-05-08). <https://link.cnki.net/doi/10.13550/j.jxhg.20250116>.
- [5] 肖翔心, 刘博文, 王玉忠. 兼具优良力学性能的新型阻燃聚碳酸酯[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2025, 62(5): 1036-1042.
- [6] 王学, 于水欢, 姚哲侃, 等. 吡啶-磷酸酯阻燃剂的合成及阻燃聚碳酸酯应用[J]. 化学通报, 2021, 84(7): 748-751.
- [7] 康玉杰. 硅氧烷基阻燃剂在聚碳酸酯/丙烯腈-丁二烯-苯乙烯合金中的应用研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2025.
- [8] 刘显勇, 刘羽玲, 杨东方, 等. 阻燃聚碳酸酯的研究进展[J]. 山东化工, 2023(19): 131-133.

- [9] 瞿发海, 张振环, 查坐统, 等. 磷系阻燃剂阻燃机制及高分子材料阻燃技术研究进展[J]. 生态产业科学与磷氟工程, 2025, 40(5): 71-79.
- [10] 丁培杰, 赵明, 张双琨, 等. 磷系阻燃剂对芳氧基聚磷腈绝热材料性能的影响研究[J]. 化工新型材料, 2025, 53(9): 117-120.
- [11] 唐诚兴, 秦良雨, 王念贵. 磷系阻燃聚氨酯硬质泡沫的制备[J]. 胶体与聚合物, 2025(2): 51-54.
- [12] 王承慧, 张英强, 杨晨熙, 等. 含DOPO阻燃环氧树脂的研究进展[J]. 应用技术学报, 2022(4): 321-325.
- [13] 译伟. 基于DOPO衍生的磷系阻燃剂的构建及其应用[D]. 天津: 天津工业大学, 2023.
- [14] LIU B W, ZHAO H B, WANG Y Z. Advanced flame-retardant methods for polymeric materials[J]. Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.), 2022, 34(46): 2107905.
- [15] 吴琼, 郑健强, 李斌, 等. 陶瓷化组合物对WF/PP复合材料阻燃性能影响的研究[J]. 化学与粘合, 2013, 35(4): 51-54.
- [16] 王欢, 齐鲁. 氟钛酸钾接枝改性羽绒纤维的阻燃性能[J]. 消防科学与技术, 2013(1): 71-74.
- [17] 吕璐, 王杰, 王妮, 等. 防水整理对六钛酸钾晶须涂层织物隔热性能的影响[J]. 产业用纺织品, 2022(2): 7-11.
- [18] 张新兰, 张琴, 傅强, 等. 聚碳酸酯热降解与稳定性的研究进展[J]. 塑料工业, 2008, 36(9): 1-4.
- [19] 佟铭玉. 膨胀型阻燃硬质聚氨酯泡沫涂层的制备与改性研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2023.
- [20] 王雪娇. 高防水性无卤阻燃聚乳酸复合材料的研究与应用[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [21] 马哲文. 仿生含硫聚合物基阻燃涂层的制备及其植酸杂化阻燃聚氨酯硬泡研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2021.
- [22] 瞿赢定. 聚乳酸反应性增韧及其机理研究[D]. 杭州: 杭州师范大学, 2023.
- [23] 胡高平, 高杰, 王玲. 环氧建筑结构胶热变形温度(HDT)的研究[J]. 粘接, 2017, 38(11): 53-56.
- [24] 周文英. 高导热绝缘高分子复合材料研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [25] 廖瑞金, 柳海滨, 柏舸, 等. 纳米 SiO_2 /芳纶绝缘纸复合材料的空间电荷特性和介电性能[J]. 电工技术学报, 2016(12): 40-48.
- [26] 陈子炜. 银包覆四钛酸钾导电晶须的制备及其复合材料的应用研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2023.
- [27] 李树材, 陶磊, 秦小梅. POE-g-MAH反应性增容HDPE/PA6共混合金的热致形状记忆性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2010(2): 44-46.