MCA/ZDP协同改性聚酰胺6阻燃性能与力学性能研究

李圆圆[1],章 震[2],王路通[1],秦小转[1],姚 瑶[1],王宇飞[1]

(1.郑州工程技术学院材料与化学工程学院,河南 郑州 450044;2.浙江新锂想科技有限责任公司,浙江 杭州 311607)

摘 要:聚酰胺6(PA6)具有优良的力学性能、耐磨性、耐化学腐蚀性,广泛应用于纺织服装、电子电气等领域。然而,PA6的易燃特性阻碍其在更多领域的应用拓展。文章以氮系阻燃剂三聚氰胺氰尿酸盐(MCA)和磷系阻燃剂二乙基次膦酸锌(ZDP)协同改性PA6,采用熔融共混法制备阻燃PA6,研究阻燃PA6的性能。结果表明:随着阻燃剂含量的增加,阻燃PA6的熔点、热稳定性呈逐渐下降趋势,力学性能呈先上升后下降趋势。当MCA质量分数为8%、ZDP质量分数为4%时,PA6/MCA/4ZDP的熔点和起始分解温度分别降至218.3 ℃和325.0 ℃。PA6/MCA/4ZDP的拉伸强度和断裂伸长率均为最低值,分别为46.8 MPa与20.3%。当MCA质量分数为8%、ZDP质量分数为2%时,PA6/MCA/2ZDP的阻燃性能最佳,UL94垂直燃烧等级为V-0级,极限氧指数(LOI)为30.1%。

关键词:阻燃;聚酰胺6;三聚氰胺氰尿酸;二乙基次膦酸锌

中图分类号:TQ323.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-3360(2026)08-0001-05

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.001

Study on Flame Retardancy and Mechanical Properties of Polyamide 6 Synergistically Modified by MCA/ZDP

LI Yuanyuan[1], ZHANG Zhen[2], WANG Lutong[1], QIN Xiaozhuan[1], YAO Yao[1], WANG Yufei[1]

(1. College of Materials and Chemical Engineering, Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou 450044, China;
2. Zhejiang Xinlixiang Technology Co. , Ltd. , Hangzhou 311607, China)

Abstract: Polyamide 6 (PA6) possesses excellent mechanical properties, wear resistance, and chemical corrosion resistance, and is widely used in the textile, apparel, electronic, and electrical fields. However, the inherent flammability of PA6 hinders its further application in more fields. In the study, nitrogen-based flame retardant melamine cyanurate (MCA) and phosphorus-based flame retardant zinc diethylphosphinate (ZDP) were used to synergistically modify PA6, and flame-retardant PA6 was prepared via melt compounding. The properties of the flame-retardant PA6 were investigated. The results showed that with increasing flame retardant content, the melting point and thermal stability of flame-retardant PA6 exhibited a gradual decreasing trend, while the mechanical properties first increased and then decreased. When the mass fraction of MCA was 8% and that of ZDP was 4%, the melting point and initial decomposition temperature of PA6/MCA/4ZDP decreased to 218.3 ℃ and 325.0 ℃, respectively. The tensile strength and elongation at break of PA6/MCA/4ZDP reached their minimum values of 46.8 MPa and 20.3%, respectively. When the mass fraction of MCA was 8% and that of ZDP was 2%, PA6/MCA/2ZDP exhibited the best flame retardancy, with a UL94 vertical burning rating of V-0 and a limiting oxygen index (LOI) of 30.1%.

Keywords: Flame retardancy; PA6; MCA; ZDP

收稿日期Submitted date 2026-02-21;修回日期Revised date 2026-03-13;录用日期Accepted date 2026-04-15

基金项目:河南省自然科学基金项目(252300423751);河南省科技攻关项目(252102210069);河南省高等学校重点科研项目(25B520024);郑州工程技术学院高层次人才科研启动基金项目(22072);2024年度河南省本科高校研究性教学示范课程《应用化学综合实验》;郑州市功能电催化与化学储能重点实验室

联系人,lyy20081211@163.com

引用本文:李圆圆,章震,王路通,等.MCA/ZDP协同改性聚酰胺6阻燃性能与力学性能研究[J].塑料科技,2026,54(8):1-5.

Citation:LI Y Y, ZHANG Z, WANG L T, et al. Study on flame retardancy and mechanical properties of polyamide 6 synergistically modified by MCA/ZDP[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 1-5.

聚酰胺6(PA6)凭借优良的力学性能、耐磨性及耐化学腐蚀性等特性，被广泛应用于诸多领域。然而，PA6的易燃特性所带来的安全隐患阻碍其在更多领域的应用拓展[1-3]。为提升PA6的阻燃性能，可以引入阻燃剂，抑制或延缓其燃烧过程[4-6]。进行阻燃、增强改性时，共混法因其制备方法简便、成本可控、阻燃剂种类多等优点而备受关注[7-10]。

三聚氰胺氰尿酸盐(MCA)是一种常见的氮系阻燃剂，因其与聚酰胺有良好的相容性，在阻燃PA6领域获得广泛应用[11-15]。LI等[16]以MCA为阻燃剂并引入己内酰胺，经原位聚合法制备阻燃PA6。结果表明：当MCA质量分数为8%时，阻燃PA6的极限氧指数(LOI)可达29.3%，UL94垂直燃烧等级为V-0级，阻燃效果较好。FAN等[17]将1,3-双(3-氨基丙基)四甲基二硅氧烷(MSDS)通过可控酰胺化和缩聚反应合成一种本质阻燃PA6(FR-PA6)，然后将MCA纳米颗粒作为气相增效组分，对FR-PA6进行协同改性，以增强其阻燃性能。结果表明：制备的FR-PA6/MCA纳米复合材料的LOI能够达到32.7%，UL94垂直燃烧等级为V-0级，力学性能良好。SHAN等[18]合成聚(三嗪磷酰胺)(BPGA)，研究BPGA/MCA在PA6中的协同阻燃性能和机理。结果表明，当BPGA和MCA的质量比为1∶1时，阻燃体系对PA6的阻燃效果最佳，BPGA/MCA表现出良好的协同炭化效应。LI[19]采用MCA和勃姆石(BM)为复配阻燃剂，制备一系列BM/MCA/PA6复合材料。结果表明：当MCA含量为15%时，其LOI达到30.4%，UL-94垂直燃烧等级达V-0级；使用BM替代部分MCA后，4-BM/11-MCA/PA6表现出最佳的阻燃性，LOI达到33.8%，UL-94垂直燃烧等级仍为V-0级；适量MCA与BM具有协同阻燃效应。

二乙基次膦酸锌(ZDP)具有较高的磷含量，在气相和凝聚相均有阻燃效果，可用于聚合物的阻燃[20-21]。刘婷等[22]设计季戊四醇磷酸酯(PEPA)/ZDP协同阻燃体系，采用熔融挤出法制备PA6/PEPA/ZDP阻燃材料。结果表明：当PEPA与ZDP的质量比为2∶1时，PA6/PEPA/ZDP的LOI达到28%，锥形量热残炭率增加6.56%，总热释放量降低34.5%，具有良好的可纺性。FENG等[23]制备具有微孔-微核结构PA6复合材料[单甘油酯(MG)/八苯基硅氧烷(OPS)/ZDP/PA6]。结果表明：微孔的隔热效应与OPS和ZDP在微核中具有协同作用，共同实现材料的高阻燃性能。

氮-磷阻燃剂复配使用可以提高阻燃效率[24]。因此，本研究将磷系阻燃剂和氮系阻燃剂进行复配，构建MCA/ZDP协效阻燃体系，采用熔融共混法制备阻燃PA6树脂，对其阻燃性能进行深入研究。

1 实验部分

1.1 主要原料

PA6，YH800，湖南岳化化工股份有限公司；MCA，工业纯，浙江旭森非卤消烟阻燃剂有限公司；ZDP，工业纯，浙江新化化工股份有限公司。

1.2 仪器与设备

双螺杆挤出机，MEDI-22/40，广州市普同实验分析仪器有限公司；真空干燥箱，DZF-6020，上海一恒科学仪器有限公司；注塑机，TY-7003，江苏天源试验设备有限公司；差示扫描量热仪(DSC)，Q2000，美国TA公司；热重分析仪(TG)，209 F3，德国耐驰公司；电子万能材料试验机，SANS CMT6000，美特斯工业系统(中国)有限公司；极限氧指数仪，ZNJF-5，济南中诺仪器有限公司；垂直燃烧测定仪，CZF-5，山东德瑞克仪器有限公司。

1.3 样品制备

表1为PA6和阻燃PA6的配方。将原料置于真空烘箱中，在85 ℃条件下干燥8 h，去除水分，按照表1配方将原料混合均匀，每组样品中PA6的质量不少于1 000 g。利用双螺杆挤出机，经熔融共混制备6组样品。表2为双螺杆挤出机各段温度。

表1 PA6和阻燃PA6的配方

Tab.1 Formula of PA6 and flame-retardant PA6 单位：%

样品编号	w_{PA6}	w_{MCA}	w_{ZDP}
PA6	100	0	0
PA6/MCA	92	8	0
PA6/MCA/1ZDP	91	8	1
PA6/MCA/2ZDP	90	8	2
PA6/MCA/3ZDP	89	8	3
PA6/MCA/4ZDP	88	8	4

表2 双螺杆挤出机各段温度

Tab.2 Temperatures of each zone of twin-screw extruder 单位：℃

温区	温度
料筒1区	160
料筒2区	220
料筒3区	240
料筒4区	257
料筒5区	260
料筒6区	257
料筒7区	255
料筒8区	250
模头区	247

1.4 性能测试与表征

DSC测试：将样品以40 ℃/min的速率从室温升温至320 ℃，恒温5 min，消除热历史。以10 ℃/min的速率降温至100 ℃，以10 ℃/min的速率升温至300 ℃。

TG测试：在N_2气氛下进行测试，样品干燥后以10 ℃/min的速率从50 ℃升温至800 ℃。

力学性能测试：将PA6和阻燃PA6切片干燥后注塑成标准样条(5A型)，利用电子万能材料试验机按照GB/T

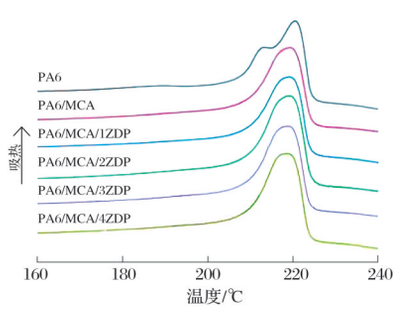
1040.2—2022进行测试，标距为20 mm，拉伸速率为20 mm/min。

阻燃性能测试：LOI按照GB/T 2406.2—2009进行测试，样条尺寸为100 mm×10 mm×4 mm。垂直燃烧性能按照GB/T 2408—2021进行测试，样条厚度为3.2 mm。

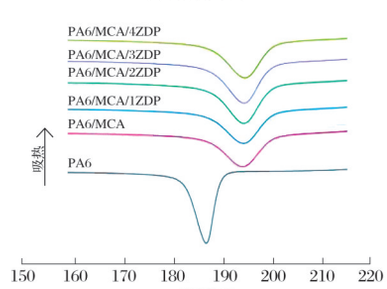
2 结果与讨论

2.1 阻燃剂对PA6熔融及结晶行为的影响

图1为PA6和阻燃PA6的DSC曲线，表3为PA6和阻燃PA6的DSC数据。从图1与表3可以看出，PA6的熔点温度(t_m)为220.6 ℃，结晶温度(t_c)为186.4 ℃。引入阻燃剂后，随着ZDP含量的增加，阻燃PA6的熔点呈降低趋势。PA6/MCA/4ZDP的t_m降低至218.3 ℃。可能是由于阻燃剂的引入破坏PA6分子链的规整度，降低分子间的氢键密度，减弱分子间作用力，分子链更易发生相对滑移，从而导致熔点下降。t_c与t_m的变化趋势相反，阻燃PA6的t_c随ZDP含量的增加逐渐升高。PA6/MCA/4ZDP的t_c上升至194.2 ℃，较PA6提高约7.8 ℃。阻燃剂的引入能够改善基体的结晶性能，这是因为阻燃剂在降温过程中起到异相“成核剂”的作用，大量异相晶核导致PA6大分子链在较高温度下结晶，从而提高阻燃PA6的t_c。



(a) 熔融曲线



(b) 结晶曲线

图1 PA6和阻燃PA6的DSC曲线

Fig.1 DSC curves of PA6 and flame-retardant PA6

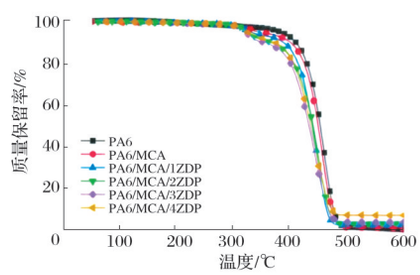
2.2 阻燃剂对PA6热稳定性的影响

图2为PA6和阻燃PA6的TG和DTG曲线，表4为PA6和阻燃PA6的TG数据。从图2和表4可以看出，PA6为一步降解过程，在461.2 ℃处出现热失重峰，PA6分子链在高温时发生分解、芳香化和交联等反应，释放NH_3、H_2O和CO_2等不燃性气体。而阻燃PA6呈现两步降解特征。280~370 ℃处的第一个热失重峰是由于阻燃剂分解所引起，虽然阻燃PA6热稳定性降低，但仍能满足后续注塑等加工过程对温度的要求。在450 ℃附近的第二个热失重峰则对应PA6骨架的降解。

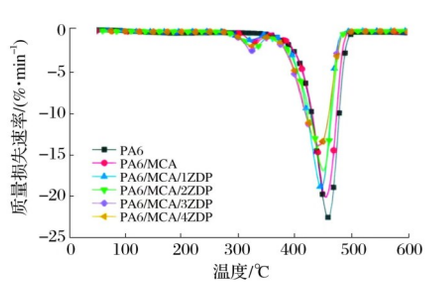
表3 PA6和阻燃PA6的DSC数据

Tab.3 DSC data of PA6 and flame-retardant PA6 单位：℃

样品编号	t_m	t_c
PA6	220.6	186.4
PA6/MCA	219.5	193.7
PA6/MCA/1ZDP	219.3	193.8
PA6/MCA/2ZDP	219.1	194.0
PA6/MCA/3ZDP	218.6	194.1
PA6/MCA/4ZDP	218.3	194.2



(a) TG



(b) DTG

图2 PA6和阻燃PA6的TG和DTG曲线

Fig.2 TG and DTG curves of PA6 and flame-retardant PA6

表4 PA6和阻燃PA6的TG数据

Tab.4 TG data of PA6 and flame-retardant PA6

样品编号	初始分解温度/℃	最大分解温度/℃	600 ℃时残炭率/%
PA6	385.4	461.2	0.12
PA6/MCA	348.2	456.5	0.67
PA6/MCA/1ZDP	331.8	449.3	2.22
PA6/MCA/2ZDP	327.3	451.5	3.01
PA6/MCA/3ZDP	321.5	445.6	3.63
PA6/MCA/4ZDP	325.0	444.7	6.92

残炭率是评价凝聚相阻燃效果的重要指标。从表4可以看出，PA6在600 ℃时的残炭率为0.12%。与PA6相比，阻燃PA6的残炭率逐渐提高。PA6/MCA的残炭率为0.67%，与PA6基本持平，表明MCA的阻燃机理主要以气相为主。MCA在受热时释放的不燃性气体能够稀释氧气

与可燃性气体浓度，中断燃烧链式反应，从而抑制燃烧，达到阻燃效果。当ZDP含量增加时，阻燃PA6的残炭率也逐渐增加，PA6/MCA/4ZDP的残炭率达6.92%，表明ZDP对PA6起凝聚相阻燃作用，ZDP的引入促进PA6基体在高温下脱水成炭，形成凝聚相保护层，阻隔热量与物质传递，达到阻燃效果。TG测试结果也表明，MCA/ZDP阻燃体系可以同时起到气相和凝聚相协调阻燃效果。

PA6的初始分解温度为385.4 ℃，引入阻燃剂后，阻燃PA6的初始分解温度呈下降趋势，说明阻燃剂的引入能够降低PA6基体的热稳定性。这主要是因为MCA与PA6分子链间的氢键作用破坏PA6分子内氢键的有序排列，削弱物理交联网络，使链段在受热条件下更易运动和解离，最终表现为热稳定性的下降。所有改性体系的初始分解温度均高于300 ℃，远超出常规注塑加工温度范围，表明其热稳定性可完全满足实际生产需求。

2.3 阻燃剂对PA6力学性能的影响

表5为PA6和阻燃PA6的力学性能。从表5可以看出，PA6的拉伸强度为57.1 MPa，断裂伸长率为56.4%。引入MCA后，PA6/MCA的拉伸强度降低至48.4 MPa，断裂伸长率降低至33.3%。原因是MCA在基体中易发生团聚，形成应力集中源，这些缺陷在受力条件下会诱发局部应力急剧升高，加速裂纹萌生和扩展，导致材料由韧性断裂向脆性断裂转变，塑性变形能力显著降低。继续添加ZDP，阻燃PA6的拉伸强度和断裂伸长率均先升高后降低，PA6/MCA/2ZDP的拉伸强度和断裂伸长率最优，分别为49.8 MPa和35.0%。适量ZDP可能作为界面改性剂，改善阻燃剂与PA6基体间的界面黏结状态，对阻燃PA6具有增强作用。当ZDP含量增加到一定程度时，阻燃PA6的力学性能逐渐下降。过量阻燃剂一方面会破坏PA6分子链结构的规整性，另一方面也可能在PA6基体中形成应力集中点，使阻燃PA6在受力时更易发生断裂，导致力学性能下降。

表5 PA6和阻燃PA6的力学性能

Tab.5 Mechanical properties of PA6 and flame-retardant PA6

样品编号	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%
PA6	57.1	56.4
PA6/MCA	48.4	33.3
PA6/MCA/1ZDP	49.1	34.5
PA6/MCA/2ZDP	49.8	35.0
PA6/MCA/3ZDP	48.2	27.8
PA6/MCA/4ZDP	46.8	20.3

2.4 阻燃剂对PA6阻燃性能的影响

UL94垂直燃烧等级和LOI是评价材料阻燃性能的重要指标。PA6属易燃材料，燃烧时间较长，燃烧过程伴有严重熔滴滴落，引燃脱脂棉，UL94垂直燃烧等级为V-2级[25]。

表6为PA6和阻燃PA6的垂直燃烧和LOI测试结果。从表6可以看出，引入MCA后，PA6/MCA的燃烧时间缩短，LOI提升至27.4%，但其熔滴滴落仍会引燃脱脂棉，UL94垂直燃烧等级为V-2级。样条燃烧后表面有明显的孔洞结构，表明MCA以气相阻燃机理为主导，分解产生的不燃性气体能够吸收热量并稀释可燃气体，从而延缓燃烧进程。然而，由于缺乏有效的凝聚相成炭作用，MCA无法抑制高温下材料的熔融滴落行为。

表6 PA6和阻燃PA6的垂直燃烧和LOI测试结果

Tab.6 Vertical burning and LOI test results of PA6 and flame-retardant PA6

样品编号	是否引燃脱脂棉	等级	LOI/%
PA6	是	V-2	21.8±0.2
PA6/MCA	是	V-2	27.4±0.1
PA6/MCA/1ZDP	否	V-0	28.7±0.1
PA6/MCA/2ZDP	否	V-0	30.1±0.2
PA6/MCA/3ZDP	是	V-2	26.9±0.2
PA6/MCA/4ZDP	是	V-2	24.5±0.2

从表6还可以看出，引入ZDP后，PA6的阻燃效果得到显著改善，阻燃体系表现出协同作用。PA6/MCA/1ZDP和PA6/MCA/2ZDP火焰很快熄灭且无熔滴滴落，UL94垂直燃烧等级为V-0级，LOI达到28%以上，达到难燃级别。尤其是PA6/MCA/2ZDP，其LOI超过30.0%。原因是ZDP的引入使阻燃PA6发生脱水成炭反应，在材料表面形成致密炭层。该炭层兼具物理屏障与支撑作用，一方面抑制热量和氧气的向内传输，另一方面防止熔融物滴落，从而有效提升材料的火灾安全性。然而随着ZDP含量的增加，阻燃PA6的燃烧时间延长，产生熔滴引燃脱脂棉，LOI降低，阻燃效果反而减弱。可能是由于添加过量ZDP后，阻燃PA6的热稳定性下降，燃烧时温度高，阻燃PA6快速软化分解，在表面炭层还未完全形成前，熔融物即因重力等作用而滴落，带走热量并引燃脱脂棉，导致样品阻燃性能下降。上述结果表明，ZDP的凝聚相成炭作用与PA6基体热稳定性之间存在竞争关系，ZDP添加过量反而会破坏阻燃平衡。然而，当MCA与ZDP复配使用时(PA6/MCA/2ZDP)，LOI超过30%，UL94垂直燃烧等级为V-0级，表明MCA与ZDP有一定协同效应，能够在一定程度上改善PA6的阻燃性能。

3 结论

阻燃剂的引入能够破坏PA6分子结构的规整性，导致其熔点逐渐降低，同时发挥异相成核作用，提高PA6的t_c。引入ZDP后，阻燃PA6的力学性能呈先升后降的趋势，表明引入少量ZDP对PA6具有一定增强效果。在热稳定性方面，阻燃剂的引入能够降低PA6的起始分解温度。MCA加入后，PA6/MCA体系的残炭率未发生明显变化，其阻燃

机理以气相作用为主。随着ZDP含量的增加，残炭率逐渐升高，表明ZDP主要发挥凝聚相阻燃作用，MCA与ZDP之间存在协同阻燃效应。在阻燃性能方面，阻燃剂的引入显著改善PA6的阻燃性能。当MCA质量分数为8%、ZDP质量分数为2%时，PA6/MCA/2ZDP的阻燃效果最佳，LOI提高至30.1%，UL94垂直燃烧等级为V-0级，达到难燃级别。

参考文献

[1] 王小庆, 徐成明. 碳纤维对聚酰胺复合材料力学性能和热稳定性的影响[J]. 塑料科技, 2025, 53(10): 55-59.

[2] TAWIAH B, ULLAH S, CHENG Z X, et al. Microporous transition metal phosphide flame retardant toughened PA6 composites with excellent thermal conductivity and ferroelectric response[J]. Composites Part B: Engineering, 2025, 300: 112502.

[3] JIN W J, DONG B P, CHENG X W, et al. Synthesis of a phosphorylated bio-derivative for multifunctional polyamide 6 via a self-polymerization strategy[J]. Polymer Degradation and Stability, 2025, 242: 111669.

[4] ZHENG J, ABDALRHEM H A O, LIAO Z G, et al. Preparation of DOPO-immobilized α-ZrP and its PA6 composites with enhanced flame retardancy via synergetic effect[J]. Polymer Degradation and Stability, 2026, 249: 112079.

[5] SHI X J, DU X X, ZHAO X D, et al. Improvement of flame retardancy on polyamide 6 composites via melamine polyphosphate-modified carbon nanotubes[J]. Polymers, 2026, 18(5): 643.

[6] 张鑫欣, 孙妍璐, 马训明, 等. 阻燃聚酰胺纤维研究进展[J]. 现代纺织技术, 2026, 34(6): 1-13.

[7] TAO B, ZHANG Y, LIU L B, et al. Surface construction of aluminum diethylphosphinate for improving flame retardant and mechanical properties of PA6 composites[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2026, 193: 107420.

[8] 刘臻, 李拜天, 纪国栋. 硼酸盐功能化纤维素纳米晶/聚酰胺共混物的3D打印结构化水凝胶设计[J]. 塑料科技, 2025, 53(8): 97-101.

[9] 张萌. 反应挤出制备玄武岩纤维增强尼龙6复合材料的研究[D]. 河北科技大学, 2025.

[10] WANG Y K, CUI L, ZHANG J F, et al. Fire retardant treatments for polyamide 6 and 66: Advances and trends over the last five years[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2025, 7(8): 4677-4693.

[11] TANG S, QIAN L J, QIU Y, et al. The effect of morphology on the flame-retardant behaviors of melamine cyanurate in PA6 composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 131(15): 40558.

[12] 李俊, 姚旭霞, 余洋, 等. 三聚氰胺-三聚氰酸共改性氧化石墨烯/PA66复合薄膜的制备与性能研究[J]. 塑料科技, 2025, 53(9): 49-54.

[13] TAO W, LI J. Melamine cyanurate tailored by base and its multi effects on flame retardancy of polyamide 6[J]. Applied Surface Science, 2018, 456: 751-762.

[14] LIU X, LIU Y C. Application of melem and aluminum diethylphosphinate in the synergistic flame retardancy of PA6: Composites preparation and properties[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2026, 143(18): e70607.

[15] 蔡安惠, 宋立新, 陆遥, 等. 有机硅微球协同膨胀型阻燃剂改性HDPE复合材料的制备与性能研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(3): 55-61.

[16] LI Y Y, LIN Y Z, SHA K, et al. Preparation and characterizations of flame retardant melamine cyanurate/polyamide 6 composite fibers via *in situ* polymerization[J]. Textile Research Journal, 2017, 87(5): 561-569.

[17] FAN S, YUAN R C, WU D Q, et al. Silicon/nitrogen synergistically reinforced flame-retardant PA6 nanocomposites with simultaneously improved anti-dripping and mechanical properties[J]. RSC Advances, 2019, 9(14): 7620-7628.

[18] SHAN H, YAN L L, XU B, et al. Polyphosphamide containing triazine and melamine cyanurate for flame-retardant PA6[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2023, 5(7): 5322-5333.

[19] LI X. Influence of melamine cyanurate and boehmite on flame retardancy of PA6[J]. Iranian Polymer Journal, 2022, 31(8): 975-981.

[20] DU J, ZHENG J X, XIN C L, et al. Phosphorus/bromine synergism improved the flame retardancy of polyethylene terephthalate foams[J]. Polymers, 2024, 16(12): 1690.

[21] 房孝栋, 吴明生. 无卤氮磷系阻燃剂对阻燃三元乙丙橡胶胶料性能的影响[J]. 橡胶工业, 2023, 70(3): 182-188.

[22] 刘婷, 张安莹, 王锐, 等. 季戊四醇磷酸酯/二乙基次磷酸锌协同阻燃聚酰胺6的制备及其性能[J]. 纺织学报, 2018, 39(9): 8-14.

[23] FENG H S, LU H Y, GENG Z S, et al. Microporous-micronucleus composite structure endowing heterogenous polyamide 6 with low-temperature toughness, low dielectric constant, fire retardancy and antibacterial activity[J]. Composites Part B: Engineering, 2023, 261: 110808.

[24] LU Y X, FENG J B, YI D Q, et al. Strong synergistic effects between P/N-containing supramolecular microplates and aluminum diethylphosphinate for fire-retardant PA6[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2024, 176: 107834.

[25] LIU R Q, TAO B, GAO S L, et al. A nitrogen-oxygen triazine flame retardant for simultaneously improving flame retardancy and mechanical performance of nylon 6[J]. Polymer Degradation and Stability, 2026, 246: 111924.