

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.01.027

阻燃聚酰胺/聚苯醚合金的研究进展

魏安^{1,2}, 尹奇志², 孟征^{1,2}

(1.北京航天凯恩新材料有限公司,北京 100074; 2.北京航天试验技术研究所,北京 100074)

摘要:综述了阻燃聚酰胺/聚苯醚(PA/PPO)合金的改性策略与研究进展。介绍了PA与PPO因相容性差及PA易燃性导致的合金阻燃难题。简述了通过增容技术改善界面相容性,可为构建高效阻燃体系奠定基础的方法。重点论述了适用于PA/PPO合金的无机磷系(如红磷、磷酸锆)与有机磷-氮协同阻燃体系的阻燃机理与应用效果,并对本征阻燃等前沿策略进行了展望。文章指出,相容性优化是实现阻燃剂高效分布与性能平衡的基础;多元协同阻燃是提升阻燃效率、抑制烟毒释放的有效途径;未来研究应致力于开发兼具高效、环保及良好加工性的多功能集成阻燃体系,以推动其在高端领域的应用。

关键词:聚酰胺/聚苯醚合金;相容性;阻燃性;高性能聚合物;工程塑料

中图分类号:TQ322.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2026)01-0207-05

Research review of flame retardant polyamide/polyphenylene oxide alloy

WEI An^{1,2}, YIN Qizhi², MENG Zheng^{1,2}

(1. Beijing Aerospace Kaizen New Material Co., Ltd., Beijing 100074, China;

2. Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: Modification strategies and research advances in flame-retardant polyamide/polyphenylene ether (PA/PPO) alloys were summarized. The challenges in flame-retarding these alloys, which stem from the inherent incompatibility between PA and PPO phases and the flammability of PA were addressed. Methods for improving interfacial compatibility through compatibilization strategies were briefly introduced as a foundation for developing efficient flame-retardant systems. The flame-retardant mechanisms and practical effectiveness of inorganic phosphorus-based systems (e.g., red phosphorus, zirconium phosphate) and organic phosphorus-nitrogen synergistic systems applicable to PA/PPO alloys were focused on, perspectives on emerging strategies like intrinsic flame retardancy were also provided. It is pointed out that optimizing compatibility is crucial for achieving homogeneous dispersion of flame retardants and balanced material properties, multi-component synergistic flame retardancy represents a sustainable pathway to enhance efficiency while suppressing smoke and toxic emissions. Future research should prioritize developing integrated multi-functional flame-retardant systems that combine high efficiency, environmental friendliness, and excellent processability to enable applications in high-end fields.

Keywords: polyamide/polyphenylene ether alloys; compatibility; flame retardancy; high-performance polymer; engineering plastics

火点亮了世界与人类的文明,但火灾每年也同时给人类生命财产造成难以估量的损害^[1]。2024年,中国共发生火灾事故超90万起,造成2 000余人遇难,超2 600余人受伤,直接经济损失超77亿元。在这严峻形势下,社会各行各业对所用材料都提出了严格的阻燃要求^[2-4]。然而,高分子材料作为民用设备、工业设施及医疗领域中不可或缺的基础材

料,其有机化学结构大多具有本征可燃性,在外部热源或明火作用下极易被引燃,且在燃烧过程中会释放大热量、烟雾和有毒气体^[5-7]。因此,开发能够有效减轻或消除火灾隐患的新型高效阻燃聚合物材料已成为建筑、电子、交通等领域迫切需求与发展方向^[8-9]。在这一背景下,阻燃聚酰胺/聚苯醚(PA/PPO)合金作为一种高性能工程塑料,因其优异的

通信作者:孟征,博士,研究员,研究方向为高分子材料功能化改性

收稿日期:2025-10-17

引用格式:魏安,尹奇志,孟征.阻燃聚酰胺/聚苯醚合金的研究进展[J].工程塑料应用,2026,54(1):207-211.

WEI An, YIN Qizhi, MENG Zheng. Research review of flame retardant polyamide/polyphenylene oxide alloy[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(1): 207-211.

综合性能而受到广泛关注,在电动汽车零部件、电子电气设备外壳、高温连接器等对材料耐热、阻燃及力学强度要求较高的领域展现出重要的应用潜力^[10-13]。

PA分子链上的强极性酰胺键能形成大量氢键,因此具有高强度、高刚性、耐蠕变等卓越的力学性能,此外还具备良好的耐磨性、耐有机溶剂性和加工流动性^[14-16]。但该酰胺基团也导致PA易吸水,进而引起尺寸稳定性和力学强度下降,其耐热性与耐冲击性也相对不足。PPO独特的刚性苯环结构使其拥有高力学强度、硬度、韧性及抗蠕变性,热稳定性优异(玻璃化转变温度 $T_g \approx 210^\circ\text{C}$,分解温度 $T_d \approx 330^\circ\text{C}$),且本质阻燃(自熄性),并兼具优良的电绝缘性、低介电常数和耐水解性^[17-19]。尽管如此,PPO存在熔体黏度高、加工困难、内应力大易开裂及耐疲劳性差等显著缺点。目前,该合金体系面临两大挑战:一是PA与PPO相容性差导致力学性能劣化;二是PPO本身具有自熄性,但PA组分的引入显著降低了合金的阻燃性能。对于不相容的PA/PPO体系,增容改性至关重要。

本文从界面相容性优化、阻燃体系构建以及本征阻燃策略三个角度系统综述阻燃PA/PPO合金的研究进展,并重点评价近年来的新技术路径。

1 PA/PPO合金的增容改性

将PA与PPO制成合金可获得优异的综合性能,如尺寸稳定性好、热变形温度高、耐溶剂性和加工成型性优良,但是由于PA和PPO之间界面相容性差,如果想只是通过简单的物理共混来得到性能优异的合金制品是无法实现的。为此,研究人员引入高抗冲苯乙烯、苯乙烯-丁二烯共聚物等相容剂来改善PA/PPO的相容性^[20-22]。除此之外,PA/PPO合金虽然强度高但是韧性差,所以增韧同时保持高强也是制备高性能PA/PPO合金的关键技术难题。

Jeziorski等^[23]以PPO/PA11(80/20)共混物为基体,通过双螺杆挤出熔融共混制备填充未改性 SiO_2 和胺基改性 SiO_2 (A- SiO_2)的纳米复合材料,重点探究硅烷表面改性对复合材料性能的影响;结果表明,随A- SiO_2 含量从1%增至5%,复合材料形态从液滴-基体结构转变为共连续相结构(伴随相反转),而5%未改性 SiO_2 虽引发相反转但仍保留液滴结构;A- SiO_2 显著提升复合材料的流变性和力学性能(5%时拉伸弹性模量达4 998 MPa、弯曲强度达90 MPa),并通过增容作用改善PPO与PA11的相容性、降低PA11结晶度且不影响其结晶温度(T_c);未改性 SiO_2 则因增塑PPO,略增PA11结晶度、降低PA11的 T_c 和PPO的 T_g ,力学性能提升有限。该研究在表面改性纳米粒子增强不相容聚合物共混物领域取得了系统性突破,A- SiO_2 改性为PPO/PA11合金的高性能化提供了低成本、高效率的解决方案,具有工业化应用潜力。

聚合物的性能与其化学结构息息相关,PA与PPO的链结构导致其韧性不佳,将两者共混后其韧性依然很差,不能满足使用要求,因此必须对PA/PPO合金进行增韧改性。但是现在单一的增容已经不能满足PA/PPO合金的需求了,研

究者们开始研发兼具增容效果的增韧剂,以期用最少种类的添加剂达到最高的性能。

Xia等^[20]研究了采用马来酸酐接枝苯乙烯-乙烯-丁烯-苯乙烯嵌段共聚物(SEBS-g-MAH)作为反应性相容剂,通过熔融共混制备PA10T/PPO合金。结果表明,SEBS-g-MAH通过其马来酸酐基团与PA10T的端胺基发生酰胺化反应,原位生成SEBS-g-PA10T共聚物,有效改善了PA10T与PPO的相容性,使分散相PPO的域尺寸显著减小。冲击强度从7.9 kJ/m²提升至13.7 kJ/m²,且吸水率和成型收缩率明显降低。尽管拉伸与弯曲强度因PPO加入而略有下降,但材料展现出优异的综合性能、耐热性及尺寸稳定性,表明其在工程塑料领域具有广阔的应用潜力。该研究符合“工程塑料高性能化、多功能化”的趋势,尤其适配汽车电子、精密制造等高端领域的需求,其技术方案具备直接工业化转化的条件。若能进一步优化刚性平衡与长期稳定性,该PA10T/PPO合金有望成为替代部分进口高端工程塑料[如PA9T/PPO、聚苯硫醚(PPS)]的国产化方案,具备重要的产业价值。

吉亚丽等^[24]采用原位聚合/原位增容同步法制备PPO/PPO-g-PA6/PA6纳米共混物,重点探究己内酰胺(CL)在PPO介质中的阴离子开环聚合动力学影响因素;结果表明,引发剂(NaH)含量、小分子活化剂2,4-甲苯二异氰酸酯(BDI)含量、大分子活化剂丙烯酸苯酯接枝聚苯醚(PPO-g-MPAA)活性点数目及温度为促进CL聚合的正效应因素(如NaH=1.2 mol%、BDI=1.00 mol%时聚合速度最优),而PPO含量增加因提高体系黏度和稀释CL浓度呈负效应,大分子活化剂会降低聚合中后期速度;当大分子活化剂接枝率为3%时,共混物中PA6颗粒尺寸最小、界面模糊,增容效果最佳。该增容剂避免了传统反应性增容剂的残留单体和加工敏感性问题,在汽车、电子领域具商用潜力。若能进一步完善工业化工艺细节,该技术有望成为替代传统相容化方案的国产化创新技术,推动PPO/PA6合金的高端化应用。

目前对于PA/PPO合金的增容改性正逐渐从单一的解决相容性问题过渡到多功能性增容改性,例如增韧增容改性、增强增容改性等。良好的相容性是实现阻燃剂均匀分散和有效发挥作用的基石,解决了PA/PPO合金相容性问题,为开发阻燃PA/PPO合金奠定了基础。

2 PA/PPO合金的阻燃改性

PA/PPO合金良好的相容性是阻燃改性的基础。PPO本身是一种自熄性聚合物,具有良好的阻燃性能,但是PPO/PA合金阻燃效果却大打折扣。所以PPO/PA合金阻燃性能的瓶颈主要源于PA组分的易燃性,所以理解PA燃烧过程对解决该问题至关重要。除此之外,针对PA/PPO合金的阻燃研究,还需特别考虑阻燃剂与不相容两相的界面相互作用,以及阻燃剂对已脆弱的相界面可能带来的负面影响。

聚合物的燃烧是一个由自由基引发的连锁循环过程:在热氧条件下,聚合物首先热分解产生烷基自由基($\text{R}\cdot$)等活性中间体; $\text{R}\cdot$ 与氧气反应生成过氧自由基($\text{ROO}\cdot$),进而夺取高

分子链上的氢形成氢过氧化物(ROOH);不稳定的ROOH分解产生新的自由基,同时释放可燃气体,使燃烧反应持续进行^[8,25]。基于此机理,阻燃策略主要从两方面入手:在气相中,通过捕获自由基或释放不燃气体来中断燃烧链式反应;在凝聚相中,则通过催化成炭、形成保护层或吸热来隔绝热质交换。为实现这些策略,主要的改性方法包括将阻燃剂通过物理共混加入基体或通过化学接枝嵌入聚合物链。

2.1 直接添加阻燃剂

将阻燃剂物理共混到聚合物基体中是历史最悠久且最常用的阻燃方法。该方法操作简单,不需要改变聚合物的合成工艺,几乎适用于各种聚合物材料,广泛应用于工业生产中。经过多年发展,已经研发出各种基于不同阻燃元素和机理的阻燃剂,并且也提出了一些更加先进的共混方法。

最早使用的阻燃剂以卤素类阻燃剂为主,该阻燃剂通过捕获聚合物燃烧过程中产生的自由基,切断自由基连锁反应达到阻燃的目的。然而在实际应用中,卤素阻燃剂会释放有毒有害的氢卤酸气体,不仅破坏生态环境,还危害人体健康,这与绿色可持续发展的理念背道而驰。因此,卤素阻燃剂在日常生产和生活中的应用已受到严格限制。

磷系阻燃剂凭借独特的阻燃机制和低毒性,已成为卤素阻燃剂的理想替代品^[26]。根据不同的化学结构和组成,磷系阻燃剂主要分为无机与有机两大类^[27-29]。常用的无机磷系阻燃剂包括多聚磷酸铵(APP)、次磷酸铝(AHP)和红磷。

红磷作为无机磷系阻燃剂的经典代表,在燃烧过程中会生成五氧化二磷(P_2O_5)。该五氧化二磷物质通过吸水迅速转化为偏磷酸等无机酸,这些成分能有效降低火焰高度和热释放速率。此外,在高温条件下,红磷还能催化形成耐火焦炭层,从而在燃烧表面形成隔热屏障,阻止氧气和热量的进一步传递^[30]。但是无机磷存在吸湿性高、与聚合物相容性差、易热分解等缺点,导致其很难直接用于聚合物的阻燃改性。

Zhang等^[31]研究了氢氧化铝包覆红磷(RP*)对PA66/PPO合金的影响。RP*的添加显著提高了极限氧指数,8%的含量即可达到UL94 V-0级别。含有RP*的PA66/PPO合金的力学性能从韧性降低到脆性断裂模式。随后加入玻璃纤维(GF)有效地弥补了这些缺陷,力学性能提高了100%,但并未改变断裂模式。RP*阻燃剂改善了PA66/PPO/GF复合材料的热分解并降低了最大失重率且大幅提高了其热变形温度,表明含有RP*阻燃剂的PA66/PPO/GF复合材料可用于高温场。RP*技术本身并未突破传统添加型阻燃剂在韧性和颜色方面的固有局限,属于对现有技术的优化与应用拓展,而非颠覆性创新。

Ran等^[32]研究了有机改性磷酸锆结构纳米片(OZrP)和聚氨酯涂层碳纤维(CF)协同增强PA46/PPO合金的阻燃性能、热稳定性和力学性能。改性得到的PA46/PPO的LOI值高达42.0%,远高于纯PA46/PPO(30.5%),且峰值热释放速率下降65.6%,峰值烟生成速率下降86.2%,总热释放下降48.0%,残炭量从0.2%提升到29.9%,提升了150倍。该数据表明

OZrP具有催化聚合物在CF表面碳化作用,形成致密、高石墨化度的保护炭层,该炭层能有效阻隔热量、氧气和可燃气体传输。除了优异的阻燃性能,该策略还兼备力学增强效果。拉伸强度和弯曲强度分别提高了193%和156.3%。OZrP和CF协同作用显著提升PA46/PPO的阻燃性、热稳定性和力学性能,该研究为同时提升聚合物合金的阻燃和力学性能提供了一种有效策略。Rantua团队的研究是一项具有前瞻性和示范性的高水平工作。它通过精巧的“纳米-宏观”多尺度协同设计,不仅解决了聚合物的阻燃问题,还同步大幅提升了其力学性能,实现了“1+1>2”的效果。

有机磷阻燃剂是一种含有有机基团的磷化合物,具有分散性好、所需剂量低的优点。根据磷的结构,可分为磷酸胺类、磷杂菲类等。在阻燃机理研究领域,Camino等^[33]对聚磷酸盐/季戊四醇混合物的热降解行为展开研究,为揭示有机磷阻燃剂的作用奠定了重要基础。现有研究表明,有机磷阻燃剂主要通过气相和凝聚相两种阻燃机制实现阻燃效果。具体作用机制包括:(1)燃烧过程中,有机磷阻燃剂会生成 $HPO\cdot$ 、 $PO\cdot$ 等自由基,这些自由基可捕获 $H\cdot$ 和 $OH\cdot$ 基团,从而抑制燃烧反应;(2)高温条件下,有机磷阻燃剂能催化碳、氢、氧元素的脱水反应,形成致密炭层。同时,该过程会在PA66表面生成磷酸盐,有效隔离材料与空气接触。Camino的工作为理解其凝聚相行为提供了经典范式。当前,有机磷阻燃剂的研究正朝着大分子化、结构多元以及与纳米材料或多元素协同的方向发展,以期在更低添加量下实现更高效、更全面的阻燃保护。

Xie等^[34]利用甘油、丙烯酸酯和磷杂菲(DOPO)合成了星型聚合物三臂甘油丙烯酸酯-DOPO(GL-3DOPO)极大提高了传统DOPO的热稳定性,初始分解温度从194℃提高到360℃。当GL-3DOPO添加量达25%时,PA66的阻燃等级达UL94 V-0级,且材料的LOI值显著提升。GL-3DOPO主要解决了传统DOPO衍生物热稳定性不足、主要发挥气相阻燃作用的问题,通过其更高的热稳定性和气相-凝聚相协同阻燃机制,可以预见的是将GL-3DOPO加入PA66/PPO合金中也能极大提升该合金的阻燃效果。

尽管有机磷阻燃剂应用广泛,但仍面临诸多挑战,例如与聚合物相容性差、力学性能下降等问题。为突破这些局限,科研人员正持续探索新型阻燃剂。其中,氮系阻燃剂凭借独特的阻燃机理和环保特性,已引发学界广泛关注。氮系阻燃剂主要通过气相机理实现阻燃目的,受热分解时会生成 N_2 、 NO_2 、 NH_3 等不可燃气体,这些气体不仅带走PA66表面的热量,而且稀释了氧气和可燃气体的浓度,从而抑制燃烧反应^[35-37]。但是氮系阻燃剂自身阻燃效率较低,单独使用时需大量添加才能达到良好阻燃效果,所以多元素协同阻燃是未来阻燃剂开发的重要方向^[38-41]。

Guo等^[42]通过DOPO与2,4,6-三烯丙氧基-1,3,5-三嗪的加成反应,成功合成了熔融型磷氮阻燃剂(DT),并用DT与PA66及PPO共混成功制备了PA复合材料。实验表明,该材

料具有优异的阻燃性能,LOI值从纯PA66的22.4%提升至29.0%,总热释放降低了27%,有效燃烧热降低了21%,峰值热释放率显著下降。这是因为DT在气相中释放含磷自由基和含氮气体,抑制燃烧;在凝聚相中促进成炭,形成石墨化炭层。PA复合材料除了具有优异的阻燃性能外,力学性能相比于纯PA66也略有提高,但是断裂伸长率和冲击强度随DT增加而下降。在DT阻燃PA66/PPO体系中,“阻燃-力学”性能的平衡确实需要通过精确调控DT的添加量来实现。这需要在确保目标阻燃等级(如UL94 V-0)的前提下,优化DT用量,以尽可能减少对韧性的损失。

尽管直接添加阻燃剂共混法在提升各类聚合物材料阻燃性能方面成效显著,但仍存在小分子阻燃剂迁移扩散、引发溶胀现象、破坏材料固有性能及长期使用稳定性、生物蓄积性和毒性等问题。针对上述问题,通过化学键合阻燃结构单元到聚合物分子链的共聚/接枝阻燃法是一个理想选择。然而由于其制备工艺复杂(包括阻燃共聚单体的设计合成、单体与聚合物单体的共聚反应、共聚参数的繁琐调整)以及高昂成本等问题,目前该技术仅在聚酯、聚酰胺、聚氨酯、环氧树脂、不饱和聚酯和聚苯乙烯等少数材料中得到应用。

2.2 共聚/接枝阻燃单元

通过对文献的调研,发现基本鲜有PA/PPO合金的共聚/接枝改性,多集中于对于PA的共聚改性。这是因为在PA/PPO合金中,限制其阻燃效果的主要因素是PA的可燃性,而PPO本身是一种自熄聚合物。而从聚合物合成角度出发,PA的缩聚反应又极易引入一些含有苯环或者含有阻燃有机磷官能团的组分,从而提高PA的阻燃性能。通过阻燃共聚/接枝改性的PA还能极大提高与PPO的相容性(因为大部分引入了苯环),所以对于PA的接枝/共聚的改性成功,意味着其也能成功应用于PA/PPO合金体系。

Fu等^[43]设计了一种集酸源、碳源和氮源于一体的反应型阻燃剂(TRFR),通过化学键合方式接入PA66主链,可有效避免添加型阻燃剂相容性差、力学性能下降等问题。TRFR具有双羧酸端基,可与己二胺反应形成类似于PA66盐的类聚物,再与PA66在高温高压下共聚,得到TRFR接枝的PA66。当TRFR的添加量为3%时,PA66阻燃级别即可达到V-0级。这是因为当PA66燃烧时,TRFR会发生分解,生成含碳、磷、氮的化合物。磷酸类物质能对燃烧表面脱水生成致密多孔的炭层,这种炭层具有隔离热量和氧气的作用。除此之外,氮源分解释放不可燃气体稀释氧气和可燃气体,通过气-固协同阻燃,有效阻止PA66的持续燃烧。Fu团队的研究超越了对阻燃剂的简单“使用”,进入了“设计”的境界。它提供了一条通往高性能阻燃工程塑料的理想路径:通过极低添加量的反应型阻燃剂,实现永久、高效且不牺牲力学性能的阻燃效果。这代表了阻燃技术发展的未来趋势之一,尽管面临成本挑战,但其科学价值和指导意义是巨大的。

为了使PA66在保持良好力学性能同时具备优异的阻燃性,Zhang等^[44]制备了一种高力学性能的本征阻燃尼龙66

(FRPA66)。首先,通过4-(2-((2-羧乙基)(苯基)磷酰基)氧基)乙氧基-4-氧代己酸(CPPOA)与1,6-己二胺反应生成CPPOA盐,该过程极大提高了CPPOA的初始分解温度,使其能够满足PA66的聚合温度。添加6%的CPPOA就可使PA66的阻燃级别由V-2级提升到V-0级,且热释放速率和总热释放显著降低。虽然力学性能对比略有下降但是明显优于多数文献报道的含6%阻燃剂的PA66。Zhang团队的研究通过精妙的“前驱体稳定化”策略,成功制备了一种高性能本征阻燃PA66。它以其高阻燃效率(6%添加量达V-0级)和卓越的力学性能保持率,展示了反应型阻燃技术所能达到的理想状态。这项技术为开发下一代兼具优异综合性能的工程塑料提供了明确且可行的技术路径,尽管其商业化进程仍会受到成本和工艺复杂性的制约。

Carter等^[45]利用生物来源的trans-3-己烯二酸(t3HDA),通过一锅法异构化和迈克尔加成反应,将DOPO共价接枝到二酸单体上得到功能化二酸(DOPO-HDA),再将其作为共聚单体引入到PA66主链。共价接枝DOPO的PA66总热释放和峰值热释放效率低于共混DOPO的PA66,远小于纯PA66,说明共价接枝DOPO能更有效地抑制燃烧过程中的热量释放。在渗出测试中,在氯仿和热水(80℃)处理后的溶液未检测出DOPO,说明该策略有效避免了环境渗出风险。5%添加量DOPO的PA66拉伸强度、拉伸弹性模量、断裂伸长率以及韧性均显著提升。Carter团队展示了反应型阻燃策略在设计 and 制备高性能、环境友好型阻燃工程塑料方面的巨大潜力。它成功地将生物基原料、高效的磷系阻燃剂和PA66的合成工艺相结合,在分子层面实现了阻燃性、力学性能和环保安全性的协同提升,为下一代阻燃高分子材料的设计提供了非常有益的借鉴。

目前,针对PA/PPO合金的直接共聚/接枝改性研究多聚焦于在PA分子链中引入阻燃结构单元,以制备本征阻燃PA。通过将含磷、氮等元素的反应型阻燃剂以化学键合方式接入PA主链,不仅能高效提升阻燃性(实现UL 94 V-0级,显著降低热释放),还展现出添加型阻燃剂难以比拟的优势:其一,从根本上避免了小分子迁移、渗出,提升了耐久性;其二,部分阻燃剂结构(如含苯环)能同时改善与PPO的相容性;其三,能在较低添加量下实现阻燃与力学性能的良好平衡,甚至部分力学性能得以保持或增强。这些成功案例表明,对PA进行共聚/接枝改性所获得的本征阻燃PA,在阻燃效率、相容性和综合性能上均表现出色,为开发高性能阻燃PA/PPO合金提供了极具潜力的材料基础与技术路径。

3 结语

围绕提升PA及其与PPO合金的阻燃性能,深入探讨了从共混改性到本征阻燃的多种技术路径,核心结论与展望如下:

(1)阻燃策略多元化:单一的阻燃方式各有优劣。添加阻燃剂工艺简单但可能影响力学性能;接枝/共聚阻燃单元效果持久但合成复杂、成本高。选择何种策略需根据具体应

用场景和性能要求决定。

(2)协同阻燃是高效手段:研究一致表明,磷-氮、磷-金属等多元素协同阻燃效应能在气相(释放不燃气体、淬灭自由基)和凝聚相(促进形成致密、高石墨化度的保护炭层)同时发挥作用,实现1+1>2的效果,以较低的添加量实现UL 94 V-0级阻燃,从而显著提升阻燃效率。

(3)性能平衡是关键挑战与目标:成功的阻燃改性不仅是提高LOI值或通过UL-94测试,更要兼顾材料的力学性能、加工流动性和耐久性。通过微胶囊化技术、相容剂的使用以及纳米材料的增强设计,可以在提升阻燃性的同时,将力学性能的损失降至最低,甚至实现增强。

(4)应用前景广阔:经过阻燃改性PA/PPO合金,因其优异的综合性能,在新能源汽车零部件(连接器、电池模块)、电子电气设备外壳等领域展现出巨大的应用潜力。

总而言之,PA/PPO的阻燃改性已从追求单一阻燃指标,发展到追求高效、持久、环保且综合性能优异的“全能战士”。未来研究将继续聚焦于开发新型多功能协同阻燃体系,并解决其工业化生产中的成本与工艺问题,以推动这类高性能工程塑料在更安全、更广阔的领域中的应用。

参考文献

- [1] KELLY C. *Environmental Research*, 2020, 150:255–263.
- [2] LUO Ting, et al. *Resources Chemicals and Materials*, 2025, 4(2). DOI:10.1016/j.recm.2024.10.004.
- [3] LING Chao, et al. *Industrial Crops and Products*, 2023, 194. DOI: 10.1016/j.indcrop.2023.116264.
- [4] 陈勇. *现代化工*, 2023, 43(5):11–13.
CHEN Yong. *Modern Chemical Industry*, 2023, 43(5):11–13.
- [5] KIRKPATRICK A T, et al. *Principles of combustion*[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2024. DOI:10.1007/s00162-006-0039-5.
- [6] 温中印,等. *高分子通报*, 2022, 27(7):7–12.
WEN Zhongyin, et al. *Polymer Bulletin*, 2022, 27(7):7–12.
- [7] SHEN Jingjing, et al. *Polymers*, 2021, 14(1). DOI: 10.3390/polym14010082.
- [8] LIU Bowen, et al. *Advanced Materials*, 2022, 34(46). DOI:10.1002/adma.202107905.
- [9] 李永翔,等. *塑料科技*, 2025, 53(4):69–75.
LI Yongxiang, et al. *Plastics Science and Technology*, 2025, 53(4): 69–75.
- [10] 李登辉,等. *化工新型材料*, 2022, 50(11):168–170, 175.
LI Denghui, et al. *New Chemical Materials*, 2022, 50(11): 168–170, 175.
- [11] 庄肖,等. *塑料*, 2024, 53(4):1–7.
ZHUANG Xiao, et al. *Plastics*, 2024, 53(4):1–7.
- [12] YANG Chao, et al. *Polymer Composites*, 2022, 43(9):5 767–5 782.
- [13] LUO Kang, et al. *Journal of Electronic Materials*, 2025:1–16.
- [14] JING Huang, et al. *Materials Science*, 2024, 30(1):47–52.
- [15] VENOOR V, et al. *Polymer Reviews*, 2021, 61(3):598–645.
- [16] KONDO M Y, et al. *Polimeros*, 2022, 32. DOI: 10.1590/0104-1428.20220042.
- [17] THANGARASU S, et al. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(77):38 381–38 415.
- [18] YANG Yong, et al. *Polymer Bulletin*, 2022, 25(11):32–39.
- [19] KIM B Y, et al. *ACS Applied Polymer Materials*, 2024, 6(8): 4 708–4 717.
- [20] XIA Housheng, et al. *Polymers*, 2024, 16(11). DOI: 10.3390/polym16111598.
- [21] ZHANG Zhenya, et al. *Polymer Bulletin*, 2022, 79(9): 7 939 – 7 951.
- [22] CHONG Yunsheng, et al. *Advances in Polymer Technology*, 2023, 2023(1). DOI:10.1155/2023/3114639.
- [23] JEZIORSK A R, et al. *Materials*, 2022, 15(10). DOI: 10.3390/ma15103421.
- [24] 吉亚丽,等. *东华大学学报(自然科学版)*, 2007, 33(2): 149–152, 157.
JI Yali, et al. *Journal of Donghua University(Natural Science Edition)*, 2007, 33(2):149–152, 157.
- [25] FENG Bingtao, et al. *Polymers*, 2025, 17(8). DOI: 10.3390/polym17081074.
- [26] LEVCHIK S. *Non-Halogenated Flame Retardant Handbook*, 2021:23–99.
- [27] HUO Siqi, et al. *Progress in Polymer Science*, 2021, 114. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2021.101366.
- [28] SINGH I, et al. *ChemistrySelect*, 2024, 9(26). DOI: 10.1002/slct.202401485.
- [29] ZHENG Tao, et al. *Polymers for Advanced Technologies*, 2021, 32 (6):2 508–2 516.
- [30] CHEN Jiuke, et al. *Polymer Degradation and Stability*, 2025. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2025.111543.
- [31] ZHANG Zhenya, et al. [J] *Materials*, 2025, 15(3). DOI:10.3390/ma15030813.
- [32] RAN Jincheng, et al. *Composites Part B:Engineering*, 2019, 166: 621–632.
- [33] CAMINO G, et al. *Polymer Degradation and Stability*, 1984, 6(4): 243–252.
- [34] XIE Mingchen, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2017, 134(22). DOI:10.1002/app.44892.
- [35] 刘采采,等. *有机硅材料*, 2023, 37(1). DOI:10.11941/j.issn.1009-4369.2023.01.010.
LIU Caicai, et al. *Silicone Material*, 2023, 37(1). DOI:10.11941/j. issn.1009-4369.2023.01.010.
- [36] 余厚咏,等. *纺织高校基础科学学报*, 2024, 37(3). DOI:10.13338/j.issn.1006-8341.2024.03.003.
YU Houyong, et al. *Basic Sciences Journal of Textile Universities*, 2024, 37(3). DOI:10.13338/j.issn.1006-8341.2024.03.003.

(下转第218页)