

水滑石基纳米阻燃剂合成及其在聚合物应用的研究进展

李炎^{1,2}, 邢晓华^{1,2}, 孙元华¹, 刘海凤¹, 汪少锋^{1,2*}

(1. 山东天一化学股份有限公司, 山东 潍坊 262737;

2. 山东省阻燃剂开发及应用工程技术研究中心, 山东 潍坊 262737)

摘要:系统综述了水滑石(LDHs)基纳米阻燃剂的结构功能化设计策略与协同阻燃机理。首先阐述了通过层板阳离子调控、层间阴离子功能化插层、表面修饰改性及多维杂化结构构筑等手段实现LDHs功能化的核心策略;深入分析了LDHs与膨胀型阻燃剂、磷氮系阻燃剂及其他无机填料的协同作用机制,揭示了气相-凝聚相双重阻燃的协同效应;系统总结了功能化LDHs在聚烯烃、聚氯乙烯、环氧树脂等典型聚合物基体中的应用进展与界面相容性解决方案。最后展望了该领域在理论计算指导下的理性设计、生物基绿色改性及智能响应材料开发等发展趋势,为新一代高性能环境友好型聚合物阻燃材料的设计开发提供理论指导和技术参考。

关键词:层状双金属氢氧化物;结构功能化设计;协同阻燃;界面工程;聚合物复合材料

中图分类号:TQ314.24

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)05-0076-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.05.014

Research progress on the synthesis of layered double hydroxide-based nano flame retardants and their applications in polymers

LI Yan^{1,2}, XING Xiao-hua^{1,2}, SUN Yuan-hua¹, LIU Hai-feng¹, WANG Shao-feng^{1,2*}

(1. Shandong Tianyi Chemical Co., Ltd., Weifang 262737, China; 2. Shandong Engineering

Technology Research Center of Flame Retardant Development and Application, Weifang 262737, China)

Abstract: This review systematically summarizes the structural functionalization strategies and synergistic flame-retardant mechanisms of layered double hydroxide (LDHs)-based nanoflame retardants. First, we elaborate on the core strategies for LDHs functionalization, including host-layer cation regulation, interlayer anionic functional intercalation, surface modification, and the construction of multidimensional hybrid structures. Furthermore, the synergistic mechanisms between LDHs and intumescent flame retardants, phosphorus-nitrogen compounds, and other inorganic fillers are analyzed in depth, revealing the dual gas- and condensed-phase synergistic effects. The application progress and interfacial compatibility solutions of functionalized LDHs in typical polymer matrices (e.g., polyolefins, polyvinyl chloride, and epoxy resins) are also systematically reviewed. Finally, we highlight future development trends in this field, encompassing rational design guided by theoretical calculations, bio-based green modification, and the development of smart responsive materials. This review aims to provide theoretical guidance and technical references for the design and development of next-generation, high-performance, and environmentally friendly polymer flame retardants.

Key words: layered double hydroxides; structural-functional design; synergistic flame retardancy; interface engineering; polymer composites

聚合物材料凭借卓越的比强度、质轻、易加工成型以及成本低等优势,已在国民经济、尖端工业和人类日常生活等领域占据了主导地位^[1]。有机聚合物因富含碳氢元素而高度易燃,高温下易氧化裂解放热,燃烧时还会产生有毒烟气和熔融滴落,加剧火势并威胁人类安全。添加阻燃剂是经济有效的改性手段,但传统卤系阻燃剂的热解产物含腐蚀性卤化氢和持久性污染物,虽高效却因环保法规收紧而面临淘汰。因此,开发高效、低毒、抑烟的新型无卤绿

色阻燃体系已成为迫在眉睫的战略需求^[2]。

在众多新型无卤阻燃剂中,层状双金属氢氧化物(LDHs),又称水滑石类化合物,作为一种二维纳米材料,展现出独特的应用前景。其理想化学通式为 $[M_{1-x}^{2+}M_x^{3+}(\text{OH})_2]^{x+}(\text{A}^{n-})_{x/n} \cdot m\text{H}_2\text{O}$,结构由带正电荷的类水镁石结构金属氢氧化物层板和层间的阴离子及水分子构成,这种特殊的层状结构赋予了LDHs多功能的阻燃特性^[3]。LDHs在受热时会经历层间水脱除、羟基脱水及阴离子分解等多阶段吸

收稿日期:2025-07-18;修回日期:2026-03-16

基金项目:潍坊市科技发展计划项目(2023ZJ1034);山东省产业领军人才资助项目(tscx202306066)

作者简介:李炎(1998-),男,硕士,助理工程师,研究方向为无机阻燃剂的设计、合成及其应用,lotusqdu@qq.com;汪少锋(1974-),男,博士,正高级工程师,研究方向为新型阻燃剂设计、制备及应用,通讯联系人,shaofw2020@qq.com。

热反应,释放出大量水蒸气与二氧化碳,有效降低燃烧界面的局部温度并稀释可燃气体浓度,发挥气相阻燃作用。同时,其热分解产物为高比表面积的复合金属氧化物(LDO),能够自组装形成致密的隔热挡氧物理屏障;层板内过渡金属阳离子的固态酸碱催化活性,更能显著促进聚合物链在凝聚相发生芳构化与交联反应,形成热稳定性极高的石墨化炭层^[4]。

尽管 LDHs 具备上述理论优势,但在实际应用中仍面临着严峻考验。LDHs 表面富含极性羟基,导致其占市场主导地位的非极性聚合物基体的界面相容性极差,极易发生不可逆的严重团聚^[5]。这不仅使纳米尺度效应失效,更会引发应力集中导致材料力学性能崩塌;且单一 LDHs 欲达理想阻燃级别通常需要极高的添加量,这进一步恶化了加工流变性^[6]。因此,如何通过先进的材料设计理念和技术手段,在原子、分子及纳米尺度上对 LDHs 进行结构功能一体化设计,并利用与其他阻燃组分的协同效应,克服上述挑战,是当前该领域的研究核心^[7]。本文将围绕 LDHs 的结构设计与协同策略这 2 条主线,系统评述其在聚合物阻燃领域的研究进展,并对未来发展方向进行展望。

1 面向高效阻燃的 LDHs 纳米结构功能化设计

为了将 LDHs 从一种简单的无机填料转变为高效的多功能纳米阻燃剂,近年来的研究主要聚焦于以下 4 个方向进行功能化结构设计。

1.1 层板金属阳离子的组成调控

改变主体层板中的金属阳离子种类及比例,是直接调控 LDHs 晶格缺陷密度与本征催化活性的最有效途径。在传统的 MgAl-LDH 基础上,通过同晶取代引入具有可变价态的过渡金属离子(如 Co^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Cu^{2+} 等)或稀土金属离子(如 Ce^{3+} 、 La^{3+}),能够从原子尺度重构层板电子云,显著增强其催化聚合物成炭的能力^[7]。Jiang 等^[8]的工作表明,含有 Ni 元素的 NiAl-LDH 在高温下原位生成的金属镍和氧化镍纳米簇,展现出卓越的脱氢交联催化活性,促使聚合物裂解片段转化为高度石墨化的致密炭层,从而大幅提升抗气流冲击与隔热能力,从而大幅提升了阻燃性能(图 1)。此外,稀土元素的大离子半径及特殊的 4f 电子排布使其极易形成丰富的晶格氧缺陷,引入铈掺杂的 Ce-MgAl-LDH 以及多元杂化 ZnAlCe-LDHs,不仅拓宽了吸热温度窗口,还凭借

$\text{Ce}^{3+}/\text{Ce}^{4+}$ 的高效氧化还原循环,在树脂基体中起到了极佳的自由基猝灭与烟气抑制作用^[9]。

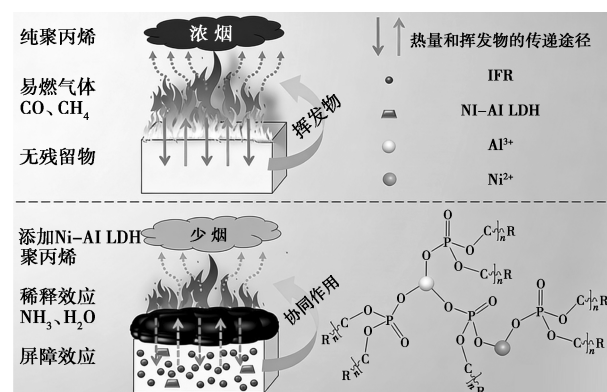


图 1 PP 复合材料的阻燃和抑烟机理示意图

1.2 层间阴离子的功能化插层

利用 LDHs 层间阴离子的拓扑可交换性,将具备特定阻燃或界面相容功能的客体阴离子限域于二维层间距内,是实现 LDHs 多元功能集成的核心策略^[10]。例如, Xu 等^[11]将具有优异脱水成炭能力的三聚磷酸根($\text{P}_3\text{O}_{10}^{5-}$)插入 LDH 层间,不仅能扩大层间距,其受热生成的偏磷酸还能作为强酸催化剂促进基体脱水成炭。此外,通过记忆效应引入具有强氧化和催化活性的多金属氧酸盐,可使聚合物在极低热辐射下迅速生成致密炭壳^[12]。近年来,利用可再生的生物质分子(如植酸、环糊精、海藻酸钠等)对 LDH 进行插层改性成为绿色化学领域的研究热点^[13]。Zhang 等^[14]创造性地将植酸(PA)接枝的 β -环糊精(PCD)作为插层客体靶向插层至 LDH 中。其中,环糊精“外亲水、内疏水”的空腔不仅大幅增加了层间距,还充当了改善 LDH 与非极性基体相容性的“分子桥梁”;而富含磷元素的植酸则提供了高效的酸源与气相自由基猝灭位点(图 2)。

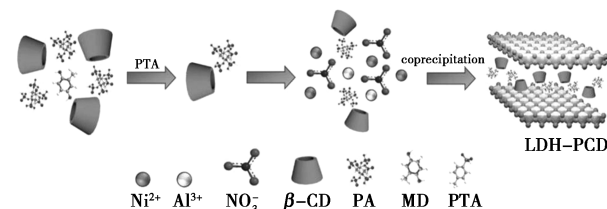


图 2 植酸接枝 β -环糊精插层 LDH (LDH-PCD) 的合成示意图

1.3 表面功能化与界面相容性调控

针对电荷密度过高难以完全插层剥离的体系,直接对外表面进行疏水修饰是解决团聚的关键,研究者在 LDH 纳米片表面包覆一层功能性大分子物

质,可以有效调控其表面性。Wang 等^[15]提出了一种高度精巧的“核-壳”包覆策略,以单宁酸(TA)交联的六氯环三磷腈(HP)网络作为包覆层,制备了核壳结构的超疏水 LDH@TA-HP 复合阻燃剂。该聚合物网络外壳不仅完全屏蔽了 LDH 的极性表面,其自身富含的 P/N 元素更能在受热时引发微区膨胀,与内部 LDH 的分解形成完美的协同效果。

1.4 多维度杂化纳米结构设计

将 0D 纳米颗粒、1D 纳米管或 2D 纳米片与 LDHs 进行异质组装,可实现多种阻燃功能的非线性叠加。Yan 等^[16]以环保木质素磺酸钠(LS)为改性剂,在 LDH 表面定向沉积 Ni(OH)₂ 纳米片,形成了 LDH-LS@Ni(OH)₂ 核-壳杂化物(图 3)。两亲性的木质素改善了分散性并提供优质碳源,而外层的 Ni(OH)₂ 则在燃烧时起到高效催化成炭和提升炭层石墨化度的作用,将“生物基修饰、核壳包覆、过渡金属催化”集于一体,赋予了基体卓越的物理-化学双重防护。这类精巧的结构设计,将不同阻燃机制在纳米尺度上进行结合,为开发下一代高性能阻燃剂开辟了新路径。

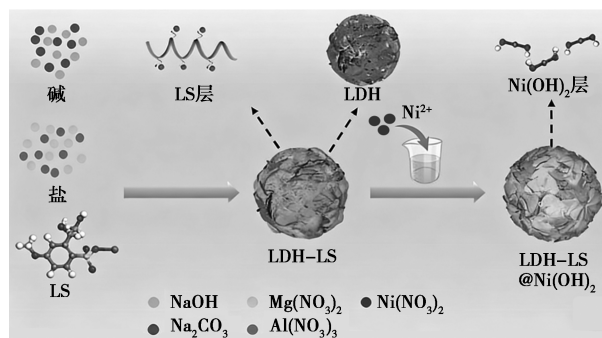


图 3 LDH-LS@Ni(OH)₂ 核壳结构阻燃剂的制备示意图

2 LDHs 基阻燃剂的核心协同策略与机制

尽管通过结构功能化设计可以显著提升 LDHs 的本征阻燃性能,但在实际工业应用中,LDHs 常与其他阻燃剂进行科学复配,以极低的总体添加量来构建多相态的协同增效体系。

2.1 与膨胀型阻燃剂(IFR)的协同作用

LDHs 与 IFR 的协同作用主要体现在凝聚相,IFR 体系在受热时,酸源(如 APP)分解产生多聚磷酸,催化炭源(如 PER)和聚合物基体脱水炭化,同时气源(如 MA)分解产生不燃气体使炭层膨胀^[17]。LDHs 热分解形成的金属氧化物作为成炭催化剂可以促进形成量更多、更致密的炭层,剥离的 LDH 纳

米片可以在膨胀炭层中充当“钢筋”的角色来增强炭层的机械强度。此外,过渡金属(如 Ni、Co)能显著提升残炭的石墨化度,确保膨胀炭层在长时间烧蚀下依然保持致密完整^[8]。表 1 汇总了近年来 LDHs 与 IFR 或其他阻燃剂协同的一些代表性研究成果。

表 1 LDHs 与其他阻燃剂协同体系的典型应用与性能

聚合物基体	LDH 类型	协同阻燃剂	添加量/%	LOI/%	UL-94
PP ^[8]	NiAl-LDH	IFR	17	29.8	V-0
PP ^[11]	LDH-P	APP	25	27.8	V-0
PP ^[18]	LDH-LS@CS@PAMn	生物基 IFR	20	31.6	V-0
PP ^[15]	LDH@TA-HP	磷腈/单宁酸	20	30.1	V-0
EP ^[19]	MgAlZn-LDH-PMoA	HACP(磷腈)	7	—	V-0
EVA ^[20]	SA-LDH	IFR	17	26.9	—
PLA ^[21]	LDH-PWA	IFR	20	36.5	V-0

2.2 与磷/氮系阻燃剂的协同作用

除了物理协同,LDHs 与含反应性官能团的磷/氮系阻燃剂间存在复杂的化学协同联系。以 DOPO 等含磷阻燃剂为例,其在气相中热解释放的高活性 PO·自由基可以高效猝灭火焰区的 H·和 OH·自由基,当与在凝聚相发挥催化炭化作用的 LDHs 复配时,便构建了“气相淬灭+凝聚相阻隔”的全方位双重防线^[19]。磷腈类大分子化合物兼具极高热稳定性及磷氮协同成炭特性^[22],将其交联网络包覆于 LDH 表面,受热时分解生成的含磷酸性物质促进基体脱水,同时释放的不燃性氮气与 LDH 释放的水蒸气形成协同气相稀释,阻燃效率呈指数级放大。

2.3 与其他无机纳米填料的协同作用

将 LDHs 与不同维度的无机纳米填料(如零维二氧化硅、一维碳纳米管或二维氧化石墨烯)进行组装,能在聚合物熔体内部构筑出高度复杂的物理迷宫屏障。这些填料可填充不同尺度的空隙,有效延长热量和可燃气体在材料内部的传输路径,从而延缓燃烧过程^[23]。特别是在与氧化石墨烯的复配中,静电自组装不仅解决了片层间的 π - π 堆叠团聚问题,LDHs 生成的金属氧化物还能通过强界面相互作用催化石墨烯网络发生结构重组,形成热导率更低、更为连续致密的陶瓷化炭层。这种多维度无机杂化网络的构建,使得复合材料的火灾安全性能

可在不增加密度的前提下得到质的提升。

3 LDHs 在典型聚合物基体中的应用

鉴于不同聚合物在分子结构与结晶行为上的巨大差异,将功能化 LDHs 应用于特定基体时必须采取高度针对性的界面工程兼容性解决方案,以确保阻燃性能与力学强度的双重达标。

3.1 在聚烯烃中的应用

聚烯烃(如聚丙烯 PP 和聚乙烯 PE)是产量最大、应用最广的通用塑料。然而,极性、亲水的 LDHs 在完全非极性的脂肪族碳氢分子链聚烯烃基体中极难达到热力学稳态分散^[24]。未经修饰的 LDHs 在强剪切力下依然会形成微米级硬质团聚体,严重劣化基体的冲击韧性。因此,表面疏水化改性是第一要务。除了利用长链脂肪酸阴离子像“分子拉链”般插入无定形区外,构筑自发式的疏水聚合物网络展现出极好前景。以单宁酸与磷腈交联聚合形成的 TA-HP 外壳不仅有效降低了界面张力,更在火灾场景下通过金属离子(如 Ni²⁺)高效捕获聚烯烃断裂产生的初级自由基碎片,引导其向多环芳烃缩聚,从而赋予极易熔融滴落的聚烯烃优异的成炭保形能力^[15]。

3.2 在聚氯乙烯中的应用

聚氯乙烯(PVC)是一种应用广泛但热稳定性差的聚合物,在加工和使用过程中易发生热降解,脱出腐蚀性的 HCl 气体,并形成共轭双键结构导致材料变色和性能下降^[25]。在此体系中,LDHs 扮演着至关重要的高效热稳定剂角色。层板的弱碱性使其成为强效 HCl 清除剂,层间碳酸根及羟基能迅速与脱出的 HCl 中和,将氯离子原位捕获限域于晶格内,彻底切断了游离 HCl 对邻近 PVC 链断裂的自催化降解循环^[26]。为最大化该效应,精准掺杂锌/钙金属离子并引入稀土元素,不仅显著延长了刚果红热稳定时间,延缓了“锌烧”现象,还有效抑制了有毒芳烃化合物的挥发^[27]。改性 LDHs 能够在热降解初期优先与 PVC 活泼氯原子发生加成反应,从源头上阻断共轭多烯大分子的过度交联固化,实现了最佳的抑烟减毒效果。

3.3 在环氧树脂中的应用

环氧树脂(EP)作为高性能热固性聚合物的代表,广泛应用于覆铜板与航空复合材料。如何防止纳米填料在树脂单体高温固化交联过程中被相分离排斥出交联网络是 LDHs 引入环氧树脂的巨大挑战。通过氨基硅烷等活泼偶联剂对 LDHs 进行接

枝,氨基可直接参与环氧基团的亲核开环固化聚合反应,将 LDH 纳米片像“交联节点”一样牢牢化学锚定在三维无限交联网络中,从根本上杜绝二次团聚^[28]。更为高阶的设计是合成兼具固化与阻燃双重功能的大分子,如将含活性氨基的环状磷腈衍生物与多金属氧酸盐插层 LDH 进行杂化,阻燃组分直接作为主固化剂,从而实现无机网络与有机交联网络的完美拓扑融合^[19]。

4 结语

层状双金属氢氧化物作为一类结构可调、环境友好的纳米材料,在聚合物阻燃领域展现出巨大的应用潜力。通过层板阳离子调控、层间客体分子插层、表面功能化以及多维杂化结构设计等策略,研究者们已能有效克服其与聚合物基体相容性差的难题,并实现了与膨胀型、磷氮系等多种阻燃剂的高效协同,显著提升了聚合物材料的防火安全性。

尽管研究成就斐然,但该领域仍面临挑战,主要包括对复杂燃烧过程中多组分协同阻燃机理的微观认识仍不够深入,许多高效功能化 LDHs 的制备工艺复杂、成本较高,以及在高填充量下如何根本性地解决对材料力学性能的负面影响等。展望未来,该领域的发展将呈现以下趋势:借助理论计算与高通量实验相结合,实现 LDHs 阻燃剂的“按需”理性设计;全面拥抱可持续化学理念,大力发展生物基 LDHs 改性体系与复合材料;构建集成传感、响应、阻燃等多功能于一体的智能防火材料。随着多学科交叉的不断深入,LDHs 基纳米阻燃剂必将在新一代高性能安全聚合物材料的开发中扮演更加重要的角色。

参考文献

- [1] Liu B W, Zhao H B, Wang Y Z. Advanced flame-retardant methods for polymeric materials [J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(46): 2107905.
- [2] Ma C, Kumagai S, Saito Y, et al. Recent advancements in pyrolysis of halogen-containing plastics for resource recovery and halogen up-cycling: A State-of-the-Art review [J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58(3): 1423-1440.
- [3] Mochane M J, Magagula S I, Sefadi J S, et al. Morphology, thermal stability, and flammability properties of polymer-layered double hydroxide (LDH) nanocomposites: A review [J]. *Crystals*, 2020, 10(7): 612.
- [4] 秦旻,王亚茹,赵毅.层状双金属氢氧化物阻燃高分子材料的制备及研究进展[J]. *化工新型材料*, 2022, 50(10): 5-9.
- [5] 董钦炳,徐海,竺柏康,等.层状双氢氧化物/聚合物复合材料研

- 究进展[J].现代化工,2022,42(12):35-39.
- [6] Liu Y, Gao Y, Wang Q, *et al.* The synergistic effect of layered double hydroxides with other flame retardant additives for polymer nanocomposites: A critical review [J]. Dalton Transactions, 2018, 47(42):14827-14840.
- [7] Oosthuizen H, Jones L, Naseem S, *et al.* Tailoring materials for their need: Sustainable layered double hydroxide polymer composites[J]. Journal of Polymer Science, 2023, 61(16):1749-1777.
- [8] Jiang S, Liu L, Yang X, *et al.* Nickel-aluminum hydrotalcite for improving flame retardancy and smoke suppression of intumescent flame retardant polypropylene: Preparation, synergy, and mechanism study[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2022, 308(4):2200533.
- [9] Li Y, Shen G, Liu M, *et al.* Study on preparation and flame-retardant mechanism of cerium-doped mg-al hydrotalcite[J]. Coatings, 2025, 15(1):68.
- [10] 胡爱莲, 滑亚婷, 杜春贵, 等. LDHs 的层间阴离子插层技术研究进展及其在材料阻燃中的应用前景[J]. 化工新型材料, 2021, 49(10):240-244, 248.
- [11] Xu S, Li S Y, Zhang M, *et al.* Effect of $P_3O_{10}^{5-}$ intercalated hydrotalcite on the flame retardant properties and the degradation mechanism of a novel polypropylene/hydrotalcite system[J]. Applied Clay Science, 2018, 163:196-203.
- [12] Zhang H, Li K, Liang Z, *et al.* Replacement of interlayer anion via memory effect of layered double hydroxide: A promising strategy for fabricating nanostructures with better flame-retardant performance [J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2022, 170:110932.
- [13] Xu Y J, Zhang K T, Wang J R, *et al.* Biopolymer-based flame retardants and flame-retardant materials [J]. Advanced Materials, 2025, 37(22):2414880.
- [14] Zhang K, Zhang G, Zhang R, *et al.* Synergistic effects of intercalation of layered double hydroxide with phytic acid-grafted β -cyclodextrin on the flame retardancy of polypropylene[J]. Materials Today Communications, 2022, 32:103904.
- [15] Wang L, Tian X Y, Liu Z H, *et al.* Fabrication of highly hydrophobic layered double hydroxide decorated with tannic acid cross-linked phosphazene as a novel flame retardant for polypropylene [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2023, 667:131356.
- [16] Yan W J, Xu S, Tian X Y, *et al.* Novel bio-based lignosulfonate and $Ni(OH)_2$ nanosheets dual modified layered double hydroxide as an eco-friendly flame retardant for polypropylene[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 655:130195.
- [17] 陈涛, 许肖丽, 汪济奎, 等. 无卤膨胀阻燃剂研究进展[J]. 上海塑料, 2017, (4):1-8.
- [18] Yan W J, Ding C J, Min J J, *et al.* Fabrication of green and scalable N/P/S/Mn containing biobased layered double hydroxide as a novel flame retardant and efficient char forming agent for polypropylene[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2023, 11(13):5216-5228.
- [19] Chen X, Wang B, Hao Z, *et al.* Synergistic effect of multifunctional layered double hydroxide-based hybrids and modified phosphagen with an active amino group for enhancing the smoke suppression and flame retardancy of epoxy [J]. ACS Omega, 2022, 7(25):21714-21726.
- [20] Zhang S, Tang W, Sun J, *et al.* Synergistic effects of modified hydrotalcite on improving the fire resistance of ethylene vinyl acetate containing intumescent flame retardants [J]. Polymer Composites, 2016, 39(2):522-528.
- [21] Zhang S, Yan Y, Wang W, *et al.* Intercalation of phosphotungstic acid into layered double hydroxides by reconstruction method and its application in intumescent flame retardant poly (lactic acid) composites[J]. Polymer Degradation and Stability, 2018, 147:142-150.
- [22] Huo S, Song P, Yu B, *et al.* Phosphorus-containing flame retardant epoxy thermosets: Recent advances and future perspectives[J]. Progress in Polymer Science, 2021, 114:101366.
- [23] Hong N, Song L, Wang B, *et al.* Co-precipitation synthesis of reduced graphene oxide/NiAl-layered double hydroxide hybrid and its application in flame retarding poly (methyl methacrylate) [J]. Materials Research Bulletin, 2014, 49:657-664.
- [24] Rezvani Ghomi E, Khosravi F, Mossayebi Z, *et al.* The flame retardancy of polyethylene composites: From fundamental concepts to nanocomposites[J]. Molecules, 2020, 25(21):5157.
- [25] Yu J, Sun L, Ma C, *et al.* Thermal degradation of PVC: A review [J]. Waste Management, 2016, 48:300-314.
- [26] Pan Y T, Yuan Y, Wang D Y, *et al.* An overview of the flame retardants for poly (vinyl chloride): Recent states and perspective [J]. Chinese Journal of Chemistry, 2020, 38(12):1870-1896.
- [27] Du G, Liu Z, Jia P, *et al.* Intercalated rare earth hydrotalcite-like materials and their application in stabilizers in poly (vinyl chloride) [J]. Journal of Vinyl and Additive Technology, 2023, 29(2):410-423.
- [28] Ao Y, Xu L, Wu H, *et al.* Organophosphonic acid intercalation and surface-functionalized hydrotalcite-based flame retardant materials for epoxy resins with highly effective smoke suppression and fire safety[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2025, 72:106361.
-

欢迎订阅《现代化工》杂志, 邮发代号 82—67。