镁铝层状双氢氧化物改性聚碳酸亚丙酯复合材料的制备及性能研究

张贵林，吴俊峰

（黄河科技学院，河南 郑州 450063）

摘　要：为提升可生物降解的聚碳酸亚丙酯（PPC）的阻燃性能，抑制其燃烧时的烟气释放，以镁铝层状双氢氧化物（MgAl-LDHs）为阻燃剂、PPC为基体，采用熔融共混法制备PPC/MgAl-LDHs复合材料，系统考察MgAl-LDHs含量对复合材料力学性能、阻燃性能、抑烟性能、热稳定性及微观形貌的影响。结果表明：当MgAl-LDHs质量分数为5%时，复合材料力学性能最优，拉伸强度达31.5 MPa。当MgAl-LDHs质量分数为7%~10%时，复合材料阻燃等级达到UL-94 V-0级，极限氧指数（LOI）显著提高，峰值热释放率（PHRR）、总热释放量（THR）和烟密度等级均显著降低。复合材料初始分解温度和残炭率随MgAl-LDHs含量的增加而显著提升。阻燃抑烟机理归因于MgAl-LDHs受热分解释放CO_2和H_2O的气相稀释效应、金属氧化物形成的物理屏障以及促进致密炭层生成的协同作用。研究结果为开发环保高效且兼具良好力学性能的阻燃PPC复合材料提供重要参考。

关键词：聚碳酸亚丙酯；镁铝层状双氢氧化物；力学性能；阻燃性能；抑烟性能

中图分类号：TQ323.41　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1005-3360（2026）09-0019-05

DOI：10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.09.004

Study on Preparation and Properties of Magnesium-Aluminum Layered Double Hydroxide Modified Polypropylene Carbonate Composites

ZHANG Guilin, WU Junfeng

(Huanghe S & T University, Zhengzhou 450063, China)

Abstract: To enhance the flame retardancy of biodegradable poly(propylene carbonate) (PPC) and suppress its smoke emission during combustion, magnesium-aluminum layered double hydroxides (MgAl-LDHs) were employed as flame retardants, and PPC/MgAl-LDHs composites were prepared via melt blending. The effects of MgAl-LDHs content on the mechanical properties, flame retardancy, smoke suppression performance, thermal stability, and microstructure of the composites were systematically investigated. The results showed that at a MgAl-LDHs mass fraction of 5%, the composites exhibited optimal mechanical properties, with a tensile strength of 31.5 MPa. At MgAl-LDHs mass fractions of 7%~10%, the composites achieved a UL-94 V-0 flammability rating, with significantly improved limiting oxygen index (LOI), and marked reductions in peak heat release rate (PHRR), total heat release (THR), and smoke density level. The initial decomposition temperature and char residue of the composites increased notably with increasing MgAl-LDHs content. The flame-retardant and smoke-suppression mechanisms are attributed to the synergistic effects of the gaseous dilution effect from CO_2 and H_2O released upon thermal decomposition of MgAl-LDHs, the physical barrier formed by metal oxides, and the promotion of a dense char layer. The study results provide an important reference for developing environmentally friendly, high-efficiency flame-retardant PPC composites with desirable mechanical properties.

Keywords: PPC; Magnesium-Aluminum layered double hydroxide; Mechanical properties; Flame retardancy; Smoke suppression property

收稿日期 Submitted date 2025-12-21；修回日期 Revised date 2026-01-25；录用日期 Accepted date 2026-02-20

基金项目：济源市科技攻关计划项目（24022003）

联系人，HHKJXY1705@yeah.net

引用本文：张贵林，吴俊峰. 镁铝层状双氢氧化物改性聚碳酸亚丙酯复合材料的制备及性能研究[J]. 塑料科技，2026，54(9)：19-23.

Citation: ZHANG G L, WU J F. Study on preparation and properties of magnesium-aluminum layered double hydroxide modified polypropylene carbonate composites[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(9): 19-23.

聚碳酸亚丙酯(PPC)是一种重要的脂肪族聚碳酸酯材料，由CO_2和环氧丙烷在催化作用下共聚而成，可生物降解，可固定利用CO_2，被广泛应用于包装材料、生物医用材料、一次性餐具、薄膜制品等领域[1-4]。然而，PPC极限氧指数(LOI)仅为19.5%，属于易燃材料，燃烧时熔滴严重，产生黑烟，存在火灾安全隐患，严重限制其在消防安全要求较高领域的应用[5-8]。

层状双氢氧化物(LDHs)是一类由两种或两种以上金属氢氧化物构成的二维层状材料，其结构通式为$[M^{2+}_{1-x}M^{3+}_{x}(OH)_2]^{x+}(A^{n-})_{x/n}\cdot mH_2O$，其中$M^{2+}$和$M^{3+}$分别为二价和三价金属阳离子，$A^{n-}$为层间可交换的阴离子[9-12]。镁铝层状双氢氧化物(MgAl-LDHs)是常见的LDHs材料之一，Mg^{2+}和Al^{3+}作为层板金属离子，CO_3^{2-}作为层间阴离子[13-15]，具有层状结构可调变、热稳定性好、环境友好、阻燃、成本低廉等优点，在聚合物阻燃领域受到广泛关注。当MgAl-LDHs受热时，层间的CO_3^{2-}和OH^-分解释放CO_2和H_2O，稀释可燃气体浓度；同时，层板结构坍塌形成金属氧化物覆盖层，阻隔热量和氧气的传递。此外，MgAl-LDHs在燃烧过程中可以促进聚合物表面炭层的形成，提高残炭率，增强凝聚相阻燃效应[16-20]。

目前，MgAl-LDHs已广泛用于改善聚丙烯(PP)、聚乳酸(PLA)以及聚氨酯(PU)等聚合物的阻燃性能[21-25]，但是缺乏MgAl-LDH含量对PPC综合性能影响的研究。本研究以MgAl-LDHs为阻燃剂、PPC为基体，采用熔融共混法制备PPC/MgAl-LDHs复合材料，系统研究MgAl-LDHs含量对PPC阻燃性能、抑烟性能、热稳定性、结晶行为和力学性能的影响，探讨MgAl-LDHs在PPC中的阻燃机理，为高性能阻燃PPC复合材料的制备提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

PPC，PPC-1225，数均分子量为1.2×10^5 g/mol，羟值≤0.5 mg KOH/g，浙江温岭锦喜塑料有限公司；MgAl-LDHs，Mg与Al物质的量比为2∶1，层间距为0.78 nm，比表面积约为180 m^2/g，平均粒径为2.5 μm，上海沪震实业有限公司；无水乙醇，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-20，南京科亚化工装备有限公司；微型注塑机，ZJ15，宁波海天塑机集团有限公司；平板硫化机，XLB-D，青岛鑫城一鸣橡塑机械有限公司；极限氧指数测定仪，JF-3，南京江宁分析仪器有限公司；垂直燃烧测定仪，CZF-3，南京江宁分析仪器有限公司；锥形量热仪，XU8560，郑州希欧仪器设备有限公司；烟密度测定仪，JCY-2，南京江宁分析仪器有限公司；热重分析仪(TG)，TGA550，美国TA公司；电子万能试验机，UTM 5205，深圳三思纵横科技股份有限公司；摆锤冲击试验机，ZBC 1400，深圳三思纵横科技股份有限公司；扫描电子显微镜(SEM)，Quanta 200，美国FEI公司；哈克转矩流变仪，HAAKE PolyLab OS，赛默飞世尔科技公司。

1.3 样品制备

采用熔融共混法制备PPC/MgAl-LDHs复合材料。将PPC颗粒和MgAl-LDHs粉末在60 ℃条件下真空干燥12 h，以去除水分。表1为PPC/MgAl-LDHs复合材料的配方。按照表1配方精确称量各原料，在哈克转矩流变仪中进行熔融共混。混炼温度为160 ℃，转子转速为60 r/min，混炼时间为8 min。混炼完成后，将所得复合材料在平板硫化机上模压成型。模压温度为165 ℃，压力为10 MPa，保压时间为5 min。成型后样品在室温冷却24 h，裁切成标准测试样条。

表1 PPC/MgAl-LDHs复合材料的配方

Tab.1 Formula of PPC/MgAl-LDHs composites 单位：%

样品	w_{PPC}	$w_{MgAl\text{-}LDHs}$
PPC-0	100	0
PPC-1	99	1
PPC-3	97	3
PPC-5	95	5
PPC-7	93	7
PPC-10	90	10

1.4 性能测试与表征

力学性能测试：按照GB/T 1040.2—2022，采用万能材料试验机进行拉伸性能测试，哑铃形试样，总长150 mm，窄平行段长80 mm、宽10 mm、厚4 mm，标距50 mm，拉伸速率为50 mm/min；按照GB/T 9341—2008进行弯曲性能测试，样条尺寸为80 mm×10 mm×4 mm，跨距64 mm，弯曲速率为2 mm/min；按照GB/T 1043.1—2008进行简支梁缺口冲击强度测试，样条尺寸为80 mm×10 mm×4 mm，A型缺口，缺口深度2 mm，底部圆角半径0.25 mm。

LOI测试：按照GB/T 2406.2—2009，采用极限氧指数测定仪进行测试，样条尺寸为80 mm×10 mm×4 mm。

垂直燃烧测试：按照GB/T 2408—2021，采用垂直燃烧仪进行测试，样条尺寸为125 mm×13 mm×3 mm。

烟密度测试：按照GB/T 10671—2023进行有焰模式产烟测试，记录1.5、4.0 min对应的比光密度和整个测试周期的最大比光密度，计算烟密度等级。

锥形量热分析：按照GB/T 16172—2026，采用锥形量热仪进行测试，热辐射通量为50 kW/m^2，试样尺寸为100 mm×100 mm×6 mm，记录点燃时间(TTI)、热释放速率峰值(PHRR)、总热释放量(THR)、有效热释放量(EHC)及火势增长速率指数(FIGRA)等参数。

TG分析：按照GB/T 33047.2—2021，采用热重分析仪进行测试，测试温度范围为室温至600 ℃。

SEM测试：采用扫描电子显微镜观察试样的断面形貌，测试前对样品表面进行喷金处理，加速电压为5 kV。

2 结果与讨论

2.1 PPC/MgAl-LDHs复合材料的力学性能分析

图1为PPC/MgAl-LDHs复合材料的力学性能。从图1a可以看出，随着MgAl-LDHs含量的增加，PPC/MgAl-LDHs复合材料的拉伸强度呈现先增大后减小的趋势，PPC-5复合材料的拉伸强度最大，为31.5 MPa。随着MgAl-LDHs含量的增加，PPC/MgAl-LDHs复合材料的断裂伸长率逐渐降低。MgAl-LDHs作为刚性无机填料，当其含量较低时，MgAl-LDHs能够分散于PPC基体中，起到异相成核和增强作用，MgAl-LDHs通过氢键或范德华力与PPC分子链形成良好界面结合，限制链段的过度滑移。

从图1b可以看出，随着MgAl-LDHs含量的增加，PPC/MgAl-LDHs复合材料的弯曲强度呈先升后降的趋势，弯曲模量显著提升。PPC-5的弯曲强度最高，达47.2 MPa。这表明适量的MgAl-LDHs能够显著改善材料的刚性和抗弯曲能力。

从图1c可以看出，随着MgAl-LDHs含量的增加，PPC/MgAl-LDHs复合材料的冲击强度呈先升高后降低的趋势，PPC-5的冲击强度最高，但整体仍维持在较高水平，未出现明显脆化现象。

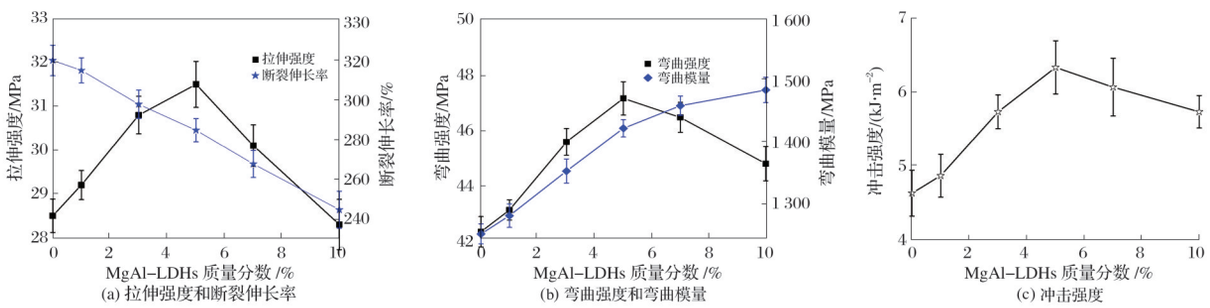


图1 PPC/MgAl-LDHs复合材料的力学性能

Fig.1 Mechanical properties of PPC/MgAl-LDHs composites

当MgAl-LDHs的质量分数为1%~5%时，MgAl-LDHs表现出良好分散性及相容性，可作为成核剂促进PPC结晶并分散应力；当MgAl-LDHs的质量分数超过7%后，MgAl-LDHs颗粒间可能出现轻微团聚，导致局部应力集中和界面缺陷，PPC/MgAl-LDHs复合材料的拉伸强度和冲击强度略有回落。因此，PPC-5的力学性能最优，既保持良好的韧性，又实现强度与刚性的协同提升，为后续阻燃改性提供良好的力学基础。

2.2 PPC/MgAl-LDHs复合材料的阻燃性能分析

图2为PPC/MgAl-LDHs复合材料的LOI。表2为PPC/MgAl-LDHs复合材料的UL-94测试结果。从图2和表2可以看出，随着MgAl-LDHs含量的增加，PPC/MgAl-LDHs复合材料的LOI呈线性上升趋势。未添加MgAl-LDHs时，PPC-0的LOI仅为19.5%，属于易燃材料；而添加MgAl-LDHs后，PPC-10的LOI提升至29.8%，UL-94等级为V-0级，达到难燃级别。未添加MgAl-LDHs时，PPC-0未通过UL-94等级测试，且伴随严重熔滴现象，燃烧后自熄时间长达45 s。随着MgAl-LDHs质量分数的增加，熔滴行为逐步得到抑制，PPC-7和PPC-10均达到V-0级，自熄时间分别缩短至8 s和5 s，点燃时间也延长至18 s和20 s。

MgAl-LDHs的阻燃作用机制可归因为气相和凝聚相协同效应：一是层间CO_3^{2-}和OH^-在受热时分解，释放大量CO_2和水蒸气，有效稀释了燃烧区域的可燃气体浓度，降低了氧气分压；二是层状结构坍塌后形成的MgO和Al_2O_3等金属氧化物在材料表面构筑致密覆盖层，阻隔热量向内部传递，抑制了可燃挥发物的逸出，从而减轻熔滴现象，缩短燃烧时间。

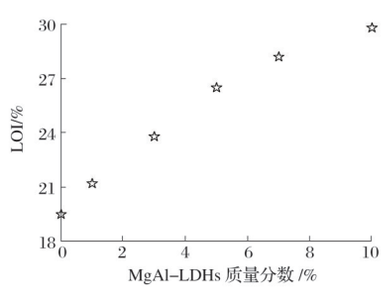


图2 PPC/MgAl-LDHs复合材料的LOI

Fig.2 LOI of PPC/MgAl-LDHs composites

表2 PPC/MgAl-LDHs复合材料的UL-94测试结果

Tab.2 UL-94 test results of PPC/MgAl-LDHs composites

样品	UL-94等级	熔滴情况	点燃时间/s	自熄时间/s
PPC-0	NR	严重熔滴	8	45
PPC-1	V-2	熔滴	10	32
PPC-3	V-2	轻微熔滴	12	24
PPC-5	V-1	无熔滴	15	18
PPC-7	V-0	无熔滴	18	8
PPC-10	V-0	无熔滴	20	5

注：NR表示未通过UL-94等级测试。

2.3 PPC/MgAl-LDHs复合材料的锥形量热测试分析

表3为PPC/MgAl-LDHs复合材料的锥形量热测试结果。从表3可以看出，与未添加MgAl-LDHs的PPC-0相比，PPC-10的TTI从28 s延长至58 s，材料的点燃过程得到有效延迟；PHRR从485 kW/m²降低至208 kW/m²，燃烧强度被显著抑制；THR从68.5 MJ/m²降至38.5 MJ/m²，整体放

热量减少；EHC从22.5 MJ/kg降至17.8 MJ/kg；FIGRA从12.8 kW/(s·m^2)降至4.6 kW/(s·m^2)，火势蔓延风险大幅降低。MgAl-LDHs的气相稀释降低了燃烧驱动力，凝聚相屏障减少了热反馈。同时，MgAl-LDHs分解吸热进一步延缓了热解过程。PPC-10在真实火灾场景下的安全性显著提升。

表3 PPC/MgAl-LDHs复合材料的锥形量热测试结果

Tab.3 Cone calorimetry test results of PPC/MgAl-LDHs composites

样品	TTI/s	PHRR/(kW·m^{-2})	THR/(MJ·m^{-2})	EHC/(MJ·kg^{-1})	FIGRA/[kW·(s·m^2)$^{-1}$]
PPC-0	28	485	68.5	22.5	12.8
PPC-1	32	425	62.8	21.8	10.5
PPC-3	38	365	55.2	20.5	8.6
PPC-5	45	298	48.5	19.2	6.8
PPC-7	52	245	42.8	18.5	5.5
PPC-10	58	208	38.5	17.8	4.6

2.4 PPC/MgAl-LDHs复合材料的抑烟性能分析

表4为PPC/MgAl-LDHs复合材料的烟密度测试结果。从表4可以看出，随着MgAl-LDHs含量的增加，PPC/MgAl-LDHs复合材料的各烟密度参数均呈现明显下降的趋势。PPC燃烧时产生大量黑烟，主要源于其脂肪族碳链结构的不完全燃烧，而MgAl-LDHs的加入显著抑制了烟气释放。其抑烟机理为：MgAl-LDHs受热分解产生的金属氧化物会促进PPC表面形成致密膨胀炭层，有效吸附和固定烟颗粒；同时，释放的CO_2和H_2O会进一步稀释烟气浓度，减少可燃烟雾的生成。锥形量热测试结果中THR和PHRR的降低与烟密度测试结果高度相关，表明MgAl-LDHs在实现阻燃的同时兼具优异的抑烟性能，这对降低火灾中的烟气毒性和能见度损失具有重要实际意义。

表4 PPC/MgAl-LDHs复合材料的烟密度测试结果

Tab.4 Smoke density test results of PPC/MgAl-LDHs composites

样品	比光密度(1.5 min)	比光密度(4.0 min)	最大比光密度	烟密度等级
PPC-0	285	420	485	78.5
PPC-1	245	365	428	68.2
PPC-3	198	298	365	58.6
PPC-5	152	245	298	48.3
PPC-7	118	198	245	39.8
PPC-10	95	165	208	33.5

2.5 PPC/MgAl-LDHs复合材料的热稳定性分析

图3和表5分别为PPC/MgAl-LDHs复合材料的TG曲线和TG参数。从图3和表5可以看出，未添加MgAl-LDHs时，PPC-0的5%热失重温度($t_{5\%}$)仅为185 ℃，10%热失重温度($t_{10\%}$)为215 ℃。当MgAl-LDHs的质量分数为10%时，PPC-10的$t_{5\%}$、$t_{10\%}$、50%热失重温度($t_{50\%}$)、最大热失重速率温度(t_{max})及残炭率均随MgAl-LDHs含量的增加而显著提高。这表明加入MgAl-LDHs能够明显提高PPC/MgAl-LDHs复合材料的初始分解温度。其原因在于MgAl-LDHs在较低温度下吸热分解，消耗了部分热量，分解生成的金属氧化物在基体表面形成保护层，阻碍了小分子挥发产物逸出，促进了炭化反应，提高了残炭率。残炭率的提升进一步增强了凝聚相阻燃效果，与锥形量热测试中THR降低的结果相呼应。MgAl-LDHs显著拓宽了PPC的热加工窗口和使用温度范围。

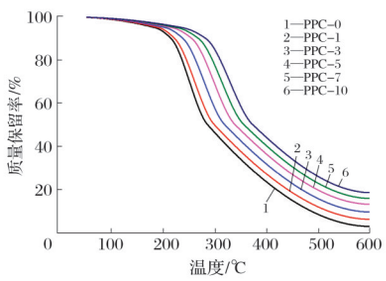


图3 PPC/MgAl-LDHs复合材料的TG曲线

Fig.3 TG curves of PPC/MgAl-LDHs composites

表5 PPC/MgAl-LDHs复合材料的TG参数

Tab.5 TG parameters of PPC/MgAl-LDHs composites

样品	$t_{5\%}$/℃	$t_{10\%}$/℃	$t_{50\%}$/℃	t_{max}/℃	残炭率/%
PPC-0	185	215	285	295	2.5
PPC-1	192	222	298	308	5.8
PPC-3	205	238	318	328	9.2
PPC-5	218	255	338	348	12.8
PPC-7	228	268	355	365	15.5
PPC-10	238	282	372	382	18.2

2.6 PPC/MgAl-LDHs复合材料的微观形貌分析

图4为PPC/MgAl-LDHs复合材料的SEM照片。从图4可以看出，当MgAl-LDHs质量分数为1%~5%时，MgAl-LDHs颗粒分散均匀在PPC基体中，粒径分布较窄，界面结合紧密，几乎无明显团聚或空隙，表明在熔融共混工艺下，MgAl-LDHs与PPC相容性良好。当MgAl-LDHs质量分数为7%时，MgAl-LDHs在PPC基体中仍能够保持较好的分散状态，颗粒被PPC基体有效包覆。当MgAl-LDHs质量分数为10%时，MgAl-LDHs出现少量微米级团聚体，局部界面略显疏松。微观形貌结果与宏观力学性能高度一致，即MgAl-LDHs在PPC基体中分散良好时对应的复合材料力学性能最优。MgAl-LDHs轻微团聚则解释了力学性能的轻微回落。均匀分散的MgAl-LDHs颗粒为阻燃和抑烟提供了充足的活性位点，确保了热分解过程中金属氧化物覆盖层的连续性和炭层的完整性。当MgAl-LDHs的质量分数为5%~7%时，可实现阻燃、抑烟、热稳定与力学性能的良好平衡；当MgAl-LDHs的质量分数为10%时，阻燃效果更佳，但力学性能略有牺牲。

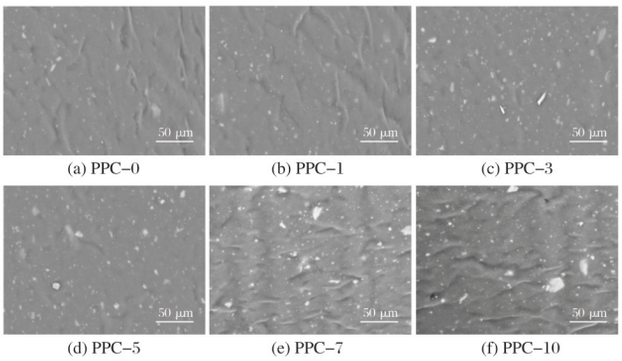


图4 PPC/MgAl-LDHs复合材料的SEM照片

Fig.4 SEM images of PPC/MgAl-LDHs composites

3 结论

本研究以MgAl-LDHs为阻燃剂、PPC为基体，采用熔融共混法制备PPC/MgAl-LDHs复合材料。结果表明：MgAl-LDHs能够显著提升PPC的阻燃性能、抑烟性能和热稳定性。当添加适量的MgAl-LDHs时，PPC/MgAl-LDHs复合材料能够兼顾力学性能和阻燃性能。当MgAl-LDHs质量分数较高时，PPC/MgAl-LDHs复合材料的阻燃等级可达到UL-94 V-0级，THR和烟密度等级均显著降低，热分解起始温度和残炭率均显著提升。MgAl-LDHs的阻燃抑烟机理主要涉及受热分解释放CO_2和H_2O的气相稀释效应、金属氧化物物理屏障作用以及促进致密炭层生成的多重协同机制。综合各项性能，MgAl-LDHs最佳质量分数为5%~7%。研究结果为开发环保、高效、兼具阻燃与力学性能的PPC复合材料提供重要参考。

参考文献

[1] ZHENG G F, HAN L J, MA T Y, et al. Synergistic effects of poly (propylene carbonate) content and pre-stretching on the strength, toughness, and heat resistance of polylactide/poly(propylene carbonate) blends[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2026, 44(4): 1142-1153.

[2] WU M X, GAO Y B, SUN J X, et al. High-strength, waterproof, and biodegradable adhesive based on poly(propylene carbonate) for sustainable and recycling economy[J]. Chemical Engineering Journal, 2026, 530: 173449.

[3] 蔡亮, 刘忠林, 刘婉玉, 等. 环氧增容剂对PBAT/PPC复合薄膜降解性能的影响[J]. 塑料科技, 2025, 53(12): 140-145.

[4] 吴俊峰, 陆红红. PPC/含铈硫酸钙复合材料的制备及其多维度性能研究[J]. 塑料科技, 2025, 53(8): 132-136.

[5] NAN Y F, WANG X Y, WANG W Z, et al. Design and synthesis of a bio-based DOPO-ITA flame-retardant monomer for modifying CO_2-based polycarbonates[J]. Journal of Polymer Science, 2026, 64(4): 904-918.

[6] 赵晨, 王文珍, 乔红军, 等. 二氧化碳基聚碳酸酯的功能化研究进展[J]. 高分子通报, 2024, 37(9): 1222-1232.

[7] WANG W Z, ZHANG X M, HAN W W, et al. A one-pot strategy for the preparation of fire-retardant poly(propylene carbonate) by terpolymerization of CO_2, propylene oxide and chlorendic anhydride[J]. Materials Today Communications, 2023, 34: 105179.

[8] 柳彦梅, 张存良, 海士坤, 等. 勃姆石阻燃和增强聚碳酸亚丙酯复合材料的制备和表征[J]. 塑料科技, 2018, 46(9): 73-77.

[9] J J, D J, S D, et al. Multi-active-site perovskite ceramic layered double hydroxides for high-performance hydrogen evolution in alkaline electrolysis[J]. Ionics, 2026, 32(5): 5065-5076.

[10] 马铭君, 于浩楠, 李晓蒙, 等. 层状双金属氢氧化物(LDHs)增强低长径比纳米纤维素复合膜: 低成本高性能食品包装材料[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(2): 15-25.

[11] 吴悦华, 何伟. LDH@AA/羟丙基甲基纤维素/聚乙烯醇复合薄膜的制备与阻隔性能研究[J]. 塑料科技, 2025, 53(6): 95-99.

[12] 马应霞, 李静, 孟田力, 等. Ni-MOF/GNS@Ni/Mn-LDH电极材料的电化学性能研究[J]. 材料导报, 2025, 39(22): 1-8.

[13] MAHINROOSTA M, SHARGHI E A, PAZOUKI M. Synthesis of Mg-Al-CO_3 layered double hydroxide using a novel soft hydrogel reactor based on polyacrylic acid-carboxymethyl cellulose as an efficient and selective nitrate adsorbent[J]. Journal of Water Process Engineering, 2026, 81: 109277.

[14] FEZRAOUI A, CORNU D, STECIUK G, et al. Condensation of chromate into dichromate within magnesium/aluminum layered double hydroxide: An experimental and theoretical study[J]. Applied Clay Science, 2026, 280: 108064.

[15] 席满意, 李秀壮, 唐蓉萍, 等. 镁铝层状双氢氧化物的应用研究进展[J]. 山东化工, 2024, 53(16): 96-99.

[16] 王依兰. 层状双金属氢氧化物电极材料的制备及电化学性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2025.

[17] 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.

[18] 吴忧, 秦路彦, 王艳华, 等. 水滑石的功能化改性及其应用研究[J]. 功能材料, 2021, 52(8): 8060-8067.

[19] 谢磊, 杨保俊, 陈长铸, 等. 类水滑石及其复配阻燃剂阻燃聚丙烯应用研究[J]. 塑料科技, 2021, 49(3): 38-42.

[20] 陈月铃, 勾星月, 曹智文, 等. 纳米层状阻燃复合材料的制备及研究进展[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(10): 128-134.

[21] HE X Y, HU Z Y, WANG C X, et al. Synergistic flame retardancy of layered double hydroxide and decabromodiphenyl ethane in glass fiber-reinforced polypropylene[J]. Journal of Polymer Research, 2026, 33 (4): 123.

[22] HOU R Y, UNIVERSITY H E, et al. Flame-retardant modification of layered double hydroxides from biomass resources for polylactic acid [J]. ACS Omega, 2025, 10(29): 32348-32363.

[23] LI W D, ZHOU Y W, ZENG Z H, et al. $Ti_3C_2T_x$/layered double hydroxide hybrid system decorated with iron-loaded polydopamine as a hydrophobic flame retardant for reducing the fire hazard of ethylene-vinyl acetate[J]. Polymer Degradation and Stability, 2025, 236: 111297.

[24] ZHANG S T, FENG R, ZHANG J, et al. Nano-layered double hydroxides as efficient endothermic, strengthening, and flame-retardant agents for fly ash/polyurethane composite materials[J]. Composites Communications, 2025, 53: 102168.

[25] LIU X H, WANG Z, CHEN M Z, et al. Phytic acid/cellulose nanofibers modified layered double hydroxides flame retardants: Synthesis, properties and applications[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 283: 137562.