一维纳米凹凸棒石对聚羟基脂肪酸酯的增强改性及性能研究

范彩霞，王震虎，杨慎宇

（黄河科技学院工学部，河南 郑州 450063）

摘　要：为解决聚羟基脂肪酸酯（PHA）力学强度低、热稳定性差及阻燃性不足的问题，文章采用熔融共混法制备改性一维纳米凹凸棒石（ATP）增强PHA复合材料，系统研究ATP含量对PHA/ATP复合材料微观形貌、结晶行为、热稳定性、力学性能及阻燃性能的影响。结果表明：适量的改性ATP在PHA基体中分散均匀，界面结合紧密，无明显团聚现象。ATP具有显著的异相成核作用，使PHA冷结晶温度降低11.2 ℃，结晶度从21.3%提升至29.7%。当ATP质量分数为4.0%时，PHA/ATP复合材料的初始分解温度较PHA提高12.8 ℃。当ATP质量分数为2.0%时，PHA/ATP复合材料的力学性能最优。当ATP质量分数为8.0%时，PHA/ATP复合材料的极限氧指数从19.2%提升至26.8%，垂直燃烧等级达到V−1级。热释放速率、总热释放量及总烟释放量均随ATP含量的增加呈降低趋势。研究表明，适量改性ATP能够通过微观增强、异相成核及催化成炭的协同作用全面提升PHA的综合性能。

关键词：聚羟基脂肪酸酯；一维纳米凹凸棒石；增强改性；力学性能；阻燃性能

中图分类号：TQ323.4　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1005-3360（2026）09-0144-06

DOI：10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.09.026

Enhanced Modification and Performance Study of Polyhydroxyalkanoates by One-dimensional Nano-attapulgite

FAN Caixia, WANG Zhenhu, YANG Shenyu

(Department of Engineering, Huanghe University of Science and Technology, Zhengzhou 450063, China)

Abstract: To address the issues of low mechanical strength, poor thermal stability, and insufficient flame retardancy of polyhydroxyalkanoate (PHA), the study prepared modified one-dimensional nano-attapulgite (ATP) reinforced PHA composites via melt blending, and systematically investigated the effects of ATP content on the microstructure, crystallization behavior, thermal stability, mechanical properties, and flame retardancy of the PHA/ATP composites. The results showed that an appropriate amount of modified ATP dispersed uniformly in the PHA matrix, with tight interfacial bonding and no obvious agglomeration. ATP exhibited a significant heterogeneous nucleation effect, which reduced the cold crystallization temperature of PHA by 11.2 ℃ and increased the crystallinity from 21.3% to 29.7%. When the ATP mass fraction reached 4.0%, the initial decomposition temperature of the PHA/ATP composite increased by 12.8 ℃ compared to that of PHA. The optimal mechanical properties of the PHA/ATP composites were achieved at an ATP mass fraction of 2.0%. When the ATP mass fraction reached 8.0%, the limiting oxygen index of the composites increased from 19.2% to 26.8%, and the vertical burning test reached a V-1 rating. The heat release rate, total heat release, and total smoke release all showed a decreasing trend with increasing ATP content. The study demonstrated that an appropriate amount of modified ATP could comprehensively enhance the overall performance of PHA through the synergistic effects of micro-reinforcement, heterogeneous nucleation, and catalytic char formation.

Keywords: PHA; One-dimensional nano-attapulgite; Reinforcement modification; Mechanical properties; Flame retardancy

收稿日期Submitted date 2026-03-18；修回日期Revised date 2026-04-25；录用日期Accepted date 2026-05-30

基金项目：河南省科技厅科技攻关项目（252102220121）；河南省智能制造产业学院项目（YYSFZD2501）

联系人，fcx211@163.com

引用本文：范彩霞，王震虎，杨慎宇．一维纳米凹凸棒石对聚羟基脂肪酸酯的增强改性及性能研究[J]. 塑料科技，2026，54(9)：144−149.

Citation：FAN C X, WANG Z H, YANG S Y. Enhanced modification and performance study of polyhydroxyalkanoates by one-dimensional nano-attapulgite[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(9): 144-149.

随着全球塑料污染问题的加剧，开发可生物降解的环境友好型高分子材料成为材料科学领域的核心研究方向之一[1-5]。聚羟基脂肪酸酯(PHA)作为一种由微生物发酵合成的天然生物降解聚酯，兼具良好的生物相容性、热塑性加工性能与自然降解特性，在食品包装、一次性医疗器械、农业地膜等领域展现出广阔的应用前景[6-9]。与聚乳酸(PLA)等主流生物降解材料相比，PHA具有更出色的韧性与耐冲击性，不需要特定的工业堆肥条件即可在自然环境中分解，是一种发展潜力较大的绿色高分子材料[10-13]。

但纯PHA存在诸多固有缺陷，严重制约其工程化应用。一是力学强度偏低，拉伸强度通常仅为20~30 MPa，难以满足承载类制品的使用要求；二是热稳定性不佳，加工温度窗口窄，高温下易发生热降解，导致性能劣化；三是易燃性突出，燃烧时热释放速率高，熔滴严重，存在较大火灾安全隐患；四是结晶速率慢，成型加工周期长，生产效率偏低[7,14]。现有PHA改性手段主要包括共混改性、增塑改性、纳米复合改性等，其中无机纳米填料复合改性因性能提升幅度大、成本低，成为当前应用较为广泛的改性路径[15-17]。但目前常用的球形纳米填料易导致材料韧性大幅下降，碳纳米管、石墨烯等一维填料虽增强效果优异，但价格高昂且易团聚，难以实现规模化工业应用[18-21]。

一维纳米凹凸棒石(ATP)是一种天然含水富镁铝硅酸盐黏土矿物，具有独特的一维棒状晶体结构，长径比可达50~100，纤维增强效应显著。ATP在我国江苏、安徽等地储量极为丰富，价格仅为碳纳米管的千分之一，成本优势突出[22-24]。ATP表面富含羟基，易于采用硅烷偶联剂改性，从而改善ATP与聚合物基体的界面相容性。ATP中含有的硅铝酸盐成分还具备催化成炭作用，可同时赋予材料一定的阻燃性能[25-26]。目前，ATP已成功应用于聚丙烯、PLA等通用高分子的改性，但针对其在PHA体系中的分散行为、界面作用机制以及对材料结晶、力学、阻燃性能的协同调控规律，仍缺乏系统的研究[27-29]。

因此，本研究采用γ-氨丙基三乙氧基硅烷(KH-550)对ATP进行表面改性，利用熔融共混法制备不同含量ATP的PHA/ATP复合材料，系统探究ATP含量对材料微观形貌、结晶行为、热稳定性、力学性能及阻燃性能的影响，阐明ATP对PHA的增强增韧与阻燃作用机理，旨在为开发高性能、低成本的PHA基生物降解复合材料提供参考，推动PHA在工程包装、电子配件等领域的应用。

1 实验部分

1.1 主要原料

PHA，注塑级，EM10080，深圳市意可曼生物科技有限公司；ATP，质量分数≥95%，长度1~3 μm，直径20~50 nm，盱眙博图凹土高新技术开发有限公司；KH-550，质量分数≥98%，国药集团化学试剂有限公司；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，南京科亚化工成套装备有限公司；微型注塑机，ZJ15，宁波海天塑机集团有限公司；扫描电子显微镜(SEM)，TM3030，日本Hitachi公司；差示扫描量热仪(DSC)，Q20，美国TA仪器公司；热重分析仪(TG)，STA 449 F3，德国NETZSCH公司；电子万能试验机(UTM)，CMT6104，深圳市新三思材料检测有限公司；摆锤式冲击试验机，XJJ-5，承德市金建检测仪器有限公司；热变形温度测试仪(HDT)，BWR-300A，北京北广精仪仪器设备有限公司；极限氧指数测定仪(LOI)，JF-3，南京市江宁区分析仪器厂；垂直燃烧仪，CZF-3，南京市江宁区分析仪器厂；锥形量热仪，JCY-III，苏州阳屹沃尔奇检测技术有限公司。

1.3 样品制备

采用KH-550对ATP进行表面改性，获得改性ATP。将PHA颗粒置于80 ℃真空干燥箱中干燥12 h，去除原料中的水分，防止加工过程中发生水解降解。按配方比例(改性ATP质量分数分别为0、1.0%、2.0%、4.0%和8.0%)将干燥后的PHA与改性ATP加入高速混合机，预混5 min，使两者混合均匀。随后将混合物料加入双螺杆挤出机，熔融共混挤出，挤出机各区温度从加料口到机头依次设定为140、150、160、165、160 ℃，螺杆转速为120 r/min。挤出的料条经水冷后送入切粒机切粒，获得复合材料颗粒。将复合材料颗粒再次在80 ℃下真空干燥8 h，最后采用微型注塑机注塑成标准测试样条，注射温度为165 ℃，模具温度为40 ℃，注射压力为80 MPa，保压时间为10 s。最终制得PHA/ATP复合材料，将其分别命名为PHA、PHA/ATP-1.0、PHA/ATP-2.0、PHA/ATP-4.0和PHA/ATP-8.0。

1.4 性能测试与表征

力学性能测试：拉伸性能按照GB/T 1040.1—2025进行测试，采用哑铃形试样，拉伸速率为10 mm/min；弯曲性能按照GB/T 9341—2008进行测试，试样尺寸为80 mm×10 mm×4 mm，跨度为64 mm，加载速率为2 mm/min；缺口冲击强度按照GB/T 1043.1—2008进行测试，采用简支梁冲击试验机，试样为A型缺口，缺口深度为2 mm。每组5个样品，取平均值并计算标准差。

DSC测试：取5~10 mg样品，置于铝坩埚中，在N_2气氛下，以10 ℃/min的速率从30 ℃升至200 ℃，等温5 min，以消除热历史，再以10 ℃/min的速率降至30 ℃，最后以10 ℃/min的速率升至200 ℃，记录DSC曲线。结晶度(X_c)计算公式为：

$$X_c=(\Delta H_m/\Delta H_m^0)\times 100\% \quad (1)$$

式(1)中：X_c为结晶度，%；ΔH_m为试样的熔融焓，J/g；ΔH_m^0为完全结晶状态下PHA的熔融焓，取146 J/g。

TG测试：取5~10 mg样品，置于氧化铝坩埚中，在N_2气氛下，以10 ℃/min的速率从30 ℃升至600 ℃。初始分解温度($t_{5\%}$)定义为样品失重5%时的温度，最大分解速率

温度($t_{d,max}$)为微分热重(DTG)曲线峰值对应的温度。

SEM测试:将注塑样条在液氮中浸泡10 min后进行脆断,断面喷金处理后,采用扫描电子显微镜观察复合材料的断面形貌,加速电压为10 kV。

HDT测试:按照GB/T 1634.1—2025,采用三点弯曲法进行测试,载荷为0.45 MPa,升温速率为120 ℃/h,记录试样变形量达到0.34 mm时的温度。

阻燃性能测试:LOI按照GB/T 2406.2—2009进行测试,试样尺寸为130.0 mm×6.5 mm×3.2 mm;垂直燃烧试验按GB/T 2408—2021进行测试,试样尺寸为125.0 mm×13.0 mm×3.2 mm;热释放速率与产烟速率按照GB/T 16172—2026进行测试,热辐射功率为50 kW/m^2,试样尺寸为100 mm×100 mm×3 mm。记录点燃时间(TTI)、峰值热释放速率(PHRR)、到达峰值时间(TTPHRR)、总热释放量(THR)以及总烟释放量(TSR)等参数。残炭率为测试后剩余炭渣质量与原始试样质量的比值。

2 结果与讨论

2.1 PHA/ATP复合材料的微观形貌分析

图1为PHA/ATP复合材料的断面SEM照片。从图1a可以看出,PHA的断面整体较为平整,呈现清晰的层状台阶结构,裂纹扩展路径平直,无明显塑性变形痕迹,表现出典型的脆性断裂特征。随着ATP的引入,复合材料的断面形貌随着ATP含量的增加呈规律性的渐变趋势。从图1b可以看出,PHA/ATP-1.0断面的台阶明显减少,整体形貌趋于细腻平整,视野内未观察到明显的颗粒团聚与界面缝隙。此时,改性ATP与PHA基体具有良好的相容性,能够在基体中实现均匀分散,形成紧密的界面结合,裂纹在扩展过程中会受到分散颗粒的钉扎作用发生偏转,断裂过程耗散的能量有所增加。从图1c可以看出,PHA/ATP-2.0断面粗糙度进一步增大,表面出现更多细微的凹凸起伏与少量凹坑结构,断面的不规则性显著提升,均匀分散的ATP颗粒能够有效传递外加载荷,并通过裂纹偏转、裂纹分叉等多重机制吸收断裂能,使材料的强度同步提升。从图1d可以看出,PHA/ATP-4.0断面的凹凸起伏更为显著,基体中可见大量均匀分布的微小颗粒亮点,整体形貌更加粗糙。但由于ATP含量的增加,颗粒间距不断减小,范德华作用力逐渐增强,局部开始出现轻微的颗粒聚集趋势,应力集中效应随之显现,这也是复合材料力学性能在ATP质量分数达到4.0%后出现回落的重要原因。从图1e可以看出,PHA/ATP-8.0断面中能够观察到明显的白色颗粒团聚体,颗粒聚集现象加剧,部分区域甚至出现界面缺陷与空隙。这些团聚体在受力时会成为应力集中点,诱发裂纹提前萌生并快速扩展,最终导致材料的力学性能出现下降。

2.2 PHA/ATP复合材料的热性能分析

图2为PHA/ATP复合材料的DSC测试结果。从图2可以看出,PHA的冷结晶温度(t_{cc})为78.5 ℃,熔融温度(t_m)为156.3 ℃,X_c为21.3%。PHA的X_c较低,原因在于PHA分子链的柔顺性较差,分子链间的相互作用力较强,在冷却过程中难以规整排列形成晶体。随着ATP含量的增加,t_{cc}呈现下降趋势。PHA/ATP-4.0的t_{cc}降至67.3 ℃,较PHA降低11.2 ℃,表明ATP充当高效的异相成核剂,能够显著促进PHA结晶。其异相成核机制为:ATP表面的羟基和接枝的KH-550分子中的氨基,能够与PHA分子链中的酯基形成氢键作用,为PHA分子链的吸附和排列提供成核位点,显著降低结晶能垒,使PHA分子链在较低的温度下即可完成从无序向有序的转变。此外,复合材料的X_c随着ATP含量的增加呈先升高后降低的趋势。PHA/ATP-4.0的X_c最大,为29.7%,较PHA提升39.4%。PHA/ATP-8.0的X_c回落至27.1%。其原因在于过量ATP发生团聚,团聚体内部的纳米粒子无法提供有效的成核位点,且团聚体对PHA分子链的重排产生空间位阻效应,抑制了晶体的生长。t_m随着ATP含量的增加略有下降,从156.3 ℃降至154.5 ℃。其原因在于快速成核过程中形成的晶粒尺寸更细小且分布均匀,细小晶粒的熔点低于大晶粒。X_c的提升对复合材料的综合性能具有重要影响,规整的晶体网络能够显著增强材料的刚性和强度,提高其承载能力。同时,X_c的提高能够增加材料的HDT和热稳定性,拓宽其使用温度范围。

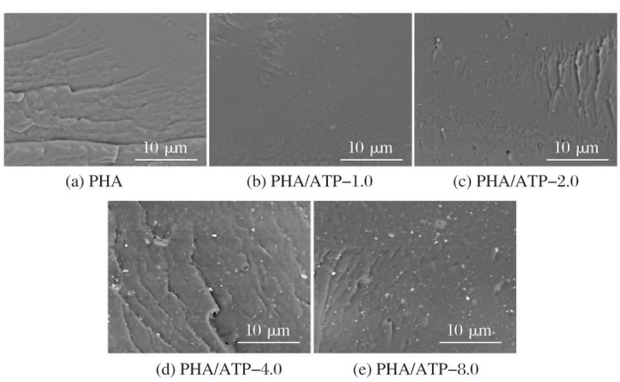


图1 PHA/ATP复合材料的断面SEM照片(5 000×)

Fig.1 SEM images of fracture surface of PHA/ATP composites (5 000×)

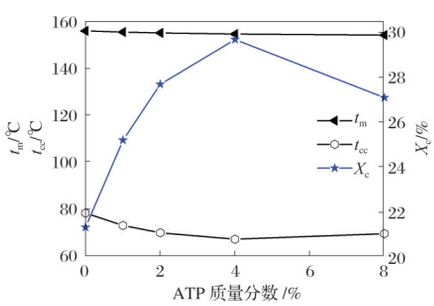


图2 PHA/ATP复合材料的DSC测试结果

Fig.2 DSC test results of PHA/ATP composites

2.3 PHA/ATP复合材料的热稳定性分析

表1为PHA/ATP复合材料的TG数据。从表1可以看

出，PHA的热分解过程为一步反应，$t_{5\%}$为258.7 ℃，$t_{d,max}$为282.5 ℃，两者相差23.8 ℃，符合PHA热分解的典型特征（$t_{5\%}$与$t_{d,max}$通常相差20~30 ℃）。PHA的热稳定性较差，主要归因于无规断链反应机制。高温下PHA分子链中的酯键易断裂，生成小分子烯烃和羧酸，这些小分子产物的快速逸出加速了材料的热降解。

加入ATP后，PHA/ATP复合材料的热稳定性得到改善，随着ATP含量的增加呈先升后降的趋势。PHA/ATP-4.0的热稳定性最佳，$t_{5\%}$和$t_{d,max}$分别升至271.5 ℃和296.3 ℃，较PHA分别提高12.8 ℃和13.8 ℃，两者温差为24.8 ℃，仍符合热分解动力学规律。这一改善归因于以下3个方面：一是物理阻隔效应，一维ATP纳米棒在基体中相互搭接，形成物理阻隔网络，延缓热分解产生的小分子气体逸出与外部热量向材料内部传递，从而抑制热降解的进行；二是催化成炭作用，ATP中的硅铝酸盐组分（如Al_2O_3、SiO_2）作为路易斯酸，催化PHA分子链发生脱水和交联反应，促进炭层形成；三是界面相互作用，改性ATP与PHA基体间的强界面结合能够限制PHA分子链的热运动，提高热稳定性。PHA/ATP-8.0的热稳定性略有下降，$t_{5\%}$降至269.2 ℃，这与团聚体导致的界面热缺陷有关。团聚体与基体界面发生脱黏，形成热传导通道，加速了热量传递与热降解。此外，600 ℃时的残炭率随ATP含量的增加显著提高，从0.8%提升至13.1%，证实ATP的催化成炭效应。

表1 PHA/ATP复合材料的TG数据

Tab.1 TG data of PHA/ATP composites

样品	$t_{5\%}$/℃	$t_{d,max}$/℃	($t_{d,max}$-$t_{5\%}$)/℃	600 ℃残炭率/%
PHA	258.7	282.5	23.8	0.8
PHA/ATP-1.0	263.4	287.2	23.8	2.5
PHA/ATP-2.0	267.9	291.8	23.9	4.2
PHA/ATP-4.0	271.5	296.3	24.8	7.6
PHA/ATP-8.0	269.2	294.7	25.5	13.1

2.4 PHA/ATP复合材料的HDT分析

图3为PHA/ATP复合材料的HDT。从图3可以看出，PHA的HDT仅为54.8 ℃。当环境温度超过55.0 ℃时，PHA制品即发生形变，无法正常使用，这严重限制其在中高温环境下的应用。添加ATP后，PHA/ATP复合材料的HDT随ATP含量的增加持续升高。PHA/ATP-8.0的HDT达到62.5 ℃，较PHA提升7.7 ℃。HDT的提升主要归因于两方面的协同作用：一是X_c的提升，ATP的异相成核作用能够提高PHA的X_c，规整的晶体网络具有较高的刚性和热稳定性，能够抵抗高温下的变形；二是刚性骨架支撑作用，一维ATP纳米棒具有较高的刚性和热稳定性，在基体中起到类似“钢筋”的骨架支撑作用，能够限制高温下PHA分子链的运动和滑移。PHA/ATP复合材料的HDT与埃洛石纳米管增强PHA复合材料的提升幅度相当，但ATP成本更低，其更有工业化应用前景。

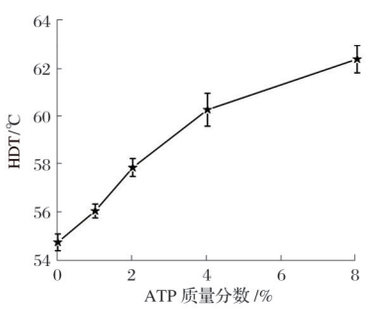
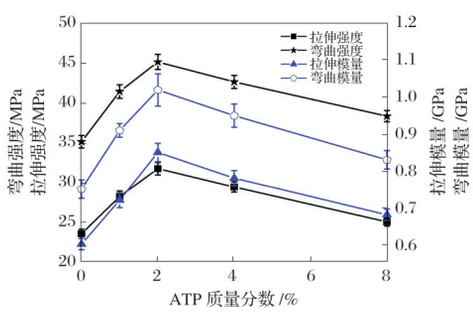


图3 PHA/ATP复合材料的HDT

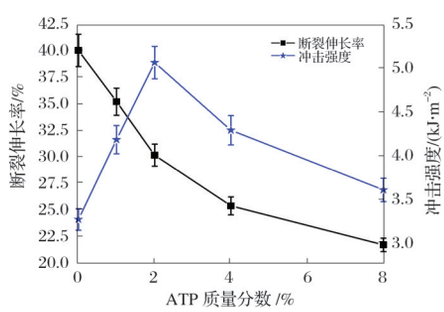
Fig.3 HDT of PHA/ATP composites

2.5 PHA/ATP复合材料的力学性能分析

图4为PHA/ATP复合材料的力学性能。



(a) 拉伸强度、拉伸模量、弯曲强度和弯曲模量



(b) 断裂伸长率和冲击强度

图4 PHA/ATP复合材料的力学性能

Fig.4 Mechanical properties of PHA/ATP composites

从图4可以看出，PHA的拉伸强度为23.6 MPa，拉伸模量为0.60 GPa，弯曲强度为35.2 MPa，弯曲模量为0.75 GPa，断裂伸长率为40.0%，缺口冲击强度为3.2 kJ/m^2，符合PHA的典型力学性能范围，PHA具有良好

的韧性。随着ATP含量的增加，PHA/ATP复合材料的拉伸强度、拉伸模量、弯曲强度、弯曲模量以及缺口冲击强度均呈先升高后降低的趋势，且在ATP质量分数为2.0%时达到峰值。与PHA相比，PHA/ATP-2.0的拉伸强度提升至31.8 MPa，提升34.7%；拉伸模量提升至0.85 GPa，提升41.7%；弯曲强度提升至45.2 MPa，提升28.4%；弯曲模量提升至1.02 GPa，提升36.0%；缺口冲击强度提升至5.0 kJ/m^2，提升56.3%。这表明适量添加改性ATP能够实现同步增强增韧。这种同步增强增韧的效果主要得益于以下4个方面。第一，应力传递机制。改性ATP与PHA基体之间的强界面结合能够保证外力从基体有效地传递到高刚性的ATP纳米棒上，充分发挥其承载作用。第二，拔出效应。在断裂过程中，ATP纳米棒从基体中拔出需要克服界面摩擦力，消耗大量的断裂能。第三，裂纹偏转和桥接机制。当裂纹扩展遇到ATP纳米棒时，会发生偏转、分叉和桥接，增加裂纹扩展的路径和阻力，吸收更多的能量。第四，X_c提升机制。ATP诱导X_c提升，增强基体的刚性和强度，提高其承载能力。

2.6 PHA/ATP复合材料的阻燃性能分析

表2为PHA/ATP复合材料的阻燃性能。从表2可以看出，PHA的LOI仅为19.2%，属于易燃材料，且燃烧时产生大量熔滴，垂直燃烧等级无等级。加入ATP后，PHA/ATP复合材料的LOI随ATP含量的增加持续升高。值得注意的是，ATP能够有效抑制PHA燃烧时的熔滴现象。PHA燃烧时，由于热降解产生的低分子量熔体黏度低，容易滴落形成熔滴，且熔滴携带火焰，容易引燃周围的可燃物。加入ATP后，一方面，ATP的加入提高了熔体的黏度，减少熔滴的产生；另一方面，ATP催化形成的炭层能够覆盖在熔体表面，阻止熔体的滴落。PHA/ATP-8.0燃烧时无明显熔滴产生，垂直燃烧等级达到V-1级，显著提高材料的火灾安全性。

表2 PHA/ATP复合材料的阻燃性能

Tab.2 Flame retardancy of PHA/ATP composites

样品	LOI/%	垂直燃烧等级	熔滴现象
PHA	19.2	无等级	严重，引燃脱脂棉
PHA/ATP-1.0	21.5	无等级	较严重，引燃脱脂棉
PHA/ATP-2.0	23.1	HB	中等，不引燃脱脂棉
PHA/ATP-4.0	25.3	V-2	轻微，不引燃脱脂棉
PHA/ATP-8.0	26.8	V-1	无明显熔滴

表3为PHA/ATP复合材料的锥形量热测试结果。从表3可以看出，随着ATP含量的增加，TTI逐渐延长，从PHA的32 s延长至PHA/ATP-8.0的41 s；PHRR显著降低，从452 kW/m^{2}降至287 kW/m^2，降低36.5%；TTPHRR逐渐推迟，从125 s延长至186 s；THR从87.2 MJ/m^{2}降至65.4 MJ/m^2，降低25.0%；TSR从1 235 m^2/m^{2}降至892 m^2/m^2，降低27.8%。ATP对PHA的阻燃机制主要包括以下3个方面。一是物理阻隔作用。在燃烧过程中，一维ATP纳米棒在材料表面相互搭接，形成致密的炭层。该炭层能够有效阻隔外部氧气和热量向材料内部的传递，同时抑制内部可燃气体的逸出，从而减缓燃烧反应的进行。二是催化成炭作用。ATP中的Al^{3+}和Si^{4+}作为路易斯酸，能够催化PHA分子链发生脱水、交联和环化反应，促进炭层的形成，炭层不仅能够减少可燃气体的释放，还能够起到隔热隔氧的作用。三是吸热作用。ATP在高温下会发生脱水和脱羟基反应，吸收大量的热量，降低燃烧体系的温度，从而抑制燃烧反应的进行。此外，炭层还能够吸附燃烧过程中产生的烟颗粒和有毒气体，降低烟释放量和毒性。

表3 PHA/ATP复合材料的锥形量热测试结果

Tab.3 Cone calorimetric test results of PHA/ATP composites

样品	TTI/s	PHRR/(kW·m^{-2})	TTPHRR/s	THR/(MJ·m^{-2})	TSR/(m^2·m^{-2})
PHA	32	452	125	87.2	1 235
PHA/ATP-1.0	35	408	138	80.5	1 126
PHA/ATP-2.0	37	365	152	74.3	1 018
PHA/ATP-4.0	39	321	170	69.1	945
PHA/ATP-8.0	41	287	186	65.4	892

本研究中，不同性能的最佳ATP含量存在差异。PHA/ATP-2.0力学性能达到最优，PHA/ATP-4.0和PHA/ATP-8.0热稳定性和阻燃性能表现更佳。力学性能对纳米粒子的分散状态和界面完整性更为敏感，少量团聚就会导致应力集中，使力学性能下降；而热稳定性和阻燃性能主要依赖纳米粒子的阻隔效应和催化成炭作用，较高的含量更有利于形成连续的阻隔网络和炭层。当ATP质量分数超过2.0%后，由于团聚现象的出现，应力集中效应加剧，导致力学性能下降。复合材料的断裂伸长率随ATP含量的增加略有下降，从40.0%降至21.0%。其原因在于刚性纳米粒子的加入限制了PHA分子链的运动，使材料的韧性有所降低。但即使在8.0%的高添加质量分数下，断裂伸长率仍保持在20%以上，说明复合材料仍具有良好的韧性，能够满足大多数应用场景的要求。

3 结论

本研究通过熔融共混法制备不同ATP含量的PHA/

ATP复合材料，系统考察ATP含量对材料微观结构、结晶行为、热稳定性、力学性能及阻燃性能的影响。结果表明，低质量分数(≤2.0%)改性ATP可在PHA基体中均匀分散并形成良好界面结合。ATP具有显著异相成核作用，可提高PHA/ATP复合材料的X_c，改善PHA/ATP复合材料的热稳定性与HDT。PHA/ATP-2.0力学性能最佳，可实现强度与韧性的平衡。随着ATP含量的增加，PHA/ATP复合材料的阻燃性能逐渐增强，PHA/ATP-8.0的阻燃性能最好。改性ATP可通过多机制协同作用提升PHA的综合性能。本研究为低成本高性能生物降解复合材料的开发提供参考。

参考文献

[1] 陈业中, 付学俊, 麦开锦, 等. 可生物降解树脂与纤维素或淀粉共混材料研究进展[J]. 塑料科技, 2026, 54(5): 214-218.

[2] 岑金发, 韩江瑶, 龙敏为, 等. 改性聚乳酸基材料的研究进展[J]. 塑料科技, 2026, 54(5): 198-203.

[3] 张玉, 骆宇新, 邢桐贺, 等. 双碳目标下废旧聚酯纺织品的回收再利用研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(10): 182-190.

[4] 边琦, 徐子凡, 任启文, 等. 生物可降解高分子材料在农林领域的研究前沿[J]. 环境科学与技术, 2025, 48(8): 103-114.

[5] 李子翱. 棕榈油基UV固化聚氨酯丙烯酸酯的合成及核壳填料耐候改性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2026.

[6] 吴杰, 王仕杰, 刘之烨. 可降解材料聚羟基脂肪酸酯的研究进展[J]. 塑料科技, 2025, 53(8): 207-211.

[7] 刘会雪, 郭会娟, 胡兆宏. 二硫化钼改性聚羟基脂肪酸酯复合材料的结构调控与性能研究[J]. 塑料科技, 2026, 54(5): 100-104.

[8] 针珈滔, 黄威, 陈鹏, 等. 聚乳酸/聚羟基脂肪酸酯共混改性研究进展[J]. 高分子通报, 2026, 39(3): 341-348.

[9] 宋信平, 贾海媛, 王辰, 等. 木质素生物转化聚羟基脂肪酸酯的研究进展[J]. 生物加工过程, 2025, 23(6): 616-627.

[10] 周同. 聚羟基脂肪酸酯在生物医学领域的应用进展[J]. 纺织科学研究, 2025(3): 27-33.

[11] 胡焕国, 代先星. 聚羟基脂肪酸酯对墙体用聚苯乙烯泡沫复合材料性能的影响[J]. 塑料科技, 2025, 53(3): 77-81.

[12] 魏风军, 杨雪, 贾秋丽. 聚羟基脂肪酸酯功能化改性研究进展[J]. 包装学报, 2025, 17(2): 1-9.

[13] 吴静, 黄嘉园, 蓝峻峰, 等. 可生物降解的纳米$CaCO_3$/BF/PHA/PE复合材料的制备及性能[J]. 塑料科技, 2024, 52(7): 121-124.

[14] 马晓星, 蒋爱云. 改性羟基磷灰石/聚羟基脂肪酸酯复合材料的制备及性能研究[J]. 塑料科技, 2026, 54(1): 117-122.

[15] 杨慎宇, 苗秋菊. 聚羟基脂肪酸酯/掺铈硫酸钙复合材料的制备及性能研究[J]. 塑料科技, 2023, 51(6): 24-28.

[16] 田强运, 裴树昆, 马晓军, 等. 生物降解包装材料聚羟基脂肪酸酯的工艺研究进展[J]. 包装工程, 2023, 44(7): 63-75.

[17] 相恒学, 曾佳, 陈姿晔, 等. 聚羟基脂肪酸酯(PHAs)的结晶行为与力学性能调控[J]. 中国材料进展, 2019, 38(5): 450-456.

[18] SIRAJUDEEN A O, ANNUAR M, IBRAHIM S. Enhanced microbial fuel cell performance using carbon nanotube-composited medium-chain-length polyhydroxyalkanoates-*co*-polycaprolactone blends as anode coatings[J]. Chemical Engineering Communications, 2025, 212 (9): 1382-1394.

[19] JEE M H, YEO M J, JANG S S, et al. Preparation and characterization of polyhydroxyamide composite fibers reinforced with carbon nanotubes: Experiment and computation collaborative approach[J]. Polymer Composites, 2023, 44(11): 8116-8124.

[20] XU P W, LIU J L, LIU B, et al. Sequential multiaxial stretching-engineered polyhydroxyalkanoates/graphene quantum dot composites: Synergistic enhancement of mechanical robustness, long-term stability, and multifunctionality for sustainable materials[J]. Small, 2025, 21(31): 2504008.

[21] PAXINOU A, NIGMATULLIN R, PATERAKIS G, et al. Novel polyhydroxyalkanoate-graphene oxide composites with potential for clinical application against bacterial implant-associated infections in septic surgery[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2025, 13: 1671682.

[22] 乔娇娇. 凹凸棒石-废纸纤维素基复合气凝胶材料的制备及其性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2025.

[23] 倪寅翔, 文举, 高青青, 等. 凹凸棒石增强PA6复合线材制备及3D打印研究[J]. 非金属矿, 2024, 47(3): 28-32.

[24] ZHANG T, HUANG X Y, QIAO J J, et al. Recent developments in synthesis of attapulgite composite materials for refractory organic wastewater treatment: A review[J]. RSC Advances, 2024, 14(23): 16300-16317.

[25] 解维闵, 梁晓正, 赵晓光, 等. 黏土矿物基纳米复合阻燃材料的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(23): 23192-23204.

[26] 王刚, 赵梓成, 唐蓉萍, 等. 磷腈/凹凸棒石纳米复合阻燃剂在环氧树脂中的应用[J]. 塑料科技, 2023, 51(11): 74-79.

[27] 姚超, 张亮亮, 任强, 等. 凹凸棒石复配膨胀阻燃剂阻燃HDPE的研究[J]. 塑料科技, 2012, 40(6): 37-41.

[28] ZHONG J H, XIN Y. Preparation, compatibility and barrier properties of attapulgite/poly(lactic acid)/thermoplastic starch composites[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 242: 124727.

[29] TSOU C H, ZENG R, TSOU C Y, et al. Mechanical, hydrophobic, and barrier properties of nanocomposites of modified polypropylene reinforced with low-content attapulgite[J]. Polymers, 2022, 14(17): 3696.