聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯/硅灰石复合材料的制备与性能研究

江友琛[1]，马 军[2]，冒爱民[2]，杜旭诚[1]，王自庆[1,2]*

（1.石河子大学化学化工学院 绿色化工过程兵团重点实验室，新疆 石河子 832003；
2.新疆蓝山屯河聚酯有限公司，新疆 昌吉 832000）

摘 要：研究采用醇-水溶液法制备γ-氨丙基三乙氧基硅烷（KH550）改性硅灰石粉末（MWO），将其作为填料与聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯（PBAT）进行熔融共混，制备PBAT/MWO复合材料。研究复合材料的微观形貌、热学性能、力学性能和阻隔性能，分析MWO含量对其微观结构和性能的影响。研究发现，当MWO质量分数低于3%时，MWO可以均匀分散在PBAT中，MWO与PBAT基体具有良好的相容性，能够形成稳定的交联结构，分子链运动抑制作用与异相成核作用相互竞争，影响其结晶性能。当MWO质量分数为2%时，拉伸强度和断裂伸长率分别从19.9 MPa和343%提高至21.7 MPa和482%。然而，随着MWO含量的增加，复合材料的断裂伸长率逐渐下降，材料性质由软韧逐渐转向刚性，力学性能降低。当MWO质量分数为2%时，复合材料的氧气透过系数和水蒸气透过系数分别较PBAT降低18.53%和10.82%。

关键词：聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯；硅灰石粉末；硅烷偶联剂；力学性能
中图分类号：TQ314 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-3360（2026）09-0132-06
DOI：10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.09.024

Study on Preparation and Properties of Poly(butylene adipate-*co*-terephthalate)/Wollastonite Composites

JIANG Youchen[1], MA Jun[2], MAO Aimin[2], DU Xucheng[1], WANG Ziqing[1,2]*

(1. Key Laboratory of Green Chemical Processes Corps, School of Chemistry and Chemical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China; 2. Xinjiang Blue Ridge Tunhe Polyester Co. , Ltd. , Changji 832000, China)

Abstract: The modified wollastonite powder (MWO) was prepared via an alcohol-water solution method using γ-aminopropyltriethoxysilane (KH550) as the modifier. The MWO was then used as a filler and melt-blended with poly (butylene adipate-*co*-terephthalate) (PBAT) to prepare PBAT/MWO composites. The microstructure, thermal properties, mechanical properties, and barrier properties of the composites were investigated, and the effects of MWO content on the microstructure and performance were analyzed. It was found that when the MWO mass fraction was below 3%, MWO was uniformly dispersed in the PBAT matrix, exhibiting good compatibility with PBAT and forming a stable crosslinked structure. The suppression of molecular chain mobility and the heterogeneous nucleation effect competed with each other, influencing the crystallization behavior of the composites. At an MWO mass fraction of 2%, the tensile stress and elongation at break increased from 19.9 MPa and 343% to 21.7 MPa and 482%, respectively. However, with further increase in MWO content, the elongation at break gradually decreased, and the material transitioned from ductile to rigid, resulting in a decline in mechanical properties. At an MWO mass fraction of 2%, the oxygen permeability coefficient and water vapor permeability coefficient of the composites decreased by 18.53% and 10.82%, respectively, compared with those of PBAT.

Keywords: PBAT; Wollastonite powder; Silane coupling agent; Mechanical properties

收稿日期 Submitted date 2025-09-05；修回日期 Revised date 2025-10-10；录用日期 Accepted date 2025-11-17
基金项目：新疆维吾尔自治区重点园区引才育才计划项目（2023ZCYC013）；新疆昌吉州科技计划项目（2023112258）
*联系人，wzq20070420@163.com
引用本文：江友琛，马军，冒爱民，等. 聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯/硅灰石复合材料的制备与性能研究[J]. 塑料科技，2026，54(9)：132-137.
Citation：JIANG Y C, MA J, MAO A M, et al. Study on preparation and properties of poly(butylene adipate-*co*-terephthalate)/wollastonite composites[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(9): 132-137.

塑料凭借质量轻、绝缘性好以及可塑性高等优势，已被广泛应用于人类生产生活的各个领域[1]。然而，大量塑料制品的使用及其在环境中的持续累积，已引发严重的“塑料污染”问题，成为人类社会共同面临的重大生态挑战。开发可完全生物降解材料以实现对传统石油基聚合物的替代，被认为是解决“白色污染”问题的有效途径[2]。聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯(PBAT)是一种由己二酸、对苯二甲酸与1,4-丁二醇共聚而成的脂肪族-芳香族聚酯共聚物[3]，兼具良好的耐热性、抗冲击性和延展性，广泛应用于包装、农业及生物医药等领域。目前，PBAT在全生物降解高分子材料的商业化生产中占据主导地位[4]。然而，与传统聚合物相比，PBAT在拉伸强度等力学性能和气体阻隔性能方面仍存在明显不足，限制其应用领域的拓展。

为改善PBAT的综合性能，研究人员常采用共混、共聚及填充改性等方法对其进行功能化改性[5-8]。XIE等[9]将有机化层状Zn-Al水滑石(OLDH)与PBAT共混，制备PBAT/OLDH复合材料，发现OLDH的引入能够显著增强材料的力学性能与水蒸气阻隔性能。LIU等[10]采用熔融共混法制备PBAT/木质素复合材料，研究表明，木质素不仅能够提高复合材料的力学强度，还能够促进其在土壤中的降解。CHENG等[11]将竹粉引入PBAT体系，系统探讨竹粉含量对复合材料性能的影响，发现添加竹粉可显著提升阻隔性能，复合材料对氧气的透过率较纯PBAT显著降低。此外，多项研究证实，纳米碳酸钙、纤维素纳米晶及热塑性淀粉等填料的引入均能有效改善PBAT的综合性能[12-16]。

硅灰石(WO)是一种天然单链硅酸盐矿物，具有成本低、无毒、耐化学腐蚀及环境友好等优点，常被用作聚合物增强填料以提升其拉伸强度等力学性能[17]。尽管WO在聚合物增强方面已有较多研究，但由于其比表面积较高，粉末易团聚，与聚合物基体相容性较差，反而可能导致复合材料性能下降。因此，提高填料与聚合物之间的相容性已成为塑料改性研究的重要课题。目前广泛采用的方法是利用偶联剂对WO进行有机化改性，以改善其与聚合物的相容性[18]。本研究采用γ-氨丙基三乙氧基硅烷(KH-550)对WO进行表面改性，系统研究改性硅灰石(MWO)含量对PBAT复合材料微观结构、热性能、力学性能及阻隔性能的影响，重点探讨MWO在PBAT基体中的分散状态随含量变化的规律及其异相成核效应与分子链运动限制效应在结晶过程中的竞争与平衡机制。

1 实验部分

1.1 主要原料

PBAT，数均分子量(M_n)为3.3×10^4 g/mol，新疆蓝山屯河聚酯有限公司；WO粉末，200目，工业级，江西上高县雪峰粉体有限公司；KH550，质量分数98%，上海麦克林生化科技有限公司；无水乙醇，分析纯，天津市富宇精细化工有限公司；去离子水，自制；乙酸，分析纯，天津市富宇精细化工有限公司。

1.2 仪器与设备

双螺杆挤出机，Process 16，美国Thermo Fisher Scientific公司；傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)，Vertex 70，德国Bruker公司；扫描电子显微镜(SEM)，JSM-6490LV，日本电子株式会社；差示扫描量热仪(DSC)，DSC200F3，德国Netzsch公司；同步热分析仪(TG)，STA 449F3，德国Netzsch公司；万能试验机，Instron 3366，美国Instron公司；平板硫化机，YJ-LH22B，东莞市仪通检测设备科技有限公司；压差法气体渗透仪，Labthink Basic 201，济南兰光机电技术有限公司；水蒸气透过率测试仪，Labthink W3-031，济南兰光机电技术有限公司；高混机，GH-10型，北京泽岛机械有限公司。

1.3 样品制备

1.3.1 MWO粉末的制备

采用醇-水溶液法对WO进行表面改性。将KH550、去离子水与无水乙醇按质量比1∶1∶4进行混合，用乙酸调节pH值至3.5，室温水解60 min，得到KH550水解液。将40 g WO加入160 g无水乙醇中，超声30 min后升温至60 ℃，滴加占WO质量2%的水解液，反应60 min。抽滤、乙醇洗涤3次，50 ℃干燥12 h，得到MWO粉末。

1.3.2 PBAT/MWO复合材料的制备

将PBAT置于80 ℃真空干燥箱中干燥12 h，去除水分，备用。将PBAT和MWO在高混机中快速搅拌5 min，混合均匀后，放入双螺杆挤出机中熔融挤出，料筒温度设置为150、150、160、170、175、175、170、160 ℃。将挤出的复合物冷却，造粒，于80 ℃下干燥6 h，得到PBAT/MWO-X(X为MWO占PBAT的质量分数)复合材料。

1.4 性能测试与表征

FTIR测试：使用傅里叶变换红外光谱仪对KH-550、WO和MWO进行测定，扫描范围为4 000~400 cm^{-1}。

SEM测试：采用扫描电子显微镜观察MWO与PBAT/MWO复合材料断面形貌。抽真空后进行喷金处理，加速电压为2 kV。

DSC测试：采用差示扫描量热仪测试材料的热性能。氮气保护下，从室温快速升温至170 ℃，保持3 min消除热历史和残余应力。然后以10 ℃/min降温至-50 ℃，再以10 ℃/min升温至170 ℃，记录DSC曲线。PBAT的结晶度(X_c)计算公式为：

$$X_c=\frac{\Delta H_m}{w\times\Delta H_m^0}\times100\% \quad (1)$$

式(1)中：w为PBAT在共混物中的质量分数，%；ΔH_m为熔融焓，J/g；ΔH_m^0为100%结晶PBAT的熔融焓，取114 J/g。

TG测试：采用同步热分析仪测试复合材料的热稳定性。在氮气氛围下，从50 ℃开始升温至800 ℃，升温速率为10 ℃/min。

力学性能测试：按照GB/T 1040.2—2022进行测试，试样为注塑1A型哑铃形样条。测试在室温下进行，拉伸速率为10 mm/min。每组至少测试5个平行试样，取平均值。

氧气和水蒸气透过性能测试：采用平板硫化机将样品压制成厚度均一的薄膜，将其裁剪成具有一定表面积(约33 cm^2)的薄膜。复合材料的氧气阻隔性能在23 ℃下按照GB/T 1038.1—2022进行测试；水蒸气透过性能采用水蒸气透过率测试仪，在38 ℃和相对湿度90%条件下按照GB/T 1037—2021进行测试。

2 结果与讨论

2.1 MWO、WO和KH550的FTIR分析

图1为MWO、WO和KH550的FTIR谱图。从图1可以看出，MWO在700~800 cm^{-1}处表现出Si—O键的典型伸缩振动峰；而KH-550的引入使MWO在3 400 cm^{-1}表现出KH-550特有的N—H特征峰[19]。同时，800 cm^{-1}处表现出Si—O—Si的峰，表明KH-550成功接枝于WO表面。

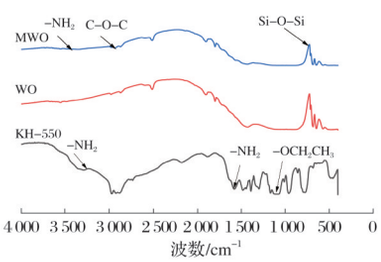
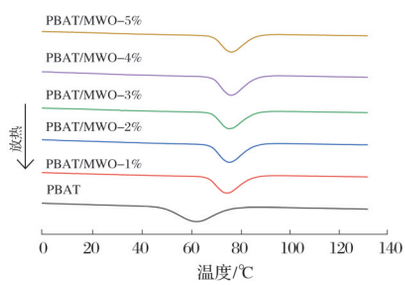


图1 MWO、WO和KH550的FTIR谱图

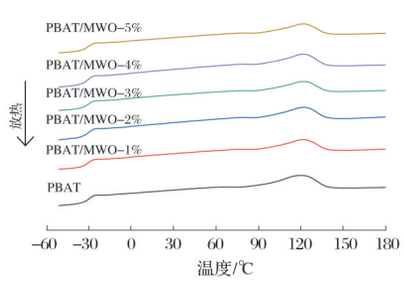
Fig.1 FTIR spectra of MWO, WO and KH550

2.2 PBAT/MWO复合材料的热性能分析

图2为PBAT/MWO复合材料的DSC曲线。表1为PBAT/MWO复合材料的热学性能数据。从图2和表1可以看出，PBAT的结晶温度(t_c)为62.1 ℃，而PBAT/MWO复合材料的t_c均在74 ℃以上。原因是分散在PBAT中的MWO为PBAT分子链提供成核位点，从而起到异相成核作用，显著降低结晶成核能垒，提升PBAT的t_c[20]。ΔH_m整体呈现下降趋势，原因是MWO能够抑制PBAT分子链运动，随着MWO含量的增大，填料会因团聚而形成物理屏障，阻碍分子链有序排列，导致ΔH_m下降[21]。X_c的变化规律进一步验证了MWO填料的双重作用机制。当MWO质量分数从0提高至1%时，X_c从11.8%降至9.9%。这表明MWO的分子链阻碍效应占主导作用，其物理阻碍作用能够抑制PBAT链段的规整排列，导致结晶能力下降。而当MWO质量分数为2%时，X_c小幅回升至10.3%，这表明此时MWO的异相成核开始发挥作用，可提供成核位点促进局部结晶。然而，该正面效应仍无法抵消分子链运动受限所导致的结晶能力下降[22]。而当MWO含量进一步增加时，X_c持续降低，当MWO质量分数大于3%时，团聚体进一步阻碍分子链扩散，破坏晶体生长的一致性[23]。因此，MWO对PBAT X_c的影响呈现“抑制-弱促进-抑制”的三阶段特征，其核心矛盾在于成核效应与分子链受限效应的相互竞争。值得注意的是，高MWO含量下的团聚效应能够导致X_c不可逆的下降。



(a) 冷却曲线



(b) 升温曲线

图2 PBAT/MWO复合材料的DSC曲线

Fig.2 DSC curves of PBAT/MWO composites

表1 PBAT/MWO复合材料的热学性能数据

Tab.1 Thermal properties data of PBAT/MWO composites

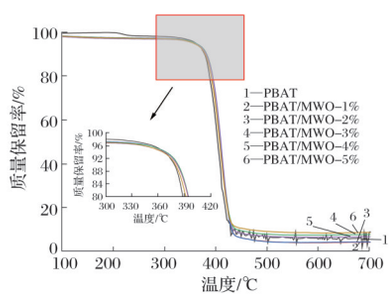
样品编号	t_g/℃	t_m/℃	ΔH_m/(J·g^{-1})	t_c/℃	ΔH_c/(J·g^{-1})	X_c/%	$t_{5\%}$/℃	t_{max}/℃
PBAT	-31.0	119.0	13.4	62.1	13.3	11.8	377.9	410.8
PBAT/MWO-1%	-31.2	122.1	11.2	74.1	14.7	9.9	357.3	412.4
PBAT/MWO-2%	-31.1	121.5	11.5	75.5	15.6	10.3	361.0	411.5
PBAT/MWO-3%	-30.1	121.0	11.0	76.0	13.5	9.9	360.7	410.9
PBAT/MWO-4%	-31.1	120.7	10.6	76.2	15.3	9.7	356.7	411.8
PBAT/MWO-5%	-30.6	120.6	10.2	75.7	13.4	9.4	356.1	412.0

注：t_g为玻璃化转变温度；t_m为熔融温度；ΔH_c为结晶焓；t_{max}为最大分解速率温度。

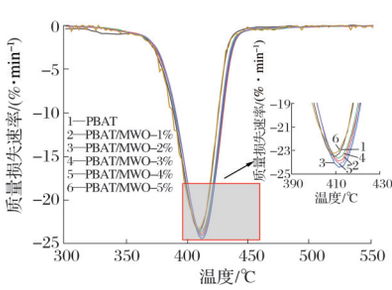
2.3 PBAT/MWO复合材料的热稳定性分析

图3为PBAT/MWO复合材料的TG和DTG曲线，相应数据列于表1。从图3可以看出，PBAT及其复合材料在410 ℃时出现单一热降解峰，主要是由PBAT分子主链断

裂引起的[24]。此外，PBAT与PBAT/MWO复合材料的热分解温度基本一致，这表明MWO的添加未改变材料的主体降解机制与热稳定性。从表1可以看出，PBAT的质量分解5%的温度($t_{5\%}$)为377.9 ℃，而PBAT/MWO-5%复合材料的$t_{5\%}$降至356.1 ℃。原因为PBAT基体交联结构与MWO团聚效应而形成竞争机制，导致热稳定性下降[25]。当MWO的质量分数为2%时，$t_{5\%}$增长至361.0 ℃。原因是填料与PBAT基体相容性良好，能够形成致密交联网络，热稳定性得以提升。而当MWO质量分数增加至4%时，MWO的团聚破坏了基体连续性并产生缺陷位点，加速热引发分解。同时，MWO与聚合物间的导热性差异协同引发局部热集中，进一步促进分子链解离[26]。这与2.2节结晶行为中观测到的“抑制-弱促进-抑制”一致，进一步证实了添加2% MWO是兼顾分散性与界面结合的最优添加质量分数。



(a) TG曲线



(b) DTG曲线

图3 PBAT/MWO复合材料的TG和DTG曲线

Fig.3 TG and DTG curves of PBAT/MWO composites

2.4 PBAT/MWO复合材料的力学性能分析

图4为PBAT/MWO复合材料的应力-应变曲线。表2为PBAT/MWO复合材料的力学性能。从图4和表2可以看出，复合材料的拉伸强度与断裂伸长率均呈现先升后降的趋势。当MWO质量分数从0增加至2%时，拉伸强度从19.9 MPa提升至21.7 MPa，断裂伸长率从343%显著增加至482%。原因是MWO颗粒的小尺寸效应及其在基体中均匀分散，二者协同增强了填料与基体之间的界面结合，促进了应力从基体向填料的高效传递[27]。进一步增加MWO含量发现，对应的拉伸强度和断裂伸长率均发生明显下降。当MWO质量分数大于3%时，一方面，颗粒团聚导致应力集中点增多，引发早期断裂；另一方面，团聚阻碍聚合物链迁移，抑制塑性变形能力[28]。弹性模量随MWO含量的增加而持续上升，原因是MWO颗粒填充聚合物的自由体积，形成致密化基体结构，限制分子链运动，从而提升宏观刚性[29]。

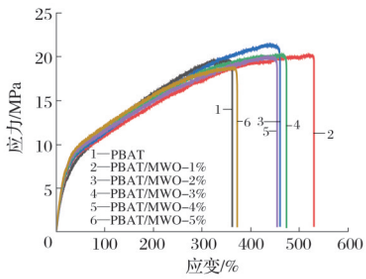


图4 PBAT/MWO复合材料的应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of PBAT/MWO composites

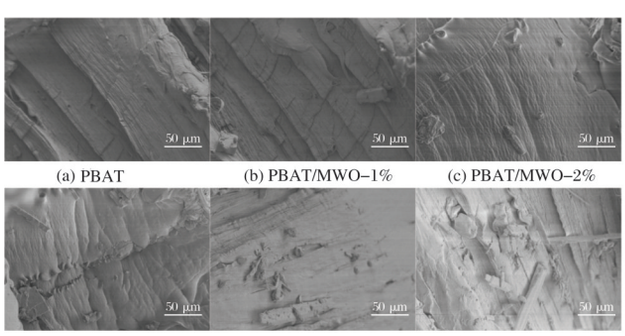
表2 PBAT/MWO复合材料的力学性能

Tab.2 Mechanical properties of PBAT/MWO composites

样品	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%	弹性模量/MPa
PBAT	19.9±1.1	343±10	37.2±3.0
PBAT/MWO-1%	20.7±0.6	530±40	40.0±0.96
PBAT/MWO-2%	21.7±0.4	482±68	47.1±2.2
PBAT/MWO-3%	20.4±1.5	462±32	44.6±1.9
PBAT/MWO-4%	19.3±0.6	420±20	50.2±1.8
PBAT/MWO-5%	18.9±0.8	366±34	50.1±1.9

2.5 PBAT/MWO复合材料的SEM分析

图5为PBAT和PBAT/MWO复合材料断面的SEM照片。从图5可以看出，PBAT断面结构光滑均匀，无孔隙。当MWO质量分数为1%和2%时，MWO可以均匀分散在PBAT基体中，未出现明显颗粒聚集现象，说明MWO与PBAT基体相容性良好，界面结合紧密，断面光滑，原因是MWO与PBAT基体之间能够形成稳定结构，可以有效传递应力[30]。但当MWO质量分数为4%时，由MWO颗粒造成的团聚现象明显，是导致材料性能下降的主要原因。



(a) PBAT (b) PBAT/MWO–1% (c) PBAT/MWO–2%

(d) PBAT/MWO–3% (e) PBAT/MWO–4% (f) PBAT/MWO–5%

图5 PBAT和PBAT/MWO复合材料断面的SEM照片(1 000×)

Fig.5 Cross-section SEM images of PBAT and PBAT/MWO composites (1 000×)

2.6 PBAT/MWO复合材料的阻隔性能分析

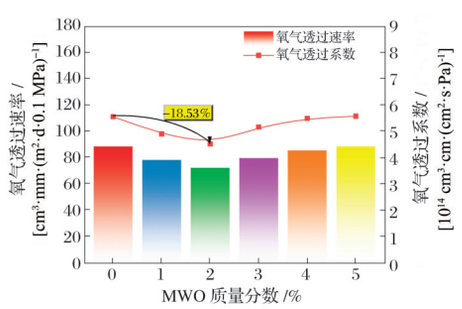
表3为PBAT/MWO复合材料的阻隔性能数据，图6为PBAT/MWO复合材料的阻隔性能。从表3和图6可以看出，PBAT薄膜的氧气透过系数与水蒸气透过系数分别为

5.56×10^{14} $cm^3\cdot cm/(cm^2\cdot s\cdot Pa)$ 和 3.42×10^{13} $g\cdot cm/(cm^2\cdot s\cdot Pa)$。随着MWO含量的增加，PBAT/MWO复合材料的氧气透过速率与水蒸气透过速率均呈先降低后升高的趋势。当MWO质量分数为2%时，PBAT/MWO-2%的氧气透过系数和水蒸气透过系数分别下降至4.53×10^{14} $cm^3\cdot cm/(cm^2\cdot s\cdot Pa)$和$3.05\times10^{13}$ $g\cdot cm/(cm^2\cdot s\cdot Pa)$，分别较PBAT降低18.53%和10.82%。进一步增加MWO的含量发现，材料阻隔性能下降。原因为低含量MWO能够与PBAT基体形成致密网络结构，延长气体在复合材料中渗透路径[31]。此外，MWO填料还起到异相成核作用，使聚合物分子链排列更紧密有序，结晶区域分子间作用力强，进而能有效阻碍气体扩散，提升阻隔性[32]。当MWO含量过高时，产生填料分散不均与团聚现象，材料内部出现空洞，形成团聚体-基体间的弱界面通道，导致阻隔性能下降[33]。

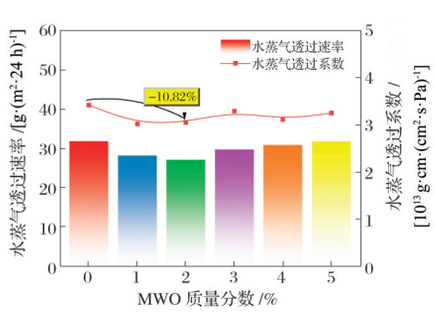
表3 PBAT/MWO复合材料的阻隔性能数据

Tab.3 Barrier properties data of PBAT/MWO composites

样品	氧气透过速率/ $[cm^3\cdot mm\cdot(m^2\cdot d\cdot 0.1\ MPa)^{-1}]$	氧气透过系数/ $[10^{14}\ cm^3\cdot cm\cdot(cm^2\cdot s\cdot Pa)^{-1}]$	水蒸气透过速率/ $[g\cdot(m^2\cdot 24\ h)^{-1}]$	水蒸气透过系数/ $[10^{13}\ g\cdot cm\cdot(cm^2\cdot s\cdot Pa)^{-1}]$
PBAT	88.61	5.56	31.83	3.42
PBAT/MWO-1%	78.25	4.91	28.11	3.02
PBAT/MWO-2%	72.42	4.53	27.05	3.05
PBAT/MWO-3%	79.68	5.17	29.64	3.29
PBAT/MWO-4%	85.69	5.50	30.83	3.11
PBAT/MWO-5%	88.59	5.58	31.83	3.25



(a) 氧气透过性能



(b) 水蒸气透过性能

图6 PBAT/MWO复合材料的阻隔性能

Fig.6 Barrier properties of PBAT/MWO composites

3 结论

本研究使用KH-550对WO进行改性，采用熔融共混法制备PBAT-MWO复合材料，对复合材料进行系统表征与性能测试，探究改性MWO含量对PBAT材料结晶性能、热稳定性以及力学性能的影响。FTIR谱图显示，KH550与MWO成功接枝。MWO对PBAT同时存在分子链运动抑制与异相成核两种作用，二者相互竞争。SEM照片显示，当MWO质量分数为1%~3%时，MWO与PBAT相容性良好。当MWO质量分数为4%时，MWO出现团聚现象，材料内部出现空穴。PBAT/MWO-2%复合材料拉伸强度与断裂伸长率分别为21.7 MPa和482%。同时，该趋势与SEM表征结果吻合，进而表明PBAT/MWO复合材料力学性能提升。MWO能够降低自由体积，形成渗透网络结构，延长氧气和水蒸气的渗透路径，提升复合材料的阻隔性能。当MWO含量较高时，MWO引起的填料团聚现象能够增强气体分子的渗透，对阻隔性能产生负面影响。

参考文献

[1] GEYER R, JAMBECK J R, LAW K L. Production, use, and fate of all plastics ever made[J]. Science Advances, 2017, 3(7): e1700782.

[2] MOHANTY A K, VIVEKANANDHAN S, PIN J M, et al. Composites from renewable and sustainable resources: Challenges and innovations [J]. Science, 2018, 362(6414): 536-542.

[3] 刘洋, 王婷, 蔡庆, 等. 可降解聚己二酸对苯二甲酸丁二醇酯/天然橡胶生物基复合材料性能的研究[J]. 橡胶工业, 2024, 71(12): 919-924.

[4] YE H B, LI Q Y, LI J, et al. Review on the abiotic degradation of biodegradable plastic poly(butylene adipate-terephthalate): Mechanisms and main factors of the degradation[J]. Chinese Chemical Letters, 2025, 36(1): 109861.

[5] LIU J L, OUYANG C B, HE W Q, et al. Degradation mode of PBAT mulching film and control methods duringits degradation induction period[J]. Mini-Reviews in Organic Chemistry, 2022, 19(5): 608-616.

[6] CHEN X N, ZENG Z, JU Y L, et al. Design of biodegradable PLA/PBAT blends with balanced toughness and strength via interfacial compatibilization and dynamic vulcanization[J]. Polymer, 2023, 266: 125620.

[7] BAI J, PEI H J, ZHOU X P, et al. Reactive compatibilization and properties of low-cost and high-performance PBAT/thermoplastic starch blends[J]. European Polymer Journal, 2021, 143: 110198.

[8] HAHLADAKIS J N, VELIS C A, WEBER R, et al. An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling[J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 344: 179-199.

[9] XIE J Z, ZHANG K, WU J F, et al. Bio-nanocomposite films reinforced with organo-modified layered double hydroxides: Preparation, morphology and properties[J]. Applied Clay Science, 2016, 126: 72-80.

[10] LIU Y F, LIU S, LIU Z T, et al. Enhanced mechanical and biodegradable properties of PBAT/lignin composites via silane grafting and reactive extrusion[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 220: 108980.

[11] CHENG Z, NING M, MAO K Y, et al. Bamboo powder lignocellulose/polybutylene adipate terephthalate biodegradable bioplastic composite film for food packaging materials[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 316: 144781.

[12] 邱瑞, 李梦雅, 雷文. 植物纤维/PBAT复合材料的现状及进展[J]. 塑料, 2024, 53(4): 133-138.

[13] 苗庆, 王祖芳, 黄东, 等. 改性纤维素纳米晶/PBAT复合材料的制备与性能[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(6): 103-109.

[14] MOUSTAFA H, GUIZANI C, DUPONT C, et al. Utilization of torrefied coffee grounds as reinforcing agent to produce high-quality biodegradable PBAT composites for food packaging applications[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2017, 5(2): 1906-1916.

[15] SUN Z Y, XU L, CHEN Z G, et al. Enhancing the mechanical and thermal properties of epoxy resin via blending with thermoplastic polysulfone[J]. Polymers, 2019, 11(3): 461.

[16] XIONG S J, PANG B, ZHOU S J, et al. Economically competitive biodegradable PBAT/lignin composites: Effect of lignin methylation and compatibilizer[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020, 8(13): 5338-5346.

[17] WONG J F, CHAN J X, HASSAN ABIN, et al. Thermal and flammability properties of wollastonite-filled thermoplastic composites: A review[J]. Journal of Materials Science, 2021, 56(15): 8911-8950.

[18] CHAN J X, WONG J F, HASSAN A, et al. Mechanical properties of wollastonite reinforced thermoplastic composites: A review[J]. Polymer Composites, 2020, 41(2): 395-429.

[19] TONG Z H, JIANG T Y, QIU R, et al. Effect of different silane coupling agent modified SiO_2 on the properties of silicone rubber composites: Based on molecular dynamics[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2025, 705: 135615.

[20] SCHAWE J E K, PÖTSCHKE P, ALIG I. Nucleation efficiency of fillers in polymer crystallization studied by fast scanning calorimetry: Carbon nanotubes in polypropylene[J]. Polymer, 2017, 116: 160-172.

[21] WANG M, HE C X, YANG X X, et al. Preparation and properties of PLA/PBAT composites modified with different filler particles[J]. Materials Letters, 2024, 372: 136960.

[22] AGUBRA V A, OWUOR P S, HOSUR M V. Influence of nanoclay dispersion methods on the mechanical behavior of E-glass/epoxy nanocomposites[J]. Nanomaterials, 2013, 3(3): 550-563.

[23] MING Y Q, ZHOU Z P, HAO T F, et al. Polymer Nanocomposites: Role of modified filler content and interfacial interaction on crystallization[J]. European Polymer Journal, 2022, 162: 110894.

[24] MA P M, LV P, XU P W, et al. Design of bio-based conductive and fast crystallizing nanocomposites with controllable distribution of multiwalled carbon nanotubes via interfacial stereo complexation[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 336: 223-232.

[25] KASHANI RAHIMI S, AEINEHVAND R, KIM K, et al. Structure and biocompatibility of bioabsorbable nanocomposites of aliphatic-aromatic copolyester and cellulose nanocrystals[J]. Biomacromolecules, 2017, 18 (7): 2179-2194.

[26] SILVA C GDA, KANO F S, DOS SANTOS ROSA D. Thermal stability of the PBAT biofilms with cellulose nanostructures/essential oils for active packaging[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019, 138(4): 2375-2386.

[27] 杜旭诚, 黄岐, 王培贤, 等. 聚对苯二甲酸-己二酸丁二醇酯/改性玄武岩纤维复合材料的制备及性能[J]. 精细化工, 2025(8): 1756-1762.

[28] CHAIWUTTHINAN P, CHUAYJULJIT S, SRASOMSUB S, et al. Composites of poly(lactic acid)/poly(butylene adipate-*co*-terephthalate) blend with wood fiber and wollastonite: Physical properties, morphology, and biodegradability[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136(21): 47543.

[29] 罗文倩, 何丽秋, 黎京鸿, 等. 超声辅助法制备片状Ca-Mg复相碳酸盐及其对PBAT复合材料性能的影响[J]. 复合材料学报, 2025, 42(1): 323-335.

[30] WU Q, BAI H H, YANG X, et al. Significantly increasing the interfacial adhesion of carbon fiber composites via constructing a synergistic hydrogen bonding network by vacuum filtration[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 225: 109300.

[31] XU Z B, DONG Y X, YANG Y, et al. Mechanical, barrier, and biodegradable properties of poly(butylene adipate-*co*-terephthalate)/polyglycolic acid blends prepared by reactive extrusion[J]. ACS Applied Engineering Materials, 2023, 1(1): 304-315.

[32] 张田伟, 梁嘉欣, 岳双双, 等. 可生物降解的半芳香聚酯聚碳酸丙烯酯共聚物/聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯共混物的制备及性能表征[J]. 高分子学报, 2023, 54(8): 1144-1154.

[33] LI J X, LAI L, WU L B, et al. Enhancement of water vapor barrier properties of biodegradable poly(butylene adipate-*co*-terephthalate) films with highly oriented organomontmorillonite[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(5): 6654-6662.