

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.06.024

磷石膏添加量对PBS复合材料性能的影响

陈思瑶¹, 张海¹, 吴寿明², 张小伟³, 董延鑫¹, 王莹¹, 高成涛⁴, 田琴³

(1. 贵州省烟草公司安顺市公司, 贵州安顺 561000; 2. 贵州中烟工业有限责任公司, 贵阳 550001;

3. 贵阳学院材料科学与工程学院, 贵阳 550005; 4. 贵州省材料产业技术研究院, 贵阳 550014)

摘要: 为改善聚丁二酸丁二醇酯(PBS)的性能, 以 γ -缩水甘油醚氧丙基三甲氧基硅烷(KH560)改性处理的磷石膏(OPG)为增强相, 苯乙烯马来酸酐共聚物(SMA)为增容剂, 通过熔融加工制备 OPG/SMA/PBS 复合材料。考察了 OPG 添加量对 PBS 复合材料热稳定性能、结晶性能、流变性能和力学性能的影响。热重分析表明, OPG 的添加有利于提高 PBS 复合材料的初始分解温度; 差示扫描量热分析表明, OPG 质量分数为 0.5% 时, OPG (0.5%)/SMA/PBS 复合材料的结晶温度和熔融温度最高, 分别达到 78.71 °C 和 115.42 °C, 均高于纯 PBS。流变性能测试表明, OPG/SMA/PBS 复合材料的储能模量(G')、损耗模量(G'')和复数剪切黏度(η^*)均高于纯 PBS, 且 OPG (0.5%)/SMA/PBS 复合材料的 G' 、 G'' 、 η^* 最高。力学性能测试表明, OPG/SMA/PBS 复合材料的拉伸强度、拉伸弹性模量、弯曲强度、弯曲模量、缺口冲击强度均高于纯 PBS, 且随 OPG 添加量的增加而降低, 比较而言, OPG (0.5%)/SMA/PBS 复合材料的力学性能最佳, 其拉伸强度、拉伸弹性模量、弯曲强度、弯曲模量、缺口冲击强度较纯 PBS 分别提高了 44.09%、68.23%、21.47%、40.08%、29.91%。

关键词: 磷石膏; PBS; 结晶性能; 流变性能; 力学性能

中图分类号: TQ323.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)06-0208-06

Influence of phosphogypsum addition on properties of PBS composites

CHEN Siyao¹, ZHANG Hai¹, WU Shouming², ZHANG Xiaowei³, DONG Yanxin¹, WANG Ying¹, GAO Chengtao⁴, TIAN Qin³

(1. Anshun Branch of Guizhou Tobacco Company, Anshun 561000, China; 2. Guizhou Tobacco Industry Co., Ltd., Guiyang 550001, China;

3. School of Materials Science and Engineering, Guiyang University, Guiyang 550005, China;

4. Guizhou Institute of Materials Industry Technology, Guiyang 550014, China)

Abstract : To improve the performance of polybutylene succinate (PBS), OPG/SMA/PBS composites were prepared by melt processing with phosphogypsum (OPG) modified by γ -glycidoxypolytrimethoxysilane (KH560) as the reinforcing phase and styrene-maleic anhydride copolymer (SMA) as the compatibilizer. The effects of OPG addition on the thermal stability, crystallization behavior, rheological properties and mechanical properties of PBS composites were investigated. Thermogravimetric tests indicate that the addition of OPG was beneficial to increase the initial decomposition temperature of PBS composites. Differential scanning calorimetry tests show that the OPG/SMA/PBS composite with mass fraction of OPG of 0.5% OPG (0.5%)/SMA/PBS, has the highest crystallization temperature of 78.71 °C and melting temperature of 115.42 °C, which are higher than those of pure PBS. Rheological property tests indicate that the storage modulus (G'), loss modulus (G''), and complex shear viscosity (η^*) of OPG/SMA/PBS composites are all higher than those of pure PBS, and the OPG (0.5%)/SMA/PBS composite has the highest G' , G'' , and η^* . Mechanical property tests show that the tensile strength, tensile modulus, flexural strength, flexural modulus and notched impact strength of OPG/SMA/PBS composites are all higher than those of pure PBS, which decrease with the increase of OPG addition. Comparatively, the OPG (0.5%)/SMA/PBS composite has the best mechanical properties of, whose tensile strength, tensile modulus, flexural strength, flexural modulus and notched impact strength are respectively increased by 44.09%, 68.23%, 21.47%, 40.08% and 29.91% compared with pure PBS.

Keywords : phosphogypsum ; poly(butylene succinate) ; crystallization performance ; rheological performance ; mechanical performance

基金项目: 贵州省烟草公司安顺市公司科技项目(2024ASXM08), 贵州省科技支撑项目([2024]一般 048), 贵州省科技重大计划项目(黔科合重大专项字[2024]007), 贵阳学院 2023 年校级创新创业类培育项目(27)

通信作者: 张海, 农艺师, 主要研究方向为烟草生产及技术开发

收稿日期: 2026-03-05

引用格式: 陈思瑶, 张海, 吴寿明, 等. 磷石膏添加量对 PBS 复合材料性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(6): 208–213.

CHEN Siyao, ZHANG Hai, WU Shouming, et al. Influence of phosphogypsum addition on properties of PBS composites[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(6): 208–213.

聚丁二酸丁二醇酯(PBS)是一种全生物降解高分子材料,是丁二醇和丁二酸的缩聚产物^[1-5],因具有较优异的耐热性能、加工性能等^[6-7]而成为全生物降解高分子材料中应用前景较广的一种材料。但PBS使用中存在成本较高且综合力学性能低于通用塑料的问题,使其应用受限^[8-9]。通过熔融共混将无机粒子添加到PBS中是降低其成本并改善其综合力学性能的重要途径^[10-11]。无机粒子中的磷石膏(PG)因具有显著的成本优势且与聚合物有较强的亲和力^[12]已成功用于改善聚合物力学性能^[13-15],在改善PBS力学性能方面极具潜力。

为了获得综合性能较优的PBS复合材料,本文拟将经硅烷偶联剂KH560改性处理的PG(OPG)作为增强相添加到PBS中,同时根据课题组前期研究工作^[16]添加苯乙烯马来酸酐共聚物(SMA)增强OPG与PBS的界面相容性,制备OPG/SMA/PBS复合材料,通过分析改性前后样品的热稳定性能、结晶性能、流变性能和力学性能,研究OPG对PBS复合材料性能的影响,为扩大PBS的应用提供一定的依据。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PBS: TH803S, 新疆蓝山屯河科技股份有限公司;

PG: 贵州某厂废渣;

KH560: γ -缩水甘油醚氧丙基三甲氧基硅烷, 纯度99%, 广东科纳化学试剂有限公司;

苯乙烯-马来酸酐共聚物(SMA): 2025, 纯度98%, 深圳易普诺化工有限公司。

1.2 主要设备及仪器

转矩流变仪: Thermo Scientific HAAKE PolyLab, 美国赛默飞世尔科技有限公司;

微型注射机: M1400, 武汉启恩科技发展有限责任公司;

场发射扫描电子显微镜(FESEM): Quanta 250 FEG, 美国FEI公司;

热重(TG)分析仪: TG 209 F3 Tarsus, 德国耐驰(上海)机械仪器有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪: DSC 214 Polyma, 德国耐驰(上海)机械仪器有限公司;

偏光显微镜(POM): Leica DM2700P, 德国徕卡显微系统股份公司;

旋转流变仪: HAAKE MARS iQ, 德国HAAKE公司;

拉力试验机: Instron 6800, 美国英斯特朗有限公司。

1.3 样品制备

借助文献[17]的方法用KH560对PG进行改性处理制备OPG, 随后将OPG、干燥的PBS及SMA^[16]按照表1的配比均匀混合后在转矩流变仪中于140 °C、60 r/min下搅拌6 min后取样破碎, 随后在微型注塑机中注射10 s、合膜10 s、冷却10 s, 以制备标准测试样条。

表1 OPG/SMA/PBS共混物中各组分的质量分数

Tab. 1 Mass fraction of each component of OPG/SMA/PBS blend

Samples	%		
	OPG	SMA	PBS
PBS			100
OPG (0.5%)/SMA/PBS	0.5	2	97.5
OPG (1%)/SMA/PBS	1	2	97
OPG (3%)/SMA/PBS	3	2	95
OPG (5%)/SMA/PBS	5	2	93
OPG (7%)/SMA/PBS	7	2	91

1.4 性能测试

TG测试: 将装有约5 mg样品的氧化铝坩埚置于TG分析仪的炉膛内, 随后升温至650 °C, 测试在氮气下进行, 升温速率为10 °C/min。

DSC测试: 称取约10 mg的样品置于铝坩埚中, 在DSC仪中进行测试, 首先升温至160 °C恒温3 min随后降温至-40 °C后再次升温至160 °C, 测试中升、降温速率为10 °C/min, 且通入氮气保护, 测试结束后即可获得样品的结晶熔融曲线。

POM分析: 以10 °C/min的升温速率将热台升温至160 °C, 随后将样品放入热台加热5 min, 再以10 °C/min将温度降到80 °C恒温, 即可观察样品的结晶形貌。

流变性能测试: 将样品台加热至160 °C, 随后将测试频率从0.01 Hz升到100 Hz, 在应变为0.5%时测试样品的流变性能。

力学性能测试: 样品的拉伸强度根据GB/T 1040.3-2006测试, 试样尺寸为哑铃型, 测试速率为50 mm/min; 样品的缺口冲击强度根据GB/T 1043.1-2008测试, 试样尺寸为(80±2)mm×(10±0.2)mm×(4±0.2)mm, A型缺口, 缺口深度2 mm; 样品的弯曲强度根据GB/T 9341-2008测定, 试样尺寸为80 mm×10 mm×4 mm, 测试速率为2 mm/min。为确

保测试结果的可靠性,每组性能测试均选取 5 根样条测试。

2 结果与讨论

2.1 热稳定性能

图 1 为纯 PBS 及不同 OPG 添加量下制备的 OPG/SMA/PBS 复合材料的 TG 和 DTG 曲线,对应的初始分解温度($T_{5\%}$)和最大质量损失速率温度($T_{\max}$)列于表 2。从 TG 分析结果中可以看出,添加了 OPG 的 PBS 复合材料的 $T_{5\%}$ 均高于纯 PBS,且随着 OPG 添加量的增加,PBS 复合材料的 $T_{5\%}$ 逐步下降,在 OPG 质量分数为 0.5% 时,PBS 复合材料的 $T_{5\%}$ 最高,为 364.4 $^{\circ}\text{C}$ 。这可能是由于 OPG 的加入在 PBS 基体中增加了热量传输的阻隔层,较有效地降低了 OPG/SMA/PBS 复合材料的热量传递,从而提高了 PBS 复合材料的 $T_{5\%}$;但随着 OPG 添加量的增大,OPG 在 PBS 中极有可能团聚,有效阻隔层反而减少,使得 PBS 的 $T_{5\%}$ 降低。同时,OPG/SMA/PBS 复合材料的 $T_{\max}$ 均低于纯 PBS,且随着 OPG 添加量的增大,OPG/SMA/PBS 复合材料的 $T_{\max}$ 降低,这可能是 PBS 中的 SMA 分解温度较低所致,且随着 OPG 添加量的增大,其在 PBS 基体中的团聚体增多,不利于 OPG 对热量的阻隔,OPG/SMA/PBS 复合材料的 $T_{\max}$ 则表现为逐步降低。

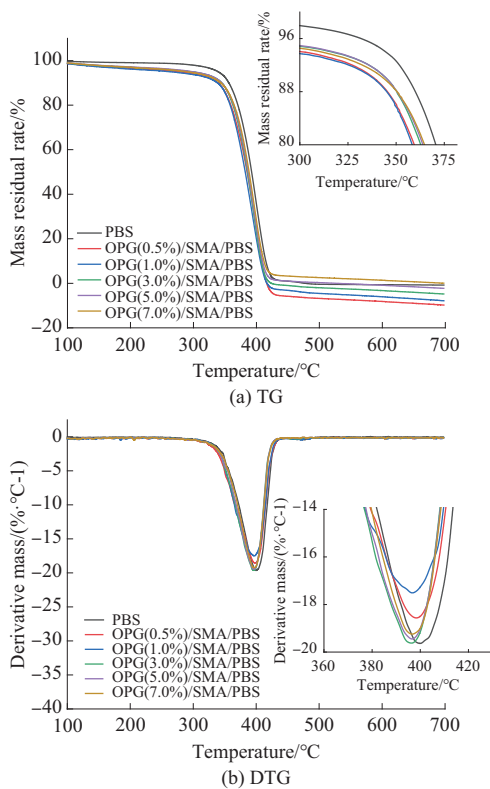


图 1 PBS 和 OPG/SMA/PBS 复合材料的 TG 和 DTG 曲线
Fig. 1 TG and DTG curves of PBS and OPG/SMA/PBS composites

表 2 PBS 和 OPG/SMA/PBS 复合材料的 $T_{5\%}$ 和 $T_{\max}$
Tab. 2 $T_{5\%}$ and $T_{\max}$ values of PBS and OPG/SMA/PBS composites $^{\circ}\text{C}$

Samples	$T_{5\%}$	$T_{\max}$
PBS	350.0	402.1
OPG(0.5%)/SMA/PBS	364.4	398.4
OPG(1%)/SMA/PBS	362.6	396.9
OPG(3%)/SMA/PBS	361.3	396.7
OPG(5%)/SMA/PBS	356.2	396.1
OPG(7%)/SMA/PBS	359.7	395.8

Notes: $T_{5\%}$ is temperature at 5% mass loss; $T_{\max}$ is temperature at maximum mass loss rate.

2.2 结晶性能

图 2 为纯 PBS 及不同 OPG 添加量下制备的 OPG/SMA/PBS 复合材料的结晶和熔融曲线,对应的结晶温度(T_c)和熔融温度(T_m)分别列于表 3。从图 2a 和表 3 可以看出,随着 OPG 添加量的增加,OPG/SMA/PBS 复合材料的 T_c 逐步降低,当 OPG 质量分数分别为 0.5%、1%、3% 时制备的 OPG/SMA/PBS 复合材料的 T_c 均高于纯 PBS,而当 OPG 质量分数分别为 5%、7% 时制备的 OPG/SMA/PBS 复合材料的 T_c 则低于纯 PBS。比较而言,当 OPG 质量分数为 0.5% 时制备的 OPG (0.5%)/SMA/PBS 复合材料的 T_c 最高,为 78.71 $^{\circ}\text{C}$ 。一方面,这可能由于 OPG 在 PBS 基体中充当了异质形核点,利于 PBS 在较高的温度开始结晶,使其 T_c 提高;另一方面,在 OPG 添加量较多

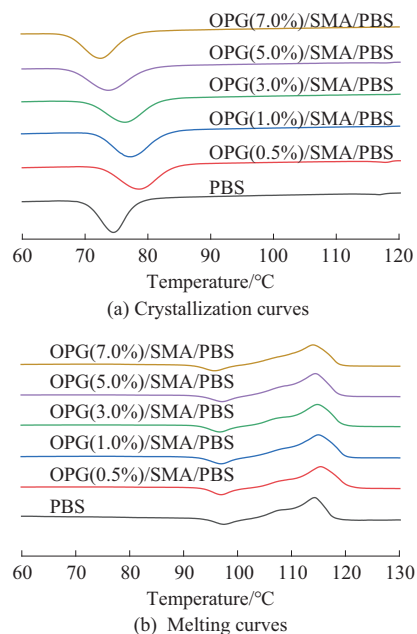


图 2 PBS 及不同 OPG 添加量下制备的 OPG/SMA/PBS 复合材料的 DSC 曲线

Fig. 2 DSC curves of pure PBS and OPG/SMA/PBS composites prepared under different OPG addition amounts

表3 PBS及不同OPG添加量下制备的OPG/SMA/PBS复合材料的 T_c 和 T_m

Tab. 3 T_c and T_m values of pure PBS and OPG/SMA/PBS composites prepared with different OPG addition amounts

Samples	T_c	T_m
PBS	74.54	114.29
OPG (0.5%)/SMA/PBS	78.71	115.42
OPG (1%)/SMA/PBS	77.43	114.98
OPG (3%)/SMA/PBS	76.21	114.80
OPG (5%)/SMA/PBS	73.69	114.46
OPG (7%)/SMA/PBS	72.51	114.01

Notes: T_c is crystallization temperature; T_m is melting temperature.

时,其对PBS分子链折叠的阻碍作用更显著,表现为OPG/SMA/PBS复合材料的 T_c 的降低。

从图2b和表3也可以看出,OPG/SMA/PBS复合材料的 T_m 大都高于纯PBS,且随着OPG添加量的增加,制备的OPG/SMA/PBS复合材料的 T_m 逐步降低,当OPG质量分数为0.5%时制备的OPG(0.5%)/SMA/PBS复合材料的 T_m 最高,为115.42 °C。这可能是OPG添加量较少时,其在PBS基体中易于均匀地分布分散,较有效地促进PBS的结晶,使PBS的结晶度增加,需要较高的温度才能使其熔融;而OPG添加量较多时,其对PBS规律排列的阻挡作用更显著,在外部热源的作用下,排列较松散的PBS分子链在较低的温度下就被破坏,使其表现为较低的 T_m 。

2.3 流变性能

图3为纯PBS及不同OPG添加量下制备的OPG/SMA/PBS复合材料的储能模量(G')、损耗模量(G'')、复数黏度(η^*)与角频率(ω)的关系曲线。从图3a可知,OPG/SMA/PBS复合材料的 G' 均高于纯PBS,这可能是OPG阻碍了PBS大分子链的运动,增大了熔体流动的阻力所致,比较而言,OPG/SMA/PBS复合材料在低频区的 G' 随着OPG添加量的增加而降低,当OPG质量分数为0.5%时制备的OPG/SMA/PBS复合材料的 G' 最高,这可能是过多OPG的添加使OPG在熔体中易于团聚,不利于OPG的均匀分布,对PBS大分子链的运动阻碍减小的缘故。在高频区,由于存在剪切变稀现象,不同OPG添加量下制备的OPG/SMA/PBS复合材料的 G' 差异较小。图3b表明,OPG/SMA/PBS复合材料的 G'' 均较纯PBS大,这是由于OPG/SMA/PBS复合材料内多了OPG的作用,使复合材料变形所需的损耗能增大所致,但OPG添加量过大时,因其易于团聚,使

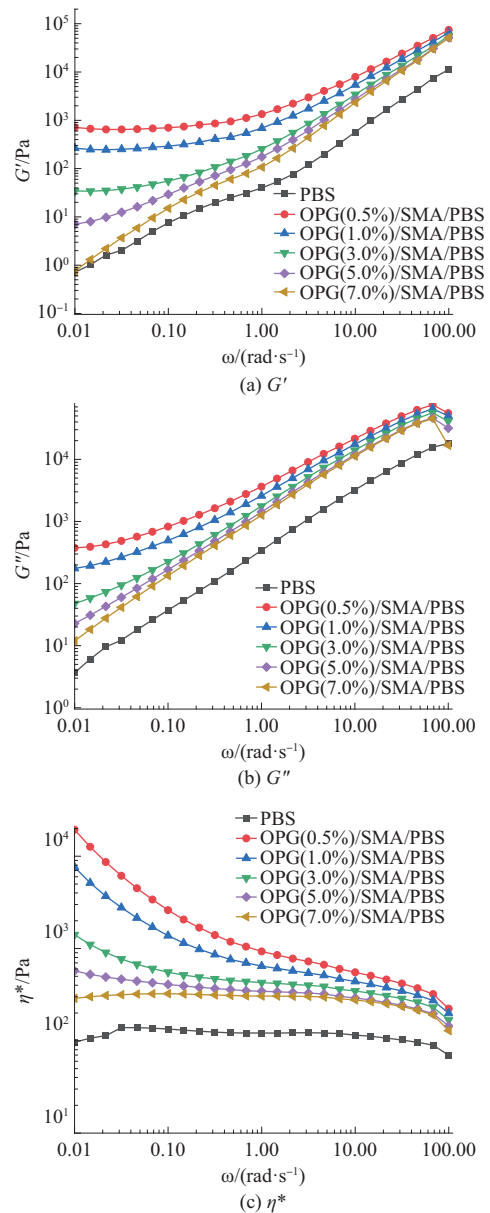


图3 PBS及OPG/SMA/PBS复合材料的 G' 、 G'' 、 η^* 与 ω 的关系曲线
Fig. 3 Relationship curves of G' , G'' , η^* , and ω of PBS and OPG/SMA/PBS composites

OPG/SMA/PBS复合材料形变所需的损耗能降低,比较而言,当OPG质量分数为0.5%时制备的OPG/SMA/PBS复合材料的 G'' 最高,高频区由于存在剪切变稀现象,不同OPG添加量下制备的OPG/SMA/PBS复合材料的 G'' 差异较小。从图3c可以看出,随着 ω 的增大,PBS及OPG/SMA/PBS复合材料的 η^* 降低,呈现出明显的“剪切变稀”现象,表明纯PBS及OPG/SMA/PBS复合材料均为典型的非牛顿流体。从图3c还可以看出,OPG/SMA/PBS复合材料的 η^* 均高于纯PBS,这可能是OPG的添加对PBS大分子链的运动有阻碍作用,增加了熔体的流动阻

力,使OPG/SMA/PBS复合材料熔体的流动减弱,从而表现为 η^* 增加,且在低频区OPG/SMA/PBS复合材料表现为随着OPG添加量的增加而降低,当OPG质量分数为0.5%时制备的OPG/SMA/PBS复合材料的 η^* 最高,在高频区由于存在剪切变稀现象,不同OPG添加量下制备的OPG/SMA/PBS复合材料间的 η^* 接近。

2.4 力学性能

图4为PBS及不同OPG添加量下制备的OPG/SMA/PBS复合材料的力学性能。图4a表明,OPG/SMA/PBS复合材料的拉伸强度和拉伸弹性模量均高于纯PBS,但随着OPG添加量的增多逐步降低,当OPG质量分数为0.5%时制备的OPG/SMA/PBS复合材料的拉伸强度和拉伸弹性模量最高,较纯PBS分别提高了44.09%和68.23%。图4b表明,OPG/SMA/PBS复合材料的弯曲强度和弯曲模量均高于纯PBS,且随OPG添加量的增大逐步降低,当OPG质量分数为0.5%时制备的OPG/SMA/PBS复合材料的弯曲强度和弯曲模量最高,较纯PBS分别提高了21.47%和40.08%,与图4a的规律类似。这可能是由于少量OPG在PBS基体中较好地分布分散,有利于PBS结晶,使其结晶度提高,制备的PBS复合材料表现出较优异的拉伸强度、拉伸弹性模量、弯曲强度和弯曲模量,而过多的OPG在PBS基体中易于聚集,反而不利于改善OPG的拉伸强度、拉伸弹性模量、弯曲强度和弯曲模量。图4c表明,OPG/SMA/PBS复合材料的缺口冲击强度均高于纯PBS,且随OPG添加量的增加,OPG/SMA/PBS复合材料的冲击强度呈降低趋势,当OPG质量分数为0.5%时制备的OPG/SMA/PBS复合材料的缺口冲击强度最高,较纯PBS提高了29.91%。这可能是由于较少的OPG添加有利于其在PBS基体中均匀地分布分散,这些较均匀分布分散的OPG在受到外力冲击时不仅自身会存在“脆-韧”转变,而且还可能会诱发四周基体产生银纹,耗散大量的冲击能,从而阻止裂纹的扩展,对基体起到了有效的增韧作用,而过多OPG的添加则因OPG自身的团聚使PBS基体中应力集中区域较多反而恶化了PBS基体的抗冲击性能。

3 结论

(1)添加适量的OPG有利于提高PBS复合材料的结晶性能,当OPG添加量为0.5%时制备的OPG/

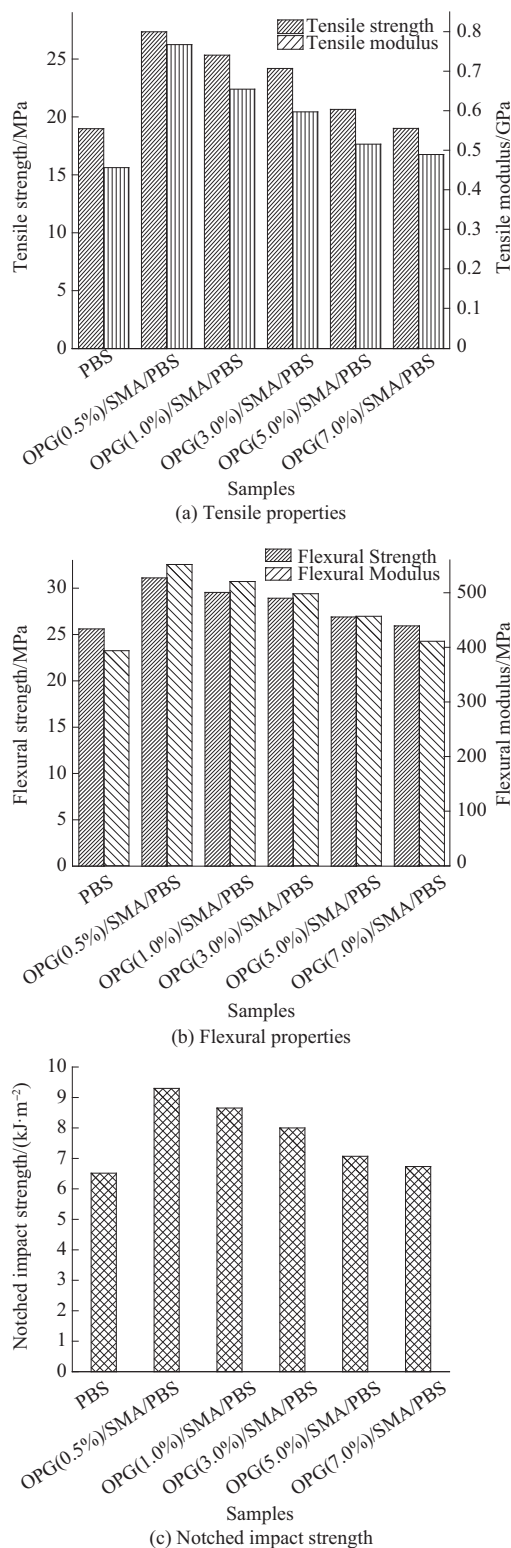


图4 PBS及OPG/SMA/PBS复合材料的力学性能

Fig. 4 Mechanical properties of PBS and OPG/SMA/PBS composites

SMA/PBS复合材料的 T_c 和 T_m 最高,其中 T_c 为78.71℃, T_m 为115.42℃,且OPG的添加有利于提高PBS复合材料的初始分解温度。

(2)PBS及OPG/SMA/PBS复合材料均为典型的

非牛顿流体,OPG/SMA/PBS复合材料的 G' 、 G'' 和 η^* 均高于纯PBS,在低频区随着OPG添加量增大,OPG/SMA/PBS复合材料的 G' 、 G'' 和 η^* 降低,当OPG添加量为0.5%时制备的OPG/SMA/PBS复合材料的 G' 、 G'' 、 η^* 最高,在高频区,由于体系的“剪切变稀”,OPG/SMA/PBS复合材料的 G' 、 G'' 和 η^* 接近。

(3)OPG/SMA/PBS复合材料的拉伸强度、拉伸弹性模量、弯曲强度、弯曲模量和冲击强度均高于纯PBS,且随OPG添加量的增多逐渐降低,当OPG质量分数为0.5%时制备的OPG/SMA/PBS复合材料的拉伸强度、拉伸弹性模量、弯曲强度、弯曲模量和冲击强度最高,较纯PBS分别提高了44.09%、68.23%、21.47%、40.08%、29.91%。

参考文献

- [1] SAMIR A, ASHOUR F H, ABDEL HAKIM A A, et al. Recent advances in biodegradable polymers for sustainable applications[J]. *npj Materials Degradation*, 2022, 6. DOI: 10.1038/s41529-022-00277-7.
- [2] 田琴,曹蒙,谢本亮,等.蒙脱土改性剂结构对PBS复合材料性能的影响[J].*工程塑料应用*,2022(3):141-146.
TIAN Qin, CAO Meng, XIE Benliang, et al. Effects of modifier structure of montmorillonite on performance of PBS composite[J]. *Engineering Plastics Application*, 2022(3):141-146.
- [3] 尉彝,丁波娜,张须臻,等.聚丁二酸丁二酯切片的储存稳定性[J].*工程塑料应用*,2024,52(7):131-138.
WEI Ben, DING Bona, ZHANG Xuzhen, et al. Storage stability of polybutylene succinate chips[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(7):131-138.
- [4] PADERMSHOKE A, AN Y J, KAJIWARA T, et al. Photooxidation-induced conformational changes and degradation behaviors of poly (butylene succinate) and poly(butylene succinate-co-adipate) [J]. *Journal of Polymer Science*, 2024, 62(16):3 794-3 807.
- [5] PLATNIEKS O, GAIDUKOV S, KUMAR THAKUR V, et al. Bio-based poly (butylene succinate): Recent progress, challenges and future opportunities[J]. *European Polymer Journal*, 2021, 161. DOI:10.1016/j.eurpolymj.2021.110855.
- [6] BARLETTA M, AVERSA C, AYYOUB M, et al. Poly(butylene succinate)(PBS): Materials, processing, and industrial applications [J]. *Progress in Polymer Science*, 2022, 132. DOI: 10.1016/j.prog-polymsci.2022.101579.
- [7] 李昆育,任亮,辛丽美,等.生物可降解PBS复合材料的制备及性能[J].*工程塑料应用*,2021,49(9):50-54.
LI Kunyu, REN Liang, XIN Limei, et al. Preparation and performance of biodegradable PBS composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(9):50-54.
- [8] MTIBE A, MUNIYASAMY S, MOKHENA T C, et al. Recent insight into the biomedical applications of polybutylene succinate and polybutylene succinate-based materials[J]. *Express Polymer Letters*, 2023, 17(1):2-28.
- [9] 陈嘉瑶,高湛,叶海木.伸直链晶体增强聚丁二酸丁二醇酯结晶与力学性能的研究[J].*塑料科技*,2025,53(9):15-21.
CHEN Jiayao, GAO Zhan, YE Haimu. Study on crystallization and mechanical properties of polybutylene succinate enhanced by extended-chain crystals[J]. *Plastics Science and Technology*, 2025, 53(9):15-21.
- [10] RAFIQAH S A, KHALINA A, HARMAEN A S, et al. A review on properties and application of bio-based poly(butylene succinate)[J]. *Polymers*, 2021, 13(9). DOI: 10.3390/polym13091436.
- [11] KHALEGHI R, DADASHI P, BABAEI A. Investigating the effect of GO-ZnO nano-hybrid on the mechanical, rheological, and degradation performance of poly (butylene succinate) [J]. *Polymer Composites*, 2025, 46(1):659-678.
- [12] WU F H, HE M J, QU G F, et al. Synergistic densification treatment technology of phosphogypsum and aluminum ash[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 173:847-858.
- [13] ZHANG J, WEI C, RAN J Y, et al. Properties of polymer composite with large dosage of phosphogypsum and it's application in pipeline[J]. *Polymer Testing*, 2022, 116. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2022.107742.
- [14] SUN M, SUN Q, ZHANG J, et al. Surface modification of phosphogypsum and application in polyolefin composites[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(44): 66 177 - 66 190.
- [15] 雷阳,刘应红,吴良喜,等.磷石膏/聚乙烯复合材料的制备及性能研究[J].*塑料工业*,2022,50(3):49-56.
LEI Yang, LIU Yinghong, WU Liangxi, et al. Performance and study on the preparation of phosphogypsum/polyethylene composite[J]. *China Plastics Industry*, 2022, 50(3):49-56.
- [16] 田琴,孙荣荣,王壹,等.苯乙烯马来酸酐共聚物对PBS复合材料性能的影响[J].*工程塑料应用*,2023,51(9):40-45.
TIAN Qin, SUN Rongrong, WANG Yi, et al. Effect of styrene-maleic anhydride graft copolymer on properties of PBS composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(9):40-45.
- [17] 陈陵翔,付海,龚维,等.硅烷偶联剂改性磷石膏及其对聚碳酸酯/丙烯酸-丁二烯-苯乙烯力学性能的影响[J].*化学世界*,2020,61(12):833-840.
CHEN Lingxiang, FU Hai, GONG Wei, et al. Modification of phosphogypsum by silane coupling agent and its effect on mechanical properties of polycarbonate/acrylonitrile butadiene styrene[J]. *Chemical World*, 2020, 61(12):833-840.