

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.03.007

改性无水磷石膏/水性聚氨酯复合材料制备与性能

陈靖瑀¹, 刘德钰¹, 余书发², 明诗怡¹, 黄冰月¹, 黄伟江¹, 王奎¹, 严伟¹

(1. 贵阳学院材料科学与工程学院, 贵阳 550005; 2. 贵州华云汽车饰件制造有限公司, 贵阳 550014)

摘要: 采用硬脂酸湿法改性无水磷石膏, 将改性产物(mPG)与水性聚氨酯(WPU)混合制备 mPG/WPU 复合材料, 并对复合材料的微观形貌、力学性能、流变性能及阻燃性能进行测试与表征。结果表明, 硬脂酸可成功对无水磷石膏进行表面改性。复合材料中 mPG 添加量为 WPU 质量的 7% 时, mPG 在复合材料断面出现局部团聚现象, 但与 WPU 基体界面融合较好, 无脱黏间隙; 随着 mPG 含量进一步增加, 其团聚现象加剧且与基体发生脱黏, 导致复合材料力学性能下降。另外, 随着 mPG 含量的提高, 复合材料的残炭率逐渐上升, 700 °C 残炭率可达 19.92%。流变性能结果表明 mPG/WPU 复合材料的储能模量、损耗模量、复数黏度都优于纯 WPU; 添加 WPU 质量 7% 的 mPG 时, 复合材料的拉伸强度达到最优; 垂直燃烧测试与微型量热测试结果证实, mPG 的加入可显著提升 WPU 的阻燃性能, 添加 WPU 质量 10% 的 mPG 时, 复合材料的热释放速率峰值达到最小值 231.0 W/g, 垂直燃烧等级为 V-0 级、极限氧指数为 27.8%。

关键词: 无水磷石膏; 硬脂酸; 水性聚氨酯; 阻燃性能; 力学性能

中图分类号: TQ323.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)03-0056-07

Preparation and properties of modified anhydrous phosphogypsum/waterborne polyurethane composites

CHEN Jingyu¹, LIU Deyu¹, YU Shufa², MING Shiyi¹, HUNG Bingyue¹, HUNG Weijiang¹, WANG Kui¹, YAN Wei¹

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

2. Guizhou Huayun Auto Parts Manufacturing Co., Ltd., Guiyang 550014, China)

Abstract: Anhydrous phosphogypsum was modified by stearic acid via a wet method and then mixed with waterborne polyurethane (WPU) to prepare mPG/WPU composites. The microstructure, mechanical properties, rheological behavior, and flame retardancy of the composites were tested and characterized. Results show that stearic acid can successfully modify anhydrous phosphogypsum via surface treatment. When the amount of mPG in the composite material is 7% of the mass of WPU, local agglomeration is observed on the fracture surface of the composite. However, the mPG integrates well with the WPU matrix without noticeable debonding gaps. With a further increase of the mPG content, the agglomeration becomes more severe and debonding from the matrix occurs, leading to a decline in the mechanical properties of the composites. In addition, the char residue rate of the composites gradually increases with increasing mPG content, reaching up to 19.92% at 700 °C. Rheological results show that the storage modulus, loss modulus, and complex viscosity of the mPG/WPU composites are superior to those of pure WPU. The mechanical property tests show that the tensile strength reaches its optimum value when adding 7% of mPG to the WPU quality. Vertical burning tests and microcalorimetry tests confirm that the addition of mPG significantly improves the flame retardancy of WPU. When adding 10% of mPG to the WPU quality, the peak heat release rate (pHRR) reaches a minimum value of 231.0 W/g. The vertical combustion grade was V-0 and the limit oxygen index was 27.8%.

Keywords: anhydrous phosphogypsum ; stearic acid ; waterborne polyurethane ; flame retardancy ; mechanical property

磷石膏(PG)是工业上湿法磷酸产生的一种固体废弃物, 主要成分是二水硫酸钙($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), 其

中还含有大量重金属杂质^[1], 全球年产出量超过 2.8 亿吨, 我国年产量 PG 产生量超过 1 亿吨。其中只有

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目(黔科合中引地[2026]005), 贵州省科技厅 2025 年“科技副职”项目

通信作者: 严伟, 教授, 研究方向为高分子材料改性

收稿日期: 2025-12-12

引用格式: 陈靖瑀, 刘德钰, 余书发, 等. 改性无水磷石膏/水性聚氨酯复合材料制备与性能[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(3): 56-62.

CHEN Jingyu, LIU Deyu, YU Shufa, et al. Preparation and properties of modified anhydrous phosphogypsum/waterborne polyurethane composites[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(3): 56-62.

14%被重新利用,其利用率较低。另外,对于生产磷酸的企业,大量PG堆放于露天空地,对企业及生态环境产生不利影响,同时PG的堆放占用大量土地资源,且堆存过程中雨水淋溶会导致杂质渗入土壤和地下水,造成环境污染。因此,发掘PG的潜在价值并高附加值化,对PG资源的利用具有重要意义^[2-4]。目前PG主要应用于建材和水泥,研究者为拓展PG的应用范围,将PG作为填料应用到聚合物中已成为PG高值化利用研究的热点^[5-8]。

水性聚氨酯(WPU)是一种以水为分散介质,其结构主要由异氰酸酯(如二苯基甲烷二异氰酸酯、甲苯二异氰酸酯)与多元醇(如聚醚多元醇、聚酯多元醇)经聚合反应生成的聚氨酯预聚体^[9],再通过亲水改性(引入羧基、羟基等亲水基团)或添加乳化剂,使聚氨酯粒子稳定分散于水中,形成乳白色或透明液体。WPU保留了聚氨酯的弹性、耐候性、附着力等核心特性,同时因无或低挥发性有机溶剂,具有低污染,安全无毒的优势。其核心应用领域有涂料行业^[10],胶黏剂行业^[11],皮革^[12]与纺织工业^[13]及油墨^[14]与其他领域。但由于WPU易燃且力学性能欠佳,限制了其在以上领域的广泛应用。

本文主要采用硬脂酸湿法改性无水PG,以此作为填料添加至WPU中,增强力学性能、阻燃性能、热稳定性等。同时笔者探究了不同改性无水PG添加量下复合材料的性能与结构,为提高PG的高值化利用提供理论支撑。

1 实验部分

1.1 主要原材料

无水PG:500目(约30 μm),贵州鸿海石膏粉产业有限公司;

硬脂酸:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

3-氨基丙基三乙氧基硅烷(KH-550):纯度≥97%,上海麦克林生化科技股份有限公司;

无水乙醇:纯度≥98%,重庆川东化学试剂有限公司;

WPU:F402/1926,深圳市吉田化工有限公司;

去离子水:实验室自制。

1.2 主要仪器及设备

热重(TG)分析仪:219 F3,德国Netzsch仪器有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪:Nicolet IS50,美

国赛默飞世尔公司;

X射线衍射(XRD)仪:XRD-6100,日本岛津公司;

X射线荧光光谱(XRF)仪:Axios FAST,荷兰Panalytical公司;

微型量热仪:MCC-3,美国DEATAK公司;

转矩流变仪:HAAKE MARS III,美国赛默飞世尔公司;

万能试验机:INSTRON3365,美国英斯特朗有限公司;

水平垂直燃烧测试仪:CZF-3,南京江宁分析仪器厂;

扫描电子显微镜(SEM):Quanta 250 FEG,配备Apollo 40 SDD能量色散X射线谱(EDS)仪,美国FEI公司;

真空干燥箱,DZF-605,上海一恒科学仪器有限公司;

极限氧指数(LOI)仪:HC-2,南京江宁分析仪器有限公司。

1.3 试样制备

改性无水PG(mPG)的制备:将无水PG取出用去离子水反复洗涤去除杂质,抽滤后在50℃下干燥24 h,得到除杂无水PG;将0.2 g硬脂酸溶于20 mL无水乙醇室温搅拌15 min,随后称取10 g洗涤后的无水PG加入上述溶液,超声分散20 min,静置5 min,在60℃下恒温搅拌20 min,随后抽滤、50℃下干燥24 h,得到mPG。

mPG/WPU复合材料的制备:按照表1中配方,称取硅烷偶联剂KH-550倒入按一定配比混合的无水乙醇和去离子水中,随后加入WPU,在室温下搅拌10~15 min;然后加入mPG,先超声20 min,再继续搅拌15 min,随后浇铸于模具上,在室温下干燥36 h取出,最终得到mPG/WPU复合材料。

表1 mPG/WPU复合材料配方

Tab. 1 mPG/WPU composites formulation

Samples	WPU	mPG	KH550	g
WPU	40	0	0	
1% _{mPG} /WPU	40	0.4	0.03	
3% _{mPG} /WPU	40	1.2	0.06	
5% _{mPG} /WPU	40	2.0	0.07	
7% _{mPG} /WPU	40	2.8	0.09	
10% _{mPG} /WPU	40	4.0	0.12	

1.4 测试与表征

TG分析:样品质量为5~10 mg,在N₂气氛下,以10 K/min的升温速率从20 °C升温至750 °C,记录样品的TG曲线。

FTIR分析:扫描范围为400~4 000 cm⁻¹,分辨率为4 cm⁻¹,扫描16次后得到FTIR谱图。

XRD表征:工作电压为60 kV,电流为40 mA,扫描步宽为0.02°,扫描范围衍射角2θ为0°~80°。

XRF分析:采用顺序扫描方式对PG粉末进行元素分析。仪器分析范围为O(8)~U(92)、含量检测范围为10⁻⁶~100%。

SEM表征:使用SEM在20 kV电压的高真空条件下,观察复合样条材料断面的微观结构。利用EDS分析复合材料的成分和元素分布。

微型量热仪测试:取少量(1~50 mg)样品,测试复合材料燃烧时释放热量的速率及总热释放量。

流变性能表征:采用转矩流变仪分析不同复合材料的流变行为。测试平板直径2.5 mm,平板间隙1.0 mm,测试温度130 °C;频率扫描时,频率为0.01~600 rad/s,温度扫描范围为130~200 °C。

LOI测试:采用LOI仪按GB/T 2406.2-2009测试,样条尺寸为80 mm×10 mm×4 mm。

垂直燃烧测试:采用水平垂直燃烧测试仪按GB/T 2408-2021进行测试,样品尺寸为127 mm×12.7 mm×1.5 mm。

拉伸性能测试:参照GB/T 1040-2022,拉伸速率为50 mm/min。样品尺寸为135 mm×10 mm×4 mm,标距为50 mm。

2 结果与讨论

2.1 硬脂酸改性无水PG的结构表征

图1为无水PG的结构表征。由图1可知,无水PG呈棒状,长度为5~10 μm。其吸收强度较明显的特征峰位于2θ=25.4°和2θ=31.3°。无水PG的化学组成见表2,可以看出SO₃和CaO为其主要成分。图2为硬脂酸、无水PG、mPG的FTIR谱图。PG的谱图中3 439 cm⁻¹处的峰对应于—OH的伸缩振动峰,1 118 cm⁻¹处为SO₄²⁻的不对称伸缩振动峰,680 cm⁻¹和601 cm⁻¹处分别为SO₄²⁻的面外和面内弯曲振动峰。硬脂酸的谱图中1 700 cm⁻¹处为C=O伸缩振

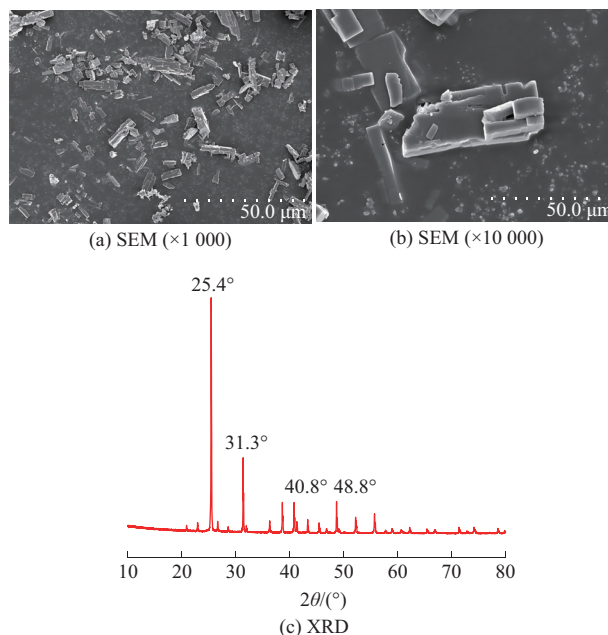


图1 PG的微观形貌表征图

Fig. 1 Microscopic morphology characterization diagram of PG

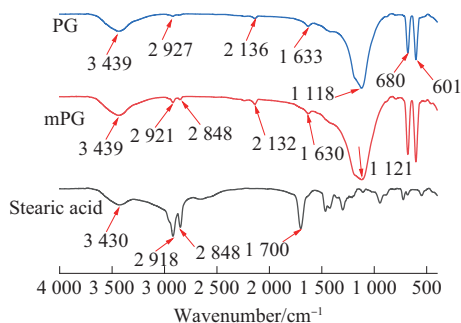


图2 硬脂酸、Anhydrous PG、mPG的FTIR谱图

Fig. 2 FTIR spectra of stearic acid, Anhydrous PG and mPG

动,2 918 cm⁻¹和2 848 cm⁻¹处的峰分别对应烷基—CH₂、—CH₃官能团特征。在mPG的谱图中,2 918 cm⁻¹和2 848 cm⁻¹处出现与硬脂酸重合的烷基伸缩振动峰,说明硬脂酸的长碳链(—CH₂₋₁₆—CH₃)成功改性到无水PG表面;同时在1 700 cm⁻¹处,硬脂酸(C=O伸缩峰)在mPG中几乎消失,这是因为羧基(—COOH)与无水PG表面的Ca²⁺发生成盐反应(—COOH→—COO⁻Ca²⁺)导致C=O伸缩振动的峰位迁移、强度显著减小^[15]。通过基于K系特征X射线的EDS分析得出,Ca、S、O等源自PG基体的元素信号强度更高、分布更为集中(图3)。综上,硬脂酸的羧基与无水PG表面Ca²⁺通过化学作用成盐,物理结构上,长烷基链向外伸展,成功改性无水PG^[16]。

表2 无水PG的化学组分(质量分数)

Tab. 2 Chemical composition of anhydrous PG (mass fraction)

Composition	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	SrO	BaO
Mass fraction/%	0.055	0.145	3.198	0.067	60.013	0.023	36.023	0.078	0.016	0.077	0.053	0.231

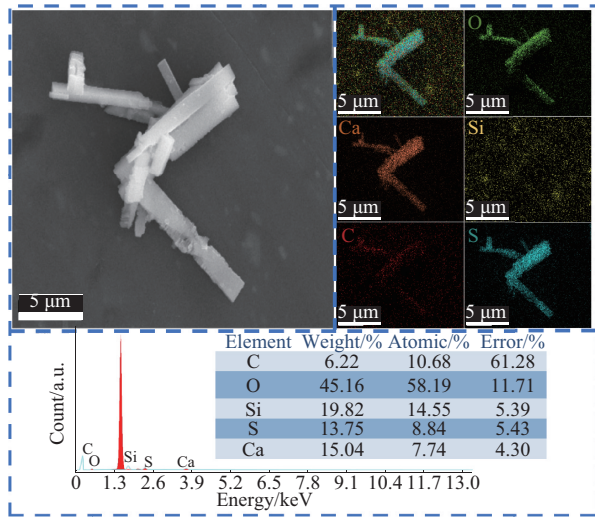


图3 mPG的元素分析图

Fig. 3 Elemental analysis of mPG

2.2 WPU 复合材料力学性能

图4为WPU复合材料不同含量mPG的应力-应变曲线,力学性能数据见表3,结合图表可看出复合材料的拉伸强度呈现先增后降的趋势。当mPG添加量为WPU质量的7%时,mPG/WPU复合材料的拉伸强度和断裂伸长率达到峰值,分别为5.8 MPa和580%。随后WPU复合材料拉伸强度呈下降趋势

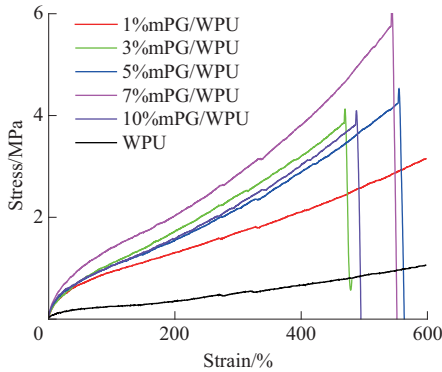


图4 WPU 和mPG/WPU复合材料的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of WPU and mPG/WPU composites

表3 WPU 和mPG/WPU 复合材料力学性能数据

Tab. 3 Mechanical properties data of WPU and mPG/WPU composites

Samples	Tensile strength/MPa	Elongation at break/%	Tensile modulus/GPa
WPU	0.8±0.1	—	0.2±0.2
1% mPG/WPU	3.0±0.2	—	0.5±0.1
3% mPG/WPU	4.0±0.1	500±50	0.6±0.2
5% mPG/WPU	4.2±0.2	550±57	0.7±0.3
7% mPG/WPU	5.8±0.3	580±56	0.9±0.4
10% mPG/WPU	4.5±0.4	520±60	0.8±0.2

Note: samples of WPU and 1% mPG/WPU were stretched to the maximum stroke of the testing machine without fracture, thus, no valid elongation at break data was obtained.

势。mPG/WPU 复合材料拉伸强度下降的原因是随着mPG含量继续增加,WPU复合材料中的mPG出现堆积团聚现象,界面结合变差,导致应力集中从而降低拉伸强度。

2.3 WPU 复合材料微观结构

图5为WPU和不同mPG含量的mPG/WPU复合材料断面的SEM照片。图5a和图5b为纯WPU的形貌,其表面比较光滑。如图5c至图5f所示,1% mPG/WPU与3% mPG/WPU复合材料中mPG分散均匀无团聚。图5g和图5h中,mPG出现局部团聚现象,但与基体界面融合较好,无脱黏间隙,界面的高度融合实现了增强效果。图5i和图5j中,mPG

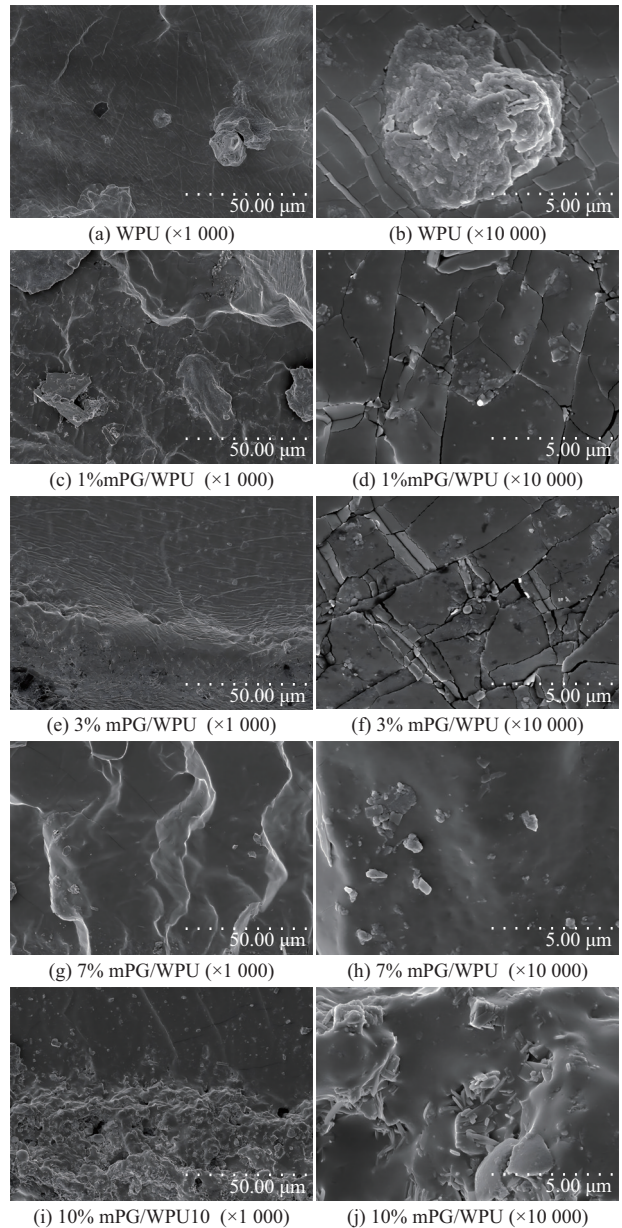


图5 WPU 和mPG/WPU复合材料的微观SEM照片

Fig. 5 SEM images of WPU and mPG/WPU composites

出现团聚,与基体脱黏,也导致WPU复合材料力学性能表现变差。

2.4 WPU复合材料的流变行为

图6为不同mPG含量对复合材料流变行为的影响,从图6a可看出,复合材料的复数黏度(η^*)随mPG含量增加总体呈增大趋势,这是由于改性剂填料PG与WPU分子链形成相互作用网络,填料浓度越高,分子链运动阻力越大,黏性越强,其中以10%*mPG*/WPU复合材料 η^* 提升最显著。如图6b所示,WPU的储能模量(G')总体上最低,说明纯体系分子链弹性回复能力弱,缺乏稳定的弹性网络支

撑。而改性样品的 G' 总体呈增加的趋势,10%*mPG*/WPU达到最高,这是因为mPG的加入在WPU基体中形成“物理交联点”,弹性储能能力增强。图6c所示,WPU复合材料损耗模量(G'')随mPG含量增加总体呈增加趋势,10%*mPG*/WPU最大,因为剪切过程中内摩擦增大,导致黏性损耗显著提升,填料浓度更高时,内摩擦进一步加剧,因而 G'' 达到最大。

2.5 WPU复合材料TG分析

图7为WPU及mPG/WPU复合材料TG曲线和DTG曲线,表4是对应的热性能数据。如图7a和表4所示,与纯WPU(初始分解温度237.2℃,残炭率

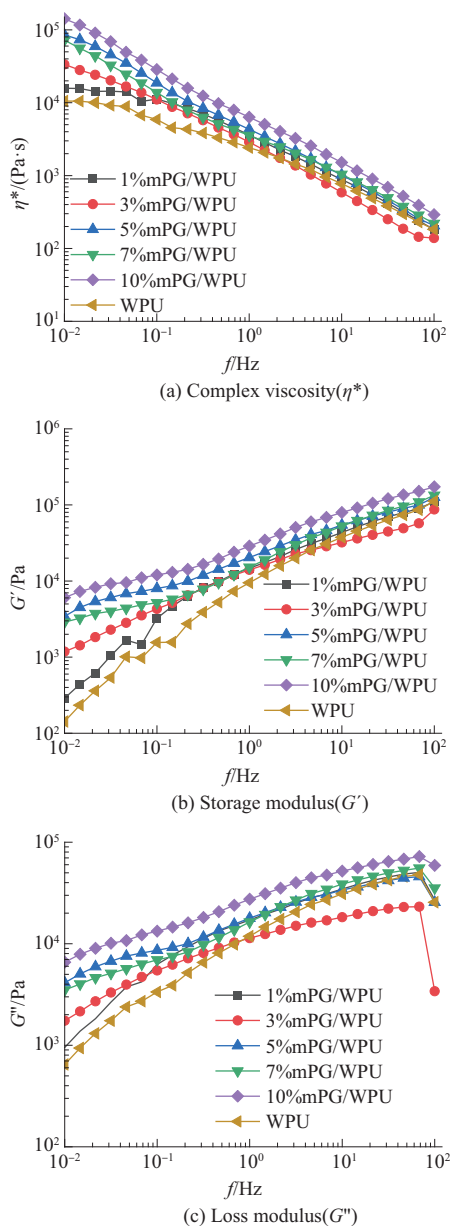


图6 WPU和mPG/WPU复合材料的流变行为

Fig. 6 Rheological behaviors of WPU and mPG/WPU composites

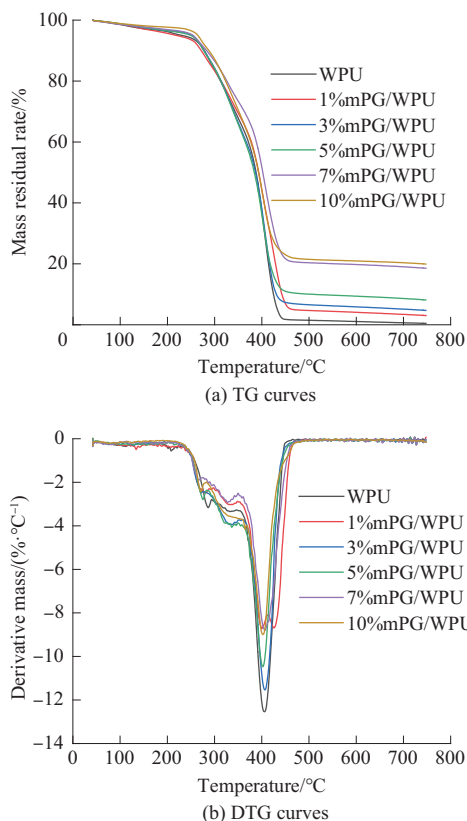


图7 WPU和mPG/WPU复合材料的TG分析

Fig. 7 TG analysis of WPU and mPG/WPU composites

表4 WPU和mPG/WPU复合材料热性能参数

Tab. 4 Thermal performance parameters of WPU and mPG/WPU composites

Samples	CY/%	$T_{5\%}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{max}}/^{\circ}\text{C}$
WPU	0.46	237.2	405.1
1% <i>mPG</i> /WPU	3.05	248.8	401.4
3% <i>mPG</i> /WPU	4.72	250.9	407.9
5% <i>mPG</i> /WPU	8.15	252.4	401.9
7% <i>mPG</i> /WPU	18.55	255.1	406.6
10% <i>mPG</i> /WPU	19.92	258.9	402.4

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

为0.46%)相比,所有复合材料质量损失5%温度($T_{5\%}$)与残炭率均随mPG含量的增加而提升,添加WPU质量10%的mPG时达到最大(258.9 °C, 19.92%)。纯WPU的DTG曲线呈现出一个宽而高的放热峰,说明其分解过程剧烈且集中;所有mPG/WPU复合材料的DTG峰形明显变窄,峰值显著降低,且最大失重速率对应的温度总体上向高温区移动。这是由于均匀分散的mPG填料在聚合物基体中构建物理屏障,有效阻碍了热量传递与降解产物的挥发,延缓了WPU分子链的热降解进程。mPG填料的引入形成了物理屏障,提升了材料的热稳定性与成炭能力。

2.6 复合材料的阻燃性能

图8a和图8b分别为复合材料的热释放速率(HRR)曲线和总热释放量(THR)曲线,复合材料的阻燃数据见表5。如图8a所示,mPG/WPU复合材料的HRR峰值随mPG添加量增加呈梯度下降,从添加WPU质量1%的mPG时的297.3 W/g显著降至10%时的231.0 W/g,曲线峰宽化,上升的斜率减小,有效抑制了热量释放。图8b的THR曲线所示,WPU的THR为29.8 kJ/g,表明燃烧过程中全程释放累积热量高,复合材料的THR随mPG含量增加而

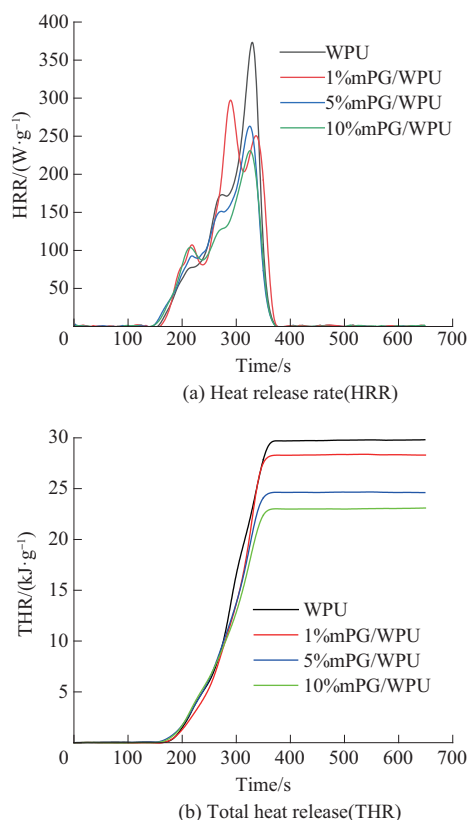


图8 WPU和mPG/WPU复合材料的HRR和THR曲线
Fig. 8 HRR and THR curves of WPU and mPG/WPU composites

表5 WPU和mPG/WPU复合材料的阻燃性能
Tab. 5 Flame retardant properties of WPU and mPG/WPU composites

Samples	PHRR($W \cdot g^{-1}$)	THR($kJ \cdot g^{-1}$)	UL 94 rating	LOI/%
WPU	373.2	29.8	V-2	18.9
1% mPG/WPU	297.3	28.3	V-1	19.1
5% mPG/WPU	263.1	24.6	V-0	22.4
10% mPG/WPU	231.0	23.1	V-0	27.8

Notes: PHRR is peak heat release rate; THR is total heat release; LOI is limiting oxygen index.

显著降低,其中以质量分数10% mPG/WPU最为显著,为23.1 kJ/g,降幅22.5%。原因是mPG的加入表明mPG/WPU复合材料炭层阻隔使热量难以向内部传递,被迫在表面炭层聚集,内部的材料被热阻隔未充分燃烧。另外,由表5可知,随mPG添加量的增加,复合材料的LOI逐渐提高,mPG添加量达到WPU质量的5%及以上时,阻燃等级为V-0级。图9为垂直燃烧时的数码照片,在WPU在燃烧过程中,滴落时间为5.2 s,而mPG添加量为WPU质量的1%、5%、10%时,滴落时间分别为10.1、12.97、14.68 s,说明mPG延缓了WPU复合材料的滴落,使材料的阻燃性能得到提升。当mPG添加量为WPU质量的10%时,复合材料的LOI为27.8%。

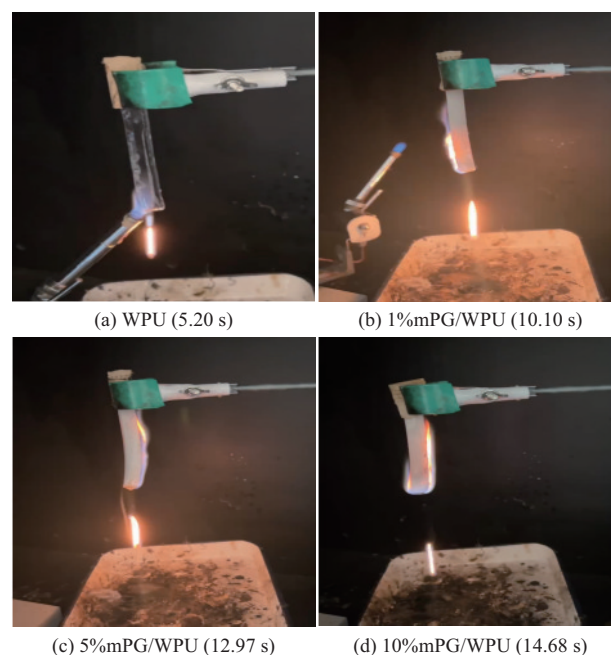


图9 mPG/WPU复合材料垂直燃烧照片

Fig. 9 Vertical burning photo of mPG/WPU composites

3 结论

(1)通过FTIR谱及mPG的元素分析,证明硬脂酸成功地改性无水PG。mPG作为填料加入到WPU中显著提升了其力学性能,添加量为WPU质量的

7%时的性能最优。

(2)通过SEM观察WPU复合材料的断面可知,WPU质量7%的mPG的添加,改善了mPG与WPU的界面结合,与拉伸强度结果相对应。

(3)在流变测试过程中,发现随着mPG的含量不断增加,其复合黏度、储能模量和损耗模量较于WPU总体上得到很大提升,说明mPG的加入可显著改善WPU的流变性能。

(4)WPU复合材料在mPG添加量为WPU质量的10%时,热释放速率峰值达到最低,为231.0 W/g。垂直燃烧等级为V-0级、LOI为27.8%。同时,随mPG含量的增加,WPU复合材料的残炭率也逐步上升,700℃残炭率最高为19.92%,说明mPG的加入能明显提升WPU的阻燃性能。

参考文献

- [1] 白春华,王金宝,李光辉,等.我国磷石膏污染特性、利用及环境管理研究[J].环境科学研究,2025,38(3):632-641.
BAI Chunhua, WANG Jinbao, LI Guanghui, et al. Research on the pollution characteristics, utilization and environmental management of phosphogypsum in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2025, 38(3):632-641.
- [2] 祝国亮.磷石膏的综合利用及其在环境领域的应用研究进展[J].生态产业科学与磷氟工程,2024,39(7):65-70.
ZHU Guoliang. Research progress on comprehensive utilization of phosphogypsum and its application in environment field[J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2024, 39(7): 65-70.
- [3] 刘伟,李学锋,李晓.磷石膏利用现状及其应用实践[J].生态产业科学与磷氟工程,2024,39(6):64-67.
LIU Wei, LI Xuefeng, LI Xiao. Present status and application practice of phosphogypsum utilization[J]. Eco-industry Science & Phosphorus Fluorine Engineering, 2024, 39(6):64-67.
- [4] 陈汉昭,李德高,黄迪,等.磷石膏综合利用的研究进展[J].云南化工,2024,51(9):11-15.
CHEN Hanzhao, LI Degao, HUANG Di, et al. Research progress on comprehensive utilization of phosphogypsum[J]. Yunnan Chemical Technology, 2024, 51(9):11-15.
- [5] 舒顶波,吴小凯,李娟,等.改性磷石膏填充PBAT复合薄膜的制备及性能[J].工程塑料应用,2025,53(1):1-8.
SHU Dingbo, WU Xiaokai, LI Juan, et al. Preparation and properties of modified phosphogypsum-filled PBAT composite films[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(1):1-8.
- [6] 李远霞,曾芳芳,杨琰,等.磷石膏的疏水改性研究现状及进展[J].新型建筑材料,2024,51(7):23-31,38.
LI Yuanxia, ZENG Fangfang, YANG Guang, et al. Research status and progress of hydrophobic modification of phosphogypsum[J]. New Building Materials, 2024, 51(7):23-31, 38.
- [7] 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.
- [8] 秦军,金翠霞,于杰,等.硬脂酸对磷石膏的改性研究[J].无机盐工业,2009,41(10):47-49.
QIN Jun, JIN Cuixia, YU Jie, et al. Surface modification of phosphogypsum by stearic acid[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2009, 41(10):47-49.
- [9] 杨斌.水性聚氨酯的分子结构设计与优化[J].化工管理,2025(24):152-156.
YANG Bin. Molecular structure design and optimization of waterborne polyurethane[J]. Chemical Enterprise Management, 2025 (24):152-156.
- [10] 付豪,龚林波,龚淑玲.水性聚酯改性聚氨酯的合成及其在水性涂料中的应用[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2026,54(1):84-93.
FU Hao, GONG Linbo, GONG Shuling. Synthesis of waterborne polyester-modified polyurethane and its application in waterborne coatings[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2026, 54(1):84-93.
- [11] 高冬元,张广鑫.水性聚氨酯胶粘剂的研究进展[J].化学与粘合,2025,47(4):460-465.
GAO Dongyuan, ZHANG Guangxin. Research progress in waterborne polyurethane adhesives[J]. Chemistry and Adhesion, 2025, 47(4):460-465.
- [12] 陈楠,王凯,王智,等.功能性水性聚氨酯在皮革涂饰领域的应用研究进展[J].中国皮革,2025,54(3):5-10.
CHEN Nan, WANG Kai, WANG Zhi, et al. Research progress on the application of functional waterborne polyurethane in leather finishing[J]. China Leather, 2025, 54(3):5-10.
- [13] 王刚,宋兵,王亮,等.尼龙56超细纤维合成革的制备及力学性能[J].上海纺织科技,2025,53(4):34-37,79.
WANG Gang, SONG Bing, WANG Liang, et al. Preparation of nylon 56 microfiber synthetic leather and its mechanical properties [J]. Shanghai Textile Science & Technology, 2025, 53(4): 34-37, 79.
- [14] 王磊.绿色合成工艺下的水性聚氨酯油墨树脂制备及其性能研究[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(6):136-138.
WANG Lei. Preparation and properties of waterborne polyurethane ink resin under green synthesis process[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2025, 45(6):136-138.
- [15] 赵波,冯含宇,舒锡娜,等.氧化石墨烯/三聚氰胺磷酸酯水性复合涂层耐蚀性能的研究[J].材料保护,2025,58(8):63-68.
ZHAO Bo, FENG Hanyu, SHU Xina, et al. Study on the corrosion resistance of graphene oxide/melamine phosphate waterborne composite coatings[J]. Materials Protection, 2025, 58(8):63-68.
- [16] 阮世诚,伍林,刘盈,等.改性氧化石墨烯/聚苯胺复合材料增强水性聚氨酯涂层防腐抗静电性能研究[J].化工新材料,2026,54(2):136-143.
RUAN Shicheng, WU Lin, LIU Ying, et al. Research on anti-corrosion and antistatic properties of waterborne polyurethane coatings reinforced by modified graphene oxide/polyaniline composites[J/OL]. New Chemical Materials, 2026, 54(2):136-143.