

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.09.001

聚碳硅烷 / 双金属氢氧化物增强阻燃聚氨酯弹性体

邹炎君^{1,2}, 笄鹏^{1,2}, 谢李昭³, 蒋学鑫², 王韶晖², 黄妍²

(1. 中国科学技术大学纳米科学技术学院, 江苏苏州 215123; 2. 安徽壹石通金属陶瓷有限公司, 合肥 230000;

3. 安徽壹石通材料科技股份有限公司, 安徽蚌埠 233000)

摘要: 使用水热法制备了镁铝双金属氢氧化物 (MgAl-LDH), 并利用聚碳硅烷 (PCS) 对其进行改性制备 MgAl-LDH/PCS, 通过正硅酸四乙酯水解包覆聚磷酸铵 (APP) 制备硅溶胶包覆 APP(Si-APP), 使用 X 射线衍射光谱、扫描电镜、傅里叶变换红外光谱对阻燃剂进行表征。将其用于制备热塑性聚氨酯 (TPU) 复合阻燃材料 TPU/MgAl-LDH, TPU/MgAl-LDH/PCS, TPU/MgAl-LDH/APP, TPU/MgAl-LDH/PCS/Si-APP, 进行极限氧指数 (LOI)、残炭扫描、力学性能分析, 实验结果表明, Si-APP 与 MgAl-LDH/PCS 有显著的协同阻燃作用, 其 LOI 值为 30.0%, 拉伸强度为 7.16 MPa, 断裂伸长率为 430.21%, 残炭表面平整致密, 几乎没有熔滴现象。

关键词: 热塑性聚氨酯; 双金属氢氧化物; 聚碳硅烷; 硅溶胶; 阻燃; 熔滴

中图分类号: TQ323.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)09-0001-06

Polycarbosilane / Layered Double Hydroxide Synergistic Flame Retardant Polyurethane Elastomer

Zou Yanjun^{1,2}, Da Peng^{1,2}, Xie Lizhao³, Jiang Xuexin², Wang Shaohui², Huang Yan²

(1. Nano Science and Technology Institute of University of Science and Technology of China, Suzhou 215123, China; 2. Anhui Estone Metal Ceramics Co., Ltd., Hefei 230000, China; 3. Anhui Estone Material Science and Technology Co., Ltd., Bengbu 233000, China)

Abstract: Magnesium-aluminum layered double hydroxide (MgAl-LDH) was prepared by hydrothermal method, and modified by polycarbosilane (PCS) to prepare MgAl-LDH / PCS. Silica sol coating polyammonium phosphate (Si-APP) was prepared by hydrolytic coating of tetrahexyl orthosilicate and polyammonium phosphate (APP). The flame retardants were characterized by X-ray diffraction, scanning electron microscope and Fourier transform. It was used to prepare thermoplastic polyurethane (TPU) composite flame retardant materials TPU / MgAl-LDH, TPU / MgAl-LDH / PCS, TPU / MgAl-LDH / APP, TPU / MgAl-LDH / PCS / Si-APP, and oxygen index (LOI) and carbon residue scanning were performed. The results of mechanical property analysis show that Si-APP and MgAl-LDH / PCS have a significant co-effect of flame retardant effect, LOI is 30.0%, the tensile strength is 7.16 MPa, the elongation at break is 430.21%, the surface of carbon residue is flat and compact, almost no melt drop phenomenon.

Keywords: thermoplastic polyurethane; layered double hydroxide; polycarbosilane; silica sol; flame retardant; drop

热塑性聚氨酯弹性体 (TPU) 通常是以聚合物多元醇、二异氰酸酯、扩链剂、交联剂及少量助剂为原料, 通过加聚反应制得分子链中含氨基甲酸酯集团 (—NHCOO—) 的嵌段聚合物^[1-2]。TPU 是一类既有橡胶弹性又具有塑料刚性的高分子材料^[3], 具有高强度、高韧性、耐磨、耐油、加工性能好等优异的综合性能, 广泛应用于国防、医疗、食品等行业, 已成为重要的热塑性弹性体材料之一^[4-5]。然而普通 TPU 的极限氧指数 (LOI) 仅为 19% 左右, 具有易燃

性, 一旦引燃将剧烈燃烧, 并伴有大量热量、有毒气体和烟雾的释放^[6], 而且燃烧过程中有严重的熔融滴落现象^[7-8], 极易导致二次点燃, 造成更大的损失, 因此很有必要对 TPU 进行阻燃改性研究^[9,10]。

传统阻燃剂如氢氧化铝、氢氧化镁阻燃效率低、添加量大、相容性差、会大幅损耗 TPU 的力学性能^[11]。含磷阻燃剂的代表之一聚磷酸铵 (APP) 含有丰富的氮、磷元素, 其成本较低、毒性较小、阻燃效果较好, 被广泛应用于高分子阻燃领域, 但 APP 容

通信作者: 邹炎君, 硕士, 主要从事聚合物抑烟的研究

收稿日期: 2021-07-05

引用格式: 邹炎君, 笄鹏, 谢李昭, 等. 聚碳硅烷 / 双金属氢氧化物增强阻燃聚氨酯弹性体 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(9):1-6.

Zou Yanjun, Da Peng, Xie Lizhao, et al. Polycarbosilane / layered double hydroxide synergistic flame retardant polyurethane elastomer [J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(9):1-6.

易吸潮,且与聚合物的相容性不好^[12],需要在表面包覆一层疏水层来使用。双金属氢氧化物(LDHs)是一类具层状结构的无机功能材料,LDHs作为阻燃剂使用时,具有无卤、无毒、不挥发、腐蚀性小、稳定性好等优点^[13]。且LDHs具有较强的碱性,在阻燃时可以吸附酸性烟气,具有较强的抑烟效果,受热时,羟基及层间离子以水和CO₂的形式脱出,起到阻隔O₂的阻燃作用,LDHs中结构水、层板羟基以及层间离子在不同的温度内脱离层板,有利于降低燃烧时产生的高温^[14]。LDHs已被广泛用作阻燃聚合物复合材料的添加剂^[15]。然而,LDHs的主体层与层间阴离子之间存在较强的相互作用,阻碍了LDHs在聚合物基体中的分散性。因此,如何实现LDHs在聚合物基体中的均匀分散,从而提高聚合物整体性能仍然是一个挑战^[16]。聚碳硅烷(PCS)是用于制备碳化硅陶瓷材料的前驱体材料,是一种分子中只含有碳、硅和氢的有机硅聚合物,热解过程中能够发生交联、有机-无机转变等^[17],具有热稳定性好,促进成炭等优点。

笔者制备了镁铝双金属氢氧化物(MgAl-LDH),并利用PCS对其改性,制备MgAl-LDH/PCS,利用PCS优点,对MgAl-LDH进行改性,可改善其相容性差的问题,且促进燃烧过程致密炭层的形成。利用硅溶胶表面包覆制备(Si-APP)来改善APP与聚合物相容性差以及吸潮问题,并研究了这三种阻燃剂在TPU中的阻燃效果。

1 实验部分

1.1 主要原材料

APP: II型, $n > 1000$, 萨恩化学技术(上海)有限公司;

六水合氯化镁(MgCl₂·6H₂O)、氨水(25%~28%)、二甲苯(98.5%): 分析纯, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

六水合氯化铝(AlCl₃·6H₂O): 99%, 阿法埃莎(中国)化学有限公司;

正硅酸四乙酯(TEOS): 99.99%, 上海麦克林生化科技有限公司;

无水乙醇: 分析纯, 95%, 上海泰坦科技股份有限公司;

PCS: SLF-PCS, 苏州中宝复合材料股份有限公司;

乳化剂(OP-10): 工业级, 江苏省海安石油化工厂;

TPU: 1185A, 德国巴斯夫公司。

1.2 主要设备及仪器

LOI测定仪: JF-3型, 南京江宁分析仪器厂;

水平/垂直燃烧仪: CZF-3型, 上海路荣试验仪器有限公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪: TENSOR 27型, 昂伽仪器(上海)有限公司;

X射线衍射(XRD)仪: D8Advance型, 德国布鲁克公司;

场发射扫描电子显微镜(FESEM): S-4800型, 日本日立公司;

平板硫化机: XBL-D400型, 河南商丘橡胶机械厂;

转矩流变仪: XSS-300型, 上海科创橡塑机械设备有限公司;

万能制样机: ZHY-W型, 承德实验机厂;

电子万能试验机: UTM5105X型, 深圳三思纵横科技股份有限公司。

1.3 镁铝双金属氢氧化物的制备

将MgCl₂·6H₂O和AlCl₃·6H₂O按照3:1物质的量比分散到温度为60℃、体积为1000 mL去离子水中, 滴加25%氨水调节混合溶液pH值为9~9.5, 随后温度升温至80℃, 在搅拌状态下反应8 h。反应结束后冷却至室温, 产物过滤, 用去离子水和乙醇洗涤, 在90℃烘箱中干燥24 h, 得到镁铝双金属氢氧化物(MgAl-LDH)。

1.4 PCS改性MgAl-LDH

首先将PCS溶于二甲苯中, 配置成浓度为1 g/mL的溶液。称取一定质量的MgAl-LDH分散于500 mL装有无水乙醇的三口烧瓶中, 在45℃下逐滴加入PCS溶液, 在搅拌状态下反应2 h。反应结束后冷却至室温, 产物过滤, 用去离子水和乙醇洗涤, 在90℃烘箱中干燥24 h, 得到PCS改性的镁铝双金属氢氧化物(MgAl-LDH/PCS)。

1.5 硅溶胶包覆APP的制备

将15 g去离子水和50 mL无水乙醇加入到装有机械搅拌的100 mL三口烧瓶中混合均匀, 将15 g APP在搅拌的状态下分散到该三口烧瓶中, 保持45℃, 恒温机械搅拌15 min, 转速为300 r/min。随后用5 mL氨水调节体系pH=8~9, 并加入0.1 g OP-10, 边搅拌边逐滴加入3 g TEOS, 保持体系温度为45℃反应2 h, 抽滤、清洗、干燥得到硅溶胶包覆的APP记为Si-APP。

1.6 阻燃 TPU 的制备

将 MgAl-LDH, MgAl-LDH/PCS 与 Si-APP 充分干燥,分别按一定比例与 TPU 在转矩流变仪中进行熔融共混并用于制备阻燃复合材料的测试样品(TPU/MgAl-LDH, TPU/MgAl-LDH/PCS, TPU/MgAl-LDH/APP, TPU/MgAl-LDH/PCS/Si-APP),共混温度为 180°C ,转速为 70 r/min ,共混时间为 15 min 。使用平板硫化机上进行模压成型,上下模板温度设置为 180°C ,在 10 MPa 下保压 10 min 后成片,室温冷压出片,再使用万能制样机制样,制得的样条进行阻燃性能和力学性能的表征。

1.7 性能测试

XRD 测试: 采用 XRD 仪对样品进行测试。

SEM 测试: 采用 FESEM 对样品进行微观形态和粒径大小进行分析。将样品进行真空喷金作为前处理步骤,电子加速电压为 25 kV 。

红外测试: 取少量样品放在 40°C 真空干燥箱中充分干燥 12 h 。用 FTIR 仪进行表征,光谱的波长范围在 $4000\sim 400\text{ cm}^{-1}$ 之间,透射光谱扫描 32 次。

LOI 测试: 通过调节 LOI 仪氧-氮混合气体中氧气浓度,测得使试样恰能保持燃烧 50 mm 长或燃烧时间为 3 min 所需要的最低氧气体积百分比浓度。按照 GB/T2406-2009 进行测试,样条尺寸为 $130\text{ mm}\times 6.5\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 。

力学性能测试: 按 GB/T 1040.3-2006 进行测试,位移速度为 20 mm/min ,采用哑铃型样条,取 5 根样条拉伸强度和断裂伸长率平均值为测试结果。

2 结果与讨论

2.1 XRD 测试

图 1 为 MgAl-LDH 的 XRD 谱图。从图 1 可以看出, MgAl-LDH 样品在 (003), (006), (012), (015), (018), (110), (113) 晶面出现衍射峰,能与标准卡片 JCPDS89-0460 对应,说明制备的样品具有典型的 MgAl-LDH 晶体结构。MgAl-LDH 谱图衍射峰尖锐,无杂峰,说明样品结构稳定,纯度高。

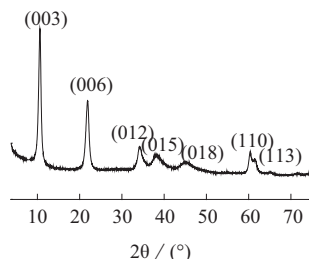
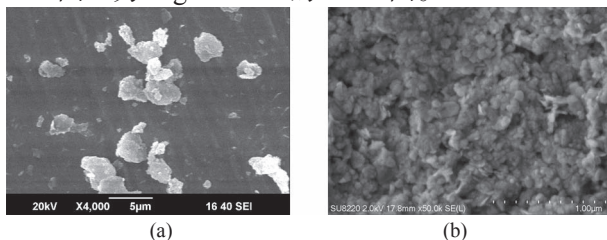


图 1 MgAl-LDH 的 XRD 谱图

2.2 SEM 表征

图 2 为 MgAl-LDH 的 SEM 图。

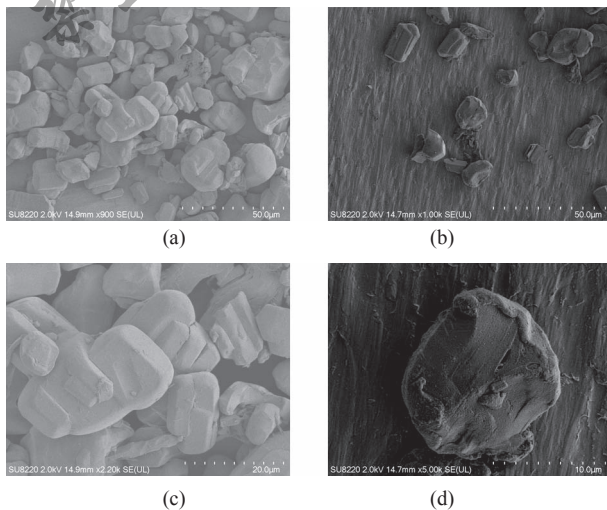


a—整体形貌; b—局部放大

图 2 MgAl-LDH 的 SEM 图

从图 2 可以看出,制备的 MgAl-LDH 具有纳米片堆叠而成的层状结构,由图 2a 可以看出,层状结构尺寸较大,尺寸约为 $5\text{ }\mu\text{m}$,由图 2b 可以看出,纳米片的尺寸约为 100 nm 。

APP, Si-APP 颗粒的表面形貌如图 3 所示。从图 3a 和图 3c 可以看出,大多数 APP 颗粒的表面都很光滑。对 APP 硅溶胶改性后,颗粒的表面形貌发生了明显的变化,表面变得粗糙,从图 3b 和图 3d 可以看出, APP 颗粒被 SiO_2 完全包覆, SiO_2 在 APP 表面沉积。



a—APP ($\times 900$); b—Si-APP ($\times 1000$);
c—APP ($\times 2200$); d—Si-APP ($\times 5000$)

图 3 APP 和 Si-APP 不同放大倍率的 SEM 图

2.3 FTIR 测试

图 4 为 MgAl-LDH, PCS, MgAl-LDH/PCS 的 FTIR 谱图。从图 4 可以看出, PCS 的 FTIR 谱图中明显的特征峰为: 2950 cm^{-1} 和 2895 cm^{-1} (C—H 伸缩振动)、 2100 cm^{-1} (Si—H 伸缩振动)、 1400 cm^{-1} (—CH₃ 变形振动)、 1335 cm^{-1} (—CH₂—变形振动)、 1250 cm^{-1} (Si—CH₃ 变形振动)、 1025 cm^{-1} (Si—O 伸缩振动) 以及 830 cm^{-1} 和 735 cm^{-1} (Si—C 伸缩

振动);MgAl-LDH/PCS的FTIR谱图上同时出现了PCS和MgAl-LDH的特征峰,说明MgAl-LDH/PCS已成功制备。

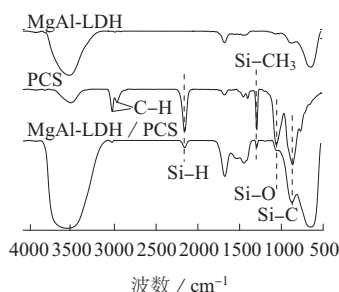


图4 MgAl-LDH, PCS, MgAl-LDH/PCS的FTIR谱图

图5为APP与Si-APP的FTIR谱图。从图5 APP与Si-APP的FTIR谱图可看出,APP的特征峰为:3200 cm⁻¹(N—H伸缩振动)、687 cm⁻¹(N—H弯曲振动)、1255 cm⁻¹(P=O伸缩振动)、1080 cm⁻¹和880 cm⁻¹(P—O伸缩振动),硅溶胶改性后,特征峰没有明显变化,可能原因是硅溶胶包覆量较低。

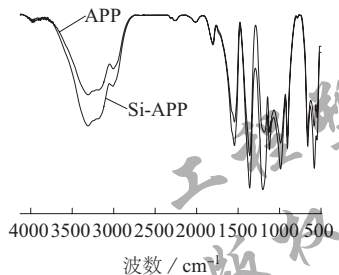


图5 APP与Si-APP的FTIR谱图

2.4 阻燃性能

图6为添加不同种类及含量阻燃剂的TPU复合材料的LOI值。从图6可以看出,添加MgAl-LDH/PCS或MgAl-LDH均可以提高TPU复合材料的LOI,添加阻燃剂MgAl-LDH/PCS阻燃性能普遍优于添加MgAl-LDH样品组。当阻燃剂的添加量为2%时,MgAl-LDH/PCS和MgAl-LDH组TPU复合材料的LOI均最高。随着阻燃剂含量的增加,LOI整体呈现下降趋势,这可能是因为2%的

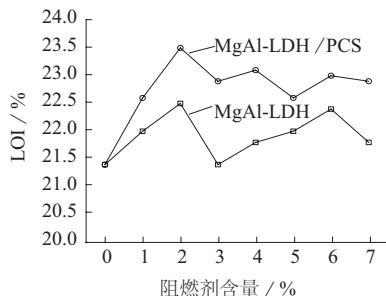
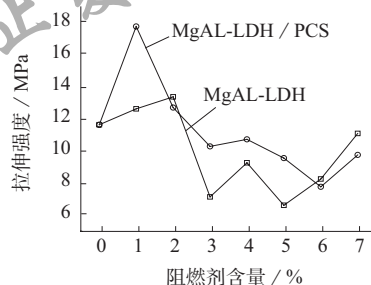


图6 不同阻燃剂添加量时TPU复合材料的LOI值

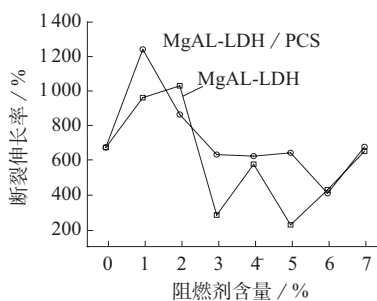
MgAl-LDH/PCS和MgAl-LDH与TPU的分散性较好,且与纯TPU相比有所提升,但是由于添加量较少,提升并不显著。

2.5 力学性能

图7为TPU/MgAl-LDH和TPU/MgAl-LDH/PCS的力学性能图。从图7可知,MgAl-LDH和MgAl-LDH/PCS添加量在1%和2%时,TPU复合材料的力学性能优于纯TPU。添加1%MgAl-LDH/PCS的复合材料,比纯TPU断裂伸长率提升84%,拉伸强度提升48%,分别为1240.37%和17.78 MPa,TPU/MgAl-LDH/PCS的拉伸强度和断裂伸长率均高于TPU/MgAl-LDH,这是因为PCS长链结构提高了TPU复合材料力学性能。随着阻燃剂添加量的增加,两种复合材料的拉伸强度和断裂伸长率均出现下降趋势,这可能是由于含量较高时,阻燃剂粒子之间容易吸附发生团聚成微米级的大颗粒,导致在聚合物中分散不均匀。MgAl-LDH和MgAl-LDH/PCS最适宜添加量均为1%。



(a)



(b)

a—拉伸强度;b—断裂伸长率

图7 不同阻燃剂添加量时TPU复合材料的力学性能

2.6 Si-APP与MgAl-LDH/PCS协同增强对TPU阻燃及力学性能的影响

表1为Si-APP和MgAl-LDH/PCS的协同增强TPU的LOI和力学性能表。从表1可知,添加APP或者Si-APP后,TPU复合材料样条的LOI值均可以提高7%左右。TPU/MgAl-LDH/PCS

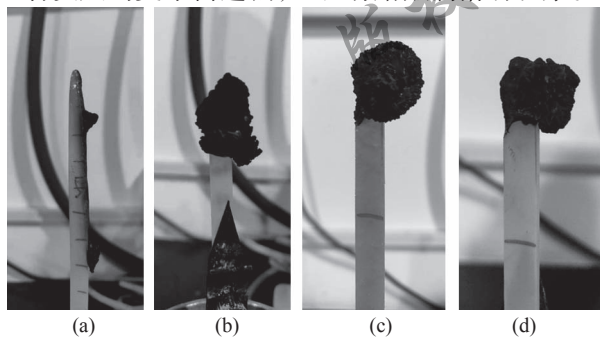
/Si-APP 综合性能最好, Si-APP 与 MgAl-LDH/PCS 的协效阻燃剂作用明显, TPU 复合材料的 LOI 为 30.0%, 拉伸强度为 7.16 MPa, 断裂伸长率为 430.21%, 力学性能满足工业使用要求。

表 1 APP 和 MgAl-LDH 协效阻燃 TPU 的 LOI 值和力学性能

编号	组分份数					LOI/ %	断裂 伸长 率/%	拉伸强 度/ MPa
	TPU	APP	Si- APP	MgAl- LDH	MgAl-LDH/ PCS			
1	99	0	0	1	0	22	961.30	12.64
2	99	0	0	0	1	22.5	1240.37	17.18
3	93	0	6	0	1	30.0	430.21	7.16
4	93	0	6	1	0	29.9	231.97	6.45
5	93	6	0	1	0	30.4	180.54	6.06

2.7 Si-APP 与 MgAl-LDH/PCS 协效增强对 TPU 残炭的研究

图 8 为在阻燃剂添加量都为 1% 的情况下, 不同 TPU 复合材料的炭层数码图片。图 8a 为 TPU/MgAl-LDH 样条炭层, 可以发现其炭层较少, 熔滴较严重。图 8b 为 TPU/MgAl-LDH/PCS 样条的炭层, 其炭层较丰富且没有熔融滴落现象, 可以证实 PCS 可以起到协效 MgAl-LDH 促进 TPU 炭层的形成, 有效减少熔滴。图 8c 为 TPU/MgAl-LDH/APP 样条燃烧后炭层, 图 8d 为 TPU/MgAl-LDH/PCS/Si-APP 样条燃烧后炭层, 在添加 APP 或 Si-APP 后, 二者炭层均更丰富蓬松, 且没有熔融滴落的现象。

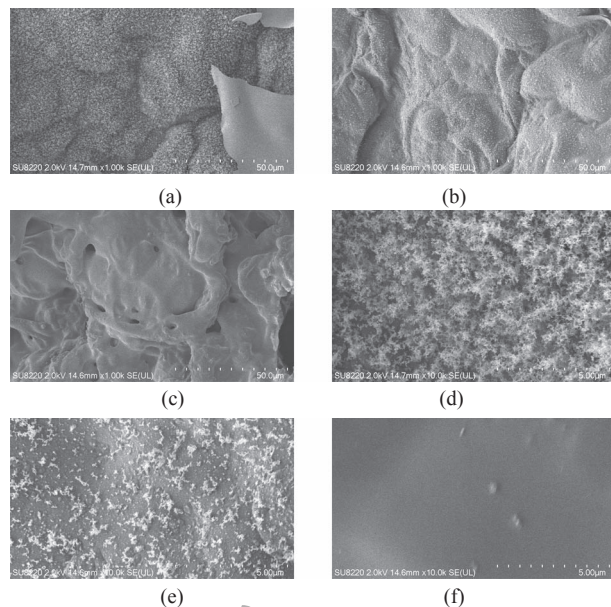


a—TPU/MgAl-LDH; b—TPU/MgAl-LDH/PCS;
c—TPU/MgAl-LDH/APP; d—TPU/MgAl-LDH/PCS/Si-APP

图 8 不同 TPU 复合材料炭层形成情况

2.8 Si-APP 与 MgAl-LDH/PCS 协效增强对 TPU 残炭扫描分析

图 9 为 TPU 复合材料残炭扫描电镜图。纯 TPU 以及 TPU/MgAl-LDH 样条因熔滴现象严重无法形成炭层。图 9a、图 9d 是 TPU/MgAl-LDH/PCS 形成的炭层, 可以看出其炭层疏松多孔, 比较蓬松。图 9b、图 9e 为 TPU/MgAl-LDH/APP/PCS 样条残炭 SEM 图片, 可以看出 MgAl-LDH/APP/TPU/PCS 样条残炭具有一定的致密性, 说明 APP



a, d—TPU/MgAl-LDH/PCS($\times 1000$, $\times 10000$); b, e—TPU/MgAl-LDH/APP/PCS($\times 1000$, $\times 10000$); c, f—TPU/MgAl-LDH/PCS/Si-APP($\times 1000$, $\times 10000$)

图 9 不同 TPU 复合材料残炭扫描电镜图

对 TPU/MgAl-LDH/PCS 炭层的形成具有一定的催化作用。图 9c、图 9f 为 TPU/MgAl-LDH/PCS/Si-APP 样条的残炭 SEM 图片, 可以看出其更为平整致密, 说明在催化 TPU/MgAl-LDH/PCS 成炭方面, Si-APP 比 APP 有着更高的效率, 这种高热稳定性、高质量的炭层的形成, 进一步阻碍了燃烧区的热量和燃料, 并阻碍了可燃气体的释放, 进而阻止了聚合物基质的进一步燃烧。

3 结论

采用水热法制备 MgAl-LDH, XRD 图谱衍射峰尖锐无杂峰, 说明样品纯度高, 通过 SEM 图看出 MgAl-LDH 纳米片尺寸约为 100 nm。FTIR 图谱显示 PCS 成功改性 MgAl-LDH 以及硅溶胶成功包覆在 APP 上。从 TPU/MgAl-LDH/PCS 的力学性能与残炭 SEM 图片可以看出, PCS 有助于提高 TPU/MgAl-LDH 的力学性能以及提高 MgAl-LDH 催化成炭能力。TPU/Si-APP/MgAl-LDH/PCS 的阻燃性能最好, 其 LOI 值为 30.0%, 炭层致密无熔滴, 拉伸强度为 7.16 MPa, 断裂伸长率为 430.21%。

参考文献

- [1] 孟娇娇. 氮化硼纳米片改性聚氨酯的制备与性能研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古科技大学, 2020.
Meng Jiaojiao. Preparation and performance improvement of thermoplastic polyurethane filled with phosphorus modified BN nanosheets[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Science &

- Technology, 2020.
- [2] 张新原. 铜螯合物协同膨胀阻燃 TPU 火灾安全设计与机理研究 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2020.
- Zhang Xinyuan. Research on fire safety design and mechanism of the synergism of copper chelate in intumescent flame retardant TPU[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2020.
- [3] 温凯. 高导热聚氨酯弹性体的制备及性能研究 [D]. 太原: 中北大学, 2015.
- Wen Kai. Preparation and properties of highly thermal conductive polyurethane elastomer[D]. Taiyuan: North University of China, 2015.
- [4] Herrera M, Matuschek G, Kettrup A. Thermal degradation of thermoplastic polyurethane elastomers (TPU) based on MDI[J]. Polym Degrad Stab., 2002, 78(2):323–331.
- [5] Gao Xiaoling, Cheng Qu, Zhang Qin, et al. Brittle–ductile transition and toughening mechanism in POM / TPU / CaCO₃ ternary composites[J]. Macromol Mater Eng, 2004, 289(1):41–48.
- [6] Wang Junling, Zhang Dichang, Zhang Yan, et al. Construction of multifunctional boron nitride nanosheet towards reducing toxic volatiles (CO and HCN) generation and fire hazard of thermoplastic polyurethane[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 362(5):482–494.
- [7] Luo Tingting, Jiao Chuanmei, Chen Xilei, et al. Flame-retardant effect of modified molecular Sieve by ionic liquid in TPU[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2021.doi: 10.1007/S10973-021-10840-0.
- [8] 周陆陆. 硅磷协同阻燃热塑性聚氨酯弹性体研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2017.
- Zhou Lulu. Study on flame retardant thermoplastic polyurethane elastomer based on silica and phosphorus[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017.
- [9] 王康琪, 崔静宇, 张咪, 等. 热塑性聚氨酯弹性体的无卤阻燃研究进展 [J]. 聚氨酯工业, 2019, 34(6):6–8.
- Wang Kangqi, Cui Jingyu, Zhang Mi, et al. Research progress on halogen-free flame retardance of thermoplastic polyurethane elastomer[J]. Polyurethane Industry, 2019, 34(6):6–8.
- [10] Wan Le, Deng Cong, Chen Hong, et al. Flame-retarded thermoplastic polyurethane elastomer: From organic materials to nanocomposites and new prospects[J]. Chemical Engineering Journal, 2021.doi: 10.1016/J.CEJ.2021.129314.
- [11] Jiao Yonghong, Wang Xiuli, Wang Yuzhong, et al. Thermal degradation and combustion behaviors of flame-retardant polypropylene / thermoplastic polyurethane blends[J]. J Macromol Sci B, 2009, 48(5):889–909.
- [12] Liu Yuan, Liu Meifang, Xie Daiyi, et al. Thermoplastic polyurethane-encapsulated melamine phosphate flame retardant polyoxymethylene[J]. Polym-Plast Technol Eng, 2008, 47(3):330–334.
- [13] Liu Yuan, Gao Yanshan, Zhang Zhang, et al. Preparation of ammonium polyphosphate and dye co-intercalated LDH / polypropylene composites with enhanced flame retardant and UV resistance properties[J]. Chemosphere, 2021.doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.130370.
- [14] 王荣珍, 童周禹, 张月, 等. 过渡金属化合物在聚合物阻燃中的研究进展 [J/OL]. 化工新型材料: 1–7[2021–07–02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2357.TQ.20210513.1658.052.html>.
- Wang Rongzhen, Tong Zhouyu, Zhang Yue, et al. Progress in transition metal compounds in flame retardant polymers[J/OL]. New Chemical Materials: 1–7[2021–07–02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2357.TQ.20210513.1658.052.html>.
- [15] Xue Tiantian, Fan Wei, Zhang Xiang, et al. Layered double hydroxide / graphene oxide synergistically enhanced polyimide aerogels for thermal insulation and fire-retardancy[J]. Composites Part B: Engineering, 2021.doi: 10.1016/J.COMPOSITESB.2021.108963.
- [16] Minwang Laipan, Yu Jingfang, Zhuc Runliang, et al. Functionalized layered double hydroxides for innovative applications[J]. Mater Horizons, 2020, 7(3): 715–745.
- [17] 张立飞, 王春峰, 韩志东. 聚碳硅烷改性氢氧化镁对 PP 复合材料阻燃性能的影响 [J]. 功能材料, 2020, 51(7):7069–7073, 7082.
- Zhang Lifei, Wang Chunfeng, Han Zhidong. Effects of polycarbosilane modified magnesium hydroxide on flame retardant properties of PP composites[J]. Journal of Functional Materials, 2020, 51(7):7069–7073, 7082.