

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.01.023

聚丙烯荧光材料制备及其 3D 打印测试

车璇¹, 马捷帆¹, 侯慧玉¹, 林成清¹, 黄榆慧¹, 温华文¹, 李善吉¹, 郭建维²

(1. 广州工程技术职业学院石油化工学院, 广州 510725; 2. 广东工业大学轻工化工学院, 广州 510006)

摘要: 通过配位反应合成了三种荧光配合物: 铕配合物 [Eu(DBM)₃phen], 8-羟基喹啉铝配合物 (AlQ₃) 和 8-羟基喹啉锌配合物 (ZnQ₂), 然后通过熔融共混的方式在聚丙烯 (PP) 材料中分别掺杂这三种荧光配合物, 制得三种 PP/荧光配合物复合材料, 以提高 PP 发光性能。对这三种复合材料进行了一系列的荧光和力学性能测试。结果表明, 三种复合材料都具有良好的发光性能和力学性能, 其中当荧光配合物质量分数为 0.5% 时, PP/Eu(DBM)₃phen 复合材料在测试条件下的力学性能最优, 缺口冲击强度比纯 PP 提高 11%, 其最大发射峰位于 610 nm 处, 半峰宽为 9 nm。最后应用 3D 打印机通过熔融沉积成型工艺对复合材料进行打印, 所得到的打印模型外观良好, 表明此复合材料可适用于 3D 打印。

关键词: 聚丙烯; 复合材料; 配合物; 荧光; 3D 打印

中图分类号: TQ325.1+4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)01-0133-05

Preparation of Polypropylene Fluorescent Materials and Their 3D Printing Test

Che Xuan¹, Ma Jiefan¹, Hou Huiyu¹, Lin Chengqing¹, Huang Yuhui¹, Wen Huawen¹, Li Shanji¹, Guo Jianwei²

(1. School of Petrochemical Engineering, Guangzhou Institute of Technology, Guangzhou 510725, China;

2. School of Light Industry and Chemical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Three fluorescent complexes were synthesized through coordination reaction, which were Eu complex [Eu(DBM)₃phen], 8-hydroxyquinoline aluminum complex (AlQ₃) and 8-hydroxyquinoline zinc complex (ZnQ₂). The three fluorescent complexes were doped on polypropylene (PP) by melt blending to prepare three PP/fluorescent complex composites to improve the luminescence properties of PP. Fluorescent and mechanical properties tests were also carried out on these composites. The results show that these composites have good luminescence and mechanical properties. When 0.5wt% fluorescent complex is doped, PP/Eu(DBM)₃phen composite has the best properties under the test conditions, the notched impact strength is increased by 11% compared with neat PP, and the composite has a maximum emission peak at about 610 nm, the full width at half maxima of the composite is 9 nm. Finally, the melt deposition molding of the composite were carried out by using 3D printer, the printed model has the nice appearance, which shows that this composite is suitable for 3D printing.

Keywords: polypropylene; composite; complex; fluorescent; 3D printing

在过去的几十年中,聚丙烯 (PP) 已作为一种商品化热塑性塑料被广泛应用^[1]。与其它许多高分子材料相同,也会通过添加不同的添加剂对 PP 进行改性,除了用于增加塑性和韧性的有机填料外^[2],碳酸钙 (CaCO₃) 和二氧化硅 (SiO₂) 等无机纳米颗粒也会用于增加此类聚烯烃热塑性塑料的力学性能^[3]。此外,添加荧光配合物的热塑性塑料因其在荧光和

光通信器件中的潜在应用而备受关注,如聚合物光纤放大器、荧光传感器、信息加密和防伪等^[4-7]。PP 因其低的光吸收特性也受到一定的关注,这使其适合作为荧光配合物掺杂的潜在基体材料。然而,关于光学改性 PP 的报道目前相对较少^[8-9]。目前的聚合物荧光材料制备方法除了在常见高分子材料上掺杂荧光材料外,也有合成新型的具有荧光的高分

基金项目: 广州市教育局高校科研项目 (202032826)

通信作者: 李善吉,博士,教授,主要研究方向为高分子材料、荧光材料

收稿日期: 2021-11-11

引用格式: 车璇,马捷帆,侯慧玉,等. 聚丙烯荧光材料制备及其 3D 打印测试 [J]. 工程塑料应用,2022,50(1):133-137,154.

Che Xuan, Ma Jiefan, Hou Huiyu, et al. Preparation of polypropylene fluorescent materials and their 3D printing test[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(1):133-137, 154.

子材料^[10-12],此类材料在分子结构上含有发光基团或具有大的共轭体系,已在有机半导体领域有所应用^[13-14],如在有机发光二极管等^[15-17]。但是这些新型合成荧光高分子材料由于分子结构刚性较大以及合成成本较高,在3D打印领域应用较少^[18]。

笔者通过合成三种有机金属荧光配合物:铕配合物 $[\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}]$, 8-羟基喹啉铝配合物 (AlQ_3) 和 8-羟基喹啉锌配合物 (ZnQ_2) , 分别作为掺杂剂对 PP 进行改性,以增强其荧光性能。 $\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$, AlQ_3 和 ZnQ_2 的发光光色范围是红光至黄绿光,三种荧光配合物都具有较好的发光性质,因此希望借助这三种配合物在低掺杂量的情况下使 PP/ 荧光配合物复合材料同时兼顾 PP 材料原有的力学性能和配合物较好的发光性能。同时针对研究结果,也希望可以拓宽 PP/ 荧光配合物复合材料的应用范围,包括在 3D 打印方面的应用。

1 实验部分

1.1 主要原料

PP 粒料: M180R, 中国石化上海石油化工股份有限公司;

三氧化二铕 (Eu_2O_3): 纯度 99%, 洛阳市方德新材料科技有限公司;

邻菲罗啉 (phen)、无水乙醇、8-羟基喹啉、氢氧化钠 (NaOH)、二苯甲酰基甲烷 (DBM)、无水氯化铝 (AlCl_3): 分析纯, 广东翁江化学试剂有限公司;

盐酸 (HCl), NaOH : 分析纯, 广州化学试剂厂;

氯化锌 (ZnCl_2): 分析纯, 天津市福晨化学试剂厂。

1.2 主要仪器与设备

双螺杆挤出机: LSHJ-20 型, 上海科创橡塑机械设备有限公司;

切粒机: SG-20 型, 上海科创橡塑机械设备有限公司;

平板硫化机: HY-25TD 型, 上海恒驭仪器有限公司;

塑料注射成型机: CJ80TB 型, 震德塑料机械有限公司;

悬臂梁冲击试验机: XJU-22 型, 承德市开发区德盛检测设备有限公司;

CMT 微机控制电子万能试验机: E43.104 型, 美特斯工业系统 (中国) 有限公司;

扫描电子显微镜 (SEM): S-3400N 型, 日立株式会社;

荧光分光光度计: RF-5301PC 型, 日本 SHIMADZU (岛津) 制作所;

料斗干燥机: GHD-12E 型, 东莞嘉洛斯机械科技有限公司;

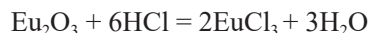
3D 打印耗材挤出机: MXS45 型, 东莞市茂兴胜机械设备有限公司;

3D 打印机: Arts Maker 型, 三帝打印科技有限公司。

1.3 有机金属荧光配合物合成

(1) $\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$ 合成。

称取 0.352 g Eu_2O_3 溶于过量 HCl 中, 于加热板上蒸发至近干, 然后加入约 10 mL 无水乙醇, 得 Eu^{3+} 溶液, 转移到三口烧瓶中, 反应式如下所示。



EuCl_3 为白色粉末, 如呈现黄色说明还有 HCl 存在, 需要继续蒸发。

将 1.346 g DBM 配体和 0.360 g 的 phen 配体溶于适量的 (约 20 mL) 无水乙醇中, 然后逐滴滴加到上述 Eu^{3+} 溶液中。滴加过程中会有配体析出, 继续加热配体溶液, 然后再滴加。滴加完毕变黄色澄清溶液, 再用 0.5 mol/L 的 NaOH 水溶液调节上述混合溶液的 pH 值至 7~8, 中和产物中过量的 HCl , 此时有大量淡黄色沉淀物生成。然后在 80℃ 下继续搅拌反应至少 2 h, 沉淀抽滤, 用蒸馏水和乙醇多次洗涤, 真空干燥后再重结晶, 得到淡黄色产物 1.612 g, 该产物即为 $\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$, 合成路线如图 1 所示。

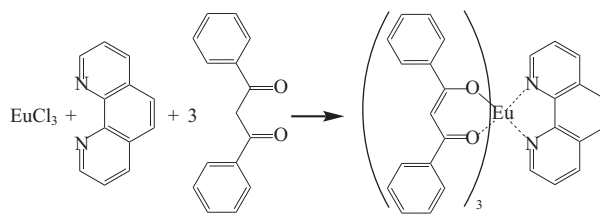


图1 配合物 $\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$ 的合成路线

(2) AlQ_3 合成。

称取 7 g 的 8-羟基喹啉溶于 100 mL 无水乙醇中, 经充分搅拌至完全溶解, 搅拌过程中可适当加热, 加热温度不超过 40℃。称取 15.0 g 无水 AlCl_3 溶于 200 mL 纯净蒸馏水中, 溶解过程中加入少量 HCl , 约 5 mL 即可, 控制水解发生沉淀。待 AlCl_3 完全溶解后与 8-羟基喹啉溶液混合, 充分搅拌后静置 1 h 以上。再称取 5.30 g NaOH 溶于 60 mL 纯净蒸馏水中, 将制成的 NaOH 溶液缓慢滴加到上述混合溶液中, 可看到逐渐有絮状沉淀物析出。继续

在 80~90℃ 下回流反应,至 pH 调至 7 左右。产物放置 24 h 后,沉淀抽滤,用蒸馏水多次洗涤,放入真空干燥箱,在 150℃ 下烘干得到暗绿色产物 7.044 g (产物产率为 77.4%),该产物即为 AlQ_3 ,合成路线如图 2 所示。

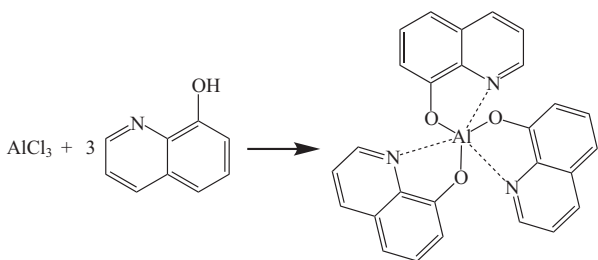


图 2 配合物 AlQ_3 的合成路线

(3) ZnQ_2 合成。

ZnQ_2 的合成过程与 AlQ_3 基本相同,仅将无水 AlCl_3 换成 ZnCl_2 ,其用量为 15.0 g,8-羟基喹啉用量为 6.97 g,最终得到黄绿色产物 6.832 g (产物产率为 75.08%),该产物即为 ZnQ_2 ,合成路线如图 3 所示。

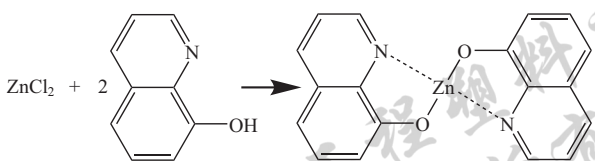


图 3 配合物 ZnQ_2 的合成路线

1.4 PP/荧光配合物复合材料制备

将 $\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$, AlQ_3 , ZnQ_2 按相应比例与 PP 均匀混合,然后加入到双螺杆挤出机的主喂料料筒中,以 180~200℃ 的挤出温度和 30 r/min 的转速共混熔融挤出造粒。将均匀切粒后的复合材料粒料经干燥处理后,放在干净、铺有耐高温薄膜的金属模具中,放入平板硫化机上压片成型。加热温度设置为 190~200℃,设定压力到 10 MPa 时自动放气,连续三次;保持压力 10 MPa 大约 10 min 左右,可取出模具,待冷却后取出 PP/ $\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$, PP/ AlQ_3 和 PP/ ZnQ_2 复合材料试样平板,用于荧光性能测试。将均匀切粒后的复合材料经干燥处理后,在塑料注射成型机中注塑成符合 GB/T 12554-2006 标准的拉伸、冲击测试样条,注塑温度为 190~220℃,注塑压力为 80 MPa,螺杆转速为 50 r/min,注塑时间为 18 s,冷却时间为 30 s。在加入不同的荧光配合物后 PP 材料外观颜色从原来的白色偏透明均变为黄绿色。

1.5 3D 打印测试

于 85~95℃ 条件下,将 PP 复合材料试样在料

斗干燥机中干燥 2~4 h。将烘干后的材料加入到 3D 打印耗材挤出机的喂料筒中,按相应的工艺条件挤出拉条,对有稳定丝径的线材进行收集,在此基础上进行熔融沉积成型 (FDM) 3D 打印测试。

1.6 测试与表征

(1) 荧光性能测试。

将复合材料平板置于荧光分光光度计中,以 300 nm 波长的光源作为激发光,进行光致发光检测;荧光配合物二氯甲烷 (CH_2Cl_2) 溶液 (浓度 1.2×10^{-4} mol/L) 的荧光性能测试在 1 cm×1 cm 的石英比色皿中进行,条件与固体平板样品相同。

(2) 力学性能测试。

拉伸性能按照 GB/T 1040.2-2006 测试,试样标距设定为 20 mm,夹具拉伸速率设定为 5 mm/min,测试温度 (25 ± 2)℃。

缺口冲击强度按照 GB/T 1843-2008 测试,摆锤能量设定为 11 J,测试温度 (25 ± 2)℃。

(3) SEM 表征。

采用 SEM 观察复合材料试样冲击断面的形貌,为避免电子束下的电荷,因此必须用真空镀金处理试样断面,加速电压为 5 kV。

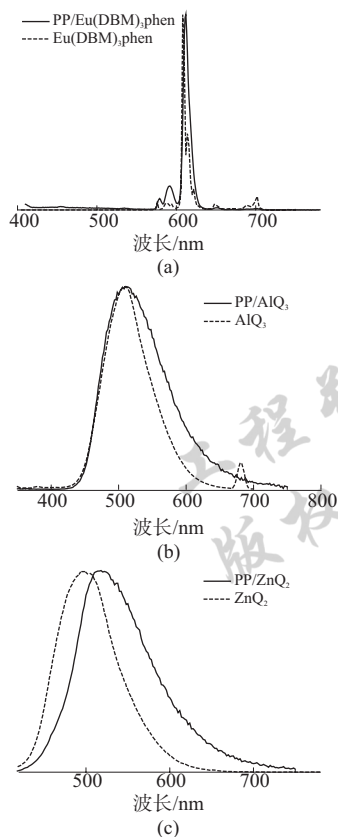
2 结果与讨论

2.1 荧光性能分析

在室温下研究了含有荧光配合物 (质量分数 0.5%) 的 PP/荧光配合物复合材料的发光性能,并与在 CH_2Cl_2 溶液中的荧光配合物进行了比较,如图 4 所示。图 4a 中,PP/ $\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$ 复合材料的荧光光谱在 610 nm 处有一个最大发射峰,在 590 nm 和 578 nm 处有两个相对较弱的峰。而在 $\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$ 溶液的荧光光谱中,观察到九个发射峰,分别在 576,587,594,608,614,622,648,689,702 nm 处,这现象与其它文献相一致^[19]。通过对比可以发现,PP/ $\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$ 复合材料的最大发射峰对应的波长相比 $\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$ 溶液的最大发射峰红移了 2 nm,而 PP/ $\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$ 复合材料的半峰宽 (FWHM) 是 9 nm,比 $\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$ 溶液的 4 nm 宽了 125%。最大发射峰的变宽和红移可归因于 $\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$ 在固态中的聚集效应。通过实验结果表明,PP/ $\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$ 复合材料具有良好的发光性质。

图 4b 中, AlQ_3 在 CH_2Cl_2 溶液中的最大荧光强度出现在 510 nm,固态 PP/ AlQ_3 复合材料的最大荧光强度对应波长也位于 510 nm。与 PP/

Eu(DBM)₃phen 相似, AlQ₃ 在 PP 固态中的聚集也导致荧光光谱发射峰明显比溶液状态中的宽。图 4c 中, ZnQ₂ 溶液和 PP/ZnQ₂ 复合材料的荧光强度最大值对应波长分别为 496 nm 和 518 nm, 这意味着在 ZnQ₂ 的固态中形成了激发二聚体或激基复合物, 从而导致了明显的红移现象。PP/ZnQ₂ 复合材料的半峰宽 (101 nm) 比 ZnQ₂ 溶液的半峰宽更宽, 其原因与 PP/Eu(DBM)₃phen 和 PP/AlQ₃ 复合材料相似, 也是因为荧光配合物的聚集效应所影响。这些荧光测试结果都说明所制备的 PP/ 荧光配合物复合材料具有优异的荧光性能。



a—PP/Eu(DBM)₃phen 与 Eu(DBM)₃phen ; b—PP/AlQ₃ 与 AlQ₃ ;
c—PP/ZnQ₂ 与 ZnQ₂

图 4 PP/ 荧光配合物复合材料及 CH₂Cl₂ 溶液中
荧光配合物的荧光光谱

2.2 力学性能分析

图 5 显示了 PP/ 荧光配合物复合材料的缺口冲击强度和拉伸强度随荧光配合物掺杂量的变化曲线。由图 5 可以看出, 在掺杂质量分数 0.5% 荧光配合物的情况下, PP/Eu(DBM)₃phen, PP/AlQ₃ 和 PP/ZnQ₂ 复合材料的缺口冲击强度分别比纯 PP 提高 11%, 1% 和 3%, 这表明适量的荧光配合物分子在一定程度上能提高 PP 的韧性。然而, 随着荧光

配合物掺杂量的不断增加 (质量分数从 0.5% 增加到 2%), 三种复合材料的缺口冲击强度有所降低, 表明荧光配合物掺杂量的增多导致复合材料发生了脆化, 但相对来说, PP/Eu(DBM)₃phen 复合材料的缺口冲击强度始终高于纯 PP, 而其它两种复合材料缺口冲击强度的下降幅度相对较小。

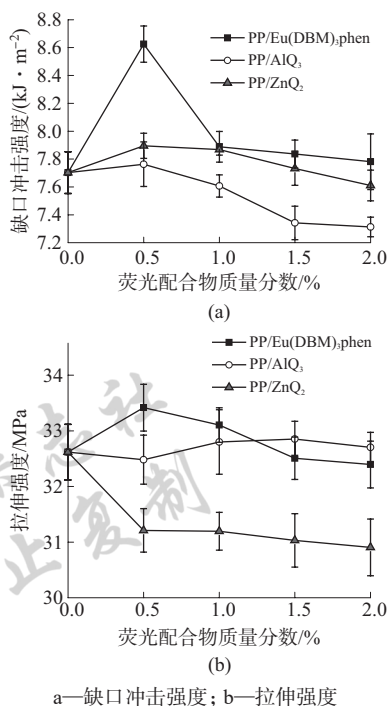
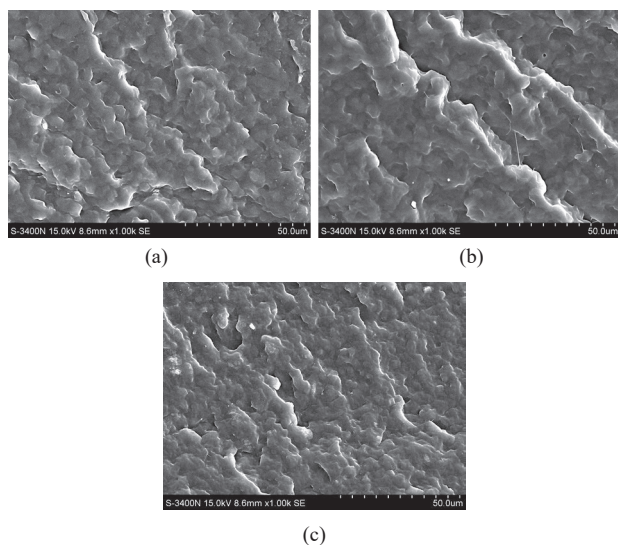


图 5 不同荧光配合物掺杂量的 PP/ 荧光配合物复合材料的力学性能

对于 PP/ZnQ₂ 复合材料, 与纯 PP 的拉伸强度 32.618 MPa 相比, 其拉伸强度均略有降低, ZnQ₂ 质量分数为 0.5%, 1%, 1.5%, 2% 的复合材料的拉伸强度分别略微降低至 31.211, 31.196, 31.032, 30.905 MPa。另一方面, PP/Eu(DBM)₃phen 和 PP/AlQ₃ 复合材料的拉伸强度随着相应荧光配合物掺杂量的增加, 没有明显下降。这些结果进一步表明, 与纯 PP 相比, 掺杂在 PP 中的荧光配合物对复合材料力学性能没有显著的负面影响, 其中 Eu(DBM)₃phen 还可使复合材料的缺口冲击强度得到一定程度的提高。

为了更进一步了解荧光配合物对复合材料力学性能的影响, 通过 SEM 观察了复合材料的微观形貌, 如图 6 所示。图 6 中的 SEM 照片显示, 在低倍率下, 当添加了质量分数 0.5% 荧光配合物后, PP 微观形貌没有受到明显的影响, 荧光配合物没有出现与 PP 的相分离。这一结果表明, 在微米尺度上, 复合材料中荧光配合物均匀分散在 PP 基体中。因此, 这也与力学性能试验的结论是一致的。在不考虑发

光色情况下, $\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$ 质量分数为 0.5% 时, $\text{PP}/\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$ 复合材料的力学性能最优。



a— $\text{PP}/\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$; b— PP/AlQ_3 ; c— PP/ZnQ_2

图6 PP/荧光配合物复合材料的微观形貌 SEM 照片

2.3 3D 打印测试

图7显示了一个采用 $\text{PP}/\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$ 复合材料3D打印制作的实物模型。在测试过程中, $\text{PP}/\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$ 复合材料不仅可用于打印厚壁中空结构,也可用于打印薄壁中空结构,且无明显变形和缺陷。打印过程的顺利进行和模型的良好外观表明,当平台底板温度设置为 120°C 时, $\text{PP}/\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$ 复合材料制作的长丝适合 FDM 打印技术。因此,在整个 3D 打印过程中,只需将 3D 打印模型的平台设置在合适的温度下,不需要其它额外支撑结构或粘合剂,就可采用 FDM 技术打印制作该类 PP/荧光配合物复合材料制件。



图7 使用 $\text{PP}/\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$ 复合材料进行 3D 打印的模型照片

3 结论

(1) 开发了三种 PP/荧光配合物复合材料,通过加入荧光配合物提高 PP 的光学性能。将 $\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$, AlQ_3 和 ZnQ_2 分别掺杂到 PP 中,制备成具有荧光活性的复合材料。

(2) 通过力学性能的测试发现,当添加质量分数 0.5% 的荧光配合物, $\text{PP}/\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$, PP/AlQ_3 和

PP/ZnQ_2 三种复合材料的缺口冲击强度分别提高了 11%, 1% 和 3%。由于荧光配合物在复合材料中的良好分散性,这些复合材料的拉伸强度没有显著降低。综合而论, $\text{PP}/\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$ 复合材料在测试条件下的力学性能最优。

(3) 当将 $\text{PP}/\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{phen}$ 复合材料用于 FDM 打印时,3D 打印可以顺利进行,在 120°C 时既不会出现可见的变形,也不会从平台上脱落。因此,该类 PP/荧光配合物复合材料有望为 PP 基荧光复合材料在包括 3D 打印技术在内的许多潜在应用领域提供一定的参考。

参考文献

- [1] Moore E. Polypropylene handbook: Polymerization, characterization, properties, processing, applications[M]. Cincinnati: Hanser-Gardner Publications, 1996.
- [2] Martín Z, Jiménez I, Gómez-Fatou M A, et al. Interfacial interactions in polypropylene-organoclay-elastomer nanocomposites: influence of polar modifications on the location of the clay[J]. Macromolecules, 2011, 44(7): 2179–2189.
- [3] Karger-Kocsis J. Polypropylene: Structure, blends and composites[M]. London: Chapman & Hall, 1995.
- [4] Kuriki K, Koike Y, Okamoto Y. Plastic optical fiber lasers and amplifiers containing lanthanide complexes[J]. Chem Rev, 2002, 102(6): 2347–2356.
- [5] Mirzakhani M, Nozary H, Naseri S, et al. Bottom-up approach for the rational loading of linear oligomers and polymers with lanthanides[J]. Inorganic Chemistry, 2021, 60(20): 15529–15542.
- [6] Ahmed I, Lee Y R, Yu K, et al. Gd^{3+} Adsorption over carboxylic- and amino-group dual-functionalized UiO-66[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019, 58(6): 2324–2332.
- [7] Xu Y Y, Ding Z F, Liu F Y, et al. 3D printing of polydiacetylene photocomposite materials: two wavelengths for two orthogonal chemistries[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2020, 12(1): 1658–1664.
- [8] Ma Y, Farinha J P S, Winnik M A, et al. Compatibility of chlorinated polyolefin with the components of thermoplastic polyolefin: a study by laser scanning confocal fluorescence microscopy[J]. Macromolecules, 2004, 37(17): 6544–6552.
- [9] Chen L, Wang S S, Zhang Y Y, et al. N-Hydroxyphthalimide catalyzed hydrazination of polyethylene glycol[J]. Reactive and Functional Polymers, 2020, 154. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104666.
- [10] Yamada N, Noguchi H, Orimoto Y, et al. Emission-color control in polymer films by memorized fluorescence solvatochromism in a new class of totally organic fluorescent nanogel particles[J]. Chemistry-A European Journal, 2019, 25(43): 10141–10148.

(下转第 154 页)

- [16] 李坤泉,柴生勇,李积德,等.受阻胺光稳定剂 770 的合成与应用研究[J].合成材料老化与应用,2019,48(5):1-5,58.
Li Kunquan, Chai Shengyong, Li Jide, et al. Study on the preparation and application of the hindered amine light stabilizer 770[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2019, 48(5):1-5, 58.
- [17] 戴立起,李邦.英力士高密度聚乙烯装置 V3001 结块的分析[J].石油化工,2021,50(3):268-273.
Dai Liqi, Li Bang. The analysis of V3001 agglomerations of Innovene S HDPE plant[J]. Petrochemical Technology, 2021, 50(3):268-273.
- [18] 蒋小良,曾铭,郭敏,等.食品塑料包装材料中光稳定剂 HS-770 迁移量测定及迁移规律研究[J].中国口岸科学技术,2021,3(6):60-64.
Jiang Xiaoliang, Zeng Ming, Guo Min, et al. Study on migration amount determination and migration law of light stabilizers HS-770 in food plastic packaging materials[J]. China Port Science and Technology, 2021, 3(6):60-64.
- [19] 李杰.抗氧剂、光稳定剂在聚碳酸酯和改性材料中的应用技术[J].塑料助剂,2021(1):1-6.
Li Jie. Application of antioxidants and light stabilizers in polycarbonate and modified materials[J]. Plastic Additives, 2021(1):1-6.
- [20] 卢祉巡,于海佳,董薇.受阻胺光稳定剂作用机制及其适用性研究综述[J].塑料科技,2019,47(4):98-102.
Lu Zhixun, Yu Haijia, Dong Wei. Research review on mechanism and applicability of hindered amine light stabilizer[J]. Plastics Science and Technology, 2019, 47(4):98-102.

(上接第 137 页)

- [11] Bhaumick P, Jana A, Choudhury L H. Synthesis of novel coumarin containing conjugated fluorescent polymers by Suzuki cross-coupling reactions and their chemosensing studies for iron and mercury ions[J]. Polymer, 2021, 218. DOI:10.1016/j.polymer.2021.123415.
- [12] Badekar P S, Thakur G C N, Varma M E, et al. Rhodamine-based fluorescence 'Turn-On' chemosensor: Detection of Fe^{3+} ion in aqueous medium and MCF-7 live cells[J]. ChemistrySelect, 2021, 6(9):2373-2378.
- [13] Teshima Y, Saito M, Mikie T, et al. Bithiazole dicarboxylate ester: An easily accessible electron-deficient building unit for π -conjugated polymers enabling electron transport[J]. Macromolecules, 2021, 54(7):3489-3497.
- [14] Huang J Y, Yu G. Structural engineering in polymer semiconductors with aromatic *N*-heterocycles[J]. Chemistry of Materials, 2021, 33(5):1513-1539.
- [15] Handrea-Dragan M, Botiz I. Multifunctional structured platforms: From patterning of polymer-based films to their subsequent filling with various nanomaterials[J]. Polymers, 2021, 13(3). DOI:10.3390/polym13030445.
- [16] Park J, Han S, Park H, et al. Simultaneous measurement of glass-transition temperature and crystallinity of as-prepared polymeric films from restitution[J]. Macromolecules, 2021, 54(20):9532-9541.
- [17] Bauri J, Choudhary R B, Mandal G. Recent advances in efficient emissive materials-based OLED applications: A review[J]. Journal of Materials Science, 2021, 56(34):18837-18866.
- [18] Champion A, Metral B, Schuller A S, et al. A simple and efficient model to determine the photonic parameters of a photopolymerizable resin usable in 3D printing[J]. ChemPhotoChem, 2021, 5(9):839-846.
- [19] Liang H, Zheng Z Q, Zhang Q J, et al. Radiative properties of $\text{Eu}(\text{DBM})_3\text{Phen}$ -doped poly(methyl methacrylate)[J]. Journal of Materials Research, 2003, 18:1895-1899.