

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.06.029

聚合物基电磁屏蔽复合材料结构调控研究进展

陶瑞祥¹, 高珠怡², 尚梦瑶², 申屠宝卿², 程亨伦², 吴驰男²

(1. 浙江正泰电缆有限公司, 浙江嘉兴 314006; 2. 浙江大学化学工程与生物工程学院化学工程国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 综述了聚合物基电磁屏蔽复合材料的结构调控研究进展, 介绍了隔离结构、共连续结构、泡孔结构、层状结构等特殊结构的研究现状, 论述了这些特殊结构对聚合物基电磁屏蔽复合材料电磁屏蔽效能的影响。研究表明, 通过结构调控可促进碳系导电填料在聚合物基体中高效导电网络的构筑, 从而使其更好地损耗电磁波, 进而提高材料电磁屏蔽效能。

关键词: 电磁屏蔽; 结构调控; 聚合物基复合材料; 碳系导电填料

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)06-0165-04

Research Progress of Structure Control of Polymer based Electromagnetic Shielding Composites

Tao Ruixiang¹, Gao Zhuyi², Shang Mengyao², Shentu Baoqing², Cheng Henglun², Wu Chinan²

(1. Zhejiang CHINT Cable Co., Ltd., Jiaxing 314006, China;

2. State Key Lab of Chemical Engineering, College of Chemical and Biological Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract : The structure control of polymer based electromagnetic shielding composites in recent years was reviewed. And the research status of special structures such as isolation structure, co-continuous structure, bubble structure and layered structure were introduced. The effects of these special structures on the electromagnetic shielding effectiveness of polymer based electromagnetic shielding composites were also discussed. The researches show that structure control can improve the construction of efficient conductive network of carbon based conductive fillers in polymer matrix, so that they can better lose electromagnetic wave, and then improve the electromagnetic shielding effectiveness of materials.

Keywords : electromagnetic shielding ; structural control ; polymer-based composite ; carbon conductive filler

随着现代科技发展, 电子、电器设备为社会生产与人类生活提供高效便利的同时, 其工作过程产生的电磁辐射与干扰对人类健康、正常通讯、自然空间电磁环境等造成不良后果^[1]。特别是 5G 时代的到来, 联网设备和无线通讯系统数量急剧增加, 使得电磁波污染问题受到密切关注。因此, 研究制备具有高电磁屏蔽效能的电磁屏蔽材料十分重要。

目前通常采用屏蔽效能 (SE) 作为衡量材料对电磁波屏蔽能力的定量指标^[2]。传统电磁屏蔽材料采用高电导率与介电常数的铜^[3]、镍^[4]或银^[5]等金属制备, 屏蔽效能优异, 但屏蔽机制主要以反射损耗为主, 易造成二次污染, 阻碍了其在电磁屏蔽领域的市场拓展^[6]。相比之下, 聚合物基电磁屏蔽复合材料以轻质柔性、耐腐易加工和性能可调等优点得

到迅速发展^[7]。聚合物基电磁屏蔽材料主要通过是在聚合物基体中引入导电或导磁填料, 形成导电 / 导磁网络结构以实现电磁波的屏蔽作用, 目前主要以导电填料研究为主。导电填料种类繁多, 其中碳系导电填料因其低密度、易加工、多功能性、吸收为主等优点, 在电磁屏蔽领域备受关注^[8]。近年来, 新型碳系导电填料如碳纳米管 (CNTs)^[9]、石墨烯^[10]等的出现, 掀起了碳系导电填料在电磁屏蔽材料中的研究热潮。对于聚合物基导电复合材料而言构筑高效导电网络是提高其电磁屏蔽效能的重要途径。

传统聚合物基电磁屏蔽复合材料主要采用原位聚合^[11]、溶液共混^[12]、熔融共混^[13]等方法将聚合物与填料直接混合, 制备得到的复合材料中填料随机分布于整个基体范围

基金项目: 浙江省重点研发计划项目 (2020C01138)

通信作者: 申屠宝卿, 教授, 主要研究方向为高分子材料科学与工程

收稿日期: 2021-03-26

引用格式: 陶瑞祥, 高珠怡, 尚梦瑶, 等. 聚合物基电磁屏蔽复合材料结构调控研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(6) : 165-168, 174.

Tao Ruixiang, Gao Zhuyi, Shang Mengyao, et al. Research Progress of Structure Control of Polymer Based Electromagnetic Shielding Composites[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(6) : 165-168, 174.

内,因此所需量较大,不利于导电网络结构的构建,且电磁屏蔽能力十分有限^[14]。通过结构调控可将填料选择性分布于基体中某一空间范围,降低导电逾渗阈值,同时通过空间区域内导电性能差异,增加电磁波在材料中的多次界面反射、散射、吸收,提高电磁屏蔽效能。

笔者综述了近几年聚合物基电磁屏蔽复合材料结构调控方面的研究,介绍了隔离结构、共连续结构、泡孔结构、层状结构等特殊结构的研究现状,同时论述了这些特殊结构对聚合物基电磁屏蔽复合材料电磁屏蔽效能的影响。

1 隔离结构

具有隔离结构的聚合物基电磁屏蔽复合材料中,碳系导电填料选择分布于聚合物颗粒连接处,有利于提高填料有效浓度,形成更完善的导电网络,从而提高电磁屏蔽效能^[15]。以往研究中隔离结构多采用高黏度低流动性的聚合物作为基体,以超高分子量聚乙烯(PE-UHMW)为主^[16-17]。随着隔离结构构建研究的深入,部分研究人员已成功将其应用于多种聚合物^[18-19]。

Yan Dingxiang等^[20]借助超声分散将氧化石墨烯包覆至PE-UHMW颗粒表面,随后将修饰颗粒原位热还原,制备得到PE-UHMW/热还原氧化石墨烯(TRGO)复合材料。当TRGO体积分数为0.66%时,材料体积电导率可达3.4 S/m,在X波段(8.2~12.4 GHz)范围内SE达28.3~32.4 dB,其中吸收损耗占96.5%。Jia Lichuan等^[21]在PE-UHMW颗粒表面包覆石墨和CNTs的混合粉末(G-CNTs),热压成型制备了PE-UHMW/G-CNTs复合材料,固定填料质量分数为15%,当石墨与CNTs质量比为1/3时,材料体积电导率达195.3 S/m,在X波段SE达81 dB。Wu Hongyuan等^[22]采用溶液混合与热压成型制备了s-聚丙烯(PP)/CNTs复合材料,探究了成型过程中温度与压力对隔离结构构建的影响。结果表明当热压温度为180℃,压力为100 MPa时,CNT质量分数为5%的s-PP/CNTs复合材料SE可达到48.3 dB,且克服了隔离结构力学性能差的缺点。这是因为在高温高压下,界面结合力增强,分子堆叠紧密,使得内部缺陷减少,从而有助于维持优异的力学性能。溶液共混方法常常需要大量溶剂,相比之下,机械混合绿色环保,操作简单,更具实际工业应用价值。Cui Chenghua等^[23]利用左旋聚乳酸(PLLA)与右旋聚乳酸(PDLA)混合物中共晶与立构复合晶形成时的温度差异,通过机械共混与热压成型制备了PLA/CNTs复合材料,在CNT体积分数仅为0.6%时电导率达12 S/m,X波段SE可达35.5 dB。

相比于热压成型方法,工业生产中更倾向于快速简便的注塑成型加工方法,然而注塑过程中的高剪切力对隔离结

构形成造成了困难,因此该方向研究仍较少。Wu Hongyuan等^[24]将CNTs包覆至等规聚丙烯(iPP)表面,然后利用iPP与无规聚丙烯(aPP)熔融温度差异,使得CNTs迁移至aPP中,制备PP/CNTs复合材料。该材料具有较低的逾渗阈值,当CNTs质量分数为5%时电导率为86.3 S/m,X波段SE为43.1 dB。Zhang Yunpeng等^[25]采用两种黏度不同的共聚PP与CNTs通过机械混合与注塑成型制备PP/CNTs复合材料,CNTs选择分布于低黏度PP(LPP)中。当材料中CNTs质量分数为3.5%时,电导率达14.4 S/m,X波段SE达32 dB。此外,由于LPP的加入,增强了界面强度,保证了拉伸过程中有效载荷的传递,同时避免了界面微孔的产生,使得材料力学性能得到提升。

2 共连续结构

共连续结构多应用于不相容的聚合物共混体系,首先通过改变聚合物配比形成共连续形貌,其次依赖于聚合物性质差异、制备方法、填料基团改性等调控,使得碳系导电填料选择分布于某一相中^[26]。共连续结构的形成和填料的选择分布构建了双逾渗网络结构,促进了材料导电性能的提升,与此同时,选择分布后不同相间导电性能的差异,增加电磁波在相界面的多次反射、散射及吸收,从而提高了材料电磁屏蔽效能^[27]。

A. Sadeghi等^[28]以具有共连续形貌的聚对苯二甲酸乙二酯(PET)/PP共混物(质量比为50/50)为基体,添加热还原石墨烯(TRG)。在热力学上,为了降低体系自由能,TRG选择性分布于其倾向的一相,在动力学上,TRG倾向分布于黏度较低的一相,因此TRG倾向分布于PET相。当TRG体积分数为2%时,材料电导率为0.16 S/m,在X波段下SE达40~60 dB。Yang Yan等^[29]以具有共连续形貌的聚酮(POK)/聚偏氟乙烯(PVDF)共混物(体积比为50/50)为基体,制备了PVDF/POK/CNTs复合材料。润湿系数计算及扫描电子显微镜(SEM)照片表明,CNTs选择分布于POK相,且当CNTs体积分数为2%时,该复合材料在X波段范围内SE可达到21 dB。S. P. Pawar等^[30]通过重氮化反应将多壁CNTs(MWNTs)化学接枝至多巴胺改性的四氧化三铁(Fe_3O_4)纳米颗粒上,得到MWNT-g- Fe_3O_4 纳米粒子,并将其应用于具有双连续结构的聚碳酸酯(PC)/苯乙烯-丙烯腈共聚物(SAN)中,根据润湿系数计算及SEM显示,MWNT-g- Fe_3O_4 选择分布于PC相,当采用质量分数为3%的MWNTs与体积分数为3%的多巴胺改性 Fe_3O_4 反应生成的纳米粒子时,材料在18 GHz时SE可达到32.5 dB,且以吸收损耗为主要屏蔽机制。

S. Biswas等^[31]在PC/PVDF共混物(质量比为60/40)中添加3-氨丙基三乙氧基硅烷改性BaFe及离子液体改

性 CNTs (IL-CNTs),采用将改性 BaFe 先与 PC 形成母粒,再与 PVDF 及 IL-CNTs 熔融挤出的方法,使改性 BaFe 被限制分布于 PC 相,而 IL-CNTs 选择分布于 PVDF 相,所得材料具有共连续形貌且当两填料质量分数分别为 5% 与 2% 时,材料在 8.2~18 GHz 范围内 SE 达 34 dB,其中吸收损耗占 61.8%。A. V. Menon 等^[27]研究了 CNTs 与 FeNi 在 PVDF/苯乙烯-马来酸酐共聚物(SMA)共连续结构中的分布对材料 SE 的影响,未改性的 CNTs 与 FeNi 选择分布于强极性的 PVDF 相,而采用 3-氨基三乙氧基硅烷改性后,填料表面的氨基与 SMA 的马来酸酐发生化学反应,使其选择分布于 SMA 相。实验结果表明,当添加质量分数 5% 的改性 CNTs 和质量分数 30% 的 FeNi 时,材料的电磁屏蔽能力最强,SE 可达到 23 dB,其中吸收损耗占 92%。

3 泡孔结构

泡孔结构在聚合物基电磁屏蔽复合材料中的研究十分热门。聚合物发泡可以实现材料性能的显著提升。首先,发泡材料质量轻,适用于航天航空等高新技术领域;其次,通过发泡将碳系导电填料排挤至孔壁内,使得低添加量便可达到高电导率;最后,空气的存在使得材料介电常数实部降低,从而降低了材料表面的反射率,避免电磁波二次污染^[32-33]。

Ling Jianqiang 等^[34]通过相分离工艺制备了轻质微孔聚醚酰亚胺(PEI)/石墨烯纳米片(GNP)复合泡沫材料。发泡过程中的延伸流诱导了位于孔壁上的 GNP 再分散和取向,使得材料逾渗阈值从体积分数 0.21% 降低至 0.18%,当 GNP 质量分数 10% 时,比屏蔽效能从 17 dB·cm³/g 升至 44 dB·cm³/g。同时,发泡材料产生的细胞结构进一步增加了电磁波在材料内部的吸收,使得吸收损耗占 99%。Shen Bin 等^[35]通过共沉淀法制备了 Fe₃O₄ 修饰的石墨烯杂化粒子(G@Fe₃O₄),并将其应用于 PEI 中形成发泡材料,当 G@Fe₃O₄ 质量分数为 10% 时,发泡材料在 9.6 GHz 时 SE 为 17.8 dB,其中吸收屏蔽效能占比 97.2%。这是因为 Fe₃O₄ 的引入改善了材料表面的阻抗匹配,使得绝大部分电磁波能进入材料内部,同时通过介电损耗和磁损耗机制的结合,以及电磁波在泡孔中及石墨片间多次反射,提高了电磁屏蔽效能,增加了吸收损耗占比。Yang Hongli 等^[36]采用简单的溶剂蒸发诱导相分离法制备了含有还原氧化石墨烯(RGO)和 CNTs 的聚醚酰亚胺(PI)发泡材料,当总填料质量分数为 8% 时,PI/RGO,PI/CNTs 和 PI/RGO/CNTs 发泡材料的电导率分别为 0.05,0.02,1.87 S/m,X 波段范围 SE 分别达到 13.7~15.1 dB,13.0~14.3 dB 和 16.6~18.2 dB。

Zhang Hongming 等^[37]分别采用三种石墨烯与 CNTs 形成杂化粒子,并将其应用于聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)基体中制备发泡材料。结果表明,通过高温热还原制备的

石墨烯(TG)与 CNTs 交联后形成的 TG-CN 杂化粒子具有最佳的性能,当 TG-CN 质量分数为 10% 时,发泡材料在 X 波段的 SE 最高可达 30.4 dB,相比于未发泡前的复合材料提高了 40.7%。Fan Xun 等^[38]采用二氧化碳法制备了环氧树脂(EP)/端羧基聚丁二烯丙烯腈(CTBN)/CNTs 发泡材料,当 CNTs 质量分数为 5% 时,材料电导率为 0.43 S/m,SE 达 22.9 dB,比电磁屏蔽效能为 37.54 dB·cm³/g。Zhao Yishen 等^[39]采用熔融共混法制备了聚乙烯(PE)/PVDF/Fe₃O₄/CNTs 复合材料,通过改变加料顺序使 Fe₃O₄ 和 CNTs 分别选择分布于 PVDF 分散相和 PE 连续相中,再通过调控发泡温度制备了空心核-壳结构发泡材料,当 Fe₃O₄ 与 CNTs 质量分数分别为 5% 和 10% 时,材料电导率为 0.25 S/cm,在 Ku 波段(18~26.5 GHz)范围内 SE 最高可达 26 dB。

4 层状结构

相比于隔离结构、共连续结构和泡孔结构,层状结构的聚合物基电磁屏蔽复合材料具有更为优异的设计灵活性,其广泛应用于多功能电磁屏蔽材料的设计制备^[40]。层状结构通过将均匀分布在基体中的导电填料集中在一层或多层,通过增加层间界面,提高多重反射,进而使得大量电磁波被吸收损耗^[41]。不仅如此,通过设计构建导电/导磁多层梯度结构,有效调控与自由空间界面处的阻抗失配,减少二次污染。

赵文鹏等^[42]将 PVDF/CB 复合材料与纯 PVDF 层层叠合,当 CB 质量分数 8% 时层状材料 SE 为 17~26 dB,而 PVDF/CB 复合材料 SE 约为 12 dB,这是因为相比较于传统共混体系,CB 在层状结构中的分布更为集中,易于形成导电网络,使得材料电导率提高,从而提升电磁屏蔽能力。Lu Zhengang 等^[43]制备了超薄导电层插层的高透明 PET/石墨烯复合材料,随着层数增加,该材料电磁屏蔽效能不断提高。当层数达 8 层时,材料在 Ku 波段下 SE 达 19.14 dB,其中吸收屏蔽效能占 96%,此时石墨烯层总厚度仅为 4 nm。S. Pande 等^[44]采用 PMMA 与 CNTs 溶液共混制备 CNTs 质量分数为 10% 的薄膜,随后通过热压将 PMMA/CNTs 薄膜堆叠形成多层结构,当堆叠层数达 7 层时,材料在 X 波段范围内 SE 最高可达 40 dB,优于整体结构材料。

Liu Yanju 等^[45]以 EP 为基体,以纳米 Fe₃O₄、纳米 Fe 及 CNTs 为填料,堆叠形成“阻抗匹配层-吸收层-反射层”三层结构复合材料。其中阻抗匹配层为含质量分数 15% 纳米 Fe₃O₄ 的 EP/Fe₃O₄ 或质量分数 15% 纳米 Fe 的 EP/Fe 复合材料,吸收层为 CNTs 质量分数为 5% 的 EP/CNTs 复合材料,反射层为 CNTs 质量分数为 10% 的 EP/CNTs 复合材料。此三层结构复合材料在 3.22~40 GHz 波段范围内 SE 最高可超过 100 dB。Zhang Liangqing 等^[46]以聚环氧乙烷(PEO)

/CNTs 作为屏蔽层,纤维素 /CNTs 薄膜作为基底层,制备了具有层状结构的复合材料,该材料在 12 GHz 下 SE 可达到 30~35 dB,相比于整体结构材料提高了约 50%。这是因为 PEO/CNTs 层具有高导电率,入射的电磁微波进入该层后被大量吸收,转化为焦耳热耗散,透过的电磁波在导电层之间多次反射和散射进一步衰减,此外,导电层与纤维素层之间的界面导致电磁波界面极化,从而使得材料具有优异的电磁屏蔽效能。

5 结语

聚合物基电磁屏蔽复合材料的结构调控,可显著提高填料的有效利用率,在低填料添加量下便可达到优异的导电性能与电磁屏蔽效能。通过体积排除作用将填料定位在聚合物间的界面处,或利用聚合物共混物中相间差异将填料选择分布于某一相内,或通过发泡技术及分层设计提高填料的有效浓度等,都可实现碳系导电填料在聚合物基体中高效导电网络的构筑,同时产生众多界面以增加多重反射作用,从而大大提升材料电磁屏蔽效能。

随着电磁屏蔽材料在电子信息等领域的需求不断增加,低成本高效益成为挑战,因此聚合物基电磁屏蔽复合材料结构调控的重要性尤为突出。未来该领域研究重点主要包括高导电填料的制备、填料与基体的界面调控、三维高效网络的预构技术及综合性能调控等方面。

参考文献

- [1] Liu Ji, et al. *Advanced Materials*, 2017, doi:10.1002/adma.201702367.
- [2] Ahmad A F, et al. *Polymers*, 2020, doi:10.3390/polym12020427.
- [3] Yang Xutong, et al. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*, 2020, doi:10.1016/j.compositesa.2019.105670.
- [4] Dravid S V, et al. *Journal of Electronic Materials*, 2020, 49(3):1 630–1 637.
- [5] Yuan Ye, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(25):21 371–21 381.
- [6] Zhu Shoupu, et al. *Carbon*, 2019, 145:259–265.
- [7] Das N C, et al. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*, 2000, 31(10):1 069–1 081.
- [8] Al-Saleh M H, et al. *Carbon*, 2013, 60:146–156.
- [9] Singh B P, et al. *Journal of Nanoparticle Research*, 2011, 13(12):7 065–7 074.
- [10] Mutlay İ, et al. *Fullerenes, Nanotubes, and Carbon Nanostructures*, 2014, 22(5):413–433.
- [11] Ganguli S, et al. *Carbon*, 2008, 46(5):806–817.
- [12] Singh B P, et al. *Journal of Nanoparticle Research*, 2013, 15(4):1–12.
- [13] Al-Saleh M H, et al. *Carbon*, 2009, 47(7):1 738–1 746.
- [14] Shi Yunyun, et al. *Composites Part B:Engineering*, 2013, 55:463–469.
- [15] Yan Dingxiang, et al. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(4):559–566.
- [16] Yu Wancheng, et al. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*, 2018, 110:237–245.
- [17] Pang Huan, et al. *Journal of Materials Chemistry A:Materials for Energy and Sustainability*, 2013, doi:10.1039/c3ta10242d.
- [18] Jia Lichuan, et al. *Carbon*, 2017, 121:267–273.
- [19] Chang Chenggong, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2020, doi:10.1002/app.48709.
- [20] Yan Dingxiang, et al. *Nanotechnology*, 2014, doi:10.1088/0957-4484/25/14/145705.
- [21] Jia Lichuan, et al. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018, 57(35):11 929–11 938.
- [22] Wu Hongyuan, et al. *Composites Science and Technology*, 2018, 156:87–94.
- [23] Cui Chenghua, et al. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2016, 4(8):4 137–4 145.
- [24] Wu Hongyuan, et al. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018, 57(37):12 378–12 385.
- [25] Zhang Yunpeng, et al. *Composites Science and Technology*, 2020, doi:10.1016/j.compscitech.2020.108253.
- [26] Sultana S M N, et al. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019, 58(26):11 576–11 584.
- [27] Menon A V, et al. *Physical Chemistry Chemical Physics:PCCP*, 2016, 19(1):467–479.
- [28] Sadeghi A, et al. *Polymer Composites*, 2019, 40(S2):E1 461–E1 469.
- [29] Yang Yan, et al. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*, 2020, doi:10.1016/j.compositesa.2020.105967.
- [30] Pawar S P, et al. *Journal of Materials Chemistry A:Materials for Energy and Sustainability*, 2015, 3(2):656–669.
- [31] Biswas S, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(45):25 448–25 463.
- [32] Thomassin J, et al. *Polymer*, 2012, 53(1):169–174.
- [33] Zhang Hongming, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 353:381–393.
- [34] Ling Jianqiang, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5(7):2 677–2 684.

- 1068.
- [17] Ma Piming, et al. *Industrial & Engineering Chemical Research*, 2014, 53:12 888–12 892.
- [18] Ma Piming, et al. *European Polymer Journal*, 2015, 70:400–411.
- [19] Bai Hongwei, et al. *Macromolecules*, 2011, 44:1 233–1 237.
- [20] Fan Yinqing, et al. *Polymer*, 2015, 67:63–71.
- [21] Li Chunhai, et al. *Biomacromolecules*, 2017, 18:1 440–1 448.
- [22] Kong Weili, et al. *Polymer*, 2019, 168:77–85.
- [23] Ma Piming, et al. *European Polymer Journal*, 2017, 87:221–230.
- [24] Shen Tianfeng, et al. *Polymers*, 2016, 8:431.
- [25] Zhang Huanhuan, et al. *Polymer Testing*, 2017, 64:12–19.
- [26] Bai Hongwei, et al. *Polymer*, 2014, 55:6 924–6 934.
- [27] Zhang Huixian, et al. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2016, 4:3 939–3 947.
- [28] 彭爽娟, 等. *高分子材料科学与工程*, 2019, 35(9):109–113.
- Peng Shuangjuan, et al. *Polymeric Materials Science and Engineering*, 2019, 35(9):109–113.
- [29] Bai Hongwei, et al. *Biomacromolecules*, 2014, 15:1 507–1 514.
- [30] Li Chunhai, et al. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, 6:6 247–6 255.

(上接第 168 页)

- [35] Shen Bin, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5(21):11 383–11 391.
- [36] Yang Hongli, et al. *Applied Surface Science*, 2018, 434:318–325.
- [37] Zhang Hongming, et al. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*, 2020.doi:10.1016/j.compositesa.2020.105773.
- [38] Fan Xun, et al. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*, 2019, 121:64–73.
- [39] Zhao Yishen, et al. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*, 2020.doi:10.1016/j.compositesa.2020.106095.
- [40] Song Weili, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(41):36 119–36 129.
- [41] Biswas S, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(3):3 030–3 039.
- [42] 赵文鹏, 等. *塑料工业*, 2014, 42(7):93–96.
- Zhao Wenpeng, et al. *China Plastics Industry*, 2014, 42(7):93–96.
- [43] Lu Zhengang, et al. *Nanoscale*, 2016, 8(37):16 684–16 693.
- [44] Pande S, et al. *Nanoscale Research Letters*, 2009, 4(4):327–334.
- [45] Liu Yanju, et al. *Composites Part B:Engineering*, 2014, 63:34–40.
- [46] Zhang Liangqing, et al. *Journal of Materials Chemistry C:Materials for Optical and Electronic Devices*, 2017, 5(12):3 130–3 138.