

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.05.029

石墨烯改性 PA6 纳米复合材料研究进展

王学军^{1,2}, 冯建立^{1,2}, 陈茜茹^{1,2}, 周云辉^{1,2}

(1. 炼焦煤资源开发及综合利用国家重点实验室, 河南平顶山 467000; 2. 中国平煤神马能源化工集团有限责任公司, 河南平顶山 467000)

摘要: 概述了尼龙 6 / 石墨烯纳米复合材料的制备方法, 包括原位聚合法、溶液共混法、熔融共混法和其它复合法。详细介绍了石墨烯在 PA6 改性方面的应用情况, 包括强化界面结合、改善导热性能、增强摩擦性能、赋予导电性能、提高阻隔性能和抗菌性能等。

关键词: 石墨烯; 尼龙 6; 纳米复合材料; 制备; 应用

中图分类号: TQ323.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)05-0153-05

Progress of Graphene Modified PA6 Nanocomposites

Wang Xuejun^{1,2}, Feng Jianli^{1,2}, Chen Qianru^{1,2}, Zhou Yunhui^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coking Coal Exploitation and Comprehensive Utilization, Pingdingshan 467000, China;

2. China Pingmei Shenma Energy & Chemical Industry Group Co., Ltd., Pingdingshan 467000, China)

Abstract: The preparation methods of graphene nylon 6 nanocomposites were summarized, the methods including in situ polymerization, solution blending, melt blending and other composite methods. The applications of graphene in the modification of PA6 were introduced in detail, including strengthening interfacial adhesion, increasing thermal conductivity, enhancing tribological property, endowing conductivity, improving barrier and antibacterial performances.

Keywords: graphene; polyamide 6; nanocomposites; preparation; application

尼龙 6 (PA6) 是由己内酰胺缩聚而成的热塑性半结晶聚合物, 以其高韧性、低摩擦系数、优良的冲击性能和优良的高温承载能力而成为用量较大的工程塑料之一。PA6 主要应用于食品包装薄膜、容器、机械零部件、汽车等领域, 但由于吸水率高、耐热耐光性差、尺寸稳定性欠佳等缺点限制其应用范围。因此, 对 PA6 进行功能化和高性能化改性越来越受到学术界和工程技术人员的关注, 其中纳米复合材料是主要的研究方向之一^[1]。纳米复合材料是以聚合物为基体连续相, 以纳米尺度的填充物为分散相的复合材料。

石墨烯类碳材料, 包括氧化石墨烯 (GO)、还原氧化石墨烯 (rGO) 等衍生物, 是一种新型二维材料, 稳定的晶格网络及片层结构赋予其比表面积高、力学强度高、电性能和热性能优异等独特性能。利用石墨烯与 PA6 复合, 有助于改善聚合物的结晶形貌、微观结构等性质, 可以显著提高聚合物纳米复合材料的综合性能^[2]。笔者从近几年的报道入手,

介绍了石墨烯类纳米材料改性 PA6 的最新进展, 包括复合材料制备方法和性能改进方向, 存在的问题及应用前景等。

1 石墨烯改性 PA6 复合材料的制备方法

1.1 原位聚合法

GO 表面具有丰富的含氧官能团, 理论上可以与尼龙分子通过氢键或化学键作用达到分散的均匀性与结合的牢固性。原位聚合法可实现聚合和复合同步完成, 能促进石墨烯的剥离与分散, 同时提高 PA6 与石墨烯的界面结合^[2]。A. O' Neill 等^[3]对 PA6 / GO 原位聚合过程进行了系统研究, 发现聚合过程中 GO 的还原, 也正因此 GO 片与 PA6 链实现了功能化。原子力显微镜 (AFM) 显示, 聚合后的石墨烯片中存在单层 GO, 片高增加到约 4 nm。这表明, 石墨烯作为高分子链形成的基础, 导致填料和基体之间产生良好的界面相互作用。石墨烯的加入还可以用于调整结晶速率和结晶度, 以获得需要的结晶形态和性能。张芬萍等^[4]采用氨基化

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC0604706)

通信作者: 冯建立, 博士, 高级工程师, 从事化学合成与新材料研究 E-mail: elephantfeng@163.com

收稿日期: 2021-02-19

引用格式: 王学军, 冯建立, 陈茜茹, 等. 石墨烯改性 PA6 纳米复合材料研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(5): 153-157.

Wang Xuejun, Feng Jianli, Chen Qianru, et al. Progress of graphene modified PA6 nanocomposites[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(5): 153-157.

石墨烯 (AG) 研究了原位聚合过程中 PA6 的非等温结晶行为,发现 PA6 基体中的 AG 能起到异相成核的作用,使 PA6 的结晶温度提高,同时加快了 PA6 的结晶速率,可以为实际生产提供理论依据。

1.2 溶液共混法

溶液共混法是直接将石墨烯和 PA6 同时溶解于溶剂中,经充分分散 PA6 基体及石墨烯,再除去溶剂后得到 PA6 / 石墨烯纳米复合材料。Gong Lei 等^[5]用 GO 与聚乙烯醇 (PVA) 通过酯键进行共价改性,将改性产物 (GO-es-PVA) 溶解在甲酸中,然后与 PA6 的甲酸溶液共混,通过超声形成稳定的溶液状分散体,然后用去离子水将产物沉淀出来干燥得到复合材料。由于接枝聚合物链的存在,PA6 / GO-es-PVA 复合材料中 GO 片在 PA6 基体中均匀分散,纳米片与基体的界面结合力显著提高。另外 A. Allahbakhsh 等^[6]采用溶液浇铸法制备了功能化稻壳和稻壳灰增强 PA6 / GO 纳米复合材料。GO 和稻壳灰作为一种有机 / 无机纳米体系同时存在于基体结构中,使得最终纳米复合材料的结构和力学性能得到明显提高。

1.3 熔融共混法

熔融共混法是借助高温和剪切力作用将石墨烯均匀分散于高分子基体中,是快速制备聚合物 / 石墨烯纳米复合材料的简便方法。J. Gómez 等^[7]采用双螺杆挤出法对石墨烯相关材料和 PA6 进行了熔融复合,发现硅烷功能化 rGO 在其质量分数为 0.5% 时,PA6 / 硅烷功能化 rGO 复合材料的熔体流动速率 (MFR) 增加了 76% 以上,促进了石墨烯在基体中的加工和分散,复合材料的拉伸弹性模量和拉伸强度增加了 39%。Fu Xubing 等^[8]则采用液态反应挤出工艺制备了 PA6 / 少数层石墨烯 (FLG) 纳米复合材料。

1.4 其它复合法

以上方法各有优缺点,原位聚合法分散效果好,但过程复杂、不易控制;溶液共混法分散均匀,但需要寻找适合溶剂及考虑溶剂回收;熔融共混法操作简单易放大,但容易造成分散不均匀。因此,最近一些新的方法,如原位聚合-诱导相转化结合制备 PA6 / rGO 复合微球^[9]、溶液-熔融两步复合制备 PA6 / GO 纳米复合材料等^[10]。Chen Long 等^[11]采用静电纺丝和电喷雾相结合的方法方便地制备出柔性自立式多层纳滤膜,显著提高了膜的纯水通量和有机染料截留率。

2 石墨烯复合材料性能与应用

2.1 强化界面结合

PA6-GO 体系引起了人们极大的兴趣,因为 GO 可以与 PA6 的 $-NH_2$ 端基反应,形成一种“扩链剂”,从而影响聚合物结晶度和复合材料微结构^[12],进而在加工-结构-性能关

系方面引起有益的变化。由于聚合物链与纳米填料之间的界面粘附力对纳米复合材料的性能有很大的影响,研究者们提出了各种方法来改善 PA6 / 纳米复合材料的性能。将 GO 先进行功能化,再与 PA6 复合是一种有效的方法。J. Minář 等^[13]用 GO 引发 ϵ -己内酯的聚合,热重 (TG) 分析和傅立叶变换红外光谱 (FTIR) 证实了 GO 与聚己内酯之间存在共价键。通过含有功能化 GO 的 ϵ -己内酰胺的原位聚合,得到存在单一剥离纳米填料层的 PA6 纳米复合材料,并提高了 GO 与 PA6 的界面结合力。

玄武岩纤维 (BF) 由于其出色的力学强度及良好的耐高温性和耐化学药品性,在纤维增强方面引起了越来越多的关注。但因界面粘结性差,制约了其在先进复合材料领域的进一步推广应用。为了提高 BF 与 PA6 基体之间的界面结合力,石墨烯被用于 PA6 / BF 的复合界面增强中^[14]。与未添加石墨烯的 PA6 / BF 相比,拉伸强度和弯曲强度分别提高了 18.2% 和 34%,并获得了较低的摩擦系数和较高的耐磨性能。这是由于石墨烯的桥效应,生成了机械啮合的纳米界面,改善了复合材料的应力传递。Zhao Xiaoran 等^[15]将 PA6 / GO 复合材料作为新型层间增韧增粘剂应用于织物增强环氧复合材料方面,显著提高了层间断裂韧性。认为 PA6 / GO 具有良好的颗粒 / 基体界面、较粗糙的小凸结构和较高的颗粒断裂能耗是其优异的增韧效果的主要原因^[16]。

2.2 提高力学性能

石墨烯具有较高的比表面积和较强的力学性能,将石墨烯应用到材料中理论上会大大增加材料的综合性能。首先要解决的是分散性,采用反应挤出、三元复合、石墨烯功能化等方法可以有效地提高石墨烯在复合材料基体中的分散度^[17-18]。S. H. Hwang 等^[19]采用熔融纺丝法制备石墨烯复合材料。与纯 PA 纤维相比,GO 的质量分数为 1% 的复合纤维的拉伸强度提高了 76%。这种效应可以通过使用小尺寸 of 的石墨烯、表面功能化和最大化纤维拉伸比来放大。采用动态力学分析、X 射线衍射 (XRD) 和扫描电子显微镜 (SEM) 等方法研究了 PA6 复合纤维的结晶动力学和界面结合对其拉伸性能的影响。

田银彩等^[20]则发现添加石墨烯诱导 PA6 由 γ 晶型向 α 晶型转变,控制适度的石墨烯含量可以保证其分散均匀并实现最大的拉伸强度和断裂伸长率。J. Macossay 等^[21]证实了在 PA6 微纳米纤维中加入氮氧化物功能化氧化石墨烯 (GOFT) 可以诱导 PA6 与 GOFT 之间形成氢键,从而提高聚合物基体的结晶度。并提出两种准稳态多晶型 (β 相和 δ 相) 的存在和高比率 (46%) 是导致拉伸性能同时增强的原因。

Wang Huihui 等^[22]研究了纳米复合材料在低负荷下的

力学性能突然下降的问题,发现一种切断机制,揭示了在整个聚合物基体中形成连续或半连续的石墨烯网络是性能突然下降的主要原因,为复合材料力学性能的改进提供了新的认识。

2.3 改善导热性能

PA6 的热导率在 0.20 W/(m·K) 左右,在聚合物基体中填充石墨烯类高导热填料可拓展其在散热材料领域中的应用。表 1 列出了近年有关石墨烯复合改性 PA6 材料导热

表 1 石墨烯改性 PA6 导热性能研究

序号	石墨烯改性方法	PA6 材料复合方法	质量分数 / %	热导率增加率 / %	发表年份
1	还原氧化石墨烯	原位开环聚合共价接枝	10	210	2014
2	NH ₂ -PEG-NH ₂ 共价官能化石墨烯	溶液共混法	5	200	2015
3	石墨烯泡沫 (GF) 构建的三维石墨烯结构	原位热缩聚制备玻璃纤维	2	300	2016
4	碳化硅晶须 (SiCw) 桥效应	密炼机熔融搅拌	2	199	2017
5	球磨法原位剥离为 PA6 中的单层石墨烯片	熔融稀释法	5	85	2017
6	氧化石墨烯 (GO) 的还原和自组装	原位聚合法	0.25	288	2018
7	商品石墨烯片,未经功能化处理	溶液和熔融共混相结合	20	1167	2019
8	碳酸钙和石墨烯微片双组分添加	熔融共混法	15	426	2020
9	在石墨烯片上接枝聚酰胺可混溶聚醚组分	挤出复合法	28	300	2020

性能的研究结果^[23-31]。可以看出,石墨烯类纳米材料在提高导热性方面效果比较突出,这可归因于石墨烯材料出色的热导率、超大的比表面积和较好的分散性。

在改善热导率的同时,提高复合材料抗氧化降解性能是另外一个研究热点。石墨烯等碳族材料因独特的电子结构,表面能吸附并灭活聚合物降解过程中产生的自由基,同时其层状结构可以阻碍气体分子的扩散和降解产物的逸出,因此具有抗氧化的能力。研究表明,可通过控制 PA6 晶形^[32]、提高 GO 氧化度^[33]以及掺杂抗氧剂^[34]等来提高自由基清除率、抑制 PA6 分子的氧化降解。

2.4 润滑耐磨性能

尼龙材料可用作轴承、轴套、齿轮等耐磨部件,适用于很多苛刻的工况条件,具备金属耐磨部件所不具备的性能。石墨烯的片层结构赋予其出色的自润滑性,作为添加剂可以进一步提高材料的摩擦磨损性能。氨基改性石墨烯可以实现石墨烯与 PA6 基质间的“锚定”,改善分散性和粘结性,进而提高耐磨性。Chen Yue 等^[35]通过 *N*-(2-氨基乙基)-3-氨基丙基三甲氧基硅烷锚定在石墨烯片表面 (AMG),采用共混方法制备了不同石墨烯含量的 PA6 / AMG 复合材料。结果表明,PA6 / AMG 复合材料的摩擦系数比纯 PA6 低 44.6%,磨损率降低 33.2%。Sun Lei 等^[36]则采用八氨基多面体低聚倍半硅氧烷 (POSS) 功能化 GO 制备了 PA6 / rGO-POSS 纳米复合材料。与 PA6 相比,rGO-POSS 质量分数为 0.3% 的 PA6 / rGO-POSS 纳米复合材料的摩擦系数降低了 86.36%。磨痕深度和宽度分别减少 79.64% 和 70.69%。研究发现,rGO-POSS 在基体中是自固定的,能有效地提高界面结合强度。Wang Liping 等^[37]使用聚氨酯泡沫载体设计多孔 3D 石墨烯润滑剂,然后通过将单体浇铸 PA6(MCPA6) 注入 3D 石墨烯润滑剂中来制备自润滑复合材料,其耐磨性是纯 MCPA6 的 160 倍以上。该研究为在恶劣摩擦条件下设计三

维石墨烯复合材料开辟了新的思路。

2.5 导电性能

石墨烯中的大 π 键使其 π 电子可以自由移动,赋予了石墨烯优异的导电性,其电子迁移率约是硅中电子迁移率的 140 倍,是室温下导电性能最佳的材料。Xiang Meng 等^[38]以工业化生产的 rGO 产品为基础,制备了具有高接枝率异氰酸酯活性中心的 rGO-TDI 石墨烯前驱体,并通过反应熔融法制备了一系列 PA6 / rGO-TDI 复合材料。剥离态 rGO-TDI 的分子桥效应降低了导电网络形成的活化能,导致复合材料的导电性在低阈值下迅速增加。按照这一思路,他们还用反应熔融法制备了 PA6 / 纤维素-rGO-TDI 纳米复合材料^[39]。在 rGO 体积分数为 1.2% 时,复合材料的电导率显著提高,为 0.58 S/m。

尼龙微球是一种性能优良的新型高科技材料,在生物医药、激光烧结 3D 打印及光扩散等领域有广阔的应用前景。考虑到石墨烯和聚合物纳米微球的粒径相近,且两者具有较高的比表面积,通过将石墨烯与微球共混制备聚合物 / 石墨烯复合材料可以避免传统熔融共混法的缺点。此外,石墨烯能在聚合物基体中形成互穿网络 (IPN) 结构,分散均匀,对纳米复合材料性能有明显改善。Ma Meng 等^[40]采用溶液共混和热压成型的方法制备了以 rGO 和 PA6 为基体的高性能复合材料,由于成功地形成了隔离结构而呈现出优异的电性能。Fu Xubing 等^[41]则采用反应诱导相分离法合成了 PA6 微球,并用剥离吸附法将其包裹在 GO 上,使 GO 片在 PA6 基体中形成三维网络结构。电性能和力学性能表征看出,GO 使 PA6 复合材料的性能有了明显的提高,优于传统的聚合物 / 石墨烯复合材料。

2.6 提高阻隔性能

石墨烯是一种潜在的理想阻隔材料,即使对最小的气体分子也是不可渗透的^[42]。T. P. Raine 等^[43]将石墨烯纳米

片夹在 PA6 的两个圆盘之间构成的层压板具有优异的阻隔性能。在超临界条件下,将 CO_2 渗透率降低了一个数量级以上,并将 H_2S 渗透率降低到无法检测的水平。PA6 具有耐透氧性,但不耐水和水蒸气。另一方面,聚丙烯 (PP) 具有优异的防潮性能。M. Gómez 等^[44]采用熔融共混法制备了含热还原氧化石墨烯 (TrGO) 的 PP 和 PA6 纳米复合材料,发现 TrGO 在聚合物基体中有较好的分散性,且两种聚合物的结晶度都略有降低。Lin Fenglong 等^[45]引入聚酮 (PK),采用熔融共混-双向拉伸工艺制备了双向取向的 PA6/PK/GO 薄膜,能很好地改善 PA6/PK/GO 薄膜的阻隔性能,当 PK 质量分数为 20% 以及 GO 质量分数为 0.08% 时膜的透氧率减少了 94.7%。这是因为气体渗透路径更加曲折,对氧和水蒸气的渗透性降低,而 GO 的加入使聚合物相对结晶度提高。

2.7 实现阻燃性能

纯 PA6 极易燃烧,未经阻燃的 PA6 阻燃等级较低,垂直燃烧只能达到 UL94 V-2 级,极限氧指数 (LOI) 为 24% 左右,燃烧过程中产生滴落,引发火灾^[46]。由于石墨烯结构稳定,且均匀分散的石墨烯片可以充当物理障碍,减少复合材料燃烧过程中气体的渗透和材料的降解,阻止氧气的供应,从而可以充当阻燃剂的角色^[47]。Hong Ningning 等^[48]研究了石墨烯负载 Co_3O_4 和 NiO 复合材料对 PA6 的阻燃性能。这两种改性石墨烯都提高了 PA6 的防火安全性,表现为热释放峰值时间的延迟和热释放速率、CO 生成速率以及总烟气生成量的降低。这种改性主要是由于石墨烯层的物理阻挡和金属化合物的催化碳化的综合作用。Zhu Jiawen 等^[49]采用 GO 改性 GF 增强 PA6 与磷酸二乙酯铝共混制备阻燃 PA6。锥形量热计测试结果表明,复合材料的 LOI 提高到 31.2%,垂直燃烧试验 (UL 94) 达到 V-0 级,峰值放热率降低了 18.0%。分析认为 GO 的引入大大提高了界面相容性。GO 在石墨烯片状结构表面可以阻止可燃气体的溢出和熔体沿玻璃纤维的流动,从而显著地减弱了芯吸效应,提高了复合材料的阻燃性能。

2.8 增强抗菌性能

在纺织工业、生物医学和生物技术应用中,对多功能和高强度纤维的需求大幅增加。Zhang Yunhai 等^[50]开发了一种高效环保的方法制备功能化氧化石墨烯 (FGO),并用于 PA6 复合功能纤维。当 FGO 的质量分数为 0.5% 时,PA6 复合功能纤维的拉伸强度达到 4.21 cN/dtex,拉伸弹性模量达到 33.86 cN/dtex,分别提高了 31.6% 和 33.6%。此外,在 FGO 低质量分数 (0.9%) 的情况下,织物的紫外线防护系数提高到 471 以上,抗菌性能也提高到一定水平 (抗菌效果 >94%),表明织物能有效防止细菌的侵害。这些功能化和复

合制备方法为制备高强度、多功能的石墨烯基纳米复合纤维提供了一条方便、可扩展的途径,在纺织、生物医学、生物技术等领域有着广阔的应用前景。

2.9 屏蔽电磁干扰

电磁干扰 (EMI) 是高频电子设备扩散的不良副产品,可干扰其它设备的正常运行,并可能因长时间暴露而对健康造成不利影响。丝状材料可以用于电磁应用的部件印刷,通过辐射吸收、反射实现 EMI 屏蔽。屏蔽层的电磁干扰屏蔽效能除了其固有的介电特性外,还取决于屏蔽层的厚度和其它阻碍波在屏蔽层中传播的几何特征。K. P. M. Lee 等^[51]研究了 PA6/石墨烯复合长丝在长丝基材料挤出制造中的应用。较高的石墨烯浓度并未影响熔体流动性能,赋予了复合材料优越的拉伸弹性模量和拉伸强度。SEM 显示,石墨烯在复合材料中排列整齐,测试发现石墨烯的加入提高了 PA6 的介电性能和电磁干扰。

3 结语

通过适当的制备方法将石墨烯类碳材料均匀地分散于 PA6 基体中形成纳米复合材料,可以赋予复合材料优异的综合性能,包括力学性能、热性能、电性能、摩擦性能、阻隔性能、阻燃性能等。石墨烯在复合材料中的分散均匀性是形成协同效应、获得优异性能的先决条件。为此要在石墨烯的改性、复合方法、机理研究等方面继续深入,进一步简化方法,降低成本,在大幅度提高各项性能的同时实现负载量最小化。相信,随着科学和技术研究方面的挑战不断突破,石墨烯类碳材料的应用将更加广泛。

参考文献

- [1] 林海亚,等. 化工新型材料,2018,46(8):133-135.
Lin Haiya, et al. New Chemical Materials, 2018, 46(8):133-135.
- [2] 黄欢,等. 材料研究学报,2019,33(8):621-628.
Huang Huan, et al. Chinese Journal of Materials Research, 2019, 33(8):621-628.
- [3] O' Neill A, et al. Polymer Composites, 2017, 38(3):528-537.
- [4] 张芬萍,等. 高分子通报,2019(5):59-64.
Zhang Fenping, et al. Chinese Polymer Bulletin, 2019(5):59-64.
- [5] Gong Lei, et al. Composites Part B, 2015(73):49-56.
- [6] Allahbakhsh A, et al. European Polymer Journal, 2017(94):417-430.
- [7] Gómez J, et al. Results in Materials, 2020(7).doi.org / 10.1016 / j.rinma.2020.100105.
- [8] Fu Xubing, et al. RSC Advances, 2015, 5(94):77 316-77 323.
- [9] Zhang Na, et al. Chemistry Select, 2019, 4(38):11 294-11 301.
- [10] Scaffaro R, et al. Composites Part B:Engineering, 2019(165):55-64.
- [11] Chen Long, et al. Chemical Engineering Journal, 2018(345):536-544.

- [12] Melo C C N, et al. *Thermochimica Acta*, 2018(667):111–121.
- [13] Minář J, et al. *Composites Part B:Engineering*, 2019.doi.org / 10.1016 / j.compositesb.2019.107019.
- [14] Zhou Shaofeng, et al. *Materials Chemistry and Physics*, 2018 (217):315–322.
- [15] Zhao Xiaoran, et al. *Composites Science and Technology*, 2020(191).doi.org / 10.1016 / j.compscitech.2020.108094.
- [16] Zhao Xiaoran, et al. *Composites Science and Technology*, 2019 (171):180–189.
- [17] Fu Xubing, et al. *European Polymer Journal*, 2019(110):97–106.
- [18] Elmarakbi A, et al. *Applied Materials Today*, 2017(6):1–8.
- [19] Hwang S H, et al. *Composites Part B:Engineering*, 2016(100):220–227.
- [20] 田银彩, 等. *工程塑料应用*, 2020, 48(7):128–131.
Tian Yincui, et al. *Engineering Plastics Application*, 2020, 48(7):128–131.
- [21] Macossay J, et al. *Macromolecular Rapid Communications*, 2020, 41(21).doi.org / 10.1002 / marc.202000195.
- [22] Wang Huihui, et al. *Polymers for Advanced Technologies*, 2020, 31(4):786–794.
- [23] Ding Peng, et al. *Carbon*, 2014(66):576–584.
- [24] Song Na, et al. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*, 2015(73):232–241.
- [25] Li Xuheng, et al. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*, 2016(88):305–314.
- [26] Song Na, et al. *RSC Advances*, 2017, 7(73):46306–46312.
- [27] Wei Pingfu, et al. *Composites Science and Technology*, 2017 (153):151–159.
- [28] Wang Rui, et al. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018, 57(32):10967–10976.
- [29] Ren Yanjuan, et al. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*, 2019(126).doi.org / 10.1016 / j.compositesa.2019.105578.
- [30] 林少芬, 等. *工程塑料应用*, 2020, 48(9):1–6, 12.
Lin Shaofen, et al. *Engineering Plastics Application*, 2020, 48(9):1–6, 12.
- [31] Ren Yanjuan, et al. *Composites Science and Technology*, 2020 (199).doi.org / 10.1016 / j.compscitech.2020.108340.
- [32] Li Ruiguang, et al. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017, 56(46):13715–13724.
- [33] Scaffaro R, et al. *Polymers*, 2019, 11(5).doi.org / 10.3390 / polym 11050857.
- [34] Li Ruiguang, et al. *Composites Part B:Engineering*, 2019(162):11–20.
- [35] Chen Yue, et al. *Composites Part B:Engineering*, 2018(138):55–65.
- [36] Sun Lei, et al. *Tribology International*, 2021(154).doi.org / 10.1016 / j.triboint.2020.106747.
- [37] Wang Liping, et al. *Advanced Engineering Materials*, 2020.doi.org / 10.1002 / adem.201901170.
- [38] Xiang Meng, et al. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2018(62):84–95.
- [39] Xiang Meng, et al. *Composites Part B:Engineering*, 2019(167):533–543.
- [40] Ma Meng, et al. *Materials Letters*, 2017(190):71–74.
- [41] Fu Xubing, et al. *Composites Part C:Open Access*, 2020.doi.org / 10.1016 / j.jcomc.2020.100043.
- [42] Ghanta T S, et al. *Polymer Engineering & Science*, 2020, 60 (8): 1717–1759.
- [43] Raine T P, et al. *Advanced Materials Interfaces*, 2018, 5(15).doi.org / 10.1002 / admi.201800304.
- [44] Gómez M, et al. *Polymer Composites*, 2019, 40(S2):E1746–E1756.
- [45] Lin Fenglong, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021 (138).doi.org / 10.1002 / app.50501
- [46] 王利, 等. *工程塑料应用*, 2018, 46(10):117–120, 127.
Wang Li, et al. *Engineering Plastics Application*, 2018, 46(10):117–120, 127.
- [47] Xu Jia You, et al. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2015, 16(2):25–26.
- [48] Hong Ningning, et al. *Materials Chemistry and Physics*, 2013, 142(2–3):531–538.
- [49] Zhu Jiawen, et al. *Polymers for Advanced Technologies*, 2020, 31(8):1709–1718.
- [50] Zhang Yunhai, et al. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*, 2019(123):149–157.
- [51] Lee K P M, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, 138 (9).doi.org / 10.1002 / app.49909.