

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.04.023

碳材料增强PA复合材料的研究进展

何东升¹, 栾京生¹, 郑严¹, 郭淋², 钱韦吉¹, 张家豪³

(1. 西南石油大学机电工程学院, 成都 610500; 2. 北京化工大学化工学院, 北京 100029; 3. 四川大学机电工程学院, 成都 610065)

摘要: 综述了高性能碳材料对尼龙(PA)改性的研究成果。简要介绍了目前应用于PA改性上的高性能碳材料, 包括碳纳米管、石墨烯、碳纤维及石墨等, 介绍了高性能碳材料的结构与性质特点。分析了碳纳米管、石墨烯、碳纤维及石墨材料对改性后PA复合材料力学、热力学及电学等性能的影响。最后对高性能PA复合材料目前存在的问题及未来发展趋势进行了展望。

关键词: PA; 碳材料; 改性; 复合材料; 力学性能

中图分类号: TQ323.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)04-0150-05

Research Progress of Carbon Material Reinforced PA Composites

He Dongsheng¹, Luan Jingsheng¹, Zheng Yan¹, Guo Lin², Qian Weiji¹, Zhang Jiahao³

(1. School of Mechatronic Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. School of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;

3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract : The research progress of nylon (PA) modified by high performance carbon materials was reviewed. The high-performance carbon materials used in PA modification at present, including carbon nanotubes, graphene, carbon fiber and graphite were introduced. Their structures and properties were also summarized. The effects of carbon nanotubes, graphene, carbon fibers and graphite materials on the mechanical, thermodynamic and electrical properties of modified PA composites were analyzed. Finally, the current problems and future development trends of high-performance PA composites were prospected.

Keywords : nylon ; carbon material ; modification ; composite material ; mechanical property

尼龙(PA)是一种半结晶合成聚合物,属于聚酰胺家族^[1], PA是一种内含酰胺基团的高分子聚合物,它们可以通过天然和合成的方式获得^[2-3]。PA是一种多功能的热塑性聚合物,可以通过熔化、成型和冷却过程转化为纤维、薄膜或不同形状的材料,由于PA具有高韧性、低摩擦系数、优良的冲击性能,已被广泛用于服装、模塑塑料、汽车和食品等领域^[4-6]。但随着高端汽车、电子通讯、医疗和工程机械等产业对产品高性能的要求越来越高,PA材料自身耐热耐光性差、尺寸稳定性欠佳等缺点越来越凸显。为此,将碳材料作为填料与PA合成高性能PA/碳材料复合材料可以有效改善PA的综合性能。在本文中,从近几年国内外报道入手,分别介绍了四种主要碳材料对PA材料改性技术的最新进展,探讨了目前存在的问题并展望了未来发展前景。

1 碳纳米管对PA性能的影响

碳纳米管(CNTs)根据组成石墨层数不同分为单壁碳纳米管(SWCNTs)和多壁碳纳米管(MWCNTs),CNTs同时具有金属材料、纺织纤维及陶瓷的优良性能,且CNTs与PA材料复合时,能够均匀分散在基体中,有利于材料性能稳定,获得高性能的复合材料^[7-9],CNTs能够有效改善PA复合材料的性能。

为研究CNTs对PA材料阻燃性能改善的影响,王欣欣等^[10]研究了MWCNTs与反应型阻燃剂衍生物(DIDPO)混合加入对PA6阻燃性能的影响。结果表明,MWCNTs的加入能够降低复合材料的热释放速率峰值,与纯PA6相比,PA6/MWCNTs复合材料的热释放速率峰值减小为367.28 kW/m²,MWCNTs的加入在没有明显降低其力学性能的基础上使热释放速率峰值降低了58.9%,极大减缓了PA6的燃烧

基金项目: 四川省自然科学基金面上项目(2022NSFSC0402),“十三五”国家科技重大专项(2016ZX05028-001-006)

通信作者: 何东升,副教授,研究方向为井下工具材料研究

收稿日期: 2023-02-22

引用格式: 何东升,栾京生,郑严,等. 碳材料增强PA复合材料的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(4): 150-154.

He Dongsheng, Luan Jingsheng, Zheng Yan, et al. Research progress of carbon material reinforced PA composites[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(4): 150-154.

速度。Saced等^[11]研究了酸化SWCNTs的加入对PA6热稳定性性能的影响。研究发现,SWCNTs的加入使PA6热稳定性较纯PA6相比提高了28~35℃,同时发现复合材料对溶剂的吸收率随着SWCNTs加入量的增加而降低。金晓东等^[12]将氨基磺酸胍(GAS)引入MWCNTs中,将PA6与MWCNTs-GAS共混制得PA6/MWCNTs-GAS复合材料,研究MWCNTs-GAS的加入对PA6阻燃性能的影响。研究发现,当MWCNTs-GAS的添加量逐渐增加,PA6/MWCNTs-GAS复合材料的燃烧时间逐渐延长,当MWCNTs-GAS添加量为3%时,燃烧时间较纯PA6相比增加了95.44%,且燃烧时熔滴现象减少,成炭性能显著改善。李建华等^[13]系统地研究了CNTs与蒙脱土(MMT)在改善PA6热稳定性性能的协同效应。研究发现,与纯PA6相比,当CNTs与MMT的质量分数分别为4%和1%时,复合材料热释放速率峰值由1 000.2 kW/m²降低到421.1 kW/m²,CNTs与MMT的加入能够显著增强PA6的热稳定性性能,提高复合材料燃烧后的最终残炭量。

为研究CNTs对PA力学性能改善的影响,邱丽等^[14]研究了MWCNTs不同改性方法对PA66/MWCNTs复合材料的表面形貌及力学性能的影响。研究发现,胺化MWCNTs(D-MWCNTs)能够较好地分散在PA66基体中,复合材料储能模量较纯PA66在-40℃提高了133.1%,在120℃提高了73.3%,复合材料的力学性能如拉伸弹性模量、拉伸强度也提高了12.7%和24.3%。Nguyen等^[15]将SWCNTs和MWCNTs分散到PA66聚合物溶液中,利用扫描电子显微镜(SEM)和场发射透射电子显微镜(FE-TEM)研究了PA66/CNTs纳米纤维材料的形态特征以及纳米纤维在硬化水泥糊体微观结构中的性能。研究发现,PA66/SWCNTs纳米纤维和PA66/MWCNTs纳米纤维的加入,使复合材料韧性提高了30%和12%,拉伸强度提高了43%和57%,极大提高了复合材料的整体力学性能。Han等^[16]通过熔丝制造(FFF)加工制造了PA/CNTs/热致液晶聚合物(TLCP)复合材料。研究发现,CNTs对于增强PA/CNTs/TLCP复合材料力学性能的关键浓度为1%,与不添加CNTs的纯PA材料相比,所制备的复合材料的拉伸弹性模量和拉伸强度分别提高了225%和80%,当TLCP,CNTs及PA的质量分数分别为40%,1%及59%时,3D打印样品的拉伸弹性模量和拉伸强度分别为38.92 GPa和127.16 MPa。

通过添加增容剂或采用其它物理方法改善CNTs在PA材料中的分散性从而改善界面结合情况,有助于提高PA/CNTs复合材料的综合性能。金晓东等^[12]将GAS引入MWCNTs中,将PA6与MWCNTs-GAS共混制得PA6/MWCNTs-GAS复合材料。研究发现与纯PA6相比复合材料拉伸强度明显提高,当添加MWCNTs-GAS的质量分数为1%时,复合材料拉伸强度为45.9 MPa,相较于纯PA6提升了41.6%。阳范文等^[17]采用增容偶联改性剂(YY-702)将PA6与CNTs熔融共混制得PA6/CNTs复合材料。研究发现,随着YY-702含量的增加, CNTs在PA6基体的分散性更加均

匀,复合材料的一致性得到提升,其拉伸强度最大为75.8 MPa。葛铁军等^[18]采用阴离子聚合法制备单体浇铸PA(MCPA)/MWCNTs复合材料,并对其摩擦磨损性能进行研究。研究发现,复合材料的摩擦系数随着MWCNTs加入量的增加不断减小,当MWCNTs添加量为0.3%时,MCPA/MWCNTs复合材料磨损最少,在提高复合材料耐磨性的同时力学性能也得到一定提升。

为研究CNTs对PA材料导电性能改善的影响,Javadi等^[19]采用熔融混合法制备了PA6/MWCNTs/炭黑(CB)复合材料,研究了MWCNTs和CB对PA6导电性能改善的协同效应。研究发现,当添加MWCNTs和CB的质量分数分别为1.7%和3.4%时,在临界渗透阈值下生成的PA6基复合材料具有较好的导电性能,可以用于1~10 GHz频率范围内的穿戴式个人防护电磁屏蔽织物制作。

2 石墨烯对PA性能的影响

石墨烯因其优异的力学、导电及导热性能受到了极大的关注,并作为润滑剂、添加剂在摩擦学领域显示出良好的效果。由于其具有较高的强度(130 GPa)和弹性模量(0.5~1 TPa)^[20~22],作为添加剂,石墨烯对PA材料的力学性能有很强的影响。目前石墨烯常被用作PA复合材料的填料。

为研究氧化石墨烯(GO)对PA力学性能改善的影响,王月欣等^[23]用四种不同柔性链改性剂对GO进行表面改性,分别制作了四种不同MCPA/GO复合材料。研究发现,十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)对GO在MCPA中分散性改善效果最佳,与纯MCPA材料相比,改性后复合材料的弯曲强度提高了9.3%,冲击强度提高了60%,拉伸和压缩强度分别提高了2.0%和15.8%。Cho等^[24]采用原位界面聚合法制备了以氯酰基功能化GO(AGO)和CNTs为杂化填料的PA66/AGO-CNTs复合材料。通过热化学分析发现,复合材料中填料的最佳氢键比为2:1,与纯PA66相比,PA66/AGO-CNTs复合材料的界面剪切强度、拉伸强度和储能模量分别比纯PA66提高了160%,136%和300%。Roy等^[25]将聚乙烯亚胺(PEI)功能化的GO与PA12结合,克服了GO与PA12因界面结合弱与基体不相容导致分散性差的缺点,制备了PA12/GO复合材料。研究发现,当分别加入质量分数为0.25%和0.35%的改性GO时,复合材料拉伸强度、杨氏模量相较于纯PA12分别提高了37%和54%,65%和74%,同时经过动态力学研究发现,复合材料的储能模量提高了63%。季翔等^[26]利用十二烷基胺(DA)对GO表面改性得到氨基化的GO(A-GO),通过熔融共混法制得PA6/A-GO复合纤维材料。研究发现,A-GO通过在PA6基体中起异相成核作用促进PA6纤维结晶,诱导PA6由 α 晶型向 γ 晶型转变,复合材料5%热失重温度较纯PA6相比提高了6.1~8.9℃,同时复合材料拉伸强度提高了40%。李泽钊等^[27]采用SEM和拉曼光谱测试仪研究了PA/还原GO(RGO)复合材料的表面形貌和结构特征。结果表明,PA/RGO复合材料电阻与应变成正比关系,当应变减小时,电阻恢复初始值,当电压稳定在0.5 V时,电流信号能

够准确反映手指关节的运动,为PA/RGO织物作为柔性传感器提供了思路。

石墨烯被认为是一种薄的固体润滑剂^[28-29],在纳米尺度表现出很高的耐磨性和导电性^[30-31]。Masood等^[32]利用GO的二维结构和高刚度来改善PA复合材料的摩擦学响应。研究发现,在不改变PA66晶间结构的情况下GO纳米片能够均匀分布在其中,随着GO的加入,复合材料的摩擦系数、磨损率降低,当GO浓度为0.5%时磨损率提高了3倍,得益于GO的高表面能,PA66/GO涂层对底层基材的附着力提高了3倍。Pan等^[33]研究了采用碱催化阴离子开环聚合法制备的MCPA/GO纳米复合材料的力学和摩擦学性能。研究发现,极低含量的GO对MCPA基体有显著的增强作用,与纯MCPA相比,MCPA/GO纳米复合材料的磨损性能得到了提高,其磨损形貌与磨损环上均匀的转移膜和细小的磨损屑相对应。

3 碳纤维对PA性能的影响

碳纤维(CF)增强的热塑性复合材料具有高的刚性和比强度、良好的机械可靠性、易于加工、可制造任何复杂的3D形状等特点,特别是在潮湿环境下热塑性复合材料的增强效果和物理性能的保持方面,CF能够降低复合材料热膨胀系数和模具收缩率、提高热导率、增强复合材料耐磨性和韧性。CF增强热塑性复合材料的发展无疑给传统的有机、无机复合材料带来了强大的竞争对手,并创造了许多高性能热塑性复合材料^[34-38]。

为研究CF对PA力学性能改善的影响,张琦等^[39]以PA10T为基体树脂,采用CF增强改性的方法制备高性能PA10T/CF复合材料,研究CF含量对PA10T/CF复合材料力学性能的影响。结果表明,CF的加入在复合材料结晶过程中起到了异向成核的作用,为结晶过程提供了大量的晶核,当在PA10T加入质量分数为30%的CF时,复合材料的拉伸强度、弯曲强度和弯曲弹性模量分别达到253 MPa,360 MPa和20.1 GPa,与纯PA10T相比分别提高了216%,323%和675%,表明CF的加入极大提高了PA10T的力学性能。刘旭等^[40]将CF经浓硝酸处理后与含有10% PA6的甲酸溶液进行上浆处理,制备了具有优异性能的PA6/CF复合材料。研究发现,随着CF的加入,PA6结晶时有更多的 γ 晶型向 α 晶型转化,使生成的复合材料更加趋于稳定;当加入质量分数为8%的CF时,较纯PA6,复合材料的拉伸强度和拉伸弹性模量分别提高了80.8%和513.9%,该复合材料力学性能得到了显著提升。张友强等^[41]研究了CF与流动改性剂含量对PA66/CF复合材料力学性能的影响。研究发现,当CF的添加量为35%时,PA66/CF复合材料的拉伸、弯曲及缺口冲击强度分别达到了251 MPa,358 MPa及22 kJ/m²,较纯PA66而言,分别提高了210%,397%及178%。张顶顶等^[42]运用万能试验机和SEM研究了以聚酰胺胺(PAMAM)树枝状高分子作为改性剂制备的PA66/CF复合材料的力学性能。研究发现,PAMAM的加入有效改善了PA66的结晶度且CF能够均

匀地分布在PA66基体中,当添加改性剂的质量分数为1%时,PA66的结晶度最大为12.75%,PA66/CF的拉伸强度为118 MPa。

通过添加扩链剂、施胶剂、增韧剂或采用其它物理方法改善CF在PA材料中的分散性从而改善其界面结合情况,有助于提高PA/CF复合材料的综合性能。王伟等^[43]研究了将苯乙烯-马来酸酐共聚物(SMA-700)作为扩链剂改性PA6/CF复合材料的力学性能。研究发现,SMA-700的添加可以增强PA6的结晶速率和结晶度,当扩链剂添加量为1%时,复合材料的拉伸强度达到最大值为125.4 MPa,当SMA-700添加量超过1%时, α 晶型的结晶度降低。Cho等^[44]将由施胶剂和RGO组成的混合物添加在PA6/CF复合材料中,研究了CF在PA6中的分散特性。研究发现,通过改性施胶剂和混合涂层,PA6/CF复合材料的层间剪切强度较未改性的PA6/CF复合材料提高了70.7%,其弯曲强度和弯曲弹性模量分别提高了73%和84%,储能模量和吸收冲击能分别提高了200%和73.3%。Feng等^[45]将再生CF(RCF)与PA6共混制备了PA6/RCF热塑性复合材料,研究了用硝酸和环氧大分子偶联剂清洗改性RCF表面的有效方法。研究发现,RCF对PA6的结晶起着成核作用,由于基体中RCF的非均相成核效应,其结晶速率和成核密度显著提高;经表面改性后,RCF在PA6中分散更加均匀,PA6/RCF复合材料的力学性能和热稳定性得到了提高。Li等^[46]采用横向纤维束(TFB)测试方法对半结晶PA6界面黏附性进行了研究。结果表明,PA6/CF复合材料的界面厚度为331~394 nm,界面模量为纤维模量的0.24~0.30倍,降低冷却速度或提高退火温度均使CF表面PA6残留量增加,复合材料的淬火和随后的退火与缓慢冷却结果相似。姚利等^[47]通过在PA/CF复合材料中加入增韧剂,极大提高了复合材料的韧性。研究发现,当单独添加N系增韧剂,生产的产品力学性能和表面电阻率最好,且当增韧剂添加量为2%时,复合材料的拉伸和弯曲强度最高。

4 石墨对PA性能的影响

石墨具有良好的导热、导电及自润滑性能,当石墨与PA材料复合时,能够有效改善PA材料的耐热及力学性能^[48-49]。

为研究石墨对PA材料力学性能改善的影响。廖正福等^[50]、刘科等^[51]通过将石墨颗粒与PA66共混,运用双螺杆挤出机制备了PA/石墨复合材料,研究了石墨添加量对复合材料性能的影响。研究发现,双螺杆挤出机的挤压能够提高材料的均匀性,当石墨粒径越小时,PA/石墨复合材料平面取向度越高,正交方向的热导率数值相差越大,当复合材料中石墨的质量分数达到30%~40%时,石墨能够最大限度均匀地分散在PA66基体中,形成稳定的导热体系,提高材料的导热性能。夏兆路等^[52]将PA6与功能化热膨胀石墨(EG-T)熔融共混并采用超声辅助挤出法制备了PA6/EG-T复合材料,研究了EG-T添加量对复合材料性能的影响。研究发现,随着EG-T添加量的增加,PA6结晶度不断提高,相较于纯PA6,PA6/EG-T复合材料的拉伸强度和拉伸弹性模量分别提高了

15.8%和16.8%,热变形温度提高了34.5℃,表明复合材料具有良好的综合性能。黄自华等^[53]通过将鳞片石墨(FG)填充于PA66中,采用熔融共混法制备了PA66/FG复合材料,研究FG的含量及粒径对材料力学及导热性能的影响。研究发现,当FG填充质量分数为50%时,其拉伸和冲击强度分别为59.3 MPa和3.03 kJ/m²,热导率达到了3.07 W/(m·K),是纯PA66的12.3倍;复合材料力学性能随粒径变化呈现先增大后减小的趋势,当粒径为100 μm时,复合材料的力学性能最佳。

石墨具有较好的导热、导电及润滑性能,学者多将其作为填料以改善PA复合材料的导热及导电性能。Ha等^[54]采用熔融共混法制备了以PA6为基体,石墨纳米片(GNPs)和SWCNTs为混合填料的PA6/GNPs/SWCNTs复合材料,研究了GNPs与SWCNTs单独加入与混合加入对复合材料导热性能的影响。研究发现,含有混合填料体系的复合材料导热和放热行为的热像图与导热结果一致,并分别表现出快速的温度跳跃和快速的温度下降,且复合材料热导率提高至8.8 W/(m·K),与纯PA6的热导率相比提高了35倍。Li等^[55]采用原位聚合法制备了PA6/FG复合材料、PA6/石墨烯插层复合物(GIC)复合材料和PA6/脱落石墨(EG)复合材料。研究发现,当FG、GIC和EG的质量分数分别为1%、2%~4%和1%时,石墨衍生物复合材料的体积电阻率可达 7.5×10^6 、 3.6×10^8 、 $2.3 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ 。当EG的质量分数从0%增加到9%时,PA6/EG复合材料的热稳定性温度从70℃提高到196℃。黄云刚等^[56]采用钛酸酯偶联剂(TMC-01)对FG进行表面处理,制备了PA6/FG复合材料,研究不同烧结温度处理的FG对热导率的影响。研究发现,热导率随烧结温度提高出现先增大后减小的趋势,当烧结温度为600℃时,复合材料热导率达到最大值。郝鲁阳等^[57]采用熔融共混法制备了PA6/EG复合材料,研究了填料形状、填料含量对复合材料导热性能影响。研究结果表明片状EG较其它形状填料对PA6热导率提高有更好提升效果,当填料质量分数为20%时,PA6/EG复合材料热导率达到最大。Tomiak等^[58]采用EG作为PA6的阻燃添加剂,对PA6/EG复合材料的导电性和导热性以及流变性进行了表征。研究表明,当EG填充量在25%时,PA6/EG复合材料的热导率从0.27 W/(m·K)提高到0.89 W/(m·K),在PA6中,EG最低填充度为15%,可以达到与样品条件无关的显著防火效果。

5 总结与展望

随着科技的进步,市场对PA材料的力学性能、加工性能及耐高温阻燃性能提出了新的要求,相关工作者利用碳材料对PA的改性做了大量工作,促进了PA材料在耐高温、耐摩擦和极端环境下的使用。笔者综述了近几年国内外学者使用CNTs、石墨烯、CF及石墨对PA材料改性的研究进展。从四个方面归纳总结了不同碳材料对复合材料力学、阻燃性能、导电性能及摩擦磨损等方面的影响。笔者结合目前市场发展对高性能PA材料的要求方向,总结PA/碳材料复合材料

未来发展趋势如下:

(1)PA合金化是实现PA材料高性能的重要手段,将PA与高性能碳材料共混改性,提高PA材料机械加工性能、抗高温性能及低温脆性,使PA具有优异的综合性能,从而可用于汽车发动机及排气、航空航天轻量化等领域;

(2)纳米PA技术是指在PA产品生产制造过程中运用纳米制造技术生产出在热性能、力学性能、阻燃性、阻隔性都优于传统PA材料的生产制造工艺,随着国内纳米技术制造成本的降低,纳米PA技术具有较大的市场竞争力;

(3)绿色化PA复合材料研究是指运用生物合成的方法,制造出能够自然降解的PA复合材料,旨在解决PA复合材料在制造过程和报废后产生的潜在废物的问题,实现绿色制造。

参考文献

- [1] Winnacker M, et al. *Biomaterials Science*, 2017, 5(7):1 230–1 235.
- [2] Ding Yufei, et al. *Nature Communications*, 2019, 10(1). DOI: 10.1038/s41467-019-08835-5.
- [3] Winnacker M, et al. *Macromolecular Rapid Communications*, 2016, 37(17):1 391–1 413.
- [4] Coates G W, et al. *Nature reviews: Materials*, 2020, 5(7):501–516.
- [5] Winnacker M, et al. *Macromolecular Rapid Communications*, 2019, 40(12). DOI:10.1002/marc.201900091.
- [6] Bigham A, et al. *Bio-Design and Manufacturing*, 2020, 3(4): 281–306.
- [7] 薛竹林,等. *塑料科技*, 2019, 47(5):31–36.
Xue Zhulin, et al. *Plastics Science and Technology*, 2019, 47(5): 31–36.
- [8] 周子健,等. *塑料工业*, 2018, 46(9):108–112.
Zhou Zijian, et al. *China Plastics Industry*, 2018, 46(9):108–112.
- [9] 孙才英,等. *塑料科技*, 2017, 45(3):90–94.
Sun Caiying, et al. *Plastics Science and Technology*, 2017, 45(3): 90–94.
- [10] 王欣欣,等. *高分子学报*, 2019, 50(4):419–428.
Wang Xinxin, et al. *Acta Polymerica Sinica*, 2019, 50(4):419–428.
- [11] Saeed K, et al. *Instrumentation Science & Technology*, 2016, 44 (4):435–444.
- [12] 金晓冬,等. *塑料*, 2015, 44(1):16–18.
Jin Xiaodong, et al. *Plastics*, 2015, 44(1):16–18.
- [13] 李建华,等. *塑料*, 2018, 47(4):55–58.
Li Jianhua, et al. *Plastics*, 2018, 47(4):55–58.
- [14] 邱丽,等. *化工新型材料*, 2016, 44(9):75–77.
Qiu Li, et al. *New Chemical Materials*, 2016, 44(9):75–77.
- [15] Nguyen T, et al. *Materials Today Communications*, 2020, 23. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2019.100845.
- [16] Han J Y, et al. *Polymer Composites*, 2021, 42(9):4 328–4 341.
- [17] 阳范文,等. *工程塑料应用*, 2019, 47(9):12–16.
Yang Fanwen, et al. *Engineering Plastics Application*, 2019, 47(9): 12–16.
- [18] 葛铁军,等. *沈阳化工大学学报*, 2014, 28(1):37–41.

- Ge Tiejun, et al. Journal of Shenyang University of Chemical Technology, 2014, 28(1):37–41.
- [19] Javadi T M, et al. Synthetic Metals, 2019, 251:75–84.
- [20] Cataldi P, et al. Applied Physics Letters, 2017, 110(12). DOI: 10.1063/1.4978865.
- [21] Eswaraiah V, et al. ACS Applied Materials & Interfaces, 2011, 3(11):4 221–4 227.
- [22] Wei Xiaoding, et al. Nature Communications, 2017, 8(1). DOI: 10.1038/ncomms9029.
- [23] 王月欣,等.塑料科技,2018,46(12):114–118.
Wang Yuexin, et al. Plastic Science and Technology, 2018, 46(12): 114–118.
- [24] Cho B G, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020, 135. DOI:10.1016/j.compositesa.2020.105938.
- [25] Roy S, et al. ACS Appl Mater Interfaces, 2015, 7(5):3 142–3 151.
- [26] 季翔,等.高分子材料科学与工程,2019,35(8):49–54.
Ji Xiang, et al. Polymer Materials Science and Engineering, 2019, 35(8):49–54.
- [27] 李泽钊,等.印染助剂,2020,37(5):27–30.
Li Zezhao, et al. Textile Auxiliaries, 2020, 37(5):27–30.
- [28] Berman D, et al. Materials Today, 2014, 17(1):31–42.
- [29] Kim K S, et al. ACS Nano, 2011, 5(6):5 107–5 114.
- [30] Huang Yuehua, et al. Carbon, 2017, 115:600–607.
- [31] Zeng Xingzhong, et al. Carbon, 2017, 118:233–240.
- [32] Masood M T, et al. Carbon, 2017, 123:26–33.
- [33] Pan Bingli, et al. Wear, 2012, 294–295:395–401.
- [34] Gao Yang, et al. Composites Part B: Engineering, 2011, 42(7): 1 945–1 955.
- [35] Sharma S P, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011, 42(1):8–15.
- [36] Li J, et al. Current Applied Physics, 2011, 11(1):50–54.
- [37] Beier U, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008, 39(9):1 572–1 581.
- [38] Wasselynck G, et al. Magnetism, IEEE Transactions on Magnetism, 2011, 47(5):1 114–1 117.
- [39] 张琦,等.工程塑料应用,2022,50(5):44–49.
Zhang Qi, et al. Engineering Plastics Application, 2022, 50(5): 44–49.
- [40] 刘旭,等.材料工程,2021,49(4):128–134.
Liu Xu, et al. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(4): 128–134.
- [41] 张友强,等.工程塑料应用,2021,49(8):43–46.
Zhang Youqiang, et al. Engineering Plastics Application, 2021, 49(8):43–46.
- [42] 张顶顶,等.复合材料学报,2021,38(2):406–413.
Zhang Dingding, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(2):406–413.
- [43] 王伟,等.华东理工大学学报(自然科学版),2020,46(5):613–620.
Wang Wei, et al. Journal of East China University of Science and Technology, 2020, 46(5):613–620.
- [44] Cho B G, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing(Natural Science Edition), 2021, 149. DOI: 10.1016/j.compositesa.2021.106521.
- [45] Feng Nan, et al. Current Applied Physics, 2013, 13(9): 2 038 – 2 050.
- [46] Li Hongfu, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 85:31–39.
- [47] 姚利,等.天津化工,2022,36(3):21–24.
Yao Li, et al. Tianjin Chemical Industry, 2022, 36(3):21–24.
- [48] 曹会彦,等.耐火材料,2021,55(6):471–475.
Cao Huiyan, et al. Refractories, 2021, 55(6):471–475.
- [49] 徐爱东,等.耐火材料,2019,53(6):452–456.
Xu Aidong, et al. Refractories, 2019, 53(6):452–456.
- [50] 廖正福,等.塑料工业,2015,43(9):75–78.
Liao Zhengfu, et al. China Plastics Industry, 2015, 43(9):75–78.
- [51] 刘科,等.复合材料学报,2014,31(3):610–616.
Liu Ke, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2014, 31(3): 610–616.
- [52] 夏兆路,等.工程塑料应用,2015,43(9):13–18.
Xia Zhaolu, et al. Engineering Plastics Application, 2015, 43(9): 13–18.
- [53] 黄自华,等.塑料,2018,47(1):9–12.
Huang Zihua, et al. Plastics, 2018, 47(1):9–12.
- [54] Ha S M, et al. Science and Technology of Advanced Materials, 2015, 16(6). DOI:10.1088/1468-6996/16/6/065001.
- [55] Li Jihui, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012, 43(7):1 038–1 043.
- [56] 黄云刚,等.塑料工业,2020,48(10):16–19.
Huang Yungang, et al. China Plastics Industry, 2020, 48(10): 16–19.
- [57] 郝鲁阳,等.中国塑料,2017,31(11):35–40.
Hao Luyang, et al. China Plastics, 2017, 31(11):35–40.
- [58] Tomiak F, et al. Polymers, 2021, 13(16). DOI: 10.3390/polym13162733.