

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.03.028

聚氨酯/石墨烯复合材料研究进展

周龙旋¹,程国君^{1,2,3},宣自月¹,刘蒙¹,丁国新¹,万祥龙^{1,3},李璟睿¹,高俊珊¹

[1. 安徽理工大学材料科学与工程学院,安徽淮南 232001; 2. 安徽省绿色高分子材料重点实验室,合肥 230601;

3. 安徽理工大学环境友好材料与职业健康研究院(芜湖),安徽芜湖 241003]

摘要:以改性石墨烯作为聚氨酯的填料对其进行功能化研究为主线,举例简要说明了石墨烯填充聚氨酯树脂材料的制备方法和性能研究的类别。从聚氨酯/石墨烯复合材料的力学性能、热性能、电性能、阻燃性、抗菌性和耐腐蚀性等方面,分别概述了近年来石墨烯改性聚氨酯在高性能和功能性的进展,并对聚氨酯/石墨烯复合材料未来的发展趋势进行了展望。

关键词:聚氨酯;石墨烯;改性;多功能性

中图分类号: TQ327.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)03-0159-05

Research Progress of Polyurethane/Graphene Composites

Zhou Longxuan¹, Cheng Guojun^{1,2,3}, Xuan Ziyue¹, Liu Meng¹, Ding Guoxin¹, Wan Xianglong^{1,3}, Li Jingrui¹, Gao Junshan¹

[1. College of Material Science and Engineering, Anhui University of Science & Technology, Huainan 232001, China;

2. Anhui Province Key Laboratory of Environment-friendly Polymer Materials, Hefei 230601, China;

3. Institute of Environment-friendly Materials and Occupational Health of Anhui University of Science and Technology (Wuhu), Wuhu 241003, China]

Abstract: Taking modified graphene as the filler of polyurethane, the functionalization research is the main line, and the preparation method and performance research category of graphene-filled polyurethane resin materials are briefly illustrated. From the aspects of mechanical properties, thermal properties, electrical properties, flame retardancy, antibacterial properties and corrosion resistance of polyurethane/graphene composites, the progress of graphene-modified polyurethane in high performance and functionality in recent years is summarized. And the future development trend of polyurethane/graphene composite materials is prospected.

Keywords: polyurethane; graphene; modification; versatility

聚氨基甲酸酯又称聚氨酯,即主链上含有重复氨基甲酸酯基团的化合物的统称,由有机二异氰酸酯或多异氰酸酯与二羟基或多羟基化合物加聚而成。聚氨酯大分子中除含氨基甲酸酯外,还可含有适量的醚、酯、脲、缩二脲和脲基甲酸酯等基团。由于聚氨酯分子基团的差异,其可用于制造塑料^[1-3]、橡胶^[4-5]、纤维^[6-8]、硬质^[9-11]和软质^[12]泡沫塑料等不同材料。

石墨烯是一种二维材料,具有六角型呈蜂巢晶格的平面薄膜,因此具有良好的力学性能、导电性、导热性和抗菌性等^[13-15]。利用聚氨酯分子基团性能的差异性和石墨烯良好的功能性,制备的聚氨酯/石墨烯复合材料在发泡、接枝、掺

杂等方面表现优良,因此在电磁屏蔽、导电、阻燃、耐腐蚀及生物抗菌等领域中具有潜在的应用价值^[16-19]。根据原材料选择的不同、添加剂种类的各异、催化剂和分散剂品种的差别,可以得到种类丰富的聚氨酯/石墨烯复合材料。相较于纯聚氨酯,聚氨酯/石墨烯表现出卓越的弹性、硬度、附着力、耐久性等物理性能和优异的耐化学药品性、导热性、耐腐蚀、抗菌、阻燃等化学性能^[20-23]。近年来,在聚氨酯/石墨烯复合材料的研究方面已开展大量工作并取得了明显的进步,笔者以石墨烯混合掺杂作为填料改性聚氨酯为主线,系统综述了近年来国内外聚氨酯/石墨烯复合材料在功能性和用途方面的进展,并对其研究趋势进行了展望。

基金项目: 安徽省高校自然科学基金项目(KJ2019A0118),安徽理工大学环境友好材料与职业健康研究院研发专项基金项目(ALW2020YF14和ALW2020YF02),安徽理工大学博士基金项目(ZY017和13190203),淮南市科技计划项目(2020B150),大学生创新创业项目(S202010361167)

通信作者: 程国君,教授,主要从事多功能性聚合物纳米复合材料的设计与制备

收稿日期: 2022-01-12

引用格式: 周龙旋,程国君,宣自月,等. 聚氨酯/石墨烯复合材料研究进展[J]. 工程塑料应用,2022,50(3):159-163.

Zhou Longxuan, Cheng Guojun, Xuan Ziyue, et al. Research progress of polyurethane/graphene composites[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(3): 159-163.

1 聚氨酯/石墨烯的力学性能

聚氨酯/石墨烯复合材料具有优异的强度^[24]、硬度^[25]、塑性^[26]、弹性^[27]、抗压^[28-29]、摩擦性能^[30]等力学性能。石墨烯及其掺杂体系对聚氨酯树脂材料力学性能的影响见表1。

表1 石墨烯对聚氨酯力学性能的影响

填充材料	聚氨酯复合材料的力学性能
石墨烯和氮化硼	拉伸强度和拉伸弹性模量分别提高了85%和140%
氧化石墨烯	断裂伸长率提高了12.1%
六方氮化硼	拉伸强度提高了14%
苯胺氧化石墨烯	拉伸强度提高到38.4 MPa
苯胺氧化石墨烯	断裂伸长率增加448%
氧化石墨烯	拉伸弹性模量增加了30%
氧化石墨烯	拉伸强度和拉伸弹性模量分别提高了34%和162%
碳纳米管	拉伸强度提高到26.8 MPa
石墨烯纳米管	拉伸弹性模量达到3.5 MPa

单独使用具有良好力学性能的石墨烯或与其它填料复合掺杂对聚氨酯均能体现优异的力学性能,Ribeiro等^[31]利用氧化石墨烯和六方氮化硼作为聚氨酯的纳米填料。与纯聚氨酯相比,当氧化石墨烯和六方氮化硼混合物的质量分数为0.5%时,该材料的拉伸强度和拉伸弹性模量分别提高了85%和140%。而Du等^[32]研究表明,聚氨酯中掺入质量分数为0.55%的氧化石墨烯时,它的拉伸强度和断裂伸长率分别提高了23.4%和12.1%。Fei等^[33]在聚氨酯中添加了质量分数为5%的六方氮化硼纳米体系,其拉伸强度只提高了14%。可见,氧化石墨烯掺杂体系对聚氨酯树脂力学性能改善更为突出。

通过使用苯胺低聚物氧化还原的石墨烯作为聚氨酯填料,能够有效增强聚合物的力学性能。Li等^[34]采用液相化学法制备苯胺低聚物氧化石墨烯和还原石墨烯。当氧化石墨烯、还原石墨烯、苯胺低聚物氧化石墨烯和苯胺低聚物还原石墨烯的质量都达到0.025 g时,还原石墨烯和氧化石墨烯可以将聚氨酯材料的拉伸强度从8.9 MPa大幅度分别提高到15.2 MPa和21.3 MPa,断裂伸长率分别提高了92.4%和190%,同样,聚氨酯/苯胺低聚物还原石墨烯和聚氨酯/苯胺低聚物氧化石墨烯复合材料的拉伸强度分别达到了22.3 MPa和38.4 MPa,断裂伸长率增加了343%和448%。聚氨酯/苯胺低聚物氧化石墨烯的各项力学性能均优于聚氨酯/苯胺低聚物还原石墨烯,原因是,在苯胺低聚物氧化石墨烯中,苯胺低聚物和氧化石墨烯之间实现了共价键和 $\pi-\pi$ 共轭,即与还原石墨烯上的官能团相比氧化石墨烯的羟基官能团容易与苯胺低聚物的官能团形成化学键,这有助于改善填料在聚氨酯基体中的分散性,从而实现了与聚氨酯基体的增强交联。

Zhang等^[35]在研究聚氨酯/氧化石墨烯复合膜过程中发现,复合膜的拉伸弹性模量随氧化石墨烯含量的增加而增加,当添加的氧化石墨烯质量分数为10.25%时,复合膜的拉伸弹性模量达到最大值,提高了近30%。

为进一步测试少层石墨烯对聚氨酯树脂力学性能的影响,Zahid等^[36]采用溶液共混-浇铸的方法制备了少层石墨烯薄片,并填充到热塑性聚氨酯复合薄膜当中。当少层石墨烯薄片的质量分数为1%时,与纯热塑性聚氨酯相比,复合薄膜拉伸强度从23.5 MPa提高到30.9 MPa,拉伸弹性模量从5.6 MPa提高到14.7 MPa,分别提高了34%和162%。

碳系材料中的碳纳米管也具有良好的力学性能,也可作为填料。Li等^[37]利用荷叶仿生的方式增强了聚氨酯的力学性能。其中,石墨烯和碳纳米管作为协同增强剂使用。结果表明,与纯聚氨酯材料相比,石墨烯和碳纳米管填充聚氨酯复合材料的拉伸强度从19.3 MPa提高到26.8 MPa,硬度和最大载荷分别提高了60%和100%。Habibpour等^[19]通过多壁碳纳米管的氧化解法制备了石墨烯纳米带。将多壁碳纳米管的高纵横比与石墨烯的平面结构相结合,形成高纵横比的多壁碳纳米管。质量分数为0.5%的高纵横比多壁碳纳米管改性聚氨酯材料的拉伸弹性模量达到3.5 MPa,分别是聚氨酯/低纵横比多壁碳纳米管复合材料(2.2 MPa)和聚氨酯/多壁碳纳米管复合材料(2.5 MPa)的1.6倍和1.4倍。

2 聚氨酯/石墨烯的热性能

聚氨酯/石墨烯复合材料虽然在力学、弹性、硬度等方面有良好的性能,但在热性能方面表现并不突出。为了有效地改善它的热性能,研究人员对石墨烯进行了功能化处理,有效调节了聚氨酯的散热、保温、热电等性能^[38-39],改性石墨烯及其掺杂体系对聚氨酯树脂材料热性能的影响见表2。

表2 石墨烯及掺杂体系对聚氨酯热性能的影响

材料	聚氨酯复合材料的热导率 / $[W \cdot (m \cdot K)^{-1}]$
木粉	1.87
还原石墨烯气凝胶	3.36
还原石墨烯	0.598
二维+一维	0.97
多层石墨烯薄片	0.74

Lu等^[40]将氧化石墨烯纳米片与木粉掺入聚氨酯中,结果表明,当掺入质量分数为4.0%的石墨烯和质量分数为16.0%的木粉时,聚氨酯的热导率达到1.87 W/(m·K),为高导热状态。值得关注的是,这种材料还有高的相变焓(140.2 J/g)和冻结焓(139.4 J/g),对拓宽其应用领域具有潜在价值。与Lu等不同的是, Li等^[41]采用还原石墨烯气凝胶的方法,来提升聚氨酯材料的热导率。在室温下,使用氢碘酸还原的石墨烯气凝胶掺入到聚氨酯中,石墨烯质量分数为2.5%,聚氨酯复合材料的热导率为3.36 W/(m·K)。进一

步说明还原石墨烯气凝胶能够稳定分散在聚氨酯体系中,并能明显改善体系的热导。

聚氨酯/橡胶体系的热导率较低,为改善聚氨酯/橡胶体系导热性能,Tao等^[42]通过水热还原法与石墨烯一起制备三维还原石墨烯掺入到聚氨酯/橡胶复合体系中,结果表明,纯聚硫橡胶的热导率为 $0.239\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。聚氨酯/聚硫橡胶/还原石墨烯复合材料的热导率随着还原石墨烯含量的增加而增加。当还原石墨烯的质量分数为 0.9% 时,聚氨酯/聚硫橡胶/还原石墨烯复合材料的热导率达到了 $0.598\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。原因是,这种三维互联框架提供一条传导热量的路径,从而减少了声子的散射。Wang等^[43]把不同形貌的添加剂进行组合加入聚氨酯材料中以提升其热导率。氧化石墨烯、碳纳米管和纳米金刚石分别用作二维、一维和零维的导热填料。实验表明,二维+一维组合比二维+零维组合具有更好的导热性能和更强的协同效应,其中,氧化石墨烯和碳纳米管可以形成“桥状”结构,构建更多的导热通道。当二维+一维组合比例为 $7.5:2.5$ 时,协同效应达到最大,热导率为 $0.97\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,较纯聚氨酯增加了 131% 左右。

为进一步探究多层石墨烯对聚氨酯复合材料导热性能的影响,Zahid等^[36]将多层石墨烯薄片填充到热塑性聚氨酯薄膜中,与热塑性聚氨酯相比[热导率为 $0.26\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$],在多层石墨烯薄片的质量分数达到 4% 时,热塑性聚氨酯复合材料的热导率提高了近 3 倍,热导率达到 $0.74\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

3 聚氨酯/石墨烯的导电性能

近年来,聚氨酯导电性的研究相对较少,而氧化石墨烯和碳纳米管均具有良好的电性能,研究发现聚氨酯与两者结合也具有一定导电性。

氧化石墨烯可以制成粒子电极,对废水进行处理。Guo^[18]采用氧化聚合法制备导电聚氨酯/氧化石墨烯粒子电极,将其在三维电极反应器中降解左氧氟沙星,结果表明,在 pH 为 7 、电压为 6 V 、曝气量为 $2.0\text{ L}/\text{min}$ 、初始浓度为 $20\text{ mg}/\text{L}$ 的条件下,降解率可达 90% 以上。

碳系材料中的石墨烯具有超强的导电率(约为 $10^6\text{ S}/\text{m}$),因此被认为是最具有潜力的导电填料之一。Tao等^[42]利用水热还原法制备三维石墨烯。他将液态的聚硫寡聚体倒入三维的石墨烯-聚氨酯骨架中,制备聚硫橡胶复合材料。研究表明,当三维的石墨烯-聚氨酯的质量分数达到 0.5% 时,聚硫橡胶复合材料的体积电阻率是 $2.6\times 10^6\ \Omega\cdot\text{cm}$,与纯的聚硫橡胶($10^{11}\ \Omega\cdot\text{cm}$)相比,降低了 5 个数量级,对聚硫橡胶的导电性具有良好的促进作用。吴思瑞等^[44]采用三氧化铁对石墨烯进行化学沉积改性,得到磁性石墨烯。通过与聚氨酯共混,制备磁性聚氨酯/石墨烯柔性复合材料,进一步降低了复合材料的表面电阻率。

赵梁成等^[45]采用水热还原法将羧基化多壁碳纳米管接枝到氧化石墨烯上,经冷冻干燥,再填充到聚氨酯中制备了热塑性聚氨酯/三维石墨烯-多壁碳纳米管复合材料。当羧基化多壁碳纳米管的质量分数达到 10% 时,热塑性聚氨酯/三维石墨烯-多壁碳纳米管复合材料的体积电阻率是 $10^3\ \Omega\cdot\text{cm}$,比纯聚氨酯(约 $10^{12}\ \Omega\cdot\text{cm}$)降低了 9 个数量级。

4 聚氨酯/石墨烯的抗菌性能

通常采用大肠杆菌和金黄色葡萄球菌两种细菌来评价材料的抗菌性能。金属氧化物常用作抗菌材料,它的抗菌性源于氧化物中含有活性氧,因此常与氧化石墨烯进行复合,起到协同抗菌的效果^[14]。Mirzadeh等^[46]发现涂有二氧化钛和石墨烯纳米片的聚氨酯复合膜的革兰氏阳性金黄色葡萄球菌和革兰氏阴性大肠杆菌减少至原来的 1% 。

石墨烯作为一种优异的抗菌材料,有较好的分散性和较大的比表面积,与壳聚糖复合表现出很强的抗菌活性,使细菌与石墨烯纳米片的接触率更高。Najafabadi等^[47]将壳聚糖修饰的石墨烯纳米片引入到聚氨酯基体中,合成了聚氨酯/石墨烯纳米复合膜。可以看出,空白聚氨酯样品在与革兰氏阴性大肠杆菌和革兰氏阳性金黄色葡萄球菌接触时没有显示出抑菌圈和抗菌活性。但将 2 g 的壳聚糖修饰的石墨烯纳米片引入聚氨酯基体中可以更有效地增强对革兰氏阴性大肠杆菌和革兰氏阳性金黄色葡萄球菌的抗菌活性,抑菌圈分别为 $6.1\sim 10.2\text{ mm}$ 和 $2.9\sim 5.1\text{ mm}$ 。

5 聚氨酯/石墨烯的耐腐蚀性能

纯聚氨酯的耐腐蚀性不强,但石墨烯与聚氨酯复合体系对金属表面的腐蚀和电化学腐蚀等具有很好的去除效果,石墨烯及其掺杂体系与聚氨酯树脂复合体系的耐腐蚀性见表3。

表3 石墨烯对聚氨酯耐腐蚀性的影响

填充材料	聚氨酯复合体系的耐腐蚀性
氧化锌/多壁碳纳米管	耐腐蚀效率为 95.24%
氧化锌/还原石墨烯	耐腐蚀效率为 99.09%
氧化石墨烯	耐腐蚀性为 $9.04\times 10^7\ \Omega\cdot\text{cm}^2$
多壁碳纳米管	耐腐蚀性为 $8.45\times 10^5\ \Omega\cdot\text{cm}^2$

由于石墨烯的平面结构,其表现出良好的阻隔耐腐蚀性,常被用作耐腐蚀复合材料的载体,将石墨烯与其它金属氧化物进行复合,能够起到协同抗腐蚀的作用,并且能够有效防止其在复合材料中的团聚现象。Rajitha等^[48]研究了氧化锌/还原石墨烯和氧化锌/多壁碳纳米管杂化材料与聚氨酯复合的耐腐蚀性。研究表明,含有氧化锌/还原石墨烯的聚氨酯复合材料的耐腐蚀效率可达 99.09% ,优于氧化锌/多壁碳纳米管复合材料的耐腐蚀效率(95.24%)。可见,含有二维还原石墨烯的材料防腐效率明显优于一维体系。

碳基材料对腐蚀介质,如水、空气等表现出较强的隔

离子或阻隔性,避免金属在水或空气中长时间氧化。Xue等^[49]以聚氨酯/石墨烯作为防腐材料进行了研究。结果表明,当石墨烯的质量分数达到0.08%时,防腐材料在质量分数为3.5%的氯化钠溶液中浸渍168 h后,它的抗蚀性($9.04 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$)是聚氨酯材料($1.80 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$)的50倍左右。Habibpour等^[19]采用多壁碳纳米管氧化降解法制备石墨烯纳米带,并与聚氨酯共混复合。石墨烯纳米带具有平面结构、高宽比、分散均匀、聚合物-填料相互作用好等优点,这不仅有助于提高纳米复合材料的承载性能,而且还能形成一条曲折的途径,抑制腐蚀性物质向聚氨酯基体的扩散。石墨烯纳米带的质量分数达到0.5%时,聚氨酯纳米复合材料的耐腐蚀性能非常优异,能够达到 $8.45 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

6 聚氨酯/石墨烯的阻燃性能

纯聚氨酯多孔材料的阻燃效果较差,其极限氧指数为17.5%左右。研究者利用二维片层石墨烯及其掺杂体系进一步改善聚氨酯的阻燃性能,并通过锥形量热仪、热重分析仪、极限氧指数等方法对其阻燃性能进行表征分析。

Yao等^[16]采用一锅法制备聚氨酯/石墨烯多孔复合材料。锥形量热分析显示,放热速率曲线在0~5 s内基本处于平缓线性状态,在30 s左右达到最大热释放速率,石墨烯的加入不仅达到最大热释放速率所需时间从35 s延长到49 s,而且使最大热释放速率从518 kW/m²降低到395 kW/m²。极限氧指数和热重分析进一步显示,随着石墨烯含量的增加,复合材料的极限氧指数增大;当石墨烯的质量分数为0.75%时,聚氨酯/石墨烯复合材料在点火5 s后会自动熄灭;热重曲线有两个阶段,第一阶段对应于副反应生成的小分子副产物在200~300℃的热分解,第二阶段对应于300~400℃的聚氨酯的热分解。随着石墨烯含量的增加,第一阶段的热失重减少,第二阶段的热失重增加,表明石墨烯的加入提高了聚氨酯分子链的热稳定性。

新型二维纳米材料过渡金属碳/氮化物(MXene)是利用MAX(三元层状化合物的总称)相中A(IV族元素)片层与MX(M代表过渡族金属元素,X为碳或氮片层)之间的弱结合力,选用合适的刻蚀剂,将MAX相中的A原子层剥蚀而制备的一种新型碳、氮化物二维纳米层状材料,如二维碳化钛等,兼具良好的阻燃性。Liu等^[20]对二维碳化钛和还原石墨烯进行组装,改善热塑性聚氨酯弹性体的阻燃性能。锥形量热仪显示,当添加质量分数为2.0%的二维碳化钛-还原石墨烯共混物时,热塑性聚氨酯纳米复合材料的发烟率和总发烟量分别降低了81.2%和54.0%。此外,热塑性聚氨酯/二维碳化钛-还原石墨烯的碳峰明显减少,一氧化碳产率和二氧化碳总产率分别为原来的54.1%和46.2%。

Jamsaza等^[23]利用酒精灯对聚氨酯/石墨烯进行燃烧试验。与纯聚氨酯相比,经过60 s的燃烧试验,聚氨酯/石墨烯仍然保持了原状。说明石墨烯具有良好的阻燃性能,可作为填料加入到聚氨酯后,能够有效增加复合材料的阻燃性。

7 结语

聚氨酯在汽车、石化、冶金、机械、纺织等领域都发挥了独特的优势,而纯聚氨酯在力学强度、热性能、导电性、阻燃性、抗菌性、耐腐蚀性等方面还存在一些不足,无法满足一些高性能产品和高性能领域的需要,所以如何进一步提高聚氨酯的性能受到众多研究人员的关注。聚氨酯/石墨烯的研究进展迅速,尤其是六方氮化硼、苯胺低聚物、碳纳米管、木粉、碳化钛等一维和二维体系与石墨烯混合掺杂,对进一步拓宽石墨烯在聚氨酯中的应用提供了理论和实践参考。同时,聚氨酯/石墨烯的应用研究仍然具有很大的发展空间,如聚氨酯/单一改性石墨烯的高性能化和高功能化的研究,改性石墨烯和不同维数填料的复配相容性及对聚氨酯高性能化和高功能化的影响研究等。

参考文献

- [1] Xu Zhigang, et al. *Polymer*, 2021, 218, 8. DOI: 10.1016/j.polymer.2021.123498.
- [2] Li Zhou, et al. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020, 9(1). DOI: 10.1016/j.jece.2020.104704.
- [3] Ritzen L, et al. *Polymers*, 2021, 13(2). DOI: 10.3390/polym13020305.
- [4] Silva N, et al. *Waste Management*, 2020, 116:131-139.
- [5] Tang Xiaojie, et al. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 402(15). DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123516.
- [6] Banikazemi S, et al. *Polymers for Advanced Technologies*, 2020, 10(31):2199-2208.
- [7] Zhang Guogao, et al. *Extreme Mechanics Letters*, 2021, 48. DOI: 10.1016/j.eml.2021.101434.
- [8] Costa I, et al. *Fibers and Polymers*, 2020, 21(8):1832-1840.
- [9] Tang Gang. *Advanced Powder Technology*, 2020, 31(4):1420-1430.
- [10] Czlonka S, et al. *Polymer Testing*, 2020, 87(6). DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.106511.
- [11] Tang Gang, et al. *Advanced Powder Technology*, 2020, 31(1):279-286.
- [12] Cui Yongyin, et al. *Applied Polymer*, 2021, 45(138). DOI: 10.1002/app.51346.
- [13] Orooji Y, et al. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 848. DOI: 10.1016/j.jallcom.2020.156495.
- [14] 张思雨,等. *复合材料学报*, 2021, 38(4):1043-1053.
Zhang Siyu, et al. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(4):1043-1053.

- [15] 曹明艳,等. 材料导报,2021,35(10):10 227–10 231.
Cao Mingyan, et al. Materials Reports, 2021, 35(10):10 227–10 231.
- [16] Yao Yuanyuan, et al. Composites Science and Technology, 2020, 17. DOI:10.1016/j.compscitech.2020.108457.
- [17] Jiang Qiuyue, et al. Composites Communications, 2020, 21. DOI: 10.1016/j.coco.2020.100416.
- [18] Guo Cuicui, et al. Environmental Pollution, 2020, 260. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114101.
- [19] Habibpour S, et al. Chemical Engineering Journal, 2021, 405. DOI: 10.1016/j.ccej.2020.126858.
- [20] Liu Chan, et al. Composites Part B Engineering, 2020, 203. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108486.
- [21] 张迅韬,等. 工程塑料应用,2021,49(3):161–165.
Zhang Xuntao, et al. Engineering Plastics Application, 2021, 49(3):161–165.
- [22] Zhang Y, et al. Composites Science and Technology, 2021, 211. DOI:10.1016/j.compscitech.2021.108843.
- [23] Jamsaza A, et al. Journal of Molecular Liquids, 2020, 307. DOI: 10.1016/j.molliq.2020.112979.
- [24] Wang Li, et al. Polymer Composites, 2020, 41:1 242–1 254.
- [25] Dhawan A, et al. Polymer Composites, 2021, 9(42):4 911–4 912.
- [26] 于运歌,等. 聚氨酯工业,2018,33(3):1–4.
Yu Yunge, et al. Polyurethane Industry, 2018, 33(3):1–4.
- [27] 张德洲,等. 功能材料与器件学报,2021,27(3):174–180.
Zhang Dezhou, et al. Journal of Functional Materials and Devices, 2021, 27(3):174–180.
- [28] Li Manjun, et al. Construction and Building Materials, 2020, 259. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.119797.
- [29] Huang Hao, et al. Construction and Building Materials, 2020, 242. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.117221.
- [30] Huang Qiren, et al. Tribology International, 2021, 155. DOI: 10.1016/j.triboint.2020.106784.
- [31] Ribeiro H, et al. Polymer Testing, 2020, 87. DOI:10.1016/j.polymertesting.2020.106510.
- [32] Du Weining, et al. Industrial & Engineering Chemistry, 2018, 57:7 146–7 155.
- [33] Fei Ting, et al. High Performance Polymers, 2019, 32(3):324–333.
- [34] Li Fengying, et al. Chemical Engineering Journal, 2021, 425. DOI: 10.1016/j.ccej.2021.130006.
- [35] Zhang Yan, et al. Composites Science and Technology, 2021, 211. DOI: 10.1016/j.compscitech.2021.108843.
- [36] Zahid M, et al. Composites Science and Technology, 2020, 200. DOI: 10.1016/j.compscitech.2020.108461.
- [37] Li Sishi, et al. Progress in Organic Coatings, 2021, 159. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2021.106414.
- [38] 张钊滢,等. 复合材料学报,2020,37(11):2 726–2 734.
Zhang Zhaoyan, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(11):2 726–2 734.
- [39] 区炳显,等. 包装工程,2021,42(11):87–95.
Ou Bingxian, et al. Packaging Engineering, 2021, 42(11):87–95.
- [40] Lu Xiang, et al. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2020, 208. DOI:10.1016/j.solmat.2019.110391.
- [41] Li An, et al. Composites:Part A, 2017, 103:161–167.
- [42] Tao Wenjie, et al. Composites:Part A, 2021, 143. DOI:10.1016/j.compositesa.2021.106293.
- [43] Wang Ying, et al. Materials Letters, 2021, 297. DOI:10.1016/j.matlet.2021.129938.
- [44] 吴思瑞,等. 化工与工程进展,2020,39(4):1 422–1 430.
Wu Sirui, et al. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(4):1 422–1 430.
- [45] 赵梁成,等. 复合材料学报,2020,37(2):242–251.
Zhao Liangcheng, et al. Journal of Composite Materials, 2020, 37(2):242–251.
- [46] Mirzadeh S, et al. Surface and Coatings Technology, 2021, 405. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2020.126507.
- [47] Najafabadia S A A, Materials Science & Engineering, 2020, 15. DOI: 10.1016/j.msec.2020.110899.
- [48] Rajitha K. Flatchem, 2020, 24(5). DOI: 10.1016/j.flatc.2020.100208.
- [49] Xue Dan, et al. Corrosion Science, 2020, 176. DOI:10.1016/j.corsci.2020.109055.