

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.01.028

碳纤维上浆改性及其增强聚合物材料研究进展

刘晓楠, 邝婷婷, 郭冰雪, 肖诚俊, 何敏, 刘玉飞

(贵州大学材料与冶金学院高分子材料与工程系, 贵阳 550025)

摘要:介绍了针对不同树脂基体制备碳纤维 (CF) 上浆剂的方法,并探讨 CF 上浆改性对 CF 增强聚合物基复合材料 (CFRPC) 界面性能及力学性能的影响。根据不同树脂基体类型综述了 CF 表面上浆后增强环氧树脂、聚酰胺、聚碳酸酯、聚醚砜及聚酰亚胺等聚合物材料的力学性能和界面粘结强度的变化情况。最后指出,针对不同树脂基体开发专用上浆剂,在 CF 生产过程中采用专用上浆剂对 CF 进行上浆处理,以实现 CF 生产完成后即可制备界面性能和力学性能优异的 CFRPC,是 CF 上浆改性研究的未来发展方向。

关键词:碳纤维;上浆剂;改性;复合材料;界面

中图分类号: TQ327.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)01-0161-04

Research Progress on Sizing Modification of Carbon Fiber and Its Reinforced Polymer Materials

Liu Xiaonan, Kuang Tingting, Guo Bingxue, Xiao Chengjun, He Min, Liu Yufei

(Department of Polymer Material and Engineering, College of Materials and Metallurgy, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract : The methods of preparing sizing agent for carbon fiber (CF) based on different resin substrates were introduced, and the effects of sizing modification of CF on the interface properties and mechanical properties of CF reinforced polymer matrix composites (CFRPC) were discussed. The changes of mechanical properties and interfacial bond strength of epoxy resin, polyamide, polycarbonate, polyethersulfone and polyimide reinforced by CF after surface sizing were reviewed according to different resin matrix types. Finally, it is pointed out that the development of special sizing agent for different resin substrates, and the use of special sizing agent in the production process of CF for sizing treatment, in order to realize the immediate preparation of CFRPC with excellent interface properties and mechanical properties after the production of CF, is the future development direction of CF sizing modification research.

Keywords : carbon fiber ; sizing agent ; modification ; composite ; interface

碳纤维 (CF) 具有低密度、耐磨损、高比强度和高比模量等优异性质,由其制备的聚合物复合材料质量轻、强度高且易加工^[1-2]。因此,CF 增强聚合物基复合材料 (CFRPC) 正逐渐替代金属材料,广泛应用于航空航天、汽车、体育器械等领域,以实现产品轻量化^[3]。CF 生产过程中的高温炭化和石墨化,使得其表面活性基团含量少、化学惰性严重,导致纤维与树脂基体粘接效果差而形成孔隙。当复合材料受到外力后易产生应力集中,使得复合材料的力学性能大为降低。因此,对 CF 表面进行改性处理,提高 CF 表面活性,增强 CF 与树脂基体的粘接,提高复合材料的界面性能,成为制备性能优异的复合材料的关键环节^[4]。目前使用的改性处理方

法有等离子体处理^[5]、接枝改性处理^[6-7]、氧化法处理^[8-9]、电化学法改性处理^[10-11]、上浆处理^[12-13]等。在 CF 生产过程中,需对 CF 进行上浆处理,以降低 CF 表面摩擦、避免 CF 在运输过程中产生毛丝,而商用上浆剂在提高复合材料的界面性能方面效果较差^[14-17]。因此,一般需要先去除 CF 生产过程中的商用上浆剂 (即去浆),然后再对 CF 进行上浆改性,而 CF 上浆改性对于提高复合材料界面性能尤为重要。笔者按不同树脂种类综述了采用不同上浆剂对 CF 表面进行上浆改性以提高 CFRPC 性能的方法,通过对比改性前后复合材料的力学性能,讨论上浆改性后 CF 表面形貌和性质的变化,以及其对复合材料界面性能和力学性能的影响,为 CFRPC

基金项目: 贵州大学 SRT 项目 [贵大 SRT 字 (2019)008 号]

通信作者: 何敏,教授,主要从事高性能材料的研究与开发

收稿日期: 2021-11-18

引用格式: 刘晓楠,邝婷婷,郭冰雪,等. 碳纤维上浆改性及其增强聚合物材料研究进展 [J]. 工程塑料应用,2022,50(1):161-164,169.

Liu Xiaonan, Kuang Tingting, Guo Bingxue, et al. Research progress on sizing modification of carbon fiber and its reinforced polymer materials[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(1):161-164, 169.

中 CF 的上浆改性研究发展提供参考。

1 环氧树脂 (EP)

EP 是环氧氯丙烷与双酚 A 或多元醇的缩聚产物,多种含活泼氢的化合物可以使 EP 开环固化交联生成网状结构。EP 具有良好的物理力学和电绝缘性能,与其它热固性树脂相比,EP 具有更好的材料粘接性能和工艺灵活性能^[16]。

高艳等^[18]用二乙醇胺在惰性气体的保护下,改性四官能团的 EP (MF-4101H),并且采用自乳化法制备得到耐高温型 EP 乳液。该实验最佳条件为 80℃ 下反应 2.5 h, EP 与二乙醇胺物质的量之比为 1:3,此时所制备的耐高温型上浆剂的乳液稳定性最好。与原 CF 相比,采用该上浆剂上浆后的 CF 表面的沟槽变浅,表面更加光滑,表面缺陷显著降低,并且由此上浆后的 CF 制备的 EP/CF 复合材料层合板仍能在 160℃ 高温下保持 65% 以上的层间剪切强度 (ILSS)。

Chi 等^[19]提出了在不同 pH 值下,采用改性 EP (PEG-E51) 和氧化石墨烯 (GO) 作为上浆剂,改善 CF 增强 EP 复合材料的界面相互作用和界面粘结性能的方法。在不同 pH 条件下制备 PEG-E51 和 GO 复合上浆剂,然后均匀地涂覆在 CF 表面,在 CF 表面形成上浆层,并成功地在 CF 周围引入多个 GO 薄片。随着 pH 值的变化,CF 的表面形貌发生了明显的变化。当 pH 值调整到 10 时,PEG-E51 和 GO 复合上浆剂改性的复合材料的界面剪切强度 (IFSS) 由未上浆改性 CF 增强 EP 材料的 51.36 MPa 提高到 77.23 MPa。扫描电子显微镜 (SEM) 和 IFSS 测试结果吻合较好,说明通过调节 PEG-E51 的 pH 值并将其与 GO 复合上浆,复合材料的界面结合效果较好。

Becker-Staines 等^[20]将 β -环糊精作为 CF 的上浆剂,发现 CF 表面可与 EP 周围的 β -环糊精之间形成络合作用,这种界面设计提高了 CF 和 EP 之间的附着力。上浆后复合材料的 IFSS 从 12 MPa 增加到 38 MPa。

Lim 等^[21]报道了上浆剂对 EP/CF 界面相互作用的影响。通过微滴脱粘法对 EP/CF 复合材料的 IFSS 进行了研究。结果表明,上浆剂改性后 IFSS 提高了 176.5%。

2 聚酰胺 (PA)

PA 材料具有良好的力学性能、耐热性、耐磨损性、耐化学药品性和自润滑性,且摩擦系数低,有一定的阻燃性,易于加工^[22]。CF 通过上浆处理后,有利于提高 PA 复合材料的拉伸强度和缺口冲击强度,改善复合材料之间的界面结合强度^[23-24]。

Kim 等^[24]为提高原位聚合法制备的 PA6 基 CFRTP 的力学性能,制备了己内酰胺-磷酸酯基苯氧基脂上浆剂。在复合材料加工过程中,上浆剂发生化学反应生成了 PA6,其可与 PA6 基体发生纠缠,形成机械互锁。通过对该上浆剂包

覆 CF 的分析,确定了最佳的包覆条件。并与己内酯改性苯氧脂上浆剂包覆 CF 制备的 PA6 基 CFRTP 进行了比较,发现拉伸强度提高了约 68.8%。

Cho 等^[25]通过在 CF 表面涂覆由 PA 上浆剂和还原 GO (RGO) 组成的混合物,增强了 PA6/CF 复合材料的界面粘结强度。改性后的 PA6/CF 复合材料的 ILSS 提高 70.7%,弯曲强度和弯曲弹性模量分别提高 73% 和 84%。另外,改性后的 PA6/CF 复合材料的储能模量和冲击吸收能分别提高 200% 和 73.3%。PA 上浆剂和 RGO 涂层组成的混合物包覆于 CF 表面,大大提高了 PA6/CF 复合材料的界面粘结强度。

Li 等^[26]通过电泳沉积阳离子壳聚糖 (CS) 对 CF 表面进行改性,以期提高 PA6/CF 复合材料的抗吸湿性能和力学性能。采用 SEM、傅里叶变换红外光谱 (FTIR)、X 射线光电子能谱 (XPS)、原子力显微镜 (AFM) 和 X 射线衍射 (XRD) 仪对不同处理阶段的 CF 进行了表征。研究表明,CS-CF 提高了 CF 的表面化学活性和粗糙度,增强了 CF 与 PA6 的化学键合和机械联锁。与去浆 CF (D-CF) 相比,CS-CF 的 O/C 配比从 20.34% 提高到 50.86%,复合材料的拉伸强度和弯曲强度分别提高了 50.31% 和 43.88%。此外,还提高了 PA6/CS-CF 的抗吸湿性能。

Zhan 等^[27]采用羧基酯化反应将亲水性聚合物聚乙二醇 (PEG) 和聚乙烯醇 (PVA) 作为上浆剂涂覆在 CF 表面,制备了 PA6/CF-g-PEG 和 PA6/CF-g-PVA 复合材料。采用 SEM, AFM, XPS, 热重 (TG) 分析和 ILSS 测试等方法研究了上浆改性后 CF 的性能。SEM 可以确定 CF 表面的形态; AFM 结果表明,改性 CF 比未改性 CF 的粗糙度显著提高; XPS 显示,含氧官能团浓度增加 186.1%; TG 分析结果表明,CF-g-PEG 的负载率为 0.5%, CF-g-PVA 的负载率为 2.0%; PA6/CF-g-PEG 和 PA6/CF-g-PVA 复合材料的 ILSS 分别提高了 22.7% 和 43.0%。

Hendlmeier 等^[28]探索了 EP 类和 PA 类上浆剂对 PA6/CF 复合材料性能的影响。拉伸性能的测定结果表明,低导电性环氧上浆剂改性的 PA6/CF 复合材料的拉伸性能最佳,而上浆剂和表面处理均不影响 CF 单丝的拉伸强度,复合材料的拉伸强度最高提高了 61.5%。

3 聚碳酸酯 (PC)

PC 是一种非晶态聚合物,熔融和冷却后会变成透明的玻璃状物质,具有良好的抗冲击性、尺寸稳定性、耐老化性、电绝缘性和较高的力学性能等优点^[23]。根据其结构又可分为脂肪族、芳香族、脂肪族-芳香族等多种类型,通过上浆可以改善 CF 的界面性能,提高 PC/CF 复合材料的电学和力学性能等^[29]。

Zhang 等^[30]采用热压成型的方法制备单向 CF 增强

PC 层压板,发现经 PC- 聚氨酯 (PC-PUR) 上浆后的 PC/CF 复合材料的 ILSS 最大,其次是用 PUR 上浆剂制备的复合材料 (62.9 MPa),较氧化 CF (OCF) 制备的复合材料提高了 24.8%; 而由未处理的 CF 制备的 PC/CF 复合材料的 ILSS 值最低 (38.1 MPa)。

Yao 等^[31]采用喷涂方法将 PC 树脂预涂覆在 CF 表面,采用后加热工艺保证涂层的均匀性,均匀化后在 CF 表面生成一层薄的 PC 薄膜。PC 的理想喷涂质量浓度为 5%~7.5%,浓度过高无法完成喷涂。溶液中的 PC 浓度与 CF 上的涂层厚度呈线性关系。研究发现,界面性能与 PC 树脂基体对 CF 的浸渍效果密切相关。浸渍效果越好,界面性能也越好。当 PC 涂层厚度增加到 0.06 μm 时,其拉伸强度和弯曲强度会开始提高,之后达到一个峰值;进一步增加厚度,拉伸强度最大提高了 19.09%。在热压处理过程中,CF 丝束不能完全被 PC 基体浸渍,导致 IFSS 和力学性能下降。PC 涂层在 CF 表面形成的薄膜有利于浸渍附近的 CF,可提高 CF 与 PC 基体之间的界面附着力。

张为苏等^[32]通过热压成型的方法制备 PC/CF 复合材料。研究了未处理 CF、氧化处理 CF、商业上浆剂 EP 改性 CF 和自制 PUR 上浆剂改性 CF 增强 PC 复合材料的性能。实验结果表明,用自制的 PUR 上浆处理后的 CF 表面含氧官能团是最多,由此可得, PUR 上浆剂相比于 EP 上浆剂更适合于 CF 增强 PC 复合材料,也更利于提高界面性能。

Ozkan 等^[33]采用 EP/ 苯氧 (EP-PHE)、聚酰亚胺 (PI) 和苯氧 (PHE) 作为上浆剂分别对 CF 进行上浆并制备 PC/CF 复合材料。研究发现,改性后的复合材料拉伸强度比纯 PC 高,且相比于未进行上浆处理的 CF 而言,由 PHE 和 EP-PHE 上浆改性 CF 制备的复合材料拉伸强度更大。这是因为,上浆剂在纤维表面和聚合物之间起“桥梁”作用,能提供更好的应力传递,使其具有更好的拉伸性能。

刘玉婷等^[34]为了改善 CF 与 PC 的界面强度,采用水性 PC (WPC) 和含碳纳米管 (CNTs) 的水性 PUR (WPU) 作为上浆剂对 CF 进行处理。采用单丝增强复合材料的单纤维碎裂试验和定向束复合材料的横向拉伸试验两种方法,研究了上浆剂种类和 CNTs 含量对复合材料界面性能的影响。结果表明, WPU 的成膜性优于 WPC,更有利于改善 PC/CF 复合材料的界面结合性能; CNTs 质量分数为 0.1% 时, CNTs 的加入可提高复合材料的界面结合性能。过量的 CNTs 会引起团聚,不利于界面性能的改善。CNTs 质量分数为 0.1% 时,复合材料的界面结合强度达到最大,其中 WPU 和 WPC 上浆处理 CF 增强 PC 复合材料的界面结合强度分别增加 97.6% 和 87.93%。

Kore 等^[35]采用含 450 K 长丝的 EP 上浆的纺织级聚丙

烯腈基 CF (TCF) 对 PC 进行增强。研究了 EP 上浆剂对 PC/TCF 复合材料的表面性能、热性能和力学性能的影响。XPS 和 FTIR 结果表明, PC/EP 上浆 TCF 复合材料中没有环氧烷基团,表明 PC 与 EP 上浆 TCF 的环氧烷环和羰基之间形成共价键。PC/EP 上浆 TCF 复合材料的拉伸强度、弯曲强度、压缩强度和 ILSS 分别为 323.53, 371.31, 397.87, 36.3 MPa。

4 聚醚砜 (PES)

PES 是一种综合性能优异的热塑性高分子材料,具有优良的耐热性能、耐水解性能、耐冲击性、物理力学性能、绝缘性能等^[36]。

Yuan 等^[37]在去离子水中直接电离聚酰胺酸 (PAA) 固体,得到了不含有机溶剂的 PAA 水性上浆剂。PAA 水性上浆剂经过热亚胺化反应后在 CF 表面形成连续均匀的 PAA 上浆层,上浆层对 CF 表面沟槽没有明显影响,但显著提高了 CF 的表面能,其表面能由 42.91 mN/m 提高到 54.55 mN/m,提高了 27.1%。与未上浆 CF 相比,上浆改性后的 CF 增强 PES 复合材料的 ILSS 由 33.6 MPa 提高到 49.7 MPa,并且单丝拔出测试表明改性后其界面粘合力提高了 47.9%。这主要是 PES 基体与上浆层之间范德华力的增加,以及上浆层与基体间分子链段的扩散与缠绕所致。此外,该上浆剂具有优良的耐热性能,初始分解温度 ($T_{d5\%}$) 高达 567℃。

Yuan 等^[38]为了提高 PES/CF 复合材料的界面附着力,用吐温 80 作为乳化剂制备 PES 乳液上浆剂。以 PES : 吐温 80 质量比为 8 : 3 混合后得到 Zeta 电位为 -52.6 mV、平均粒径为 117 nm 的 PES 乳液上浆剂。上浆改性后的 CF 表面含氧官能团增多,并且表面自由能相比于去浆 CF 提高 28%。PES/CF 复合材料的 ILSS 从 33.7 MPa 提高到 42.5 MPa,提高了 26%。复合材料力学性能的改善,主要是因为复合材料的界面相容性得到提高,聚合物链段在 CF 与 PES 之间扩散和缠结得到加强;并且上浆剂改善了 CF 表面的润湿性,从而也增强了复合材料的 ILSS。

5 PI

PI 是一种高性能工程塑料^[39],因其具有热变形温度高、阻燃性能和介电性能良好等优点在航天航空和电子器件等领域得到广泛的应用,尤其是航天航空领域对其力学性能提出更高的要求,因此 CF 增强 PI 复合材料的研究具有很重要的意义^[40]。

Hao 等^[41]利用超声分散技术合成了一种 $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{RGO}$ 改性 PI 水性上浆剂,在外加磁场作用下将其涂覆在 CF 表面,改性后的 PI/CF 复合材料的 ILSS 提高 159.0%。上浆后 CF 的表面有一层连续而均匀的 PAA 和 $\text{PAA-Fe}_3\text{O}_4/\text{RGO}$ 浆料层,形成较浅的沟槽。PAA 上浆 CF (P-CF) 的平均粗糙度比未上浆的低 48%,而在磁场下 $\text{PAA-Fe}_3\text{O}_4/\text{RGO}$ 上浆

CF (MH-CF) 的平均粗糙度比未上浆的高 10.7%, 无磁场下 PAA-Fe₃O₄/RGO 上浆 CF (H-CF) 的平均粗糙度则比未上浆的高 25%。AFM 测试表明, MH-CF 表面均匀分布一些小凸起, 而 H-CF 表面出现了大量的细长斑点, 说明在没有磁场的情况下 Fe₃O₄/RGO 存在严重的团聚现象。CF 表面的 Fe₃O₄/RGO 会增加粗糙度, 这增加了 CF 表面物理化学性质的复杂性。然而, 较大上浆剂的沉积可能会在界面中产生空隙, 降低复合材料的界面性能。

6 展望

近年来, 针对不同树脂基体制备不同类型上浆剂对 CFRPC 进行改性的研究越来越多。对 CF 进行上浆改性后, 改善了 CF 与树脂基体间的界面粘接性, 有利于增加树脂基体与 CF 间的附着力, 复合材料的界面粘结性能和力学性能明显提高。在未来, 研究者应不断探索, 寻找更好的上浆剂或改性方法以降低上浆改性成本, 继续扩大 CFRPC 的应用。笔者综述发现, 目前的研究大都需要对 CF 进行去浆后再进行上浆处理, 工艺复杂且成本高昂。根据 CFRPC 中树脂基体的不同制备性能优异的专用上浆剂, 在 CF 生产时的上浆处理过程中, 采用专用上浆剂进行处理, 以实现 CF 生产完成后即可制备界面性能优异的 CFRPC, 从而避免去浆后再上浆改性的复杂工艺, 可有效地降低成本。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Meinhard D, et al. Composite Structures, 2021, 256. DOI:10.1016/j.compstruct.2020.113138.
- [3] Lei Yongpeng, et al. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 13:2 126-2 137.
- [4] 郑志才, 等. 工程塑料应用, 2020, 48(5):118-122.
Zheng Zhicai, et al. Engineering Plastics Application, 2020, 48(5):118-122.
- [5] Bahrami M, et al. Composites Part B:Engineering, 2021, 221. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109033.
- [6] Eyckens D J, et al. Chemical Engineering Journal, 2018, 353:373-380.
- [7] Randall J D, et al. Carbon, 2019, 146:88-96.
- [8] Andideh M, et al. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2021, 141. DOI:10.1016/j.compositesa.2020.106201.
- [9] Fukushima R, et al. Advanced Composite Materials, 2021, 30(6): 527-543.
- [10] Jiang Jianjun, et al. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2017, 95:248-256.
- [11] Ma Quansheng, et al. Applied Surface Science, 2016, 379:199-205.
- [12] Andreas H, et al. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2019, 127. DOI:10.1016/j.compositesa.2019.105622.
- [13] 赵德明, 等. 工程塑料应用, 2021, 49(3):145-149.
Zhao Deming, et al. Engineering Plastics Application, 2021, 49(3):145-149.
- [14] Deng Zongyi, et al. Composites Part B:Engineering, 2021, 221. DOI:10.1016/j.compositesb.2021.109011.
- [15] Li Maohua, et al. Composites Part B:Engineering, 2021, 208. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108599.
- [16] Wang Weitao, et al. Composites Part B:Engineering, 2020, 197. DOI:10.1016/j.compositesb.2020.108044.
- [17] Wang Gang, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136(12). DOI:10.1002/APP.47232.
- [18] 高艳, 等. 高科技纤维与应用, 2020, 45(4):15-19.
Gao Yan, et al. Hi-Tech Fiber and Application, 2020, 45(4):15-19.
- [19] Chi Xiaofeng, et al. Polymers for Advanced Technologies, 2021, 32(9):3 458-3 473.
- [20] Becker-Staines A, et al. Heliyon, 2020, 6(4). DOI:10.1016/j.heliyon.2020.e03766.
- [21] Lim S H, et al. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2021, 146. DOI:10.1016/j.compositesa.2021.106424.
- [22] Liu Yufei, et al. Polymer, 2021, 214. DOI:10.1016/j.polymer.2020.123237.
- [23] Uematsu H, et al. Polymer, 2021, 223. DOI:10.1016/j.polymer.2021.123711.
- [24] Kim S W, et al. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2020, 139. DOI:10.1016/j.compositesa.2020.106104.
- [25] Cho B G, et al. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2021, 149. DOI:10.1016/j.compositesa.2021.106521.
- [26] Li Liping, et al. Fibers and Polymers, 2020, 21(3):583-589.
- [27] Zhan Yikai, et al. Polymer Engineering & Science, 2019, 59(5): 1 043-1 050.
- [28] Hendlmeier A, et al. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2020, 138. DOI:10.1016/j.compositesa.2020.106058.
- [29] 张欢, 等. 工程塑料应用, 2021, 49(8):14-18.
Zhang Huan, et al. Engineering Plastics Application, 2021, 49(8):14-18.
- [30] Zhang Weisu, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136(38). DOI:10.1002/app.47982.
- [31] Yao Tingting, et al. Composites Science and Technology, 2019, 182. DOI:10.1016/j.compscitech.2019.107763.
- [32] 张为苏, 等. 新型炭材料, 2019, 34(1):75-83.
Zhang Weisu, et al. New Carbon Materials, 2019, 34(1):75-83.
- [33] Ozkan C, et al. Composites Part B:Engineering, 2014, 62:230-235.
- [34] 刘玉婷, 等. 新型炭材料, 2021, 36(3):639-648.

- [13] 张响,等.现代塑料加工应用,2016,28(3):16-19.
Zhang Xiang, et al. Modern Plastics Processing and Applications, 2016,28(3):16-19.
- [14] 梁小杰,等.化工新型材料,2015,43(10):191-192.
Liang Xiaojie, et al. New Chemical Materials,2015,43(10):191-192.
- [15] 衣亚东,等.现代塑料加工应用,2021,33(4):5-9.
Yi Yadong, et al. Modern Plastics Processing and Applications, 2021,33(4):5-9.
- [16] 单丹,等.冶金与材料,2020,40(6):133-134.
Shan Dan, et al. Metallurgy and Materials,2020,40(6):133-134.
- [17] 熊利,等.矿冶工程,2018,38(5):33-35.
Xiong Li, et al. Mining and Metallurgical Engineering,2018, 38(5):33-35.
- [18] 王跃平,等.材料开发与应用,2021(4):57-61.
Wang Yueping, et al. Development and Application of Materials, 2021(4):57-61.
- [19] 姜涛,等.现代塑料加工应用,2019,31(5):9-12.
Jiang Tao, et al. Modern Plastics Processing and Applications, 2019,31(5):9-12.
- [20] 赵忠贤,等.塑料科技,2019,47(3):53-58.
Zhao Zhongxian, et al. Plastics Science and Technology,2019, 47(3):53-58.
- [21] 王耀声,等.功能材料,2018,49(8):8 205-8 210.
Wang Yaosheng, et al. Journal of Functional Materials,2018, 49(8):8 205-8 210.
- [22] 余为,等.材料研究学报,2017,31(4):300-308.
Yu Wei, et al. Chinese Journal of Materials Research,2017, 31(4):300-308.
- [23] 鄢柳柳,等.玻璃钢/复合材料,2016(7):38-41.
Yan Liuliu, et al. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2016(7):38-41.
- [24] 王彩华,等.机械强度,2018,40(2):312-318.
Wang Caihua, et al. Journal of Mechanical Strength,2018, 40(2):312-318.
- [25] 支超,等.东华大学学报:自然科学版,2016,42(3):338-343.
Zhi Chao, et al. Journal of Donghua University:Natural Science, 2016,42(3):338-343.
- [26] Yu Wei, et al. Fibers and Polymers,2017,18(5):971-978.
- [27] Keivani M, et al. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2015,54(6):581-593.
- [28] 黄婷,等.复合材料学报,2020,37(1):27-34.
Huang Ting, et al. Acta Materiae Compositae Sinica,2020, 37(1):27-34.
- [29] Mohammed I, et al. Polymer Composites,2021,42(8):3 786-3 798.
- [30] 李佩鲜,等.胶体与聚合物,2020,38(1):3-6.
Li Peixian, et al. Chinese Journal of Colloid & Polymer,2020, 38(1):3-6.
- [31] 李想,等.理化检验-物理分册,2017,53(4):244-248.
Li Xiang, et al. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A:Physical Testing),2017,53(4):244-248.
- [32] Vahtrus M, et al. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences,2017,66(4):339-346.
- [33] 陈沉,等.功能材料,2020,51(9):10 094-10 099.
Chen Chen, et al. Journal of Functional Materials,2020, 51(9):10 094-10 099.
- [34] 余为,等.材料导报,2020,34(8):16 161-16 166.
Yu Wei, et al. Materials Reports,2020,34(8):16 161-16 166.
- [35] 王照辉,等.钻井液与完井液,2020,37(4):412-420.
Wang Zhaohui, et al. Drilling Fluid & Completion Fluid,2020, 37(4):412-420.
- [36] 都待尧.工程机械,2020,51(4):81-87.
Du Daiyao. Construction Machinery and Equipment,2020, 51(4):81-87.
- [37] Zhuo Jinlong, et al. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2017,129(1):357-366.
- [38] Trofimov A N, et al. Polymer Science Series D,2017,10(2):95-98.

(上接第 164 页)

- Liu Yuting, et al. New Carbon Materials,2021,36(3):639-648.
- [35] Kore S, et al. Industrial & Engineering Chemistry Research,2021, 60(10):3 981-3 991.
- [36] Jung H S, et al. Fibers and Polymers,2021,22(1):184-195.
- [37] Yuan Haojie, et al. Applied Surface Science,2013,279:279-284.
- [38] Yuan Haojie, et al. Applied Surface Science,2014,317:737-744.
- [39] Zhang Yuanyuan, et al. Composite Structures,2021,270. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.114057.
- [40] Zhang Yuanyuan, et al. Composites Part B:Engineering,2021,212. DOI:10.1016/j.compstruct.2021.114057.
- [41] Hao Ruiting, et al. Applied Surface Science,2019,485:304-313.