

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.09.027

# 多尺度碳纳米材料 / 纤维增强体构筑及界面增强机制

董彬<sup>1,2</sup>, 李华<sup>3</sup>, 魏汝斌<sup>1,2</sup>, 何金迎<sup>1,2</sup>, 张文婷<sup>1,2</sup>, 李金鹿<sup>1,2</sup>, 李锋<sup>1,2</sup>, 翟文<sup>1,2</sup>

(1. 中国兵器工业集团第五三研究所, 济南 250031; 2. 山东三达科技发展有限公司, 济南 250031;

3. 海军驻西安弹药专业军事代表室, 西安 710043)

**摘要:** 首先介绍了杂化多尺度碳纳米材料 (包括碳纳米管和石墨烯等) / 纤维增强体的构筑工艺, 包括喷涂-浸涂工艺、化学气相沉积工艺、化学氧化接枝工艺、电泳沉积工艺和上浆剂复合工艺。分析了树脂 / 多尺度增强体的界面增强机制和失效模式, 探讨了多尺度增强体对复合材料综合性能的影响, 展望了多尺度增强体增强复合材料未来发展方向。针对多尺度增强体的优势和不足, 指出需通过界面结构设计进一步提高碳纳米材料与纤维之间的界面结合强度, 多尺度界面增强和失效机制将是下一步研究的重点方向。

**关键词:** 碳纳米管; 石墨烯; 多尺度增强; 界面设计与调控; 失效模式

**中图分类号:** TB322 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)09-0150-05

## Construction of Multi-scale Carbon Nanomaterials / Fiber Reinforcements and Its Interfacial Strengthening Mechanism

Dong Bin<sup>1,2</sup>, Li Hua<sup>3</sup>, Wei Rubin<sup>1,2</sup>, He Jinying<sup>1,2</sup>, Zhang Wenting<sup>1,2</sup>, Li Jinlu<sup>1,2</sup>, Li Feng<sup>1,2</sup>, Zhai Wen<sup>1,2</sup>

(1. Institute 53, China North Industries Group Corporation, Jinan 250031, China; 2. Shandong Sanda Scientific and Technological Development Co., Ltd., Jinan 250031, China; 3. Navy in Xi'an Ammunition Speciality Military Representative Office, Xi'an 710043, China)

**Abstract:** The construction technologies of hybrid multi-scale carbon nanomaterials (including carbon nanotubes and graphene) / fiber reinforcements were first introduced, including spraying coating-dip coating, chemical vapor deposition, chemical oxidation grafting, electrophoretic deposition, and fiber sizing compound. The interfacial strengthening mechanism and failure modes between multi-scale reinforcements and resin matrix were analyzed, the influences of multi-scale fiber reinforcements on the comprehensive properties of fiber reinforced composites were discussed, and the development direction of multi-scale reinforcement reinforced composites was also expected. According to the advantages and disadvantages of multi-scale reinforcements, the interfacial adhesion strength between the carbon nanomaterials and fibers should be further strengthened through the design of interfacial structure, and the interfacial strengthening and failure mechanism would be the key development direction in the future.

**Keywords:** carbon nanotube; graphene; multi-scale reinforcement; interfacial design and manipulation; failure mode

纤维增强树脂基复合材料具有比强度高、比模量高、易成型、耐腐蚀、尺寸稳定、能量吸收率高等优异性能, 已广泛应用于武器装备、航空航天、舰艇船舶和民用器材等领域<sup>[1]</sup>。复合材料的性能是由纤维增强体、树脂基体以及二者之间的界面应力传递能力共同决定的。增强纤维 (如碳纤维和芳纶纤维等) 普遍具有较强的化学惰性和较低的表面能, 导致复合材料的层间剪切强度和界面剪切强度等界面性能较弱, 难以充分发挥纤维优异力学性能的优势<sup>[2]</sup>。另外, 复合材料

属于典型的各向异性材料, 其优异的物理力学性能主要集中在纤维的轴向, 其在横向和厚度方向上的性能较弱, 限制了复合材料的应用领域<sup>[3]</sup>。因此, 通过对纤维与树脂之间的界面结构进行设计与优化, 可以提高界面应力传递能力, 改善复合材料的综合性能。

新型碳纳米材料 (包括碳纳米管和石墨烯等) 具有极高的比表面积、断裂强度和冲击韧性, 已成为复合材料理想的增强填料。碳纳米材料改性复合材料的方式主要包括: 对

**基金项目:** 兵器工业联合基金

**通讯作者:** 翟文, 研究员, 硕士, 主要从事高效抗冲击树脂基复合材料与功能防护材料的研发与设计工作 E-mail: 18653127753@163.com

**收稿日期:** 2020-06-12

**引用格式:** 董彬, 李华, 魏汝斌, 等. 多尺度碳纳米材料 / 纤维增强体构筑及界面增强机制 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(9): 150-154.

Dong Bin, Li Hua, Wei Rubin, et al. Construction of multi-scale carbon nanomaterials / fiber reinforcements and its interfacial strengthening mechanism[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(9): 150-154.

树脂基体改性和对增强纤维改性两种<sup>[4]</sup>。大量研究已经证实,将碳纳米材料加入到树脂基体中可显著提高树脂的力学性能<sup>[5-7]</sup>。但是,碳纳米材料改性树脂工艺存在明显的局限性,例如微量碳纳米材料的加入即可导致树脂黏度的急剧增加,降低了树脂对纤维的浸润性,增大了复合材料的成型难度<sup>[8]</sup>。由于碳纳米材料之间极强的相互作用,碳纳米材料在树脂基体中的分散极为困难。同时,当采用传统的真空辅助成型工艺制备复合材料时,树脂基体中的碳纳米材料可由于纤维织物的存在而发生严重的过滤作用<sup>[9-10]</sup>。

鉴于碳纳米材料改性树脂工艺的局限性,近年来,多尺度碳纳米材料/纤维增强体的构筑受到了广泛关注。与碳纳米材料改性树脂基体不同,将碳纳米材料沉积于纤维表面构筑多尺度增强体,可有效避免树脂黏度的增加和纤维对碳纳米材料的过滤作用。同时,多尺度增强体能够充分发挥纤维和碳纳米材料的各自优势,实现对复合材料界面结构的优化和性能的调控。杂化多尺度结构的构筑可以提高纤维表面粗糙度和纤维与基体的机械啮合程度,改善纤维表面的微界面结构。功能化碳纳米材料表面大量活性官能团的存在可实现碳纳米材料与基体的化学结合,进一步优化纤维与基体之间的界面性能,实现应力的有效传递。同时,碳纳米材料在纤维表面的沉积可有效弥补纤维表面的结构缺陷,强化纤维的力学性能<sup>[11]</sup>。

## 1 多尺度碳纳米材料/纤维增强体的构筑工艺

目前,多尺度碳纳米材料/纤维增强体的构筑工艺主要包括喷涂-浸涂工艺、化学气相沉积(CVD)工艺、化学接枝工艺、电泳沉积(EPD)工艺和上浆剂复合工艺等<sup>[12]</sup>。

### 1.1 喷涂-浸涂工艺

严格来说,喷涂和浸涂是两种不同的多尺度增强体构筑工艺,喷涂是利用高压喷枪将碳纳米材料分散液均匀喷涂于纤维表面,而浸涂是将纤维完全浸渍于碳纳米材料分散液中。但二者的原理是一致的,均是利用水或有机溶剂的挥发将碳纳米材料沉积于纤维表面,其中稳定分散的碳纳米材料分散液的制备是其关键技术<sup>[13]</sup>。B. D. Jamnani等<sup>[14]</sup>采用浸涂工艺制备酸化碳纳米管/玻璃纤维多尺度增强体,酸化碳纳米管的沉积提高了玻璃纤维与环氧树脂之间的界面剪切强度。Zhang Han等<sup>[15]</sup>采用喷涂工艺,将多壁碳纳米管沉积到碳纤维预浸料表面,碳纳米管的沉积显著提高了碳纤维复合材料的层间断裂韧性和应变破坏敏感能力。类似地,Yao Huichao等<sup>[16]</sup>将聚合物接枝碳纳米纤维和多壁碳纳米管稳定分散于乙醇溶液中,采用高压喷涂工艺将其沉积到碳纤维织物表面,碳纳米材料的沉积提高了复合材料的层间剪切强度和弯曲强度。F. Yavari等<sup>[17]</sup>对比分析了两种不同的石墨烯分布方式对环氧树脂/玻璃纤维复合材料性能的影响。

研究发现,将石墨烯直接喷涂于玻璃纤维表面而制备的复合材料的抗疲劳失效性能比石墨烯改性树脂工艺提高了8倍。原因是当石墨烯分布于纤维表面时可显著提高纤维与树脂的界面强度。尽管喷涂-浸涂工艺可实现大规模工程化应用,但碳纳米材料在纤维表面的团聚问题以及碳纳米材料/纤维之间较弱的界面结合限制了多尺度增强体性能的发挥。

### 1.2 CVD工艺

CVD工艺是目前国内外研究最多的碳纳米管/碳纤维多尺度增强体的制备工艺<sup>[18]</sup>。鉴于石墨烯和碳纳米管不同的化学气相生长机制,目前CVD工艺还不能用于多尺度石墨烯/纤维增强体的构筑。研究表明,CVD工艺构筑的碳纳米管/碳纤维增强体可显著提高增强体与基体的接触面积,改善复合材料的界面应力传递能力和冲击韧性<sup>[18]</sup>。CVD工艺影响因素复杂,设备要求较高,其中金属催化剂的种类和浓度、前驱体组成和浓度、沉积温度和时间等工艺参数均会显著影响碳纳米管在纤维表面的生长状态。Wang Yilei等<sup>[19]</sup>采用CVD工艺,在碳纤维表面均匀沉积单壁碳纳米管。层间剪切强度测试表明,单壁碳纳米管在碳纤维表面的沉积有利于界面载荷的有效传递。但是,催化剂金属颗粒在纤维表面的残留以及高温沉积条件等将严重损害碳纤维的力学性能<sup>[20]</sup>;高温下纤维表面聚合物上浆剂的去除将严重削弱碳纳米管与碳纤维之间的相互作用。近年来,等离子体CVD工艺在制备多尺度增强体领域显示出较大优势,该工艺可不使用金属催化剂,并且碳纳米材料在纤维表面为均匀连续结构,具有良好的发展前景和应用潜力<sup>[21-22]</sup>。

### 1.3 化学接枝工艺

化学接枝工艺是通过在碳纳米材料与纤维之间构筑共价键合的方法实现二者之间的有效结合,一般首先通过纤维预氧化的方式在其表面引入极性官能团,然后与功能化碳纳米材料发生化学反应,制备工艺极为繁琐。例如,Wu Guangshun等<sup>[23]</sup>采用化学接枝工艺制备了碳纳米管/碳纤维多尺度增强体,具体工艺如下:首先采用丙酮回流方式将碳纤维表面的上浆剂去除,浓硝酸预氧化处理碳纤维在其表面引入羟基和羧基, $\text{LiAlH}_4$ 处理将羧基全部转化为羟基,羟基与水解后的氨基硅烷偶联剂发生缩合反应,将氨基引入到碳纤维表面;对碳纳米管进行酰氯功能化,利用酰氯基团与氨基的反应,最终将碳纳米管接枝到碳纤维表面。类似地,Chen Lei等<sup>[24]</sup>采用化学接枝工艺制备了氧化石墨烯/聚对苯撑苯并二噁唑纤维(PBO)多尺度增强体。首先采用浓硫酸预氧化处理,在PBO表面引入羟基和羧基,采用硅烷偶联剂预沉积和氧化石墨烯二次沉积工艺,将氧化石墨烯接枝到PBO表面。研究发现,氧化石墨烯接枝PBO纤维的力学性能明显低于初始PBO纤维。原因是浓硫酸预氧化对PBO

纤维的力学性能产生损伤。

为避免纤维的预氧化处理对纤维力学性能产生的不利影响, Zhu Jiaojiao 等<sup>[25]</sup>利用聚多巴胺的超优异粘合性能,采用聚多巴胺预沉积和氧化石墨烯二次沉积工艺,将氧化石墨烯接枝到芳纶纤维表面,构筑了多尺度氧化石墨烯/芳纶纤维增强体。研究发现,芳纶纤维的力学性能得到显著提升,拉伸强度、断裂伸长率和断裂能分别提高了 8.2%、12.3% 和 19.7%。原因是氧化石墨烯有效弥补了纤维在生产制造过程中产生的缺陷,避免了应力集中。Wang Pengfei 等<sup>[26]</sup>采用类似的聚多巴胺预沉积工艺,将氧化石墨烯二次沉积到碳纤维表面,显著提高了环氧树脂/碳纤维复合材料的抗裂纹扩展性能。聚多巴胺预沉积工艺避免了纤维的强酸预氧化处理,同时强化了纤维的力学性能,表现出良好的应用潜能。尽管如此,化学接枝工艺极为繁琐,目前仍处于实验室研究阶段,难以实现大规模工程化应用。

#### 1.4 EPD 工艺

EPD 工艺是利用电化学原理将带电荷的碳纳米材料均匀沉积于纤维表面,通过控制带电荷碳纳米材料溶液的浓度和 pH 值、施加电压以及沉积时间等因素,调控和设计碳纳米材料在纤维表面的沉积速率和沉积量<sup>[27-29]</sup>。研究发现,EPD 工艺对导电纤维(如碳纤维)和非导电纤维(如玻璃纤维)均适用<sup>[30-31]</sup>。EPD 工艺可有效避免 CVD 工艺中金属催化剂和高温等不利因素对纤维造成的损伤,亦可避免化学接枝工艺中强氧化剂对纤维造成的损伤。Yao Xuming 等<sup>[32]</sup>采用超声波辅助 EPD 工艺,分别将羧基功能化碳纳米管和氧化石墨烯(二者均带负电荷)均匀沉积到碳纤维表面,对比分析了两种不同碳纳米材料的沉积对环氧树脂/碳纤维复合材料界面剪切强度的不同影响。结果表明,羧基功能化碳纳米管/碳纤维增强复合材料表现出更高的界面剪切强度。EPD 工艺制备的多尺度增强体中碳纳米材料与纤维之间是弱范德华力相互作用。为进一步提高碳纳米材料与纤维之间的界面结合, Wang Caifeng 等<sup>[33-34]</sup>均通过 EPD/热退火处理的工艺制备了氧化石墨烯/碳纤维多尺度增强体,在热退火处理的过程中,氧化石墨烯与碳纤维表面上浆剂发生化学反应,将氧化石墨烯以其共价键合的方式沉积于碳纤维表面,实现了碳纳米材料与纤维的有效结合,为充分发挥多尺度增强体的优异特性提供了崭新的途径。

#### 1.5 上浆剂复合工艺

涂敷上浆剂是纤维生产制造过程中必不可少的工序,而上浆剂复合工艺是将碳纳米材料提前均匀分散于纤维上浆剂中,通过纤维上浆工艺将碳纳米材料沉积于纤维表面,实现多尺度纤维增强体的构筑<sup>[12]</sup>。Zhang Xiaoqing 等<sup>[35]</sup>将氧化石墨烯分散于碳纤维上浆剂中,探究了上浆剂中氧化石

墨烯的浓度对环氧树脂/碳纤维复合材料层间剪切强度和界面剪切强度的影响。研究发现,上浆剂中的氧化石墨烯提高了环氧树脂对碳纤维的浸润性,并且纤维表面的氧化石墨烯可与环氧树脂形成化学键和氢键而相互作用。Ma Lichun 等<sup>[36]</sup>将功能化石墨烯通过上浆剂复合工艺均匀沉积于碳纤维表面。单纤维微液滴脱粘测试和三点弯曲测试表明,复合材料的层间剪切强度、界面剪切强度和弯曲强度等均得到大幅提升。上浆剂复合工艺方法简单、经济性好,因此最易实现工业化。

#### 2 多尺度界面增强机制和失效模式

目前国内外已逐步开展关于多尺度结构界面增强机制的研究。碳纳米材料的引入导致复合材料中三种界面同时存在:碳纳米材料/纤维界面、碳纳米材料/基体界面以及纤维/基体界面,使得界面增强机制和失效模式更加复杂。针对碳纳米管/碳纤维多尺度微纳结构, An Feng 等<sup>[37]</sup>提出了三种界面失效模式,分别为:①碳纤维从基体中拔出时,碳纳米管与碳纤维发生剥离,碳纳米管残留于基体中;②碳纳米管和碳纤维同时从基体中拔出,碳纳米管残留于碳纤维表面;③碳纳米管发生断裂,一部分随碳纤维拔出,一部分残留于基体中。研究发现,碳纳米管/碳纤维多尺度微纳结构的三种失效模式同时存在,只是所占比例不同。Wang Chao 等<sup>[38]</sup>分别通过化学接枝和 CVD 工艺制备了碳纳米管/碳纤维多尺度增强体,对比分析了二者之间界面失效机制的差异。界面失效机制随着碳纳米管在碳纤维表面分布形貌的不同而明显不同。对于化学接枝工艺制备的多尺度增强体结构,其界面失效机制主要包括切向失效和正向失效;对于 CVD 工艺制备的多尺度增强体结构,其界面失效机制则为碳纳米管从碳纤维表面的剥离和碳纳米管的断裂。Peng Qingyu 等<sup>[39]</sup>对比分析并阐释了羧基功能化碳纳米管/碳纤维和氧化石墨烯/碳纤维多尺度结构的不同界面增强机制。羧基化碳纳米管和氧化石墨烯表面大量活性官能团的存在实现了碳纳米材料与环氧树脂基体的化学结合,有效阻止裂纹的扩展。碳纳米材料的沉积提高了纤维表面的粗糙程度和纤维与基体之间的机械啮合程度。由于氧化石墨烯具有比碳纳米管更大的二维尺寸,导致氧化石墨烯在碳纤维表面的接枝密度低于碳纳米管,氧化石墨烯/碳纤维多尺度增强体结构的界面结合强度略低于碳纳米管/碳纤维多尺度增强体结构。

#### 3 多尺度增强体对复合材料性能的影响

##### 3.1 界面结合性能

多尺度增强体的构筑可显著提高纤维的表面粗糙度和树脂对纤维的浸润程度,树脂与纤维之间的机械互锁增强了界面应力传递能力。大量研究已经证实,采用碳纳米材料对

纤维进行修饰可显著提高复合材料的层间剪切强度和界面剪切强度等界面性能。Huang Shengyun 等<sup>[34]</sup>采用 EPD/热退火工艺制备氧化石墨烯/碳纤维多尺度增强体。研究发现,环氧树脂/多尺度增强体复合材料的界面剪切强度由 47.29 MPa 提高到 81.75 MPa,提高 73%。An Feng 等<sup>[37]</sup>采用 CVD 工艺制备碳纳米管/碳纤维多尺度增强体。研究发现,经碳纳米管沉积后,碳纤维与环氧树脂基体之间的界面剪切强度提高了约 94%。Zhang Tong 等<sup>[40]</sup>通过 EPD 和化学接枝工艺将碳纳米管和氧化石墨烯共同沉积于碳纤维表面。单纤维微液滴拉伸测试表明,复合材料的界面剪切强度提高了 69.7%,碳纳米管与氧化石墨烯对碳纤维起到协同增强的作用。Sun Tong 等<sup>[41]</sup>采用 EPD 工艺制备了氧化石墨烯/碳纤维多尺度增强体。结果表明,复合材料的界面剪切强度由 45.0 MPa 提高到 61.9 MPa,提高 37.6%。

### 3.2 物理力学性能

多尺度增强体在提高复合材料界面性能的同时,也对复合材料的拉伸强度和弯曲强度等力学性能产生积极影响。Li Min 等<sup>[42]</sup>采用喷涂-浸涂工艺,将羧基功能化和羟基功能化碳纳米管沉积到碳纤维表面,真空辅助成型工艺制备环氧树脂/碳纳米管/碳纤维复合材料,结果显示,复合材料的拉伸强度由 1.46 GPa 提高到 1.62 GPa,提升 11%。Liu Liu 等<sup>[43]</sup>采用化学接枝工艺制备了氧化石墨烯/碳纤维多尺度增强体,热压工艺制备了聚醚醚酮/氧化石墨烯/碳纤维复合材料。结果表明,复合材料的弯曲强度由 762 MPa 提高到 981 MPa,提升 28.7%。A. K. Srivastava 等<sup>[44]</sup>采用喷涂工艺制备了石墨烯纳米片层/碳纤维多尺度增强体,真空辅助成型工艺制备了环氧树脂/石墨烯纳米片层/碳纤维复合材料。结果表明,复合材料的弯曲强度由 629 MPa 提高到 777 MPa,提升 23.5%,充分显示出碳纳米材料对复合材料极佳的增强效果。

### 3.3 其它功能特性

研究表明,多尺度增强体增强复合材料表现出更加优异的功能特性,如抗高速弹丸侵彻、电磁屏蔽、压阻效应等。

V. M. Boddu 等<sup>[45]</sup>采用 CVD 工艺,在 E-玻璃纤维织物表面沉积碳纳米管制备了多尺度增强体,研究了聚酯/多尺度增强体复合材料的抗高速弹道侵彻性能。结果表明,多尺度增强体增强复合材料在高应变率下的比吸能提高了 106%,弹道极限速度提高了 11.1%。该研究证实了多尺度碳纳米管/纤维增强体的构筑对复合材料的抗高速冲击性能产生了积极影响。

Wu Jiaming 等<sup>[46]</sup>通过 EPD 工艺和化学还原的方式制备了还原氧化石墨烯/碳纤维多尺度增强体,探究了沉积时间和沉积电压等沉积工艺参数对多尺度增强体增强环氧树

脂复合材料电磁屏蔽性能的影响。研究表明,在最佳 EPD 工艺(沉积电压 21 V,沉积时间 60 min)条件下,当频率为 12.4 GHz 时,多尺度增强体增强环氧树脂复合材料获得了最大的电磁屏蔽效能(37.6 dB),比环氧树脂/碳纤维复合材料的屏蔽效能提高了 47.6%。类似地,Wan Xiangrong 等<sup>[47]</sup>通过化学接枝工艺制备了还原氧化石墨烯/玻璃纤维多尺度增强体。在 8.2~12.4 GHz 的频率范围内,多尺度增强体增强不饱和聚酯树脂复合材料的电磁屏蔽效能最大值为 21.3 dB,充分显示出多尺度增强体在电磁屏蔽领域的巨大优势。

Hao Bin 等<sup>[48]</sup>利用多尺度增强体增强复合材料的压阻效应,采用 EPD 工艺分别构筑了碳纳米管/玻璃纤维和石墨烯/玻璃纤维多尺度增强体,对比分析了两种增强体在监测结构破坏方面的应用潜能。结果表明,两种多尺度增强体增强的环氧树脂复合材料均表现出负温度系数行为,石墨烯/玻璃纤维增强复合材料比碳纳米管/玻璃纤维增强复合材料表现出对温度和应变更强的敏感性。引起复合材料压阻效应的原因是在外力条件下,纤维与树脂基体之间产生了不同的界面结构。石墨烯/玻璃纤维增强复合材料在监测复合材料结构破坏方面更具有价值,可提供更加详细的结构破坏细节。

## 4 结语

尽管可以通过一系列先进工艺获得碳纳米材料修饰的多尺度纤维增强体,但是碳纳米材料与纤维之间的界面结合往往较弱,复合材料的界面失效通常发生在碳纳米材料与纤维的界面结合处。换句话说,碳纳米材料的沉积有时会严重降低纤维与树脂之间的界面结合,因此需通过界面结构设计来进一步提高纤维与碳纳米材料之间的界面结合,完善制备工艺。

碳纳米材料的引入导致纤维/碳纳米材料、碳纳米材料/树脂和纤维/树脂三种界面同时存在,使得多尺度界面增强机制和失效模式更加复杂,影响因素众多,目前国内外对于此方面的研究还处于起步阶段,亟需进一步加强研究。由于界面性质的改变,碳纳米材料在纤维表面的沉积可引起复合材料性能的一系列变化,并赋予复合材料新的功能特性。多尺度增强体与树脂复合后的新型复合材料的性能研究需深入探索。

## 参考文献

- [1] Mouritz A P. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 25: 105502. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105502>.
- [2] Mittal G, et al. Composites Part B: Engineering, 2018, 138: 122-139.
- [3] Jiao Weiwei, et al. Journal of Materials Science, 2017, 52(24): 13812-13828.

- [4] Zhou Hongwei, et al. Composites Part B:Engineering, 2016, 88: 201–211.
- [5] Ahmadi-Moghadam B, et al. Engineering Fracture Mechanics, 2015, 143:97–107.
- [6] Ramos-Fernandez G, et al. Polymer Composites, 2018, 39(S4): E2116–E2124.
- [7] Zahid S, et al. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(1):197–204.
- [8] Adak N C, et al. Composites Part B:Engineering, 2018, 149:22–30.
- [9] Wang Ben, et al. Composites Science and Technology, 2018, 158: 51–60.
- [10] Zhang Han, et al. Composites Science and Technology, 2017, 139: 138–145.
- [11] Hung P, et al. Composites Part B:Engineering, 2018, 133:240–257.
- [12] Karger-Kocsis J, et al. Composites Science and Technology, 2020, 186:doi:10.1016/j.compscitech.2019.107932.
- [13] Nagi C S, et al. Materials and Design, 2020, 193:doi:10.1016/j.matdes.2020.108831.
- [14] Jamnani B D, et al. Journal of Nanomaterials, 2015, 16(1):doi: 10.1155/2015/149736.
- [15] Zhang Han, et al. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2015, 70:102–110.
- [16] Yao Huichao, et al. Composite Structures, 2018, 195:288–296.
- [17] Yavari F, et al. ACS Applied Materials & Interfaces, 2010, 2(10): 2738–2743.
- [18] Feng Lei, et al. Materials and Design, 2017, 113:9–16.
- [19] Wang Yilei, et al. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(10):8960–8966.
- [20] He Delong, et al. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(3): 2948–2958.
- [21] Sha Zhao, et al. Composites Science and Technology, 2019, 184: doi:10.1016/j.compscitech.2019.107867.
- [22] Bayram O, et al. Ceramics International, 2019, 45(11):13664–13670.
- [23] Wu Guangshun, et al. Composites Part B:Engineering, 2015, 82: 50–58.
- [24] Chen Lei, et al. Composites Science and Technology, 2015, 106: 32–38.
- [25] Zhu Jiaojiao, et al. Chemical Engineering Journal, 2017, 310:134–147.
- [26] Wang Pengfei, et al. Materials & Design, 2017, 113:68–75.
- [27] Wu Yadong, et al. Composites Part B:Engineering, 2020, 195:doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108093.
- [28] Mahmood H, et al. Composites Science and Technology, 2016, 126:149–157.
- [29] Sourti H, et al. International Journal of Smart and Nano Materials, 2018, 9(3):167–183.
- [30] Tripathi M, et al. Composites Part B:Engineering, 2018, 148:272–280.
- [31] Yuan Xiaomin, et al. Applied Surface Science, 2018, 458: 996–1005.
- [32] Yao Xuming, et al. Composites Part B:Engineering, 2018, 132: 170–177.
- [33] Wang Caifeng, et al. Composites Science and Technology, 2016, 135:46–53.
- [34] Huang Shengyun, et al. Carbon, 2013, 52:613–616.
- [35] Zhang Xiaoqing, et al. ACS Applied Materials & Interfaces, 2012, 4(3):1543–1552.
- [36] Ma Lichun, et al. Composites Part B:Engineering, 2019, 176:doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107078.
- [37] An Feng, et al. Materials and Design, 2012, 33:197–202.
- [38] Wang Chao, et al. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2013, 50:1–10.
- [39] Peng Qingyu, et al. Journal of Materials Chemistry, 2012, 22(13): 5928–5931.
- [40] Zhang Tong, et al. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2019, 125:doi:10.1016/j.compositesa.2019.105573.
- [41] Sun Tong, et al. Applied Surface Science, 2020, 499:doi:10.1016/j.apsusc.2019.143929.
- [42] Li Min, et al. Carbon, 2013, 52:109–121.
- [43] Liu Liu, et al. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2018, 107:616–625.
- [44] Srivastava A K, et al. Composites Part B:Engineering, 2019, 179: doi:10.1016/j.compositesb.2019.107539.
- [45] Boddu V M, et al. Composites Part B:Engineering, 2016, 88:44–54.
- [46] Wu Jiaming, et al. Composites Part B:Engineering, 2016, 105: 167–175.
- [47] Wan Xiangrong, et al. Composite Interfaces, 2018, 25(10):883–900.
- [48] Hao Bin, et al. Composites Science and Technology, 2016, 129: 38–45.