

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.08.030

# 碳纳米管 / 碳纤维复合材料研究进展

刘爱云, 刘俊聪, 徐井利, 张建芹, 邢文芳, 张海云, 刘方彪, 王丹勇, 李树虎, 陈以蔚

(山东非金属材料研究所, 济南 250031)

**摘要:**介绍了碳纳米管增强碳纤维复合材料的进展情况, 主要包括理论研究、碳纳米管定向排列、碳纳米管改性树脂、碳纳米管网格和碳纳米管改性碳纤维等五个方面。指出了碳纳米管 / 碳纤维复合材料进一步发展急需解决三方面的问题, 一方面是加强碳纳米管增强机理方面的研究以指导试验研究, 另一方面是针对碳纳米管的增强效应需量化, 再有就是加强碳纳米管 / 碳纤维复合材料的三相界面结合力方面研究。

**关键词:**碳纳米管; 碳纤维复合材料; 层合板

**中图分类号:** TQ323.5    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-3539(2020)08-0158-05

## Research Progress on Carbon Nanotube / Carbon Fiber Composites

Liu Aiyun, Liu Juncong, Xu Jingli, Zhang Jianqin, Xing Wenfang, Zhang Haiyun, Liu Fangbiao, Wang Danyong, Li Shuhu, Chen Yiwei  
(Shandong Non-metallic Materials Institute, Jinan 250031, China)

**Abstract :** The progress of carbon nanotubes / carbon fiber composites was presented, including theoretical research, aligned carbon nanotubes, carbon nanotube modified resin, carbon nanotube grid and carbon nanotube modified fiber. It was pointed out that the further development of carbon nanotubes / carbon fiber composites needs to solve three problems urgently. On the one hand, strengthening the research on the reinforcement mechanism of carbon nanotubes to guide the experimental research, on the other hand, it is necessary to quantify the enhancement effect of carbon nanotubes, and to strengthen the three-phase interfacial bonding force of composites.

**Keywords :** carbon nanotube ; carbon fiber composite ; laminated plate

碳纤维作为一种高性能纤维, 是近年来发展最快的增强材料之一。碳纤维增强树脂基复合材料已应用于多个领域, 但目前碳纤维增强树脂复合材料优异的物理力学性能主要体现在碳纤维的轴向方向。为了提高材料的层间性能, 研究者在复合材料中加入碳纳米管, 关于碳纳米管 / 碳纤维多尺度增强复合材料的研究被大量报道, 主要是开展的碳纳米管的加入方式、方法、复合工艺、材料的性能和应用等方面的研究。笔者现就碳纳米管 / 碳纤维复合材料的进展情况作一介绍。

### 1 理论研究方面

为了研究碳纳米管 / 碳纤维多尺度复合材料层内增韧和层间增韧效果, 聂佳祺<sup>[1]</sup>采用多尺度模拟方法, 构建了碳纳米管 / 碳纤维数学模型, 并计算了材料的力学性能。

张加贝等<sup>[2]</sup>制备了碳纳米管 / 碳纤维多尺度纤维, 然

后结合电化学氧化和电泳技术从微观角度分析了多尺度纤维的界面增强机理。

V. Mirjalili 等<sup>[3]</sup>模拟了定向和随机取向的碳纳米管对聚合物断裂韧性的影响。利用模型确定了碳纳米管的几何形状、力学性能对其改性的聚合物断裂韧性增强的影响。

李浩<sup>[4]</sup>采用分子模拟和实验相结合的方法, 分析了碳纳米管对环氧树脂高低温弹性模量的影响, 并从微观角度进行了解释, 建立起微观结构与宏观弹性模量的联系。

吴涛<sup>[5]</sup>采用均匀化理论, 利用计算语言编写程序建立了多尺度模型, 模拟预测了碳纳米管 / 碳纤维多尺度增强风机叶片复合材料的性能。

戴剑锋等<sup>[6]</sup>模拟计算了定向排列的碳纳米管复合材料的电导率及其渗流阈值。发现复合材料的电导率及渗流阈值取决于碳纳米管长度、长径比和结构, 也就是碳纳米管的

通讯作者: 刘爱云, 副研究员, 主要研究方向为复合材料 E-mail: liuaiyun0818@126.com

收稿日期: 2020-05-25

引用格式: 刘爱云, 刘俊聪, 徐井利, 等. 碳纳米管 / 碳纤维复合材料研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(8):158-162.

Liu Aiyun, Liu Juncong, Xu Jingli, et al. Research progress on carbon nanotube / carbon fiber composites[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(8):158-162.

几何尺寸和结构影响。

## 2 碳纳米管定向排列方面

董怀斌等<sup>[7]</sup>采用高频电场诱导法使碳纳米管定向,制备了碳纳米管/碳纤维增强环氧树脂复合材料。与未加定向碳纳米管时相比,复合材料的层间剪切强度最大提高28.9%,压缩强度提高28.83%,弯曲强度提高15.01%。

邓火英等<sup>[8]</sup>采用两种碳纳米管取向膜进行层间增韧,分别是碳纳米管膜垂直于碳纤维和平行于碳纤维。研究了碳纳米管增韧后的碳纤维复合材料的力学性能和层间韧性。

陈伟等<sup>[9]</sup>制备出超顺磁性复合粒子 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -碳纳米管,利用磁场力使带有磁性粒子的碳纳米管定向。带有磁性粒子的碳纳米管复合材料表现出明显的各向异性。

李长青等<sup>[10]</sup>采用电场诱导法制备了环氧树脂/碳纳米管复合材料,碳纳米管均匀分散且沿电场方向有序排列在环氧树脂中。碳纳米管含量为2.5%时,材料的拉伸强度提高了26.3%。

孙昌等<sup>[11]</sup>自制了一套反复抽打装置,并使用该装置获得了取向排列碳纳米管增强聚酯复合材料。碳纳米管的取向是利用了反复抽打装置的挤压过程,流动剪切力破坏了碳纳米管的聚集或缠结,使碳纳米管优先沿流体流动的方向排列。

张钰<sup>[12]</sup>采用弱磁场诱导制备了碳纳米管增强环氧树脂复合材料,并研究了其结构与性能。同时开展了磁场诱导对复合材料性能的影响规律和碳纳米管取向体制机理研究。

邱军等<sup>[13]</sup>开展不同诱导方式下制备取向碳纳米管增强复合材料,诱导力包括机械力、电场力、磁场力、液晶诱导等。同时分析了各种诱导方式制备复合材料的进展。

戴剑锋等<sup>[14]</sup>采用机械拉伸的工艺制备了碳纳米管均匀分散并且定向排列的复合材料,碳纳米管沿拉伸方向排列。

姜久兴等<sup>[15]</sup>提出了一种用于制备定向排列碳纳米管复合材料的装置。使用该装置,当碳纳米管含量为0.5%时,制备的复合材料拉伸强度提高了70%。

张超等<sup>[16]</sup>同样采用机械拉伸的方法制备了碳纳米管定向排列的复合材料。沿拉伸方向,复合材料的弹性模量提高了210.3%,拉伸强度提高了209%。

刘方彪等<sup>[17]</sup>针对单向纤维增强树脂基复合材料横向强度低的问题,制备了取向碳纳米管/碳纤维(玻璃纤维)增强环氧树脂复合材料,与碳纳米管未取向复合材料相比,横向拉伸和弯曲性能都有大幅度提高。

赫玉欣等<sup>[18]</sup>研究了低温情况下,碳纳米管的有序排列对复合材料低温抗裂纹性能的影响。通过顺磁粒子四氧化三铁使碳纳米管在磁场下取向,制备出碳纳米管定向排列的碳纤维复合材料。复合材料的低温力学性能提高,热膨胀系

数降低。相对于纯树脂,碳纳米管定向的复合材料热膨胀系数降低了41.6%,相对于碳纤维树脂复合材料,低温下微裂纹密度降低了56.2%。

## 3 碳纳米管改性树脂方面

范雨娇等<sup>[19]</sup>采用两种碳纳米管加入方式制备复合材料,一种是在树脂中加入碳纳米管后制备预浸料,另外一种是将碳纳米管喷涂在预浸料表面。比较了加入方式对碳纳米管/碳纤维增强环氧树脂复合材料层合板的层间断裂韧性和层间剪切强度的影响。

李娜等<sup>[20]</sup>对多壁碳纳米管进行改性处理,然后通过热压成型制备碳纳米管/碳纤维增强环氧树脂复合材料层合板,当碳纳米管含量为0.5%时,与没有碳纳米管的复合材料层合板相比,其压缩强度、层间剪切强度和冲击后压缩强度都有所提高。

A. Warrier等<sup>[21]</sup>通过在玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料中加入碳纳米管,和在环氧树脂基体中加入碳纳米管两种方式制备复合材料。研究了碳纳米管的加入对复合材料热力学性能和I型层间断裂韧性的影响。

魏化震等<sup>[22]</sup>利用碳纳米管对酚醛树脂进行改性。当碳纳米管含量为0.5%时,复合材料的弯曲强度达到最大值891.8 MPa,比未加碳纳米管时提高了168.4 MPa;当碳纳米管含量为1.5%时,复合材料的压缩强度、层间剪切强度、冲击强度均达到最大值。

赵忠博<sup>[23]</sup>选择超声共混工艺将碳纳米管引入到碳纤维增强环氧树脂复合材料中,研究结果发现,碳纳米管仅仅是增韧了树脂基体,并没有形成梯度界面层。

张清杰<sup>[24]</sup>首先对碳纳米管进行了官能化处理,包括氨基化和羧基化。重点研究了不同官能团对碳纳米管官能化后的影响,氨基化后碳纳米管的稳定性增强,团聚减少,带有氨基基团的碳纳米管可以与环氧基团发生开环反应。氨基化的碳纳米管与醚类反应,制备了液态碳纳米管增强体,解决了纳米粒子添加后树脂黏度大幅增加、分散性降低、工艺性变差的技术难题。

柳和生等<sup>[25]</sup>研究了超声振荡工艺参数包括振荡时间、功率和振荡频率对碳纳米管在树脂中的分散影响。

南辉<sup>[26]</sup>同样将碳纳米管功能化处理,包括氨基化、羧基化和酰氯化。官能化后的碳纳米管的分散性明显好于未经官能化处理的碳纳米管分散性。选取优异的配比,制备了碳纳米管/碳纤维增强环氧树脂复合材料层合板。

刘仲良等<sup>[27]</sup>利用改性后的碳纳米管制备了环氧树脂/碳纳米管复合材料,主要研究了复合材料的固化动力学、流变学性、电学、导热性、耐热性和力学性能。

于广等<sup>[28]</sup>研究了碳纳米管含量对聚酰亚胺/碳纤维复

合材料力学性能和热稳定性的影响。碳纳米管含量为聚酰亚胺质量的 0.05% 时,复合材料具有最佳的高温力学性能,400℃下,拉伸强度提高 15.8%,弯曲强度提高 9.6%,层间剪切强度提高 12.8%。碳纳米管含量为聚酰亚胺质量的 0.2% 时,复合材料具有最佳的常温力学性能,常温拉伸强度提高 19.5%,弯曲强度提高 20.6%,层间剪切强度提高 14.7%。另外,碳纳米管的加入对复合材料的热稳定性几乎没有影响。

#### 4 碳纳米管改性碳纤维方面

范汶鑫等<sup>[29]</sup>通过电化学方法在连续碳纤维表面生长碳纳米管,碳纳米管均匀、规整地生长在纤维表面。与未用碳纳米管处理碳纤维时相比,碳纤维复合材料的层间剪切强度提高了 11%。

樊序敏等<sup>[30]</sup>运用单丝断裂法研究了碳纳米管通过水溶液加入对碳纤维复合材料性能的影响,主要是碳纤维与环氧树脂界面粘结性能的影响和影响机理。经过碳纳米管水溶液浸润处理后,碳纤维/树脂界面处的机械结合力增强,界面粘结强度明显提高,增幅最高达 35.8%。

蔡安宁<sup>[31]</sup>用偶联剂将碳纳米管化学接枝到碳纤维表面,提高了碳纤维与环氧树脂基体的界面结合强度和复合材料的力学性能。

王雷<sup>[32]</sup>采用快速冷冻干燥技术制得碳纳米管/碳纤维多尺度增强体,在碳纤维增强体中形成均匀分布的碳纳米管网络。然后利用真空浸渍工艺制备了碳纳米管/碳纤维增强环氧树脂复合材料,复合材料的力学性能有所提高。

李伟等<sup>[33]</sup>在碳纤维表面沿径向生长碳纳米管,带有碳纳米管的碳纤维与树脂复合固化为复合材料,对比了径向带有碳纳米管和不带有碳纳米管的复合材料的性能差别。研究表明,加入碳纳米管后会显著提高碳纤维的纵向和厚度方向的电导率,增加幅度约为两个数量级。

张福华<sup>[34]</sup>制备了胺功能化的碳纳米管,并对碳纤维进行了酰氯功能化处理,通过胺基与酰氯官能团间的取代反应将碳纳米管接枝到碳纤维表面,制备出新型碳纳米管/碳纤维多尺度增强体。增强复合材料的界面剪切强度较 T300 碳纤维提高了 150%。

陈超等<sup>[35]</sup>通过超声的方法将多壁碳纳米管附着在碳纳米材料表面,然后采用浸渍法将碳纳米材料涂覆在纤维表面,通过热压成型工艺制备环氧树脂/改性碳纤维复合材料。

梅蕾<sup>[36]</sup>使用聚酰胺-胺对碳纤维表面进行氨基修饰并接枝碳纳米管,制备了多尺度增强树脂基复合材料。接枝碳纳米管后的复合材料比碳纤维原丝复合材料的界面剪切强度提高约 160%。

陈超<sup>[37]</sup>利用上浆法对碳纤维进行表面改性,上浆剂中

分散有多壁碳纳米管,采用手糊成型和热压成型工艺制备碳纤维复合材料,质量分数为 0.5% 的多壁碳纳米管上浆剂对碳纤维的改性效果较好,经 0.5% 多壁碳纳米管上浆剂改性 CF 复丝的拉伸强度与去浆碳纤维相比提高了 70.8%,改性碳纤维复合材料的弯曲强度和层间剪切强度与去浆碳纤维复合材料相比分别提高了 42.8% 和 72.9%。

王柏臣等<sup>[38]</sup>使用六亚甲基二异氰酸酯作为偶联剂处理碳纳米管,然后将羧基化碳纳米管化学接枝于碳纤维表面,采用模压工艺制备碳纳米管/碳纤维增强环氧树脂复合材料,其层间剪切强度比未处理碳纤维复合材料提高了 32.1%。

张慧玲<sup>[39]</sup>利用化学修饰方法对碳纳米管进行了功能化试验研究,同时对碳纤维进行了表面化学处理,并通过接枝技术将碳纳米管连接到碳纤维表面,制备出碳纳米管/碳纤维多尺度增强体材料。并对多尺度增强体在复合材料中的增强机理进行了理论分析预测。

阿诺娜<sup>[40]</sup>使用电泳沉积法制备碳纳米管-碳纤维多尺度增强体。选用混酸氧化超声的方法对碳纳米管进行预处理,然后使用索氏提取法对碳纤维进行退浆处理,在不同电压下电泳沉积了一系列碳纳米管-碳纤维多尺度增强体及碳纳米管-Cr(CO)<sub>6</sub>-碳纤维多尺度增强体,Cr(CO)<sub>6</sub>的加入使得碳纳米管与碳纤维之间相互作用更强,最终提高了增强体的力学性能。

郑志才等<sup>[41]</sup>对比了不同碳纳米管加入方式对复合材料界面强度和层间剪切强度的影响。通过观察界面接触角发现,预先对碳纳米管进行活化反应的纤维和树脂的界面接触角较小,接触角减小了 3.1°,界面强度提高了 12.7%,层间剪切强度提高了 9%。碳纳米管直接混合在树脂中制备的复合材料,界面接触角增大了 0.9°,界面强度降低了 8.6%,层间剪切强度与未加碳纳米管的基本相同。碳纳米管生长在碳纤维表面的复合材料,界面浸润性降低,界面接触角增加了 4.5°,界面强度降低了 5.7%,层间剪切强度降低了 11.5%。

桑明珠等<sup>[42]</sup>研究了石墨烯和碳纳米管协同改性碳纤维方面,石墨烯通过偶联剂处理,碳纳米管经过酸化改性,制备了二者协同改性的碳纤维复合材料。并测试了复合材料的拉伸性能、电阻率和孔隙率。

梁馨<sup>[43]</sup>同样开展了碳纳米管对碳纤维织物的改性,碳纳米管生长在碳纤维织物上,但由于碳纤维长度太长(10 μm),复合材料内部缺陷增多,而且多根碳纤维末端弯曲形成笼状,树脂很难进入碳纳米管内部,碳纳米管无法发挥增强作用。

#### 5 碳纳米管网格或碳纳米管膜方面

刘玲等<sup>[44]</sup>采用正压过滤法制备了不同厚度的多壁碳纳

米管网格,并将制得的碳纳米管网格并入碳纤维层合板的层间界面。结果表明,制备的层合板层间断裂韧性和层间剪切强度分别提高了 69% 和 24%。

刘刚等<sup>[45]</sup>采用碳纳米管膜作为碳纤维增强环氧树脂复合材料的层间改性材料,碳纳米管膜在制备的混杂复合材料层间仍然保持其原有连续网格结构形式,这种形式对张开型 I 型层间断裂韧性没有明显影响,但对于滑移型 II 型层间断裂韧性有显著改性效果,从碳纤维增强环氧树脂复合材料的 1 292 J/m<sup>2</sup> 提高到 2 869 J/m<sup>2</sup>,提高幅度达 120%。

李周仪<sup>[46]</sup>将浮动催化化学气相沉积法制备的碳纳米管膜作为碳纤维层间改性材料,采用热压成型工艺制备了碳纳米管膜/碳纤维增强环氧树脂混杂复合材料。复合材料的 II 型断裂韧性比未改性材料提高约 60%,面内和面外方向的压缩强度也得到一定提高。

## 6 结语

与碳纤维复合材料相比,碳纳米管/碳纤维复合材料具有更好的性能,科研工作正在如火如荼地进行,也取得了一些进展。但总体来说,存在以下三点阻碍和制约了碳纳米管增强碳纤维复合材料的应用。首先,碳纳米管/碳纤维复合材料的研究很多,但没有具体的量化碳纳米管的增强效果。其次对于碳纳米管的增强机理需进一步研究,指导试验研究工作。再次,碳纳米管在树脂甚至在复合材料中的分散问题是亟待解决的。同时,解决复合材料中的三相界面结合力也是重中之重。

## 参考文献

- [1] 聂佳祺. 碳纳米管/碳纤维多尺度复合材料的层内刚与层间增韧的数值模拟 [D]. 济南: 山东大学, 2012.  
Nie Jiaqi. Simulation of intralaminar reinforcement and interlaminar toughness enhancement of CNT/CF multiscale composites[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [2] 张加贝, 等. CNT/CF 多尺度复合材料的界面结构与性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018.  
Zhang Jiabei, et al. Study on interface structure and properties of CNT/CF multiscale composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [3] Mirjalili V, et al. Composites Science and Technology, 2010, 16(5):1 537-1 543.
- [4] 李浩. 碳纳米管/环氧树脂复合材料高低温弹性模量的分子模拟与实验研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2016.  
Li Hao. Molecular simulation and experimental nalysis on elastic modulus of swcons/epoxy composites at high low temperature[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016.
- [5] 吴涛. 碳纳米管/碳纤维多尺度风机叶片复合材料力学性能预测 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2014.  
Wu Tao. Prediction of mechanical properties for CNTs/CF multi-scale wind turbine blade composites[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2014.
- [6] 戴剑锋, 等. 材料工程, 2008(10):1-5.  
Dai Jianfeng, et al. Materials Engineering, 2008(10):1-5.
- [7] 董怀斌, 等. 玻璃钢/复合材料, 2017(7):22-28.  
Dong Huaibin, et al. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2017(7):22-28.
- [8] 邓火英, 等. 宇航材料工艺, 2015(5):31-35.  
Deng Huoying, et al. Aerospace Materials & Technology, 2015(5):31-35.
- [9] 陈伟, 等. 复合材料学报, 2013, 33(6):54-59.  
Chen Wei, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 33(6):54-59.
- [10] 李长青, 等. 复合材料学报, 2018, 35(9):2 387-2 396.  
Li Changqing, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(9):2 387-2 396.
- [11] 孙昌, 等. 山东化工, 2015, 44(19):6-7.  
Sun Chang, et al. Shandong Chemical Industry, 2015, 44(19):6-7.
- [12] 张钰. 弱磁场诱导下碳纳米管/环氧树脂复合材料的结构与性能 [D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2011.  
Zhang Yu. The structures and properties of carbon nanotubes/epoxyresin composites under a low magnetic field induction[D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2011.
- [13] 邱军, 等. 高分子通报, 2009(11):10-17.  
Qiu Jun, et al. Polymer Bulletin, 2009(11):10-17.
- [14] 戴剑锋, 等. 碳素技术, 2008, 27(4):7-9.  
Dai Jianfeng, et al. Carbon Techniques, 2008, 27(4):7-9.
- [15] 姜久兴, 等. CN203611472U[P]. 2014-05-28.  
Jiang Jiuxing, et al. CN203611472U[P]. 2014-05-28.
- [16] 张超. 优质碳纳米管的制备及其定向排列的 SWNTs/PMMA 复合材料研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2008.  
Zhang Chao. Prepaion of high-quality carbon nanotubes and study on their aligned composites[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2008.
- [17] 刘方彪, 等. 材料科学与工程学报, 2015, 33(2):163-167.  
Liu Fangbiao, et al. Journal of Materials Science and Engineering, 2015, 33(2):163-167.
- [18] 赫玉欣, 等. 复合材料学报, 2017, 34(8):1 693-1 703.  
Hao Yuxin, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(8):1 693-1 703.
- [19] 范雨娇, 等. 复合材料学报, 2015, 32(2):332-340.  
Fan Yujiao, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2015, 32(2):332-340.
- [20] 李娜, 等. 功能材料, 2017, 48(7):7 073-7 078.  
Li Na, et al. Functional Materials, 2017, 48(7):7 073-7 078.

- [21] Warrier A, et al. Composites Part A, 2010, 41(4):532-538.
- [22] 魏化震, 等. 工程塑料应用, 2006, 34(6):14-16.  
Wei Huazhen, et al. Engineering Plastics Application, 2006, 34(6):14-16.
- [23] 赵忠博. 基于碳纳米管改性碳纤维增强环氧复合材料的力学、界面和抗疲劳性能 [D]. 天津: 天津工业大学, 2017.  
Zhao Zhongbo. Mechanical, interfacial and fatigue properties of carbon fiber reinforced epoxy composites modified by carbon nanotubes[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2017.
- [24] 张清杰. 官能化碳纳米管 / 碳纤维多尺度增强环氧树脂基复合材料基础研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2016.  
Zhang Qingjie. Fundamental research on functionalized carbon nanotube / carbon fiber multi-scale reinforced epoxy composites[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016.
- [25] 柳和生, 等. 材料导报 A, 2017, 31(2):112-115.  
Liu Hesheng, et al. Materials Reports A, 2017, 31(2):112-115.
- [26] 南辉. 碳纳米管改性环氧 / 碳纤维复合材料的制备与性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.  
Nan Hui. Study on preparation and properties of multiwalled carbon nanotube modified epoxy / carbon fiber reinforced composites[D]. Harbin: Harbin Industrial University, 2017.
- [27] 刘仲良, 等. 粘接, 2018(10):59-63.  
Liu Zhongliang, et al. Adhesion, 2018, (10):59-63.
- [28] 于广, 等. 工程塑料应用, 2020, 48(5):143-148.  
Yu Guang, et al. Engineering Plastics Application, 2020, 48(5):143-148.
- [29] 范汶鑫, 等. 功能材料, 2015, 46(20):100-104.  
Fan Wenxin, et al. Functional Materials, 2015, 46(20):100-104.
- [30] 樊序敏, 等. 复合材料学报, 2012, 29(4):17-22.  
Fan Xumin, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(4):17-22.
- [31] 蔡安宁. 碳纳米管 / 碳纤维多尺度增强体及其复合材料研究 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2016.  
Cai Anning. Study on multi-scale reinforcement of carbon nanotubes / carbon fibers and their composites[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2016.
- [32] 王雷. 碳纳米管增强碳纤维复合材料的制备及性能研究 [D]. 天津: 天津大学, 2014.  
Wang Lei. Preparation and properties of carbon nanotubes reinforced carbon fiber composites[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [33] 李伟, 等. 高科技纤维与应用, 2014, 39(6):45-50.  
Li Wei, et al. Hi-Tech Fiber & Application, 2014, 39(6):45-50.
- [34] 张福华. 碳纳米管 / 碳纤维多尺度增强体及其复合材料界面研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.  
Zhang Fuhua. Interfacial study on multi-scale reinforcement of carbon nanotubes / carbon fibers and their composites[D]. Harbin: Harbin Industrial University, 2008.
- [35] 陈超, 等. 工程塑料应用, 2019, 47(2):116-121.  
Chen Chao, et al. Engineering Plastics Application, 2019, 47(2):116-121.
- [36] 梅蕾. 碳纳米管 / 碳纤维多尺度结构制备及其界面增强效果研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.  
Mei Lei. Study on carbon nanotube / carbon fiber multi-scale structure and its interfacial reinforcing effect[D]. Harbin: Harbin Industrial University, 2010.
- [37] 陈超, 等. 塑料工业, 2019, 47(5):121-124.  
Chen Chao, et al. China Plastic Industry, 2019, 47(5):121-124.
- [38] 王柏臣, 等. 沈阳航空航天大学学报, 2016, 33(4):48-54.  
Wang Baichen, et al. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2016, 33(4):48-54.
- [39] 张慧玲. 碳纳米管 / 碳纤维多尺度增强体组织性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.  
Zhang Huiling. Study on microstructure and performance of carbon nanotube / carbon fiber multi-scale reinforcement[D]. Harbin: Harbin Industrial University, 2007.
- [40] 阿诺娜. 碳纳米管-碳纤维多尺度增强体的制备及性能研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2016.  
A Nuona. Preparation and properties of carbon nanotube-carbon fiber multi-scale reinforcement[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [41] 刘玲, 等. 固体力学学报, 2015, 36(S1):80-84.  
Liu Ling, et al. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2015, 36(S1):80-84.
- [42] 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.
- [43] 桑明珠, 等. 中国塑料, 2018, 32(6):124-130.  
Sang Mingzhu, et al. Chinese Plastics, 2018, 32(6):124-130.
- [44] 梁馨, 等. 宇航材料工艺, 2016, 46(4):56-59.  
Liang Xin, et al. Aerospace Materials & Technology, 2016, 46(4):56-59.
- [45] 刘刚, 等. 高分子学报, 2013(10):1334-1340.  
Liu Gang, et al. Acta Polymerica Sinica, 2013(10):1334-1340.
- [46] 李周仪, 等. 高压物理学报, 2019, 33(2):1-8.  
Li Zhouyi, et al. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(2):1-8.