

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.10.005

周期性孪晶结构碳化硅纳米线改性环氧树脂的性能^{*}

王冬华

(渭南师范学院化学与材料学院,陕西渭南 714099)

摘要:通过超声分散和模具浇注成型法制备了周期性孪晶结构碳化硅(SiC)纳米线改性环氧树脂,探讨了SiC纳米线的周期性孪晶结构及含量对环氧树脂复合材料力学性能的影响。结果表明,周期性孪晶结构SiC纳米线的加入明显改善了环氧树脂基体的力学性能,孪晶结构有助于提高SiC纳米线与基体树脂之间的相互结合程度。随着孪晶SiC纳米线含量的增加,复合材料的拉伸性能和弯曲性能都呈现出先增加后减小的趋势。当SiC纳米线的含量为2%时,复合材料的拉伸强度、拉伸弹性模量、断裂伸长率、弯曲强度和弯曲弹性模量均达到最大值,相比于纯环氧树脂分别提高了90.6%,37.8%,38.3%,53.4%和24.5%。当SiC纳米线含量为3%时,弯曲应变达到最大值(6.72%),相比于环氧树脂提高了32.0%。

关键词:碳化硅纳米线;环氧树脂;复合材料;制备

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)10-0024-06

Properties of Periodically Twinned SiC Nanowires Modified Epoxy Resin

Wang Donghua

(College of Chemistry and Material, Weinan Normal University, Weinan 714099, China)

Abstract : The epoxy matrix modified by periodically twinned SiC nanowires were prepared by using ultrasonication and the cast molding method. The influences of the structure and content of the periodic twins of SiC nanowires on the mechanical properties of epoxy resin composites were researched. The results indicate that the improved mechanical properties of epoxy resin / SiC nanowires composites can be attributed to the periodically twinned SiC nanowires. The enhanced bonding between nanowires and epoxy resin due to the twin structure. The tensile properties and the bending properties of epoxy resin / SiC nanowires composites increase firstly and then decrease with the increasing of SiC nanowire addition. When the content of SiC nanowires loading reaches 2%, the tensile strength, tensile modulus, elongation at break, flexural strength and flexural modulus reach the highest value, which are increased by 90.6%, 37.8%, 38.3%, 53.4% and 24.5% respectively. When the content of SiC nanowires loading reaches 3%, the flexural strain reaches the highest value (6.72%), which are increased by 32.0%.

Keywords : silicon carbide nanowire ; epoxy resin ; composite ; preparation

作为一种热固性高分子材料,环氧树脂具有粘结性好、耐腐蚀性强、强度大、绝缘等优点,被广泛用于涂料、粘合剂、复合材料制备,是工业生产中不可缺少的重要材料。但固化后的环氧树脂的交联密度高、质脆且内应力大、耐疲劳性、耐热性、抗冲击能力都较差,极大地影响了环氧树脂的使用^[1-5],因此,对环氧树脂进行增韧改性引起了研究者的广泛关注。目前,一些科研工作者通过在环氧树脂基体中添加碳纳米管^[6]、石墨烯^[7]和氧化铝^[8]等韧性、刚性较好的纳米材料以改善环氧树脂复合材料的力学性能、电学性能、热性能、耐磨性和使用寿命等。

碳化硅(SiC)纳米材料具有硬度大、强度高、耐腐蚀性强、耐磨损性好、比表面积大、弹性模量大等优点^[9-11],被认为是改善复合材料力学性能的理

想增强体。相比于常规SiC, SiC纳米线具有更加优异的力学特性。但是通常的SiC纳米线表面光滑,与基体结合力不强,影响了其增强作用。Hao Yajuan等^[12]在环氧树脂中加入具有明显凸起的链珠状SiC纳米线,研究发现,链珠状特殊凸起的节结构对复合材料的拉伸性能有显著增强作用。Y. Zhang等^[13]研究发现,竹节状SiC纳米线具有优异的塑性。因此,制备具有不光滑表面的SiC纳米线作为复合材料的增强体,对于改性环氧树脂复合材

^{*} 陕西省教育厅专项科研计划项目(16 JK1270),渭南师范学院教育科学研究项目(2016 JYKX005)

联系人:王冬华,博士,副教授,研究方向为碳化硅纳米材料的制备及应用

收稿日期:2017-08-09

料具有重要的意义。

笔者以一种具有周期性孪晶结构的 SiC 纳米线作为增强体,通过超声分散和模具浇注成型法制备得到环氧树脂/SiC 纳米线复合材料,分析了 SiC 纳米线的形貌和添加量对环氧树脂复合材料力学性能的影响,并对 SiC 纳米线的增强机制进行了初步探索。

1 实验部分

1.1 主要原材料

联苯: 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司;

正硅酸乙酯、硝酸铁: 分析纯, 天津市福晨化学试剂厂;

无水乙醇、六次甲基四胺、草酸: 分析纯, 天津市天力化学试剂有限公司;

氢氟酸: 分析纯, 上海国药集团化学试剂公司;

浓盐酸: 分析纯, 太原化肥厂化学试剂厂;

环氧树脂: E-51, 兰州蓝星树脂有限公司;

聚酰胺: 650, 天津市宁平化学制品有限公司;

丙酮: 分析纯, 天津东丽区天大化学试剂厂。

1.2 主要仪器与设备

管式高温炉: SGL-1600 型, 上海大恒光学精密机械有限公司;

真空干燥箱: DZK-6020 型, 上海笃特科学仪器有限公司;

X 射线衍射 (XRD) 仪: XRD-6100 型, 日本岛津公司;

高分辨场发射扫描电子显微镜 (SEM): Zeiss SIGMA 500 型, 德国蔡司公司;

透射电子显微镜 (TEM): Hitach-7650 型, 日本日立公司;

电子万能试验机: RGM-3030 型, 深圳市瑞格尔仪器有限公司。

1.3 周期性孪晶结构 SiC 纳米线的制备

按照文献 [14] 所述制备方法制备 SiC 纳米线。

分别配制 3.4% 的草酸溶液和 35.8% 的六次甲基四胺溶液各 100 mL。将 20 g 联苯和 1.5 g 硝酸铁溶于 60 mL 丙酮中,待完全溶解后再加入 50 mL 正硅酸乙酯,在强力搅拌下,加入 8 mL 3.4% 的草酸溶液,密封搅拌。充分搅拌 24 h 后,逐滴加入 8 mL 35.8% 六次甲基四胺溶液,密封搅拌至凝固。待溶胶凝固后,在 110℃ 下干燥 12 h。将干燥后的样品放入氩气为保护气的管式高温炉中,先以 10℃/min 的升温速率,从室温升温至 1000℃,再

以 2℃/min 的升温速率,升温至 1300℃,恒温反应 7 h。冷却到室温后,将样品先在 700℃ 马弗炉中反应 2 h,然后再用盐酸和氢氟酸的混合酸 (体积比 1:3) 浸泡 48 h,最后经水洗、过滤、烘干,即可得到 SiC 纳米线粉末样品。

1.4 环氧树脂/SiC 纳米线复合材料的制备

(1) 首先将环氧树脂和聚酰胺 650 固化剂在 60℃ 烘箱中加热,待原料呈流动态时,在两个 100 mL 烧杯中分别称取 10 g 环氧树脂和 12 g 聚酰胺,然后分别加入 4 g 丙酮,磁力搅拌下得到具有一定流动性的溶液。将上述两种溶液混合。

(2) 称取一定量的 SiC 纳米线粉末样品 (分别占环氧树脂质量的 1%, 2%, 3%, 4%), 置于烧杯中,然后加入 4 g 丙酮,磁力搅拌分散后,加入到上述混合溶液中,再用超声波分散仪超声处理 2 h,然后将其放入真空烘箱中除去气泡。将所得复合物缓慢灌入模具中,放进烘箱进行加热固化。固化条件为 50℃ 保温 6 h, 65℃ 保温 24 h, 然后自然冷却到室温得到试样。为了方便比较,制备了未加 SiC 的环氧树脂。

1.5 性能测试与表征

用 XRD 研究 SiC 纳米线粉末样品的晶体结构和种类。使用 Cu K_{α} 辐射 ($\lambda=0.154$ nm), 金属 Ni 滤波,管压为 40 kV,管流为 30 mA,扫描速率为 2°/min,扫描步长为 0.02°。

用 SEM 观察 SiC 纳米线粉末样品的形貌。首先将少量粉末样品粘在样品台的导电胶带上,喷射镀金后放入仪器中进行观察。

用 TEM 分析 SiC 纳米线粉末样品的结构。先将粉末样品加入到乙醇分散剂中,经过 30 min 超声波震荡,然后用胶头滴管取 1~2 滴于铜网上,干燥后放入仪器中进行观察。

用电子万能试验机测量环氧树脂/SiC 纳米线复合材料的力学性能。按照 GB/T 2567-2008 测试复合材料的拉伸性能和弯曲性能,每个数据为 5 个测试试样所得平均值。

2 结果与讨论

2.1 SiC 粉末产物的 XRD 表征

图 1 为所得 SiC 粉末样品的 XRD 谱图。图谱结果表明,衍射峰的 2θ 值分别为 35.64°, 41.41°, 60.09°, 71.85° 和 75.59°, 分别对应于 β -SiC 的 (111), (200), (220), (311), (222) 的晶面。除了 SiC 的衍射峰外,没有其它杂峰的出现,标记有 SF 的弱

峰一般是由堆积缺陷所引起的^[15]。结果表明,所制备的样品为纯 β -SiC,衍射峰强而尖锐,说明产品的结晶性较好。

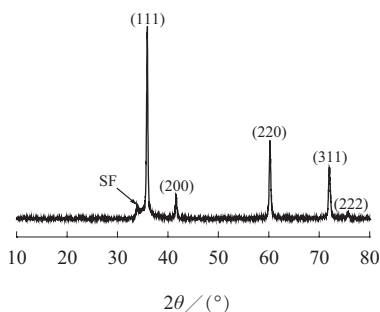
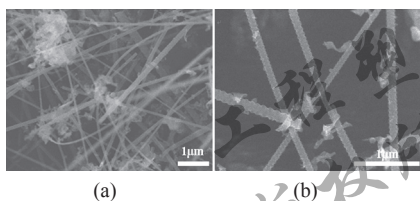


图1 SiC粉末产物的XRD图

2.2 SiC纳米线的微观结构

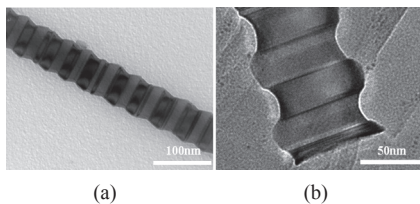
图2是所得SiC纳米线样品在不同放大倍数下的SEM照片。从图2a可以看出, SiC纳米线样品由形貌统一的直的纳米线组成,其直径在60~100 nm之间,长度在几十微米至几百微米之间,纳米线彼此缠绕在一起。从图2b可明显看出,纳米线表面不光滑,有一些明显的凸起。



放大倍数: a—7000倍; b—20000倍

图2 SiC纳米线样品的SEM照片

图3是所得SiC纳米线样品在不同放大倍数下的TEM照片。从图3a可清晰看出, SiC纳米线是由凸起并按照一定的周期性分布而组成的,经证实为周期性的孪晶结构^[14]。从图3b可以看出,两个相反方向的凸起交替性地出现,凸起的厚度一致,约为30 nm。



放大倍数: a—50000倍; b—100000倍

图3 SiC纳米线样品的TEM照片

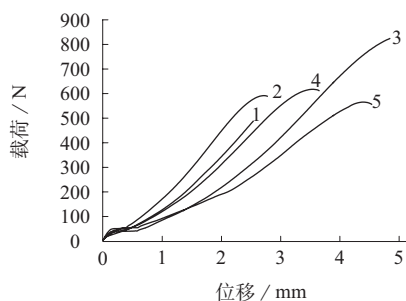
从以上结果可以看出,所制备的SiC纳米线具有周期性的孪晶结构,表面不光滑,相比于光滑SiC纳米线更有利于与基体结合。在TEM观察过程中发现,经过超声波震荡后, SiC纳米线变得较为分散。因此,在制备复合材料的过程中,通过超声波技

术可以促进SiC纳米线在环氧树脂基体中的分散。

2.3 SiC纳米线含量对复合材料力学性能的影响

(1) 环氧树脂/SiC纳米线复合材料的拉伸性能。

图4是环氧树脂/SiC纳米线复合材料的拉伸载荷-位移曲线。

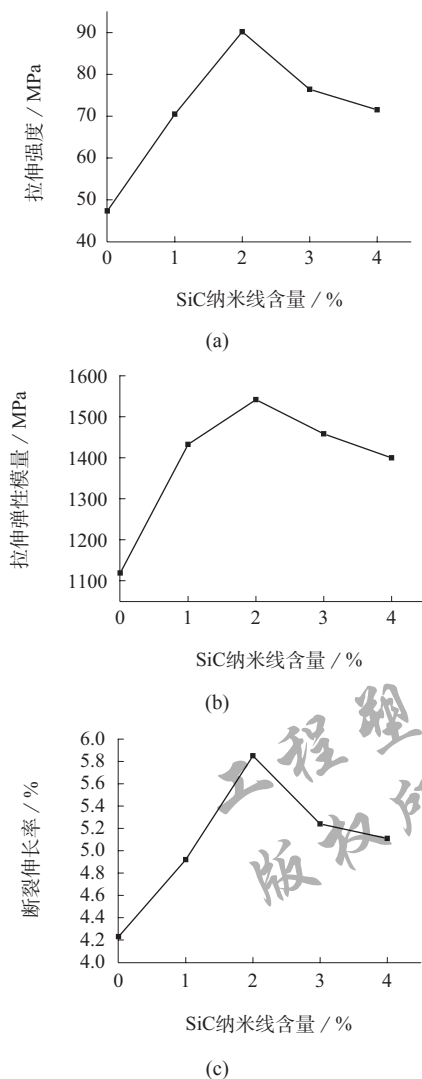


SiC纳米线含量: 1—0%; 2—1%; 3—2%; 4—3%; 5—4%

图4 环氧树脂/SiC纳米线复合材料的拉伸载荷-位移曲线

从图4可以看出,曲线1下方所包围的面积较小,说明纯环氧树脂材料所能承受的载荷最小。当环氧树脂基体中加入周期性孪晶结构SiC纳米线后,形成的复合材料承受载荷的能力较纯环氧树脂有了大的提升。曲线2~曲线5下方所包围的面积都大于曲线1下方所包围的面积,说明孪晶SiC纳米线的加入能够有效提高复合材料的拉伸特性。随着孪晶SiC纳米线加入量的增加,曲线所包围面积出现了先增大后减小的趋势。当SiC纳米线质量分数为2%时,所包围面积达到最大。继续增大SiC纳米线的质量分数,所包围的面积出现了明显减小趋势,说明随着SiC纳米线含量的增加, SiC纳米线的增强效果有所减弱。造成此现象的原因可能是:当SiC纳米线的加入量较少时,经过超声波分散后, SiC纳米线在环氧树脂中分散较好, SiC纳米线表面的均匀凸起与树脂基体牢牢地结合在一起,当受到外力作用时, SiC纳米线的孪晶结构能够较好地限制环氧树脂基体分子链段的运动,从而增强了复合材料的拉伸特性。随着孪晶纳米线加入量的增加,纳米线间发生团聚的几率增加,凸起结构彼此交错,与环氧树脂结合后形成了较大的空隙。在承受外力作用时,空隙处纳米线和环氧树脂结合力较弱,不能有效地阻止高分子链的运动,因此复合材料的破坏会从空隙处开始,但由于孪晶SiC纳米线本身的力学性能优于环氧树脂,而且部分分散较好的SiC纳米线仍表现出较好的增强效果,所以相比于纯环氧树脂材料,环氧树脂/SiC纳米线复合材料仍表现出较好的增强作用。

环氧树脂/SiC 纳米线复合材料的拉伸强度、拉伸弹性模量及断裂伸长率与 SiC 纳米线含量之间的关系曲线如图 5 所示。



a—拉伸强度; b—拉伸弹性模量; c—断裂伸长率

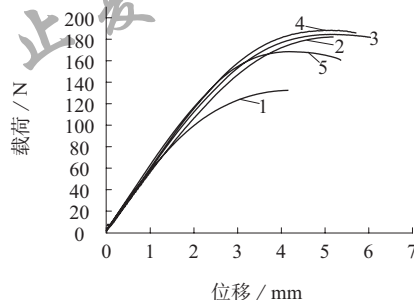
图 5 环氧树脂/SiC 纳米线复合材料的拉伸强度、拉伸弹性模量及断裂伸长率与 SiC 纳米线含量之间的关系曲线

从图 5 可以明显看出,加入周期性孪晶结构 SiC 纳米线后,环氧树脂/SiC 纳米线复合材料的拉伸强度、拉伸弹性模量及断裂伸长率明显优于纯环氧树脂。随着 SiC 纳米线含量的增加,拉伸性能都呈现出先增大后减小的趋势。当 SiC 纳米线含量为 2% 时,复合材料的拉伸强度、拉伸弹性模量及断裂伸长率都达到最大值,分别为 90.19 MPa, 1541.7 MPa 及 5.85%, 比纯环氧树脂的 47.32 MPa, 1118.7 MPa 及 4.23% 分别提高了 90.6%, 37.8% 及 38.3%。随着周期性孪晶结构 SiC 纳米线加入量的继续增加,拉伸强度、拉伸弹性模量

及断裂伸长率都出现明显下降趋势。这可能是因为低含量下,孪晶 SiC 纳米线经过超声波分散后,达到了较好的分散效果,树脂基体中分散性较好的单根 SiC 纳米线较多,纳米线分担了一部分外力,同时纳米线表面的均匀孪晶结构能够更好地增强与基体之间的结合力,使得孪晶纳米线的拔出和断裂较为困难,从而能够有效地阻止破坏的产生和延展。此外,由于孪晶 SiC 纳米线本身的拉伸性能远高于树脂基体,因此,复合材料的拉伸性能都出现了明显的增大;随着 SiC 纳米线含量的继续增加,纳米线之间形成团聚的几率增大,团聚体数量明显增加,彼此交错的纳米线和基体之间容易形成缺陷,受到外力作用时,内部会出现纳米线之间的滑移,复合材料会被破坏,从而使复合材料的拉伸性能有所降低。

(2) 环氧树脂/SiC 纳米线复合材料的弯曲性能。

图 6 是环氧树脂/SiC 纳米线复合材料的弯曲载荷-位移曲线。



SiC 纳米线含量: 1—0%; 2—1%; 3—2%; 4—3%; 5—4%

图 6 环氧树脂/SiC 纳米线复合材料的弯曲载荷-位移曲线

从图 6 可以看出,加入周期性孪晶结构 SiC 纳米线后,环氧树脂/SiC 纳米线曲线下方所包围的面积都大于纯环氧树脂曲线所包围的面积,说明周期性孪晶结构 SiC 纳米线能够较好地增强复合材料的弯曲性能。曲线 2~曲线 5 所包围的面积远大于曲线 1 所包围的面积,说明当周期性孪晶结构 SiC 纳米线的含量在 1%~4% 时能有效提高所制备复合材料的弯曲性能,其中含量为 2% 时增强效果最好。可能的原因是:在制备复合材料过程中,当少量的 SiC 纳米线加入到树脂基体中,经过超声波分散后,孪晶 SiC 纳米线能够在树脂中达到很好的分散效果,孪晶 SiC 纳米线和环氧树脂能够均匀接触,界面连接更为充分,孪晶结构的 SiC 纳米线与基体相互作用较强,并且均匀分布的孪晶结构相当于在基体中形成了一个均匀的壁垒,当复合材料受到压

力时,可有效地阻止破坏的延伸,从而提高复合材料的弯曲性能。随着孪晶 SiC 纳米线加入量的增多, SiC 纳米线的数量增加, SiC 纳米线之间容易发生团聚,减弱了 SiC 纳米线与基体的接触,形成了缺陷点,增加了材料的破坏程度,当受到外力作用时,孪晶 SiC 纳米线同时表现出一定的增强作用和破坏作用,但由于增强作用优于破坏作用,因此复合材料仍能表现出较好的弯曲性能。

环氧树脂 / SiC 纳米线复合材料的弯曲强度、弯曲弹性模量及弯曲应变与 SiC 纳米线含量之间的关系曲线如图 7 所示。

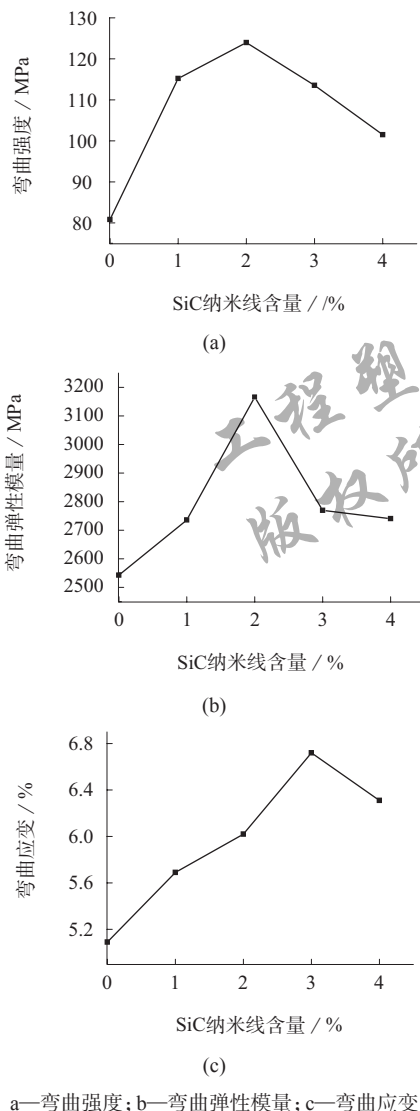


图 7 环氧树脂 / SiC 纳米线复合材料的弯曲强度、弯曲弹性模量及弯曲应变与 SiC 纳米线含量之间的关系曲线

从图 7 可以看出,加入孪晶 SiC 纳米线后,环氧树脂 / SiC 纳米线复合材料的弯曲强度、弯曲弹性模量及弯曲应变明显优于纯环氧树脂,并

且孪晶 SiC 纳米线含量的增加都呈现先增大后减小的趋势。复合材料的弯曲强度和弯曲弹性模量在 SiC 纳米线含量为 2% 时都达到最大值,分别为 123.96 MPa 和 3 166.1 MPa,相比于纯环氧树脂的 80.82 MPa 和 2 542.8 MPa 分别提高了 53.4% 和 24.5%;弯曲应变在 SiC 纳米线含量为 3% 时达到最大值,为 6.72%,相比纯环氧树脂的 5.09% 提高了 32.0%。这主要是由于低含量下, SiC 纳米线经过超声波分散达到了较好的分散效果, SiC 纳米线的孪晶结构和树脂基体的界面作用力较强,在受到外力作用时,均匀分布的纳米壁垒能够有效地阻止树脂基体高分子链段的运动,而且在裂纹延伸的过程中,裂纹需要耗散更多的能量绕过纳米线壁垒,或者破坏纳米线孪晶结构与界面的结合力而使纳米线从基体中脱出,从而有效提高了复合材料的弯曲性能。随着孪晶 SiC 纳米线加入量的增加,纳米线之间团聚的可能性增大,团聚体数量明显增多,有些发展成为大的聚集体,进一步发展为缺陷,从而降低了复合材料的弯曲特性;此外, SiC 纳米线的凸起结构相互交错,使得团聚体内部空隙较多, SiC 纳米线之间结合力较弱,受到外力作用时,内部容易出现滑移,导致复合材料的弯曲性能下降。

3 结论

(1) 通过溶胶-凝胶和高温碳热还原的方法制备得到了具有周期性孪晶结构的 SiC 纳米线。

(2) 周期性孪晶结构 SiC 纳米线对环氧树脂增强效果显著。随着孪晶 SiC 纳米线含量的增加,环氧树脂 / SiC 纳米线复合材料的拉伸性能和弯曲性能先增大后减小。当孪晶 SiC 纳米线的含量为 2% 时,复合材料的拉伸强度、拉伸弹性模量、断裂伸长率、弯曲强度和弯曲弹性模量分别达到最大值,分别为 90.19 MPa, 1 541.7 MPa, 5.85%, 123.96 MPa 和 3 166.1 MPa。当 SiC 纳米线含量为 3% 时,弯曲应变达到最大值,为 6.72%。

(3) 周期性孪晶结构 SiC 纳米线的均匀凸起结构能够提高其与基体界面的结合力,使裂纹的扩展变得较为困难,进一步提高了复合材料的力学特性。

(4) 超声波分散可使孪晶 SiC 纳米线在树脂基体中均匀分散,进而提高环氧树脂 / SiC 纳米线复合材料的力学性能。

参考文献

- [1] Shokrieh M, Esmkhani M, Shahverdi H R, et al. Effect of graphene nanosheets (GNS) and graphite nanoplatelets (GNP) on the mechan-

- ical properties of epoxy nanocomposites[J]. Sci Adv Mater, 2013, 5(3):260–266.
- [2] 沈小军, 孟令轩, 付绍云. 石墨烯-多壁碳纳米管协同增强环氧树脂复合材料的低温力学性能[J]. 复合材料学报, 2015, 32(1):21–26.
- Shen Xiaojun, Meng Lingxuan, Fu Shaoyun. Cryogenic mechanical properties of epoxy composites synergistically reinforced by graphene-multi-walled carbon nanotubes. Acta Materialiae Compositae Sinic, 2015, 32(1):21–26.
- [3] 张昊, 蔡佩芝, 赵东林, 等. 碳纳米管增强环氧树脂基复合材料的制备及其力学性能[J]. 北京化工大学学报, 2011, 38(1):62–66.
- Zhang Hao, Cai Peizhi, Zhao Donglin, et al. Fabrication and mechanical properties of carbon nanotubes reinforced epoxy resin matrix composites[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2011, 38(1):62–66.
- [4] 秦浩, 王洋, 孟姗姗, 等. 多壁碳纳米管/聚醚砜-环氧树脂复合材料的制备及力学性能[J]. 复合材料学报, 2014, 31(4):931–936.
- Qin Hao, Wang Yang, Meng Shanshan, et al. Preparation and mechanical properties of multi-walled carbon nanotubes/polyethersulphone-epoxy composites[J]. Acta Materialiae Compositae Sinic, 2014, 31(4):931–936.
- [5] 张明艳, 隋姗, 陈金玉, 等. 功能化碳纳米管/环氧树脂复合材料性能研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4):97–102.
- Zhang Mingyan, Sui Shan, Chen Jinyu, et al. Study of properties of functional multi-walled carbon nanotubes/epoxy nanocomposites[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4):97–102.
- [6] 李其祥, 袁观明, 董志军, 等. 纳米碳管/环氧树脂复合材料的力学性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(15):25–28.
- Li Qixiang, Yuan Guanming, Dong Zhijun, et al. Research on the mechanical properties of carbon nanotube/epoxy resin composites[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(15):25–28.
- [7] 谢卫刚, 赵东林, 景磊, 等. 石墨烯/环氧树脂复合材料的制备与力学性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2012, 28(9):129–132.
- Xie Weigang, Zhao Donglin, Jing Lei, et al. Preparation and mechanical properties of graphene reinforced epoxy resin matrix composites[J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2012, 28(9):129–132.
- [8] 龚瑾, 李喆, 刘新月. 氧化铝/环氧树脂复合材料空间电荷特性与高温高湿环境下交流电场老化[J]. 电工技术学报, 2016, 31(18):191–197.
- Gong Jin, Li Zhe, Liu Xinyue. Space charge and AC field aging in high hygrothermal environment of alumina/epoxy resin composites[J]. Transactions of Chian Electrotechnical Society, 2016, 31(18):191–197.
- [9] 张俊. 碳化硅纳米复合材料的制备及其在光催化中的应用[D]. 南京: 南京大学, 2015.
- Zhang Jun. Fabrication of 3C-SiC nanocrystal composites and applications in photocatalysis[D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.
- [10] Li Hejun, He Zibo, Chu Yanhui, et al. Large-scale synthesis, growth mechanism, and photoluminescence of 3C-SiC nanobelts[J]. Mater Lett, 2013, 109:275–278.
- [11] Magyar A P, Aharonovich I, Baram M, et al. Photoluminescent SiC Tetrapods[J]. Nano Lett, 2013, 13(3):1 210–1 215.
- [12] Hao Yajuan, Wagner J B, Su Dangsheng, et al. Beaded silicon carbide nanochains via carbothermal reduction of carbonaceous silica xerogel[J]. Nanotechnology, 2006, 17:2 870–2 874.
- [13] Zhang Y, Han X, Zheng K, et al. Direct observation of superplasticity of beta-SiC nanowires at low temperature[J]. Adv Funct Mater, 2007, 17(17):3 435–3 440.
- [14] Wang Donghua, Xu Di, Wang Qing, et al. Periodically twinned SiC nanowires[J]. Nanotechnology, 2008, 19:doi:https://doi.org/10.1088/0957-4484/19/21/215602.
- [15] Choi H J, Lee J G. Stacking faults in silicon carbide whiskers[J]. Ceram Int, 2000, 26(1):7–12.

优惠销售中国工程塑料复合材料技术研讨会《论文集》及论文集光盘

中国合成树脂供销协会加工与应用分会为了配合 2000~2017 年先后召开的中国工程塑料复合材料技术研讨会, 共编辑、出版了 18 本《论文集》。其内容涉及工程塑料及通用塑料的合成与改性、加工、应用、测试、模具、设备新技术, 以及文献综述、评论等, 突出了我国工程塑料行业发展规划、热点分析。现尚有部分《论文集》, 以及应广大读者要求加工制作的论文集光盘, 现以优惠价格(含邮费)销售, 欢迎订阅。

1. 2004~2017 年中国工程塑料复合材料技术研讨会《论文集》, 优惠价 400 元/套。

2. 2000~2017 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集光盘, 优惠价 300 元/盘。本光盘除收录 2000~2017 年 18 本《论文集》的全部内容外, 还包括约 3 400 人次的会议代表通讯录。

邮局汇款

收款地址: 山东济南市天桥区田庄东路 3 号

收款单位: 《工程塑料应用》杂志社

邮 编: 250031

电 话: (0531)85878223 85878057 85878278

传 真: (0531)85947355

银行汇款

户 名: 山东非金属材料研究所

开户银行: 济南市工商银行经十一路支行

帐 号: 1602001229014425546

网上订购: <http://www.epa1973.com>