

文章编号: 1674-599X(2020)02-0045-07

纳米材料胶粘剂胶体拉伸性能与微观结构

李传习, 高有为, 李游, 刘宇飞

(长沙理工大学 桥梁工程安全控制教育部重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 为制备出常温固化的环氧树脂结构胶粘剂, 通过超声波细胞粉碎仪对羧基功能化碳纳米管(TNMC1)、羟基功能化碳纳米管(TNMH1)和氧化石墨烯(TNGO-10)3种纳米材料分别进行分散处理, 制备了纳米材料增强环氧树脂胶粘剂, 测试了胶粘剂常温固化胶体的拉伸曲线。利用扫描电子显微镜, 获取了拉伸断面形貌, 分析了掺入纳米材料后的增强增韧机制。研究表明: 掺入微量的纳米材料能显著提高胶粘剂的拉伸性能。当 TNGO-10 掺量为 0.1%时, 加入了 TNGO-10 的胶粘剂的拉伸强度达到最大, 较纯胶粘剂提高了 42.64%; 当分别加入 TNMC1 和 TNMH1 掺量为 0.2%时, 相应胶粘剂的拉伸强度达到最大, 分别较纯胶粘剂提升了 55.32%, 38.08%; 同时加入为 0.05%的 TNMH1 和 0.05%的 TNGO-10 时, 其拉伸强度、断裂伸长率及弹性模量较纯胶粘剂分别提高了 56.41%, 43.67%和 19.5%, 充分发挥了一维和二维2种纳米材料的协同效应。胶体拉伸断面 SEM 分析表明, TNMC1, TNMH1 和 TNGO-10 的掺入能提高其断面的粗糙度, 表面活性化的纳米材料与胶粘剂形成了紧密结合的界面, 导致纳米材料周围的基体具有更明显的塑性变形。裂纹在遇到纳米材料时, 需要绕过或者剪断纳米材料方能扩展, 形成了二级裂纹, 消耗了更多的断裂能。加入纳米材料后, 胶粘剂拉伸试件的断裂形式由脆性断裂转变为韧性断裂, 材料的强度与韧性显著提高。

关键词: 环氧胶粘剂; 纳米材料; 拉伸性能; 微观结构; 常温固化

中图分类号: TQ433.3

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.02.008

Tensile properties and the microstructure of a kind of nanomaterial adhesive

LI Chuan-xi, GAO You-wei, LI You, LIU Yu-fei

(Key Laboratory of Bridge Engineering Safety Control by Department of Education,
Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to make an efficient epoxy resin adhesive that solidifies in room temperature, three kinds of nanomaterials named carboxyl functionalized carbon nanotubes (TNMC1), hydroxyl (TNMH1) functionalized carbon nanotubes and graphene oxide (TNGO-10) were dispersed by ultrasonic cell pulverizer to make the nanomaterial reinforced epoxy adhesive. The tensile property of the normal temperature curing colloid was tested, the fracture surface of the tensile profile was captured by the Scanning Electron Microscope (SME), and the toughening and strengthening mechanisms by adding nanomaterials were disclosed. It is concluded that the tensile property of the adhesive can be improved significantly by adding nanomaterials. When the mass fraction of TNGO-10 is 0.1%, the tensile strength of the adhesive added with nanomaterial TNGO-10 reaches the maximum, which is 42.64% higher than that of pure adhesive. When TNMC1 and TNMH1 with a mass fraction of 0.2% are added, the tensile strength of the corresponding adhesives reaches the maximum, which are enhanced by 55.32% and 38.08% respectively. When TNMH1 and TNGO-10 with mass fraction of 0.05% are added, their tensile strength, elongation at break and elastic modulus are increased by 56.41%, 43.67% and 19.5%

收稿日期: 2019-09-02

作者简介: 李传习(1963-), 男, 长沙理工大学教授, 博士生导师。

respectively. Those results indicate that the synergistic effect of one-dimensional and two-dimensional nanomaterials is brought into full play. The SEM analysis of colloidal tensile section shows that the roughness of the section is improved by the addition of TNMC1, TNMH1 and TNGO-10, in which the surface activated nanomaterials formed a tight interface with the adhesive, resulting in the increase of the obvious plastic deformation capacity of the matrix around the nanomaterials. Cracking propagation is restricted by nanomaterial, the secondary crack should either bypass or shear the nanomaterial, consuming fracture energy. When the nanomaterial is added, the fracture pattern of adhesive colloidal tensile specimen will change from brittle fracture to ductile fracture, and the strength and toughness of the materials are improved significantly.

Key words: epoxy adhesive; nanoparticle; tensile property; microstructure; normal temperature curing

疲劳开裂是钢结构常见病害之一^[1-2]。粘贴碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer, 简称为 CFRP)加固疲劳开裂钢结构是一种新兴、快捷及耐久的结构加固技术, 环氧胶粘剂为最常用的粘结材料。已有研究表明, 粘结界面为 CFRP 加固结构的薄弱环节, 而胶粘剂的性能对 CFRP/结构界面粘结性能的影响显著^[3-5]。环氧树脂(Epoxy Resin, 简称为 EP)是一种热固性树脂, 其固化后交联密度高, 固化后的产物存在脆性大、耐冲击性较弱、不抗疲劳及韧性较差等不足, 在一定程度上限制了其在工程上的应用。因此, 环氧树脂的增强增韧技术一直是国内外相关领域所关注的热点课题^[6-7]。

已有研究表明: 加入纳米材料能有效提高环氧树脂的性能(强度、韧性等)^[8-11]。Bao^[12]等人采用三聚六氯化环磷腈及缩水甘油等对氧化石墨烯进行处理, 再与环氧树脂结合, 其环氧纳米复合材料拉伸强度提高了 38%。Cui^[13]等人将原始碳纳米管(MWCNTs)、羧基化碳纳米管(MWCNTs-COOH)和氨基化碳纳米管(MWCNTs-NH₂)分散到 EP 中, 与纯 EP 相比, 采用原始的 MWCNTs、MWCNTs-COOH 和 MWCNTs-NH₂ 与 EP 制备的复合材料的拉伸强度分别提高了 24.27%、35.33% 和 57.61%, 相应 MWCNTs 的质量分数分别为 0.2%、0.6% 和 1.0%。Yang^[14]等人提出将一维碳纳米管与二维石墨烯相结合成三维结构。长又曲的碳纳米管可以穿插在两片石墨烯中, 有效阻止了团聚的发生, 从而增大了石墨烯/碳纳米管与聚合物基体的连接面积。张竞^[15]等人将羟基化多壁碳纳米管和氧化石墨烯混合制得 GO-MWCNTs/EP 复合材料, 研究了不同总质量分数及两者混合比例对复合材料力学性能的影响, 得出当总质量分数为 0.5% 时, 其力学性能最

好。相比于纯 EP, 其拉伸强度提高了 48.4%, 断裂伸长率增加了 97.9%。石墨烯/碳纳米管的协同效应使得复合材料的机械性能和热力学性能得到了极大的提高。这些研究大多采用超声振荡法或高速剪切法将纳米材料分散在 EP 中, 但超声振荡法的分散性有限^[16], 高速剪切法对纳米材料的形貌改变大, 可能会破坏纳米材料的表面功能化基团^[17]。另外, 不同种类和掺量的纳米材料对树脂的增强效果不同。针对不同配比的结构胶粘剂, 适合的纳米材料种类及最佳掺量也会不同。这些研究均采用高温固化工艺, 如: 文献[15]为 80 °C(1 h)+100 °C(3 h)+140 °C(3 h)+160 °C(2 h), 该固化流程繁琐, 不便应用。目前, 基于常温固化工艺下, 纳米材料对结构胶粘剂的增强增韧效果的研究鲜见。因此, 作者基于团队自主研发的环氧树脂胶粘剂配比, 拟采用超声波细胞粉碎分散技术, 制备了纳米材料增强环氧树脂胶粘剂, 研究了添加不同掺量的功能化碳纳米管、氧化石墨烯及两者混掺对环氧树脂胶粘剂常温固化胶体拉伸性能的影响。利用扫描电子显微镜观察了纳米材料增强环氧树脂胶粘剂常温固化胶体的拉伸断面形貌, 分析了纳米材料对环氧树脂胶粘剂胶体的增强增韧机理。以钢为基材, 粘贴碳纤维复合材料的结构胶粘剂包括抗拉强度、抗压强度、抗弯强度以及耐久性等^[18]基本性能, 本研究仅涉及抗拉强度。以制备出性能优良的结构胶粘剂, 有效提高 CFRP/钢界面性能。

1 试样制备与试验

1.1 原材料

氧化石墨烯(TNGO-10)、氧化碳纳米管(羟基化

多壁碳纳米管 TNMH1 和羧基化多壁碳纳米管 TNMC1)均为成都中科时代纳能科技有限公司生产。环氧树脂采用双酚 A 型 E51, 固化剂采用缩胺 105, 另外, 试件制作需掺入 KH560 偶联剂和 D240 消泡剂。

1.2 试样的制备

按照 ASTM D638-10 制作哑铃型胶粘剂拉伸试件, 试件尺寸如图 1 所示。首先称取适量的氧化石墨烯和氧化碳纳米管, 置于干燥箱中进行真空干燥 8~12 h, 保证水分完全去除。按比例称取环氧树脂和固化剂。然后将干燥好的氧化纳米材料按比例加入到环氧树脂中, 人工搅拌 5 min 后, 放入细胞粉碎仪中超声分散 2 h, 超声功率为 900 W。最后加入一定量的偶联剂, 即制备了 A 组分, 另称量好缩胺 105 固化剂, 加入少量 D240 消泡剂, 即制备了 B 组分, 将 A、B 组分混合, 人工搅拌 5 min 后, 倒入提前预热并涂好脱模剂的哑铃型模具中, 室温固化 7 d, 脱模后得到样条。胶粘剂试件中氧化石墨烯和氧化碳纳米管的质量分数见表 1, 每种试样制备 5 个拉伸试件, 总计 105 个试件。

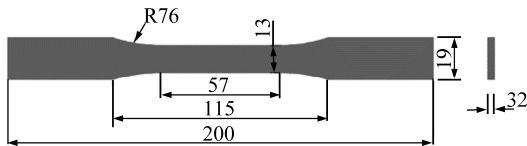


图 1 胶粘剂拉伸试件及其尺寸(单位: mm)
Fig. 1 Adhesive colloid tensile specimen and its size (unit: mm)

表 1 胶粘剂试件中掺入氧化石墨烯和氧化碳纳米管的质量分数

Table 1 Mass fraction of graphene and nanotubes in adhesive colloidal specimens				
试验 编号	不同复合材料中掺入纳米材料的质量分数/%			
	氧化 石墨烯	羟基功能化 碳纳米管	羧基功能化 碳纳米管	氧化石墨烯和 羟基功能化碳纳米管
1	0.05	0.1	0.1	0.05
2	0.10	0.2	0.2	0.10
3	0.20	0.4	0.4	0.20
4	0.40	0.6	0.6	0.30
5	0.60	0.8	0.8	0.40

1.3 试验设备

试验的主要设备有: ①新芝系列超声波细胞粉碎机 GY98-3N, 宁波新芝生物科技股份有限公司;

②真空干燥箱 SZF-6090 型, 宁波洛尚智能科技有限公司; ③高精度电子天平 FA3204, 上海衡平仪器仪表厂; ④万能试验机 WDW-300D, 济南科盛试验机设备有限公司。

1.4 试验方法

首先, 给试样编号, 在试样标距内任意三处测量其宽度和厚度, 取平均值。然后, 在夹持试样时, 使试样的中心轴线与上、下夹具的中心线一致, 并安装引伸计。最后, 试验按 2 mm/min 的速度均匀连续加载直至破坏, 读取破坏荷载值, 计算其拉伸强度。

2 试验结果与分析

2.1 氧化石墨烯

不同掺量的 TNGO-10 下, TNGO/EP 胶粘剂胶体的拉伸强度变化曲线如图 2 所示。由图 2 可知, 掺入微量的 TNGO-10 就能使得 TNGO/EP 胶粘剂胶体的拉伸强度得到明显的提升。表明: 微量的 TNGO-10 在 EP 中分散良好, TNGO-10 与环氧树脂基体形成强的共价键, 承担一定的载荷。TNGO-10 的掺量为 0.1% 时拉伸强度达到最大值 57.15 MPa, 相较于纯的 EP 材料提高了 42.64%; TNGO-10 的掺量继续增加, 其拉伸强度随之降低。当 TNGO-10 的掺量大于 0.6% 时, 其拉伸强度较纯 EP 低, 因过量的 TNGO-10 加入, 使 TNGO-10 在树脂中难以有效分散, 易出现团聚现象, 从而导致应力集中, 致使胶粘剂胶体性能下降。

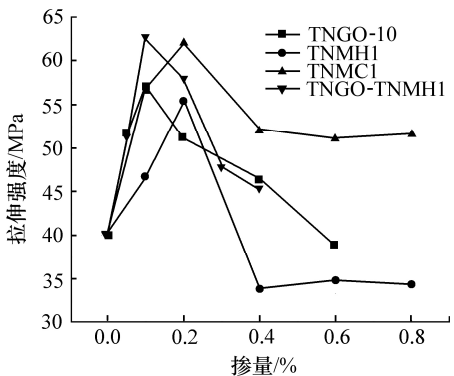


图 2 不同复合材料的拉伸强度随纳米材料掺量的变化趋势

Fig. 2 The variation of tensile strength of different composites with the mass fraction of nanomaterials

不同掺量的 TNGO-10 下, TNGO/EP 胶粘剂的

断裂伸长率变化曲线如图3所示。从图3可以看出, TNGO/EP 胶粘剂的断裂伸长率与其拉伸强度的变化趋势类似, 均先增加后减小。在 TNGO-10 的掺量为 0.05% 时, 断裂伸长率有一个较大的增幅, 达到最大值为 1.93%, 较纯 EP 提高了 38.85%。TNGO-10 的掺量继续增加, 其断裂伸长率逐渐下降。

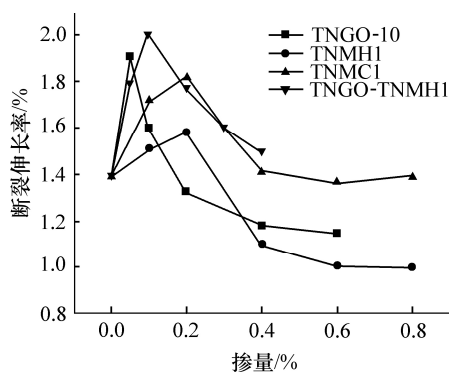


图3 不同复合材料的断裂伸长率随纳米材料掺量的变化趋势

Fig. 3 The variation of breaking elongation of different composites with the mass fraction of nanomaterials

不同掺量的 TNGO-10 下, TNGO/EP 胶粘剂胶体的弹性模量变化曲线如图4所示。从图4可以看出, 随着 TNGO-10 的掺量增加, 其拉伸模量逐渐上升, 当 TNGO-10 的掺量为 0.1% 时, 其拉伸模量达到最大值为 5 909.49 MPa, 较纯 EP 的拉伸模量 4 502.47 MPa, 提升了 31.25%。但当 TNGO-10 的掺量继续增加达到 0.6% 时, 其拉伸模量急剧下降, 因为, 加入过量的 TNGO-10, 易在树脂中出现团聚现象, 复合材料的自由体积浓度和数量的增加, 从

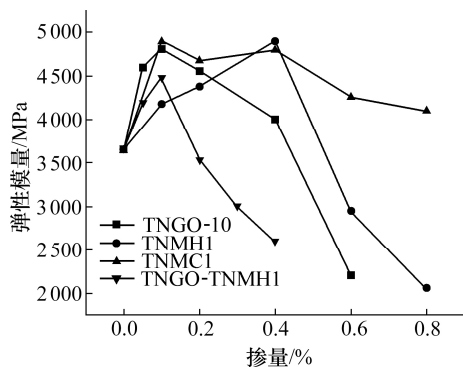


图4 不同复合材料的拉伸模量随纳米材料掺量的变化趋势

Fig. 4 The variation of tensile modulus of different composites with the content of nanomaterials

而使力学性能降低。

2.2 功能化多壁碳纳米管

不同掺量的 TNMH1 和 TNMC1 下, TNMH1/EP 和 TNMC1/EP 胶粘剂的拉伸强度变化曲线如图2所示。从图2可以看出, 2种碳纳米管对 EP 的拉伸强度均有明显增强, 且随着碳纳米管掺量的增加, 胶粘剂的拉伸强度都是先增加后下降。当碳纳米管的掺量为 0.2% 时, 两者的拉伸强度都达到最大值。TNMC1/EP, TNMH1/EP 分别较纯 EP 的拉伸强度提高了 55.32%, 38.08%。随着碳纳米管的掺量继续增加, 两者拉伸强度均明显下降。但是, TNMC1/EP 的强度仍高于纯 EP 的拉伸强度, 提高了 25%~30%, 而 TNMH1/EP 的强度却低于纯 EP 的拉伸强度。

从图3可以看出, TNMH1/EP 和 TNMC1/EP 的断裂伸长率曲线均先上升后下降, 两者的断裂伸长率与其拉伸强度的变化趋势相一致。微量的碳纳米管能够均匀地分散在树脂中, 增强复合材料的韧性, 从图4可以看出, 因碳纳米管具有较高的弹性模量, 加入适量的碳纳米管能提高复合材料的拉伸模量。当质量分数为 0.4% 时, 其增强效果最佳, 拉伸模量分别达到 6 030.74 MPa 和 6 131.02 MPa, 较纯 EP 的拉伸模量分别提高了 25% 和 27%。随着碳纳米管的增加, TNMC1/EP 的拉伸模量变化不大, 而 TNMH1/EP 的拉伸模量出现较大的波动。所以, 碳纳米管掺量超过一定量时, 在树脂中容易出现分布不均, 从而导致纳米材料团聚处的应力集中, 致使胶粘剂性能下降。

2.3 功能化纳米管和氧化石墨烯协同作用

图2~4为 TNMH1 和 TNGO-10 的掺量对 TNGO-TNMH1/EP 胶粘剂拉伸性能的影响。从图2~4还可以看出, 随着 TNMH1 和 TNGO-10 掺量的增加, 胶粘剂的拉伸强度、断裂伸长率及弹性模量均呈现出先上升再下降的趋势。当 TNMH1 和 TNGO-10 总掺量为 0.1% (TNMH1:TNGO-10=1:1) 时, TNGO-TNMH1/EP 的拉伸性能达到最佳, 其拉伸强度、断裂伸长率和弹性模量较纯 EP 的分别提高了 56.41%, 43.67% 和 19.5%。与 TNMH1/EP (较纯 EP 提高 42.64%, 19.93% 和 27%) 和 TNGO/EP (较纯 EP 提高 42.64%, 38.85% 和 20%) 相比, TNGO-TNMH1/EP 只需要更少的掺量就能达到相同甚至更好的拉伸性能。其原因为: ①加入微量的

纳米材料, 能够均匀的分散在树脂基体中; ②石墨烯的比表面积大, 能够阻碍碳纳米管的集聚, 充分发挥两者的协同作用。

3 拉伸断面 SEM 分析

拉伸试件断面 SEM 图像如图 5 所示。从图 5(a)中可以看出, 纯 EP 断面比较光滑, 几乎没有产生明显的凸起和裂纹。而图 5 的(b)~(f)分别是加入掺量为 0.1% 的 TNGO-10、0.2% 的 TNMH1、0.2% 的 TNMC1、0.2% 的 TNMH1 及 0.1% 的 TNGO-TNMH1 的拉伸试件断面 SEM 图, 从图 5 的(b)~(f)中可以看出, 其断裂表面的粗糙度较纯 EP 粗糙, 有明显的褶皱, 分布较为均匀。表明: 裂纹在扩展时, 受到纳米材料阻碍, 致使其产生二级裂纹, 朝其它方向发展, 且纳米材料附近的基体会产生明显的塑性变形, 因而较纯 EP 能吸收更多的能量。从图 5 中还可以看出, 其表面出现明显的附着物, 从形状上

推测, 这些附着物可能是碳纳米管。表明: 掺量为 0.2% 的碳纳米管能有效分散在环氧树脂中, 并能够与树脂良好的结合。从图 5(f)中可以看出, 有大小不一的碳纳米管, 这是石墨烯包裹碳纳米管, 两者发挥协同作用, 或者是功能化的碳纳米管表面基团与环氧树脂反应, 碳纳米管在拔出时, 上面附着环氧树脂。裂纹在萌发和发展期遇到碳纳米管时, 需要绕过或者剪断碳纳米管进行扩展, 这将消耗裂纹扩展能量, 进而抑制裂纹的扩展。其断裂形式从纯 EP 的脆性断裂转变为韧性断裂, 从而达到增强树脂的目的。

图 6,7 掺量为 0.8% 的碳纳米管拉伸试件断面 SEM 图。从图 6,7 中可以看出, 断面有明显的裂缝、气泡及缺陷, 且裂纹走向单一。浇筑试件时, 高含量的碳纳米管复合材料的粘稠度明显较低含量的要高, 碳纳米管在树脂中分散不均匀, 容易出现团聚。图 6,7 中的裂纹产生于应力集中处, 其附近由于碳纳米管分布不均, 裂纹朝褶皱少的地方扩散。

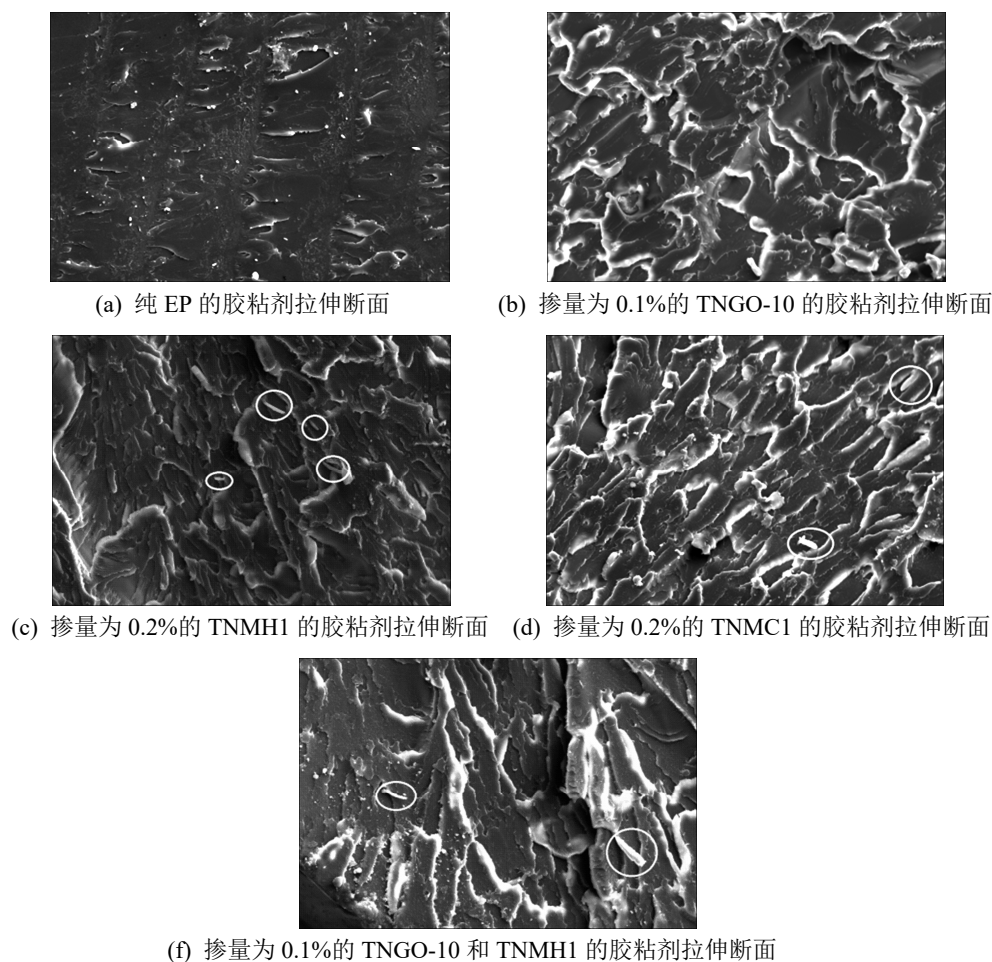


图 5 胶粘剂胶体拉伸试件断面 SEM 图(放大倍数: X288)

Fig. 5 SEM image of tensile fracture section of adhesive colloid specimen (Magnification: X 288)

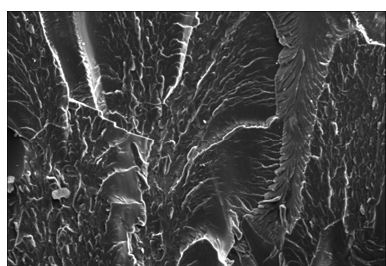


图 6 掺量为 0.8% 的 TNMC1 的胶粘剂拉伸试件断面
(放大倍数: X 100)

Fig. 6 Tensile fracture section of specimen with TNMC1 content of 0.8% (Magnification: X 100)

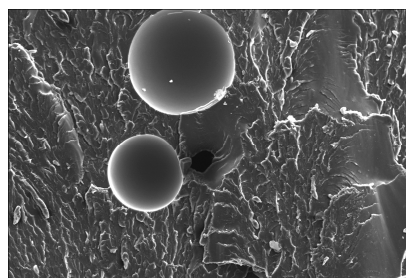


图 7 掺量为 0.8% 的 TNMH1 的 TNMH1/EP 胶粘剂拉伸试件断面(放大倍数: X 100)

Fig. 7 Tensile fracture section of TNMC1/EP specimen with TNMC1 content of 0.8% (Magnification: X 100)

4 结 论

1) 加入适量的纳米材料能使常温固化后胶粘剂的拉伸性能得到明显改善。当加入掺量为 0.1% 的 TNGO-10 时, 胶粘剂的拉伸强度较纯环氧树脂提高了 42.64%; 分别加入 2 种不同功能化的碳纳米管, 两者掺量均为 0.2% 时, 拉伸强度达到最大, 分别较纯 EP 的拉伸强度提高了 55.32%, 38.08%。

2) 一维的碳纳米管与二维的石墨烯两者混掺能发挥协同效应, 具有比单一纳米材料加入更好的拉伸性能。同时加入掺量为 0.05% 的 TNMH1 与 0.05% 的 TNGO-10 时, 经常温固化后的 TNGO-TNMH1/EP 胶粘剂的拉伸性能能达到最佳, 其拉伸强度、断裂伸长率和弹性模量较纯 EP 的分别提高了 56.41%, 43.67% 和 19.5%。

3) 经 SEM 对胶粘剂胶体拉伸断面观察分析, TNGO-10、TNMC1、TNMH1 的加入能改变其断面的粗糙度, 并能够与树脂良好的结合。裂纹在萌发和发展期遇到纳米材料时, 需要绕过或者剪断纳米材料进行扩展, 这将消耗裂纹扩展能量, 进而抑制

裂纹的扩展。其断裂形式也从纯 EP 的脆性断裂转变为韧性断裂, 从而达到增强树脂的目的。

参考文献(References):

- [1] 孔祥明, 吉伯海, 傅中秋, 等. 正交异性钢桥面板焊缝疲劳应力影响因素分析[J]. 交通科学与工程, 2017, 33(3): 10-17. (KONG Xiang-ming, JI Bo-hai, FU Zhong-qiu, et al. Analysis of influencing factors of fatigue stress of weld seam in orthotropic steel bridge deck[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2017, 33(3): 10-17. (in Chinese))
- [2] 李传习, 肖雄, 陈卓异. U 肋双侧焊的钢桥面板残余应力数值分析[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(2): 38-44. (LI Chuan-xi, XIAO Xiong, CHEN Zhuo-yi. Numerical analysis of residual stress of steel bridge deck under double sides welding of U-shaped ribs[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(2): 38-44. (in Chinese))
- [3] Korayem A H, Li C Y, Zhang Q H, et al. Effect of carbon nanotube modified epoxy adhesive on CFRP-to-steel interface[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 79(15): 95-104.
- [4] LI C, KE L, HE J, et al. Effects of mechanical properties of adhesive and CFRP on the bond behavior in CFRP-strengthened steel structures[J]. Composite Structures, 2019, 211: 163-174.
- [5] 李传习, 柯璐, 陈卓异, 等. CFRP-钢界面粘结性能试验与数值模拟[J]. 复合材料学报, 2018, 35(12): 3534-3546. (LI Chuan-xi, KE Lu, CHEN Zhuo-yi, et al. Experimental study and numerical simulation for bond behavior of interface between CFRP and steel[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(12): 3534-3546. (in Chinese))
- [6] 魏波, 周金堂, 姚正军, 等. 环氧树脂基体的原位增韧技术研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(17): 2976-2988. (WEI Bo, ZHOU Jin-tang, YAO Zheng-jun, et al. Research progress in toughening epoxy resin matrix by in-situ technique[J]. Materials Reports, 2019, 33(17): 2976-2988. (in Chinese))
- [7] Kunal Mishra, Raman P. Singh. Effect of APTMS modification on multiwall carbon nanotube reinforced epoxy nanocomposites[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 162: 425-432.
- [8] Wang X, Jin J, Song M. An investigation of the mechanism of graphene toughening epoxy[J]. Carbon, 2013, 65: 324-

- 333.
- [9] Prusty R K,Rathore D K,Sahoo A,et al.Mechanical behaviour of graphene oxide embedded epoxy nanocomposite at sub- and above- zero temperature environments[J].Composites Communications,2017(3): 47–50.
- [10] Chhetri S,Adak N C,Samanta P,et al.Functionalized reduced graphene oxide/epoxy composites with enhanced mechanical properties and thermal stability[J].Polymer Testing,2017,63:1–11.
- [11] Wan Y J,Gong L X,Tang L C,et al.Mechanical properties of epoxy composites filled with silane-functionalized graphene oxide[J].Composites Part A:Applied Science and Manufacturing,2014,64:79–89.
- [12] Bao C L,Guo Y Q,Song L,et al.In situ preparation of functionalized graphene oxide/epoxy nanocomposites with effective reinforcements[J].Journal of Materials Chemistry,2011(21):13290–13298.
- [13] Cui L J,Wang Y B,Xiu W J,et al.Effect of functionalization of multi-walled carbon nanotube on the curing behavior and mechanical property of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites[J].Materials & Design, 2013,49:279–284.
- [14] Yang S Y,Lin W N,Huang Y L,et al.Synergetic effects of graphene platelets and carbon nanotubes on the mechanical and thermal properties of epoxy composites [J].Carbon,2011,49(3):793–803.
- [15] 张竞,王洪亮,叶瑞.水热法氧化石墨烯改性环氧树脂的制备与性能[J].高分子材料科学与工程,2015,31(6): 167–171.(ZHANG Jing,WANG Hong-liang,YE Rui. Preparation and mechanical properties of grapheme oxide reinforced epoxy resin matrix composites[J].Polymer Materials Science & Engineering,2015,31(6):167–171.(in Chinese))
- [16] Fu S Y,Chen Z K,Hong S,et al.The reduction of carbon nanotube (CNT) length during the manufacture of CNT/ polymer composites and a method to simultaneously determine the resulting CNT and interfacial strengths[J]. Carbon,2009,47(14):3192–3200.
- [17] 赵艳文,徐伟,陈静,等.分散方法对碳纳米管/环氧树脂性能的影响[J].航空制造技术,2017(4):87–91.(ZHAO Yan-wen,XU Wei,CHEN Jing,et al.Effect of dispersing methods on the properties of carbon nanotubes/epoxy[J]. Aeronautical Manufacturing,Technology,2017(4):87–91. (in Chinese))
- [18] 四川省住房和城乡建设厅.GB50728-2011,工程结构加固材料安全性鉴定技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.(Sichuan Department of Housing and Urban-Rural Development.GB50728-2011, Technical code for safety appraisal of engineering structural strengthening materials[S].Beijing:China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese))