

表面功能化

# 聚多巴胺改性碳纳米管增强 羧基丁腈橡胶动态力学性能的研究

陈多礼<sup>a,b</sup>, 樊小强<sup>b</sup>, 张林<sup>b</sup>, 李文<sup>b</sup>, 朱旻昊<sup>a,b</sup>

(西南交通大学 a.机械工程学院 摩擦学研究所, b.材料科学与工程学院  
材料先进技术教育部重点实验室, 成都 610031)

**摘要:** **目的** 探究改性多壁碳纳米管 (MWCNTs) 在羧基丁腈橡胶 (XNBR) 中的分散性、增强橡胶基体动态力学性能及其作用机理。**方法** 采用多巴胺自聚合兼物理修饰的技术对 MWCNTs 进行表面改性处理, 以增加其表面极性基团, 提高其与 XNBR 基体的兼容性, 并制备了聚多巴胺改性碳纳米管 (MWCNTs-P)。采用红外光谱仪和 X 射线光电子能谱仪分析了改性多壁碳纳米管的表面化学状态, 使用透射电子显微镜 (TEM) 探索了改性碳纳米管的结构演变。使用动态力学分析仪 (DMA) 研究了改性碳纳米管填料网络对 XNBR 基体的增强效果, 结合复合材料断面的扫描电镜 (SEM) 和透射电镜 (TEM), 探索了 MWCNTs-P 填料增强 XNBR 动态力学性能的作用机理。**结果** 调控多巴胺反应浓度实现了 MWCNTs-P 填料表面物理包覆厚度从 2 nm 增加到 4 nm。动态力学性能测试表明, MWCNTs-P 填料提高了复合材料老化前后的动态力学性能。SEM 测试发现, MWCNTs-1.0P-2.0wt% 复合材料在老化试验后断面存在的孔洞最浅。TEM 测试发现, MWCNTs-1.0P 填料在 XNBR 基体中有更好的分散性。**结论** 聚多巴胺改性多壁碳纳米管提高了其在羧基丁腈橡胶基体中的分散性, 从而增强了复合材料老化前后的动态力学性能。

**关键词:** 增强; 羧基丁腈橡胶; 动态力学性能; 聚多巴胺; 多壁碳纳米管

中图分类号: TB332 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2020)09-0149-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.09.016

## Dynamic Mechanical Properties of Polydopamine Modified Multi-walled Carbon Nanotubes Reinforced Carboxyl Nitrile Rubber

CHEN Duo-li<sup>a,b</sup>, FAN Xiao-qiang<sup>b</sup>, ZHANG Lin<sup>b</sup>, LI Wen<sup>b</sup>, ZHU Min-hao<sup>a,b</sup>

(a. Tribology Research Institute, School of Mechanical Engineering, b. Key Laboratory of Advanced Technologies of Materials (Ministry of Education), School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

收稿日期: 2020-06-29; 修订日期: 2020-08-05

Received: 2020-06-29; Revised: 2020-08-05

基金项目: 国家自然科学基金 (51705435, 51805454)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51705435 and 51805454)

作者简介: 陈多礼 (1987—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为碳纳米材料表面改性技术。

Biography: CHEN Duo-li (1987—), Male, Doctor, Research focus: surface modification technology of carbon nanomaterials.

通讯作者: 樊小强 (1986—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为润滑与防腐材料及材料服役行为。邮箱: fxq@home.swjtu.edu.cn

Corresponding author: FAN Xiao-qiang (1986—), Male, Doctor, Assistant professor, Research focus: lubrication and anti-corrosion materials and materials service behavior. E-mail: fxq@home.swjtu.edu.cn

通讯作者: 朱旻昊 (1968—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为摩擦学及表面工程、材料服役行为。邮箱: zhuminhao@swjtu.cn

Corresponding author: ZHU Min-hao (1968—), Male, Doctor, Professor, Research focus: tribology and surface engineering, material service behavior. E-mail: zhuminhao@swjtu.cn

引文格式: 陈多礼, 樊小强, 张林, 等. 聚多巴胺改性碳纳米管增强羧基丁腈橡胶动态力学性能的研究[J]. 表面技术, 2020, 49(9): 149-156.

CHEN Duo-li, FAN Xiao-qiang, ZHANG Lin, et al. Dynamic mechanical properties of polydopamine modified multi-walled carbon nanotubes reinforced carboxyl nitrile rubber[J]. Surface technology, 2020, 49(9): 149-156.

**ABSTRACT:** The work aims to investigate the dispersibility of modified multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) in carboxylated nitrile butadiene rubber (XNBR) and dynamic mechanical properties and action mechanism of reinforced rubber substrate. Self-polymerization and physical modification technology of dopamine was adopted to modify the surface of MWCNTs to increase the polar groups to improve the compatibility with XNBR substrate and the polydopamine modified multi-walled carbon nanotubes were prepared. The surface chemical states of the MWCNTs-P were analyzed by FTIR and XPS. The structural evolution of the MWCNTs-P was investigated by TEM. DMA was used to study the reinforcing effects of carbon nanotubes on XNBR substrate. The action mechanism of MWCNTs-P reinforcing the dynamic mechanical properties of XNBR was explored by SEM and TEM images of composite section. By controlling the concentration of dopamine, the thickness of PDA layer on MWCNTs surface gradually increased from 2 nm to 4 nm. The MWCNTs-P fillers could increase the dynamic mechanical properties of composite before and after aging. SEM test showed that the H-MWCNTs-1.0P-2.0wt% composite had shallower holes on the section after aging. The TEM showed that MWCNTs-1.0P fillers had better dispersion in XNBR substrate than MWCNTs fillers. MWCNTs-P fillers are beneficial to reinforcing the dynamic mechanical properties of XNBR matrix due to their better dispersibility in XNBR substrate.

**KEY WORDS:** reinforcing; XNBR; dynamic mechanical properties; polydopamine; MWCNTs

多壁碳纳米管 (MWCNTs) 由于其优异的物理性能而被视为制备纳米复合材料的理想填料, 其在高分子材料基体中的分散性以及同基体的相互作用, 被认为是影响复合材料性能的关键因素<sup>[1-2]</sup>。但是, MWCNTs 在范德华力的作用下容易团聚, 使得其在高分子材料基体中的分散性很差, 对高分子材料基体的增强作用大打折扣。在现有研究当中, 研究人员采用了各种方法对 MWCNTs 进行表面功能化, 以提高 MWCNTs 在 高分子材料基体中的分散性以及同基体的相互作用。这些方法包括强酸氧化<sup>[3-4]</sup>、有机试剂化学改性<sup>[5-6]</sup>、物理吸附改性<sup>[7-8]</sup>。然而, 由于化学改性会使用到有毒和昂贵的化学试剂, 物理吸附改性要求试剂的分子结构比较特殊, 这些因素都将阻碍 MWCNTs 的工业化应用。因此, 研究一种绿色环保的改性方法来提高 MWCNTs 在 高分子基体中的分散性尤为重要。

聚多巴胺是一种绿色环保的改性试剂, 能够在室温和 pH 值为 8.5 的水溶液环境中对碳纳米管进行物理包覆<sup>[9]</sup>。本文制备了聚多巴胺改性的碳纳米管, 并将其与羧基丁腈橡胶 (XNBR) 进行共混, 研究了聚多巴胺改性碳纳米管在 XNBR 基体中的分散性以及其对动态力学性能的影响。本文选取羧基丁腈橡胶作为基体材料, 主要考虑到 XNBR 基体存在更多的极性官能团——羧基, 通过聚多巴胺包覆在碳纳米管表面增加其表面极性基团, 并将改性填料添加入 XNBR 基体中, 这种方法更有利于提高其在 XNBR 基体中的分散性以及同基体的相互作用。本文的创新性在于通过调控多巴胺反应浓度, 制备了表面物理包覆层厚度不同的聚多巴胺改性碳纳米管 (MWCNTs-P) 填料, 并将其添加入 XNBR 基体中, 提高了羧基丁腈橡胶老化前后动态力学性能, 并对复合材料动态力学性能提高的机理进行了研究。

## 1 试验与方法

### 1.1 材料

MWCNTs 购自苏州石墨烯技术公司 (中国), 6-羟基多巴胺盐酸盐 (多巴胺, 98%) 和三羟甲基甲烷 (TRIS, 99%) 购自 Alfa Aesar (美国) 公司, 羧基丁腈橡胶 (XNBR) 购自台湾南帝化学工业股份有限公司, 橡胶耐油试验用标准油 IRM901 购自于北京海润泽众科技有限公司。

### 1.2 改性方法

首先在装有 1000 mL 去离子水的烧杯中加入 1000 mg 的多壁碳纳米管, 将混合溶液进行超声波分散 10 min。超声分散后, 加入 250 mg 多巴胺并进行磁力搅拌。搅拌 10 min 时, 往烧杯中加入 TRIS 试剂, 将混合溶液的 pH 值调到 8.5, 然后再继续搅拌 6 h, 实验过程中能够观察到溶液从透明慢慢变成褐色。经过 6 h 的搅拌, 多巴胺将会发生聚合反应并包覆在碳纳米管表面。最后将聚多巴胺包覆的碳纳米管用去离子水进行离心清洗, 通过 10 次的离心清洗后收集沉淀, 将收集的沉淀在 60 °C 进行真空干燥, 得到聚多巴胺改性碳纳米管填料, 改性后的填料记作 MWCNTs-0.25P。为了探索多巴胺浓度变化对羧基丁腈橡胶动态力学性能的增强效果, 制备了 MWCNTs-0.5P 和 MWCNTs-1.0P 两个样品, 分别对应于多巴胺添加量为 500 mg 和 1000 mg。

### 1.3 纳米复合材料的制备

将真空干燥好的填料按照比例 (质量分数为 2%) 称量备用, 在双辊开炼机将羧基丁腈橡胶与碳纳米管进行混炼薄通 10 次, 确保填料在 XNBR 基体中没有团聚的大块颗粒。最后将混炼胶放入到厚度 2 mm 的

热压模具中, 将压板温度调整到  $145\text{ }^{\circ}\text{C}$  并保温, 然后在  $10\text{ MPa}$  下进行热压, 热压  $10\text{ min}$  后, 取出样品进行下一步的动态力学性能测试。为研究聚多巴胺改性碳纳米管的添加量对羧基丁腈橡胶动态力学性能的影响, 相应制得了  $0.2\%$ 、 $0.5\%$ 、 $1.0\%$ 、 $2.0\%$  四种样品, 测试样品分别记作 MWCNTs-0.25P-0.2wt%、MWCNTs-0.25P-0.5wt%、MWCNTs-0.25P-1.0wt% 和 MWCNTs-0.25P-2.0wt%。

## 1.4 测试分析

使用 Bruker VERTEX70 红外光谱仪, 分析改性碳纳米管在  $4000\sim 500\text{ cm}^{-1}$  范围内的有机官能团。通过 X 射线光电子能谱法 (XPS, ESCALAB 250Xi, Thermo Scientific) 分析聚多巴胺改性 MWCNTs 填料的化学组成。通过透射电子显微镜 (TECNAI G2 TF20), 探索聚多巴胺改性 MWCNTs 的结构演变及改性碳纳米管在 XNBR 基体中的分散性。使用 DMA (Ta Q800) 研究纳米复合材料的动态力学性能。通

过扫描电子显微镜 (SEM, JSM-6610) 探索复合材料高温油老化后的断面形貌。

## 2 MWCNTs-PDA 的表征分析

### 2.1 MWCNTs-PDA 的形貌特征

通过透射电子显微镜 (TEM) 探索了聚多巴胺改性 MWCNTs 的结构演变。如图 1a 所示, 未改性 MWCNTs 的晶格条纹清晰可见。在图 1b 中, MWCNTs-0.25P 表面除了能够看见碳纳米管的晶格条纹以外, 还能够发现无定形态的聚多巴胺层, 由于多巴胺反应浓度较低, 使其厚度比较薄。如图 1c 所示, 随着多巴胺反应浓度的提高, MWCNTs-0.5P 样品表面沉积的无定性形态的聚多巴胺层表现得更明显。在图 1d 中, 随着多巴胺反应浓度进一步增加, MWCNTs-1.0P 样品表面的多巴胺包覆层厚度增加到  $4\text{ nm}$ , 聚多巴胺层的无定型形态清晰可见。透射电镜照片表明, 多巴胺反应浓度越高, 包覆在碳纳米管表面的聚多巴胺层越厚。

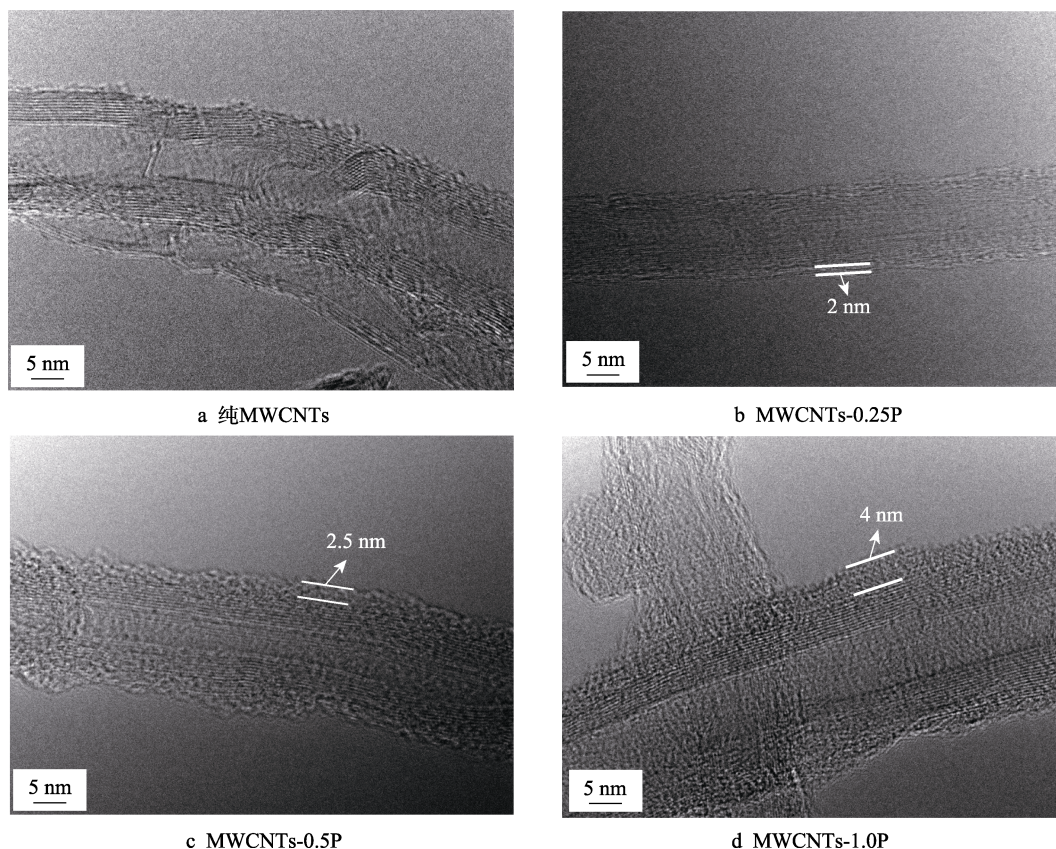


图 1 聚多巴胺改性多壁碳纳米管的透射电镜照片

Fig.1 TEM images of polydopamine modified multi-walled carbon nanotubes

### 2.2 MWCNTs-PDA 的成分分析

使用红外光谱仪分析改性前后碳纳米管表面有机官能团的化学成分变化, 结果见图 2。在红外光谱图中对比了未改性 MWCNTs (图 2 中 a 曲线) 和 MWCNTs-0.25P (图 2 中 b 曲线) 的变化。在 a 曲线

中, 未改性碳纳米管表面存在  $\text{O—H}$  峰, 这是由于结晶水的存在所致。在 b 曲线中,  $3458\text{ cm}^{-1}$  的  $\text{O—H}$  峰宽变大, 这是由于聚多巴胺包覆增加了含氧官能团的数量, 在  $1620\text{ cm}^{-1}$  位置的特征峰高更为突出, 其来源于聚多巴胺的  $\text{N—H}$  峰, 表明多巴胺进行氧化聚合后沉积在碳纳米管表面<sup>[10-11]</sup>。



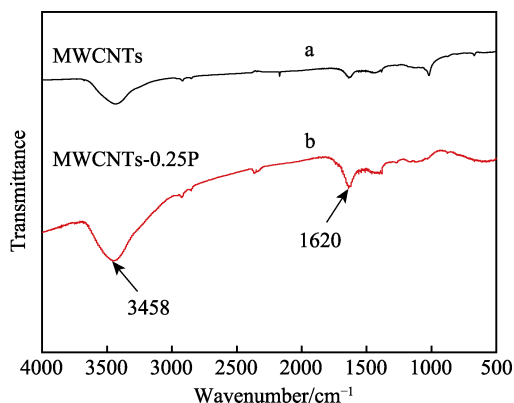
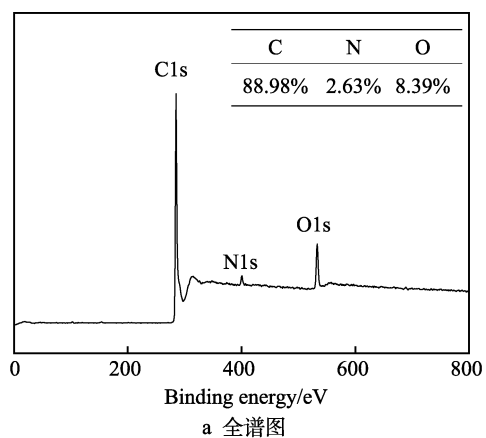
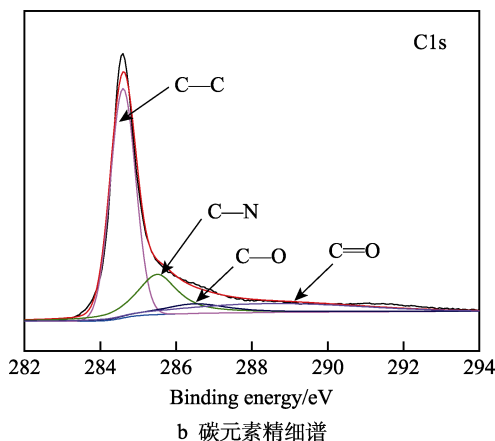


图2 聚多巴胺改性碳纳米管的红外光谱图  
Fig.2 FTIR spectra of MWCNTs and MWCNTs-0.25P

采用 XPS 光电子能谱对 MWCNTs-0.25P 样品表面典型化学元素及结合能进行进一步分析,结果见图3。如图3a所示,多巴胺通过自聚合沉积在碳纳米管表面后,在全谱中有明显的 O1s 和 N1s 出现,表明聚多巴胺的包覆增加了这两种元素的含量。其中, C 元素占比为 88.98%, N 元素占比为 2.63%, O 元素占比为 8.39%,通过计算得知 N/O 元素比为 0.31,多巴胺的理论元素比为 0.50,剩下的 0.19 的元素比为碳纳米管表面存在的羟基峰,表明聚多巴胺的包覆明显增加了碳纳米管表面极性基团的数量。



a 全谱图



b 碳元素精细谱

图3 聚多巴胺改性碳纳米管的 XPS 光电子能谱图  
Fig.3 XPS spectra of polydopamine modified multi-walled carbon nanotubes: a) full spectra; b) fine spectra of carbon

如图3b所示,将4个峰值曲线对C1s进行拟合,这四个峰值曲线分别为284.6 eV位置的C—C键、285.5 eV位置的C—N键、286.45 eV位置的C—O键和288.5 eV位置的C=O键,其中C—N键和C=O键的出现进一步证实了沉积在碳纳米管表面的是聚多巴胺层<sup>[12-13]</sup>。

### 3 复合材料的动态力学性能分析

#### 3.1 动态力学性能分析

动态力学性能分析的主要指标包括弹性模量、玻璃化转变温度和损耗因子(损耗模量)。通常采用复合材料整段温度区域的动态弹性模量提高来评价填料网络对基体的增强作用<sup>[14-15]</sup>。图4反映了MWCNTs-P填料添加量对复合材料动态弹性模量的影响。图4a中,MWCNTs-0.25P-0.2wt%样品的弹性模量在-30℃到玻璃化转变温度的区域与未改性MWCNTs-0.2wt%相近,同时在-50℃到-30℃出现了低于未改性MWCNTs-0.2wt%的区域。这是由于填料添加量较低的情况下,复合材料基体从低温到高温转变的过程中,材料的流体流动效应占主导,而MWCNTs-0.25P-0.2wt%样品中的填料网络对基体的增强效果较弱<sup>[15]</sup>。图4b—d中,随着填料添加量的增加,MWCNTs-P填料制备的复合材料在低于玻璃化转变温度的区域出现了明显的增强,这是由于当温度降低时,复合材料会逐渐变硬,高分子材料基体中的自由体积会随着温度的降低而减少,从而使得高分子材料基体变得越来越致密,同时会使得分子链移动所需要的作用力增大,当纳米填料在基体中分散得越好时,作用力会进一步加强,最后填料网络会使得复合材料在低温段表现出更高的弹性模量<sup>[16]</sup>。MWCNTs-P填料制备的复合材料的弹性模量,在高于玻璃化转变温度的区域也出现了很好的提升,表明聚多巴胺改性碳纳米管对羧基丁腈橡胶基体的增强效果很明显。

图5反映了MWCNTs-P填料添加量变化对基丁腈橡胶损耗因子的影响。在图5a—d中,MWCNTs填料制备的样品的损耗因子峰值没有明显的增大,而MWCNTs-P填料制备的样品的损耗因子峰值都高于原胶和MWCNTs填料制备的样品,暗示着MWCNTs-P填料能够提高其在羧基丁腈橡胶基体中的分散性,进一步提高样品填料与分子链间相互摩擦的界面,从而提高了能量耗散的能力<sup>[17]</sup>。在图5c中,MWCNTs-P填料制备的样品的玻璃化转变温度都向高温偏移,表明改性填料同基体的相互作用得到了提升<sup>[18-19]</sup>。综合测试结果表明,MWCNTs-P填料不仅能够增强羧基丁腈橡胶的动态弹性模量,还能提高复合材料能量耗散的能力,能够有效提高羧基丁腈橡胶的动态力学性能。



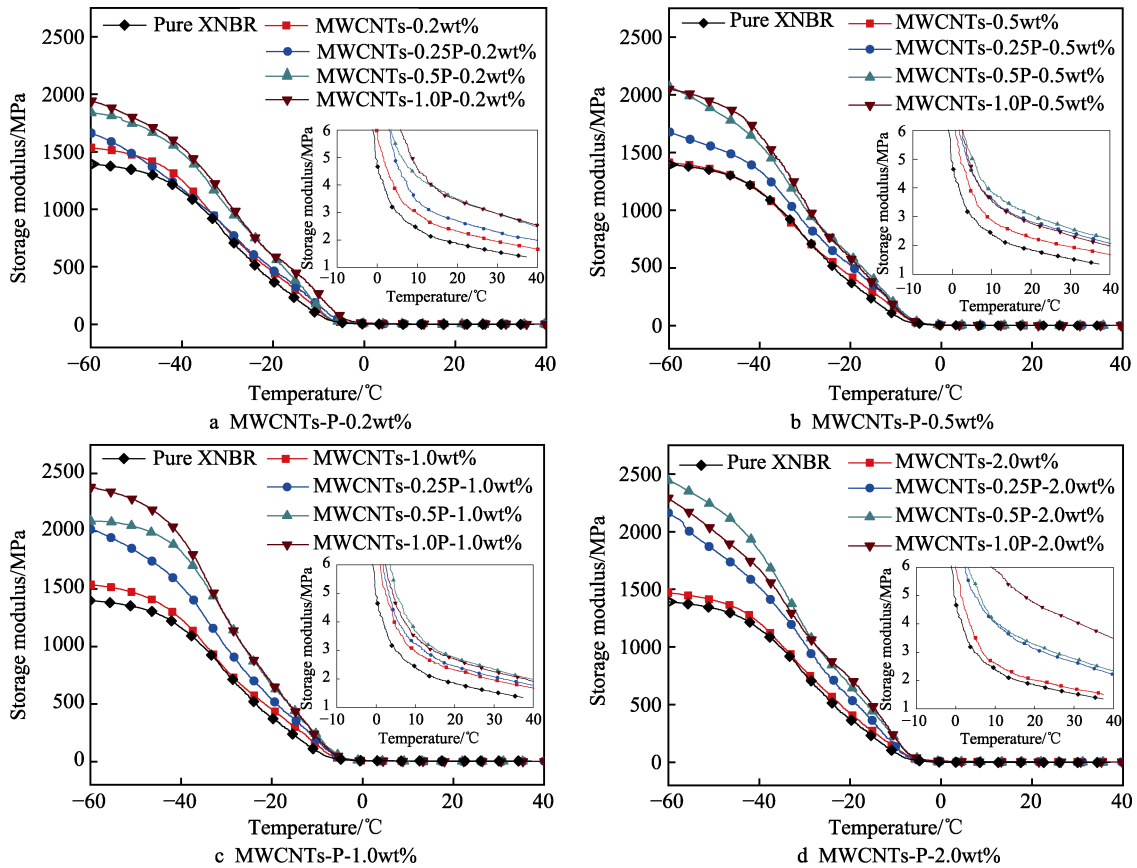


图 4 不同改性碳纳米管含量的复合材料的弹性模量-温度曲线

Fig.4 Temperature-dependent elasticity modulus of composites with different contents of MWCNTs-P

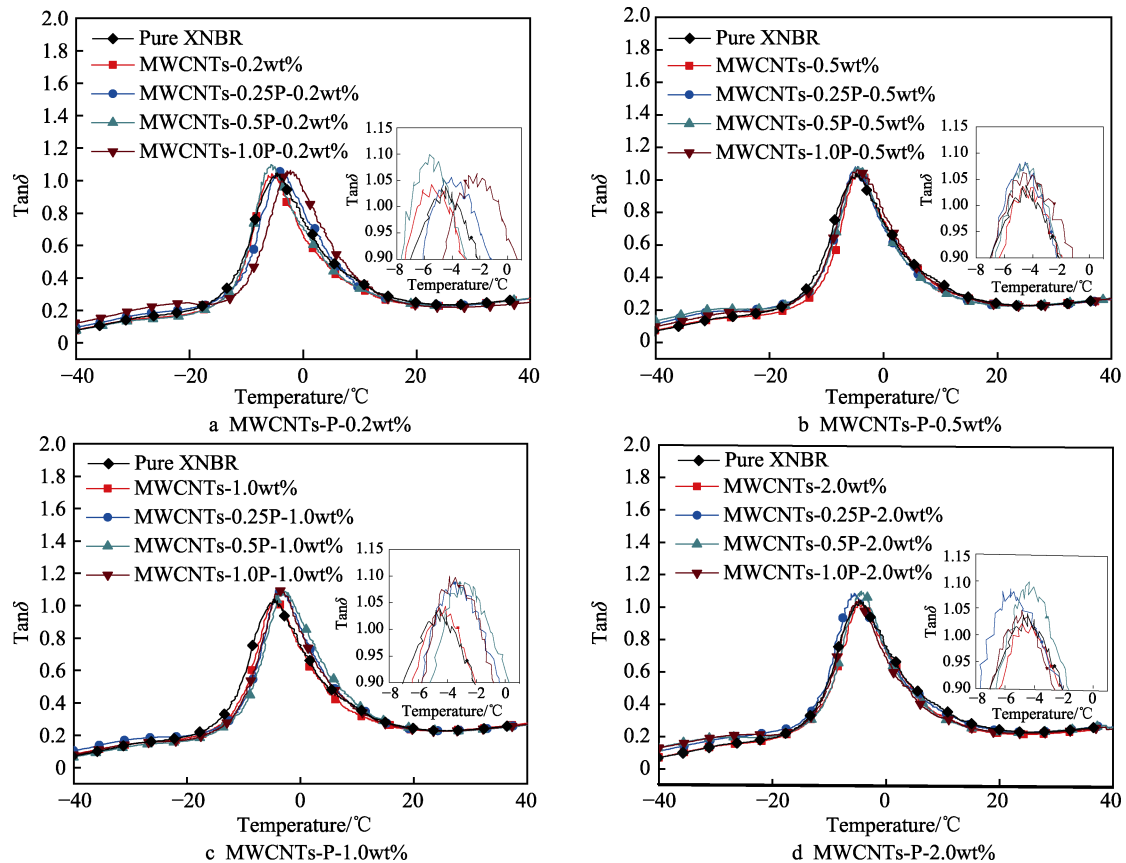


图 5 不同改性碳纳米管含量的复合材料的损耗因子-温度曲线

Fig.5 Temperature-dependent loss factors of composites with different contents of MWCNTs-P

### 3.2 高温油老化后动态力学性能分析

图 6 为 MWCNTs-P-2.0wt% 复合材料在 120 °C 下进行 7 d 油浸泡试验后动态力学性能的变化情况, 浸泡介质为橡胶耐油试验用标准油 IRM901 (ASTM 标准)。从图 6a 中可以得知, H-MWCNTs-0.25P-2.0wt% 和 H-MWCNTs-0.5P-2.0wt% 样品的弹性模量在低温段均出现了低于 H-MWCNTs-2.0wt% 的区域, 随着温度的升高, 弹性模量出现上升的情况。H-MWCNTs-1.0P-2.0wt% 样品在进行了高温油老化试验后, 其弹

性模量在整段温域内都高于 H-MWCNTs-2.0wt% 样品。从图 6b 中可以得知, 三种改性填料制备的复合材料样品老化后的损耗模量均高于 H-MWCNTs-2.0wt% 样品, 表现出更优良的能量耗散的能力。

如图 7a 所示, H-MWCNTs-2.0wt% 复合材料在经过高温油老化后, 断面出现了大量孔洞, 这也是未改性碳纳米管填料对复合材料增强效果很差的原因。如图 7b 和图 7c 所示, H-MWCNTs-0.25P-2.0wt% 和 H-MWCNTs-0.5P-2.0wt% 两个样品的断面形貌依然存在孔洞, 由于孔洞的存在, 导致这两个样品在高温油老

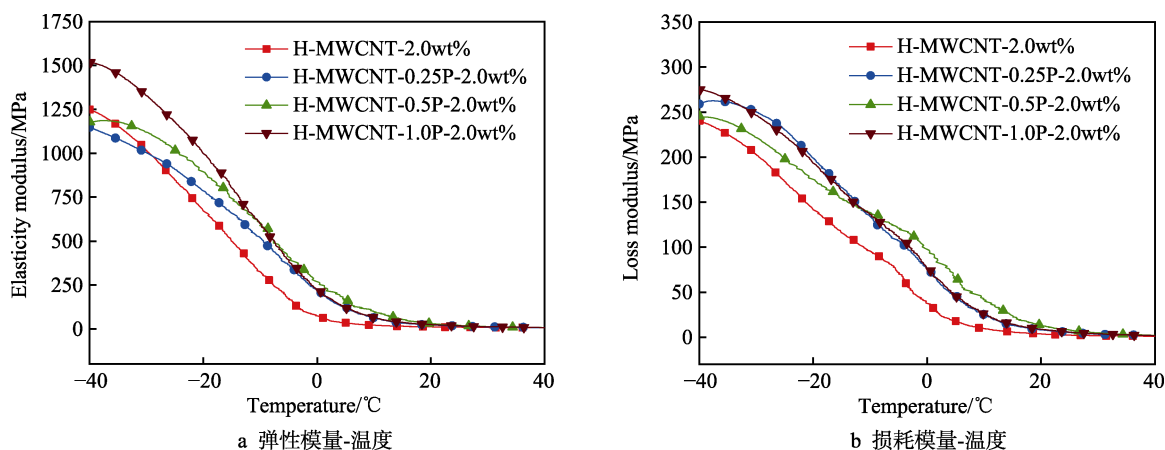


图 6 改性碳纳米管含量为 2.0wt% 的复合材料高温油老化后的弹性模量和损耗模量与温度的关系曲线  
Fig.6 Temperature-dependent elasticity modulus (a) and loss modulus (b) of composites with 2.0wt% content of MWCNTs-P

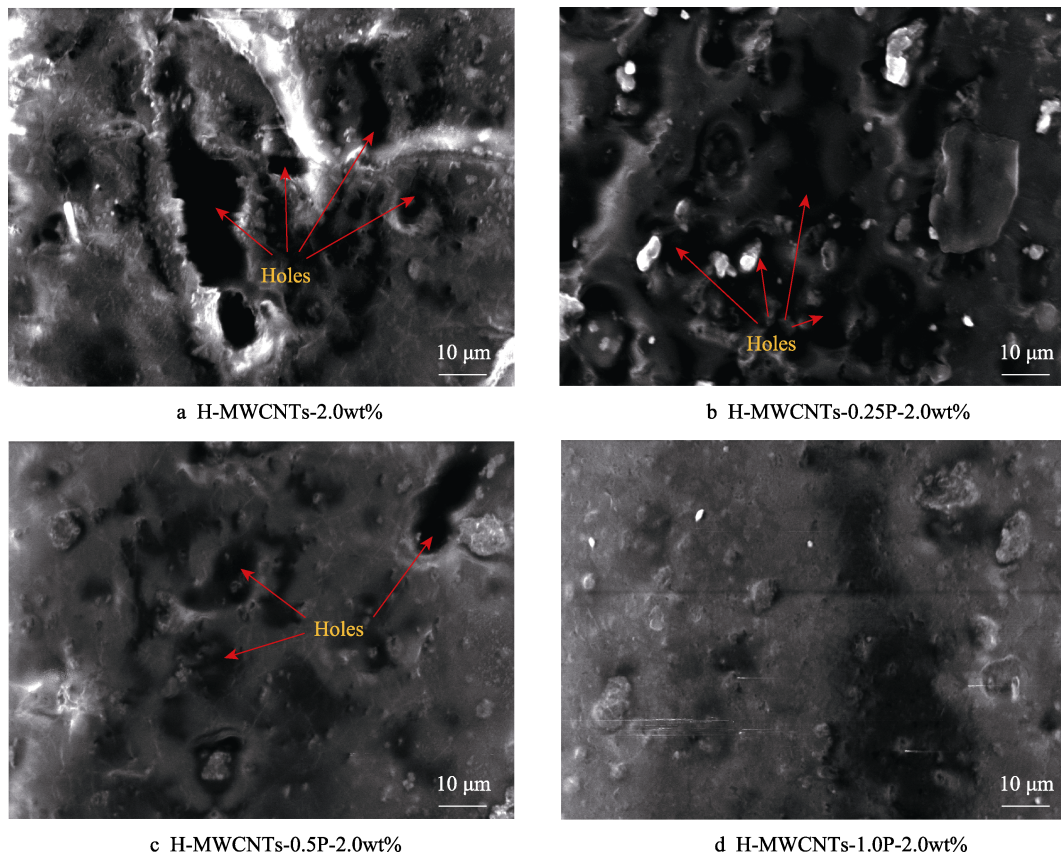


图 7 高温油老化后四种样品的断面 SEM 形貌照片  
Fig.7 SEM images of fracture surfaces for four composites after thermal aging in oil



化后的弹性模量在低温段出现了低于 H-MWCNTs-2.0wt% 的区域。如图 7d 所示, H-MWCNTs-1.0P-2.0wt% 复合材料断面的孔洞明显变浅, 使得复合材料的弹性模量在整段温域都高于 H-MWCNTs-2.0wt%。

### 3.3 MWCNTs-PDA 在基体中的分散性

如图 8a 和图 8b 所示, 未改性 MWCNTs 填料在 XNBR 基体中出现了大块的团聚, 使得其对 XNBR

基体的动态力学性能的增强效果较差。如图 8c 和图 8d 所示, MWCNTs-P 填料在 XNBR 基体中没有出现明显的大块团聚, 表明 MWCNTs-P 填料在 XNBR 基体中的分散性比未改性 MWCNTs 填料在 XNBR 基体中的分散性更好, 这是由于采用聚多巴胺对碳纳米管进行表面包覆的方式可以增加填料表面极性基团, 使得 MWCNTs-P 填料在 XNBR 基体中能够得到更好的分散性, 从而提高复合材料的动态力学性能。

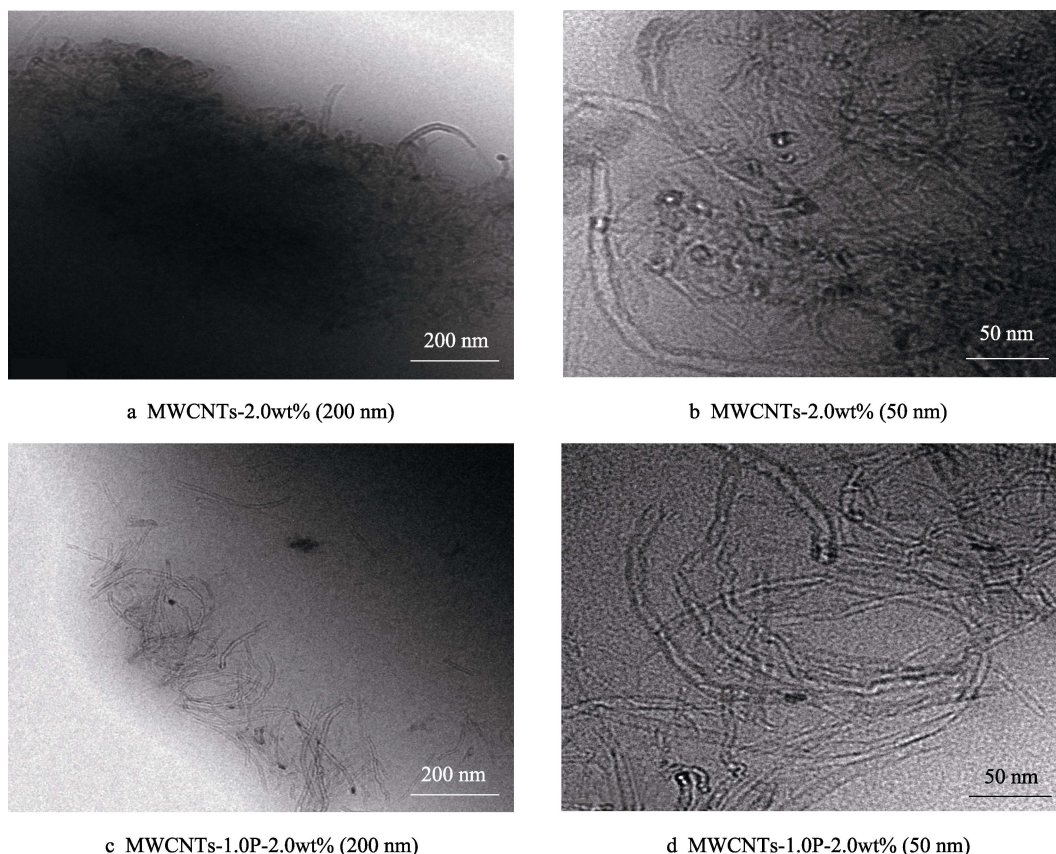


图 8 MWCNTs-2.0wt% 和 MWCNTs-1.0P-2.0wt% 两种样品的透射电镜照片  
Fig.8 TEM images of (a, b) MWCNTs-2.0wt%, (c, d) MWCNTs-1.0P-2.0wt%

## 4 结论

1) 通过调控化学反应过程中的多巴胺浓度, 可在碳纳米管表面制备不同厚度的聚多巴胺包覆改性层。

2) 聚多巴胺包覆改性层的厚度越大, 越有利于提高复合材料的动态力学性能。

3) 使用聚多巴胺对碳纳米管进行表面包覆可以增加其表面极性基团, 使得改性碳纳米管在 XNBR 基体中能够得到更好的分散性, 从而提高复合材料的动态力学性能。

### 参考文献:

[1] AJAYAN P M, SCHADLER L S, GIANNARIS C, et al. Single-walled carbon nanotube-polymer composites: Strength

and weakness[J]. Advanced materials, 2000, 12: 750-753.  
[2] MONIRUZZAMAN M, WINEY K I. Polymer nanocomposites containing carbon nanotubes[J]. Macromolecules, 2006, 39: 543-545.  
[3] ESUMI K, ISHIGAMI M, NAKAJIMA A, et al. Chemical treatment of carbon nanotubes[J]. Carbon, 1996, 34: 279-281.  
[4] SIANIPAR M, KIM S H, MIN C, et al. Potential and performance of a polydopamine-coated multiwalled carbon nanotube/polysulfone nanocomposite membrane for ultra-filtration application[J]. Journal of industrial and engineering chemistry, 2016, 34: 364-373.  
[5] DURAN H, YAMEEN B, KHAN H U, et al. Surface initiated ring-opening polymerization of L-proline n-carboxy anhydride from single and multiwalled carbon nanotubes[J]. Reactive & functional polymers, 2013, 73: 606-612.  
[6] GUO J, SAHA P, LIANG J, et al. Multi-walled carbon



- nanotubes coated by multi-layer silica for improving thermal conductivity of polymer composites[J]. Journal of thermal analysis and calorimetry, 2013, 113: 467-474.
- [7] ZHA J, LEE J K, WU Y, et al. Photoluminescence and electronic interaction of anthracene derivatives adsorbed on sidewalls of single-walled carbon nanotubes[J]. Nano letters, 2003, 3(3): 403-407.
- [8] CHEN J, DYER M J, YU M. Cyclodextrin-mediated soft cutting of single-walled carbon nanotubes[J]. Journal of the American Chemical Society, 2001, 123(25): 6201-6202.
- [9] LEE H, LEE B P, MESSERSMITH P B. A reversible wet/dry adhesive inspired by mussels and geckos[J]. Nature, 2007, 448: 338-341.
- [10] LEE M, KU S H, RYU J K, et al. Mussel-inspired functionalization of carbon nanotubes for hydroxyapatite mineralization[J]. Journal of materials chemistry, 2010, 20: 8848-8853.
- [11] LING Y, LI W Z, WANG B Y, et al. Epoxy resin reinforced with nanothin polydopamine-coated carbon nanotubes: A study of the interfacial polymer layer thickness[J]. RSC advances, 2016, 6(37): 3654.
- [12] CHEN S, CAO Y, FENG J. Polydopamine as an efficient and robust platform to functionalize carbon fiber for high-performance polymer composites[J]. ACS applied materials & interfaces, 2014, 6: 349-356.
- [13] SA R, YAN Y, WEI Z, et al. Surface modification of aramid fibers by bio-inspired poly(dopamine) and epoxy functionalized silane grafting[J]. ACS applied materials & interfaces, 2014, 6: 21730-21738.
- [14] MATOS C F, GALEMBECK F, ZARBIN A J G. Multi-functional and environmentally friendly nanocomposites between natural rubber and graphene or graphene oxide[J]. Carbon, 2014, 78: 469-479.
- [15] POTHANA L, OOMMENB Z, THOMASC S. Dynamic mechanical analysis of banana fiber reinforced polyester composites[J]. Composites science and technology, 2003, 63: 283-293.
- [16] 何曼君, 张红东, 陈维孝, 等. 高分子物理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2007: 109-112.  
HE Man-jun, ZHANG Hong-dong, Chen Wei-xiao, et al. Polymer physics[M]. Shanghai: Fudan University Press, 2007: 109-112.
- [17] SASIKUMAR K, MANOJ N R, MUKUNDAN T, et al. Hysteretic damping in XNBR-MWCNT nanocomposites at low and high compressive strains[J]. Composites part B, 2016, 92: 74-83.
- [18] CHEN S S, CAO Y W, FENG J C. Polydopamine as an efficient and robust platform to functionalize carbon fiber for high-performance polymer composites[J]. ACS applied materials & interfaces, 2014, 6: 349-356.
- [19] BROCKS T, CIOFFI M O H, VOORWALD H J C. Effect of fiber surface on flexural strength in carbon fabric reinforced epoxy composites[J]. Applied surface science, 2013, 274: 210-216.

(上接第 124 页)

- [40] MUMTAZ K, HOPKINSON N. Top surface and side roughness of Inconel 625 parts processed using selective laser melting[J]. Rapid prototyping journal, 2009, 15(2): 96-103.
- [41] DAI D, GU D. Effect of metal vaporization behavior on keyhole-mode surface morphology of selective laser melted composites using different protective atmospheres[J]. Applied surface science, 2015, 355: 310-319.
- [42] SAVALANI M M, PIZARRO J M. Effect of preheat and layer thickness on selective laser melting (SLM) of magnesium[J]. Rapid prototyping journal, 2016, 22(1): 115-122.
- [43] YASA E, KRUTH J. Application of laser re-melting on selective laser melting parts[J]. Prod Eng, 2011, 6(4): 259-270.
- [44] ALRBAEY K, WIMPENNY D, TOSI R, et al. On optimization of surface roughness of selective laser melted stainless steel parts: a statistical study[J]. Journal of materials engineering & performance, 2014, 23(6): 2139-2148.
- [45] VAITHILINGAM J, GOODRIDGE R D, HAGUE R J M, et al. The effect of laser remelting on the surface chemistry of Ti6Al4V components fabricated by selective laser melting[J]. Journal of materials processing technology, 2016, 233: 1-8.
- [46] WANG D, LIU Y, YANG Y, et al. Theoretical and experimental study on surface roughness of 316L stainless steel metal parts obtained through selective laser melting[J]. Rapid prototyping journal, 2016, 22(4): 706-716.
- [47] 葛亚楠, 武美萍, 冒浴沂, 等. 激光选区熔化扫描策略对钛合金成形精度的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 268-274.  
GE Ya-nan, WU Mei-ping, MAO Yu-yi, et al. Effect of scanning strategy on forming precision of titanium alloy by selective laser melting[J]. Laser & optoelectronics progress, 2018, 55(9): 268-274.
- [48] BÂLC N, COSMA S C, KESSLAR J, et al. Research on improving the outer surface quality of the parts made by SLM[J]. Applied mechanics and materials, 2015, 808: 6.
- [49] 闫岸如, 杨恬恬, 王燕灵, 等. 变能量激光选区熔化 IN718 镍基超合金的成形工艺及高温机械性能[J]. 光学精密工程, 2015(6): 1695-1704.  
YAN An-ru, YANG Tian-tian, WANG Yan-ling, et al. Forming process and high-temperature mechanical properties of variable energy laser selective melting manufacturing IN718 superalloy[J]. Optics and precision engineering, 2015(6): 1695-1704.
- [50] CLOOTS M, ZUMOFEN L, SPIERINGS A B, et al. Approaches to minimize overhang angles of SLM parts[J]. Rapid prototyping journal, 2017, 23(2): 362-369.
- [51] ABELE E, KNIEPKAMP M. Analysis and optimisation of vertical surface roughness in micro selective laser melting[J]. Surface topography metrology & properties, 2015, 3(3): 034007.