

单壁碳纳米管/聚醚酰亚胺电磁屏蔽薄膜的制备与性能*

王天赐¹⁾ 夏乾善^{1)†} 黄信佐^{2)‡} 王永正¹⁾ 刘斌¹⁾ 张晋通¹⁾ 黎涛¹⁾

1) (哈尔滨理工大学电气与电子工程学院, 工程电介质及其应用教育部重点实验室, 哈尔滨 150080)

2) (中国航空工业集团公司济南特种结构研究所, 济南 250023)

(2024 年 6 月 11 日收到; 2024 年 7 月 22 日收到修改稿)

在实际应用中, 柔性、轻质、高性能是聚合物基电磁屏蔽材料应具备的特点. 目前, 制备兼具优异电导率、电磁屏蔽性能和力学性能的聚合物基电磁屏蔽材料仍然是一个巨大挑战. 因此, 本工作以单壁碳纳米管和聚醚酰亚胺为原料, 通过静电纺丝和真空辅助过滤的方法制备了单壁碳纳米管/聚醚酰亚胺复合薄膜. 通过调控单壁碳纳米管的面密度, 复合薄膜的电导率可以提升至 1866 S/cm. 对于电磁屏蔽性能, 单壁碳纳米管/聚醚酰亚胺复合薄膜在 Ku 波段 (12—18 GHz) 的总电磁屏蔽效能 (SE_T) 为 75.78—81.83 dB, 高于纯单壁碳纳米管薄膜的电磁屏蔽效能 (65.19—69.81 dB). 由于聚醚酰亚胺纤维和单壁碳纳米管之间形成了界面, 在一定的单壁碳纳米管面密度范围内, 界面越多, 消耗的电磁波能量越多. 对于力学性能, 单壁碳纳米管/聚醚酰亚胺薄膜的最大拉伸强度和断裂伸长率分别为 28.52 MPa 和 7.91%, 是单壁碳纳米管薄膜的 1.13 倍和 1.5 倍, 随着单壁碳纳米管面密度的增大, 单壁碳纳米管之间的相互作用以及聚醚酰亚胺纤维和单壁碳纳米管在界面处的相互作用对复合薄膜的力学性能起到了一定的增强作用. 单壁碳纳米管/聚醚酰亚胺复合薄膜作为一种优异的聚合物基电磁屏蔽复合材料, 可用于如精密电子仪器的防护和可穿戴电子设备等领域.

关键词: 单壁碳纳米管, 聚醚酰亚胺, 静电纺丝, 电磁屏蔽

PACS: 81.05.Lg, 81.05.Qk, 81.07.De, 81.15.-z

DOI: 10.7498/aps.73.20240822

1 引言

随着信息技术的高速发展, 电磁辐射和干扰等问题因电子设备数量的增加而变得更加严重, 这会严重影响这些设备的使用寿命和性能, 甚至会威胁人类健康^[1]. 因此, 如何开发高性能的电磁屏蔽材料成为亟待解决的问题.

与传统金属电磁屏蔽材料相比, 聚合物基电磁屏蔽材料因具有轻质、耐腐蚀、易加工的优点得到

广泛关注. 聚合物基电磁屏蔽材料包括本征导电聚合物电磁屏蔽材料和复合型导电聚合物电磁屏蔽材料. 本征导电聚合物电磁屏蔽材料是掺杂剂和具有丰富共轭 π 键的绝缘高分子聚合物通过化学或者电化学电荷转移从而转变为具有一定导电性的材料, 如聚吡咯 (polypyrrole, PPy), 聚丙烯腈 (polyacrylonitrile, PAN), 聚苯胺^[2] (polyaniline, PANI), 聚噻吩^[3] (polythiophene, PTh) 等. Qiao 等^[4] 利用自组装硅烷单层和添加掺杂剂制备了 PPy 薄膜, 其电磁屏蔽效能 (electromagnetic interference

* 中国博士后科学基金 (批准号: 2021M701019)、黑龙江省博士后资助项目 (批准号: LBH-Z20069) 和黑龙江省高校基础研究基金 (批准号: 2022-KYYWF-0152) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xiaqianshan@sina.com

‡ 通信作者. E-mail: xz150638@163.com

shielding effectiveness, EMI SE) 为 37.03 dB, 电导率为 51.4 S/cm. Lai 等^[5]利用静电纺丝和浸涂制备高交联导电 PAN 薄膜, 其 EMI SE 超过 55 dB, 并且最大抗拉强度为 8.3 MPa. 本征导电聚合物电磁屏蔽材料由于复杂的掺杂工艺、较高的制造成本、较差的力学性能导致应用领域十分有限. 复合型导电聚合物电磁屏蔽材料是运用多种方法把电绝缘的聚合物基体和填料制备成具有导电性的电磁屏蔽复合材料. Ma 等^[6]以纤维素纳米纤维为基体, 采用逐层过滤的方法制备了 CNF/MXene/FeCo@rGO 复合薄膜, 其 EMI SE 在 X 波段达到了 45.2 dB, 且抗拉强度为 26.2 MPa. Ren 等^[7]利用水性聚氨酯与银涂层无纺布制备了 Ag/NWF/WPU 复合薄膜, 其 EMI SE 为 72.5 dB 且拉伸强度可达 12 MPa. 与本征导电聚合物电磁屏蔽材料相比, 复合型导电聚合物电磁屏蔽材料因其力学性能好、成本低、易加工、柔性好等优点已被广泛研究和应用. 由于趋肤效应, 复合材料采用尺寸较小的填料时会具有更好的导电性, 近年来纳米级的导电填料比如碳纳米管^[8-10]、石墨烯^[11-13]、金属纳米线^[14-16]等被更多地应用于制备复合型导电聚合物电磁屏蔽材料.

在本工作中, 以单壁碳纳米管和聚醚酰亚胺为原料, 采用静电纺丝技术制备了聚醚酰亚胺薄膜, 进一步通过真空辅助过滤的方法制备了单壁碳纳米管/聚醚酰亚胺复合薄膜. 由于单壁碳纳米管的加入, 解决了聚醚酰亚胺薄膜力学性能差的问题. 同时通过真空抽滤, 聚醚酰亚胺纤维能够连接单壁碳纳米管层, 从而减小二者之间的孔隙. 相比于纯单壁碳纳米管薄膜, 复合薄膜的电磁屏蔽性能得到了提升. 原因是聚醚酰亚胺薄膜为多孔结构, 不但可以使大量的单壁碳纳米管沉积在其表面, 还可以使两者之间形成大量的界面. 当电磁波入射到复合薄膜表面时, 界面处发生的极化会对电磁波起到进一步吸收消耗的作用. 同时复合薄膜的力学性能通过界面的增强效应以及单壁碳纳米管之间的相互作用也得到了增强. 最终制备的复合薄膜的电导率可以达到 1866 S/cm, 在 Ku 波段的电磁屏蔽性能最高可达 81.83 dB. 此外, 复合薄膜还呈现出优异的拉伸强度 (28.52 MPa). 这些优点使得单壁碳纳米管/聚醚酰亚胺复合薄膜在聚合物基电磁屏蔽复合材料领域具有巨大潜力.

2 实验

2.1 实验材料

聚醚酰亚胺 (polyetherimide, PEI) 购买于 Sabic Innovation Plastic(USA) 公司. N-甲基吡咯烷酮 (N-methylpyrrolidone, NMP) 购买于国药化学试剂有限公司. 单壁碳纳米管 (single-walled carbon nanotube, SWCNT) 购买于 OCSiAl Trading (Shenzhen) 有限公司. 十二烷基硫酸钠 (sodium dodecyl sulfate, SDS) 购买于天津光复科技发展有限公司.

2.2 实验方法

2.2.1 PEI 膜的制备

通过在 60 °C 的条件下水浴加热搅拌 12 h, PEI 颗粒被均匀分散在 NMP 中, 自然冷却获得 25% (质量分数) 的 PEI 溶液. 在静电纺丝的过程中, 将 25% 的 PEI 溶液在针头 22G、供液速度 20 mL/min、电压 12 kV、接收距离 10 cm、滚筒转速为 300 rad/min 的参数条件下电纺成 PEI 纤维膜. 纺丝完成后, 将 PEI 纤维膜放入 60 °C 的鼓风烘箱中, 干燥 12 h 得到 PEI 薄膜.

2.2.2 SWCNTs 悬浊液的制备

适量表面活性剂 SDS 加入一定量的去离子水中, 通过机械搅拌 1 h 至完全溶解. 然后将适量 SWCNTs 加入均匀的 SDS 溶液中, 继续机械搅拌 1 h. 通过超声波细胞粉碎机再将得到的溶液循环超声分散 3 个循环, 每次 0.5 h, 从而得到均匀稳定的 SWCNT 悬浊液.

2.2.3 SWCNT/PEI 复合薄膜的制备

将 PEI 薄膜置于真空辅助过滤装置中作为滤膜, 再加入 SWCNTs 悬浊液. 待过滤过程结束后, 再分别加入去离子水和无水乙醇分别滤洗 3 次以去除残余的 SDS. 将得到的复合薄膜置于 80 °C 的鼓风烘箱中干燥 12 h, 得到 SWCNT/PEI 复合薄膜. 本工作分别制备了单壁碳纳米管面密度为 1, 2, 3 和 4 mg/cm² 的 SWCNT/PEI 复合薄膜, 分别命名为 1-SWCNT/PEI, 2-SWCNT/PEI, 3-SWCNT/PEI 和 4-SWCNT/PEI. 同时, 为了对比 SWCNT/PEI 复合薄膜的综合性能, 在真空辅助过滤装置中放入孔径为 0.45 μm 的尼龙滤

膜对 SWCNTs 悬浊液进行抽滤, 制备了面密度为 3 mg/cm^2 的单壁碳纳米管薄膜, 并命名为 3-SWCNT. SWCNT/PEI 复合薄膜制备示意图如图 1 所示.

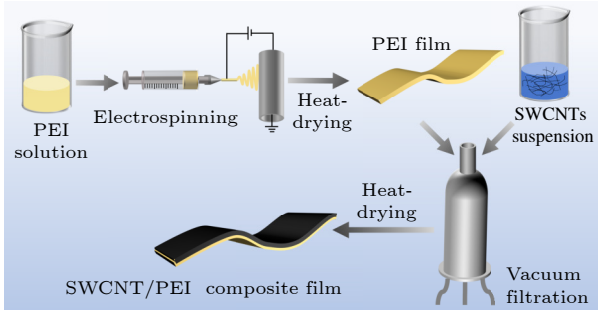


图 1 SWCNT/PEI 复合薄膜制备示意图

Fig. 1. Schematic diagram of SWCNT/PEI composite film preparation.

2.3 表征分析

采用 SU8020 型扫描电子显微镜在 15 kV 电压下研究了不同复合薄膜的形貌. 采用 JASCO FTIR-6100 型傅里叶变换红外光谱仪对试样中所携带的官能团的种类进行分析, 波长范围为 $500\text{--}4000 \text{ cm}^{-1}$. 采用 TA Q800 型动态热机械分析仪分析了引入 SWCNT 前后薄膜力学性能的变化^[17]. 采用 RTS-9 型双电测四探头测试仪对样品进行电导率的测试^[18]. 采用 3656 D 型矢量网络分析仪测量了样品的 EMI 屏蔽效能和介电性能, 测量频率范围为 $12\text{--}18 \text{ GHz}$. 基于测量的 S -参数 (S_{11} , S_{21} , S_{22} , S_{12})^[19], 通过以下公式可以计算出反射系数 (R)、透射系数 (T)、反射损耗效能 (SE_R)、吸收损耗效能 (SE_A) 和总电磁屏蔽效能 (SE_T)^[20]:

$$R = |S_{11}|^2 = |S_{22}|^2, \quad (1)$$

$$T = |S_{12}|^2 = |S_{21}|^2, \quad (2)$$

$$\text{SE}_R = -10\log_{10}(1 - R), \quad (3)$$

$$\text{SE}_A = -10\log_{10}\left(\frac{T}{1 - R}\right), \quad (4)$$

$$\text{SE}_T = \text{SE}_R + \text{SE}_A. \quad (5)$$

3 结果与讨论

3.1 结构与形态

静电纺丝得到的聚醚酰亚胺薄膜不可避免地存在拉伸强度小等问题, 这将大大影响其实际应

用. 本工作选用了单壁碳纳米管作为填料, 通过真空辅助过滤将其和聚醚酰亚胺薄膜制成复合薄膜, 有利于解决上述问题. 获得的复合薄膜的微观形貌结构如图 2 所示.

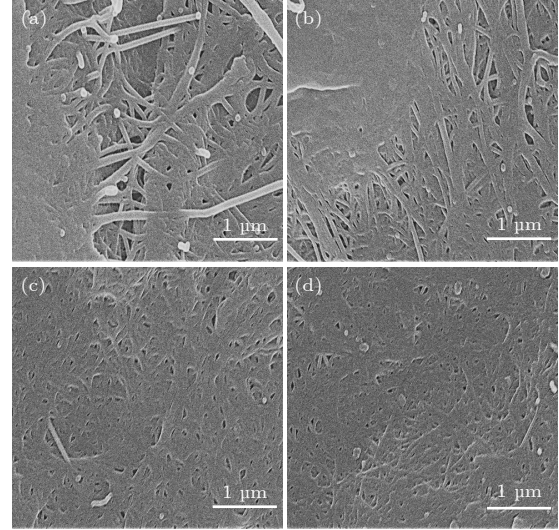


图 2 SWCNT/PEI 复合薄膜的 SWCNT 层表面 SEM 图 (a) 1-SWCNT/PEI; (b) 2-SWCNT/PEI; (c) 3-SWCNT/PEI; (d) 4-SWCNT/PEI

Fig. 2. SEM images of the surface of SWCNT layer of SWCNT/PEI composite films: (a) 1-SWCNT/PEI; (b) 2-SWCNT/PEI; (c) 3-SWCNT/PEI; (d) 4-SWCNT/PEI.

从图 2 可以看出, 当单壁碳纳米管的面密度较小时, 得到的复合薄膜结构中碳纳米管层的表面孔径较大并且由范德瓦耳斯力产生的碳纳米管之间的物理交联点较少. 当单壁碳纳米管的面密度较大时, 碳纳米管层的表面孔径明显变小, 同时物理交联点也逐渐增加, 碳纳米管网络变得越来越致密. 这会使 SWCNT/PEI 复合薄膜的导电性会在一定的单壁碳纳米管面密度范围内得到增强, 原因是 SWCNT 层为电子的传递提供了有效的途径^[21].

图 3 为复合薄膜的聚醚酰亚胺层的局部放大图. 从图 3 可以看出, 聚醚酰亚胺层中含有大量通过静电纺丝形成的聚醚酰亚胺纤维孔隙. 这些纤维表面会随机缠绕一定量的碳纳米管, 且缠绕的碳纳米管的含量会随着单壁碳纳米管面密度的增大而增大, 使得聚醚酰亚胺纤维可承受的力大大增加, 致使复合薄膜的力学性能得到提升.

3.2 红外光谱

由图 4 可知, PEI 薄膜和 SWCNT/PEI 复合薄膜中均含有 5 种较为明显的特征吸收峰. 在波数

为 1721 cm^{-1} 和 1776 cm^{-1} 处分别是酰亚胺环上羰基的对称和不对称伸缩振动吸收峰, 1358 cm^{-1} 是酰亚胺环中碳氮键 (C—N) 的吸收峰. 1276 cm^{-1} 处的特征吸收峰, 表明两种薄膜中均存在醚键^[22]. 783 cm^{-1} 处是酰亚胺环中羰基的弯曲振动吸收峰. 此外, SWCNT/PEI 复合薄膜中并未出现新的吸收峰, 说明单壁碳纳米管的加入并未与聚醚酰亚胺纤维薄膜发生反应. 因此, 通过真空辅助过滤的

方法制备 SWCNT/PEI 复合薄膜可以保持原有的 PEI 纤维薄膜结构.

3.3 力学性能

由于单壁碳纳米管和聚醚酰亚胺纤维本身具有一定的力学性能, 再通过真空抽滤使得碳纳米管在聚醚酰亚胺薄膜表面形成致密网络同时缠绕在少量纤维表面, 致使复合薄膜整体呈现出优异的力学性能. 如图 5 所示, 聚醚酰亚胺薄膜的拉伸强度仅为 9.83 MPa . 在加入单壁碳纳米管后, 复合薄膜的拉伸强度增大, 随着碳纳米管面密度的增大, 复合薄膜的拉伸强度在一定范围内随之增大; 4-SWCNT/PEI 复合薄膜的拉伸强度可以达到 28.98 MPa , 这说明了单壁碳纳米管对聚醚酰亚胺薄膜的增强作用. 复合薄膜的断裂伸长率随着碳纳米管面密度的增加而逐渐降低, 由 8.27% 降低至 7.37% . 原因是在拉伸过程中, 聚醚酰亚胺纤维会首先断裂, 然后复合薄膜所受的力会转移到单壁碳

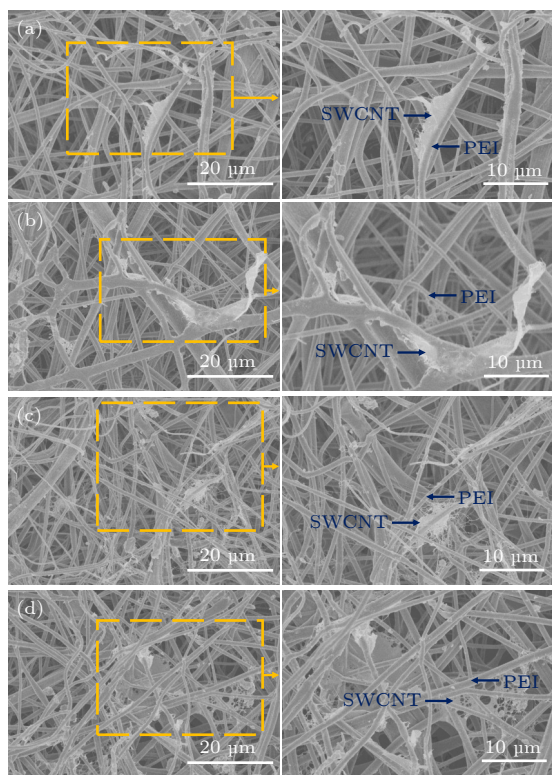


图 3 SWCNT/PEI 复合薄膜的 PEI 层表面 SEM 图 (a) 1-SWCNT/PEI; (b) 2-SWCNT/PEI; (c) 3-SWCNT/PEI; (d) 4-SWCNT/PEI

Fig. 3. SEM images of the surface of PEI layer of SWCNT/PEI composite films: (a) 1-SWCNT/PEI; (b) 2-SWCNT/PEI; (c) 3-SWCNT/PEI; (d) 4-SWCNT/PEI.

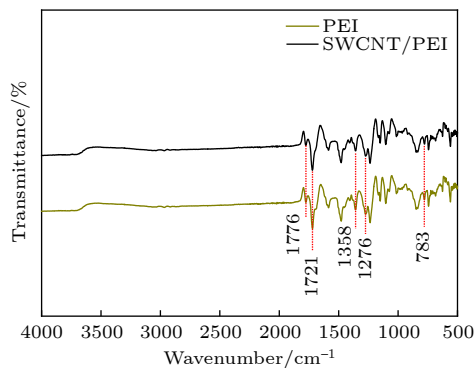


图 4 PEI 薄膜和 SWCNT/PEI 复合薄膜的红外光谱图

Fig. 4. FTIR spectra of PEI film and SWCNT/PEI composite films.

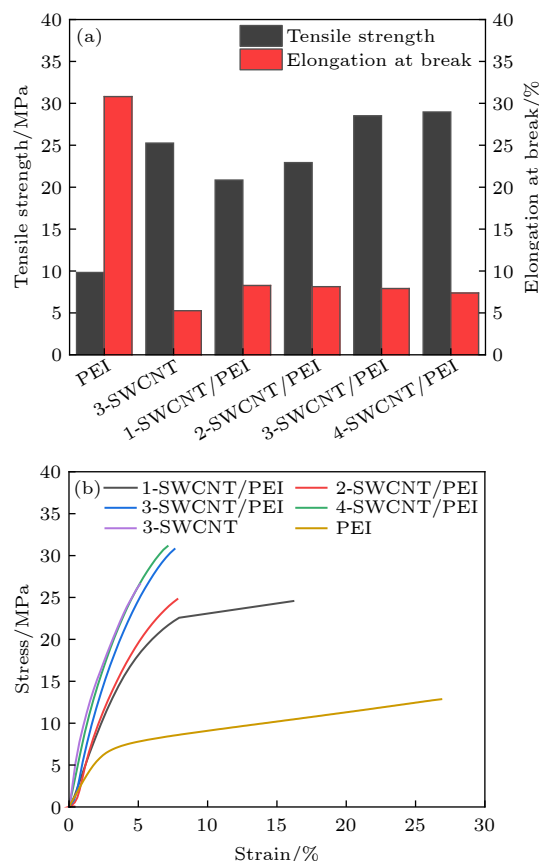


图 5 PEI 薄膜、3-SWCNT 薄膜和 SWCNT/PEI 复合薄膜 (a) 拉伸强度和断裂伸长率; (b) 应力-应变曲线

Fig. 5. PEI film, 3-SWCNT film and SWCNT/PEI composite films: (a) Tensile strength and elongation at break; (b) stress-strain curves.

纳米管层, 这会导致复合薄膜的断裂伸长率远低于聚醚酰亚胺薄膜. 但在相同的单壁碳纳米管面密度下, 复合薄膜的拉伸强度和断裂伸长率均高于纯单壁碳纳米管薄膜.

3.4 电导率

聚合物基导电复合材料的电磁屏蔽性能与其导电性密切相关. 较高的电导率通常有助于提升

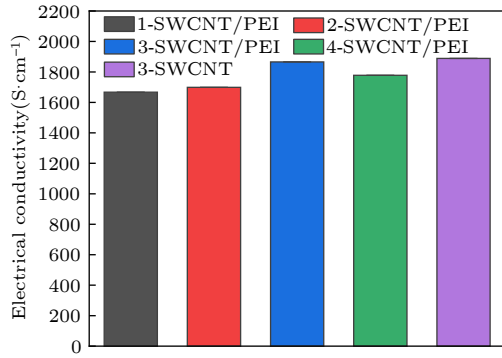


图 6 3-SWCNT 薄膜和 SWCNT/PEI 复合薄膜的电导率
Fig. 6. Conductivity of 3-SWCNT film and SWCNT/PEI composite films.

EMI 屏蔽性能^[23]. 单壁碳纳米管/聚醚酰亚胺复合薄膜中碳纳米管能够形成连续的导电网络, 同时单壁碳纳米管具有突出的电导率, 致使复合薄膜呈现出优异的电导率. 如图 6 所示, 在一定范围内复合薄膜的电导率随着单壁碳纳米管面密度的增大而增大^[24]. 3-SWCNT/PEI 薄膜的电导率可以达到 1866 S/cm, 仅比相同面密度的单壁碳纳米管薄膜的电导率低 1.22%. 这意味着电纺聚醚酰亚胺纤维的引入未对复合薄膜的电导率造成明显影响.

3.5 电磁屏蔽性能

通过对单壁碳纳米管/聚醚酰亚胺复合薄膜进行电磁屏蔽效能的测量, 探究不同碳纳米管面密度对复合薄膜电磁屏蔽性能的影响. 图 7(a)–(c) 展示了 SWCNT/PEI 复合薄膜和 3-SWCNT 薄膜在 Ku 波段的电磁屏蔽性能. 由图 7(a) 可知, 1-SWCNT/PEI—4-SWCNT/PEI 复合薄膜反射损耗效能 SE_R 值范围分别为 14.29—15.20 dB, 14.37—16.40 dB, 14.08—16.42 dB 和 15.38—16.36 dB.

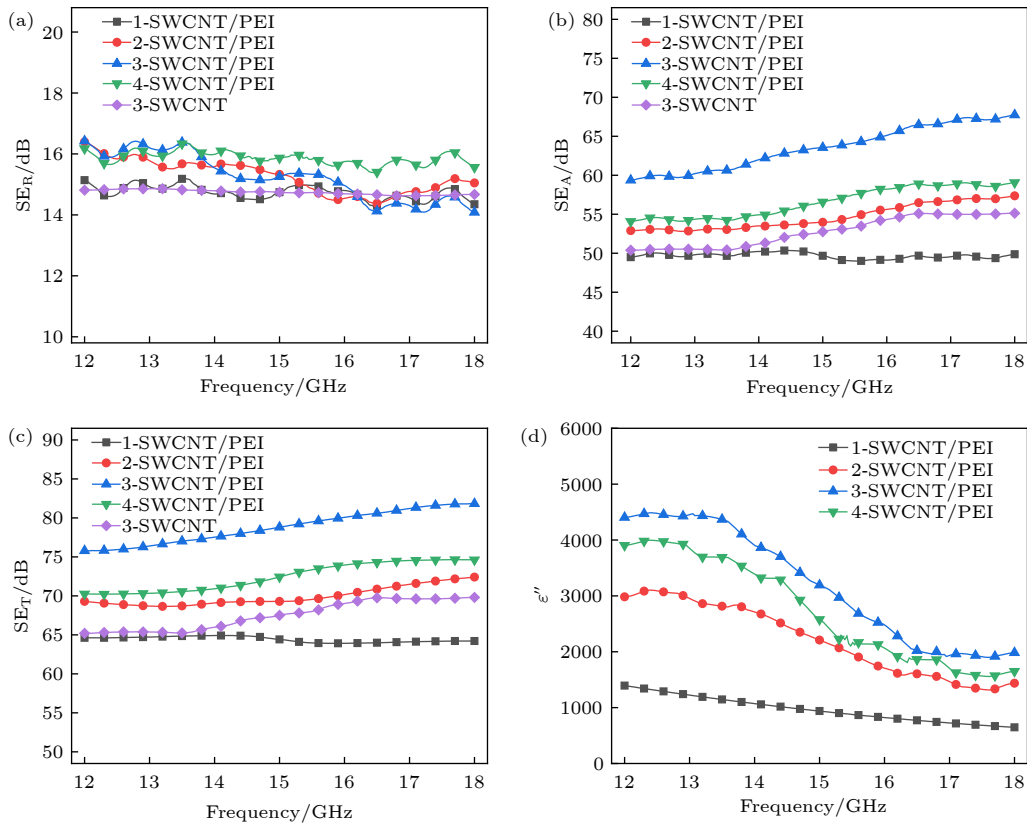


图 7 3-SWCNT 薄膜和 SWCNT/PEI 复合薄膜 (a) SE_R ; (b) SE_A ; (c) SE_T ; (d) 复合薄膜的 ϵ'' 值

Fig. 7. 3-SWCNT film and SWCNT/PEI composite films: (a) SE_R ; (b) SE_A ; (c) SE_T ; (d) the value of ϵ'' of SWCNT/PEI composite films.

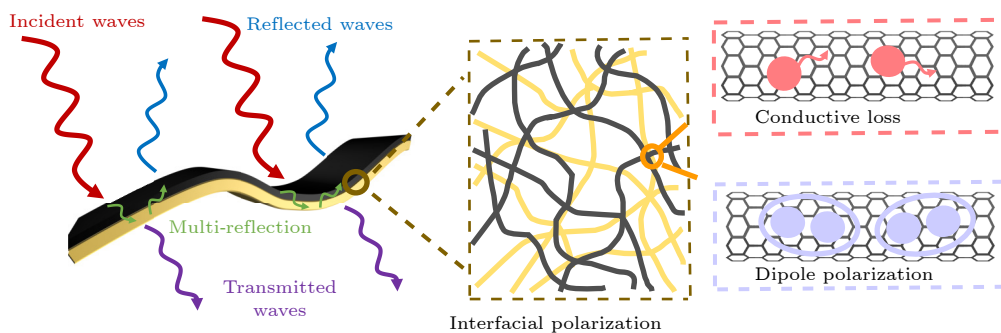


图 8 SWCNT/PEI 复合薄膜的电磁屏蔽机理示意图

Fig. 8. Schematic diagram of electromagnetic shielding mechanism of SWCNT/PEI composite film.

由此可知, 在一定范围内, 复合薄膜的 SE_R 值的范围随着单壁碳纳米管面密度的增加而增大, 而当单壁碳纳米管面密度大于 3 mg/cm^2 时, 复合薄膜的 SE_R 值有所下降. 由图 7(b) 可知, 1-SWCNT/PEI—3-SWCNT/PEI 复合薄膜的吸收损耗效能 SE_A 值随单壁碳纳米管面密度的增大而增大, 其 SE_A 值范围分别为 $49.48\text{—}49.86 \text{ dB}$, $52.90\text{—}57.36 \text{ dB}$ 和 $59.36\text{—}67.74 \text{ dB}$, 但当单壁碳纳米管面密度为 4 mg/cm^2 时, 复合薄膜 SE_A 值有所下降, 其 SE_A 值范围为 $54.07\text{—}59.07 \text{ dB}$. 这是由于随着单壁碳纳米管面密度逐渐增大, 更多的碳纳米管渗透到聚醚酰亚胺层中, 碳纳米管与聚醚酰亚胺纤维之间形成的界面逐渐增多, 导致复合薄膜的吸收损耗效能随着界面极化损耗增大而提升 [25]. 而当复合薄膜聚醚酰亚胺层中的单壁碳纳米管逐渐增多时, 碳纳米管会形成一定数量的小型导电网络, 这些导电网络相当于在聚醚酰亚胺层中形成了阻挡入射电磁波的屏障, 导致复合薄膜的吸收损耗效能降低 [26]. 由图 7(c) 知, 1-SWCNT/PEI—4-SWCNT/PEI 复合薄膜的总电磁屏蔽效能 SE_T 也呈现出与其吸收损耗效能相同的趋势, 且当单壁碳纳米管面密度为 3 mg/cm^2 时, 复合薄膜总电磁屏蔽效能达到最佳, 其 SE_T 值最高为 81.82 dB . 3-SWCNT 薄膜的 SE_R , SE_A 和 SE_T 值的范围分别为 $14.63\text{—}14.86 \text{ dB}$, $50.38\text{—}55.13 \text{ dB}$, $65.19\text{—}69.81 \text{ dB}$. 在相同的单壁碳纳米管面密度下, 3-SWCNT/PEI 复合薄膜的 SE_A 和 SE_T 值远大于 3-SWCNT 薄膜, 这是由于复合薄膜中存在大量单壁碳纳米管和聚醚酰亚胺纤维形成的界面, 致使复合薄膜的吸收损耗效能远大于单壁碳纳米管薄膜, 从而使复合薄膜的总电磁屏蔽效能得到提高. SWCNT/PEI 复合薄膜的介电常数虚部 (ϵ'') 随频率的变化如图 7(d) 所示. ϵ''

表征电场能量的消耗. 不同单壁碳纳米管面密度的复合薄膜的 ϵ'' 值均随着频率的增大而降低. 在频率为 12.4 GHz 处, 3-SWCNT/PEI 复合薄膜的 ϵ'' 值为 4488 , 是同一频率下 1-SWCNT/PEI 复合薄膜的 3.38 倍. 单壁碳纳米管/聚醚酰亚胺复合薄膜的电磁屏蔽机理示意图如图 8 所示. 引入高导电的单壁碳纳米管强化了电磁波在复合薄膜内部的多重反射损耗 [27], 同时碳纳米管与聚醚酰亚胺纤维形成的界面也在一定范围内使得复合薄膜的界面极化损耗能力得到提高.

4 结 论

本工作通过静电纺丝和真空辅助过滤的方法制备了单壁碳纳米管/聚醚酰亚胺电磁屏蔽薄膜. 复合薄膜中单壁碳纳米管缠绕在聚醚酰亚胺纤维上, 能够达到增强复合薄膜力学性能的效果, 随着单壁碳纳米管面密度的增大, 复合薄膜的拉伸强度甚至可以达到 28.98 MPa . 单壁碳纳米管在聚醚酰亚胺纤维上形成了大量的导电网络, 从而使复合薄膜表现出优异的电导率, 尤其是 3-SWCNT/PEI 薄膜的电导率可以达到 1866 S/cm . 对于电磁屏蔽效能, 复合薄膜中单壁碳纳米管和聚醚酰亚胺纤维形成大量界面, 致使复合薄膜的电磁屏蔽效能在一定范围内得到显著提高. 在相同单壁碳纳米管面密度下, 3-SWCNT/PEI 复合薄膜具有较高的 SE_A 和 SE_T , 优于 3-SWCNT 薄膜.

参考文献

- [1] Qi Q, Ma L, Zhao B, Wang S, Liu X B, Lei Y, Park C B 2020 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12** 36568
- [2] Promlok D, Wichaita W, Phongtamrug S, Kaewsaneha C, Sreearunothai P, Suteewong T, Tangboriboonrat P 2024 *Prog. Org. Coat.* **186** 108002

- [3] Kulkarni G, Kandesar P, Velhal N, Phadtare V, Jatratar A, Shinde S K, Kim D-Y, Puri V 2019 *Chem. Eng. J.* **355** 196
- [4] Qiao Y S, Shen L Z, Guo Y, Liu J H, Meng S M 2014 *Mater. Techn.* **30** 182
- [5] Lai H R, Li W Y, Xu L, Wang X M, Jiao H, Fan Z Y, Lei Z L, Yuan Y 2020 *Chem. Eng. J.* **400** 125322
- [6] Ma M, Shao W Q, Chu Q D, Tao W T, Chen S, Shi Y Q, He H W, Zhu Y L, Wang X 2024 *J. Mater. Chem. A* **12** 1617
- [7] Ren W, Zhu H X, Yang Y Q, Chen Y H, Duan H J, Zhao G Z, Liu Y Q 2020 *Compos. Part B: Eng.* **184** 107745
- [8] Yang G, Zhou L C, Wang M J, Xiang T T, Pan D, Zhu J Z, Su F M, Ji Y X, Liu C T, Shen C Y 2023 *Nano Res.* **16** 11411
- [9] Wei L F, Ma J Z, Ma L, Zhao C X, Xu M L, Qi Q, Zhang W B, Zhang L, He X, Park C B 2022 *Small Methods* **6** 2101510
- [10] Wang T, Kong W W, Yu W C, Gao J F, Dai K, Yan D X, Li Z M 2021 *Nanomicro Lett.* **13** 162
- [11] Li M M, Xu Q Y, Jiang W, Farooq A, Qi Y R, Liu L F 2023 *Fiber. Polym.* **24** 771
- [12] Si Y F, Jin H H, Zhang Q, Xu D W, Xu R X, Ding A X, Liu D 2022 *Ceram. Int.* **48** 24898
- [13] Anand S, Pauline S 2021 *Nanotechnology* **32** 475707
- [14] Wang B B, Zhang W Y, Sun J M, Lai C H, Ge S B, Guo H W, Liu Y, Zhang D H 2023 *J. Mater. Chem. A* **11** 8656
- [15] Wang C B, Guo Y B, Chen J W, Zhu Y T 2023 *Compos. Commun.* **37** 101444
- [16] Yang S, Yan D X, Li Y, Lei J, Li Z M 2021 *Ind. Eng. Chem. Res.* **60** 9824
- [17] Jia F F, Lu Z Q, Liu Y Q, Li J Y, Xie F, Dong J Y 2022 *ACS Appl. Polym. Mater.* **4** 6342
- [18] Song J W, Xu K J, He J, Ye H J, Xu L X 2023 *Polym. Compos.* **44** 2836
- [19] Hu P Y, Lyu J, Fu C, Gong W B, Liao J H, Lu W B, Chen Y P, Zhang X T 2020 *ACS Nano* **14** 688
- [20] Cao W T, Ma C, Tan S, Ma M G, Wan P B, Chen F 2019 *Nanomicro Lett.* **11** 72
- [21] Mani D, Vu M C, Lim C S, Kim J B, Jeong T H, Kim H J, Islam M A, Lim J H, Kim K M, Kim S R 2023 *Carbon* **201** 568
- [22] Lee E S, Lim Y K, Chun Y S, Wang B Y, Lim D S 2017 *Carbon* **118** 650
- [23] Khodadadi Yazdi M, Noorbakhsh B, Nazari B, Ranjbar Z 2020 *Prog. Org. Coat.* **145** 105674
- [24] An P, Guo H, Chen M, Zhao M M, Yang J T, Liu J, Xue C Y, Tang J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 237306 (in Chinese) [安萍, 郭浩, 陈萌, 赵苗苗, 杨江涛, 刘俊, 薛晨阳, 唐军 2014 物理学报 **63** 237306]
- [25] Zheng X H, Hu Q L, Wang Z Q, Nie W Q, Wang P, Li C L 2021 *J. Colloid. Interface Sci.* **602** 680
- [26] Chauhan S, Nikhil Mohan P, Raju K C J, Ghotia S, Dwivedi N, Dhand C, Singh S, Kumar P 2023 *Colloid. Surfaces A* **673** 131811
- [27] Wang M M, Tian L, Zhang Q Q, You X, Yang J S, Dong S M 2023 *Carbon* **202** 414

Preparation and properties of single-walled carbon nanotube/polyetherimide electromagnetic shielding film^{*}

Wang Tian-Ci¹⁾ Xia Qian-Shan^{1)†} Huang Xin-Zuo^{2)‡} Wang Yong-Zheng¹⁾
Liu Bin¹⁾ Zhang Jin-Tong¹⁾ Li Tao¹⁾

¹⁾ (Key Laboratory of Engineering Dielectric and Applications (Ministry of Education), School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

²⁾ (AVIC Research Institute for Special Structures of Aeronautical Composites, Ji'nan 250023, China)

(Received 11 June 2024; revised manuscript received 22 July 2024)

Abstract

In practical applications, flexibility, lightweight, and high performance are the characteristics that polymer-based electromagnetic shielding materials should have. At present, it is still a great challenge to prepare polymer-based electromagnetic shielding materials with excellent conductivity, electromagnetic shielding properties, and mechanical properties. Therefore, in this work, single-walled carbon nanotubes/polyetherimide composite films are prepared by electrostatic spinning and vacuum-assisted filtration through using single-walled carbon nanotubes and polyetherimide as raw materials. By regulating the surface density of single-walled carbon nanotubes, the conductivity of the composite film can be enhanced to 1866 S/cm. For the electromagnetic shielding performance, the total electromagnetic shielding effectiveness of single-walled carbon nanotubes/polyetherimide composite film in Ku band (12–18 GHz) is in a range of 75.78–81.83 dB, which is higher than that of pure single-walled carbon nanotube film (65.19–69.81 dB). This is attributed to the formation of interfaces between the polyetherimide fibers and the single-walled carbon nanotubes, with more interfaces consuming more electromagnetic wave energy for a given range of single-walled carbon nanotube surface densities. For the mechanical properties, the maximum tensile strength and elongation at the break of the single-walled carbon nanotube/polyetherimide film are 1.13 and 1.5 times higher than those of the single-walled carbon nanotube film, with the values of 28.52 MPa and 7.91%, respectively. As the surface density of single-walled carbon nanotubes increases, the interaction between single-walled carbon nanotubes as well as the interaction between polyetherimide fibers and single-walled carbon nanotubes at the interface plays a role in enhancing the mechanical properties of the composite films. The single-walled carbon nanotube/polyetherimide composite films, as an excellent polymer-based electromagnetic shielding composite material, can be used in fields such as the protection of precision electronic instruments and wearable electronic devices.

Keywords: single-walled carbon nanotube, polyetherimide, electrostatic spinning, electromagnetic shielding

PACS: 81.05.Lg, 81.05.Qk, 81.07.De, 81.15.-z

DOI: 10.7498/aps.73.20240822

^{*} Project supported by the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2021M701019), the Heilongjiang Postdoctoral Financial Assistance, China (Grant No. LBH-Z20069), and the Fundamental Research Foundation for Universities of Heilongjiang Province, China (Grant No. 2022-KYYWF-0152).

[†] Corresponding author. E-mail: xiaqianshan@sina.com

[‡] Corresponding author. E-mail: xz150638@163.com

单壁碳纳米管/聚醚酰亚胺电磁屏蔽薄膜的制备与性能

王天赐 夏乾善 黄信佐 王永正 刘斌 张晋通 黎涛

Preparation and properties of single-walled carbon nanotube/polyetherimide electromagnetic shielding film

Wang Tian-Ci Xia Qian-Shan Huang Xin-Zuo Wang Yong-Zheng Liu Bin Zhang Jin-Tong Li Tao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 178101 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240822

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240822>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

扭转单壁碳纳米管的第一性原理研究

First-principles study of torsional single-walled carbon nanotubes

物理学报. 2023, 72(19): 197302 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230566>

单壁碳纳米管受限空间内水的分布

Water distribution in confined space of single-wall carbon nanotube

物理学报. 2021, 70(6): 060201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201523>

单壁碳纳米管太赫兹超表面窄带吸收及其传感特性

Narrow band absorption and sensing properties of the THz metasurface based on single-walled carbon nanotubes

物理学报. 2024, 73(2): 026102 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231357>

透明可开关的超宽带频率选择表面电磁屏蔽研究

Switchable and optically transparent ultrawide stopband frequency selective surface for electromagnetic shielding

物理学报. 2024, 73(12): 124201 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240339>

超临界氮气在单壁碳纳米管内吸附行为的GCMC模拟研究

GCMC simulation of supercritical N₂ adsorption in single-walled carbon nanotubes

物理学报. 2022, 71(22): 220201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220765>

溶胶-喷雾法制备多壁碳纳米管增强氧化铝基复合材料及性能研究

Preparation and properties of multi-walled carbon nanotube reinforced alumina composites by sol-spray method

物理学报. 2022, 71(1): 018801 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211043>