

http://pmse.scu.edu.cn

具有频率选择性的TPU/FeCo@CNT/MXene复合泡沫材料的制备与电磁屏蔽性能

宋朋威, 王晓涵, 廖霞

(四川大学高分子科学与工程学院 高分子材料工程国家重点实验室(四川大学), 四川 成都 610065)

摘要: 鉴于目前电磁辐射日益严重, 电磁屏蔽材料的研究与开发得到高度重视。文中通过填料铁钴合金改性碳纳米管(FeCo@CNT)和MXene联用, 以热塑性聚氨酯(TPU)为基体材料, 利用二氧化碳(CO₂)间歇发泡法成功制备了TPU/FeCo@CNT/MXene三明治复合泡沫材料。通过矢量网络仪分析其电磁屏蔽性能, 结果表明, 三明治复合泡沫材料展现出频率选择性电磁屏蔽, 且屏蔽峰频率随发泡条件的变化, 从9.2 GHz提高至13.0 GHz。同时, 实现了电磁屏蔽材料的轻量化, 在密度为0.76 g/cm³时, 平均电磁屏蔽性能可达53.7 dB。

关键词: 电磁屏蔽; 频率选择性; 三明治结构; 热塑性聚氨酯

中图分类号: **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7555(2022)09-000

随着信息技术的发展, 电子设备给人们生活、工作带来便利的同时, 也带来了严重的电磁污染。电磁波辐射不仅会影响电子设备的正常运行, 还会影响人体健康, 因此, 电磁屏蔽材料的研究引起了高度重视^[1-3]。与易腐蚀、加工成型困难的金属基电磁屏蔽材料相比, 聚合物基电磁屏蔽材料具有质轻、易成型加工、耐腐蚀、结构可控、性能可调等优点^[4-6], 因此, 聚合物基电磁屏蔽材料在近年来受到了广泛关注。聚合物本身不具备导电和电磁屏蔽能力, 需加入填料才能赋予其电磁屏蔽性能。填料可分为导电材料和磁性填料, 分别增加材料对电磁波的介电损耗和磁损耗, 对填料进行改性也是提高电磁屏蔽性能的有效方式^[7,8]。例如, Rohini等^[9]制得了聚苯乙烯(PS)/聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)/碳纳米管(CNT)复合材料, 其中, 对CNT进行氨基化改性, 改性后的CNT质量分数仅为1%时, 电磁屏蔽性能即可达到25 dB。

除了对填料进行改性外, 合理的结构设计也能起到优化材料电磁屏蔽性能的作用。基于电磁波的传播理论, 多层结构的设计可以增加电磁波的反射界面, 是提高材料吸波性能的有效手段。此外, 泡孔结构的引入不仅可以降低材料的密度, 泡孔壁

还可以作为电磁波的反射屏障^[10], 提高材料对电磁波的吸收性能。二氧化碳发泡技术^[11-13]与传统发泡方式相比具有环境友好、在聚合物中无残留、无毒、不可燃等优势。Yang等^[14]利用二氧化碳发泡技术制备了密度为0.48 g/cm³的硅橡胶/Fe₃O₄@MWCNTs层状泡沫材料, 其在X波段内的屏蔽效能可达27.5 dB, 在低密度情况下实现了有效的电磁屏蔽性能。

根据不同应用环境的需求, 人们对电磁屏蔽材料的应用范围逐渐细化, 而通过灵活的结构设计可以使电磁屏蔽材料满足不同应用场景的需求^[15,16]。研究表明三明治结构具有电磁屏蔽性能的频率选择性, 由于Fabry-Pérot谐振腔的形成, 在一定频率范围内, 材料对电磁波的吸收性能明显提高。本文以TPU为基体, 通过加入铁钴合金改性碳纳米管(FeCo@CNT)和MXene, 以及其一维填料和二维填料的协同作用来提高搭接效率, 实现了高效的电磁屏蔽性能。铁钴改性能增加材料的磁损耗, 提高了电磁波吸收能力。结合二氧化碳发泡技术制备了三三明治结构的TPU/FeCo@CNT/MXene复合泡沫, 探究了样品厚度对电磁屏蔽性能的影响规律, 并对电磁波在三三明治结构中的屏蔽机理进行了探讨。该设计对低密度、高吸波性能、电磁屏蔽性能可调的

doi:10.16865/j.cnki.1000-7555.2022.0196

收稿日期: 2022-04-19

基金项目: 四川省科技厅重点研发项目(2020YFG0098)

通讯联系人: 廖霞, 主要从事聚合物在超临界流体中的形态、结构及性能演变与控制研究, E-mail: xiao@scu.edu.cn

电磁屏蔽复合泡沫材料的研究和开发具有参考价值。

1 实验部分

1.1 原料和试剂

热塑性聚氨酯: 实验用到 2 种聚氨酯, 分别为 Elastollan1185A 颗粒和 1185A 粉末 (密度 1.12 g/cm^3 、邵氏硬度为 85 A), 均由德国 BASF 公司提供; 碳纳米管: 牌号 NC7000 (长度 $1.5 \mu\text{m}$ 、直径 9.5 nm), 购买自比利时 Nanocyl 公司; Ti_3AlC_2 : 规格 400 mesh, 密度 4.37 g/cm^3 , 购于宁波博华斯纳米科技有限公司; 十六烷基溴化铵 (CTAB)、正丁醇、正己烷等试剂: 均为分析纯, 购自成都科龙试剂有限公司。

1.2 试样的制备

1.2.1 MXene 的制备: 首先将 $2 \text{ g Ti}_3\text{AlC}_2$ 粉末浸入 20 mL 、40% 浓度的 HF 溶液中, 在 $35 \text{ }^\circ\text{C}$ 搅拌 48 h, 所得混合物用去离子水 (DI) 洗涤, 然后进行离心收集, 直到 pH 值大于 6。最后, 所得粉末在 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 真空烘箱中干燥 24 h。

1.2.2 MWCNT@FeCo 的制备: 采用反相乳液方法制备 FeCo/MWCNT。首先, 将适量的 CTAB (8 g) 完全溶解在含有正丁醇 (6 mL)、正己烷 (20 mL) 和去离子水 (1 mL) 的混合液中。其次, 将碳纳米管加入 60 mL 的 H_2SO_4 和 HNO_3 混合液 (3:1) 中于 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 回流 3 h 进行酸化处理, 收集备用。将酸化碳纳米管超声处理 30 min, 形成浑浊分散液。将包含 $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 的水溶液 (2 mL) 和含氢氧化钠 (2 g) 和纯 $\text{N}_2\text{H}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (10 mL) 溶液 (12 mL) 依次加入到上述浑浊液中, 再将得到的溶液放入预热的油浴中, 保持温和搅拌反应, 收集析出的黑色沉淀物并用蒸馏水和乙醇洗至中性, 然后在 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 真空烘箱中干燥 8 h, 得到最终产品。

1.2.3 TPU/FeCo@CNT/MXene 三明治复合泡沫的制备: 首先将 TPU 颗粒溶解在 DMAc 溶剂中, 然后将体积分数 4.1% 的 FeCo@CNT 粉末和体积分数 3.7% 的 MXene 粉末加入 TPU/DMAc 溶液中进行超声分散处理。将 TPU/FeCo@CNT/MXene/DMAc 分散体注入去离子水中得到 TPU/FeCo@CNT/MXene 沉淀, 干燥后热压成片, 作为夹层结构复合材料的表层, 厚度为 0.35 mm ; 中间层由纯 TPU 粉末直接热压得到, 厚度为 0.7 mm 。最后, 采用分层压制成型的方法制备三明治结构的 TPU/FeCo@CNT/MXene 复合材料, 再采用 scCO_2 发泡法制备夹层结构的 TPU/FeCo@CNT/MXene 复合泡沫材料。首先, 将上述制备的固体三明治结构片材放入发泡釜中, 充入 4 MPa 的 CO_2 气体, $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 饱和 12 h, 然后将饱和完全的样品放入 $40 \text{ }^\circ\text{C}$ 的热水中进行发泡, 由于表层和中间层 TPU 基体发泡窗口的差异性, 得到中间层选择性发泡的三明治结构泡沫材料。根据发泡时间不同, 得到的发泡样品厚度也不同。为方便起见, 将样品命名为 T_x , x 为整体厚度, 样品原始厚度为 1.4 mm , 发泡后样品的厚度为 $1.6\sim 2.2 \text{ mm}$ 。例如, $\text{T}_{1.4}$ 指的是厚度为 1.4 mm 的 TPU/FeCo@CNT/MXene 复合材料, $\text{T}_{2.2}$ 指的是厚度为 2.2 mm 的 TPU/FeCo@CNT/MXene 复合泡沫。所有泡沫在室温放置至少 7 d, 以稳定泡沫结构。具体制备过程如图 1 所示。

1.3 测试与表征

1.3.1 扫描电子显微镜表征: 将不同发泡倍率的样品在液氮中脆断, 放在样品台上, 然后进行喷金处理, 喷金后的样品通过 Quanta 250 型扫描电子显微镜 (美国 FEI 公司) 在加速电压为 15 kV 时对泡沫样品的断面形貌及填料粒子的分散情况进行观察。

1.3.2 密度和孔隙率测试: 将发泡前后的样品用密

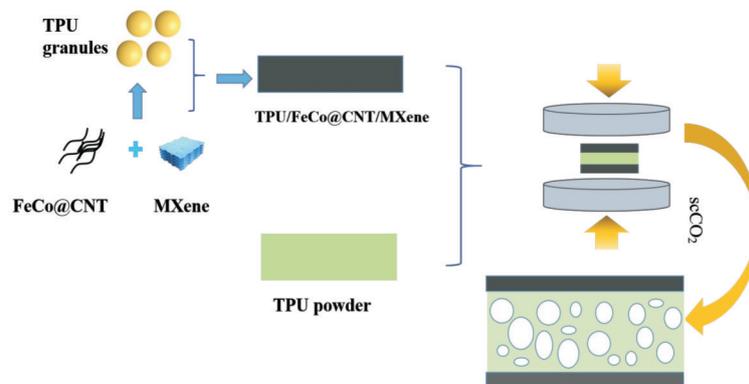


Fig.1 Schematic of the preparation of sandwich-structured TPU/FeCo@CNT/MXene composite foams

度测试仪(AUY120,日本岛津)进行密度测试。每个样品测3次取平均值,即为样品的密度。样品的孔隙率(P)的计算公式为 $P=1-\rho_s/\rho_f$,式中: ρ_s 为发泡前样品的密度; ρ_f 为发泡后样品的密度。

1.3.3 电导率测试:由于所制备的复合材料为非均质结构,其平面和面内的电性能差异较大,因此采用双电测四点探头装置(RTS-9,广州四探针科技有限公司)和高阻计(ZC-90F,上海太欧电子有限公司)分别测试样品的面内方向和平面方向的电导率。

1.3.4 电磁屏蔽测试:将样品制成直径为1.2 cm的圆形片材,通过Agilent N5247 矢量网络分析仪(安捷伦科技有限公司)得到样品发泡前后的参数 S_{11} 和 S_{21} ,计算反射效能(SE_R)、吸收效能(SE_A)和总屏蔽效能(SE_T)及反射系数(R)、透射系数(T)和吸收系数(A)。

2 结果与讨论

2.1 复合泡沫的断面形貌

为观察填料在样品内的分散情况和泡孔的微观形貌,采用扫描电子显微镜对发泡前后的样品进行观察。填料分散情况结果如图2所示。由图2可知,分散在材料表层的MXene呈片状结构。图3为不同发泡条件下的泡孔形态,由图3(a₁~d₁)所示,样品中间层发泡、上下层不发泡,密度的降低是由

于中间层的泡孔引入。发泡后的样品层间结合紧密,无分层现象。表明三明治结构在发泡后依然存在。由图3(a₂~d₂)所示,根据发泡厚度的增大,泡孔的形态变化不大,但材料的孔隙率发生了变化,呈现增大的趋势。

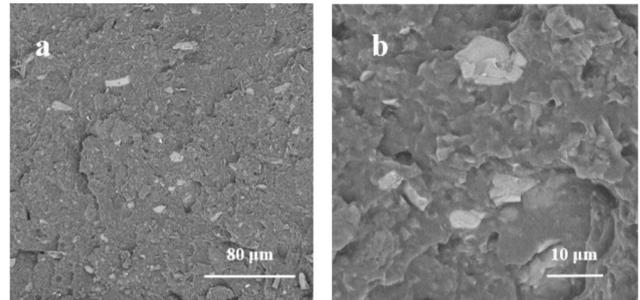


Fig.2 SEM images of surface layers in TPU/FeCo@CNT/MXene composites

2.2 复合泡沫的密度和孔隙率

Tab.1 为不同厚度的TPU/FeCo@CNT/MXene泡沫材料的密度、孔隙率和填料占比,根据发泡后样品厚度不同,样品密度和孔隙率也随之发生变化。随着厚度增加,泡沫材料呈现密度减小、孔隙率增大的趋势。未发泡TPU/FeCo@CNT/MXene复合材料的密度为 1.3 g/cm^3 ,发泡后,当厚度为2.2 mm时,密度可降低至 0.69 g/cm^3 ,孔隙率可达46.5%。

2.3 复合泡沫的电性能

采用加热诱导间歇发泡工艺成功制备了多层结构的TPU/FeCo@CNT/MXene泡沫材料,测得其平

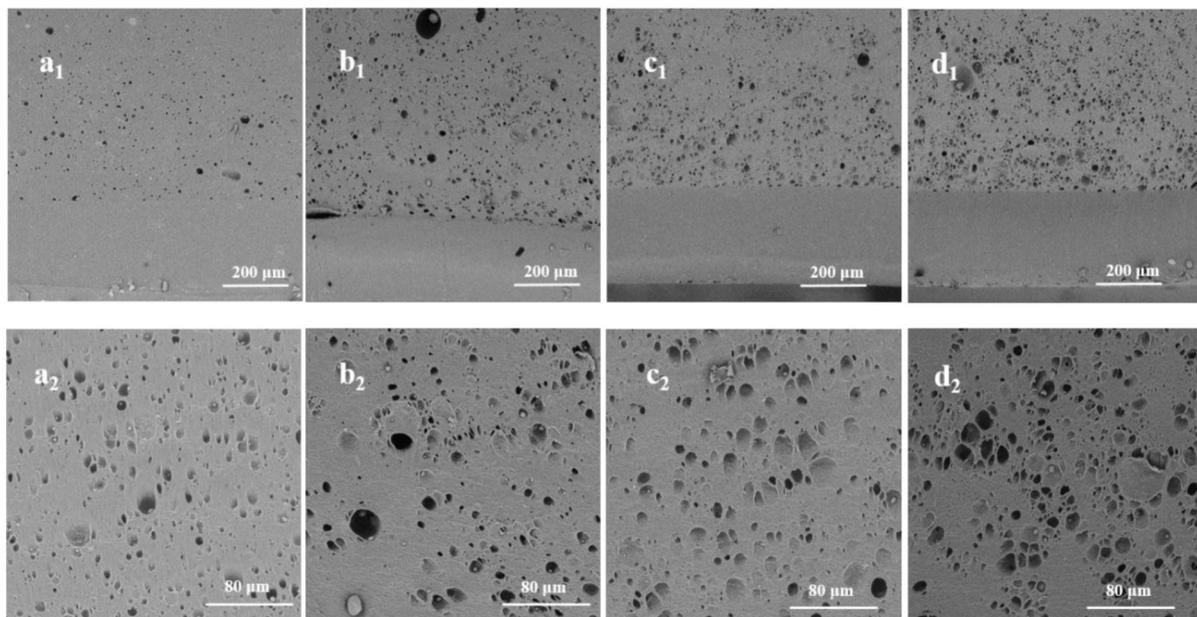


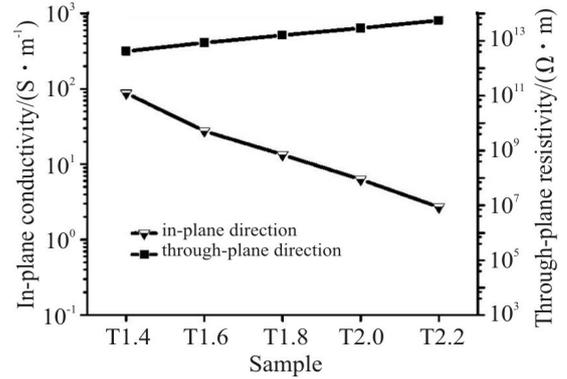
Fig.3 SEM images of TPU/FeCo@CNT/MXene composite foams with different thicknesses

(a₁,a₂):T1.6; (b₁,b₂): T1.8; (c₁,c₂): T2.0; (d₁,d₂): T2.2

Tab. 1 Sample identification of TPU/FeCo@CNT/MXene composites

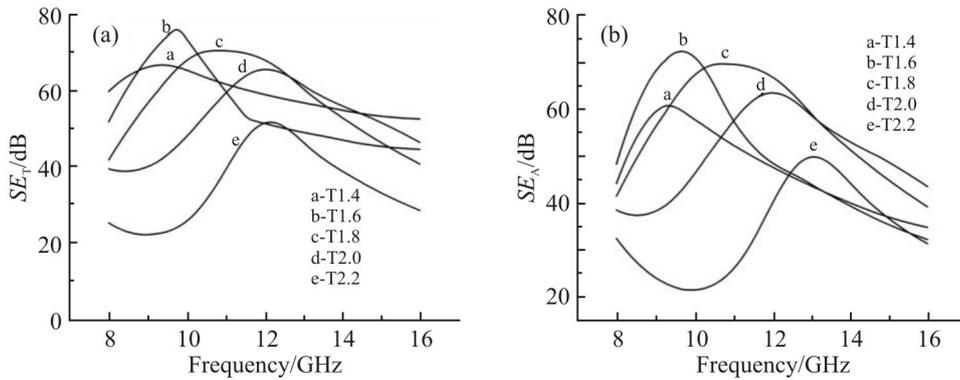
Sample code	Density of sample/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Porosity of sample/%	Volume fraction of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ /%	Volume fraction of FeCo@CNT /%
T1.4	1.30		4.1	3.7
T1.6	1.07	17.7	3.3	3.0
T1.8	0.86	33.4	2.6	2.5
T2.0	0.76	41.3	2.4	2.2
T2.2	0.69	46.5	2.2	2.0

面和面内的电导率如 Fig.4 所示。结果表明,随着复合材料厚度的增加,表层电导率呈下降趋势,三明治结构泡沫厚度增加是由于中间层的发泡,除了沿垂直方向厚度增加,水平方向上也有一定膨胀。因此虽然表层并未发泡,但还是受到中间层膨胀引起的拉伸作用,在一定程度上破坏了表层的导电网络结构,导致电导率降低。厚度越大,电导率越低。与表层电导率不同的是,厚度的改变对层间电阻的影响很小,层间电阻始终介于 $10^{12} \sim 10^{14} \Omega \cdot \text{m}$ 之间,层间具有很好的绝缘性能,这是由于中间层为纯的 TPU 层,TPU 具有优异的绝缘性能。这种屏蔽方向绝缘、表面导电的三明治结构可用于特殊的应用场景,拓宽了其在导电和电磁屏蔽领域的使用范围。

**Fig.4 Electrical conductivity in-plane and the electric resistance through- plane of TPU/FeCo@CNT/MXene composite foams with different thicknesses**

2.4 复合泡沫的电磁屏蔽性能

所制备的三明治结构的 TPU/FeCo@CNT/MXene

**Fig.5 (a) SET and (b) SEA of TPU/FeCo@CNT/MXene composite materials with different thicknesses**

复合材料由于其发泡孔隙率的不同,中间层厚度也相应不同。为验证中间层厚度对材料电磁屏蔽性能的影响,本实验采用矢量网络分析仪对所制备的不同厚度的 TPU/FeCo@CNT/MXene 复合材料进行了电磁屏蔽性能的测试,结果如 Fig.5 所示。结果表明,在 8~16 GHz 的频率范围内,TPU/FeCo@CNT/MXene 复合泡沫材料在不同厚度下均出现频率选择性,且随着厚度的增大,屏蔽峰逐渐右移,最大屏

蔽峰值为 78 dB。对于具体的应用场景,可使用相应频率下电磁屏蔽性能优良的 TPU/FeCo@CNT/MXene 复合材料,其电磁屏蔽性能均远高于商业使用值(20 dB),满足了不同具体应用场景的需要。此外,电磁屏蔽值大部分均由 SE_A 提供,说明所制备的电磁屏蔽材料以吸收机制为主,该结构促进了电磁波的吸收,减小了电磁波的二次污染,为设计和制备高吸收的电磁屏蔽材料提供了思路和方法。

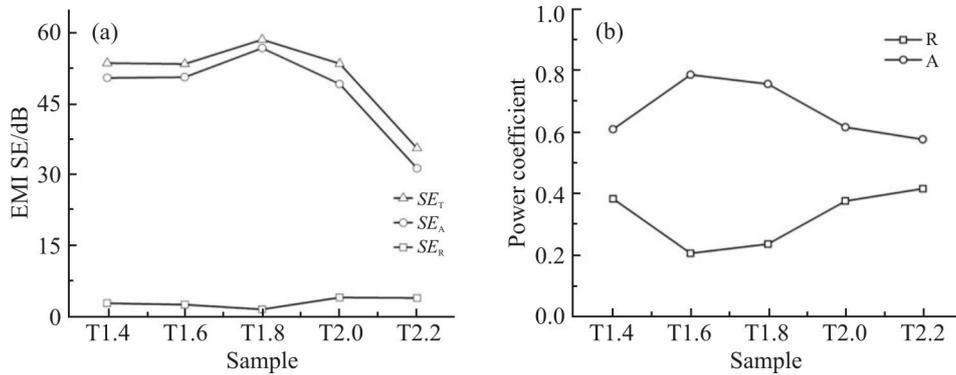


Fig.6 (a) AVE EMI SE and (b) absorptivity and reflectivity of TPU/FeCo@CNT/MXene composite materials with different thicknesses

对不同厚度的 TPU/FeCo@CNT/MXene 复合泡沫材料进行了平均 EMI SE 值、A 值和 R 值的计算, 其结果如图 6 所示。结果表明, 在密度大幅降低的同时, 复合泡沫材料的平均电磁屏蔽效能均大于商用标准, 电磁屏蔽最大值均大于 30 dB。随着样品厚度的增加, 平均 EMI SE 值先增大后减小, 范围在 30~60 dB。A 值也有相同的趋势, 随着样品厚度的增加, A 值先增大后减小, 但都大于 0.6, 说明材料是以吸收为主的屏蔽机制。这是由于三明治结构形成的 Fabry-Pérot 谐振腔, 电磁波在具有导电性能的上下层间经多次反射及吸收, 发生了多次介电损耗及磁损耗, 大部分电磁波被材料内部被吸收, 少部分反射出去, 因此材料的屏蔽机制以吸收为主^[17]。由 Fig.6 可知, 根据发泡条件的不同, TPU/FeCo@CNT/MXene 复合泡沫的电磁屏蔽性能出现差异, 但存在最优的发泡条件, 在厚度为 1.8 mm 时, 平均 EMI SE 最大; 在厚度为 1.6 mm 时, A 值最大, 接近 0.8。因此, 通过调节发泡条件可制备满足不同需求的电磁屏蔽泡沫材料, 为实现电磁屏蔽材料的屏蔽性能可控可调提供了思路。

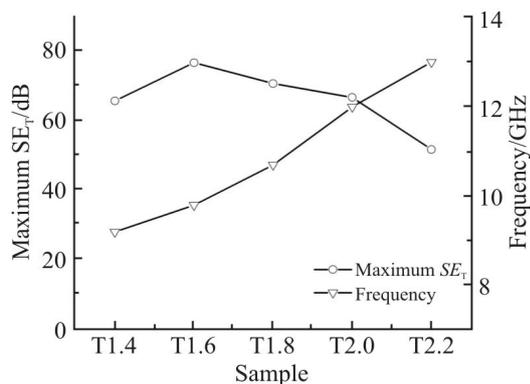


Fig.7 Maximum EMI SE and frequency with the maximum EMI SE under different thicknesses

为量化电磁屏蔽峰位置的变化, Fig.7 中统计了

电磁屏蔽最大值和电磁屏蔽最大值对应频率。由图可知, 随厚度的增加, 电磁屏蔽最大值对应的频率单调增加, 这主要是因为发泡使中间层厚度增加, 使表层电导率降低。电磁屏蔽最大值呈现先增大后减小的趋势, 说明可通过发泡条件的调控, 在改变密度的同时改变电磁屏蔽效能值与电磁屏蔽峰的位置。

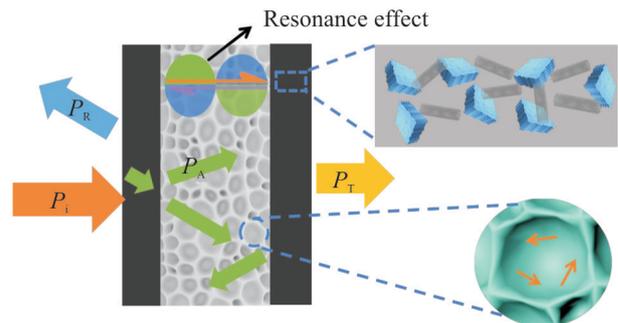


Fig.8 Schematic diagram of the electromagnetic shielding mechanism of TPU/FeCo@CNT/MXene composites with sandwich structure after foaming

2.5 电磁屏蔽机理

为更清楚地解释发泡对电磁屏蔽性能的影响机理, 本文所制备的三明治结构的 TPU/FeCo@CNT/MXene 复合泡沫材料的屏蔽机理如图 8 所示。三明治结构表层具有磁性粒子和导电粒子, 入射进来的电磁波在上下两层之间, 经过多次反射共振产生电磁屏蔽峰。由于电磁波不断地经过上下层的磁损耗和介电损耗, 大部分电磁波被材料吸收, 所以材料是以吸收为主的屏蔽机制^[18]。当样品发泡后厚度改变时, 材料的中间层具有不同的孔隙率, 而随着孔隙率的增大, 致使发生共振的电磁波的频率向高频移动。

3 结论

本文提出了一种夹层结构的 TPU/FeCo@CNT/

MXene 泡沫材料。用 FeCo 修饰 MWCNT, 外加二维片状 MXene 集中分布在上下表层, 中间层采用容易发泡的 TPU, 制备出中间层发泡, 上下层不发泡的三明治结构。通过改变中间层的发泡倍率, 可以获得具有不同孔隙率的 TPU/FeCo@CNT/MXene 泡沫材料。结果表明, 小膨胀倍率下的夹层结构泡沫具有更高的电磁屏蔽能力, 同时也具有更高的吸收系数。由于 Fabry-Pérot 共振效应, 一定的中间层厚度有利于特定波长的电磁波的衰减, 使其具有电磁干扰选频屏蔽特性。随着中间层厚度变厚, 谐振波的频率发生变化, 致使 EMI SE 的峰值向更高的频率偏移。综上所述, 本文成功制备了具有可调屏蔽峰和有效电磁衰减能力的频率选择性 TPU 基导电泡沫材料, 为制备轻质、可调的电磁屏蔽材料提供了思路。

参考文献:

- [1] Wang G, Zhao J, Ge C, *et al.* Nanocellular poly(ether-block-amide)/MWCNT nanocomposite films fabricated by stretching-assisted microcellular foaming for high-performance EMI shielding applications[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2021, 9: 1245-1258.
- [2] Cheng Y, Zhu W, Lu X, *et al.* Recent progress of electrospun nanofibrous materials for electromagnetic interference shielding [J]. *Composites Communications*, 2021, 27: 100823.
- [3] Ma L, Hamidinejad M, Liang C, *et al.* Enhanced electromagnetic wave absorption performance of polymer/SiC-nanowire/MXene (Ti₃C₂T_x) composites[J]. *Carbon*, 2021, 179: 408-416.
- [4] Abbasi H, Antunes M, Velasco J, *et al.* Recent advances in carbon-based polymer nanocomposites for electromagnetic interference shielding[J]. *Progress in Materials Science*, 2019, 103: 319-373.
- [5] Jiang D, Murugadoss V, Wang Y, *et al.* Electromagnetic interference shielding polymers and nanocomposites- a review[J]. *Polymer Reviews*, 2019, 59: 280-337.
- [6] Wang C, Murugadoss V, Kong J, *et al.* Overview of carbon nanostructures and nanocomposites for electromagnetic wave shielding[J]. *Carbon*, 2018, 140: 696-733.
- [7] Xu X, Li Z, Shi L, *et al.* Ultralight conductive carbon nanotube polymer composite[J]. *Small* 2007, 3: 408-411.
- [8] Zeng Z, Wang C, Siqueira G, *et al.* Nanocellulose - MXene biomimetic aerogels with orientation - tunable electromagnetic interference shielding performance[J]. *Advanced Science*, 2020, 7: 2000979.
- [9] Rohini R, Bose S. Electromagnetic interference shielding materials derived from gelation of multiwall carbon nanotubes in polystyrene/poly (methyl methacrylate) blends [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2014, 6: 11302-11310.
- [10] Han N, Wang Z, Shen X, *et al.* Graphene size-dependent multifunctional properties of unidirectional graphene aerogel/epoxy nanocomposites[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10: 6580-6592.
- [11] Ameli A, Nofar M, Wang S, *et al.* Lightweight polypropylene/stainless-steel fiber composite foams with low percolation for efficient electromagnetic interference shielding[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6: 11091-11100.
- [12] Jiang Q, Liao X, Yang J, *et al.* A two-step process for the preparation of thermoplastic polyurethane/graphene aerogel composite foams with multi-stage networks for electromagnetic shielding[J]. *Composites Communications*, 2020, 21: 100416.
- [13] Yang J, Liao X, Wang G, *et al.* Fabrication of lightweight and flexible silicon rubber foams with ultra-efficient electromagnetic interference shielding and adjustable low reflectivity[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8: 147-157.
- [14] Yang J, Liao X, Li J, *et al.* Light-weight and flexible silicone rubber/MWCNTs/Fe₃O₄ nanocomposite foams for efficient electromagnetic interference shielding and microwave absorption[J]. *Composites Science and Technology*, 2019, 181: 107670.
- [15] Ling J, Zhai W, Feng W, *et al.* Facile preparation of lightweight microcellular polyetherimide/graphene composite foams for electromagnetic interference shielding[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5: 2677-2684.
- [16] Yan D, Ren P, Pang H, *et al.* Efficient electromagnetic interference shielding of lightweight graphene/polystyrene composite [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2012, 22: 18772-18774.
- [17] Wang Z, Wei R, Liu X. Fluffy and ordered graphene multilayer films with improved electromagnetic interference shielding over X-Band[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9: 22408-22419.
- [18] Tang X, Li J, Wang Y, *et al.* Controlling distribution of multi-walled carbon nanotube on surface area of poly(ϵ -caprolactone) to form sandwiched structure for high-efficiency electromagnetic interference shielding[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 196: 108121.

Preparation and Electromagnetic Interference Shielding Properties of Frequency-Selective TPU/FeCo@CNT/MXene Composite Foam

Pengwei Song, Xiaohan Wang, Xia Liao

(College of Polymer Science and Engineering, State Key Laboratory of Polymer Materials Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

ABSTRACT: The research and development of electromagnetic shielding materials have been attached great importance because of the serious electromagnetic radiation environments. The preparation of electromagnetic shielding materials with low density and high absorbing performance has become a hot topic in current research. In this paper, TPU/FeCo@CNT/MXene sandwich composite foams were successfully prepared by carbon dioxide (CO₂) foaming method using thermoplastic polyurethane (TPU) as matrix material by the combination of FeCo-alloy-modified carbon nanotube (FeCo@CNT) and MXene fillers. The electromagnetic shielding performance was analyzed by vector network analyzer. Results show that sandwich composite foams possess frequency selective electromagnetic shielding feature, and the frequency at shielding peak moves from 9.2 GHz to 13.0 GHz as the foaming conditions vary. The efficient angel lightweight electromagnetic interference shielding material was realized in foam with a density of 0.76 g/cm³ and an average electromagnetic interference shielding effectiveness of 53.7 dB.

Keywords: electromagnetic interference shielding; frequency selectivity; sandwich structure; thermoplastic polyurethane