

文章编号 1672-6634(2023)03-0042-08

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2022120011

外界刺激响应型电磁干扰屏蔽材料的研究进展

唐婧缘,陈 耀,刘 倩,张润华,孟凡彬

(西南交通大学 材料科学与工程学院、材料先进技术教育部重点实验室,四川 成都 610000)

摘 要 在现代高精尖技术突飞猛进的背景下,如何抑制电磁干扰成为目前材料领域广为研究的重要课题。电磁干扰屏蔽材料有助于吸收或反射电磁辐射,从而作为一种屏障以阻挡电磁辐射。然而,随着科技的发展,传统的电磁干扰屏蔽材料已无法满足日益复杂的应用场景的需要,不能实现易于调谐且响应灵敏的屏蔽效能、吸收损耗、反射损耗。外界刺激响应型电磁干扰屏蔽材料则有望解决这一问题,这类材料的特点是:电磁响应性能可以根据特定的应用要求或实时的环境变化自行调整。综述了应变响应型、温度响应型、湿度响应型三种外界刺激响应型电磁干扰屏蔽材料的最新研究进展,包括材料的结构特点、主要成分、制备方法和响应机制,对未来发展和研究方向进行了展望。

关键词 电磁干扰屏蔽;智能;刺激响应;电磁屏蔽性能

中图分类号 TB34

文献标识码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Recent Advance of the Electromagnetic Interference Shielding Materials with External Stimulus-Responsive

TANG Jingyuan, CHEN Yao, LIU qian, ZHANG Runhua, MENG Fanbin

(Key Laboratory of Advanced Technologies of Materials(Ministry of Education), School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610000, China)

Abstract In the context of the rapid advancement of modern high-tech, how to suppress electromagnetic interference has become an important topic in the field of materials. The electromagnetic interference (EMI) shielding materials help absorb or reflect electromagnetic radiation, which acting as a barrier to block electromagnetic radiation. However, with the development of science and technology, traditional EMI shielding materials can no longer meet the increasingly complex application scenarios. They can't realize smart tunable shielding efficiency, absorption dissipation, reflection factors or high sensitivity to external stimuli either. The above questions are expected to be solved by external stimuli-responsive EMI materials, which are characterized by electromagnetic response that

收稿日期:2022-12-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51903213,52173265);四川省科技计划项目(2020YFH0053);中央引导地方科技发展资金——深圳虚拟大学园自由探索类基础研究项目(2021Szvup124);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2682021GF004)资助

通讯作者:孟凡彬,男,汉,博士,研究员,博士生导师,四川省杰出青年基金获得者,研究方向:先进电磁功能材料及智能防腐材料的制备与应用研究,E-mail:mengfanbin_wing@126.com。

can be tuned according to specific application requirements or real-time environmental changes. This work mainly reviewed the latest research progress of three external stimulus-responsive EMI shielding materials (including strain-responsive, temperature-responsive, hydro-responsive materials), including the structural characteristics, main components, preparation methods and response mechanisms of them. Finally, the prospects were put forward for the future development and research directions.

Key words electromagnetic interference shielding; smart; stimulus-responsive; electromagnetic shielding properties

1 引言

随着信息技术的迅猛发展,高功率电子设备包括卫星通信、宽带雷达、无线网络和便携式数字硬件等,在医疗卫生、电子安全和国防安全等领域的应用越来越广泛^[1-3]。然而,电磁干扰、辐射污染以及信息泄露等问题则随之产生^[4-6]。因此,开发能够防止电磁辐射的电磁功能材料已成为材料领域的热点^[7-10]。

电磁干扰(EMI)屏蔽材料是指能实现对电磁波屏蔽的功能性材料,其作用原理是通过电磁波的反射和吸收来达到对电磁波的阻隔或衰减的目的^[11]。为了减少电磁干扰,金属^[12, 13]、陶瓷^[14, 15]、高导电碳材料^[5, 16, 17]、二维过渡金属碳化物、氮化物或碳氮化物(即 MXene)^[18, 19]、导电高分子等材料被广泛研究。传统的屏蔽材料可以实现优异的导电性、轻质、柔性或高屏蔽效能^[20-23]。传统的 EMI 屏蔽材料,大多存在被动隐身和性能不佳的问题,而目前大多数研究仍集中在提高电磁波波段的屏蔽效率,使得 EMI 屏蔽材料难以满足当今日益复杂多变的应用场景^[24]。面向智能防电磁干扰系统、可控 EMI 屏蔽开关、智能可穿戴设备等领域的需求,开发可根据特定应用要求或实时环境变化而调节性能的外界刺激响应型 EMI 材料意义重大。与具有固定屏蔽性能的传统屏蔽材料不同,外界刺激响应型 EMI 材料的电磁波响应性能可以在电压、热、光等外界刺激下发生本质改变,从而产生实时可变的屏蔽性能^[25-27]。

本文对已有的外界刺激响应型 EMI 材料进行了分类,归纳了主要成分、结构特点和刺激响应机制,提出了外界刺激响应型 EMI 屏蔽材料面临的困难和挑战,对研究方向进行了展望。

2 外界刺激响应型电磁干扰屏蔽材料分类及机理

2.1 应变响应型

对于应变响应型电磁干扰屏蔽材料,应变响应的关键是完整导电路径的建立与破坏、微观结构中界面数量的增多与减少。以压缩情况下的电磁屏蔽材料为例,导电路径增加可以提升材料电导率从而增加反射损耗,但压缩还会引起孔隙率减少从而导致吸收损耗减少,由此可见,应变响应型电磁干扰屏蔽材料的屏蔽效能是电磁波反射增加和吸收减少的总体表现。根据材料所受外力的加载方式,应变响应的刺激条件包括机械压缩和减压、拉伸和释放。

Liu 等人^[28]利用薄膜的应变敏感性,设计了两种柔性电磁功能材料。这类各向异性的磁液态金属薄膜(AMLM),具备拉伸增强的电磁干扰屏蔽性能,通过反复拉伸和释放薄膜,能明显改变 AMLM 的电导率,进而增加反射损耗,实现对电磁波屏蔽和透射模式的快速且可逆的切换。未拉伸的薄膜 AMLM-2.5 在 x 轴方向的总屏蔽效能(SE_{TX})和在 y 轴方向的总屏蔽效能(SE_{TY})分别低至 4.8 dB 和 1.6 dB,允许多数入射电磁波穿透薄膜,对应屏蔽功能“关闭状态”。当应变达到 400%, SE_{TX} 和 SE_{TY} 分别增至 32.2 dB 和 25.2 dB,对应屏蔽功能“开启状态”。同样是采用液态金属为主要电磁屏蔽材料,Wang 等人^[29]通过将共晶镓铟合金(EGaIn)涂覆在聚二甲基硅氧烷(PDMS)泡沫的壁面,开发了一种柔性复合材料,压缩应变能显著增加材料的 EMI 屏蔽效能(SE),当材料的压缩应变为 60%时, SE 提高了 1.8 倍。Tang 等人^[30]采用静电纺丝制备了聚氨酯(PU)纳米纤维薄膜,随后采用化学沉积将铜纳米颗粒(Cu-NPs)连续均匀地沉积在整个薄膜的每根 PU 纳米纤维上。当拉伸变形达到 50%时,薄膜由导体变为绝缘体,当去除拉伸应变时,薄膜又由绝缘体变为导体。这种变形使纳米铜颗粒在 PU 纳米纤维表面反复分离和接触,形成导体和绝缘体的可逆转变,其 EMI 屏蔽效能可在 0 ~ 52.31 dB 之间改变。

Khatua 等人^[31]制备了一种具有三维导电网络的海绵状的复合材料,该复合材料中的单壁碳纳米角

(SWCNH)和四氧化三铁(Fe_3O_4)纳米颗粒作为电磁波的吸收剂。其屏蔽性能可通过压缩和释放直接调节。压缩会使复合材料的 SE 降低,主要原因是复合材料对电磁波吸收能力的降低。Zheng 等人^[32]制备了蜂窝状大孔石墨烯复合材料,可以通过调整取向方向或压应力大小来调整 SE 。Tang 等人^[33]采用浸涂法和超声浸渍法制备了水溶性石墨烯基复合泡沫,当材料处于三向受压状态时,立体骨架向内凹陷,使泡沫在单位体积内具有更多的界面,电磁波在材料内部反射次数增多,从而提高 SE ;该材料的屏蔽性能还可以通过简单的加热处理来调节。

从应变响应型电磁干扰屏蔽材料的所受应变种类来看,主流电磁干扰屏蔽材料可分为拉伸应变响应和压缩应变响应,其中以压缩应变响应型最多,这类应变响应型 EMI 屏蔽材料的结构、主要材料类型、制备方法、电磁干扰屏蔽性能和刺激响应机理如表 1 所示。

表 1 不同结构的压缩应变响应型 EMI 屏蔽材料汇总

基体材料	复合材料	结构	制备方法	最佳厚度/ 体积大小/ 填料含量	应变程度	电磁干扰屏蔽性能(dB)	刺激响应机理	参考文献
PDMS	EGaIn	三维泡沫	模板法	10 mm	60%	$\Delta SE_R = 6.3$ $\Delta SE_A = 32.5$	压缩方向与人射波方向平行时,压缩使电导率增加,导致 SE_R 和 SE_A 增加	[29]
PDMS	Fe_3O_4 修饰的还原氧化石墨烯、SWCNH	三维海绵	模板法	2 mm	...	$\Delta SE_T = -11.51$	压缩导致 SE 降低。因压缩使内部多次反射和散射大大降低,进而削弱电磁波吸收能力	[31]
还原氧化石墨烯(RGO)	PDMS	三维蜂窝状立方体	离子扩散定向组装	10 mm	80%	57.2→34.4	压缩引起的屏蔽效能变化是由于电磁波反射增加和吸收减少的总体表现	[32]
PU	支链碳纳米管(CNTs)和反式-1,4-聚异戊二烯	三维泡沫	二次浸涂	...	50%→80%	22.2→20.0	机械变形使材料反射系数(R)减小,压缩区域和未压缩区域反射电磁波的相位差	[34]
Ti_2CT_x	...	三维气凝胶	双向冷冻铸造技术	1 mm	...	$SSE_t = 8\ 818.2$ $\text{dB} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$	压缩使完整的导电通路增多,导电性增加,进而增大反射系数 R	[35]
蜜胺泡沫(MF)	MXene、银纳米线、聚乙二醇	三维泡沫	真空浸渍法	...	50%	30.5→12.4	压缩引起完整导电通路增多,微观多次反射减少	[36]
PDMS	EGaIn	二维薄膜	机械共混 外磁场固化	...	20%	9→42	压缩时,导电路径增多,使电磁波反射增强;导电损耗和界面损耗增强,使电磁波吸收增强	[37]
碳化木材	多壁碳纳米管和氧化石墨烯(GO)	三维层状气凝胶	水热法 冷冻干燥	18×18 cm	75%	27.6	压缩使碳纳米颗粒能够在气凝胶中建立更多有效的导电路径	[26]
MF	CNTs、碳纳米纤维	三维泡沫	热解法 化学气相沉积	5 mm	12.5%→40.6%	16.4→21.6 (18 GHz)	压缩增强了材料的导电性	[38]
PU	石墨烯(GR)、聚多巴胺	三维泡沫	浸涂法 超声浸渍	$w(\text{GR}) = 36.9\%$	压缩因子为 5	59.75	压缩让材料具有凹陷结构,使界面增多,延长电磁波在材料内部的耗散路径	[33]

注: SE_R 、 SE_A 、 SE_T 、 SSE 分别表示反射产生的、吸收产生的、总的和比屏蔽效能;“→”表示屏蔽性能的数值变化趋势。

2.2 温度响应型

温度响应型电磁干扰屏蔽材料是使用温度作为外部刺激,实现 EMI 屏蔽性能的动态调整。Cao 等

人^[25]制备了一种温度响应型的含有 SiO_2 干凝胶纳米粉末的体形石墨烯基屏蔽材料。如图 1(a)所示,这种还原氧化石墨烯(r-GO)复合材料在高温下的电磁屏蔽效能主要是由于偶极极化和变化的电导率。由图 1(b)可知,在外界温度从 323 K 上升至 473 K 时,11.5 GHz 的固定频率下,其屏蔽效能从 ~ 34.5 dB 增加至 ~ 37.5 dB。这是由于当复合材料中填料质量分数较高($>8\%$),高温引起极化和电导率变化,材料的虚介电常数与温度变化呈正相关。虚介电常数是影响吸收损耗的重要参数,因此在 323~473 K 的温度范围,材料的电磁屏蔽性能呈现与虚介电常数相同的变化趋势。后来,他们^[39]又采用水热法制备了 Fe_3O_4 修饰的 r-GO 材料(FG)。与 r-GO 相比, Fe_3O_4 纳米颗粒的引入有效地调谐了电磁响应,图 1(c)展示了 FG 材料中的电磁响应机理。观察图 1(d)可知,在 323~523 K,反射损耗始终在 SE 中起主要作用。该研究为灵活地操纵电磁波响应甚至高温下的电磁波响应提供了方法,为未来的材料设计奠定了基础。

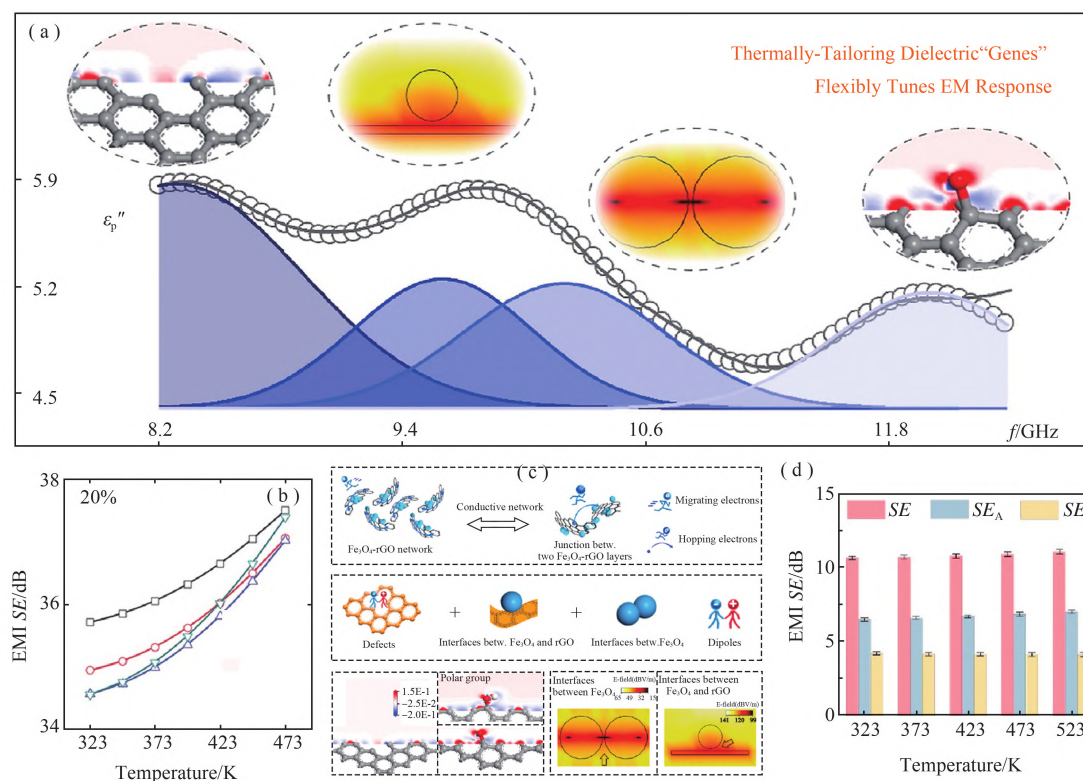


图 1 (a)r-GO 复合材料在高温下的电磁干扰屏蔽机理;(b)r-GO 复合材料的屏蔽效能对温度的依赖性^[25];
(c)FG 中的电磁响应;(d)FG 在不同温度下的屏蔽性能^[39]

2.3 湿度响应型

有研究表明水分子可以诱导微观界面处电磁波的多次散射^[40],还可以改变高分子体积进而构建有效导电通路^[41]。另外,根据有效介质理论,材料中有效水分子的增加会增大材料介电常数的实部。因此,研究者提出将水作为刺激条件,来操纵材料的电磁响应行为,这一策略为实现能被环境条件操纵的智能 EMI 材料提供了思路。

Khatua 等人^[41]采用溶液浇铸法制备杂化聚合物纳米复合材料(SWCNT/PVA/CZTO/PDMS),以 PDMS 为基质,复合了聚乙烯醇(PVA)、单壁碳纳米管(SWCNT)和碳掺杂锡酸锌(CZTO),PVA 颗粒充当吸水物质。吸水膨胀后的 PVA 增加了表面导电路径还引起极性结构的介电损耗,从而提高屏蔽性能。图 2(a)展示的是材料吸水后的电磁屏蔽机制。如图 2(b)所示,复合材料的 SE_T 随着含水量的增加而增加,在 20 GHz 的恒定频率下,未吸水的材料的 SE 为 70.04 dB;吸水质量分数为 7.4% 和 16.3% 的材料 SE 分别增加到 85.07 dB 和 87.90 dB。值得注意的是,该复合材料的屏蔽效能对湿度的响应,具有稳定、可逆的特点。

Shen 等人^[42]将整个聚酰亚胺泡沫浸涂在含有碳纳米管聚乙烯吡咯烷酮分散液(PVP/CNT),蒸发其中的水分后得到泡沫状聚酰亚胺基复合材料(PIF/CNT),其制备流程如图 2(c)所示。润湿的材料 SE 会大幅提高,这是因为吸附在泡沫骨架上的极性水分子会改变样品的固有介电性能,从而增强阻抗失配,增强反

射损耗;此外,强极性水分子的存在增加了极性界面数量,在高频微波下引起更强的极化损失,从而耗散更多的微波。反射损耗的增加是润湿样品屏蔽效能增加的主要原因。图 2(d)展示的是复合材料的屏蔽性能与含水量的关系,填料负载量不同的材料可以在有效屏蔽范围内($SE > 20$ dB)实现由含水量调控的屏蔽效能或屏蔽模式的“开/关”状态。PIF/CNT 材料的多孔结构和导电网络决定了材料屏蔽机制以吸收为主,PIF/CNT 的屏蔽机理如图 2(e)所示。这为新型智能 EMI 材料的设计提供了一个参考。

Song 等人^[43]制备了一种碳基三明治结构薄膜,热解石墨(PG)充当导电层,成分不同的聚丙烯无纺布(NW)作夹层,其结构以及制备流程见图 2(f)。图 2(g)展示了夹层中的水分子对界面的影响以及对电磁屏蔽的作用,水分子作为刺激条件,改变了材料介电常数的实部和虚部,从而调节多孔夹层材料的电磁响应特性,在水分子的存在下,夹层的 EMI 屏蔽性能显著提高。同时,观察到 EMI 屏蔽性能与夹层结构的固有物质特征和环境湿度有关,调控环境湿度和夹层成分能制得屏蔽效能增强型 EMI 屏蔽材料。

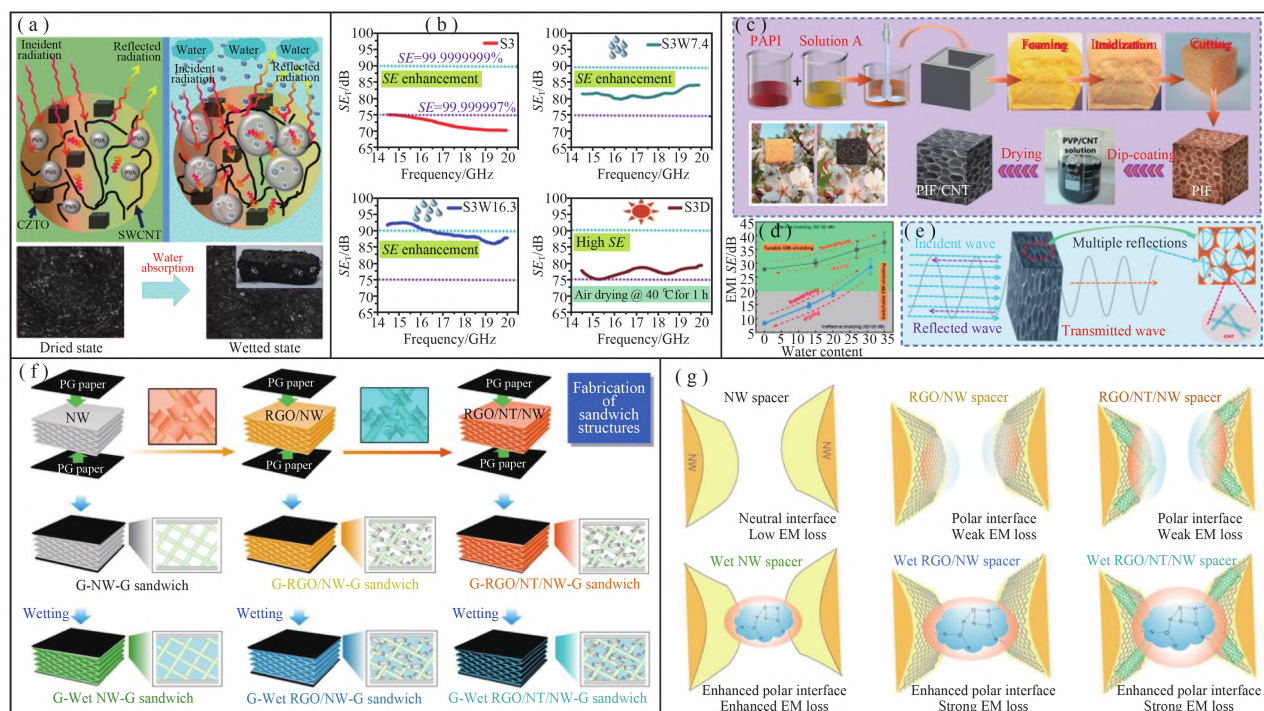


图 2 (a)SWCNT/PVA/CZTO/PDMS 复合材料在吸水前后的屏蔽机制;(b)含水量对复合材料 SE 的影响以及可逆的水分调谐的屏蔽性能^[41];(c)PIF/CNT 的制备流程;(d)PIF/CNT 受含水量调控的屏蔽性能;(e)PIF/CNT 的电磁屏蔽机理示意图^[42];(f)碳基三明治结构薄膜的制备流程示意图;(g)PIF/CNT 中水分子对界面的影响以及对电磁屏蔽的作用^[43]

2.4 其它响应型

为满足日益复杂多变的应用场景,除了上述三种外界刺激响应型 EMI 屏蔽材料,研究者还开发了一些具有自适应电磁特性的智能材料,这些材料电磁响应行为受不同条件操纵:酸碱性和外加偏置电压和偏转度。

在目前的研究中,酸碱响应型智能 EMI 屏蔽材料的屏蔽性能的变化来自酸、碱环境下的电导率变化。例如,利用聚苯胺在碱性环境中的脱掺杂效应,降低聚苯胺的本征电导率以实现弱屏蔽。Zhang 等人^[44]采用高效真空过滤辅助喷涂法制备了含有 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 和聚苯胺纳米线的棉织物(PMCF),图 3(a)是 PMCF 的制备流程。原始 PMCF 的电磁屏蔽效能可在 11 GHz 时为 24 dB,将 PMCF 依次在体积分数为 2×10^{-3} 的 NH_3 和 HCl 的气氛中持续处理 1 min,碱性环境下电磁屏蔽效能降至 15 dB,酸性处理后又增至 22 dB,实现了在低效弱屏蔽($SE < 20$ dB)和高效强屏蔽($SE > 20$ dB)之间的切换,见图 3(b)。聚苯胺的脱掺杂效应在酸碱刺激响应中起着关键作用,这种织物有应用在智能服装、柔性电子传感器的潜力。

当今无线应用需开发一种“筛子型”智能材料,可以有效地屏蔽不需要的电磁波,同时允许特定电磁波以最小的损耗传输到接受体。研究发现,要制备这样的材料,可以采用合适的电荷密度可调的材料,通过施加外部偏置电压来调节其电导率,从而得到需要的吸收系数、反射系数、透射系数。Ji 等人^[27]提出了一种将结

构设计与电压控制相结合的策略,设计了一种具有三明治结构的柔性低频雷达隐身器件,制备流程如图3(c)所示。外层选用介电损耗能力可调的 $\text{Sn}/\text{SnO}_2@\text{C}$ 作为吸收层,内层选用超薄碳膜作为电子传输通道,使得该材料兼具透波选择性和电磁屏蔽性。从图3(d)可看出,通过施加偏压,它可以接收特定频率的电磁波,在 $8 \sim 8.4$ 、 $8 \sim 9.3$ 和 $8 \sim 10$ GHz 的频率范围内表现出很强的传输能力。

材料取向和电磁波的电场方向的相对角度变化也可操纵电磁屏蔽效能,这是利用增强的感应电流密度和二次电场以衰减电磁波。Koo 等人^[45]用预聚聚多巴胺在二维过渡金属碳化物/氮化物(MXene)上构建了一个多功能保护纳米壳,制备了抗氧化性和流变性比 MXene 油墨更好的导电油墨(p-MXene),制备流程如图3(e)所示。p-MXene 由于显著增强的片间相互作用,而显示出比 MXene 油墨高得多的粘度和弹性,可供精确打印各种定制的电磁干扰屏蔽设备,p-MXene 涂层还具有红外伪装能力。通过丝网印刷制备可用于 EMI 屏蔽的 p-MXene 膜,这种薄膜类似于光栅,具有等宽等间距的狭缝,图3(f)概括了 p-MXene 膜与微波在波导腔内相互作用机理。由图3(g)可知,随着狭缝的取向和电磁波的电场方向的相对角度的改变,薄膜对电磁波的衰减能力也能相应地改变,这为智能电磁屏蔽材料的设计提供了一种策略。

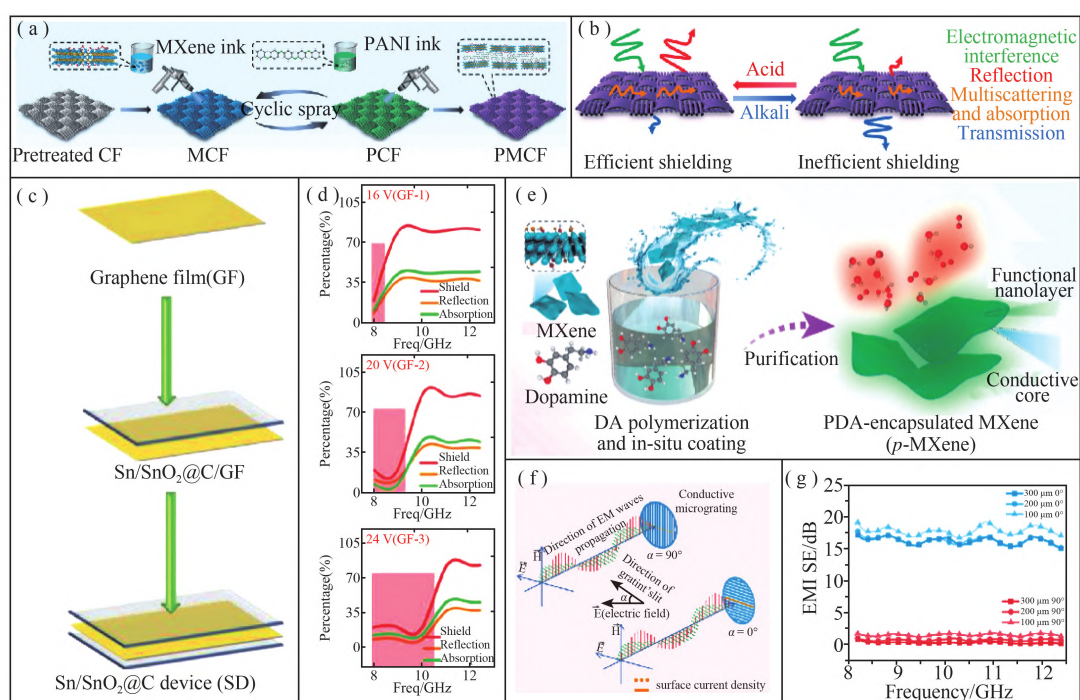


图3 (a)PMCF的制备流程示意图;(b)PMCF的酸/碱响应和可调EMI屏蔽行为^[44];(c)SD薄膜的制备流程示意图;

(d)使用不同电导率石墨烯的SD薄膜的屏蔽系数^[27];(e)p-MXene油墨的制备流程示意图;(f)由p-MXene

制得的薄膜在波导腔内与微波相互作用机理的示意图;(g)电磁干扰屏蔽性能与微光栅方向的关系^[45]

3 总结与展望

近年来,外界刺激响应型电磁干扰屏蔽材料已经可以在外力、温度和湿度变化等外界刺激下产生实时可变的屏蔽性能,但是目前关于智能电磁干扰屏蔽材料的研究仍处于起步阶段,尚且存在一些亟待解决的问题:整体屏蔽效能较低、无法通过外界刺激循环调控屏蔽性能、可拉伸性与耐用性较差、屏蔽性能的“开/关”机制研究基础弱。因此,后续发展方向应聚焦于以下几个方面:(1)外界刺激响应型EMI屏蔽材料正朝着多组分、多结构一体化的方向发展,最重要的是探究结构和功能的关系,特别是一维/二维/三维材料中层次结构或空间结构的耦合/协同效应。(2)“薄、轻、宽、强”仍然是包括外界刺激响应型电磁干扰屏蔽材料在内的智能电磁干扰屏蔽材料需要深入研究的基础目标。(3)考虑到材料在各种环境中的长效服役性,评断指标不仅是外界刺激下屏蔽性能循环可调控,还应包括在数百次或数千次循环后较稳定的屏蔽性能,具有阻燃性、自修复等特性。(4)材料合成与制备的最终目标是应用于日益复杂的电磁环境,因此开发具有反应条件温和、可控性好、操作简单、成本低、规模化生产等优点的新型组装策略十分必要。

参 考 文 献

- [1] 袁宝国, 张德宾, 徐国芬, 等. 聚苯胺纳米纤维/还原氧化石墨烯复合吸波材料的制备与性能[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2021, 34(6): 43-49.
- [2] LI J, XU Z, LI T, et al. Multifunctional antimony tin oxide/reduced graphene oxide aerogels with wideband microwave absorption and low infrared emissivity[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 231: 109565-109574.
- [3] MENG F, CHEN Y, LIU W, et al. Multifunctional RGO-based films with “brick-slurry” structure: high-efficiency electromagnetic shielding performance, high strength and excellent environmental adaptability[J]. *Carbon*, 2022, 200: 156-165.
- [4] REN H, LI T, WANG H, et al. Two birds with one stone: Superhelical chiral polypyrrole towards high-performance electromagnetic wave absorption and corrosion protection[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 427: 131582-131594.
- [5] ZHANG L, CHEN Y, LIU Q, et al. Ultrathin flexible electrospun carbon nanofibers reinforced graphene microgasbags films with three-dimensional conductive network toward synergetic enhanced electromagnetic interference shielding[J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2022, 111: 57-65.
- [6] GONZALEZ M, POZUELO J, BASELGA J. Electromagnetic shielding materials in GHz range[J]. *Chemical Record*, 2018, 18(7-8): 1000-1009.
- [7] MA Z, KANG S, MA J, et al. Ultraflexible and mechanically strong double-layered aramid nanofiber- $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene/silver nanowire nanocomposite papers for high-performance electromagnetic interference shielding[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(7): 8368-8382.
- [8] SONG Q, YE F, YIN X, et al. Carbon nanotube-multilayered graphene edge plane core-shell hybrid foams for ultrahigh-performance electromagnetic-interference shielding[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(31): 1701583-1701590.
- [9] WEI Q, PEI S, QIAN X, et al. Superhigh electromagnetic interference shielding of ultrathin aligned pristine graphene nanosheets film[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(14): 1907411-1907419.
- [10] ZHANG J, KONG N, UZUN S, et al. Scalable manufacturing of free-standing, strong $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene films with outstanding conductivity[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(23): 2001093-2001101.
- [11] CHEN Y, LI J, LI T, et al. Recent advances in graphene-based films for electromagnetic interference shielding: Review and future prospects[J]. *Carbon*, 2021, 180: 163-184.
- [12] WANASINGHE D, ASLANI F. A review on recent advancement of electromagnetic interference shielding novel metallic materials and processes[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 176(1): 107207-107230.
- [13] YAN Z, CAI J, XU Y, et al. Microwave absorption property of the diatomite coated by Fe-CoNiP films[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 346: 77-83.
- [14] JIA Y, AJAYI T D, ROBERTS M A, et al. Ultrahigh-temperature ceramic-polymer-derived SiOC ceramic composites for high-performance electromagnetic interference shielding[J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2020, 12(41): 46254-46266.
- [15] LIU X, YIN X, DUAN W, et al. Electromagnetic interference shielding properties of polymer derived SiC-Si₃N₄ composite ceramics[J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2019, 35(12): 2832-2839.
- [16] WANG Z, MAO B, WANG Q, et al. Ultrahigh conductive copper/large flake size graphene heterostructure thin-film with remarkable electromagnetic interference shielding effectiveness[J]. *Small*, 2018, 14(20): 1704332-1704339.
- [17] ZHOU E, XI J, GUO Y, et al. Synergistic effect of graphene and carbon nanotube for high-performance electromagnetic interference shielding films[J]. *Carbon*, 2018, 133: 316-322.
- [18] LIPTON J, RÖHR J A, DANG V, et al. Scalable, highly conductive, and micropatternable MXene films for enhanced electromagnetic interference shielding[J]. *Matter*, 2020, 3(2): 546-557.
- [19] LIU J, LIU Z, ZHANG H B, et al. Ultrastrong and highly conductive MXene-based films for high-performance electromagnetic interference shielding[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2019, 6(1): 1901094-1901101.
- [20] JI K, ZHAO H, ZHANG J, et al. Fabrication and electromagnetic interference shielding performance of open-cell foam of a Cu-Ni alloy integrated with CNTs[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 311: 351-356.
- [21] LIN M C, LIN J H, BAO L. Applying TPU blends and composite carbon fibers to flexible electromagnetic-shielding fabrics: long-fiber-reinforced thermoplastics technique[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2020, 138: 106022-106030.
- [22] WANG Y, NI L J, YANG F, et al. Facile preparation of a high-quality copper layer on epoxy resin via electroless plating for applications in electromagnetic interference shielding[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, 5(48): 12769-12776.
- [23] LIANG J, GU Y, BAI M, et al. Electromagnetic shielding property of carbon fiber felt made of different types of short-chopped carbon fibers[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, 121: 289-298.

- [24] JIA X, SHEN B, ZHANG L, et al. Construction of shape-memory carbon foam composites for adjustable EMI shielding under self-fixable mechanical deformation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 405: 126927-126935.
- [25] WEN B, CAO M, LU M, et al. Reduced graphene oxides: light-weight and high-efficiency electromagnetic interference shielding at elevated temperatures[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(21): 3484-3489.
- [26] LIU X, LI Y, SUN X, et al. Off/on switchable smart electromagnetic interference shielding aerogel[J]. *Matter*, 2021, 4(5): 1735-1747.
- [27] LV H, YANG Z, ONG S J H, et al. A flexible microwave shield with tunable frequency-transmission and electromagnetic compatibility[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(14): 1900163-1900170.
- [28] ZHU R, LI Z, DENG G, et al. Anisotropic magnetic liquid metal film for wearable wireless electromagnetic sensing and smart electromagnetic interference shielding[J]. *Nano Energy*, 2022, 92: 106700-106709.
- [29] YAO B, XU X, LI H, et al. Soft liquid-metal/elastomer foam with compression-adjustable thermal conductivity and electromagnetic interference shielding[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 410(15): 128288-128295.
- [30] XIA S, WEI C, TANG J, et al. Tensile stress-gated electromagnetic interference shielding fabrics with real-time adjustable shielding efficiency[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, 9(42): 13999-14005.
- [31] BERA R, MAITRA A, PARIA S, et al. An approach to widen the electromagnetic shielding efficiency in PDMS/ferrous ferric oxide decorated RGO-SWCNH composite through pressure induced tunability[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 335: 501-509.
- [32] CHEN J, SHEN B, JIA X, et al. Lightweight and compressible anisotropic honeycomb-like graphene composites for highly tunable electromagnetic shielding with multiple functions[J]. *Materials Today Physics*, 2022, 24: 100695-100704.
- [33] FAN D, LI N, LI M, et al. Polyurethane/polydopamine/graphene auxetic composite foam with high-efficient and tunable electromagnetic interference shielding performance[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 427(1): 131635-131644.
- [34] WANG G, YI D, JIA X, et al. Structural design of compressible shape-memory foams for smart self-fixable electromagnetic shielding with reduced reflection[J]. *Materials Today Physics*, 2022, 22:100612-100620.
- [35] HAN M, YIN X, HANTANASIRISAKUL K, et al. Anisotropic MXene aerogels with a mechanically tunable ratio of electromagnetic wave reflection to absorption[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(10): 1900267-1900273.
- [36] HE Y J, SHAO Y W, XIAO Y Y, et al. Multifunctional phase change composites based on elastic MXene/silver nanowire sponges for excellent thermal/solar/electric energy storage, shape memory, and adjustable electromagnetic interference shielding functions[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(4): 6057-6070.
- [37] LI J, ZHANG Y, LI X, et al. Oriented magnetic liquid metal-filled interlocked bilayer films as multifunctional smart electromagnetic devices[J]. *Nano Research*, 2022, 16: 1-9.
- [38] PITKANEN O, TOLVANEN J, SZENTI I, et al. Lightweight hierarchical carbon nanocomposites with highly efficient and tunable electromagnetic interference shielding properties[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(21): 19331-19338.
- [39] WANG X X, ZHANG M, SHU J C, et al. Thermally-tailoring dielectric "genes" in graphene-based heterostructure to manipulate electromagnetic response[J]. *Carbon*, 2021, 184: 136-145.
- [40] ZHANG K L, CHENG X D, ZHANG Y J, et al. Weather-manipulated smart broadband electromagnetic metamaterials[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(47): 40815-40823.
- [41] SINGH P P, DE A, KHATUA B B. Hydro-tunable CZTO/SWCNT/PVA/PDMS hybrid composites for smart green EMI shielding[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2022, 10(44): 16903-16913.
- [42] SUN Z, CHEN J, JIA X, et al. Humidification of high-performance and multifunctional polyimide/carbon nanotube composite foams for enhanced electromagnetic shielding[J]. *Materials Today Physics*, 2021, 21: 100521-100529.
- [43] WANG Y, CHENG X D, SONG W L, et al. Hydro-sensitive sandwich structures for self-tunable smart electromagnetic shielding[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 344: 342-352.
- [44] LI D Y, LIU L X, WANG Q W, et al. Functional polyaniline/MXene/cotton fabrics with acid/alkali-responsive and tunable electromagnetic interference shielding performances[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(10): 12703-12712.
- [45] DENG Z, LI L, TANG P, et al. Controllable surface-grafted MXene inks for electromagnetic wave modulation and infrared anti-counterfeiting applications[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(10): 16976-16986.

(责任编辑:蒲锡鹏)