

· 综述 ·

## 水凝胶基柔性电磁屏蔽材料研究进展

王侯琦<sup>1</sup> 常晓华<sup>2</sup> 陈建闻<sup>2</sup> 余德翔<sup>2</sup> 陈蕤<sup>2</sup> 赵桂艳<sup>1\*</sup> 朱雨田<sup>2\*</sup>

(<sup>1</sup>辽宁石油化工大学新能源与新材料学院 抚顺 113001)

(<sup>2</sup>杭州师范大学材料与化学化工学院 有机硅化学及材料技术教育部重点实验室  
浙江省有机硅材料技术重点实验室 杭州 311121)

**摘要** 随着电子设备小型化进程的加速和电磁污染问题的日益严峻,开发兼具高效屏蔽性能与良好柔性的电磁屏蔽材料至关重要.传统金属基屏蔽材料存在重量大、柔韧性差等局限,而水凝胶凭借其高柔韧性、生物相容性及结构可设计性展现出独特潜力,为新一代柔性电磁屏蔽材料的开发提供了新思路.本综述首先介绍了水凝胶材料的电磁屏蔽机理,探讨了影响其屏蔽性能的关键因素,包括水分子、多孔结构和导电填料类型;随后,系统分析了提升水凝胶电磁屏蔽性能的主要方法,包括不同类型的无机导电填料、引入本征导电聚合物以及结构设计等,并对比了各类方法的优势与优化策略.最后,总结了水凝胶基电磁屏蔽材料在柔性电子等领域的实际应用及刺激响应型智能屏蔽水凝胶的研究进展,对水凝胶屏蔽材料当前面临的挑战与未来发展方向进行了展望.

**关键词** 水凝胶; 电磁干扰屏蔽; 柔性; 刺激响应

**引用:** 王侯琦, 常晓华, 陈建闻, 余德翔, 陈蕤, 赵桂艳, 朱雨田. 水凝胶基柔性电磁屏蔽材料研究进展. 高分子学报, 2026, 57(3), 636-653.

**Citation:** Wang, Y. Q.; Chang, X. H.; Chen, J. W.; Yu, D. X.; Chen, R.; Zhao, G. Y.; Zhu, Y. T. Research progress on hydrogel-based flexible electromagnetic shielding materials. *Acta Polymerica Sinica* (in Chinese), 2026, 57(3), 636-653.

随着电子信息技术在通信、医疗和国防等领域的快速发展,由此产生的电磁干扰问题也日趋严重<sup>[1-4]</sup>.过量的电磁辐射不仅会干扰精密电子设备的正常运行,还可能对人体健康造成潜在威胁<sup>[5-7]</sup>.与此同时,随着电子设备小型化的发展趋势,对电磁屏蔽材料提出了超薄、柔韧、可集成等新要求<sup>[8-10]</sup>.因此,开发新型高效、可靠的电磁屏蔽材料显得尤为关键.

传统的电磁屏蔽材料,如金属,虽然性能优良,但往往存在重量大、柔韧性差、易腐蚀或加工复杂等局限<sup>[11-14]</sup>.水凝胶由亲水性聚合物网络和水构成,相比传统电磁屏蔽材料,它们具有高柔韧性、可拉伸性、生物相容性和结构可设计

性,使其在电磁屏蔽领域展现出独特的潜力<sup>[15-18]</sup>.但水凝胶材料固有的低屏蔽效率阻碍了其进一步发展.

水凝胶实现电磁屏蔽主要依赖于3个关键因素:(1)高含水量:水分子在交变电磁场中发生极化旋转,可以有效耗散电磁能,从而提升材料对电磁波的吸收能力<sup>[19-21]</sup>;(2)多孔结构:水凝胶内部丰富的孔隙可以延长电磁波的传播路径,通过孔壁多次反射与散射效应进一步增强能量耗散<sup>[22-24]</sup>;(3)导电网络:通过在凝胶基体中引入无机导电填料,如金属纳米颗粒<sup>[25,26]</sup>、碳纳米管(CNT)<sup>[27-29]</sup>、石墨烯(graphene)<sup>[30-32]</sup>、MXene<sup>[33-36]</sup>或本征导电聚合物,如聚(3,4-乙烯二氧噻吩)、

2025-09-19收稿, 2025-11-18录用, 2026-01-14网络出版.

\*通信联系人, E-mail: gyzhao@lnpu.edu.cn; ytzhu@hznu.edu.cn

doi: 10.11777/j.issn1000-3304.2025.25246; CSTR: 32057.14.GFZXB.2025.7522

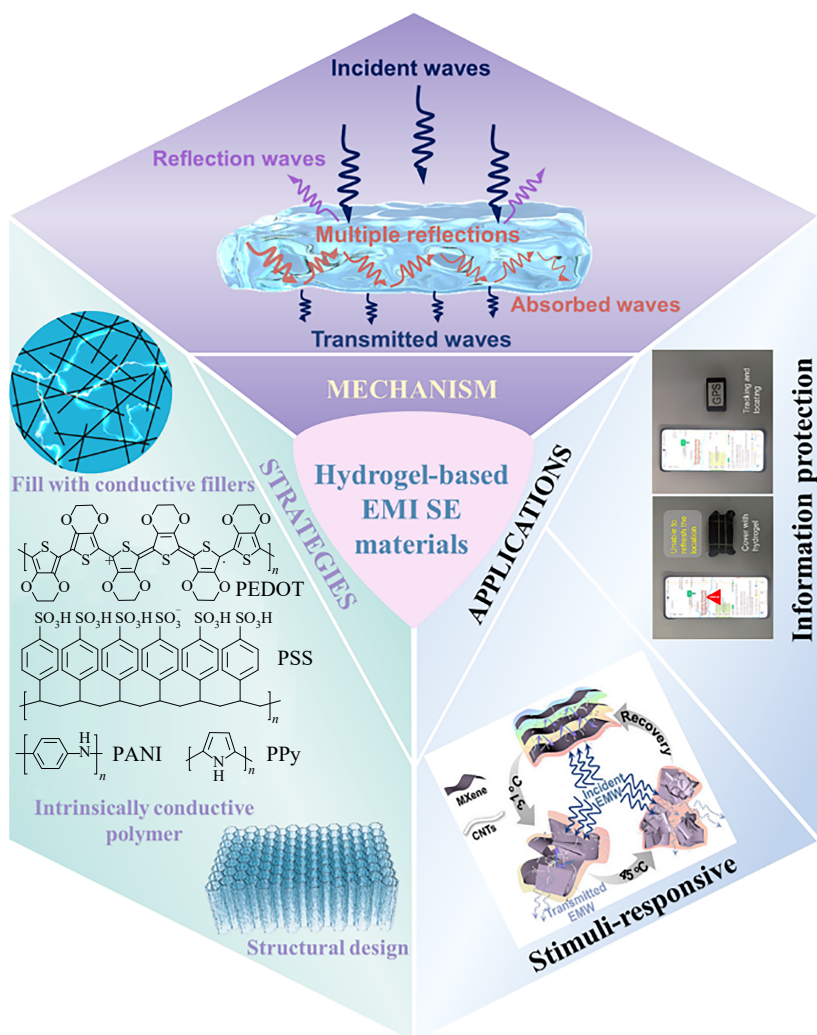
聚苯乙烯磺酸盐(PEDOT:PSS)、聚吡咯(PPy)、聚苯胺(PANI)等<sup>[37~39]</sup>, 构建连续导电通路, 借助导电损耗和界面极化机制衰减电磁波. 三者协同作用共同赋予水凝胶材料优异的电磁屏蔽性能.

将无机导电填料引入水凝胶体系是提高其电磁屏蔽效能的一种高效策略<sup>[40~43]</sup>. 然而, 仅依赖提高无机导电填料含量往往会引发填料团聚, 进而造成水凝胶柔韧性下降等问题<sup>[15, 44, 45]</sup>. 因此, 在维持水凝胶固有的柔韧性、生物相容性等优势的基础上, 实现高效且可控的电磁屏蔽, 已成为当前研究的关键挑战. 针对这一挑战, 研究者们提出多种策略, 如选用多维无机导电填料协同增效<sup>[32]</sup>, 引入本征导电聚合物改善相容性<sup>[46~48]</sup>, 以及通过结构设计(如构建定向孔结构<sup>[49]</sup>、不对称梯度导电层<sup>[50]</sup>或微电容器网络<sup>[51]</sup>等)等优化电磁波吸收路径和阻抗匹配. 这些策略能够在降低电磁波反射

的同时增强整体屏蔽效能, 有助于实现低反射的“绿色”屏蔽并减少二次污染. 此外, 赋予水凝胶刺激响应性, 如应变响应<sup>[27]</sup>、温度响应<sup>[52, 53]</sup>, 使其能够根据外部环境变化动态调节屏蔽性能, 已成为研究热点. 本综述系统阐述水凝胶基电磁屏蔽材料的研究进展. 首先, 介绍其电磁屏蔽的基本机理; 其次, 重点评述提升其屏蔽性能的主要策略, 包括填充无机导电填料、引入本征导电聚合物与结构优化设计; 随后, 概述水凝胶屏蔽材料的实际应用场景及刺激响应型智能屏蔽水凝胶的发展现状; 最后, 对该领域面临的挑战与未来发展方向进行展望, 整体框架如图 1 所示.

## 1 水凝胶材料的电磁屏蔽机理

电磁屏蔽材料通常用于保护暴露在电磁辐射下的电子设备或生物体, 其主要目的是减弱电磁



**Fig. 1** Mechanisms, enhancement strategies, and applications of hydrogel-based electromagnetic interference shielding materials (Reprinted with permission from Refs. [32, 52]; Copyright (2025) Wiley-VCH).

波的穿透<sup>[54]</sup>. 根据 Schelkunoff 理论<sup>[55-57]</sup>, 材料电磁屏蔽效能(EMI SE, dB)的定量评估主要由总屏蔽效能( $SE_T$ )决定, 其中包括3种不同类型的损耗: 反射损耗( $SE_R$ ), 吸收损耗( $SE_A$ )和多重反射损耗( $SE_M$ ). 这些损耗共同导致电磁波的耗散, 其总和反映了屏蔽材料对入射电磁波的衰减程度. 因此,  $SE_T$ 可以通过将这3个损耗分量相加来计算, 如公式(1)所示<sup>[58-60]</sup>:

$$SE_T = 10 \lg \left( \frac{P_i}{P_t} \right) = 20 \lg \left( \frac{E_i}{E_t} \right) = 20 \lg \left( \frac{H_i}{H_t} \right) \quad (1)$$

$$= SE_A + SE_R + SE_M$$

式中,  $P_i$  ( $E_i$ 或 $H_i$ )和 $P_t$  ( $E_t$ 或 $H_t$ )分别表示入射电磁波和透射电磁波的功率(电场强度( $V \cdot m^{-1}$ )或磁场强度( $A \cdot m^{-1}$ )), 其单位为W. 随着电磁干扰系数的增大, 屏蔽效率增大.

当电磁屏蔽材料遇到入射电磁波时, 阻抗匹配程度对三种损耗机制均产生显著影响. 阻抗匹配程度直接决定 $SE_R$ , 其本质源于自由空间与屏蔽介质之间的阻抗( $Z$ )失配<sup>[54,61]</sup>. 提高屏蔽层的导电性可以加剧自由空间与屏蔽层界面处的阻抗失配, 从而增强电磁波反射, 提升电磁屏蔽效能<sup>[62-64]</sup>. 由于屏蔽层无法完全反射电磁波, 为尽量减少透射, 需使入射辐射在屏蔽层内部产生额外衰减. 这可以通过电磁屏蔽的二次吸收机制实现<sup>[65-67]</sup>. 与此同时, 阻抗匹配程度间接调控 $SE_A$ .  $SE_A$ 源自电磁波与材料内的电子、电偶极子和磁偶极子的相互作用, 具体表现为传导、介电/极化损耗和磁损耗<sup>[68-71]</sup>. 通过优化屏蔽材料和自由空间的阻抗匹配, 可促进电磁波高效透入材料内部, 增强其在基体中的吸收与耗散<sup>[54,59,72]</sup>. 此外, 阻抗匹配亦影响多次反射损耗 $SE_M$ , 即电磁波在屏蔽层界面间反复反射伴随能量耗散的过程<sup>[73-75]</sup>; 在材料中引入工程结构, 如多孔、多层、多相结构等可以产生更多的阻抗不匹配界面, 从而促进内部散射, 增强波的衰减<sup>[76-78]</sup>. 然而, 当屏蔽层厚度超过趋肤深度或其 $SE_A$ 超过10 dB时, 内部多重反射效应可以忽略不计<sup>[79,80]</sup>. 理论上,  $SE_A$ 、 $SE_R$ 和 $SE_M$ 可以用公式(2)~(4)表示, 其中 $f$ 为入射电磁波的频率(Hz),  $\mu_r$ 为磁导率,  $\sigma_r$ 为电导率( $S \cdot m^{-1}$ ),  $\delta$ 为趋肤深度(m),  $t$ 为屏蔽材料的厚度(m)<sup>[72,81,82]</sup>.

$$SE_A = 8.68 \left( \frac{t}{\delta} \right) = 8.68 t \sqrt{\pi f \mu_r \sigma_r} \quad (2)$$

$$SE_R = 168.2 + 10 \lg \frac{\sigma_r}{f \mu_r} \quad (3)$$

$$SE_M = 20 \lg \left( 1 - 10^{-\frac{SE_A}{10}} \right) \quad (4)$$

电磁屏蔽性能通常使用矢量网络分析仪来表征, 该分析仪采用 $S$ 参数( $S_{11}$ 和 $S_{21}$ )来量化入射波和透射波.  $S$ 参数与反射系数( $R$ )、吸收系数( $A$ )和透射系数( $T$ )的关系可以用公式(5)~(7)表示<sup>[83-85]</sup>:

$$R = |S_{11}|^2 \quad (5)$$

$$T = |S_{21}|^2 \quad (6)$$

$$A = 1 - R - T \quad (7)$$

当吸收占主导地位时, 即 $A > R$ , 入射电磁波主要通过材料内能量耗散衰减. 相反, 较高的 $R$ 表明大多数电磁波在材料-空气界面被反射<sup>[86-88]</sup>.

如图2所示, 水分子、多孔结构和导电填料是提升水凝胶电磁屏蔽性能的关键. 水分子通过极化损耗, 即分子旋转耗散电磁能显著增强电磁波衰减, 水分子的存在降低了水凝胶电磁屏蔽材料对高浓度导电填料的需求. 多孔结构通过多重反射延长电磁波传播路径、孔壁散射分散能量, 并与填料协同提升吸收效率, 强化整体屏蔽效果. 导电填料则通过导电损耗, 以及与绝缘基体间形成极化界面导致载流子聚集, 从而提升屏蔽效果. 三者通过极化损耗、导电损耗及多重散射的协同作用, 优化水凝胶材料的电磁屏蔽性能.

## 2 增强水凝胶基电磁屏蔽材料性能的策略

电磁屏蔽水凝胶主要由聚合物网络、导电填料和水组成. 因此, 通过选择不同类型的无机导电填料、引入本征导电聚合物(PEDOT:PSS、PANI和PPy等)以及结构设计等方式, 均有利于提高水凝胶材料的电磁屏蔽效能.

### 2.1 填充无机导电填料的水凝胶

水因其强极性已被证明可以通过多种机制有效衰减电磁波<sup>[23,54]</sup>. 水凝胶内部富含大量水, 使其具备一定的电磁屏蔽效能. 如图3(a)所示, Lian等<sup>[89]</sup>开发了一种基于丙烯酰胺-丙烯酸共聚物(P(AM-co-AA))的透明可拉伸水凝胶. 由于其内部的自由离子以及高达80%的含水量的富水环境, P(AM-co-AA)水凝胶具有一定的电磁屏蔽性能. 从图3(b)~3(d)可以看出, 在2.5 mm厚度下, 该材料在X波段的 $SE_T$ 最高可达27 dB, 且在室温放置一周后仍能保留80%的初始屏蔽效能. P(AM-co-AA)水凝胶的屏蔽机制主要依靠导

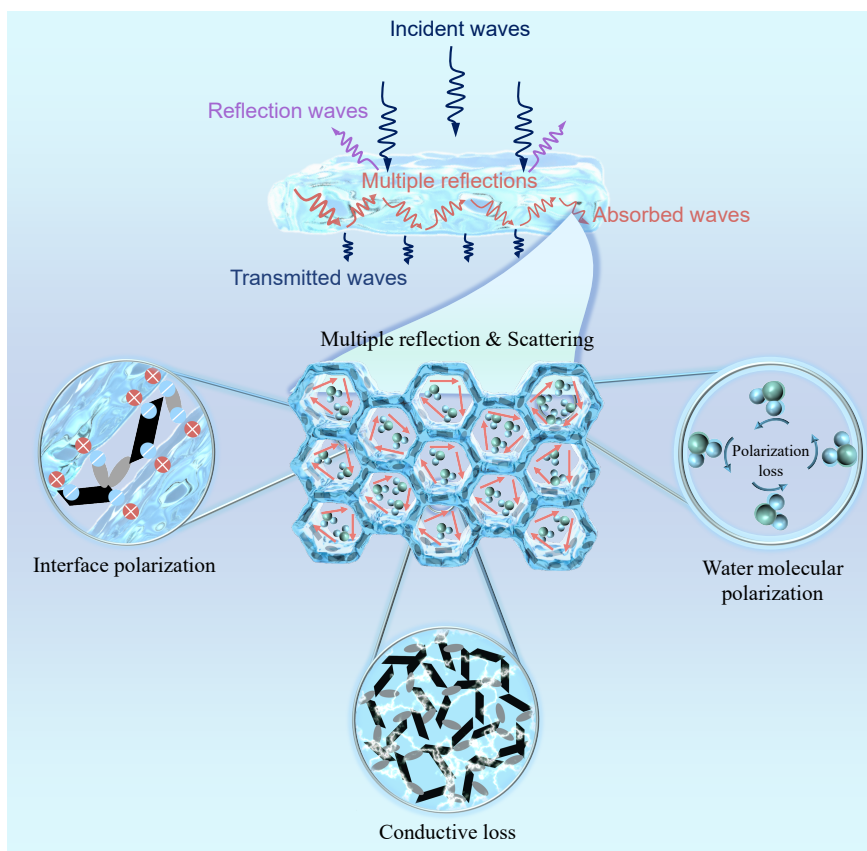
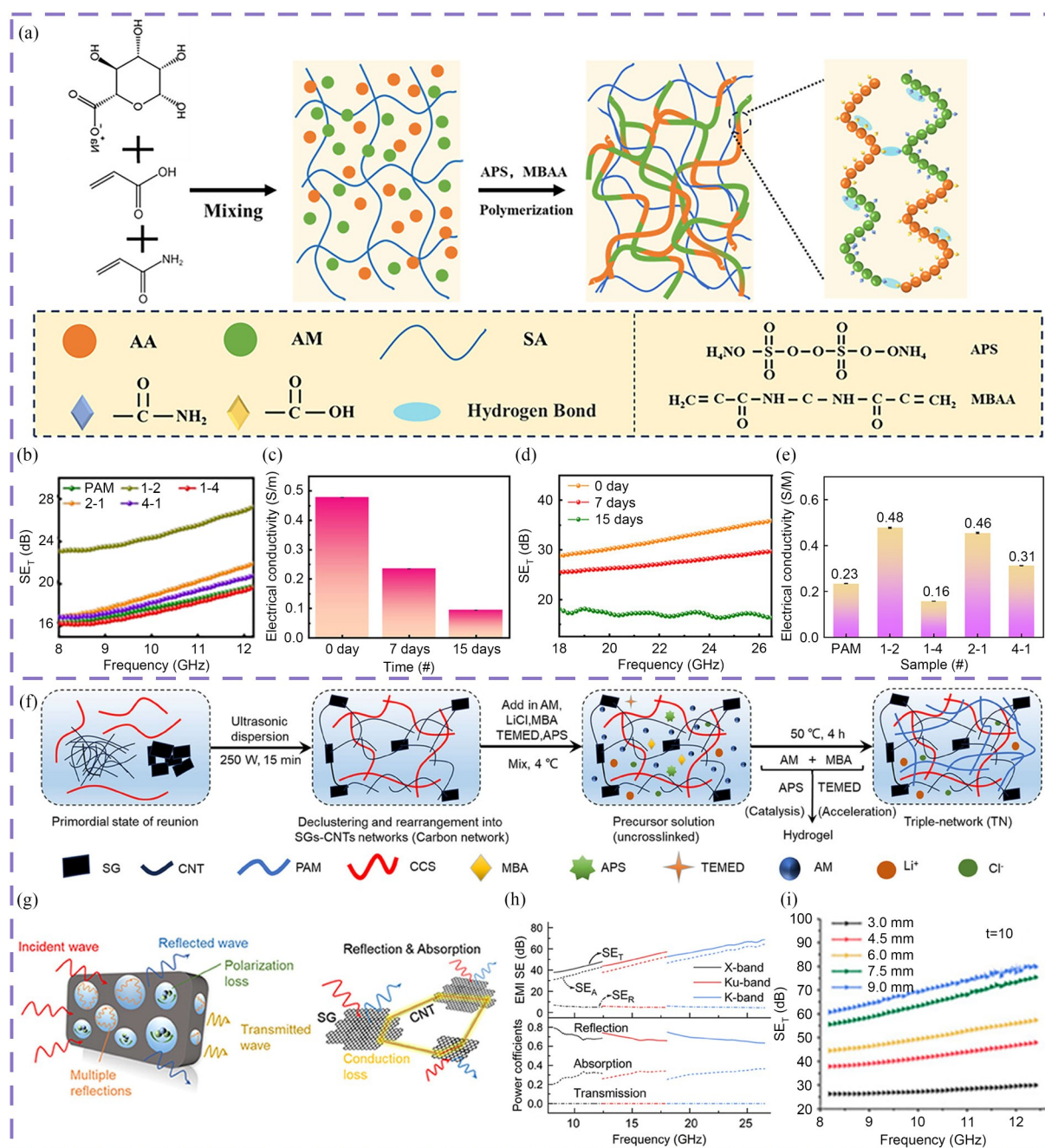


Fig. 2 Electromagnetic shielding mechanisms of hydrogel materials.

电损耗, 其电导率为  $0.48 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ , 如图 3(e). 该电导率主要由聚合物网络中的自由离子贡献. 尽管其  $\text{SE}_T$  值高于商业标准的 20 dB, 但自由离子的浓度是有限的, 导致离子电导率难以进一步提高. 同时, 该材料缺乏电子传导、界面极化损耗、多重反射与散射等其他高效的电磁能量损耗机制, 这些因素共同限制了其电磁屏蔽效能的进一步提升, 从而制约了该材料在电磁屏蔽领域的进一步发展. 填充无机导电填料是显著提升水凝胶电磁屏蔽效能的有效策略之一, 其核心原理在于建立高效的电子传导机制, 并协同产生多种损耗机制和结构效应, 进而提升屏蔽效能.

无机导电填料已被广泛应用于水凝胶基体中, 以开发性能更优异的电磁屏蔽材料. 这些填料包括零维(0D)金属纳米颗粒(如金、银、镍、铜)、一维(1D)纳米结构(如碳纳米管、金属纳米棒和金属纳米线), 以及二维(2D)纳米片(如石墨烯和 MXene)<sup>[20,90,91]</sup>. 这些无机导电填料主要通过导电损耗和极化损耗机制衰减入射电磁波. Feng 等<sup>[92]</sup>利用 2,2,6,6-四甲基哌啶-1-氧化物(TEMPO)氧化纤维素纳米纤维(TO-CNF)后封装液态金属

(LM, 75% Ga 和 25% In), 再与聚乙烯醇(PVA)和硼砂交联, 制备出一种可回收的纤维素/液态金属水凝胶. 该水凝胶表现出优异的电磁屏蔽性能, 其  $\text{SE}_T$  随 LM 含量增加而提高, 当 LM 含量为 60 wt% 时, 在 10 GHz 频率下最高可达 33.14 dB. 该水凝胶的屏蔽机制主要源于 LM 液滴引起的阻抗失配反射, 当电磁波接触高导电性的 LM 液滴时, 由于 LM 与空气的阻抗差异, 部分电磁波被直接反射, 反射系数  $R$  高达 0.82, 同时透射系数  $T$  降至  $5.62 \times 10^{-4}$ . 此外, 水凝胶经三次回收后屏蔽效能仅下降 0.92 dB, 显示出良好的可回收性与稳定的屏蔽性能. Lai 等<sup>[93]</sup>报道了一种由还原氧化石墨烯(RGO)、聚丙烯酸(PAA)、壳聚糖(CS)、无定形碳酸钙(ACC)组成的复合水凝胶材料, 该材料表现出卓越的电磁屏蔽能力. 当 RGO 含量为 4.76 wt%、厚度为 9.71 mm 时, 该水凝胶在 X 波段(8.2~12.4 GHz)的  $\text{SE}_T$  高达 90.63 dB. 该材料在经历 3000 次拉伸—自修复循环、100 °C 高温处理或酸碱浸泡后, 仍保持稳定的屏蔽性能. 即使在 40  $\mu\text{m}$  的超薄厚度下, 水凝胶的  $\text{SE}_T$  仍达到 20 dB, 满足商用需求. 综上所述, 通过引入



**Fig. 3** (a) Schematic illustration for the synthesis of P(AM-co-AA) hydrogel; (b)  $SE_T$  of P(AM-co-AA) hydrogels with different monomer ratios; (c, d) Electrical conductivity and  $SE_T$  of P(AM-co-AA) hydrogel (the weight ratio of AM to AA monomer is 2:1) at different resting time; (e) Electrical conductivity of P(AM-co-AA) hydrogels with different monomer ratios (Reprinted with permission from Ref. [89]; Copyright 2024 Wiley-VCH). (f) Microstructural formation process of SGs-CNTs/CCS/PAM hydrogel; (g) Electromagnetic shielding mechanism of hydrogel; (h) Hydrogel shielding parameters across X, Ku, K-bands:  $SE_R$ ,  $SE_A$ ,  $SE_T$  with  $R$ ,  $A$ ,  $T$  coefficients; (i)  $SE_T$  of hydrogel with different thickness (Reprinted with permission from Ref. [32]; Copyright (2025) Wiley-VCH).

无机导电填料提升水凝胶电磁屏蔽性能的核心在于构建连续导电通路，以增强导电损耗。尽管单一无机导电填料的添加可在一定程度上改善水凝胶的屏蔽效能，但高填料含量容易导致导电网络效率降低和填料团聚，严重损害机械性能。因此，

在控制填料用量的前提下构建高效的导电网络，已成为实现同等优异电磁屏蔽效能的关键策略。

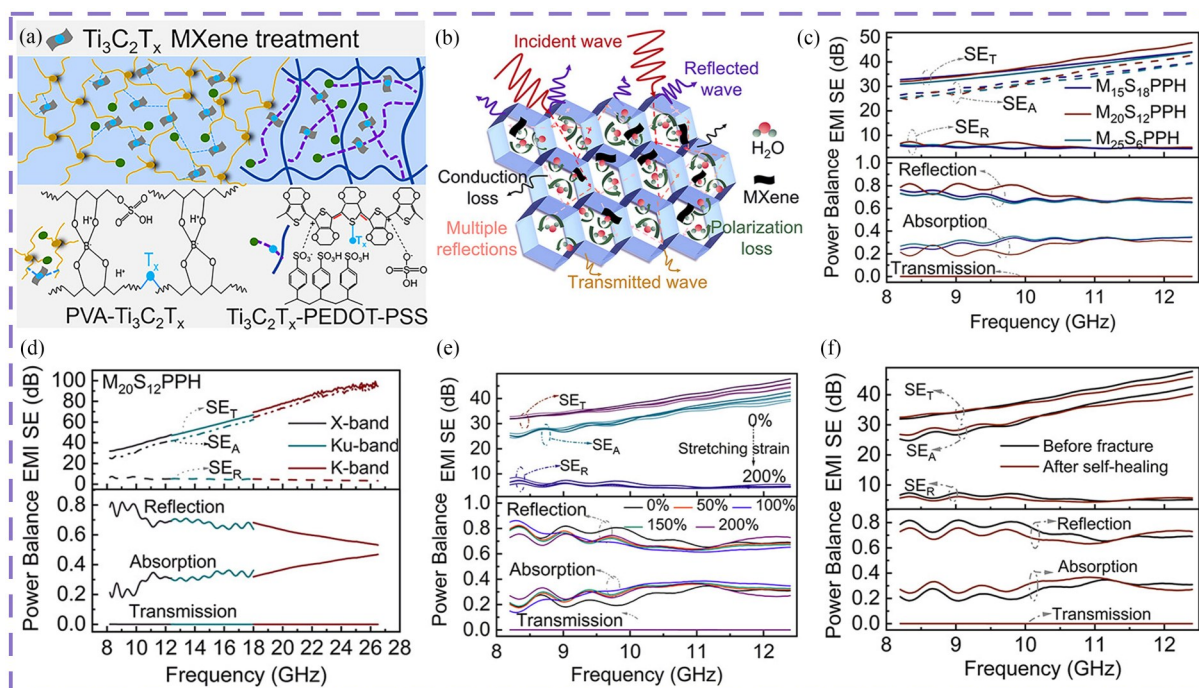
通过在水凝胶基体中引入不同维度的填料构建三维导电网络，可以利用各类填料之间的协同效应显著提高水凝胶的导电性。具体而言，零维

填料可以提供大量导电位点,一维填料能够桥接形成导电路径,而二维填料凭借其高比表面积有助于构建大面积的导电界面.因此,整合不同维度的填料可以实现功能互补,协同构建高效稳定的导电网络结构.如图3(f)所示,受神经网络结构启发,He等<sup>[32]</sup>开发了一种由单层石墨烯(SGs)、CNTs、PAM和羧甲基壳聚糖(CCS)组成的水凝胶.该水凝胶在覆盖X、Ku、K波段的宽频范围内(8.2~26.5 GHz)表现出优异的电磁屏蔽效能.如图3(g)所示,其中SGs模拟神经元节点,CNTs模拟轴突/树突结构,二者协同形成高效导电网络.在水凝胶基体中仅需添加1.2 wt%的低填料量即可实现显著屏蔽效果,如图3(h)所示,在X、Ku、K波段(厚度为4.5mm)的 $SE_T$ 分别达42.31、50.20和60.78 dB,且 $SE_T$ 随频率升高而增强.该水凝胶的屏蔽机制以电磁波反射为主( $R > A$ ).此外,根据图3(i)可知,材料厚度可灵活调控屏蔽性能:当厚度为3 mm时, $SE_T$ 为27.73 dB;增至9 mm时, $SE_T$ 可达70.73 dB.总之,该水凝胶通过仿生神经网络结构实现了宽频高效电磁屏蔽,为柔性电子器件提供了理想的屏蔽材料.

## 2.2 本征导电聚合物电磁屏蔽水凝胶

尽管无机导电填料的引入可显著提升水凝胶材料的电磁屏蔽效能,但多数无机导电填料本身具有疏水性.将其与亲水性聚合物链段构成的水凝胶复合时,往往因相容性较差而损害材料的力学性能和生物相容性.为应对这一挑战并满足对高性能电磁屏蔽材料的需求,将PEDOT:PSS等本征型导电聚合物引入水凝胶体系,成为一种有效的策略.

PEDOT:PSS作为最具代表性的导电聚合物之一,其两亲性结构,包括疏水性PEDOT链和亲水性PSS链使其能够在水性环境中稳定分散,并通过氢键和静电吸引促进与聚合物基质的强相互作用.这些相互作用有助于形成稳定的三维导电网络,从而赋予水凝胶优异的导电性和高拉伸性.图4(a)显示,Li等<sup>[46]</sup>以PEDOT:PSS和PVA为基体,通过引入MXene并辅以硫酸处理,制得具有电磁屏蔽性能的双网络水凝胶(MSPPH).图4(b)展示了MSPPH水凝胶的电磁屏蔽机制:MXene提供了更多氢键交联位点并增强静电相互作用,促进电荷离域;硫酸处理则诱导PEDOT分子链



**Fig. 4** (a) Effect of  $H_2SO_4$  and MXene treatments on the microstructure of PEDOT:PSS/PVA hydrogel; (b) Schematic illustration for the electromagnetic shielding mechanism of MSPPH hydrogel; (c)  $SE_R$ ,  $SE_A$ ,  $SE_T$  and  $R$ ,  $A$ ,  $T$  coefficients of MSPPH hydrogel in the X-band; (d)  $SE_R$ ,  $SE_A$ ,  $SE_T$  and  $R$ ,  $A$ ,  $T$  coefficients of MSPPH hydrogel in the X, Ku, and K-bands; (e)  $SE_R$ ,  $SE_A$ ,  $SE_T$  and  $R$ ,  $A$ ,  $T$  coefficients of MSPPH after stretching-releasing cycles at different strains; (f)  $SE_R$ ,  $SE_A$ ,  $SE_T$  and  $R$ ,  $A$ ,  $T$  coefficients of MSPPH hydrogel before and after self-healing (Reprinted with permission from Ref. [46]; Copyright (2024) American Chemical Society).

由卷曲构象转变为线性构象,二者协同提升了材料的导电性与拉伸性能.从图4(c)可以看出,MSPPH水凝胶在X波段(8.2~12.4 GHz)的 $SE_T$ 达到41 dB;随着频率升至26.5 GHz(K波段),由于高频下水分子极化损失增强, $SE_T$ 线性增至99 dB(图4(d)).如图4(e)和4(f)所示,该材料在经历200%应变拉伸一释放循环后, $SE_T$ 保持率仍达94.5%,并可在1 min内通过自修复恢复98%的性能,显示出良好的可拉伸性与自修复能力.MSPPH水凝胶为柔性电子设备提供了一种低成本、高性能的电磁防护解决方案.Zhang等<sup>[48]</sup>通过光引发聚合制备了由PVA、PAA、聚乙二醇二甲基丙烯酸酯(PEGDMA)和PEDOT:PSS组成的导电水凝胶(简称PPPH).该水凝胶表现出良好的电磁屏蔽性能,当厚度为1 mm时,PPPH水凝胶在X波段(8.2~12.4 GHz)的 $SE_T$ 为20.58 dB.当厚度从1 mm增至4 mm时,其 $SE_T$ 从20.58 dB提升至40.61 dB, $SE_A$ 从15.52 dB增至36.12 dB.PPPH水凝胶屏蔽机制以反射为主(吸收系数 $A < 0.5$ ),主要源于材料与空气界面处的阻抗失配.内部PEDOT:PSS构建的导电网络通过电子迁移引起传导损耗,水分子在电磁场下的极化作用贡献了极化损耗,多孔结构引发的多重反射进一步延长了电磁波传播路径从而增强能量耗散.Meng等<sup>[47]</sup>采用溶胶-凝胶法制备了基于聚吡咯纳米管(PNTs)的PVA/纤维素(CNFs)/PNTs多孔有机水凝胶(POGs),其在X波段表现出优异的电磁屏蔽效能.当PNTs填充量为20 wt%、样品厚度为2 mm时, $SE_T$ 达到63.6 dB,较纯有机水凝胶的屏蔽效能(15.6 dB)提升约300%.POGs水凝胶的屏蔽性能可归因于PNTs构建的三维导电网络(电导率为 $443.5 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ )与DMSO/ $\text{H}_2\text{O}$ 极性溶剂体系的协同作用:导电网络增强传导损耗,多孔结构促进了电磁波多重反射,极性溶剂与PNTs表面官能团共同优化极化损耗.该水凝胶在常温下放置30天后 $SE_T$ 仍保持在50.3 dB,经 $-40^\circ\text{C}$ 冷冻4 h后效能仍达到59.3 dB,这说明水凝胶具有优异的环境稳定性.

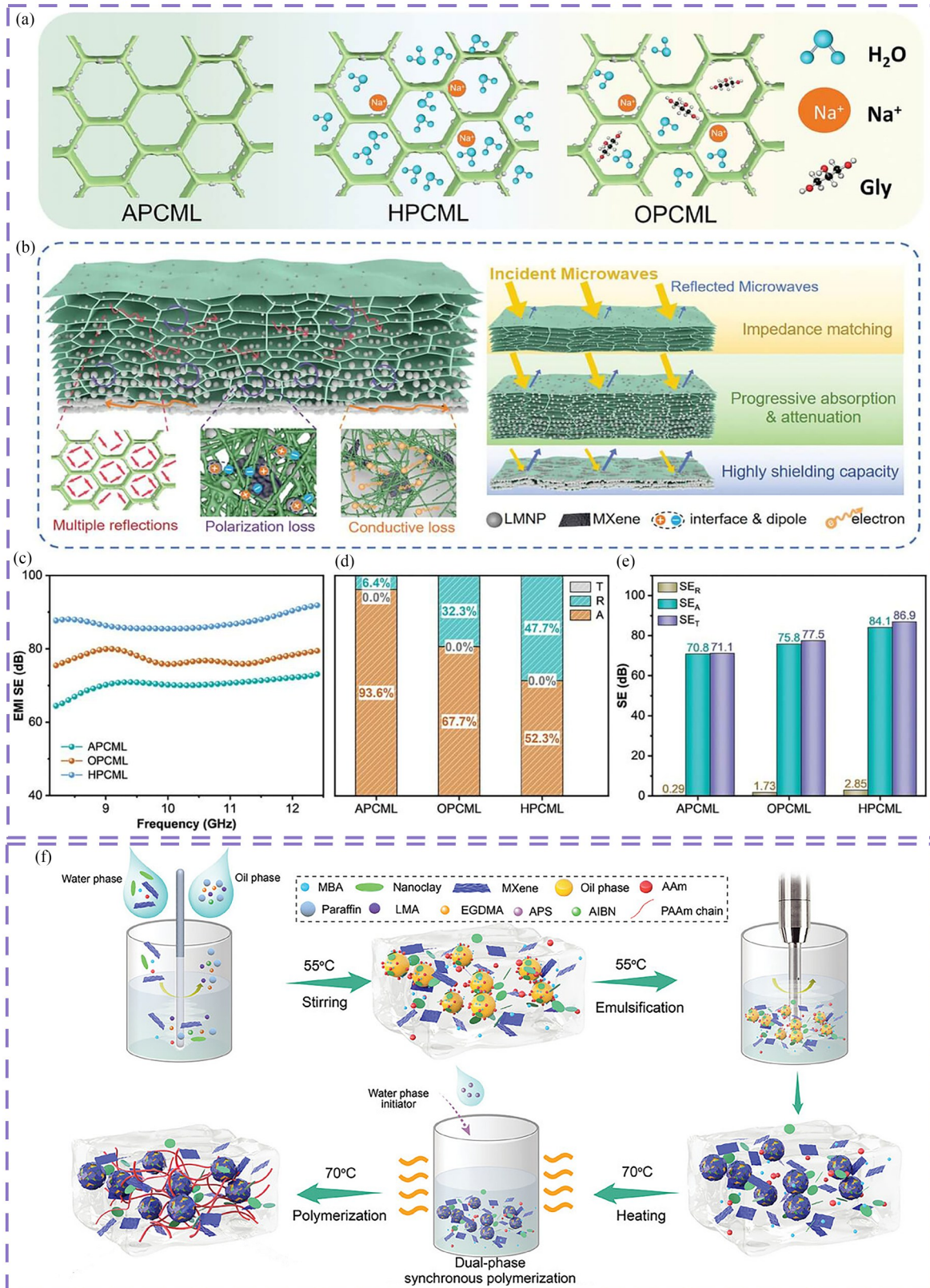
### 2.3 结构设计类电磁屏蔽水凝胶

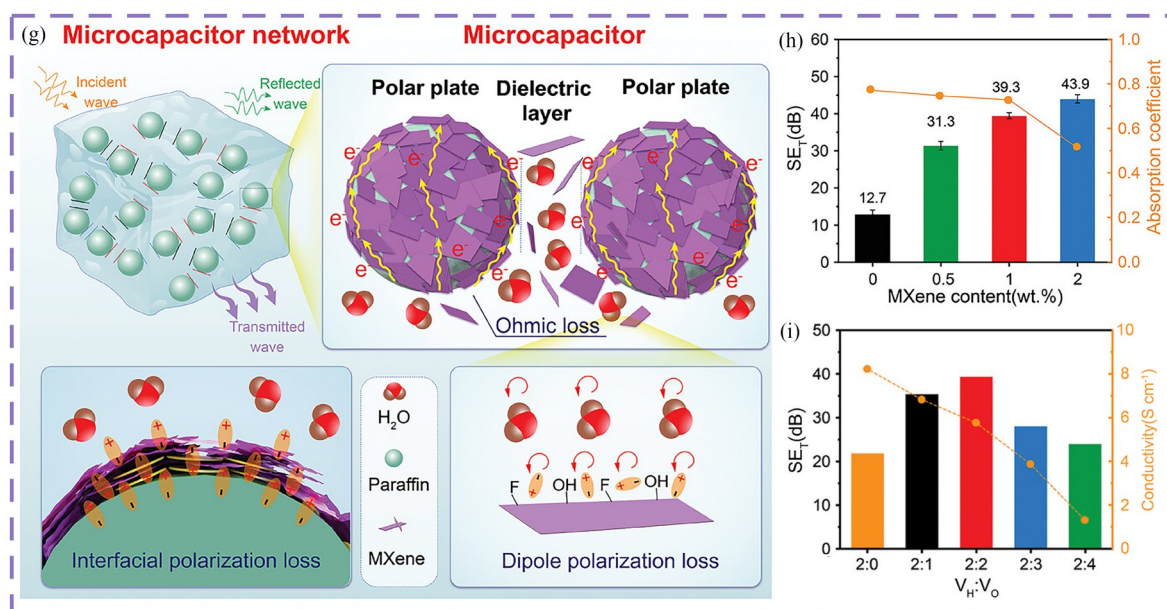
相比于通过添加无机导电填料或导电聚合物来提高电磁屏蔽效能,对其内部结构进行合理设计同样可实现优异的屏蔽效果.Fang等<sup>[49]</sup>通过冰模板法制备了具有定向孔结构的PVA/甘油(Gly)/MXene(PMG)有机水凝胶,实现了多频段绿色电

磁屏蔽.该材料利用甘油调控水凝胶体系,获得 $0.22 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ 的较低电导率,以降低电磁波反射;同时,定向冷冻形成的致密孔结构(孔隙率 $0.001427 \text{ cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ )增强界面极化损耗,促进电磁波衰减.在X波段,MXene含量为0.78 wt%的PMG20-3凝胶实现42.34 dB的电磁屏蔽效能,且吸收损耗占主导( $A/R > 1$ ).在太赫兹波段(0.2~2 THz),该凝胶的吸收率达99.9%,优于多数已报道材料.这种非磁性材料的多频段吸收机制归因于:(1)甘油-水二元溶剂在交变电磁场下诱导偶极子旋转产生极化损耗;(2)MXene与聚合物/液相界面增强了对电磁波的捕获;(3)致密孔结构延长了电磁波传播路径.该材料同时具备优异机械性能,能够承受1000次压缩循环,同时具有红外隐身能力,为多功能绿色屏蔽材料设计提供新思路.如图5(a)所示,He等<sup>[50]</sup>通过重力诱导液态金属纳米颗粒(LMNPs)在PVA/CNF凝胶基体内部自然沉降,构建了具有不对称梯度结构的复合气凝胶、水凝胶和有机凝胶,分别标记为APCML、HPCML和OPCML,其中PCML代表PVA/CNF/LM/MXene.图5(b)展示了该凝胶材料的电磁屏蔽机制,LMNPs浓度自下而上梯度递增,形成非对称导电分布:顶部低导电区改善阻抗匹配,促进电磁波进入;中部梯度过渡区增强电导损耗与极化损耗;底部高导电层反射剩余电磁波并引发再吸收过程.结合MXene与LM填料的界面极化、偶极极化和多孔结构的多重反射,三种凝胶均展现出吸收主导的屏蔽特性, $SE_T \geq 71.1 \text{ dB}$ ,如图5(c)所示.由图5(d)和5(e)可知,HPCML水凝胶因水分子的高介电常数和离子导电性,反射最强,反射系数 $R=47.7\%$ ,屏蔽效能也最高, $SE_T$ 高达86.9 dB.APCML气凝胶阻抗匹配最佳,反射最低, $R=6.4\%$ , $SE_T=71.1 \text{ dB}$ .OPCML有机凝胶(甘油/水介质)性能介于二者之间, $R=32.3\%$ , $SE_T=76.8 \text{ dB}$ .通过调控凝胶内部介质类型(空气介质、甘油/水介质和水介质),可有效调节屏蔽性能, $SE_T$ 值的相对大小为:APCML < OPCML < HPCML.该研究为开发低反射、高屏蔽性能的梯度材料提供了新策略.如图5(f)所示,Fang等<sup>[51]</sup>提出了一种基于微电容器网络结构的有机水凝胶,简称M-有机水凝胶,用于实现以吸收主导的电磁屏蔽.从图5(g)可以看出,该材料通过Pickering乳液模板法,将石蜡-纳米黏土/

MXene核壳微球均匀分散于聚丙烯酰胺水凝胶基质中，形成类平行板的微电容器网络。其中，相邻微球的导电外壳作为电极板，间隙中的水凝胶充当介电层。该结构通过电极板上的微电流损

耗、界面极化以及介电层内的偶极子极化，显著增强了对电磁波的吸收能力。图5(h)结果表明，在X和Ku波段范围内，该材料实现了吸收主导的电磁屏蔽效果，吸收系数 $A > 0.7$ ，同时 $SE_T$ 高





**Fig. 5** (a) Schematic of internal structures in APCML, OPCML and HPCML; (b) Electromagnetic shielding mechanism of PCML gel with asymmetric gradient structure; (c) SE<sub>T</sub> of PCML gel in the X-band; (d)  $R$ ,  $A$ ,  $T$  coefficients of PCML gel; (e) SE<sub>R</sub>, SR<sub>A</sub>, SE<sub>T</sub> of APCML, OPCML, HPCML gels (Reprinted with permission from Ref. [50]; Copyright (2024) Wiley-VCH). (f) Schematic illustration of the synthesis of M organo-hydrogel; (g) Schematic illustration of the microcapacitor network model and relevant EMI shielding mechanism; (h) Average SE<sub>T</sub> and  $A$  values of M organo-hydrogels with different MXene concentrations in the Ku band; (i) Conductivity and average SE<sub>T</sub> values (Ku band) of M hydrogel and M organo-hydrogels. (Reprinted with permission from Ref. [51]; Copyright (2024) Wiley-VCH).

达 39.3 dB. 此外, 图 5(i) 显示 M-有机水凝胶的电导率为 1.3~8.2 S·cm<sup>-1</sup>, 较低的电导率有助于改善阻抗匹配, 减少电磁波反射, 减少二次污染. 这种微电容器网络策略为开发高性能、低反射的智能电磁屏蔽材料提供了新思路.

对上述内容中的关键数据进行归纳和总结, 如表 1 所示. 可以看出, 无论是加入无机导电填

料还是导电聚合物, 均能通过增强导电损耗显著增强水凝胶的电磁屏蔽效能. 然而, 过度追求高导电性不仅会导致反射损耗占主导地位, 还会在周围环境中产生二次电磁波污染, 造成不利影响. 对水凝胶进行结构设计可以有效解决这一问题, 无论是设计定向孔径结构、无机导电填料的不对称梯度结构还是构建微电容器网络结构, 均

**Table 1** Comparative performance of electromagnetic shielding hydrogel materials.

Sample	Conductivity (S·m <sup>-1</sup> )	EMI SE (dB)	Thickness (mm)	SSE (dB·mm <sup>-1</sup> )	Ref.
P(AM-co-AA) hydrogel	0.48	27.00	2.50	10.80	[89]
LM/TO-CNF/PVA hydrogel	25.69	33.14	3.00	11.05	[92]
PAA/CS@ACC hydrogel	22.79	90.63	9.71	9.33	[93]
SGs/CNTs/PAM/CCS hydrogel	0.26	42.31	4.50	9.40	[32]
MXene and H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -treated PEDOT: PSS/PVA hydrogel	0.75	41.00	4.50	9.11	[46]
PVA/PAA/PEGDMA/PEDOT:PSS hydrogel	1.24	20.58	1.00	20.58	[48]
PVA/Gly/MXene hydrogel	0.22	42.34	2.00	21.17	[49]
PVA/CNF/LM/MXene (A) hydrogel	–	71.10	3.00	23.7	[50]
PVA/CNF/LM/MXene (H) hydrogel	–	86.9	3.00	28.97	[50]
PVA/CNF/LM/MXene (O) hydrogel	–	76.80	3.00	25.60	[50]
PVA/PNTs/CNF hydrogel	44.35	63.60	2.00	31.80	[47]
PAM/PM/MXene organo-hydrogel	600.00	39.30	1.50	26.20	[51]

实现了以吸收为主导的屏蔽效果. 这种结构设计策略为构建具有低反射、高屏蔽性能的电磁屏蔽水凝胶材料开辟了新思路.

### 3 应用

#### 3.1 应用场景

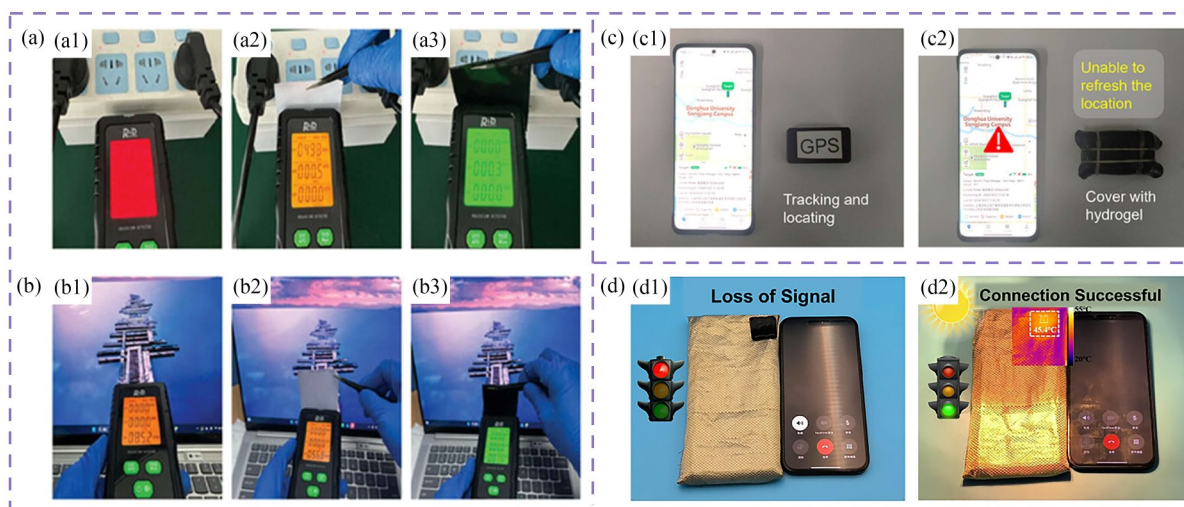
除了提高水凝胶材料的电磁屏蔽效能, 考虑其在实际场景中的应用效果也至关重要. 目前水凝胶屏蔽材料主要应用于辐射防护、个人信息保护等领域.

Qian等<sup>[94]</sup>基于水凝胶电磁屏蔽材料在变形时, 其变薄区域会使电磁波的透过率增加这一特性, 开发了一种新型电磁波传感系统. 该系统将水凝胶贴附于手指表面, 用于监测2.4 GHz频段Wi-Fi信号的强度变化. 该传感系统结构包括作为信号源的计算机热点, 以及一个被水凝胶覆盖的连接微控制单元(MCU)的小型贴片天线接收器. 信号强度由自主开发的计算机软件实时采集. 实验表明, 当手指伸直时, Wi-Fi信号强度减弱至约-55 dBm; 手指弯曲时, 信号强度相对更高且稳定在-40 dBm左右. 不同于依赖电阻变化的传统应变传感器, 此基于电磁屏蔽机理的电磁波传感系统有效避免了通电热效应对材料性能的影响. 如图6(a)和6(b)所示, Lin等<sup>[95]</sup>验证了水凝胶电磁屏蔽材料对电源及电子产品辐射的实际屏蔽效果. 在无屏蔽材料时, 电源电场辐射与计

算机射频辐射分别高达 $565 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ 和 $85.2 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ . 使用同尺寸白纸遮挡时, 辐射值仅轻微降低, 仍显示警示标识. 采用所制备的水凝胶遮挡后, 电源电磁辐射立即由白纸遮挡时的 $498 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ 降至 $0 \text{ V}\cdot\text{m}^{-1}$ , 计算机射频辐射则由 $56.8 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ 显著降至 $7.5 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ . 由此可见, 水凝胶电磁屏蔽材料展现出良好的商业化可行性与稳定性. 如图6(c)所示, He等<sup>[32]</sup>将水凝胶电磁屏蔽材料用于保护位置信息. 当GPS模块暴露于外界环境时, 手机定位系统可以检测到该模块的实时位置信息, 在用水凝胶对GPS模块进行封装之后, 手机定位系统无法获取GPS模块所处位置, 有效保护了个人信息. 由图6(d)可知, Tang等<sup>[52]</sup>制备了一种具有可调屏蔽功能的水凝胶材料, 通过两部手机间的通讯实验验证了其可调屏蔽功能. 在“开启状态”(强屏蔽)下, 电磁波被阻断, 手机信号传输中断. 在“关闭状态”(弱屏蔽)下, 电磁波以较低损耗透过, 手机成功接通信号.

#### 3.2 刺激响应型电磁屏蔽水凝胶

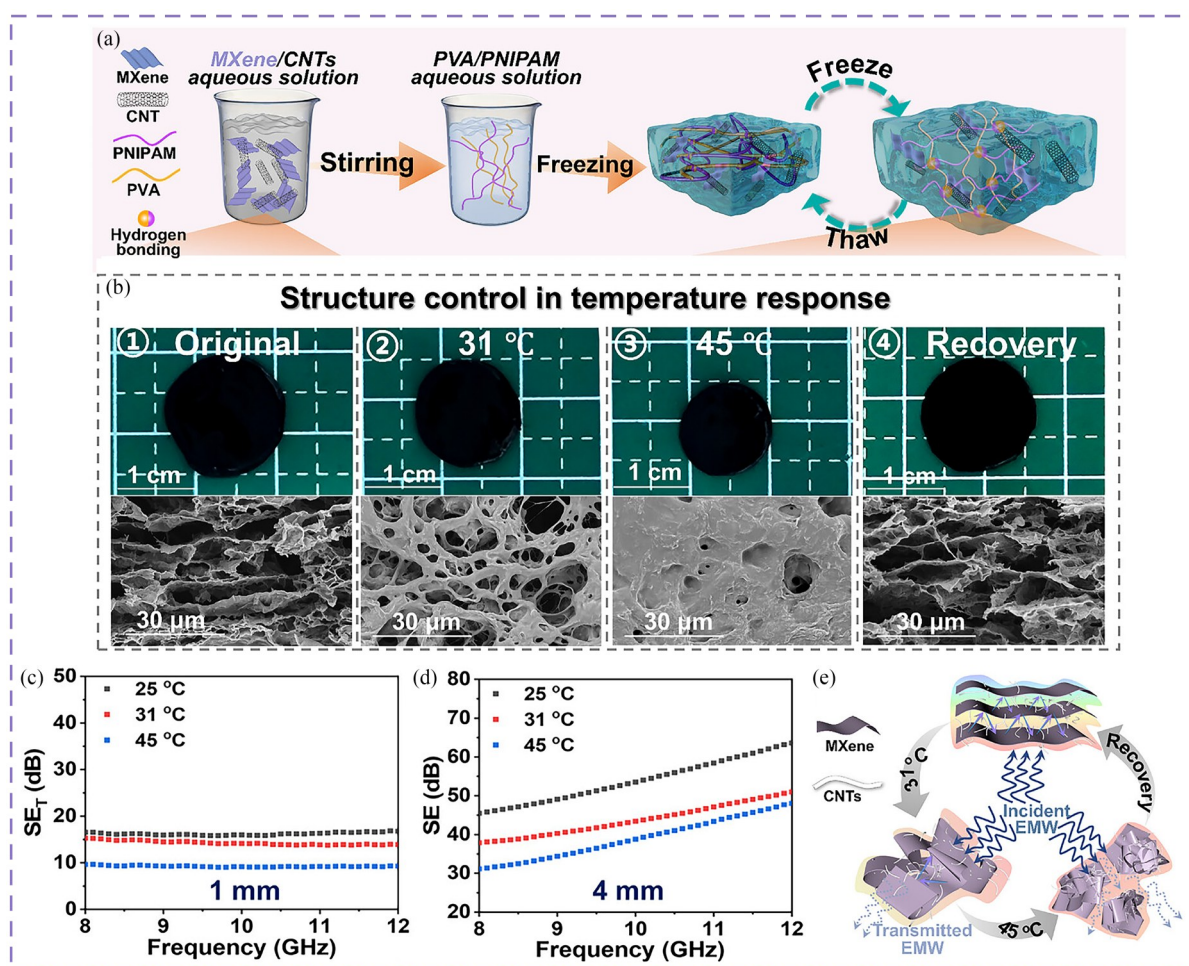
一般而言, 固定的成分和结构只能对应一种固有的电磁屏蔽性能. 因此, 传统电磁屏蔽材料的电磁屏蔽效能往往需要通过改变其成分、结构或更换原有屏蔽材料来调节. 与具有固定电磁屏蔽效能的传统材料相比, 开发能够响应外界刺激、动态调节电磁屏蔽性能的刺激响应型电磁屏蔽水凝胶材料至关重要.



**Fig. 6** (a, b) Electromagnetic shielding effectiveness tests against electromagnetic radiation sources from power and electronic devices in practical scenarios (Reprinted with permission from Ref. [95]; Copyright (2024) Wiley-VCH). (c) Demonstration of reversible on/off-switchable shielding functionality using mobile devices (Reprinted with permission from Ref. [32]; Copyright (2025) Wiley-VCH). (d) Interference effects of hydrogel on GPS tracker signals (Reprinted with permission from Ref. [52]; Copyright (2025) Wiley-VCH).

刺激响应型电磁屏蔽水凝胶通常兼具电磁屏蔽和对外界刺激响应特性. 其中, 屏蔽功能主要来源于所添加的导电材料, 而刺激响应功能则由特定材料引发结构变化来实现. Guo 等<sup>[27]</sup>通过超声波使 CNT 包覆液态金属, 并利用紫外原位聚合法制备了 CNT@LM/PAM/明胶(Gel)双网络水凝胶(LMCPG). 由于 LMCPG 水凝胶独特的多孔结构以及 CNT 与 LM 液滴之间形成的连续导电电路, 使得其在电磁屏蔽领域具有突出表现. 当水凝胶厚度为 4 mm 且 LM 含量增至 8 g 时, 其在 X 波段的  $SE_T$  可以达到 75.69 dB, 远超商业标准的 20 dB. 由于 LM 具有较好的流动性, 水凝胶形变时会诱导 CNT@LM 形成新的导电路径, 因此 LMCPG 水凝胶从 0% 拉伸至 200% 时, 电磁屏蔽效能不衰减反而增强. 继续拉伸至 1000% 应变时, 因 LM 液滴间距增大导致导电网络断裂, 屏

蔽效能显著下降, 实现智能“开关”行为. 此外, LMCPG 水凝胶的双网络结构赋予材料优异的机械性能, 拉伸强度为 117 kPa、应变为 1033%, 同时经过 2000 次弯曲后仍保持 98% 屏蔽性能, 具有优异的耐久性. Tang 等<sup>[52]</sup>报道了一种基于聚 *N*-异丙基丙烯酰胺(PNIPAM)/PVA 互穿网络和 MXene-碳纳米管热阻网络的温敏相变水凝胶(PMCP), 实现了温度触发的电磁屏蔽开关功能, 如图 7(a)和 7(b)所示. 由图 7(c)和 7(d)可以发现该材料在 X 波段展现出可调谐的电磁屏蔽效能. 当水凝胶厚度为 1 mm 时,  $SE_T$  随温度升高从 16.2 dB 降至 9.3 dB, 实现“开/关”切换; 当厚度为 2 mm 时,  $SE_T$  从 27.0 dB 降至 11.3 dB; 厚度为 4 mm 时,  $SE_T$  从 53.9 dB 降至 37.0 dB, 实现“强/弱”屏蔽状态切换. 水凝胶屏蔽效能的调控机制源于温度诱导的双重协同效应: (1) PNIPAM



**Fig. 7** (a) Scheme for the fabrication of PMCP hydrogel; (b) Optical photographs and cross-sectional SEM images of PMCP hydrogel at different temperatures; (c, d) Tunable shielding efficiency of PMCP-2 hydrogel with varied thicknesses at different temperatures; (e) Schematic of the temperature-dominated electromagnetic shielding mechanism of PMCP hydrogel (Reprinted with permission from Ref. [52]; Copyright (2025) Wiley-VCH).

网络在低临界溶液温度(31 °C)发生相变收缩, 破坏 MXene-CNTs 导电通路; (2)升温导致 MXene 电导率增加而CNTs的电导率降低, 因此升温导致 MXene 和 CNTs 的界面电阻显著增大, 所以凝胶的整体电导率下降(图 7(e)). 此外, MXene 赋予材料光热响应特性, 通过氙灯照射可在 85 s 内触发屏蔽关闭, 水凝胶的  $SE_T$  降至 9.3 dB. 该水凝胶还具备自修复能力, 修复后  $SE_T$  仍能保持 52.1 dB, 修复效率达到 96.7%, 且经 15 次温度循环后性能无衰减, 表现出优异的循环稳定性.

## 4 结论与展望

本综述系统阐述了水凝胶材料在电磁屏蔽领域的研究进展. 水凝胶凭借其独特的结构特性, 展现出显著的电磁屏蔽潜力: 内部富含的水分子可以通过极化旋转耗散电磁能; 多孔结构能够延长电磁波传播路径并增强多重反射与散射效应; 引入的导电网络则通过导电损耗与界面极化机制进一步提升衰减能力. 为优化其性能, 研究者已开发出多种有效策略, 包括填料复合、结构设计及智能响应系统的构建. 在实际应用方面, 水凝胶电磁屏蔽材料表现出广泛的应用前景, 可用于可穿戴传感设备(如监测 Wi-Fi 信号变化)、辐射防护(有效屏蔽电源和电子产品辐射)、位置信息保护(干扰 GPS 信号定位)以及开发智能响应材料(如应变响应的 LMCPG 水凝胶、温敏的 PMCP 水凝胶). 特别是刺激响应型水凝胶, 能通过材料形变或环境温度变化等外界刺激动态调控导电网络结构与屏蔽性能, 实现“开关”切

换或“强弱”可调的智能屏蔽功能, 为下一代自适应电磁屏蔽材料的设计提供了重要方向.

尽管水凝胶基电磁屏蔽材料取得了显著进展, 但是未来研究仍需关注以下关键挑战和发展方向.

1. 高屏蔽效能与优异机械性能的平衡: 高填料含量仍是实现水凝胶超高屏蔽性能的主要手段, 但会损害水凝胶的拉伸性、透明性和自愈性等固有优势. 未来仍需深入探索如何在低填料负载下, 通过精细的结构设计(如仿生结构、多级结构)和新型复合材料策略, 实现屏蔽效能与综合性能的协同优化.

2. 拓展刺激响应类型与调控精度: 现有的刺激响应型水凝胶(如应变、温度响应)种类有限, 且调控范围和精度有待提高. 探索对光、电、磁、pH、湿度等多种外界刺激响应的新型智能水凝胶, 并实现更宽范围、更快响应速度、更精确阈值控制的屏蔽性能动态调节, 将成为未来重要的研究方向.

3. 推动实际应用与多功能集成: 需要加强材料在复杂真实环境(如不同温湿度、长期使用)下的稳定性、耐久性和可靠性评估. 同时, 探索水凝胶电磁屏蔽材料与其他功能(如传感、驱动、能量收集、热管理、生物相容性)的集成, 开发面向柔性电子、可穿戴设备、生物医疗和智能隐身等领域的多功能一体化器件.

通过持续的基础研究与技术创新, 水凝胶基电磁屏蔽材料有望克服现有瓶颈, 发展成为下一代高性能、智能化、环境友好的电磁防护解决方案.



**作者简介:** 赵桂艳, 女, 1979年生. 辽宁石油化工大学教授、硕士研究生导师. 2008年获得博士学位, 2008~2015年于中国科学院长春应用化学研究所高分子物理与化学国家重点实验室工作, 2015年11月至今任职于辽宁石油化工大学新能源与新材料学院. 2022年获得辽宁省优秀硕士论文指导教师荣誉, 并在 *Carbohydr. Polym.*、*Compos. Commun.*、*J. Appl. Polym. Sci.* 等期刊发表论文 30 余篇, 申请专利 10 余项. 主要研究方向为聚合物共混改性、生物降解高分子材料高性能化、反应加工及有机无机杂化材料.



**作者简介:** 朱雨田, 男, 1979年生. 杭州师范大学材料与化学化工学院教授, 主要研究方向为高分子导电/导热/电磁屏蔽复合材料、柔性传感材料、弹性体废弃物回收及高值再利用. 以一作/通讯作者在 *Nat. Commun.*、*Angew. Chem. Int. Ed.*、*Adv. Funct. Mater.* 等期刊发表论文 120 余篇, 他引 7000 余次. 获浙江省自然科学基金杰出青年基金、浙江省自然科学基金杰出青年基金延续项目; 主持国家自然科学基金项目 5 项. 担任 Springer 出版集团 *Advanced Composites and Hybrid Materials* 期刊编委, 以第一完成人获得吉林省学术成果奖二等奖.

## REFERENCES

- 1 Chen, P.; He, S. B.; Wang, T. Y.; Wang, C. C.; Tao, J. R.; Li, Y. W. Melanin-like nanofibers with highly ordered structures achieve ultrahigh specific electromagnetic interference shielding efficiency. *Nat. Commun.*, **2025**, 16, 7127.
- 2 Li, S. Y.; Li, X.; Liang, Y. Y.; Shi, J. J.; Du, Y. K.; Chen, W. Q.; Wang, Y.; Dai, H. Q.; Shen, Y.; Zhu, N. F.; Ma, T. H.; Liu, C. W.; Li, J. Z.; Xia, C. L. Full-lifecycle biocarbon foam through multiscale pore engineering toward ultra-high electromagnetic absorption. *Adv. Funct. Mater.*, **2025**, e13375.
- 3 Yin, G.; Wu, J.; Qi, C. Z.; Zhou, X. F.; Yu, Z. Z.; Zhang, H. B. Pickering emulsion-driven MXene/silk fibroin hydrogels with programmable functional networks for EMI shielding and solar evaporation. *Nano Micro Lett.*, **2025**, 17(1), 312.
- 4 Zhu, W. J.; Feng, R. Y.; Li, Z. X.; Yang, W.; Zhang, C.; Du, S. X.; Ding, Z. Z.; Cao, Z. Y.; Dong, J. Y.; Kong, L. Y.; Li, Y. F. Design strategies and research progress of macrostructure graphene-based electromagnetic shielding materials. *Carbon*, **2025**, 242, 120432.
- 5 Guo, W. Y.; Jiang, Y. T.; Wang, B.; Ma, M. G. Multifunctional cellulose nanofiber/MXene zwitterionic hydrogel for dual-mode strain and temperature sensing with high-performance electromagnetic shielding. *J. Mater. Sci. Technol.*, **2026**, 246, 299–313.
- 6 Luo, Y.; Guo, Y. B.; Wei, C.; Chen, J. W.; Zhao, G. Y.; Yuan, Q.; Zhu, Y. T. Lightweight, compressible, and stretchable composite foams for ultra-efficient and high-stable electromagnetic interference shielding materials. *Carbon*, **2023**, 215, 118480.
- 7 Teng, F. D.; Yuan, Y.; Li, N.; Cao, Y. T.; Yu, J. R.; Wang, Y.; Hu, Z. M. Molecularly engineered para-aramid papers with plasma-activated interfacial precision for multifunctional extreme-environment applications. *Compos. Part B Eng.*, **2025**, 307, 112881.
- 8 Sima, H. F.; Liu, B.; Shi, X. L.; Zhang, C. L. CNT@CNF/MXene hydrogel with complete conductive network for flexible anti-freeze sensor and electromagnetic shielding. *Carbohydr. Polym.*, **2025**, 366, 123825.
- 9 Tian, Y. C.; Zhu, Y.; Qian, K. P.; Miao, M.; Ye, J. H.; Feng, X. Liquid metal integrated cellulose nanocrystal/polyacrylic acid dual-network hydrogel towards high-performance wearable sensing and electromagnetic interference shielding. *J. Mater. Sci. Technol.*, **2026**, 251, 124–134.
- 10 Zhang, Y. F.; Li, Z. H.; Xu, Z. S.; Xiao, M. Y.; Yuan, Y.; Jia, X. L.; Shi, R.; Zhang, L. Q.; Wan, P. B. Flexible healable electromagnetic-interference-shielding bioelastic hydrogel nanocomposite for machine learning-assisted highly sensitive sensing bioelectrode. *Aggregate*, **2024**, 5(5), e566.
- 11 李亚南, 王凯, 刘得军, 谭志良. MXene基复合材料在电磁屏蔽领域的研究进展. *材料导报*, **2025**, 39(14), 31–41.
- 12 牟欣雨, 张英汉, 郑琦, 王连军, 江莞. 高导电聚(3,4-乙烯二氧噻吩)-聚苯乙烯磺酸基水凝胶的构筑及其电磁屏蔽性能. *东华大学学报(自然科学版)*, **2025**, (1671–0444), 1–11.
- 13 Guo, Y. B.; Chen, X.; Wei, C.; Luo, Y.; Chen, J. W.; Zhu, Y. T. Flexible conductive polymer composite film with sandwich-like structure for ultra-efficient and high-stability electromagnetic interference shielding. *Compos. Sci. Technol.*, **2024**, 255, 110717.
- 14 Wang, C. B.; Chen, X.; Zhang, Y. T.; Chen, J. W.; Zhu, Y. T. Enhanced electromagnetic interference shielding, thermal management, and Joule heating performance in polymer composite film by incorporating hybrid graphene-silver nanowire networks. *Mater. Today Nano*, **2025**, 29, 100583.
- 15 陈葵, 常晓华, 韩媛媛, 赵桂艳, 朱雨田. 水凝胶基柔性应变传感材料设计及研究进展. *高分子通报*, **2025**, 38(8), 1193–1208.
- 16 Chen, R.; Wang, L.; Ji, D.; Luo, M. Q.; Zhang, Z. H.; Zhao, G. Y.; Chang, X. H.; Zhu, Y. T. Highly stretchable, conductive, and self-adhesive starch-based hydrogel for high-performance flexible electronic devices. *Carbohydr. Polym.*, **2025**, 352, 123220.
- 17 Wang, L.; Luo, M. Q.; Zhang, Z. H.; Ji, D.; Chang, X. H.; Zhu, Y. T. Ultra-stretchable, robust, self-healable conductive hydrogels enabled by the synergistic effects of hydrogen bonds and ionic coordination bonds toward high-performance e-skins. *Chem. Eng. J.*, **2024**, 500, 156800.
- 18 丁晶晶, 剧芳, 刘春华, 唐龙祥, 朱元元. 高强度银纳米线/聚丙烯酰胺复合水凝胶的制备及导电性能研究. *高分子学报*, **2022**, 53(8), 942–951.
- 19 He, T. A.; Liu, C. Y.; Chen, Z. W.; Nie, C. H.; Ren, W. P.; Zhang, Y. J.; Zhang, H.; Ji, G. B. Multi-layer alternating structured alginate hydrogels featuring exceptional flexibility and electromagnetic shielding performance. *J. Colloid Interface Sci.*, **2025**, 699, 138103.

- 20 Li, C. B.; Yao, X. M.; Li, D.; Zhang, F.; Chen, J. Z.; Wu, J. Y.; Guo, L.; Zhang, W. Z.; Wu, Y.; Zheng, Q. B. Highly stretchable and conductive 3D graphene skeleton/polyacrylamide/LiCl nanocomposite hydrogels for high-performance electromagnetic interference shielding. *Carbon*, **2025**, 244, 120712.
- 21 Zhu, Y. Y.; Liu, J.; Guo, T.; Wang, J. J.; Tang, X. Z.; Nicolosi, V. Multifunctional  $Ti_3C_2Tx$  MXene composite hydrogels with strain sensitivity toward absorption-dominated electromagnetic-interference shielding. *ACS Nano*, **2021**, 15(1), 1465–1474.
- 22 胡煦煦, 魏子健, 谢兆新, 张冉, 战艳虎. 兼具应变传感和电磁屏蔽双功能的柔性水凝胶基聚合物的研究进展. *复合材料学报*, **2023**, 40(12), 6554–6571.
- 23 Yang, Y. F.; Han, M. R.; Liu, W.; Wu, N.; Liu, J. R. Hydrogel-based composites beyond the porous architectures for electromagnetic interference shielding. *Nano Res.*, **2022**, 15(10), 9614–9630.
- 24 Yang, Y. F.; Wu, N.; Li, B.; Liu, W.; Pan, F.; Zeng, Z. H.; Liu, J. R. Biomimetic porous MXene sediment-based hydrogel for high-performance and multifunctional electromagnetic interference shielding. *ACS Nano*, **2022**, 16(9), 15042–15052.
- 25 Yuan, Y.; You, Q.; Qiu, S. J.; Wang, Z. M.; Chen, Y. H.; Wang, C. Y.; Zhou, L.; Liu, H. X. Tough, self-healing, strain-sensitive MXene/Ni hydrogel for electromagnetic shielding and wearable sensors. *ACS Appl. Polym. Mater.*, **2024**, 6(18), 11406–11419.
- 26 Zhao, B.; Bai, Z. Y.; Lv, H. L.; Yan, Z. K.; Du, Y. Q.; Guo, X. Q.; Zhang, J. C.; Wu, L. M.; Deng, J. S.; Zhang, D. W.; Che, R. C. Self-healing LiquidMetal magnetic hydrogels for smart feedback sensors and high-performance electromagnetic shielding. *Nano Micro Lett.*, **2023**, 15(1), 79.
- 27 Guo, H. T.; Shi, Y. Y.; Pan, F.; Zheng, S. H.; Chai, X. L.; Yang, Y.; Jiang, H. J.; Wang, X.; Li, L. X.; Xiu, Z.; Wang, J. L.; Lu, W. Tough, stretchable dual-network liquid metal-based hydrogel toward high-performance intelligent on-off electromagnetic interference shielding, human motion detection and self-powered application. *Nano Energy*, **2023**, 114, 108678.
- 28 Ji, Y.; Jang, J. M.; Kim, J. Y.; Choi, E.; Jeong, H.; Lee, C. H.; Lee, S.; Kwak, Y.; Cho, Y.; Lee, H.; Myung, J. H.; Kim, B.; Kim, S. J.; Kim, D. W. SWCNT/MWCNT binderless hybrid hydrogel: towards large-scale high-performance EMI shielding coating at commercial level. *Carbon*, **2025**, 238, 120250.
- 29 Zhou, T.; Zhang, D. H.; Diao, K. L.; Du, J. J.; Hu, Y. P.; Lei, Z.; Liu, D. J.; Liu, S.; Qin, S. H. Constructing PAM/PEG electromagnetic shielding hydrogels based on MWCNTs@ $TiO_2$ . *Mater. Today Nano*, **2025**, 29, 100606.
- 30 任家豪, 熊杨凯, 李继鹏, 孟庆飞, 汪国庆. 石墨烯片负载量对聚乙烯醇-聚丙烯酰胺双网络水凝胶电磁屏蔽和微波吸收性能的影响. *机械工程材料*, **2025**, 49(5), 37–44.
- 31 Chen, J.; Liu, Y. L.; Sun, D. X.; Qi, X. D.; Yang, J. H.; Wang, Y. Recent progress in structural design of graphene/polymer porous composites toward electromagnetic interference shielding application. *Chem. Eng. J.*, **2024**, 495, 153586.
- 32 He, J. Z.; Ma, Z. K.; Liu, S. L.; Lu, Y. G.; Wu, Q. L. SGs-CNTs/PAM/CCS triple network hydrogel: neural architecture inspired for broadband EMI shielding and environmental resilience. *Adv. Funct. Mater.*, **2025**, 35(37), 2507404.
- 33 范克凡, 李鲲, 杨志坚, 程珏, 张军营. 双网络MXene水凝胶的制备及其电磁和紫外屏蔽性能. *复合材料学报*, **2023**, 40(7), 3939–3949.
- 34 Guo, J. L.; Zhang, T. Y.; Hao, X. Y.; Liu, S. J.; Zou, Y. X.; Li, J. J.; Wu, W.; Chen, L. M.; Liu, X. Q. Aramid nanofiber/MXene-reinforced polyelectrolyte hydrogels for absorption-dominated electromagnetic interference shielding and wearable sensing. *Nano Micro Lett.*, **2025**, 17(1), 271.
- 35 Xu, G. C.; Nie, Y. H.; Gu, C. W.; Liang, H. Q.; Yang, H. C.; Zhan, H. F.; Zhang, C.; Lü, C. F.; Chen, Y. M.; Xu, Z. K. MXene-embedded nanocomposite hydrogels with triple-gradient architecture. *Chem. Eng. J.*, **2025**, 519, 164843.
- 36 Yang, Y. F.; Li, B.; Wu, N.; Liu, W.; Zhao, S. Y.; Zhang, C. J.; Liu, J. R.; Zeng, Z. H. Biomimetic porous MXene-based hydrogel for high-performance and multifunctional electromagnetic interference shielding. *ACS Mater. Lett.*, **2022**, 4(11), 2352–2361.
- 37 Wang, H.; Zhuang, T. T.; Wang, J.; Sun, X.; Wang, Y. Z.; Li, K. C.; Dai, X.; Guo, Q. Y.; Li, X. H.; Chong, D. T.; Chen, B.; Yan, J. J. Multifunctional filler-free PEDOT: PSS hydrogels with ultrahigh electrical conductivity induced by lewis-acid-promoted ion exchange. *Adv. Mater.*, **2023**, 35(33), 2302919.
- 38 Wang, J.; Li, Q.; Li, K. C.; Sun, X.; Wang, Y. Z.; Zhuang, T. T.; Yan, J. J.; Wang, H. Ultra-high electrical conductivity in filler-free polymeric hydrogels toward thermoelectrics and electromagnetic interference shielding. *Adv. Mater.*, **2022**, 34(12), 2109904.
- 39 Zhu, T. Y.; Jiang, W. J.; Wu, S.; Huang, Z. J.; Liu, Y. L.; Qi, X. D.; Wang, Y. Multifunctional MXene/PEDOT: PSS-based phase change organohydrogels for electromagnetic interference shielding and medium-low temperature infrared stealth. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2024**, 16(12), 15372–15382.

- 40 Diao, K. L.; Zhou, T.; Zhang, D. H.; Liu, D. J.; Du, J. J.; Zou, K. X.; Qin, S. H. Unlock multi-function: Cnts@COF hydrogel with high toughness, arbitrary shape adaptability, strong electromagnetic shielding and heat insulation performance. *Prog. Org. Coat.*, **2025**, 208, 109469.
- 41 Mei, L.; Ouyang, W. C.; Zhou, F.; Pan, Z. C.; Xu, L. M.; Bai, Y.; Lu, Q. M.; Luo, T. Z.; Wu, Z. W. Low-cost multifunctional antimony-doped tin oxide/polyacrylamide-chitosan double-network hydrogels with good mechanical properties and excellent electromagnetic interference shielding performance in terahertz band. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **2025**, 196, 109018.
- 42 Park, S. Y.; Choi, S. J.; Kim, J. C.; Joe, D. J.; Lee, H. E. Self-healable and conductive hydrogel nanocomposite with high environmental stability for electromagnetic-interference-free electrocardiography patches. *Energy Environ. Mater.*, **2025**, 8(5), e70039.
- 43 柴哲元, 王子成. 阻抗渐变型丙烯酸复合涂层的可控构筑及其5G高频波段低反射高效电磁屏蔽研究. *高分子学报*, **2024**, 55(1), 58–66.
- 44 Lu, Y.; Li, S. N.; Ma, Y. Y.; Deng, F.; Yue, Y. Y.; Jiang, S. H.; Ye, M. Q.; Zhou, Y. H.; Xiao, H. N.; Han, J. Q. Nanocellulose-assisted construction of conductive gradient hydrogel for remote actuated and self-sensing soft actuator. *Carbohydr. Polym.*, **2025**, 368, 124092.
- 45 Mo, Y. Y.; Zhu, M. N.; Sun, S.; Sun, D. Z.; Lu, D. D. Microgel double-crosslinked hydrogel with excellent mechanical properties for flexible electronics. *J. Colloid Interface Sci.*, **2025**, 699, 138155.
- 46 Li, P.; Wang, H. N.; Ju, Z. S.; Jin, Z. Z.; Ma, J. G.; Yang, L.; Zhao, X. N.; Xu, H. Y.; Liu, Y. C.  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$  MXene- and sulfuric acid-treated double-network hydrogel with ultralow conductive filler content for stretchable electromagnetic interference shielding. *ACS Nano*, **2024**, 18(4), 2906–2916.
- 47 Meng, L. S.; Yang, S.; Ma, Y.; Zou, Y. P.; Zhang, Y.; Chen, G.; Dong, C. J.; Guan, H. T. Porous polypyrrole nanotube-based organohydrogels: versatile materials for robust electromagnetic interference shielding in harsh environments. *Chem. Eng. J.*, **2024**, 479, 147643.
- 48 Zhang, Z. Q.; Liu, G. D.; Wu, J. K.; Jiang, X. H.; Liu, H. B.; Li, Z. J. High-strength dual-network hydrogels with chain-growth enhancement for multifunctional flexible sensors, triboelectric nanogenerators, and EMI shielding. *Chem. Eng. J.*, **2025**, 519, 165710.
- 49 Fang, J. Y.; Xu, J.; Zuo, P. Y.; Zhou, Y. K.; Tang, C. H.; Qian, J.; Wang, R. Q.; Liu, X. Y.; Zhuang, Q. X. New system for green EMI shielding: organohydrogel with multi-band green electromagnetic shielding, sensing, and infrared-stealth capacity. *J. Mater. Sci. Technol.*, **2025**, 219, 1–9.
- 50 He, M.; Lv, X. L.; Li, Z. H.; Li, H. Y.; Qian, W.; Zhu, S. Y.; Zhou, Y. M.; Wang, Y. J.; Bu, X. H. Research on efficient electromagnetic shielding performance and modulation mechanism of aero/organo/hydrogels with gravity-induced asymmetric gradient structure. *Small*, **2024**, 20(51), 2403210.
- 51 Fang, M.; Huang, L. Y.; Cui, Z. R.; Yi, P.; Zou, H. H.; Li, X. F.; Deng, G.; Chen, C. Y.; Geng, Z.; He, J. Z.; Sun, X.; Shui, J. L.; Yu, R. H.; Liu, X. F. Phase-transition microcapacitor network in organohydrogel for absorption-dominated electromagnetic interference shielding and multi-mode intelligent responsiveness. *Adv. Funct. Mater.*, **2025**, 35(18), 2418870.
- 52 Tang, J. Y.; Gao, Y.; Li, T.; Qin, R. C.; Qi, Q.; Meng, F. B. Thermoresistive network in phase-transition hydrogel: achieving on/off switchable electromagnetic interference shielding. *Adv. Funct. Mater.*, **2025**, 35(36), 2504959.
- 53 Yan, Q.; Liu, Z. L.; Xiong, J. H.; Lian, H. X.; Chen, H.; Fei, T.; Chen, Y. X.; Zheng, H. W.; Zhao, X.; Xu, L. L.; Xue, F. H.; Zhong, Y. S.; Ma, X. L.; Shi, L. P.; Peng, Q. Y.; He, X. D. Stimuli-responsive MXene/PNIPAM hydrogel with high-performance and tunable electromagnetic interference shielding performance. *Adv. Sci.*, **2025**, 12(31), e05551.
- 54 Zhang, C. Z.; Zhang, Y. W.; Wang, Y.; Huang, Y. Advances in conductive filler-integrated hydrogels and derived aerogels: innovative strategies for electromagnetic interference shielding. *Mater. Horiz.*, **2025**, 12(18), 7066–7100.
- 55 Lv, Y. L.; Wei, Q. Y.; Ye, L. D.; Huang, Y. Y.; Zhang, L. L.; Shen, R. B.; Li, Z. W.; Lu, S. R. Liquid metal flexible multifunctional sensors with ultra-high conductivity for use as wearable sensors, joule heaters and electromagnetic shielding materials. *Compos. Part B Eng.*, **2025**, 291, 112064.
- 56 Song, M. P.; Liu, Z.; Wang, Y.; Liu, C. H.; Guo, J. C.; Wang, W.; Gao, X. P.; Zhu, B.; Yuan, X. M. Industrial-grade flexible carbon fiber paper/MXene composite electromagnetic shielding material with ultra-large area and ultra-high performance. *Adv. Funct. Mater.*, **2025**, 35(27), 2421422.
- 57 Xie, X.; Lu, M. M.; Li, G. H.; Gao, G. H.; Kang, J. Y.; Zhang, Q.; Liu, X. Anti-impact electromagnetic shielding hydrogel with solvent-driven tunability. *Chem. Eng. J.*, **2025**, 505, 159114.

- 58 单杨, 段荣霞, 赵芳, 程兆刚, 张颖, 夏元佳. MXene基材料在电磁屏蔽领域研究进展. *材料工程*, 1-19.
- 59 Shi, Y.; Wu, M. J.; Ge, S. B.; Li, J. Z.; Alshammari, A. S.; Luo, J.; Amin, M. A.; Qiu, H.; Jiang, J. X.; Asiri, Y. M.; Huang, R. Z.; Hou, H.; El-Bahy, Z. M.; Guo, Z. H.; Jia, C.; Xu, K. M.; Chen, X. M. Advanced functional electromagnetic shielding materials: a review based on micro-nano structure interface control of biomass cell walls. *Nano Micro Lett.*, **2024**, 17(1), 3.
- 60 Yu, Y. Y.; Liu, X. B.; Lu, D. Q.; Liu, T.; Li, Y. S.; Wu, Z. P. Recent progress in graphene based materials for high-performance electromagnetic shielding. *Carbon*, **2025**, 236, 120093.
- 61 Tang, X. W.; Lu, Y. Z.; Li, S. S.; Zhu, M. Y.; Wang, Z. X.; Li, Y.; Hu, Z. Y.; Zheng, P. L.; Wang, Z. C.; Liu, T. X. Hierarchical polyimide nonwoven fabric with ultralow-reflectivity electromagnetic interference shielding and high-temperature resistant infrared stealth performance. *Nano Micro Lett.*, **2024**, 17(1), 82.
- 62 Yin, L.; Zhang, J. L.; Luo, J. J.; Shi, Y. Q.; Yu, B.; Zhang, S.; Zhou, K. Q. Janus-inspired alternating architecture CNF/MXene/ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>@PANI composite films with outstanding electromagnetic interference shielding and Joule heating. *J. Mater. Sci. Technol.*, **2025**, 223, 275-286.
- 63 Zhang, P. C.; Li, H. Y.; Liang, H. Y.; Wang, H. P.; Shan, X. K.; Wang, Y. H.; Fan, X. Y.; Xu, K.; Zhang, Q. Y.; Chen, Y. H. Ultra-lightweight asymmetric hierarchical porous structure for high-efficiency absorption-dominated electromagnetic interference shielding. *Compos. Part B Eng.*, **2025**, 290, 111969.
- 64 刘云杰, 金碧辉, 马昊宇, 龚鹏剑, 牛艳华, B.Park, C., 李光宪. 乙烯-丙烯醇共聚物/碳纳米管复合发泡材料的电磁屏蔽性能研究. *高分子学报*, **2023**, 54(1), 106-120.
- 65 王春翔, 李姣, 李倩, 刘常威, 解开放, 徐广标. 聚合物基电磁屏蔽材料(PEMSM)在纺织领域的研究进展. *丝绸*, **2025**, 62(6), 86-95.
- 66 Kim, N. G.; Jang, J. M.; Kim, Y. J.; Kim, J. Y.; Kang, D.; Park, J.; Won, J. C.; Kim, S. W.; Kim, D. W.; Kim, S. J.; Kim, Y. H. Scalable and eco-friendly production of flexible, hierarchical porous MXene/polyimide composites with superior electromagnetic interference shielding. *Compos. Part B Eng.*, **2025**, 304, 112805.
- 67 Wang, Y. Q.; Huang, J. R.; Zhao, G. Y.; Chen, R.; Huang, J. R.; Chang, X. H.; Li, J. S.; Zhu, Y. T. Flexible conductive hydrogels through optimized interfacial connectivity of hybrid fillers toward efficient electromagnetic interference shielding and wearable strain sensors. *Compos. Commun.*, **2025**, 60, 102611.
- 68 高得洲, 岳楚欣, 庄旭品, 汪晓银. 聚吡咯负载的芳纶纳米纤维气凝胶纤维的制备及电磁屏蔽性能. *现代纺织技术*, **2026**, 34(1), 113-119.
- 69 王纯, 游志昌, 关福旺, 李雅婷, 夏克尔·赛塔尔, 陈力群. 柔性纺织基电磁屏蔽复合材料的研究进展. *复合材料学报*, **2025**, 42(6), 3042-3053.
- 70 Ren, Q.; Wei, Y. Q.; Li, X. Y.; Yu, C.; Wang, L.; Shen, B.; Zheng, W. G. Influence of expansion ratio and multilayered gradient structure on the electromagnetic interference shielding performance of lightweight poly(lactic acid)/carbon nanostructures composite foams. *Compos. Sci. Technol.*, **2025**, 261, 110992.
- 71 Wang, J. Q.; Liu, L.; Wu, Z.; Xing, Y. Q.; Huang, P.; Li, B. J. Breathable, robust, and corrosion-resistant composite films with finger-web-like architecture for highly efficient electromagnetic interference shielding. *Compos. Sci. Technol.*, **2024**, 252, 110603.
- 72 Yang, Q.; Gao, Y.; Li, T.; Ma, L.; Qi, Q.; Yang, T.; Meng, F. B. Advances in carbon fiber-based electromagnetic shielding materials: composition, structure, and application. *Carbon*, **2024**, 226, 119203.
- 73 Chen, M. Y.; Zhu, J.; Zhang, K.; Zhou, H. K.; Gao, Y. F.; Fan, J.; Chen, R. X.; Wang, H. L. Carbon nanofiber/polyaniline composite aerogel with excellent electromagnetic interference shielding, low thermal conductivity, and extremely low heat release. *Nano Micro Lett.*, **2024**, 17(1), 80.
- 74 Dong, J. Y.; Liu, C. Q.; Cheng, H. L.; Jiang, C. L.; Zhou, B.; Huang, M.; Liu, C. T.; Feng, Y. Z. Recent progress of Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T MXene-based layered films for electromagnetic interference shielding. *J. Mater. Sci. Technol.*, **2025**, 223, 131-149.
- 75 Wang, L.; Lang, L.; Hu, X. F.; Gao, T. T.; He, M. K.; Qiu, H.; Ji, X. H.; Guo, H.; Zhang, Y. L.; Huang, S. Multifunctional ionic bonding-strengthened (Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T MXene/CNF)-(BNNS/CNF) composite films with Janus structure for outstanding electromagnetic interference shielding and thermal management. *J. Mater. Sci. Technol.*, **2025**, 224, 46-55.
- 76 Chen, G. Q.; Zhang, Y. B.; Han, Y.; Li, Q. T.; Wang, L.; Zhang, H. B. An ultra-strong multilayer structural bacterial cellulose film by biosynthesis for high-performance electromagnetic interference shielding. *J. Mater. Chem. A*, **2025**, 13(19), 14127-14136.
- 77 Lin, X.; Wang, C. C.; Zhang, C. Q.; Guo, Q.; Hu, C. S.; Yang, Y.; Zhou, Y. H.; Lin, X. Y.; Zhang, W. W.; Xu, J. T. Asymmetric gradient-structured PPy@bacterial nanocellulose aerogels enable broadband microwave absorption via synergistic polarization-conduction loss. *Chem. Eng. J.*, **2025**, 520, 166529.

- 78 Wang, L. Z.; Zhang, T.; Zhang, S. Q.; Lian, Z. X.; Liu, Y. H.; Li, Q.; Yu, D.; Wang, W. Asymmetric 3D-printed PEG porous frame composited with functional materials for high electromagnetic shielding and infrared stealth performance. *J. Colloid Interface Sci.*, **2025**, 699, 138101.
- 79 Mai, T.; Chen, L.; Liu, Q.; Guo, Z. H.; Ma, M. G. Zeolitic imidazolate frameworks derived magnetic nanocage/MXene/nanocellulose bilayer aerogels for low reflection electromagnetic interference shielding and light-to-heat conversion. *Adv. Funct. Mater.*, **2025**, 35(13), 2417947.
- 80 Wang, C. Y.; Wang, Y.; Zou, F. X.; Fang, B. W.; Zhao, J.; Zhang, H.; Guo, J.; Jia, L. C.; Yan, D. X. Construction of lightweight, high-energy absorption 3D-printed scaffold for electromagnetic interference shielding with low reflection. *Compos. Part B Eng.*, **2025**, 291, 112043.
- 81 邓卫斌, 李铁虎, 李昊, 李立哲, 常鹏. 炭基电磁屏蔽复合材料的结构设计与应用进展. *航空制造技术*, **2025**, 68(10), 24-38.
- 82 Wei, Y. W.; Bhuyan, P.; Kwon, S. J.; Kim, S.; Bae, Y.; Singh, M.; Thanh Tran, D.; Ha, M.; Jeong, K. U.; Ma, X.; Park, B.; Park, S. Liquid metal grid patterned thin film devices toward absorption-dominant and strain-tunable electromagnetic interference shielding. *Nano Micro Lett.*, **2024**, 16(1), 248.
- 83 李汝哲, 宋会青, 衡芳芳, 支建海. 碳纤维复合材料在电磁干扰屏蔽领域的研究进展. *化工新型材料*, 1-8.
- 84 Rong, Y. J.; Guo, H. T.; Zhou, X.; Wu, W. J.; Zhu, W. K.; Wang, H. W.; Ma, X. F.; Jiang, S. H.; Sun, Q. F. Absorption-dominant electromagnetic interference shielding materials: from microstructure to multi-scale assembly. *Adv. Funct. Mater.*, **2025**, e06746.
- 85 Wang, L.; Ren, W. N.; Hu, X. F.; He, M. K.; Men, J. Y.; Guo, H.; Zhang, Y. L.; Shi, X. T.; Qiu, H.; Ji, X. H. Biomass materials and their derivatives for electromagnetic interference shielding: a review. *J. Mater. Sci. Technol.*, **2026**, 243, 28-44.
- 86 Hwang, U.; Lee, J.; Kim, S.; Yang, X.; Kim, S.; Suhr, J.; Nam, J. D. Structural design of hybrid fillers in a polymer matrix for advanced electromagnetic interference shielding. *Small Struct.*, **2025**, 6(2), 2400404.
- 87 Lee, S.; Kim, D.; Nguyen, N. K.; Kim, W.; Kim, M.; Nah, J. 3D-printed gradient conductivity and porosity structure for enhanced absorption-dominant electromagnetic interference shielding. *Carbon*, **2025**, 231, 119759.
- 88 Li, X. F.; Chen, C. Y.; Li, Z. Y.; Yi, P.; Zou, H. H.; Deng, G.; Fang, M.; He, J. Z.; Sun, X.; Yu, R. H.; Shui, J. L.; Pan, C. F.; Liu, X. F. Inter-skeleton conductive routes tuning multifunctional conductive foam for electromagnetic interference shielding, sensing and thermal management. *Nano Micro Lett.*, **2024**, 17(1), 52.
- 89 Lian, Y. H.; Wang, H. G.; Liu, L. L.; Guan, L.; Lin, M. M.; Li, Q. L.; Guo, X. Q.; Liu, Z.; Chen, P.; Zhao, B.; Zhang, R. Highly stretchable, transparent hydrogel for electromagnetic interference shielding. *Small Struct.*, **2025**, 6(5), 2400486.
- 90 李华, 朱雨田, 赵桂艳. 导电高分子基柔性应变传感材料研究进展. *辽宁石油化工大学学报*, **2022**, 42(2), 44-49.
- 91 Ren, F.; Ma, L.; Li, C. J.; Wu, T.; Zhang, J. L.; Pei, L.; Jin, Y. L.; Sun, Z. F.; Guo, Z. Z.; Song, P.; Ren, P. G. Bimetallic MOF-derived Co/Ni@C and MXene co-decorated cellulose-derived carbon foams for absorption-dominated electromagnetic interference shielding. *Carbohydr. Polym.*, **2025**, 356, 123369.
- 92 Feng, X. Z.; Wang, C.; Shang, S. B.; Liu, H.; Huang, X. J.; Jiang, J. X.; Song, Z. Q.; Zhang, H. B. Self-healing, EMI shielding, and antibacterial properties of recyclable cellulose liquid metal hydrogel sensor. *Carbohydr. Polym.*, **2023**, 311, 120786.
- 93 Lai, D. G.; Chen, X. X.; Wang, G.; Xu, X. H.; Wang, Y. Arbitrarily reshaping and instantaneously self-healing graphene composite hydrogel with molecule polarization-enhanced ultrahigh electromagnetic interference shielding performance. *Carbon*, **2022**, 188, 513-522.
- 94 Qian, K. P.; Zhou, J. Y.; Miao, M.; Thaiboonrod, S.; Fang, J. H.; Feng, X. Stretchable supramolecular hydrogel with instantaneous self-healing for electromagnetic interference shielding control and sensing. *Compos. Part B Eng.*, **2024**, 287, 111826.
- 95 Mei, L.; Ouyang, W. C.; Xu, L. M.; Huang, Y. L.; Liu, Q.; Bai, Y.; Lu, Q. M.; Luo, T. Z.; Wu, Z. W. Super tough multifunctional MXene/PAA-CS double network hydrogels with high mechanical sensing properties and excellent EMI shielding performance. *Small*, **2025**, 21(6), 2410687.

## Research Progress on Hydrogel-based Flexible Electromagnetic Shielding Materials

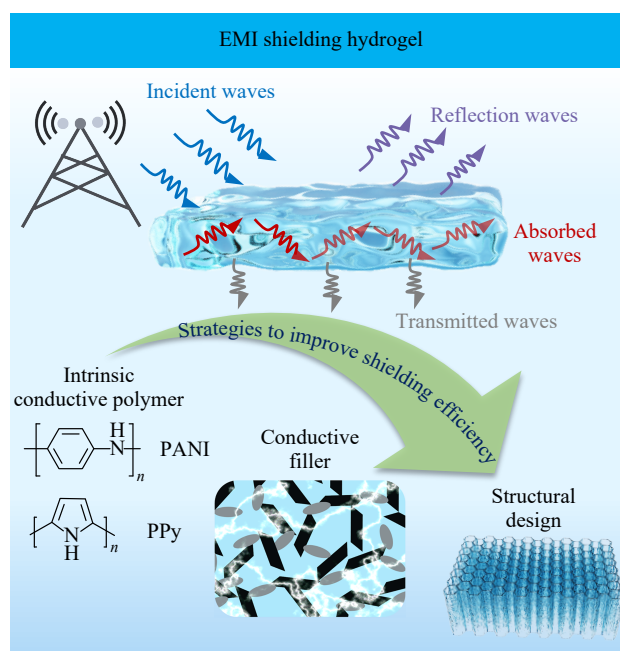
Yu-qi Wang<sup>1</sup>, Xiao-hua Chang<sup>2</sup>, Jian-wen Chen<sup>2</sup>, De-xiang Yu<sup>2</sup>, Rui Chen<sup>2</sup>, Gui-yan Zhao<sup>1\*</sup>, Yu-tian Zhu<sup>2\*</sup>

(<sup>1</sup>School of New Energy and Advanced Materials, Liaoning Petrochemical University, Fushun 113001)

(<sup>2</sup>College of Material, Chemistry and Chemical Engineering, Key Laboratory of Organosilicon Chemistry and Material Technology, Ministry of Education, Key Laboratory of Organosilicon Material Technology,

Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121)

**Abstract** With the acceleration of the miniaturization of electronic devices and the increasingly severe problem of electromagnetic pollution, it is crucial to develop electromagnetic shielding materials that possess both efficient shielding performance and good flexibility. Traditional metal-based shielding materials have limitations, such as heavy weight and poor flexibility. In contrast, hydrogels exhibit unique potential owing to their intrinsic flexibility, biocompatibility, and designability, thereby offering innovative paradigms for next-generation flexible electromagnetic shielding materials. This review first introduces the electromagnetic shielding mechanism of hydrogels and discusses the key factors affecting their shielding performance, including water molecules, porous structures, and types of conductive fillers. Second, it systematically explores the main methods for improving the electromagnetic shielding performance of hydrogels, including the use of different types of inorganic conductive fillers, the introduction of intrinsically conductive polymers, and rational structural design, and compares and analyzes the performance advantages and optimization strategies of various methods. Subsequently, it summarizes the practical applications of hydrogel-based electromagnetic shielding materials in flexible electronics and the research progress of stimulus-responsive intelligent shielding hydrogels. Finally, it looks forward to the current challenges and future development directions of hydrogel-based shielding materials.



**Keywords** Hydrogels; Electromagnetic interference shielding; Flexibility; Stimuli response

\* Corresponding authors: Gui-yan Zhao, E-mail: gyzhao@lnpu.edu.cn

Yu-tian Zhu, E-mail: ytzhu@hznu.edu.cn