复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

第 38 卷 第 7 期 7 月 2021 年
Vol. 38 No. 7 Jul 2021

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20210302.004

MXene 基水凝胶复合材料的研究进展

分享本文

朱韵伊，彭伟，林泽慧，林武挈，彭鸣，谭勇文*
（湖南大学 材料科学与工程学院，长沙 410082）

摘 要：MXenes 是一类新型二维纳米片，随着 MXenes 材料的迅速发展，近年来，兴起了一种新型材料，即 MXene 基水凝胶复合材料，其在生物医学、能源、电磁干扰屏蔽、传感器等方面均具有广泛的应用前景。但目前 MXene 基水凝胶复合材料的制备和应用仍处于起步阶段。本文主要回顾 MXene 基水凝胶复合材料的最新进展，详细梳理 MXene 基水凝胶复合材料的制备方法，并重点介绍其潜在应用前景。最后，针对 MXene 基水凝胶复合材料领域中所面临的机遇和挑战进行展望。

关键词：MXenes；二维纳米片；水凝胶；复合材料；应用

中图分类号：TB33 **文献标志码**： A **文章编号**： 1000-3851(2021)07-2010-15

Research progress of MXene-based hydrogel composites

ZHU Yunyi , PENG Wei , LIN Zehui , LIN Wujun , PENG Ming , TAN Yongwen*
(School of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The MXenes is a new type of two-dimensional nanosheets. With the rapid development of MXene materials, a new material, namely MXene-based hydrogel composites, has emerged in recent years. It has broad application prospects in biomedical, energy storage, electromagnetic interference shielding, sensors and other aspects. However, the preparation and application of MXene-based hydrogel composites are still in their infancy. This article mainly reviews the latest progress of MXene-based hydrogel composites, combs the preparation progress of MXene-based hydrogel composites in detail, and highlights its potential application prospects. Finally, the opportunities and challenges on the challenges in the field of MXene-based hydrogel composites are prospected.

Keywords: MXene; two-dimensional nanosheet; hydrogel; composites; applications

水凝胶是一类柔软灵活且具有 3D 网络结构的高分子聚合物材料。水凝胶中含有大量的亲水性基团，能够吸收超过自身几十倍甚至几百倍的水分或液体，并在水中能够溶胀而不溶解，因此具有很好的保水能力[1]。目前已经开发出多种类型水凝胶来满足某些特殊应用要求。在众多类型水凝胶中，其中智能型水凝胶是集感知、驱动和信息处理于一体，并具有智能属性的一类功能材料，在传统生物医学及传感等领域都有广阔的应用前景[2]。但传统水凝胶还存在导电性低、力学性能和生物相容性差及对外界刺激响应速度慢且响应单一等缺点，限制了其实际应用范围[3]。目前已经实现多种方法来改善水凝胶的性能并扩展其应用范围。其中，通过向水凝胶网络中引入功能化纳米材料的方法受到研究者的广泛关注，适当引入功能化纳米材料不仅可以提高水凝胶的导电性，增强力学性能和生物相容性，还能够提供新的功能响应性，使传统水凝胶的局限性得到很大突破[4-8]。

MXenes 是一类具有类石墨烯结构的过渡金属碳化物二维纳米材料。2011 年，Gogotsi 团队首次提出并成功制备 $Ti_3C_2T_x$ MXene，在近年掀起了研究热潮[9-11]。通常，MXenes 的化学式为 $M_{n+1}X_nT_x$ (n=1~4)，其中 M 代表前过渡金属 (Ti、V、Nb 等)，X 代表 C 或 N，T_x 表示不同的表面终端基团

收稿日期：2021-01-13; **录用日期**：2021-02-23 ; **网络首发时间**：2021-03-02 12:33:09
网络首发地址：https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210302.004
基金项目：国家自然科学基金 (51771072; 51901076); 湖南省杰出青年科学基金 (2020JJ2006)
通信作者：谭勇文, 博士, 教授, 研究方向为多孔材料设计、制备及应用 Email: tanyw@hnu.edu.cn

引用格式：朱韵伊, 彭伟, 林泽慧, 等. MXene 基水凝胶复合材料的研究进展 [J]. 复合材料学报, 2021, 38(7): 2010-2024.
ZHU Yunyi, PENG Wei, LIN Zehui, et al. Research progress of MXene-based hydrogel composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(7): 2010-2024(in Chinese).

(—OH、—O、—F 等)[12]。到目前为止，MXenes 在电化学储能和转化、电磁干扰屏蔽、传感及生物医学等众多领域中都展现出较好的应用前景[13-20]。且 MXenes 具有独特的金属导电性、亲水性、良好的加工性、高比表面积、优异的力学强度等性能[21]，因此将二维 MXenes 纳米片水凝胶化不仅可以在一定程度上提高原有的性能，还可以在原有水凝胶体系中引入新的性能，从而实现 MXenes 基水凝胶复合材料的多功能化[18,22-24]，并展示出更广阔的应用前景。

本文主要讨论基于 MXene 水凝胶的制备策略，并总结 MXene 基水凝胶复合材料在电磁干扰 (EMI) 屏蔽、生物医学、储能、传感等领域的应用现状，如图 1 所示，最后展望 MXene 基水凝胶复合材料所面临的主要挑战及潜在的研究方向。

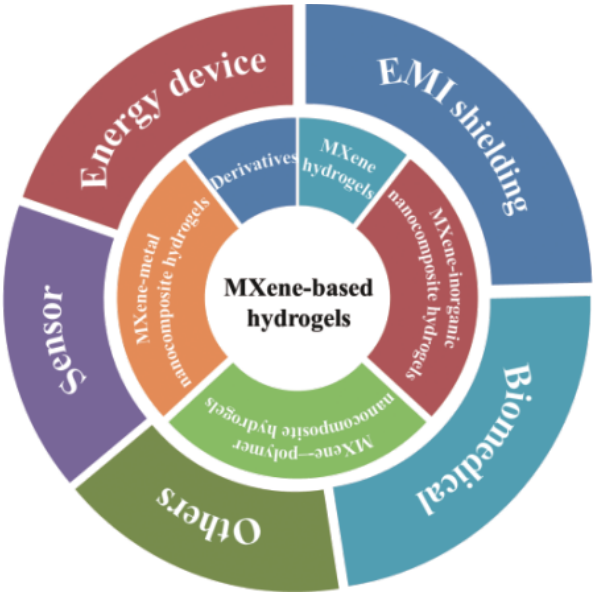


图 1 已报道的 MXene 基水凝胶复合材料的制备方法及其应用现状示意图

Fig. 1 Schematic diagram of reported preparation method and application status of MXene-based hydrogel composite

1 MXene 基水凝胶复合材料的制备方法

MXenes 是一类具有类石墨烯结构的过渡金属碳化物二维纳米材料。常见的二维石墨烯材料只存在单一的共价键，因此难以与其他材料组装在一起，且通过氧化石墨烯 (GO) 还原的制备过程较为复杂[11]。而 MXenes 材料中除了含有大量的共价键，还存在金属键和离子键，可以提供更强的结合方式，因此将 MXenes 组装成水凝胶相比于石墨烯材料具有很大优势。

1.1 MXene 水凝胶

MXene 表面含有大量的亲水性基团 (—OH、—O 等)，因此制备纯 MXene 水凝胶具有很大挑战性[25-26]。另外，MXene 纳米片含有大量氢键，在水溶液中非常容易发生自聚集[27]，因此难以组装成均匀的纯水凝胶。通常在水凝胶中引入其他物质 (如大分子胶凝剂[28-29] 或盐 (多价阳离子)[30])，可以制成 $Ti_3C_2T_x$ 复合水凝胶。但引入外在成分会使复合水凝胶的电导率一定程度上降低。因此，制备高性能纯 MXene 水凝胶是一个关键挑战。

Lin 等[31] 通过对分层的 $Ti_3C_2T_x$ 胶体溶液进行真空过滤制备了一种 $Ti_3C_2T_x$ MXene 离子水凝胶膜，将制备的 $Ti_3C_2T_x$ 水凝胶薄膜进一步浸入离子液体电解质中，真空干燥后，离子液体可以保留在 $Ti_3C_2T_x$ 凝胶膜中，可以增加 MXene 纳米片之间的片层间距，并防止重新堆叠，最终得到一种纯 MXene 水凝胶。Chen 等[32] 利用一种化学诱导转变方法，即通过在一定浓度的质子酸中进行冷冻诱导的预组装和独特的解冻过程，可以制备出不含其他组分的纯 $Ti_3C_2T_x$ MXene 水凝胶，如图 2 所示。首先，在冰晶的引导下，冻结 $Ti_3C_2T_x$ 分散液，预组装 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片，从而形成相互连接的 $Ti_3C_2T_x$ 三维骨架结构。其次，在 5 mol/L 盐酸中解冻冷冻样品，诱导嵌入的 Li^+ 与水合质子交换，

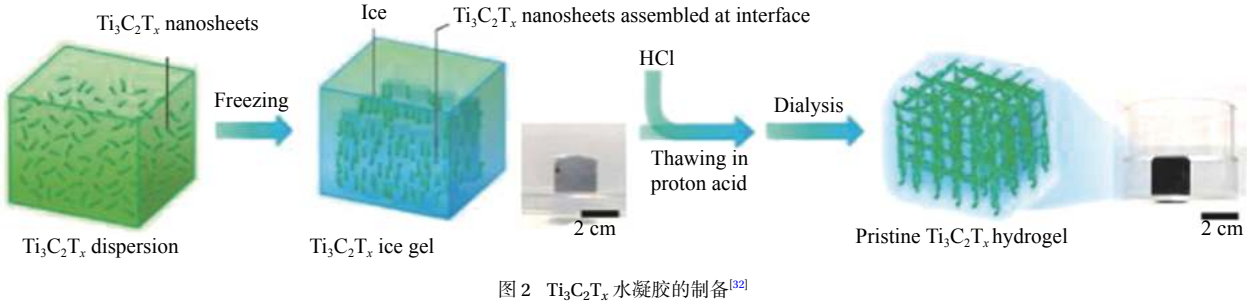


图 2 $Ti_3C_2T_x$ 水凝胶的制备[32]

Fig. 2 Fabrication of pristine $Ti_3C_2T_x$ hydrogel[32]

从而通过静电相互作用稳定水凝胶基质。最后，将 $Ti_3C_2T_x$ 水凝胶反复透析至中性得到纯 $Ti_3C_2T_x$ 水凝胶。嵌入的 Li^+ 与水合质子的交换触发，可以显著抑制堆叠的 $Ti_3C_2T_x$ 水合作用，增强 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片之间的相互作用，因此有利于纯 $Ti_3C_2T_x$ 水凝胶的形成。且由于不含外在组分，该纯 $Ti_3C_2T_x$ 水凝胶的力学和电学性能可以得到最大化，在固体含量为 5wt% 时，压缩模量为 2.4 MPa，电导率达到 (220.3±16.8) S/m。

1.2 MXene-无机物纳米复合水凝胶

对于纯 MXene 水凝胶，由于 MXene 表面的活性交联位点有限，因此可以通过引入外在胶凝剂来增加交联位点。GO 是一种常见的二维无机纳米片，可以很好地充当胶凝剂。GO 能够与 MXene 纳米片形成良好的界面相互作用，从而达到增强水凝胶的效果。

Shang 等[29] 采用 GO 和合适的还原剂乙二胺 (EDA) 辅助制备了 3D MXene 基复合水凝胶。首先，EDA 启动了 GO 层上的环氧基和氧单价键，然后 MXene 片与这些基团和键反应，形成 MXene 和部分还原氧化石墨烯 (RGO) 的杂化结构，最后通过范德华力和 π-π 堆积作用形成 MXene 基复合水凝胶。Yang 等[33] 将 RGO 和 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片混合，再将 K_2PtCl_4 溶液作为 Pt 源缓慢加入混合溶液中，在溶剂热环境下，两种富氧材料上的官能团 (如—OH、—COOH) 会发生键合，从而形成相互连通的 3D 多孔结构，Pt 离子还原为金属 Pt，并沉积在 GO 和 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片表面，最终形成 3D Pt/RGO-$Ti_3C_2T_x$ 复合水凝胶。Wychowaniec 等[34] 提出一种新的制备方法，通过 EDA 介导的 $Ti_3C_2T_x$ 和 GO 之间的化学反应诱导薄片间化学交联，获得还原的 GO-MXene (RGO-MXene) 复合水凝胶。在 EDA 作用下，MXene 和 GO 在 95℃ 下进行 6 h 水热反应。高温水热处理下，GO 的官能团发生还原和裂解，从而形成 RGO。MXene 和 RGO 都含有大量含氧官能团，EDA 分子通过与含氧分子的强相互作用交联相邻的二维纳米片，最终得到 RGO-MXene 复合水凝胶，如图 3 所示。

1.3 MXene-聚合物纳米复合水凝胶

由于 MXene 具有亲水性，将 MXene 纳米片掺入到聚合物水凝胶网络中制备 MXene 聚合物纳米复合水凝胶是常见的 MXene 基水凝胶复合材料制造策略之一。在这种复合水凝胶中，MXene 纳米片与聚合物之间的主要结合方式包括聚合物链之间的缠结、氢键 (物理键) 和共价键 (化学键) 及离子相互作用等。到目前为止，已经报道了多种 MXene-聚合物纳米复合水凝胶。

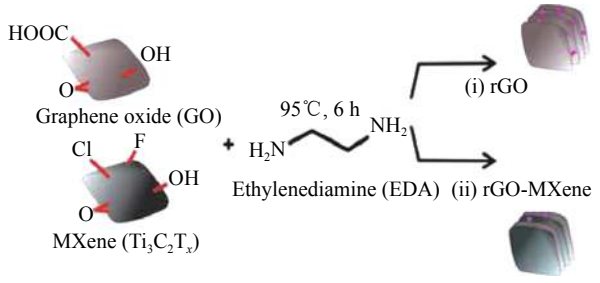
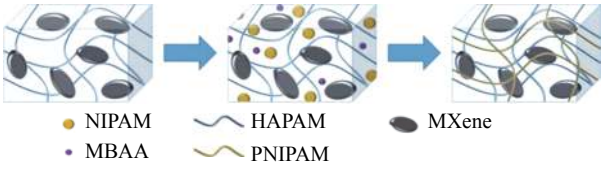


图 3 还原氧化石墨烯 (RGO)-MXene 复合水凝胶的合成过程示意图[34]

Fig. 3 Schematic illustration of formation process of reduced graphene oxide (RGO)-MXene composite hydrogel[34]

Wang 等[35] 受到蜘蛛网结构的启发，制备了超稳定 3D MXene-聚丙烯酰胺 (PAM) 纳米复合水凝胶。通过超声处理将 MXene 纳米片均匀地分布在凝胶介质中，然后进行 PAM 水凝胶的原位自组装。在这种情况下，通过 PAM 链的交织蜘蛛网状结构，MXene 纳米片可以通过强相互作用被很好地限制和捕获。这种方法有效解决了水凝胶中 MXene 纳米片稳定性较差的问题，同时紧密的交联结构赋予了 MXene-PAM 复合水凝胶良好的抗压缩和抗膨胀能力。Zhang 等[36] 通过聚 (N-异丙基丙烯酰胺) (PNIPAM) 水凝胶和物理交联水凝胶作基质来制备 MXene 复合水凝胶。合成方法 (如图 4 所示) 主要分为两步：第一步，合成包含 MXene 的疏水缔合聚丙烯酰胺 (HAPAM) 纳米复合水凝胶，在此过程中，借助氢键作用，该复合水凝胶会形成额外的交联点；第二步，往冻干的 HAPAM 复合水凝胶中加入 PNIPAM 并冷冻。最终通过化学交联和物理交联相结合的方法制备了具有温度敏感性和应变传感性能的复合水凝胶。Liao 等[37] 通过简便的溶剂置换法获得 MXene 纳米复合有机水凝胶，通过将丙烯酰胺 (AAm)、聚乙烯醇 (PVA) 与 MXene 溶液混合形成 MXene 纳米复合水凝胶。将十水合四硼酸钠 (硼砂) 加入到分散溶液中。PVA 的羟基和四羟基硼酸根离子的动态离子交联作用赋予了水凝胶良好的自愈能力。然后，在 60℃ 下进行原位聚合即可获得 PAAm 网络和水凝胶。最后，将水凝胶浸入乙二醇 (EG) 后在室温下通过溶剂置换得到 MXene 纳米复合有机水凝胶。

Zhang 等[18] 将 MXene 纳米片与玩具中常用的



MBAA—N,N′-Methylene diacrylamide; NIPAM—N-Isopropyl acrylamide; HAPAM—Hydrophobically associated polyacrylamide; PNIPAM—Poly(N-isopropyl acrylamide)

图 4 MXene 纳米复合双网络水凝胶的合成过程[36]

Fig. 4 Synthesis process of MXene nanocomposite double network hydrogel[36]

低成本商业水凝胶混合，即由 PVA、水和防脱水添加剂组成的“结晶黏土”，然后将其卷成球并用手压扁，过程重复几次得到均匀的黑色 MXene-PVA 复合水凝胶，通过 MXene 上丰富的亲水表面基团与 PVA 羟基之间的氢键作用，$Ti_3C_2T_x$ 和 PVA 网络连接在一起。Tao 等[38] 发现二维过氧化物修饰的 $Ti_3C_2T_x$ MXene 纳米片 (p-$Ti_3C_2T_x$) 可以通过超声辅助的最小强度分层 (MILD) 蚀刻方法合成。获得的 MXene 可以产生用作引发剂的羟基自由基，从而引发丙烯酸单体进行自由基聚合，而无需使用光照或其他共引发剂。同时，作为单体聚合起点的 MXene 可以组装聚合物链以形成 MXene 基聚合物水凝胶，因此这种 MXene 水凝胶的制备非常迅速，且纳米片在水凝胶体系中也具有较好的稳定性。

1.4 MXene-金属纳米复合水凝胶

最近，研究人员提出了一种新的策略，即将 MXene 纳米片和金属分子自组装形成水凝胶，从而促进胶凝过程，使 MXene 与水迅速相分离并抑制纳米片的再堆叠现象。

Deng 等[30] 报道了 MXene 在水分散体中由金属离子引发的凝胶化反应，MXene 表面上的—OH 基团和金属离子 (Fe^{2+}、Mg^{2+}、Co^{2+}、Ni^{2+}等) 之间的静电作用起关键作用。以 Fe^{2+}离子为例，Fe^{2+}离子的存在会破坏分散体中 MXene 纳米片之间的静电排斥力，并充当联接体将纳米片黏合在一起，从而形成 3D MXene 网络结构。此外，获得的水凝胶可有效避免 MXene 纳米片的重新堆积，且离子的引入提高了水凝胶的环境稳定性。Lin 等[17] 采用一种有效且可控的离子扩散诱导胶凝的方法制备 MXene 基水凝胶，如图 5 所示。首先，将稳定的 MXene-GO 混合分散体进行超声和搅拌处理，形成带负电荷的亲水性表面，然后采用 HCl 将其酸化。随后，将 Zn 箔置于 MXene-GO 混合分散体中以引发胶凝过程。在胶凝化过程中，Zn 箔与 HCl 发生反应，释放 Zn^{2+}离子并自发扩散到混合分散液中，Zn 箔附近的离子浓度提高[39]，带负电 MXene 和 GO 片通过静电作用在 Zn 箔表面聚合并形成高稳定的水凝胶。

1.5 MXene 基复合水凝胶的衍生物

由于 MXene 基复合水凝胶独特的性能，其衍生物也受到越来越多的关注。其中，MXene 气凝胶由于轻质、低密度、高孔隙率及大的比表面积等优点使其成为新型电磁干扰屏蔽及传感材料。

Gao 等[40] 通过简单的冰模板冻结技术和随后在低温 Ar/H_2 下退火制备了一种 3D MXene-RGO 复合气凝胶，接着在柔性聚酰亚胺 (PI) 交叉电极中采用合适的尺寸，然后用聚乙烯 (PE) 塑料薄膜封装，最后将银与铜线连接粘贴传感元件，制造了基于 MXene-RGO 复合气凝胶的压力传感器，如图 6(a) 所示。Liu 等[41] 通过添加一种 PI 聚合物来增强 MXene 纳米片之间的界面作用，制备了 MXene-PI 复合气凝胶，具体过程如图 6(b) 所示。将 MXene 和聚丙烯酸 (PAA) 的混合溶液进行冷冻

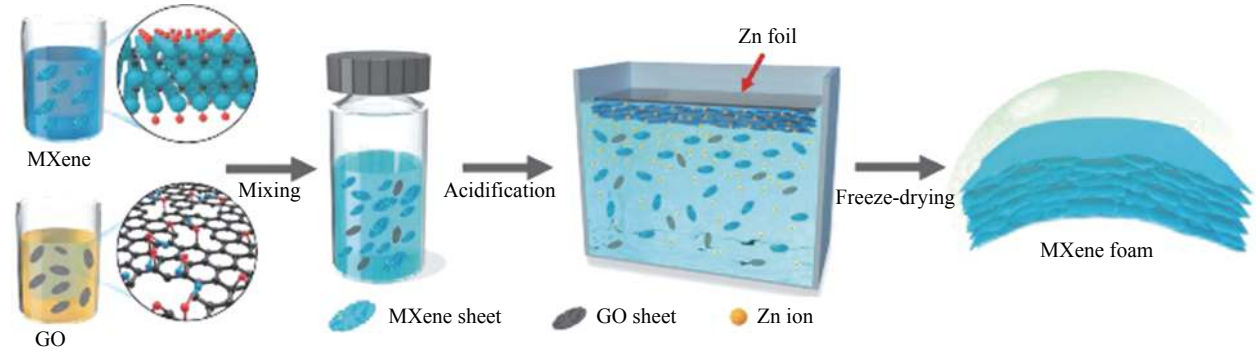
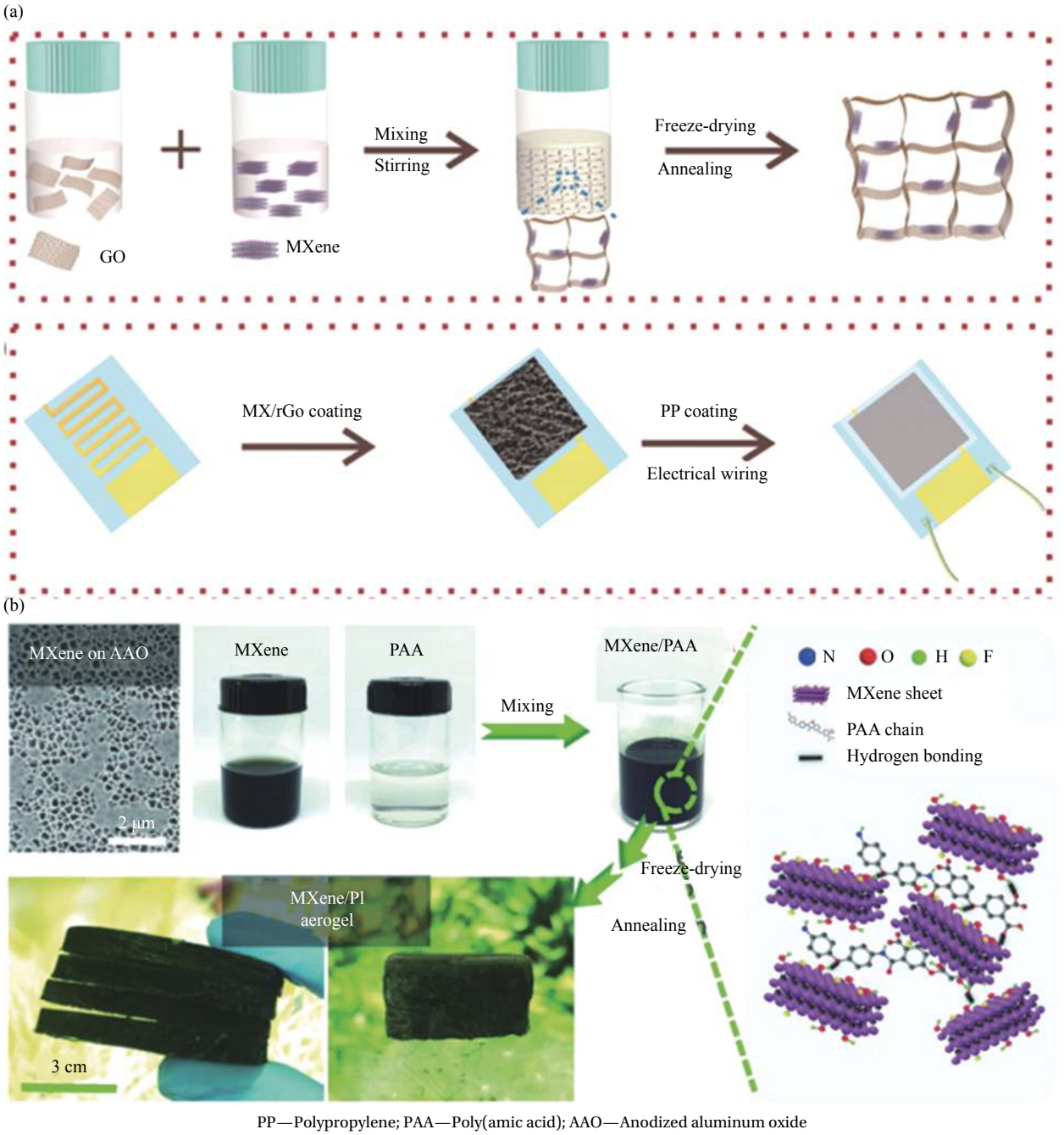


图 5 Zn^{2+}介导的 MXene-氧化石墨烯 (GO) 纳米复合水凝胶的示意图[17]

Fig. 5 Schematic process of Zn^{2+} mediated MXene-graphene oxide (GO) nanocomposite hydrogel[17]



PP—Polypropylene; PAA—Poly(amic acid); AAO—Anodized aluminum oxide

图 6　3D MXene-RGO 复合气凝胶 (a)[40] 及 MXene/聚酰亚胺 (PI) 复合气凝胶 (b)[41] 的合成示意图

Fig. 6　Synthesis process of 3D MXene-RGO composite aerogel (a)[40] and MXene-polyimide (PI) composite aerogel (b)[41]

干燥，水溶性 PAA 分子与亲水性 MXene 纳米片之间的强相互作用有利于形成 3D 构架，接着在 Ar 中 300℃ 下热退火诱导 PAA 聚合形成 PI 大分子，最终形成 MXene-PI 复合气凝胶，该气凝胶具有良好的力学性能和超低的密度 (8.9 mg·cm^{-3})。

2　MXene 基水凝胶复合材料的应用

MXene 独特的结构和表面化学性能赋予了其金属导电性、光热性能和抗菌性能等诸多重要特性[42]。因此，MXene 在储能[43-45]、电磁干扰屏蔽[46-47]、传感器[48-49] 等领域具有广泛的前景。

2.1　储能 (超级电容器、电池)

2.1.1　超级电容器

Deng 等[30] 通过将 MXene-金属离子自组装成水凝胶，有效避免了 MXene 纳米片的重新堆叠，从而极大地提高了其表面利用率，如图 7(a) 所示。将这种水凝胶用作超级电容器电极时，其具有较

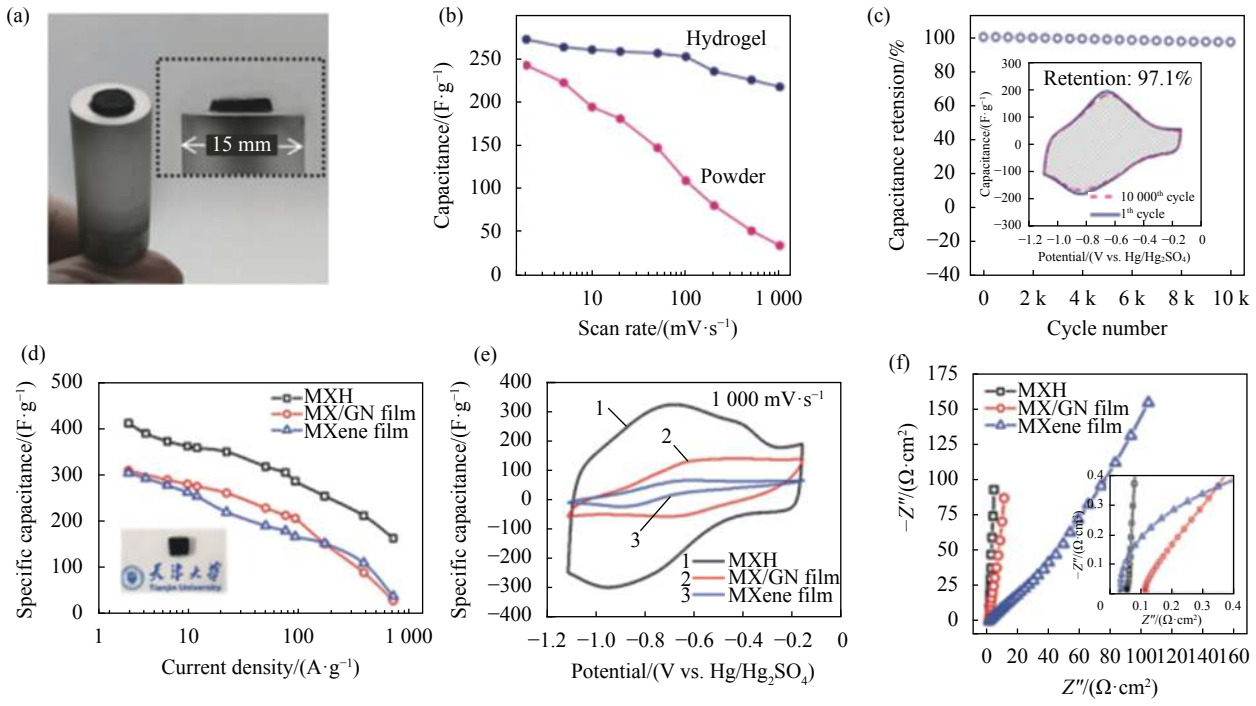


图 7　MXene 水凝胶制成的电极图片 (a); MXene 粉末和水凝胶在室温下扫描速率为 20 mV·s^{-1} 时 5 个循环后的电化学阻抗图谱 (b); MXene 水凝胶电极的电容保持率，插图为 MXene 水凝胶在 1 V·s^{-1} 的扫描速率下在第 1 个周期和第 10 000 个周期的 CV 曲线 (c)[30]; MXH、MX-GN 膜和 MXene 膜电极在电流密度为 0.2~1 000 A·g^{-1} 时的高速率性能 (d); 三种材料在 1 000 mV·s^{-1} 时的循环伏安曲线 (e); 三种材料在开路电位下收集的奈奎斯特图 (f)[29]

Fig. 7　Picture of electrodes made of MXene hydrogel (a); Electrochemical impedance spectroscopy of MXene powder and hydrogel at room temperature at a scanning rate of 20 mV·s^{-1} after 5 cycles (b); Capacitance retention test of MXene hydrogel electrode, inset shows CV curve of MXene hydrogel at 1st cycle and 10 000 th cycle at a scanning rate of 1 V·s^{-1} (c)[30]; Rate performance of MXH, MX-GN film and MXene film electrodes at current density of 0.2–1 000 A·g^{-1} (d); Cyclic voltammetry curves of three materials collected at 1 000 mV·s^{-1} (e); Nyquist plots of three materials collected at open circuit potential (f)[29]

高的倍率性能，在 1 V·s^{-1} 的高扫描速率时的电容为 226 F·g^{-1}，在 2 mV·s^{-1} 低扫描速率下也能达到 272 F·g^{-1} 的电容，优于 MXene 粉末电极 (如图 7(b) 所示)。这种 MXene 基复合水凝胶具有更好的倍率性能主要归因于水凝胶的湿性和三维多孔结构促进电解质离子的快速扩散及 MXene 材料与电解质的完全接触。MXene 水凝胶以 1 000 mV·s^{-1} 的扫描速率在 10 000 次循环后的电容保持率可达 97.1%，CV 曲线在 10 000 次循环后也几乎不变，具有良好的循环稳定性 (如图 7(c) 所示)。

Shang 等[29] 报道了一种新的凝胶化方法，由 GO 和合适的还原剂辅助，将二维 MXene 片制备成 3D 水凝胶。该水凝胶用作超级电容器电极时，在 5 A·g^{-1} 时可提供 370 F·g^{-1} 的电容，即使在 1 000 A·g^{-1} 时，电容仍达 165 F·g^{-1} (如图 7(d) 所示)，这是由于 3D 结构有利于离子快速传输到氧化还原活性位点，从而提高了电化学性能。从图 7(e) 可以看到，MXene 基复合水凝胶超级电容器也具有出色的循环性能。MXene 基复合水凝胶电极在低频范围内的奈奎斯特曲线斜率最大 (如图 7(f) 所示)，这是由于 3D 结构提供了更高的孔隙率和更低的曲折度，从而缩短了离子传输路径。

2.1.2　电池

与其他纳米材料 (如石墨烯、碳纳米管、MOF、MoS_2 等) 相比，由于 MXene 材料的二维结构、丰富的表面官能团、良好的可加工性及优异的电子传导性[21]，因此在解决电池金属负极固有问题[50] 方面具有巨大潜力。迄今为止，MXene 已成功应用于锂金属电池[51-52]、钠金属电池[53] 等领域。但 MXene 纳米片易于团聚的缺点限制了其电化学性能[27]。将 MXene 纳米片组装成 3D 多孔结构的水凝胶及其衍生物材料可以有效防止其堆叠，改善离子传输，由此获得高性能的电池负极材料。

Zhang 等[54] 制备了一种 3D 多孔 MXene 气凝胶，并将其用作高倍率锂金属负极电极。MXene 气凝胶体系可以显著提高锂金属阳极 (LMA) 在高电流密度的电镀/剥离效率。这是由于 MXene 纳米片上含有大量的含氧基团，可以诱导均匀的 Li

成核。且 MXene 纳米片的交联网络可以提供高电子传导性和快速的离子传输性，从而实现 Li 生长。在高达 10 mA·cm^2 的电流密度下可以提供高循环稳定性和低过电位。在以 $LiFePO_4$ 为阴极的全电池中也证明了其高倍率性能。这项工作为非石墨烯二维材料应用在高能量密度锂金属电池提供了参考。

Song 等[55] 合理地设计了一种 3D 多孔 $Ti_3C_2T_x$ MXene-RGO 复合气凝胶，并将该材料应用为 Li-S 电池负极。图 8(a) 和图 8(b) 分别为该电极在 1 次循环和 100 次循环后的微观结构图像。将高电导率的 MXene 和 RGO 集成到 3D 互通的多孔气凝胶中，可实现快速的 Li^+电子传输和强大的多硫化锂的化学锚定，提高氧化还原反应动力学，因此这

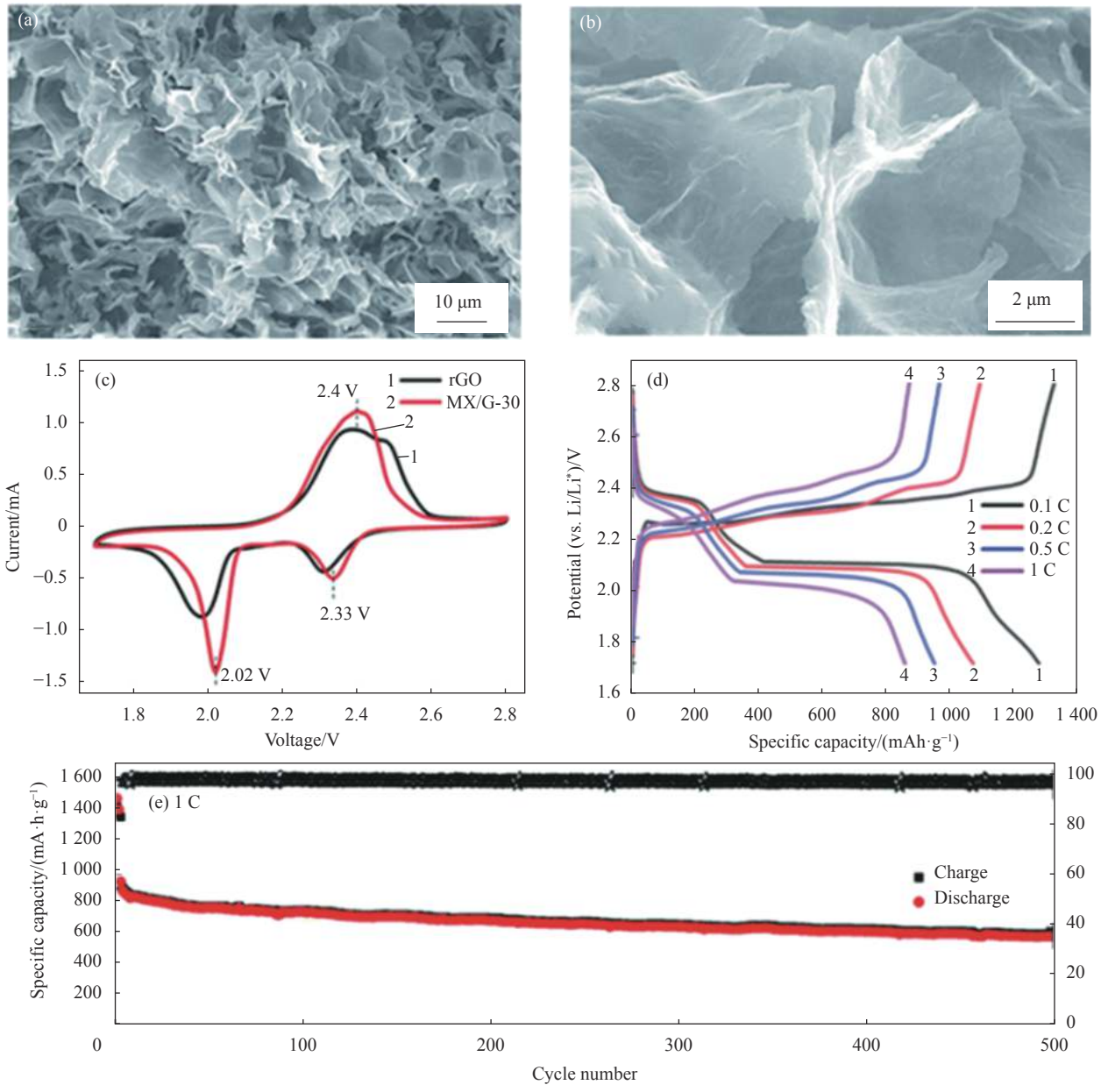


图 8　在 1 次循环 (a) 和 100 次循环 (b) 后 MXene 含量为 30% 的 MXene/rGO 复合气凝胶 (MX/G-30) 电极的 SEM 图橡; RGO 和 MX-G-30 电极的 Li-S 电池在扫描速率为 0.1 mV·s^{-1} 的循环伏安曲线 (c); MX-G-30 电极的 Li-S 电池在不同速率下的充电/放电曲线 (d); MX-G-30 电极的 Li-S 电池在 500 个循环的长期循环性能 (e)[55]

Fig. 8　SEM images of MXene/rGO hybrid aerogel with 30% MXene contents (MX/G-30) electrode after 1 cycle (a) and 100 cycles (b); Li-S battery with RGO and MX-G-30 electrodes at a scan rate of 0.1 mV·s^{-1} cyclic voltammetry curve (c); Charge/discharge curve of Li-S battery with MX-G-30 electrode at different rates (d); Li-S battery with MX-G-30 electrode long-term cycle performance of 500 cycles (e)[55]

种气凝胶电极具有优异的电化学性能。在高容量 0.1 C 时为比容量为 1 270 mAh·g^{-1} (如图 8(d) 所示)，面积容量为 5.27 mAh·cm^{-2}，并具备出色的循环稳定性 (如图 8(e) 所示)。

2.2 电磁干扰屏蔽

Zhao 等[56] 开发了一种 GO 辅助水热法，通过定向冻结和冷冻干燥制备具有核-壳结构的 MXene-RGO 复合气凝胶。从图 9(a) 和图 9(b) 可以看到，与 RGO 气凝胶对比，$Ti_3C_2T_x$ MXene-RGO 复合气凝胶具有均匀且整体对齐的细胞结构。由于有序的纳米结构及良好的 $Ti_3C_2T_x$ 本征结构，复合气凝胶具有较高的电导率 (1 085 S·m^{-1})，从而实现了出

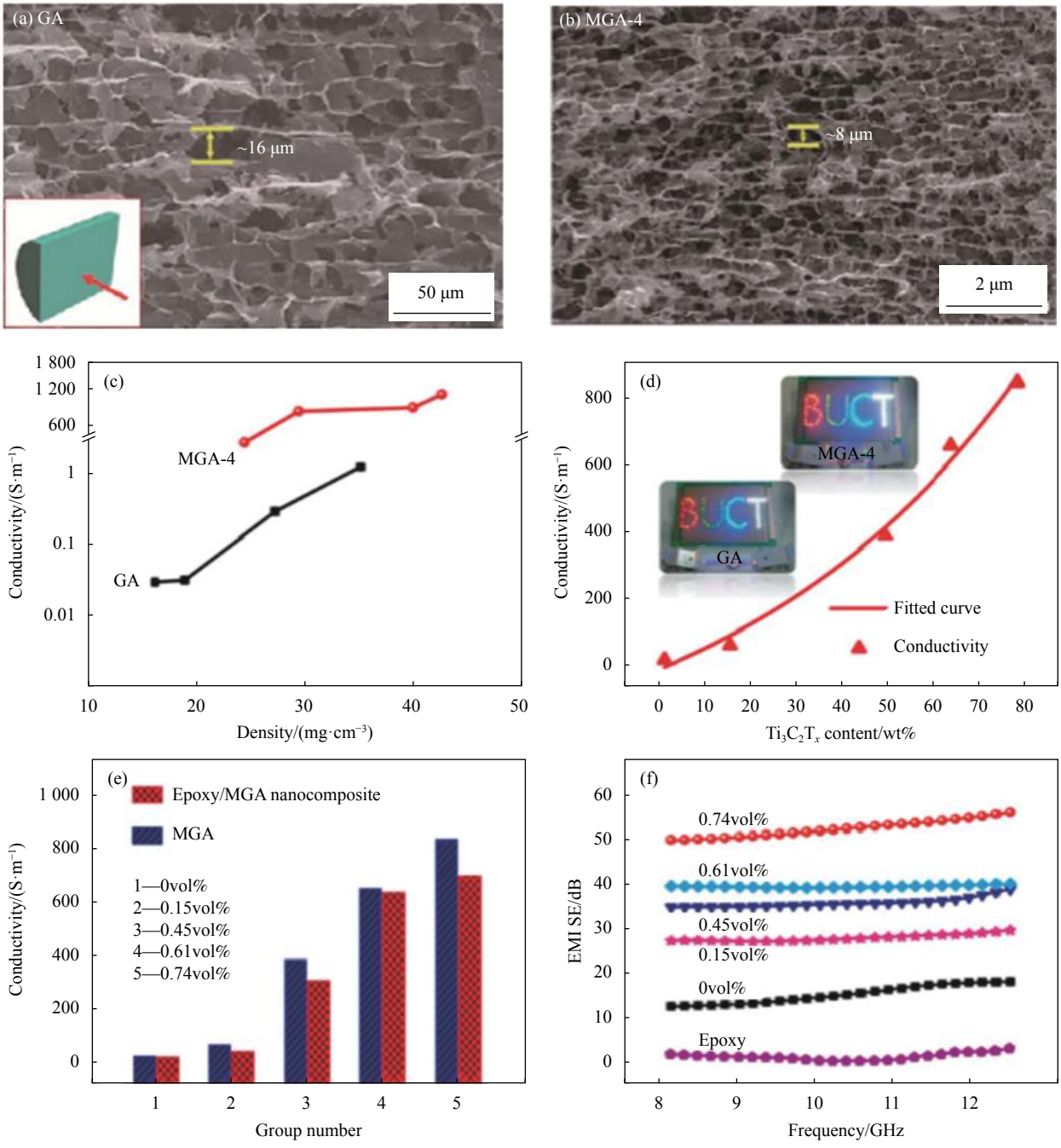


图 9 石墨烯气凝胶 (GA) (a)、80% $Ti_3C_2T_x$ MXene/RGO 混合气凝胶 (MGA-4) (b) 侧面的 SEM 图像; 不同密度的 GA 和 MGA-4 的电导率 (c); $Ti_3C_2T_x$ 含量对 MGA 的电导率的影响 (d); MGA 纳米复合材料的电导率 (e) 和 EMI 屏蔽性能 (f)[56]

Fig. 9 Side-view SEM images of graphene aerogel (GA) (a) and $Ti_3C_2T_x$ MXene/RGO hybrid aerogel with 80% MXene contents (MGA-4) (b); Comparison of electrical conductivities of GA and MGA-4 with different bulk densities (c); Influence of $Ti_3C_2T_x$ content on electrical conductivity of MGA (d); Electrical conductivity (e) and EMI shielding performance of MGA nanocomposite[56]

色的 EMI 屏蔽性能 (如图 9(c) 和图 9(d) 所示)。从图 9(e) 和图 9(f) 可以看到，$Ti_3C_2T_x$ 体积比仅为 0.15% 的 MXene-RGO 复合气凝胶具有高达 23.3 S·m^{-1} 的电导率和 29.7 dB 的 EMI 屏蔽效能。当 $Ti_3C_2T_x$ 体积比增加到 0.74%，其电导率和 EMI 屏蔽值也分别为 695.9 S·m^{-1} 和 56.4 dB。

Han 等[57] 采用双向冻结铸造技术制备了一系列具有层状结构的 MXene ($Ti_3C_2T_x$、Ti_2CT_x 和 Ti_3CNT_x) 气凝胶。与常规气凝胶相比，在 50% 应变下 20 个压缩循环后，对齐结构的 MXene 气凝胶电阻也能保持稳定。三种 MXene 气凝胶的 EMI 屏蔽效能在厚度为 1 mm、密度约为 1.0 mg·cm^{-3}、频率范围为 8.2~12.4 Hz 时分别达到 70.5 dB、69.2 dB 和 54.1 dB。由于薄膜超低密度和高 EMI 屏蔽效能，最高屏蔽效率 (SSE) 除以厚度达 88 182 dB·cm^2·g^{-1}，优于大多数屏蔽材料。在 MXene 气凝胶的压缩过程中，电磁波反射与吸收的比率增加，但总 EMI 屏蔽效能几乎不变。

Lin 等[17] 采用离子扩散诱导的凝胶化方法制备了 MXene 气凝胶泡沫，实现了出色的太赫兹屏蔽性能。MXene 纳米片通过与多价金属离子和 GO 交联形成一种定向多孔结构，使该气凝胶在潮湿环境中具有出色的稳定性和耐久性。由于优异的导电性和良好的多孔结构，该轻质 MXene 气凝胶泡沫在厚度仅为 85 μm 下的太赫兹屏蔽性能可达 51 dB。

2.3 传感

水凝胶基传感器通常具有相对低的灵敏度，作为黏弹性材料，其对外力的机电响应传递通常会有滞后现象。得益于高的电导率及良好的力学性能等性质，MXene 基复合水凝胶成为具有高应变灵敏度的传感器材料。

Zhang 等[18] 证明 MXene 基复合水凝胶表现出极高的拉伸性 (应变达 3 400% 以上)、瞬间自愈性及对各种材料表面的贴合和黏附性，且 MXene 基复合水凝胶具有出色的拉伸应变灵敏度 (GF)，GF 为 25，在压缩应变下灵敏度更高 (GF 为 80)。利用这种不对称应变灵敏性及黏性变形，为水凝胶的传感能力增加新的传感尺度，因此可以更方便地检测水凝胶表面的运动方向和速度。基于这种效果，MXene 基复合水凝胶在先进的传感应用中 (如笔迹、面部表情和声音信号等) 都展示出优异的传感性能，还可以扩展到包括触摸传感及生物信号监控等传感应用中。

Liao 等[37] 制备的 MXene 有机水凝胶具有出色的防冻性能，如图 10(a) 所示，将 MXene 有机水凝胶和 LED 灯泡连接，灯泡能在–40℃ 下保持亮度。将 MXene 有机水凝胶组装成一种可穿戴应变传感器，可以实现较宽的应变范围 (应变高达 350%) 和在极低温度下的高灵敏度 (44.85) (如图 10(b) 所示)。由图 10(c) 和图 10(d) 可知，在微小和较大应变下，MXene 有机水凝胶传感器的相对电阻变化均比较稳定，因此该水凝胶具有潜在的多功能应用，可应用于电子皮肤和机器交互及个性化的健康监控等，如可以识别手指弯曲和吞咽动作等 (如图 10(e) 和图 10(f) 所示)。

Wei 等[58] 设计了一种导电的纳米复合有机凝胶 (PTCM-Gly5) 材料。由于三元复合网络设计，PTCM-Gly5 有机水凝胶显示出约 1 500% 的断裂应变，断裂应力超过 160 kPa。在引入甘油后，有机水凝胶在低温 (–36℃) 下也能保持优异的性能，并具备长期环境稳定性 (超过 7 天)。PTCM-Gly5 有机水凝胶也具有良好的黏合性和自愈性能，这归因于丰富的儿茶酚基团和可逆键 (氢键和动态硼酸酯键)。将该凝胶材料用于可穿戴应变传感器，其表现出良好的环境稳定性和宽的工作应变范围 (约 500% 应变) 及高灵敏度 (8.21)，可以有效监测大动作及微型运动。

Wang 等[59] 制备了一种 MXene-芳纶纳米纤维 (ANFs) 复合气凝胶，该气凝胶具有超低密度 (25 mg/cm^3)，高达 1 000 次的高可压缩回弹性和优异的传感性能。MXene-ANFs 复合气凝胶传感器具有宽的检测范围 (2.0%~80.0%)、灵敏的传感特性 (128 kPa^{-1}) 和超低检测限度 (100 Pa) 及快速响应时间 (320 ms) 等。因此，该气凝胶传感器能检测人体的正常运动 (包括跳绳、行走甚至跑动踩平等)，展示出在监测人类行为和极端条件感官感知下的巨大应用潜力。

2.4 生物医学

Yang 等[60] 通过化学方法开发了一系列具有可生物降解和电活性再生细菌纤维素-MXene (rBC-MXene) 水凝胶，通过电调节细胞行为，可以在外部电刺激 (ES) 下主动进行皮肤伤口愈合。当刺激电压为 100 mV 时，rBC-MXene 水凝胶上的细胞数量最多，且活性增殖最高，因此 rBC/MXene 水凝胶具有高的电导率和生物相容性。此外，在大鼠

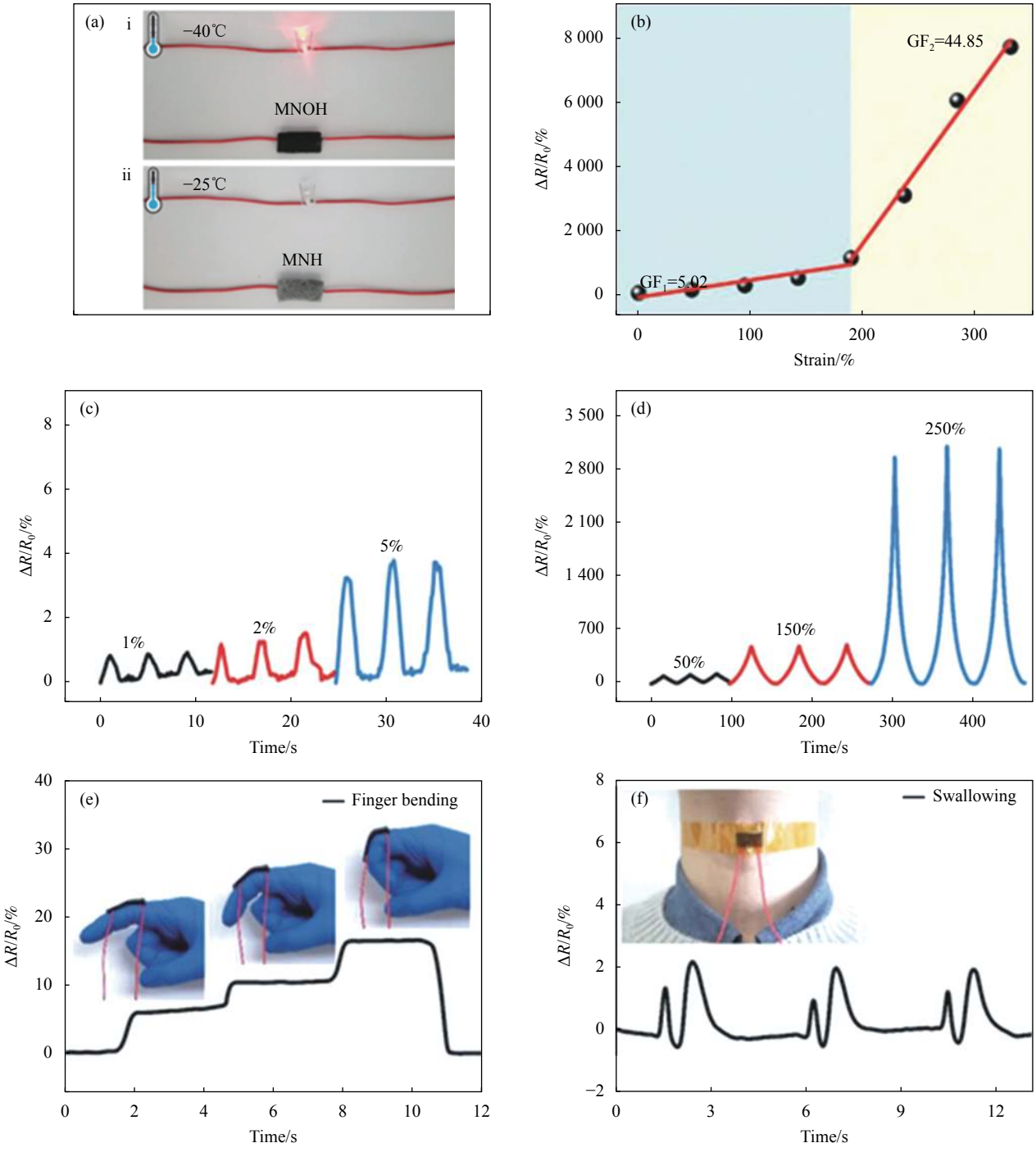


图 10 MXene 有机水凝胶 (MNOH) 和 MXene 纳米复合水凝胶 (MNH) 分别在低温下与 LED 灯的串联电路 (a); 在不同的施加应变下基于 MNOH 传感器的相对电阻变化 (b); 在微小应变 (c) 和较大应变 (d) 下 MNOH 传感器的相对电阻变化; 手指不同角度弯曲运功 (e) 及吞咽动作 (f)[37]

Fig. 10 Series circuit of MXene nanocomposite organohydrogel (MNOH) or MXene nanocomposite hydrogel (MNH) with LED lamp at low temperature, respectively (a); Relative resistance change based on MNOH sensor under different applied strain (b); Tiny strain (c) and high strain (d) relative resistance change of MNOH sensor; Fingers bending at different angles (e) and swallowing movements (f)[37]

全层皮肤缺损模型中，rBC-MXene 水凝胶比市售生物膜具有更好的治疗效果。rBCMXene 水凝胶可以作为皮肤伤口愈合的伤口敷料，并将电活性 rBC-MXene 水凝胶与电刺激结合协同治疗能有效促进伤口修复，对于临床相关的伤口治疗非常重要。

2.5 其他 (催化、发电机、光电探测器、太阳蒸汽能)

除以上比较广泛的应用领域外，一些 MXene 基复合水凝胶的应用还可以扩展到催化、发电机、光电探测器及太阳能器件等方面。

Yang 等[33] 提出一种简单的自下而上的方法，采用 RGO 和 MXene ($Ti_3C_2T_x$) 纳米片作为复合模块，合成了超细 Pt 纳米颗粒修饰的 MXene 基复合水凝胶催化剂。得益于高度互连的多孔网络、较大的比表面积、金属 Pt 的均匀分散及良好的电子传导性等优势，3D Pt/RGO-$Ti_3C_2T_x$ 复合水凝胶表现出较高的甲醇氧化催化活性，且相比于其他催化剂也具有强的毒化耐受性和稳定性。

Lee 等[61] 合成了一种可以通过超声产生足够电能来驱动通电小工具的 MXene 基复合水凝胶，如图 11(a) 所示。将 $Ti_3C_2T_x$-PVA 复合水凝胶夹在两个己二酸丁二醇酯和对苯二甲酸丁二醇酯的共聚物 (Eco-flex) 覆盖层之间组装成水凝胶发生器，超声波通过水介质传播到 MXene 基复合水凝胶发生器 (如图 11(b) 所示)。将增强的 MXene 基复合水凝胶发生器插到一块新鲜的牛肉中，发电机可以通过收集电力来证明超声波的产生，MXene 基水凝胶发生器还能够从普通的医学超声探头中收集超声能量再成像，在物理治疗中具有很好的应用前景，如图 11(c) 和图 11(d) 所示。

Chen 等[32] 通过一种插入化学行为，将 Li^+嵌入到 $Ti_3C_2T_x$ 中，通过冷冻诱导的预组装及随后的质子酸解冻过程来制备 $Ti_3C_2T_x$ 水凝胶。这种具有垂直排列微观结构的 $Ti_3C_2T_x$ 水凝胶能够最大限度地提高垂直方向的力学性能和电导率，具备较大的各向异性比 (如图 12(a) 所示)。宽为 1 cm、密

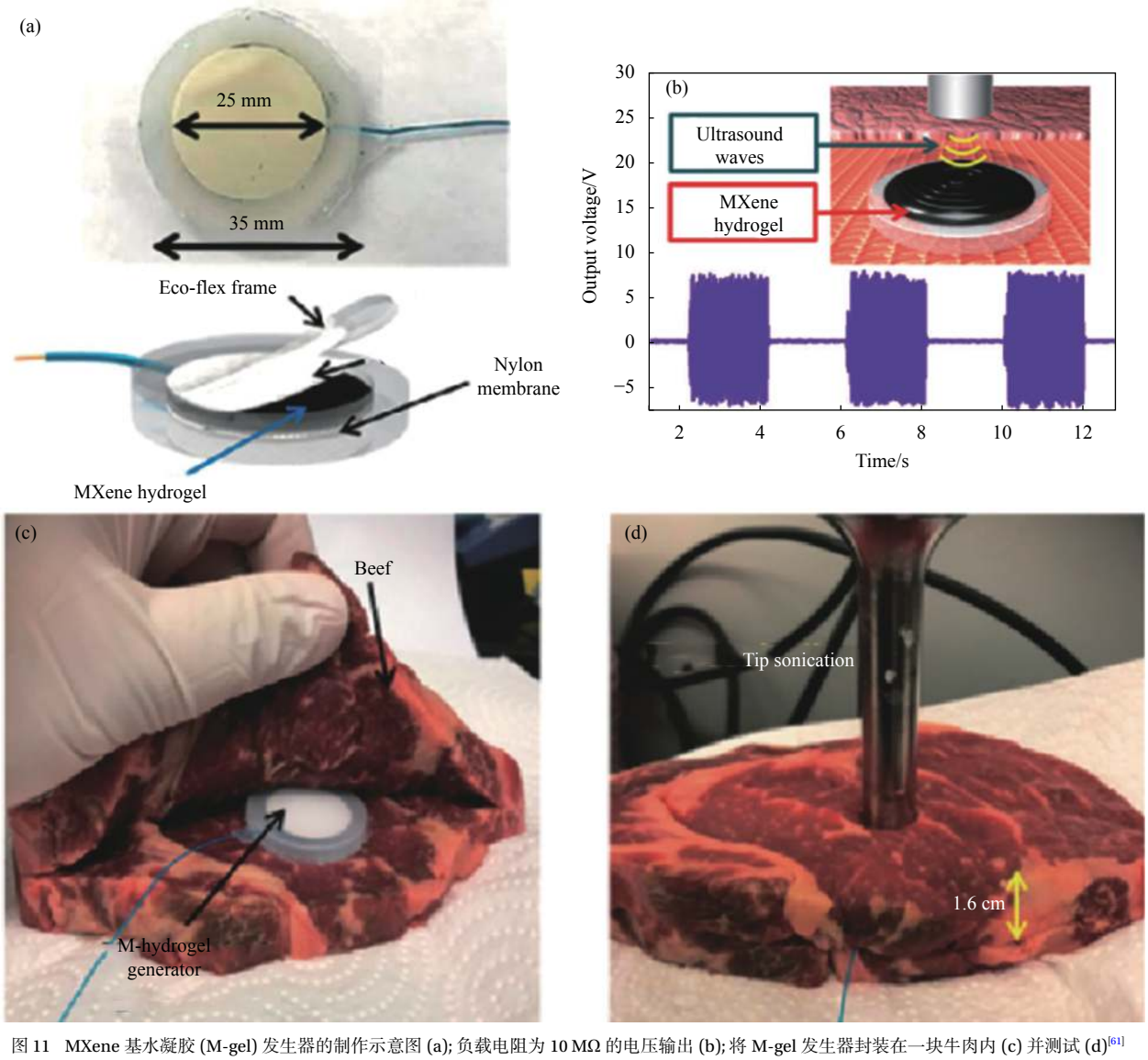


图 11　MXene 基水凝胶 (M-gel) 发生器的制作示意图 (a); 负载电阻为 10 MΩ 的电压输出 (b); 将 M-gel 发生器封装在一块牛肉内 (c) 并测试 (d)[61]

Fig. 11　Schematic illustration of MXene-based hydrogel (M-gel) generator(a); Voltage output with a load resistance of 10 MΩ (b); Encapsulate M-gel generator inside a piece of beef (c), and measurement setup (d)[61]

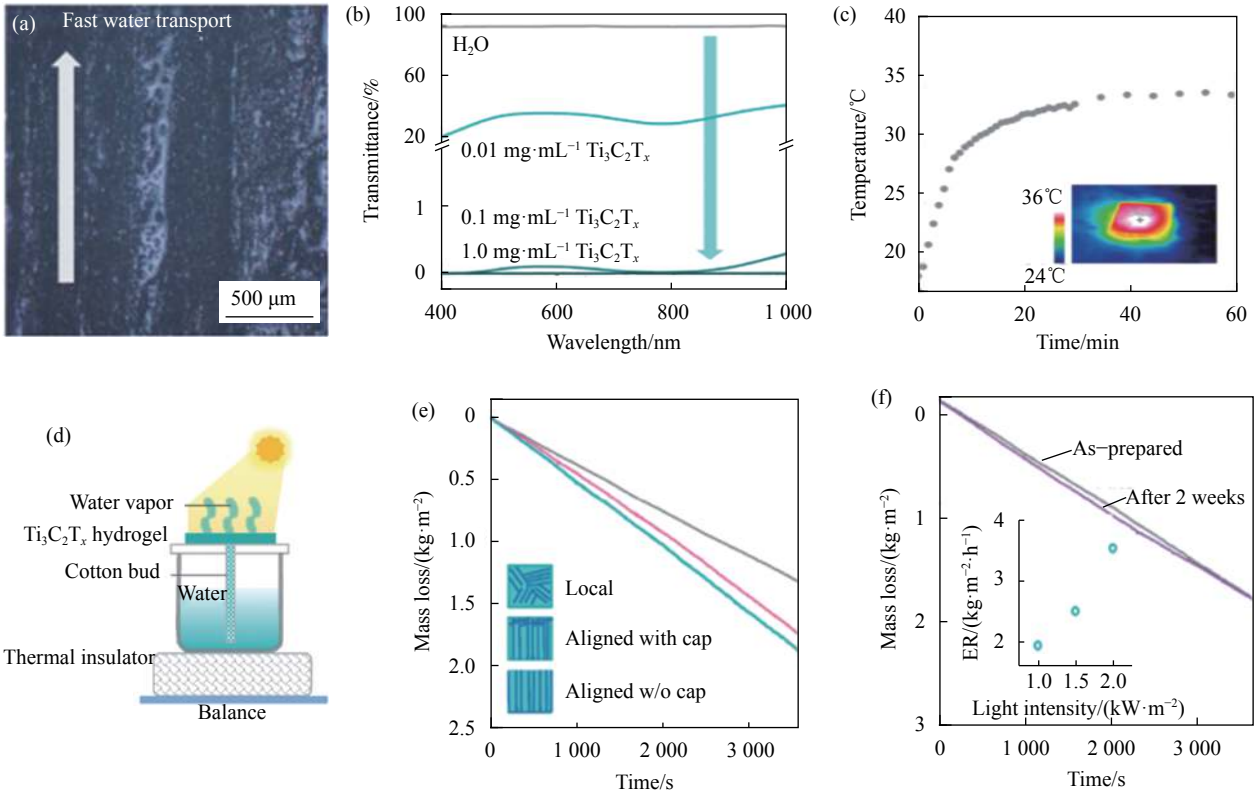


图 12　$Ti_3C_2T_x$ 水凝胶中垂直对齐通道快速水传输的显微镜图像 (a); 不同浓度的 $Ti_3C_2T_x$ 分散体的紫外-可见光图谱 (b); 在 1 kW·m^{-2} 辐射下原始 $Ti_3C_2T_x$ 水凝胶的表面温度 (c); 原始 $Ti_3C_2T_x$ 水凝胶的蒸汽产生速率的测试设备 (d); 比较不同原始 $Ti_3C_2T_x$ 水凝胶的蒸发速率投影面积 (e); $Ti_3C_2T_x$ 水凝胶在不同阳光照射下的稳定性测试和蒸汽产生性能 (f)[32]

Fig. 12　Microscopic image of fast water transmission in vertically aligned channels of $Ti_3C_2T_x$ hydrogel (a); UV-vis spectra of $Ti_3C_2T_x$ dispersions of different concentrations (b); Surface temperature of original $Ti_3C_2T_x$ hydrogel under 1 kW·m^{-2} radiation (c); Test equipment for steam generation rate of original $Ti_3C_2T_x$ hydrogel (d); Compare evaporation rate projection area of different original $Ti_3C_2T_x$ hydrogels (e); Stability test and steam generation performance of $Ti_3C_2T_x$ hydrogel under different sun illumination (f)[32]

度为 1.0 mg·mL^{-1} 的 $Ti_3C_2T_x$ 分散体在可见光范围内的吸收大于 99.5%，在光照后，$Ti_3C_2T_x$ 水凝胶温度快速升高 (如图 12(b) 和图 12(c) 所示)。从图 12(d) 和图 12(e) 可以看到，具有垂直排列微通道的 $Ti_3C_2T_x$ 水凝胶在 1 kW·m^{-2} 辐射下蒸发速率投影面积能达到 1.90 kg·m^{-2}·h^{-1}。同时，在较高的光浓度下，经过 2 周后能量均能稳定地存储下来 (如图 12(f) 所示)，证实这种水凝胶具有良好的稳定性，因此在太阳能蒸汽产生方面具有很好的应用潜力。

Tao 等[38] 设计了一种 MXene 基近红外响应纳米复合水凝胶，并将该水凝胶用于远程控制设备。在这项工作中，由于该水凝胶材料具有出色的光热性能和稳定性以及良好的导电性，因此，基于 PNIPAM 的纳米复合水凝胶在近红外光响应式“智能”窗口、流体阀及光电探测器等具有很好的应用前景。

3　结论及展望

随着 MXene 材料蓬勃发展，基于 MXene 的水凝胶材料也成为研究热点，其在能源储存和转换、电磁干扰屏蔽、传感器、生物医学等方面都展现出广泛的应用前景。目前，MXene 基水凝胶复合材料的设计和制备已经取得一些良好进展，但仍处于起步阶段，具有很大发展空间。当前，MXene 基水凝胶复合材料的设计和制备主要存在以下几个挑战：(1) MXene 基水凝胶复合材料大多是手工制造，MXene 用量大，大批量生产困难，迫切需要开发低成本批量生产的制备方法；(2) MXene 纳米片在水凝胶中极易二次团聚，从而影响水凝胶的长期稳定性；(3) MXene 纳米片非常容易氧化，不利于环境保存，从而极大地削弱了水凝胶的综合性能，并限制其实际应用；(4) MXene 基水凝胶的形成机制和构效关系尚不明确，且其孔径通常都是几百纳米到微米尺度级别，制备纳米尺度孔

结构的水凝胶仍是一个挑战。总之，MXene 基水凝胶复合材料的制备仍存在很多限制，需要合理利用 MXene 的特性来制备满足某些特定领域需求的水凝胶，因此水凝胶材料的应用领域还存在较大局限性。但机遇与挑战共存，相信通过研究者们更加深入的研究，MXene 基水凝胶复合材料领域必将呈现出更多激动人心的研究成果。

参考文献：

[1] ELSHERBINY I M, ABDELHAMID M I, RASHAD M, et al. New calcareous soil-alginate composites for efficient uptake of Fe(Ⅲ), Mn(Ⅱ) and As(Ⅴ) from water[J]. Carbohydrate Polymers，2013，96(2)：450-459.

[2] 金淑萍, 柳明珠, 陈世兰, 等. 智能聚合物和水凝胶的响应特性及其应用[J]. 物理化学学报, 2007, 23(3)：438-446.
JIN Shupin, LIU Mingzhu, CHEN Shilan, et al. Responsive properties and applications of the intelligent polymers and hydrogels[J]. Acta Physico-Chimica Sinica，2007，23(3)：438-446(in Chinese).

[3] HONG S, SYCKS D, CHAN H F, et al. 3D printing of highly stretchable and tough hydrogels into complex, cellularized structures[J]. Advanced Materials，2015，27(27)：4035-4040.

[4] HAO G P, HIPPAUF F, OSCHATZ M, et al. Stretchable and semitransparent conductive hybrid hydrogels for flexible supercapacitors[J]. ACS Nano，2014，8(7)：7138-7146.

[5] HAN L, LU X, WANG M H, et al. A mussel-inspired conductive, self-adhesive, and self-healable tough hydrogel as cell stimulators and implantable bioelectronics[J]. Small，2017，13(2)：1601916.

[6] YANG X J, LIU X, LIU Z, et al. Near-infrared light-triggered, targeted drug delivery to cancer cells by aptamer gated nanovehicles[J]. Advanced Materials，2012，24(21)：2890-2895.

[7] FUSCO S, SAKAR M S, KENNEDY S, et al. An integrated microrobotic platform for on-demand, targeted therapeutic interventions[J]. Advanced Materials，2014，26(6)：952-957.

[8] HUANG C C, BAI H, LI C, et al. A graphene oxide/hemoglobin composite hydrogel for enzymatic catalysis in organic solvents[J]. Chemical Communications，2011，47(17)：4962-4964.

[9] NAGUIB M, MOCHALIN V N, BARSOUM M W, et al. 25th thanniversary article: MXenes: A new family of two-dimensional materials[J]. Advanced Materials，2014，26(7)：992-1005.

[10] NAGUIB M, KURTOGLU M, PRESSER V, et al. Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti_3AlC_2[J]. Advanced Materials，2011，23(37)：4248-4253.

[11] LUKATSKAYA M, MASHTALIR O, REN C, et al. Cation intercalation and high volumetric capacitance of two-dimensional titanium carbide[J]. Science，2013，341(6153)：1502-1505.

[12] SUN Z M. Progress in research and development on MAX phases: A family of layered ternary compounds[J]. International Materials Reviews，2013，56(3)：143-166.

[13] ANASORI B, LUKATSKAYA M, GOGOTSI Y. 2D metal carbides and nitrides (MXenes) for energy storage[J]. Nature Reviews Materials，2017，2：16098.

[14] ZHANG W, MA J, ZHANG W J. A multidimensional nanostructural design towards electrochemically stable and mechanically strong hydrogel electrodes[J]. Nanoscale，2020，12(12)：6637-6643.

[15] QI Q, ZHANG H, ZHANG P, et al. Self-assembled sandwich hollow porous carbon sphere@MXene composites as superior Li-S battery cathode hosts[J]. 2D Materials，2020，7(2)：025049.

[16] HANTANASIRISAKUL K, GOGOTSI Y. Electronic and optical properties of 2D transition metal carbides and nitrides (MXenes)[J]. Advanced Materials，2018，30(52)：1804779.

[17] LIN Z, LIU J, PENG W, et al. Highly stable 3D $Ti_3C_2T_x$ MXene-based foam architectures toward high-performance terahertz radiation shielding[J]. ACS Nano，2020，14(2)：2109-2117.

[18] ZHANG Y, LEE K H, ANJUM D H, et al. MXenes stretch hydrogel sensor performance to new limits[J]. Science Advances，2018，4(6)：aat0098.

[19] RASOOL K, HELAL M, ALI A, et al. Antibacterial activity of $Ti_3C_2T_x$ MXene[J]. ACS Nano，2016，10(3)：3674-3684.

[20] CHENG L, CHEN Q, LI J, et al. Boosting the photocatalytic activity of $CdLa_2S_4$ for hydrogen production using Ti_3C_2 MXene as a co-catalyst[J]. Applied Catalysis B: Environmental，2020，267：118379.

[21] VENKATESHALU S, GRACE A. MXenes: A new class of 2D layered materials: Synthesis, properties, applications as supercapacitor electrode and beyond[J]. Applied Materials Today，2020，18：100509.

[22] QIN L, YANG D, ZHANG M, et al. Superelastic and ultralight electrospun carbon nanofiber/MXene hybrid aerogels with anisotropic microchannels for pressure sensing and energy storage[J]. Journal of Colloid and Interface Science，2021，589：264-274.

[23] LI W, LI X, CHANG W, et al. Vertically aligned reduced graphene oxide/$Ti_3C_2T_x$ MXene hybrid hydrogel for highly efficient solar steam generation[J]. Nano Research，2020，13：3048-3056.

[24] YU Z, WU P. Biomimetic MXene-polyvinyl alcohol composite hydrogel with vertically aligned channels for highly efficient solar steam generation[J]. Advanced Materials Technologies，2020，5(6)：2000065.

[25] KAJIYAMA S, SZABOVA L, IINUMA H, et al. Enhanced Li-ion accessibility in MXene titanium carbide by steric chloride termination[J]. Advanced Energy Materials，2017，7(9)：1601873.

[26] WAN W, TAO M, CAO H, et al. Enhanced dielectric properties of homogeneous $Ti_3C_2T_x$ MXene@SiO_2/polyvinyl alcohol composite films[J]. Ceramics International，2020，46(9)：13862-13868.

[27] CAO W, CHEN F, ZHU Y, et al. Binary strengthening and toughening of MXene/cellulose nanofiber composite paper with nacre-inspired structure and superior electromagnetic interference shielding properties[J]. ACS Nano，2018，12(5)：4583-4593.

[28] CHEN Y, XIE X, XIN X, et al. $Ti_3C_2T_x$-based three-dimensional hydrogel by a graphene oxide-assisted self-convergence process for enhanced photoredox catalysis[J]. ACS Nano，2019，13(1)：295-304.

[29] SHANG T, LIN Z, QI C, et al. 3D macroscopic architectures from self-assembled MXene hydrogels[J]. Advanced Functional Materials，2019，29(33)：1903960.

[30] DENG Y, SHANG T, WU Z, et al. Fast gelation of $Ti_3C_2T_x$ MXene initiated by metal ions[J]. Advanced Materials，2019，31(43)：1902432.

[31] LIN Z, BARBARA D, TABERNA P, et al. Capacitance of $Ti_3C_2T_x$ MXene in ionic liquid electrolyte[J]. Power Sources，2016，326：575-579.

[32] CHEN H, MA H, ZHANG P, et al. Pristine titanium carbide MXene hydrogel matrix[J]. ACS Nano，2020，14(8)：10471-10479.

[33] YANG C, JIANG Q, LI W, et al. Ultrafine Pt nanoparticle-decorated 3D hybrid architectures built from reduced graphene oxide and MXene nanosheets for methanol oxidation[J]. Chemistry of Materials，2019，31(22)：9277-9287.

[34] WYCHOWANIEC J, LITOWCZENKO J, TADYSZAK K, et al. Unique cellular network formation guided by heterostructures based on reduced graphene oxide-$Ti_3C_2T_x$ MXene hydrogels[J]. Acta Biomater，2020，115：104-115.

[35] WANG Q, PAN X, WANG X, et al. Spider web-inspired ultra-stable 3D $Ti_3C_2T_x$ (MXene) hydrogels constructed by temporary ultrasonic alignment and permanent in-situ self-assembly fixation[J]. Composites Part B: Engineering，2020，197：108187.

[36] ZHANG Y, CHEN K, LI Y, et al. High-strength, self-healable, temperature-sensitive, MXene-containing composite hydrogel as a smart compression sensor[J]. ACS Applied Materials & Interfaces，2019，11(50)：47350-47357.

[37] LIAO H, GUO X, WAN P, et al. Conductive MXene nanocomposite organohydrogel for flexible, healable, low-temperature tolerant strain sensors[J]. Advanced Functional Materials，2019，29(39)：1904507.

[38] TAO N, ZHANG D, LI X, et al. Near-infrared light-responsive hydrogels via peroxide-decorated MXene-initiated polymerization[J]. Chemical Science，2019，10(46)：10765-10771.

[39] YEH C, RAIDONGIA K, SHAO J, et al. On the origin of the stability of graphene oxide membranes in water[J]. Nature Chemistry，2015，7：166-170.

[40] MA Y, YUE Y, ZHANG H, et al. 3D synergistical MXene/reduced graphene oxide aerogel for a piezoresistive sensor[J]. ACS Nano，2018，12(4)：3209-3216.

[41] LIU J, ZHANG H B, XIE X, et al. Multifunctional, superelastic, and lightweight MXene/polyimide aerogels[J]. Small，2018，14(45)：1802479.

[42] GEORGE S M, KANDASUBRAMANIAN B. Advancements in MXene-Polymer composites for various biomedical applications[J]. Ceramics International，2020，46(7)：8522-8535.

[43] GHIDIU M, LUKATSKAYA M R, ZHAO M, et al. Conductive two-dimensional titanium carbide ‘clay’ with high volumetric capacitance[J]. Nature，2014，516：78-81.

[44] LIN Z, SUN D, HUANG Q, et al. Carbon nanofiber bridged two-dimensional titanium carbide as a superior anode for Lithium-ion batteries[J]. Journal of Materials Chemistry A，2015，3(27)：14096-14100.

[45] LUKATSKAYA M R, KOTA S, LIN Z, et al. Ultra-high-rate pseudocapacitive energy storage in two-dimensional transition metal carbides[J]. Nature Energy，2017，2：17105.

[46] SHAHZAD F, ALHABEB M, HATTER C B, et al. Electromagnetic interference shielding with 2D transition metal carbides (MXenes)[J]. Science，2016，353(6304)：1137-1140.

[47] LIU J, ZHANG H B, SUN R, et al. Hydrophobic, flexible, and lightweight MXene foams for high-performance electromagnetic-interference shielding[J]. Advanced Materials，2017，29(38)：1702367.

[48] MA Y, LIU N, LI L, et al. A highly flexible and sensitive piezoresistive sensor based on MXene with greatly changed interlayer distances[J]. Nature Communication，2017，8：1207.

[49] XU B, ZHU M, ZHANG W, et al. Field-effect transistors: Ultrathin MXene-micropattern-based field-effect transistor for probing neural activity[J]. Advanced Materials，2016，28(17)：3333-3339.

[50] YU M, ZHOU S, WANG Z, et al. Accelerating polysulfide redox conversion on bifunctional electrocatalytic electrode for stable Li-S batteries[J]. Energy Storage Materials, 2019, 20: 98-107.

[51] WU X, WANG Z, YU M, et al. Stabilizing the MXenes by carbon nanoplating for developing hierarchical nanohybrids with efficient lithium storage and hydrogen evolution capability[J]. Advanced Materials, 2017, 29(24): 1607017.

[52] NIU S, WANG Z, YU M, et al. MXene-based electrode with enhanced pseudocapacitance and volumetric capacity for power-type and ultra-long life lithium storage[J]. ACS Nano, 2018, 12(4): 3928-3937.

[53] LUO J, WANG C, WANG H, et al. Pillared MXene with ultralarge interlayer spacing as a stable matrix for high performance sodium metal anodes[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(3): 1805946.

[54] ZHANG X, LV R, WANG A, et al. MXene aerogel scaffolds for high-rate lithium metal anodes[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2018, 57(46): 15028-15033.

[55] SONG J, GUO X, ZHANG J, et al. Rational design of free-standing 3D porous MXene/rGO hybrid aerogels as polysulfide reservoirs for high-energy lithium-sulfur batteries[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2019, 7(11): 6507-6513.

[56] ZHAO S, ZHANG H, LUO J, et al. Highly electrically conductive three-dimensional $Ti_3C_2T_x$ MXene/reduced graphene oxide hybrid aerogels with excellent electromagnetic interference shielding performances[J]. ACS Nano, 2018, 12(11): 11193-11202.

[57] 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.

[58] WEI Y, XIANG L, OU H, et al. MXene-based conductive organohydrogels with long-term environmental stability and multifunctionality[J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(48): 2005135.

[59] WANG L, ZHANG M, YANG B, et al. Highly compressible, thermally stable, light-weight and robust aramid nanofibers/Ti_3AlC_2 MXene composite aerogel for sensitive pressure sensor[J]. ACS Nano, 2020, 14(8): 10633-10647.

[60] MAO L, HU S, GAO Y, et al. Biodegradable and electroactive regenerated bacterial cellulose/MXene ($Ti_3C_2T_x$) composite hydrogel as wound dressing for accelerating skin wound healing under electrical stimulation[J]. Advanced Healthcare Materials, 2020, 9(19): 2000872.

[61] LEE K H, ZHANG Y, JIANG Q, et al. Alshareef, ultrasound-driven two-dimensional $Ti_3C_2T_x$ MXene hydrogel generator[J]. ACS Nano, 2020, 14(3): 3199-3207.