文章编号:1674-2869(2024)05-0503-07

提升碱化MXene材料性能的策略综述

万 彪,杨富国,张 桥,喻湘华,季家友*,李 亮*
武汉工程大学材料科学与工程学院,湖北 武汉 430205

摘 要:拥有片层结构的二维过渡金属氮化物和碳化物(MXene)纳米材料是新发现的一种二维材料,可以通过氢氧化钠处理改变MXene材料表面的官能团和官能团的数量,经碱处理过的MXene材料拥有更优良的电化学、吸附等性能,可应用于能量储存和转换、光电催化、柔性传感器等领域。对提升碱化MXene材料性能的策略进行综述。首先可以通过十八烷基胺、氨基、金属离子等小分子修饰碱化MXene材料,还可以通过碱化MXene与金属材料、金属化合物、非金属材料、高分子材料等复合得到复合材料从而提升其性能。还对碱化MXene的发展提出了建议,认为调控碱化MXene材料的性能并降低碱化MXene材料的生产成本是拓展碱化MXene材料实际应用的主要方向。

关键词:碱化MXene;小分子修饰;材料复合;综述
中图分类号:TQ427.26 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202306020

Review of strategies for improving the performance of alkaline MXene materials

WAN Biao, YANG Fuguo, ZHANG Qiao, YU Xianghua, JI Jiayou, LI Liang**
School of Materials Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: The two-dimensional transition metal nitride and carbide (MXene) nanomaterial with a lamellar structure is an emerging class of two-dimensional material. The variety and the number of functional groups on the surface can be further altered by treating with sodium hydroxide, resulting in alkali-treated MXene materials with superior electrochemical and adsorption properties. And it can be applied in the fields of energy storage and conversion, photoelectrocatalysis, and flexible sensors. In this review, strategies for improving the performance of alkaline MXene materials are introduced. Firstly, alkaline MXene materials can be modified by small molecules such as octadecylamine, amino acid, and metal ions. Additionally, composites can be obtained by combining alkalized MXene with metal materials, metal compounds, non-metallic materials, and polymer materials to enhance their performance. Recommendations for the development of alkalized MXene have been provided, indicating that regulating the properties of alkaline MXene materials and lowering the production cost are the main approaches to broaden their applications.

Keywords: alkaline MXene; modification with small molecules; material composite; review

电子只能在纳米尺度的二维平面运动,厚度为原子级的纳米材料称为二维材料[1],目前发现的二维材料普遍具有片层结构。常见的二维材料有二硫化钼(MoS_2)[2]、氧化石墨烯(graphene orxide, GO)[3-4]、类石墨相氮化碳(graphite phase carbon nitride, g-C_3N_4)[5]等。Anasori和Naguib[6]

收稿日期:2023-06-22
基金项目:湖北高校2022年省级大学生创新创业训练计划项目(S202210490009)
作者简介:万 彪,硕士研究生。Email:2217104074@qq.com
***通信作者**:李 亮,博士,教授。Email:msell08@163.com
季家友,博士,教授。Email:Jijy@wit.edu.cn
引文格式:万彪,杨富国,张桥,等. 提升碱化MXene材料性能的策略综述[J]. 武汉工程大学学报,2024,46(5):503-509.

首次制备出了二维过渡金属氮化物和碳化物(transition metal nitride and carbide, MXene),MXene一般是通过选择性刻蚀碳/氮化物的前驱体进行制备。主要的蚀刻方法有氢氟酸(hydrofluoric acid,HF)刻蚀法、原位HF刻蚀、熔融盐法[7-9]。MXene作为一种全新的二维片层结构材料,其优异的性能引发了众多学者的兴趣[10-13]。MXene的结构是$M_{n+1}X_nT_x$型,其中的M代表早期过渡金属(如:钛),X代表氮或碳,T_x代表刻蚀过程中添加的表面官能团,n=1,2,3[14-16]。目前MXene材料被广泛应用于能量储存和转换(包括超级电容器[17-19]和可充电电池[20-22])、光电催化[23-26]、柔性传感器[27-29]等领域。表面官能团的存在和MXene材料的性能有关,材料表面的官能团以及官能团的数量均有可能改变MXene材料的化学性质,继而影响性能[30-31]。酸化处理MXene过程中利用HF刻蚀其前驱物,从而得到表面含有氟元素和氢元素的MXene。在2018年,Zheng等[32]研究发现,对MXene材料采用氢氧化钠进行碱化处理,可以使MXene材料表面的含氟官能团转化为羟基(—OH)。刻蚀过程使MXene材料表面附着更多的—OH官能团。把含氟官能团转化为—OH后,带负电的—OH更容易与阳离子结合,使MXene材料更利于吸附废水中的阳离子杂质。碱处理MXene会破坏MXene片层间的静电平衡,使MXene片层之间的静电斥力无法补偿高表面能,诱导MXene薄片起皱。同时钠离子的插入使MXene片层间距增大,有效抑制MXene薄片再次堆积,有利于形成开放的三维多孔结构,为层间填充提供足够大的空间,有利于与其他材料有效复合[33],也方便电子运输,提高材料的电化学性能。碱化(alkali,alk-)的MXene(记为alk-MXene)由于有更多的—OH官能团和三维多孔结构,目前主要用于吸附水中的重金属离子[34-38]、净化水资源等。此外碱化MXene在电催化[39]、超级电容器[40]、柔性传感器[41]等领域也有一定的应用潜力。目前国内外研究人员对alk-MXene材料的关注度不高,有待进一步研究。本文介绍了提升alk-MXene材料性能的策略,一方面可以通过十八烷基胺(octadecylamine,ODA)、氨基、金属离子等小分子修饰alk-MXene材料,另一方面也可以通过alk-MXene与金属材料、金属化合物、非金属材料、高分子材料等材料复合制备复合材料,从而提升其性能。

1 小分子修饰alk-MXene

1.1 ODA修饰alk-MXene

为了解决泡沫洗涤剂在低温环境下去除表面放射性污染物过程中稳定性差、去污效率低的问题,Chen等[42]通过氟化锂(LiF)和盐酸(HCl)的混合溶液蚀刻MAX制备了MXene(图1),通过羟基化对MXene进行改性得到alk-MXene,并用ODA对alk-MXene进行疏水改性得到alk-MXene@ODA。表征结果表明:alk-MXene具有较大的层间距、较大的比表面积和丰富的表面官能团—OH。alk-MXene表现出对水的完全吸收,alk-MXene@ODA接枝改性后润湿接触角增加到89.07°。通过alk-MXene与ODA协同增加泡沫的稳定性,泡沫的排水半衰期从40.81 min增加到66.89 min,泡沫液膜的平均厚度从47.065 μm增加到53.162 μm,液膜衰减率从0.956 μm/min降低到0.544 μm/min,解决了泡沫洗涤剂在低温环境下去除表面放射性污染物过程中稳定性差、去污效率低的问题。

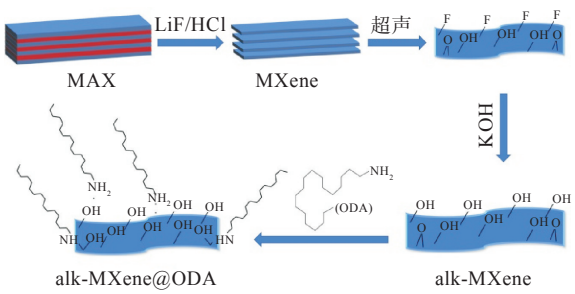

图1 十八烷基胺修饰alk-MXene示意图[42]

Fig. 1 Schematic diagram of octadecylamine modified alk-MXene[42]

1.2 氨基修饰alk-MXene

Zhang等[43]通过碱化接枝改性制备出了一种具有高效吸附铅(Pb)的氨基(—NH_2)改性alk-MXene(记为alk-MXene-NH_2)纳米片(图2)。通过增加接枝有机官能团的含量,可以显著改善MXene层间间距和化学状态,制备的alk-MXene-NH_2纳米片的比表面积达到129.21 $m^2 \cdot g^{-1}$,高于所有MXene-NH_2纳米片的比表面积。形成的官能团表现出较强的络合作用,能从水介质中捕获Pb^{2+}。alk-MXene-NH_2对Pb(II)的最大吸附量可达384.63 $mg \cdot g^{-1}$,与其他吸附剂相比具有显著的优势。这些性质表明,氨基功能化的MXene基吸附剂将是工业应用有力的候选者。

1.3 金属离子修饰alk-MXene

Dao等[44]采用碱性插层法制备了表面富含—OH的alk-MXene,以去除废水中的四环素

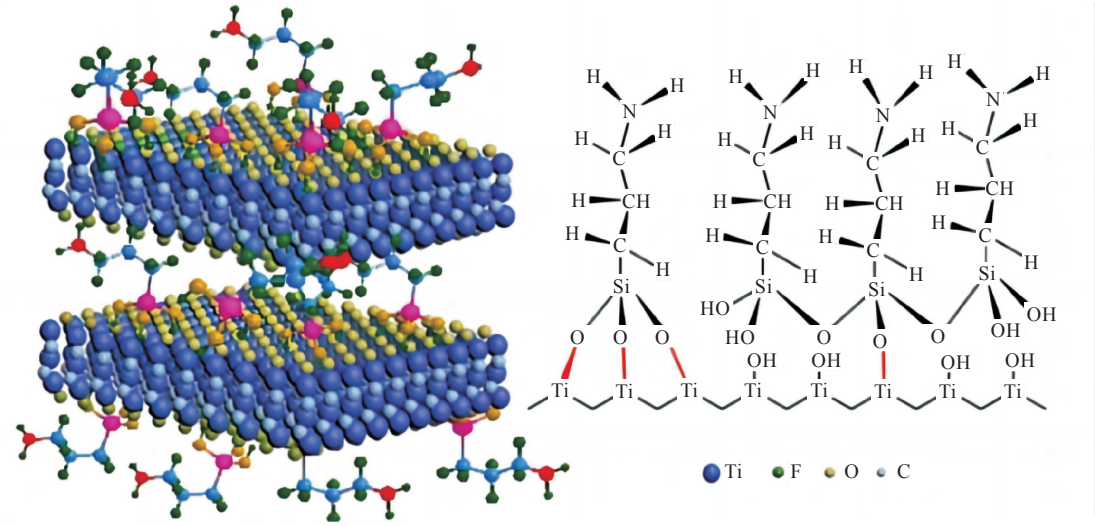

图2　碱化接枝法合成氨基官能化alk-MXene纳米片示意图[43]

Fig. 2　Schematic diagram of the preparation of amino-functionalized alk-MXene nanosheets synthesized by alkaline grafting method[43]

(tetracycline，TC)(图3)。此外还探讨了金属离子，包括Co(II)、Cu(II)、Cr(III)、Cd(II)和Ni(II)对alk-MXene吸附TC的影响。定量分析表明，MXene表面的—OH含量与TC吸附量之间存在关联。分批吸附实验表明，金属离子的存在提高了TC的吸附能力，当与Ni(II)共存时，去除能力提高了750%。采用Langmuir模型、Freundlich模型和单层模型等3种吸附等温线模型对吸附机理进行了研究，结果表明吸附遵循Freundlich模型。吸附发生在alk-MXene表面的—OH位点上，金属离子的表面修饰增强了表面络合作用，从而增强了alk-MXene的吸附能力。

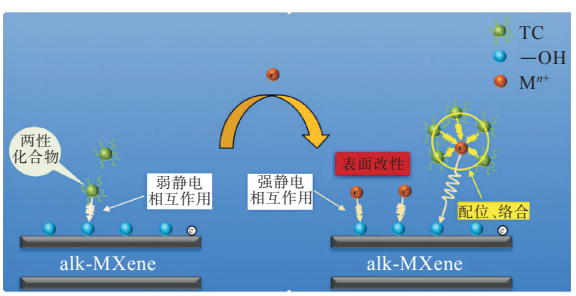

图3　金属离子修饰alk-MXene吸附TC示意图[44]

Fig. 3　Schematic diagram of the adsorption of TC by metal ion modified alk-MXene[44]

2　金属化合物或金属材料复合alk-MXene

褐黑色斜方晶体的硫化亚锡(stannous sulfide，SnS)是一种金属化合物，其光学直接带隙和间接带隙与太阳辐射中的可见光光谱匹配，适合用作太阳能电池中的光吸收层，是一种有潜力的太阳能电池材料。MXene与SnS的复合材料在锂电池方面有很大的应用潜力。Tan等[45]通过水热法制备了alk-MXene-SnS杂化物。alk-MXene微孔板有利于电子传输，三维褶皱形态确保了Li^+扩散需要的充足通道。MXene碱化处理产生的alk-MXene有效与SnS结合，使SnS纳米片在循环过程中与alk-MXene基底牢固结合，并克服了由大体积变化引起的容量衰减。电化学阻抗谱和电化学测试证明，通过两种成分之间的协同作用实现了高的电子/离子导电性和优异的动力学性能，保证了混合材料优异的电化学性能。因此alk-MXene-SnS在200 mA·g^{-1}下100次循环后和在8 000 mA·g^{-1}下分别保持519和330 (mA·h)/g的比容量。此外，在1 000 mA·g^{-1}下进行800次循环的长期循环测试后，可以保持421 (mA·h)/g的可逆比容量。

Zhang等[46]报道了在室温下将硝酸银($AgNO_3$)与alk-MXene在含聚乙烯吡咯烷酮(polyvinylpyrrolidone，PVP)的溶液中直接混合制备了一系列MXene-Ag复合材料，其中类似海胆形状的MXene-$Ag_{0.9}Ti_{0.1}$双金属纳米线复合材料在氧化还原反应中表现出优异的电催化活性。PVP溶液的加入诱导alk-MXene形成纳米孪晶Ag种子，然后长成Ag/Ti($Ag_{0.9}Ti_{0.1}$)双金属纳米线。独特的双金属纳米线有利于四电子转移过程，具有大量的氧吸附位点和较短的吸附氧扩散路径，具有较高的电流密度和良好的稳定性。这一结果是alk-MXene材料在电催化应用领域中的新进展之一。

3 非金属材料复合alk-MXene

非金属材料中的碳纳米管(carbon nanotubes,CNTs)材料目前已经成为热门的研究方向,其与MXene的复合材料在超级电容器的应用方面具有潜力。Li等[40]提出了一种简单的碱诱导工艺,即在MXene薄膜电极内构建孔隙,并将集成的CNTs作为"间隔剂",以扩大MXene的层间间距。这种双重策略可以有效抑制MXene纳米片的再堆积,并通过改善离子传输和暴露活性表面位点进行强氧化还原反应最大限度地提高了电极性能。如图4所示,基于其独特的结构,alk-MXene-CNT复合膜(记为A-MCF)在1 $A\cdot g^{-1}$电流密度下具有401.4 $F\cdot g^{-1}$的高比电容,在1 000 $A\cdot g^{-1}$电流密度下保持336.2 $F\cdot g^{-1}$的比电容。此外,薄膜电极表现出出色的循环稳定性,在100 $A\cdot g^{-1}$下循环20 000次后比电容保持率为99.0%,在超级电容器的应用方面具有很大的潜力。

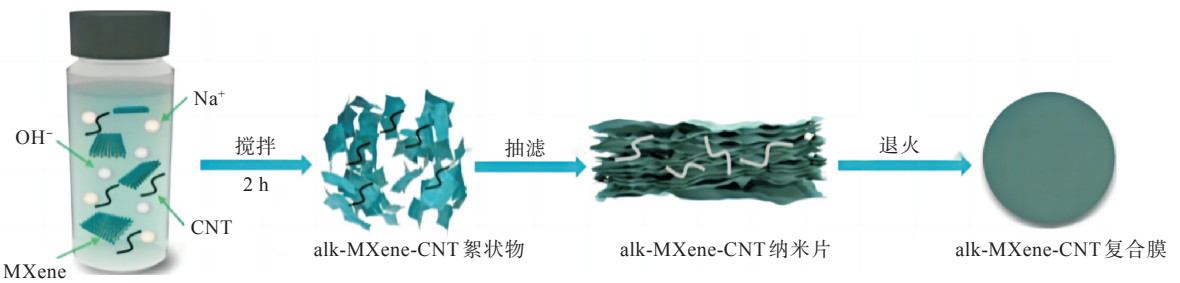

图4 A-MCF制备示意图[40]

Fig. 4 Schematic diagram of the preparation of A-MCF[40]

4 高分子材料复合alk-MXene

Li等[41]研究了一种基于alk-MXene材料和聚多巴胺(polydopamine,PDA)复合开发的柔性湿度传感器,可以有效避免由直接接触产生的问题。alk-MXene具有大比表面积、独特的手风琴状分级结构,PDA含有丰富的吸水官能团(图5),使传感器具有高灵敏度、快速响应和大检测范围的优异性能。该设备已成功用于基于指尖距离控制非接触开关系统,并从远程监测志愿者的不同呼吸模式,证明了其在未来非接触人机交互和人体生理监测中的潜在应用。

Wang等[47]使用简单的水热和自组装技术,设计了一种新的磁性吸附剂,将$CoFe_2O_4$/壳聚糖(chitosan,CS)复合材料负载在alk-MXene片上。对合成的alk-MXene/$CoFe_2O_4$/CS复合材料的结构和表面性能进行了表征。进行了吸附刚果红(Congo red,CR)、罗丹明B和孔雀绿染料的实验,结果表明$CoFe_2O_4$/CS负载在alk-MXene片上可以提高$CoFe_2O_4$/CS对阳离子和阴离子染料的吸附能力。吸附机理分析表明,静电相互作用和氢键的协同作用使alk-MXene/$CoFe_2O_4$/CS复合材料具有优异的吸附能力。

Hao等[48]通过将聚丙烯酸(polyacrylic acid,PAA)接枝到碱化的单层/多层MXene纳米片上,制备了一种新型的PAA-alk-MXene吸附剂,用于去除废水中的染料(图6)。结果证实了PAA成功接枝到alk-MXene纳米片上,通过吸附实验研究了

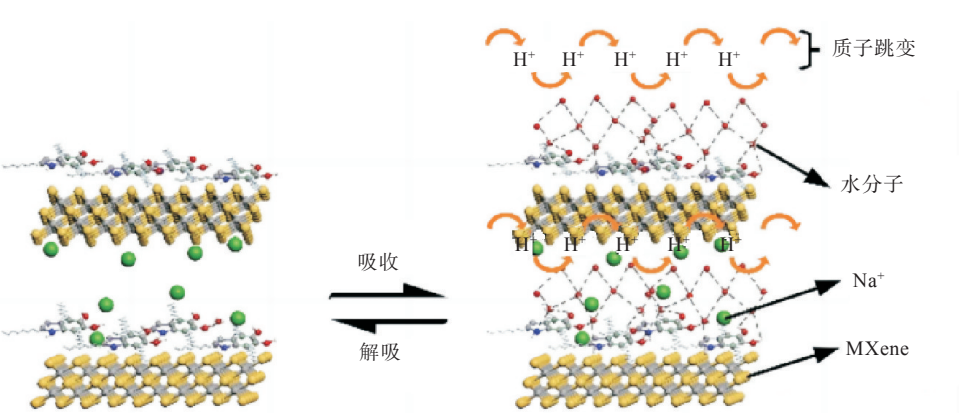

图5 传感器吸水示意图[41]

Fig. 5 Schematic diagram of sensor water absorption[41]

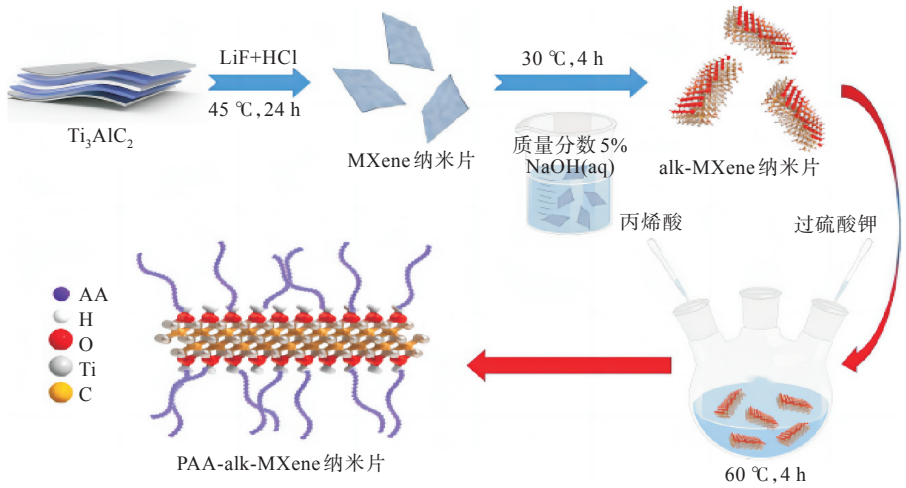

图6　PAA-alk-MXene的制备示意图[48]

Fig. 6　Schematic diagram of the preparation of PAA-alk-MXene[48]

PAA-alk-MXene对阴离子染料CR和阳离子染料亚甲基蓝(methylene blue，MB)的吸附。研究丙烯酸用量、染料和吸附剂的接触时间、染料初始浓度、温度和pH对吸附过程的影响。吸附数据表明，2 mL丙烯酸改性样品对CR和MB的最大吸附量分别为264.46和193.92 mg/g。同时，实验还研究了PAA-alk-MXene的吸附机理，发现静电吸引、氢键和层间作用力可能是吸附的主要驱动力。

5　总结与展望

拥有片层结构的二维纳米材料MXene自2011年被发现以来，其制备方法由最开始的使用危害性、腐蚀性比较大的HF直接蚀刻到用氢化物盐混合物蚀刻制备。制备出的MXene材料具有良好的性能，可以与其他材料复合进一步提高材料整体性能。除此之外，还可以对MXene材料进行改性，采用氢氧化钠对MXene材料进行碱化处理，使MXene材料表面官能团中的—F转化为—OH，可以提高MXene材料以及MXene基复合材料的性能。目前alk-MXene材料主要用来吸附水中的重金属离子。此外Na^+的插入和三维多孔结构的存在使alk-MXene在超级电容器、锂电池、柔性传感器方面具有一定的应用潜力。用ODA、氨基、金属离子等小分子对alk-MXene进行修饰改性可以扩大其比表面积和层间距，进一步增强去污和吸附能力；将alk-MXene与SnS、CNT等材料进行复合后，扩大了alk-MXene材料的层间距，提供了电子/离子高速传输路径，进而提高其电化学、吸附等性能；采用PDA、CS和PAA等复合alk-MXene后，扩大的比表面积和丰富的表面官能团可增强其传感和吸附性能。通过一些策略提高alk-MXene的性能的同时也存在一些问题。比如，用来修饰提升alk-MXene性能的材料价格过高、成本偏大，仅限于实验室研究使用，并不能实现大规模的工业生产。在未来的研究中，需要在提升alk-MXene材料性能的同时降低其生产成本，可以选择铁等成本低的金属，拓展其应用领域。

参考文献

[1]　李能，曾宪兵，陈怡君，等. 新型二维材料MXene及MBene合成的研究进展[J]. 武汉工程大学学报，2023，45(1)：15-24.

[2]　JIA W H，WU H，ZHENG Y X，et al. Co/N co-doped MoS_2 with high pseudocapacitive performance for solid-state flexible supercapacitors [J]. ACS Applied Energy Materials，2023，6(4)：2570-2581.

[3]　MAZLAN N S N，SALLEH K M，KHAIRUNNISA-ATIQAH M K，et al. Macro-size regenerated cellulose fibre embedded with graphene oxide with antibacterial properties [J]. Polymers，2023，15(1)：230.

[4]　WANG Y，LI S S，YANG H Y，et al. Progress in the functional modification of graphene/graphene oxide：a review [J]. RSC Advances，2020，10(26)：15328-15345.

[5]　LI X，BAI Y，SHI X，et al. Mesoporous g-C_3N_4/MXene ($Ti_3C_2T_x$) heterojunction as a 2D electronic charge transfer for efficient photocatalytic CO_2 reduction [J]. Applied Surface Science，2021，546：149111.

[6]　ANASORI B，NAGUIB M. Two dimensional MXenes [J]. MRS Bulletin，2023，48(3)：238-244.

[7]　QIN R Z，LI X，HU M J，et al. Preparation of high-performance MXene/PVA-based flexible pressure

sensors with adjustable sensitivity and sensing range [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2022, 338: 113458.

[8] LI S, FAN Z D, WU G Q, et al. Assembly of nanofluidic MXene fibers with enhanced lonic transport and capacitive charge storage by flake orientation [J]. ACS Nano, 2021, 15(4): 7821−7832.

[9] DE S, MAITY C K, SAHOO S, et al. Polyindole booster for $Ti_3C_2T_x$ MXene based symmetric and asymmetric supercapacitor devices [J]. ACS Applied Energy Materials, 2021, 4(4): 3712−3723.

[10] 宁佳鑫,邓勇,李亮.MXene及其复合材料的制备与应用研究进展[J].武汉工程大学学报,2022,44(4):371−376,407.

[11] 王若冲,陈振宇,李厚燊,等.基于MXene气凝胶的微型超级电容器[J].武汉工程大学学报,2021,43(3):288−293,299.

[12] 方龙,张鹏,喻湘华,等.聚多巴胺/MXene/Cu改性棉织物的制备及其性能[J].武汉工程大学学报,2024,46(2):155−161.

[13] 王东,杨圣雄,肖健,等.用于电解水制氢的MXene基电催化剂的研究进展[J].武汉工程大学学报,2023,45(4):364−377,412.

[14] KIM Y, KIM E, KIM D, et al. Tuning the microstructure and rheological properties of MXene-polymer composite ink by interaction control [J]. Korea-Australia Rheology Journal, 2023, 35(2): 117−125.

[15] JIANG J, CHEN X, NIU Y, et al. Advances in flexible sensors with MXene materials [J]. New Carbon Materials, 2022, 37(2): 303−320.

[16] WANG Y X, YUE Y, CHENG F, et al. $Ti_3C_2T_x$ MXene-based flexible piezoresistive physical sensors [J]. ACS Nano, 2022, 16(2): 1734−1758.

[17] GUO T Z, ZHOU D, DENG S G, et al. Rational design of $Ti_3C_2T_x$ MXene inks for conductive, transparent films [J]. ACS Nano, 2023, 17(4): 3737−3749.

[18] HALIM J, LUKATSKAYA M R, COOK K M, et al. Transparent conductive two-dimensional titanium carbide epitaxial thin films [J]. Chemistry of Materials, 2014, 26(7): 2374−2381.

[19] PAN Z H, CAO F, HU X, et al. A facile method for synthesizing CuS decorated Ti_3C_2 MXene with enhanced performance for asymmetric supercapacitors [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2019, 7(15): 8984−8992.

[20] XI W, ZHANG Y F, ZHANG J P, et al. Constructing MXene hydrogels and aerogels for rechargeable supercapacitors and batteries [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2023, 11(7): 2414−2429.

[21] VAHIDMOHAMMADI A, HADJIKHANI A, SHAHBAZMOHAMADI S, et al. Two-dimensional vanadium carbide (MXene) as a high-capacity cathode material for rechargeable aluminum batteries [J]. ACS Nano, 2017, 11(11): 11135−11144.

[22] TAN B, LU T D, LUO W B, et al. A novel MoS_2-MXene composite cathode for aluminum-ion batteries [J]. Energy & Fuels, 2021, 35(15): 12666−12670.

[23] QIANG W, QU X, CHEN C T, et al. Ti_3C_2 MXene derived (001) TiO_2/Ti_3C_2 heterrojunctions for enhanced visible-light photocatalytic degradation of tetracycline [J]. Materials Today Communications, 2022, 33: 104216.

[24] YOU Z Y, LIAO Y L, LI X, et al. State-of-the-art recent progress in MXene-based photocatalysts: a comprehensive review [J]. Nanoscale, 2021, 13(21): 9463−9504.

[25] JIANG J Z, ZOU Y L, ARRAMEL, et al. Intercalation engineering of MXenes towards highly efficient photo(electrocatalytic) hydrogen evolution reactions [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2021, 9(43): 24195−24214.

[26] PENG J H, CHEN X Z, ONG W J, et al. Surface and heterointerface engineering of 2D MXenes and their nanocomposites: insights into electro- and photocatalysis [J]. Chem, 2019, 5(1): 18−50.

[27] CAI Y C, SHEN J, GE G, et al. Stretchable $Ti_3C_2T_x$ MXene/carbon nanotube composite based strain sensor with ultrahigh sensitivity and tunable sensing range [J]. ACS Nano, 2018, 12(1): 56−62.

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

[29] LI N, PENG J H, ONG W J, et al. MXenes: an emerging platform for wearable electronics and looking beyond [J]. Matter, 2021, 4(2): 377−407.

[30] JIANG J Z, BAI S H, ZOU J, et al. Improving stability of MXenes [J]. Nano Research, 2022, 15(7): 6551−6567.

[31] ZOU J, WU J, WANG Y Z, et al. Additive-meditated intercalation and surface modification of MXenes [J]. Chemical Society Reviews, 2022, 51(8): 2972−2990.

[32] ZHENG W, ZHANG P G, TIAN W B, et al. Alkali treated $Ti_3C_2T_x$ MXenes and their dye adsorption performance [J]. Materials Chemistry and Physics, 2018, 206: 270−276.

[33] LIAN P C, DONG Y F, WU S, et al. Alkalized

Ti_3C_2 MXene nanoribbons with expanded interlayer spacing for high-capacity sodium and potassium ion batteries[J]. Nano Energy，2017，40：1-8.

[34] WANG S Y，WANG L，LI Z J，et al. Highly efficient adsorption and immobilization of U(VI) form aqueous solution by alkalized MXene-supported nanoscale zero-valent iron[J]. Journal of Hazardous Materials，2021，408：124949.

[35] FENG X F，YU Z X，LONG R X，et al. Self-assembling 2D/2D（MXene/LDH）materials achieve ultra-high adsorption of heavy metals Ni^{2+} through terminal group modification [J]. Separation and Purification Technology，2020，253：117525.

[36] GUO J X，PENG Q M，FU H，et al. Heavy-metal adsorption behavior of two-dimensional alkalization-intercalated MXene by first-principles calculations [J]. The Journal of Physical Chemistry，2015，119（36）：20923-20930.

[37] GUO J X，FU H，ZOU G D，et al. Theoretical interpretation on lead adsorption behavior of new two-dimensional transition metal carbides and nitrides [J]. Journal of Alloys and Compounds，2016，684：504-509.

[38] PENG Q M，GUO J X，ZHANG Q R，et al. Unique lead adsorption behavior of activated hydroxyl group in two-dimensional titanium carbide [J]. Journal of the American Chemical Society，2014，136（11）：4113-4116.

[39] ZHANG Q，GUO D，HUANG Z，et al. 2D hydroxylated MXene(OH-MXene)/RGO composites modification toward superior electrocatalytic degradation of paracetamol [J]. Diamond and Related Materials，2023，137：110152.

[40] LI K L，ZHANG P，SOOMRO R A，et al. Alkali-induced porous MXene/carbon nanotube-based film electrodes for supercapacitors [J]. ACS Applied Nano Materials，2022，5(3)：4180-4186.

[41] LI T K，ZHAO T T，TIAN X M，et al. A high-performance humidity sensor based on alkalized MXenes and poly(dopamine) for touchless sensing and respiration monitoring [J]. Journal of Materials Chemistry C，2022，10(6)：2281-2289.

[42] CHEN C H，XI H L，LIN X Y，et al. Study on modified MXene to increase the stability and decontamination properties of biomass-based antifreeze foam detergent [J]. Colloids and Surfaces A：Physicochemical and Engineering Aspects，2022，653：130014.

[43] ZHANG G L，WANG T C，XU Z H，et al. Synthesis of amino-functionalized $Ti_3C_2T_x$ MXene by alkalization-grafting modification for efficient lead adsorption [J]. Chemical Communications，2020，56（76）：11283-11288.

[44] DAO X，HAO H X，BI J T，et al. Surface complexation enhanced adsorption of tetracycline by ALK-MXene [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research，2022，61(17)：6028-6036.

[45] TAN H K，SUN L，XIE F，et al. SnS nanosheets firmly bound in alkali-treated wrinkled MXene framework with enhanced lithium-ion storage [J]. Journal of Colloid and Interface Science，2023，633：737-745.

[46] ZHANG Z W，LI H N，ZOU G D，et al. Self-reduction synthesis of new MXene/Ag composites with unexpected electrocatalytic activity [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering，2016，4(12)：6763-6771.

[47] WANG R C，CAO H P，YAO C，et al. Construction of alkalized MXene-supported $CoFe_2O_4$/CS composites with super-strong adsorption capacity to remove toxic dyes from aqueous solution [J]. Applied Surface Science，2023，624：157091.

[48] HAO C Q，LI G F，WANG G L，et al. Preparation of acrylic acid modified alkalized MXene adsorbent and study on its dye adsorption performance [J]. Colloids and Surfaces A：Physicochemical and Engineering Aspects，2022，632：127730.

本文编辑：苗　变