文章编号:1674-2869(2025)02-0151-09

MXenes应用于锂离子电池负极的研究进展

王博海,石胜伟*
武汉工程大学材料科学与工程学院,湖北 武汉 430205

摘 要:具有优异导电性、机械性能以及化学稳定性的二维层状过渡金属碳化物、氮化物或碳氮化物(MXenes)在储能领域受到了广泛关注。锂离子电池因其循环寿命长、绿色环保、无记忆效应等优点被认为是拥有巨大潜力的储能器件,但目前的负极材料都存在一些不足之处,如比容量还需进一步提高、充电前后体积会发生巨大变化,而将MXenes应用到锂离子电池中可以有效提升电池性能。介绍了MXenes的制备方法,并从结构调控以及与其他材料复合方面对MXenes近年来在锂离子电池中的应用研究进行了综述。MXenes的制备方法主要有化学法、熔融盐法、电化学法,不同方法制备的MXenes表面化学基团也有着差异。结构调控可以改变MXenes的层间距、层数以及整体结构,使MXenes暴露出更多活性位点并增强其储锂能力。从MXenes与硅、金属氧化物、碳材料复合的方面出发,讨论了MXenes复合材料的性能以及在锂离子电池负极中的研究进展。最后,本文总结了MXenes在锂离子电池负极中的研究进展,并对MXenes应用于锂离子电池的发展趋势进行了展望,为MXenes在锂离子电池中的后续研究提供了一定参考。

关键词:MXene;锂离子电池;储能器件;负极材料;研究进展
中图分类号:O482.54 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202409009

Research progress on MXenes in lithium-ion battery anodes

WANG Bohai, *SHI Shengwei**
School of Materials Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: Two-dimensional layered transition metal carbides, nitrides, or carbon-nitrides (MXenes) with excellent electrical conductivity, mechanical properties, and chemical stability have received much attention in the field of energy storage. Lithium-ion batteries are regarded as energy storage devices with great potential due to their long cycle life, environmental friendliness and no memory effect. However, the current anode materials have such disadvantages as low specific capacity and large volume changes before and after charging. Applying MXenes in lithium-ion batteries can effectively improve their performance. This paper introduces the preparation methods of MXenes, and reviews the application of MXenes in lithium-ion batteries in recent years in terms of structure modulation and compounding with other materials. The preparation methods of MXenes mainly include the chemical method, the molten salt method and the electrochemical method, and the surface chemical groups of MXenes prepared by different methods vary. The structure modulation can change the interlayer spacing, the number of layers and the overall structure of MXenes, making MXenes expose more active sites and enhance the lithium storage capacity. By analyzing the composites of MXenes with silicon, metal oxides and carbon materials, the properties of MXenes composites and their research progress in lithium-ion battery anodes are discussed. In the end, this paper summarizes the research progress of MXenes in lithium-ion battery anodes, and provides an outlook on the future development of MXenes in lithium-ion batteries, offering some reference for further research on MXenes in lithium-ion batteries

Keywords: MXene; lithium-ion batteries; energy storage devices; anode materials; research progress

收稿日期:2024-09-11
基金项目:国家自然科学基金(52173183);光电化学材料与器件教育部重点实验室开放课题(JDGD-202207)
作者简介:王博海,硕士研究生。Email:22205010032@stu.wit.edu.cn
***通信作者**:石胜伟,博士,教授。Email:shisw@wit.edu.cn
引文格式:王博海,石胜伟. MXenes应用于锂离子电池负极的研究进展[J]. 武汉工程大学学报,2025,47(2):151-159.

科技的发展离不开能源的支持，但传统化石燃料的使用会对环境造成破坏[1]。为了应对目前全球恶劣的环境问题，人们便把目光放在了太阳能[2]、风能[3-4]等清洁能源上，但是想要进一步发展这类清洁能源还需要对储能技术进行提升，因此人们对高性能储能器件的需求不断上升。

在储能器件中锂离子电池因其绿色清洁、能量密度高以及长寿命[5-6]等优点被广泛应用于手机、电脑等电子产品及新能源电动汽车等领域[7-10]。然而锂离子电池的负极材料目前也存在一些阻碍锂离子电池发展的问题，例如目前商业化的锂离子电池大多以石墨作为负极材料，但石墨负极存在理论比容量（372 mA·h·g^{-1}）偏低的问题。硅基负极因具有高的理论比容量（~4 200 mA· h·g^{-1}）而被认为是具有很大潜力的负极材料，但却会在充放电过程中发生严重的体积变化[11-12]。为了寻找性能优异的负极材料，研究者们对大量材料进行了研究，在众多材料中一些二维材料能够快速传输、储存锂离子，因此被认为具有一定潜力作为锂离子电池负极[13-14]。

二维层状过渡金属碳化物、氮化物或碳氮化物（two-dimensional layered transition metal carbides/nitrides/carbon-nitrides，MXenes）作为一种新兴的多功能材料，具有优异的导电性、高比表面积、亲水性、丰富的表面基团等优点，自问世以来便受到广泛的关注，并被应用于环境、储能、传感器等多个领域[15-16]（图1）。基于MXenes的众多优点，近年来MXenes被应用于锂硫电池[17-18]、锂金属电池[19-20]以及锂离子电池[21]。MXenes在锂离子电池中的应用主要集中在锂离子电池负极。MXenes负极有着优异的循环稳定性，但可逆容量偏低。将MXenes与Si、金属氧化物、碳材料等复合可以提高负极的容量，同时由于MXenes的多层结构以及优异的机械性能，可以有效减小Si和金属氧化物在锂离子嵌入/脱嵌时的电极体积变化。



图1 MXenes在多个研究领域的应用

Fig. 1 Applications of MXenes in multiple research fields

锂离子电池作为一种被广泛使用的储能器件，与人类的日常生活息息相关，然而其性能还需不断提升。为了更好地指引MXenes在锂离子电池负极中的研究，针对MXenes的独特优势，本文总结了近年来的相关研究，从MXenes结构调控和MXenes复合体系两个方面进行讨论，并对未来MXenes在锂离子电池中的研究进行了展望，希望MXenes在锂离子电池中的研究能为锂离子电池的发展提供一定助力。

1 MXene的组成及制备

1.1 MXene的组成

MXene是一类二维过渡金属碳化物、氮化物和碳氮化物的统称，其母体为三元层状碳化物或氮化物（ternary layered carbides/nitrides，MAX相）。MAX相的通式为$M_{n+1}AX_n$，MXene的通式为$M_{n+1}X_nT_x$，各组成部分如图2(a)所示[22]，其中“M”代表过渡金属元素，如Ti、V、Nb，“A”代表的元素有Al、Si、Zn等，“X”代表C、N、O，而“T_x”代表MXene表面的端基[23-25]。目前所知的MAX相都被认为拥有$P6_3/mmc$对称层状结构[26]，即MAX相是由“$M_{n+1}X_n$”与“A”层交替堆叠而形成的，此外MAX相的各层之间化学键不同，M层与X层之间存在着离子键和共价键，而M层与A层之间存在着金属键，通过一些特定的反应除去MAX相中的“A”层便可以得到二维的MXene，如图2(b)所示[23]。

1.2 MXene的制备方法

目前，MXene是通过选择性刻蚀MAX相制备的，即通过特定的反应刻蚀掉MAX相的“A”层便可得到MXene，例如最早的MXene（$Ti_3C_2T_x$）是通过氟化氢（hydrogen fluoride，HF）刻蚀Ti_3AlC_2中的Al原子层获得的。随着对MXene的研究越来越深入，制备方法也变得多样化（图3），如原位生成HF法、熔融盐法[27]、电化学法[28]、碱辅助水热法[29]、化学气相沉积法等[30]。

1.2.1 含F化学法制备 由于M层与X层间的离子键与共价键的强度高于M层与A层间的金属键，因此可以通过化学反应选择性除去MAX相中的A层。使用HF可以有效刻蚀MAX相，但是HF具有一定的毒性，所以直接使用HF进行刻蚀会给实验带来一定的危险，为了使实验更安全，Driscoll等[31]将HF、HCl和去离子水的混合溶液作为刻蚀剂，并对Ti_3AlC_2刻蚀处理，最终成功制备出Ti_3C_2，这种刻蚀方法不仅能有效制备MXene，还能减少HF的用量。此外，在刻蚀过程中原位生成HF也

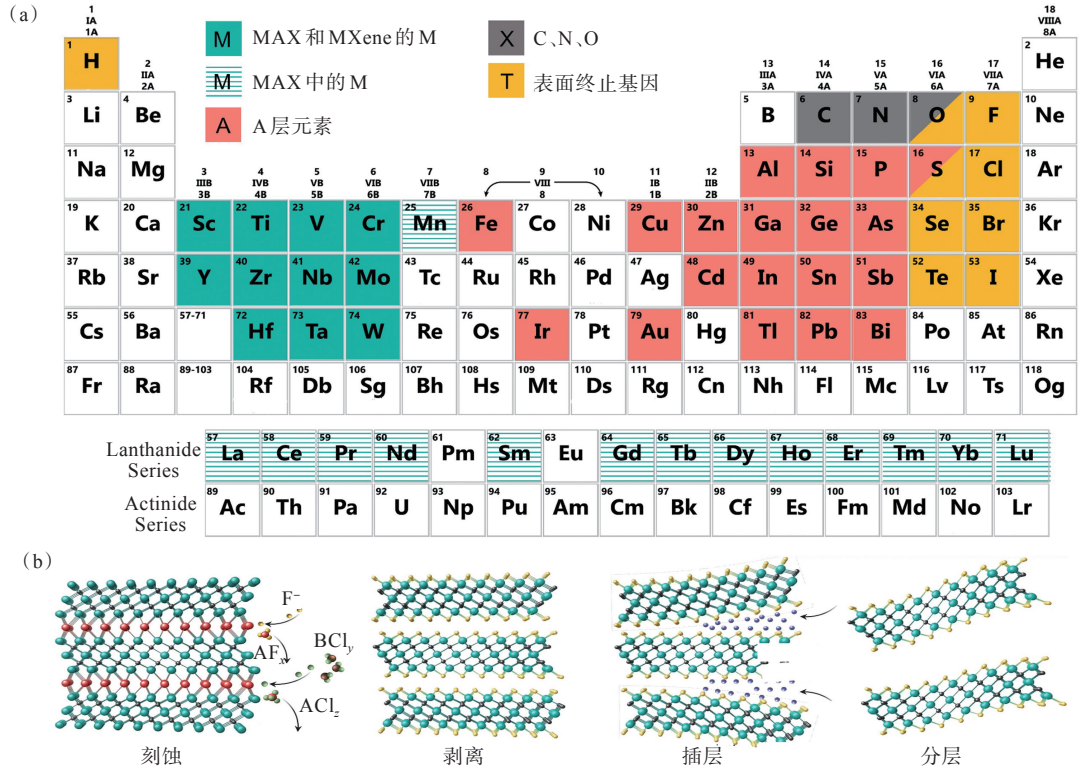

图2　MXene的组成及制备示意图：(a)MAX相和MXene中各组成部分的元素[22]，(b)MAX相刻蚀流程[23]

Fig. 2　Composition and preparation schematic of MXene: (a) composition of elements in MAX phases and MXene[22], (b) schematic of the etching process of MAX phase[23]

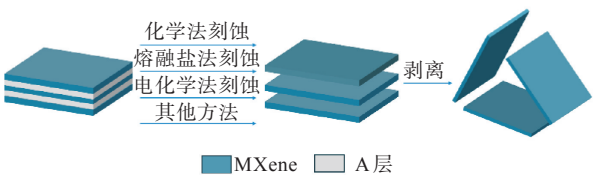

图3　一些刻蚀MAX相的方法

Fig. 3　Some methods of etching MAX phases

是一种降低实验危险性的方法，Alhabeb等[32]通过将LiF与HCl溶液混合的方法原位生成了HF，并用该混合溶液对Ti_3AlC_2刻蚀处理，结果表明采用该方法制备的MXene缺陷较少。

1.2.2　无F化学法制备　除了含F的刻蚀方法外，研究者们也成功利用无F化学法制备出了MXene，Li等[29]提出了一种制备MXene的碱辅助水热法，通过该方法制备的以OH/O封端的$Ti_3C_2T_x$的质量电容较HF蚀刻的$Ti_3C_2T_x$的质量电容有明显的提升。

1.2.3　熔融盐法制备　熔融盐法制备MXene的原理是将熔融的卤化物盐作为刻蚀剂对MAX相中的“A”层进行刻蚀以制备MXene，熔融盐法制备MXene时通常需要在保护气体的氛围下进行，以防止反应物发生氧化。熔融盐法的优点在于制备MXene的过程中可以避免HF的使用，降低了实验过程中的危险性。Urbankowski等[33]将LiF、KF、NaF混合，在氩气氛围下将混合的氟盐与Ti_4AlN_3以1∶1的质量比加热至550 ℃保持0.5 h得到$Ti_4N_3T_x$，这种方法相较于酸性水溶液刻蚀的方法能够更完全地除去氮化物基MAX相中的“A”层。除了氟盐外，氯盐也可作为刻蚀剂制备MXene，Qu等[34]将$ZnCl_2$与Ti_3AlC_2 MAX相以6∶1的摩尔比混合，在合成温度下保温4 h便可得到以Cl为端基并且具有完整层状结构的$Ti_3C_2Cl_x$ MXene。熔融盐法除了可以刻蚀Al基MAX相外，还可以刻蚀其他种类的MAX相，Li等[35]用熔融盐法对Ti_3SiC_2 MAX相进行刻蚀，并成功制得了MXene，将这种MXene用作负极材料时有着205 mA·h·g^{-1}的比容量。

1.2.4　电化学法制备　电化学法刻蚀MAX相可以有效制备MXene，这种方法不需要使用HF，降低了实验的危险性[36]。Yang等[37]在氯化铵和四甲基氢氧化铵(NH_4Cl+TMA·OH)二元水性电解液中对MAX相进行电化学刻蚀，由于Cl离子会破坏Ti—Al键，因此MAX相中的Al会被逐渐刻蚀掉最终得到$Ti_3C_2T_x$。

不同方法制备的MXene表面化学基团的种类有所不同，含F化学法制备的MXene表面存在—OH、—F等基团，熔融盐法制备的MXene表面存在—Cl等基团，电化学法制备的MXene表面存

在—O、—OH、—Cl等基团。

2 MXene在锂离子电池负极中的应用

为了使锂离子电池更好地满足实际使用，负极材料的性能还需提升。高性能的负极材料通常具备几个关键条件：储锂容量足够高、循环稳定性好、电导率高、标准氧化还原电位低[38-39]。经过不断地发展，已有多种锂离子电池负极材料被开发应用，锂离子电池的负极材料主要分为炭系和非炭系，目前在炭系负极材料的研究中以商业石墨为主，但是使用商业石墨负极的锂离子电池已无法满足人们对高容量电池的需求。硅负极的理论比容量约为传统石墨负极比容量的10倍，因此被认为是具有较大潜力的负极材料，然而在电池循环过程中，Li-Si合金化/去合金化的过程会使电极发生大于300%的体积膨胀[40]，随着对锂离子电池负极材料的不断研究，过渡金属氧化物、过渡金属硫化物以及过渡金属碳/氮化合物等二维材料受到了广泛关注。MXene作为一种二维过渡金属碳氮化合物，本身具有大的比表面积、快的离子迁移速率[41]，此外还拥有能使离子嵌入的层状结构、可调节的活性位点[42-43]，因此近年来越来越多的研究对MXene修饰调控或将MXene与其他材料复合，并研究其作为锂离子电池负极的电化学性能。

2.1 基于MXene的结构调控

基于MXene优异的导电性、二维层状结构、丰富的亲锂表面官能团等特点，MXene可以做为锂离子电池的负极材料，而MXene的储锂能力与其自身组成、表面化学环境以及结构息息相关，因此元素掺杂对其电化学性能有着一定影响[44]，Tian等[45]通过水热法制备了一种钒掺杂的$Ti_3C_2T_x$ MXene，钒元素的掺杂扩大了MXene的层间距，并且使其暴露出更多活性位点，循环测试表明，在10 $A·g^{-1}$的电流密度下循环10 000圈后钒掺杂MXene的放电比容量为63.6 $mA·h·g^{-1}$，约为未掺杂钒元素MXene的2倍，证明元素掺杂可以提高MXene的储锂能力以及循环性能。除了单种元素的掺杂，多种元素共掺杂也可提升MXene的电化学性能，Zhang等[46]采用硫脲直接一步煅烧的方法制备了氮、硫共掺杂的V_2CT_x MXene，如图4(a)所示，并将其作为锂离子电池的负极。从图4(b1)和图4(b2)的透射电子显微镜(transmission electron microscope，TEM)图可看出氮和硫元素的掺杂会扩大MXene的层间距，此外氮和硫元素的掺杂还提高了MXene的电荷转移能力，因此这种MXene负极在循环100圈后仍保持590 $mA·h·g^{-1}$的比容量。从上述的工作可以看出元素掺杂后会增大MXene的层间距、提升MXene的电化学性能，为了探究层间距对电化学性能的影响，Sun等[47]制备了利用二甲基亚砜插层处理的in-Ti_3C_2和未被插层处理的ex-Ti_3C_2，通过测试2种样品在1C条件下的充放电性能发现，in-Ti_3C_2的比容量为123.6 $mA·h·g^{-1}$，而未被插层处理的ex-Ti_3C_2的比容量为107.2 $mA·h·g^{-1}$。此外Zhang等[48]利用熔融路易斯碱性卤化物处理的方式扩大了MXene的层间距，这是因为熔融路易斯碱性卤化物含有的大量去溶剂化卤素阴离子会与MXene表面的F端基发生亲核取代，如图4(c1)所示，从图4(c2)的XRD图谱可以发现处理后MXene的层间距从1.12 nm扩大到了1.47 nm，通过这种方法处理的$Ti_3C_2T_x$ MXene的比容量较未处理样品的比容量有明显提升，达到了229 $mA·h·g^{-1}$。可见经插层处理扩大层间距后，MXene的电化学性能明显提升。

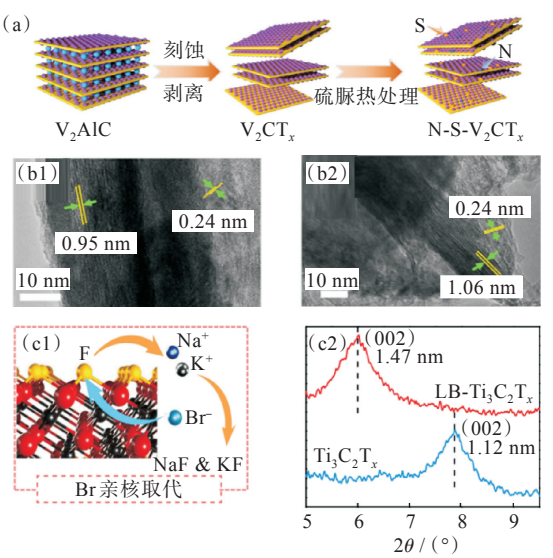

图4 MXene在锂离子电池负极的应用：(a)氮、硫共掺杂V_2CT_x MXene的过程，(b)VCT-600和N-S-VCT-600的高分辨率TEM图[46]，(c)熔融路易斯碱性卤化物扩大MXene层间距[48]

Fig. 4 Application of MXene in the negative electrode of lithium-ion batteries: (a)process of nitrogen and sulfur co-doping V_2CT_x MXene, (b)high-resolution TEM images of VCT-600 and N-S-VCT-600[46], (c)expansion of MXene interlayer spacing with molten Lewis basic halides[48]

除了元素掺杂、扩大层间距提升MXene电化学性能外，减少MXene的层数也可以获得优异的电化学性能。Zhao等[49]采用延长刻蚀时间的方法制备出了少层的f-Nb_2CT_x，通过测试发现在

0.05 A·g^{-1}的电流密度下进行110次循环后f-Nb_2CT_x的比容量可以达到354 mA·h·g^{-1}，而在同样的测试条件下多层m-Nb_2CT_x的比容量却只有165 mA·h·g^{-1}。此外，MXene的结构也会影响其电化学性能，为了研究结构的变化对MXene性能的影响，Gandla等[50]制备了一种具有三维结构的花朵状介孔$Mo_2Ti_2C_3Cl_x$ MXene，这种三维结构能够缓冲电池循环过程中MXene的体积变化，提高电池的循环寿命，并且可以使MXene与电解液更好地接触，提高离子的扩散性能。将这种MXene与NCM811组装成全电池并在0.5 A·g^{-1}的电流密度下测试，经过500圈循环后电池容量保持率为81%。此外，Guan等[51]通过牺牲模板法制备了一种三维中空$Ti_3C_2T_x$管，该$Ti_3C_2T_x$管具有较大比表面积以及离子快速扩散的能力，因此$Ti_3C_2T_x$管负极表现出了优异的倍率性能，在0.1 A·g^{-1}的电流密度下循环200圈后其放电比容量保持在586 mA·h·g^{-1}。综上，将MXene制备成三维结构可以有效提升其性能。

近几年的研究表明，MXene的电化学性能受多方面因素的影响，通过元素掺杂或者使用插层剂扩大层间距都可以提高MXene储存锂离子的能力，从而提升比容量。此外对MXene的结构进行调控，如减少MXene的层数或制备三维结构的MXene也是提升MXene电化学性能的有效策略。

2.2　基于MXene的复合体系

MXene虽然具有优异的电化学性能，但也存在易团聚、自堆叠等问题。将MXene与其他材料复合是近年来的研究趋势，通过研究发现MXene可以与多种材料复合，并且MXene的复合材料拥有优异的性能，如良好的循环稳定性、高比容量等。

2.2.1　MXene/Si复合材料　Si作为一种具有高理论比容量的负极材料而被寄予了厚望，然而在循环过程中硅的体积膨胀导致容量快速下降限制了它的实际应用，MXene作为具有优异机械性能的二维层状材料与Si复合后可以有效缓解Si体积膨胀带来的负面影响，同时，Si可以支撑MXene，防止MXene自堆叠。Zhou等[52]采用静电组装的方法制备出了Si NPs/MXene复合材料，在Si与$Ti_3C_2T_x$的相互作用下Si NPs/MXene复合负极表现出优异的循环稳定性，在0.5 A·g^{-1}的电流密度下循环300圈后仍有着1 917.9 mA·h·g^{-1}的比容量。Gong等[53]也制备了一种MXene/Si电极，并且通过第一性原理计算证明这种MXene/Si电极具有优异的电化学性能。在1 000 mA·g^{-1}电流密度下进行循环测试时，经过15次循环Si负极比容量便发生了急剧衰减，当电流密度提升至2 000 mA·g^{-1}时Si负极一开始便表现出了极低的比容量，而MXene/Si电极有着稳定的结构，因此在所有电流密度下均表现出良好的循环稳定性。

集流体作为电池中不可缺少的部分，起到了集载活性物质和汇集电流的作用，传统的电极集流体一般由金属材料制成，例如目前常见的用于正极的Al箔集流体和用于负极的Cu箔集流体，但这些集流体通常对电极的容量无贡献[54-55]。为了提高集流体的性能，研究人员开发了一系列碳材料集流体，如碳纸[56]、碳纳米管[57]、石墨烯膜[58]等。MXene拥有高电导率和优异的机械性能，因此具有作为集流体的潜力，Tian等[59]制备了一种由MXene与Si复合而成的薄膜，如图5(a)所示，并将这种Si/MXene复合膜用作锂离子电池负极，在这种复合薄膜中MXene不仅起到了集流体的作用，还能促进循环过程中离子的传输。图5(b1)和图5(b2)分别为纯Si负极和Si/MXene负极循环100圈前后的表面形貌，可以看出由Cu集流体以及

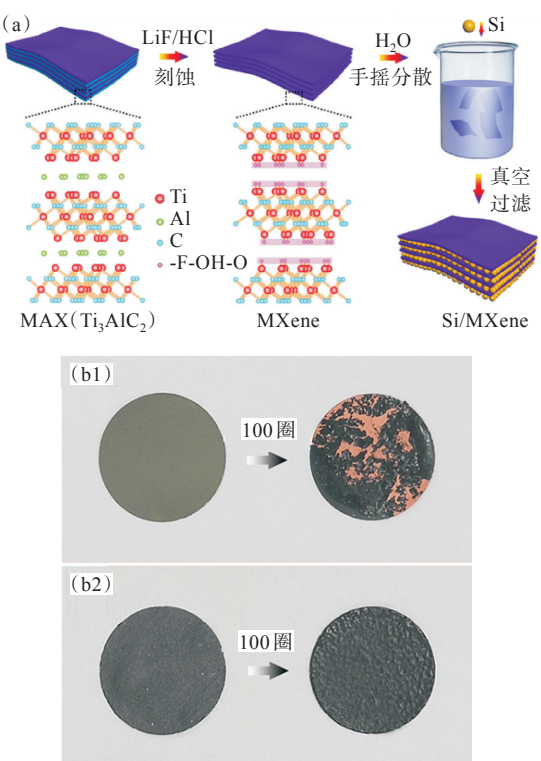

图5　MXene/Si复合材料：(a)Si/MXene复合膜的制备，(b)纯Si负极和Si/MXene复合薄膜负极100圈循环前后表面形貌[59]

Fig. 5　MXene/Si composites: (a) preparation of Si/MXene composite film, (b) optical photographs before cycle and after 100 cycles of pure Si and Si/MXene anodes[59]

纯Si组成的负极在循环后出现了活性材料脱落的现象，而Si/MXene复合薄膜负极在循环后仍保持着完整的结构，因此Si与MXene复合后循环稳定性有着很大的提升。

2.2.2 MXene/金属氧化物复合材料 氧化铁储量丰富，近年来被用作锂离子电池负极材料，虽然氧化铁的比容量(~1 000 mA·h·g^{-1})较高[60]，但在充放电过程中存在严重的体积膨胀。为了提升循环稳定性，Zhang等[61]制备了一种氮掺杂高度褶皱的N-Ti_3C_2 MXene材料并将其与氧化铁颗粒复合，这种褶皱N-Ti_3C_2具有高比表面积，可以有效避免氧化铁纳米颗粒的团聚，并且缓解了氧化铁的体积膨胀。如图6(a)所示，在1 A·g^{-1}的电流密度下循环100圈后N-Ti_3C_2/Fe_2O_3负极仍然保持688 mA·h·g^{-1}的比容量。此外Fe_3O_4也可作为负极材料，Duan等[62]制备了一种表面有SnO_2涂层的多孔Fe_3O_4颗粒，并将其与MXene复合，这种Fe_3O_4@SnO_2/MXene复合材料具有高比表面积、高导电性并且能促进锂离子迁移。在1 000 mA·g^{-1}的电流密度下循环900圈后，Fe_3O_4@SnO_2/MXene的比容量仍可达626.1 mA·h·g^{-1}，说明这种复合材料具有高比容量以及优异的循环稳定性。

在金属氧化物中，氧化锡也是一种具有潜力的负极材料，然而氧化锡也存在体积膨胀的问题，为了提升氧化锡负极的稳定性，通常会将氧化锡与其他材料复合后制备电极[63]。Du等[64]制备了一种三维多孔结构的SnO_2/MXene复合材料，这种复合材料多孔的结构可以使电解液更容易渗透，并且可以提供更多的活性位点，此外多孔的结构也缩短了锂离子扩散的距离。在1 A·g^{-1}的电流密度下循环630圈后，这种SnO_2/MXene电极仍有624.5 mA·h·g^{-1}的比容量，表现出了高比容量及优异的循环稳定性，这是因为这种复合材料中SnO_2的质量分数较高并且这种复合材料具有稳定的结构。Zhao等[65]采用球磨法制备了分层的MXene纳米片，接着利用水热反应将纳米SnO_2锚定在了MXene纳米片上，如图6(b)所示，制得的SnO_2/Ti_3C_2有着出色的倍率性能以及循环稳定性，在0.1 A·g^{-1}条件下循环1 000圈后，仍有904 mA·h·g^{-1}的高比容量。

从上述研究中可以发现MXene与金属氧化物复合材料的性能相较于纯的金属氧化物有明显的提升，通过制备方法的改进以及对MXene进行修饰等都可以提升MXene/金属氧化物复合材料的电化学性能。

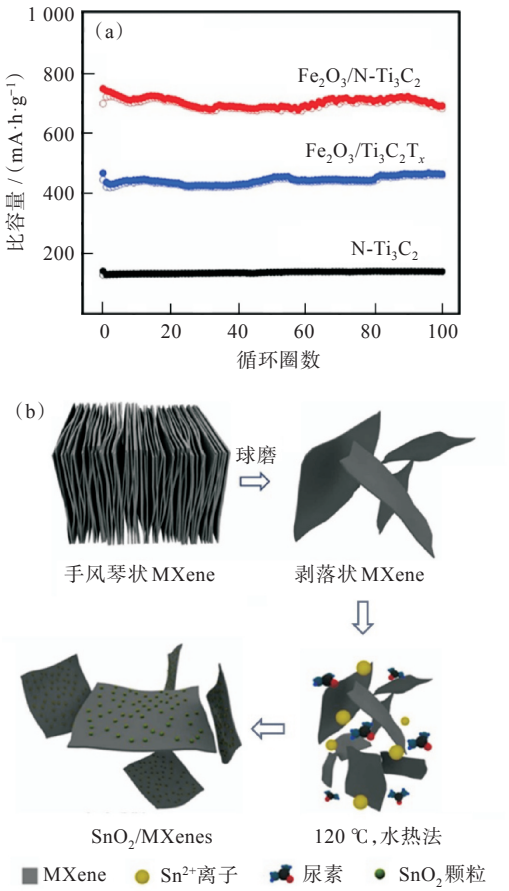

图6 MXene/金属氧化物复合材料：(a)N-Ti_3C_2/Fe_2O_3的循环性能[61]，(b)球磨水热法制备SnO_2/Ti_3C_2[65]

Fig. 6 MXene/metal oxide composites: (a)cycling properties of N-Ti_3C_2/Fe_2O_3[61], (b)ball milling hydrothermal preparation of SnO_2/Ti_3C_2[65]

2.2.3 MXene/碳复合材料 氧化石墨烯(graphene oxide，GO)作为一种二维材料，可以插入MXene层间，由于其具有高导电性，因此在扩大MXene层间距的同时还能提高层间电荷的转移能力。Wang等[66]利用真空高速球磨法制备了一种$Ti_3C_2T_x$/GO异质结复合材料，在这种$Ti_3C_2T_x$/GO复合材料中，GO处于$Ti_3C_2T_x$纳米层之间，这种特殊结构不但增大了MXene的层间距，而且提升了复合材料的导电性。在2.5 A·g^{-1}的高电流密度下循环2 000圈后，$Ti_3C_2T_x$/GO复合材料表现出116.5 mA·h·g^{-1}的比容量。

在众多碳材料中，活性炭具有导电性好、比表面积大、孔隙率高等优点，因此被广泛应用。为了防止MXene堆叠，Abdah等[67]将活性炭分散在MXene层间，制备了一种AC_Ti_3C_2复合材料，并研究了MXene与活性炭的质量比对复合材料性能的影响，研究结果表明当活性炭的质量比为80%时复合材料表现出最佳性能。由于活性炭在支撑MXene的同时还提供了离子迁移的路径，因此这

种复合材料表现出了优异的循环性能，在0.2 $A·g^{-1}$的电流密度下循环80圈后，比容量仍可达841.8 $mA·h·g^{-1}$，并且容量保持率超过70%。

通过对MXene材料在锂离子电池负极中的研究可以发现，调整MXene的表面基团、层间距以及将MXene与其他材料复合都可以提升MXene的性能，从而提升含MXene锂离子电池的电化学性能。未来，通过对MXene更深入的研究以及将MXene与更多性能优异的材料复合，MXene及其复合材料将会更好地推动锂离子电池的发展。

3　总结与展望

MXene材料自问世以来便因其卓越的电导率、优异的机械性能、高的比表面积、可调控的结构、良好的化学稳定性等优点受到了广泛关注。本文介绍了近年来MXene的一些制备方法，随着对MXene研究的不断深入，新的制备方法不断被提出，制备的MXene种类越来越多、性能也越来越优异；并结合近年来众多对MXene调控改性的研究综述了MXene材料在锂离子电池负极中的应用，这些调控改性的方法主要包括对MXene层间距的调控、元素掺杂、将MXene与其他材料复合等。研究结果表明，将改性后的MXene应用于锂离子电池负极中对锂离子电池的性能有着明显提升。

目前已有大量的研究将MXene应用于锂离子电池中并取得了一定成果，但未来MXene在锂离子电池领域中的应用仍面临着挑战：(1)MXene与其他材料复合后性能明显提升，因此未来可以将MXene复合材料应用于锂离子电池其他组成部分；(2)目前的研究大多以$Ti_3C_2T_x$ MXene为研究对象，因此其他类型的MXene在锂离子电池中的应用还有待研究；(3)MXene的制备工艺都较为复杂，且成本较高，因此想要将MXene更好地应用在锂离子电池中，还需要不断简化MXene的制备工艺、降低其制备成本。相信通过不断研究，MXene在锂离子电池中的应用可以进一步推动新能源器件的发展。

参考文献

[1] YANG Z G, ZHANG J L, KINTNER-MEYER M C W, et al. Electrochemical energy storage for green grid [J]. Chemical Reviews, 2011, 111(5): 3577-3613.

[2] ZHU Y Q, ZHOU S, FENG Y M, et al. Influences of solar energy on the energy efficiency design index for new building ships [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(30): 19389-19394.

[3] LIU C, CHENG M S, ZHAO B C, et al. A wind power plant with thermal energy storage for improving the utilization of wind energy [J]. Energies, 2017, 10(12): 2126.

[4] DUPRÉ A, DROBINSKI P, ALONZO B, et al. Sub-hourly forecasting of wind speed and wind energy [J]. Renewable Energy, 2020, 145: 2373-2379.

[5] MA M M, ZHANG M H, JIANG B T, et al. A review of all-solid-state electrolytes for lithium batteries: high-voltage cathode materials, solid-state electrolytes and electrode-electrolyte interfaces [J]. Materials Chemistry Frontiers, 2023, 7(7): 1268-1297.

[6] PAMPAL E S, STOJANOVSKA E, SIMON B, et al. A review of nanofibrous structures in lithium ion batteries [J]. Journal of Power Sources, 2015, 300: 199-215.

[7] BARBOSA J C, GONÇALVES R, COSTA C M, et al. Recent advances on materials for lithium-ion batteries [J]. Energies, 2021, 14(11): 3145.

[8] FAN E S, LI L, WANG Z P, et al. Sustainable recycling technology for Li-ion batteries and beyond: challenges and future prospects [J]. Chemical Reviews, 2020, 120(14): 7020-7063.

[9] WANG X F, LU X H, LIU B, et al. Flexible energy-storage devices: design consideration and recent progress [J]. Advanced Materials, 2014, 26(28): 4763-4782.

[10] NITTA N, WU F X, LEE J T, et al. Li-ion battery materials: present and future [J]. Materials Today, 2015, 18(5): 252-264.

[11] JI H S, XU X H, LI X, et al. A low-cost Si@C composite for lithium-ion batteries anode materials synthesized via freeze-drying process using kerf loss Si waste [J]. Ionics, 2024, 30(5): 2585-2599.

[12] DU X P, HUANG Y, WANG J M, et al. Si/TiO_2 carbon fiber core encapsulated in hierarchical multiple MXene@Co-MoS_2 shells for constructing a free-standing anode of lithium storage [J]. Rare Metals, 2024, 43(9): 4222-4233.

[13] PENG L L, FANG Z W, ZHU Y, et al. Holey 2D nanomaterials for electrochemical energy storage [J]. Advanced Energy Materials, 2018, 8(9): 1702179.

[14] PRAMANIK A, MAHAPATRA P L, TROMER R, et al. Biotene: earth-abundant 2D material as sustainable anode for Li/Na-ion battery [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16(2): 2417-2427.

[15] GOGOTSI Y, ANASORI B. The rise of MXenes [J]. ACS Nano, 2019, 13(8): 8491-8494.

[16] 彭婷，徐金新，张琪，等. $Ti_3C_2T_x$ MXene水分散液的稳定性研究[J]. 武汉工程大学学报，2022，44(6)：636-642.

[17] WANG X W, GUO J Y, XU K N, et al. In situ self-assembled NiS_2 nanoparticles on MXene nanosheets as multifunctional separators: regulating shuttling effect and boosting redox reaction kinetics of lithium polysulfides [J]. Applied Surface Science, 2024, 645: 158859.

[18] WEI C L, XI B J, WANG P, et al. In situ anchoring ultrafine ZnS nanodots on 2D MXene nanosheets for accelerating polysulfide redox and regulating Li plating [J]. Advanced Materials, 2023, 35 (32): 2303780.

[19] 杨佳璐,钱越,王可,等.MXene基纳米材料在高性能金属锂负极应用中的研究进展(英文)[J].新型炭材料(中英文),2023,38(4):659-677.

[20] LEE S H, KIM M S, LEE J H, et al. A Li-In alloy anode and Nb_2CT_x artificial solid-electrolyte interphase for practical Li metal batteries [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2022, 10(8): 4157-4169.

[21] LIU Z Q, YANG Y, ZHU Q Z, et al. Enhanced lithium-ion storage of the SiO_x@C anode enabled by carbon coating coupled with MXene as a conductive binder [J]. Inorganic Chemistry Frontiers, 2024, 11 (5): 1511-1521.

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

[23] LIM K R G, SHEKHIREV M, WYATT B C, et al. Fundamentals of MXene synthesis [J]. Nature Synthesis, 2022, 1(8): 601-614.

[24] HONG W C, WYATT B C, NEMANI S K, et al. Double transition-metal MXenes: atomistic design of two-dimensional carbides and nitrides [J]. MRS Bulletin, 2020, 45(10): 850-861.

[25] ANASORI B, GOGOTSI Y. MXenes: trends, growth, and future directions [J]. Graphene and 2D Materials, 2022, 7(3/4): 75-79.

[26] MING F W, LIANG H F, HUANG G, et al. MXenes for rechargeable batteries beyond the lithium-ion [J]. Advanced Materials, 2021, 33(1): 2004039.

[27] ZHANG T, SHEVCHUK K, WANG R J, et al. Delamination of chlorine-terminated MXene produced using molten salt etching [J]. Chemistry of Materials, 2024, 36(4): 1998-2006.

[28] HUANG Z M, QIN J D, ZHU Y X, et al. Green and scalable electrochemical routes for cost-effective mass production of MXenes for supercapacitor electrodes [J]. Carbon Energy, 2023, 5(10): e295.

[29] LI T F, YAO L L, LIU Q L, et al. Fluorine-free synthesis of high-purity $Ti_3C_2T_x$ (T=—OH, —O) via alkali treatment [J]. Angewandte Chemie (International Edition), 2018, 57(21): 6115-6119.

[30] FAN Y X, LI L, ZHANG Y, et al. Recent advances in growth of transition metal carbides and nitrides (MXenes) crystals [J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(16): 2111357.

[31] DRISCOLL N, RICHARDSON A G, MALESKI K, et al. Two-dimensional Ti_3C_2 MXene for high-resolution neural interfaces [J]. ACS Nano, 2018, 12 (10): 10419-10429.

[32] ALHABEB M, MALESKI K, ANASORI B, et al. Guidelines for synthesis and processing of two-dimensional titanium carbide ($Ti_3C_2T_x$ MXene) [J]. Chemistry of Materials, 2017, 29(18): 7633-7644.

[33] URBANKOWSKI P, ANASORI B, MAKARYAN T, et al. Synthesis of two-dimensional titanium nitride Ti_4N_3 (MXene) [J]. Nanoscale, 2016, 8(22): 11385-11391.

[34] QU L S, ZHAO Z H, LI Z Y, et al. Synthesis and formation mechanism of $Ti_3C_2Cl_x$ MXene by molten salt method [J]. Ceramics International, 2024, 50 (14): 25115-25121.

[35] LI Y B, SHAO H, LIN Z F, et al. A general Lewis acidic etching route for preparing MXenes with enhanced electrochemical performance in non-aqueous electrolyte [J]. Nature Materials, 2020, 19: 894-899.

[36] LIU R X, WEI S N, SHI B, et al. Preparation and properties of two-dimensional Ti_2CT_x MXene based on electroetching method [J]. Nanotechnology, 2024, 35(34): 345402.

[37] YANG S, ZHANG P P, WANG F X, et al. Fluoride-free synthesis of two-dimensional titanium carbide (MXene) using a binary aqueous system [J]. Angewandte Chemie (International Edition), 2018, 57 (47): 15491-15495.

[38] LI H. Practical evaluation of Li-ion batteries [J]. Joule, 2019, 3(4): 911-914.

[39] WANG C Y, YANG C P, ZHENG Z J. Toward practical high-energy and high-power lithium battery anodes: present and future [J]. Advanced Science, 2022, 9(9): 2105213.

[40] REN W F, ZHOU Y, LI J T, et al. Si anode for next-generation lithium-ion battery [J]. Current Opinion in Electrochemistry, 2019, 18: 46-54.

[41] ZHANG Y S, LU Q B, ZHANG L S, et al. Adjustable MXene-based materials in metal-ion batteries: progress, prospects, and challenges [J]. Small Structures, 2024, 5(1): 2300255.

[42] WANG C D, CHEN S M, XIE H, et al. Atomic Sn^{4+} decorated into vanadium carbide MXene interlayers for superior lithium storage [J]. Advanced Energy Materials, 2019, 9(4): 1802977.

[43] KAMYSBAYEV V, FILATOV A S, HU H C, et al. Covalent surface modifications and superconductivity

of two-dimensional metal carbide MXenes [J]. Science, 2020, 369(6506): 979-983.
[44] ZHANG L S, WANG S Q, ZHANG Z H, et al. Regulating interlayer spacing and surface terminations of N-doped 3D MXenes with high-rate Li-ion storage capability [J]. Materials Letters, 2023, 349: 134832.
[45] TIAN M, HAO Z K. Synthesis of vanadium-doped $Ti_3C_2T_x$ MXene for enhanced lithium storage [J]. Functional Materials Letters, 2023, 16(3/4): 2340006.
[46] ZHANG Y J, LI J L, GONG Z W, et al. Nitrogen and sulfur co-doped vanadium carbide MXene for highly reversible lithium-ion storage [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2021, 587: 489-498.
[47] SUN D D, WANG M S, LI Z Y, et al. Two-dimensional Ti_3C_2 as anode material for Li-ion batteries [J]. Electrochemistry Communications, 2014, 47: 80-83.
[48] ZHANG T Z, CHANG L B, ZHANG X F, et al. Simultaneously tuning interlayer spacing and termination of MXenes by Lewis-basic halides [J]. Nature Communications, 2022, 13: 6731.
[49] ZHAO J B, WEN J, BAI L N, et al. One-step synthesis of few-layer niobium carbide MXene as a promising anode material for high-rate lithium ion batteries [J]. Dalton Transactions, 2019, 48(38): 14433-14439.
[50] GANDLA D, LI Q, ZHOU Y A, et al. In-plane mesoporous 3D flower-like $Mo_2Ti_2C_3Cl_x$ MXene anodes for Li-ion batteries: from structure to performance [J]. Small, 2024, 20(45): 2404880.
[51] GUAN K K, DONG L, XING Y Y, et al. Structure and surface modification of MXene for efficient Li/K-ion storage [J]. Journal of Energy Chemistry, 2022, 75: 330-339.
[52] ZHOU H, ZHANG J Y, LIU J Z, et al. Silicon nanospheres supported on conductive MXene nanosheets as anodes for lithium-ion batteries [J]. ACS Applied Energy Materials, 2023, 6(1): 160-169.
[53] GONG W J, WU M X, WANG Z, et al. Layer effects on MXenes electrode and it applied to silicon composite structures [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 91: 112038.
[54] JOHNSON B A, WHITE R E. Characterization of commercially available lithium-ion batteries [J]. Journal of Power Sources, 1998, 70(1): 48-54.
[55] ZHOU G M, LI F, CHENG H M. Progress in flexible lithium batteries and future prospects [J]. Energy & Environmental Science, 2014, 7(4): 1307-1338.
[56] YAN J H, LIU X B, QI H, et al. High-performance lithium-sulfur batteries with a cost-effective carbon paper electrode and high sulfur-loading [J]. Chemistry of Materials, 2015, 27(18): 6394-6401.
[57] HU J W, WU Z P, ZHONG S W, et al. Folding insensitive, high energy density lithium-ion battery featuring carbon nanotube current collectors [J]. Carbon, 2015, 87: 292-298.
[58] RANA K, SINGH J, LEE J T, et al. Highly conductive freestanding graphene films as anode current collectors for flexible lithium-ion batteries [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(14): 11158-11166.
[59] TIAN Y, AN Y L, FENG J K. Flexible and freestanding silicon/MXene composite papers for high-performance lithium-ion batteries [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(10): 10004-10011.
[60] KAKARLA A K, BANDI H, SHANTHAPPA R, et al. Polyaniline layered N-doped carbon-coated iron oxide nanocapsules for extremely active Li-ion battery anode and oxygen evolution reaction [J]. Carbon, 2024, 228: 119308.
[61] ZHANG Z Y, WENG L, RAO Q S, et al. Highly-dispersed iron oxide nanoparticles anchored on crumpled nitrogen-doped MXene nanosheets as anode for Li-ion batteries with enhanced cyclic and rate performance [J]. Journal of Power Sources, 2019, 439: 227107.
[62] DUAN X, LIU J Q, LÜ F S, et al. 3D porous structure Fe_3O_4@SnO_2/MXene composites with enhanced electrochemical performance for lithium ion battery anode [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 86(Part B): 111308.
[63] NGUYEN T P, KIM I T. Self-assembled few-layered MoS_2 on SnO_2 anode for enhancing lithium-ion storage [J]. Nanomaterials, 2020, 10(12): 2558.
[64] DU C Z, CHEN X Y, ZHU W Z, et al. 3D porous SnO_2/MXene as a superior anode material for Li-ion and Na-ion battery [J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2024, 967: 118481.
[65] ZHAO C, WEI Z Y, ZHANG J, et al. Ultrafine SnO_2 nanoparticles on delaminated MXene nanosheets as an anode for lithium-ion batteries [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 907: 164428.
[66] WANG L, YUAN K, BAI H Y, et al. MXene/graphene oxide heterojunction as a high performance anode material for lithium ion batteries [J]. RSC Advances, 2023, 13(37): 26239-26246.
[67] ABDAH M A A M, CHERUSSERI J, DZULKA-RNAIN N A, et al. Facile synthesis of microwave-etched Ti_3C_2 MXene/activated carbon hybrid for lithium-ion battery anode [J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2023, 928: 117050.

本文编辑：苗　变