

渐入佳境的 MXene 研究

黄庆^{1,2}

(1. 中国科学院 宁波材料技术与工程研究所, 先进能源材料工程实验室, 宁波 315201; 2. 宁波杭州湾新材料研究院, 宁波 315336)

“乱花渐欲迷人眼, 浅草才能没马蹄”, MXene 材料自 2011 年被报道之后, 逐步受到材料科学家的青睐, 近年来在储能、催化、环境、吸波、生物治疗和高性能复合材料等领域都涌现出一系列重要突破, 令人目不暇接。为了及时跟踪该新兴二维无机材料的研究进展, 《无机材料学报》编辑部组织了本期特邀专题评述。虽然已有一些有关 MXene 的优秀综述文章, 但针对性更强的专题评述类文章还比较少。为此, 我们特意邀请了活跃在 MXene 研究前沿并取得重要进展的专家, 请他们讲述 MXene 研究的心得体会, 并指出存在的问题和挑战。

合成是 MXene 研究的基础, 也是决定其最终物理化学性质的根本。所有的 MXene 材料研究都涉及到如何得到这种新型二维材料, 目前几乎 90% 以上的研究都会采用含氟刻蚀剂的化学方法将 MAX 相转变为 MXene。该方法简单易行, 特别适合在常规化学实验室中操作。路易斯酸熔盐刻蚀的方法是近年来发展出来的非溶剂化学刻蚀方法, 非常适用于调控 MXene 表面端基。“化学剪刀”结构编辑策略提出后进一步丰富了 MXene 材料表面化学和晶体结构, 为定制化合成该二维无机材料提供了全新思路。MAX 相作为传统的结构与功能一体化材料, 在高温应用方面的潜力巨大, 但是其层状结构的增韧特性并没有得到很好的诠释。刘增乾团队通过巧妙的实验设计得到具有类贝壳微观结构的 MAX 相/镁合金复合材料, 大幅度提高了材料的强度和韧性, 但调控界面润湿和结合强度仍是未来研究的重点。程群峰团队近期在高性能 MXene 纳米复合材料研发上取得了突破性进展, 提出界面协同概念提高复合材料的致密度, 并认为未来应该更加关注大面积、高效率、规模化的 MXene 复合材料制造技术。阿卜杜拉国王科技大学 Alshareef 团队撰文论述了 MXene 电子学应用研究, 并特别指出 MXene 诸多关键物理化学性质 (如亲水性、功函数可调、表面端基可控、导电、特征离子激元和电磁相互作用等) 对于未来电子器件研究的重要意义。沈国震团队也介绍了 MXene 材料在柔性光电探测器中的研究现状, 特别指出半导体型 MXene 是最终实现器件应用的关键。汪德高团队回顾了 MXene 作为添加剂对于新型薄膜太阳能电池的作用, 二维 MXene 可以在界面处调控能带、光吸收效率和电传输等, 对发展高光电转化效率光电器件有积极的作用。张传芳团队则介绍了面向电子器件和能源应用的 MXene 油墨印刷技术, 其中特别强调 MXene 材料的环境稳定性和封装技术是需要关注的难题之一。MXene 具有类金属导电性和手风琴状结构, 因此在应力调控下具有电阻变化的响应特性。高义华团队详细介绍了 MXene 压力传感器的研究进展, 同时也提及了几种新型传感机制, 如电容式传感、摩擦电式传感、压电式传感、电池式传感和纳米流体传感等, 在未来的“电子皮肤”应用领域很有发展前景。MXene 材料与电磁波之间的相互作用引起了广泛研究兴趣, 如电磁屏蔽相关研究等。与石墨烯材料相比, MXene 固有的亲水性使得终端应用 (如涂层和聚合物复合材料) 更加方便, 韩美康团队最新工作显示 MXene 在红外波段具有结构可控的辐射特性, 尤其是改变晶格元素、端基组成和层间距可显著影响红外响应, 有望发展成全新的红外波段物理器件。肖旭团队最新工作发现 MXene 在全太赫兹波段能够实现理论极限 50% 的吸收率, 并指出高载流子浓度和超快弛豫时间是其在太赫兹宽频均一响应的关键因素。未来太赫兹技术在探测、成像、通信等领域会发挥越来越重要的作用, 因此 MXene 材料也将受到越来越多的关注。MXene 在储能领域的研究一直以来都是热点, 支春义团队阐述了用于锌离子电池的 MXene 阴极、阳极和电解质/隔膜的最新进展, 讨论了离子插层调控、表面接枝修饰、杂原子掺杂、层间距控制等手段的作用。这些研究思路对于其它离子电池研发都具有很好的借鉴意义。

《无机材料学报》编辑部向所有受邀专家们表达最诚挚的谢意, 相信这些文章中的真知灼见能够对 MXene 研究起到积极的促进作用, 也会对孜孜以求的研究生们提供有益的帮助; 同时还要感

谢诸位无私的审稿专家，他们的专业意见和建议为这一期的评述文章增色不少。

“两岸猿声啼不住，轻舟已过万重山”。就在这一期特邀专题评述的出版过程中，科学界又不断涌现出更多更新的 MXene 科研成果，不少是围绕本专辑提及的难点和挑战提出了新的见解，并逐步深入到基础的合成化学机制和新奇的物理行为研究。我们期待在各界同仁的共同努力下，MXene 材料能为材料科学界带来更多惊喜。

MXene: Coming up Roses

HUANG Qing^{1,2}

(1. Engineering Laboratory of Advanced Energy Materials, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China; 2. Qianwan Institute of CHiTECH, Ningbo 315336, China)

MXene material has gained popularity among scientists since its discovery in 2011. It has shown great potential in various fields such as energy storage, catalysis, environment, wave absorption, biotherapy, and high-performance composite materials. A series of special perspectives have been organized to provide an overview of the latest research progress and challenges in MXene material science. The invited experts have shared their research highlights and discussed existing problems and future directions.

Synthesis is the foundation of MXene research, with nearly all studies employing chemical methods that use fluoride etchants to transform MAX phases into MXenes. Strategies like Lewis acid molten salt etching and “chemical scissors” for structural editing offer new perspectives for customized synthesis. MXene possesses key physicochemical properties crucial for electronic applications, significantly impacting the study of electronic devices. MXene materials have broad application prospects in flexible photodetectors, solar cells, electronic devices, and energy applications. Moreover, MXene’s metallic conductivity and accordion-like structure make it useful for pressure sensors and electromagnetic shielding. MXene is also a hot topic in the field of energy storage, such as the latest developments in anodes, cathodes, and electrolytes/separators for zinc-ion batteries. *Journal of Inorganic Materials* expresses gratitude to the invited experts and reviewers for their contributions and looks forward to more updates on MXene research findings.

In summary, MXene materials have shown great potential due to their unique properties and have made significant breakthroughs in various fields. However, there are still many challenges to be addressed, such as the environmental stability and packaging technology of MXene materials. With continuous efforts from researchers, it is expected that more exciting findings and breakthroughs will be achieved in the future.



黄庆，男，研究员，博士生导师，现任中国科学院宁波材料技术与工程研究所先进能源材料工程实验室主任，聚焦层状材料结构编辑与硅基特种材料研究，主持承担国家自然科学基金委重大研究计划集成项目和中国科学院先导专项等重要项目，作为科技负责人主持国家发展改革委“十三五”科教基础设施新能源技术

与材料综合研发平台项目碳化硅纤维及复合材料分平台的建设和运行，以通讯作者身份在 *Science*, *Nature Materials* 等学术期刊发表论文 400 余篇，担任中国核学会核材料分会常务理事、辐照效应分会理事和《无机材料学报》副主编等学术兼职，曾获得中国科学院优秀导师奖和朱李月华优秀教师奖等奖励。

E-mail: huangqing@nimte.ac.cn

文章编号: 1000-324X(2024)02-0113-02

人主持国家发展改革委“十三五”科教基础设施新能源技术