引用格式：程铭，李文，韦国科 .MXene在航空领域研究与应用进展[J]. 材料工程，2026，54(7)：133-148.
CHENG Ming，LI Wen，WEI Guoke. Research progress and application of MXene in aviation field[J]. Journal of Materials Engineering，2026，54(7)：133-148.

MXene在航空领域研究与应用进展

程　铭*，李　文，韦国科
（中国航空制造技术研究院，北京 100024）

摘要：MXene作为一种新型二维过渡金属碳化物/氮化物材料，因其独特的层状结构、优异的导电性、丰富的表面化学和可调控的物理性能，在多个领域展现出广阔的应用前景。本文系统综述了MXene材料在航空领域的研究与应用进展，重点分析了其在轻量化结构、电磁屏蔽、传感器、储能系统与热管理等方面的应用潜力。详细探讨了MXene的合成方法、结构特性及其与航空材料性能需求的匹配性，通过表格和数据分析对比了MXene与传统航空材料的性能差异。同时，阐述了当前MXene在航空应用中的创新突破，如超轻复合材料、自修复涂层和多功能集成系统，并深入剖析了其科学意义。针对MXene在航空领域应用中存在的规模化制备、环境稳定性和成本控制等挑战，提出了相应的解决思路和发展方向。最后，基于当前研究现状，对MXene在航空领域的未来发展趋势进行了展望，包括绿色合成工艺、智能化设计和大规模产业化路径等，为MXene在航空领域的深入研究与工程化应用提供参考和指导。

关键词：MXene；航空材料；电磁屏蔽；轻量化结构；传感器；二维材料
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000703　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000703
中图分类号：TB34　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)07-0133-16

Research progress and application of MXene in aviation field

CHENG Ming*，LI Wen，WEI Guoke
（AVIC Manufacturing Technology Institute，Beijing 100024，China）

Abstract：MXene, a cutting-edge two-dimensional transition metal carbide/nitride material, has exhibited immense potential for applications across diverse fields. This potential stems from its distinctive layered structure, exceptional electrical conductivity, rich surface chemistry, and adjustable physical properties. This article presents a comprehensive review of the research and application progress of MXene materials in the aviation sector. MXene's application potential are analyzed selectively in lightweight structures, electromagnetic interference shielding, sensors, energy systems, and thermal management. The article delves into the synthesis methods and structural characteristics of MXene, highlighting their compatibility with the performance requirements of aviation materials. Through tabular presentations and data analysis, it compares the performance disparities between MXene and traditional aviation materials. Meanwhile, this review summarizes the current innovative breakthroughs in the aviation applications of MXene, such as ultra-lightweight composites, self-healing coatings, and multifunctional integrated systems, and expounds on their scientific significance. In light of the challenges encountered in the aviation application of MXene, including scalable production, environmental stability, and cost management, corresponding solutions and development directions are proposed. Finally, based on the current research landscape, the article prospects future development trends for MXene in the aviation field, covering green synthesis processes, intelligent design, and large-scale industrialization routes. This review aims to serve as a valuable reference and guide for in-depth research and engineering application of MXene in the aviation domain.

Key words：MXene；aviation materials；electromagnetic interference shielding；lightweight structure；sensor；two-dimensional material

航空工业的发展始终与材料科学的进步密切相关，从早期的木材和织物到铝合金，再到钛合金和碳纤维复合材料，每一次材料技术的突破都显著推动了航空器性能的提升。近年来，随着航空器向更轻质、更高效、更智能和更环保的方向发展，对新型材料的需求日益迫切。特别是在电磁兼容性、热管理、结构健康监测和储能效率等方面，传统材料已逐渐难以满足日益严苛的技术要求[1-3]。在此背景下，二维材料作为材料科学的前沿领域，为航空工业的发展提供了新的解决方案[4-6]。

MXene是一类二维过渡金属碳化物、氮化物和碳氮化物材料，由Gogotsi团队[7-8]于2011年首次报道。其通式为$M_{n+1}X_nT_x$，其中M代表早期过渡金属（如Ti、V、Nb等），X代表碳或氮，T_x表示表面官能团（如—O、—OH、—F等），n一般为1～3[9-11]。MXene通常通过选择性蚀刻MAX相陶瓷中的A层（ⅢA或ⅣA族元素）制备而成，这种独特的制备方法赋予了MXene丰富的表面化学特性和可调控的物理性质[12-14]。

与石墨烯等二维材料相比，MXene具有诸多独特优势：首先，其金属级导电性使其在电磁屏蔽和导电复合材料中表现卓越[15]，例如$Ti_3C_2T_x$薄膜导电性高达2.4×10^6 S·m^{-1}；其次，MXene表面的亲水性和丰富的官能团使其易于进行功能化改性；同时，MXene具有优异的力学性能，弹性模量可达数百GPa，同时兼具良好的柔韧性和可压缩性[16]；此外，通过改变M、X元素和表面终端基团，可以精确调控MXene的电子结构和物理化学性质，实现性能的定制化设计[17]。

这些独特性能使MXene在航空领域展现出巨大的应用潜力。航空器对材料的轻量化、多功能集成、环境耐受性等方面有着极高要求，而MXene正好在这些方面表现优异。例如在电磁屏蔽领域，MXene薄膜在45 μm厚度下，屏蔽效能可达92 dB，远超传统金属屏蔽材料[18]；在轻量化结构方面，MXene泡沫的密度可低至0.197 g/cm^3，同时保持71.3 dB的电磁屏蔽效能[19]；在传感器领域，MXene的高导电性和表面活性使其能够灵敏检测气体、应变和温度变化，为航空器健康监测提供了新方案[20]。

本文系统梳理了MXene材料在航空领域中的研究与应用进展，围绕其独特的二维结构、可调控的表面化学特性以及优异的电学、力学与热学性能，从材料基础到多功能应用展开分析。在材料基础层面，重点总结MXene的合成方法、功能化改性策略及其在极端环境下的稳定性与可靠性；在应用层面，则聚焦于MXene在轻质高强复合材料、电磁屏蔽与隐身、防除冰涂层、结构健康监测以及能量存储与热管理等方面的航空适用性，揭示其实现航空装备轻量化、智能化与高性能化的潜力。同时，关注从实验室研究走向工程化与产业化过程中面临的关键科学技术问题，包括规模化制备、环境适应性、成本控制及安全性等挑战，并对未来技术发展路径与商业化前景作出展望。

1 MXene材料的合成、结构与性能

1.1 MXene合成方法

MXene的合成主要通过对MAX相前驱体进行化学处理来实现。MAX相是一类三元层状陶瓷材料，分子式为$M_{n+1}AX_n$，其中M为过渡金属，A主要为ⅢA或ⅣA族元素，X为碳或氮。目前，最常用的MXene合成方法是氢氟酸（HF）选择性蚀刻法[7]。该方法通过HF溶液选择性地去除MAX相中的A层，同时在其表面引入—F、—OH等官能团，从而得到多层MXene材料[21-23]。

MXene合成方法如图1所示，随着研究的深入，MXene的合成方法不断丰富和发展。目前主要包括：（1）液相剥离法：通过插层剂（如有机分子或金属离子）扩大MXene层间距，再通过超声或机械搅拌实现层间剥离，获得少层或单层MXene；（2）电化学蚀刻法：通过电场驱动阴离子插入MAX相层间，实现A层的选择性蚀刻，这种方法避免了HF的使用，更加环保；（3）熔盐蚀刻法：利用高温熔融盐体系蚀刻MAX相，可制备具有新型表面终端基团的MXene，如—Cl、—S等传统方法难以引入的表面终端基团[24]；（4）化学气相沉积法：直接生长MXene薄膜，适用于微电子器件集成。

不同合成方法在航空材料制备中的适用性与其环境影响存在显著差异。液相剥离法工艺成熟，可制备高质量MXene，但其批次一致性控制难、难以连续化生产，且使用的高浓度HF具强腐蚀性与剧毒性，产生大量含氟废水与废气，后续处理成本高昂，环境负担重。电化学蚀刻法工艺可控性强，易于实现连续化、自动化生产，适合规模化制备。其环境优势明显，通常使用中性或弱酸性电解质，避免了HF的直接使用，三废处理简单。熔盐蚀刻法为定制化功能（如高温抗氧化）提供了可能，但该法能耗高、反应条件苛刻，且规模化生产与控制难度大，适用于对终端有特殊要求的航空功能材料制备，而非通用结构件。化学气相沉积法可直接在基底上生长高质量、均匀的MXene薄膜，纯度与结晶度高，非常适用于航空微电子器件集成。但其设备复杂、成本高昂、生长速率慢、产能低，且前驱体可能具毒性，目前主要适用于高性能、小批量的特定航空器件场景。

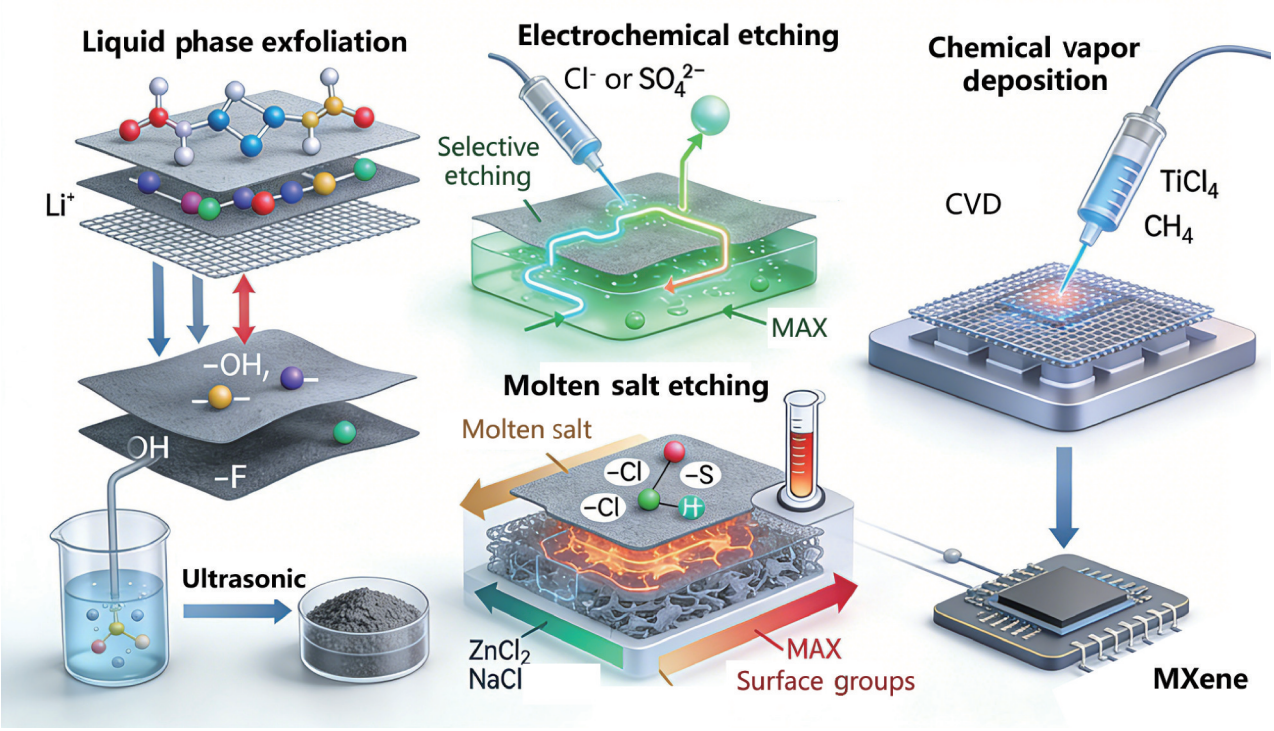


图 1　MXene 合成方法

Fig.1　Synthetic methods for MXene

近年来，为了满足航空领域对材料性能和经济性的高要求，MXene 的合成技术正朝着绿色、高效、规模化的方向快速发展。例如，原位生成 HF 的蚀刻方法避免了直接使用高浓度 HF，降低了安全风险；电化学剥离法可实现 MXene 的连续化生产，提高了制备效率；而模板辅助合成法则可直接构建 MXene 的三维网络结构，大大扩展了其应用形式。未来面向航空应用的 MXene 合成技术发展必将聚焦于理解不同方法本征机理与短板的基础上，融合绿色化学原则与先进过程工程，开发兼具环境友好性和经济可行性的制备技术。

1.2　MXene 微观结构与表面特性

MXene 的微观结构特征主要源于其前驱体 MAX 相。MAX 相具有典型的六方晶系结构（空间群 P6_3/mmc），其中 M 层与 X 层通过强共价键/金属键连接，形成 M-X 八面体层，这些八面体层之间通过 A 层连接，M—A 键相对较弱。蚀刻去除 A 层后，MXene 保留了母相 MAX 的层状结构，但层间仅通过较弱的范德瓦耳斯力结合，使其易于剥离成单层或少层纳米片。

MXene 的表面化学特性对其性能和应用具有决定性影响。在蚀刻过程中，新生成的 MXene 表面具有高反应活性，会立即与环境中的物种（如水、氧气等）反应，形成丰富的表面官能团 T_x，主要包括—OH、—O 和—F。这些表面官能团的类型和比例取决于合成条件，如蚀刻剂种类、浓度、温度和时间等。例如使用 HF 蚀刻时，主要形成—F 和—OH 终端；而使用 LiF＋HCl 混合溶液时，则更易形成—O 终端。

表面终端基团不仅影响 MXene 的表面润湿性，实现从亲水到疏水可调，还显著影响其电学、电化学和催化性能。例如，—O 终端的 MXene 通常表现出更高的电导率和更好的电化学活性，而—F 终端则可能降低其导电性[25]。值得注意的是：通过后续处理如热处理、等离子体处理或化学修饰，可以对 MXene 的表面终端进行精确调控，从而实现针对性的性能优化[26]。

1.3　MXene 物理化学性能

MXene 具有一系列优异的物理化学性能，使其在航空领域具有广阔的应用前景[27-32]。首先，在电学性能方面，MXene 最引人注目的特性之一是其卓越的导电性。$Ti_3C_2T_x$ 薄膜的电导率可达 2.4×10^6 S·m^{-1}，$Ti_3C_2T_x$ 纳米片的电导率更高达 4.6×10^6 S·m^{-1}，接近金属银的水平（6.3×10^7 S·m^{-1}）。这种金属级的导电性主要源于 MXene 中过渡金属 d 电子形成的离域电子云，以及其完整的晶体结构。与其他二维材料相比，MXene 的导电性显著高于还原氧化石墨烯（1.6×10^5 S·m^{-1}）和多壁碳纳米管（约 10^6 S·m^{-1}），与石墨烯（约 10^8 S·m^{-1}）相当[15]。这种高导电性使 MXene 在电磁屏蔽、导电复合材料和电子器件中具有独特优势。其次，在力学性能方面，MXene 还具有优异的力学性能，其弹性模量可达数百 GPa，强度可达数十 GPa。同

时，MXene纳米片具有良好的柔韧性和可弯曲性，使其适用于柔性电子器件。当MXene与聚合物形成复合材料时，即使添加少量MXene也能显著提高复合材料的强度和模量。例如，MXene/聚合物复合材料的弹性模量可比纯聚合物提高数倍[16]。这种高强度、高模量兼柔韧性的组合，使MXene非常适用于航空领域对轻质高强材料的需求。最后，在热性能方面，MXene具有较高的热稳定性，在惰性气氛中可稳定至800 ℃以上，使其在航空航天与汽车等领域具备应用潜力，具体应用场景如图2所示[33]。其热导率因成分和结构而异，$Ti_3C_2T_x$的热导率约为50 $W\cdot m^{-1}K^{-1}$，远高于一般聚合物材料[34]。通过构建三维MXene网络，可以制备出具有高热导率的复合材料，用于航空电子器件的热管理。此外，MXene还表现出优异的光热转换性能，在太阳光照射下可迅速升温，可用于航空器的防除冰系统[35]。

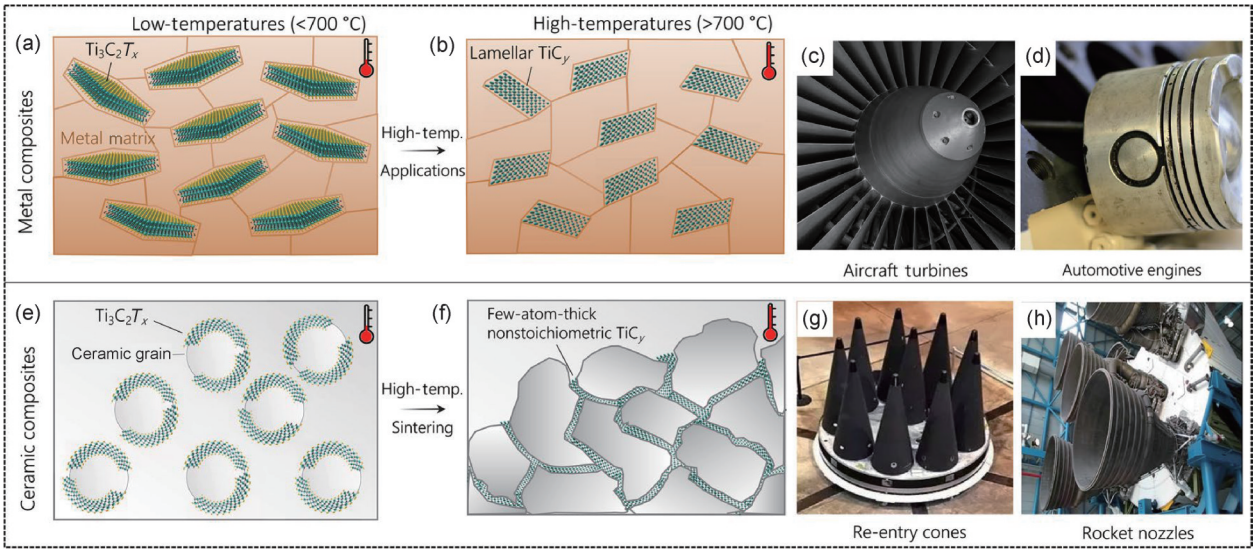


图2 MXene增强体复合材料未来应用场景[33]

(a)MXene可作为单片形式增强材料用于金属基复合材料；(b)在高温应用场景下MXene可转化为层状TiC_y并复合于金属材料中；(c)部分高温应用需要优异的力学性能，如飞机涡轮发动机；(d)某些场景需满足低摩擦特性要求，如汽车发动机气缸；(e)利用MXene二维特性可实现陶瓷晶粒包覆；(f)通过相变形成兼具高强度和导电性的化学键合晶间增强材料；(g)MXene强晶间结合技术应用于航天重返大气层锥形罩；(h)MXene强晶间结合技术应用于火箭喷嘴等超高温陶瓷材料

Fig.2 Future applications of MXene-reinforced composite materials[33]

(a)MXenes used as single-flake reinforcement materials in metal matrix composites; (b)MXenes transformed into layered TiC_y and incorporated into metal materials in high-temperature applications; (c)some high-temperature applications require excellent mechanical properties, such as aircraft turbine engines; (d)certain scenarios demand low-friction characteristics, such as automotive engine cylinders; (e)utilizing the two-dimensional properties of MXene to achieve ceramic grain coating; (f)forming chemically bonded intergranular reinforcement materials with both high strength and conductivity through phase transition; (g)MXene strong intergranular bonding technology applied to aerospace re-entry cones; (h)MXene strong intergranular bonding technology applied to ultra-high temperature ceramic materials such as rocket nozzles

MXene表面丰富的官能团赋予了其优异的亲水性、分散性及可加工性。为充分发挥这些优势，尤其是在航空领域的长周期应用中，需关注其在含氧环境中的稳定性[36]。通过控制温度、湿度等存储与加工条件，或进行适当的表面钝化，可有效管理其氧化倾向，从而保障材料性能的持久可靠[37]。

MXene材料与传统航空材料性能对比见表1，从表中可见，与传统航空材料相比，MXene在电导率、比表面积和电磁屏蔽效能方面具有明显优势，特别是在轻质泡沫/气凝胶形态下，其密度远低于传统金属材料。虽然MXene本体的力学性能不及高强度合金和碳纤维复合材料，但其作为增强体可显著提高聚合物基复合材料的性能。此外，MXene的多功能特性（如导电、电磁屏蔽、传感等）使其能够实现结构-功能一体化设计，这正是下一代航空材料的发展方向。

2 MXene在航空领域研究进展

2.1 轻量化结构材料

航空领域对轻量化材料的追求从未停止，因为减轻质量直接意味着燃油效率的提高、航程的增加和有效载荷的提升。MXene作为纳米增强相在轻量化复合材料体系中展现出独特优势。虽然MXene本体密度（3.2～4.5 $g\cdot cm^{-3}$）高于石墨烯（1.8～2.5 $g\cdot cm^{-3}$），

表1　MXene材料与传统航空材料性能对比

Table 1　Performance comparison of MXene materials and conventional aerospace materials

Material	Density/($g\cdot cm^{-3}$)	Electrical conductivity/($S\cdot m^{-1}$)	Tensile strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Thermal conductivity/($W\cdot m\cdot K^{-1}$)	Specific surface area/($m^2\cdot g^{-1}$)	EMI shielding effectiveness/dB	Maximum service temperature/℃
MXene ($Ti_3C_2T_x$)	3.2-4.0 (bulk); 0.1-0.5 (foam/aerogel)	2.4×10^6 (film); 4.6×10^6 (nanosheet)	10-15 (film); can be enhanced to >100 in composites	200-300 (theoretical); can be enhanced to >10 in composites	≈50 (in-plane)	97.5	>70 (>92 for 45 μm film)	200-300 (in air); >700 (inert atmosphere)
Aluminum alloy (7075)	2.81	3.3×10^7	500-600	70-80	130-150	<1	Low (requires surface treatment)	200-250
Carbon fiber Composite	1.5-1.6	10^3-10^5 (anisotropic)	1500-3500 (fiber direction)	120-200 (fiber direction)	5-50 (anisotropic)	10-100 (porous structure)	Low (requires modification)	150-200 (depends on resin)
titanium Alloy(Ti-6Al-4V)	4.43	5.8×10^5	900-1100	110-120	6.7-7.5	<1	Low	500-600

但其独特的结构和表面特性赋予其高比表面积和表面活性，使其在极低添加量，通常<5%（质量分数，下同）时，可显著提升基体性能，实现结构减重与功能集成。

将MXene作为纳米增强体加入聚合物基体中，得到MXene增强复合材料，可显著提高复合材料的力学性能。研究表明，仅添加1%～2%的MXene就可使环氧树脂的拉伸强度和弹性模量分别提高40%和60%以上。这种显著的增强效果源于MXene的高比表面积和丰富的表面官能团，使其与聚合物基体形成强烈的界面相互作用。更重要的是，与传统的碳纤维增强复合材料相比，MXene增强复合材料具有各向同性的特点，且易于加工成复杂形状，适用于航空器的异形结构件[38]。

此外，通过构建三维多孔网络结构，可以制备出超轻的MXene泡沫和气凝胶材料。例如，Liu等[39]通过胂诱导发泡过程，制备了独立、柔性且疏水的MXene泡沫，密度仅为0.1～0.3 $g\cdot cm^{-3}$，但具有一定的机械强度和优异的回弹性。这种轻质泡沫材料在航空航天领域具有重要应用价值，既可作为轻质结构材料，又可作为多功能载体。

特别值得关注的是，Liang等[19]开发的具有“砖/泥”结构的超轻MXene气凝胶/木基多孔碳复合材料，在密度低至0.197 $g\cdot cm^{-3}$的条件下，实现了高达71.3 dB的电磁屏蔽效能。这种仿生结构设计中，木基多孔碳骨架充当“泥”的角色，MXene气凝胶作为“砖”，不仅解决了MXene气凝胶网络结构不稳健的问题，还通过延长电磁波传输路径显著提高了屏蔽性能。这种兼具轻质、绝热和阻燃特性的材料，在航空、航天等国防军事工业中具有巨大的应用潜力，其中MXene基轻量化材料在航空领域应用潜力见表2。

2.2　电磁干扰屏蔽

现代航空器充斥着各种高灵敏度电子设备，而电磁干扰会严重影响这些设备的正常工作，甚至导致系统故障。同时，航空器本身也需要控制自身的电磁信号特征，以满足隐身要求。因此，高效电磁屏蔽材料在航空领域具有至关重要的作用[40-46]。

MXene在电磁屏蔽领域表现出优异的性能。MXene的电磁屏蔽效能源于其金属级高电导率与独特的二维纳米片层状结构协同作用的多重损耗机制，是一个“反射-吸收-再反射/吸收”的协同物理过程。其高电导率确保了强大的首层反射屏障；而其纳米片层状堆积与可调控的表面/界面特性，则共同构建了一个高效的内部损耗结构，通过多重反射、极化弛豫和电导/涡流损耗机制，将透入的电磁波能量逐步消耗殆尽。这种独特的机制使其在航空领域所需的轻质、薄层、高性能电磁屏蔽材料中展现出不可替代的优势。Shahzad等[18]研究发现，厚度仅为45 μm的$Ti_3C_2T_x$薄膜的电磁屏蔽效能高达92 dB，这意味着它能阻挡超过99.999999%的入射电磁波。更薄的2.5 μm薄膜也能提供超过50 dB的屏蔽效能。该性能远超大多数已知的合成材料，包括传统的金属屏蔽材料和碳

表 2 MXene基轻量化材料在航空领域应用潜力

Table 2 Application potential of MXene-based lightweight materials in the aerospace field

Material type	Density range/($g\cdot cm^{-3}$)	Key performance characteristic	Potential aerospace application	Development statu
MXene/polymer composites	1.2-1.8	High strength, conductive, electromagnetic shielding	Wing skins, cabin structures, UAV fuselages	Laboratory research stage
MXene foam	0.1-0.3	Ultra-light, compressible, conductive	Lightweight sandwich core materials, cushioning materials	Verification stage
MXene aerogel	0.01-0.1	Ultra-light, high porosity, thermal insulation	Thermal insulation materials, sensor substrates	Fundamental research stage
MXene/carbon fiber hybrid composites	1.5-1.7	High strength, high modulus, multifunctional	Primary load-bearing structures, wing spars	Preliminary exploration stage
MXene/metal laminated materials	2.0-3.0	High toughness, fatigue resistant, electromagnetic shielding	Fuselage shells, protective structures	Concept proposal stage

基材料。MXene卓越的电磁屏蔽性能主要源于其金属级的导电性和独特的层状结构,后者能引起电磁波在层间的多次反射,从而增强能量衰减[47]。二维导电MXene纳米片在与高强度芳纶纳米纤维(ANF)进行层级复合后,在实现力学性能提高的前提下,展现出优异的电磁屏蔽性能和多功能性[48]。MXene与ANF复合后形成了具有三明治结构的MXene/ANF/MXene纳米复合薄膜。MXene/ANF/MXene薄膜的电磁屏蔽机理及性能测试如图3所示[49],ANF优异的力学性能使复合薄膜力学强度显著增强,其拉伸强度达到69.2 MPa,相较于纯MXene薄膜提升了163%。同时高导电MXene层状结构赋予了复合薄膜良好的电磁屏蔽性能,在X波段(8.2~12.4 GHz)的电磁干扰屏蔽效能达到23.77 dB。

为了适应航空领域的特殊要求,研究人员开发了多种MXene基电磁屏蔽材料[50-54]。Liu等[39]制备的疏水、柔性和轻质MXene泡沫,不仅具有约70 dB的屏蔽效能(SE),还具有良好的疏水性和环境稳定性,适用

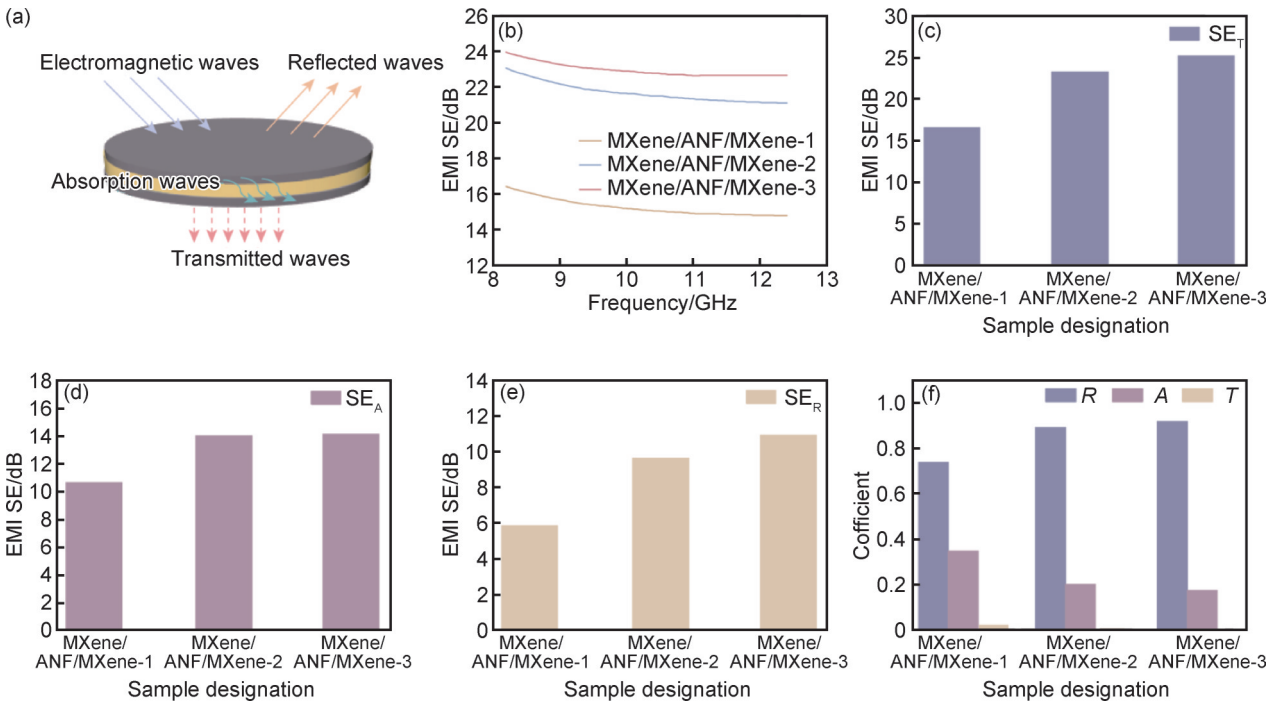


图3 MXene/ANF/MXene薄膜的电磁屏蔽机理及性能测试[49]

(a)电磁屏蔽机理;(b)电磁干扰屏蔽效能;(c)总屏蔽效能;(d)吸收电磁波效能;(e)反射电磁波效能;(f)X波段的R、A、T系数

Fig.3 Electromagnetic mechanisms and performance testing of MXene/ANF/MXene films[49]

(a)mechanism of electromagnetic shielding;(b)electromagnetic interference shielding effectiveness;(c)overall shielding effectiveness;(d)electromagnetic wave absorption efficiency;(e)reflective efficiency of electromagnetic waves;(f)R, A, and T coefficients for X-band

于潮湿环境下的航空电子设备保护。这种MXene泡沫的屏蔽性能甚至优于未发泡的薄膜(53 dB),这归因于多孔结构对电磁波的高效衰减。在多功能集成方面,Wei等[55],Zhu等[56]开发的无黏接剂MXene气凝胶相变复合材料,实现了超高热能存储密度和卓越的电磁干扰屏蔽性能的结合。这种材料能够有效管理航空电子器件的热环境,同时提供电磁保护,体现了MXene在多功能集成方面的独特优势[57-61]。对于航空应用,MXene屏蔽材料的轻质特性尤为重要[62]。研究表明,MXene材料的比屏蔽效能(specific shielding effectiveness,SSE),定义为屏蔽效能除以密度,可高达19531.1 $cm^2 \cdot g^{-1}$,远高于传统金属材料和大多数碳材料[63]。这意味着在相同质量下,MXene能提供更高效的电磁屏蔽,这对于质量敏感的航空应用具有重大意义。

2.3　传感器与健康监测

航空器的结构健康监测、环境感知和系统状态监控对于确保飞行安全至关重要[64]。MXene基传感器由于其高灵敏度、快速响应和灵活性,在航空传感领域展现出广阔的应用前景[65-68]。

在应变与应力传感器方面,MXene的高导电性和机械柔性使其成为理想的应变传感材料。当MXene薄膜或复合材料发生形变时,其导电通路会发生变化,从而导致电阻改变。Tan等[15]的研究表明,MXene基力传感器具有高灵敏度(应变因子>100)、快速响应(<100 ms)和良好的稳定性。这类传感器可直接贴附在航空器结构表面,实时监测机翼、机身等关键部位的应变状态,为结构健康监测提供重要数据。

航空器在使用时需要监测多种气体,包括驾驶舱和客舱的空气质量、燃油蒸气泄漏、发动机排放等。MXene由于其高比表面积和丰富的表面活性位点,对多种气体具有高灵敏度[69-70]。Tran等[20]的研究发现,MXene基气体传感器对目标气体的选择性识别,主要源于通过材料设计实现气体分子与传感材料之间的特异性相互作用。通过表面功能化修饰(如负载纳米粒子),可将高催化活性位点引入MXene表面,优先催化特定气体的吸附与反应,从而产生选择性响应。通过构建异质结,则能利用界面能带弯曲与电荷转移效应,协同放大金属氧化物本身的气体选择性。对于航空环境中复杂的多气体监测需求(如燃油蒸气、CO_2、NH_3共存),可采用基于不同MXene复合材料的传感器阵列,结合模式识别算法,实现对混合气体的有效区分与精准检测。特别是对于航空燃油蒸气的检测,MXene传感器表现出快速响应和低检测限的特点。此外,航空器在飞行过程中会经历大幅度的温度变化,准确的温度监测对系统控制和安全至关重要。MXene具有显著的温度电阻效应,其电导率随温度变化而发生可逆改变,可用于温度传感[71],用于在甲醇和水不同浓度环境下检测乙醇的MXene二维材料虚拟传感器阵列如图4(a)所示[72],可精确检测并区分温度与压力刺激基于$Ti_3C_2T_x$ MXene的多功能触觉传感器如图4(b)所示[73]。此外,MXene的光热效应也可用于非接触式温度监测和热成像[35]。

此外,MXene的一个突出优势是能够实现多种传感功能的集成,打造多功能集成传感系统。例如,Rahman等[74]开发的MXene改性自供电芳纶基气凝胶织物,可在白天吸收太阳能并存储,在夜间或阴天时提供持续电力,同时,监测环境和结构状态。这种自供电特性对于远程、长期监测的航空应用尤其有价值。在航空器健康监测系统的具体应用中,MXene传感器可通过印刷、涂覆或嵌入等方式集成到航空器结构中,形成分布式传感网络。与传统的压电传感器或光纤传感器相比,MXene传感器具有制备简单、成本低、易于集成等优势。特别是对于新一代柔性航空电子设备,MXene的柔性和可拉伸性使其能够适应各种复杂曲面,这在传统刚性传感器难以实现的场合具有独特优势。

2.4　储能系统与热管理

航空器的储能系统和热管理对其性能和安全性具有至关重要的影响。MXene在高效能源存储和智能热管理方面展现出独特优势,为航空技术发展提供了新的解决方案[75-77]。

现代航空器,特别是无人机和电动飞机,对轻量化、高能量密度储能系统有着迫切需求[78]。MXene由于其高导电性、大比表面积和可调控的层间结构,在超级电容器和锂离子电池等领域表现出优异性能[79-85]。研究表明,MXene基超级电容器的体积电容可达1500 F/cm^3,远高于传统碳基超级电容器[86]。这种高体积能量密度对于空间受限的航空应用尤为重要,具备打造轻量化储能设备系统的潜力。值得一提的是,MXene可用于制备柔性、轻薄的微型超级电容器,直接集成于航空器结构表面或内部,为分布式电子设备供电[87-90]。例如,通过光刻或印刷技术可在柔性基底上制备MXene微电极,实现结构-功能一体化设计[91]。

航空器在飞行过程中面临复杂的热环境,有效的热管理对保障电子设备和结构安全至关重要。MXene具有较高的热导率和优异的光热转换效率,在热管理领域具有广泛应用。在主动热管理方面,MXene复合材料可用于制备高效的热界面材料,改善航空电

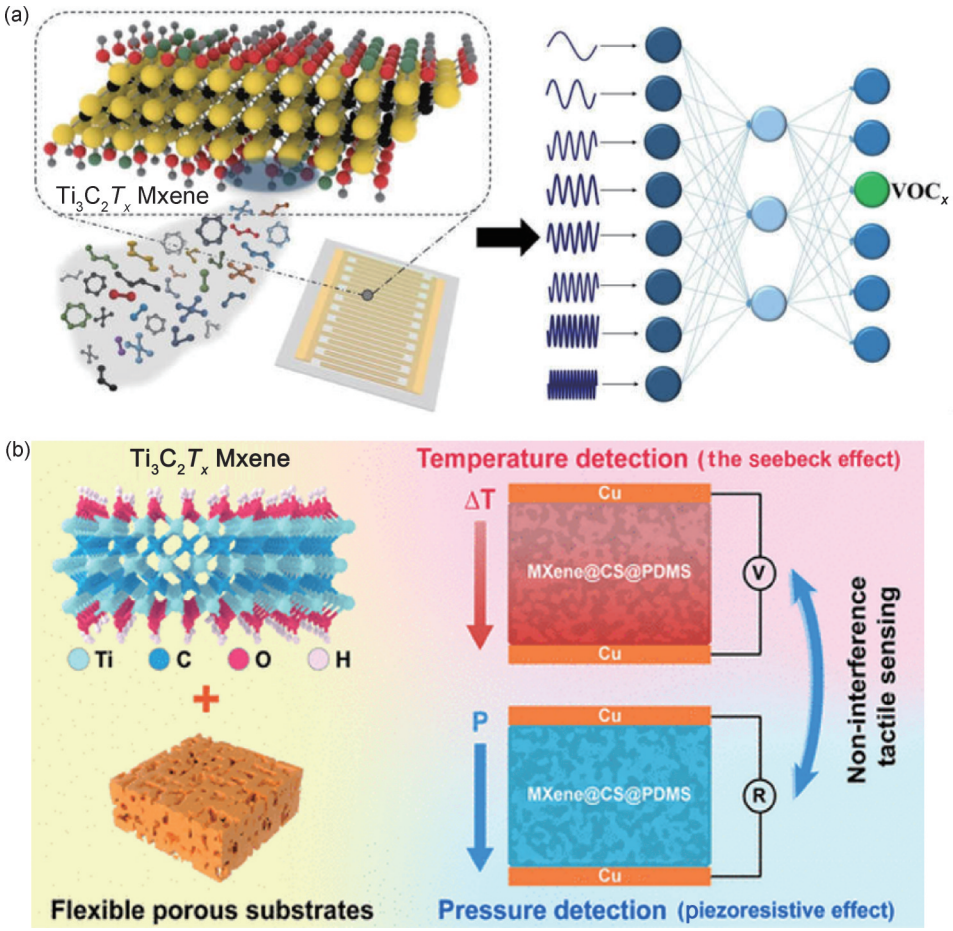


图 4 MXene 传感器

(a)用于在甲醇和水不同浓度环境下检测乙醇的 MXene 二维材料虚拟传感器阵列[72]；

(b)可精确检测、区分温度与压力刺激基于 $Ti_3C_2T_x$ MXene 的多功能触觉传感器[73]

Fig.4 MXene sensors

(a)virtual sensor array of MXene 2D material for ethanol detection in the presence of various concentrations of methanol and water[72];

(b)precise detection and differentiation of temperature and pressure stimuli based on $Ti_3C_2T_x$ MXene multifunctional tactile sensors[73]

子器件与散热器之间的热传递。研究表明，添加少量 MXene 即可显著提高聚合物的热导率，如 1% MXene/环氧树脂复合材料的热导率提高了约 120%[34]，MXene 复合材料用于红外热管理的原理如图 5(a)所示[92]。在被动热管理方面，MXene 气凝胶和泡沫具有低热导率(0.03～0.05 $W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$)和低密度，可作为优良的隔热材料，用于航空器高温区域的热防护[19]。某些 MXene 复合材料能够根据环境温度智能调节其热性能，实现自适应热管理，基于 MXene 的智能多响应芳纶气凝胶纤维赋能自供电织物如图 5(b)所示[93]。

MXene 的光热效应使其可用于航空器的智能表面设计。通过调控 MXene 的表面化学和微观结构，可以设计出具有特定太阳吸收率和红外发射率的表面涂层，实现对航空器表面温度的智能控制。这对于高超声速飞行器的热防护具有特别重要的意义。Zhang 等[94]制备的 MXene 和氧化石墨烯交替堆叠构成的多层复合薄膜结构可以通过多次内部反射和散射，极大地延长光传播路径，具备极强的红外隐身能力，即使飞机表面因气动加热或发动机热辐射升温，也能在红外探测器面前隐藏热信号，提升生存能力。此外，MXene 基复合材料还可用于航空器的防除冰系统[95-98]。基于 MXene 的光热或电热效应，可在结冰条件下快速产生热量，防止或消除冰层积聚，提高飞行安全性[99]。与传统的热空气防冰或电热防冰相比，MXene 基防冰系统具有响应快、效率高、易于集成等优势[100-108]。

3 MXene 在航空应用中的创新点与科学意义

3.1 多功能集成与性能突破

MXene 在航空应用中最显著的创新点在于其多功能集成能力。传统航空材料往往专注于单一功能，如结构承载、电磁屏蔽或热防护，而 MXene 基材料则

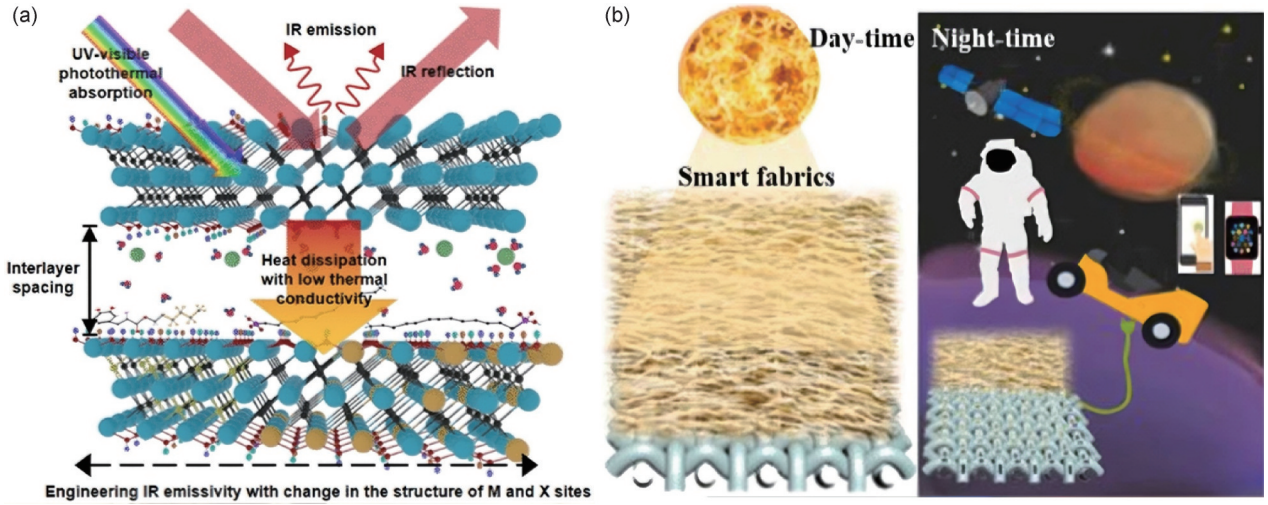


图5　MXene用于热管理

(a)MXene复合材料用于红外热管理的原理[92];(b)智能多响应芳纶气凝胶纤维赋能的自供电织物[93]

Fig.5　MXene for thermal management

(a)principle of MXene composite material for infrared thermal management[92];

(b)self powered fabric energized by intelligent multi response aramid aerogel fiber[93]

能同时实现多种功能的集成,为航空器设计提供了新的可能性。

在结构-功能一体化设计方面,MXene可实现结构材料与功能材料的无缝集成。例如,MXene增强复合材料既可作为轻质结构材料,又能提供电磁屏蔽和传感功能,打破了传统材料的功能界限[38]。这种结构-功能一体化设计可显著减轻航空器质量,简化系统结构,提高可靠性。从科学角度看,这源于MXene独特的二维结构和可调控的表面化学状态,使其能够同时满足多种功能需求。

在极限性能突破方面,MXene已在多个性能指标上突破了传统材料的限制。在电磁屏蔽领域,MXene薄膜的屏蔽效能(92 dB)和比屏蔽效能(19531.1 $cm^2 \cdot g^{-1}$)均创下了纪录[18]。在轻量化方面,MXene气凝胶的密度可低至0.01 $g \cdot cm^{-3}$级别,同时保持一定的结构完整性和功能性[19]。在传感领域,MXene传感器的灵敏度和工作范围也达到了较高水平[15]。这些性能突破不仅拓展了航空材料的性能边界,也为新一代航空器设计提供了更多可能性。

在自适应与智能响应材料设计方面,MXene基材料能够对外界刺激产生智能响应,可覆盖应力、温度、电磁场等多种条件,实现自适应功能。例如,近红外光和太阳光激活的自修复环氧涂层利用MXene作为多功能填料,可在光照条件下实现损伤的自主修复[99]。这种自修复能力对航空结构的长寿命和高可靠性要求具有重要意义。从科学层面看,这体现了MXene作为“活性”材料的新特性,超越了传统材料的“被动”角色。

3.2　结构创新与界面工程

MXene在航空应用中的另一重要创新在于其结构设计和界面工程方面的突破。

研究人员通过多级结构设计,充分发挥了MXene的潜能。例如,“砖/泥”结构的MXene气凝胶/木基多孔碳复合材料模仿了自然的砖泥结构,既解决了MXene气凝胶网络结构不稳健的问题,又通过延长电磁波传输路径显著提高了屏蔽性能。这种仿生设计思路为材料结构优化提供了新方向。

在界面调控策略方面,MXene与基体材料的界面相互作用对其性能至关重要。通过表面功能化改性,如有机、无机和有机-无机杂化改性,可显著改善MXene与聚合物基体的相容性,增强界面结合力。例如,通过硅烷偶联剂改性MXene表面,可提高其在环氧树脂中的分散性和界面相互作用,从而显著提升复合材料的力学性能和稳定性[50]。这些界面调控策略为解决MXene的团聚问题和提高复合材料性能提供了有效途径[109]。

此外,将MXene与其他维度的材料(如零维纳米颗粒、一维纳米纤维、三维多孔框架或其他二维纳米材料)复合,可产生显著的多维度协同效应[110]。例如,MXene与银纳米线的复合物结合了二维材料和一维材料的优势,建立了高效的双极导电路径,显著提高了材料的导电性和电磁屏蔽性能[111]。MXene与石墨烯的复合气凝胶则结合了两种二维材料的特性,实现了电磁屏蔽性能和力学性能的协同提升。这种多维度融合策略为设计高性能航空材料提供了新思路。

3.3 科学意义与范式转变

MXene在航空领域的应用不仅带来了技术创新，还具有深远的科学意义，推动了材料科学范式的转变。MXene在航空领域的应用创新与科学意义如图6所示。

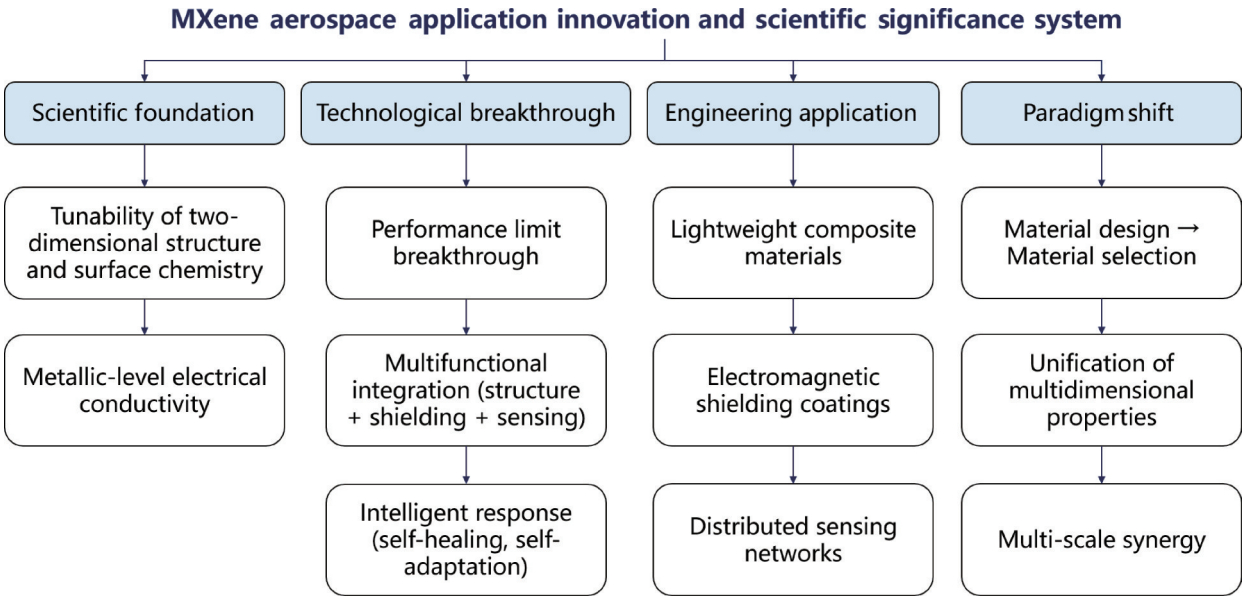


图6 MXene航空应用创新与科学意义

Fig.6 Innovations and scientific significance of MXene in aviation applications

首先，从“材料选择”到“材料设计”的转变。MXene的可调控性（包括成分、层数、表面终端基团等）使材料学家能够根据具体应用需求“定制”材料性能。这种从被动选择到主动设计的转变，代表了材料科学的一个重要发展方向。例如，通过调控MXene的—F/—OH/—O表面基团比例，可精确调节其电导率和亲疏水性，满足不同航空应用场景的需求[25]。

其次，多维性能统一。传统材料往往在多种性能之间存在权衡关系，如强度与韧性、导电与绝缘、刚性与柔性等。MXene通过其独特的二维结构和表面化学，在一定程度上突破了这些传统权衡，实现了多种优异性能的统一[112-115]。这种多维性能的统一对于复杂的航空应用环境具有重要价值。

再次，跨尺度协同设计。MXene促进了从原子尺度到宏观器件的跨尺度协同设计。从原子尺度的表面终端调控，到纳米尺度的层间工程，再到微米尺度的多级结构设计，最后到宏观尺度的器件集成，MXene研究涵盖了多个尺度。这种跨尺度研究方法和设计理念对现代材料科学的发展具有示范意义。

最后，理论-实验-应用紧密结合。MXene研究体现了理论计算、实验研究和应用开发之间的紧密互动。理论计算可预测MXene的结构和性能，指导实验合成；实验研究验证理论预测并发现新现象；应用开发则推动基础研究的深入[116]。这种良性循环加速了MXene从基础研究到实际应用的转化进程。

4 MXene航空应用面临的挑战与问题

4.1 规模化制备与质量控制

尽管MXene在实验室研究阶段显示出卓越性能，但其规模化制备仍面临重大挑战，这严重制约了其在航空领域的实际应用。首先，目前大多数MXene合成方法仅限于实验室小规模制备，当尝试放大生产时，面临质量一致性和工艺稳定性的问题[117]。HF蚀刻法作为最常用的MXene制备方法，使用高毒性、高腐蚀性的氢氟酸，对设备要求高，且产生大量含氟废水，环境负担重[118]。虽然已开发出一些替代方法，如电化学蚀刻、熔盐蚀刻等，但这些方法在规模化时仍面临挑战。其次，MXene的质量受前驱体MAX相质量、蚀刻条件、剥离参数等多种因素影响，批次间差异较大，存在质量一致性问题。航空领域对材料性能的一致性要求极高，特别是对于关键部件，任何性能波动都可能导致严重后果。目前，MXene的质量控制标准尚未建立，缺乏统一的表征方法和评价体系。此外，还有成本问题，高纯度MAX相前驱体的合成、蚀刻剂的使用、纯化步骤等使得MXene的制备成本居高不下[119]。虽然随着制备技术的进步，MXene的成本正在下降，但与铝合金、钛合金等传统航空材料相比，仍显昂贵。成本问题限制了MXene在航空领域的大规模应用，特别是在对成本敏感的商业航空领域。

4.2　环境稳定性与耐久性

MXene的环境稳定性不足是其航空应用的另一重要障碍。航空器工作在复杂多变的环境中，包括温度循环、湿度变化、紫外线辐射、氧化氛围等，对材料的环境耐久性要求极高。在含氧环境中，MXene易发生氧化降解，转化为金属氧化物和碳质材料，导致导电性、力学性能等关键指标失效。氧化过程从片层边缘向中心扩展，受温度、湿度、光照等多因素耦合影响。对于长期使用的航空结构，氧化问题可能导致材料性能随时间逐渐退化，影响航空器的使用寿命和可靠性。此外，MXene在高温下的稳定性也是航空应用的关注点。航空器某些部位（如发动机附近）的工作温度较高，而MXene在空气中约300 ℃以上就开始明显氧化。虽然通过表面改性或复合设计可提高其热稳定性，但难以满足某些高温部件的应用需求。Liu等[120]指出，航空发动机铸造件的电磁屏蔽需要材料能够耐受380 ℃以上的高温，而目前MXene基材料难以在此温度下长期稳定工作。此外，虽然MXene具有优异的力学性能，但其在长期循环载荷下的疲劳性能、在复杂应力状态下的损伤演化等尚未得到充分研究。航空结构材料需要承受长期的振动、冲击和循环载荷，对材料的耐久性要求极高。MXene基复合材料在复杂应力状态下的界面稳定性、损伤机理和寿命预测等都是需要深入研究的课题。

4.3　与其他材料的兼容性与集成工艺

将MXene集成到航空系统和结构中面临诸多技术挑战，涉及材料兼容性、工艺适应性和系统集成等多个方面。在与航空材料兼容性方面，MXene与航空领域常用材料（如铝合金、钛合金、碳纤维复合材料等）的物理化学兼容性尚未充分研究。不同材料间的热膨胀系数差异、界面结合力、热导率等差异可能导致界面应力集中、热应力开裂等问题。例如，MXene与聚合物基体的界面结合力不足可能导致应力传递不均，影响结构完整性。此外，MXene的表面化学特性（如亲水性、官能团分布）可能与传统航空材料的处理工艺（如表面处理、涂层工艺）存在冲突，增加集成难度。同时工艺适应性问题也是一大难题，航空制造工艺（如模压、注塑、焊接等）对材料的加工性能和工艺参数有严格要求。MXene的制备和加工工艺（如液相剥离、电化学蚀刻等）与传统航空材料的加工工艺存在差异，可能导致工艺流程不兼容。例如，MXene的高导电性和热敏感性可能影响焊接、热处理等工艺的稳定性，增加工艺控制难度。而将MXene集成到复杂航空系统中（如机翼、机身、发动机部件等）需要解决多学科交叉问题，面临较高的系统集成复杂性。例如，MXene基传感器的集成需考虑传感器布局、信号传输、电源管理、数据处理等系统级问题。此外，MXene的多功能性（如电磁屏蔽、传感、热管理）需与航空系统的其他功能模块（如结构承载、能源供应、控制逻辑）协同工作，增加系统设计和验证的复杂性。

4.4　成本与经济性问题

尽管MXene在性能上具有显著优势，但其高昂的制备成本和经济性问题限制了其在航空领域的大规模应用。MXene的合成通常需要高纯度前驱体（如MAX相）、昂贵的蚀刻剂（如氢氟酸）、复杂的纯化步骤和高能耗的工艺。尽管近年来合成方法不断优化（如电化学蚀刻、熔盐蚀刻等），但规模化生产仍面临成本高、能耗高的问题。此外，MXene的纯度和批次一致性控制难度大，进一步增加了生产成本。与传统航空材料相比，MXene的单位成本显著较高，经济性与市场接受度面临挑战。尽管其性能优势（如轻量化、多功能集成）可能带来长期经济效益，但短期内难以实现成本效益比的平衡。此外，航空市场对材料的经济性要求极高，特别是在商业航空领域，成本敏感性更强，限制了MXene的市场接受度。尽管MXene在性能上具有优势，但其长期使用寿命、维护成本和环境影响（如氧化稳定性、环境耐久性）尚未充分评估。航空器的全生命周期成本（包括设计、制造、维护、报废）需综合考虑材料性能、可靠性、维护成本等因素，MXene的长期经济性仍需进一步验证。

5　未来发展方向与解决路径

针对上述挑战，未来MXene在航空领域的研究与应用需从多个维度进行突破和优化。

（1）开发绿色合成技术与规模化生产。开发环境友好、低成本、高效率的MXene合成方法是关键。例如，探索无HF蚀刻的替代工艺、绿色溶剂体系、生物模板法等，以降低环境影响和生产成本。同时，推动规模化生产技术，如设计连续流反应器、开发模块化工艺等，以提高产量和一致性。

（2）推动材料稳定性与耐久性提升。通过表面工程（如功能化改性）、复合设计（如MXene/聚合物复合材料、MXene/金属层压材料）、多级结构设计等手段，提高MXene的环境稳定性、热稳定性、机械耐久性。此外，开发抗氧化、抗老化涂层和封装技术，延长材料使用寿命。

（3）多功能集成与智能化设计。推动MXene在航空领域的多功能集成应用，如结构-功能一体化设计（如轻量化结构＋电磁屏蔽＋传感）、智能响应材料

(如自修复、自适应热管理)、智能传感与健康监测系统。结合人工智能和大数据技术,实现航空系统的智能化、自主化。

(4)跨学科协同与标准化。加强材料科学、航空工程、电子工程、计算机科学等多学科交叉研究,推动MXene在航空领域的系统集成与应用。建立统一的性能评价标准、测试方法和质量控制体系,促进技术标准化和产业化。

6 结束语

MXene作为一种新型二维材料,凭借其独特的层状结构、高导电性、可调控的表面化学性质以及优异的力学性能,在航空领域展现出巨大的应用潜力。在轻量化方面,MXene的低密度和高比强度特性使其成为替代传统金属合金的理想选择,有助于减轻飞机结构质量,从而提升燃油效率与载荷能力。在电磁屏蔽领域,MXene薄膜具有极高的电导率和丰富的界面极化效应,可有效抑制航空电子设备间的电磁干扰,保障飞行通信安全。同时,MXene基柔性传感器能够实现对飞机结构健康状态的实时监测,例如应变、裂纹与温度变化等,极大增强了航空器的智能感知与故障预警能力。在储能方面,MXene可作为高性能电极材料应用于机载超级电容器和电池系统中,满足航空器对高功率、长寿命储能组件的需求。

然而,MXene在航空领域的实际工程应用仍面临诸多挑战。在规模化制备方面,目前常用的氢氟酸蚀刻法存在安全风险与环境压力,难以满足航空级材料对批量一致性与工艺稳定性的高要求。在环境稳定性上,MXene易被氧化的问题限制了其在湿热、高盐雾或紫外线辐射等苛刻航空环境下的长期服役性能。在成本控制方面,原料价格较高、合成工艺复杂导致MXene的制备成本显著高于传统航空材料,制约了其商业化进程。此外,在集成工艺方面,如何实现MXene与复合材料、功能涂层或嵌入式系统的高效结合,并适应航空制造中的自动化装配流程,仍缺乏成熟的解决方案。

未来,通过推动绿色合成路径的开发,如采用无氟蚀刻剂或电化学合成法,有望在降低环境负荷的同时实现MXene的高效、安全制备。在性能优化方面,可通过表面修饰、掺杂或构建多层异质结构增强其抗氧化与力学性能,以满足航空材料对耐久性的严格要求。进一步推动MXene在结构-功能一体化方面的创新,例如发展兼具承载与电磁屏蔽能力的智能蒙皮,或集成传感、储能与热管理功能的多维系统,将极大拓展其在航空装备中的应用维度。跨学科协同也至关重要,需要材料科学家、航空工程师与制造企业通力合作,共同攻克从材料设计到部件集成的技术瓶颈。

随着材料科学、制备工艺与航空产业体系的持续进步,MXene有望在未来航空材料体系中扮演重要角色,推动航空器结构进一步向轻量化、智能化与高可靠性方向发展。从实验室的基础研究到工程化验证,再到最终实现装机应用,MXene或将成为新一代高性能航空材料的关键组成部分,为未来绿色航空、智能航空与高超声速飞行器的创新发展提供强有力的材料支撑。

参考文献

[1] SHI Z, KHALEDIALIDUSTI R, MALAKI M, et al. MXene-based materials for solar cell applications[J]. Nanomaterials, 2021, 11(12): 3170.

[2] CHEN J, DING Y B, YAN D, et al. Synthesis of MXene and its application for zinc-ion storage[J]. SusMat, 2022, 2(3): 293-318.

[3] WANG C L, PAN Z B, CHEN H Q, et al. MXene-based materials for multivalent metal-ion batteries[J]. Batteries, 2023, 9(3): 174.

[4] MALAKI M, JIANG X T, WANG H L, et al. MXenes: from past to future perspectives[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 463: 142351.

[5] KANNAN K, SADASIVUNI K K, ABDULLAH A M, et al. Current trends in MXene-based nanomaterials for energy storage and conversion system: a mini review[J]. Catalysts, 2020, 10(5): 495.

[6] MUNIR S, RASHEED A, RASHEED T, et al. Exploring the influence of critical parameters for the effective synthesis of high-quality 2D MXene[J]. ACS Omega, 2020, 5(41): 26845-26854.

[7] NAGUIB M, KURTOGLU M, PRESSER V, et al. Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti_3AlC_2[M]// MXenes. New York: Jenny Stanford Publishing, 2023: 15-29.

[8] NAGUIB M, BARSOUM M W, GOGOTSI Y. Ten years of progress in the synthesis and development of MXenes[J]. Advanced Materials, 2021, 33(39): 2103393.

[9] CUI Y L, ZHU J, TONG H, et al. Advanced perspectives on MXene composite nanomaterials: types synthetic methods, thermal energy utilization and 3D-printed techniques[J]. iScience, 2023, 26(1): 105824.

[10] REPON M R, MIKUČIONIENĖ D, PAUL T K, et al. Architectural design and affecting factors of MXene-based textronics for real-world application[J]. RSC Advances, 2024, 14(23): 16093-16116.

[11] RAHMAN U U, HUMAYUN M, GHANI U, et al. MXenes as emerging materials: synthesis, properties, and applications[J]. Molecules, 2022, 27(15): 4909.

[12] 王武,邵春阳,蔡天骄,等.MXene基形状记忆复合材料研究进展[J].材料工程,2025,53(6):74-86.
WANG W, SHAO C Y, CAI T J, et al. Research progress in MXene-based shape memory composites[J]. Journal of Materials

Engineering,2025,53(6):74-86.

[13] 张文娟,寇苗.二维材料MXene在水处理领域的应用[J].材料工程,2021,49(9):14-26.
ZHANG W J,KOU M.Applications of two dimensional material MXene in water treatment[J].Journal of Materials Engineering,2021,49(9):14-26.

[14] 曾敏,陈淋,李星,等.基于$Ti_3C_2T_x$材料在钠离子电池中的应用进展[J].材料工程,2023,51(2):1-14.
ZENG M,CHEN L,LI X,et al.Progress in application of $Ti_3C_2T_x$ materials in sodium-ion batteries[J].Journal of Materials Engineering,2023,51(2):1-14.

[15] TAN D C,JIANG C M,CAO X G,et al.Recent advances in MXene-based force sensors:a mini-review[J].RSC Advances,2021,11(31):19169-19184.

[16] SREENILAYAM S P,UL AHAD I,NICOLOSI V,et al.MXene materials based printed flexible devices for healthcare,biomedical and energy storage applications[J].Materials Today,2021,43:99-131.

[17] 李华鹏,董旭晟,孙彬,等.TiO_2/MXene纳米复合材料的可控制备及在光催化和电化学中的应用研究进展[J].材料工程,2021,49(8):54-62.
LI H P,DONG X S,SUN B,et al.Research progress on controllable preparation of TiO_2/MXene nanocomposites and applications in photocatalysis and electrochemistry[J].Journal of Materials Engineering,2021,49(8):54-62.

[18] SHAHZAD F,ALHABEB M,HATTER C B,et al.Electromagnetic interference shielding with 2D transition metal carbides (MXenes)[M].MXenes.New York:Jenny Stanford Publishing,2023:933-947.

[19] LIANG C B,QIU H,SONG P,et al.Ultra-light MXene aerogel/wood-derived porous carbon composites with wall-like "mortar/brick" structures for electromagnetic interference shielding[J].Science Bulletin,2020(8):616-622.

[20] TRAN V A,TRAN N T,DOAN V D,et al.Application prospects of MXenes materials modifications for sensors[J].Micromachines,2023,14(2):247.

[21] BISWAS S,ALEGAONKAR P S.MXene:evolutions in chemical synthesis and recent advances in applications[J].Surfaces,2022,5(1):1-34.

[22] IBRAGIMOVA R,RINKE P,KOMSA H P.Native vacancy defects in MXenes at etching conditions[J].Chemistry of Materials,2022,34(7):2896-2906.

[23] WAN S J,LI X,WANG Y L,et al.Strong sequentially bridged MXene sheets[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2020,117(44):27154-27161.

[24] ABID M Z,RAFIQ K,ASLAM A,et al.Scope,evaluation and current perspectives of MXene synthesis strategies for state of the art applications[J].Journal of Materials Chemistry A,2024,12(13):7351-7395.

[25] 陆赞,郭子娇,李悦,等.MXene终端基团改性研究与应用进展[J].东华大学学报(自然科学版),2021,47(3):12-22,59.
LU Z,GUO Z J,LI Y,et al.Research and application progress on modification of MXene terminal groups[J].Journal of Donghua University (Natural Science),2021,47(3):12-22,59.

[26] JIANG Y,XIE Y H,WU H,et al.Research progress in the construction of MXene-based flame retardant system and its application in polymer flame retardant modification[J].Scientia Sinica Chimica,2024,54(11):2147-2166.

[27] LI G H,WYATT B C,SONG F,et al.2D titanium carbide (MXene) based films:expanding the frontier of functional film materials[J].Advanced Functional Materials,2021,31(46):2105043.

[28] POGORIELOV M,SMYRNOVA K,KYRYLENKO S,et al.MXenes:a new class of two-dimensional materials:structure,properties and potential applications[J].Nanomaterials,2021,11(12):3412.

[29] CHANDRA A.Unlocking the potential of sodium ion batteries:a comprehensive review[J].Frontiers in Advanced Materials Research,2023:43-55.

[30] YAO J R,ZHOU J T,YANG F,et al.Multi-functional and multi-scenario applications for MXene aerogels with synergistically enhanced asymmetric modules[J].Nano Research,2024,17(4):3359-3368.

[31] IRFAN S,KHAN S,DIN M,et al.Retrospective on exploring MXene based nanomaterials:photocatalytic applications[J]Molecules 2023,28(6),2495.

[32] AMANI A M,TAYEBI L,ABBASI M,et al.The need for smart materials in an expanding smart world:MXene-based wearable electronics and their advantageous applications[J].ACS Omega,2023,9(3):3123-3142.

[33] WYATT B C,NEMANI S K,ANASORI B.2D transition metal carbides (MXenes) in metal and ceramic matrix composites[J].Nano Convergence,2021,8(1):16.

[34] LI L,CHENG Q F.MXene based nanocomposite films[J].Exploration,2022,2(4):20220049.

[35] CHEN Z,FU X,LIU R,et al.Fabrication,performance,and potential applications of MXene composite aerogels[J].Nanomaterials 2023,13(14),2048.

[36] SUN Z X,WANG R,MATULIS V E,et al.Structure,synthesis,and catalytic performance of emerging MXene-based catalysts[J].Molecules,2024,29(6):1286.

[37] XU B L,QI S H,JIN M M,et al.2020 roadmap on two-dimensional materials for energy storage and conversion[J].Chinese Chemical Letters,2019,30(12):2053-2064.

[38] 巴智晨,梁大鑫,谢延军.MXenes复合材料的发展:界面调控及结构设计[J].高等学校化学学报,2021,42(4):1225-1240.
BA Z C,LIANG D X,XIE Y J.Progress of MXenes composites:interface modification and structure design[J].Chemical Journal of Chinese Universities,2021,42(4):1225-1240.

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

[40] DENG Y L,CHEN Y Q,LIU W,et al.Transparent electromagnetic interference shielding materials using MXene[J].Carbon Energy,2024,6(11):e593.

[41] WANG H R, JIANG Y, MA Z W, et al. Hyperelastic, robust, fire-safe multifunctional MXene aerogels with unprecedented electromagnetic interference shielding efficiency [J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33(49): 2306884.

[42] XIANG Z, SHI Y Y, ZHU X J, et al. Flexible and waterproof 2D/1D/0D construction of MXene-based nanocomposites for electromagnetic wave absorption, EMI shielding, and photothermal conversion[J]. Nano-Micro Letters, 2021, 13(1): 150.

[43] HE Z W, XIE H M, WU H Q, et al. Recent advances in MXene/polyaniline-based composites for electrochemical devices and electromagnetic interference shielding applications [J]. ACS Omega, 2021, 6(35): 22468-22477.

[44] LIU Y, WANG Y D, WU N, et al. Diverse structural design strategies of MXene-based macrostructure for high-performance electromagnetic interference shielding [J]. Nano-Micro Letters, 2023, 15(1): 240.

[45] LIU Y, LIU Y J, ZHAO X M. MXene composite electromagnetic shielding materials: the latest research status [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16(31): 41596-41615.

[46] 刘后宝, 傅仁利, 苏新清, 等. MXene材料的结构、性能及在电磁屏蔽领域的应用[J]. 材料导报, 2021, 35(13): 13067-13074.
LIU H B, FU R L, SU X Q, et al. MXene structure, properties and application in the field of electromagnetic shielding[J]. Materials Review, 2021, 35(13): 13067-13074.

[47] RU X H, LI H Y, PENG Y W, et al. A new trial for lightweight MXene hybrid aerogels with high electromagnetic interference shielding performance [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2022, 33(7): 4093-4103.

[48] CUI Z B, GAO C L, FAN Z M, et al. Lightweight MXene/cellulose nanofiber composite film for electromagnetic interference shielding [J]. Journal of Electronic Materials, 2021, 50(4): 2101-2110.

[49] 李泽群, 滕超, 曹墨源, 等. 用于电磁屏蔽和渗透能量捕获的仿生MXene基薄膜[J]. 表面技术, 2025, 54(21): 113-123.
LI Z Q, TENG C, CAO M Y, et al. Biomimetic MXene-based films for electromagnetic shielding and permeation energy trapping [J]. Surface Technology, 2025, 54(21): 113-123.

[50] HE P, CAO M S, CAO W Q, et al. Developing MXenes from wireless communication to electromagnetic attenuation [J]. Nano-Micro Letters, 2021, 13(1): 115.

[51] ZHANG Q M, WANG Q, CUI J, et al. Structural design and preparation of $Ti_3C_2T_x$ MXene/polymer composites for absorption-dominated electromagnetic interference shielding [J]. Nanoscale Advances, 2023, 5(14): 3549-3574.

[52] CAO W T, CHEN F F, ZHU Y J, 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.

[53] 王梦雅, 颜鹏, 王海风, 等. 原位反应制备具有高电磁屏蔽性能的MXene/CaF_2复相陶瓷材料[J]. 现代技术陶瓷, 2021, 42(3): 181-191.
WANG M Y, YAN P, WANG H F, et al. *In-situ* reaction prepared MXene/CaF_2 ceramic composite with high electromagnetic interference shielding performance [J]. Advanced Ceramics, 2021, 42(3): 181-191.

[54] 梅婷, 冉娅, 蔡雄睿, 等. 基于MXene电磁屏蔽材料的研究[J]. 复合材料学报, 2024, 41(5): 2280-2293.
MEI T, RAN Y, CAI X R, et al. Research on electromagnetic shielding materials based on MXene [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(5): 2280-2293.

[55] WEI C X, ZHANG Q G, WANG Z, et al. Recent advances in MXene-based aerogels: fabrication, performance and application [J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33(9): 2211889.

[56] ZHU C B, HAO Y R, WU H, et al. Self-assembly of binderless MXene aerogel for multiple-scenario and responsive phase change composites with ultrahigh thermal energy storage density and exceptional electromagnetic interference shielding [J]. Nano-Micro Letters, 2023, 16(1): 57.

[57] OLIVEIRA F M, AZADMANJIRI J, WANG X H, et al. Structure design and processing strategies of MXene-based materials for electromagnetic interference shielding [J]. Small Methods, 2023, 7(7): 2300112.

[58] ZHANG Y, ZHANG G C, MA Z L, et al. Heterogeneous MXene-based films with graded electrical conductivity towards highly efficient EMI shielding and electrothermal heating [J]. Nano Research, 2024, 17(8): 7264-7274.

[59] WU F S, HU P Y, HU F Y, et al. Multifunctional MXene/C aerogels for enhanced microwave absorption and thermal insulation[J]. Nano-Micro Letters, 2023, 15(1): 194.

[60] RAAGULAN K, BRAVEENTH R, KIM B M, et al. An effective utilization of MXene and its effect on electromagnetic interference shielding: flexible, free-standing and thermally conductive composite from MXene-PAT-poly (*p*-aminophenol)-polyaniline co-polymer[J]. RSC Advances, 2020, 10(3): 1613-1633.

[61] ZHOU J, YU J S, BAI D Y, et al. Mechanically robust flexible multilayer aramid nanofibers and MXene film for high-performance electromagnetic interference shielding and thermal insulation[J]. Nanomaterials, 2021, 11(11): 3041.

[62] MA C, LIU T, XIN W, et al. Breathable and wearable MXene-decorated air-laid paper with superior folding endurance and electromagnetic interference-shielding performances [J]. Frontiers in Materials, 2019, 6: 308.

[63] 原因. 轻质石墨烯与MXene气凝胶的制备及其电磁屏蔽性能[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
YUAN Y. Preparstion and electromagnetic interference shielding properties of lightweight graphene and MXene aerogels [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.

[64] HART J L, HANTANASIRISAKUL K, LANG A C, et al. Control of MXenes' electronic properties through termination and intercalation[J]. Nature Communications, 2019, 10: 522.

[65] PANG J B, PENG S A, HOU C Y, et al. Applications of MXenes in human-like sensors and actuators [J]. Nano Research, 2023, 16(4): 5767-5795.

[66] SHRESTHA S, BARVENIK K J, CHEN T L, et al. Machine intelligence accelerated design of conductive MXene aerogels with programmable properties [J]. Nature Communications, 2024, 15:

4685.

[67] 卢少微,蒋孝伟,王晓强,等.碳基纳米传感器在复合材料制造过程及服役过程监测中的应用[J].航空材料学报,2021,41(3):36-51.
LU S W,JIANG X W,WANG X Q,et al.Application of carbon nanosensors in monitoring the manufacturing and service processes of composite materials[J].Journal of Aeronautical Materials,2021,41(3):36-51.

[68] 陈达,石宇晴,张伟,等.基于MXene的电化学传感研究进展[J].材料工程,2022,50(4):85-95.
CHEN D,SHI Y Q,ZHANG W,et al.Research progress in electrochemical sensors based on MXene[J].Journal of Materials Engineering,2022,50(4):85-95.

[69] CHAUDHARY V,ASHRAF N,KHALID M,et al.Emergence of MXene-polymer hybrid nanocomposites as high-performance next-generation chemiresistors for efficient air quality monitoring[J].Advanced Functional Materials,2022,32(33):2112913.

[70] KIM H,ALSHAREEF H N.MXetronics:MXene-enabled electronic and photonic devices[J].ACS Materials Letters,2020,2(1):55-70.

[71] BABAR Z U D,DELLA VENTURA B,VELOTTA R,et al.Advances and emerging challenges in MXenes and their nanocomposites for biosensing applications[J].RSC Advances,2022,12(30):19590-19610.

[72] CHEN W Y,JIANG X F,LAI S N,et al.Nanohybrids of a MXene and transition metal dichalcogenide for selective detection of volatile organic compounds[J].Nature Communications,2020,11:1302.

[73] GAO F L,LIU J,LI X P,et al.$Ti_3C_2T_x$ MXene-based multifunctional tactile sensors for precisely detecting and distinguishing temperature and pressure stimuli[J].ACS Nano,2023,17(16):16036-16047.

[74] RAHMAN M,AL MAMUN M S.Future prospects of MXenes:synthesis,functionalization,properties,and application in field effect transistors[J].Nanoscale Advances,2024,6(2):367-385.

[75] 党阿磊,方成林,赵婴,等.新型二维纳米材料MXene的制备及在储能领域的应用进展[J].材料工程,2020,48(4):1-14.
DANG A L,FANG C L,ZHAO Z,et al.Preparation of a new two-dimensional nanomaterial MXene and its application progress in energy storage[J].Journal of Materials Engineering,2020,48(4):1-14.

[76] 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.

[77] ZHOU Y L,YIN L T,XIANG S F,et al.Unleashing the potential of MXene-based flexible materials for high-performance energy storage devices[J].Advanced Science,2024,11(3):2304874.

[78] YU L L,LIU B J,WANG Y Y,et al.Recent progress on MXene-Derived material and its' application in energy and environment[J].Journal of Power Sources,2021,490:229250.

[79] LEI J C,ZHANG X,ZHOU Z.Recent advances in MXene:preparation,properties,and applications[J].Frontiers of Physics,2015,10(3):276-286.

[80] SUN M M,YE W,ZHANG J Y,et al.Structure,properties,and preparation of MXene and the application of its composites in supercapacitors[J].Inorganics,2024,12(4):112.

[81] ASLAM M K,NIU Y B,XU M W.MXenes for non-lithium-ion (Na,K,Ca,Mg,and Al) batteries and supercapacitors[J].Advanced Energy Materials,2021,11(2):2000681.

[82] YU H,WANG Y H,JING Y,et al.Surface modified MXene-based nanocomposites for electrochemical energy conversion and storage[J].Small,2019,15(25):1901503.

[83] 董旭晟,赵瑞正,孙彬,等.MXenes的表面改性及其在碱金属离子电池中应用的研究进展[J].功能材料,2020,51(9):9031-9044.
DONG X S,ZHAO R Z,SUN B,et al.Research progresses on surface modifications and applications of MXenes-based nanocomposites in alkali metal ion batteries[J].Journal of Functional Materials,2020,51(9):9031-9044.

[84] PERERA A A P R,MADHUSHANI K A U,PUNCHIHEWA B T,et al.MXene-based nanomaterials for multifunctional applications[J].Materials,2023,16(3):1138.

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

[86] 耿琬琪,杨硕,曲鸿宵,等.MXene的制备及应用研究进展[J].科技与创新,2023(7):47-49.
GENG W Q,YANG S,QU H X,et al.Research progress in preparation and application of MXene[J].Science and Technology & Innovation,2023(7):47-49.

[87] GUL I,SAYED M,SAEED T,et al.Unveiling cutting-edge progress in the fundamentals of MXene:synthesis strategies,energy and bio-environmental applications[J].Coordination Chemistry Reviews,2024,511:215870.

[88] ZHU M Y,LU C C,LIU L R.Progress and challenges of emerging MXene based materials for thermoelectric applications[J].iScience,2023,26(5):106718.

[89] FEI L,LEI L,XU H,et al.Ion transport behaviors in MXenes for electrochemical energy storage and conversion[J].Carbon Energy,2025,7(3):e678.

[90] AWAN H T A,KUMAR L,WONG W P,et al.Recent progress and challenges in MXene-based phase change material for solar and thermal energy applications[J].Energies,2023,16(4):1977.

[91] PROTYAI M I H,BIN RASHID A.A comprehensive overview of recent progress in MXene-based polymer composites:their fabrication processes,advanced applications,and prospects[J].Heliyon,2024,10(17):e37030.

[92] HASSAN T,PARK C,NAQVI S M,et al.MXenes for infrared thermal management[J].ACS Nano,2025,19(48):40703-40732.

[93] ZUO X W,FAN T T,QU L J,et al.Smart multi-responsive aramid aerogel fiber enabled self-powered fabrics[J].Nano Energy,2022,101:107559.

[94] ZHANG Y X,LI L,CAO Y X,et al.High-strength,low infrared-emission nonmetallic films for highly efficient Joule/solar heating,electromagnetic interference shielding and thermal camouflage[J].

Materials Horizons, 2023, 10(1): 235-247.
[95] OMANA L, CHANDRAN A, JOHN R E, et al. Recent advances in polymer nanocomposites for electromagnetic interference shielding: a review[J]. ACS Omega, 2022, 7(30): 25921-25947.
[96] KHAN M U, DU L J, FU S, et al. Preparations and applications of MXene-metal composites: a review [J]. Coatings, 2022, 12(4): 516.
[97] GIMÉNEZ R, SERRANO B, SAN-MIGUEL V, et al. Recent advances in MXene/epoxy composites: trends and prospects [J]. Polymers, 2022, 14(6): 1170.
[98] JIAN L. The influence of MXenes on the mechanical, antistatic, and heat-resistant properties of CF/PI composites [J]. Materials Science-Poland, 2021, 39(4): 507-516.
[99] ZOU Y T, FANG L, CHEN T Q, et al. Near-infrared light and solar light activated self-healing epoxy coating having enhanced properties using MXene flakes as multifunctional fillers [J]. Polymers, 2018, 10(5): 474.
[100] SAHARUDIN M S, AYUB A, HASBI S, et al. Recent advances in MXene composites research, applications and opportunities [J]. Materials Today: Proceedings, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.02.435.
[101] WOZNIAK J, JASTRZĘBSKA A, OLSZYNA A. Challenges and opportunities in tailoring MAX phases as a starting materials for MXenes development [J]. Materials Technology, 2022, 37(11): 1639-1650.
[102] PERSSON P O Å, ROSEN J. Current state of the art on tailoring the MXene composition, structure, and surface chemistry [J]. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2019, 23(6): 100774.
[103] 刘超,李茜,郝丽芬,等.MXene的功能化改性及其应用研究进展[J].复合材料学报,2021,38(4):1020-1028.
LIU C, LI Q, HAO L F, et al. Research progress of functional modification of MXene and its applications [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(4): 1020-1028.
[104] WORKU A K, ALEMU M A, AYELE D W, et al. Recent advances in MXene-based materials for high-performance metal-air batteries [J]. Green Chemistry Letters and Reviews, 2024, 17(1): 2325983.
[105] WANG X Y, KOIRALA S, XU L Y, et al. Advancements in emerging MXene-integrated nanocomposite coatings: unraveling defect-free microstructure for superior tribological, mechanical, and anti-aging features [J]. Progress in Organic Coatings, 2024, 188: 108206.
[106] IRFAN M S, ALI M A, KHAN T, et al. MXene and graphene coated multifunctional fiber reinforced aerospace composites with sensing and EMI shielding abilities [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2023, 165: 107351.
[107] RAMACHANDRAN T, MOURAD A I, ELSAYED M S A. Nb_2CT_x-based MXenes most recent developments: from principles to new applications [J]. Energies, 2023, 16(8): 3520.
[108] HOU T Q, ZHAO Y S, DING L J, et al. Layered ultralightweight MXene based composite films for current conduction [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2022, 161: 107114.
[109] 王敬枫,康辉,成中军,等. $Ti_3C_2T_x$ MXene基电磁屏蔽材料的研究进展[J].材料工程,2021,49(6):14-25.
WANG J F, KANG H, CHENG Z J, et al. Research progress in $Ti_3C_2T_x$ MXene-based electromagnetic interference shielding material [J]. Journal of Materials Engineering, 2021, 49(6): 14-25.
[110] PATIL S A, MARICHEV K O, PATIL S A, et al. Advances in the synthesis and applications of 2D MXene-metal nanomaterials [J]. Surfaces and Interfaces, 2023, 38: 102873.
[111] XIN W, XI G Q, CAO W T, et al. Lightweight and flexible MXene/CNF/silver composite membranes with a brick-like structure and high-performance electromagnetic-interference shielding [J]. RSC Advances, 2019, 9(51): 29636-29644.
[112] ZAREPOUR A, RAFATI N, KHOSRAVI A, et al. MXene-based composites in smart wound healing and dressings [J]. Nanoscale Advances, 2024, 6(14): 3513-3532.
[113] ZAZOUM B, BACHRI A, NAYFEH J. Functional 2D MXene inks for wearable electronics [J]. Materials, 2021, 14(21): 6603.
[114] ALHAJRI F, FADLALLAH M M, ALKHALDI A, et al. Hybrid MXene-graphene/hexagonal boron nitride structures: electronic and molecular adsorption properties [J]. Nanomaterials, 2022, 12(16): 2739.
[115] JEONG I, HAN D Y, HWANG J, et al. Foldable batteries: from materials to devices [J]. Nanoscale Advances, 2022, 4(6): 1494-1516.
[116] KHAZAEI M, RANJBAR A, ARAI M, et al. Electronic properties and applications of MXenes: a theoretical review [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2017, 5(10): 2488-2503.
[117] TAN K H, ABU ZAED M, SAIDUR R, et al. Strategic insights for bulk production of MXene: a review [J]. E3S Web of Conferences, 2024, 488: 01003.
[118] KANG H L, HAN L S, CHEN S L, et al. Research progress on two-dimensional layered MXene/elastomer nanocomposites [J]. Polymers, 2022, 14(19): 4094.
[119] MIM M, HABIB K, FARABI S N, et al. MXene: a roadmap to sustainable energy management, synthesis routes, stabilization, and economic assessment [J]. ACS Omega, 2024, 9: 32350-32393.
[120] LIU N, LI Q Q, WAN H J, et al. High-temperature stability in air of $Ti_3C_2T_x$ MXene-based composite with extracted bentonite [J]. Nature Communications, 2022, 13: 5551.

基金项目:航空科学基金项目(2022Z043025001);制造院基金项目(KS522505)
收稿日期:2025-12-01;**录用日期**:2026-01-05
通讯作者:程铭(1995—),男,高级工程师,博士研究生,研究方向为航空材料、腐蚀防护,联系地址:北京市朝阳区朝阳路1号中国航空制造技术研究院(100024),E-mail:aviccm@126.com

(本文责编:张宝玲)