引用格式：赵禹，张潇，姚超凡，等.MXenes材料在生物医学应用中的研究进展[J].材料工程，2026，54(9)：1-10.
ZHAO Yu，ZHANG Xiao，YAO Chaofan，et al.Research progress in MXenes materials for biomedical applications[J].Journal of Materials Engineering，2026，54(9)：1-10.

MXenes材料在生物医学应用中的研究进展

赵　禹[1]，张　潇[1]，姚超凡[1]，栗洪彬[2*]，程　凤[1*]
（1 哈尔滨工业大学 化工与化学学院 先进无机纤维与复合材料全国重点实验室，哈尔滨 150001；
2 齐齐哈尔大学 轻工与纺织学院，黑龙江 齐齐哈尔 161006）

摘要：MXenes，通式为$M_{n+1}X_nT_x$，是一种由过渡金属、氮或碳化合物组成的二维纳米材料。由于其表面丰富的功能团给予其优异的理化性质和生物学性质，MXenes已被广泛应用于生物传感、肿瘤治疗、示踪成像等生物领域。MXenes具有良好的抗菌活性和一定的活性氧清除能力，这些生物学特性与伤口敷料所需的性能高度一致，使得MXenes成为近年来伤口敷料改性的热门材料。本文详细介绍了MXenes的结构、性能及其制备方法，综述MXenes及其复合材料在创面修复、骨缺损修复和肌肉修复领域中的最新研究进展。

关键词：MXenes；创面修复；抗菌性；导电性；生物相容性
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2024.000091　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2024.000091
中图分类号：TB34　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)09-0001-10

Research progress in MXenes materials for biomedical applications

ZHAO Yu[1]，ZHANG Xiao[1]，YAO Chaofan[1]，LI Hongbin[2*]，CHENG Feng[1*]
（1 State Key Laboratory of Advanced Inorganic Fibers and Composites，School of Chemical Engineering and Chemistry，Harbin Institute of Technology，Harbin 150001，China；2 College of Light Industry and Textile，Qiqihar University，Qiqihar 161006，Heilongjiang，China）

Abstract：MXenes，with the general formula $M_{n+1}X_nT_x$，are a novel class 2D nanomaterials composed of transition metallic compounds with nitrogen or carbon. Due to the rich functional groups on its surface，MXenes have been widely used in biosensing，tumor therapy，tracer imaging，and other biological fields. MXenes exhibit strong antibacterial activity and certain active oxygen-scavenging ability，and these biological characteristics closely align with the required properties of wound dressings，making MXenes a popular material for wound dressing modification in recent years. In this review，the structure，properties，and preparation methods of MXenes are introduced in detail，and the latest research progress of MXenes and their composites in the field of wound repair，bone defect repair，and muscle repair are reviewed.

Key words：MXenes；wound repair；antibacterial property；electrical conductivity；biocompatibility

创面修复是一个复杂的过程，涉及多种免疫细胞、非免疫细胞、细胞因子、生长因子和细胞外基质等[1]。正常的创面修复过程可分为：止血、炎症、增殖、重塑，尽管这些阶段是相互关联的，但它们具有不同的过程。创面修复的第一阶段是止血和炎症，在组织损伤后会立即发生，在这个过程中，炎症通路被激活，免疫系统除去失活组织防止感染，免疫系统还会激活、促进凝血，以防止持续的液体流失[2]。与此同时，凝血过程中形成的纤维蛋白凝块可以作为屏障，防止外来细菌通过皮肤损伤侵入人体，大多数传统的伤口敷料解决了皮肤修复的第一阶段。创面修复的第二阶段是增殖[3]，该过程发生在组织损伤后2～10天，涉及血管生成、肉芽组织形成和细胞外基质(ECM)成分的合成。在这个阶段，血管内皮生长因子(VEGFA)和成纤维细胞生长因子(FGF2/bFGF)等细胞因子在伤口中大量分泌，促进创面修复。此外，在第二阶段，

成纤维细胞和肌成纤维细胞产生细胞外基质，以胶原蛋白的形式出现，最终形成成熟的疤痕。伤口修复的第三阶段是重塑。这个阶段发生在初次受伤后2～3周，持续约一年或更长时间[4]。在这个阶段，大多数巨噬细胞和肌成纤维细胞会逐渐凋亡，同时，细胞外基质逐渐从Ⅲ型胶原骨架向Ⅰ型胶原骨架转化[5]。

抗生素被认为是预防和治疗伤口感染的有效手段。但由于过度使用抗生素导致细菌突变及抗生素耐药细菌的产生，使开发新的抗菌化合物成为必要。MXenes在生物医药方面表现出优异的性能，这与其独特的结构组成有关，包括多种元素组成、2D层状结构、大表面积、丰富的表面端接等[6-7]，具有高导电性、抗菌性、大表面积、丰富的表面化学性质、优异的近红外（NIR）响应性、生物相容性和优异的光学性能等特点。由于这些特性，MXenes及其衍生物已广泛应用于储能、光催化、传感器、药物递送、组织工程创面修复、骨移植/再生、生物传感等领域[8]。

MXenes具有高表面积和易表面功能化特点[9]，因此具有抗菌应用前景。因其高膜渗透性、生物相容性和多种抗菌活性等优点，纳米颗粒通常不会引起细菌耐药性[10]。合成的MXenes具有表面端基，如—OH、—O或—F，赋予材料高亲水性、丰富的表面化学性质，有利于进一步加工[11]，MXenes表面修饰会提高其体内有效性，使其毒性降低，稳定性提高，体内循环延长[12]，有利于在生物医药方面的应用。

本文系统阐述了MXenes独特的二维层状晶体结构、优异的理化与生物学特性及其主流制备技术，重点梳理了MXenes及其复合功能材料在抗菌抗感染、抗氧化抗炎、导电促再生、光热协同治疗等方面的最新进展；聚焦创面修复、骨缺损再生与骨骼肌修复三大应用场景，深入剖析了材料组成、结构设计与修复性能之间的构效关系，归纳了当前研究面临的瓶颈与挑战，并展望了绿色可控制备、智能响应复合体系及临床转化的发展方向，旨在为MXenes基生物医用材料的设计开发与临床应用提供理论参考与研究思路。

1 MXenes的特征

1.1 MXenes的结构

MXenes是由过渡金属碳化物和氮化物构成的材料[13-14]，这些化合物可以用通式$M_{n+1}X_n$计算，其中M表示过渡金属[15]（例如Sc、Ti、Cr等），X是碳或氮[5]。MXenes是通过选择性蚀刻MAX相中的“A”金属元素得到[16]。MAX相是一组具有分层六角结构的三元碳化物和氮化物，其一般公式为$M_{n+1}AX_n$，其中M代表过渡金属元素（包括Ti、Nb、Cr、Mo等），A是A族元素（主要是周期表中的ⅢA和ⅣA族元素），X代表C或N元素，n=1，2，3。当A元素被蚀刻掉时，n+1层M与n层X交错排列，因此MXenes的一般公式为$M_{n+1}X_nT_x$，在其中T_x表示MXenes的表面末端基团，如—O、—OH、—F、—Cl等[17]。MXenes具有独特的物理化学性质，（1）MXenes表面带有亲水性官能团（—OH、—O等），这使其相较于其他疏水纳米颗粒而言具备优势，因为无需进行复杂的表面改性[18]；（2）MXenes具有抗菌性[16,19]；（3）MXenes具有优异的生物相容性[20]。MXenes存在多种形式，如Ti_3C_2、Ti_2C、Nb_2C、Ti_3CN、Ta_4C_3、MoN、Sc_2C等[21]，更多的工作致力于研发各种结构和功能的MXenes复合材料[22]。

1.2 MXenes的性能

1.2.1 抗菌性

$Ti_3C_2T_x$对革兰氏阴性大肠杆菌和革兰氏阳性枯草芽孢杆菌的抗菌效果高于氧化石墨烯。SEM和TEM观察表明，在没有$Ti_3C_2T_x$的情况下，培养的大肠杆菌中没有观察到细胞损伤或死亡[23]。但是当存在$Ti_3C_2T_x$时，在大多数细菌培养物中可以看到不同程度的细胞损伤。同时还发现随着$Ti_3C_2T_x$浓度的升高，两种细菌的乳酸脱氢酶（LDH）释放增加，菌落数减少[23]。Arabi Shamsabadi等[24]研究了4种尺寸的MXenes纳米片对大肠杆菌的抗菌性能。在3 h内发现细菌DNA泄漏和细菌细胞分散。Jastrzębska等[25]系统研究了Ti_2C和Ti_3C_2的原子结构与其抗菌性能之间的关系。研究可知，在表面化学方面，Ti_2C和Ti_3C_2之间没有差异。然而，Ti_2C不影响细菌存活，而Ti_3C_2表现出抗菌性能。除了对常见细菌的抑制作用外，还发现MXenes对真菌具有抑制作用，Lim等[26]重点研究了$Ti_3C_2T_x$的抗真菌特性，使用倒置对比显微镜观察到在不含$Ti_3C_2T_x$的对照组中发现大量菌丝体和孢子，采用分层的$Ti_3C_2T_x$（d-$Ti_3C_2T_x$）处理的实验组中观察到真菌生长抑制，d-$Ti_3C_2T_x$纳米片通过破坏真菌半球结构实现了对真菌的生长抑制。上述实验结果均表明，MXenes材料具有良好的抗菌性能[27]。表1[23-26]总结了上述材料的抗菌性能。

1.2.2 生物相容性

生物相容性是评估材料生物医学用途的关键参数[5]。表面改性可通过调控MXenes的比表面积来优化其性能[28]。因此，许多研究利用聚合物材料、生物分子或其他各种物质表面化学修饰提高生物相容性[29]。Zhu等[30]通过冷冻干燥方法制备了具有良好孔隙率和连通性的MXene/竹纤维素纤维（BCF）（MB），通过将MB泡沫直接嵌入聚二甲基硅氧烷（PDMS）弹

表 1　MXenes的抗菌性能

Table 1　Antibacterial properties of MXenes

MXene	Experimental method	Result	Ref.
$Ti_3C_2T_x$	Bacterial cell injury was observed	Lactate dehydrogenase release and reduced colony number	[23]
$Ti_3C_2T_x$	Avoid light and observe bacteria	Bacterial DNA leakage and bacterial cell dispersion	[24]
Ti_2C, Ti_3C_2	The atomic structure and antibacterial activity were observed	Ti_2C MXene did not affect bacterial survival, and Ti_3C_2 MXene showed antimicrobial properties	[25]
d-$Ti_3C_2T_x$	The growth of fungi was observed	Fungal growth inhibition was observed in the d-$Ti_3C_2T_x$ group	[26]

性体中获得MB基压阻复合材料(PMB),与传统的传感器相比,PMB压力传感器具有良好的生物相容性。Nasrallah等[31]使用斑马鱼胚胎模型来评估$Ti_3C_2T_x$纳米片的体内毒性,研究发现50 μg/mL剂量的$Ti_3C_2T_x$纳米片不会影响斑马鱼胚胎的神经元或肌肉活动。Zhang等[32]将MXenes膜植入大鼠皮下和钙质缺损部位,并对样品分析,结果表明,MXenes膜未引起毒副作用。

1.2.3　导电性

MXenes的电导率主要取决于其组成成分。诸如Nb_2C、Nb_2CF_2等组分是金属材料,其在表面改性后表现出半导体性质,并且表现出导电性,Ti_3C_2层的结构也类似于半金属结构,其低电阻率对于生物医学应用来说是一个很大的优势。MXenes是酶、抗体、核酸适体等生物分子构建电化学生物传感器的理想载体[33],具有与多层石墨烯分子相当的电导率(2×10^5 S/m)[34]。MXenes因其优异的抗菌性、生物相容性和导电性等被认为是生物医药方面良好的材料[35-37]。

1.2.4　光热性能

现有研究发现Ti_3C_2暴露于1次太阳辐射(1 kW/m^2)时具有100%光热转换效率和84%光水蒸发效率,这表明MXenes是一种有前途的太阳能光热材料[38]。该研究还证实,Ti_3C_2纳米片在近红外激光照射下表现出高的近红外吸收和光热转换效率。除了Ti_3C_2之外,其他MXenes材料也具有类似的特性,横向纳米尺寸的Nb_2C NSs表现出极高的光热转换效率(NIR-Ⅰ为36.4%,NIR-Ⅱ为45.65%)[39]。而Ta_4C_3纳米片被发现具有优异的光热转换性能(效率η为44.7%)[40]。上述研究表明,MXenes材料具有优异的光热性能,是一种具有应用前景的新型光热剂。

1.2.5　活性氧与炎症反应的调节

MXenes含有大量的离域电子,可以实现电子的快速传导。同时,MXenes表面丰富的官能团也可以与活性氧(reactive oxygen species,ROS)发生反应,在活性氧清除方面具有良好的应用前景[41]。将MXenes添加到皮肤伤口敷料中可以提高材料对活性氧的整体清除能力。Chen等[42]构建了具有抗氧化和抗菌活性的Nb_2C水凝胶。这种水凝胶中的Nb_2C可以有效去除活性氧,减少细胞的氧化损伤。同时,在NIR照射下的水凝胶也具有良好的抗菌性能。Ren等[43]将纳米片Ti_3C_2嵌入温度敏感的细胞外基质水凝胶中以制备抗氧化剂/导电水凝胶(E-MXene)。研究发现,在小鼠MI区域注射E-MXene可以减少MI的ROS产生和心肌细胞凋亡。

2　MXenes的制备

MXenes的合成可分为自上而下合成法和自下而上合成法。MAX相自上而下合成是应用最广泛的一种方法。自上而下合成方法包括2个步骤:MAX相的蚀刻和MXenes的分层[16]。MAX相的蚀刻是通过用氢氟酸(HF)或含HF的蚀刻剂对MAX相进行湿法化学蚀刻或原位形成HF来合成MXenes的过程。由于较强的金属*M*—*A*键,MXenes很难通过MAX相的机械剥离获得[44],*M*—*A*键比*M*—*X*键更具有化学反应性,可以通过各种蚀刻剂选择性地蚀刻"*A*"层。通过采用浓HF蚀刻Ti_3AlC_2,成功获得了MXenes家族的第一个成员(Ti_3C_2)[45]。通过将MAX相浸泡在特定酸中并破坏*M*—*A*键,将MXenes与MAX相分离[46],在此过程中,需要一定的时间和充分搅拌。虽然HF蚀刻被广泛用于制备MXenes,但残留的HF阻碍了其在生物医学领域中的应用。研究用较温和的氟化氢蚀刻剂(例如NH_4HF_2、$NaHF_2$、KHF_2)来蚀刻MAX相,Li等[47]研发了一种通过在高温下用后过渡元素原子取代"*A*"的可行路线。由于含氟废液处理困难,近年来化学法无氟处理受到关注,Xuan等[48]开发了一种更温和的方法,使用四甲基氢氧化铵(TMAOH)作为蚀刻剂。Al层可以被TMAOH蚀刻。这些绿色合成方法避免了使用危险和高腐蚀性的酸[33]。

自下而上的方法(如CVD法)已被应用于合成MAX相以及高质量的MXenes[18],有望制备大面积和高质量的MXenes[49],该技术在1085 ℃或更高的温度

下使用甲烷和铜/钼箔，可以获得具有较少缺陷的高质量、薄且大的纳米片。同时，CVD方法也可以用于合成MXenes基异质结构，大面积2D Mo_2C在石墨烯纳米片上原位生长，形成新型Mo_2C/石墨烯垂直异质结构。除了CVD方法之外，还可以通过盐模板法来合成2D过渡金属氮化物[50-51]，如V_2N、W_2N、Mn_3N_2等，在具有相似六边形金属晶格的基底上原位原子层生长TiC来制备新型2D过渡金属碳化物（Ti_4C_3和Ti_5C_4）。然而，由于表面缺乏功能基团，且这种自下而上的方法难以渗透到细胞中，因此被认为不适合大规模的生物医学应用。但研究MXenes的内在性质，精确控制其表面末端官能团是必不可少的。因此，开发自下而上的合成方法以获得具有预定特性的MXenes非常具有研究价值[18]。

表2[18,24,52-56]总结了MXenes材料的各种制备方法，选择适当的合成方法对于产物的物理化学性质具有重要影响[5]。

表2 MXenes合成的常用蚀刻方法及条件

Table 2 Common etching methods and conditions for MXenes synthesis

Material type	Preparation method	Resulting product	Ref.
Ti_3AlC_2	5%(mass fraction)HF，24 h，25 ℃ 10%HF，18 h，25 ℃ 30%HF，5 h，25 ℃	$Ti_3C_2T_x$	[18,52-53]
Ti_3AlC_2	NH_4Cl+HCl	$Ti_3C_2T_x$	[54]
Ti_3AlC_2	Sonication（mass ratio LiF：Ti_3AlC_2=5∶1） No sonication（mass ratio LiF：Ti_3AlC_2=7.5∶1）	$Ti_3C_2T_x$	[55-56]
Ti_3AlC_2	1 mol/L NH_4HF_2，60 ℃，8 h	$Ti_3C_2T_x$	[24]
Ti_3AlC_2	5 mol/L LiF+6 mol/L HCl 12 mol/L LiF+9 mol/L HCl	$Ti_3C_2T_x$	[52]

3 MXenes在创面修复中的应用

3.1 创面修复

随着社会的快速发展，生活中因创伤、疾病等因素引起的皮肤损伤发生率越来越高[57]。皮肤是人体重要的保护器官，保持其完整性可以为身体提供物理屏障，防止外来有害物质的入侵，减少水和电解质的流失，保持内环境的稳定[58]。创面敷料可以保护创面，减少外界因素和刺激对创面的影响。研究发现，MXenes具有良好的抗菌活性和一定的活性氧清除能力[59]。这些生物学特性与伤口敷料所需的性能高度一致，使得MXenes成为近年来皮肤伤口敷料改性的热门材料[60]。

Liu等[61]开发了含有$Ti_3C_2T_x$ MXene、PANI、PVA的抗菌水凝胶，如图1(a)所示。MXenes增强PVA分子之间的氢键，并提供近红外(NIR)照明的抗菌能力，PVA/MXene/PANI(PMP)水凝胶具有优异的抗菌能力，如图1(b)所示，与其他物质相比，PMP能更好促进创面修复。Kang等[62]在紫外线照射下制备了季铵改性的壳聚糖和负载有MXene@TA/Fe纳米片的多功能水凝胶(SBMA)，用于烧伤伤口修复。由于SBMA显示出较强的水合能力，水凝胶呈现出良好的性能。此外，MXenes的高导电性促进了电子传递，加速了Fe^{2+}与Fe^{3+}的相互转化，从而赋予了水凝胶酶活性，达到杀菌作用。体内实验证明，该水凝胶可促进创面肉芽组织再生、上皮层形成和胶原沉积。由各种材料制备的复合支架系统也已用于皮肤敷料研究，Zhou等[63]采用聚(甘油-乙烯亚胺)、$Ti_3C_2T_x$ MXene@PDA纳米片和氧化透明质酸(HCHO)反应制备HPEM支架。HPEM支架能够促进细胞增殖和血管生成，加速MRSA感染创面愈合(创面修复率为96.31%)。如图1(c)所示，HPEM支架有良好的抗菌能力，同时，也具有良好的止血能力(图1(d))，MXenes表现出优异的生物相容性，并且由于其主要元素是C和N和过渡金属，可以从小鼠体内降解和清除。

除抗菌和促进细胞增殖特性之外，止血也是新型伤口敷料的重要特性，Li等[64]将具有不同形貌的MXenes基纳米材料(手风琴形、插层、单层、负载金纳米颗粒(AuNPs)的单层)引入到甲壳素海绵(CH)中，制备甲壳素/MXene复合海绵，添加MXenes基纳米材料后，改善了复合海绵的亲血性，加快了血液凝固，使其止血效果显著增强。如图1(e)所示，评价伤口的愈合过程用H&E染色和Masson染色，结果表明加入MXenes后更有利于皮肤组织再生。

静电纺丝纳米纤维膜具有三维网络结构，由于其能够维持伤口部位的吸湿平衡，促进伤口愈合，有望成为一种有前景的伤口愈合材料。Xu等[65]将阿莫西林(AMX)、MXenes和PVA混合并电纺成抗菌纳米纤维膜，用于制备伤口敷料。在复合纳米纤维膜中，PVA基质可以控制AMX的释放以防止细菌感染，而MXenes可以将近红外激光转化为热量，使得局部高热促进AMX释放。同时，局部高温也可以协同促进细菌灭活。在感染的小鼠皮肤缺损模型中系统地验证了复合抗菌膜的抗菌活性和伤口愈合能力。研究发现光热疗法也可以用于促进创面修复，Zhang等[66]

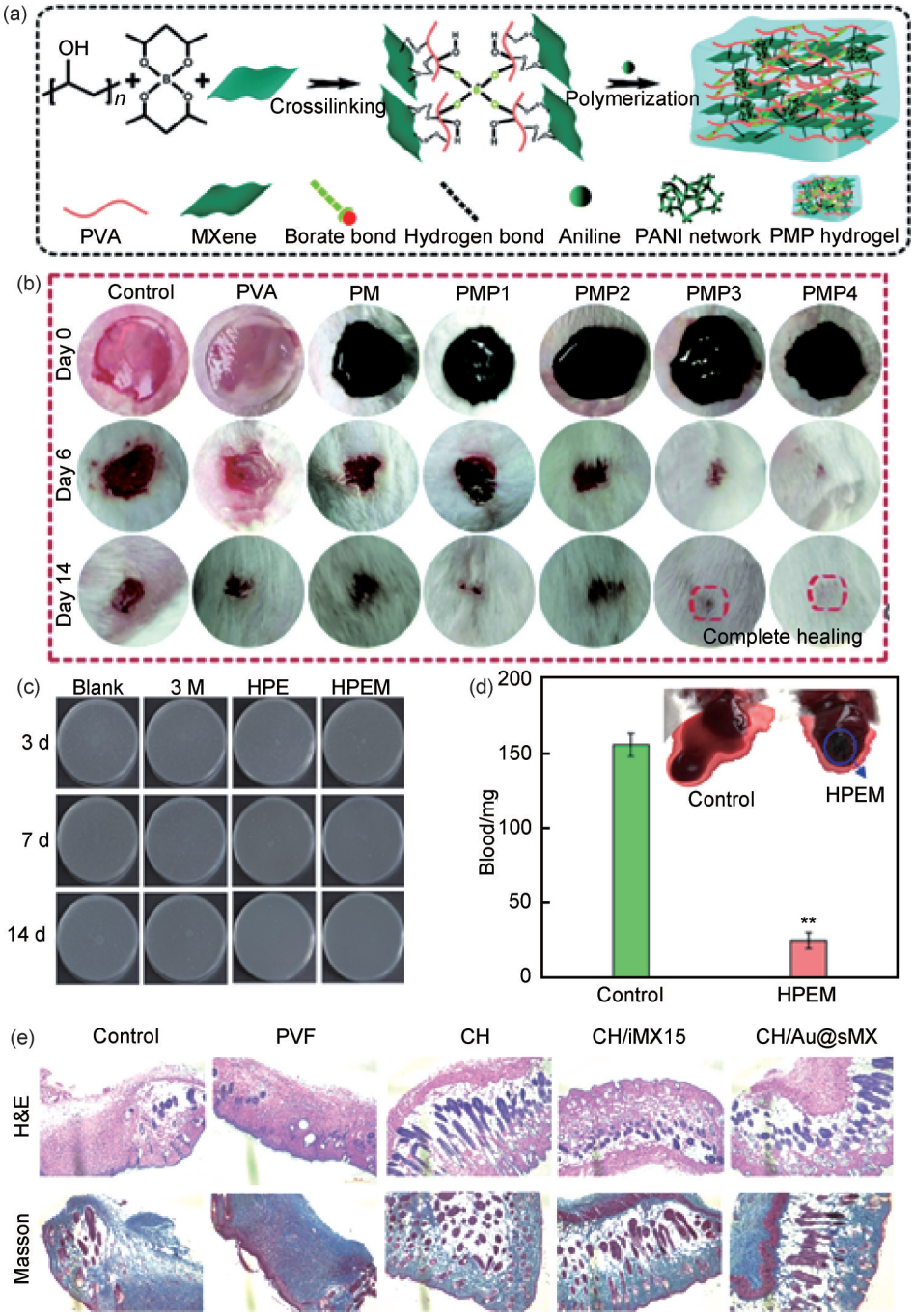

图1　MXenes在皮肤创面修复的应用

(a)PMP水凝胶的制备[61]；(b)未处理的伤口和在第0、6、14天用不同水凝胶处理的伤口的照片[61]；(c)经3、7、14天的不同处理后，均质感染组织在琼脂板上生长的MRSA菌落图像[63]；(d)用HPEM支架和对照处理60 s后受损肝脏的总失血量和图像[63]；(e)各组第13天时伤口切片的H&E染色和Masson染色图像[64]

Fig.1　Application of MXenes in skin wound repair

(a)fabrication of PMP hydrogels[61]; (b)photographs of untreated wounds and wounds treated with different hydrogels after 0, 6, 14 days[61]; (c)images of MRSA colonies growing on the agar plates derived from the homogenized infected tissues with various treatments after 3, 7, 14 days[63]; (d)total blood loss and photographs from the damaged livers after 60 s treatment with HPEM scaffolds and the control[63]; (e)H&E staining and Masson staining images of the wound section at the 13th day for each group, respectively[64]

制备了碳化钛/石咪唑骨架-8(ZIF-8)/PLA复合膜(MZ-8/PLA)，利用光热疗法的思想，通过原位生长ZIF-8并在MXenes上进行静电纺丝，抑菌性能研究表明，MZ-8/PLA对大肠杆菌的抑菌率达99.0%以上，MZ-8/PLA的快速可控灭菌能力与传统电纺膜相比具有显著优势，有利于创面修复。

3.2　骨缺损修复

骨缺损作为临床常见的骨科疾病，对身体有巨大

伤害[67]。骨骼本身具有一定的再生能力，但超过临界尺寸阈值的骨缺损难以自然愈合[68]，因此通过临床干预加速骨缺损修复和骨组织再生非常重要[69]。自体骨移植是骨修复治疗的金标准，但其缺乏来源或可能有并发症限制大规模应用。异种移植物在植入后存在修复失败的风险，例如炎症和排斥[70]。因此，应用生物材料支架植入骨缺损区促进骨缺损修复和骨组织再生已成为骨缺损治疗的主要手段。最近，MXenes成为生物材料设计的热门[71]。

从MXenes本身的二维片状结构出发，首先探索了MXenes膜等二维材料对骨再生和成骨的影响。Qu等[72]制备了多层Ti_3C_2薄膜，通过ERK信号通路调节脂肪源性干细胞（ADSCs）的成骨分化。评估MXenes纳米片的光热性能对成骨分化的影响（图2(a)，(b)），这项工作揭示了MXenes通过光热激活作为骨和软组织再生的有效策略。Fu等[73]通过静电纺丝制备了

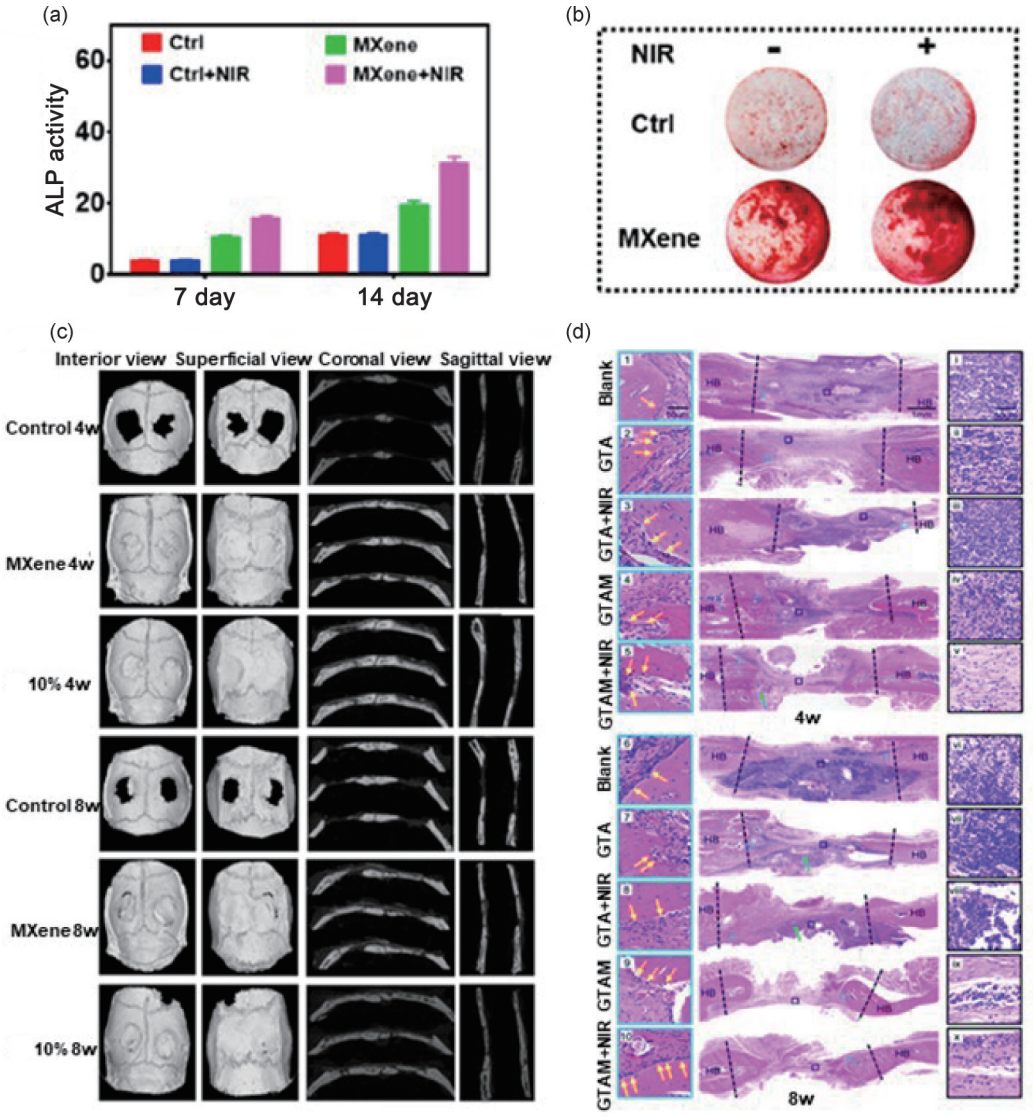

图2 MXenes在骨缺损修复的应用

(a)分别在第7天和第14天通过MXenes和808 nm激光照射进行成骨诱导后的ADSC的ALP活性评价（n=3）[72]；(b)采用不同处理孵育14天后ADSC的茜素红染色测定[72]；(c)骨缺损的三维重建图像，包括内部视图和表面视图，以及相应的显微CT图像，包括冠状面和矢状面视图[74]；(d)支架植入4周和8周后大鼠感染下颌骨的H&E染色（HB：宿主骨，虚线：宿主骨和新生骨之间的边界，绿色箭头：未降解的水凝胶支架，1～10中的黄色箭头：成骨细胞，i～x：炎性细胞）[75]

Fig.2 Application of MXenes in bone defect repair

(a)ALP activity evaluations of ADSCs following osteogenic induction by MXenes and 808 nm laser irradiation at 7 days and 14 days, respectively (n=3)[72]; (b)alizarin red staining assay of ADSCs after incubation with different treatments at 14 days[72]; (c)three-dimensional reconstruction images of bone defect including interior and superficial views and corresponding micro-CT images including coronal and sagittal views[74]; (d)H&E staining of infected mandibles of rats after 4 weeks and 8 weeks of scaffold implantation (HB: host bone; dotted line: boundary between host bone and new-born bone; green arrows: undegraded hydrogel scaffolds; yellow arrows in 1-10: osteoblast, i-x: inflammatory cells)[75]

MXene/聚偏二氟乙烯(MXene/PVDF)纳米复合膜。将 $Ti_3C_2T_x$ MXene 纳米片包裹在 PVDF 壳层中，MXene/PVDF 膜促进细胞黏附、拉伸和生长，表现出良好的生物相容性；同时，它的内在电位促进了成骨细胞的募集，加速了成骨细胞的分化。此外，1%(质量分数)MXene/PVDF 膜在愈合 4 周和 8 周后促进了大鼠颅骨缺损的骨组织形成。Fu 等[74]进一步改性了 MXenes 膜，将不同质量比的超长羟基磷灰石纳米线(UHAPNW)引入材料中，增强了材料的力学性能，如图 2(c)所示，体内实验表明 UHAPNWs/MXene 纳米复合膜在大鼠颅骨缺损中加速了骨组织的形成。除了上述使用 MXenes 膜或静电纺丝对骨缺损和骨修复和再生的研究外，Nie 等[75]通过 3D 打印技术开发了一种具有光热抗菌和成骨能力的 MXenes 复合水凝胶支架 GelMA/β-TCP/海藻酸钠(Sr^{2+})/MXene(Ti_3C_2)(GTAM)。将大鼠骨髓间充质干细胞混合到 GTAM 生物墨水中进行 3D 生物打印，载有细胞的 3D 打印 GTAM 支架显示出生物相容性和骨形成能力，如图 2(d)所示，GTAM 支架具有促进伤口感染愈合和骨再生的作用，并在抗菌和成骨方面发挥协同作用。

3.3　肌肉修复

骨骼肌组织通常具有再生能力[76]。骨骼的肌肉再生是多个步骤的复杂过程。然而，临床治疗也存在一系列缺点，如费用高、部位发病率高、手术时间长、免疫排斥、移植宿主肌肉组织恢复差、调控障碍等[77]。因此，开发有效的骨骼肌组织再生策略具有重要意义。MXenes 由于其抗氧化特性具有促进骨骼肌再生的潜力[76]。

为了探索 MXenes 在肌肉修复的作用，Li 等[76]通过合成 MXenes 薄膜调节 M2 极化和氧化应激促进血管生成和骨骼肌再生，研究表明，MXenes 可通过上调血管相关基因 VEGF 和 ANG 的表达促进骨骼肌修复。这说明 MXenes 可以通过抗炎和抗氧化作用调节细胞的微环境，从而促进肌源性分化和血管生成，使骨骼肌组织再生(图 3(a)，(b))。为了进一步研究 MXenes 在骨骼肌再生方面的应用，Zheng 等[78]制备了

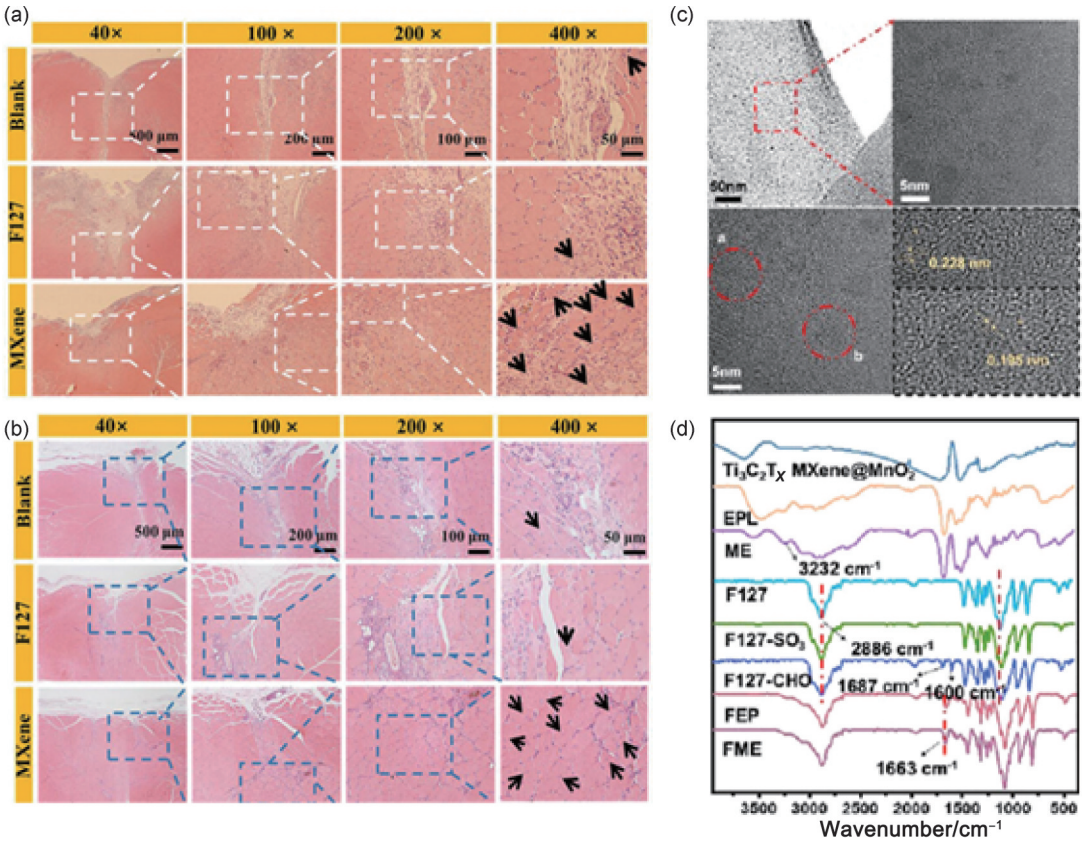

图 3　MXenes 在肌肉修复的应用

(a)骨骼肌缺损 1 周的 H&E 染色图像，其中白色框表示扩大的区域，黑色箭头表示新的肌纤维；(b)骨骼肌缺损 4 周的 H&E 染色图像[76]；(c)$Ti_3C_2T_x$ MXene@MnO_2 纳米复合材料的 TEM 图像和 TEM 图像[78]；(d)前体和 FME 支架的 FT-IR 谱[78]

Fig.3　Application of MXenes in muscle repair

(a)H&E staining images of skeletal muscle defects for 1 week A, with white boxes indicating enlarged areas and black arrows indicating new muscle fibers; (b)H&E staining images of skeletal muscle defects for 4 weeks[76]; (c)TEM images and HRTEM images of the $Ti_3C_2T_x$ MXene@MnO_2 nanocomposite[78]; (d)FT-IR spectra of precursors and the FME scaffold[78]

一种具有导电性和微环境重塑的 2D $Ti_3C_2T_x$ MXene@MnO_2纳米复合材料，并将其用于开发多功能水凝胶（FME）支架，采用扫描电镜和红外光谱表征了支架的结构（图 3(c)，(d)），MXenes 通过增强肌管形成并上调肌球蛋白重链（MHC）蛋白和肌生成基因的表达来促进肌生成分化。

4 结束语

MXenes 凭借独特的二维层状结构、大比表面积及表面丰富的含氧、氟等官能团，展现出优异的抗菌活性、导电性能、近红外光热效应及活性氧清除能力，在近红外光调控下，其抗菌、抗氧化、促修复等功能可进一步增强。表面丰富的活性位点也为材料功能化修饰提供了极大空间，使其在创面修复、骨缺损再生及骨骼肌修复等组织工程领域展现出巨大潜力。将 MXenes 引入伤口敷料、骨支架及肌肉修复材料中，可同步赋予材料抗菌、止血、抗氧化、导电及光热杀菌等多重功能，显著改善修复微环境，加速组织再生与创面愈合，为解决感染、慢性难愈创面及骨/肌肉缺损等临床难题提供了新的材料策略。

面向未来，MXenes 在生物修复领域的发展将围绕绿色化、安全化、精准化、临床化四大核心方向展开。(1)开发高效无氟蚀刻、温和插层等绿色合成技术，实现高纯度、低毒性、尺寸可控的 MXenes 大规模制备，同时通过表面官能团精准修饰与生物分子接枝，进一步提升材料生物相容性与稳定性。(2)深入揭示 MXenes 理化性能与细胞行为、炎症调控、血管生成及胶原重塑的内在关联，构建 pH、ROS、近红外光响应型智能修复材料，实现修复微环境的动态调控与功能按需激活。(3)结合水凝胶、静电纺丝、3D 打印等先进制造技术，设计兼具适宜力学性能、可控降解速率的 MXenes 基复合支架/敷料，实现与皮肤、骨、肌肉等组织的结构与功能匹配，开发载药、载生长因子的多功能递送系统，实现抗菌、抗炎、促再生一体化治疗。(4)建立系统的体内外生物安全性评价体系，全面评估 MXenes 长期毒性、免疫原性及代谢风险，开展大动物模型修复效果与安全性验证，稳步推进 MXenes 基修复材料从实验室走向临床应用。

综上，MXenes 作为一类极具潜力的二维纳米材料，在组织修复领域展现出广阔的应用前景。尽管目前仍面临制备安全、稳定性、功能调控及临床转化等挑战，但随着合成技术、材料设计及生物医学研究的不断深入，这些瓶颈将逐步被攻克。未来，MXenes 基多功能修复材料有望成为生物医用材料领域的重要发展方向，为组织再生与创面修复提供新的理论基础与技术支撑，最终造福广大患者。

参考文献

[1] Ahmad N. *In vitro* and *in vivo* characterization methods for evaluation of modern wound dressings [J]. Pharmaceutics, 2023, 15(1): 42.

[2] Moeini A, Pedram P, Makvandi P, et al. Wound healing and antimicrobial effect of active secondary metabolites in chitosan-based wound dressings: a review [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 233: 115839.

[3] Krishnaswami V, Raju N S, Alagarsamy S, et al. Novel nanocarriers for the treatment of wound healing [J]. Current Pharmaceutical Design, 2020, 26(36): 4591-4600.

[4] Wang P H, Huang B S, Horng H C, et al. Wound healing [J]. Journal of the Chinese Medical Association, 2018, 81(2): 94-101.

[5] Liang C Z, He J, Cao Y, et al. Advances in the application of Mxene nanoparticles in wound healing [J]. Journal of Biological Engineering, 2023, 17: 39.

[6] Seidi F, Arabi Shamsabadi A, Dadashi Firouzjaei M, et al. MXenes antibacterial properties and applications: a review and perspective [J]. Small, 2023, 19(14): 2206716.

[7] Ren C E, Zhao M Q, Makaryan T, et al. Porous two-dimensional transition metal carbide (MXene) flakes for high-performance Li-ion storage [J]. ChemElectroChem, 2016, 3(5): 689-693.

[8] Xu X D, Zhang Y L, Sun H Y, et al. Progress and perspective: MXene and MXene-based nanomaterials for high-performance energy storage devices [J]. Advanced Electronic Materials, 2021, 7(7): 2000967.

[9] Alhabeb M, Maleski K, Mathis T S, et al. Selective etching of silicon from Ti_3SiC_2 (MAX) to obtain 2D titanium carbide (MXene) [M]//MXenes. New York: Jenny Stanford Publishing, 2023: 451-462.

[10] Sivasankarapillai V S, Somakumar A K, Joseph J, et al. Cancer theranostic applications of MXene nanomaterials: recent updates [J]. Nano-Structures & Nano-Objects, 2020, 22: 100457.

[11] Liu X L, Xu F, Li Z Y, et al. Design strategy for MXene and metal chalcogenides/oxides hybrids for supercapacitors, secondary batteries and electro/photocatalysis [J]. Coordination Chemistry Reviews, 2022, 464: 214544.

[12] Xue Y J, Feng J B, Huo S Q, et al. Polyphosphoramide-intercalated MXene for simultaneously enhancing thermal stability, flame retardancy and mechanical properties of polylactide [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 397: 125336.

[13] Zhong Q, Li Y, Zhang G K. Two-dimensional MXene-based and MXene-derived photocatalysts: recent developments and perspectives [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 409: 128099.

[14] Tu S B, Jiang Q, Zhang X X, et al. Large dielectric constant enhancement in MXene percolative polymer composites [J]. ACS Nano, 2018, 12(4): 3369-3377.

[15] Chaudhari N K, Jin H, Kim B, et al. MXene: an emerging two-dimensional material for future energy conversion and storage applications [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2017, 5(47): 24564-24579.

[16] Zhou C, Zhao X H, Xiong Y S, et al. A review of etching methods of MXene and applications of MXene conductive hydrogels [J]. European Polymer Journal, 2022, 167: 111063.

[17] Murali G, Reddy Modigunta J K, Park Y H, et al. A review on MXene synthesis, stability, and photocatalytic applications [J]. ACS Nano, 2022, 16(9): 13370-13429.

[18] Huang K, Li Z J, Lin J, et al. Two-dimensional transition metal carbides and nitrides (MXenes) for biomedical applications [J]. Chemical Society Reviews, 2018, 47(14): 5109-5124.

[19] Seyedin S, Uzun S, Levitt A, et al. MXene composite and coaxial fibers with high stretchability and conductivity for wearable strain sensing textiles [J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30 (12): 1910504.

[20] Lim G P, Soon C F, Ma N L, et al. Cytotoxicity of MXene-based nanomaterials for biomedical applications: a mini review [J]. Environmental Research, 2021, 201: 111592.

[21] Hang G G, Wang X C, Zhang J, et al. Review of MXene nanosheet composites for flexible pressure sensors [J]. ACS Applied Nano Materials, 2022, 5(10): 14191-14208.

[22] Zhang W, Ji X X, Ma M G. Emerging MXene/cellulose composites: design strategies and diverse applications [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 458: 141402.

[23] Rasool K, Helal M, Ali A, et al. Antibacterial activity of $Ti_3C_2T_x$ MXene [J]. ACS Nano, 2016, 10(3): 3674-3684.

[24] Arabi Shamsabadi A, Sharifian Gh M, Anasori B, et al. Antimicrobial mode-of-action of colloidal $Ti_3C_2T_x$ MXene nanosheets [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2018, 6(12): 16586-16596.

[25] Jastrzębska A M, Szuplewska A, Wojciechowski T, et al. *In vitro* studies on cytotoxicity of delaminated Ti_3C_2 MXene [J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 339: 1-8.

[26] Lim G P, Soon C F, Morsin M, et al. Synthesis, characterization and antifungal property of $Ti_3C_2T_x$ MXene nanosheets [J]. Ceramics International, 2020, 46(12): 20306-20312.

[27] Salimiyan rizi K. MXene nanosheets as a novel nanomaterial with antimicrobial applications: a literature review [J]. Journal of Molecular Structure, 2022, 1262: 132958.

[28] Chimene D, Alge D L, Gaharwar A K. Two-dimensional nanomaterials for biomedical applications: emerging trends and future prospects [J]. Advanced Materials, 2015, 27(45): 7261-7284.

[29] Rozmysłowska-Wojciechowska A, Szuplewska A, Wojciechowski T, et al. A simple, low-cost and green method for controlling the cytotoxicity of MXenes [J]. Materials Science and Engineering: C, 2020, 111: 110790.

[30] Zhu W B, Luo H S, Tang Z H, et al. $Ti_3C_2T_x$ MXene/bamboo fiber/PDMS pressure sensor with simultaneous ultrawide linear sensing range, superb environmental stability, and excellent biocompatibility [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2022, 10(11): 3546-3556.

[31] Nasrallah G K, Al-Asmakh M, Rasool K, et al. Ecotoxicological assessment of $Ti_3C_2T_x$ (MXene) using a zebrafish embryo model [J]. Environmental Science: Nano, 2018, 5(4): 1002-1011.

[32] Zhang J B, Fu Y, Mo A C. Multilayered titanium carbide MXene film for guided bone regeneration [J]. International Journal of Nanomedicine, 2019, 14: 10091-10103.

[33] Panda S, Deshmukh K, Khadheer Pasha S K, et al. MXene based emerging materials for supercapacitor applications: recent advances, challenges, and future perspectives [J]. Coordination Chemistry Reviews, 2022, 462: 214518.

[34] Kumar J A, Prakash P, Krithiga T, et al. Methods of synthesis, characteristics, and environmental applications of MXene: a comprehensive review [J]. Chemosphere, 2022, 286: 131607.

[35] Akhter R, Maktedar S S. MXenes: a comprehensive review of synthesis, properties, and progress in supercapacitor applications [J]. Journal of Materiomics, 2023, 9(6): 1196-1241.

[36] Yang G H, Liu F L, Zhao J Y, et al. MXenes-based nanomaterials for biosensing and biomedicine [J]. Coordination Chemistry Reviews, 2023, 479: 215002.

[37] Xiao Y, Guo X Y, Yang N C, et al. Heterostructured MOFs photocatalysts for water splitting to produce hydrogen [J]. Journal of Energy Chemistry, 2021, 58: 508-522.

[38] Lin H, Wang X G, Yu L D, et al. Two-dimensional ultrathin MXene ceramic nanosheets for photothermal conversion [J]. Nano Letters, 2017, 17(1): 384-391.

[39] Lin H, Gao S S, Dai C, et al. A two-dimensional biodegradable niobium carbide (MXene) for photothermal tumor eradication in NIR-Ⅰ and NIR-Ⅱ biowindows [J]. Journal of the American Chemical Society, 2017, 139(45): 16235-16247.

[40] Lin H, Wang Y W, Gao S S, et al. Theranostic 2D tantalum carbide (MXene) [J]. Advanced Materials, 2020, 32(42): 2003085.

[41] Li Y, Fu R Z, Duan Z G, et al. Artificial nonenzymatic antioxidant MXene nanosheet-anchored injectable hydrogel as a mild photothermal-controlled oxygen release platform for diabetic wound healing [J]. ACS Nano, 2022, 16(5): 7486-7502.

[42] Chen J, Liu Y J, Cheng G P, et al. Tailored hydrogel delivering niobium carbide boosts ROS-scavenging and antimicrobial activities for diabetic wound healing [J]. Small, 2022, 18(27): 2201300.

[43] Ren X Y, Xiao M, Xu Y, et al. Injectable MXene conductive hydrogel improves myocardial infarction through scavenging ROS and repairing myocardium electrical integrity [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 481: 148791.

[44] Gao L F, Bao W L, Kuklin A V, et al. Hetero-MXenes: theory, synthesis, and emerging applications [J]. Advanced Materials, 2021, 33(10): 2004129.

[45] 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.

[46] Zhan X X, Si C, Zhou J, et al. MXene and MXene-based composites: synthesis, properties and environment-related applications [J]. Nanoscale Horizons, 2020, 5(2): 235-258.

[47] Li M, Lu J, Luo K, et al. Element replacement approach by reaction with lewis acidic molten salts to synthesize nanolaminated MAX phases and MXenes [J]. Journal of the American Chemical Society, 2019, 141(11): 4730-4737.

[48] Xuan J N, Wang Z Q, Chen Y Y, et al. Organic-base-driven intercalation and delamination for the production of functionalized titanium carbide nanosheets with superior photothermal therapeutic performance [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2016, 55(47): 14569-14574.

[49] Xu C, Wang L B, Liu Z B, et al. Large-area high-quality 2D ultra-

thin Mo_2C superconducting crystals[J].Nature Materials,2015,14(11):1135-1141.
[50] Yang B W, Chen Y, Shi J L. Material chemistry of two-dimensional inorganic nanosheets in cancer theranostics[J].Chem,2018,4(6):1284-1313.
[51] Xiao X, Yu H M, Jin H Y, et al. Salt-templated synthesis of 2D metallic MoN and other nitrides[J]. ACS Nano, 2017, 11(2): 2180-2186.
[52] Chang L B, Xiao X. The review of MXenes for osmotic energy harvesting: synthesis and properties[J].Diamond and Related Materials,2023,136:109971.
[53] Gu Z M, Fu J Z, Lin H, et al.Development of 3D bioprinting: from printing methods to biomedical applications[J]. Asian Journal of Pharmaceutical Sciences,2020,15(5):529-557.
[54] Wei Y, Zhang P, Soomro R A, et al. Advances in the synthesis of 2D MXenes[J].Advanced Materials,2021,33(39):2103148.
[55] Lipatov A, Alhabeb M, Lukatskaya M R, et al. Effect of synthesis on quality, electronic properties and environmental stability of individual monolayer Ti_3C_2 MXene flakes[J]. Advanced Electronic Materials,2016,2(12):1600255.
[56] 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.
[57] LeBlanc K, Langemo D, Woo K, et al. Skin tears: prevention and management[J]. British Journal of Community Nursing, 2019, 24(Sup9):S12-S18.
[58] Solangi N H, Ali Mazari S, Mubarak N M, et al. Recent trends in MXene-based material for biomedical applications[J]. Environmental Research,2023,222:115337.
[59] Wang G, Yang F F, Zhou W Y, et al. The initiation of oxidative stress and therapeutic strategies in wound healing[J].Biomedicine & Pharmacotherapy,2023,157:114004.
[60] Zhang Z Y, Qi Z P, Kong W J, et al. Applications of MXene and its modified materials in skin wound repair[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology,2023,11:1154301.
[61] Liu S D, Li D S, Wang Y, et al. Flexible, high-strength and multifunctional polyvinyl alcohol/MXene/polyaniline hydrogel enhancing skin wound healing[J].Biomaterials Science,2022,10(13):3585-3596.
[62] Kang X R, Li Y, Duan Z G, et al. A Mxene@TA/Fe dual-nanozyme composited antifouling hydrogel for burn wound repair[J].Chemical Engineering Journal,2023,476:146420.
[63] Zhou L, Zheng H, Liu Z X, et al. Conductive antibacterial hemostatic multifunctional scaffolds based on $Ti_3C_2T_x$ MXene nanosheets for promoting multidrug-resistant bacteria-infected wound healing[J].ACS Nano,2021,15(2):2468-2480.
[64] Li S S, Gu B, Li X Y, et al. MXene-enhanced chitin composite sponges with antibacterial and hemostatic activity for wound healing[J].Advanced Healthcare Materials,2022,11(12):2102367.
[65] Xu X, Wang S G, Wu H, et al. A multimodal antimicrobial platform based on MXene for treatment of wound infection[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces,2021,207:111979.
[66] Zhang S Q, Ye J W, Liu X, et al. Titanium carbide/zeolite imidazole framework-8/polylactic acid electrospun membrane for near-infrared regulated photothermal/photodynamic therapy of drug-resistant bacterial infections[J]. Journal of Colloid and Interface Science,2021,599:390-403.
[67] Xue N N, Ding X F, Huang R Z, et al. Bone tissue engineering in the treatment of bone defects[J]. Pharmaceuticals, 2022, 15(7):879.
[68] Li Y, Chen S K, Li L, et al. Bone defect animal models for testing efficacy of bone substitute biomaterials[J]. Journal of Orthopaedic Translation,2015,3(3):95-104.
[69] Erika R, DeBaun Malcolm R, Adam D G, et al. Treatment of critical-sized bone defects: clinical and tissue engineering perspectives[J]. European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology: Orthopedie Traumatologie,2018,28(3):351-362.
[70] Wubneh A, Tsekoura E K, Ayranci C, et al. Current state of fabrication technologies and materials for bone tissue engineering[J]. Acta Biomaterialia,2018,80:1-30.
[71] Chen X P, Cheng Y P, Wu H. Recent trends in bone defect repair and bone tissue regeneration of the two-dimensional material MXene[J].Ceramics International,2023,49(12):19578-19594.
[72] Qu X Y, Guo Y, Xie C X, et al. Photoactivated MXene nanosheets for integrated bone-soft tissue therapy: effect and potential mechanism[J].ACS Nano,2023,17(8):7229-7240.
[73] Fu Y, Huang S, Feng Z R, et al. MXene-functionalized ferroelectric nanocomposite membranes with modulating surface potential enhance bone regeneration[J].ACS Biomaterials Science & Engineering,2023,9(2):900-917.
[74] Fu Y, Zhang J B, Lin H, et al. 2D titanium carbide (MXene) nanosheets and 1D hydroxyapatite nanowires into free standing nanocomposite membrane: *in vitro* and *in vivo* evaluations for bone regeneration[J]. Materials Science and Engineering: C, 2021,118:111367.
[75] Nie R, Sun Y, Lv H X, et al. 3D printing of MXene composite hydrogel scaffolds for photothermal antibacterial activity and bone regeneration in infected bone defect models[J].Nanoscale,2022,14(22):8112-8129.
[76] Li T, Ma J P, Wang W S, et al. Bioactive MXene promoting angiogenesis and skeletal muscle regeneration through regulating M2 polarization and oxidation stress[J].Advanced Healthcare Materials,2023,12(4):2201862.
[77] Madl C M, Heilshorn S C, Blau H M. Bioengineering strategies to accelerate stem cell therapeutics[J]. Nature, 2018, 557(7705): 335-342.
[78] Zheng H, Cheng F, Guo D, et al. Nanoenzyme-reinforced multifunctional scaffold based on $Ti_3C_2T_x$ MXene nanosheets for promoting structure-functional skeletal muscle regeneration via electroactivity and microenvironment management[J]. Nano Letters, 2023,23(16):7379-7388.

基金项目:黑龙江省优秀青年基金项目(YQ2022B007)
收稿日期:2024-01-29;**录用日期**:2024-03-23
通讯作者:栗洪彬(1987—),男,教授,博士,主要从事纤维基功能复合材料、静电纺丝基生物医用材料以及纤维素基3D打印创伤敷料和器官芯片的研究,联系地址:黑龙江省齐齐哈尔市齐齐哈尔大学轻工与纺织学院(161006),E-mail:lhb987258@163.com;程凤(1990—),女,副教授,博士,主要从事3D打印在器官芯片、创伤敷料等领域的应用及多功能医用敷料的设计、制备与应用研究,联系地址:黑龙江省哈尔滨市南岗区哈尔滨工业大学明德楼(150001),E-mail:feng9004@hit.edu.cn

(本文责编:齐 新)