

MXene 基水凝胶在创面修复领域的应用

何蕊, 李重一, 王瑞瑶, 曾丹, 范代娣

<https://doi.org/10.12307/2025.412>

投稿日期: 2023-12-20

采用日期: 2024-03-13

修回日期: 2024-05-20

在线日期: 2024-06-15

中图分类号:

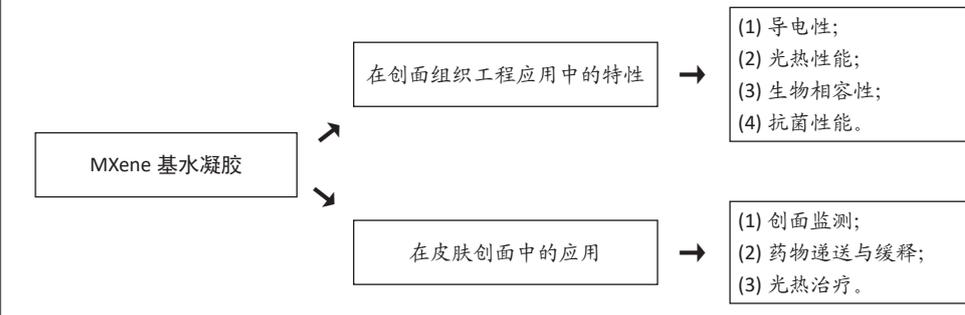
R459.9; R318.08; R-1

文章编号:

2095-4344(2025)16-03486-08

文献标识码: A

文章快速阅读: MXene 基水凝胶在创面修复领域的研究与进展



文题释义:

MXene基水凝胶: MXene是一类具有类石墨烯结构的由过渡金属碳化物、氮化物或者碳氮化物组成的二维纳米材料, 由于具有优异的结构、生物相容性和电学性在生物医药的发展中备受关注。水凝胶是一类柔软灵活且具有3D网络结构的高分子聚合物材料。通过交联等方式将MXene材料与其他物质结合制备的水凝胶为MXene基水凝胶。

创面修复: 创面是正常皮肤(组织)由于外力、化学物质、外科手术等外界因素或者某处血液供应障碍等内在因素作用下所造成的损害, 通常伴随皮肤完整性的破坏以及一定量正常组织的丢失。水凝胶具有吸收渗液、保持创面湿润的独特优势, 利用其本身的修复优势并附加抗菌、抗炎等功效进而促进创面的快速修复。

摘要

背景: MXene基水凝胶是一类纳米复合的多功能性水凝胶材料, 在慢性创面(如糖尿病足、压疮、癌症及外伤性溃疡等)修复领域有广阔的应用前景。

目的: 综述MXene基水凝胶的优势及其在创面修复领域的应用和相关作用机制。

方法: 检索中国知网、维普、PubMed、Science Direct数据库中收录的文章, 文献检索时限为2010年1月至2023年10月, 中文检索关键词为“MXene, 水凝胶, 组织工程应用, 创面修复”, 英文检索关键词为“MXene, Hydrogel, Wound repair”, 最终选取符合标准的70篇文献进行综述。

结果与结论: MXene基水凝胶在创面组织工程应用中具有优异的力学、导电和光热性能及生物相容性和抗菌性等生物学功效, 可以与其他有机物质和无机物质相结合, 在水凝胶中产生更大的治疗作用。含有MXene的水凝胶可以结合创面监测、药物递送和缓释以及光热治疗等方式应用于皮肤创面。尽管MXene基水凝胶复合材料的设计和制备已经取得一些良好进展, 但仍处于基础研究阶段, 缺乏临床验证其功效性和安全性, 具有很大发展潜力和应用空间。

关键词: 纳米功能材料; MXene; 水凝胶; 创面修复; 生物相容性; 创面监测; 药物缓释

Application of MXene-based hydrogels in wound repair

He Rui, Li Chongyi, Wang Ruiyao, Zeng Dan, Fan Daidi

School of Chemical Engineering, Shaanxi Key Laboratory of Degradable Biomedical Materials, Shaanxi R&D Center of Biomaterials and Fermentation Engineering, Northwest University, Xi'an 710127, Shaanxi Province, China

He Rui, School of Chemical Engineering, Shaanxi Key Laboratory of Degradable Biomedical Materials, Shaanxi R&D Center of Biomaterials and Fermentation Engineering, Northwest University, Xi'an 710127, Shaanxi Province, China

Li Chongyi, Master candidate, School of Chemical Engineering, Shaanxi Key Laboratory of Degradable Biomedical Materials, Shaanxi R&D Center of Biomaterials and Fermentation Engineering, Northwest University, Xi'an 710127, Shaanxi Province, China

He Rui and Li Chongyi contributed equally to this article.

Corresponding author: Zeng Dan, Associate professor, Master's supervisor, School of Chemical Engineering, Shaanxi Key Laboratory of Degradable Biomedical Materials, Shaanxi R&D Center of Biomaterials and Fermentation Engineering, Northwest University, Xi'an 710127, Shaanxi Province, China

Corresponding author: Fan Daidi, Professor, Doctoral supervisor, School of Chemical Engineering, Shaanxi Key Laboratory of Degradable Biomedical Materials, Shaanxi R&D Center of Biomaterials and Fermentation Engineering, Northwest University, Xi'an 710127, Shaanxi Province, China

西北大学化工学院, 陕西省可降解生物医用材料重点实验室, 陕西省生物材料与发酵工程技术研究中心, 陕西省西安市 710127

第一作者: 何蕊, 女, 2003年生, 甘肃省天水市人, 汉族, 主要从事组织工程材料的制备研究。

共同第一作者: 李重一, 女, 2000年生, 陕西省延安市人, 汉族, 西北大学在读硕士, 主要从事纳米功能材料在创面组织工程领域的应用研究。

通讯作者: 曾丹, 副教授, 硕士生导师, 西北大学化工学院, 陕西省可降解生物医用材料重点实验室, 陕西省生物材料与发酵工程技术研究中心, 陕西省西安市 710127

通讯作者: 范代娣, 教授, 博士生导师, 西北大学化工学院, 陕西省可降解生物医用材料重点实验室, 陕西省生物材料与发酵工程技术研究中心, 陕西省西安市 710127

<https://orcid.org/0009-0006-8133-8688> (何蕊); <https://orcid.org/0009-0005-5033-0651> (李重一)

基金资助: 科技部国家重点研发计划项目(2019YFA0905200), 项目负责人: 范代娣; 国家自然科学基金青年项目(22108226),

项目负责人: 曾丹; 陕西省自然科学基金基础研究计划青年项目(2021JQ-439), 项目负责人: 曾丹

引用本文: 何蕊, 李重一, 王瑞瑶, 曾丹, 范代娣. MXene 基水凝胶在创面修复领域的应用 [J]. 中国组织工程研究, 2025, 29(16):3486-3493.



Abstract

BACKGROUND: MXene-based hydrogel is a kind of nano-composite multifunctional hydrogel material, which has broad application prospects in the field of chronic wound repair, such as diabetic foot, pressure sore, cancer, and traumatic ulcer.

OBJECTIVE: To review the advantages of MXene-based hydrogels and their application and related action mechanism in wound repair.

METHODS: The articles included in CNKI, VIP, PubMed, and Science Direct databases were searched from January 2010 to October 2023. The key words were "MXene, hydrogel, tissue engineering application, wound repair" in Chinese and "MXene, hydrogel, wound repair" in English. Finally, 70 articles that met the criteria were selected for review.

RESULTS AND CONCLUSION: MXene-based hydrogels have excellent mechanical, electrical, photo-thermal properties, biocompatibility, and antibacterial effects in wound tissue engineering, and can be combined with other organic and inorganic substances to produce greater therapeutic effects in hydrogel. MXene-based hydrogels can be applied to skin wounds in combination with wound monitoring, drug delivery and release, and photothermal therapy. Despite some progresses in the design and preparation of MXene-based hydrogel composites, they are still in the fundamental research stage. There is a lack of clinical validation regarding their effectiveness and safety, but they hold great potential for development and application.

Key words: nano-functional materials; MXene; hydrogel; wound repair; biocompatibility; wound monitoring; sustained drug release

Funding: National Key Research & Development Program of China, No. 2019YFA0905200 (to FDD); Youth Program of National Natural Science Foundation of China, No. 22108226 (to ZD); Youth Project of Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province, No. 2021JQ-439 (to ZD)

How to cite this article: HE R, LI CY, WANG RY, ZENG D, FAN DD. Application of MXene-based hydrogels in wound repair. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu. 2025;29(16):3486-3493.

0 引言 Introduction

烧伤、机械创伤及慢性疾病(如糖尿病性溃疡)等导致的皮肤损伤及功能失调一直是目前世界上急需解决的重大医学问题之一。传统创面敷料因缺少相应的生物功能且难以更换,仅能达到覆盖创面和抗菌的效果,对于难愈性创面继发的反复感染和组织愈合往往无能为力^[1]。慢性创面通常治疗难度大、疗程长、费用高,在治疗过程中会给患者家庭和社会造成巨大的经济负担。预计到2024年,全球创面护理市场将有4.6%的复合年增长率,从2019年的198亿美元增至248亿美元。创面敷料的革新以实现受损皮肤组织的修复愈合,是现阶段亟待解决的重大科学难题。创面愈合涉及多个序贯又相互交叉的基本病理生理过程,大致分成止血、炎症期、细胞增殖期和重塑期4个阶段,涉及多种细胞、结构蛋白、生长因子及蛋白水解酶之间的复杂相互作用^[2]。研究发现,由氧化应激引起的创面微环境中的慢性炎症、血管生成受损、促炎性细胞因子表达增加和细菌感染被认为是造成持久性慢性创面的主要原因^[3]。水凝胶是基于“湿性愈合理论”发展起来的新型高端材料,由于其良好的生物相容性、仿细胞外基质的3D微环境、与天然皮肤组织黏弹性类似等特性,已成为一种极具潜力的创面敷料,是近年来难愈性创面治疗的研究热点^[4]。

理想的创面敷料以提供支撑细胞生长的支架方式形成抗感染屏障,从而促进血液的自然凝结,阻断神经末梢以减轻疼痛,吸收创面渗出液,提供创面愈合所需蛋白质且具有强化新生组织等性能。相较于传统的水凝胶敷料,纳米复合水凝胶是将纳米粒子或纳米结构的材料均匀地分散在聚合物网络中,通过物理或化学交联形成水凝胶网络,具有优异的力学、光学、自愈合、溶胀/收缩性能^[5],同时克服了传统化学交联水凝胶的局限性,是目前极具应用潜力的新型智能材料。MXene是最近一段时间一类备受瞩目的二维纳米材料,主要通过MAX的氢氟酸刻蚀再超声辅助剥离的方法得到^[6]。

MXene的结构如图1所示^[7]。MXene由 $M_{n+1}X_nT_x$ 元素组成,M表示过渡金属元素,X表示碳或氮原子,T表示表面官能团(如-O、-OH、-F和/或-Cl), n 取值为1、2或3,MXene的3种原子排列类型如图1所示,最具代表性的是 $Ti_3C_2T_x$ MXene。MXene是选择性刻蚀掉MAX相

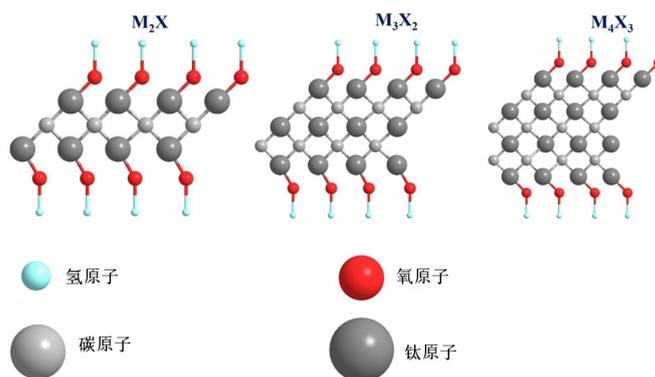


图1 | MXene 的结构^[7]

中的A原子层而获得的 $M_{n+1}X_n$,MXene可以形成多层、少层、单层、纳米片^[8],使得表面末端丰富的官能团(即M和X交替排列的片层状结构)可采用氟化氢铵(NH_4HF_2)蚀刻^[9]、盐酸(HCl)和氟盐蚀刻获得^[10]。

MXene不仅具有高表面积和高机械韧性等二维纳米材料的共有特性,还具有一些独特性,例如丰富的表面官能团、优良的导电性、亲水性、强抗菌性和生物相容性等,使其在生物医学领域(如生物传感器、生物成像、光热疗法、药物递送、治疗性纳米平台和创面敷料)具有特别的吸引力和极大的应用空间^[11]。研究发现,MXene丰富的表面官能团能产生带负电荷的亲水表面^[12],可通过与紧密缠绕的聚合物链交联形成特殊的三维网络结构,从而显著提高水凝胶的弹性模量和拉伸模量等力学性能^[13];同时,可以增加水凝胶体系中非共价键的数量,许多暴露在表面的官能团避免了一些氧化作用,提高自身的可塑性;此外还避免了其他纳米材料(如还原氧化石墨烯和石墨烯)在水溶液中分散性差、容易团聚的问题,将会为生物医用材料带来新的发展机遇。该文主要综述MXene的生物医学特性以及MXene基水凝胶在创面检测、药物递送与缓释、光热疗法等创面修复方面的应用。

1 资料和方法 Data and methods

1.1 资料来源

1.1.1 检索人及检索时间 由第一作者在2024年3月进行检索。

1.1.2 检索文献时限 2010 年 1 月至 2024 年 3 月发表的相关文献。

1.1.3 检索数据库 中国知网、维普、PubMed、Science Direct 数据库。

1.1.4 检索词 中文检索关键词为“MXene, 水凝胶, 组织工程应用, 创面修复”, 英文检索关键词为“MXene, Hydrogel, Tissue engineering application, Wound repair”。

1.1.5 检索文献类型 研究原著、综述、述评、经验交流。

1.1.6 手工检索情况 无。

1.1.7 检索策略 以 PubMed 数据库检索策略为例, 见图 2。

```
#1 MXene [All Fileds]
#2 Hydrogel [All Fileds]
#3 Tissue engineering application [All Fileds]
#4 Engineering application [All Fileds]
#5 Wound repair [All Fileds]
#6 2010-2023 [Date]
#7 #1 AND (#2 OR #3 OR #4) AND #5
```

图 2 | PubMed 数据库检索策略

1.1.8 检索文献量 初步检索到中英文文献 383 篇。

1.2 文献筛选标准

纳入标准: ①在创面修复领域 MXene 基水凝胶构建的相关文献; ②探讨 MXene 基水凝胶在创面修复领域的特性以及应用模式相关的文献; ③在此领域有重要研究意义的文献。

排除标准: ①与研究目的不符合的文献; ②具有相似研究背景的文献; ③内容较久远、存在研究错误的文献; ④不可进行重复性实验的文献。

1.3 数据提取与文献质量评价 计算机初步检索得到与此次研究目的相关的中英文文献 383 篇, 经资料收集人员根据纳入标准及排除标准进一步筛选, 选择与该综述内容相符的文献, 最终确定纳入 70 篇符合标准的文献进行综述。文献筛选流程图见图 3。

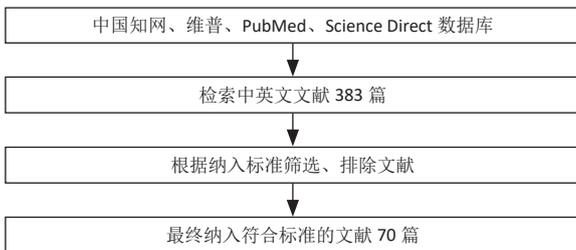


图 3 | 文献筛选流程图

2 结果 Results

2.1 MXene 基水凝胶在创面修复研究中的部分研究脉络 难愈性创面通常治疗难度大、愈合速度慢。MXene 作为一种新型二维纳米材料, 具备丰富的官能团及优良的导电性、亲水性、抗菌性和生物相容性等独特性能, 这使得 MXene 基水凝胶在创面修复方面颇具优势。表 1 是 MXene 基水凝胶在创面修复研究中的部分研究脉络, 表明 MXene 水凝胶在促伤口愈合方面的潜力巨大。

表 1 | MXene 基水凝胶在创面修复研究中的部分研究脉络

研究者	发表年份	MXene 基水凝胶	研究结论
ZHOU 等 ^[14]	2021	设计了一种 MXene、氧化透明质酸、支链聚甘油-乙炔亚胺、聚多巴胺组合的抗菌导电止血多功能水凝胶支架	该 MXene 基水凝胶支架可通过抗感染刺激细胞增殖与血管生成, 调控创面的生长因子, 加速多重耐药性细菌感染创面的愈合
LI 等 ^[15]	2022	设计了一种透明质酸接枝多巴胺和聚多巴胺的 MXene 基可注射水凝胶	该水凝胶在近红外刺激下能够可控释放氧气, 清除过量活性氧, 缓解氧化应激, 通过促进巨噬细胞从 M1 到 M2 极化实现创面抗炎, 极大提升了糖尿病创面的愈合速度
JIN 等 ^[16]	2022	设计了一种 MXene 负载甲磺酸去铁胺和透明质酸接枝多巴胺负载乙酰水杨酸的水凝胶 (MNFs@DFOM-H@AC)	该水凝胶可在光热效应下通过有效调节甲磺酸去铁胺和乙酰水杨酸的释放, 调控创面免疫微环境, 实现全层皮肤创面的无瘢痕愈合
KANG 等 ^[17]	2023	设计了一种季铵改性壳聚糖-磺基甜菜碱丙烯酰胺水凝胶 MXene@ 单宁酸 /Fe 促进烧伤创面愈合的水凝胶	该 MXene@ 单宁酸 /Fe 水凝胶可以促进血管生成以及胶原沉积, 实现烧伤创面的快速修复
LIU 等 ^[18]	2024	设计了一种由聚(丙烯酸酯-co-磺基甜菜碱甲基丙烯酸酯)为骨架, 掺入银和聚多巴胺修饰的 MXene, 具有优越的导电性、灵敏度和自黏能力的水凝胶	该水凝胶可以快速监测人体表皮体征的指标, 辅助进行医疗诊断, 同时在电刺激下可以促进糖尿病创面愈合

2.2 MXene 在创面修复应用中的特性

2.2.1 MXene 的导电性 与其他二维材料相比, MXene 具有优异的导电性能。SHAHZAD 等^[19]报道了 MXene 的电导率为 46 S/m, 表现出了优异的金属特性。由于 MXene 内部电子的运动状态和性能传递与金属相同, 因此存在电阻率随着温度线性降低的现象。MXene 的电子特性主要取决于 M 位、X 位和表面端部的性质。GUAN 等^[20]开发了一种方法, 将 2D Ti₃C₂T_x 片转化为具有 3D 多孔结构的中空 Ti₃C₂T_x-MXene 管, 同时退火处理后, Ti₃C₂T_x-MXene 上的大多数 -F 端基被去除, 许多 -OH 端基被 -O 端基取代, 并且 O 端基的 Ti₃C₂(Ti₃C₂O₂) 对 K⁺ 和 Li⁺ 表现出更高的吸附能力和更低的扩散势垒, 这保证了优异的离子存储能力和快速的离子扩散和传输, 使材料具有更好的电化学性能。

研究表明, 导电创面敷料可以促进创面部位的细胞行为, 与细胞增殖、胶原蛋白沉积、肉芽组织形成和血管生成有关的多个基因表达有关, 从而调节创面愈合过程^[21-22]。因此, 以 MXene 为主要基材构建的水凝胶将被赋予良好的导电性和促创面修复功效。人造皮肤、传感器的快速发展对导电水凝胶的要求越来越高。WAN 等^[23]为了开发有自供电特性的新型水凝胶, 在湿发电技术的基础上设计了一种导电 MXene-纤维素纳米晶体-罗望子胶-聚丙烯酰胺水凝胶, 具有感应压力、应变、湿度和温度的优势, MXene 的加入极大加强了水凝胶的高灵敏度和高导电性。LIU 等^[18]以聚(丙烯酸酯-co-磺基甜菜碱甲基丙烯酸酯)为水凝胶骨架, 将银纳米粒子和聚多巴胺修饰的 MXene 纳米复合材料以异质结构型设计合成水凝胶, 该水凝胶具有宽范围、高灵敏度、再现性良好、快速响应性和弹性等特性, 可以检测人体的各种动作、面部表情和体内心跳信号, 在电刺激下可修复糖尿病创面。ZHAO 等^[24]用丙烯酸和丙烯酰胺为聚合物单体, 以 MXene 负载聚二烯丙基二甲基氯化铵为模板构建的半互穿网络水凝胶, 在室温下储存 30 d 后仍具有优异的应变响应和柔韧

性, 在 1 100 次循环后性能也不会下降^[25]。

2.2.2 MXene 的光热性能 MXene 具有的电磁波吸收能力使其能够有效吸收阳光, 产生良好的光热效应, 未反射的电磁波可以穿过 MXene 晶格结构在层间进行内部反射, 最终被结构吸收, 这一特性保证了 MXene 材料在广阔的太阳光谱范围内的有效光吸收。近红外触发的智能热响应水凝胶可以很好地提高水凝胶对创面的修复效率, MXene 的局部表面离子体共振效应和近红外吸收能力使其具有优异的光热转换效率, 可达近乎 100%^[26]。

LI 等^[15] 研究报道的一种可注射性水凝胶, 通过 H₂O₂/HbO₂ 体系催化交联透明质酸-多巴胺的邻苯二酚基团和 MXene@ 聚多巴胺氧化偶联形成, 其中 MXene 提供一个由近红外激发产生温和热量的平台, 进而激活 HbO₂ 氧载体控释氧气, 有效促进糖尿病的创面愈合。LIN 等^[27] 的研究证明, Ti₃C₂ 纳米薄片具有超高的光热转换效率, 但合成的 MXene 具有亲水性, 导致其在生理培养基中的稳定性较差, 同时也会造成局部不均匀的光热效应。鉴于此, 现阶段的研究考虑采用复合材料改善其性质。在对 MXene 中 Ti₃C₂ 片的研究上, 通常使用酸性介质如具有强腐蚀性的浓氢氟酸或 HCl 和氟化物盐的混合物。为了更好地提取 Al 层, XUAN 等^[28] 使用有机碱四甲基氢氧化铵制备了功能化 Ti₃C₂ 片, 经过铝氧阴离子表面修饰后 Ti₃C₂ 薄片在近红外区域具有强而宽的吸收, 其性能相当甚至优于最先进的光吸收材料(包括金纳米结构、碳基材料和过渡金属双卤代烷), 可作为一种有效的光热转换剂。DONG 等^[29] 通过混合、冻干水合的程序制备了壳聚糖-MXene 非交联水凝胶, 可以快速吸附多重耐药菌细胞, 在近红外照射下的抗菌效果可达 99.18%。有研究制备了 Nb₂C-MXene 钛板材料, 研究了细菌膜和 Nb₂C-MXene 尖锐边缘之间的物理相互作用以及光热行为和光热协同抗菌作用^[30]。PARK 等^[31] 将环丙沙星负载在 MXene 上, 同时与海藻酸钠混合制备环丙沙星-MX@ 海藻酸钠, 可通过近红外刺激进行药物递送, 加速创面愈合。由以上研究可以看出, MXene 具有理想的光热性能。使用近红外光来照射 MXene 复合材料进而提供热透能量以及氧化应激来针对难愈性创面带来的反复感染, 能改善难愈性创面处的微环境, 加快创面愈合速度, 提高了 MXene 在创面敷料中的应用价值。

2.2.3 MXene 的生物相容性 MXene 表面端基含有的羟基(-OH)、氧(-O)以及氟(-F)会决定 MXene 的表面亲水性质, 实验通过去离子水对冷压 MXene 盘的表面接触角进行测量, 证明其具有亲水性, 亲水性好意味着生物相容性良好, 一些常见的钛基 MXene 具有生物相容性, 如 Ti₃AlC₂。MXene 对正常细胞的细胞毒性远小于癌症细胞等非正常细胞, MXene 的尺寸在 1-100 nm 范围内, 可以被细胞正常内化^[32]。RAFIEERAD 等^[33] 通过将蜂蜜和 MXene 结合到临床认可的壳聚糖中, 所开发的多功能异质结构表现出优异的多孔结构, 具有所需的溶胀性和可控的降解性, 这种导电复合材料具有高度的生物相容性。ZHU 等^[34] 提出了一种策略, 通过将 MXene 作为纳米填料加入海藻酸盐和明胶水凝胶中合成多功能 MXene-海藻酸盐水凝胶, 该水凝

胶具有良好的导电性和生物相容性, 并且由于海藻酸盐凝胶网络的动态亚胺连接而保持了良好的自修复性能。

用于创面敷料的水凝胶需具有良好的生物相容性。经实验证明 MXene 与红细胞有较好的生物相容性, 即使 MXene 的质量浓度高达 200 μg/mL, 其引起的溶血百分比仍然可以忽略不计(仅 0.8%)。相比之下, 在相同处理浓度下石墨烯引起的溶血率达到 50.8%^[35]。WANG 等^[36] 首次证明了 MXene 对典型促炎细胞因子白细胞介素 6 具有超高的去除能力, 是传统活性炭吸附剂去除白细胞介素 6 能力的 13.4 倍。MXene 具有良好的血液相容性, SZUPLEWSKA 等^[37] 系统证明了经过大豆磷脂表面改性的 MnO_x/MXene 具有良好的体外细胞相容性和体内生物安全性。生物医学方面最重要的就是安全性和稳定性, 就目前所进行的研究整体来看, MXene 在宽浓度范围内具有良好的生物相容性。

2.2.4 MXene 的抗菌性能 抗菌性能与材料自身的片层结构性质、片状尺寸和表面电荷等有密切联系^[38]。MXene 的抗菌特性依靠自身纳米刀的结构以及能氧化还原生成活性氧。所谓纳米刀结构是指 MXene 的锋利边缘(纳米刀)会对细菌细胞壁造成一定的破坏, 引起严重的膜破坏及细胞质泄露, 并且随着 MXene 浓度的增加, 细胞会团聚包围在 MXene 纳米片上。活性氧是指内部结构有不成对电子的活性氧化分子, 有着消灭细菌和癌细胞的功能。RASOOL 等^[39] 研究了单层和多层 MXene 薄片在胶体溶液中的抗菌性能, 结果表明与被广泛报道的抗菌剂氧化石墨烯相比, MXene 对革兰阴性大肠杆菌和革兰阳性枯草杆菌均表现出更高的抗菌效率和抑菌活性。同石墨烯类似, MXene 作为一种高电子传导性的新型材料, 在经 808 nm 的近红外光辐射时, 光激发 Ti₃C₂ 的自由电子传递能量从三线态氧(³O₂)产生单线态氧(¹O₂), 活性氧能够氧化细菌内的谷胱甘肽进一步造成氧化应激, 导致细菌死亡^[40]。

慢性细菌感染的创面修复到目前为止还是一个亟待攻克的难题, 临床治疗主要使用抗生素, 但此方法对抗感染和创面恢复的效率并没有很大的作用。ZHOU 等^[14] 将 MXene 引入多功能水凝胶支架用于耐细菌感染的创面愈合研究, 结果显示该水凝胶对耐多种常用抗生素甲氧西林金黄色葡萄球菌的抗菌活性高达 99.03%。面对天然来源材料制备的水凝胶孔隙率难以控制的问题, ROZMYŚŁOWSKA-WOJCIECHOWSKA 等^[41] 在维生素 C 稳定的壳聚糖-透明质酸基质纳米复合结构中通过添加 MXene 来降低水凝胶的孔隙率, 在改变水凝胶结构的同时也提高了其抗菌能力。ZHENG 等^[42] 利用 MXene 的纳米刀抗菌原理开发了一种可注射同时可自我修复的水凝胶, 首次将 CeO₂ 纳米颗粒负载在 MXene 表面形成复合材料, 提高了抗炎能力, 为多重耐药菌感染受损皮肤的有效治疗提供了一种无需抗生素协助的水凝胶敷料新模式。未来联合应用 MXene 和其他具有生物活性的纳米粒子构建多功能水凝胶, 是创面敷料设计的研究热点。

2.3 MXene 在创面修复中的应用

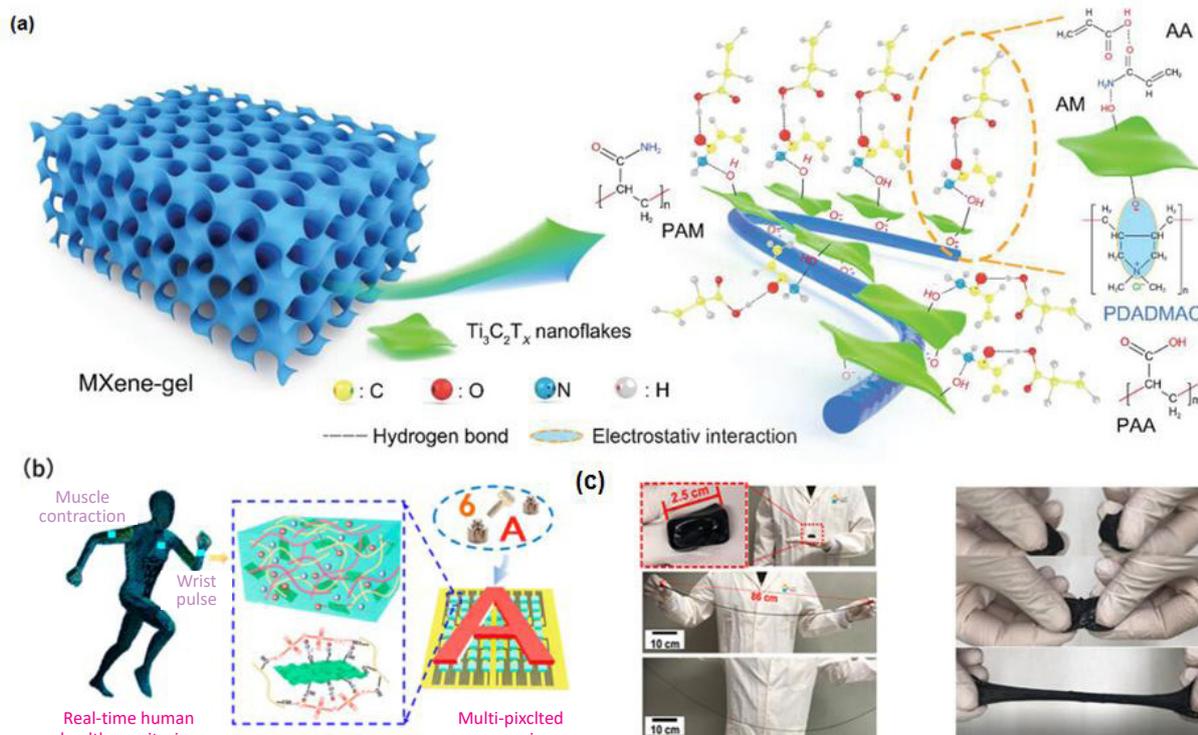
2.3.1 创面监测 创面监测是水凝胶敷料智能化革新的一个重要方向。近年来, 有关 MXene 在传感监测方面进行

的研究越来越深入,主要有压阻式传感器、生物传感器和物理传感器3个大方向。石墨烯和氧化石墨烯的易团聚会造成自身功能化,使得电导率下降,功能应用受到限制^[43];具有类似结构的 MoS_2 ,由于自身低电导率和疏水性限制了其在传感器方面的应用^[44],而与上述常规传感器材料相比,MXene具有良好稳定的分散性。MXene基水凝胶所具备的柔软可拉伸性、导电性及生物相容性是传感器的基本特性,很适合应用于进行创面修复的可穿戴/植入型器件。MXene在创面监测方面的作用机制是片层间距压缩导致的电导率增加,在经过4 000次循环之后仍保持着敏感的压缩力和应变力,并且具有较高的灵敏度^[45](图4)。HU等^[46]制备的MXene/再生丝素蛋白水凝胶表现出良好的导电性和传感功能,可用作压阻式压力传感器用于监测电生理微环境。慢性创面在3个月内无法自己再生受损组织,需多次复诊治疗,耗费额外成本。ZHANG等^[47]开发了一种具有出色传感功能的MXene-聚乙烯醇水凝胶传感材料,拥有优异的应变灵敏性、瞬时自修复性和出色的拉伸性能,可以根据拉伸和压缩应变产生不同的电阻值生成电信号,有望应用于人造皮肤或者用于具有释药促愈功能的柔性功能性敷料。但是,同时实现水凝胶优异的导电性能、拉伸性能和低检测阈值仍然是一个极端的挑战。LI等^[48]基于 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ /锂盐/聚(丙烯酰胺)/聚乙烯醇在甘油/水二元溶剂中简单浸泡得到了一种超高拉伸和高导电性水凝胶,该水凝胶可以应用 8×8 像素化传感阵列,通过监测不同部位阻力的变化来反映对目标的精确识别,展示了从微小生理信号到大规模人体运动的人类健康检测潜在能力。

将一些生物材料和生物标志物作为检测指标可以设计为生物传感器,进行身体代谢情况诊断、治疗结果推断以及身体环境的病原体的评估,可分为药物生物传感、免疫检测生物传感、神经递质生物传感等^[49],例如目前已报道的全氟磺酸基聚合物MXene传感器^[50]、MXene/NiCo层状双氢氧化物传感器^[51]、DNA-PNA传感器^[52]。光学传感器利用的是MXene的表面等离子共振、荧光共振能量转移等光学传感原理^[53],有研究构建的一种凝血酶结合适配体-MXene传感器,可以根据荧光光谱的变化监测凝血酶^[54]。

以上研究表明,MXene与其他各种材料的结合显示了良好的结构特点和功能特性,虽然现阶段传感器研究主要出于压力和电阻的物理传感器方向,但在朝着智能化发展的进程中MXene为智能传感提供了更多的可能,已成为创面修复领域极具前景的材料选择。

2.3.2 药物递送与缓释 药物递送与缓释是指将不同病理所需的治疗剂以适当的药代动力学运输到体内并释放进行治疗的过程,但是由于代谢和一些不良反应,药物的生物利用度会降低。通过药物负载在纳米结构平台上可以实现药物的持续释放,获得更好的稳定性以及细胞对药物的摄取,降低了药物载体对细胞组织造成的毒性^[55],近年来智能型控释的水凝胶发展最为迅速。与其他生物材料相比,MXene上有很多锚定位点,同时也有极高的比表面积,可用作载体递送的优良平台^[56]。与 MoS_2 相比,MXene表面含有的羟基(-OH)、氧(-O)以及氟(-F)具有很好的亲水性且可以进一步改性,得到有更好生物相容性的药物递送载体。功能化的纳米氧化石墨烯体系主要



图注: a 为 P(AA-co-AM)/MXene@PDADMAC 半 IPN 水凝胶^[42],其中 AA 为丙烯酸,AM 为丙烯酰胺,PDADMAC 为聚二烯丙基二甲基氯化铵,Hydrogen bond 为氢键,Electrostatic interaction 为静电相互作用;b 为 MXene/聚乙烯醇(PVA)水凝胶传感器^[45],其中 Muscle contraction 为肌肉收缩,Wrist pulse 为手腕脉搏,Real-time human health monitoring 为实时人体健康监测,Multi-pixelated pressure sensing array 为多像素化压力传感阵列;c 为 MXene($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$)/聚乙烯醇(PVA)水凝胶传感器^[47]。

图4 | MXene在传感方面的应用原理

通过非共价物理吸附实现载药，仍存在载药量不稳定的问题。

JIN 等^[16]分别制备了负载甲磺酸去铁胺和乙酰水杨酸两类正向因子的近红外响应 MXene 纳米纤维和水凝胶双结构体系 (MNFs@DFOM-H@AC)，双结构体系整合了两类正向因子各自的优势，实现了创面的无痕愈合，光热效应可以调节甲磺酸去铁胺的释放，同时不伤害皮肤；从水凝胶释放的乙酰水杨酸可以调节创面部位的免疫微环境，发挥抗炎和促血管形成功效。另外，LIN 等^[57]还制备了一种具有核壳结构的促进血管生成和防止瘢痕产生的水凝胶创可贴，它由负载 MXene 的纳米纤维为核、多巴胺-透明质酸水凝胶为壳，封装生长因子和 H₂S 供体，该系统连续释放产生的 H₂S 诱导巨噬细胞极化成 M2 表型，调节免疫微环境并抑制创面部位的过度炎症反应，有利于皮肤细胞的增殖，促进创面愈合。这些研究说明 MXene 基水凝胶显示出良好的药物递送与缓释效果，有望成为一种构建药物递送载体的极具潜力的纳米平台。ZHANG 等^[58]将 MXene 作为交联剂与聚丙烯酰胺有机结合合成了 Ti₃C₂/聚丙烯酰胺水凝胶，该水凝胶的机械性能得到大幅提升且具有稳定的溶胀能力，为氯霉素提供了有效的载体并提高了生物活性。近年来，中草药中抗菌提取物的使用频率大幅增加，例如：ZENG 等^[59]制备了黄芩苷-聚 ε 己内酯-MXene 三元复合水凝胶，将黄芩苷与 MXene 相结合极大提高了黄芩苷的亲水性并有助于黄芩苷的释放，此水凝胶表现出良好的抗菌活性。

将药物负载在 MXene 上通过药物递送载体控制其释放，极大减少了药物在递送过程中的损耗情况以及不良反应，可以使药物的利用度达到最大值^[60]，通过与光热效应响应、pH 值响应等结合实现药物智能控释，在创面处可控调节相关炎症因子，加速创面愈合。

2.3.3 光热治疗 长期服用抗生素会让细菌产生耐药性，导致在突发严重疾病时抗生素失效，同时也会产生胃肠道刺激、呕吐、肠道紊乱等不良反应，因此，如何在不诱发耐药性的情况下切断耐药菌的产生仍是此类创面修复面临的挑战。基于 MXene 优异光热性能的光热疗法已经成为一种很有希望的解决方法，MXene 在近红外区域 (700-1 100 nm) 表现出很强的吸附性和较高的光热转化率，在近红外光激发下可在 380-780 nm 范围进行吸收，而氧化石墨烯在近红外光发下的吸收范围为 600-800 nm。MXene 会产生局部热能、活性氧、自由基来抵抗细菌感染^[61]，同时 MXene 上的光热治疗过程会引起蛋白质的变性和失活，进而破坏细菌的完整性，细菌也不会对光热治疗产生依赖性^[62]。实验证明，在 473 nm 或者 785 nm 激光下的测试中 MXene 都有 100% 的内部光热转换效率，高于 MoS₂ 纳米片 (27.6%) 和 MoS₂ 纳米薄片 (24.4%) 的光热转化效率。CHEN 等^[63]制备了具有 0.94 mm 的 E-MoS₂ 纳米片，实验结果显示其光热转换效率仅达到 62%。

针对多重耐药菌感染，YANG 等^[64]利用带负电的 MXene 和带正电的季铵化含冰片聚合物结合以产生季铵化含冰片聚合物官能化的 MXene 纳米片，克服了 MXene 低靶向细菌能力的问题，该纳米片可以在细菌细胞壁原

位产生局部热量进行靶向光热治疗。田煜等^[65]利用静电作用构筑了 MXene 与铜铁双金属过氧化物复合材料体系 MXene-CFPs，实现光热-光/化双动力协同抗菌疗法，在近红外光激发下 MXene-CFPs 材料有着优异的光热转化效果以及双动力产活性氧的特征，也具备消灭细菌的能力，这种疗法为组织修复中常见的细菌感染问题提供了一种不使用抗生素且多种方法协同的新思路。LIU 等^[66]将金纳米颗粒负载在 MXene 上，再引入壳聚糖和 β-甘油磷酸二钠盐交联的水凝胶网络，该复合体系有很强的近红外吸收和光热协同作用，β-甘油磷酸二钠盐是一种具有优良生物相容性的电负性物理交联剂，其降解产物是适合人体的常见磷补充剂，因此该水凝胶有具有协同的近红外、pH 值和热多反应药物递送特性。CHENG 等^[67]提出一种多功能 MXene 负载锌的氧化纤维素水凝胶，其在近红外照射下持续释放锌离子，抗菌效果达到 99.8%，同时也能达到高效止血的作用。在同样的思路下，HU 等^[68]将 MXene-锌复合材料加入到琼脂和海藻酸钠的水凝胶中，得到了光热性能高、光热转换率高杀菌效果好的天然多糖水凝胶。LI 等^[69]制备了具有各向异性的聚乙烯醇网络水凝胶，将其负载在具有生物相容性的 MXene 表面，通过光热治疗的近红外照射对细菌造成不可逆破坏，解决了 MXene 在创面处稳定性差、容易脱落等问题，为细菌感染的创面修复提供了合适的微环境。另外，面对体内细菌反弹导致的抗菌性能无法满足需求的挑战，ZHENG 等^[70]通过构建包含抗生素环丙沙星的杂化温敏水凝胶，将细菌引入“陷阱和杀死机制”，该水凝胶在近红外的照射下有较高的光热转换效率，同时可以激发环丙沙星的持续释放，避免了光热治疗后细菌的反弹，目前正在研究有效剂量在临床中的具体应用。

针对当前水凝胶创面敷料临床产品存在的生物相容性差、功效不足等问题，MXene 基水凝胶材料可根据功能需求进行定向开发，目前研究主要集中在创面监测、药物递送与缓释和光热治疗等新型智能创面敷料领域，实例见表 2 所示。

表 2 | MXene 水凝胶在创面修复领域的应用

水凝胶组成	交联方式	特性	应用领域
MXene ^[64] , 海藻酸醛, 明胶	动态席夫碱	良好的自愈能力, 较好的弹性	可穿戴传感器
MXene ^[66] , 聚乙烯醇	氢键	瞬时自愈性, 高应变敏感性	触摸传感, 生物信号检测
MXene ^[67] , 聚乙烯醇	共混	出色的拉伸延展性, 瞬间自愈能力, 组织黏附性	生物传感器
MXene ^[52] , 肽核酸	肽键	对结核分枝杆菌检测, 灵敏性高	生物传感器
MXene ^[57] , 多巴胺-透明质酸	静电纺丝	良好的药物控释能力, 促创面愈合	药物释放
MXene ^[58] , N, N'-亚甲基双丙烯酰胺, 聚丙烯酰胺	原位自由基聚合	力学性能显著提高, 高载药量	药物释放
MXene ^[59] , 聚 ε 己内酯,	静电纺丝	良好生物相容性, 高亲水性	药物释放
MXene ^[64] , N, N'-二甲基甲基丙烯酸乙酯	静电作用	抗菌, 近红外光热响应	光热治疗
MXene ^[69] , 聚乙烯醇网络水凝胶	定向冷冻	抗菌性能, 组织黏附性	光热治疗
MXene ^[70] , 环丙沙星	水热法	高光热效率, 优异杀菌能力	光热治疗

3 总结与展望 Summary and prospects

3.1 既往他人在该领域研究的贡献和存在的问题 该文主要回顾了 MXene 基水凝胶的构建及在创面组织工程中的应用基础研究,发现 MXene 高比表面积的二维片层结构和丰富的表面官能团赋予了其优良的导电性、亲水性和光热性能,以及良好的生物相容性和强抗菌性,联合不同生物医用材料构建的水凝胶创面敷料能够实现创面监测、药物递送与缓释和光热/光动力治疗。但是,相关研究目前只能开展体外实验和动物模型实验,尚无法广泛开展临床应用研究,制备纳米尺度孔径的水凝胶在稳定性上还存在一些不足。今后在刺激响应型水凝胶的研究方面,如活性氧响应型水凝胶、pH 值响应型水凝胶、创面监测与药物缓释多位一体型水凝胶等还有待探索。

3.2 该综述区别于他人他篇的特点 目前还尚未有综述报道 MXene 基水凝胶在创面组织工程领域的应用,该文通过介绍 MXene 的特性以及 MXene 基水凝胶在创面修复领域的应用方式,将现阶段研究成果中的 MXene 基水凝胶复合材料进行较为完整全面的分析总结。

3.3 该综述的局限性 由于此综述重在论述 MXene 基水凝胶在创面组织工程中的应用,因此对于 MXene 基水凝胶的制备基础仅进行了系统总结。同时,鉴于领域内 MXene 基水凝胶尚处于起步阶段,此次综述仅对近年来的研究成果进行分析总结,理论依据有限。

3.4 该综述的重要意义 目前, MXene 基水凝胶复合材料在创面修复领域的研究已有良好的进展,但总体来看仍处于起步阶段,具有广阔的发展前景。文章简明系统地介绍了 MXene 基水凝胶的研发现状及在创面组织工程中的应用情况,同时探讨了现阶段存在的优势与不足,阐明了 MXene 基水凝胶未来具有广阔的应用前景,为 MXene 基水凝胶在创面组织工程中更好的应用提供了探索思路。

致谢: 研究由科技部国家重点研发计划(2019YFA0905200)、国家自然科学基金青年项目(22108226)和陕西省自然科学基金基础研究计划青年项目(2021JQ-439)资助。

作者贡献: 文章设计者为曾丹,何蕊负责收集文献和分析总结,李重一负责文章撰写,王瑞瑶负责文章校对。

利益冲突: 文章的全部作者声明,在课题研究和文章撰写过程中不存在利益冲突。

开放获取声明: 这是一篇开放获取文章,根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享 4.0”条款,在合理引用的情况下,允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展,同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献,并为之建立索引,用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

版权转让: 文章出版前全体作者与编辑部签署了文章版权转让协议。

出版规范: 该研究遵守《系统综述和荟萃分析报告规范》(PRISMA 指南)。文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行 3 次查重。文章经小同行外审专家双盲外审,同行评议认为文章符合期刊发表宗旨。

4 参考文献 References

[1] POWERS JG, HIGHAM C, BROUSSARD K, et al. Wound healing and treating wounds: Chronic wound care and management. *J Am Acad Dermatol.* 2016;74(4):607-625; quiz 625-606.

[2] SUN BK, SIPRASHVILI Z, KHAVARI PA. Advances in skin grafting and treatment of cutaneous wounds. *Science.* 2014;346(6212):941-945.

[3] ZHU Y, CANKOVA Z, IWANASZKO M, et al. Potent laminin-inspired antioxidant regenerative dressing accelerates wound healing in diabetes. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2018;115(26):6816-6821.

[4] 甘丽莉,熊娜,刘燕飞. 水凝胶药物支架修复皮肤创面: 临床应用可能性的挑战 [J]. *中国组织工程研究.* 2021;25(22):3578-3583.

[5] ZHANG A, LIU Y, QIN D, et al. Research status of self-healing hydrogel for wound management: A review. *Int J Biol Macromol.* 2020;164:2108-2123.

[6] LIU J, YU H, WANG L, et al. Two-dimensional metal-organic frameworks nanosheets: Synthesis strategies and applications. *Inorg Chim Acta.* 2018; 483:550-564.

[7] HEMANTH NR, KANDASUBRAMANIAN B. Recent advances in 2D MXenes for enhanced cation intercalation in energy harvesting Applications: A review. *Chem Eng J.* 2020;392:12367801-12367815.

[8] LEI D, LIU N, SU T, et al. Roles of MXene in Pressure Sensing: Preparation, Composite Structure Design, and Mechanism. *Adv Mater.* 2022;34(52): e2110608.

[9] HALIM J, LUKATSKAYA MR, COOK KM, et al. Transparent Conductive Two-Dimensional Titanium Carbide Epitaxial Thin Films. *Chem Mater.* 2014;26(7): 2374-2381.

[10] GHIDIU M, LUKATSKAYA MR, ZHAO MQ, et al. Conductive two-dimensional titanium carbide 'clay' with high volumetric capacitance. *Nature.* 2014; 516(7529):78-81.

[11] LIN H, CHEN Y, SHI J. Insights into 2D MXenes for Versatile Biomedical Applications: Current Advances and Challenges Ahead. *Adv Sci (Weinh).* 2018;5(10):1800518.

[12] WON JS, PRASAD C, JEONG SG, et al. Recent advances in the development of MXenes/cellulose based composites: A review. *Int J Biol Macromol.* 2023;240:124477.

[13] GUO J, YU Y, ZHANG D, et al. Morphological Hydrogel Microfibers with MXene Encapsulation for Electronic Skin. *Research (Washington, DC).* 2021; 2021:7065907.

[14] ZHOU L, ZHENG H, LIU Z, et al. Conductive Antibacterial Hemostatic Multifunctional Scaffolds Based on Ti₃C₂T_x MXene Nanosheets for Promoting Multidrug-Resistant Bacteria-Infected Wound Healing. *ACS Nano.* 2021; 15(2):2468-2480.

[15] LI Y, FU R, DUAN Z, et al. Artificial Nonenzymatic Antioxidant MXene Nanosheet-Anchored Injectable Hydrogel as a Mild Photothermal-Controlled Oxygen Release Platform for Diabetic Wound Healing. *ACS Nano.* 2022;16(5):7486-7502.

[16] JIN L, MA Y, WANG R, et al. Nanofibers and hydrogel hybrid system with synergistic effect of anti-inflammatory and vascularization for wound healing. *Mater Today Adv.* 2022;14:100224.

[17] KANG X, LI Y, DUAN Z, et al. A MXene@TA/Fe dual-nanozyme composited antifouling hydrogel for burn wound repair. *Chem Eng J.* 2023;476: 146420.

[18] LIU D, BI S, WANG H, et al. Polydopamine interface-modulated MXene-based conductive antibacterial hydrogels for on-skin health monitoring and diabetic wound healing. *Compos Part A.* 2024;180:108065.

[19] SHAHZAD F, ALHABEB M, HATTER CB, et al. Electromagnetic interference shielding with 2D transition metal carbides (MXenes). *Science.* 2016; 353(6304):1137-1140.

[20] GUAN K, DONG L, XING Y, et al. Structure and surface modification of MXene for efficient Li/K-ion storage. *J Energy Chem.* 2022;75:330-339.

[21] GUO B, MA PX. Conducting Polymers for Tissue Engineering. *Biomacromolecules.* 2018;19(6):1764-1782.

[22] HE J, SHI M, LIANG Y, et al. Conductive adhesive self-healing nanocomposite hydrogel wound dressing for photothermal therapy of infected full-thickness skin wounds. *Chem Eng J.* 2020;394:124888.

[23] WAN B, LIU N, ZHANG Z, et al. Water-dispersible and stable polydopamine coated cellulose nanocrystal-MXene composites for high transparent, adhesive and conductive hydrogels. *Carbohydr Polym.* 2023;314:120929.

[24] ZHAO L, XU H, LIU L, et al. MXene-Induced Flexible, Water-Retention, Semi-Interpenetrating Network Hydrogel for Ultra-Stable Strain Sensors with Real-Time Gesture Recognition. *Adv Sci (Weinh).* 2023;10(30):e2303922.

- [25] HE J, ZOU H, ZHOU J, et al. Thermoresponsive MXene-based hydrogel for controlled anticancer drug release. *J Drug Delivery Sci Technol.* 2024;91: 105207.
- [26] HE L, DI D, CHU X, et al. Photothermal antibacterial materials to promote wound healing. *J Control Release.* 2023;363:180-200.
- [27] LIN H, WANG X, YU L, et al. Two-Dimensional Ultrathin MXene Ceramic Nanosheets for Photothermal Conversion. *Nano Lett.* 2017;17(1):384-391.
- [28] XUAN J, WANG Z, CHEN Y, et al. Organic-Base-Driven Intercalation and Delamination for the Production of Functionalized Titanium Carbide Nanosheets with Superior Photothermal Therapeutic Performance. *Angew Chem Int Ed Engl.* 2016;55(47):14569-14574.
- [29] DONG Y, LIU J, CHEN Y, et al. Photothermal and natural activity-based synergistic antibacterial effects of Ti(3)C(2)T(x) MXene-loaded chitosan hydrogel against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*. *Int J Biol Macromol.* 2023;240:124482.
- [30] 秦苗, CHAIMA M, 苏一蒙, 等. MXene 及 MXene/ 碳基复合材料在生物医学领域的研究进展 [J]. *新型炭材料 (中英文)*, 2023, 38(3):496-509.
- [31] PARK H, KIM JU, KIM S, et al. Sprayable Ti(3)C(2) MXene hydrogel for wound healing and drug release system. *Mater Today Bio.* 2023;23:100881.
- [32] LIM GP, SOON CF, MA NL, et al. Cytotoxicity of MXene-based nanomaterials for biomedical applications: A mini review. *Environ Res.* 2021;201:111592.
- [33] RAFIEERAD A, SEQUIERA GL, YAN W, et al. Sweet-MXene hydrogel with mixed-dimensional components for biomedical applications. *J Mech Behav Biomed Mater.* 2020;101:103440.
- [34] ZHU H, DAI W, WANG L, et al. Electroactive Oxidized Alginate/Gelatin/MXene (Ti₃C₂T_x) Composite Hydrogel with Improved Biocompatibility and Self-Healing Property. *Polymers.* 2022;14(18):3908.
- [35] HUANG J, SU J, HOU Z, et al. Cytocompatibility of Ti(3)C(2)T(x) MXene with Red Blood Cells and Human Umbilical Vein Endothelial Cells and the Underlying Mechanisms. *Chem Res Toxicol.* 2023;36(3):347-359.
- [36] WANG T, SUN X, GUO X, et al. Ultraefficiently Calming Cytokine Storm Using Ti₃C₂T_x MXene. *Small Methods.* 2021;5(5):2001108.
- [37] SZUPLEWSKA A, KULPIŃSKA D, JAKUBCZAK M, et al. The 10th anniversary of MXenes: Challenges and prospects for their surface modification toward future biotechnological applications. *Adv Drug Deliv Rev.* 2022;182:114099.
- [38] SEIDI F, ARABI SHAMSABADI A, DADASHI FIROUZJAEI M, et al. MXenes Antibacterial Properties and Applications: A Review and Perspective. *Small.* 2023;19(14):2206716.
- [39] RASOOL K, HELAL M, ALI A, et al. Antibacterial Activity of Ti₃C₂T_x MXene. *ACS Nano.* 2016;10(3):3674-3684.
- [40] GE J, LAN M, ZHOU B, et al. A graphene quantum dot photodynamic therapy agent with high singlet oxygen generation. *Nat Commun.* 2014;5:4596.
- [41] ROZMYŚŁOWSKA-WOJCIECHOWSKA A, KARWOWSKA E, GLOC M, et al. Controlling the Porosity and Biocidal Properties of the Chitosan-Hyaluronate Matrix Hydrogel Nanocomposites by the Addition of 2D Ti₃C₂T_x MXene. *Materials.* 2020;13(20):4587.
- [42] ZHENG H, WANG S, CHENG F, et al. Bioactive anti-inflammatory, antibacterial, conductive multifunctional scaffold based on MXene@CeO₂ nanocomposites for infection-impaired skin multimodal therapy. *Chem Eng J.* 2021;424:130148.
- [43] YANG G, LIU F, ZHAO J, et al. MXenes-based nanomaterials for biosensing and biomedicine. *Coord Chem Rev.* 2023;479:215002.
- [44] KUMAR S, LEI Y, ALSHAREEF NH, et al. Biofunctionalized two-dimensional Ti(3)C(2) MXenes for ultrasensitive detection of cancer biomarker. *Biosens Bioelectron.* 2018;121:243-249.
- [45] LI Y, HUANG S, PENG S, et al. Toward Smart Sensing by MXene. *Small.* 2022; 19(14):2206126.
- [46] HU ZC, LU JQ, ZHANG TW, et al. Piezoresistive MXene/Silk fibroin nanocomposite hydrogel for accelerating bone regeneration by Re-establishing electrical microenvironment. *Bioact Mater.* 2023;22:1-17.
- [47] ZHANG YZ, LEE KH, ANJUM DH, et al. MXenes stretch hydrogel sensor performance to new limits. *Sci Adv.* 2018;4(6):eaat0098.
- [48] LI Q, ZHI X, XIA Y, et al. Ulstretchable High-Conductivity MXene-Based Organohydrogels for Human Health Monitoring and Machine-Learning-Assisted Recognition. *ACS Appl Mater.* 2023;15(15):19435-19446.
- [49] HO DH, CHOI YY, JO SB, et al. Sensing with MXenes: Progress and Prospects. *Adv Mater.* 2021;33(47):e2005846.
- [50] SHAHZAD F, IQBAL A, ZAIDI SA, et al. Nafion-stabilized two-dimensional transition metal carbide (Ti₃C₂T_x MXene) as a high-performance electrochemical sensor for neurotransmitter. *J Ind Eng Chem.* 2019;79: 338-344.
- [51] SUN Q, ZHANG Y, GAO P, et al. Three-dimensional NiO/Co(3)O(4)@C composite for high-performance non-enzymatic glucose sensor. *Anal Sci.* 2023;39(1):33-42.
- [52] ZHANG J, LI Y, DUAN S, et al. Highly electrically conductive two-dimensional Ti(3)C(2) Mxenes-based 16S rDNA electrochemical sensor for detecting *Mycobacterium tuberculosis*. *Anal Chim Acta.* 2020;1123:9-17.
- [53] ZHU X, ZHANG Y, LIU M, et al. 2D titanium carbide MXenes as emerging optical biosensing platforms. *Biosens Bioelectron.* 2021;171:112730.
- [54] CUI H, FU X, YANG L, et al. 2D titanium carbide nanosheets based fluorescent aptasensor for sensitive detection of thrombin. *Talanta.* 2021; 228:122219.
- [55] RAMASAMY T, RUTTALA HB, GUPTA B, et al. Smart chemistry-based nanosized drug delivery systems for systemic applications: A comprehensive review. *J Control Release.* 2017;258:226-253.
- [56] LU B, ZHU Z, MA B, et al. 2D MXene Nanomaterials for Versatile Biomedical Applications: Current Trends and Future Prospects. *Small.* 2021;17(46): 2100946.
- [57] JIN L, GUO X, GAO D, et al. An NIR photothermal-responsive hybrid hydrogel for enhanced wound healing. *Bioact Mater.* 2022;16:162-172.
- [58] ZHANG P, YANG XJ, LI P, et al. Fabrication of novel MXene (Ti₃C₂) / polyacrylamide nanocomposite hydrogels with enhanced mechanical and drug release properties. *Soft Matter.* 2020;16(1):162-169.
- [59] ZENG W, CHENG NM, LIANG X, et al. Electrospun polycaprolactone nanofibrous membranes loaded with baicalin for antibacterial wound dressing. *Sci Rep.* 2022;12(1):10900.
- [60] QIN M, JIN J, SAIDING Q, et al. In situ inflammatory-regulated drug-loaded hydrogels for promoting pelvic floor repair. *J Control Release.* 2020;322: 375-389.
- [61] 徐静, 吕慧欣, 鲍鑫, 等. 近红外光响应水凝胶在组织工程领域的应用 [J]. *中国组织工程研究*, 2024, 28(3):486-492.
- [62] HAO S, HAN H, YANG Z, et al. Recent Advancements on Photothermal Conversion and Antibacterial Applications over MXenes-Based Material. *Nanomicro Lett.* 2022;14(1):178.
- [63] CHEN F, LUO Y, LIU X, et al. 2D Molybdenum Sulfide-Based Materials for Photo-Excited Antibacterial Application. *Adv Healthc Mater.* 2022;11(13): e2200360.
- [64] YANG L, CHEN S, WEI H, et al. Low-Temperature Photothermal Therapy Based on Borneol-Containing Polymer-Modified MXene Nanosheets. *ACS Appl Mater.* 2022;14(40):45178-45188.
- [65] 田煜, 张姝婷, 邓怡, 等. MXene/ 过氧化物复合材料的制备及抗菌性能研究 [J]. *应用化工*, 2023, 52(6):1619-1625.
- [66] LIU C, YANG P, LI J, et al. NIR/pH-responsive chitosan hydrogels containing Ti(3)C(2)/AuNRs with NIR-triggered photothermal effect. *Carbohydr Polym.* 2022;295:119853.
- [67] CHENG F, YI X, DAI J, et al. Photothermal MXene@Zn-MOF-decorated bacterial cellulose-based hydrogel wound dressing for infectious wound healing. *Cell Rep Phys Sci.* 2023;4(10):101619.
- [68] HU Y, ZENG Q, HU Y, et al. MXene/zinc ion embedded agar/sodium alginate hydrogel for rapid and efficient sterilization with photothermal and chemical synergetic therapy. *Talanta.* 2024;266:125101.
- [69] LI Y, HAN M, CAI Y, et al. Muscle-inspired MXene/PVA hydrogel with high toughness and photothermal therapy for promoting bacteria-infected wound healing. *Biomater Sci.* 2022;10(4):1068-1082.
- [70] ZHENG Y, YAN Y, LIN L, et al. Titanium carbide MXene-based hybrid hydrogel for chemo-photothermal combinational treatment of localized bacterial infection. *Acta Biomater.* 2022;142:113-123.

(责任编辑: GW, ZN, QY, LWJ)