

MXene 材料在骨组织工程领域应用的研究进展

刘成林, 吴尧昆, 付佳豪, 宋伟, 陈浩, 席洪钟, 刘铎, 孙光权, 杜斌

(南京中医药大学附属医院, 江苏 南京 210029)

摘要 MXene 材料是一种新型二维材料, 因其优良的生物相容性、导电性、光热转换能力及生物降解性, 在骨组织工程领域展现出广阔的应用前景。MXene 材料通过调控成骨相关基因表达、调节免疫微环境、利用光热效应、导电性及声动力学效应等多种机制促进骨再生。此外, MXene 材料具有抗菌和抗骨肿瘤作用, 其光热效应和促进活性氧释放的能力可有效杀灭细菌和肿瘤细胞, 同时借助优异的载药性实现药物精准释放。尽管 MXene 材料在骨组织工程中具有良好的应用前景, 但其长期生物安全性、降解产物的细胞毒性等潜在风险仍需进一步研究。未来, 通过优化制备工艺和解决降解相关问题, MXene 材料有望成为一种多功能的骨组织工程材料, 为骨缺损修复、抗感染及骨肿瘤治疗提供创新性解决方案。本文对 MXene 材料在骨再生、抗菌和抗骨肿瘤等方面的研究进展进行了综述。

关键词 组织工程; MXene 材料; 骨缺损; 骨再生; 骨疾病, 感染性; 骨肿瘤; 综述

创伤、骨肿瘤、感染及部分先天性疾病都会造成骨缺损, 而人体的骨再生能力有限, 当骨缺损较大时, 单靠自身难以完成修复, 需要进行骨移植完成修复^[1]。但自体骨移植存在供区骨量不足及供区破坏的问题, 而异体骨移植也存在免疫排斥的风险^[2]。因此, 寻找一种供应量充足且疾病感染率低的骨组织工程材料, 已成为骨移植材料研究的新方向。MXene 是一种二维材料, 因具有生物相容性优良、易降解、导电性能强等优点, 近年来已成为组织工程领域研究的热点。本文对 MXene 材料在骨组织工程领域应用的研究进展进行了归纳总结, 现报告如下。

1 MXene 材料概述

2011 年 Gogotsi 团队发现了一种新型二维材料, 将其命名为 MXene; MXene 的化学通式为 $M_{n+1}X_nT_x$, 其中 M 代表过渡金属元素, 如 Ti、Mo、Cr 等; X 代表 C 或 N 元素; T_x 代表表面修饰基团, 如 -OH、-O 或 -F 等^[3-5] (图 1)。表面带有 -OH、-F、-O 等基团, 使 MXene 材料不仅具有良好的亲水性和生物相容性, 还易于与其他材料复合^[6-8]。过渡金属碳化物/氮化物主链的自由电子赋予了 MXene 材料优良的导电性^[9]。同时, MXene 材料在近红外光谱 (near infrared spectrum, NIR) 照射下具有较强的光热转换能力^[10], 提示 MXene 材料在光热疗法方面具有较大的应用潜力。此外, MXene 材料在含氧和水的环境中不稳定,

易在含有 H_2O_2 的环境中被过氧化氢酶、纤维素酶等降解, 显示出良好的生物降解能力^[11-12]。此外, MXene 材料具有高比表面积、声动力学效应、低细胞毒性等特性^[13-19]。这些特性使 MXene 材料在促进骨再生、抗菌、抗骨肿瘤等骨组织工程领域具有广泛的应用前景。见图 2。

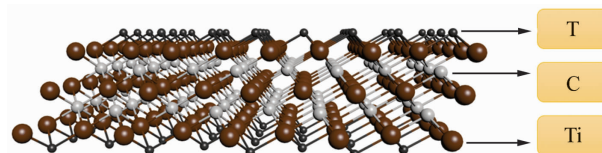


图 1 MXene 材料 $Ti_3C_2T_x$ 化学结构示意图

2 Mxene 材料促进骨再生的作用

2.1 通过调控成骨相关基因表达促进骨再生

骨髓间充质干细胞 (bone marrow stem cell, BMSC) 是骨缺损后骨修复所需成骨细胞的重要来源, 而 MXene 材料能够促进 BMSC 成骨分化, 发挥促进骨修复的作用。Mi 等^[20]研究发现, 添加了 Ti_3C_2 MXene 的支架比未添加 Ti_3C_2 MXene 的支架具有更强的促成骨分化能力。Jang 等^[21]探究了 MXene 材料的含量对成骨的影响, 结果显示培养基中 MXene 材料浓度 $< 20 \mu g \cdot mL^{-1}$ 时, 人间充质干细胞具有更强的增殖和成骨分化能力, 而 MXene 材料浓度 $> 50 \mu g \cdot mL^{-1}$ 时则出现细胞毒性。为了进一步研究 MXene 材料促成骨的具体作用机制, Nie 等^[22-28]采用 MXene 材料制备了新型支架, 结果显示新型支架能够促进 BMSC 增殖及 Runt 相关转录因子 2 (runt-related transcription factor 2, Runx2)、碱性磷酸酶 (alkaline phosphatase,

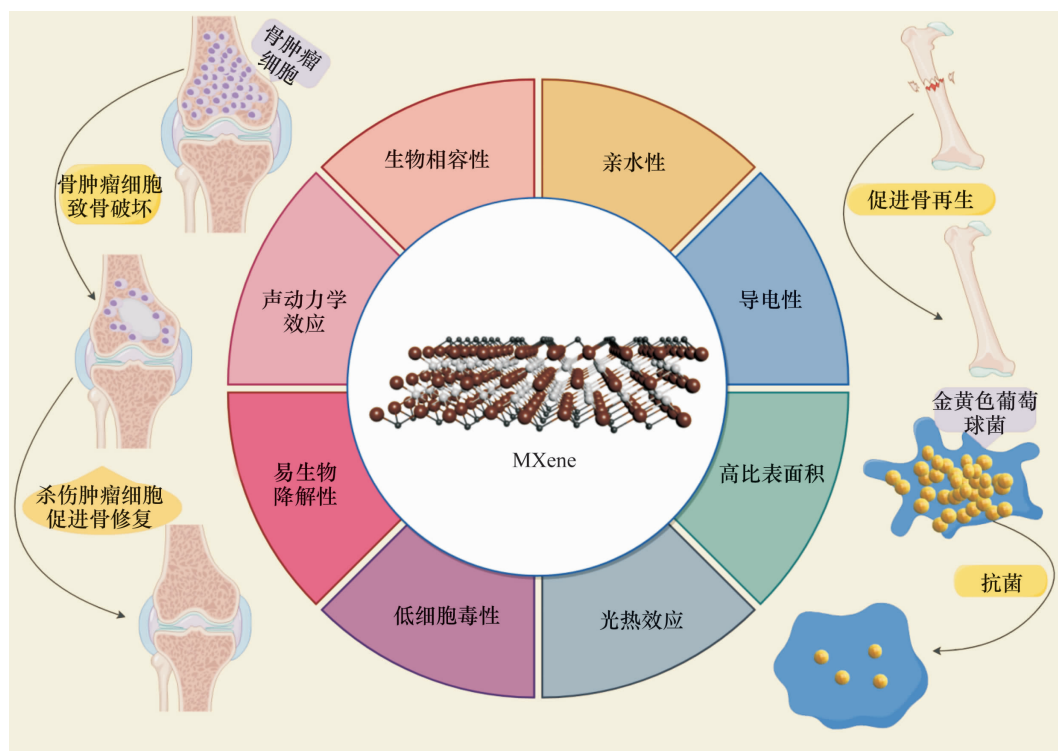


图2 MXene 材料的特性及应用

ALP)、骨钙素、骨桥蛋白等与成骨分化相关的基因表达,进而发挥促进成骨的作用,而在适宜的 NIR 刺激下其促成骨效应更强。此外,陈希鹏^[29]分析了加入 Ti_3C_2 的聚乙二醇-共聚己内酯支架与纯聚乙二醇-共聚己内酯支架上细胞的差异表达基因,发现 Ti_3C_2 可上调肌腱蛋白 N、碘甲腺氨酸脱碘酶 2 基因表达来促进成骨分化。Wnt/ β -联蛋白通路是成骨分化的重要通路,MXene 材料可通过激活该通路来稳定缺氧诱导因子-1 α (hypoxia-inducible factor-1 α , HIF-1 α) 表达,而 HIF-1 α 作为细胞代谢的关键调控因子,能够使细胞代谢从氧化磷酸化向糖酵解转变,这种代谢转变可为成骨分化提供充足的能量和生物合成前体,进而促进 Runx2、ALP 等成骨相关基因表达^[29-31],而且这种效应在 NIR 的作用下会进一步增强。此外,MXene 材料还可以通过胞外信号调节激酶信号通路激活热休克蛋白 70,进而调控脂肪来源干细胞的成骨分化,增强骨组织的自我修复^[32-33]。见图 3。

2.2 通过调节免疫微环境促进骨再生

MXene 材料能够通过调节巨噬细胞 M1、M2 极化状态,改善局部免疫微环境,从而抑制活性氧 (reactive oxygen species, ROS) 介导的炎症反应;在 NIR 的作用下,MXene 材料的光热效应可以进一步诱导巨噬细胞向抗炎的 M2 表型极化,表现为抗炎标志物精氨酸酶 1 表达增加,而促炎标志物诱导型一氧化氮合酶表达

减少;这种免疫调节作用有助于减轻炎症反应,为新骨生成创造有利的微环境,从而促进骨组织的修复和再生^[23-24,34-35]。假体植入后的炎症反应可能会对骨愈合产生不利影响。 Nb_2C MXene 能够通过吸附 ROS 来调节局部炎症微环境,即减少炎症因子产生、抑制破骨细胞的生成和活性,减少骨溶解,进而促进骨组织的修复和再生^[36-37]。见图 3。

2.3 利用光热转化效应促进骨再生

MXene 材料可通过光热转化效应促进 BMSC 增殖分化及矿化物质形成^[23,38]。MXene 材料可以通过促进钙、磷沉积,为成骨提供原料,进而促进成骨细胞的黏附和增殖^[39-41],在 NIR 的作用下这种效应会进一步增强^[42-45]。适度的热刺激对成骨分化具有促进作用。徐志民^[46]在开发骨组织工程支架时加入了一定量的 MXene 材料;结果显示,在一定范围内,随着 MXene 材料含量增加,支架的光热转化效应及亲水性增强,MXene 材料含量为 5% 时促进骨修复的能力最强,且无明显细胞毒性。Gu 等^[33]在采用 MXene 材料、乳酸-羟基乙酸共聚物和淫羊藿素构建复合微球的研究中发现,MXene 材料的加入可赋予复合微球光热转化能力,可在体内外促进细胞增殖分化,同时还能促进药物释放。见图 3。

2.4 利用导电性促进骨再生

适度的电刺激对骨形成具有促进作用,因此电

刺激与导电材料联合应用在骨缺损治疗方面具有较高价值。基于此,研究人员开发了含有 MXene 材料的水凝胶,该材料能激活 Ca^{2+} /钙调蛋白信号通路,上调成骨相关基因表达,促进间充质干细胞向成骨细胞分化;而且 MXene 材料含量与水凝胶促进增殖所需的电刺激有关^[47-48]。虽然电刺激已被证实对骨修复确有实效,但如何调控生物材料的表面电位是目前研究的难点。Fu 等^[49]采用静电纺丝法制备了 MXene/聚偏二氟乙烯纳米复合膜,发现 MXene 材料的含量变化可以使复合膜的表面电位分布更均匀,同时还能改变复合膜的形态,从而促进细胞募集、生长,促进骨细胞分化,进而促进骨再生修复。见图 3。

2.5 利用声动力学效应促进骨再生

声动力学疗法被广泛用于解决光动力学疗法中使用 NIR 时组织渗透不良的问题。Wang 等^[50]开发了一种复合材料,由卟啉金属有机骨架、 Ti_3C_2 纳米片共同合成,该材料可在低强度超声作用下促进骨缺损修复,其机制是通过调控细胞周期、DNA 复制和细胞凋亡来促进干细胞增殖。Yu 等^[51]开发的载有 CaO_2 的二维 Ti_3C_2 材料纳米片,具有优异的声动力学效应,可使 CaO_2 诱导 Ti_3C_2 原位氧化,在其表面产生声敏剂 TiO_2 来促进 Ca^{2+} 沉积,进而促进成骨。

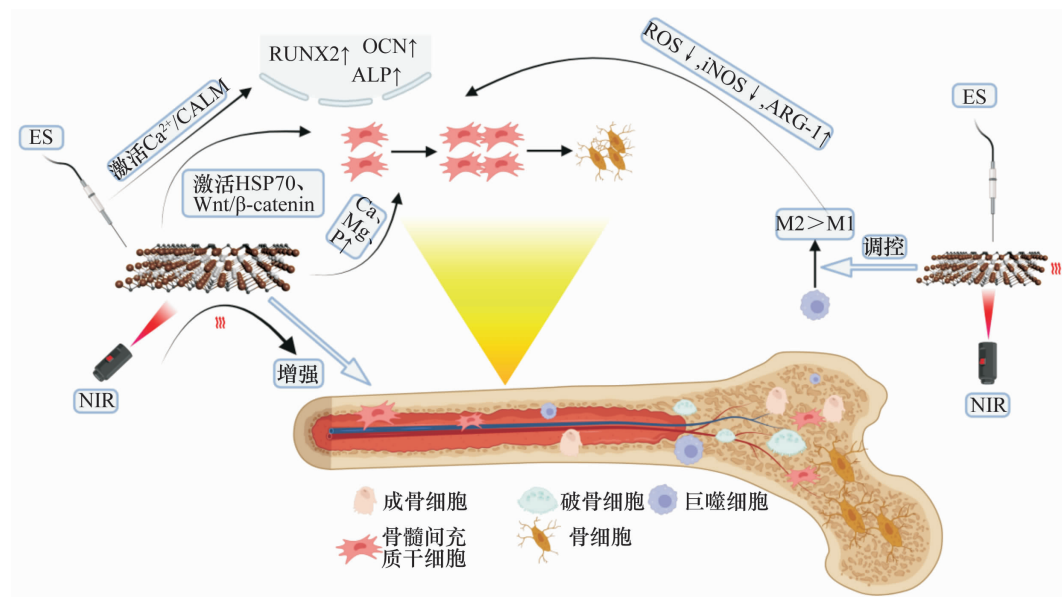
3 MXene 材料的抗菌作用

3.1 利用光热转化效应发挥抗菌作用

光辅助抗菌治疗是一种新型的非药物抗菌方案。基于 MXene 材料优异的光热转化能力,Huang 等^[52]设计了 MXene/ CaO_2 材料,体外实验表明,相比于对照组,含有 MXene 材料的实验组在 NIR 干预 15 min 的情况下,对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌及耐甲氧西林金黄色葡萄球菌的杀灭率接近 100%。Qu 等^[32]在研究 MXene 材料对感染伤口愈合效果影响的研究中发现,MXene 材料具有促进感染伤口愈合的能力,在 NIR 的干预下抗感染能力更强。为进一步揭示 MXene 材料通过光热转化效应发挥抗菌作用的机制,多位学者进行了相关的研究。他们的研究发现,在 NIR 的干预下,MXene 材料可在极短时间内将局部温度升高至 $40.8 \sim 59.6\text{ }^\circ\text{C}$,认为 MXene 材料的光热抗菌作用是通过破坏细菌生物膜,使细菌生物膜的通透性增加,导致细胞内容物泄露,干扰细菌的增殖代谢过程来发挥抗菌作用^[28,53-56]。见图 4。

3.2 通过促进 ROS 释放发挥抗菌作用

ROS 具有出色的抗菌能力,而 MXene 材料可以通过多种效应促进 ROS 产生。第一,在 NIR 的作用下,MXene 材料可产生大量的 ROS 及其他氧化物质来发挥抗菌作用,并与光热效应产生的高温来协同杀



ES 为电刺激,NIR 为近红外光谱,CALM 为钙调蛋白,HSP70 为热休克蛋白 70,β-catenin 为 β-联蛋白,Runx2 为 Runt 相关转录因子 2,OCN 为骨钙素,ALP 为碱性磷酸酶,ROS 为活性氧,iNOS 为诱导型一氧化氮合酶,ARG-1 为精氨酸酶-1,M1、M2 为巨噬细胞的 2 种不同极化状态。

图 3 MXene 材料促进骨再生机制示意图

灭细菌^[52,56]。其二,在超声的作用下,MXene 材料产生声电流并渗透到组织内部,刺激机体产生大量 ROS 来杀灭致病菌^[50-51]。其三,MXene 材料优异的导电性有助于加速电荷分离,提高光催化活性,增强氧化损伤的能力^[57]。见图 4。

以上研究表明,MXene 材料可以通过其优异的光热效应产生高温、促进 ROS 释放、干扰细菌增殖代谢,同时还可以通过声动力学效应促进 ROS 产生来共同发挥抗菌效应。

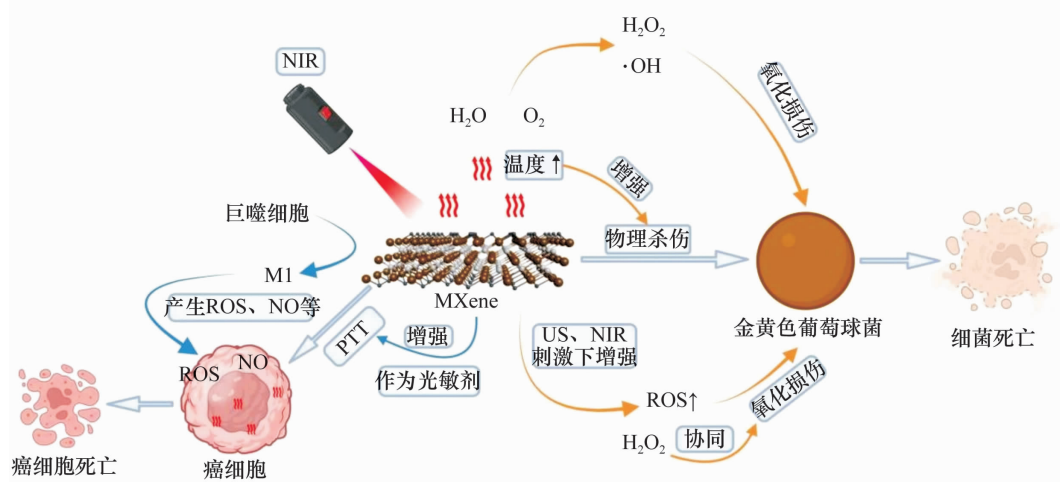
4 MXene 材料的抗骨肿瘤作用

目前,骨肿瘤治疗面临的主要难题是无法根除肿瘤细胞和骨再生能力不足。采用放疗、化疗治疗骨肿瘤的预后往往不尽人意,而且不良反应较多。术后植入具有促进骨再生和抗肿瘤作用的支架或将成为治疗骨肿瘤的可行方法。很多研究者基于 MXene 材料设计了一系列新型支架,通过 808 nm NIR 照射,含有 MXene 材料的支架可以在短时间内使局部温度上升至 45 ℃ 以上,可对肿瘤细胞进行热消融,并且可以促进骨缺损修复^[11,44,58-59]。Liang 等^[60]合成了 RhRu/Ti₃C₂T_x,并将其运用于骨肿瘤的化学动力疗法、光动力疗法和光热疗法的协同治疗,结果显示 RhRu/Ti₃C₂T_x 能够提高类酶活性,类酶作为光热转化的催化剂,可提高 MXene 材料对骨肿瘤光热消融的效率,同时还能够促进细胞产生大量 ROS,催化 H₂O₂ 产生羟基自由基来杀伤肿瘤细胞。MXene 材料特殊的层状结构使其具有优异的载药性。基于 MXene 材料设计的水凝胶、微球等材料,不仅能够将抗癌药物负载

到材料中,使药物能够精确到达病灶,而且在 NIR 作用下,MXene 材料能够快速产生高温,促进药物释放,对骨肿瘤细胞进行热消融和药物的双重杀灭^[61-63]。研究发现,Nb₂C MXene 可与 S-亚硝基硫醇、生物活性玻璃等合成新型支架,在 NIR-Ⅱ 激发下,Nb₂C 的光热效应与 S-亚硝基硫醇精准释放的 NO 相结合,实现多方位促进肿瘤消融、骨缺损修复及血管新生^[64-66]。见图 4。

5 小 结

MXene 材料因其独特的物理化学性质,在骨组织工程领域展现出广阔的应用前景。它不仅能够通过调控成骨相关基因表达、调节免疫微环境,以及利用光热转化效应、导电性、声动力学效应等多种机制促进骨再生,还具有显著的抗菌和抗骨肿瘤作用。虽然 MXene 材料在骨组织工程领域的应用潜力巨大,但仍需进一步研究其长期生物安全性及临床转化的可行性。例如在 MXene 材料的生产方面,虽有多种制取方式,但在纯度、刻蚀剂残留、不同批次之间的质量一致性等方面仍存在问题;MXene 材料虽具有良好的生物降解性,但其降解所产生的 Ti⁴⁺、Al³⁺,如果过量将可能产生细胞毒性;随着 MXene 材料的降解,其治疗效果可能随之降低,影响长期治疗效果;治疗中大量产生的 ROS 可能会导致慢性炎症。未来基于上述问题继续研究、改进,MXene 材料有望成为一种多功能的骨组织工程材料,为骨缺损修复、抗感染及骨肿瘤治疗提供创新性解决方案。



NIR 为近红外光谱,ROS 为活性氧,M1 为巨噬细胞的一种极化状态,PTT 为光热疗法,·OH 为羟基自由基,US 为超声。

图 4 MXene 材料抗菌和抗肿瘤机制示意图

参考文献

- [1] DIMITRIOU R, JONES E, MCGONAGLE D, et al. Bone regeneration: current concepts and future directions[J]. BMC Med, 2011, 9: 66.
- [2] DIMITRIOU R, MATALIOTAKIS G I, ANGOULES A G, et al. Complications following autologous bone graft harvesting from the iliac crest and using the RIA: a systematic review[J]. Injury, 2011, 42(Suppl 2): S3 – S15.
- [3] NAGUIB M, KURTOGLU M, PRESSER V, et al. Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti_3AlC_2 [J]. Adv Mater, 2011, 23(37): 4248 – 4253.
- [4] NAGUIB M, MASHTALIR O, CARLE J, et al. Two-dimensional transition metal carbides [J]. ACS Nano, 2012, 6(2): 1322 – 1331.
- [5] LIN H, CHEN Y, SHI J. Insights into 2D MXenes for versatile biomedical applications: current advances and challenges ahead[J]. Adv Sci (Weinh), 2018, 5(10): 1800518.
- [6] 徐斌. MXene 材料: 制备、性质与储能应用[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [7] ZHANG J, FU Y, MO A. Multilayered titanium carbide MXene film for guided bone regeneration[J]. Int J Nanomedicine, 2019, 14: 10091 – 10103.
- [8] KAYALI E, VAHIDMOHAMMADI A, ORANGI J, et al. Controlling the dimensions of 2D MXenes for ultrahigh-rate pseudocapacitive energy storage[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2018, 10(31): 25949 – 25954.
- [9] ZHANG Y Z, WANG Y, JIANG Q, et al. MXene printing and patterned coating for device applications[J]. Adv Mater, 2020, 32(21): e1908486.
- [10] LIN H, WANG X, YU L, et al. Two-dimensional ultrathin MXene ceramic nanosheets for photothermal conversion[J]. Nano Lett, 2017, 17(1): 384 – 391.
- [11] LIN H, GAO S, DAI C, et al. A Two-dimensional biodegradable niobium carbide (MXene) for photothermal tumor eradication in NIR- I and NIR- II Biowindows[J]. J Am Chem Soc, 2017, 139(45): 16235 – 16247.
- [12] MAO L, HU S, GAO Y, et al. Biodegradable and electroactive regenerated bacterial cellulose/MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) composite hydrogel as wound dressing for accelerating skin wound healing under electrical stimulation[J]. Adv Healthc Mater, 2020, 9(19): e2000872.
- [13] HUANG H, FENG W, CHEN Y. Two-dimensional biomaterials: material science, biological effect and biomedical engineering applications[J]. Chem Soc Rev, 2021, 50(20): 11381 – 11485.
- [14] LEE I C, LI Y E, THOMAS J L, et al. Recent advances using MXenes in biomedical applications[J]. Mater Horiz, 2024, 11(4): 876 – 902.
- [15] HUANG H, DONG C, FENG W, et al. Biomedical engineering of two-dimensional MXenes[J]. Adv Drug Deliv Rev, 2022, 184: 114178.
- [16] WANG X, YU Y, YANG C, et al. Dynamically responsive scaffolds from microfluidic 3D printing for skin flap regeneration[J]. Adv Sci (Weinh), 2022, 9(22): e2201155.
- [17] LIAO M, CUI Q, HU Y, et al. Recent advances in the application of MXenes for neural tissue engineering and regeneration[J]. Neural Regen Res, 2024, 19(2): 258 – 263.
- [18] ASARO G A, SOLAZZO M, SUKU M, et al. MXene functionalized collagen biomaterials for cardiac tissue engineering driving iPSC-derived cardiomyocyte maturation[J]. NPJ 2D Mater Appl, 2023, 7(1): 44.
- [19] KHAISI M A, SHIRINI F, SHIRINI K, et al. Additively manufactured MAX- and MXene-composite scaffolds for bone regeneration- recent advances and future perspectives [J]. Colloids Surf B Biointerfaces, 2023, 225: 113282.
- [20] MI X, SU Z, FU Y, et al. 3D printing of Ti_3C_2 -MXene-incorporated composite scaffolds for accelerated bone regeneration[J/OL]. Biomed Mater, 2022, 17(3) [2025 – 01 – 01]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35316803>.
- [21] JANG J H, LEE E J. Influence of MXene Particles with a stacked-lamellar structure on osteogenic differentiation of human mesenchymal stem cells [J]. Materials (Basel), 2021, 14(16): 4453.
- [22] NIE R, SUN Y, LV H, 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.
- [23] XIA S, LIU D, JIANG K, et al. Photothermal driven BMSCs osteogenesis and M2 macrophage polarization on polydopamine-coated Ti_3C_2 nanosheets/poly(vinylidene fluoride trifluoroethylene) nanocomposite coatings [J]. Mater Today Bio, 2024, 27: 101156.
- [24] HUANG B, LI S, DAI S, et al. $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene-decorated 3D-printed ceramic scaffolds for enhancing osteogenesis by spatiotemporally orchestrating inflammatory and bone repair responses[J]. Adv Sci (Weinh), 2024, 11(34): e2400229.
- [25] YU F, ZHAO X, ZHANG S, et al. Regulation of T cell glycosylation by MXene/ β -TCP nanocomposite for enhanced mandibular bone regeneration [J]. Adv Healthc Mater, 2025, 14(6): e2404015.

- [26] ZHU Y, LIU H, WU P, et al. Multifunctional injectable hydrogel system as a mild photothermal-assisted therapeutic platform for programmed regulation of inflammation and osteo-microenvironment for enhanced healing of diabetic bone defects in situ [J]. *Theranostics*, 2024, 14 (18): 7140 – 7198.
- [27] LEE S H, JEON S, QU X, et al. Ternary MXene-loaded PLCL/collagen nanofibrous scaffolds that promote spontaneous osteogenic differentiation [J]. *Nano Converg*, 2022, 9(1): 38.
- [28] ZHAO Y, KANG H, XIA Y, et al. 3D printed photothermal scaffold sandwiching bacteria inside and outside improves the infected microenvironment and repairs bone defects [J]. *Adv Healthc Mater*, 2024, 13(6): e2302879.
- [29] 陈希鹏. 3D 打印负载盐酸万古霉素的 PGCL@Ti₃C₂ 多功能支架在急性感染性骨缺损治疗中的实验研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [30] CUI D, KONG N, DING L, et al. Ultrathin 2D titanium carbide MXene (Ti₃C₂T_x) nanoflakes activate wnt/hif-1 α -mediated metabolism reprogramming for periodontal regeneration [J]. *Adv Healthc Mater*, 2021, 10(22): e2101215.
- [31] LEE S H, KANG M S, JEON S, et al. 3D bioprinting of human mesenchymal stem cells-laden hydrogels incorporating MXene for spontaneous osteodifferentiation [J]. *Heliyon*, 2023, 9(3): e14490.
- [32] QU X, GUO Y, XIE C, et al. Photoactivated MXene nanosheets for integrated bone-soft tissue therapy: effect and potential mechanism [J]. *ACS Nano*, 2023, 17(8): 7229 – 7240.
- [33] GU C, CHEN H, ZHAO Y, et al. Ti₃C₂T_x@PLGA/Icaritin microspheres-modified PLGA/ β -TCP scaffolds modulate icaritin release to enhance bone regeneration through near-infrared response [J/OL]. *Biomed Mater*, 2024, 19(5) [2025-01-01]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39121886>.
- [34] WU M, LIU H, ZHU Y, et al. Mild photothermal-stimulation based on injectable and photocurable hydrogels orchestrates immunomodulation and osteogenesis for high-performance bone regeneration [J]. *Small*, 2023, 19(28): e2300111.
- [35] LI J, FAN Z, GUAN Z, et al. Injectable MXene/Ag-HA composite hydrogel for enhanced alveolar bone healing and mechanistic study [J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2024, 12: 1485437.
- [36] SUN K Y, WU Y, XU J, et al. Niobium carbide (MXene) reduces UHMWPE particle-induced osteolysis [J]. *Bioact Mater*, 2022, 8: 435 – 448.
- [37] YANG C, LUO Y, LIN H, et al. Niobium carbide MXene augmented medical implant elicits bacterial infection elimination and tissue regeneration [J]. *ACS Nano*, 2021, 15(1): 1086 – 1099.
- [38] WEI D, ZENG M, SU B, et al. Bioactive cell niche mediating uniform thermal stimulus for BMSC neural differentiation through TRPV1 channel activation [J]. *J Mater Chem B*, 2023, 11(28): 6567 – 6580.
- [39] 秦晓莉. 海藻酸盐/明胶/MXene 复合膜的制备及在引导骨再生中的应用研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
- [40] QIN X, PAN H, YANG K, et al. Biodegradable and biocompatible alginate/gelatin/MXene composite membrane with efficient osteogenic activity and its application in guided bone regeneration [J]. *J Biomater Sci Polym Ed*, 2023, 34(13): 1843 – 1857.
- [41] QIN X, LEI S, YANG K, et al. Green synthetic sodium alginate-glycerol-MXene nanocomposite membrane with excellent flexibility and mineralization ability for guided bone regeneration [J]. *J Mech Behav Biomed Mater*, 2024, 150: 106336.
- [42] LI C, CHU D, JIN L, et al. Synergistic effect of the photothermal performance and osteogenic properties of MXene and hydroxyapatite nanoparticle composite nanofibers for osteogenic application [J]. *J Biomed Nanotechnol*, 2021, 17(10): 2014 – 2020.
- [43] 李成成. 光响应性纳米纤维的制备及其成骨性能研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2022.
- [44] ZHANG G, LU Y, SONG J, et al. A multifunctional nano-hydroxyapatite/MXene scaffold for the photothermal/dynamic treatment of bone tumours and simultaneous tissue regeneration [J]. *J Colloid Interface Sci*, 2023, 652 (Pt B): 1673 – 1684.
- [45] ZHANG J, TANG S, DING N, et al. Surface-modified Ti₃C₂ MXene nanosheets for mesenchymal stem cell osteogenic differentiation via photothermal conversion [J]. *Nanoscale Adv*, 2023, 5(11): 2921 – 2932.
- [46] 徐志民. 3D 打印 MXene/PCL 原位骨组织工程支架及其成骨分子机制的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [47] HU Z C, LU J Q, ZHANG T W, et al. Piezoresistive MXene/silk fibroin nanocomposite hydrogel for accelerating bone regeneration by re-establishing electrical microenvironment [J]. *Bioact Mater*, 2023, 22: 1 – 17.
- [48] BHASKAR N, KACHAPPILLY M C, BHUSHAN V, et al. Electrical field stimulated modulation of cell fate of pre-os-

- teoblasts on PVDF/BT/MWCNT based electroactive biomaterials[J]. J Biomed Mater Res A, 2023, 111(3):340 – 353.
- [49] FU Y, HUANG S, FENG Z, et al. MXene-functionalized ferroelectric nanocomposite membranes with modulating surface potential enhance bone regeneration[J]. ACS Biomater Sci Eng, 2023, 9(2):900 – 917.
- [50] WANG H, MU N, HE Y, et al. Ultrasound-controlled MXene-based schottky heterojunction improves anti-infection and osteogenesis properties[J]. Theranostics, 2023, 13(5):1669 – 1683.
- [51] YU Y, SUN H, LU Q, et al. Spontaneous formation of MXene-oxidized sono/chemo-dynamic sonosensitizer/nanocatalyst for antibacteria and bone-tissue regeneration[J]. J Nanobiotechnology, 2023, 21(1):193.
- [52] HUANG Y, LI J, YU Z, et al. Elaborated bio-heterojunction with robust sterilization effect for infected tissue regeneration via activating competent cell-like antibacterial tactic[J]. Adv Mater, 2024, 36(48):e2414111.
- [53] DU T, ZHAO S, DONG W, et al. Surface modification of carbon fiber-reinforced polyetheretherketone with MXene nanosheets for enhanced photothermal antibacterial activity and osteogenicity[J]. ACS Biomater Sci Eng, 2022, 8(6):2375 – 2389.
- [54] HE X, QIAN Y, WU C, et al. Entropy-mediated high-entropy MXenes nanotherapeutics: NIR-II-enhanced intrinsic oxidase mimic activity to combat methicillin-resistant staphylococcus aureus infection[J]. Adv Mater, 2023, 35(26):e2211432.
- [55] 聂然. 3D 打印 MXene 复合水凝胶支架对口腔感染性骨缺损抗菌成骨作用的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [56] 王晓岚. 基于 Ti_3C_2 MXenes 复合材料的构建及其在抗菌材料领域的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
- [57] CHENG H, WANG J, YANG Y, et al. $Ti_3C_2T_x$ MXene Modified with ZnTCPP with bacteria capturing capability and enhanced visible light photocatalytic antibacterial activity[J]. Small, 2022, 18(26):e2200857.
- [58] PAN S, YIN J, YU L, et al. 2D MXene-integrated 3D-printing scaffolds for augmented osteosarcoma phototherapy and accelerated tissue reconstruction[J]. Adv Sci (Weinh), 2020, 7(2):1901511.
- [59] YIN J, HAN Q, ZHANG J, et al. MXene-based hydrogels endow polyetheretherketone with effective osteogenicity and combined treatment of osteosarcoma and bacterial infection[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2020, 12(41):45891 – 45903.
- [60] LIANG Y, LIAO C, GUO X, et al. Rhru alloy-anchored MXene nanozyme for synergistic osteosarcoma therapy[J]. Small, 2023, 19(22):e2205511.
- [61] PEKTAS H K, DEMIDOV Y, AHVAN A, et al. MXene-integrated silk fibroin-based self-assembly-driven 3D-printed theragenerative scaffolds for remotely photothermal anti-osteosarcoma ablation and bone regeneration[J]. ACS Mater Au, 2023, 3(6):711 – 726.
- [62] ZHAO Y, CHEN H, FU J, et al. Drug-loaded microspheres on NIR-responsive PLA/MXene scaffolds: controlled release and bone tissue regeneration[J]. ACS Appl Bio Mater, 2025, 8(1):285 – 298.
- [63] HUI T, FU J, ZHENG B, et al. Subtractive nanopore engineered MXene photonic nanomedicine with enhanced capability of photothermia and drug delivery for synergistic treatment of osteosarcoma[J]. ACS Appl Mater Interfaces, 2023, 15(43):50002 – 50014.
- [64] YANG Q, YIN H, XU T, et al. Engineering 2D mesoporous Silica@MXene-integrated 3D-printing scaffolds for combinatory osteosarcoma therapy and no-augmented bone regeneration[J]. Small, 2020, 16(14):e1906814.
- [65] YIN J, PAN S, GUO X, et al. Nb₂C MXene-functionalized scaffolds enables osteosarcoma phototherapy and angiogenesis/osteogenesis of bone defects[J]. Nanomicro Lett, 2021, 13(1):30.
- [66] 杨前昊. 负载介孔二氧化硅 MXene 复合材料合并 3D 打印支架协同治疗骨肉瘤促进骨修复[D]. 上海: 上海交通大学, 2022.

(收稿日期:2025-01-17 本文编辑:李晓乐)