



Part B: Persian Edition

Journal of Textiles and Polymers

Vol. 11, No. 2, 85-114, April 2023

<http://doi.org/10.48302/jtp.2023.411142.1270>



REVIEW PAPER

An overview of recent advances in the development of MXene nanoplates-based textiles

Mansoor Mandegari¹, Komeil Nasouri^{1*}, Laleh Ghasemi-Mobarakeh¹

1. Department of Textile Engineering, Isfahan University of Technology, P.O. Box: 84156-83111, Isfahan, Iran

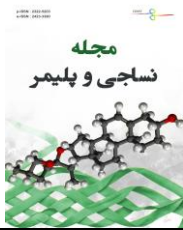
Received: 11 August 2023, Accepted: 9 September 2023

Abstract

Carbon has a broad variety of different allotropes such as graphite, diamond, fullerene, carbon black, carbon nanotube, and graphene, each of which has unique properties. Graphene has significant advantages in structural, electrical, and thermal properties and therefore has attracted global attention. Despite the desirable properties of graphene, the using of this material in some composite materials has reduced their electrical properties. Also, according to surface chemistry, graphene is very hydrophobic and does not disperse well in aqueous solutions, is not very suitable for biological applications, and requires a surfactant or surface modification. Therefore, the production and introduction of new two dimensional (2D) structures that do not have the challenges of graphene can create a new research field in the future. In the meantime, MXene 2D nanosheets have achieved double importance due to their layered structure and suitable physical, chemical, and mechanical properties in various fields such as electrochemical, magnetic, optical, and medical. MXene is a 2D nanosheet of conductive metals nitride or carbide that was first synthesized in 2011. Due to its unique properties and excellent performance in many applications, it quickly attracted research attention after 2018 and has replaced graphene in numerous applications. Nowadays, MXene nanosheets are coated in various methods on fiber structures in order to add suitable properties to textiles and be used in different applications such as conductive coatings, shielding of electromagnetic waves, antibacterial, flame retardant, and especially the production of multifunctional textiles. In this paper, after introducing MXene nanosheets, their synthesis protocols, properties, and textile applications are reviewed.

Keywords: Graphene, MXene, 2D nanosheets, synthesis, textiles.

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail : k.nasouri@iut.ac.ir



مروری بر پیشرفت‌های اخیر در توسعه منسوجات مبتنی بر نانوصفحات مکسین

منصور ماندگاری^۱، کمیل نصوری^{۱*}، لاله قاسمی مبارکه^۱

۱- اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی نساجی، صندوق پستی: ۸۳۱۱۱-۸۴۱۵۶

دریافت: ۱۴۰۲/۵/۲۰ و پذیرش: ۱۴۰۲/۶/۱۸

چکیده

کاربردها، به سرعت توجه تحقیقات را بعد از سال ۲۰۱۸ به خود جلب کرده و جایگزین گرافن در بسیاری از کاربردها شده است. امروزه مکسین‌ها به روش‌های مختلفی بر روی سازه‌های الیافی پوشش‌دهی می‌شوند تا بتوانند خصوصیات مناسبی را به منسوجات اضافه کنند و در کاربردهای متنوعی مثل پوشش‌های رسانا، محافظ امواج الکترومغناطیس، ضدباکتری، بازدارنده شعله و خصوصاً تولید منسوجات چندمنظوره استفاده شوند. در این مقاله، پس از معرفی نانوصفحات مکسین، روش‌های سنتز، خواص و کاربردهای آن در نساجی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

واژه‌های کلیدی: گرافن، مکسین، نانو صفحات دوبعدی، سنتز، منسوجات.

۱ مقدمه

کربن یکی از فراوان‌ترین و پرکاربردترین عناصر در سازه‌های مهندسی است که تقریباً در اکثر صنایع، کاربرد فراوان دارد. از نظر شیمیایی کربن در میانه جدول تناوبی قرار دارد و از نظر الکترونگاتیویته حد واسط بین فلزات و نافلزات است.

کربن دارای تنوع زیادی از دگرشکل‌ها همچون گرافیت، الماس، فولرن، کربن سیاه، نانولوله کربنی و گرافن است که هرکدام از آن‌ها نسبت به یکدیگر خواص منحصر به فردی دارند. گرافن دارای برتری‌های محسوس در خواص ساختاری، الکتریکی و حرارتی بوده و بنابراین توجهات جهانی را به خود جلب کرده است. چالش مهم در این راه، سنتز گرافن تک‌لایه و خالص است. علی‌رغم ویژگی‌های مطلوب گرافن، استفاده از این ماده در برخی مواد مرکب باعث کاهش خصوصیات الکتریکی آن‌ها شده است. همچنین با توجه به شیمی سطح، گرافن بسیار آب‌گریز بوده و به خوبی در محلول‌های آبی پخش نمی‌شود و برای کاربردهای بیولوژیکی چندان مناسب نیست و به سطح فعال یا اصلاح سطح نیاز دارد؛ بنابراین تولید و معرفی ساختارهای جدید دوبعدی که چالش‌های گرافن را نداشته باشد می‌تواند زمینه تحقیقاتی جدیدی را در آینده به وجود آورد. در این میان، نانو صفحات دوبعدی مکسین به دلیل ساختار لایه‌ای و خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی مناسب در زمینه‌های متنوعی از جمله الکتروشیمیایی، مغناطیسی، نوری و پزشکی اهمیت دوچندان یافته است. مکسین، نانوصفحات دوبعدی از نیتريد یا کاربرد فلزات رساناست که اولین بار در سال ۲۰۱۱ سنتز شد. به دلیل خواص منحصر به فرد و عملکرد عالی در بسیاری از

* مسئول مکاتبات پیام نگار: k.nasouri@iut.ac.ir

در نانو پزشکی است [۶, ۷]. نانولوله‌های کربنی برای نخستین بار در سال ۱۹۹۱ اندکی بعد از کشف فولرن‌ها شناسایی شدند. نانولوله‌های کربنی را می‌توان به دودسته تک دیواره و چند دیواره تقسیم کرد. نانولوله کربنی تک دیواره، حاصل پیچیدن یک صفحه کربنی به دور خود است که یک استوانه به قطر 2 nm - ایجاد می‌کند. نانولوله‌های چند دیواره شامل لوله‌هایی با دو یا تعداد بیشتری صفحات گرافیتی هستند که در راستای محور طولی لوله قرار دارند. نانولوله‌های کربنی با توجه به ساختار، قطر و تغییر خواص می‌تواند ابررسانا، رسانا و یا نیمه‌هادی باشد [۵, ۷].

گرافن، یک صفحه از گرافیت و به عبارت دیگر واحد تشکیل‌دهنده گرافیت است که به صورت شبکه‌ای دو بعدی (2D) متشکل از ۶ ضلعی‌هایی با یک اتم کربن در هر رأس، با هیبرید sp^2 به هم متصل شده‌اند و اولین بار در سال ۲۰۰۴ میلادی سنتز شده است. لایه‌های گرافنی از ۵ تا ۱۱ لایه را گرافن کم‌لایه و بین ۲۱ تا ۳۱ لایه را گرافن چندلایه، گرافن ضخیم و یا نانوبلورهای نازک گرافیتی، می‌نامند. گرافن خالص تک لایه خواص شبه‌فلزی دارد [۵]. گرافن نسبت به سایر دگرشکل‌های کربن دارای برتری‌های محسوس در خواص ساختاری، الکتریکی و گرمایی است و بنابراین توجهات جهانی را به خود جلب کرده است. یکی از چالش‌ها، سنتز گرفتن تک‌لایه و خالص است. همچنین مطالعات جدید نشان داده که مقاومت در برابر شکستگی گرافن بسیار کم و نزدیک به یک جامد بسیار شکننده است. بنابراین علی‌رغم استحکام نظری فوق‌العاده گرافن، نقایص ترک مانند استفاده از این ماده را در کاربردهای عملی با مشکل مواجه ساخته است [۷, ۸]. همچنین با توجه به شیمی سطح، گرافن بسیار آب‌گریز بوده و به خوبی در آب پخش نمی‌شود و به سطح فعال یا اصلاح سطح نیاز دارد. بنابراین تولید و معرفی ساختارهای جدید 2D که چالش‌های کمتری نسبت به گرافن داشته باشد، می‌توانند زمینه تحقیقاتی جدیدی را در آینده به وجود آورند. در سال‌های اخیر، نانو صفحات دو بعدی مکسین به دلیل ساختار لایه‌ای و خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی در زمینه‌های متنوعی از جمله الکتروشیمیایی، مغناطیسی و نوری اهمیت دو

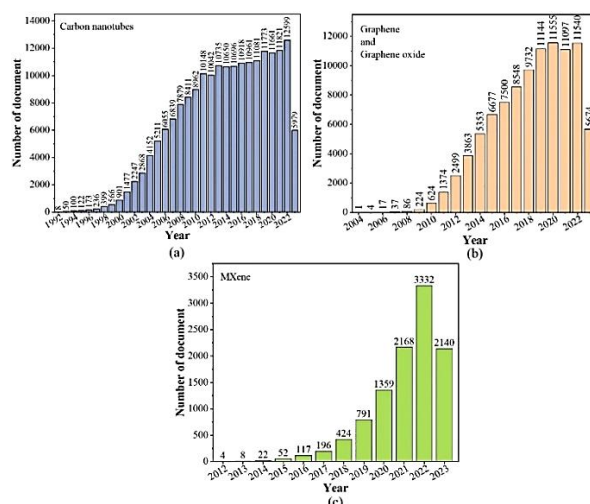
کربن به دلیل ظرفیت تشکیل پیوندهای هیبرید شده sp^3 , sp^2 , sp دارای تنوع زیادی از دگرشکل‌هاست که هر کدام از آن‌ها خواص منحصر به فرد و متفاوتی نسبت به ساختار دیگر دارد [۱]. دگرشکل‌های مختلفی از کربن و همچون گرافیت، الماس، فولرن، کربن سیاه، نانولوله کربنی گرافن وجود دارند که همه آن‌ها به صورت جامد بوده و در ساختار آن‌ها اتم‌های کربن به صورت کاملاً منظم در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. در ادامه سعی خواهد شد تا به معرفی کلی این دگرشکل‌ها پرداخته شود.

گرافیت معمولاً در ساختار شش‌وجهی یا هگزاگونال متبلور می‌شود و ساختار لایه‌لایه دارد؛ به طوری که هر لایه از کنار هم قرار گرفتن اتم‌های کربن با پیوند کووالانسی قوی شکل می‌گیرد. یک لایه گرافیت از طریق پیوندهای ضعیف واندروالس به لایه زیرین متصل می‌شود. این مسئله باعث می‌شود که صفحات گرافیت به راحتی روی یکدیگر بلغزند و خواص ویژه‌ای به وجود آورند. از جمله ویژگی‌های گرافیت می‌توان به مقاومت در برابر خوردگی، رسانایی الکتریکی و گرمایی بالا، مقاومت فشاری و شیمیایی بالا اشاره کرد [۲, ۳]. الماس عد از گرافیت، مهم‌ترین دگرشکل کربن است که در ساختار چهاروجهی یا مکعبی متبلور می‌شود. الماس دارای پیوندهای بسیار قوی کووالانسی از نوع هیبرید sp^3 است لذا به عنوان سخت‌ترین ماده در طبیعت شناخته می‌شود. از جمله ویژگی‌های مهم الماس سختی و استحکام بالا، پایداری شیمیایی و خواص گرمایی بالاست و به عنوان یک عایق شفاف کاربرد دارد [۲, ۴]. کربن سیاه به صورت تجاری از تجزیه گرمایی و اکسایشی هیدروکربن‌ها ساخته می‌شود. نام‌گذاری انواع کربن سیاه نیز بر اساس فرآیند تولید آن انجام می‌شود. حدود ۷۰ درصد از کربن سیاه تولیدی به عنوان رنگدانه و تقویت‌کننده در لاستیک‌های خودرو استفاده می‌شود [۵]. فولرن ممکن است یک کره توخالی، بیضی، لوله‌ای یا به اشکال دیگر باشد. وجود فضای خالی در وسط هر مولکول فولرن، موقعیت مناسبی جهت قرارگیری اتم و یون است که باعث بهبود خواص مختلف آن می‌شود. همین فضای خالی نیز موقعیت مناسبی برای قرارگیری برخی از داروها، هورمون‌ها و آنزیم‌ها جهت استفاده

۲ معرفی نانو صفحات مکسین

فاز MAX به‌عنوان پیش‌ماده مکسین، مجموعه‌ای از ترکیبات سه‌تایی با ساختار بلوری هگزاگونال هستند که در آن‌ها M یک فلز واسطه (به‌عنوان مثال، Sc، Ti، V، Cr، Zr، Hf، Nb، Mo، Ta و W)، A عنصری از گروه III یا IV در جدول تناوبی (معمولاً Al یا Ga) و X کربن یا نیتروژن مطابق شکل ۲-الف است [۱۱]. در سال‌های اخیر، این مواد به دلیل ویژگی‌های دو گانه فلزات و سرامیک‌ها به طور گسترده برای کاربردهای صنعتی مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱۲]. فازهای MAX دارای دمای ذوب بالا، هدایت حرارتی عالی، مدول الاستیک مطلوب، مقاومت در برابر اکسیداسیون و هدایت الکتریکی فوق‌العاده هستند [۱۳، ۱۴]. فازهای MAX با $M=Ti$ ، $A=Al$ و $X=C$ دارای خصوصیات برتری شامل فرآیندپذیری مناسب، هدایت حرارتی مطلوب، مقاومت عالی در برابر تنش و هدایت الکتریکی فوق‌العاده هستند [۱۵]. مخلوط‌های سه‌گانه Ti-Al-C را می‌توان به دو فاز Ti_2AlC (۲۱۱) و Ti_3AlC_2 (۳۱۲) طبقه‌بندی کرد. ترکیب پیوندهای ضعیف Ti-Al و پیوندهای قوی Ti-C با ساختار سه‌بعدی، منجر به خواص منحصر به فرد فازهای MAX می‌شوند [۱۶]. فازهای $Ti_{n+1}AlC_n$ با فرآیندهای مختلفی مانند سنتز احتراقی خودپیش‌رونده در دمای بالا (SHS) [۱۷، ۱۸]، آلیاژسازی مکانیکی (MA) [۱۸]، کندوپاش مغناطیسی [۱۹]، روش واکنش جامد-مایع (SLR) [۲۰]، پرس داغ (HP) [۲۱]، سنتز احتراقی (CS) [۲۲]، روش نمک مذاب (MS) [۲۳] و فرآیند تف‌جوشی پلاسمای جرقه‌ای (SPS) [۱۶] سنتز می‌شوند. مکسین‌ها با جدا کردن انتخابی عنصر A از فاز MAX به وجود می‌آیند. سطوح مکسین با گروه‌های فراوانی همچون OH، O و/یا F (که با T نمایش داده می‌شود) عامل‌دار می‌شوند که نوع و مقدار آن به روش زدایش بستگی دارد [۲۵]. شکل ۲-ب مکسین چندلایه را با فرمول کلی $M_{n+1}X_nT_x$ [۲۴]. که در آن T_x گروه‌های عاملی سطحی هستند، نشان می‌دهد. مطابق شکل ۲-ج پس از زدایش، ذرات مکسین به‌دست آمده دارای ساختار آکاردئونی مانند هستند که از نظر

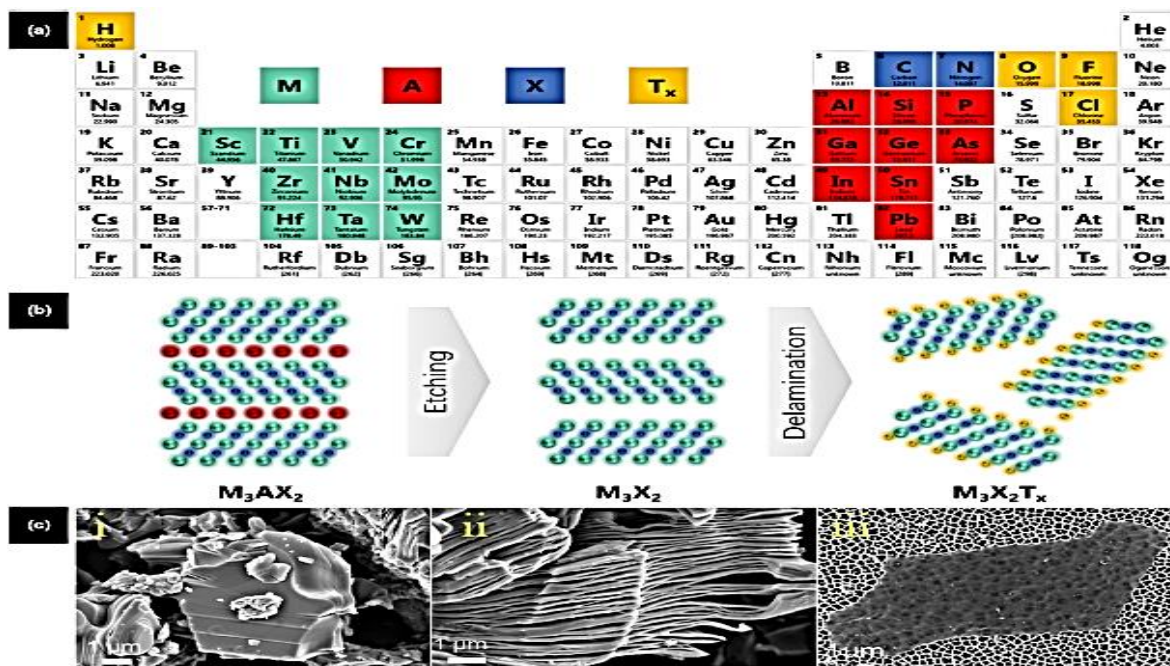
چندان یافته است. مکسین، ماده‌ای دوبعدی از نیتريد يا كاربید فلزات واسطه است که اولین بار در سال ۲۰۱۱ توسط ناگویی و همکاران سنتز شد [۹، ۱۰]. به دلیل خواص منحصر به فرد و عملکرد عالی در بسیاری از کاربردها، به سرعت توجه تحقیقات را بعد از سال ۲۰۱۸ به خود جلب کرده و جایگزین گرافن در بسیاری از کاربردها شده است. از ابتدای معرفی مکسین در سال ۲۰۱۱، تحقیقات مختلفی در سطح جهان بر روی آن انجام شده است. شکل ۱ تعداد مقالات با کلیدواژه «نانولوله‌های کربنی»، «گرافن اکساید» و «مکسین» به استناد پایگاه اسکوپوس را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تحقیقات در زمینه نانولوله‌های کربنی در بازه زمانی ۲۰۱۰ الی ۲۰۲۳ و گرافن نیز در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۹ الی ۲۰۲۳ میلادی به حد اشباع خود رسیده و رشد قابل توجهی نداشته است. در مقابل، در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۸ الی ۲۰۲۳ میلادی، تحقیقات در زمینه سنتز و کاربردهای مکسین بالاترین رشد را در بین تمامی نانوساختارها دارا بوده است. در حال حاضر در پایگاه علمی اسکوپوس، نانوساختارهای مکسین بعد از نانولوله کربنی و گرافن اکساید به عنوان پرتکرارترین کلیدواژه در بین تمامی نانو مواد در مقالات حوزه مهندسی است. بنابراین در ادامه سعی خواهد شد. روش‌های سنتز، خواص و حوزه‌های کاربردی مکسین در سازه‌های الیافی در بخش‌های جداگانه مورد مطالعه قرار گیرد.



شکل ۱- روند رشد تعداد مقالات در مجلات با کلیدواژه‌های: (a) نانولوله‌های کربنی، (b) گرافن و گرافن اکساید و (c) مکسین (منبع: اسکوپوس، جستجو در ۱۸ ژوئن ۲۰۲۳)

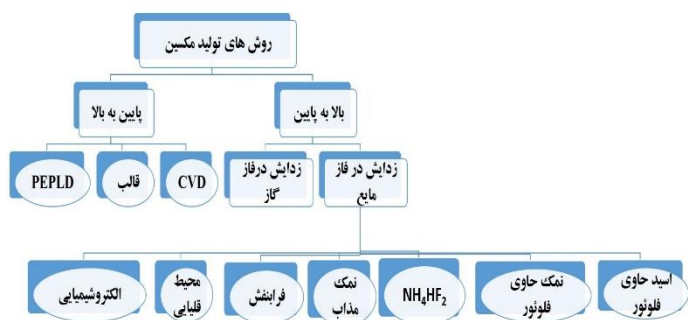
پیوندهای فلزی M-A در فاز MAX بسیار قوی هستند که برای تولید مکسین، به سختی می توان این پیوندها را به روش لایه لایه شدن مکانیکی با روشی مشابه با روش تولید گرافن، شکست [۲۸]. با استفاده از مواد زدایش کننده قوی، پیوندهای واکنش پذیر M-A می توانند شکسته و لایه های عنصر A به طور انتخابی حذف شوند [۲۹]. با در نظر گرفتن مقالات تحقیقاتی منتشر شده در سال های اخیر، با اطمینان می توان ادعا کرد که مکسین در مرز دنیای مواد دو بعدی قرار دارد [۳۰]. اولین عضو مکسین، کاربید تیتانیوم ($Ti_3C_2T_x$) است که با غوطه ور کردن فاز MAX در محلول HF تهیه شد [۹]. بلافاصله پس از آن، توجه تحقیقات زیادی را در بسیاری از زمینه ها با تمرکز بر روش های سنتز، خواص و کاربردها به خود جلب کرد. به همین دلایل مکسین ها کاربردهای گسترده ای با عملکرد چشمگیر در ابرخازن ها، باتری های قابل شارژ، فیلم های رسانای شفاف، محافظ تداخل امواج الکترومغناطیس، پوشش های ضد باکتری، تصفیه آب، پدیده گرما-نوری، ذخیره سازی هیدروژن و غیره پیدا کرده اند و تا به امروز در بسیاری از زمینه ها، از جمله آنتن ها، غشاها، ابرخازن ها و باتری های قابل شارژ، پیشرفت های مستمری ایجاد کرده اند [۳۱-۳۳].

ساختاری متمایز از فاز MAX است. پس از فرآیند لایه لایه شدن در حلال های مشخص، مکسین لایه لایه شده می تواند در حلال ها دیسپرس شود، سپس محلول های کلوئیدی تشکیل می دهد و اجازه می دهد تا محلول را به لایه های نازک، پوشش ها، کامپوزیت ها یا سایر موارد تبدیل کند [۲۵، ۲۶]. به دلیل وجود گروه های عاملی، مکسین ها آب دوست هستند و می توانند به راحتی در محیط آبی بدون کمک هیچ سطح فعالی دیسپرس شوند. علاوه بر این، سطح اکسید مانند فلز واسطه به واکنش های اکسایشی/کاهشی سریع برای رسیدن به مکسین های بسیار رسانا کمک می کند و بنابراین در شیمی سطح، خواص کاربردی کاملاً برتری نسبت گرافن دارند. رسانایی الکتریکی مکسین کاربید تیتانیوم ($Ti_3C_2T_x$) در حالت تک لایه در حدود $S.cm^{-1}$ و مدول یانگ آن ۳۳ TPa اندازه گیری شده است [۲۷]. در مکسین از پسوند -ene، به منظور دلالت بر شباهت مشترک با گرافن از نظر خواص ساختاری تک لایه، الکتریکی و مکانیکی استفاده می شود [۱۰]. گرافیت دارای نیروی ضعیف واندروالسی در بین لایه ها است که اجازه می دهد تا لایه لایه شدن میکرومکانیکی برای به دست آوردن صفحات گرافنی انجام شود. برخلاف گرافیت، پیوندهای کووالانسی صفحات M-X و



شکل ۲- (a) عناصر شیمیایی تشکیل دهنده فاز MAX و مکسین (b) فرایند زدایش و لایه لایه شدن فاز MAX جهت تبدیل به مکسین (c) تصاویر میکروسکوپ الکترونی از i- فاز MAX ii- مکسین چندلایه و iii- مکسین تک لایه [۳۴].

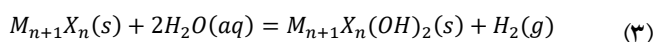
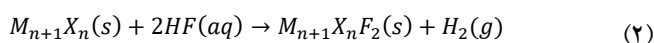
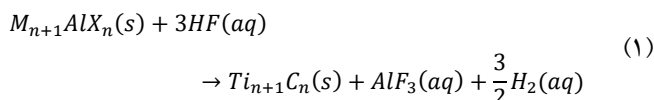
ساخت مکسین‌ها شامل زدایش در فاز مایع و زدایش در فاز گاز است.



شکل ۳ - دسته‌بندی روش‌های تولید نانوساختارهای مکسین

۳-۱-۱-۳ زدایش با اسید حاوی فلونئور

فرآیند زدایش برای اکثر پودرهای MAX مبتنی بر کاربرد به سادگی با عملیات مواد در محلول آبی اسید هیدروفلوئوریک (HF) با غلظت، دمای زدایش و مدت زمان خاص انجام می‌شود [۳۶]. لایه Al به طور انتخابی حذف شده، زیرا واکنش پذیری پیوندهای Ti-A و Ti-C متفاوت است. روابط (۱) تا (۳)، مکانیسم‌هایی که در حین زدایش رخ می‌دهد، بیان می‌کند [۳۷].



واکنش (۱) ضروری است و معمولاً با واکنش (۲)، واکنش (۳)، یا هر دو دنبال می‌شود. عملیات با HF باعث می‌شود که برخی از گروه‌های فعال مانند F، OH یا هر دو در سطح فلزات ایجاد شده و با آزاد شدن H₂ همراه باشد. شرایط زدایش با HF برای سنتز مکسین‌های مختلف بسته به شیمی و ساختار فاز اصلی، از جمله اندازه فازهای MAX، مقدار n و انرژی‌های پیوند MA متفاوت است. تاکنون، اکثر مکسین‌ها با زدایش انتخابی Al تولید شده‌اند، زیرا فعالیت شیمیایی بالای Al و پتانسیل کاهش آن نسبت به سایر عناصر مانند Si، Ge، In، یا Sn باعث می‌شود پیوندهای M-A حاوی Al راحت‌تر از پیوند با سایر عناصر A شکسته شوند [۲۳]؛

۳ روش‌های تولید نانوساختارهای مکسین

روش‌های تولید مکسین از زمان سنتز اولین مکسین در سال ۲۰۱۱ از طریق زدایش با HF توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۹]. بسیاری از روش‌های جدید برای سنتز این مواد دو بعدی جدید توسعه یافته‌اند. مطابق شکل ۳ روش‌های تولید نانو ساختارهای مکسین را می‌توان به دو دسته بالا به پایین و پایین به بالا تقسیم بندی کرد. روش بالا به پایین به فرآیند کاهش مواد حجیم یا حذف بخشی از ساختارهای حجیم برای باقی گذاشتن ذرات کوچکتر در ابعاد میکرو تا نانو اشاره دارد. از آنجایی که اولین مکسین بصورت Ti₃C₂T_x با موفقیت از Ti₃AlC₂ سنتز شد، روش سنتز بالا به پایین به مسیر اصلی مورد استفاده برای آماده‌سازی مکسین تبدیل شده‌است. روش‌های بالا به پایین شامل زدایش با اسید حاوی فلونئور، نمک حاوی فلونئور، آمونیوم هیدروژن بی فلونئوراید (NH₄HF₂)، نمک مذاب، اشعه فرابنفش، محیط قلیایی، الکتروشیمیایی و زدایش در فاز گاز می‌شود. روش سنتز پایین به بالا، ساخت مواد از پایین، اتم به اتم، مولکول به مولکول یا خوشه به خوشه است که شامل لایه‌نشانی بخار شیمیایی (CVD)، روش قالب و رسوب لیزر پالسی تقویت‌شده با پلاسما (PEPLD) است.

۳-۱-۳ روش بالا به پایین

به طور معمول، مکسین‌ها به روش بالا به پایین تشکیل می‌شوند که در آن لایه‌های A به صورت انتخابی حذف شده و لایه‌های M_{n+1}X_n از فازهای مکس پیش ماده خود استخراج می‌شوند. در مقایسه با سایر مواد دو بعدی، مانند گرافن و دی سولفید مولیبدن (MoS₂) که از جامدات لایه‌ای با نیروهای واندروالس ضعیف یا پیوندهای هیدروژنی بین لایه‌ها به دست می‌آیند، پیوند بین عناصر A و M در فازهای مکس بسیار قوی است و تحت فرآیند لایه‌لایه شدن مکانیکی شکسته می‌شود؛ بنابراین لایه‌لایه شدن شیمیایی به عنوان رایج‌ترین روش برای تهیه مکسین‌ها باقی می‌ماند [۳۵]. در حال حاضر، روش‌های زدایش شیمیایی برای

از فازهای MAX گزارش شده است. به عنوان مثال، اولین مکسین، $Ti_3C_2T_x$ ، با حل کردن پودرهای Ti_3AlC_2 در HF با غلظت ۵۰ wt% در دمای اتاق به مدت ۴۸ ساعت، به دنبال هم زدن، سانتریفیوژ، فیلتراسیون و شستشو با آب بدون یون تا زمانی که مقدار pH بین ۶ و ۴ باشد، سنتز شد [۹].

بنابراین همیشه علاقه خاصی به سنتز پیش‌ماده‌های حاوی Al وجود داشته است. با این حال، استفاده از HF با غلظت بالا به عنوان جداکننده می‌تواند باعث ایجاد نقص‌های زیادی در نانو صفحات $Ti_3C_2T_x$ شود [۱۳]. بنابراین مطابق جدول ۱، شرایط زدایش با HF در گزارش‌های متعدد به منظور سنتز انواع مختلف مکسین‌ها

جدول ۱- خلاصه پژوهش‌های مختلف برای سنتز مکسین از فاز MAX با استفاده از HF

مرجع	روش لایه‌لایه شدن	مکسین	شرایط زدایش			فاز MAX
			دما (°C)	زمان (h)	غلظت (wt%)	
[۱۰]	Sonication	Ti_2CT_x	۲۵	۱۰	۱۰	Ti_2AlC
[۱۰]	Sonication	$TaCT_x$	۲۵	۷۲	۵۰	Ta_4AlC_3
[۱۰]	Sonication	$TiNbCT_x$	۲۵	۲۸	۵۰	$TiNbAlC$
[۳۸]	NA	$Nb_4C_3T_x$	۲۵	۹۶	۴۸-۵۱	Nb_4AlC_3
[۳۹]	DMSO	$Mo_2TiC_2T_x$	۵۵	۴۸	۴۸-۵۱	Mo_2TiAlC_2
[۴۰]	TBAOH	Ti_3CNT_x	۲۵	۲۱ و ۲۴	۳۰	Ti_3AlCN
[۴۰]	TBAOH	V_2CT_x	۲۵	۲۱ و ۲۴	۴۸	V_2AlC
[۴۱]	DMSO	$Ti_3C_2T_x$	۲۵	۲۰	۴۸	Ti_3AlC_2
[۴۲]	DMSO	$Ti_3C_2T_x$	۶۰	۳۶	۵۰	Ti_3AlC_2
[۴۳]	DMSO	$Ti_3C_2T_x$	۲۵	۱۸	۴۰	Ti_3AlC_2
[۴۴]	Hydrazin monohydrate	$Ti_3C_2T_x$	۲۵	۱۸	۵۰	Ti_3AlC_2
[۴۵]	Sonication	$Ti_3C_2T_x$	۲۵	۲	۵۰	Ti_3AlC_2
[۴۶]	TBAOH	$Mo_2Ti_2C_3T_x$	۵۵	۹۰	۴۸-۵۱	$Mo_2Ti_2AlC_3$

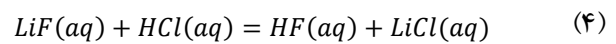
را برای لایه لایه شدن لایه‌های مکسین فراهم می‌کند، که اجازه می‌دهد کاتیون‌ها در فضای بین لایه‌ای قرار بگیرند و در نتیجه برهمکنش بین لایه‌ای را ضعیف می‌کند. علاوه بر این، این استراتژی ملایم اجازه می‌دهد تا اندازه صفحه بزرگتر با نقص اتمی کمتر نسبت به مکسین‌های استخراج شده به روش زدایش با HF خالص ایجاد شود. با این حال، این روش به دلیل همراه داشتن گروه‌های کلر اضافی نمی‌تواند به طور کامل فاز MAX را زدایش کند. از نظر ترکیب و کمیت مواد جدا کننده، این استراتژی نسبت به فرآیند سنتزی زدایش با HF رقابتی تر است. با

۳-۱-۲ زدایش با نمک حاوی فلئور

با توجه به اینکه HF خطرناک است و می‌تواند به چشم، پوست، بافت عضلانی و استخوان‌ها نفوذ کند و در نتیجه باعث آسیب دائمی شود، روش‌های سنتز مختلفی برای جلوگیری یا کاهش استفاده از HF معرفی شده‌اند [۳۰]. یکی از روش‌ها، توسط گیدو و همکاران [۴۷] پیشنهاد شده که اسید را درجا با ترکیب نمک‌های فلئور و HCl تشکیل می‌دهد؛ در حین زدایش، F^- توسط فلوراید آزاد می‌شود و H^+ از HCl به دست می‌آید. این روش اصلاح شده نسبتاً ایمن تر و آسان تر است و مسیر سریع تری

الکتریکی فوق العاده‌ای را نشان داده‌اند. بنابراین، برای استفاده کامل از ماهیت دو بعدی مکسین‌ها و در نتیجه بدست آوردن ویژگی‌های منحصر به فرد دو بعدی مکسین‌ها، فرآیند لایه لایه شدن همیشه ضروری است. این مرحله اضافی (عموماً لایه لایه شدن بر پایه مایع) فضای بین لایه‌ای را گسترش می‌دهد و برهمکنش‌های بین لایه‌ای را ضعیف می‌کند. به عنوان مهم‌ترین فرآیند پس‌سنتز، تکنیک‌های ورقه ورقه شدن و لایه‌برداری به شدت به روش‌های جدایش و ترکیب مکسین وابسته هستند. روش مرسوم این است که کاتیون‌ها از جمله K^+ ، Na^+ ، Li^+ ، Mg^{2+} و Al^{3+} وارد مکسین‌ها می‌شود، در نتیجه فضای بین لایه‌ای افزایش می‌یابد و به عبارت دیگر فاصله بین لایه‌ها در مکسین‌های چند لایه افزایش یافته که به نوبه خود منجر به ضعیف شدن پیوند بین لایه‌ها می‌شود و امکان جدا کردن لایه‌های مکسین و تبدیل آن‌ها به مکسین‌های تک لایه فراهم می‌شود. همچنین فرآیند لایه لایه شدن را می‌توان با عملیاتی مانند فراصوت یا تکان دادن نیز محقق کرد. هنگامی که نمک‌های فلئورید مانند KF ، NaF یا LiF محلول در HCl به عنوان زدایش‌کننده مورد استفاده قرار می‌گیرند، معمولاً به عامل لایه‌بردار اضافی نیازی نیست زیرا کاتیون‌های موجود در نمک‌های فلئورید بین لایه‌های مکسین‌ها قرار گرفته‌اند و در نتیجه آن‌ها را لایه لایه می‌نند [۴۷]. بنابراین فرآیند لایه لایه شدن همزمان در طول فرآیند جدایش انجام می‌شود و این فرآیند را می‌توان به سادگی با استفاده از سوسپانسیون مکسین‌ها انجام داد. علاوه بر این، مولکول‌های آلی مختلف قطبی، مانند دی‌متیل سولفوکسید ($DMSO$)، هیدروکسید تترابوتیل آمونیوم ($TBAOH$)، هیدرازین، اوره، ایزوپروپیل‌آمین و n -بوتیل آمین نیز می‌توانند برای کمک به لایه لایه شدن مکسین‌های چند لایه با عملیات مکانیکی مورد استفاده قرار گیرند [۵۱].

توجه به ماهیت خطرناک HF ، یک محلول ترکیبی جدا کننده خفیف، ترکیبی از لیتیوم فلوراید (LiF) و اسید کلریدریک (HCl) برای تشکیل درجا HF به منظور دستیابی به جدا کردن انتخابی مطابق واکنش (۴) معرفی شد [۴۸، ۴۹]. به طور معمول، پودر LiF به محلول HCl تحت هم زدن در دمای اتاق اضافه می‌شود تا زمانی که محلولی شفاف تشکیل شود، که با توجه به رابطه (۴)، HF با غلظت کم (۳-۵ wt%) تولید می‌شود [۵۰].



افزودن فاز MAX به مخلوط فوق شبیه به روش HF است و بسته به کیفیت مکسین حاصل، واکنش تا ۲۴ ساعت طول خواهد کشید. لازم به ذکر است که نسبت LiF به HCl از نظر کیفیت، اندازه جانبی نانو صفحات و فرآیند پذیری $Ti_3C_2T_x$ اهمیت دارد. مطابق جدول ۲، شرایط زدایش با نمک حاوی فلئور در گزارشات متعدد به منظور سنتز انواع مختلف مکسین‌ها از فازهای MAX گزارش شده است. در همه تحقیقات از HCl به عنوان اسید استفاده شده و فرآیند لایه لایه شدن توسط $DMSO$ ، فراصوت و تکان دادن دستی انجام شده است. همچنین شرایط دمایی برای سنتز توسط این روش بیشتر در بازه دمایی $30^\circ C$ - ۴۰ انجام می‌شود. کسر نسبی LiF در محیط واکنش و استفاده یا عدم استفاده از عملیات فراصوت می‌تواند به شدت بر اندازه جانبی مکسین‌ها و همچنین تراکم نقص‌ها تأثیر بگذارد. به عنوان مثال، اندازه نمونه فراصوت شده معمولاً کمتر از میکرون است و با نقص‌های زیادی در ساختار همراه است. در حالی که نمونه فراصوت نشده، دارای نانوصفحات مکسین بدون عیب با عرض متوسط $3 \mu m$ است [۳۹]. همچنین فاصله بین لایه‌ای مکسین در مقایسه با مکسین زدایش شده با HF بزرگ‌تر است [۳۵]. به دست آوردن مکسین‌های تک لایه فقط از طریق لایه لایه شدن مکانیکی، یک چالش است. با این حال، در مقایسه با مکسین‌های چند لایه، صفحات مکسین تک لایه، خواص فیزیکی، شیمیایی و

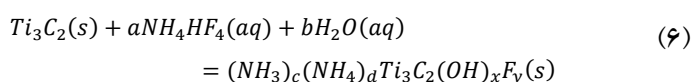
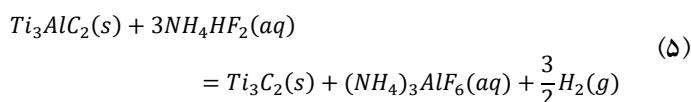
جدول ۲- خلاصه پژوهش‌های مختلف برای سنتز مکسین‌های مختلف از فاز MAX با استفاده از ماده جداکننده نمک حاوی فلئوئور HCl-

مرجع	روش لایه‌لایه شدن	مکسین	شرایط زدایش			مواد جداکننده	فاز MAX
			دما (°C)	زمان (h)	غلظت		
[۵۲]	DMSO	Ti ₂ NT _x	۴۰	۲۴	6 g KF, 6 M HCl	KF- HCl	Ti ₂ AlN
[۵۳]	DMSO, Urea	Ti ₃ C ₂ T _x , Ti ₂ CT _x	۳۰-۶۰	۲۴	2.07 g LiF, 3.35 g NaF, 2.96 g NH ₄ F,	HCl+ Fluoride salts	Ti ₃ AlC ₂ , Ti ₂ AlC
[۵۴]	Manual shaking	Mo ₂ CT _x	۳۵	۳۸۴	3 M LiF, 12 M HCl	LiF-HCl	Mo ₂ Ga ₂ C
[۵۵]	Sonication, Manual shaking	Ti ₃ CNT _x	۳۰	۱۲۰	0.66 g LiF, 6 M HCl	LiF-HCl	Ti ₃ AlCN
[۵۶]	DMSO	Ti ₃ C ₂ T _x	۳۵	۲۴	9 g LiF, 9 M HCl	LiF-HCl	Ti ₃ AlC ₂
[۵۷]	Sonication	Ti ₃ C ₂ T _x	۴۰	۴۵	5 M LiF, 6 M HCl	LiF-HCl	Ti ₃ AlC ₂
[۵۸]	-	V ₂ CT _x	۹۰	۲۴-۱۶۸	2 g NaF, 40 ml HCl	NaF, HCl	V ₂ AlC
[۵۹]	-	Ti ₂ CT _x	۴۰	۱۵	2.3 g LiF, 10 ml HCl	LiF-HCl	Ti ₂ AlC
[۶۰]	Sonication	Ti ₃ C ₂ T _x	۳۵	۲۴	2 g LiF, 9 M HCl	LiF-HCl	Ti ₃ AlC ₂

۳-۱-۳ زدایش با آمونیوم هیدروژن بی فلئوئورید

نیاز است [۶۲, ۶۳]. در این روش، مکانیسم‌های (۵) و (۶) دخیل

هستند:



پس از جداکردن انتخابی، یون‌های NH₄⁺ و مولکول‌های NH₃ در لایه‌های Ti₃C₂T_x ایجاد می‌شوند که منجر به ایجاد فاصله بین لایه‌ای بزرگ‌تر می‌شود [۲۵].

۳-۱-۴ زدایش با نمک مذاب

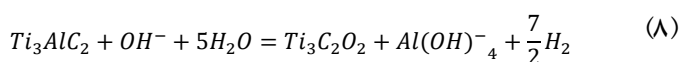
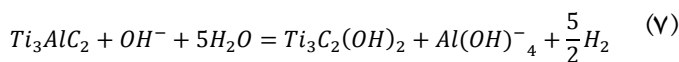
در مقایسه با مکسین‌های کاربرد، مکسین‌های نیتريد به ندرت گزارش شده‌اند. این امر به این دلیل است که جداکننده‌های اسیدی مورد استفاده درستتر مکسین‌های مبتنی بر کربن در زدایش فازهای MAX مبتنی بر N بدلیل انرژی تشکیل بالاتر و

اسید HF می‌تواند از طریق یک روش دیگر یعنی هیدرولیز آمونیوم هیدروژن بی فلوراید (NH₄HF₂) و به دنبال آن زدایش انتخابی پیش ماده‌های فاز MAX در طول زمان زدایش طولانی نیز تشکیل شود، که این فرآیند ابتدا بر روی لایه‌های نازک Ti₃AlC₂ و سپس روی پودرهای مختلف اعمال شده است. NH₄HF₂ یک ماده جدا کننده ملایم است که می‌تواند لایه Al را از Ti₃AlC₂ حذف کند. ناتو و همکاران [۶۱] نشان داده‌اند که زدایش و لایه لایه شدن فازهای MAX به مکسین‌ها را می‌توان در حلال‌های آلی قطبی و NH₄HF₂ بدون استفاده از آب انجام داد. به‌طور معمول، برای حذف کامل مولکول‌های آب حبس شده در Ti₃C₂T_x حک شده با NH₄HF₂، در مقایسه با Ti₃C₂T_x جدا شده با HF، به مدت زمان طولانی‌تر یا دمای بالاتر در حلال

دست آورد، که برای بهبود مقاومت به خوردگی مکسین‌ها مطلوب‌تر است، زیرا مکسین‌های مبتنی بر Ti در محلول‌های حاوی گروه‌های فلوراید ناپایدار هستند. این رویکرد جدید اهمیت زیادی دارد و انتظار می‌رود که سنتز مکسین‌های جدید از پیش‌ماده‌های حساس به UV را به وجود آورد [۶۸].

۳-۱-۶ زدایش در محیط قلیایی

زدایش قلیایی می‌تواند به طور موثر پیش‌ماده‌های MAX حاوی Al را به دلیل توانایی اتصال قوی بین مواد قلیایی و Al، جدا کند [۶۸]. علاوه بر این، اخیراً یک جداکننده بدون فلئوراید دیگر پیشنهاد شده که ابتدا با NaOH عمل شده و پس از آن عملیات هیدروترمال H_2SO_4 انجام می‌شود. لی و همکاران [۲۴]، روش هیدروترمال دیگری با کمک مواد قلیایی برای حک کردن پیش‌ماده‌های MAX با محلول‌های خورنده NaOH طراحی کردند. پس از زدایش، $Ti_3C_2T_x$ در دمای $270^\circ C$ و غلظت $27/5$ مولار NaOH تهیه شد. واکنش را می‌توان تحت دما و فشار بالا به دو مرحله اکسیداسیون Al به هیدروکسیدهای Al و سپس انحلال در مواد قلیایی تقسیم کرد. با فرمولاسیون NaOH غلیظ در آب گازدهی شده، می‌توان به طور موثر فاز MAX را از طریق واکنش هیدروترمال و به دنبال آن مراحل شستشوی چندگانه زدایش کرد که مکانیسم واکنش در محیط قلیایی به صورت روابط (۷) و (۸) است [۲۴].



۳-۱-۷ زدایش الکتروشیمیایی

زدایش الکتروشیمیایی به عنوان یک روش جایگزین برای تولید مکسین توسعه داده شده است. با این حال، زدایش الکتروشیمیایی Ti_3AlC_2 در محلول NaCl، HCl، HF رقیق، تمام مواد را تجزیه می‌کند و در غلظت متوسط نمی‌تواند ادامه یابد. برای پرداختن به این مسائل، انتخاب الکترولیت برای سنتز

انرژی چسبندگی کمتر نیتrideها در مقایسه با کاربیدها مناسب نیستند و Ti_nN_{n-1} تشکیل شده می‌تواند در طول فرآیند زدایش در محلول‌های HF حل شود. انرژی تشکیل بالاتر نشان می‌دهد که اتم‌های Al در فازهای MAX مبتنی بر N پیوند قوی‌تری دارند، بنابراین برای حذف آنها به انرژی بیشتری نیاز است. انرژی چسبندگی کمتر به این معنی است که فازهای MAX مبتنی بر N پایداری کمتری دارند و احتمال حل شدن آنها در محلول‌های HF وجود دارد [۶۴]. برای غلبه بر چالش فوق و به دست آوردن مکسین‌های نیتride، نمک فلئوراید مذاب سه‌تایی ($KF + LiF + NaF$) به عنوان یک جداکننده برای سنتز مکسین‌های $Ti_4N_3T_x$ از طریق زدایش انتخابی Al از Ti_4AlN_3 معرفی شده‌اند [۶۵]. مکسین چند لایه را می‌توان با زدایش پیش‌ماده پودر MAX در دمای $550^\circ C$ به مدت ۳۰ دقیقه تحت جریان آرگون در مخلوط نمک فلئوراید مذاب تهیه کرد. با این حال، $Ti_4N_3T_x$ به دست آمده نسبت به مکسین‌های تهیه شده از جداکننده‌های HF، اندازه صفحه کوچک‌تر و بلورینگی پایین‌تری دارد، که نشان می‌دهد هنوز مشکلات زیادی برای بررسی وجود دارد. لی و همکاران [۶۶] سنتز مکسین‌های Ti_2CCl_2 و $Ti_3C_2Cl_2$ را از طریق واکنش جایگزینی بین فاز MAX و هالیدهای فلزات واسطه گزارش کرده‌اند که مسیر زدایش نمک‌های مذاب اسید لوئیس را دنبال می‌کنند. به طور خاص، فاز MAX جدید Ti_2ZnC و Ti_3ZnC_2 ابتدا تحت واکنش Ti_2AlC و Ti_3AlC_2 در $ZnCl_2$ در دمای $550^\circ C$ تشکیل شده و سپس با افزایش مقدار $ZnCl_2$ به $Ti_3C_2Cl_2$ تبدیل شدند.

۳-۱-۵ زدایش با اشعه فرابنفش

می و همکاران [۶۷] یک روش جدید با استفاده از اشعه فرابنفش برای زدایش موثر لایه‌های Ga از Mo_2Ga_2C با اسید فسفریک (H_3PO_4) که تنها در عرض چند ساعت انجام می‌شود، پیشنهاد کردند. در نتیجه مکسین‌های Mo_2C با کیفیت بالا بدون استفاده از مواد جدا کننده بسیار خورنده تولید شدند. علاوه بر این، با این استراتژی می‌توان محصولات مکسین عاری از فلئوراید را به

(PEPLD) برای تهیه مکسین‌ها با سطح مخصوص زیاد، باکیفیت بالا و عاری از گروه‌های عاملی سطحی پیشنهاد شده‌اند. روش‌های پایین‌به‌بالا به دلیل بازده کم و آماده‌سازی پیچیده، از جمله بستر و انتقال فیلم نازک، به طور محدود استفاده می‌شوند.

۳-۲-۱ رسوب‌دهی شیمیایی فاز بخار

ژو و همکاران [۷۲] برای اولین بار، از روش CVD برای تهیه بلورهای بسیار نازک $\alpha\text{-MoO}_3$ استفاده کردند. اندازه صفحه، ضخامت و چگالی هسته‌زایی بلورهای دو بعدی $\alpha\text{-MoO}_3$ را می‌توان با شرایط تجربی مانند زمان رشد و دما تنظیم کرد. علاوه بر این، این فرآیند ساده را می‌توان با جایگزینی Mo با اتم‌های هدف، برای رشد سایر بلورهای فوق نازک دو بعدی، مانند WC شش ضلعی و TaC مکعبی نیز اعمال کرد. با این حال، کاربردهای فلزات واسطه (TMCs) و نیتrideهای فلزات واسطه (TMNs) دو بعدی به دست آمده به مکسین‌های سنتی تعلق ندارند. همچنین چالش‌هایی برای ساخت مکسین‌های تک‌لایه با روش CVD وجود دارد. این روش را می‌توان برای آماده‌سازی سایر TMC های دو بعدی با کیفیت بالا و ساختارهای ناهمسان مربوطه گسترش داد [۶۸].

۳-۲-۲ روش قالب

روش قالب، بازدهی بسیار بالاتری نسبت به فرآیند CVD دارد. TMC و TMN های دو بعدی با کربنیزه کردن یا آمونیزه کردن الگوی اکسیدهای فلزات واسطه دو بعدی (TMOs) در دمای بالا ($650\text{--}750\text{ }^\circ\text{C}$)، که در آن TMOs با روش قالب‌سازی نمک تشکیل شده، سنتز می‌شوند [۷۳]. با در نظر گرفتن MoO_3 دو بعدی که از گرمادهی بلورهای NaCl پوشیده شده با پیش ماده Mo به عنوان یک قالب به دست می‌آید، یک نانوصفحه h-MoN تهیه می‌شود. علاوه بر این، چندین TMN، مانند V_2N ، W_2N ، Mn_3N_2 دو بعدی، با موفقیت از طریق این روش سنتز شده‌اند. در نتیجه، از آنجا که TMO ها نسبتاً پایدار هستند و تشکیل TMN ها توسط آمونیاک یا نیتريداسیون به دمای

الکتروشیمیایی مکسین‌ها حیاتی است [۶۸]. ینگ و همکاران [۶۹] زدایش را بر اساس خوردگی آندی در یک الکترولیت آبی-قلیایی ($\text{pH} > 9$) پیشنهاد کردند که در آن NH_4Cl و TMAOH به عنوان الکترولیت و میله های Ti_3AlC_2 به عنوان الکتروود استفاده شده‌اند. در طول فرآیند زدایش، Cl^- نقش مهمی در زدایش آندی لایه اتمی Al دارد، در حالی که NH_4OH می‌تواند لبه آند جدا شده را باز کند و کل واکنش را تسهیل کند. اخیراً، مکسین‌ها نیز با زدایش الکتروشیمیایی به کمک حرارت سنتز شده‌اند؛ جایی که الکتروود کامپوزیت سه بعدی متشکل از MAX، کربن سیاه و پارچه کربنی در حاک کننده رقیق HCl قرار داده شد [۷۰].

۳-۱-۸ زدایش در فاز گازی

فاز MAX می‌تواند به روش زدایش در فاز گاز خورده شود که در آن از گازهای بسیار خورنده مانند Cl_2 یا H_2 استفاده می‌شود. برای استخراج موفقیت آمیز ساختارهای دو بعدی M_{n+1}X_n ، مواد جداکننده فعال باید انتخاب شوند و به شدت دمای واکنش کنترل شود، زیرا هر دو اتم A و M می‌توانند به طور کامل حذف شوند و در نتیجه محصولات جانبی مشتق شده از کاربرد ایجاد شود. می و همکاران [۷۱] یک روش احیاء حرارتی برای تهیه مکسین‌ها از پیش ماده‌های اصلی حاوی گوگرد پیشنهاد کرده‌اند. فاز MAX، Ti_2SC در حضور جریان مخلوط Ar/ H_2 حاک شده است، جایی که لایه S با پیوند ضعیف با H_2 واکنش می‌دهد و گاز فرار تشکیل می‌دهد و نانوصفحات شبه گرافنی Ti_2C را ایجاد می‌کند.

۳-۲ روش پایین به بالا

علاوه بر روش‌های زدایش از بالا به پایین، برخی از روش‌های پایین‌به‌بالا نیز برای ساخت مکسین‌ها گزارش شده است. انتخاب روش آماده‌سازی می‌تواند مستقیماً بر گروه‌های سطح، اندازه و کیفیت صفحات مکسین و همچنین خواص آن‌ها تأثیر بگذارد. چندین روش از پایین‌به‌بالا مانند رسوب شیمیایی بخار (CVD)، روش قالب، و رسوب لیزر پالسی تقویت شده با پلاسما

مکسین‌ها رسانایی فلزی کاربیدهای فلزات واسطه را با ماهیت آبدوست سطوح انتهایی هیدروکسیل یا اکسیژن آنها ترکیب می‌کنند که منجر به شیمی سطح غنی، مورفولوژی منحصر به فرد و خواص الکتریکی مطلوب آنها می‌شود. این ویژگی، آنها را در بسیاری از کاربردها مانند حسگرها و دستگاه‌های الکترونیکی، افزودنی‌های تقویت کننده رسانا به پلیمرها و باتری‌های لیتیوم یونی کارآمد کرده است [۷۷, ۷۸]. به طور خاص مکسین $Ti_3C_2T_x$ ، به دلیل رسانایی الکتریکی عالی آن (بالای $S.cm^{-1}$ ۱۰۰۰۰) توجه ویژه‌ای را در کاربردهای ذخیره انرژی و محافظت امواج الکترومغناطیس به خود جلب کرده است. به طوری که ژنگ و همکاران فیلم‌های مکسین $Ti_3C_2T_x$ با ضخامت nm ۲۱۴، رسانایی الکتریکی $S.cm^{-1}$ ۱۵۱۰۰ و میزان محافظت dB ۵۰ را تولید کردند [۷۹].

۲-۴ خواص نوری

مکسین‌ها به دلیل ترکیب منحصر به فرد عملکرد الکترونیکی با قابلیت تنظیم خواص نوری، استفاده از این مواد دوبعدی را در برخی وسایل الکترونیکی شفاف مانند الکترودها و حسگرهای رسانای شفاف رایج می‌کند [۶۸]. هالیم و همکاران [۶۳] در سال ۲۰۱۴، توانستند فیلم‌های $Ti_3C_2T_x$ رسوب داده شده را از طریق کندوپاش روی زیرلایه‌های 1 cm^2 شیشه ایجاد کنند. این فیلم‌ها قادر بودند ۸۵٪ نور را در محدوده مرئی تا فروسرخ منتقل کنند و رسانایی فلزی از خود نشان دادند. خواص نوری با استفاده از اسپکتروفتومتر برای به دست آوردن عبور نوری نمونه‌ها اندازه‌گیری شده است. نمونه‌های $Ti_3C_2T_x$ -IC شفاف‌ترین نمونه‌ها با عبور ۹۰٪ بوده و پس از آن فیلم‌های نمونه $Ti_3C_2T_x$ با عبوردهی تا ۷۰٪ قرار گرفتند. همچنین ماریانا و همکاران [۸۰] دریافتند که تک‌لایه مکسین $Ti_3C_2T_x$ را می‌توان به صورت محلول در فیلم‌های نازک شفاف با خواصی فراتر از فیلم‌های اکسید گرافن ایجاد کرد که نتایج مقاومت سطحی را تا $\Omega.sq$ ۴۳۷^۱ نشان داد. چنین ویژگی‌های نوری الکترونیکی عالی به فیلم‌های شفاف برپایه مکسین اجازه می‌دهد تا بدون آسیب رساندن به رسانایی الکتریکی، به اندازه کافی نازک باشند. به

بالتری نیاز دارد، $MnCl_2$ معمولاً به عنوان پیش‌ماده برای دستیابی به Mn_3N_2 دو بعدی انتخاب می‌شود [۷۴]. با استفاده از تطابق شبکه بین قالب نمک KCl و Mn_3N_2 ، Mn_3N_2 بلوری دو بعدی می‌تواند روی سطح KCl رشد کند. شایان ذکر است، قالب KCl و $NaCl$ می‌تواند باعث ایجاد اعوجاج شبکه در ساختار مکسین‌ها شود. ژا و همکاران [۷۵]، یک روش ساده برای تهیه نانوصفحات Mo_2C دوپ شده با N ایجاد کردند. از نانوصفحات MoO_2 شش ضلعی به عنوان قالب و دیسیانیدامید ($C_2H_4N_4$) به عنوان منبع C و N استفاده کردند.

۳-۲-۳ رسوب لیزر پالسی تقویت شده با پلاسما

اخیراً، روش PEPLD برای تولید فیلم‌های تک بلوری Mo_2C با سطح بزرگ توسعه یافته است. این روش جدید مزیت‌های CVD تقویت شده با پلاسما و رسوب لیزر پالسی را دارد. دمای رشد $700^\circ C$ و پلاسمای CH_4 (منبع کربن) با بخار Mo تولید شده توسط لیزر پالسی واکنش نشان می‌دهند [۷۶]. فیلم Mo_2C مکعبی به دست آمده یکنواخت و صاف است و ضخامت آن را می‌توان با عدد پالس لیزر کنترل کرد. روش PEPLD همچنین می‌تواند یک روش نویدبخش برای رشد سایر TMC و TMN های بسیار نازک باشد [۶۸].

۳-۳ مقایسه روش‌های سنتز مکسین

با توجه به مطالب گفته شده، روش‌های مختلفی برای تولید نانوساختارهای مکسین وجود دارد که هر روش مزایا و معایب مربوط به خود را دارد. در این روش‌ها دستیابی به ساختارهای مکسین با خلوص بالا، نقایص ساختاری کم و مکسین تک‌لایه از اهمیت بالایی برخوردار است. همچنین امروزه استفاده از روش‌های تولید مقرون به صرفه و دوستدار محیط‌زیست توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است؛ بنابراین در جدول ۳، سعی شده که مزایا و معایب هر روش به طور مختصر بررسی شود.

۴ خصوصیات نانوساختارهای مکسین

۱-۴ خواص الکتریکی

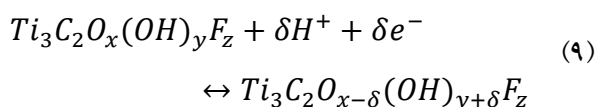
جدول ۳- مزایا و معایب روش های تولید نانو ساختارهای مکسین

معایب	مزایا	روش سنتز
سمی و خورنده بودن HF نقص ساختاری زیاد صفحات مکسین مشکلات ایمنی و زیست محیطی	زمان کوتاه در زدایش مورد استفاده در سنتز انواع مکسین اولین روش تولید Ti_3C_2Tx	اسید حاوی فلوئور
زمان زدایش طولانی نسبت به روش HF دارای گروه های کلر اضافی	روش زدایش ملایم و ایمن لایه لایه شدن سریع تر عدم نیاز به عامل لایه بردار انجام هم زمان لایه لایه شدن در طول فرایند زدایش اندازه صفحات بزرگ تر با نقایص کمتر تخریب کمتر مکسین ها نسبت به روش HF ایجاد فاصله بین لایه ای بزرگ تر	نمک حاوی فلوئور
صفحات کوچک تر و بلورینگی پایین تر سنتز در دمای بالا برای ذوب نمک ها محدودیت در نوع مکسین سنتزی	مورد استفاده در سنتز مکسین های نیتریدی ($Ti_nN_{n-1}Tx$) غیر سمی و ایمن	نمک مذاب
زمان زدایش طولانی سنتز در دمای بالا	روش زدایش ملایم مورد استفاده در محیط های حساس به آب	NH_4HF_2
زدایش نوع خاصی از پیش ماده های فاز MAX حساس به UV بازده پایین	سنتز مکسین های عاری فلوراید عدم استفاده از مواد زدایش کننده خورنده	فرابنفش
نیاز به محیط قلیایی شدید مشکلات زیست محیطی انجام واکنش در شرایط دما و فشار بالا تحت گاز آرگون	سنتز مکسین با استفاده از مواد زدایش کننده بدون فلوراید	محیط قلیایی
دقت در انتخاب الکترولیت زدایش ناکامل فاز MAX قابل استفاده برای گونه های خاصی از فاز MAX	غیر سمی بودن سنتز مکسین بدون استفاده از HF	الکتروشیمیایی
استفاده از گاز های بسیار خورنده (H_2 یا Cl_2) نیازمند کنترل دمای واکنش ایجاد محصولات جانبی زیاد	عدم استفاده از اسید خطرناک HF سنتز مکسین های عاری از فلوراید	در فاز گازی
عدم دستیابی به مکسین تک لایه نیازمند کنترل دما و زمان بازدهی کم	تولید صفحات مکسین نازک تنظیم اندازه صفحات با کنترل زمان رشد و دما سنتز مکسین های عاری از فلوراید	CVD
سنتز نوع خاصی از مکسین ها استفاده از مواد شیمیایی متعدد برای سنتز مکسین ها شرایط آماده سازی پیچیده عاری از گروه های سطحی	بازدهی بالاتر نسبت به روش CVD سنتز مکسین های عاری از فلوراید	قالب
سنتز نوع خاصی از مکسین ها شرایط آماده سازی پیچیده عاری از گروه های سطحی	سنتز مکسین های عاری از فلوراید تولید فیلم مکسین بسیار نازک	PEPLD

و دولایه $Ti_3C_2T_x$ را به کمک پروب میکروسکوپ نیروی اتمی اندازه‌گیری کردند. در طول آزمایش‌ها، منحنی‌های نیرو-جابجایی ثبت شد که بر اساس آن مدول یانگ مؤثر تک‌لایه $Ti_3C_2T_x$ ، TPa ۰/۳۳ تعیین شد. به دلیل کشش و انقباض پیوندهای $Ti-C$ ، $Ti_3C_2T_x$ دوبعدی می‌تواند کرنش‌های ۹/۵٪ را تحت کشش دوماحوری حفظ کند، درحالی‌که به ترتیب کرنش‌های ۱۸٪ و ۱۷٪ را تحت کشش تک‌محوری در امتداد جهت x و y حفظ می‌کند. لینگ و همکاران [۸۳]، با اضافه کردن PVA به $Ti_3C_2T_x$ ، فیلم‌های کامپوزیتی رسانایی الکتریکی خوب و همچنین خواص مکانیکی عالی را نشان دادند که می‌تواند ۵۰۰۰ برابر وزن خود را حفظ کند. علت استفاده از بیندر این است که اخیراً در تحقیقات مشخص شده که بیندر می‌تواند ثبات تکمیل دافع حشره را بر روی منسوجات افزایش دهد، علاوه بر این باعث رهايش تدریجی ماده دافع از روی منسوج شود [۳۳] و [۳۴]. در مورد نرمکن میکروسیلیکونی نیز با توجه به اینکه هیچ پارچه‌ای نیست که در روند تولید و تکمیل آن، نرمکن استفاده نشده باشد و با توجه به اینکه برای مواد سیلیکونی خواص رهايش تدریجی مطرح شده است، از نرمکن میکروسیلیکونی به این دلایل استفاده شد.

۴-۴ ظرفیت خازنی

به طور خاص، مکسین $Ti_3C_2T_x$ دارای ظرفیت ویژه بالایی است که دلیل آن وجود سایت‌های شبه خازنی فراوان است [۸۵]. با توجه به پروتونه شدن گروه‌های عاملی اکسیژن، وضعیت ظرفیت Ti که به گروه‌های سطحی اکسیژن متصل می‌شود به طور مداوم تغییر می‌کند که منجر به خواص ذخیره بار شبه خازنی قابل توجه مکسین‌ها در الکترولیت اسیدی و واکنش الکتروشیمیایی مطابق با رابطه (۹) می‌شود [۸۶].



حداکثر ظرفیت نظری برای $Ti_3C_2T_x$ را می‌توان، با استفاده از قانون فارادی در محدوده پتانسیل V ۰/۶-۰، برابر با $615 C \cdot g^{-1}$

همین دلیل، مکسین می‌تواند به عنوان ابرخازن‌های شفاف بدون جمع‌کننده جریان اضافی کار کند.

۴-۳ خواص مکانیکی

خواص مکانیکی مکسین‌ها به عنوان مواد افزودنی به مواد مرکب یا به عنوان فیلم‌های خالص مکسین دارای اهمیت است. تغییرات ساده در مورفولوژی و ساختار اتمی، از جمله گروه‌های عاملی و تغییرات در اجزای M یا X در فرمول $M_{n+1}X_n$ ، می‌تواند تأثیرات زیادی بر خواص نهایی ماده داشته باشد. با استفاده از نظریه تابعی چگالی، فو و همکاران [۸۱] بررسی کردند که چگونه چندین گروه عاملی بر پایداری، استحکام مکانیکی و ساختارهای الکترونیکی مکسین $Ti_3C_2T_x$ تأثیر می‌گذارند. مسیرهای تغییر شکل و پایداری‌های الکترونیکی نیز تحت نیرو مورد مطالعه قرار گرفتند تا هرگونه انتقال بار را به قدرت مکانیکی مکسین $Ti_3C_2T_x$ نسبت دهند. گروه‌های عاملی $Ti_3C_2T_x$ باعث افزایش مدول الاستیک در مقایسه با Ti_3C_2 می‌شوند. علاوه بر این، نشان داده شده است که گروه‌های عاملی اکسیژن باعث می‌شوند که بزرگترین مدول الاستیک درون صفحه تحت کشش‌های تک‌محوری و دوماحوری افزایش یابد.

ژا و همکاران [۸۲] نشان دادند که مکسین‌های M_2C با M شامل $Sc, Ti, V, Zr, Nb, Mo, Hf, Ta$ و همگی دارای ثابت الاستیک بالاتری با گروه عاملی اکسیژن روی سطح هستند. این امر به پارامترهای شبکه کوچکتر و ضخامت لایه ارائه شده توسط مکسین‌های M_2C با گروه‌های انتهایی O نسبت داده شد. همچنین مشخص شد که W_2CO_2 بالاترین ثابت الاستیک را با C_{11} برابر با $592/7 GP$ ارائه می‌کند. لینگ و همکاران [۸۳] کامپوزیت $Ti_3C_2T_x/PVA$ را با مخلوط کردن محلول‌های PVA و مکسین تولید کردند. استحکام کششی و مدول یانگ فیلم خالص $Ti_3C_2T_x$ با ضخامت $3/3 \mu m$ به ترتیب $22 MPa$ و $3/5 GPa$ بودند. نانو صفحات ورقه ورقه شده مکسین دارای انعطاف‌پذیری مکانیکی عالی به ویژه برای مکسین تک‌لایه هستند [۸۴]. اخیراً، لپیاتوف و همکاران [۲۷] خواص الاستیک تک‌لایه

خودبه‌خود در هوا اکسید می‌شوند. برای مکسین Ti_2C ، اوربیتال‌های غیراشباع Ti روی سطح خام Ti_2C به شدت به مولکول‌های O_2 نزدیک می‌شوند که منجر به تفکیک مؤثر O_2 می‌شود. در نتیجه، اکسیژن جذب شده در Ti_2C پایداری ترمودینامیکی نهایی را به خطر می‌اندازد [۹۱].

۴-۶ خواص محیط زیستی

مکسین‌ها به دلیل پتانسیل آنها در جذب آلاینده‌های مضر مختلف مانند آمونیاک، سرب (II)، کروم (VI)، مس، جیوه، متیلن بلو، متان و فسفات به خوبی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مکسین $Ti_3C_2(OH/ONa)_x F_{2-x}$ سنتز شده توسط لایه لایه شدن شیمیایی همراه با قلیایی شدن متعاقب آن، سرب (II) بیشتری نسبت به سایر یون‌های دو ظرفیتی مانند $Ca(II)$ و $Mg(II)$ در یک محلول پایه آب مشابه جذب می‌کند. این رفتار به دلیل پیوند Ti_2O موجود در مکسین‌هاست که تمایل بیشتری به سرب (II) دارد، در نتیجه تشکیل کمپلکس فضای داخلی را ترویج می‌کند. رنگ‌ها و سایر ضایعات مضر صنایع غذایی و نساجی را می‌توان با استفاده از مکسین‌ها از آب حذف کرد زیرا قابلیت جذب عالی دارند. به طور خاص، $Ti_3C_2T_x$ به عنوان جاذب ترکیبات آلی در محیط‌های آبی تحت تابش UV گزارش شده است. از آنجایی که مکسین‌ها دارای یک سطح بار منفی هستند، تنها حذف وابسته به زمان متیلن بلو از آب در تاریکی به دلیل برهمکنش‌های الکترواستاتیکی دیده شد. در زیر نور فرابنفش، می‌توان مشاهده کرد که برخی از مکسین‌ها، هم رنگزای متیلن بلو و هم رنگزای Acid Blue 80 را در محلول آبی حذف کرده‌اند و از این رو، ظرفیت جاذب عالی برای تصفیه آب را نشان می‌دهند [۶۸]. مکسین‌ها و غشاهای بر پایه مکسین، ساختارهایی با پتانسیل بسیار بالا برای حذف مواد رنگ‌زا از محیط‌های آبی هستند. ماشتالیر و همکاران [۹۲] دریافتند که مکسین $Ti_3C_2T_x$ پتانسیل بسیار خوبی برای جذب و تجزیه کاتالیزور نوری ماده رنگزای متیلن بلو و Acid blue 80 از خود نشان می‌دهد. نتایج این محققان نشان داد هنگامی که روی محلول حاوی مواد رنگ‌زا

تخمین زد. با این حال، مقادیر اندازه‌گیری شده تجربی در حدود $(245 F.g^{-1})$ $(135 C.g^{-1})$ برای ولتاژ $0.55 V$ است که بسیار کمتر از ظرفیت نظری است. لاکاتسکایا و همکاران [۸۶] از کربن شیشه‌ای به عنوان جمع‌کننده جریان برای الکتروود مکسین استفاده کردند و به پتانسیل وسیع $1 V$ دست یافتند. در نتیجه، ظرفیت خازنی گرانشی تا $450 F.g^{-1}$ همراه با عملکرد بالا در الکتروودهای با ضخامت $90 nm$ به دست آمده که مربوط به ظرفیت خازنی حجمی بالای $1500 F.cm^{-3}$ است. یانگ و همکاران [۸۷] با موفقیت فیلم‌های انعطاف‌پذیر و $Ti_3C_2T_x$ دوپ شده با N را از طریق عملیات گرمایی ساختند. فیلم‌های $Ti_3C_2T_x$ دوپ شده با نیتروژن، ظرفیت حجمی فوق‌العاده $2836 F.cm^{-3}$ $(927 F.g^{-1})$ در $5 mV.s^{-1}$ در الکتروولیت H_2SO_4 سه مولار نشان دادند که نتیجه بی‌سابقه‌ای برای همه مواد شناخته شده مبتنی بر مکسین است.

۴-۵ خواص گرمایی

با استفاده از آنالیز حرارتی و طیف‌سنجی جرمی، مشخص شده است که پایداری حرارتی مکسین‌ها به شدت به ترکیب شیمیایی آنها و محیط بستگی دارد [۸۸]. مکسین $Ti_3C_2T_x$ ($F = T_x$) یا OH تا دمای $500^\circ C$ پایدار است و ساختار بلوری شش‌ضلعی Ti_3C_2 حتی در $800^\circ C$ در محیط Ar حفظ می‌شود. با توجه به آنالیز حرارتی، $Ti_3C_2T_x$ به دلیل تبدیل به TiC ، کاهش وزن قابل توجهی را در دمای بالای $800^\circ C$ در اتمسفر Ar نشان می‌دهد [۸۹]. از سوی دیگر، زمانی که در اتمسفر اکسیژن گرمادهی شود، مکسین $Ti_3C_2T_x$ تا حدودی به نانوبلور TiO_2 آنتاز در دمای $200^\circ C$ اکسید و در دمای $1000^\circ C$ به طور کامل به TiO_2 روتایل تبدیل می‌شود [۹۰]. با کنترل نرخ گرمایش، دمای آنیلینگ و زمان اکسیداسیون، مکسین $Ti_3C_2T_x$ می‌تواند به TiO_2 با ساختارهای مختلف بلوری تبدیل شود و هیبریدها یا مشتقات مختلف مبتنی بر مکسین را تشکیل دهد. با این حال، مکسین‌ها با اتم‌های فلزی بر روی سطح، معمولاً از نظر ترمودینامیکی با انرژی سطحی بالا، متاپایدار هستند و به‌طور

تصویربرداری زیستی پیشنهاد شده است. هوانگ و همکاران [۹۳] نانوالیاف کامپوزیت مکسین را برای کاربردهای کشت سلولی و مهندسی بافت بررسی کردند. گروه‌های عاملی سطحی نانوالیاف کامپوزیتی ساخته شده، محیط خوبی برای رشد سلولی فراهم می‌کنند. بنابراین کاربرد مکسین‌ها هر روز در حال افزایش و پروتکل‌های سنتز جدید دائماً در حال بررسی هستند [۶۸].

۵ روش‌های بارگذاری مکسین در سازه‌های الیافی

با درک رو به رشد رفتار رئولوژیکی و قابلیت دیسپرس شدن مکسین در انواع حلال‌ها، فرایندهای متعددی توسعه یافته‌اند که امکان استفاده از آن‌ها به شیوه‌های مختلف مانند پوشش‌ها، فیلم، الیاف و پارچه را فراهم می‌کند. مکسین‌ها همچنین به دلیل نسبت طول به قطر بزرگ و گروه‌های فعال (OH- و F-) برای فرایند تولید الیاف قابل قبول هستند و آنها را با بسیاری از الیاف طبیعی و مصنوعی مانند پنبه و نایلون سازگار می‌کند [۹۴]. برای استفاده از ویژگی‌های ذاتی مکسین در سازه‌های الیافی، روش‌های مختلفی برای ترکیب مکسین در الیاف و منسوجات، مورد استفاده قرار گرفته‌است که به طور کلی می‌توان این روش‌ها را به (۱) پوشش‌دهی مکسین روی منسوجات، (۲) تولید الیاف مکسین خالص و کامپوزیتی در فرآیندهای ترریسی یا الکتروریسی و (۳) حبس مکسین در سازه‌های الیافی دسته‌بندی کرد.

۵-۱ پوشش‌دهی مکسین روی سازه‌های الیافی

نانو ساختارهای مکسین حالت پودری دارند و مشابه تمام مواد پودری، علی‌رغم خواص فوق‌العاده به طور معمول نمی‌توانند بدین شکل به کار برده شوند و بنابراین باید به صورت ماده مرکب مورد استفاده قرار گیرد. ساده‌ترین روش برای ترکیب مکسین در سازه‌های الیافی، پوشش‌دهی مکسین بر روی منسوجات، نخ‌های تابیده و الیاف است. طیف وسیعی از الیاف طبیعی شامل پنبه [۹۵]، کتان [۹۶]، بامبو [۹۷] و الیاف مصنوعی شامل نایلون [۹۷]، پلی‌استر [۹۸] و کربن [۹۹] با مکسین پوشش‌دهی شده‌اند که می‌توانند از طریق ساز و کارهای مختلفی که در ادامه مورد

و $Ti_3C_2T_x$ تابانده شد، تخریب مواد رنگزا افزایش یافت. حذف مواد رنگزای کاتیونی متیلن بلو توسط مکسین از طریق جذب و به دنبال آن تجزیه کاتالیزور نوری اتفاق افتاد. مکسین جذب مطلوبی برای ماده رنگزای کاتیونی مانند متیلن بلو در مقایسه با ماده رنگزای آنیونی Acid blue 80 در تاریکی نشان داد که احتمالاً به دلیل فعل و انفعالات الکترواستاتیک بین سطوح مکسین و مولکول‌های ماده رنگزای متیلن بلو بوده است. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که عملکرد جذب مواد رنگزا توسط مکسین‌ها با ایجاد گروه‌های عاملی از طریق واکنش آن با محلول قلیایی به طور قابل توجهی بهبود می‌یابد. مکسین‌ها به دلیل آبدوست بودن، سطح مخصوص زیاد، خصوصیات مکانیکی و الکتریکی بسیار عالی، به منظور استفاده در غشاهای تصفیه آب گزینه بسیار مناسبی محسوب می‌شوند.

۴-۷ خواص پزشکی و زیست پزشکی

خواص مکسین‌ها با استفاده از آنها در درمان‌های ضد سرطان و تصویربرداری زیستی مطابقت دارد. درمان‌های مرسوم سرطان مانند رادیوتراپی و شیمی‌درمانی دارای معایبی مانند عدم انتخاب‌پذیری هستند که منجر به عوارض جانبی مختلف یا درمان ناکارآمد می‌شوند. بنابراین توسعه روش‌های درمانی قوی‌تر با ویژگی‌های پیشرفته و سازگاری بهبود یافته مورد نیاز است. گزینه‌های پذیرش بهبود یافته را می‌توان با درمان‌های کنترل شده با نور، مانند عملیات فتوترمال، که در آن عملیات با استفاده از عوامل فتوترمال به بافت سرطانی تحویل داده می‌شود، به دست آورد. این عوامل می‌توانند انرژی لیزر را به انرژی گرمایی تبدیل کنند تا سلول‌های تومور هدف را بکشند. برای درمان، فتوترمال‌ها نیاز به تبدیل نور به گرمای بالا، عملکرد سطحی و زیست‌سازگاری مناسب دارند. مکسین‌های تهیه شده به صورت ورقه‌هایی با گروه‌های انتهایی OH یا F، نتایج خوبی را به عنوان عوامل فتوترمال علیه سرطان سینه موش نشان دادند. کامپوزیت $MnO_x/Ti_3C_2T_x$ به دلیل بازده تبدیل فتوترمال کمتر نسبت به نانوصفحات $Ti_3C_2T_x$ به تنهایی برای درمان‌های فتوترمال و

۵-۱-۲ پوشش دهی با بیندر

توجه به این نکته مهم است که مکسین چسبندگی ضعیفی به بسیاری از الیاف و نخ‌ها دارد. یک روش پوشش دهی مبتنی بر بیندر می‌تواند برای ترکیب مکسین با این سازه‌های الیافی استفاده شود. این روش به بیندري نیاز دارد که با مکسین و الیاف سازگار باشد تا چسبندگی بین مکسین و سطح الیاف را افزایش دهد. بیندرها همچنین می‌توانند برای افزایش کارایی پوشش دهی روی بسترهایی با آبگریزی بالا، به عنوان مثال، الیاف کربن [۹۹] و پلی دی متیل سیلوکسان (PDMS) [۱۰۲]، و بهبود بیشتر خواص مورد نظر یک لیف عامل دار شده (به عنوان مثال نایلون) [۱۰۳] استفاده شوند. در پژوهشی، پارچه نایلون نقره کاری شده رسانا با خواص مکانیکی مطلوب را با استفاده از عملیات پلاسما و به دنبال آن پوشش دهی مکسین با ضخامت حدود $1/2 \mu\text{m}$ و ظرفیت الکتریکی سطحی 328 mF.cm^{-2} تهیه کردند [۱۰۳]. با بهره‌برداری از این روش، ژنگ و همکاران [۹۹] نخ‌های ابرخازن را با CF به عنوان یک بستر رسانا، که با مکسین مخلوط شده با PEDOT:PSS به عنوان یک بیندر رسانا پوشش داده شده، تولید کردند. به دلیل دیسپرسیون بالای آن در آب و بارهای منفی فراوان، PEDOT:PSS با دیسپرسیون مکسین بسیار سازگار است و می‌تواند چسبندگی صفحات مکسین را به سطح CF افزایش دهد.

۵-۱-۳ پوشش دهی روی لایه نانوالیاف

تولید نانوالیاف به روش الکتروریسی می‌تواند برای افزایش بارگذاری مکسین مؤثر باشد، زیرا سطح مخصوصی را که مکسین می‌تواند با آن بر همکنش داشته باشد، افزایش می‌دهد [۱۰۴]. در یک چیدمان معمولی الکتروریسی، محلول پلیمری از سرنگی از طریق یک سوزن که ولتاژ بالایی به آن وارد می‌شود پمپ شده و نانو الیافی روی جمع کننده بدست می‌آیند. در الکتروریسی، دستیابی به سازگاری متقابل پلیمرها و کنترل خواص فیزیکی الیاف حاصله به منظور به دست آوردن خواص مکانیکی مناسب حائز اهمیت است [۱۰۳].

بررسی قرار خواهند گرفت. این ساز و کارها به سه گروه شامل، پوشش دهی بدون بیندر، با بیندر و روی لایه نانوالیاف تقسیم بندی می‌شوند.

۵-۱-۱ پوشش دهی بدون بیندر

در پوشش دهی بدون بیندر، هم از عملکرد سطح نانومواد و هم از مورفولوژی بستر استفاده می‌کنند. روش پوشش دهی، نسبتا ساده است و معمولا شامل غوطه‌ور کردن نخ در دیسپرسیون مواد عامل دار، عبور از حمام، یا پوشش دهی با اسپری و به دنبال آن خشک کردن است [۹۶، ۹۷]. این فرآیند را می‌توان تا زمانی که ضخامت یا عملکرد مورد نظر به دست آید، تکرار کرد. فرآیند پوشش دهی معمولی از طریق غوطه‌ور کردن الیاف در دیسپرسیون مکسین به راحتی قابل انجام است. با این حال، شیمی سطح و مورفولوژی بستر مبتنی بر الیاف نقش مهمی در چسبندگی بین صفحات مکسین و سطح الیاف ایفا می‌کند. به طور کلی، صفحات مکسین دارای بار منفی هستند و به خوبی با سطوحی که آبدوست و دارای بار مثبت هستند، برهمکنش دارند. به طور خاص، گروه‌های عاملی فراوان -F، -O، و -OH روی سطوح مکسین، چسبندگی به سطح الیاف یا نخ را از طریق پیوند هیدروژنی با گروه‌های عاملی هیدروکسیل یا آمین موجود در بسیاری از الیاف طبیعی و مصنوعی امکان پذیر می‌کنند. همچنین علاوه بر فعل و انفعالات الکترواستاتیک و پیوند هیدروژنی، وجود فلزات واسطه مانند Ti منجر به برهمکنش قوی با گروه‌های عاملی الیاف مانند کربوکسیلات‌ها و آمین‌ها می‌شود. نخ‌های مناسب برای پوشش مکسین شامل نخ‌های نایلون و بر پایه سلولز هستند، زیرا سطوح آن‌ها به ترتیب دارای گروه‌های آمید و هیدروکسیل هستند که چسبندگی را تسهیل می‌کنند. علاوه بر این، افزایش مساحت سطح یا زبری، برای افزایش چسبندگی مطلوب است. احتمالا به دلیل افزایش سطح تماس موجود برای برهمکنش با مکسین، که با مشاهده این که الیاف طبیعی با سطوح زبر اغلب مکسین بیشتری را نسبت به الیاف مصنوعی با سطح صاف نگه می‌دارند، مشهود است [۱۰۰، ۱۰۱].

حمام انعقاد با هم اکستروود شده تا الیافی با ساختار پوسته-مغزی متمایز تولید کنند؛ به عنوان مثال، PU در هسته و مکسین در پوسته قرار گیرد [۱۰۹، ۱۰۷]. در پژوهشی سیدین و همکاران [۱۱۰] الیاف کامپوزیتی PCL/مکسین، PVDF/مکسین و PAN/مکسین را به روش ترریسی با حلال‌های مختلفی به نسبت ۳:۱۰ و ۱:۱۰ با مورفولوژی‌های متفاوت تولید کردند که فقط الیاف PCL/مکسین تولید شده با تکنیک تبادل حلال می‌توانند لامپ LED را روشن کرده و میزان بالای قابلیت کشش ۷۷٪ را ایجاد کنند.

۳-۵ حبس مکسین در سازه لیفی

این روش، مبتنی بر حبس نانومواد در یک شبکه لیفی به هم پیوسته قبل از تبدیل شدن به نخ است. برخلاف روش‌های پوشش‌دهی، این روش به حبس کردن، قبل و/یا در طول ریسندگی نخ انجام می‌شود که منجر به دیسپرس شدن یکنواخت تر مکسین در سرتاسر ساختار الیاف و نخ شده و بارگذاری مکسین بالاتری را ممکن می‌سازد [۹۴]. لوویت و همکاران [۱۱۱] نخ‌های نانو لیفی نایلون/مکسین و پلی یورتان/مکسین را به روش جدید الکتروریسی تک حمامه با خصوصیات ویژه و بارگذاری بالای مکسین تولید کردند. در نتیجه، نخ‌های نایلون/مکسین با میزان بارگذاری ۹۰ wt.% مکسین، دارای رسانایی الکتریکی 1 S.cm^{-1} و ظرفیت خازنی 3 F.cm^{-3} و قابلیت کشش تا ۴۳٪ را بدست آوردند. همچنین نخ‌های پلی یورتان/مکسین با قابلیت کشش ۲۶۳٪ به عنوان حسگرهای کرنش، دامنه وسیعی با حساسیت بالا از خود نشان دادند.

۴-۵ مقایسه روش‌های بارگذاری

در جدول ۴، روش‌های مختلف بارگذاری نانوساختارهای مکسین در سازه‌های الیافی مورد مقایسه قرار گرفته و مزایا و معایب هر روش به طور مختصر شرح داده شده است. در روش‌های بارگذاری شامل تولید الیاف حاوی مکسین و حبس در سازه نانو لیفی، علاوه بر محدودیت در انتخاب حلال، پلیمر و

در پژوهشی این روش را با پوشش‌دهی مکسین بر روی یک لایه الکتروریسی شده از PU خالص نشان دادند. لایه به دست آمده بسیار انعطاف پذیر و قابل کشش بوده که حساسیت بالایی را از نظر عامل گنج (GF ≈ 228) یا نسبت بین تغییر نسبی مقاومت الکتریکی به کرنش اعمال شده نشان داد. لایه نانوالیاف همچنین دارای محدودیت تشخیص کم (۰/۱٪)، محدوده سنجش بزرگ و قابل تنظیم (تا ۱۵۰٪) و پایداری عالی در ۳۲۰۰ سیکل است [۱۰۵]. در گزارش دیگری، پلی اکریلونیتریل (PAN) با PU ترموپلاستیک برای تولید یک لایه انعطاف پذیر به روش الکتروریسی ترکیب شد و سپس به روش پوشش‌دهی از طریق غوطه‌وری با مکسین، پوشانده شد. پیوند هیدروژنی بین گروه‌های هیدروکسیل و سیانو مکسین و PAN، منجر به تشکیل لایه لیف عامل دار شده با هدایت الکتریکی ترکیبی کافی (مقاومت ویژه سطحی $101 \Omega \cdot \text{sq}^{-1}$) و الاستیسیته مورد نیاز برای کاربرد به عنوان حسگرهای کرنش شد. حسگرهای کرنش ساخته شده دوام عالی (بیش از ۱۷۵۰ سیکل)، پاسخ‌دهی سریع (۱۴۰/۶ ms) و محدودیت تشخیص کم (۰/۱٪) را نشان دادند [۱۰۶].

۲-۵ تولید الیاف حاوی مکسین

مقدار نامناسب بارگذاری شده مکسین با استفاده از فرآیند پوشش‌دهی و همچنین آسیب‌پذیری پوشش، خواص عملکردی و مکانیکی الیاف را محدود می‌کند. یک راهکار برای رفع این مشکل، ترکیب مکسین‌ها در ساختار لیف با استفاده از روش‌هایی مانند ترریسی است [۱۰۸، ۱۰۷]. برای این روش، حلال مورد استفاده برای دستیابی به دوپ ریسندگی باید با دقت انتخاب شود تا امتزاج پذیری اجزای مختلف (مکسین و پلیمر) حاصل شود. موفقیت در تولید الیاف مبتنی بر مکسین منجر به کاوش در روش‌های جایگزین ترریسی برای غلبه بر محدودیت‌های ذاتی ساختار الیاف معمولی مانند کاهش قابل توجه هدایت الکتریکی مکسین در هنگام استفاده در سیستم‌های کامپوزیتی شده است. یکی از روش‌های کنترل ویژگی‌های الیاف، استفاده از روش ترریسی هم‌محور است که در آن دو فرمولاسیون مختلف در یک

حفظ انعطاف پذیری سازه‌های لیفی، امکان بارگذاری بالای مکسین روی بستر و استفاده در مقیاس انبوه را دارد.

ترکیبات حمام انعقاد، به مصرف قابل توجهی از حلال‌ها نیاز است و در نتیجه مشکلات زیست‌محیطی را در پی دارد. در حالی که در روش پوشش‌دهی، علاوه بر سادگی شرایط فرآیند و در عین

جدول ۴- مقایسه روش‌های بارگذاری مکسین‌ها در سازه‌های الیافی

معایب	مزایا	روش
عدم نتایج مطلوب با یکبار پوشش‌دهی نیاز به بیندر برای پوشش‌دهی روی بسترهای با آب‌گریزی بالا وابسته به شیمی سطح و مورفولوژی بستر	ساده‌ترین روش ترکیب مکسین در سازه‌های لیفی تکرارپذیر حفظ انعطاف‌پذیری سازه‌های لیفی امکان استفاده در مقیاس صنعتی و انبوه راندمان بالا	پوشش‌دهی
محدودیت در انتخاب حلال محدودیت در انتخاب ترکیبات حمام انعقاد نیاز به کنترل بالای شرایط ریسندهی محدودیت در میزان مکسین استفاده شده نسبت به پلیمر مصرف قابل ملاحظه از حلال‌ها مشکلات زیست‌محیطی	تولید الیاف پوسته - مغزی بهبود خصوصیات مکانیکی و الکتریکی الیاف کامپوزیتی مکسین استفاده از دو فرمولاسیون مختلف در یک حمام انعقاد مقیاس‌پذیر	تولید الیاف حاوی مکسین
محدودیت در انتخاب پلیمر قابل استفاده برای نانوالیاف و نخ نانو لیفی، عدم سازگاری با پلیمرهای غیرقطبی مصرف قابل ملاحظه از حلال‌ها مشکلات زیست‌محیطی	دیسپرس شدن یکنواخت‌تر مکسین بارگذاری بالاتر مکسین نسبت به روش ترریسی کنترل قطر و تخلخل نخ نانو لیفی تولید شده	حبس مکسین در سازه لیفی

۶ پوشش‌دهی منسوجات با مکسین

شد. پارچه ۱۵ بار پوشش داده شده دارای زاویه تماس 123° ، کشش سطحی $39/86 \text{ mN/m}$ و کار چسبندگی $32/94 \text{ mN/m}$ بود. همچنین پارچه‌های کامپوزیتی ساخته شده تا دمای 235°C از تخریب حرارتی جلوگیری کرده و ۶٪ کاهش وزن را نشان دادند. حداکثر محدوده حفاظت الکترومغناطیس پارچه پوشش داده شده به روش غوطه‌وری، $29/2-43/3$ دسی‌بل و برای پارچه پوشش داده شده با اسپری، $29/2-31/2$ دسی‌بل نشان داده شده و در نتیجه پوشش‌دهی به روش غوطه‌وری، انتخابی عالی برای تولید پارچه با سطح بالای محافظت است. یوزون و همکاران [۹۶] با پوشش مکسین روی نخ‌هایی بر پایه سلولز، نخ‌های چند منظوره با قابلیت شست و شو و قابل بافت را تولید کردند. این کار با استفاده از محلول کلئیدی صفحات مکسین با اندازه‌های

روش‌های مختلفی برای پوشش‌دهی سازه‌های الیافی با نانو ساختار مکسین وجود دارند که شامل پوشش‌دهی به روش غوطه‌وری، پوشش‌دهی از طریق چرخش، پوشش‌دهی با اسپری، ریخته‌گری قطره‌ای، چاپ و فیلتراسیون خلأ هستند. همچنین به طور مختصر تعدادی از پژوهش‌های اخیر با کاربردهای متفاوت مورد بررسی قرار داده شد.

راگولان و همکاران [۱۱۲] در سال ۲۰۱۸، پارچه بی بافت کربن-مکسین منعطف، سبک و آبگریز به منظور محافظت تداخل الکترومغناطیسی در ناحیه S-باند را تولید کردند. به این صورت که فرآیند پوشش‌دهی $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ روی پارچه کربنی به دو روش غوطه‌وری و اسپری در سیکل‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ مرتبه انجام

مختلف در هر لایه به منظور حسگرهای فشاری قابل پوشش طراحی کرده که در آن لایه‌های مختلف ساختار سه‌لایه، نقش‌های متفاوتی دارند. با کاهش غلظت دیسپرسیون از 5 mg.mL^{-1} به 1 mg.mL^{-1} مقاومت سطحی پارچه به سرعت از $210 \Omega.\text{sq}^{-1}$ به $800 \text{ M}\Omega.\text{sq}^{-1}$ افزایش یافت. پس از آن، سه پارچه با مقاومت سطحی مختلف روی هم چیده شدند تا یک ساختار ساندویچی را تشکیل دهند. دو پارچه با مقاومت سطحی کم ($210 \Omega.\text{sq}^{-1}$) به عنوان لایه‌های الکتروود بیرونی مورد استفاده قرار گرفته، در حالی که یک پارچه با مقاومت سطحی بالا ($800 \text{ k}\Omega.\text{sq}^{-1}$ - $125 \text{ M}\Omega.\text{sq}^{-1}$) به عنوان یک لایه کاربردی به لایه میانی وارد شد. سپس سه لایه به هم دوخته تا یک حسگر پارچه‌ای را تشکیل دهند. این حسگر سه لایه را می‌توان به عنوان حسگر فشار و گرمکن انعطاف پذیر استفاده کرد. در مطالعه‌ای دیگر ونگ و همکاران [۱۱۵] در سال ۲۰۲۱، با پوشش نانوصفحات مکسین و کربوکسی متیل کیتوسان (CCS) روی پارچه پنبه‌ای (CF)، پارچه‌ای چندمنظوره با ایمنی بالا در برابر آتش با حسگر دما و عملکرد گرمایش ژول را به روش غوطه وری تولید کردند. پارچه مکسین/CF@CCS با بهره‌مندی از ویژگی رسانایی بالای نانوصفحات مکسین، عملکرد دقیق سنجش دما در محدوده وسیع را نشان داد. ژنگ و همکاران [۱۱۶] در سال ۲۰۲۰، با پوشش دهی مکسین روی پارچه پنبه‌ای تاری-پودی به روش اسپری و تنظیم سیکل‌های فرآیند، پارچه‌های بسیار رسانا، قابل تنفس و انعطاف پذیر با کاربردهای گرمایش ژول، محافظ امواج الکترومغناطیس و عملکرد سنجش کرنش بدست آوردند. پارچه‌های پوشش دهی شده با مکسین با بارگذاری کم، مقاومت سطحی $5 \Omega.\text{sq}^{-1}$ ایجاد کرده که منجر به تولید پارچه‌هایی با عملکرد محافظت امواج عالی شد. ما و همکاران [۱۱۷] در سال ۲۰۲۰، لایه‌های کامپوزیتی فوق انعطاف پذیر و دارای خواص مکانیکی برجسته کولار (ANF)-مکسین ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$)/نانو سیم‌های نقره (AgNW) با ساختار دولایه برای محافظت از امواج الکترومغناطیسی با کارایی بالا و مدیریت حرارتی، از طریق فیلتراسیون دو مرحله‌ای به کمک خلأ و سپس

کوچک ($\text{S-Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) و بزرگ ($\text{L-Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$)، طی فرآیند ساده دو مرحله‌ای پوشش دهی با غوطه‌وری انجام شد که نخ‌های مبتنی بر سلولز مثل پنبه، بامبو و لینن را به نخ‌های بسیار رسانا تبدیل کرد. فرآیند پوشش دهی نخ‌های پنبه‌ای با پوشش مکسین، دارای دو مرحله است که مرحله اول پوشش الیاف، نیاز به استفاده از صفحات مکسین $\text{S-Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ دارد که امکان نفوذ مکسین به سطح الیاف را فراهم کند و مرحله دوم از صفحات مکسین-L $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ برای پوشاندن سطح نخ استفاده کردند تا رسانایی بالایی ایجاد کنند. نخ‌های پوشش داده شده با مکسین در مقایسه با مواد کربنی، سه برابر افزایش در رسانایی الکتریکی را نشان دادند. با بهینه سازی فرآیند پوشش و انتخاب دقیق اندازه صفحه مکسین مناسب در هر مرحله از فرآیند پوشش، به نخ‌هایی با بارگذاری بالای ۷۸٪ وزنی مکسین ($2/2 \text{ mg.cm}^{-1}$) دست پیدا کردند که منجر به نخ‌هایی با هدایت الکتریکی قابل توجه تا $0.9 \text{ S.cm}^{-1} \pm 440/3$ شد. عملکرد نخ‌های پنبه‌ای با پوشش مکسین نشان داد که آن‌ها می‌توانند به عنوان وسایل ابرخازن نخی استفاده شوند. همچنین نخ پنبه‌ای با پوشش مکسین، ظرفیت خازنی سطحی $759/5 \text{ mF.cm}^{-2}$ را نشان داد. بین و همکاران [۱۱۳] پارچه $\text{PANI/Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{CF}$ سبک، قابل پوشش و بادوام با عملکرد محافظت امواج بالا و خاصیت گرمایش ژول را از طریق روش پوشش دهی لایه به لایه (L-b-L) تولید کرده که این مواد را به طور متناوب بر روی پارچه کربنی از طریق برهمکنش‌های سطحی قوی بین آنها پوشش دهی کردند. نتایج نشان داد که پارچه $\text{PANI/Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{CF}$ تنها با ضخامت 0.55 mm که طی ۵ سیکل پوشش دهی انجام شده، دارای میزان محافظت 26 dB و رسانایی الکتریکی $24/57 \text{ S.m}^{-1}$ است. علاوه بر این، پارچه‌های تولید شده در حین حفظ انعطاف پذیری، گرمایش ژول عالی، نفوذ پذیری هوای مناسب و حتی قابلیت شست و شو را نشان داده است. دنگ و همکاران [۱۱۴] در سال ۲۰۲۱، حسگری پارچه‌ای با بارگذاری نانوصفحات مکسین $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ بر روی پارچه‌های بافته شده از طریق روش پوشش دهی با غوطه‌وری و دوخت پارچه سه لایه با غلظت‌های

نانوکامپوزیتی دو لایه چند منظوره، کاربردهای مدیریت حرارتی عالی مانند گرمایش ژول بالا در ولتاژهای کم، زمان پاسخ سریع، پایداری حرارتی کافی را نشان دادند. در جدول ۵، خلاصه‌ای از پژوهش‌های اخیر در زمینه‌های کاربردهای منسوجات مختلف پوشش داده شده با مکسین به روش‌های گوناگون پوشش‌دهی آورده شده است.

روش فشار داغ تهیه کردند. لایه‌های نانوکامپوزیتی دو لایه حاصل با مقدار مکسین/AgNW کم (۲۰ wt٪)، رسانایی الکتریکی عالی 922 S.cm^{-1} ، خواص مکانیکی فوق‌العاده با استحکام کششی $235/9 \text{ MPa}$ و راندمان محافظت $48/1 \text{ dB}$ را نشان دادند. به ویژه لایه‌های نانوکامپوزیتی، حداکثر رسانایی الکتریکی $3725/6 \text{ S.cm}^{-1}$ و اثر حفاظتی 80 dB را در مقدار مکسین/AgNW ۸۰ wt٪ نشان دادند. علاوه بر این، لایه

جدول ۵- مطالعات اخیر در زمینه کاربرد منسوجات پوشش داده شده با مکسین $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$

مرجع	کاربرد	روش پوشش‌دهی	غلظت (mg/ml)	بستر الیافی	ساختار مکسین
[۱۰۲]	فتوترمال - الکتروترمال - حسگر فشار	غوطه‌وری	۵	پارچه نایلونی	$\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ / PDA/ PDMS
[۱۱۲]	آب‌گریز - محافظ امواج (۴۳dB)	غوطه‌وری	۳	پارچه کربنی	$\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$
[۱۱۲]	آب‌گریز - محافظ امواج (۳۱ dB)	اسپری	۳	پارچه کربنی	$\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$
[۹۶]	رسانایی بالا (440 S.cm^{-1}) - ابرخازن (760 mF/cm)	غوطه‌وری	۱۵	نخ پنبه‌ای - کتان - بامبو	S- و L- $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ و $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$
[۱۱۸]	ضد آب - رسانایی بالا (1000 S.cm^{-1}) - محافظ امواج (۹۰ dB)	غوطه‌وری	۱۰	پارچه پلی استری	PPy/ $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$
[۱۱۳]	گرمایش ژول - محافظ امواج (۲۶ dB)	غوطه‌وری	۲۰-۱۵	پارچه کربنی	PANI/ $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$
[۱۱۹]	فوق آب‌گریز - خودتمیزشونده - حفاظت امواج (۳۵ dB)	غوطه‌وری	۲	پارچه پنبه‌ای	ZnO/Ni/ $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$
[۱۲۰]	ضد آتش - حفاظت امواج (۳۱dB) - گرمایش ژول	غوطه‌وری	۱/۵	پارچه پنبه‌ای	$\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ / PEI/ APP
[۱۲۱]	ابرخازن - حسگر لمسی	غوطه‌وری	۲/۵	نخ پنبه‌ای	IG/ $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$
[۱۲۲]	حفاظت امواج (۸۰dB)	غوطه‌وری	۱۵	پارچه پنبه - کتان	$\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$
[۱۲۳]	ضد آتش - حفاظت امواج (۲۰dB)	غوطه‌وری	۲۰-۵	پارچه پنبه‌ای	PEI/ $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$
[۱۱۴]	حسگر فشار - گرمایش ژول	غوطه‌وری	۵-۱	پارچه نایلونی	$\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$
[۱۱۵]	گرمایش ژول - حسگر دما - ضد آتش - پیزوالکتریک	غوطه‌وری	۱۰	پارچه پنبه‌ای	CCS/ $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$
[۱۲۴]	حفاظت امواج (۳۵dB)	اسپری	-	پارچه کربنی	$\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$
[۱۲۵]	فوق آب‌گریز - حفاظت امواج (۵۴) - حسگر رطوبت	اسپری	۳	پارچه ابریشمی	AgNW/ PEI/ $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$
[۱۲۶]	حفاظت امواج (۲۰dB)	اسپری	۲/۵-۱	پلی‌یورتان	$\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$
[۱۱۶]	گرمایش ژول - حفاظت امواج (۳۶ dB)	اسپری	۲	پارچه پنبه‌ای	$\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$
[۱۲۷]	ضد آتش - حفاظت امواج (۶۲dB) - فتوترمال	اسپری	۵	پارچه آرامید	$\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$

[۱۱۷]	رسانایی بالا (922 S.cm^{-1}) - گرمایش ژول - حفاظت امواج (۸۰dB)	فیلتراسیون خلأ	-	فیلم کولار	AgNW/ Ti ₃ C ₂ T _x
[۱۲۸]	گرمایش ژول - حفاظت امواج (۴۰dB)	فیلتراسیون خلأ	۵	فیلم CNF	Ti ₃ C ₂ T _x
[۱۲۹]	فتوترمال - الکتروترمال - ضدباکتری - جاذب UV	غوطه‌وری	۵	پارچه ابریشمی	Ti ₃ C ₂ T _x
[۱۳۰]	فتوترمال - ضدباکتری - حفاظت امواج (۳۸/۶ dB)	غوطه‌وری	-	بی بافت سلولزی	Ti ₃ C ₂ T _x / GMA/ PHGH
[۱۳۱]	فوق آب‌گریز - خودتمیزشونده - حفاظت امواج (۳۳/۲ dB)	اسپری	۱۰	پارچه پنبه‌ای	Ti ₃ C ₂ T _x /Fe ₃ O ₄
[۱۳۲]	گرمایش ژول - حفاظت امواج (۷۸/۹dB)	غوطه‌وری	-	پارچه کربنی	Ti ₃ C ₂ T _x / CNT/ PANI/ LM
[۱۳۳]	فتوترمال - گرمایش ژول - ضد آتش - فوق آب‌گریز	غوطه‌وری	۱-۹	پارچه پنبه‌ای	Ti ₃ C ₂ T _x /PDMS- CNF/CNT-PA
[۱۳۴]	فتوترمال - ضد آتش - ضدباکتری - حسگر تنفس	غوطه‌وری	۵	پارچه پنبه‌ای	Ti ₃ C ₂ T _x / HACC
[۱۳۵]	حسگر فوق آب‌گریز	غوطه‌وری	۵۰۰	پارچه پنبه‌ای	Ti ₃ C ₂ T _x / SiNPs

مکسین‌ها در آینده‌ای نزدیک می‌توانند جای بسیاری از نانوساختارها همانند گرافن و نانولوله‌های کربنی را بگیرند. به‌طور کلی هر ماده‌ای علی‌رغم خصوصیات عالی خود معایبی هم دارد که نانوساختارهای مکسین نیز با چالش‌هایی از جمله فرآیندهای تولید پیچیده، مقاومت نسبتاً کم در برابر اکسید شدن و قیمت بالاتر نسبت به رقبا روبرو هستند. امروزه محققان در حال برطرف کردن برخی از این چالش‌ها هستند و با ارائه راهکارهایی مؤثر، درصدد رفع این مشکلات هستند. همچنین استفاده از مکسین‌ها و مواد مبتنی بر مکسین در سازه‌های الیافی، روند رو به رشدی را در پی داشته و می‌تواند به منسوجات، خواص عالی و کاربردهای چندمنظوره بدهد. از سازه‌های الیافی بارگذاری شده با مکسین‌ها می‌توان در پوشش‌های رسانا، محافظ‌های امواج الکترومغناطیس، محافظت در برابر اشعه فرابنفش، عملکرد گرمایش ژول، پوشش‌های ضدباکتری و همچنین تولید منسوجات چندمنظوره در صنایع مختلف بهره برد.

در بین این روش‌ها، برای به‌کارگیری نانوساختارهای مکسین بر روی سازه‌های الیافی، بیشتر از روش‌های پوشش‌دهی با غوطه‌وری، اسپری و فیلتراسیون خلأ استفاده شده است. در این تحقیقات از مکسین Ti₃C₂T_x به‌تنهایی و ترکیب آن با مواد مختلف رسانا استفاده شده که غلظت ماده پوشش‌دهنده نیز عاملی تأثیرگذار در رسیدن به خواص مورد انتظار است. همان‌طور که مشاهده می‌شود از این سازه‌ها عمدتاً برای محافظت در برابر امواج الکترومغناطیس تا میزان ۷۸/۹ dB، گرمایش ژول تا میزان ۳۰°C در ۱۳۰ V، فتوترمال تا میزان ۸۰°C، منسوجات ابررسانا، حسگرها، پارچه‌های آب‌گریز و همچنین منسوجات ضدآتش، خودتمیزشونده و ضدباکتری استفاده شده است. علاوه بر این، نوع بستر پوشش‌دهی تأثیر به‌سزایی در ثبات خواص موردنظر به‌دست آمده دارد.

۷ نتیجه‌گیری و چشم‌انداز آینده

مکسین‌ها به دلیل خواص منحصر به فرد و عملکرد عالی در بسیاری از کاربردها، به‌سرعت توجه تحقیقات را بعد از سال ۲۰۱۸ به خود جلب کرده و امروزه در حوزه‌های مختلفی استفاده می‌شوند.

۸ منابع

- [1] Gaur M, Misra C, Yadav AB, Swaroop S, Maolmhuaidh FÓ, Bechelany M, et al. Biomedical applications of carbon nanomaterials: fullerenes, quantum dots, nanotubes, nanofibers, and graphene. *Materials* 2021;14:5978.
- [2] Ke F, Zhang L, Chen Y, Yin K, Wang C, Tzeng Y-K, et al. Synthesis of atomically thin hexagonal diamond with compression. *Nano letters* 2020;20:5916-21.
- [3] Yang X, Dong J, Yao M, Hu K, Sun H, Liu R, et al. Diamond-graphite nanocomposite synthesized from multi-walled carbon nanotubes fibers. *Carbon* 2021;172:138-43.
- [4] Vavilov VS. The properties of natural and synthetic diamond. IOP Publishing; 1993.
- [5] Kharisov BI, Kharissova OV. Carbon allotropes: metal-complex chemistry, properties and applications: Springer; 2019.
- [6] Hirsch A. The era of carbon allotropes. *Nature materials* 2010;9:868-71.
- [7] Falcao EH, Wudl F. Carbon allotropes: beyond graphite and diamond. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology* 2007;82:524-31.
- [8] Bunch JS, Verbridge SS, Alden JS, Van Der Zande AM, Parpia JM, Craighead HG, et al. Impermeable atomic membranes from graphene sheets. *Nano letters* 2008;8:2458-62.
- [9] Naguib M, Kurtoglu M, Presser V, Lu J, Niu J, Heon M, et al. Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti₃AlC₂. *Advanced materials* 2011;23:4248-53.
- [10] Naguib M, Mashtalir O, Carle J, Presser V, Lu J, Hultman L, et al. Two-dimensional transition metal carbides. *ACS nano* 2012;6:1322-31.
- [11] Barsoum MW. The MN⁺ 1AXN phases :A new class of solids: Thermodynamically stable nanolaminates. *Progress in solid state chemistry* 2000;28:201-81.
- [12] Li Z, Zhou G, Wang Z, Yuan J, Ke P, Wang A. HiPIMS induced high-purity Ti₃AlC₂ MAX phase coating at low-temperature of 700° C. *Journal of the European Ceramic Society* 2023;43:4673-83.
- [13] Mandegari M, Nasouri K, Ghasemi-Mobarakeh L. Synthesis of low-cost Ti₃AlC₂-Ti₂AlC dual MAX phase with high-electrical conductivity using economical raw materials and novel compositions. *Materials Today Communications* 2023:106868.
- [14] Li X, Xie X, Gonzalez-Julian J, Malzbender J, Yang R. Mechanical and oxidation behavior of textured Ti₂AlC and Ti₃AlC₂ MAX phase materials. *Journal of the European Ceramic Society* 2020;40:5258-71.
- [15] Chen W, Tang J, Shi X, Ye N, Yue Z, Lin X. Synthesis and formation mechanism of high-purity Ti₃AlC₂ powders by microwave sintering. *International Journal of Applied Ceramic Technology* 2020;17:778-89.
- [16] Magnus C, Cooper D, Sharp J, Rainforth WM. Microstructural evolution and wear mechanism of Ti₃AlC₂-Ti₂AlC dual MAX phase composite consolidated by spark plasma sintering (SPS). *Wear* 2019;438:203013.
- [17] Goc K, Prendota W, Chlubny L, Strączek T, Tokarz W, Borowiak P, et al. Structure, morphology and electrical transport properties of the Ti₃AlC₂ materials. *Ceramics International* 2018;44:18322-8.
- [18] Lakhnik A, Kirian I, Rud A. The Mg/MAX-phase composite for hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy* 2022;47:7274-80.
- [19] Torres C, Quispe R, Calderón NZ, Eggert L, Hopfeld M, Rojas C, et al. Development of the phase composition and the properties of Ti₂AlC and Ti₃AlC₂ MAX-phase thin films—A multilayer approach towards high phase purity. *Applied Surface Science* 2021;537:147864.
- [20] Li L, Zhou A, Xu L, Li Z, Wang L. Synthesis of high pure Ti₃AlC₂ and Ti₂AlC powders

- from TiH₂ powders as Ti source by tube furnace. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed* 2013;28:882-7.
- [21] Han J-H, Hwang S-S, Lee D, Park S-W. Synthesis and mechanical properties of Ti₃AlC₂ by hot pressing TiC_x/Al powder mixture. *Journal of the European Ceramic Society* 2008;28:979-88.
- [22] Ge Z, Chen K, Guo J, Zhou H, Ferreira JM. Combustion synthesis of ternary carbide Ti₃AlC₂ in Ti–Al–C system. *Journal of the European Ceramic Society* 2003;23:567-74.
- [23] Yang LX, Wang Y, Zhang HL, Liu HJ, Zeng CL. A simple method for the synthesis of nanosized Ti₃AlC₂ powder in NaCl–KCl molten salt. *Materials Research Letters* 2019;7:361-7.
- [24] Li T, Yao L, Liu Q, Gu J, Luo R, Li J, et al. Fluorine-free synthesis of high-purity Ti₃C₂T_x (T= OH, O) via alkali treatment. *Angewandte Chemie International Edition* 2018;57:6115-9.
- [25] Alhabebe M, Maleski K, Anasori B, Lelyukh P, Clark L, Sin S, et al. Guidelines for synthesis and processing of two-dimensional titanium carbide (Ti₃C₂T_x MXene). *Chemistry of Materials* 2017;29:7633-44.
- [26] Gund GS, Park JH, Harpalsinh R, Kota M, Shin JH, Kim T-i, et al. MXene/polymer hybrid materials for flexible AC-filtering electrochemical capacitors. *Joule* 2019;3:164-76.
- [27] Lipatov A, Lu H, Alhabebe M, Anasori B, Gruverman A, Gogotsi Y, et al. Elastic properties of 2D Ti₃C₂T_x MXene monolayers and bilayers. *Science advances* 2018;4:eaat0491.
- [28] Yi M, Shen Z. A review on mechanical exfoliation for the scalable production of graphene. *Journal of Materials Chemistry A* 2015;3:11700-15.
- [29] Tian Y, Que W, Luo Y, Yang C, Yin X, Kong LB. Surface nitrogen-modified 2D titanium carbide (MXene) with high energy density for aqueous supercapacitor applications. *Journal of Materials Chemistry A* 2019;7:5416-25.
- [30] Verger L, Xu C, Natu V, Cheng H-M, Ren W, Barsoum MW. Overview of the synthesis of MXenes and other ultrathin 2D transition metal carbides and nitrides. *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 2019;23:149-6.۳
- [31] Yang J, Bao W, Jaumaux P, Zhang S, Wang C, Wang G. MXene-based composites: synthesis and applications in rechargeable batteries and supercapacitors. *Advanced Materials Interfaces* 2019;6:1802004.
- [32] Iqbal A, Sambyal P, Koo CM. 2D MXenes for electromagnetic shielding: a review. *Advanced Functional Materials* 2020;30:2000883.
- [33] Rafieerad A, Sequiera GL, Yan W, Kaur P, Amiri A, Dhingra S. Sweet-MXene hydrogel with mixed-dimensional components for biomedical applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 2020;101:103440.
- [34] Zhang C, Ma Y, Zhang X, Abdolhosseinzadeh S, Sheng H, Lan W, et al. Two-dimensional transition metal carbides and nitrides (MXenes): synthesis, properties, and electrochemical energy storage applications. *Energy & Environmental Materials* 2020;3:29-55.
- [35] Anasori B, Gogotsi ŪG. 2D metal carbides and nitrides (MXenes): Springer; 2019.
- [36] Venkateshalu S, Grace AN. MXenes—A new class of 2D layered materials: Synthesis, properties, applications as supercapacitor electrode and beyond. *Applied Materials Today* 2020;18:100509.
- [37] Anasori B, Lukatskaya M, Gogotsi Y. 2D metal carbides and nitrides (MXenes) for energy storage. 2017.
- [38] Ghidui M, Naguib M, Shi C, Mashtalir O, Pan L, Zhang B, et al. Synthesis and characterization of two-dimensional Nb₄C₃ (MXene). *Chemical communications* 2014;50:9517-20.
- [39] Anasori B, Xie Y, Beidaghi M, Lu J, Hosler BC, Hultman L, et al. Two-dimensional, ordered, double transition metals carbides (MXenes). *ACS nano* 2015;9:9507-16.
- [40] Naguib M, Unocic RR, Armstrong BL, Nanda J. Large-scale delamination of multi-layers transition metal carbides and carbonitrides “MXenes”. *Dalton transactions* 2015;44:9353-8.
- [41] Xu B, Zhu M, Zhang W, Zhen X, Pei Z, Xue Q, et al. Ultrathin MXene-micropattern-

- based field-effect transistor for probing neural activity. *Advanced Materials* 2016;28:3333-9.
- [42] Xu S, Wei G, Li J, Ji Y, Klyui N, Izotov V, et al. Binder-free Ti₃C₂T_x MXene electrode film for supercapacitor produced by electrophoretic deposition method. *Chemical Engineering Journal* 2017;317:1026-36.
- [43] Wang Y, Dou H, Wang J, Ding B, Xu Y, Chang Z, et al. Three-dimensional porous MXene/layered double hydroxide composite for high performance supercapacitors. *Journal of Power Sources* 2016;327:221-8.
- [44] Mashtalir O, Lukatskaya MR, Kolesnikov AI, Raymundo-Pinero E, Naguib M, Barsoum M, et al. The effect of hydrazine intercalation on the structure and capacitance of 2D titanium carbide (MXene). *Nanoscale* 2016;8:9128-33.
- [45] Yoon Y, Le TA, Tiwari AP, Kim I, Barsoum MW, Lee H. Low temperature solution synthesis of reduced two dimensional Ti₃C₂ MXenes with paramagnetic behaviour. *Nanoscale* 2018;10:22429-38.
- [46] Anasori B, Shi C, Moon EJ, Xie Y, Voigt CA, Kent PR, et al. Control of electronic properties of 2D carbides (MXenes) by manipulating their transition metal layers. *Nanoscale Horizons* 2016;1:227-34.
- [47] Ghidui M, Lukatskaya MR, Zhao M-Q, Gogotsi Y, Barsoum MW. Conductive two-dimensional titanium carbide 'clay' with high volumetric capacitance. *Nature* 2014;516:78-81.
- [48] Kurra N, Ahmed B, Gogotsi Y, Alshareef HN. MXene-on-paper coplanar microsupercapacitors. *Advanced Energy Materials* 2016;6:1601372.
- [49] Zhang T, Pan L, Tang H, Du F, Guo Y, Qiu T, et al. Synthesis of two-dimensional Ti₃C₂T_x MXene using HCl+ LiF etchant: enhanced exfoliation and delamination. *Journal of Alloys and Compounds* 2017;695:818-26.
- [50] Pang J, Mendes RG, Bachmatiuk A, Zhao L, Ta HQ, Gemming T, et al. Applications of 2D MXenes in energy conversion and storage systems. *Chemical Society Reviews* 2019;48:72-133.
- [51] Sadasivuni KK, Deshmukh K, Pasha SK, Kovarik T. *MXenes and Their Composites: Synthesis, Properties and Potential Applications*: Elsevier; 2021.
- [52] Soundiraraju B, George BK. Two-dimensional titanium nitride (Ti₂N) MXene: synthesis, characterization, and potential application as surface-enhanced Raman scattering substrate. *ACS nano* 2017;11:8892-900.
- [53] Liu F, Zhou A, Chen J, Jia J, Zhou W, Wang L, et al. Preparation of Ti₃C₂ and Ti₂C MXenes by fluoride salts etching and methane adsorptive properties. *Applied Surface Science* 2017;416:781-9.
- [54] Halim J, Kota S, Lukatskaya MR, Naguib M, Zhao MQ, Moon EJ, et al. Synthesis and characterization of 2D molybdenum carbide (MXene). *Advanced Functional Materials* 2016;26:3118-27.
- [55] Du F, Tang H, Pan L, Zhang T, Lu H, Xiong J, et al. Environmental friendly scalable production of colloidal 2D titanium carbonitride MXene with minimized nanosheets restacking for excellent cycle life lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta* 2017;235:690-9.
- [56] Yang Q, Xu Z, Fang B, Huang T, Cai S, Chen H, et al. MXene/graphene hybrid fibers for high performance flexible supercapacitors. *Journal of Materials Chemistry A* 2017;5:22113-9.
- [57] Rasool K, Helal M, Ali A, Ren CE, Gogotsi Y, Mahmoud KA. Antibacterial activity of Ti₃C₂T_x MXene. *ACS nano* 2016;10:3674-84.
- [58] Liu F, Zhou J, Wang S, Wang B, Shen C, Wang L, et al. Preparation of high-purity V₂C MXene and electrochemical properties as Li-ion batteries. *Journal of the Electrochemical Society* 2017;164:A709.
- [59] Kajiyama S, Szabova L, Iinuma H, Sugahara A, Gotoh K, Sodeyama K, et al. Enhanced Li-ion accessibility in MXene titanium carbide by steric chloride termination. *Advanced Energy Materials* 2017;7:1601873.
- [60] Lin Z, Barbara D, Taberna P-L, Van Aken KL, Anasori B, Gogotsi Y, et al. Capacitance of Ti₃C₂T_x MXene in ionic

- liquid electrolyte. *Journal of Power Sources* 2016;326:575-9.
- [61] Natu V, Pai R, Sokol M, Carey M, Kalra V, Barsoum MW. 2D Ti₃C₂T_z MXene synthesized by water-free etching of Ti₃AlC₂ in polar organic solvents. *Chem* 2020;6:616-30.
- [62] Zhang X, Zhang Z, Zhou Z. MXene-based materials for electrochemical energy storage. *Journal of energy chemistry* 2018;27:73-85.
- [63] Halim J, Lukatskaya MR, Cook KM, Lu J, Smith CR, Näslund L-Å, et al. Transparent conductive two-dimensional titanium carbide epitaxial thin films. *Chemistry of Materials* 2014;26:2374-81.
- [64] Shein I, Ivanovskii A. Graphene-like titanium carbides and nitrides Ti_n+1C_n, Ti_n+1N_n (n, γ, δ) = 2 and 3) from de-intercalated MAX phases: First-principles probing of their structural, electronic properties and relative stability. *Computational Materials Science* 2012;65:104-14.
- [65] Urbankowski P, Anasori B, Makaryan T, Er D, Kota S, Walsh PL, et al. Synthesis of two-dimensional titanium nitride Ti₄N₃ (MXene). *Nanoscale* 2016;8:11385-91.
- [66] Li M, Lu J, Luo K, Li Y, Chang K, Chen K, et al. Element replacement approach by reaction with Lewis acidic molten salts to synthesize nanolaminated MAX phases and MXenes. *Journal of the American Chemical Society* 2019;141:4730-7.
- [67] Mei J, Ayoko GA, Hu C, Bell JM, Sun Z. Two-dimensional fluorine-free mesoporous Mo₂C MXene via UV-induced selective etching of Mo₂Ga₂C for energy storage. *Sustainable Materials and Technologies* 2020;25:e00156.
- [68] Sadasivuni KK, Deshmukh K, Pasha K, Kovarik T. MXenes and their Composites: Synthesis, Properties and Potential Applications: Elsevier; 2021.
- [69] Yang S, Zhang P, Wang F, Ricciardulli AG, Lohe MR, Blom PW, et al. Fluoride-free synthesis of two-dimensional titanium carbide (MXene) using a binary aqueous system. *Angewandte Chemie* 2018;130:15717-21.
- [70] Pang S-Y, Wong Y-T, Yuan S, Liu Y, Tsang M-K, Yang Z, et al. Universal strategy for HF-free facile and rapid synthesis of two-dimensional MXenes as multifunctional energy materials. *Journal of the American Chemical Society* 2019;141:9610-6.
- [71] Mei J, Ayoko GA, Hu C, Sun Z. Thermal reduction of sulfur-containing MAX phase for MXene production. *Chemical Engineering Journal* 2020;395:125111.
- [72] Xu C, Wang L, Liu Z, Chen L, Guo J, Kang N, et al. Large-area high-quality 2D ultrathin Mo₂C superconducting crystals. *Nature materials* 2015;14:1135-41.
- [73] Xiao X, Yu H, Jin H, Wu M, Fang Y, Sun J, et al. Salt-templated synthesis of 2D metallic MoN and other nitrides. *ACS nano* 2017;11:2180-6.
- [74] Xiao X, Urbankowski P, Hantanasirisakul K, Yang Y, Sasaki S, Yang L, et al. Scalable synthesis of ultrathin Mn₃N₂ exhibiting room-temperature antiferromagnetism. *Advanced Functional Materials* 2019;29:1809001.
- [75] Jia J, Xiong T, Zhao L, Wang F, Liu H, Hu R, et al. Ultrathin N-doped Mo₂C nanosheets with exposed active sites as efficient electrocatalyst for hydrogen evolution reactions. *ACS nano* 2017;11:12509-18.
- [76] Zhang F, Zhang Z, Wang H, Chan CH, Chan NY, Chen XX, et al. Plasma-enhanced pulsed-laser deposition of single-crystalline Mo₂C ultrathin superconducting films. *Physical Review Materials* 2017;1:034002.
- [77] Qiao C, Wu H, Xu X, Guan Z, Ou-Yang W. Electrical conductivity enhancement and electronic applications of 2D Ti₃C₂T_x MXene materials. *Advanced Materials Interfaces* 2021;8:2100903.
- [78] Qing Y, Zhou W, Luo F, Zhu D. Titanium carbide (MXene) nanosheets as promising microwave absorbers. *Ceramics International* 2016;42:16412-6.
- [79] Zhang J, Kong N, Uzun S, Levitt A, Seyedin S, Lynch PA, et al. Scalable manufacturing of free-standing, strong Ti₃C₂T_x MXene films with outstanding conductivity. *Advanced Materials* 2020;32:2001093.
- [80] Mariano M, Mashtalir O, Antonio FQ, Ryu W-H, Deng B, Xia F, et al. Solution-processed titanium carbide MXene films

- examined as highly transparent conductors. *Nanoscale* 2016;8:16371-8.
- [81] Fu Z, Zhang Q, Legut D, Si C, Germann TC, Lookman T, et al. Stabilization and strengthening effects of functional groups in two-dimensional titanium carbide. *Physical Review B* 2016;94:104103.
- [82] Zha X-H, Luo K, Li Q, Huang Q, He J, Wen X, et al. Role of the surface effect on the structural, electronic and mechanical properties of the carbide MXenes. *EPL (Europhysics Letters)* 2015;111:26007.
- [83] Ling Z, Ren CE, Zhao M-Q, Yang J, Giammarco JM, Qiu J, et al. Flexible and conductive MXene films and nanocomposites with high capacitance. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 2014;111:16676-81.
- [84] Borysiuk VN, Mochalin VN, Gogotsi Y. Molecular dynamic study of the mechanical properties of two-dimensional titanium carbides Ti_nC_n (MXenes). *Nanotechnology* 2015;26:265705.
- [85] Zhang C, Kremer MP, Seral-Ascaso A, Park SH, McEvoy N, Anasori B, et al. Stamping of flexible, coplanar micro-supercapacitors using MXene inks. *Advanced Functional Materials* 2018;28:1705506.
- [86] Lukatskaya MR, Kota S, Lin Z, Zhao M-Q, Shpigel N, Levi MD, et al. Ultra-high-rate pseudocapacitive energy storage in two-dimensional transition metal carbides. *Nature Energy* 2017;2:1-6.
- [87] Yang C, Tang Y, Tian Y, Luo Y, Faraz Ud Din M, Yin X, et al. Flexible nitrogen-doped 2D titanium carbides (MXene) films constructed by an ex situ solvothermal method with extraordinary volumetric capacitance. *Advanced Energy Materials* 2018;8:1802087.
- [88] Wang H, Wu Y, Yuan X, Zeng G, Zhou J, Wang X, et al. Clay-inspired MXene-based electrochemical devices and photo-electrocatalyst: state-of-the-art progresses and challenges. *Advanced Materials* 2018;30:1704561.
- [89] Wang K, Zhou Y, Xu W, Huang D, Wang Z, Hong M. Fabrication and thermal stability of two-dimensional carbide Ti_3C_2 nanosheets. *Ceramics International* 2016;42:8419-24.
- [90] Li Z, Wang L, Sun D, Zhang Y, Liu B, Hu Q, et al. Synthesis and thermal stability of two-dimensional carbide MXene Ti_3C_2 . *Materials Science and Engineering: B* 2015;191:33-40.
- [91] Ghassemi H, Harlow W, Mashtalir O, Beidaghi M, Lukatskaya M, Gogotsi Y, et al. In situ environmental transmission electron microscopy study of oxidation of two-dimensional Ti_3C_2 and formation of carbon-supported TiO_2 . *Journal of Materials Chemistry A* 2014;2:14339-43.
- [92] Mashtalir O, Cook KM, Mochalin VN, Crowe M, Barsoum MW, Gogotsi Y. Dye adsorption and decomposition on two-dimensional titanium carbide in aqueous media. *Journal of Materials Chemistry A* 2014;2:14334-8.
- [93] Huang R, Chen X, Dong Y, Zhang X, Wei Y, Yang Z, et al. MXene composite nanofibers for cell culture and tissue engineering. *ACS Applied Bio Materials* 2020;3:2125-31.
- [94] Qin S, Usman KAS, Hegh D, Seyedin S, Gogotsi Y, Zhang J, et al. Development and applications of MXene-based functional fibers. *ACS Applied Materials & Interfaces* 2021;13:36655-69.
- [95] Li T, Chen L, Yang X, Chen X, Zhang Z, Zhao T, et al. A flexible pressure sensor based on an MXene-textile network structure. *Journal of Materials Chemistry C* 2019;7:1022-7.
- [96] Uzun S, Seyedin S, Stoltzfus AL, Levitt AS, Alhabeab M, Anayee M, et al. Knittable and washable multifunctional MXene-coated cellulose yarns. *Advanced Functional Materials* 2019;29:1905015.
- [97] Levitt A, Hegh D, Phillips P, Uzun S, Anayee M, Razal JM, et al. 3D knitted energy storage textiles using MXene-coated yarns. *Materials Today* 2020;34:17-29.
- [98] Park TH, Yu S, Koo M, Kim H, Kim EH, Park J-E, et al. Shape-adaptable 2D titanium carbide (MXene) heater. *ACS nano* 2019;13:6835-44.
- [99] Zhang J, Seyedin S, Gu Z, Yang W, Wang X, Razal JM. MXene: a potential candidate for yarn supercapacitors. *Nanoscale* 2017;9:18604-8.

- [100] Levitt A, Zhang J, Dion G, Gogotsi Y, Razal JM. MXene-based fibers, yarns, and fabrics for wearable energy storage devices. *Advanced Functional Materials* 2020;30:2000739.
- [101] Navarro-Suárez AM, Maleski K, Makaryan T, Yan J, Anasori B, Gogotsi Y. 2D titanium carbide/reduced graphene oxide heterostructures for supercapacitor applications. *Batteries & Supercaps* 2018;1:33-8.
- [102] Luo J, Gao S, Luo H, Wang L, Huang X, Guo Z, et al. Superhydrophobic and breathable smart MXene-based textile for multifunctional wearable sensing electronics. *Chemical Engineering Journal* 2021;406:126898.
- [103] Hu M, Li Z, Li G, Hu T, Zhang C, Wang X. All-solid-state flexible fiber-based MXene supercapacitors. *Advanced Materials Technologies* 2017;2:1700143.
- [104] Levitt AS, Alhabeb M, Hatter CB, Sarycheva A, Dion G, Gogotsi Y. Electrospun MXene/carbon nanofibers as supercapacitor electrodes. *Journal of Materials Chemistry A* 2019;7:269-77.
- [105] Yang K, Yin F, Xia D, Peng H, Yang J, Yuan W. A highly flexible and multifunctional strain sensor based on a network-structured MXene/polyurethane mat with ultra-high sensitivity and a broad sensing range. *Nanoscale* 2019;11:9949-57.
- [106] Jia Z, Li Z, Ma S, Zhang W, Chen Y, Luo Y, et al. Constructing conductive titanium carbide nanosheet (MXene) network on polyurethane/polyacrylonitrile fibre framework for flexible strain sensor. *Journal of colloid and interface science* 2021;584:1-10.
- [107] Seyedin S, Uzun S, Levitt A, Anasori B, Dion G, Gogotsi Y, et al. MXene composite and coaxial fibers with high stretchability and conductivity for wearable strain sensing textiles. *Advanced Functional Materials* 2020;30:1910504.
- [108] Zhang J, Seyedin S, Qin S, Wang Z, Moradi S, Yang F, et al. Highly conductive Ti₃C₂T_x MXene hybrid fibers for flexible and elastic fiber-shaped supercapacitors. *Small* 2019;15:1804732.
- [109] Shin H, Eom W, Lee KH, Jeong W, Kang DJ, Han TH. Highly electroconductive and mechanically strong Ti₃C₂T_x MXene fibers using a deformable MXene gel. *ACS nano* 2021;15:3320-9.
- [110] Seyedin S, Zhang J, Usman KAS, Qin S, Glushenkov AM, Yanza ERS, et al. Facile solution processing of stable MXene dispersions towards conductive composite fibers. *Global Challenges* 2019;3:1900037.
- [111] Levitt A, Seyedin S, Zhang J, Wang X, Razal JM, Dion G, et al. Bath electrospinning of continuous and scalable multifunctional MXene-infiltrated nanoyarns. *Small* 2020;16:2002158.
- [112] Raagulan K, Braveenth R, Jang HJ, Lee YS, Yang CM, Kim BM, et al. Fabrication of nonwetting flexible free-standing MXene-carbon fabric for electromagnetic shielding in S-band region. *Bulletin of the Korean Chemical Society* 2018;39:1412-9.
- [113] Yin G, Wang Y, Wang W, Yu D. Multilayer structured PANI/MXene/CF fabric for electromagnetic interference shielding constructed by layer-by-layer strategy. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 2020;601:125047.
- [114] Deng C, Zhao S, Su E, Li Y, Wu F. Trilayer MXene Fabric for Integrated Ultrasensitive Pressure Sensor and Wearable Heater. *Advanced Materials Technologies* 2021;6:210.۰۵۷۴
- [115] Wang B, Lai X, Li H, Jiang C, Gao J, Zeng X. Multifunctional MXene/chitosan-coated cotton fabric for intelligent fire protection. *ACS Applied Materials & Interfaces* 2021;13:23020-9.
- [116] Zhang X, Wang X, Lei Z, Wang L, Tian M, Zhu S, et al. Flexible MXene-decorated fabric with interwoven conductive networks for integrated joule heating, electromagnetic interference shielding, and strain sensing performances. *ACS applied materials & interfaces* 2020;12:14459-67.
- [117] Ma Z, Kang S, Ma J, Shao L, Zhang Y, Liu C, et al. Ultraflexible and mechanically strong double-layered aramid nanofiber-Ti₃C₂T_x mxene/silver nanowire nanocomposite papers for high-

- performance electromagnetic interference shielding. *ACS nano* 2020;14:8368-82.
- [118] Wang QW, Zhang HB, Liu J, Zhao S, Xie X, Liu L, et al. Multifunctional and water-resistant MXene-decorated polyester textiles with outstanding electromagnetic interference shielding and joule heating performances. *Advanced Functional Materials* 2019;29:1806819.
- [119] Wang S, Li D, Zhou Y, Jiang L. Hierarchical Ti₃C₂T_x MXene/Ni chain/ZnO array hybrid nanostructures on cotton fabric for durable self-cleaning and enhanced microwave absorption. *ACS nano* 2020;14:8634-45.
- [120] Cheng W, Zhang Y, Tian W, Liu J, Lu J, Wang B, et al. Highly efficient MXene-coated flame retardant cotton fabric for electromagnetic interference shielding. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 2020;59:14025-36.
- [121] Wang P, Li G, Liu J, Hou Z, Meng C, Guo S. Flexible, freestanding, ultrasensitive, and iontronic tactile sensing textile. *ACS Applied Electronic Materials* 2021;3:2195-202.
- [122] Uzun S, Han M, Strobel CJ, Hantanasirisakul K, Goad A, Dion G, et al. Highly conductive and scalable Ti₃C₂T_x-coated fabrics for efficient electromagnetic interference shielding. *Carbon* 2021;174:382-9.
- [123] Lan C, Jia H, Qiu M, Fu S. Ultrathin MXene/polymer coatings with an alternating structure on fabrics for enhanced electromagnetic interference shielding and fire-resistant protective performances. *ACS Applied Materials & Interfaces* 2021;13:38761-72.
- [124] Raagulan K, Braveenth R, Jang HJ, Seon Lee Y, Yang C-M, Mi Kim B, et al. Electromagnetic shielding by MXene-graphene-PVDF composite with hydrophobic, lightweight and flexible graphene coated fabric. *Materials* 2018;11:1803.
- [125] Liu LX, Chen W, Zhang HB, Wang QW, Guan F, Yu ZZ. Flexible and multifunctional silk textiles with biomimetic leaf-like MXene/silver nanowire nanostructures for electromagnetic interference shielding, humidity monitoring, and self-derived hydrophobicity. *Advanced Functional Materials* 2019;29:1905197.
- [126] Yuan W, Yang J, Yin F, Li Y, Yuan Y. Flexible and stretchable MXene/Polyurethane fabrics with delicate wrinkle structure design for effective electromagnetic interference shielding at a dynamic stretching process. *Composites Communications* 2020;19:90-8.
- [127] Wang X, Lei Z, Ma X, He G, Xu T, Tan J, et al. A lightweight MXene-coated nonwoven fabric with excellent flame retardancy, EMI shielding, and electrothermal/photothermal conversion for wearable heater. *Chemical Engineering Journal* 2022;430:132605.
- [128] Zhou B, Zhang Z, Li Y, Han G, Feng Y, Wang B, et al. Flexible, robust, and multifunctional electromagnetic interference shielding film with alternating cellulose nanofiber and MXene layers. *ACS applied materials & interfaces* 2020;12:4895-905.
- [129] Yan B, Zhou M, Liao X, Wang P, Yu Y, Yuan J, et al. Developing a multifunctional silk fabric with dual-driven heating and rapid photothermal antibacterial abilities using high-yield MXene dispersions. *ACS Applied Materials & Interfaces* 2021;13:43414-25.
- [130] Yu Z, Deng C, Seidi F, Yong Q, Lou Z, Meng L, et al. Air-permeable and flexible multifunctional cellulose-based textiles for bio-protection, thermal heating conversion, and electromagnetic interference shielding. *Journal of Materials Chemistry A* 2022;10:17452-63.
- [131] Zheng X, Tang J, Cheng L, Yang H, Zou L, Li C. Superhydrophobic hollow magnetized Fe₃O₄ nanospheres/MXene fabrics for electromagnetic interference shielding. *Journal of Alloys and Compounds* 2023;934:167964.
- [132] Li J, Zhang W, Yang L, Yin S. Conductive fabrics based on carbon nanotube/Ti₃C₂T_x MXene/polyaniline/liquid metal quaternary composites with improved performance of EMI shielding and joule

- heating. *Composites Communications* 2023;38:101476.
- [133] Zhao J, Zhou J, Li H, Xiao A. Ti₃C₂T_x MXene and cellulose-based aerogel phase change composite decorated laminated fabric with excellent electro/solar-thermal conversion and high latent heat. *Carbohydrate Polymers* 2023;316:121031.
- [134] Yan B, Bao X, Liao X, Wang P, Zhou M, Yu Y, et al. Sensitive micro-breathing sensing and highly-effective photothermal antibacterial cinnamomum camphora bark micro-structural cotton fabric via electrostatic self-assembly of MXene/HACC. *ACS Applied Materials & Interfaces* 2021;14:2132-45.
- [135] Wang S, Du X, Luo Y, Lin S, Zhou M, Du Z, et al. Hierarchical design of waterproof, highly sensitive, and wearable sensing electronics based on MXene-reinforced durable cotton fabrics. *Chemical Engineering Journal* 2021;408:127363.