

Two-Dimensional Mxene Structures: Comprehensive Review on Synthesis Methods & Applications

Atefeh Badr¹, *Arvin Taghizadeh Tabrizi², Hossein Aghajani³

1-Ph.D. Student, Faculty of Materials Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

2-Post-Doctoral. Researcher, School of Metallurgy & Materials Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran.

3-Associate professor, School of Metallurgy & Materials Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran.

Citation: Badr A, Taghizadeh Tabrizi A, Aghajani H. Two-Dimensional Mxene Structures: Comprehensive Review on Synthesis Methods & Applications. Metallurgical Engineering 2021; 24(3): 236-259 <http://dx.doi.org/10.22076/ME.2022.544234.1338>

doi: <http://dx.doi.org/10.22076/ME.2022.544234.1338>

ABSTRACT

In recent years, utilizing two-dimensional materials has attracted much attention due to the exclusive features like high specific area and high surface activity. Among the diverse 2D materials like graphene and disulfides, Mxene is a newly developed material that could be achieved from MAX phases. These materials contain a metallic element mainly from transitional metals like titanium, molybdenum, niobium, or chromium, with carbon or nitrogen and groups like fluoride, oxygen, or hydroxide. Considering their unique properties, the range of applications of the Mxene is developing. Therefore, it is essential to understand better these newly developed two dimensional materials, their structures, synthesis methods and the parameters that could optimize the achieved properties. Furthermore, more Mxenes could be achieved by designing and synthesizing more MAX phases, which could be used in more applications. In this study, we tried to introduce a history of the Mxene and emphasize its features, synthesis methods, and application.

Keywords: Two-Dimensional Materials, Mxene, Graphene, MAX Phases, Transitional Metals.

Received: 4 December 2021 | Accepted: 13 August 2022

■ ■

* *Corresponding Author:*

Arvin Taghizadeh Tabrizi, PhD

Address: School of Metallurgy & Materials Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran.

Tel: +98 (9396409220)

E-mail: iarvintt@gmail.com

ساختارهای دو بعدی مکسین: مروری تحلیلی بر روش‌های سنتز و کاربردها

عاطفه بدر^۱، آروین تقی‌زاده تبریزی^۲، حسین آقاجانی^۳

- ۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز، ایران.
 ۲- پژوهشگر پست دکتری، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
 ۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

چکیده

در سال‌های اخیر، استفاده از مواد دو بعدی به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد از قبیل سطح ویژه بسیار بالا مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. در بین مواد دو بعدی گوناگون مطرح شده، همانند گرافن و دی سولفیدها، مکسین‌ها طیف جدیدی از مواد هستند که با استفاده از فازهای ماکس به دست می‌آیند. این مواد معمولاً دارای یک عنصر فلزی از فلزات عناصر واسطه، عموماً تیتانیوم و یا کروم، به همراه کربن و یا نیتروژن و یک گروه عاملی همانند فلونور، اکسیژن و یا هیدروکسیدی هستند. با در نظر گرفتن زمینه‌های کاربردی وسیع این مواد که روز به روز نیز در حال افزایش است، و همچنین با توجه به نو و جدید بودن آن‌ها، درک بهتر ساختار و روش‌های سنتز مکسین‌ها منجر به بهینه‌سازی، بهبود خواص آنها و استفاده مناسب‌تر از آنها در زمینه‌های متفاوت می‌شود. همچنین با استفاده از فازهای ماکس متفاوت، می‌توان مکسین‌های بیشتری با ساختارهای منحصر به فرد سنتز کرد. در پژوهش پیش‌رو سعی شده است که تاریخچه مختصری از این مواد بیان کرده و سپس به توضیح خواص روش‌های سنتز و کاربردهای این مواد پرداخته شود.

واژه‌های کلیدی: مواد دو بعدی، مکسین، گرافن، فاز ماکس، فلزات عناصر واسطه.

دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۱۳ | پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۲

۱. تاریخچه

از دانشگاه درکسل^۵ در سال ۲۰۱۱ کشف شده است. مکسین نام چند کاربید، نیتريد یا کربنیتريد فلزات واسطه است که به طور موضعی با لایه برداری شیمیایی ترکیبات سه بعدی (یا چهاربعدی) که به عنوان فازهای (مکس) MAX شناخته شده‌اند، بدست می‌آید. با این حال، می‌توان ترکیبات لایه ای دیگر مانند $Zr_3Al_3C_5$ و Mo_2Ga_2C را نیز تحت عنوان مکسین بدست آورد [۱، ۲].

کاربیدها و نیتريد‌های فلزات واسطه گروه ۴-۶ در قرن بیستم به عنوان مواد مقاوم در برابر درجه حرارت بالا، سخت، با پایداری شیمیایی مناسب و مقاوم در برابر سایش مورد بررسی قرار گرفتند. با این وجود کاربردهای ذخیره انرژی آنها با بررسی رفتار کاتالیزوری در دهه ۱۹۷۰ آغاز شد و از آن زمان چندین طرح نانو ساختاری پیشنهاد شده است که گام‌های کوچکی برای افزایش سطح و عملکرد کاربیدها و

گرافن تک لایه دارای خواص منحصر به فرد زیادی است که باعث شده در طی ۱۵ سال اخیر، پژوهش‌های بسیاری در زمینه بررسی ویژگی‌های گوناگون آن انجام پذیرد. علاوه بر گرافن، فلزات انتقالی (واسطه) دیکلوژنیدها، فسفورن^۲ و مشتقات آن‌ها، نمونه‌هایی از بیشترین مواد دو بعدی مورد بررسی هستند. به تازگی، کشف یک خانواده از ترکیبات دو بعدی، به نام "MXenes" (مکسین)، توجه زیادی از جامعه علمی را به خود جلب کرده است، که از ویژگی‌های ساختاری و الکترونیکی منحصر به فردی برخوردار است. این دسته از مواد توسط پروفیسور یوری گوگوتسی^۳ و پروفیسور میشل دبلیو بارسوم^۴

1. Dicalcogenides
2. Phosphorene
3. Yury Gogotsi
4. Michel W Barsoum

* نویسنده مسئول:

دکتر آروین تقی‌زاده تبریزی

نشانی: تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی.

تلفن: (۰۹۳۹۶۴۰۹۲۲۰) ۰۹۸

پست الکترونیکی: iarvintt@gmail.com

5. Drexel

1 H 1.01	M																A	X	T _x	18 He 4.00			
3 Li 6.94	4 Be 9.01																	13 B 10.81	14 C 12.01	15 N 14.01	16 O 16.00	17 F 19.00	10 Ne 20.18
11 Na 22.99	12 Mg 24.30																	13 Al 26.98	14 Si 28.09	15 P 30.97	16 S 32.07	17 Cl 35.45	18 Ar 39.95
19 K 39.10	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.88	23 V 50.94	24 Cr 52.00	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.93	28 Ni 58.69	29 Cu 63.55	30 Zn 65.39	31 Ga 69.72	32 Ge 72.61	33 As 74.92	34 Se 78.96	35 Br 79.90	36 Kr 83.80						
37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.91	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.94	43 Tc 97.91	44 Ru 101.07	45 Rh 102.91	46 Pd 106.42	47 Ag 107.87	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.71	51 Sb 121.76	52 Te 127.60	53 I 126.90	54 Xe 131.29						
55 Cs 132.91	56 Ba 137.33	57 La 138.91	58 Ce 140.11	59 Pr 140.91	60 Nd 144.24	61 Pm 144.91	62 Sm 150.36	63 Eu 151.97	64 Gd 157.25	65 Tb 158.93	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.26	69 Tm 168.93	70 Yb 173.04	71 Lu 174.97							
87 Fr (223)	88 Ra (226)	89 Ac (227)	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (263)	107 Bh (262)	108 Hs (265)	109 Mt (266)	110 Ds (271)	111 Rg (272)	112 Ug (288)	113 Nh (289)	114 Fl (288)	115 Mc (288)	116 Lv (293)	117 Ts (294)	118 Og (294)						

شکل ۱. عناصر شیمیایی تشکیل دهنده مکسین [۷]

لایه ای سه تایی هستند که در آنها M یک فلز واسطه است (یعنی Sc, Ti, V, Cr, Zr, Nb, Mo, Ta, W) و A یک عنصر از گروه IIIA یا IVA در جدول تناوبی (معمولاً Al یا Ga) و X کربن یا نیتروژن است که در جدول تناوبی نشان داده شده در شکل ۱ مشخص شده است. گرافیت دارای نیروی واندروالس ضعیف در بین لایه‌ها است که موجب برداری میکرومکانیکی با استفاده از نوار اسکاچ برای به دست آوردن لایه‌های گرافن می‌شود. برخلاف گرافیت، پیوندهای کوالانسی M-X و پیوندهای فلزی M-A در فاز MAX پیوند هایی کاملاً قوی هستند. گزارشات اولیه نشان می‌دهد که فازهای MAX صرف نظر از غلظت آنها در حضور اسیدهای رایج (مانند HCl, H₂SO₄ و HNO₃)، بازها (یعنی NaOH, KOH) یا نمک‌ها (مانند NaCl, Na₂SO₄, K₂SO₄ و غیره) مستعد واکنش‌های شیمیایی نیستند [۱، ۳].

با این وجود، با استفاده از اچنت‌های قوی (محلول‌های اچ) مانند اسید هیدروفلوریک^۶ (HF)، مخلوط لیتیوم فلوراید-هیدروکلریک اسید^۷ (LiF-HCl)، بی فلئورید آمونیوم هیدروژن^۸ (NH₄HF₂) و سایر اچنت‌های جدید، می‌توان پیوندهای MA را شکست و لایه‌های عنصر A را به صورت انتخابی حذف کرد. در نهایت چند لایه (m- MXene) با فرمول کلی M_{n+1}X_nT_x (n = 1, 2, 3) جایی که T_x نشانگر گروه عاملی پایانه

6. Etchants

7. Hydrofluoric acid

8. lithium fluoride-hydrochloric acid

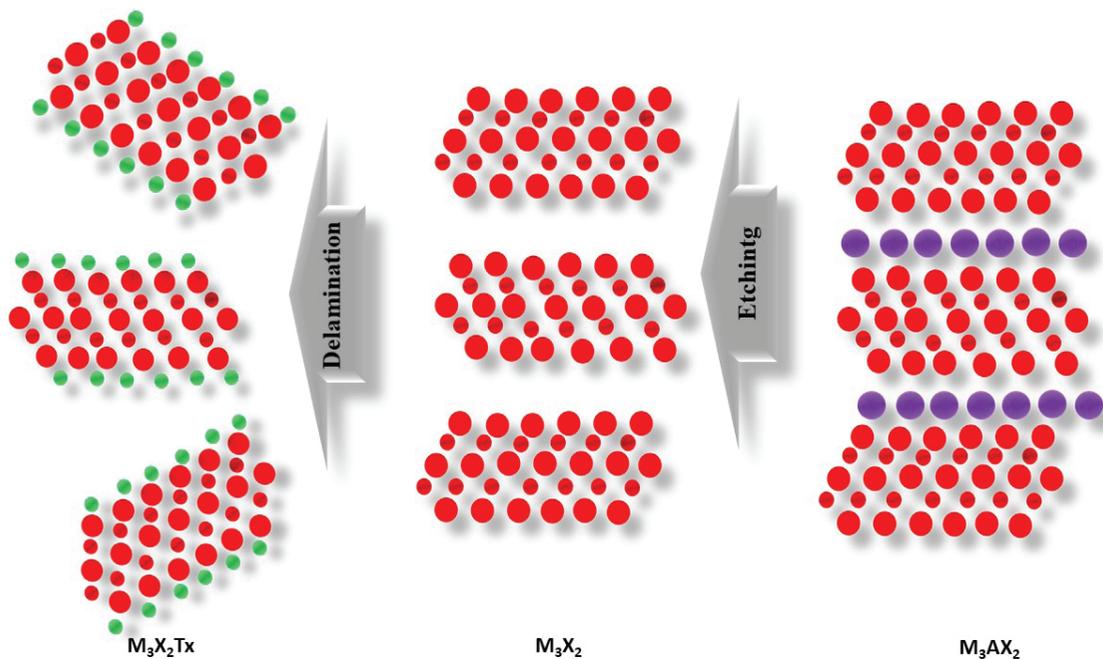
9. Ammonium hydrogen bifluoride

نیتريد‌های فلز واسطه نیز برداشته شده است. دستیابی به موفقیت در این زمینه در سال ۲۰۱۱ با کشف اولین کاربرد تیتانیوم دو بعدی (T₃C₂T_x) (2D) از خانواده مکسین آغاز شد [۳-۵].

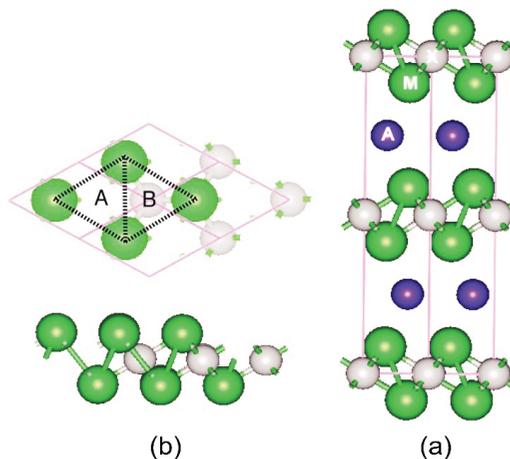
۲. فاز MAX

فازهای MAX از جهت چگالی پایین، سختی بالا و مقاومت در برابر خوردگی مشابه سرامیک‌ها هستند، در حالی که از جهت قابلیت ماشین کاری خوب، رسانایی حرارتی و الکتریکی بالا مشابه مواد فلزی است. این ویژگی‌های خاص از پیوندهای اولیه حاصل می‌شود، پیوندهای M-X دارای ترکیبی از پیوندهای یونی، فلزی و کووالانسی بوده و بخش M-A کاملاً فلزی است. بنابراین فازهای MAX، از سایر مواد لایه برداری شده سه بعدی، مانند گرافیت و دیکلکوژنیدهای فلزات واسطه، که از طریق پیوندهای ضعیف واندروالس به هم پیوند خورده اند، متفاوت هستند. لایه‌های فازهای MAX با پیوندهای قوی به هم متصل شده اند که به روش‌های مکانیکی به سختی لایه برداری می‌شود. بنابراین، برای اولین بار، روش لایه برداری شیمیایی جهت سنتز مواد دو بعدی (مکسین‌ها) از جامدات با نیروی پیوند اولیه ی بالا (فازهای MAX) مورد بررسی قرار گرفته و به مرحله اجرا رسید [۱].

یکی از کاربردهای متفاوت و البته منحصر به فرد فازهای ماکس، استفاده از این فازها به عنوان پیش‌ماده جهت سنتز مکسین‌ها است. فازهای MAX عموماً مجموعه‌ای از ترکیبات



شکل ۲. تصویر تنظیمات M_3AX_2 ، M_3X_2 و M_3X_2Tx و فرآیند سنتز آنها. [۷]



شکل ۳. (a) ساختار بالک معمولی لایه جامد M_2AX ، جایی که M، A و X به ترتیب نمایانگر فلز واسطه، عنصر A و اتمهای کربن/نیتروژن هستند. (b) نمای بالا و جانبی لایه دو بعدی M_2X بدست آمده. خطوط نقطه چین محل جاهای خالی نوع A و B را نشان می‌دهد که در متن توضیح داده شده است. برای سادگی، فقط لایه‌های اول و دوم M_2X در نمای بالا نشان داده شده است [۸].

این فاز از ورقه‌های سه لایه با یک سلول واحد شش ضلعی (هگزاگونال) تشکیل شده است، جایی که لایه X (C یا N) بین دو لایه فلز واسطه "M" قرار دارد که در شکل ۳-الف نشان داده شده است. در سطح M_2X ، دو نوع جای خالی^{۱۲} وجود دارد، همانطور که در شکل ۳-ب نشان داده شده است: جای خالی A، که هیچ اتم "X" زیر فلزات انتقالی در دسترس نیست. اما برای جاهای خالی از نوع B، اتم "X" در دسترس است [۸].

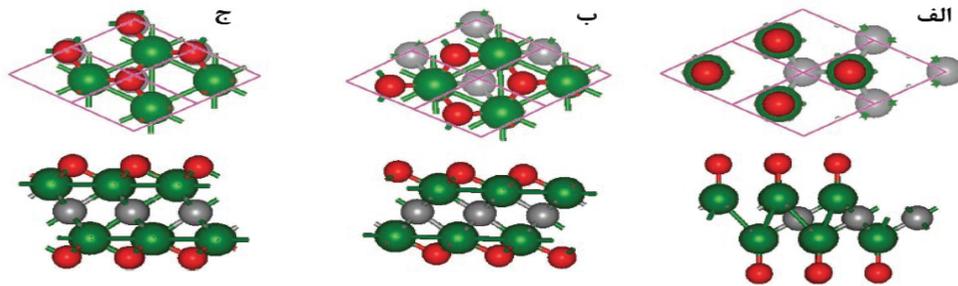
سطح^{۱۰} است، ایجاد می‌شود. این موضوع به صورت طرحواره در شکل ۲ نشان داده شده است. پایانه‌های سطح بیشتر $=O$ ، $-F$ و $-OH$ بوده و X در Tx نشان دهنده تعداد عملگرهای سطح^{۱۱} است. ورق‌های دو بعدی دارای ضخامت ۱ نانومتر هستند که با تغییر n در مکسین از M_2Tx به M_3X_2Tx و M_4X_3Tx می‌توان ضخامت آن را کنترل کرد [۳].

بررسی دقیق تر یک سیستم M_2X نشان می‌دهد که

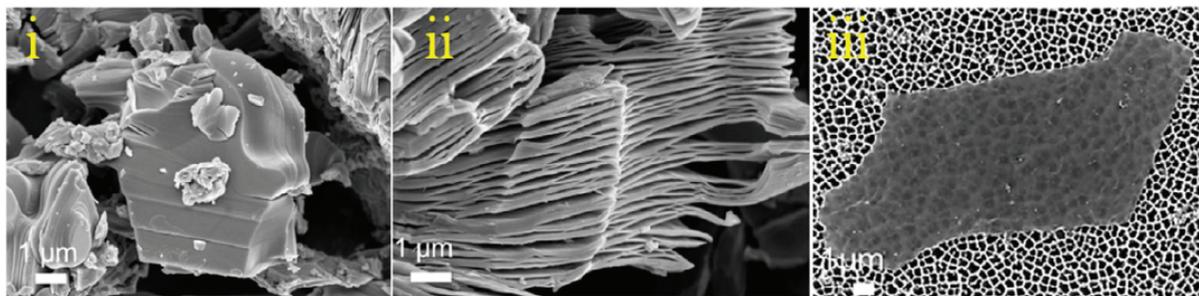
12. Hollow sites

10. Surface-termination functionalities

11. Number of surface functionalities



شکل ۴. الف-ج) نماهای بالا و جانبی مدل سیستم‌های مکسین را نشان می‌دهد. الف) مدل ۱، ب) مدل ۲ و ج) مدل ۴. مدل ۳ به دلیل شباهت به مدل ۲ و ۴ نشان داده نمی‌شود. کره‌های سبز، خاکستری و قرمز به ترتیب موقعیت فلزات واسطه، اتم‌های کربن/نیتروژن و گروه‌های عاملی متصل. برای سادگی، فقط لایه‌های اول و دوم M_2X در نمای بالا نشان داده شده است [۸].



شکل ۵. تصاویر SEM از (i) فاز MXene، (ii) Max، ورقه ورقه نشده (Delaminated) و (iii) لایه لایه شده [۷]

" M " نشان دهنده دو فلز واسطه اولیه هستند، که تنوع زیادی را به خانواده مکسین افزوده اند. هنگامی که دو فلز انتقالی با هم ترکیب می‌شوند (بیشتر یک فلز انتقالی سنگین با یک فلز سبک)، به جای تشکیل محلول‌های جامد، ساختارهای نظم یافته از فازهای MAX شکل می‌گیرد. به عنوان مثال دو لایه فلز واسطه یک یا دو لایه از فلزات دیگر را در برمی‌گیرد که با عنوان ساختار منظم شده خارج از صفحه یاد می‌شود، به عنوان مثال، Mo_2TiAlC_2 و $Mo_2Ti_2AlC_3$ از جمله این مواد هستند [۳ و ۷]. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نشان داده شده در شکل ۵ نشان‌دهنده این موضوع است که پس از حکاکی^{۱۷} در محلول HF، ذرات m-MXene به دست آمده دارای مورفولوژی شبیه آکاردئون^{۱۸} هستند که متمایز از مورفولوژی سنگ مانند فاز MAX است. m-MXene حاصل را می‌توان لایه برداری کرده و با پراکنده‌سازی در حلال‌های متفاوت، به صورت محلول‌های کلونیدی به دست آورد. در نهایت می‌توان از محلول حاصل در سنتز لایه‌های نازک/پوشش‌ها، کامپوزیت‌ها یا موارد دیگر استفاده کرد. باید توجه داشت که روش لایه برداری بسیار مهم است. به طور معمول، m-MXenes با حلال‌هایی (یعنی دی‌متیل سولفوکسید^{۱۹} DMSO) مخلوط می‌شوند که ساختار لایه ای را متورم می‌کند. به این ترتیب،

17. Etching
18. Accordion
19. Dimethyl sulfoxide

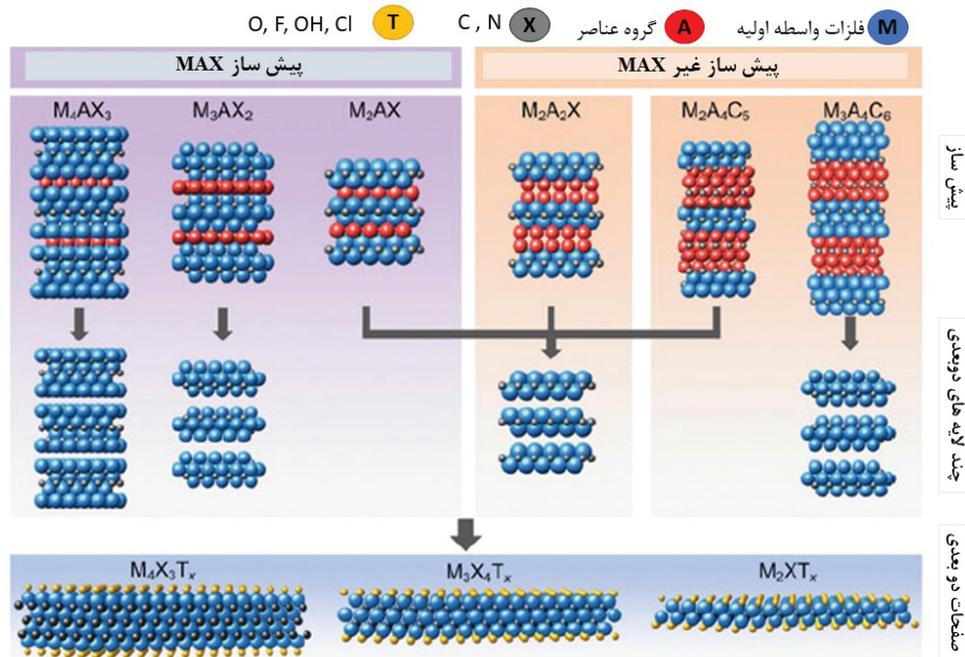
بنابراین، با توجه به موقعیت‌های نسبی گروه‌های پایانی متصل به اتم‌های فلز، چهار پیکربندی برای خاتمه‌های شیمیایی^{۱۳} یک سیستم M_2X امکان پذیر است: مدل اول دارای دو گروه عاملی^{۱۴} است که در موقعیت مکانی قسمت بالای دو فلز واسطه قرار دارند. مدل دوم دارای دو گروه عاملی در قسمت بالای جاهای خالی A است. مدل سوم دارای یک گروه عاملی است که در موقعیت مکانی قسمت بالای جای خالی A قرار دارد و گروه عاملی دیگر بالای یک جای خالی B قرار دارد. مدل چهارم دارای دو گروه عاملی است که در بالای جای خالی B واقع شده اند. این مدل‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است [۸].

۳. معرفی مکسین‌ها

پسوند ene در MXene به علت شباهت با گرافن از نظر خصوصیات شکل شناسی، الکتریکی و مکانیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ترکیبات مختلف و محلول‌های جامد به خانواده MAX تنوع زیادی می‌بخشد، که خانواده بزرگی از اعضای مکسین^{۱۵} مورد بحث قرار می‌گیرد [۳].

اناسوری^{۱۶} و همکارانش مکسین‌هایی حاوی دو فلز واسطه را توسعه داده‌اند، $M'_2M''C_2$ و $M'_2M''_2C_3$ ، که M' و

13. Chemical terminations
14. Functional groups
15. MXenemember
16. Anasori



شکل ۶. سنتز بالا به پایین مکسین از پیش سازهای MAX و غیر MAX با اچ انتخابی. سه نوع M_2XT_x ، $M_3X_2T_x$ و $M_4X_3T_x$ را می توان در قالب پودرهای چند لایه دو بعدی و ورق های دو بعدی سنتز کرد. پودرهای چند لایه دارای پایانه های مشابه ورق های دو بعدی هستند. [۳]

اولین عضو مکسین ها، کاربید تیتانیوم ($Ti_3C_2T_x$) است که با غوطه ور کردن پودر Ti_3AlC_2 در محلول ۵۰٪ وزنی HF تهیه می شود. $Ti_3C_2T_x$ به سرعت توجه بسیاری از پژوهشگران را در زمینه های سنتز، خواص و برنامه های کاربردی از جمله سنسورهای گاز، رطوبت [۹]، فوتوکاتالیست [۱۰]، حذف مواد آلی طبیعی انتخابی، مواد دارویی [۱۱] و الکترواد ابرخازن ها [۱۲] جلب کرده است [۷، ۱۳]. تا به امروز، بیش از ۷۰ درصد از کل تحقیقات مکسین بر روی اولین مکسین کشف شده، $Ti_3C_2T_x$ ، با برجسته ترین عملکرد در زمینه ذخیره انرژی الکتروشیمیایی متمرکز شده است. اکتشاف این مکسین به قدری گسترده است که برای بسیاری از محققان، نام مکسین مترادف با $Ti_3C_2T_x$ شده است و بدون مشخص کردن ترکیب از آن استفاده می شود [۱۳].

۴. روش های سنتز

به طور کلی، دو روش برای سنتز مواد دو بعدی وجود دارد. روش اول یک رویکرد از پایین به بالا^{۲۰} است، مانند رسوب دهی بخار شیمیایی^{۲۱} (CVD) که می تواند فیلم هایی با کیفیت بالا را بر روی زیرلایه های مختلف تولید کند. این روش عموماً برای ساخت مکسین استفاده نمی شود، زیرا فیلم های بدست آمده تک لایه نیستند، بلکه فیلم های چند لایه بسیار نازک هستند. به عنوان مثال، Xu و همکارانش از رسوب دهی بخار شیمیایی

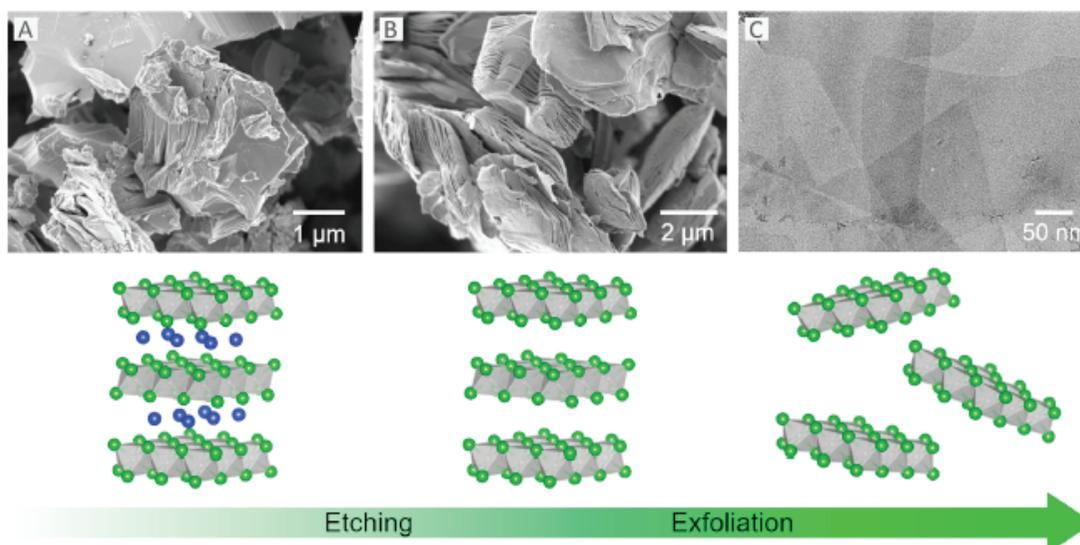
فاصله بین لایه های متورم m-MXene افزایش می یابد که تعامل و پیوند بین لایه ها ضعیف می شود [۳].

با بهره گیری از امواج فراصوت نیز، m-MXene به صورت لایه لایه به دست آمده و نانولایه های کوچکتری حاصل می شود. از سوی دیگر می توان مکسین را همزمان با برهم کنش در جای یون های لیتیوم در بین نانو صفحات و با استفاده از مقادیر بیش از حد نمک لیتیوم فلوراید (LiF)، تهیه کرد. این روش امکان ایجاد ساختار لایه ای متورم را از طریق استراتژی تبادل یونی مستقیم در آب فراهم می کند. تکان دادن بیشتر مخلوط آب-m-MXene باعث ایجاد پوسته های مکسین خوب با اندازه بسیار بزرگتر (اندازه جانبی تا ده ها میکرومتر) و عیوب کمتر نسبت به روش فراصوت می شود، همانطور که در شکل ۵ نیز نشان داده شده است [۳].

تا به امروز، تولید حدود ۱۶۰ مکسین گزارش شده است و پیش بینی می شود تعداد بیشتری نیز به شکل محلول جامد وجود داشته باشد. با توجه به بیش از ۱۰۰۰ مقاله تحقیقاتی منتشر شده، مطمئناً دلایل کافی برای این باور وجود دارد که خانواده مکسین در مرز جهان مواد دو بعدی و سه بعدی قرار دارند از جمله مکسین های رایج سنتز شده می توان به $Ti_3C_2T_x$ ، Ti_2CT_x ، $(Ti_{0.5}, Nb_{0.5})_2CT_x$ ، $(V_{0.5}, Cr_{0.5})_3C_2T_x$ ، Ti_3CNT_x ، $(Nb_{0.8}, Ti_{0.2})_4C_3T_x$ ، $Nb_4C_3T_x$ ، Nb_2CT_x ، V_2CT_x ، $Ta_4C_3T_x$ ، $Cr_2TiC_2T_x$ و $Mo_2Ti_2C_3T_x$ ، $Mo_2TiC_2T_x$ ، $(Nb_{0.8}, Zr_{0.2})_4C_3T_x$ اشاره کرد. در شکل ۶ شماتیک لایه برداری از پیش سازهای MAX و غیر MAX جهت به دست آوردن لایه های مکسین نشان داده شده است [۷].

20. Bottom-up

21. Chemical vapor deposition



شکل ۷. مسیر دستیابی به تکه‌های دو بعدی MXene با سنتز از بالا به پایین: ابتدا، حکاکی انتخابی لایه (های) اتمی از یک پیش ساز لایه ای سه بعدی و سپس لایه برداری به صورت تکه‌های تک مورد نیاز است. (A) میکروگراف SEM ذرات Ti_3AlC_2 ، (B) میکروگراف SEM چند لایه $Ti_3C_2T_x$ پس از اچ کردن لایه Al و (C) میکروگراف TEM از روی همپوشانی لایه‌های $Ti_3C_2T_x$. نمودارهای تبدیل MAX به چند لایه MXene و لایه برداری آنها در ردیف پایین نشان داده شده است. [۱۴]

روش دوم براساس جایگیری گونه‌های مختلف یونی و/یا مولکول‌های مهمان (حلال) بین لایه‌های مواد بالک است. این کار موجب تورم^{۲۷} بین لایه‌ها و در نتیجه کاهش جاذبه بین لایه‌ها و پراکندگی لایه‌های دو بعدی می‌شود. گاهی اوقات برای جداسازی لایه‌های دو بعدی یک روش پر انرژی (هم زدن^{۲۸}، و یا استفاده از امواج فراصوت^{۲۹}) نیاز است. به عنوان مثال، MoS_2 را می‌توان با این روش پراکنده کرد. برخی از مواد لایه ای^{۳۰}، مانند خاک رس، حاوی یون‌های کاتیونی هستند که بار لایه سطحی^{۳۱} آنها را جبران می‌کند. برای این نوع جامدات، یک روش سوم که مستلزم تبادل کاتیون‌ها ای ذاتی^{۳۲} (ذرات کلوئیدی خاک یعنی رس و هوموس دارای قدرت جذب کاتیون‌های مختلف و تبادل آنها را با یکدیگر، به ویژه با یون هیدروژن می‌باشند. این عمل را تبادل کاتیونی می‌نامند) با یون‌های بزرگتر است، می‌تواند منجر به جداسازی نانوسطح تحت هم زدن شدید شود. اکسیدهای منگنز لایه ای ورمیکولیت^{۳۳} را می‌توان با استفاده از این روش لایه برداری کرد. آخرین و جدیدترین روش، این است که مواد لایه ای سه بعدی را مستقیماً در معرض امواج مافوق صوت در یک حلال قرار می‌دهند تا لایه‌ها از هم جدا شده و از تجمع مجدد آنها به حالت ماده سه بعدی جلوگیری شود. در جداسازی گرافیت

27. Swelling

28. Agitation

29. Sonication

30. Layered materials

31. Surface layer charges

32. Exchanging the intrinsic cations

33. Vermiculite

برای تولید فیلم‌های نازک Mo_2C ، WC و TaC استفاده کردند. با این حال، حتی نازک ترین فیلم‌های Mo_2C از حداقل شش لایه Mo_2C تشکیل شده بود. رویکرد دوم یک رویکرد از بالا به پایین^{۳۲} است که شامل لایه برداری از جامدات با ساختار لایه ای است. این روش را می‌توان بیشتر به لایه برداری مکانیکی و شیمیایی تقسیم کرد. این رویکرد نیز برای فاز MAX به طور کامل قابل استفاده نیست به دلیل این که پیوندهای بین عناصر M و Al در بیشتر موارد، کووالانسی/فلزی قوی هستند. بسیاری از فازهای MAX مبتنی بر Al در دمای بالاتر از ۱۳۰۰ درجه سانتی گراد سنتز می‌شوند [۱۴].

کلید تبدیل مواد جامد سه بعدی به مواد دو بعدی استفاده از روش بالا به پایین با لایه برداری شیمیایی، به همراه تضعیف پیوندهای بین لایه ای است. در این روش می‌توان لایه‌ها را در حلال پراکنده کرد. بنابراین، چالش اصلی، یافتن ترکیب مناسب برای مواد هدف لایه برداری^{۳۳} و حلال است. روش‌های لایه برداری در مایع به چهار دسته اصلی تقسیم‌بندی می‌شوند. اولین مورد شامل اصلاح^{۳۴} لایه‌های جامد سه بعدی با یک اکسید کننده است که در نهایت مواد حاصل در حلال مناسب پراکنده می‌شود. اکسید گرافن^{۳۵} (GO) را نیز می‌توان با این روش سنتز کرد که در آن از اسید سولفوریک و پتاسیم پرمنگنات^{۳۶} به عنوان اکسید کننده و آب به عنوان حلال استفاده می‌شود [۱۴].

22. Top-down

23. Intercalant

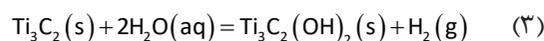
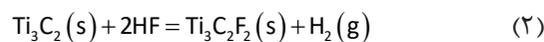
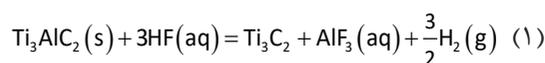
24. Treating

25. Graphene oxide

26. Permanganate potassium

واکنش در ته لوله سانتریفیوژ به عنوان رسوب ته نشین شده و از مایع رویی جدا می‌شود. با رسیدن pH مایع سطحی به مقدار خنثی (تقریباً به ۶)، m-MXene به دست می‌آید و می‌تواند با کمک خلا جمع‌آوری شود [۷].

در روش‌های سنتز اولیه، از اسید فلوریدریک (HF) تحت هم زدن مداوم استفاده شده و ساختارهای چند لایه از طریق اعمال فراصوت در محلول حاوی متانول^{۳۶} یا ایزوپروپیل الکل^{۳۷} لایه برداری می‌شد [۱]. با این حال، باید توجه داشت که استفاده از HF بسیار غلیظ به عنوان محلول اچ می‌تواند نقص‌های بسیاری را در نانوصفحات $Ti_3C_2T_x$ ایجاد کند. واکنش‌های ۱ تا ۳ مربوط به اسید هیدروفلوریک آبی به شرح زیر است [۷]:



از آنجا که محلول اچ سرشار از آنیون‌های فلورین و گروه‌های هیدروکسیل است، بنابراین، پس از اتمام حذف لایه عنصر «A»، سطح نانو ورق‌های مکسین Ti_3C_2 با عملگرهای فراوان F، O و/یا OH خاتمه می‌یابد که معمولاً به صورت $Ti_3C_2T_x$ نوشته می‌شود. بر این اساس، پیوندهای فلزی Ti-Al با پیوندهای ضعیف مانند پیوندهای هیدروژنی و واندرالس جایگزین می‌شوند. این پیوندهای ضعیف لایه لایه شدن $Ti_3C_2T_x$ را تسهیل می‌کند که استفاده از روش فراصوت یا حتی مخلوط کردن و تکان دادن دستی می‌تواند موجب لایه‌برداری کامل شود [۷].

چندین پارامتر از جمله کیفیت فاز MAX، ترکیب و اندازه ذرات، محلول اچ، دما و زمان ممکن است پارامترهای حکاکی مکسین را تحت تأثیر قرار دهند. اگر اعداد مربوط به "M" بالاتر باشد، به زمان یا غلظت اسید بیشتری نیاز دارند (به عنوان مثال، فازهای MAX، M_4AX_3 به شرایط اچ تهاجمی تر^{۳۸} از M_3AX_2 و M_2AX نیاز دارند). از مزایای اصلی حکاکی مکسین‌ها از طریق محلول HF، سادگی فرایند است، که باعث می‌شود این روش به طور گسترده مورد استفاده قرار گیرد. علاوه بر این، مطالعات اخیر قابلیت کاربرد این روش را برای سایر پیش سازهای کاربرد که به گروه فازهای MAX تعلق ندارند، مانند $Zr_3Al_3C_5$ و Mo_2Ga_2C ، نشان داد. با این حال، به دلیل این که در روش‌های HF از محلول‌های شیمیایی خطرناک استفاده می‌شود و مکسین‌های حاصل از اچ HF مواد تک لایه نیستند، بلکه تکه‌های چند لایه هستند که توسط پیوندهای ضعیف واندرالس روی هم چیده شده‌اند.

36. Methanol

37. Isopropyl alcohol

38. Aggressive

با این روش از N-methylpyrrolidone (NMP) به عنوان حلال استفاده شد. همانطور که در بالا ذکر شد، مکسین‌ها از فازهای MAX مشتق می‌شوند، که در آنها لایه‌های M-A کاملاً با ترکیبی از پیوندهای کووالانسی و فلزی به یکدیگر متصل شده‌اند، که لایه برداری مکانیکی و شیمیایی کلاسیک امکان پذیر نیست. برای حل این مورد ابتدا باید لایه‌های A به صورت انتخابی حک شود (شکل ۷) [۱۴].

استراتژی از بالا به پایین

فازهای MAX یک خانواده بزرگ با بیش از ۱۶۰ ترکیب مختلف را تشکیل می‌دهند که اکثریت قریب به اتفاق آنها در گروه فضایی P63/mmc یا مشتقات آن متبلور می‌شوند. این ساختار از هشت ضلعی MX_6 تشکیل شده است که دارای لایه‌های A است. تفاوت اصلی بین سه نوع فاز MAX، یعنی $n = 1, 2$ یا 3 ، در تعداد لایه‌های M ($2-4$) بین لایه‌های A است. آنها معمولاً به ترتیب ۲۱۱، ۳۱۲ یا ۴۱۳ نامیده می‌شوند [۱۴].

از مکسین‌های مختلف شناخته شده، همه به جز تعداد انگشت شماری با حکاکی لایه‌های Al از فازهای MAX به دست می‌آیند که چند استثنا وجود دارد. به عنوان مثال، با حکاکی Ti_3SiC_2 ، ماده $Ti_3C_2T_x$ به دست می‌آید. ماده اولیه برای سنتز Mo_2Ga_2C ، Mo_2CT_x است در حالی که از نظر فنی Mo_2Ga_2C یک فاز MAX نیست، ساختار آن کاملاً شبیه به ساختار ۲۱۱ است، با این تفاوت که هشت ضلعی MoC_6 به جای یک لایه، توسط دو لایه Ga در هم آمیخته شده است. اخیراً، گروه دیگری از جامدات لایه ای به عنوان پیش سازها مورد استفاده قرار گرفته است [۱۴].

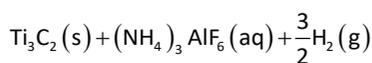
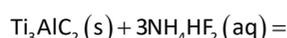
حکاکی با HF

در اکثر پروتکل‌های سنتز گزارش شده از حدود ۱۰ تا ۵۰ درصد وزنی HF استفاده می‌کنند. معمولاً مجموع ۰.۵ گرم فاز MAX Ti_3AlC_2 به تدریج در مدت ۵ دقیقه تا ۱۰ میلی لیتر به محلول اچ اضافه شده و به صورت مرتب در دمای اتاق هم زده می‌شود. افزودن تدریجی پودر MAX برای به حداقل رساندن حباب ناشی از طبیعت گرمای این واکنش ضروری است. فرآیند اچ باعث ایجاد پودرهای چند لایه مکسین می‌شود که لایه‌های دو بعدی آنها توسط پیوندهای هیدروژنی و واندرالس به هم وصل شده‌اند. پس از فرآیند حکاکی، شستشوی رسوبات به دست آمده با آب دیونیزه جهت حذف اسید باقی مانده و محصولات واکنش مانند فلوراید آلومینیوم^{۳۴} (AlF_3) ضروری است. فرآیند شستشو باید چندین بار از طریق سانتریفیوژ^{۳۵} تکرار شود. پس از هر چرخه سانتریفیوژ (۵ دقیقه در هر چرخه در ۲۰۰۰ گرم)، $Ti_3C_2T_x$ و همچنین پودر MAX بدون

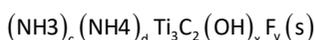
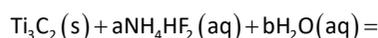
34. Aluminum fluoride

35. Centrifugation

علاوه بر این، روش حکاکی ملایم پیشنهادی، تخریب مکسین‌ها را در طول فرایند سنتز در مقایسه با استفاده از HF به حداقل می‌رساند. باید توجه داشت که هنگام ترکیب اسیدهای معمولی (مانند HCl و H₂SO₄) با LiF، می‌توان مکسینی چند لایه با کیفیت خوب نیز بدست آورد. NH₄HF₂ یکی دیگر از اجنت‌هایی است که می‌تواند لایه Al را از Ti₃AlC₂ حذف کند. به طور معمول، برای حذف کامل مولکول‌های آب به دام افتاده در Ti₃C₂T_x حاصل از حکاکی NH₄HF₂ در مقایسه با Ti₃C₂T_x با حکاکی HF، نیاز به مدت طولانی‌تر یا دمای بالاتر است [۷]. واکنش‌های ۵ و ۶ فرایندهای مربوطه را نشان می‌دهد:



(۵)



پس از حکاکی انتخابی، یون‌های NH₄⁺ و مولکول‌های NH₃ به هم متصل شده و قسمت انتهایی لایه‌های Ti₃C₂T_x را ایجاد می‌کنند در نتیجه فاصله بین لایه‌ها بیشتر شده که به بهترین وجه در الگوی XRD در شکل ۸-ب نشان داده شده است. این فاصله بین لایه ای برای برهم کنش یون‌های حجیم از جمله یون‌های Na و K مفید است. به عبارت دیگر، Ti₃C₂T_x حاصل از اچ NH₄HF₂ به دلیل ساختار لایه ای و مکان‌های فراوان اکسیداسیون مناسب برای باتری‌های سدم و پتاسیم است [۷].

حکاکی قلیایی و سایر روش‌های حکاکی

علیرغم حکاکی HF، روش‌های مبتنی بر نمک‌های فلوراید نیز می‌توانند لایه A را به طور موثر از فاز MAX حذف کنند، کار با محلول‌های HF حتی در غلظت پایین از نظر زیست محیطی ایمن نیست. به عبارت دیگر، توسعه روش‌های حکاکی بدون HF به دلیل ایمنی و نگرانی‌های زیست محیطی از اهمیت خاصی برخوردار است. اخیراً، حکاکی قلیایی فاز MAX نیز گزارش شده است و مکسین‌هایی با کیفیت خوب بدست آمده است. از آنجا که مکسین‌ها به اکسیژن محلول حساس هستند، بیرون راندن و حذف اکسیژن محلول در آب دیونیزه از طریق حباب آرگون می‌تواند مثر ثمر باشد. با فرموله کردن هیدروکسید سدیم^{۴۵} غلیظ (NaOH) در آب گازدار^{۴۶}، می‌توان به طور موثر فاز MAX را از طریق واکنش هیدروترمال و سپس مراحل شستشو چندگانه (نمودار ۸-ج) به طور موثری اچ کرد که در واکنش‌های ۷ و ۸ آورده شده است [۷].

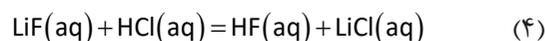
45. Sodium hydroxide

46. Deaerated water

هم‌چنین HF یک ماده شیمیایی خورنده است که می‌تواند از طریق پوست، بافت ماهیچه ای و استخوان‌ها نفوذ کرده و دفع آن سخت و استفاده خطرناک است [۱۴] که از کاربرد گسترده آن برای تولید در مقیاس بالا جلوگیری می‌کند [۱].

حکاکی با نمک فلوراید

با توجه به ماهیت خطرناک اسید هیدروفلوریک، یک محلول اچ ملایم‌تر نسبت به HF، حاوی لیتیوم فلوراید (LiF) و اسید کلریدریک (HCl) برای تشکیل محلول اسید هیدروفلوریک (HF) برای دستیابی به اچ انتخابی ایجاد شد. به طور معمول، پودر LiF در دمای اتاق و با هم زدن مداوم به محلول HCl افزوده می‌شود تا محلول شفاف HF با غلظت کم (۳-۵٪) طبق معادله ۴ به دست آید [۷]:



(۴)

افزودن فاز MAX به مخلوط فوق، مشابه روش HF است و بسته به کیفیت حاصل از مکسین، واکنش حدود ۲۴ ساعت طول خواهد کشید. باید توجه داشت که نسبت LiF به HCl بر روی کیفیت، اندازه جانبی نانو ورق^{۴۹} و قابلیت فرایند^{۴۰} تولید Ti₃C₂T_x اهمیت دارد. به عنوان مثال، دانه‌هایی با اندازه بزرگتر و با سطح تمیزتر به طور کلی هدایت الکتریکی بالاتری را نشان می‌دهند، زیرا نقص کمتری در نانو ورق وجود دارد. کسر نسبی^{۴۱} LiF در محیط واکنش و کاربرد (یا عدم کاربرد) روش اصلاح فراصوت می‌تواند به شدت بر اندازه جانبی مکسین‌ها و چگالی عیوب نیز تأثیر بگذارد. به عنوان مثال، اندازه نمونه مورد استفاده در روش فراصوت معمولاً زیر میکرون و حاوی تعداد زیادی حفره/نقص است، بر خلاف روش‌های بدون اعمال فراصوت که عرض متوسط ورق‌های مکسین‌ها ۳ میکرون است، همانطور که در شکل ۸-الف نشان داده شده است [۷].

یکی دیگر از مزایای روش اچ LiF-HCl، نفوذ بین لایه ای^{۴۲} یون‌های لیتیوم در مکسین حاصل است. در نتیجه، فاصله بین لایه‌های m-MXene در مقایسه با مکسین‌های اچ شده در HF بزرگتر است، که باعث می‌شود سینتیک تداخل یونی^{۴۳} سریعتر انجام شود و مکان‌های اکسیداسیون کاذب بیشتر ایجاد شود. این موارد، هم از لحاظ نظری و هم از نظر تجربی تأیید شده است. به عنوان مثال، لوکاستکایا و همکارانش نشان دادند که فیلم هیدروژل مکسین که با استفاده از روش LiF-HCl تهیه شده بود، خاصیت خازنی با ظرفیت فوق العاده بالا^{۴۴} را دارد [۷].

39. Nanosheet lateral size

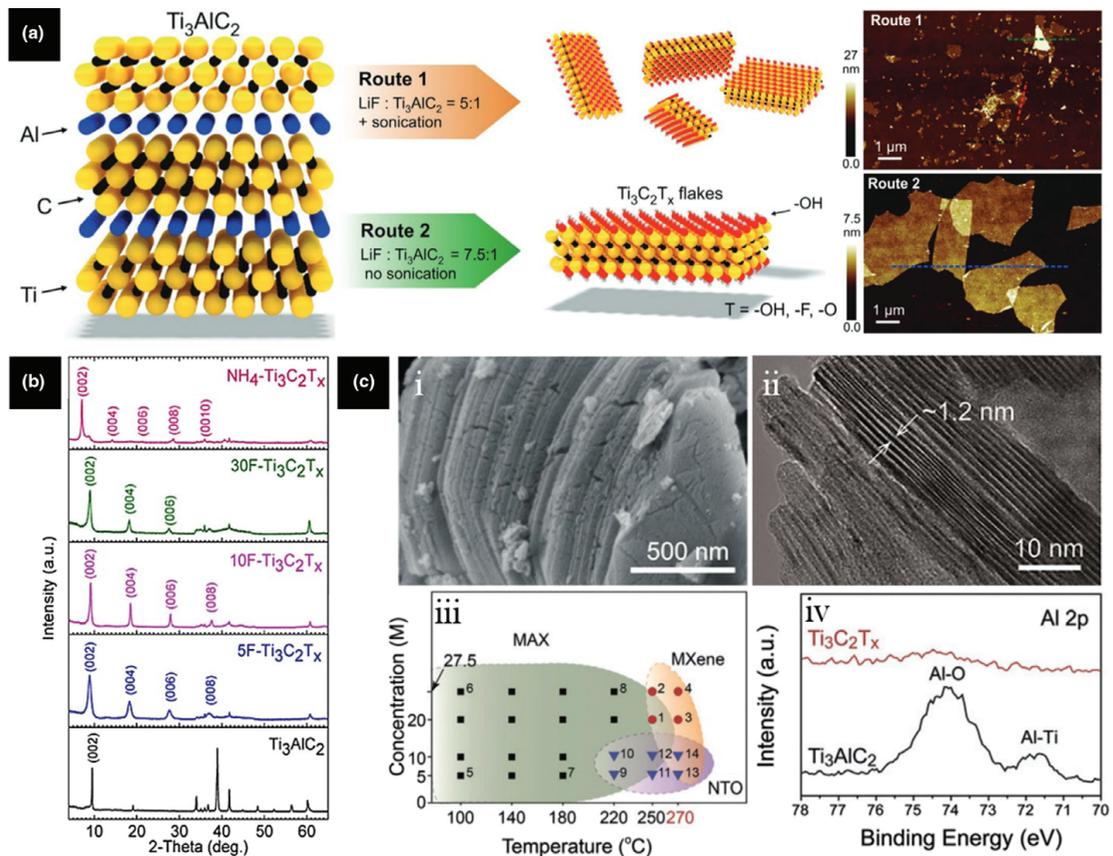
40. Processibility

41. Relative fraction

42. Situ intercalation

43. Ion intercalation

44. ultrahigh volumetric capacitance

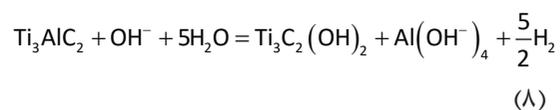


شکل ۸. (a) سنتز $Ti_3C_2T_x$ از طریق دو روش مختلف با استفاده از HCl-LiF و اثر فراصوت بر اندازه لایه، (b) الگوهای XRD پودر Ti_3AlC_2 و پودرهای مکسین $Ti_3C_2T_x$ به ترتیب با استفاده از مسیرهای $NH_4-Ti_3C_2T_x$ با ۵، ۱۰ و ۳۰ درصد وزنی HF سنتز شده اند و (c) (i) SEM، (ii) TEM مربوط به $Ti_3C_2T_x$ و (iii) تشکیل $Ti_3C_2T_x$ در دماهای مختلف هیدروترمال و غلظت NaOH. تقریباً سه منطقه وجود دارد. دایره‌های قرمز: MXene؛ مربع سیاه: MAX؛ مثلث‌های آبی: ترکیبات $Ti_3C_2T_x$ (iv) طیف XPS با وضوح بالا از Al 2P که حذف کامل Al را نشان می‌دهد [۷]

گرا تحت جریان آرگون در نمک فلوراید مذاب (مانند KF، NaF و LiF) آماده کرد.

از نظر مواد بین لایه ای^{۴۷} برای m-MXene، مولکول‌های مختلف آلی قطبی^{۴۸}، از جمله هیدرازین^{۴۹}، اوره^{۵۰}، دی متیل سولفوکسید^{۵۱} (DMSO)، ایزوپروپیل‌آمین^{۵۲} یا مولکول‌های بزرگ ارگانیک^{۵۳}، گزینه‌های خوبی برای تورم ساختار چند لایه هستند. یکی از اولین مواد گزارش شده برای افزایش فاصله لایه m-Ti₃C₂T_x حکاکی شده با HF بود. لایه‌های حاصل از حمام DMSO دارای ضخامت در حدود چند صد نانومتر هستند. از سوی دیگر، TBAOH و هیدروکسید تترامتیل آمونیوم^{۵۴} ((CH₃)₄NOH) نیز می‌توانند مکسین‌ها را لایه برداری کنند [۷].

- 47. Intercalants
- 48. Polar organic molecules
- 49. Hydrazine
- 50. Urea
- 51. Dimethyl sulfoxide
- 52. Isopropylamine
- 53. Large organic base molecules
- 54. Tetramethylammonium hydroxide



همانطور که قبلاً ذکر شد، فاز MAX خانواده بزرگی از کاربردهای سه تایی و نیتريد‌ها با ترکیبات فراوان است. بنابراین، شرایط اچ هر فاز MAX متفاوت است و به ساختار آن فاز وابسته است. معمولاً، مقدار n بیشتر در تری برای شکستن پیوندهای M-A نیاز دارد. به عنوان مثال، Nb₄AlC₃ (n = 3) نیاز به زمان حکاکی دو برابری نسبت به Nb₂AlC (یعنی n = 1) در شرایط حکاکی یکسان دارد [۷].

علاوه بر روش‌های حکاکی ذکر شده در بالا، گزارش‌هایی در مورد حکاکی نمک مذاب در دمای بالا نیز وجود دارد. به عنوان مثال، مکسین Ti₄N₃T_x چند لایه را می‌توان با حکاکی پودر پیش ساز MAX Ti₄AlN₃ در دمای ۵۵۰ درجه سانتی

جدول ۱. مقایسه رویکردهای سنتز از بالا به پایین و پایین به بالا مکسین‌ها [۱۷]

رویکرد بالا به پایین	رویکرد پایین به بالا
پیش ساز	از فاز MAX ساختار سه بعدی
روش	اچ‌های شیمیایی مانند اسید HF
شرایط سنتز	سنتز بدون فشار
دما	نیاز به دمای اتاق یا پایین جهت سنتز
مورفولوژی	ورق بزرگ نامنظم مکسین را می‌توان با اندازه جانبی چند صد نانومتر و ورق‌های نازک با ضخامت بین ۱۰ تا ۲۰۰ نانومتر تولید کرد.
خواص سطحی	عامل دار شدن - OH و -O پس از سنتز
	شروع رشد از اتم به بلور کریستالی فیلم مکسین
	اعمال روش رسوب بخار شیمیایی یا الگوی نمک (Salt-templating method) یا رسوب دهی با افزایش پلازما (Plasma enhanced deposition)
	کنترل جریان گاز را به عنوان منبع کربن
	نیاز به دمای بالای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد جهت سنتز
	تولید لایه نازک بدون نقص و بسیار کریستالی از چند لایه با اندازه جانبی بین ۱۰ تا ۱۰۰ میکرومتر
	عدم وجود گروه‌های عاملی پس از سنتز

دادن لایه‌های نازک Ti_3AlC_2 بر روی لایه TiC در خلاء فوق العاده بالا در دمای ۷۸۰ درجه سانتی گراد استفاده شده است. پس از حذف لایه آلومینیوم با استفاده از HF یا NH_4HF_2 ، که فیلم‌های اپی تکسیال^{۶۱} شفاف و رسانای $Ti_3C_2T_x$ به دست آمد، رسانایی فلزی به خوبی تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد حفظ شد. علاوه بر این، با افزایش دما، فیلم‌های نازک کاربرد فلز واسطه می‌تواند از طریق رسوب بخار شیمیایی (CVD) و رسوب لایه اتمی (ALD) سنتز شود [۷].

خو^{۶۲} و همکاران با روش CVD نانو صفحات کریستالی، فوق نازک و بدون نقص $\alpha-Mo_2C$ ، کاربرد تنگستن (WC) و کاربرد تانتالوم (TaC) را به دست آوردند. به عنوان مثال، کریستال‌های دو بعدی فوق نازک $\alpha-Mo_2C$ با ضخامت یکنواخت بیش از ۳ نانومتر و اندازه‌های جانبی بیش از ۱۰۰ میکرومتر در دمای ۱۰۸۵ درجه سانتی گراد با استفاده از متان به عنوان منبع کربن و فویل مس به عنوان زیر لایه، سنتز شدند. نکته مهم وابستگی ابررسانایی کریستال‌های $\alpha-Mo_2C$ به ضخامت کریستال و ناهمسانگردی قوی با جهت میدان مغناطیسی است. در گزارش دیگری توسط ژنگ^{۶۳} و همکاران، از کاتالیست مذاب آلیاژ Mo-Cu در فرآیند CVD برای رشد کریستال‌های Mo_2C روی گرافن استفاده شد. بلورهای Mo_2C دارای عرض ۵۰-۱۰۰ میکرومتر و ضخامت ۸ نانومتر بوده و بر روی گرافن به صورت عمودی تراز شده‌اند. در طول رشد، گرافن می‌تواند سطح کاتالیزور را غیرفعال کند و از واکنش اتم‌های Mo با متان جلوگیری کند و در نتیجه مکانیسم رشد از رسوب محدود^{۶۴} به نفوذ محدود^{۶۵} تغییر می‌کند [۷].

61. Epitaxial

62. Xu

63. Geng

64. Precipitation-limited

65. Diffusion-limited

بر خلاف استراتژی فراصوت - لایه برداری^{۵۵} DMSO، تکنیک لایه برداری با TBAOH و TMAOH بر مبنای تبادل یونی بین پروتون‌ها (H^+) و یون‌های تترا الکیل آمونیوم حجیم^{۵۶} (TMA^+ یا TBA^+) منجر به تورم ساختار مکسین‌ها و لایه برداری بیشتر با تکان دادن دستی می‌شود [۷].

استفاده از هیدروکسید تترا بوتیل آمونیوم^{۵۷} ($(C_4H_9)_4NOH$)، TBAOH) به همراه فراصوت منجر به لایه لایه شدن نانو صفحات می‌شود. طبق تئوری تابع چگالی (DFT)، خاتمه‌های اکسیژن روی $Ti_4N_3T_x$ مطلوب ترین سطوح از نظر انرژی در مقایسه با گروه‌های عاملی F و OH هستند [۷].

استراتژی پایین به بالا

همانطور که پیشتر گفته شد، انواع روش‌های انتخابی اچ برای سنتز مکسین‌ها به طور گسترده استفاده شده است. اخیراً، چندین روش سنتز از پایین به بالا نیز ایجاد شده است که شامل رسوب‌دهی بخار شیمیایی^{۵۸} (CVD) و رسوب لیزری پالسی با پلاسمای کمکی^{۵۹} (PEPLD) است. در مقایسه با فرایند حکاکی انتخابی، موادی که با روش‌های از پایین به بالا، به ویژه CVD تولید می‌شوند، دارای کیفیت بلوری بالایی هستند. لازم به ذکر است که این روش‌ها، امکان سنتز کاربردها (TMCS) و نیتريد‌های (TMNS) فلزات واسطه دو بعدی استوکيومتری مانند WC، TaC، TaN و MoN را که قابل سنتز با روش حکاکی انتخابی نیست نیز فراهم می‌کند [۱۴].

بر خلاف مسیرهای سنتز از بالا به پایین، پارامترهای موجود در روش‌های سنتز پایین به بالا، امکان کنترل محصول نهایی را فراهم می‌کند. از پاشش مگنترون DC^{۶۰} برای قرار

55. Intercalation-sonication

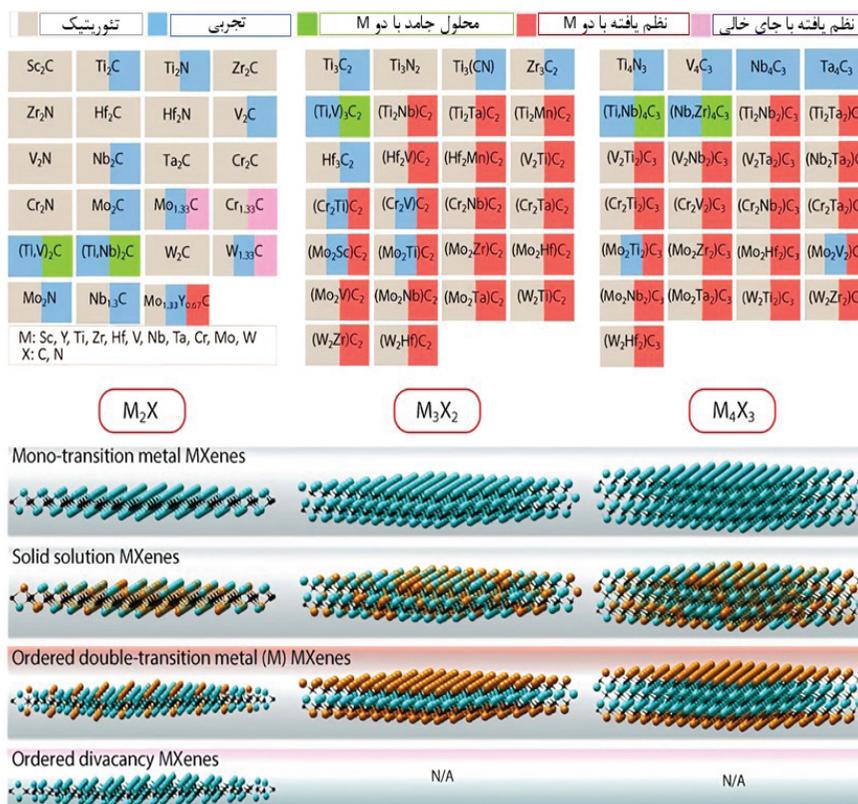
56. Tetraalkylammonium ions

57. Tetrabutylammonium hydroxide

58. Chemical vapor deposition

59. Plasma enhanced pulsed laser deposition

60. DC magnetron sputtering



شکل ۹. ردیف بالا ساختارهای mono-M مکسین را نشان می‌دهد. ردیف دوم محلول‌های جامد دو (SS) M را نشان می‌دهد. ترکیبات SS-double-M با رنگ سبز مشخص شده‌اند. ترکیب مکسین double-M نظم داده شده با رنگ قرمز مشخص شده است. ردیف چهارم یک ساختار واضح منظم را نشان می‌دهد، که فقط برای M₂C مکسین گزارش شده است، به دلیل اینکه حدود ۳۳٪ اتم را فضای خالی لایه‌های M تشکیل می‌دهد، ترکیب M_{1.33}C ایجاد و ترکیبات آن با رنگ صورتی مشخص شده است. این جدول شامل ترکیبات آزمایشی (با رنگ آبی مشخص شده) و نظری یا تجربی (با رنگ خاکستری مشخص شده) مکسین است. انتهای سطوح نشان داده نمی‌شود [۳].

به طور تصادفی (Nb_{1.33}CT_x) [۱۸-۲۲]. علاوه بر این، مکسین غیر استوکیومتری مانند Mo_{1.33}CT_x، W_{1.33}CT_x و ScC_xOH نیز توسعه یافته است [۲۱-۲۴].

با کشف مکسین با دو فلز واسطه (DTM) مشخص شد که برخی از DTM مکسین به شکل محلول‌های جامد تصادفی هستند که دو فلز واسطه به صورت تصادفی در سراسر ساختار دو بعدی توزیع شده‌اند. تا به امروز، تمام (DTM) مکسین سنتز شده، کاربیدها هستند و هیچ نیتريد یا کربنیتريد DTM مکسین دیده نشده است. ساختارهای مختلف و مجموعه ای از جفت فلزات واسطه، توانایی تنظیم DTM مکسین را برای ایجاد انواع رفتارهای نوری، مغناطیسی، الکتروشیمیایی، ترموالکتریک، کاتالیزوری یا مکانیکی خاص فراهم می‌کنند [۲۵].

هنگامی که دو فلز واسطه در یک ساختار مکسین مخلوط شوند، ویژگی منحصر به فردی از مکسین ظاهر می‌شود. علاوه بر تشکیل محلول‌های جامد مورد انتظار، مانند (Ti,Nb)CT_x (در شکل ۹ با رنگ سبز مشخص شده است)، فلزات واسطه می‌توانند به دو روش، ساختارهای منظم را در یک پوسته دو

۵. ساختار مکسین‌ها

شبه سازی‌های محاسباتی جهت درک ساختار، خواص و ویژگی‌های مواد و پیش بینی ترکیبات پایدار احتمالی جدید استفاده شده که به پیشرفت‌های تجربی کمک شایانی کرده است. از طریق این مطالعات، نشان داده شده است که مکسین می‌تواند در شش ساختار ممکن یافت شود: (۱) مواد با تک عنصر M^{۶۶} (به عنوان مثال Ti₂C و Nb₄C₃)، (۲) محلول‌های جامد (مانند (Ti, V)₃C₂ و (Cr, V)₃C₂)؛ (۳) دو عنصر M نظم یافته خارج از صفحه^{۶۷}، که در آنها یک فلز واسطه لایه‌های خارجی را اشغال می‌کند (معمولاً Cr و Mo)، در حالی که لایه‌های مرکزی توسط فلز دیگری پر می‌شود (به عنوان مثال، Nb و Ta)، به عنوان مثال مکسین Mo₂Ti₂C₃ و (۴) دو عنصر M نظم یافته داخل صفحه^{۶۸}، که در آن عناصر M مختلف در سطح پایه مرتب شده‌اند، مانند AlC_{2/3}(Y_{1/3})₂؛ (۵) جای خالی نظم داده شده، به عنوان مثال Mo_{1.33}CT_x و W_{1.33}CT_x و (۶) جای خالی توزیع شده

66. Mono-M

67. Ordered out-of-plane double-M elements

68. Ordered in-plane double-M elements

69. Double transition-metal

الکتريکی، را می‌توان با تغییر گروه‌های عملکردی^{۷۷}، شرایط استوکیومتری یا تشکیل محلول جامد تنظیم کرد. از نظر تجربی، رسانایی الکتریکی دیسک‌های فشرده مکسین مشابه گرافن چند لایه (مقاومت از 22Ω تا 339Ω ، بسته به شاخص "n" و فرمول شیمیایی آن) بوده و مقدار آن از مقادیر مربوط به نانولوله‌های کربنی و اکسید گرافن کاهش یافته (احیا شده) بالاتر است [۳۲]. اعداد مربوط به رسانایی در روش‌های شبیه سازی شده عموماً مقادیر بیشتری نسبت به آنهایی که به صورت تجربی مشاهده شده اند، دارند [۳۳].

در Ti_3C_2Tx هدایت الکتریکی اندازه گیری شده، به دلیل تفاوت در (۱) غلظت نقص^{۷۸} (۲) گروه‌های عملکردی سطحی، (۳) اصطکاک لایه لایه شدن^{۷۹}، (۴) فاصله بین لایه‌های مکسین و (۵) اندازه‌های جانبی^{۸۰} ناشی از هر روش اچ، از 850 S.cm^{-1} تا 9880 متغیر است [۳۴، ۳۵].

با توجه به ویژگی‌های ساختاری و الکترونیکی، این ترکیبات کاربردهای متفاوتی در زمینه‌های گوناگون دارند که می‌توان به کاربردهای مرتبط با انرژی، دستگاه‌های الکترونیکی و فوتونی، تقویت کننده‌ها، کامپوزیت‌ها، کاربردهای زیست پزشکی، مواد قابل استفاده برای کاربردهای ساختاری دما بالا (به عنوان مثال نازل‌ها و مبدل‌های حرارتی^{۸۱})، عناصر گرمایشی، کنتاکت‌های الکتریکی^{۸۲}، یاطاقان^{۸۳} چرخشی، مواد محافظتی در برابر سایش و خوردگی اشاره کرد [۱، ۳۶-۳۸]. گروهی از کاربردهای این دسته از مواد در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

صفحات نانو با سطح ویژه بالا برای افزایش عملکرد حسگر سنسورهای مبتنی بر مکسین مطلوب است. علاوه بر این، مکسین برای تشکیل مواد کامپوزیتی با سایر مواد و کنترل خواص مد نظر گزینه ایده‌آلی است. با طراحی سازه، مکسین و کامپوزیت دارای آن، انعطاف پذیری مکانیکی^{۸۴} و کشش پذیری^{۸۵} بیشتری را نشان می‌دهند، که کاربرد آن را در زمینه سنسورهای پوشیدنی، ذخیره انرژی و محافظ الکترومغناطیسی EMI^{۸۶}، دفع فاضلاب^{۸۷}، حسگرها^{۸۸}، کاتالیزور، نمایشگر کاغذ الکترونیکی^{۸۹}، باتری‌ها و غیره امکان‌پذیر می‌کند [۳۹-۴۱]. برخی از ساختارهای لایه ای بالک غیر MAX نیز به عنوان پیش سازهای مکسین مانند Mo_2Ga_2C ، $Zr_3Al_3C_5$ و $Hf_3(Al,Si)_4C_6$

بعدی مکسین تشکیل دهند (۱) با تشکیل ساندویچ^{۹۰}های اتمی از صفحات فلزات واسطه (برای $n \geq 2$) مانند $Mo_2TiC_2T_x$ ، (۲) ساختارهای مرتب شده درون صفحه ($n = 1$) مانند $(Mo_{2/3}Y_{1/3})_2CT_x$ [۱۳].

به طور مشابه با فازهای MAX، اتمهای "M" در یک ساختار هگزاگونال فشرده قرار گرفته اند، که در آن مکان‌های هشت ضلعی (اکتاهدرال) با اتمهای "X" پر شده است. با این حال، الگوی اتم‌ها می‌تواند با پارامتر استوکیومتری "n" تغییر کند. در حالی که ترکیبات M_2X دارای انباشته^{۹۱} AB (هگزاگونال) هستند، M_3X_2 و M_4X_3 دارای یک ABC (fcc) هستند. این تفاوت در انواع صفحات روی هم انباشته یکی از علل ناپایداری‌های مکسین است. به عنوان مثال، با وجود اینکه Mo_2C پایدار است، Mo_3C_2 و Mo_4C_3 به دلیل آرایش هگزاگونال اتم‌های Mo و C پایدار نیستند [۱، ۲۶، ۲۷].

با توجه به پیوند قوی بین خواص مکسین و خاتمه آن، درک ثبات و ساختارهای مکسین خاتمه یافته ضروری است. طبق محاسبات، شش نوع هماهنگی معمول بین فلزات انتقالی وجود دارد که منجر به ایجاد شش نوع پیوند شیمیایی بین اتم‌های M و X و تشکیل ترکیبات M_2XT_2 شد. مشخص شده است که با ثبات ترین پیکربندی معمولاً زمانی اتفاق می‌افتد که اتمهای انتهایی "T" در موقعیت‌های متفاوتی نسبت به "M" و "X" قرار بگیرند. با این حال، در برخی از ترکیبات (به ویژه دارای دو M)، اتم‌های "T" بالاتر از اتم‌های "X" هستند تا واکنش الکترونیکی آنها را افزایش دهند [۱].

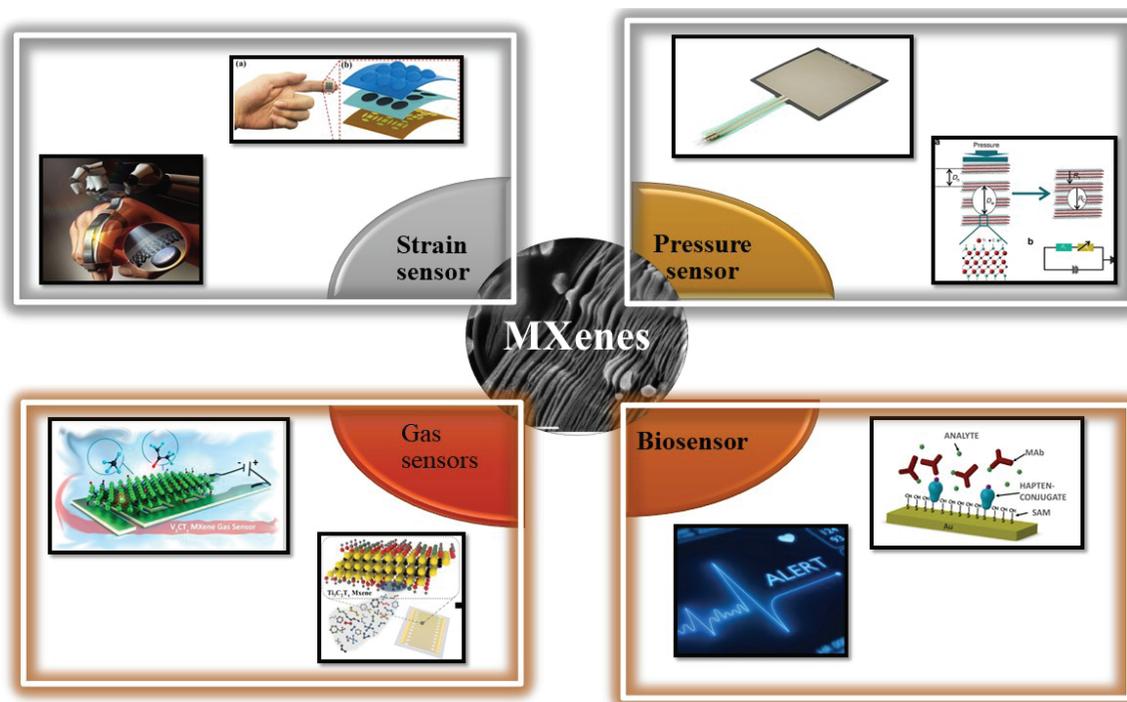
از نظر تجربی، مطالعات ساختار مکسین از طریق میکروسکوپ الکترونی عبوری روبشی با وضوح اتمی (STEM)^{۹۲}، میکروسکوپ الکترونی عبوری با وضوح بالا (HRTEM)^{۹۳} و طیف سنجی الکترونی افت انرژی (EELS)^{۹۴} ارزیابی شده اند. این تکنیک‌ها ممکن است اطلاعاتی در مورد ساختارهای اتمی مکسین، نقص‌های ذاتی و خاتمه سطحی ارائه دهند. علاوه بر این، طیف سنجی فوتوالکترون اشعه ایکس (XPS)^{۹۵} معمولاً برای شناسایی ترکیب شیمیایی و نسبت استوکیومتری عنصری آنها استفاده می‌شود. در نهایت، برخی از مطالعات از طیف سنجی رزونانس مغناطیسی هسته ای (NMR)^{۹۶} برای بدست آوردن اطلاعات در مورد عملکرد سطح مکسین و تأثیر مسیرهای مختلف سنتز (به عنوان مثال، HF و LiF و HCl) استفاده می‌شوند [۲۸-۳۱].

۶. کاربرد و خواص مکسین‌ها

دو ویژگی اصلی در مکسین یعنی خواص الکترونیکی و

77. Functional groups
78. Defect concentration
79. Delamination yield
80. Lateral sizes
81. Heat exchangers
82. Electrical contacts
83. Bearing
84. Mechanical flexibility
85. Stretchability
86. Electromagnetic shielding
87. Sewage disposal
88. Sensors
89. Electronic-paper display

70. Sandwiches
71. Stacking
72. Atomic-resolution scanning transmission electron microscopy
73. High-resolution transmission electron microscopy
74. Electron energy-loss spectroscopy
75. X-ray photoelectron spectroscopy
76. Nuclear magnetic resonance



شکل ۱۰. خلاصه ای از خواص مکسین ها [۳۹]

نانو است، در حالی که Mo_2CF_2 عامل دار شده با F یک ماده ترموالکتریک با قابلیت استفاده بالاست. با ترکیب گروه‌های اکسیژن و هیدروکسیل، $Sc_2C(OH)_{2-x}O_x$ به عنوان یک نیمه هادی مغناطیسی دوقطبی^{۱۰۲} در محتوای هیدروکسیل با x کم تعیین می‌شود. در آزمایش‌ها، صرف نظر از استفاده از محلول HF یا ترکیبی از LiF+HCl به عنوان محلول اچ، گروه‌های سطحی مکسین عموماً اکسیژن، فلورین و هیدروکسیل هستند. گروه فلورین مکسین مستعد تبدیل به هیدروکسیل در آب است و گروه هیدروکسیل با عملیات حرارتی به اکسیژن تبدیل می‌شود. اکسیژن، هیدروکسیل و فلورین، علاوه بر اینکه با مولکول‌های آب پیوند قوی دارند معمولاً به طور همزمان نیز وجود دارند، نسبت بین این گروه‌های سطحی مختلف بطور قابل توجهی به روش سنتز بستگی دارد [۲۴].

کاربیدهای فلز واسطه با خاتمه S و Se، رویکردهای جدیدی را برای تنظیم خواص کاربیدهای فلز واسطه اولیه نشان می‌دهد. با این حال، تا کنون، تعداد کمی از مطالعات بر روی این موضوع متمرکز شده اند. فقط کاربیدهای Ta و Nb به صورت آزمایشی در بین ده عنصر واسطه مورد مطالعه قرار گرفته اند. علاوه بر این، خواص الکترونیکی آنها هنوز در دست بررسی است [۴۷]. نتایج تجربی نشان داده است که برخی از کاربیدهای فلز واسطه (Ta_2C , Nb_2C ، و غیره) می‌توانند توسط اتم‌های گوگرد خاتمه یافته و ساختاری شبیه مکسین جدا شده توسط اسید هیدروفلوریک داشته باشند. این کاربیدهای

.....
 102. Bipolar magnetic semiconductor

استفاده می‌شوند [۴۲-۴۴]. از لحاظ تئوری، مکسین‌های دارای پایانه اکسیژن^{۹۰} در مقایسه با اعضای عامل‌دار شده^{۹۱} هیدروکسیل^{۹۲} و فلورین^{۹۳}، استحکام مکانیکی بالاتر و نیمه رسانایی بیشتری دارند. پیکربندی‌های بدون پایانه^{۹۴} و یا با پایانه اکسیژن^{۹۵} عملکرد بهتری را به عنوان مواد آند برای LIB نشان می‌دهد [۲۴].

سنتز مواد دو بعدی فرومغناطیس با نظم بلند دامنه^{۹۶}، پتانسیل این را دارد که کاربردهای آنها را در دستگاه‌های مغناطیسی، الکترونیکی اسپین^{۹۷} و مغناطیس نوری^{۹۸} گسترش دهد. علاوه بر نوع فلزات واسطه، انتهای سطح نیز یک عامل کلیدی است که بر خواص فیزیکی و شیمیایی تأثیر می‌گذارد. به عنوان مثال، Cr_2CO_2 یک ماده غیر مغناطیسی^{۹۹} است، در حالی که Cr_2CF_2 آنتی فرومغناطیس^{۱۰۰} است [۴۰، ۴۵، ۴۶]. همچنین Mo_2CBr_2 با پایانه ^{101}Br یک ابر رسانای مقیاس

-
 90. Oxygen terminated
 91. Functionalized
 92. Hydroxyl
 93. Fluorine
 94. Bare
 95. Oxygen terminate
 96. Long-range ferromagnetic order
 97. Spin-electrics
 98. Magneto-optic
 99. Nonmagnetic
 100. Antiferromagnetic
 101. Br terminated

دارای رسانایی فلزی با چگالی الکترونی بالا هستند. در ساختارهای نظم یافته با دو 10^9 m^{-3} ، بیان شده است که لایه‌های خارجی فلزات واسطه در مقایسه با لایه داخلی فلزی بر خواص الکترونیکی تأثیر بیشتری گذاشته اند [۴۹].

پایانه‌ها می‌توانند چگالی حالت 11 (DOS) را به میزان قابل توجهی کاهش دهند و ممکن است باند d را از سطح فرمی بالاتر ببرند و شکاف باند ایجاد کنند. این امر به دلیل هیبریداسیون بین گروه‌های عملکردی اوربیتال p با d مربوط به یکی از فلز واسطه M اتفاق می‌افتد [۲۸، ۵۰]. مطالعات در مورد اثرات گروه عملکردی نشان داد که اکثر ترکیبات M_2X_2 نیمه هادی هستند (به ویژه ترکیبات دارای اکسیژن خاتمه یافته) و مقدار شکاف باند آنها به طور معمول با عدد اتمی فلز M افزایش می‌یابد [۵۱].

در حالی که گروه‌های F و OH اثرات مشابهی روی ساختارهای الکترونیکی مکسین نشان می‌دهند، خاتمه اکسیژن منجر به رفتارهای متفاوتی می‌شود (O می‌تواند دو الکترون را بپذیرد و F و OH فقط یک الکترون را می‌پذیرند) [۲۸]. بنابراین، ساختار الکترونیکی مکسین به نوع اتم‌های M ، X و پایانه آنها بستگی دارد [۵۲].

با این حال، ترکیبات با n بالاتر (به عنوان مثال، Ti_3C_2 ، Zr_3C_2 ، Ti_4C_3 ، Nb_4C_3 و Ta_4C_3) صرف نظر از وجود گروه‌های عملکردی، به حالت فلزی باقی می‌مانند [۵۳-۵۵]. به عنوان مثال، Ti_3C_2 دارای چگالی الکترونی 10^{22} cm^{-3} است [۵۶] که باعث می‌شود، Ti_3C_2 به صورت تجربی ویژگی فلزی را ارائه دهد و باعث افزایش قابل توجه هدایت الکتریکی در پلیمر و ماتریس‌های سرامیکی شود [۱].

لازم به ذکر است که در مقایسه با کاربید-مکسین، به طور کلی DOS بالاتر نیتريد‌های مکسین و کربنیتريد‌ها از پیوند $Ti-N$ قوی تر (در مقایسه با $Ti-C$) و الکترون اضافی مربوط به نیتروژن ناشی می‌شود که می‌تواند منجر به هدایت الکتریکی بالاتر شود. بنابراین، ممکن است برای کاربردهایی مانند دستگاه‌های نانوالکترونیکی و حسگرها امیدوار کننده تر باشد. با این حال، مطالعات تجربی مربوط به نیتريد مکسین در مقایسه با کاربیدهای مشابه بسیار کمتر است [۱].

تحقیقات اخیر نشان داد که لایه‌های فلزی عامل اصلی تأثیر بر خواص الکترونیکی مکسین‌ها (رسانایی فلزی Ti_3C_2 در مقایسه با Mo_2TiC_2) هستند. وجود یک تعادل بین دما و فعالیت محلول اچ باید حفظ شود همچنین رفتار الکترونیکی را می‌توان از فلزی به شبه نیمه رسانا با تغییر دو لایه فلز واسطه M بیرونی یک کاربید دو بعدی تنظیم کرد. رسانایی الکتریکی تحت تأثیر روش‌های ساخت، به دلیل خاتمه سطح و میزان نقص 11 مختلف، می‌تواند متغیر باشد. هرچه نقص‌های بیشتر وجود داشته باشد، مکسین دارای رسانایی

فلز واسطه در مقایسه با سایر مکسین‌های ذکر شده به طور متفاوتی سنتز می‌شوند. به عنوان مثال، Nb_2CS_2 با استخراج اتم‌های Cu از فاز $Cu_xNb_2CS_2$ تهیه شده است [۴۰، ۴۸].

نتایج تجزیه و تحلیل فراوانی فونون 12 نشان داد که V_2CS_2 ، Cr_2NS_2 ، Nb_2CS_2 ، Hf_2CS_2 و Ta_2CS_2 از نظر دینامیکی پایدار هستند. محاسبات آنتالپی تشکیل این ترکیبات نشان داد که ساختارهای دو بعدی V_2CS_2 ، Nb_2CS_2 ، Ta_2CS_2 ، Hf_2CS_2 و Cr_2NS_2 پایدارترین ساختارها هستند. پایداری آن‌ها با شبیه سازی‌های دینامیکی مولکولی تا دمای 1000 کلوین تأیید شده است. انرژی‌های اتصال 14 برای سیستم‌های دو لایه V_2CS_2 ، Nb_2CS_2 ، و Cr_2NS_2 کوچکتر از 0.18 eV/atom است، که نشان می‌دهد تجزیه فیزیکی بین دو لایه M_2XS_2 رخ می‌دهد و می‌تواند به راحتی به لایه‌های جداگانه تقسیم شود. در مقابل، انرژی‌های اتصال برای سیستم‌های دو لایه Ta_2CS_2 و Hf_2CS_2 به ترتیب تا 0.326 eV/atom و 0.36 است، که نشان می‌دهد این لایه‌های دوگانه نسبتاً سخت جدا می‌شود. این موضوع را می‌توان به جایگیری موضعی اوربیتال p اتم‌های S نسبت داد. Ta_2CS_2 یک نیمه هادی با شکاف باند مستقیم 15 با شکاف باند 0.36 eV است [۴۰].

بر اساس بحث فوق، تنوع گروه‌های سطح یک روش کارآمد برای تنظیم خواص مکسین است. به تازگی، کلر به عنوان یک گروه سطحی جدید برای مکسین پیدا شده است. Ti_2ZnCl و $Ti_3Zn_2Cl_2$ با استفاده از اسیدیتته قوی لوئیس 16 مذاب $ZnCl_2$ به عنوان محلول اچ و با استفاده از حکاکی انتخابی خاتمه یافته با کلر، با موفقیت سنتز شد. بر اساس محاسبه اصول اولیه، مکان پایدار برای گروه کلر در هر مکسین تعیین می‌شود استحکام مکانیکی با عوض شدن فلز واسطه و عنصر X بطور قابل توجهی متفاوت است [۲۴].

به منظور درک و بکارگیری مکسین خاتمه یافته توسط این نوع عملگر، خواص ساختاری، مکانیکی و الکترونیکی $M_3X_2Cl_2$ و $M_2X_2Cl_2$ ($M = Mo, W, Hf, Nb, Zr, Cr, V, Ta, Ti$)، همه گروه‌های کلر در قسمت‌های بالای اتم‌های M پایینی در هر دو طرف تثبیت شده اند. در $M_3X_2Cl_2$ ، گروه‌های سطحی اکثر پیکربندی‌ها 17 در قسمت‌های بالای اتم‌های M میانی قرار دارند. با توجه به خواص مکانیکی، ثابت‌های الاستیک با انواع عناصر M و X متفاوت است [۲۴].

مکسین‌های بدون پایانه، به دلیل وجود الکترون‌های d از فلزات انتقال M [۸]، در نزدیکی سطح فرمی 18 [۲، ۳۲]

103. Phonon frequency analysis
104. Binding energies
105. Direct band gap semiconductor
106. Lewis acidity
107. Configurations
108. Fermi level

109. Double-M structures

110. Density of states

111. Defects

از آنجا که M-C و M-N از جمله ی پیوندهای با انرژی بالا هستند، انتظار می‌رود که خواص مکانیکی مکسین نیز مقادیر بالاتری را از خود نشان دهد. اولین مطالعه شبیه سازی، ثابت‌های الاستیک (C_{11}) مکسین را حداقل دو برابر بیشتر از فازهای MAX و سایر مواد دو بعدی، مانند MoS_2 نشان داده است. با این حال با استفاده از مقادیر C_{11} (1060 GPa) و توجه به اینکه مکسین‌ها ۲ تا ۴ برابر کمتر در مقایسه با گرافن به کار رفته است، سختی خمشی 121 کامپوزیت‌های حاوی مکسین بیشتر است، که نشان دهنده استفاده از آنها به عنوان تقویت کننده در کامپوزیت‌ها است. علاوه بر این، با توجه به گروه‌های عاملی، مکسین تعامل بهتری با زمینه‌های پلیمری نسبت به گرافن برای کاربردهای کامپوزیت دارد [۵۷].

یک ویژگی مهم این است که مدول هر دو کاربید و نیتريد مکسین با افزایش تعداد لایه‌ها ("n") کاهش می‌یابد. علاوه بر این، ترکیبات مبتنی بر نیتريد دارای مقادیر بالاتری نسبت به کاربیدهای مکسین هستند. وجود پایانه‌ها 122 (OH و F, O) مقدار C_{11} را به شدت کاهش می‌دهد.

در حالی که چندین روش آزمایش مکانیکی برای توصیف مواد بالک وجود دارد، ارزیابی خواص مکانیکی مواد دو بعدی همچنان چالش برانگیز است. اکثر داده‌های تجربی خواص مکانیکی نانومواد دو بعدی با استفاده از تکنیک نانوذره تعیین می‌شود، که در آن، به طور معمول، نوک AFM در مرکز فیلم مواد دو بعدی نیرو اعمال می‌کند. با این حال، علیرغم مشکلات مربوط به تکنیک‌های اندازه گیری، عدم کنترل سطوح مکسین، وجود نقص‌های ساختاری (به عنوان مثال، جای خالی) و رابط‌های کامپوزیت ضعیف یک چالش مهم است که باید از آن عبور کرد [۵۸-۶۱].

برای دستگاه‌های ائتلاف گرمای الکترونیکی و مرتبط با انرژی 123 به دلیل کوچک شدن اندازه پیوسته 124 ، مطالعات مربوط به رسانایی‌های حرارتی و ضرایب انبساط حرارتی مکسین هنوز کافی نیست. مطالعات شبیه سازی، ضرایب انبساط حرارتی کم و رسانایی حرارتی بیشتری را برای مکسین‌ها نسبت به تک لایه فسفورن 125 و MoS_2 پیش بینی کرد. به عنوان مثال، رسانایی‌های حرارتی پیش بینی شده برای Ti_2CO_2 ، Zr_2CO_2 ، Hf_2CO_2 و Sc_2CF_2 در دمای اتاق از $^{-1}K^{-1} 22 Wm$ تا ۴۷۲ متغیر است. مشابه سایر مواد هگزگونال دو بعدی، مکسین دو مسیر تقارن بالا (جهت آرمچیر 126 و زیگزگ 127) ارائه می‌دهد. در مورد ترکیبات اکسیژن دار، مشخص شد که هدایت حرارتی آنها با افزایش عدد اتمی فلز "M" افزایش می‌یابد [۶۲].

الکتريکی پایینی است که علت آن تخریب ساختار مرتب شده جهت حرکت آزاد الکترون‌ها 128 است. نقص‌ها را می‌توان با دوپ کردن 129 اتم‌های مختلف کنترل کرد. نقص‌های عدم تعادل بار، از طریق تبادل یون با چگالی الکتريکی 130 مختلف، ایجاد می‌شود. از آنجا که بیشتر محلول اچ، فلوراید است سطح مکسین معمولاً شامل گروه‌های عملکردی OH، O و F است. با تغییر پایانه سطح هدایت الکتريکی مکسین تغییر کرده است [۳۹].

به عنوان کاربیدها و کربنیتريد‌های فلز واسطه اولیه، مکسین نه تنها رسانایی قابل مقایسه با مس را دارد، بلکه دارای خواص کربن یا نیتريد نیز می‌باشد. ساختار انرژی باند و چگالی الکترونیکی حالت 131 (DOS) مکسین توسط نظریه عملکردی چگالی 132 (DFT) به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است. از مکسین‌ها به جهت خواص الکتريکی حساس می‌توان در جهت تشخیص کرنش از طریق مکانیسم ترک استفاده کرد، هنگامی که سنسور مکسین بر اثر کرنش ترک خورده باشد، با افزایش ترک، رسانایی/مقاومت آن تغییر می‌کند. مکسین‌ها را می‌توان در حسگرهای زیستی برای تشخیص جذب مولکول‌های کوچک و تشخیص حساس چندین گاز استفاده کرد. با ترکیب و غلظت متفاوت، مولکول‌ها به پایان سطح مکسین می‌چسبند، بر این اساس رسانایی تغییر می‌کند [۳۹].

از طریق جذب فیزیکی 133 یا جذب الکترواستاتیک 134 ، مولکول‌ها یا اتم‌هایی با ساختارهای مختلف می‌توانند به صورت انتخابی بر روی سطح مکسین‌ها جذب شوند که این امر برای رسیدن به خواص الکتريکی مورد نظر تأثیر می‌گذارد. به عنوان مثال، پلیمرهای زیست سازگار، مانند فسفولیپید سویا 135 ، به دلیل سطح زیاد و خاصیت زیست تخریب‌پذیری برای اصلاح سطح مکسین‌ها مناسب تر هستند. مکسین‌ها معمولاً بار منفی نشان می‌دهد زیرا پایانه‌های سطح آنها غنی از گروه‌های عاملی OH، O و F است. مولکول‌های با بار مثبت بر روی سطح مکسین با نیروی الکترواستاتیک جذب می‌شوند و این ترکیب باعث افزایش قابلیت حسگر و سیستم تحویل داروسانی 136 بهتر می‌شود [۳۹]. یک روش مفید برای افزایش خواص الکتريکی، اصلاح سطح از طریق عملیات حرارتی و قلیایی است. آنها نشان می‌دهند که رسانایی‌ها تا دو مرتبه افزایش می‌یابد. این افزایش از تغییر و/ یا حذف گروه‌های عملکردی (به ویژه F) ناشی می‌شود [۴۹].

112. Free movement of electrons
113. Doping
114. Electric densities
115. Electronic density of state
116. Density functional theory
117. Physical absorption
118. Electrostatic attraction
119. Soybean phospholipid
120. Drug transport

121. Bending rigidity
122. Terminations
123. Energy-related heat dissipation devices
124. Continuous size miniaturization
125. Phosphorene
126. Armchair
127. Zigzag directions

بازده تبدیل نور به گرما (۱۰۰٪)، که برای کاربردهای زیست پزشکی و تبخیر آب مفید است، نشان داده شد. با این وجود، برخی از ویژگی‌های مرتبط با نور، مانند بازده لومینسانس^{۱۳۷}، انتشار رنگ^{۱۳۸}، خواص نوری پلاسمونی و غیر خطی^{۱۳۹} نیاز به مطالعه دارند [۷۰]. نمونه‌ای از کاربردهای مکسین‌های مختلف سنتز شده در جدول ۲ آورده شده است که در ادامه به بررسی حوزه‌های کاربردهای خاص مکسین‌ها پرداخته شده است.

کاربردهای خاص مکسین‌ها

سنسور شیمیایی

مکسین‌ها می‌توانند به صورت انتخابی مولکول‌های زیستی (مانند گلوکز^{۱۴۰}، دوپامین^{۱۴۱}) و مولکول‌های گاز (مانند NH₃، NH₄) را از طریق کنترل مورفولوژی و اصلاح سطح جذب کنند و در نتیجه خواص الکتریکی آنها را تغییر دهند. با این حال، عناصر اصلی مکسین‌ها (عناصر لایه M) برخی از فلزات واسطه، مانند Ta، Ti و Nb هستند که نسبت به موجودات بیولوژیکی نسبتاً بی‌اثرند. آزمایشات درون بدن موجودات زنده^{۱۴۲} نشان داد که ترکیبات مکسین می‌تواند تجزیه شده و از بدن موش‌ها حذف شود، بنابراین زیست سازگاری خوبی دارند [۳۹].

ذخیره انرژی

به دلیل رسانایی الکتریکی بالا و توانایی یون‌ها برای انتشار و نفوذ آسان بین لایه‌ها، مکسین‌ها گزینه‌های خوبی به عنوان الکترود برای باتری‌های یون لیتیوم، سدیم، پتاسیم و آلومینیوم هستند. اکثر تحقیقات تا امروز عمدتاً بر روی باتری‌های Li-ion و Na-ion متمرکز شده‌اند (به ترتیب LIBs و SIBs). $ML Ti_3C_2T_x$ ظرفیتی در حدود 150 mAh g^{-1} در 100 mA g^{-1} و 260 mA g^{-1} برای LIB و حدود 100 mA g^{-1} در 100 mA g^{-1} برای SIBها گزارش شده است. همچنین الکترودهای ساخته شده از مواد لایه لایه شده (تک لایه آنها) عمدتاً به دلیل نواحی بالاتری که در معرض الکترولیت هستند ممکن است ظرفیت بالاتری داشته باشد. فیلتراسیون^{۱۴۴} سوسپانسیون‌های کلونیدی در خلا رایج ترین روشی است که فیلم‌های مستقل را تشکیل می‌دهد. با این حال، فیلم‌های به دست آمده به طور متراکم روی هم جمع می‌شوند و زمانی که مستقیماً به عنوان الکترود در هر دو LIB و SIB استفاده می‌شوند، ظرفیت‌های

با توجه به امکان مغناطیسی شدن متفاوت از فازهای MAX، مطالعات ارزیابی خواص مغناطیسی مکسین گسترش یافته است. چندین ترکیب اولیه (بدون پایانه) دارای گشتاور مغناطیسی^{۱۳۸} هستند، مانند Cr_2C ، Fe_2C ، Ti_3CN ، Ti_4C_3 ، Zr_3C_2 و Zr_2C ، Ti_2N ، Ti_3N_2 آنالیز در مورد هر مکسین و گروه عملکردی آن باید انجام شود. به عنوان مثال، Ti_3CNT_x و $Ti_4C_3T_x$ با گروه‌های عاملی غیر مغناطیسی، Cr_2NT_x و Cr_2CT_x در دمای اتاق با گروه‌های OH و F فرومغناطیس و بدون در نظر گرفتن پایان سطوح فرومغناطیس است [۶۳-۶۵].

جذب نور مرئی و فرابنفش برای دستگاه‌های حاوی الکترودهای رسانای فتوکاتالیستی^{۱۳۹}، فتوولتائیک^{۱۴۰}، اپتوالکترونیکی^{۱۴۱} و شفاف مهم است. فیلم‌های $Ti_3C_2T_x$ می‌توانند نور را در ناحیه UV-vis از ۳۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر جذب کنند و ضخامت ۵ نانومتر فیلم را تا ۹۱٫۲ درصد عبور نشان دهند. علاوه بر این، بسته به ضخامت فیلم و لایه مکسین، امکان ایجاد یک نوار جذب قوی و گسترده در حدود ۷۰۰-۸۰۰ نانومتر وجود دارد، که فیلم‌هایی به رنگ سبز کم رنگ ایجاد شده و برای کاربردهای نور درمانی^{۱۴۲} (PTT) مهم است. نکته قابل توجه این است که مقادیر عبور را می‌توان از طریق تغییر ضخامت فیلم و تداخل یونی بهینه کرد. به عنوان مثال، در حالی که هیدرازین^{۱۴۳}، اوره^{۱۴۴} و DMSO میزان انتقال $Ti_3C_2T_x$ را کاهش می‌دهند، هیدروکسید تترامتیل آمونیوم^{۱۴۵} (NME₄OH) میزان انتقال را از ۷۴٫۹ به ۹۲٫۰ درصد افزایش می‌دهد [۶۶-۶۸].

شبه سازی اولیه نشان داد که وجود گروه‌های عاملی بر خواص نوری این ترکیبات دو بعدی نیز تأثیر می‌گذارد. در واقع، خاتمه‌های فلورین و هیدروکسیل در مقایسه با اکسیژن ویژگی‌های مشابهی را نشان می‌دهند. به عنوان مثال، در محدوده قابل مشاهده (مرئی)^{۱۳۶}، خاتمه‌های F و OH جذب و بازتاب را کاهش می‌دهند، در حالی که در منطقه UV، تمام پایانه‌ها در مقایسه با مکسین اولیه و بدون پایانه بازتابندگی را افزایش می‌دهند [۶۹].

مکسین‌ها به دلیل شفافیت نوری در ناحیه قابل مشاهده و رسانایی فلزی، کاندیداهای بالقوه برای کاربردهای الکترودهای شفاف انعطاف پذیر هستند، در حالی که به دلیل بازتاب بالای آنها در منطقه ماوراء بنفش به عنوان پوشش در مقابل اشعه‌های ماوراء بنفش استفاده می‌شود. در نهایت،

- 128. Magnetic moments
- 129. Photocatalytic
- 130. Photovoltaic
- 131. Optoelectronic
- 132. Photothermal therapy
- 133. Hydrazine
- 134. Urea
- 135. Tetramethylammonium hydroxide
- 136. Visible range

- 137. Luminescence efficiency
- 138. Emission colors
- 139. Plasmonic and non-linear
- 140. Glucose
- 141. Dopamine
- 142. In vivo
- 143. Multilayered
- 144. Vacuum filtration

جدول ۲. نمونه ای از مکسین‌های سنتز شده و کاربردهای آن‌ها

نوع مکسین	مثال	روش	کاربرد	رفرنس
MX	TiCTz	HF/ HCl + LiF	کاتد با چگالی انرژی بالا برای باتری لیتیوم-هوا	[۷۲, ۷۱]
M3(XX)	Ti3CNTz	HF	لیزرهای قفل شده با حالت فمتوثانیه (Femtosecond Mode-Locked Lasers)	[۷۳]
M1-33X	Mo1-33CTz	HF	ابرخازن‌های هیبریدی روی-یون	[۷۵, ۷۴, ۲۲]
M1-33X	Nb1-33CTz	HF/ HCl + LiF	همچنین برای نمک زدایی آب و تولید هیدروژن از طریق واکنش تکامل هیدروژن (HER): Hydrogen evolution reaction	[۷۷, ۷۶]
M2X	Ti2CTz	HF/HCl + LiF, etc.	سیستم‌های ذخیره انرژی	[۷۸, ۴۶]
M2X	Ti2CTz	NaCl+KCl+CuCl2+(NH4)2S2O8	خواص ذخیره سازی لیتیوم یون	[۷۹]
M2X	V2CTx	HF	ذخیره سازی انرژی پیشرفته	[۸۰]
M2X	(Mo0.67Y0.33)2CTz	HF	ابزارهای اپتیکی	[۷۴]
M2X	(Ti0.5V0.5)2CTz	HF	باتری ها	[۸۱, ۴۶]
M2X	Mo2CTz	HF/HCl + LiF	رفتار نیمه هادی/مواد الکتروود برای یون‌های لیتیوم	[۸۲]
M3X2	Ti3C2Tz	HF/NH4F2, HCl + LiF, etc.	درمان پزشکی فوتوترمال (Photothermal therapy)	[۸۴, ۸۳]
M3X2	Ti3C2Tz	NaCl+KCl+CuCl2+(NH4)2S2O8	خواص ذخیره سازی لیتیوم یون/ الکتروودهای ابرخازن	[۸۵, ۷۹]
M3X2	Ti3C2Tz	HCl + LiF	دیودهای فوتونیک غیر فعال (Passive Photonic Diodes)	[۸۶]
M3X2	(Cr0.67Ti0.33)3C2Tz	HCl + LiF	ذخیره انرژی	[۲۶]
MX2	(Cr2Ti)C2Tz	HCl + LiF	الکتروود برای باتری‌های لیتیوم یون دستگاه‌های ذخیره انرژی	[۲۶]
M3X2	(Ti0.5V0.5)3C2Tz	HF	الکتروکاتالیست	[۸۱]
M3X2	Zr3C2Tz	HF	ذخیره انرژی الکتروشیمیایی، الکتروودهای شفاف	[۴۳]
M4X3	Ti4N3Tz	LiF, NaF, KF molten salts	ذخیره انرژی	[۸۷]
M4X3	(Nb0.8Ti0.2)4C3Tz	HF	ابرخازن ها	[۸۸]
M4X3	(Mo0.5Ti0.5)4C3Tz	HF	سلول‌های سوختی	[۲۶]
M4X3	Nb4C3Tz	HF	کاتالیزور جدید پایدار برای واکنش تکامل هیدروژن/ابرخازن‌های با کارایی بالا	[۹۱-۸۹]
MX2	(Mo2Ti)C2Tz	HF + هیدروکسید تتراپوتیلامونیوم TBAOH	انواع حسگر، نوری، الکترونیکی، الکتروشیمیایی	[۹۲]
MX3	(Mo2Ti2)C3Tz	HF + هیدروکسید تتراپوتیلامونیوم TBAOH	انواع حسگر، نوری، الکترونیکی، الکتروشیمیایی	[۹۲]
M2X	V2C Tz	HF + هیدروکسید تتراپوتیلامونیوم TBAOH	رساناهای نوری (Optical conductivities)	[۶۷]
M2X	Nb2C Tz	HCl + LiF	دستگاه‌های ذخیره انرژی Li-Ion	[۹۳]
MX2	(Mo2Ti)C2Tz	HF	باتری‌های لیتیوم و سدیم یون پر قدرت و عمر طولانی	[۹۴]
M2X3	(MoTi)2C3Tz	HF	ذخیره انرژی الکتروشیمیایی و محافظت از تداخل الکترومغناطیسی (Electromagnetic interference shielding)	[۹۵]
M2X3	(MoV)2C3Tz	HF	الکتروود مثبت در ابر خازن	[۹۶]

داده‌اند. پاسخ و واکنش این دسته مواد به خوبی لایه‌های مس نازک بوده و بهتر از کامپوزیت‌های مصنوعی و سایر کامپوزیت‌های مبتنی بر گرافن با همان ضخامت بود (شکل ۱۰-ب). مزیت بزرگ مکسین‌ها در مقایسه با محافظ‌های فلزی، سهولت در ساخت آنها به شکل لایه‌های بسیار نازک است. مکسین‌های نازک $Ti_3C_2T_x$ روی آنتن‌های نانو اسلات^{۱۵۰} در محدوده تراهرتز نیز نتایج بسیار خوبی را از خود نشان داده‌اند. شهزاد و همکارانش محافظ $EMI Ti_3C_2T_x$ آلژینات سدیم^{۱۵۱} را بررسی کرده و به انعطاف‌پذیری خوب و رسانایی بالا با لایه‌های نسبتاً نازک پی برده‌اند و بالاترین مقدار اثربخشی محافظ در بین موارد گزارش شده از هر ماده مصنوعی شناخته شده دیگری را با ضخامت قابل مقایسه گزارش کرده‌اند. فیلم $Ti_3C_2T_x$ با ضخامت ۴۵ میکرومتر اثر حفاظتی EMI، ۹۲ دسی بل (بیش از ۵۰ دسی بل برای یک فیلم ۲٫۵ میکرومتری) را نشان داد. این عملکرد از هدایت الکتریکی عالی فیلم‌های $Ti_3C_2T_x$ (۴۶۰۰ زیمنس در سانتی‌متر) و بازتاب‌های داخلی متعدد از تکه‌های $Ti_3C_2T_x$ در فیلم‌های آزاد (غیر متصل)^{۱۵۲} نشأت می‌گیرد [۹۸]. علاوه بر این، کنترل امواج الکترومغناطیسی با فرکانس تراهرتز، آنها را نامزدهای امیدوارکننده‌ای برای دستگاه‌های فرکانس رادیویی و ارتباطات بی سیم می‌کند [۹۷].

کامپوزیت‌های MXenes-Polymer

نتایج چندین مطالعه نیز در مورد سنتز و خصوصیات کامپوزیت‌های پلیمر - مکسین منتشر شده است. اولین گزارش در مورد معرفی $Ti_3C_2T_x$ به دو پلیمر، یعنی پلی (وینیل الکل) (PVA)^{۱۵۳} و پلی (دی آلیل دی آمونیوم کلرید) (PDDA)^{۱۵۴} است. هر دو پلیمر PVA و PDDA در آب محلول هستند بنابراین با سوسپانسیون‌های آبی کلوتیدی مکسین‌ها سازگار هستند. PVA به دلیل غلظت زیاد گروه‌های هیدروکسیل ساختار اصلی و استفاده گسترده از آن در الکترولیت‌ها و کامپوزیت‌های ژل مانند مورد توجه خاص قرار گرفته است [۹۷].

با افزایش میزان مکسین‌ها در کامپوزیت، استحکام کششی، مدول الاستیک و رسانایی بهبود میابد (شکل ۱۰-ج). با این حال، کرنش شکست به طور قابل توجهی با افزایش میزان مکسین کاهش می‌یابد. فیلم‌های با محتوی ۴۰ درصد وزنی دارای رسانایی 0.4 mS cm^{-1} هستند که با رسانایی 2400 mS cm^{-1} مربوط به فیلم‌های مکسین خالص یا رسانایی 220 mS cm^{-1} مربوط به یک نمونه ۹۰ درصد وزنی PVA-MXene، مقایسه شده است. در کل کامپوزیت‌هایی

نزدیک به صفر را نشان می‌دهند. برای غلبه بر این مشکل، بایستی از انباشته شدن مجدد لایه‌ها اجتناب شود [۹۷]. ژائو^{۱۴۵} و همکارانش از پلی (متیل متاکریلات) برای ساخت الکترودهایی با سوراخ‌های نسبتاً بزرگ با اندازه میکرومتر استفاده کردند، که ظرفیت 300 mAh g^{-1} را در جریان 100 mA g^{-1} به عنوان آند در SIBها نشان داد. روش متفاوتی توسط ناتو^{۱۴۶}، ژائو و همکاران استفاده شد نتایج نشان‌دهنده این موضوع است که کاهش یا افزایش pH یک کلوتید مکسین باعث می‌شود که تکه‌های مکسین، لخته شده و در یک ساختار باز مزومتخلخل^{۱۴۷} متشکل از تکه‌های مکسین مچاله شده جمع شوند (شکل ۱۱-الف). که در این روش ظرفیت تقریبی 180 mAh g^{-1} (اسید) و 230 mAh g^{-1} (باز) در 100 mA g^{-1} در SIB نشان داد. مزیت استفاده از NaOH این موضوع است که کاتیون بازی بین ورقه‌های مکسین قرار می‌گیرد و تلفات چرخه اول در SIB را در مقایسه با زمانی که KOH، LiOH یا HCl به عنوان عامل لخته‌کننده استفاده می‌شد، کاهش می‌دهد [۹۷].

ابرخازن‌ها^{۱۴۸} نوع دیگری از ابزار ذخیره انرژی هستند. دو مکانیسم اصلی ذخیره بار در ابرخازن‌ها وجود دارد و واکنش‌های اکسایشی-احیایی^{۱۴۹} سطحی که مسئول انتقال بار الکترون هستند و ظرفیت دو گانه الکتریکی، که در آن یک لایه دوگانه الکترواستاتیک بر روی سطح الکتروود تشکیل می‌شود. در اصل، به دلیل انتقال بار فارادیک، در حالت اول می‌توان شارژ بیشتری نسبت به حالت دوم ذخیره کرد. مکانیسم ذخیره‌سازی بار در مکسین‌ها عمدتاً شبه خازنی است و همراه با رسانایی بالای آن، ظرفیت‌های حجمی آن‌ها از RuO_2 پیشی می‌گیرد که بالاترین ظرفیت‌های حجمی را دارد. از نظر وزنی، مکسین‌ها بهتر از کربن فعال هستند [۹۷].

محافظت داخلی الکترومغناطیسی

هنگامی که مدارهای الکترونیکی کار می‌کنند، تداخل الکترومغناطیسی EMI ایجاد می‌کنند، که می‌تواند بر مدارهای دیگر در مجاورت آنها تأثیر منفی بگذارد. از آنجایی که دستگاه‌های الکترونیکی به مرور کوچک‌تر شده و سریع‌تر کار می‌کنند، این امر منجر به افزایش EMI شده و محافظت لازم است. مواد با خواص محافظتی خوب نیز بایستی سبک وزن و انعطاف پذیر باشند تا بتوانند با دستگاه‌های الکترونیکی ادغام شوند. فیلم‌های فیلتر شده با خلاء از جمله $Ti_3C_2T_x$ ، $Mo_2Ti_2C_3T_x$ و $Mo_2TiC_2T_x$ برای این منظور آزمایش شدند.

همه مکسین‌ها قابلیت‌های محافظتی عالی EMI را در محدوده فرکانس الکترومغناطیسی گیگاهرتز از خود نشان

150. Nano-slot antennae

 151. $Ti_3C_2T_x$ /sodium alginate

152. Free-standing films

153. Poly(vinyl alcohol)

154. Poly(diallyldimethylammonium chloride)

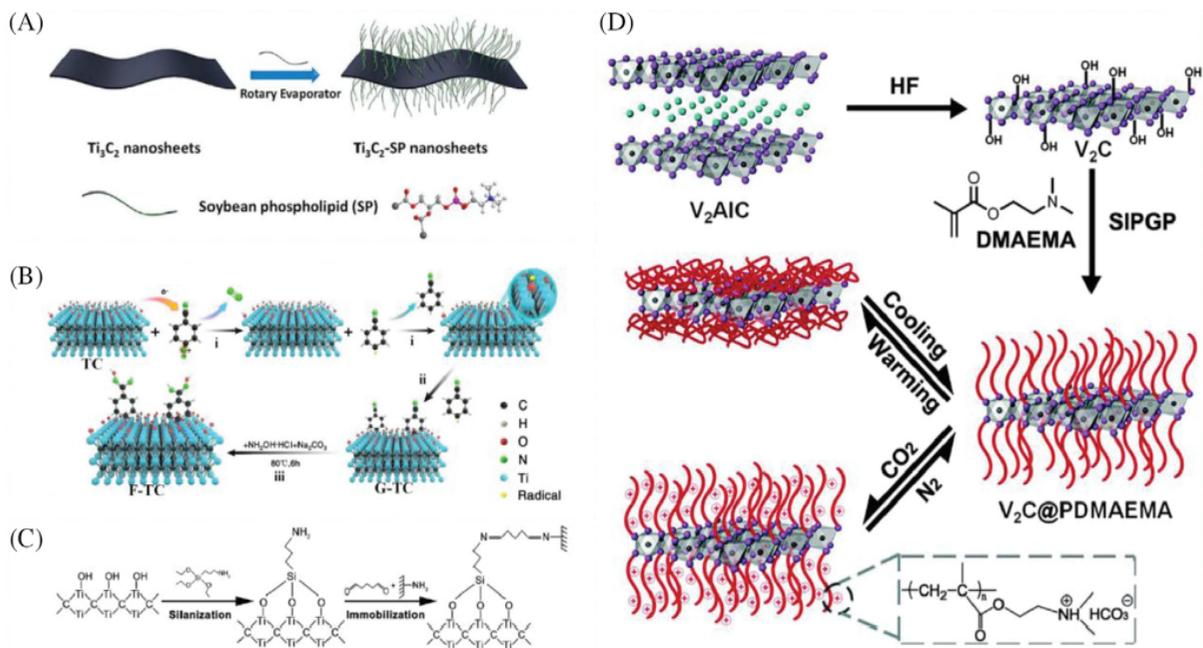
145. Zhao

146. Natu

147. Mesoporous open structure

148. Supercapacitors

149. Redox reactions



شکل ۱۱. استراتژی شیمی سطح مبتنی بر پلیمر A، شماتیک نانوصفحات اصلاح شده با SP، B. مکانیزم برای عملکرد MXene $Ti_3C_2T_x$ ، تصویر شماتیک بی حرکتی لپهاز از طریق پیوند کووالانسی، D، پیشرفت ساخت سیستم هیبریدی $V_2C@PDMAEMAsmart$. اتم‌های C با خاکستری، اتم‌های V با بنفش و اتم‌های Al با آبی نشان داده می‌شوند. برای سادگی، فقط دو لایه V_2C در اینجا نشان داده شده است [۱۰۰]

خوب جهت زیست سازگاری، خواص مرتبط با الکترونیک برای اسکن‌های توموگرافی کامپیوتری (CT)^{۱۵۷} و تصویربرداری تشدید مغناطیسی (MRI)^{۱۵۸}. اگرچه اخیراً برخی از کاربردهای بالقوه مکسین‌ها در زیست پزشکی مورد بررسی قرار گرفته است، اما استفاده از آنها به چند خانواده کاربرد تیتانیوم و کاربرد تانتالیوم محدود شده است. با سازماندهی ساختاری مکسین‌ها و استفاده از تنظیم پارامترهای سنتز آنها، مکسین‌های زیست سازگار را می‌توان برای افزایش تجزیه پذیری زیستی و کاهش سمیت سلولی مواد در حسگر زیستی، درمان سرطان، دارورسانی و کاربردهای تصویربرداری زیستی استفاده کرد. فعالیت ضد میکروبی مکسین‌ها و مکانیسم آن در آسیب رساندن به غشای سلولی نیز اخیراً مورد بحث قرار گرفته است [۱۱۷].

۷. نتیجه گیری

با توجه به جدید بودن این مواد، درک بهتر ساختار و روش‌های سنتز مکسین‌ها منجر به بهینه سازی، بهبود خواص آنها و استفاده مناسب تر از آنها در زمینه‌های متفاوت می‌شود. همچنین با استفاده از فازهای ماکس متفاوت، می‌توان مکسین‌های بیشتری با ساختارهای منحصربه‌فرد سنتز کرد. برخی از ساختارهای منحصربه‌فرد ممکن است ظرفیت انتقال الکترون را بهبود داده که می‌تواند بر ناحیه

حاوی درصد وزنی پایین مکسین گزارش نشده است، زیرا کاربرد این فیلم‌ها بر روی هدایت الکترونیکی کامپوزیت‌ها متمرکز شده است [۹۷]. به دنبال این مطالعه، $Ti_3C_2T_x$ ، اولین و گسترده ترین مکسین مورد مطالعه، در سایر ماتریس‌های پلیمری گنجانده شده است. پلی پیرول (PPY)، پلیمر رسانا، جز کامپوزیت‌هایی هستند که با پلیمریزاسیون درجا و بدون اکسیدان پیرول و با مخلوط کردن آن در نسبت ۱:۱ یا ۲:۱ با سوسپانسیون‌های کلوئیدی لایه لایه $Ti_3C_2T_x$ سنتز شدند. وجود PPY بین لایه‌های مکسین با اندازه‌گیری‌هایی توسط پراش اشعه ایکس و همچنین حضور MLs^{155} نیز مشاهده شد (یعنی لایه‌برداری MXene ناقص بود). هنگامی که یک کامپوزیت PPY/ $Ti_3C_2T_x$ به عنوان الکترودهای ابرخازن مورد آزمایش قرار گرفت، ظرفیت حجمی معادل $1000 F cm^{-3}$ (۴۱۶ $F g^{-1}$) را با حفظ ظرفیت ۹۲٪ پس از ۲۵۰۰۰ سیکل به همراه داشت. علاوه بر این، ظرفیت افزایش یافته به دلیل اثر کمکی افزایش فاصله بین لایه‌های $Ti_3C_2T_x$ به دلیل اختلاط PPY رسانا و به دلیل فرآیندهای ردوکس سطحی PPY^{156} و MXene اتفاق می‌افتد [۹۹].

کاربردهای بیو

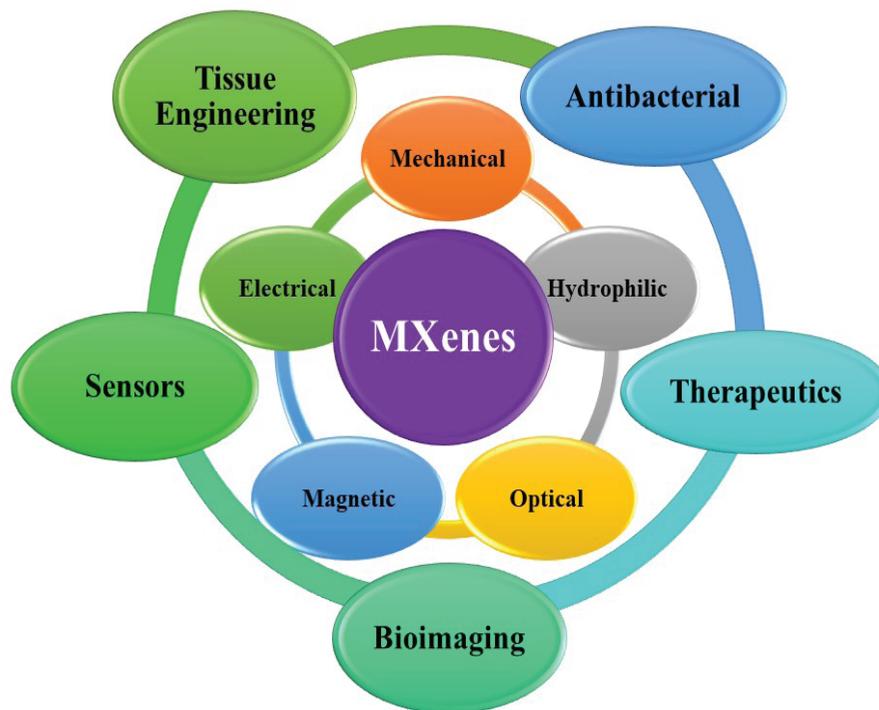
مکسین‌ها خواص بیولوژیکی خوبی را نشان می‌دهند از جمله: مساحت سطح بالا برای بارگذاری/تحویل دارو، آب دوستی

157. Computed tomography scans

158. Magnetic resonance imaging

155. Multilayers

156. Surface redox processes



شکل ۱۲. خلاصه خواص و کاربردهای زیست پزشکی MXenes [۱۰۰]

زیست پزشکی، مانند درمان دینامیک آکوستیک بررسی شود. با توجه به اینکه گاهی اوقات دو ماده برای بهبود عملکرد کلی در مواد کامپوزیتی ترکیب می‌شوند. نمونه‌ای از زمینه‌های پیشنهادی کاربرد مکسین‌ها در شکل ۱۲ آورده شده است.

انتقال دارو نیز تاثیرگذار باشد. همچنین با ادغام و ترکیب باهم، مواد دو بعدی دیگری را که حوزه کاربرد آنها را در زمینه سنسورها و ذخیره انرژی است، گسترش داد. برای مثال می‌توان به مکانیسم آنتی باکتریال MoS_2 اشاره کرد. در نهایت، کاربردهای بیشتری از مکسین‌ها باید در زمینه‌های

References

- [1] Ronchi, R.M., J.T. Arantes, and S.F. Santos, *Synthesis, structure, properties and applications of MXenes: Current status and perspectives*. Ceramics International, 2019. **45**(15): p. 18167-18188.
- [2] Coleman, J.N., et al., *Two-dimensional nanosheets produced by liquid exfoliation of layered materials*. Science, 2011. **331**(6017): p. 568-571.
- [3] Anasori, B. and Y. Gogotsi, *Introduction to 2D transition metal carbides and nitrides (MXenes)*, in *2D Metal carbides and nitrides (MXenes)*. 2019, Springer. p. 3-12.
- [4] Oyama, S.T., et al., *Preparation and characterization of early transition metal carbides and nitrides*. Industrial & engineering chemistry research, 1988. **27**(9): p. 1639-1648.
- [5] Levy, R. and M. Boudart, *Platinum-like behavior of tungsten carbide in surface catalysis*. science, 1973. **181**(4099): p. 547-549.
- [6] Alhabeib, M., et al., *Guidelines for synthesis and processing of two-dimensional titanium carbide (Ti₃C₂T_x MXene)*. Chemistry of Materials, 2017. **29**(18): p. 7633-7644.
- [7] Zhang, C., et al., *Two-dimensional transition metal carbides and nitrides (MXenes): synthesis, properties, and electrochemical energy storage applications*. Energy & Environmental Materials, 2020. **3**(1): p. 29-55.
- [8] Khazaei, M., et al., *Novel electronic and magnetic properties of two-dimensional transition metal carbides and nitrides*. Advanced Functional Materials, 2013. **23**(17): p. 2185-2192.
- [9] Zhao, Q.-N., et al., *A review on Ti₃C₂T_x-based nanomaterials: synthesis and applications in gas and humidity sensors*. Rare Metals, 2021. **40**(6): p. 1459-1476.
- [10] Li, X., et al., *Applications of MXene (Ti₃C₂T_x) in photocatalysis: a review*. Materials Advances, 2021.
- [11] Kim, S., et al., *Application of a Ti₃C₂T_x MXene-Coated Membrane for Removal of Selected Natural Organic Matter and Pharmaceuticals*. ACS ES&T Water, 2021. **1**(9): p. 2164-2173.
- [12] Tuzluca, F.N., et al. *Two Dimensional Ti₃C₂T_x MXene Electrode For Supercapacitor Application*. in *2019 IEEE Regional Symposium on Micro and Nanoelectronics (RSM)*. 2019. IEEE.
- [13] Gogotsi, Y. and B. Anasori, *The rise of MXenes*. 2019, ACS Publications.
- [14] Verger, L., et al., *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**(3): p. 149-163.
- [15] Li, T., et al., *Fluorine-free synthesis of high-purity Ti₃C₂T_x (T=OH, O) via alkali treatment*. Angewandte Chemie International Edition, 2018. **57**(21): p. 6115-6119.
- [16] Lipatov, A., et al., *Effect of synthesis on quality, electronic properties and environmental stability of individual monolayer Ti₃C₂ MXene flakes*. Advanced Electronic Materials, 2016. **2**(12): p. 1600255.
- [17] Zamhuri, A., et al., *MXene in the lens of biomedical engineering: synthesis, applications and future outlook*. Biomedical engineering online, 2021. **20**(1): p. 1-24.
- [18] Halim, J., et al., *Synthesis of two-dimensional Nb₁.33C (MXene) with randomly distributed vacancies by etching of the quaternary solid solution (Nb₂/3Sc₁/3) 2A1C MAX phase*. ACS Applied Nano Materials, 2018. **1**(6): p. 2455-2460.
- [19] Paul, J., et al., *Computational methods for 2D materials: discovery, property characterization, and application design*. Journal of Physics: Condensed Matter, 2017. **29**(47): p. 473001.
- [20] Tan, T.L., et al., *High-throughput survey of ordering configurations in MXene alloys across compositions and temperatures*. ACS nano, 2017. **11**(5): p. 4407-4418.
- [21] Meshkian, R., et al., *W-based atomic laminates and their 2D derivative W₁.33C MXene with vacancy ordering*. Advanced Materials, 2018. **30**(21): p. 1706409.
- [22] Tao, Q., et al., *Two-dimensional Mo_{1.33}C MXene with divacancy ordering prepared from parent 3D laminate with in-plane chemical ordering*. Nature communications, 2017. **8**(1): p. 1-7.
- [23] Zhou, J., et al., *Two-Dimensional Hydroxyl-Functionalized and Carbon-Deficient Scandium Carbide, ScC_xOH, a Direct Band Gap Semiconductor*. ACS nano, 2019. **13**(2): p. 1195-1203.
- [24] Qin, Y., et al., *Structural, mechanical and electronic properties of two-dimensional chlorine-terminated transition metal carbides and nitrides*. Journal of Physics: Condensed Matter, 2020. **32**(13): p. 135302.
- [25] Hong, W., et al., *Double transition-metal MXenes: Atomistic design of two-dimensional carbides and nitrides*. MRS Bulletin, 2020. **45**(10): p. 850-861.
- [26] Anasori, B., et al., *Two-dimensional, ordered, double transition metals carbides (MXenes)*. ACS nano, 2015. **9**(10): p. 9507-9516.
- [27] Shein, I. and A. Ivanovskii, *Planar nano-block structures Tin+1AlO.5Cn and Tin+1Cn (n= 1, and 2) from MAX phases: Structural, electronic properties and relative stability from first principles calculations*. Superlattices and microstructures, 2012. **52**(2): p. 147-157.
- [28] Pang, J., et al., *Applications of 2D MXenes in energy conversion and storage systems*. Chemical Society Reviews, 2019. **48**(1): p. 72-133.
- [29] Persson, I., et al., *On the organization and thermal behavior of functional groups on Ti₃C₂ MXene surfaces in vacuum*. 2D Materials, 2017. **5**(1): p. 015002.
- [30] Harris, K.J., et al., *Direct measurement of surface termination groups and their connectivity in the 2D MXene V₂CT_x using NMR spectroscopy*. The Journal of Physical Chemistry C, 2015. **119**(24): p. 13713-13720.
- [31] Persson, I., et al., *2D transition metal carbides (MXenes) for carbon capture*. Advanced Materials, 2019. **31**(2): p. 1805472.
- [32] Ghidui, M., et al., *Conductive two-dimensional titanium carbide 'clay' with high volumetric capacitance*. Nature, 2014. **516**(7529): p. 78-81.
- [33] Yockell-Lelièvre, H., F. Lussier, and J.-F. Masson, *Influence of the particle shape and density of self-assembled gold nanoparticle sensors on LSPR and SERS*. The Journal of Physical Chemistry C, 2015. **119**(51): p. 28577-28585.
- [34] Muckley, E.S., M. Naguib, and I.N. Ivanov, *Multi-modal, ultrasensitive, wide-range humidity sensing with Ti₃C₂ film*. Nanoscale, 2018. **10**(46): p. 21689-21695.

- [35] Muckley, E.S., et al., *Multimodality of structural, electrical, and gravimetric responses of intercalated MXenes to water*. ACS nano, 2017. **11**(11): p. 11118-11126.
- [36] Eklund, P., M. Beckers, and U. Jansson, H. Högberg, L. Hultman. *Thin Solid Films*, 2010. **518**: p. 18511878.
- [37] Barsoum, M., *A new class of solids: Thermodynamically stable nanolaminates*. Prog. Solid State Chem, 2000. **28**: p. 201.
- [38] Barsoum, M.W. and M. Radovic, *Elastic and mechanical properties of the MAX phases*. Annual review of materials research, 2011. **41**: p. 195-227.
- [39] Xin, M., et al., *MXenes and their applications in wearable sensors*. Frontiers in chemistry, 2020. **8**: p. 297.
- [40] Yang, J., et al., *Stability and electronic properties of sulfur terminated two-dimensional early transition metal carbides and nitrides (MXene)*. Computational Materials Science, 2018. **153**: p. 303-308.
- [41] Zhang, S.-Z., et al., *First-Principle Study of Hydrogen Evolution Activity for Two-dimensional M₂XO₂-2x(OH) 2x (M= Ti, V; X= C, N)*. Acta Physico-Chimica Sinica, 2017. **33**(10): p. 2022-2028.
- [42] Meshkian, R., et al., *Synthesis of two-dimensional molybdenum carbide, Mo₂C, from the gallium based atomic laminate Mo₂Ga₂C*. Scripta Materialia, 2015. **108**: p. 147-150.
- [43] Zhou, J., et al., *A two-dimensional zirconium carbide by selective etching of Al₃C₃ from nanolaminated Zr₃Al₃C₅*. Angewandte Chemie International Edition, 2016. **55**(16): p. 5008-5013.
- [44] Zhou, J., et al., *Synthesis and electrochemical properties of two-dimensional hafnium carbide*. ACS nano, 2017. **11**(4): p. 3841-3850.
- [45] Liao, Y., et al., *2D-layered Ti₃C₂ MXenes for promoted synthesis of NH₃ on P₂₅ photocatalysts*. Applied Catalysis B: Environmental, 2020. **273**: p. 119054.
- [46] Naguib, M., et al., *Two-dimensional transition metal carbides*. ACS nano, 2012. **6**(2): p. 1322-1331.
- [47] Suzuki, M., I.S. Suzuki, and J. Walter, *Magnetism and superconductivity in M c Ta 2 S 2 C (M= Fe, Co, Ni, and Cu)*. Physical Review B, 2005. **71**(22): p. 224407.
- [48] Boller, H. *Some Aspects of the Intercalation Chemistry of the Niobium and Tantalum Carbide Chalcogenides Nb₂S₂S₂, Ta₂S₂C and Ta₂Se₂C*. in *Solid State Phenomena*. 2011. Trans Tech Publ.
- [49] Hantanasirisakul, K. and Y. Gogotsi, *Electronic and optical properties of 2D transition metal carbides and nitrides (MXenes)*. Advanced materials, 2018. **30**(52): p. 1804779.
- [50] Sinha, A., Dhanjai; Zhao, HM; Huang, YJ; Lu, XB; Chen, JP; Jain, R. *MXene: An emerging material for sensing and biosensing*. TrAC, Trends Anal. Chem, 2018. **105**: p. 424-435.
- [51] Sarikurt, S., et al., *The influence of surface functionalization on thermal transport and thermoelectric properties of MXene monolayers*. Nanoscale, 2018. **10**(18): p. 8859-8868.
- [52] Tang, X., et al., *2D metal carbides and nitrides (MXenes) as high-performance electrode materials for Lithium-based batteries*. Advanced Energy Materials, 2018. **8**(33): p. 1801897.
- [53] Xie, Y. and P. Kent, *Hybrid density functional study of structural and electronic properties of functionalized Ti n+ 1 X n (X= C, N) monolayers*. Physical Review B, 2013. **87**(23): p. 235441.
- [54] Khazaei, M., et al., *OH-terminated two-dimensional transition metal carbides and nitrides as ultralow work function materials*. Physical Review B, 2015. **92**(7): p. 075411.
- [55] Fu, Z., et al., *Stabilization and strengthening effects of functional groups in two-dimensional titanium carbide*. Physical Review B, 2016. **94**(10): p. 104103.
- [56] Peng, Q., et al., *Unique lead adsorption behavior of activated hydroxyl group in two-dimensional titanium carbide*. Journal of the American Chemical Society, 2014. **136**(11): p. 4113-4116.
- [57] Kurtoglu, M., et al., *First principles study of two-dimensional early transition metal carbides*. Mrs Communications, 2012. **2**(4): p. 133-137.
- [58] Borysiuk, V.N., V.N. Mochalin, and Y. Gogotsi, *Bending rigidity of two-dimensional titanium carbide (MXene) nanoribbons: A molecular dynamics study*. Computational Materials Science, 2018. **143**: p. 418-424.
- [59] Borysiuk, V.N., V.N. Mochalin, and Y. Gogotsi, *Molecular dynamic study of the mechanical properties of two-dimensional titanium carbides Tin+ 1Cn (MXenes)*. Nanotechnology, 2015. **26**(26): p. 265705.
- [60] Plummer, G., et al., *Nanoindentation of monolayer Tin+ 1CnTx MXenes via atomistic simulations: The role of composition and defects on strength*. Computational Materials Science, 2019. **157**: p. 168-174.
- [61] Lipatov, A., et al., *Elastic properties of 2D Ti₃C₂T_x MXene monolayers and bilayers*. Science advances, 2018. **4**(6): p. eaat0491.
- [62] Luo, K., et al., *First-principles study on the electrical and thermal properties of the semiconducting Sc 3 (CN) F 2 MXene*. RSC advances, 2018. **8**(40): p. 22452-22459.
- [63] Khazaei, M., et al., *Electronic properties and applications of MXenes: a theoretical review*. Journal of Materials Chemistry C, 2017. **5**(10): p. 2488-2503.
- [64] Wu, F., et al., *Theoretical understanding of magnetic and electronic structures of Ti₃C₂ monolayer and its derivatives*. Solid State Communications, 2015. **222**: p. 9-13.
- [65] Shein, I. and A. Ivanovskii, *Graphene-like nanocarbitides and nanonitrides of d metals (MXenes): synthesis, properties and simulation*, Micro Nano Lett. **8** (2013) 59–62. 2012.
- [66] Maleski, K., et al., *Size-dependent physical and electrochemical properties of two-dimensional MXene flakes*. ACS applied materials & interfaces, 2018. **10**(29): p. 24491-24498.
- [67] Ying, G., et al., *Conductive transparent V₂C₂T_x (MXene) films*. FlatChem, 2018. **8**: p. 25-30.
- [68] Zhang, C., et al., *Transparent, flexible, and conductive 2D titanium carbide (MXene) films with high volumetric capacitance*. Advanced materials, 2017. **29**(36): p. 1702678.
- [69] Berdiyrov, G., *Optical properties of functionalized Ti₃C₂T₂ (T= F, O, OH) MXene: First-principles calculations*. Aip Advances, 2016. **6**(5): p. 055105.
- [70] Huang, K., et al., *Two-dimensional transition metal carbides and nitrides (MXenes) for biomedical applications*. Chemical Society Reviews, 2018. **47**(14): p. 5109-5124.

- [71] von Treifeldt, J.E., et al., *The effect of Ti₃AlC₂ MAX phase synthetic history on the structure and electrochemical properties of resultant Ti₃C₂ MXenes*. *Materials & Design*, 2021. **199**: p. 109403.
- [72] Wang, Z., et al., *TiC MXene High Energy Density Cathode for Lithium-Air Battery*. *Advanced Theory and Simulations*, 2018. **1**(9): p. 1800059.
- [73] Jhon, Y.I., et al., *Metallic MXene saturable absorber for femto-second mode-locked lasers*. *Advanced Materials*, 2017. **29**(40): p. 1702496.
- [74] Persson, I., et al., *Tailoring Structure, Composition, and Energy Storage Properties of MXenes from Selective Etching of In-Plane, Chemically Ordered MAX Phases*. *Small*, 2018. **14**(17): p. 1703676.
- [75] Etman, A.S., J. Halim, and J. Rosen, *Mo₁. 33CTz-Ti₃C₂Tz Mixed MXene Freestanding Films for Zinc-ion Hybrid Supercapacitors*. *Materials Today Energy*, 2021: p. 100878.
- [76] Sang, X., et al., *Atomic defects in monolayer titanium carbide (Ti₃C₂T_x) MXene*. *ACS nano*, 2016. **10**(10): p. 9193-9200.
- [77] Lind, H., et al., *Hydrogen Evolution Reaction for Vacancy-Ordered i-MXenes and the Impact of Proton Absorption into the Vacancies*. *Advanced Sustainable Systems*, 2021. **5**(2): p. 2000158.
- [78] Ying, G., et al., *Transparent, conductive solution processed spin-cast 2d ti₂ct_x (mxene) films*. *Materials Research Letters*, 2017. **5**(6): p. 391-398.
- [79] Ma, G., et al., *Li-ion storage properties of two-dimensional titanium-carbide synthesized via fast one-pot method in air atmosphere*. *Nature communications*, 2021. **12**(1): p. 1-6.
- [80] Fatima, M., et al., *Experimental and Computational Analysis of MnO₂@ V₂C-MXene for Enhanced Energy Storage*. *Nanomaterials*, 2021. **11**(7): p. 1707.
- [81] Abdelmalak, M.N., *MXenes: A new family of two-dimensional materials and its application as electrodes for Li-ion batteries*. 2014: Drexel University.
- [82] Halim, J., et al., *Synthesis and characterization of 2D molybdenum carbide (MXene)*. *Advanced Functional Materials*, 2016. **26**(18): p. 3118-3127.
- [83] Halim, J., et al., *Transparent conductive two-dimensional titanium carbide epitaxial thin films*. *Chemistry of Materials*, 2014. **26**(7): p. 2374-2381.
- [84] Liu, G., et al., *Surface modified Ti₃C₂ MXene nanosheets for tumor targeting photothermal/photodynamic/chemo synergistic therapy*. *ACS applied materials & interfaces*, 2017. **9**(46): p. 40077-40086.
- [85] Cao, M., et al., *Room temperature oxidation of Ti₃C₂ MXene for supercapacitor electrodes*. *Journal of The Electrochemical Society*, 2017. **164**(14): p. A3933.
- [86] Dong, Y., et al., *Saturable absorption in 2D Ti₃C₂ MXene thin films for passive photonic diodes*. *Advanced Materials*, 2018. **30**(10): p. 1705714.
- [87] Urbankowski, P., et al., *Synthesis of two-dimensional titanium nitride Ti₄N₃ (MXene)*. *Nanoscale*, 2016. **8**(22): p. 11385-11391.
- [88] Yang, J., et al., *Two-dimensional Nb-based M₄C₃ solid solutions (MXenes)*. *Journal of the American Ceramic Society*, 2016. **99**(2): p. 660-666.
- [89] Ghidui, M., et al., *Synthesis and characterization of two-dimensional Nb₄C₃ (MXene)*. *Chemical communications*, 2014. **50**(67): p. 9517-9520.
- [90] Zhao, S., et al., *Flexible Nb₄C₃T_x Film with Large Interlayer Spacing for High-Performance Supercapacitors*. *Advanced Functional Materials*, 2020. **30**(47): p. 2000815.
- [91] Tan, Y., et al., *Nb₄C₃T_x (MXene) as a new stable catalyst for the hydrogen evolution reaction*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021. **46**(2): p. 1955-1966.
- [92] Anasori, B., et al., *Control of electronic properties of 2D carbides (MXenes) by manipulating their transition metal layers*. *Nanoscale Horizons*, 2016. **1**(3): p. 227-234.
- [93] Mashtalir, O., et al., *Amine-assisted delamination of Nb₂C MXene for Li-ion energy storage devices*. *Advanced Materials*, 2015. **27**(23): p. 3501-3506.
- [94] Maughan, P.A., et al., *Pillared Mo₂TiC₂ MXene for high-power and long-life lithium and sodium-ion batteries*. *Nanoscale advances*, 2021. **3**(11): p. 3145-3158.
- [95] Mendes, R.G., et al., *In Situ N-Doped Graphene and Mo Nanoribbon Formation from Mo₂Ti₂C₃ MXene Monolayers*. *Small*, 2020. **16**(5): p. 1907115.
- [96] Pinto, D., et al., *Synthesis and electrochemical properties of 2D molybdenum vanadium carbides-solid solution MXenes*. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020. **8**(18): p. 8957-8968.
- [97] Verger, L., et al., *MXenes: an introduction of their synthesis, select properties, and applications*. *Trends in chemistry*, 2019. **1**(7): p. 656-669.
- [98] Shahzad, F., et al., *Electromagnetic interference shielding with 2D transition metal carbides (MXenes)*. *Science*, 2016. **353**(6304): p. 1137-1140.
- [99] Boota, M., et al., *Pseudocapacitive electrodes produced by oxidant-free polymerization of pyrrole between the layers of 2D titanium carbide (MXene)*. *Advanced Materials*, 2016. **28**(7): p. 1517-1522.
- [100] Huang, J., et al., *Progress and biomedical applications of MXenes*. *Nano Select*, 2021.