

چارچوب‌های فلز-آلی (MOFs): اصول، سنتز و کاربرد

لیدا هاشمی، علی مرسلی

دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم پایه، گروه شیمی معدنی

چکیده

جامدات بلورین با فضاهایی در ابعاد مولکولی، به دلیل خواص جذب سطحی بی‌نظیر و مساحت سطح بالا، تبادل یون و خواص کاتالیزوری، توجه شیمی‌دانان را به خود جلب کرده‌اند. دسته جدیدی از این جامدات چارچوب‌های فلز-آلی (MOF) یا پلیمرهای کوئوردیناسیونی متخلخل می‌باشند که موضوع روز دنیای شیمی معدنی می‌باشند. اکثر پلیمرهای کوئوردیناسیونی متخلخل یا MOFها در محدوده اندازه حفره ی مزومتخلخل و میکرومتخلخل قرار می‌گیرند (ترکیبات مزومتخلخل دارای قطری بین ۲ تا ۵۰ نانومتر و ترکیبات میکرومتخلخل قطری کمتر از ۲ نانومتر دارند). ساختار و خواص MOFها وابسته به دو فاکتور مواد اولیه و فرایند سنتز می‌باشند. در مورد مواد اولیه دو عامل یون فلزی و یا کلاسترهای فلزی از یک طرف و اتصال دهنده‌های آلی از طرف دیگر، که واحدهای سازنده ثانویه (SBU: Secondary Building Unit) نامیده می‌شوند، مورد توجه می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: چارچوب‌های فلز-آلی، تخلخل، سایز حفره، مساحت سطح.

morsali_a@modares.ac.ir

۱- مقدمه

مساحت سطح ویژه جزء مهمترین فاکتورهای ارزیابی میزان ظرفیت حفره است و با تعداد مولکول‌هایی که تماس مستقیم دارند در ارتباط می‌باشد. در سال‌های اخیر مساحت سطح ویژه قابل دسترس از مقدار $2/500 \text{ m}^2/\text{g}$ که مربوط به ژئولیت‌ها می‌باشد، به مقادیر بزرگ $2/4500-5900 \text{ m}^2/\text{g}$ در پلیمرهای کوئوردیناسیونی افزایش یافته است [۲۰۱]. این مقادیر خیلی بزرگ‌تر از مقادیر ایده آل مربوط به ترکیبات کربنی می‌باشند ($2/500 \text{ m}^2/\text{g}$) (۲۶۳۰). در اصل باریک شدن دیواره‌های حفره، مساحت سطح بالاتری فراهم می‌نماید. در مورد ژئولیت‌های معدنی دیواره‌های حفره از تعداد زیادی از اتم‌های Si، O و Al ساخته شده، در حالی که پلیمرهای کوئوردیناسیونی دارای دیواره‌های باریکی هستند. برای مثال وقتی که دیواره از $4'4$ -بی‌پیریدین تشکیل شده باشد ضخامت دیواره تنها مربوط به یک اتم کربن می‌باشد و این نشان دهنده این موضوع است که همه اتم‌های سازنده دیواره می‌توانند به عنوان سطح جذب مولکول‌ها مورد استفاده باشند. بیشتر پلیمرهای کوئوردیناسیونی متخلخل یا چارچوب‌های فلز-آلی محدود به سیستم‌های صلب می‌باشند که علت آن بیشتر مربوط به سهولت شناسایی ساختار میزبان خالی می‌باشد، اما در سال‌های اخیر مثال‌های متعددی از سیستم‌های انعطاف پذیر مشاهده شده است که شناسایی آن‌ها در حالت حلال زدایی شده میسر است. ترکیبات متخلخل انعطاف پذیر/دینامیک را می‌توان از طریق اتصال واکنشگرهای انعطاف پذیر با پیوندهای قوی (آلی یا معدنی) و یا پیوندهای ضعیفتر (برای مثال انباشتگی $\pi-\pi$ ، پیوند هیدروژنی و برهم‌کنش‌های واندروالس) تولید نمود. در واقع برهم‌کنش‌های ضعیف مانند انباشتگی $\pi-\pi$ ، پیوند هیدروژنی و

نیروهای واندروالس سبب ایجاد پایداری، حفظ تخلخل و خاصیت انعطاف پذیری شده و اجازه اصلاح ساختار با خارج شدن و جایگزینی حلال را می‌دهند. بنابراین یک شبکه نرم ایجاد می‌شود. در اکثر موارد پیوندهای ضعیف اضافه شده سبب افزایش ابعاد شبکه شده و ساختارهای شبه دو بعدی یا سه بعدی حاصل می‌شوند. این مورد مهم بوده چرا که ساختارهایی با ابعاد بالاتر معمولاً بسیار پایدارتر و محکم‌تر می‌باشند.

ساختار و خواص MOFها وابسته به دو فاکتور مواد اولیه و فرایند سنتز می‌باشند. در مورد مواد اولیه دو عامل یون فلزی و یا کلاسترهای فلزی از یک طرف و اتصال دهنده‌های آلی از طرف دیگر، که واحدهای سازنده ثانویه (SBU: Secondary Building Unit) نامیده می‌شوند [۳]، مورد توجه می‌باشند. در طراحی انواع MOFها می‌توان به سنتز MOFهایی با قالب‌های آلی، MOFهایی با توپولوژی ژئولیت‌ها، MOFهای ساخته شده از کلاسترهای فلزی، MOFهای مزومتخلخل، MOFهای با ساختار کایرال، MOFهای با مراکز فلزات خاکی کمیاب، MOFهای غشایی و MOFهای آنیونی اشاره نمود [۴]. فاکتورهایی مانند نوع حلال، غلظت حلال، طبیعت یون مخالف، نسبت فلز به لیگاند، هندسه کوئوردیناسیونی فلز، مقادیر pH، دما و طبیعت مولکول‌های مهمان نقش مهمی را در ساختار ترمودینامیکی محصول مورد نظر ایفا می‌نمایند [۵]. دسته‌ای از MOFها به نام IRMOFها با استفاده از به کارگیری لیگاندهای کربوکسیلات طراحی شده‌اند که در ویژگی‌هایی چون طول، شکل و آروماتیسیتی با هم تفاوت دارند. بدین صورت دسته‌ای از ترکیبات با اندازه حفره افزایش یافته و قابل تنظیم، شکل و ماهیت شیمیایی مورد نظر تولید شده‌اند (شکل ۱) [۳].

۲-۱-۵- روش اختلاط فیزیکی

روش اختلاط فیزیکی یا سنتز بدون حلال بنا به دلایلی قابل توجه است. برای مثال می تواند بینشی در مورد نقش مولکول های حلال در شکل گیری ساختارهای میکرو حفره در اختیار قرار دهد و امکان دسترسی به فرایندهای تولید در مقیاس بزرگ سازگار با محیط زیست را فراهم می کند و حتی روش های مقدماتی در مقیاس آزمایشگاهی را آسان می کند. از مزایای این روش می توان به بازده محصول بیشتر، زمان کوتاه تر برای سنتز، عدم نیاز به حلال و یا حرارت دادن اضافی برای تولید محصول، کارایی بالاتر در استفاده از مواد اولیه مناسب و صرفه جویی در انرژی را نام برد، اما با استفاده از این روش نمی توان تک بلورهای مناسب جهت تعیین ساختار را بدست آورد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱-۱- پتانسیل های کاربردی MOF ها

پتانسیل های کاربردی چارچوب های فلز-آلی به اختصار شامل ذخیره و جداسازی گازها (مانند هیدروژن، متان، استیلن، دی اکسید کربن و اکسیژن)، جداسازی ترکیبات، استفاده به عنوان کاتالیست، حسگر، در سیستم های آزادسازی دارو و به عنوان منابع نشر لومینسانس می باشد [۷-۱۰].

۳-۱-۱-۱- ذخیره گاز

پلیمرهای کوئوردیناسیونی متخلخل که دارای درصد بزرگی میکروتخلخل یکسان بوده (که برای کارایی بالا مورد نیاز است) و قابل طراحی می باشند به عنوان بهترین گزینه جهت جذب های گاز جامد به کار می روند. پتانسیل ذخیره گاز از طریق مطالعات ایزوترم جذب اندازه گیری می شوند. دو راه جهت برهم کنش یک گاز با یک جامد وجود دارد: ابتدا، جذب شیمیایی که در آن مولکول های گاز با سطح جامد پیوند شیمیایی برقرار می نمایند و دوم جذب فیزیکی که در آن مولکول های گاز با سطح جامد بدون تشکیل پیوند کووالانسی برهم کنش می کند. فرایند جذب شیمیایی اجازه جذب حجمی بسیار بالای مولکول های گاز را تحت شرایط محیطی فراهم می نماید، ولی جهت آزادسازی آن ها نیاز به انرژی می باشد. از طرف دیگر از آنجا که برهم کنش بین گاز و جامد در فرایند جذب فیزیکی ضعیف می باشد، حجم جذب شده معمولاً پایین بوده و تنها در دماهای پایین رخ می دهد. بنابراین هر یک از این دو فرایند معایب مربوط به خود را داشته و در نتیجه برای رسیدن به جذب سطحی بهینه گاز در یک جاذب جامد، ترکیبات متخلخل مورد جستجو می باشند که قدرت بینابینی از برهم کنشها را نشان می دهند (جذب شیمیایی کاذب).

۳-۱-۱-۲- جذب و جداسازی کربن دی اکسید

ایجاد ترکیباتی که قابلیت ذخیره کربن دی اکسید را دارند، مربوط به به دام انداختن گاز از آگروهای صنعتی مانند دودکش واحدهای صنعتی می باشد. این امر اثر مستقیمی بر کاهش خروجی های زائد دارد. تکنیک های مورد استفاده برای CO₂ مانند سرد کردن و فشرده سازی گاز خروجی از نظر اقتصادی

۲- بخش تجربی

۲-۱-۲- روش های سنتز MOF ها

۲-۱-۲-۱- روش تبخیر حلال

این تکنیک به شرایط مناسبی نیاز دارد: الف) بلورها درمحلول های اشباع شده رشد می کنند، ب) با افزایش دما انحلال پذیری افزایش یافته و بلورها می توانند در طی مرحله ی سرد شدن ظاهر شوند.

۲-۱-۲-۲- روش نفوذ (انتشار)

آمیختن سریع محلول حاوی یون های فلزی و محلول شامل لیگندهای پل دهنده، میکروبلورها (پودر) را با اندازه ای در حدود میکرومتر تولید می کند. به علت اندازه هایشان چنین نمونه های پودری برای آنالیز پراش پرتو ایکس تک بلور مناسب نیستند. برای جلوگیری از رسوب دادن فرم های پودری اغلب از روش نفوذی استفاده می شود. با نفوذ آهسته ی دو محلول ذکر شده تک بلورهای بزرگ مناسب برای آنالیز کریستالوگرافی اشعه ی ایکس بدست می آیند. وسایل متنوعی از قبیل سل های شیشه ای نوع افقی، نوع-H و نوع-Y برای این گونه سنتزها ساخته شده اند [۶]. مهمترین رکن این روش نفوذ آهسته به سمت لایه ی اتصال دو محیط متفاوت است.

۳-۱-۲- روش هیدرو (سولو) ترمال

اساس این روش جمع شدن محصولات از محلول حاوی مواد تشکیل دهنده ی جسم جدید می باشد. این روش در اصل برای سنتز ژئولیت ها استفاده می شود اما آن را می توان برای سنتز MOF ها نیز تطبیق داد. محدوده ی دمای مورد استفاده ۰C-۲۶۰ درون یک فضای بسته (اتوکلاو) و تحت فشاری است که به طور خود به خودی به وجود می آید. سرعت سرد شدن در انتهای واکنش، بسیار تأثیر گذار است [۴]. از مزایای این روش می توان به کنترل دقیق شکل، اندازه و ساختار محصول و تولید تک بلور برای شناسایی ترکیب اشاره نمود و از معایب آن می توان به زمان طولانی برای سنتز و عدم تولید MOF های خالص به صورت بالک برای کاربردهای صنعتی را نام برد.

۴-۱-۲- واکنش مایکروویو و روشهای التراسونیک

این روش ها تاکنون به طور گسترده برای تهیه ی بلورهای MOF استفاده نشده است، اما تکنیک های پر ارزشی برای انجام سنتز با سرعت بالا به شمار می روند. همچنین این دو، روشهای خوبی برای کنترل اندازه و شکل نهایی ذرات می باشند [۴]. تابش مایکروویو به عنوان روش حرارت دادن جدید برای سنتزهای هیدروترمال ترکیبات معدنی یا آلی گسترش پیدا کرده است. در اصل این روش راه مؤثری برای سنتز مواد معدنی متخلخل خالص فراهم می نماید، مزایای این روش عبارتند از: زمان های تبلور کم، توزیع اندازه ذرات محدود، کنترل مورفولوژی آسان، انتخاب گری فاز و ارزیابی مؤثر پارامترهای فرایند. مثال هایی از پلیمرهای کوئوردیناسیونی سنتز شده با این روش تا به امروز کم هستند. این تکنیک تولید بلورهای نسبتاً ریزی نموده بگونه ای که اندازه بلورها در حدود ۵-۲۰ میکرومتر است.

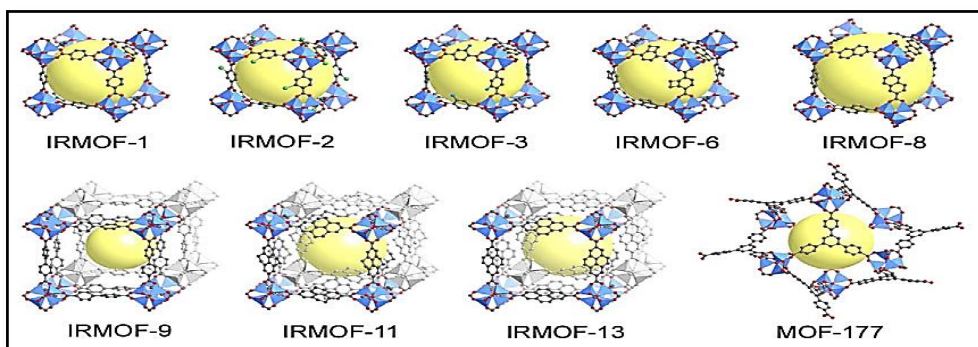
۳-۱-۴- دارو رسانی

چارچوب های فلز-آلی طبقه ای از ترکیبات متخلخل، برای بسیاری از کاربردهای زیستی، دارویی مناسب می باشند. محدوده وسیعی از آنها از نظر سمیت فرمولاسیون و ترکیب شیمیایی قابل قبولی دارند، به علت داشتن عاملیت های بالا، به عنوان عوامل شناسایی کننده بافت های هدف مناسب می باشند و وسیله ای برای حمل عوامل دارویی می باشند. چالش های موجود در این زمینه تنها شامل گسترش جامدهای جدید نمی باشد بلکه شامل اصلاح فرمولاسیون، پردازش مواد، مناسب کردن مورفولوژی و شیمی سطح چارچوب نیز، به منظور بهینه شدن آنها برای کاربردهای مورد نظر می باشد. اولین گروه MOF ها که به عنوان سیستم توزیع دارو بررسی شد دسته ی MILها بود که توسط Ferey و همکارانش کشف شد. (MIL=Materials of Institut Lavoisier) این کشف تقریباً هم زمان با این اتفاق افتاد که گروه Lin برای اولین بار کاربرد های NMOF ها را به عنوان عوامل تصویر برداری بررسی کردند. خانواده ی MIL از MOF ها از مراکز فلزی سه ظرفیتی و لیگاند های پل دهنده ی کربوکسیلیک اسید ساخته شده اند. خانواده ی MIL به علت ویژگی های جالبشان در توزیع دارو امیدوار کننده هستند، این خواص عبارتند از: حفرات بزرگ (25-34Å)، مساحت سطح چشمگیر (3100-5900 m²/g)، و امکان وارد شدن گروه های عاملی در چارچوب. (شکل ۲)

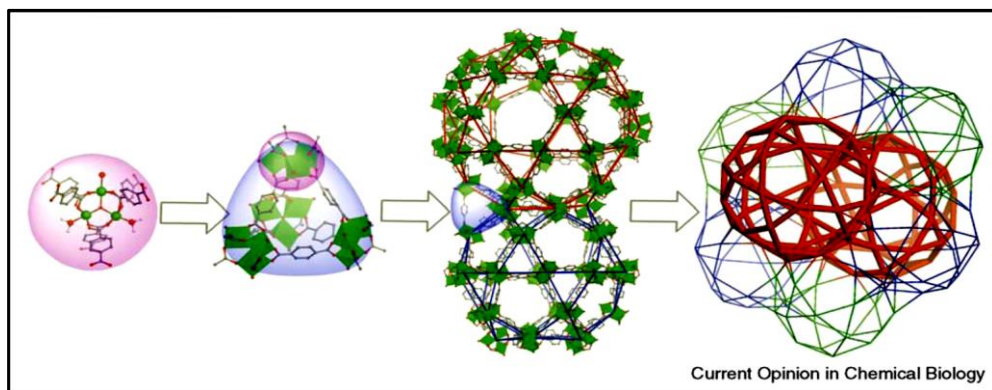
مقرون به صرفه نمی باشند. ترکیبات متخلخل دیگری مانند سیلیکات ها و کربن ها هم مورد بررسی قرار گرفته اند، اما از آنجا که دارای مولکولهای CO₂ جذب شیمیایی شده هستند، کاربرد زیست پذیر بلند مدتی را نشان نمی دهند. برای دستیابی به ذخیره CO₂، ترکیباتی که حجم های زیادی را بطور برگشت پذیر ذخیره می کنند بایستی تهیه شوند. باز هم پلیمرهای کئوردیناسیونی متخلخل، این مسیر تبدیل را جهت ذخیره CO₂ فراهم می نمایند و کارایی بالایی هم نشان می دهند.

۳-۱-۳- ذخیره و جداسازی استیلن

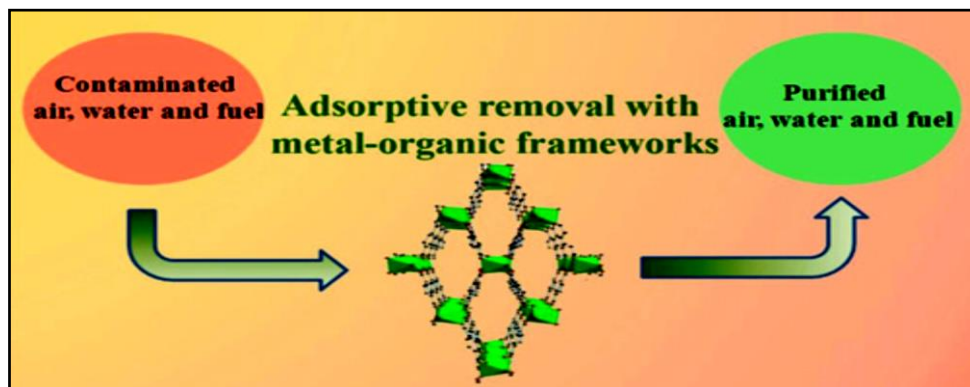
چارچوب های فلز-آلی ظرفیت بالایی برای ذخیره استیلن نشان می دهند که به دلیل کانال های پایدار آنها با حفره های زیاد و مساحت سطح بالا می باشد. گاز استیلن ماده کلیدی برای سنتز ترکیبات آلی متفاوت و مواد الکترونیکی مثل ۴۱ بوتادی ان است که بطور گسترده برای تهیه پلی اورتان ها و پلی استر ها و پلاستیک ها مورد استفاده قرار می گیرد. استیلن نمی تواند در دمای محیط و فشارهای بالا در ظروف استیل ذخیره شود چون طبیعتاً پتانسیل انفجاری دارد حتی در غیاب اکسیژن. در مقایسه با هیدروژن، متان و دی اکسید کربن، استیلن دارای ساختار خطی با هیدروژن های فعال ترمینالی می باشد بنابراین می تواند به عنوان گیرنده الکترونیکی خوب عمل کرده و به سادگی با دهنده های الکترونیکی در دیواره های کانال های جاذب، پیوند هیدرونی برقرار کند.



شکل ۱. دسته وسیعی از ترکیبات IRMOF که دارای توپولوژی شبکه ای یکسان بوده و تنها در شکل لیگاند اتصال دهنده آلی، طول و آروماتیسیت با هم تفاوت دارند [۳].



شکل ۲. ساختار MIL-101 چهار وجهی که از مراکز فلزی سه ظرفیتی و ۱۰۱-بنزن دی کربوکسیلات تجمع یافته است.



شکل ۳. جذب آلاینده های هوا، آب و سوخت توسط چارچوب های فلز-آلی

تهیه ی نانو مواد ی مانند نانو فلزات، نانو اکسید های فلزی و ... می باشند. از مزیت های این روش می توان به این دو مورد اشاره نمود: الف) برخی از نانو مواد را تنها می توان از این روش بدست آورد و روش دیگری جهت تهیه ی آن ها وجود ندارد، برای مثال می توان به نانو ساختارهای Cd_3OSO_4 اشاره نمود که تنها با استفاده از پیش ماده پلیمرهای کتوردیناسیونی امکان تهیه ی آن وجود دارد و ب) برخی از مورفولوژی های نانو مواد را تنها می توان با استفاده از این روش بدست آورد. اندازه و مورفولوژی نانو مواد معدنی حاصل به چند عامل بستگی دارد که عبارتند از: الف) رابطه ی بین ساختار بلوری ابر مولکول اولیه با نانو مواد معدنی حاصل از آن، ب) تأثیر اندازه و مورفولوژی پیش ماده ابرمولکول، ج) روش سنتز شامل دمای ترمولیز، تأثیر سورفکتانت و غیره. اما با وجود همه ی مطالعات انجام شده در این زمینه، هنوز مکانیسم و ارتباط مشخصی بین ساختار بلوری، اندازه و مورفولوژی پیش ماده ی اولیه با اندازه و مورفولوژی نانو مواد معدنی حاصل از آن ها کشف نشده است [۲۱-۱۸].

۷-۱-۳- شناسایی انتخابی مولکول های کوچک به روش عامل دار کردن

شناسایی مولکولی، یک فرآیند مهم در سیستم های شیمیایی و بیولوژیکی، تابع عملکردهای مختلف آزمون های گوناگون و خواص گیرنده های مصنوعی است. چون شناسایی مولکولی بر اساس برهمکنش های ضعیف بین گیرنده و سوبسترا می باشد، طراحی و تجمع گیرنده های سنتزی به منظور تقلید کردن سیستم های بیولوژیک و توسعه مواد جدید برای تشخیص سوبسترا های مختلف برای شناسایی انتخابی مولکول های خاص چالش برانگیز شده است. تحقیقات گسترده روی گیرنده های سنتزی برای شناسایی مولکولی، مخصوصاً روی کمپلکس های غیر کوئوالانسی خود تجمع یافته با پیوند هیدروژنی و چارچوب های فلز - آلی در حال انجام است. چون می توان منافذ چارچوب های فلز-آلی را برای هدایت خاص مولکول های کوچک با پایداریهای متخلخل عامل دار کرد. از جمله کارهایی که می تواند در این زمینه به انجام برسد عبارتند از:

طراحی معقولانه میکرو حفرات برای جذب سطحی انتخابی مولکول های گازی، تنظیم میکرو حفرات برای شناسایی آلکان ها،

۳-۱-۵- حذف جذبی مواد مضر و آلاینده های زیست محیطی
آلودگی محیط زیست امروزه یکی از مهمترین مسائل و مشکلات جهان می باشد و کوشش های زیادی برای حذف و کاهش این آلودگی ها از محیط زیست انجام شده است. مواد آلاینده و خطرناک معمول که در محیط زیست حضور دارند عبارتند از H_2S ، CO_x ، NO_x ، ترکیبات آلی فرار (VOCs)، ترکیبات حاوی نیتروژن (NCCs)، ترکیبات حاوی گوگرد (SCCs)، رنگ ها، محصولات محافظت شخصی و داروسازی (PPCPs). جذب یکی از روش های موثر در مقایسه با دیگر روش ها می باشد. قیمت کمتر، کاربردهای وسیع، سادگی طراحی، بازتولید و بازیافت سریع جاذب ها از مزایای آن می باشد. حذف جذبی بر مبنای توانایی جاذب های متخلخل برای حذف انتخابی ترکیب ویژه می باشد. ترکیباتی که شکل و اندازه مناسب دارند می توانند برای حذف از طریق جذب مورد استفاده قرار می گیرند زیرا این دسته از مواد دسترسی آسانی به حفره های جاذب جامد دارند و می توانند بر اساس برهمکنش های شیمیایی جذب شوند. جاذب های متخلخل به صورت شیمیایی و فیزیکی می باشد [۱۱]. جذب فیزیکی معمولاً به عنوان جذب جذب سطحی هستند و جذب شیمیایی با عنوان جذب واکنش پذیر نامیده می شود. در مورد حذف جذب سطحی، ماده جذب شده معمولاً با استفاده از نیروهای واندروالس درون حفره های جاذب جامد قرار می گیرد بنابراین این نوع جاذب ها می توانند به آسانی بازیافت شوند که شامل روش های تبادل حلال یا کلسینه کردن یا سونیکیت نمودن آن می باشد. اخیراً استفاده از چارچوب های فلز-آلی MOF ها به طور گسترده ای در حذف از طریق جذب سطحی مواد مضر گوناگون به کار رفته است که به دلیل حفره های بزرگ، هندسه حفره هایشان [۱۵-۱۲] و سایت های جذب ویژه [۱۶ و ۱۷] می باشد (شکل ۳).

علاوه بر آن، فلزمرکزی، سایت های کتوردیناسیونی غیراشباع، اتصال دهنده های عامل دار شده و لودکردن گونه های فعال روی MOF ها دربرهمکنش جذب شونده و چارچوب های فلز-آلی به کار می روند.

۳-۱-۶- استفاده از چارچوب های فلز-آلی به عنوان پیش ماده برای سنتز نانو مواد دیگر

نانو ابرمولکول ها که شامل نانو پلیمرهای کتوردیناسیونی و نانو چارچوب های فلز-آلی هستند، پیش ماده های مناسبی جهت

۵- منابع

- [1] K. Kaneko, C. Ishii, Colloids. Surf. 67 (1992) 203.
- [2] H. K. Chae, D. Y. Siberio-Pérez, J. Kim, Y. Go, M. Eddaoudi, A. J. Matzger, Nature. 427 (2004) 523.
- [3] J. L.C. Rowsell, O. M. Yaghi, Micropor. Mesopor. Mater. 73 (2004) 3.
- [4] S. Qiu, G. Zhu, Coord. Chem. Rev. 253 (2009) 2891.
- [5] R. Zou, Amr I. Abdel-Fattah, H. Xu, Y. Zhao and D. D. Hickmott, Cryst. Eng. Comm, 12 (2010) 1337.
- [6] S-I Noro, S. Kitagawa, T. Akutagawa, T. Nakamura, Prog. Polymer Science. 34 (2009) 240.
- [7] R. Zou, Amr I. Abdel-Fattah, H. Xu, Y. Zhao and D. D. Hickmott, Cryst. Eng. Comm, 12 (2010) 1337.
- [8] Y. H. Hu, L. Zhang, Adv. Mater. 22 (2010) E117.
- [9] D. Farrusseng, S. Aguado, C. Pinel, Angew. Chem. Int. Ed. 48 (2009) 7502.
- [10] R. J. Kuppler, D. J. Timmons, Q-R. Fang, J-R. Li, T. A. Makal, M. D. Young, D. Yuan, D. Zhao, W. Zhuang, H-C. Zhou, Coord. Chem. Rev. 253 (2009) 3042.
- [11] I.V. Babich, J.A. Moulijn, Fuel 82 (2003) 607.
- [12] H.-L. Jiang, Q. Xu, Chem. Commun. 47 (2011) 3351.
- [13] C.-Y. Huang, M. Song, Z.-Y. Gu, H.-F. Wang, X.-P. Yan, Environ. Sci. Technol. 45 (2011) 4490.
- [14] J. Liu, P.K. Thallapally, B.P. McGrail, D.R. Brown, J. Liu, Chem. Soc. Rev. 41 (2012) 2308.
- [15] M. Seredych, E. Deliyanni, T.J. Bandoz, Fuel 89 (2010) 1499.
- [16] C.O. Ania, T.J. Bandoz, Langmuir 21 (2005) 7752.
- [17] M. Seredych, T.J. Bandoz, Appl. Catal. B Environ. 106 (2011) 133.
- [18] M. Y. Masoomi, A. Morsali, Coord. Chem. Rev. 256 (2012) 2921.
- [19] H. Sadeghzadeh and A. Morsali, J of Coord. Chem., 63 (2010) 713.
- [20] L. Hashemi, A. Morsali, Inorg. Chim. Acta, 386 (2012) 56.
- [21] L. Hashemi, A. Morsali, J Inorg Organomet Polym, 22 (2012) 272.

مکان های گروه های عاملی در حفرات جارجوب های فلز-آلی برای ذخیره گازو تشخیص انتخابی، بهینه سازی سطوح متخلخل و مکان های باز فلزات برای بالا بردن جذب خیدروژن، مکان های باز فلزی لومینسانس برای سنجش مولکول های کوچک، مکان های باز فلزی جارجوب های فلز-آلی متخلخل برای ذخیره سازی فوق العاده استیلن در دمای اطاق و ...

۴- نتیجه گیری

به ۵ دلیل MOFها بهترین کاندید برای کاربردهای جذب و جداسازی می باشند:

- ۱- مساحت سطح بالا (تا حدود 6000m²/g) که باعث می شود لینکر های آلی چارچوب را در دسترس تر قرار داده و باعث افزایش جذب مولکول های مهمان شوند.
 - ۲- طبیعت کریستالی MOFها اجازه مدل سازی کامپیوتری را با دقت و صحت بالا برای پیشگویی سایت های پیوندی برای مولکول های مهمان را میدهد.
 - ۳- گستره وسیع از لیگاند های آلی و روشهای سنتز مختلف امکان طراحی MOFها را فراهم خواهد کرد و می توان از این طریق خواص شیمیایی و فضایی آنها را نیز بهینه کرد.
 - ۴- مطالعات بر روی MOFها برای ذخیره H₂ نشان میدهد که حفره های MOFها می توانند اثر فوق متراکم کنندگی بر روی H₂ داشته باشند.
 - ۵- سینتیک جذب و واجذب پتانسیل بالایی را هم برای فاکتور جذب و هم برای جداسازی در MOFها نشان میدهد.
- برای گسترش سری جدید از MOFها برای کاربرد ذخیره سازی ، ظرفیت جذب کافی ، سینتیک و ترمودینامیک جذب قابل قبول، ۲ فاکتور مهم هستند.
- در چند سال گذشته کاربردهای جدیدی از MOFها، مانند زمینه های مگنت های متخلخل، حسگرهای لومینسانس، ذخیره و رهاسازی دارو مطرح شده است. پیشرفت در آینده ای نزدیک، با گسترش پیوسته ی این کاربردها امکان پذیر خواهد بود. فهم این موضوع بسیار مهم است که در حال حاضر ما تنها با برخی از جنبه های شبکه های فلز- آلی متخلخل آشنا شده ایم و هنوز هم در حال کشف سایر جنبه های آن با مثالهای جدید گزارش شده می باشیم. جنبه شگفت انگیزی که این حوزه ایجاد می نماید، بطور حتم منجر به کاربردهای جدید و مهمی خواهد شد و مثالهای آنهم نشان دهنده رسیدن ما به این تصویر ذهنی خواهد گردید.