

معرفی ایروژل‌ها و کاربرد آنها به عنوان کاتالیست

سماحه السادات سجادی

پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشکده پتروشیمی، گروه تبدیل گاز

چکیده

ایروژل‌ها، نانومادی متخلخل، سبک با سطح تماس بسیار بالا می‌باشند. بر حسب نوع پیش‌ماده بکاررفته برای ساخت این مواد، می‌توان آنها را به سه دسته کلی معدنی، آلی و زیستی تقسیم‌بندی نمود. روش‌های ساخت متنوعی برای این مواد وجود دارد که همه آنها شامل پلیمری شدن یک یا چند پیش-ماده و تشکیل ماتریکس سل-ژلی است که در آن، حفرات با حلال واکنش پر شده‌اند. برای تولید ایروژل از این ژل خیس، حلال باید طوری از آن خارج گردد که به حفرات صدمه‌ای وارد نشده و ساختار متخلخل ایروژل دست نخورده باقی بماند. برای این منظور از روش‌های خشک کردن خاص مانند روش فوق بحرانی، فریز نمودن و یا تعویض حلال استفاده می‌شود. روش خشک نمودن، کاتالیست مورد استفاده و حلال نقش تعیین کننده در ویژگی‌های ایروژل سنتز شده دارند. ایروژل‌ها کاربردهای متنوعی مانند ساخت عایق‌های صوتی و حرارتی، کاتالیست‌ها، پیل‌های سوختی، ابرخازن‌ها، نم‌گیرها، باتری‌ها و ... دارند. از جمله جذاب‌ترین این کاربردها، توسعه کاتالیست‌های جدید می‌باشد. در این راستا می‌توان از ایروژل‌ها به عنوان کاتالیست و یا بستر آن استفاده نمود. به علاوه گزارشات جالبی در زمینه تثبیت آنزیم‌ها برای سنتز کاتالیست‌های زیستی جدید و همچنین استفاده از ایروژل‌ها برای توسعه الکتروکاتالیست‌ها و فتوکاتالیست‌ها منتشر شده است. در این مقاله ضمن معرفی ایروژل‌ها، به طور اجمالی به تقسیم‌بندی، روش‌های ساخت و کاربردهای کاتالیست‌های مختلف آنها اشاره می‌شود. در بخش بعدی مقاله به طور اختصاصی به تشریح کاربردهای کاتالیستی این مواد می‌پردازیم.

واژه‌های کلیدی: ایروژل، بستر کاتالیست، کاتالیست، نانومواد.

samahesadjadi@yahoo.com

مقدمه

تعریف ایروژل

تاریخچه ساخت ایروژل‌ها به سال ۱۹۳۲ برمی‌گردد زمانیکه برای اولین بار کیستلر ژلهایی را کشف کرد که در آنها بدون تخریب شبکه جامد ژل، مایع جایگزین یک گاز شده بود.

این دانشمند از روش خشک کردن فوق بحرانی برای خشک کردن ژل استفاده کرد. در این روش، مایعی که ژل را تلقیح می‌کرد، بعد از تبدیل شدن به سیال فوق بحرانی، خارج می‌شد. در عمل، خشک کردن فوق بحرانی به معنی گرم کردن یک ژل در اتوکلاو است تا زمانی که دما و فشار آن، به دما و فشار بحرانی (Tc, Pc) مایع موجود در حفرات ژل برسد.

به طور کلی می‌توان گفت، ایروژل‌ها، ژل‌های خشک و سبکی با حجم حفره بسیار زیاد می‌باشند. البته میزان این ویژگی به ماهیت جامد بستگی دارد. گاهی حجم نسبی حفره، به ۹۰ درصد نیز می‌رسد. [۱]

تقسیم بندی ایروژل‌ها

از یک نقطه نظر می‌توان ایروژل‌ها را به سه دسته کلی زیر تقسیم بندی نمود.

۱. ایروژل‌های معدنی (مانند ایروژل سیلیکا، اکسید تیتانیوم، اکسید زیرکونیم)
۲. ایروژل‌های آلی (ایروژل رزورسینول-فرم آلدهید، ایروژل کربنی، ایروژل پلی اورتان)
۳. ایروژل‌های طبیعی (ایروژل سلولزی)

کاربردهای ایروژل‌ها [۱]

- ایروژل‌ها کاربردهای زیادی دارند که از جمله آنها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:
۱. رطوبت‌گیر و خشک کن عالی

۲. عایق حرارتی

۳. عایق صوتی

۴. جذب کننده ذرات پر سرعت معلق در فضا

۵. سنسورها

۶. پیل‌های سوختی

۷. باتری‌ها

۸. ابرخازن‌ها

۹. تصفیه فاضلاب

۱۰. ریخته‌گری

۱۱. مواد پرانرژی

۱۲. تهیه سطوح خود تمیز شونده و فوق آب‌گریز

۱۳. دارورسانی و دیگر کاربردهای بیولوژیکی

روش‌های ساخت ایروژل‌ها

برای تولید ایروژل‌ها روش‌های مختلفی وجود دارد که همه آنها شامل پلیمری شدن یک یا چند پیش‌ماده و تشکیل ماتریکس سل-ژلی است که در آن، حفرات با حلال واکنش پر شده‌اند. برای تولید ایروژل از این ژل خیس، حلال باید طوری از آن خارج گردد که به حفرات صدمه‌ای وارد نشده و ساختار متخلخل ایروژل دست نخورده باقی بماند. به عبارت دیگر برای تهیه ایروژل، باید از عبور از مرز فاز مایع-بخار جلوگیری نمود. به این ترتیب از فروپاشی حفرات ممانعت می‌شود. این فرایند، بسیار مهم است زیرا نانوساختار ظریف یک ژل تر بهینه نشده نمی‌تواند در برابر نیروهای موینگی بزرگ مقاومت کند. برای این منظور روش‌های خشک کردن مختلفی وجود دارند که عبارتند از:

- روش فوق بحرانی
- خشک کردن از طریق فریز کردن
- خشک کردن در فشار محیط و بهینه کردن سطح

پس از مرحله خشک کردن، بسته به نوع کاربرد مدنظر، می‌توان از انواع عمل‌آوری‌ها مانند بهینه‌سازی شیمیایی با پیوند زدن در محلول پس از تلقیح مجدد، تلقیح تخلخل توده با گونه‌های فعال، وارد کردن پلیمرها، مهندسی مکانیکی با آسیاب کاری، میکروماشینکاری لیزری و فرایندهای حرارتی نظیر زینتر کردن استفاده نمود.

پارامترهای موثر بر ویژگی‌های ابروژل از جمله پارامترهای موثر بر ویژگی‌های ابروژل‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱. نوع پیش ماده
۲. ماهیت حلال
۳. روش خشک کردن
۴. ماهیت کاتالیست و غلظت آن

ایروژل‌های سیلیکایی، معمول‌ترین نوع ابروژل‌ها

از میان انواع مختلف ابروژل‌ها، ابروژل‌های سیلیکایی بیش از همه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این مواد به علت ویژگی‌های مکانیکی، حرارتی، صوتی، نوری و بیولوژیکی خود کاربردهای متنوعی دارند.

سنتز ابروژل سیلیکایی به روش سل-ژل

شیمی و فیزیک سنتز ژل‌های سیلیکایی، به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. به طور کلی یک شبکه جامد نانوساختار، در نتیجه فرایند پلیمری شدن در محیط واکنش مایع تشکیل می‌شود و پل‌های سیلوکسان (Si-O-Si) بین اتم‌های سیلیکون مولکول پیش‌ماده ایجاد می‌گردند. این تبدیل معادل فرایند پلیمری شدن در شیمی آلی می‌باشد. در مرحله اولیه فرایند سل-ژل، ذرات سیلیکای کلوتیدی جامد (یعنی نانوذراتی با اندازه زیر یک میکرومتر) یا الیگومرهای خطی ایجاد می‌گردند.

در مرحله بعد، این مواد اولیه می‌توانند در حلال با یکدیگر اتصال برقرار کنند و ساختار شبکه باز سه بعدی را بسازند که ژل نام دارد. تبدیل مداوم سل به ژل به فرایند ژل شدن معروف است. تغییر از حالت مایع به جامد، فرایند سل-ژل نام دارد. ژل‌هایی که بدست می‌آیند بسته به ماهیت واحدهای سازنده شبکه و اینکه نانوذرات باشند یا خطی (شبیه پلیمر)، به ترتیب کلوتیدی یا پلیمری هستند. برای هر دو مرحله، واکنش‌های پیش برنده عبارتند از هیدرولیز و تراکم آب و/یا الکل.

برای ژل‌های سیلیکا، مهم‌ترین پیش‌ماده، سدیم متاسیلیکات Na_2SiO_3 می‌باشد. این ماده اولین بار توسط کیستلر برای تهیه اولین ابروژل سیلیکا بکاررفت. این پیش‌ماده با اسیدهای نظیر HCl واکنش می‌دهد. (معادله ۱) نمکی که تشکیل می‌شود با دیالیز یا با تبادل H^+ از طریق ستون تبادل یون اسیدی حذف می‌گردد.

معادله ۱

$$\text{Na}_2\text{SiO}_3 + 2\text{HCl} + (x-1)\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O} + 2\text{NaCl}$$
 پیش‌ماده‌ها سیلیکایی که اغلب بکار می‌روند، الکوکسیدهای نوع Si(OR)_4 می‌باشند که در آن R و OR به ترتیب نشان دهنده گروه‌های آلکیل و الکوکسید می‌باشند. در اکثر مواقع، R گروه متیل است. بنابراین پیش‌ماده‌ای که اغلب بکار می‌رود تترامتوکسی سیلان (TMOS) می‌باشد.

در همه این پیش‌ماده‌ها، پیوندهای کووالانت قطبی Si-O وجود دارد. به علت ویژگی کووالانت پیوند Si-O ، توزیع گسترده اندازه زاویه Si-O-Si امکان‌پذیر است. بنابراین شبکه‌های تصادفی سه بعدی، شبیه شبکه‌هایی که در شیشه‌های سیلیکا معمول است ایجاد می‌گردند.

مکانیسم هیدرولیز شامل حمله هسته‌دوستی زوج الکترون‌های جفت نشده اکسیژن مولکول آب، به اتم سیلیسیم است. به علت پیوندهای قطبی Si-O ، اتم‌های سیلیکون، جزئی بار مثبت δ^+ می‌گیرند و سینتیک‌های حمله هسته دوستی و در نتیجه آن کل واکنش هیدرولیز را تعیین می‌کنند. در الکوکسیدها، اتم‌های سیلیسیم بار جزئی مثبت متوسطی را در مقایسه با الکوکسیدهای زیرکونیوم و تیتانا خواهند داشت. بنابراین سینتیک‌های ژل شدن الکوکسیدهای Si(OR)_4 بسیار کند می‌باشد. مراحل هیدرولیز و تراکم سیلیسیم توسط بازهایی با بار منفی زیاد (برای مثال OH^- و بازهای لوویس مانند یون‌های F^-) یا اسیدها کاتالیست می‌گردد. در شکل ۱ واکنش‌های درگیر در تشکیل سل ژل سیلیکا نشان داده شده است. [۹-۲]

پیرسازی

قبل از خشک شدن، اغلب ژل‌های سیلیکا از طریق فرایندهای مختلف پیرسازی می‌شوند. هدف این مرحله تقویت مکانیکی اسکلت جامد ظرفی است که در طول فرایند سل-ژل ایجاد گردیده است.

پیرسازی شامل استفاده از مکانیسم پدیده اسوالد یا / و سینرژی (هم‌افزایی) است. این فرایند با بهینه کردن ترکیب فاز مایع حفره‌های ژل سیلیکا انجام می‌شود.

افزایش آب و / یا آلکوکسی سیلان‌های منومری نظیر تترا اتوکسی سیلان (TEOS) می‌تواند به صورت چشمگیری واکنش‌های سطحی را افزایش داده و باعث واکنش‌های تراکمی مکمل شود. به این ترتیب تجزیه/ترسیب مجدد سیلیکا صورت می‌گیرد. سینتیک‌های این فرایندها به ماهیت حلال و pH بستگی دارد. طی پیرسازی اغلب دانسیته ژل و اندازه متوسط حفره افزایش پیدا می‌کند.

روش‌های پیرسازی دیگری نیز وجود دارند که می‌توانند به طور همزمان نفوذپذیری و ویژگی‌های مکانیکی را افزایش دهند. برای مثال می‌توان به افزایش مولکول‌های پیش‌ماده بزرگتر و یا افزودن محلول رقیق HF بدون افزایش پیش‌ماده سیلیکا اشاره کرد.

ایروژل‌های آب‌گریز

سطح آب‌گریز، آب را دفع می‌کند درحالی‌که سطح آب‌دوست آب را جذب می‌گاید. البته رفتار سطح می‌تواند بسیار متفاوت باشد، بیشتر سطوح نه کاملاً آب‌دوست و نه کاملاً آب‌گریز می‌باشند. یکی از معیارهای اصلی تعیین‌کننده آب‌گریزی نمونه، میزان گروه‌های عاملی سطحی است که با آب واکنش می‌دهند. این برهمکنش‌ها شامل نیروهای بین مولکولی (برهمکنش‌های دوقطبی-دوقطبی و پیوند هیدروژنی) و شیمی اسید/باز و دیگر انواع واکنش‌های سطحی با آب می‌باشند. آب به راحتی سطوح آب‌دوست را خیس می‌کند ولی از روی سطوح آب‌گریز سر می‌خورد.

همانطور که اشاره شد سل ژل‌های سیلیکا از واکنش‌های تراکمی مولکول‌های آلکوکسید ایجاد می‌شوند. اغلب مواد حاصله سیلیکا (SiO_2) می‌باشند. اما برخی از تجزیه‌های جانبی آلکوکسیدها، واکنش نکرده باقی می‌مانند (Si-OR) و برخی دیگر پس از پایان واکنش پلیمری شدن تا حدودی واکنش می‌دهند (Si-OH). اگر پیش‌ماده‌های سیلیکا گروه‌هایی داشته باشند که نتوانند از طریق تراکمی شدن واکنش دهند (Si-R)، این گروه‌ها هم در ماتریکس ابروژل وجود خواهند داشت. این گروه‌ها (Si-OR ، Si-OH ، Si-R) در سطح ابروژل می‌مانند و می‌توانند در تماس با آب باشند. از آنجایی که ابروژل‌ها اغلب نسبت به سایر مواد، سطح تماس زیادی دارند، نقاط تماس زیادی با مولکول‌های آب ایجاد می‌گردد. گروه‌های Si-OH باعث آب‌دوست شدن

به مواد بی‌شکل می‌انجامد. از نقطه نظر انتشار نیز باید گفت، ریسک انتشار نانوذرات سیلیکا از ایروزل‌ها در حین استفاده بسیار کم است. [۱]

ایروزل‌ها و کاتالیزگری

ایروزل‌ها به دلیل سطح تماس بالای خود می‌توانند به عنوان کاتالیست و یا بستر کاتالیست‌ها مورد استفاده قرار گیرند. از میان انواع مختلف ایروزل‌ها، ایروزل سیلیکایی بیش از همه برای کاربردهای کاتالیستی بکاررفته است. کاربردهای کاتالیستی ایروزل‌ها بسیار متنوع می‌باشد و می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱. کاتالیست در واکنش‌های شیمیایی
 ۲. فتوکاتالیست‌ها
 ۳. تثبیت کاتالیست‌های آنزیمی
 ۴. در ساخت الکتروکاتالیست در پیل‌های سوختی
 ۵. در ساخت الکترودها در ابرخازن‌های دولایه الکتروشیمیایی
- در ادامه به نمونه‌هایی از کاتالیست‌های برپایه ایروزل‌ها اشاره می‌شود.

ایروزل‌ها در تهیه فتوکاتالیست‌ها

فتوکاتالیست‌هایی نظیر اکسید تیتانیوم برای تخریب آلاینده‌های آلی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. اغلب برای به حداکثر رساندن عملکرد کاتالیستی، این فتوکاتالیست‌ها بر روی بستری با تخلخل بالا تثبیت می‌شوند. از ایروزل‌ها به دلیل سطح تماس بالای خود برای این منظور استفاده شده است. برای مثال، از ایروزل‌های سیلیکایی برای تهیه فتوکاتالیست کامپوزیتی ایروزل سیلیکایی/دی اکسید تیتانیوم استفاده شده و کارایی آن برای حذف Sec-2 -بوتیل-دی-نیتروفلن (یکی از مشتقات ترکیبات فنی دی نیترو می‌باشد که علی‌رغم کاربردهای زیاد، در صنایع نفت و پتروشیمی سمی و سرطان‌زا است). مورد بررسی قرار گرفته است.

در شکل ۳ تصاویر TEM ایروزل‌های سیلیکایی بعد از خشک کردن در فشار محیط و نمونه‌های کامپوزیت ایروزل سیلیکایی/دی اکسید تیتانیوم نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشخص است، در این کامپوزیت اندازه ذرات دی اکسید تیتانیوم بین ۳۰-۱۰۰ نانومتر می‌باشد. [۲۰]

جذب Sec-2 -بوتیل-دی-نیتروفلن بر روی دی اکسید تیتانیوم خالص چندان زیاد نمی‌باشد و پس از ۱۲۰ دقیقه در تاریکی، میزان حذف تنها به ۶/۱ درصد می‌رسد. درحالی‌که این مقدار برای کامپوزیت ایروزل سیلیکایی/دی اکسید تیتانیوم ۱۳/۶ درصد خواهد بود. این نتایج اثبات می‌کنند که حضور ایروزل سیلیکایی به طور موثری جذب Sec-2 -بوتیل-دی-نیتروفلن را بر روی دی اکسید تیتانیوم افزایش می‌دهد. این امر می‌تواند به دلیل سطح تماس بسیار زیاد این کامپوزیت باشد.

ایروزل‌ها در تثبیت آنزیم

دو لیپاز تجاری، یکی از بورخولدیا سپاسیا و دیگری از کاندیدا آنتارتیسا، در ایروزل‌های سیلیکایی که با فیبرهای کوارتز سیلیکا تقویت شده بودند با روش فوق بحرانی دی اکسید کربن خشک شدند. این کاتالیست‌های زیستی تثبیت شده برای سنتز بیودیزل از طریق ترانس استریفیکاسیون روغن دانه‌های آفتاب‌گردان با متیل استات بکاررفتند. نتایج نشان دادند که این کاتالیست حتی با مخلوطی از دو سوپسترا و بدون هیچ‌گونه حلالی بسیار کارآمد است. روش کپسوله کردن در ایروزل امکان نگاه داشتن (تثبیت) آنزیم را در حالت توزیع مشابه توزیع در محلول ممکن می‌سازد. (حتی برای استفاده بیشتر در محیط آب‌گریز آلی) (شکل ۴) [۲۱]

ایروزل‌ها می‌شوند چراکه این گروه‌ها می‌توانند با آب پیوندهای هیدروژنی قوی برقرار کنند. بنابراین ایروزل‌های بسیار آب‌دوست در آب، از نظر ساختاری فروپاشی می‌کنند و به این ترتیب دیگر نمی‌توان از آنها به عنوان سنسور (در محیط آبی) استفاده کرد. برخی دیگر از ایروزل‌ها نیز بسیار آب‌گریز هستند به طوری که به آنها نمگیر نیز گفته می‌شود. این ایروزل‌ها می‌توانند در محیط مرطوب، آب زیادی را جذب کنند و با گذشت زمان کدر می‌شوند. به این ترتیب استفاده از این دسته از ایروزل‌ها به عنوان عایق حرارتی بسیار پیچیده خواهد شد. از طرف دیگر گروه Si-OH اسید ضعیفی است و در نتیجه، بار متوسط این گروه‌های سطحی به pH محیطی بستگی خواهد داشت که ژل در آن است. از این ویژگی ایروزل‌ها در کرمانتوگرافی و الکتروفورز استفاده می‌شود.

وجود گروه‌های جانبی زیاد غیر قطبی (Si-R) بر روی سطح ایروزل سیلیکا باعث آب‌گریز شدن آن می‌گردد. مولکول‌های آب، تنها نیروهای بین مولکولی ضعیفی با هیدروکربن‌ها و فلوروکربن‌ها دارند ولی با خودشان (مولکول‌های آب) نیروهای بین مولکولی قوی را ایجاد می‌کنند. (شکل ۲) [۱۹-۱۰]

کاربردهای ایروزل‌های آب‌گریز

- پالایش محیط زیست
- کاربردهای بیولوژیکی
- ایجاد سطوح فوق آب‌گریز (خود تمیز شونده و ضد لک)

کامپوزیت‌های ایروزلی

ایروزل‌ها با دوپنت‌های فلزی

نانوذرات فلزی یا اکسید فلزی درون ساختار متخلخل ایروزل قرار می‌گیرند، تا نانوکامپوزیت‌های ایروزل/اکسید فلز تولید شوند. به این ترتیب می‌توان خواص نوری، مغناطیسی و کاتالیستی را بهبود و یا به طور دلخواه تغییر داد. علاوه بر این کاربرد، می‌توان با ایجاد نانوکامپوزیت‌ها و محدود کردن رشد نانوکریستال‌ها، از تجمع (اگرگیت شدن) آنها نیز جلوگیری نمود. مسائل مهم در زمینه نانوکامپوزیت‌های ایروزل/اکسید فلزات عبارتند از : ۱. میزان بارگذاری ۲. اندازه ذرات ۳. یکنواخت بودن [۱]

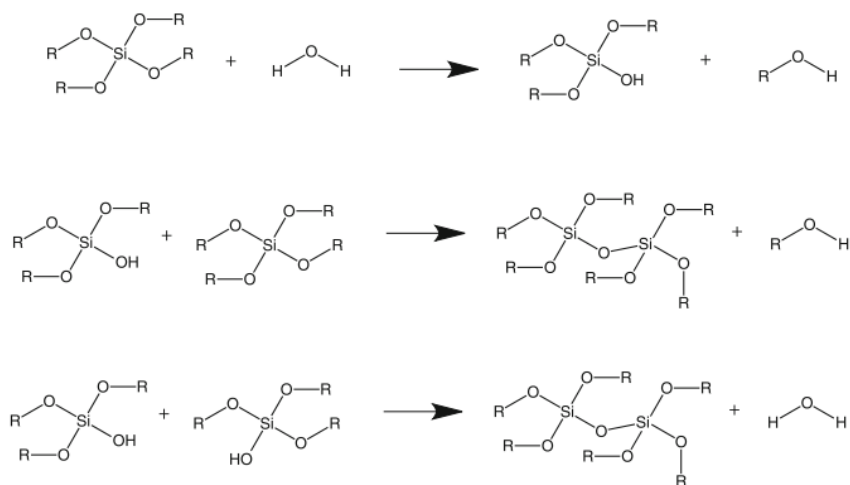
کامپوزیت‌های ایروزل با پلیمرها

یکی از ویژگی‌های نامطلوب ایروزل‌ها، شکنندگی و استحکام کششی پایین آنها است. می‌توان با ترکیب کردن ایروزل‌ها با پلیمرها، استحکام کششی را افزایش داده و ایروزل‌های سخت‌تری ساخت. کامپوزیت‌های ایروزل/پلیمر اغلب شفاف هستند. این ویژگی امکان استفاده از این مواد را در کاربردهای اپتیکی فراهم می‌سازد.

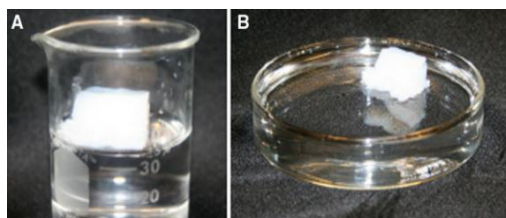
ایمنی ایروزل‌ها

ایروزل‌های ساختارهای نانومتری هستند و مانند سایر نانومواد، سمیت آنها به بررسی‌های دقیق نیاز دارند. از نقطه نظر ارزیابی ریسک، خطر بالقوه نانومواد که در محصولات به سمیت ذاتی نانومواد (نانوسمیت) و ریسک (احتمال) انتشار مربوط می‌شود.

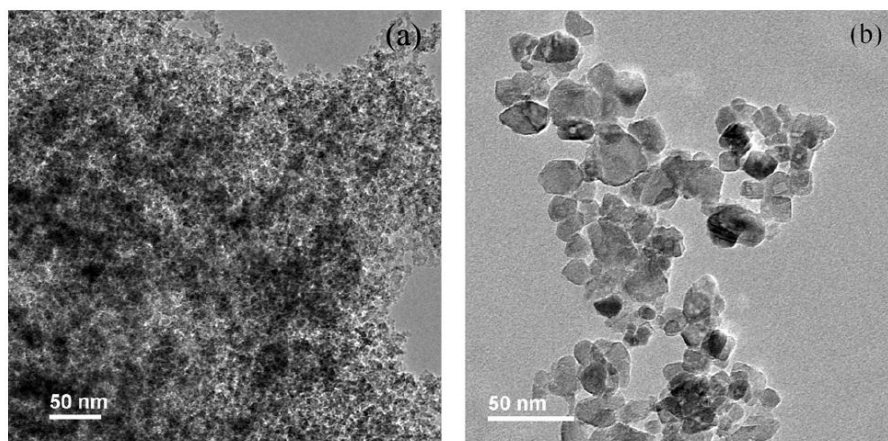
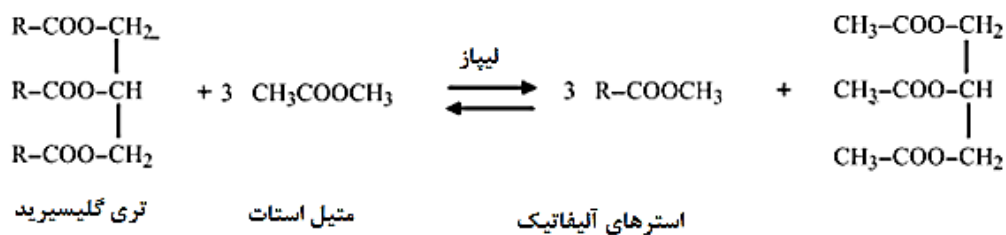
مطالعات بر روی سمیت نانورات سیلیکا نشان داده است که به طور کلی نانوذرات بی‌شکل سیلیکا نسبتاً ایمن و بی‌خطر هستند. اما این مسئله به راحتی قابل تعمیم نیست. برای مثال عامل‌دار کردن سطحی ممکن است بر روی سمیت ایروزل‌ها اثرگذار باشد. نانوذرات کریستالی سیلیکا برای جهش‌زایی ریسک بیشتری دارند. اما فرایند سل-ژل که برای تولید ایروزل‌ها بکار می‌رود



شکل (۱) نمایش واکنش‌های مربوطه برای تشکیل سل ژل سیلیکا.



شکل (۲) نمایی از ایزوژل آب گریز.


 شکل (۳) تصاویر TEM مربوط به (a) ایزوژل SiO_2 و (b) ایزوژل کامپوزیتی (۷ درصد وزنی) $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ که در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد کلسینه شده باشد.


شکل (۴) نمایی از واکنش استریفیکاسیون.

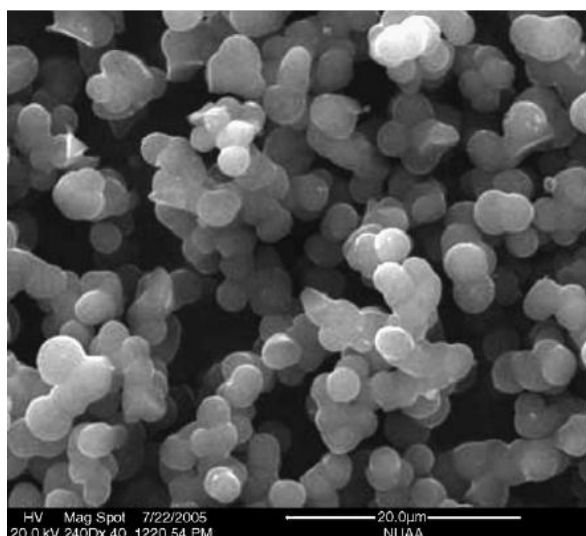
افزایش سطح تماس و کاهش فاصله بین الکترودها منجر می‌شود تا خازن‌های دولایه الکتروشیمیایی دارای دانسیته انرژی بیشتری نسبت به خازن‌های معمولی باشند.

ایروژل کربنی از پلی تراکمی رزورسینول (R) و فرمالدهید (F) و سدیم کربنات به عنوان کاتالیست (C) تهیه شد. تحقیقات نشان دادند که ایروژل کربنی حاصله یک ماده بی‌شکل با ساختار شبکه‌ای مرواریدی شکل است. (شکل ۵) نتایج ولتامتری چرخه‌ای نشان دادند که ظرفیت ویژه الکتروادایرژل کربنی در الکترولیت ۶ مولار پتاس حدود $110/06 \text{ Fg}^{-1}$ می‌باشد. از طریق اندازه‌گیری‌های گالوانواستاتیک شارژ/دشارژ، مشخص شد که الکتروادایرژل در الکترولیت پتاس پایدار است. از مزایای دیگر این الکتروادایرژل آن بود که ابرخازن دارای عمر چرخه‌ای طولانی خواهد بود. [۲۴-۲۳]

ایروژل‌ها در واکنش‌های شیمیایی

ایروژل کبات-سیلیکا (Co-SiO_2) با موفقیت بر روی دیواره کانال‌های منولیت سرامیک رشد داده شد. به این ترتیب، دیواره‌های کاتالیستی کارآمدی برای واکنش‌های گاز-جامد بدست آمد. روش تهیه عبارت بود از سنتز درمحل ژل‌های SiO_2 با هیدرولیز سل-ژل و تراکم تترائیل ارتو سیلیکات (TEOS) و سپس متوقف کردن در نقطه ژل شدن. برای وارد کردن کبات، تلقیح صورت گرفت و خروج حلال با خشک کردن فوق بحرانی انجام شد. عملکرد کاتالیستی این ماده در واکنش ریفرمینگ بخار اتانول، برای تولید هیدروژن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که فعالیت این کاتالیست، چهار برابر منولیت‌های معمول می‌باشد. علت این فعالیت بالا به توزیع زیاد ذرات کبات و نفوذ موثر و بیشتر گونه‌ها واکنش به دلیل تخلخل و اندازه متوسط حفره بزرگتر می‌باشد.

ایروژل سیلیکای دوپ شده با کبات و پلاتین نیز به روش سل-ژل و خشک کردن فوق بحرانی سنتز شدند. حالت ژل تر سیلیکا در فرایند جذب بکار رفت تا پلاتین و کبات را مجتمع سازد. فعالیت کاتالیستی برای اکسیداسیون انتخابی منوکسید کربن در سوخت‌های غنی از هیدروژن در گستره دمایی ۲۵۰-۳۰۰ درجه سانتی‌گراد در غلظت ۲۵۰۰ پی‌پی‌ام منوکسید کربن بررسی گردید. ایروژل‌های CoPt-SiO_2 فعالیت خوبی را در بازه دمایی گسترده‌ای را نشان دادند.



شکل ۵) تصویر SEM ایروژل کربنی ($R/C = 1500$)

ایروژل‌ها در پیل‌های سوختی

پیل سوختی دستگاهی است الکتروشیمیایی که انرژی حاصل از یک واکنش شیمیایی را به انرژی الکتریکی مفید تبدیل می‌کند. تبدیل انرژی در پیل سوختی تبدیل مستقیم انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی است. یک پیل سوختی از سه جز اصلی تشکیل شده است که عبارتند از الکتروادایرژل، الکتروادکات و الکترولیت. هیدروژن به آند پیل سوختی وارد می‌شود. اکسید-کننده که اغلب اکسیژن هوا می‌باشد از سمت کاتد وارد پیل سوختی می‌شود. الکترولیت نقش هدایت یونی بین دو الکترواد را بر عهده دارد و از مخلوط شدن سوخت و اکسیژن جلوگیری می‌کند. به طور کلی در پیل‌های سوختی، از ترکیب اکسیژن و هیدروژن، آب و الکتروسیسته تولید می‌گردد کاتالیست مناسب برای این واکنش‌ها، پلاتین می‌باشد. از آنجایی که پلاتین بسیار گرانبه است، در چند دهه اخیر محققان تلاش کرده‌اند تا کاتالیست ارزانتری پیدا کنند، اما هنوز پلاتین بهترین کاتالیست برای هر دو واکنش اکسید شدن هیدروژن و کاهش اکسیژن می‌باشد.

وقتی که پلاتین بر روی یک بستر که هادی الکترون است، قرار داده شود، مقدار مصرف آن کاهش می‌یابد. در بسیاری از تحقیقات از کربن فعال به عنوان بستر کاتالیزور استفاده می‌شود.

از ایروژل‌ها در ساخت الکتروکاتالیست‌های پیل‌های سوختی نیز استفاده شده است. اخیراً ایروژل کربنی جدیدی با توزیع اندازه باریک ($11/4$ نانومتر) به عنوان بستر کاتالیست در پیل‌های سوختی متانولی بکاررفته است. می‌توان ترکیبات مختلف کاتالیست دو فلزی Pt-Ru را بر روی ایروژل کربنی بارگذاری نمود. اندازه ذرات فلزی حدود ۳ نانومتر بود و به شکل یکنواختی بر روی بستر توزیع شده بودند. سطح تماس ویژه زیاد ایروژل کربنی، فرایند آماده‌سازی را تسهیل می‌نمود. [۲۲]

ایروژل‌ها در ابرخازن‌ها

خازن‌های معمولی از دو الکترواد هادی تشکیل شده‌اند که با یک ماده دی الکتریک عایق جدا می‌گردند. وقتی ولتاژی به خازن اعمال می‌گردد، بارهای مخالف بر روی سطوح هر یک از الکترودها تجمع می‌یابد. بارها توسط دی الکتریک از یکدیگر جدا نگاه داشته می‌شوند و به این ترتیب یک میدان الکتریکی ایجاد می‌شود که به خازن امکان ذخیره انرژی را می‌دهد. ظرفیت C به صورت نسبت بار (مثبت) ذخیره شده Q به ولتاژ به کار رفته V تعریف می‌شود.

$$C = Q/V$$

برای یک خازن معمولی، C مستقیماً با سطح تماس A هر یک از الکترودها رابطه مستقیم و با فاصله بین آنها D رابطه معکوس دارد.

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{D}$$

در ابرخازن‌ها نیز قوانینی مشابه با خازن‌های معمولی وجود دارد. اما در ابرخازن‌ها الکترودها سطح تماس A، بسیار بیشتری داشته و فاصله بین الکترودها D نیز بسیار کاهش می‌یابد. بنابراین بر طبق معادلات ۲ و ۳ هم ظرفیت و هم انرژی ابرخازن‌ها نسبت به خازن‌های معمولی بیشتر خواهد بود خازن‌های دولایه الکتروشیمیایی از یک دولایه الکتروشیمیایی بار برای ذخیره انرژی استفاده می‌کنند. وقتی ولتاژ اعمال گردد، بار بر روی سطوح الکترودها جمع می‌گردد. به دلیل جاذبه بارهای مخالف، یون‌ها در محلول الکترولیت در اطراف سپراتور به درون حفرات الکتروادی با بار مخالف نفوذ می‌یابند. البته الکترودها طوری مهندسی شده‌اند که از بازترکیب یون‌ها جلوگیری کنند. بنابراین دولایه بار در هر الکترواد تشکیل می‌گردد. این دولایه، به همراه

- Chemistry of Hygroscopic Silica Aerogel. *J Non-Cryst Solids* 350(7): 285–289.
15. Schwertfeger, F, Glabitt, W, & Schubert, U (1992) Hydrophobic Aerogels from Si (OMe)/MeSi (OMe) mixtures. *J Non-Cryst Solids* 145: 85–89.
 16. Schwertfeger, F, Husing, N, & Schubert, U (1994) Influence of the Nature of Organic Groups on the Properties of Organically Modified Silica Aerogels. *J Sol-Gel Sci Technol* 2(1): 103–108.
 17. Husing, N, Schwertfeger, F, Tappert, W, & Schubert, U (1995) Influence of Supercritical Drying Fluid on Structure and properties of Organically Modified Silica Aerogels. *J Non-Cryst Solids* 186: 37–43.
 18. Rao, A V, Kulkarni, M M, Amalnerkar, D, & Seth, T (2003) Surface Chemical Modification of Silica Aerogels Using Various Alkyl-alkoxy/chloro Silanes. *Appl Surf Sci* 206(1–4): 262–270.
 19. Rao, A V, & Haranath, D (1999) Effect of Methyltrimethoxysilane as a Synthesis Component on the Hydrophobicity and Some Physical Properties of Silica Aerogels. *Microporous Mesoporous Mater* 30(2–3): 267–273
 20. S. Ahmed, Y.A. Attia, Multi-metal Oxide Aerogel for Capture of Pollution Gases From Air Applied Thermal Engineering 18 (1998) 787±797
 21. O. Orcaire, P. Buisson, A. C. Pierre. Application of Silica aerogel Encapsulated Lipases in the Synthesis of Biodiesel by Transesterification Reactions *Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic* 42 (2006) 106–113.
 22. Smirnovaa, X. Dongb, H. Harab, A. Vasiliev, N. Sammesa International Novel Carbon Aerogel-Supported Catalysts for PEM Fuel Cell Application *Journal of Hydrogen Energy* 30 (2005) 149 – 158
 23. Q. Chuan-li, L. Xing, Y. Ge-ping, B. Xu-du, J. Zheng, Activated Nitrogen-Enriched Carbon/Carbon Aerogel Nanocomposites for Supercapacitor Applications *Trans.Nonferrous Met.Soc. China* 19 (2009) 738-742
 24. J. Li, X. Wang, Q. Huang, S. Gamboa, P.J. Sebastia, Studies on Preparation and Performances of Carbon Aerogel electrodes for the Application of Supercapacitor *Journal of Power Sources* 158 (2006) 784–788
 1. M. A. Aegerter, *Aerogels Handbook*, Springer New York Dordrecht Heidelberg London, ISBN 978-1-4419-7477-8, 2011.
 2. Pierre AC, Pajonk GM (2002) Aerogels and their Applications. *Chem Rev* 102:4243–4265.
 3. Ambekar AP, Bagade P (2006) A Review on: 'Aerogel - World's lightest Solid. *Popular Plastics & Packaging*, 51:96-102.
 4. Kocon L, Phalippou J (2005) Aerogels. *Material Aspect Techniques de l'Ingenieur, Sciences Fondamentales*, AF196:AF3610/1-AF3610/21.
 5. Carraher CE Jr (2005) General topics: Silica Aerogels- Properties and Uses. *Polymer News*, 30(12), 386–388.
 6. Carraher CE Jr (2005) Silica Aerogels - Synthesis and History. *Polymer News*, 30:62–64.
 7. Pajonk GM (2003) Some applications of silica aerogels. *Colloid and Polymer Science*, 281:637–651.
 8. Akimov YK (2003) Fields of Application of Aerogels (Review) *Instruments and Experimental Techniques (Translation of Pribory i Tekhnika Eksperimenta)*, 46:287–299.
 9. Fesmire, J (2006) Aerogel Insulation Systems for Space Launch Applications. *Cryogenics* 46(2–3): 111–117.
 10. Gougas, A, Ilie, D, Ilie, S, & Pojidaev, V (1999) Behavior of Hydrophobic Aerogel Used as a Cherenkov Medium. *Nucl Instrum Methods Phys Res, Sect A* 421(1–2): 249–255.
 11. Doshi, D A, Shah, P B, Singh, S, Branson, E D, Malanoski, A P, Watkins, E B (2005) Investigating the Interface of Superhydrophobic Surfaces in Contact with Water. *Langmuir* 21(17): 7805–7811.
 12. Smirnova, I, Mamic, J, & Arlt, W (2003) Adsorption of Drugs on Silica Aerogels. *Langmuir*, 19(20): 8521–8525.
 13. Yokogawa, H, & Yokoyama, M (1995) Hydrophobic Silica Aerogel. *J Non-Cryst Solids* 186: 23–29.
 14. Miner, M R, Hosticka, B, & Norris, P M (2004) The Effects of Ambient Humidity on the Mechanical Properties and Surface