مقاله مروری

فناوری پلیمر ایران

فصلنامه علمی
سال دهم، شماره ۲، شماره پیاپی ۳۸، تابستان ۱۴۰۴
Vol. 10, No. 2 Issue No. 38
Summer 2025, Quarterly
صفحه ۴۹-۲۹

Iran Polymer Technology: Research and Development

مروری بر کاربرد پلیمرهای رسانا در الکترود ابرخازن‌ها

احمدرضا اکبریان، پدرام منافی*
ماهشهر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، پردیس ماهشهر، گروه مهندسی پلیمر

چکیده ...

ابرخازن‌های انعطاف‌پذیر بر پایه پلیمرها یکی از پیشرفت‌های کلیدی در زمینه ذخیره‌سازی انرژی هستند که به‌دلیل قابلیت‌های منحصربه‌فرد توجه زیادی را در دهه اخیر جلب کرده‌اند. این دستگاه‌ها از پلیمرهای هادی به‌عنوان ماده اصلی الکترود استفاده می‌کنند که نه‌تنها خاصیت انعطاف‌پذیری را فراهم می‌کنند، بلکه رسانایی الکتریکی بالا و پایداری شیمیایی خوبی نیز دارند. این ویژگی‌ها باعث می‌شوند که این ابرخازن‌ها در دستگاه‌های الکترونیکی پوشیدنی (Wearable)، حسگرهای منعطف و حتی دستگاه‌های زیست‌پزشکی به کار گرفته شوند. در طراحی این نوع ابرخازن‌ها، بهینه‌سازی ساختارهای نانومقیاس و استفاده از الکترولیت‌های پیشرفته برای افزایش ظرفیت ذخیره‌سازی و پایداری چرخه‌ای اهمیت ویژه‌ای دارد. علاوه بر این، ترکیب پلیمرهای مختلف و مواد هیبریدی می‌تواند کارایی دستگاه را بهبود بخشد. به‌دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد، ابرخازن‌های پلیمری انعطاف‌پذیر می‌توانند در شرایط سخت محیطی کار کنند و توانایی شارژ و تخلیه سریع را ارائه دهند که این مزیت بزرگی نسبت به باتری‌های معمولی است. توسعه مداوم در این حوزه شامل طراحی مواد جدید، فرایندهای تولید کارآمد و روش‌های نوآورانه برای بهبود عملکرد این دستگاه‌ها است. این پیشرفت‌ها نویدبخش کاربردهای وسیع‌تری در فناوری‌های آینده و نقش مهمی در تحقق مفاهیم شهرهای هوشمند، دستگاه‌های قابل‌حمل پیشرفته و کاهش مصرف انرژی هستند. این فناوری نوظهور به‌طور مداوم درحال‌رشد و تکامل است و پتانسیل تغییر چشم‌انداز ذخیره‌سازی انرژی را دارد.

واژه‌های کلیدی:

ابرخازن‌ها،
پلیمرهای رسانا،
الکترود،
انعطاف‌پذیری،
نانوساختار

*پست الکترونیکی مسئول مکاتبات:
pedram_manafi@aut.ac.ir

۱ مقدمه

تحقیقات دانشگاهی و تولید صنعتی ابرخازن‌ها، از زمان ثبت اولین اختراع در سال ۱۹۵۷، با سرعت و شدت ادامه داشته و کاربردهای بالقوه این فناوری در حوزه‌های متنوعی چون وسایل نقلیه الکتریکی، خودروهای هیبریدی و سامانه‌های ذخیره‌سازی و پشتیبانی انرژی گسترش یافته است. علاوه براین، رشد تقاضا برای لوازم الکترونیکی پوشیدنی و پیشرفت‌های چشم‌گیر در نانومواد و فناوری‌های نانو منجر به شکل‌گیری روند توسعه ابرخازن‌های انعطاف‌پذیر شده است، این دستگاه‌ها از مواد پیشرفته‌ای استفاده می‌کنند که عملکرد یکپارچه را با انعطاف‌پذیری ترکیب می‌کنند. برای دستیابی به دستگاه‌هایی که علاوه بر قابلیت انعطاف‌پذیری و پوشیدن، عملکرد اولیه ابرخازن را نیز حفظ کنند، طراحی و انتخاب مواد یا ساختارهایی با انعطاف‌پذیری ذاتی و سازگاری بالا، اهمیت حیاتی دارد. این رویکرد، چشم‌انداز جدیدی را در زمینه تولید ابرخازن‌های پیشرفته فراهم می‌کند و زمینه را برای استفاده گسترده‌تر در دستگاه‌های قابل‌حمل و هوشمند فراهم می‌سازد. طرح‌واره‌ای از ساختار داخلی یک ابرخازن در شکل ۱ نشان داده شده است.

یافته‌ها و پیشرفت‌های کلیدی در تحقیق روی ابرخازن‌های پایه پلیمری شامل پیشرفت‌هایی در سنتز و ساخت الکترودهای بر پایه پلیمر است که به‌طور قابل‌توجهی معیارهای عملکرد ابرخازن‌ها را افزایش می‌دهد. پلیمرهای رسانا مانند پلی پیرول(Polypyrrole)، پلی‌آنیلین(Polyaniline) و پلی‌تیوفن(Polythiophene) با توجه به پتانسیل آنها برای ابرخازن‌ها و همچنین به‌دلیل ظرفیت ویژه و انعطاف‌پذیری بالا، به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. فن‌هایی مانند بسپارش سطحی مایع–مایع برای ایجاد لایه‌های پلیمری فوق نازک و اکسایش–کاهش فعال توسعه داده شده است که برای قطعات الکترونیکی انعطاف‌پذیر مینیاتوری بسیار مهم است. به‌عنوان مثال، اختلاط پلیمرهای رسانا با کربن برای بهینه‌سازی معیارهای عملکرد ابرخازن مانند ظرفیت و رسانایی انجام شده است. علاوه بر این، توسعه الکترولیت‌های ژل پلیمری (Polymer Gel Electrolyte) محدودیت‌های الکترولیت‌های مایع در شبه‌خازن‌ها را اصلاح کرده است و رسانایی را در دمای محیط بالاتر برده و خواص مکانیکی مناسبی را ارائه می‌دهد [۲،۳].

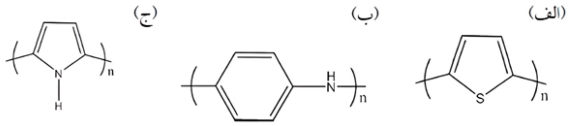
شکل ۱ ساختار داخلی یک ابرخازن [۱].

ابرخازن‌های حالت جامد (Solid-state Supercapacitors) که از الکترولیت‌های ژل پلیمری نوآورانه بهره می‌برند، توانسته‌اند بهبود چشمگیری در خواص الکتروشیمیایی و چگالی انرژی ایجاد کنند. این دستاوردها آن‌ها را به گزینه‌ای ایده‌آل برای کاربردهای با عملکرد بالا تبدیل کرده است. افزون بر این، استفاده از ابرخازن‌های تمام حالت جامد با الکترولیت‌های ژل پلیمری، از منظر عملکرد الکتروشیمیایی، چگالی انرژی و انعطاف‌پذیری، نتایج امیدوارکننده‌ای به همراه داشته است که اهمیت بسیاری در استفاده از این فناوری در دستگاه‌های الکترونیکی منعطف دارد.

با وجود پیشرفت‌های اخیر در اصلاح و ساخت الکترود و الکترولیت‌ها به‌منظور کاهش محدودیت‌های موجود، ابرخازن‌های انعطاف‌پذیر همچنان با چالش‌های مهمی مواجه هستند. از جمله این چالش‌ها می‌توان به کاهش پایداری الکتروشیمیایی در نتیجه سایش الکترود طی فرایند و همچنین تغییر ابعاد اشاره کرد. با این حال، انتخاب هوشمندانه مواد الکترود نقش تعیین‌کننده‌ای در عملکرد و دوام ابرخازن‌های انعطاف‌پذیر دارد. این مواد مستقیماً بر ظرفیت خازن، نرخ شارژ و تخلیه و همچنین پایداری چرخه‌ای تأثیرگذار هستند. به همین دلیل، تحقیقات گسترده‌ای برای شناسایی مواد الکترود جدیدی که از ویژگی‌های الکتروشیمیایی مناسبی برخوردار باشند و قابلیت تولید با روش‌های مقیاس‌پذیر را داشته باشند، صورت گرفته است.

پلیمرهای رسانا به‌دلیل رسانایی بالا، قابلیت فراورش بالا و پایداری الکتروشیمیایی، به‌عنوان مواد اولیه برای ساخت الکترود ابرخازن‌های انعطاف‌پذیر توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند [۴]. با این حال، این پلیمرها نیز محدودیت‌هایی دارند؛ به‌عنوان مثال، پایداری نسبتاً پایین آنها در برابر چرخه‌های مکرر شارژ و تخلیه می‌تواند عملکرد آنها را در طول زمان کاهش دهد. همچنین، پلیمرهای رسانا ممکن است از نظر مکانیکی ناپایدار باشند و در مواجهه با کرنش‌های شدید، دچار ترک‌خوردگی یا لایه‌برداری شوند. به‌منظور بهبود عملکرد، پژوهشگران در تلاشند با ترکیب پلیمرهای رسانا با موادی همچون نانولوله‌های کربنی یا اکسیدهای فلزی، مواد هیبریدی نوینی ایجاد کنند. هدف از این بررسی‌ها، بهبود پایداری مکانیکی و الکتروشیمیایی این مواد است.

به‌طورکلی، تحقیقات روی ابرخازن‌های بر پایه پلیمر به سمت



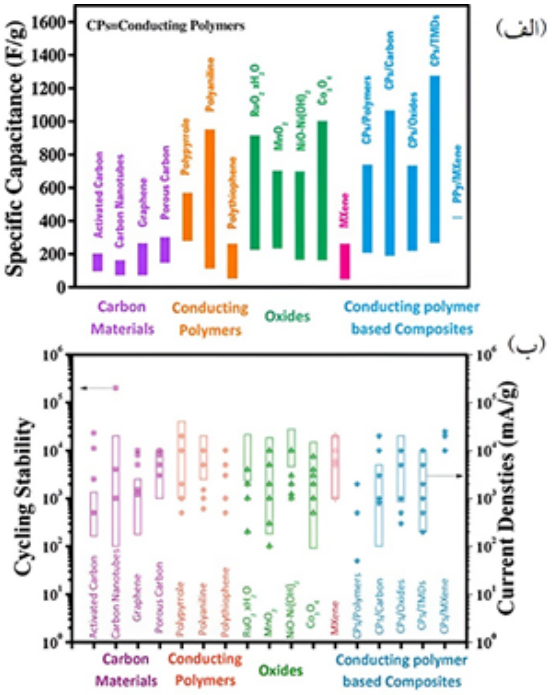
شکل ۲ ساختار مولکولی پلیمرهای رسانای رایج برای ابرخازن‌ها. (الف) پلی‌تیوفن(PTh)؛ (ب) پلی‌آنیلین(PANI)؛ (ج) پلی‌پیرول (PPy)

توسعه فناوری‌های ابرخازن کارآمد، انعطاف‌پذیر و مناسب برای تولید انبوه پیش می‌رود که انتظار می‌رود نیازهای روبه‌رشد کاربردهای الکترونیکی پیشرفته را برآورده کند.

پلیمرهای رسانا

پلیمرهای رسانا (Conductive Polymers) به‌طور فزاینده‌ای برای کاربرد در ابرخازن‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. ساختارهای مولکولی پلیمرهای رسانای رایج، مانند پلی‌پیرول(PPy)، پلی‌آنیلین (PANI) و پلی‌تیوفن (PTh) در شکل ۲ نشان داده شده است. به نظر می‌رسد پلیمرهای رسانا که از طریق اکسایش شیمیایی یا الکتروشیمیایی مونومرها تشکیل می‌شوند، دارای شباهت‌های ساختاری هستند، زیرا همگی ساختارهای مزدوج دارند [۵]. این مواد به‌دلیل ظرفیت ویژه بالا، رسانایی عالی و سازگاری با محیط زیست شناخته می‌شوند. بررسی‌ها نشان داده است که پلیمرهایی نظیر PANI و PPy می‌توانند عملکرد ابرخازن‌ها را با بهبود خواص انتقال بار و افزایش مساحت سطح، به‌ویژه زمانی که در ترکیب با کربن نانوساختار یا اکسیدهای فلزی در الکترودهای هیبریدی استفاده می‌شوند، ارتقا دهند. اختلاط پلیمرهای رسانا با مواد معدنی و تشکیل چندسازه‌های هیبریدی، به‌عنوان رویکردی امیدوارکننده برای دستیابی به قابلیت‌های ذخیره‌سازی انرژی پیشرفته شناخته می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۳ (الف) مشاهده می‌شود، ظرفیت ویژه خازنی بیشتر مواد بر پایه کربن که انرژی را از طریق سازوکار خازن دولایه الکتریکی (Electric Double Layer Capacitor) ذخیره می‌کنند، معمولاً کمتر از $300\ Fg^{-1}$ است. در مقابل، پلیمرهای رسانایی مانند PANI،PPy و PTh قادر به دستیابی به مقادیر بسیار بالاتری هستند. در میان تمامی پلیمرهای رسانا، PANI از نظر بالقوه توانایی بیشتری در ذخیره انرژی دارد. این موضوع با ظرفیت ویژه بالای آن، در مقایسه با PPy و PTh، به‌وضوح قابل مشاهده است. از سوی دیگر، اکسیدهای فلزات واسطه، نظیر MnO_z، RuO_z، $NiO/Ni(OH)_2$ و Co_3O_4، به‌دلیل ویژگی‌های الکترونیکی پیچیده، فازهای بلوری متنوع و ساختارهای نانوی قابل تنظیم، ظرفیت‌های ویژه ذاتی بالایی را



شکل ۳ مقایسه‌ی انواع مواد بر اساس پارامترهای کلیدی آن‌ها در کاربردهای ابرخازنی: (الف) ظرفیت ویژه‌ی مواد الکترودی متداول در ابرخازن‌ها؛ (ب) پایداری چرخه‌ای و محدوده‌ی چگالی جریان این مواد [۶].

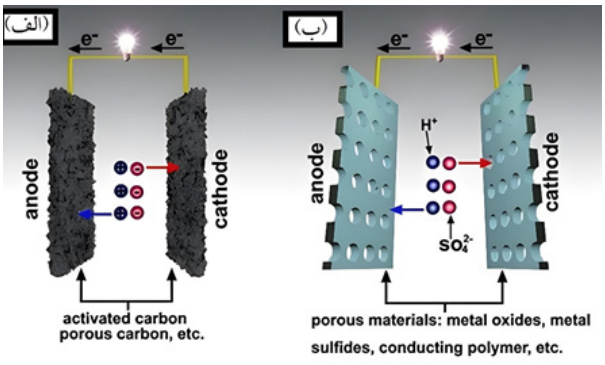
ارائه می‌دهند. ابرخازن‌هایی که با استفاده از اکسیدهای فلزات واسطه ساخته می‌شوند، معمولاً ظرفیت‌هایی بیش از $300\ Fg^{-1}$ نشان می‌دهند. افزون بر این، چندسازه‌هایی که از ترکیب پلیمرهای رسانا و سایر مواد معدنی ساخته شده‌اند، توانایی افزایش ظرفیت ابرخازن‌ها را دارند. با این وجود، همان‌طور که در شکل ۳ (ب) مشاهده می‌شود، پایداری چرخه‌ای، نشان می‌دهد که بیشتر ابرخازن‌های پیشرفته ساخته شده از مواد فعال منفرد یا چندسازه‌های پلیمرهای رسانا و سایر مواد، چرخه‌های عمر مشابهی در حدود ۱۰۳ تا ۱۰۴ چرخه دارند. در مورد مواد الکترود بر پایه کربن، می‌توان مشاهده کرد که کربن فعال و الکترودهای نانولوله کربنی تغییرات زیادی در طول عمر چرخه و محدوده چگالی جریان دارند؛ درحالی‌که گرافن و کربن متخلخل از پایداری بیشتری برخوردارند. همین وضعیت در استفاده از پلیمرهای رسانا، اکسیدهای فلزات واسطه و چندسازه‌های آن‌ها به‌عنوان مواد الکترود نیز مشاهده می‌شود. این امر ممکن است به‌دلیل فقدان روش‌های استاندارد آزمایش و ویژگی‌های خاص مواد الکترود خازنی باشد، از جمله مورفولوژی، تخلخل‌ها و رسانایی الکتریکی که به روش‌های ساخت و اصلاح آن‌ها وابسته است. در نتیجه، عملکردهای متفاوتی حتی با استفاده از همان نوع مواد مشاهده می‌شود. همچنین هنگام محاسبه

ظرفیت ویژه یا چگالی جریان با پارامترهای وزنی یا ابعادی، مشکلاتی ممکن است به وجود آید که منجر به ناسازگاری واحدها در صورت ارائه اطلاعات ناکافی شود.

پلی پیرول

پلی پیرول به‌عنوان پلیمر رسانای برجسته شناخته می‌شود که توجه چشمگیری را در حوزه ذخیره انرژی، به‌ویژه در کاربرد آن در ابرخازن‌ها به خود جلب کرده است. این دستگاه‌ها، به‌دلیل توانایی زیاد خود در ذخیره و تحویل سریع انرژی، اهمیت فراوانی دارند. از ویژگی‌های شاخص PPy می‌توان به ظرفیت نظری بالای آن و عملکرد بی‌نظیر در فرایندهای اکسایش و کاهش اشاره کرد که نقشی اساسی در بهبود عملکرد این مواد ایفا می‌کند، همچنین تطبیق‌پذیری این ماده امکان بهره‌گیری از روش‌های گوناگون سنتز و ترکیب مواد اولیه متنوع را فراهم می‌کند. این ویژگی‌ها موجب بهینه‌سازی رسانایی و خواص الکتروشیمیایی PPy شده و آن را به یکی از گزینه‌های مناسب برای راه‌حل‌های نوآورانه در ذخیره‌سازی انرژی نسل آینده تبدیل می‌سازد. ابرخازن‌های بر پایه PPy را می‌توان در پیکربندی‌های متنوع، از جمله خازن‌های EDLC و شبه‌خازن‌ها، طراحی کرد که هر یک از سازوکارهای متفاوتی برای ذخیره‌سازی انرژی بهره می‌برند.

در شکل ۴، طرحواره‌ای از EDLC و شبه‌خازن نمایش داده شده است. EDLCها عمدتاً بر پایه ذخیره‌سازی الکترواستاتیکی انرژی عمل می‌کنند. ساختار این نوع خازن شامل دو الکترود از جنس کربن فعال است که توسط یک الکترولیت از هم جدا شده‌اند. زمانی که ولتاژ به دو سر خازن اعمال می‌شود، یک لایه دوگانه از یون‌های مثبت و منفی در سطح الکترودها تشکیل می‌شود. این فرایند، بدون وقوع واکنش شیمیایی، باعث ذخیره‌سازی انرژی می‌شود. اما شبه‌خازن‌ها برخلاف EDLCها،



شکل ۴ طرحواره (الف) خازن الکتریکی دولایه و (ب) شبه‌خازن [۷].

انرژی را از طریق واکنش‌های شیمیایی ذخیره می‌کنند. این واکنش‌ها شامل فرآیندهای فارادیکی مانند اکسایش-کاهش است که منجر به انتقال بار الکتریکی بین الکترود و الکترولیت می‌شود [۷]. در ساختار شبه‌خازن‌ها، الکترودها معمولاً از موادی مانند پلیمرهای رسانا ساخته می‌شوند. ظرفیت خازنی شبه‌خازن‌ها به‌دلیل واکنش‌های شیمیایی، بیشتر EDLCها است. این ویژگی باعث می‌شود که شبه‌خازن‌ها توانایی ذخیره‌سازی انرژی بیشتری داشته باشند، هرچند سرعت شارژ و تخلیه آن‌ها کمی کمتر از خازن‌های دولایه است. به‌طور کلی، خازن‌های دولایه الکتریکی و شبه‌خازن‌ها مکمل یکدیگر هستند و اغلب در ترکیب با یکدیگر در ابرخازن‌ها استفاده می‌شوند. این ترکیب باعث می‌شود که ابرخازن‌ها ظرفیت بالا و سرعت شارژ سریع را به‌صورت هم‌زمان فراهم کنند. این تفاوت‌های ساختاری و عملکردی، نشان‌دهنده اهمیت هر یک از این نوع خازن‌ها در کاربردهای مختلف ذخیره‌سازی انرژی است. برای مثال، در کاربردهایی که سرعت اهمیت بیشتری دارد، از خازن‌های دولایه استفاده می‌شود، در حالی که در مواردی که ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی بیشتر اهمیت دارد، شبه‌خازن‌ها ترجیح داده می‌شوند.

نکته قابل توجه این است که ترکیب PPy با موادی مانند اکسیدگرافن و آیروژل (Aerogel)کربن، پیشرفت‌های چشم‌گیری را در ظرفیت ویژه خازنی نشان داده است. این ترکیب‌ها قابلیت زیادی در افزایش چگالی انرژی مواد چندسازه‌ای دارند و آن‌ها را از سامانه‌های سنتی متمایز می‌سازند [۸].

مزیت‌های رسانایی PPy، از جمله توانایی تولید الکترودهای نانوساختار با سطح بالا، این ماده را به جایگزینی جذاب برای الکترودهای کربن فعال تبدیل کرده است. الکترودهای کربن فعال معمولاً از طریق تشکیل دوغاب با استفاده از حلال و ماده اتصال‌دهنده بی‌اثر آماده‌سازی می‌شوند. در مقابل، فرایند تولید نانوساختار PPy اغلب با روش تک‌مرحله‌ای به دست می‌آید که به حداقل پردازش نیاز دارد. ازاین‌رو، نانوچندسازه‌های PPy، که تحقیقات آن‌ها به سال ۲۰۰۱ بازمی‌گردد، به یکی از مواد مورد توجه برای الکترود ابرخازن‌ها تبدیل شده‌اند [۹].

به‌طور گسترده‌ای پذیرفته شده است که اضافه‌کردن PPy به الکترودهای اکسید گرافن کاهش یافته(Reduced Graphene Oxide)، به‌دلیل اثرات هم‌افزایی حاصل از ویژگی‌های برجسته این دو ماده، ظرفیت ویژه آن‌ها را به‌طور چشم‌گیری افزایش می‌دهد. ویژگی‌های برجسته rGO، از جمله نسبت‌منظر بالا(Aspect Ratio)، خواص مکانیکی مناسب و هدایت الکتریکی و حرارتی بالا، نقش بسزایی در افزایش ظرفیت ویژه الکترود چندسازه ایفا می‌کنند. علاوه بر این، سطح وسیع گرافن

برای افزایش سطح فعال قابل دسترس پلیمرهای رسانا بسیار مطلوب است و در نتیجه شبه‌خازن قوی‌تری حاصل می‌شود. همچنین مشخص شده است این رویکرد پایداری شیمیایی الکترود را طی فرایندهای الکتروشیمیایی افزایش داده و بهبود عملکرد چرخه‌پذیری را به همراه دارد.

رابطه عملکردی میان rGO و PPy در ابرخازن‌ها بر پایه دو سازوکار مستقل برای ذخیره انرژی تعریف می‌شود. در حالی که rGO معمولاً به‌عنوان الکترودهای نوع EDLC شناخته می‌شود، PPy در توسعه شبه‌خازن‌ها نقش کلیدی دارد. شبه‌خازن‌ها از طریق واکنش‌های اکسایش و کاهش میان الکترولیت و پلیمرها تشکیل می‌شوند؛ در نتیجه، هر دو ماده، یعنی rGO و PPy، در افزایش ظرفیت خازنی و چگالی انرژی ابرخازن‌ها موثر هستند. با این حال، PPy ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی بیشتری در مقایسه با EDLCهای سنتی ارائه می‌دهد. به‌عنوان مثال، راس و همکاران نشان دادند، افزودن تنها ۱۶ میکروگرم PPy به ۳۰ میکروگرم rGO می‌تواند ظرفیت ویژه الکترود rGO را، بسته به شرایط محیطی، ۴ تا ۵ برابر افزایش دهد. بررسی چنین ترکیباتی به‌دلیل توانایی آن‌ها در بهره‌گیری از مزایای منحصربه‌فرد هر ماده، قابلیت قابل‌توجهی برای ارتقای عملکرد ابرخازن‌ها ارائه می‌دهد و توجه گسترده‌ای را در تحقیقات به خود جلب کرده است [۱۰].

یکی از ویژگی های بارز rGO رسانایی الکتریکی فوق‌العاده آن است که در صورت استفاده در الکترود ابرخازن‌ها، بازده انتقال الکترون در داخل ماده را افزایش می‌دهد. رسانایی بهبود یافته چندسازه ناشی از یکپارچه‌سازی rGO منجر به نرخ شارژ و تخلیه‌ی سریع‌تر و چگالی توان بالاتر می‌شود. در ترکیب rGO/PPy، نقش اصلی rGO افزایش پایداری هنگام شارژ و تخلیه است، درحالی‌که PPy عمدتاً ظرفیت ویژه الکترود را بهبود می‌بخشد. عملکرد الکترودهای ابرخازن شامل rGO و PPy ممکن است بسته به نسبت این دو ماده، به‌طور قابل‌توجهی متفاوت باشد. علاوه بر این، ترکیب فلزات یا ترکیبات فلزی (مانند اکسیدهای فلزی، سولفیدهای فلزی یا نیتریدهای فلزی) با چندسازه rGO/PPy برای ایجاد ترکیبات سه‌تایی و چهارتایی نیز مورد توجه قرار گرفته است، زیرا اثر هم‌افزایی میان این مواد باعث بهبود عملکرد الکتروشیمیایی الکترودهای ابرخازن می‌شود.

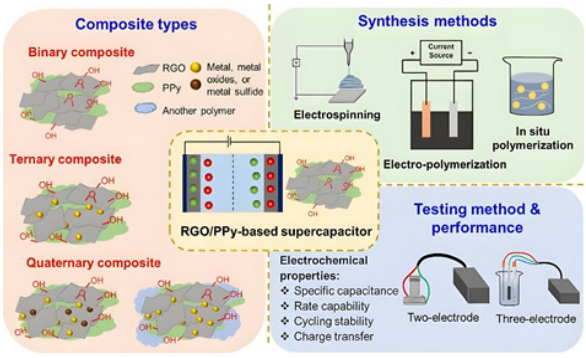
روندهای اخیر

یکی از روندهای اخیر در پژوهش‌های مربوط به ابرخازن‌ها، تمرکز محققان بر طراحی و توسعه ابرخازن‌های انعطاف‌پذیر و قابل‌پوشیدن است که قابلیت استفاده در کاربردهای گوناگونی از جمله لباس‌های هوشمند، دستگاه‌های الکترونیکی و کاشتینه‌های پزشکی را دارند. این کاربردها مستلزم نوآوری و اصلاح در فرایندهای تولید و استفاده از مواد الکترودی انعطاف‌پذیر هستند [۱۱]. یکی از چالش‌های اصلی در استفاده از PPy برای ابرخازن‌های انعطاف‌پذیر، محدودیت‌های ذاتی این ماده در رسانایی و سینتیک انتقال الکترون است؛ عواملی که می‌توانند بهره‌برداری کامل از ظرفیت شبه‌خازنی آن را مختل کرده و طول عمر آن را در چرخه‌های مداوم شارژ و تخلیه کاهش دهند. برای رفع این چالش‌ها، پژوهشگران به ترکیب PPy با موادی همچون نانولوله‌های کربنی، الیاف کربنی یا اکسید گرافن کاهش‌یافته روی آورده‌اند. این ترکیب باعث افزایش تحرک الکترون در PPy شده و مشکلات ناشی از تغییرات حجم را به حداقل می‌رساند.

چندسازه‌های PPy

همان‌طور که پیش‌تر بررسی شد، rGO در میان مواد کربنی به‌دلیل ویژگی‌های استثنایی آن، جایگاه ویژه‌ای دارد. این ماده پتانسیل بالایی در بهبود عملکرد ابرخازن‌های انعطاف‌پذیر، به‌ویژه در ترکیب با PPy نشان می‌دهد [۱۱]. همچنین، چندین پژوهش مهم عملکرد مواد برپایه rGO را در ابرخازن‌ها، به‌صورت چندسازه با پلیمرهای رسانای مختلف، با تأکید خاص بر PANI [۱۲] و همین‌طور چندسازه‌های rGO با اکسیدهای فلزی [۱۳] و سولفیدهای فلزی مورد بررسی قرار داده‌اند با وجود تحقیقات گسترده‌ای که به کاربرد rGO و PPy به‌عنوان مواد اصلی در ابرخازن‌ها اختصاص یافته است، به نظر می‌رسد که تاکنون بررسی جامعی در مورد مواد ابرخازن بر پایه rGO/PPy ارائه نشده باشد، مگر یک مطالعه خاص که به‌طور انحصاری روی ابرخازن‌های نساجی انعطاف‌پذیر تمرکز داشته است [۱۴]. در اینجا، پیشرفت‌ها و طراحی چندسازه‌های rGO/PPy را با استفاده از روش‌های مختلف بسپارش PPy روی rGO، از جمله چندسازه‌های سه‌تایی و چهارتایی rGO/PPy همراه با مواد دیگر، در شکل ۵ نشان داده‌ایم.

پلی‌پیرول نه‌تنها از توسعه ابرخازن‌های انعطاف‌پذیر و اقتصادی حمایت می‌کند، بلکه برای کاربرد در وسایل الکترونیکی قابل‌حمل و سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر نیز گزینه‌ای جذاب به‌شمار می‌رود. با وجود مزایای چشمگیر آن، استفاده از PPy در ابرخازن‌ها خالی از چالش نیست. مسائل مرتبط با پایداری، تخریب در حین چرخه‌های عملیاتی، و رسانایی ذاتی پایین، می‌توانند بر عملکرد و قابلیت اطمینان بلندمدت این دستگاه‌ها تأثیرگذار باشند. تحقیقات نشان می‌دهد اگرچه ممکن است ویژگی‌های شارژ و تخلیه در ابتدا ثابت بمانند، اما تخریب



شکل ۵ نمایش طرح‌واره اکسید گرافن کاهش‌یافته و چندسازه‌های پلی‌پیرول برای بررسی عملکرد ابرخازن‌ها [۱۵].

قابل‌توجهی در استفاده طولانی مدت رخ می‌دهد که می‌تواند بر قابلیت استفاده و کارایی این سامانه‌ها تأثیر منفی بگذارد [۱۶]. علاوه بر این، نگرانی‌های مربوط به سازگاری با مواد دیگر در سامانه‌های چندسازه، موانع بیشتری را ایجاد می‌کند که باید برای عملکرد بهینه برطرف شوند [۱۷]. پیشرفت‌های مستمر در سنتز PPy و راهبردهای یکپارچه‌سازی، مسیر را برای ابرخازن‌های بادوام‌تر و کارآمدتر هموار می‌کنند. نوآوری‌هایی نظیر فن‌های سنتز الکتروشیمیایی و توسعه ابرخازن‌های نامتقارن حالت جامد، رویکردهای امیدوارکننده‌ای هستند که می‌توانند معیارهای عملکرد و پایداری عملیاتی را ارتقا دهند. با پیشرفت تحقیقات، انتظار می‌رود که PPy نقش کلیدی در تکامل فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی ایفا کند؛ به‌ویژه در کاربردهای انرژی تجدیدپذیر، جایی که می‌تواند به تثبیت شبکه‌های الکتریکی و مدیریت نوسانات برق حاصل از منابع انرژی متغیر مانند خورشید و باد کمک کند [۱۸].

پلی‌تیوفن

پلی‌تیوفن (PTh) پلیمر رسانای برجسته است که به واسطه ساختار حلقه‌ی هتروآروماتیک پنج‌عضوی و سامانه گسترده کانژوگه‌ی خود، از پایداری الکتروشیمیایی استثنایی و رسانایی الکتریکی بالایی برخوردار است. این ویژگی‌های منحصربه‌فرد، PTh را به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای گوناگون، به‌ویژه در فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی مانند ابرخازن‌ها، تبدیل کرده است. تحقیقات نشان می‌دهد که مواد بر پایه PTh ظرفیت خازنی ویژه‌ی چشمگیری ارائه می‌دهند، ذخیره‌سازی شارژ کارآمد و قابلیت‌های تخلیه سریع را تسهیل می‌کنند. بنابراین، این مواد پتانسیل قابل‌توجهی در سامانه‌های انرژی پیشرفته و طراحی ابرخازن‌های هیبریدی دارند [۱۹]. در ابرخازن‌ها، PTh توانایی قابل‌توجهی را برای انجام واکنش‌های ریداکس نشان می‌دهد که امکان انتقال موثر بار و ذخیره انرژی را از طریق وارد کردن یون‌ها از الکترولیت فراهم می‌کند. مطالعات نشان داده‌اند چندسازه‌های PTh می‌توانند به مقادیر خازنی ویژه‌ای تا ۴۴۳/۵ Fg^{-1} دست یابند، اگرچه PTh خالص اغلب در مقایسه با سایر پلیمرهای رسانا مانند PANI و PPy عملکرد کمتری را نشان می‌دهد [۲۰]، اما نکته قابل‌توجه این است که اختلاط مواد بر پایه کربن، مانند نانولوله‌های کربنی چندجداره، در چندسازه‌های PTh منجر به افزایش رسانایی الکتریکی و پایداری مکانیکی شده است. این سامانه‌های هیبریدی برای کاربردهای گوناگون، به‌ویژه در وسایل نقلیه الکتریکی و وسایل الکترونیکی قابل حمل، جذابیت زیادی پیدا کرده‌اند.

با وجود ویژگی‌های امیدوارکننده‌ی PTh، پذیرش گسترده‌ی آن در ابرخازن‌ها با چالش‌هایی مانند مسائل مربوط به پایداری چرخه، چگالی انرژی و تغییرپذیری هدایت میان فرمول‌های مختلف مواجه است. عملکرد الکترودهای بر پایه PTh به‌طور عمده به بهینه‌سازی مواد چندسازه و روش‌های سنتز وابسته است؛ حوزه‌هایی که همچنان از موضوعات فعال در تحقیقات باقی مانده‌اند [۲۱] علاوه بر این، تأثیر زیست‌محیطی PTh و نیاز به استفاده از روش‌های پایدار در تولید و کاربرد آن، به ملاحظات مهمی در پیشرفت فناوری ابرخازن تبدیل شده است [۲۲].

PTh در ابرخازن‌ها

در حوزه ابرخازن‌ها، PTh ویژگی‌های امیدوارکننده‌ای مانند ظرفیت خازنی ویژه‌ی بالا و چگالی انرژی قابل‌توجهی ارائه می‌دهد. ماهیت رسانای آن، امکان انتقال مؤثر بار را در طول فرایندهای شارژ و تخلیه فراهم می‌کند؛ به‌ویژه زمانی که این پلیمر می‌تواند از طریق وارد کردن کاتیون‌ها یا آنیون‌ها از الکترولیت، احیا یا اکسید شده و تشکیل حامل‌های بار غیرمحلی را در طول زنجیره‌های پلیمری تسهیل کند [۱۹]. عملکرد ابرخازن‌های بر پایه PTh، هنگامی که با نانوذرات رسانا همچون نانولوله‌های کربنی ترکیب می‌شوند، به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. این بهبود نه‌تنها رسانایی را ارتقا می‌بخشد، بلکه ظرفیت الکتریکی کلی را نیز بهبود می‌دهد [۲۳].

چندسازه‌های PTh

مطالعات اخیر بر ترکیب PTh با مواد کربنی برای بهبود عملکرد الکترود متمرکز شده‌اند. به‌عنوان مثال، ایجاد نانوچندسازه‌های نانولوله کربنی /PTh(MWCNT) از طریق بسپارش الکتروشیمیایی نتایج امیدوارکننده‌ای را نشان داده است. در مطالعه‌ای، ظرفیت ویژه‌ای برابر با ۱۱۰ Fg^{-1} با سرعت روبش ۶۰ mV/s گزارش

شده است. نانوچندسازه مورد بررسی پس از ۱۰۰۰ چرخه همچنان ۹۰٪ پایداری خود را حفظ کرده است [۲۱]. یکی دیگر از روش‌ها با استفاده از پوشش PTh با ضخامت ۲ تا ۳ نانومتر روی MWCNTها، ظرفیت ویژه‌ای برابر با $216\ Fg^{-1}$ به‌دست آورد. این روش، قابلیت بالای چندسازه‌های PTh را برای کاربردهای ابرخازن با کارایی بالا به وضوح نشان می‌دهد [۲۱].

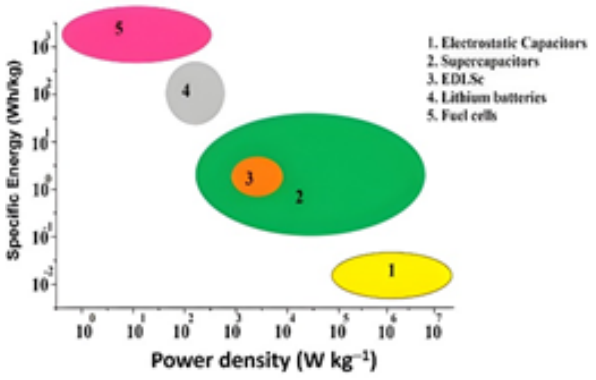
چگالی انرژی و چگالی توان

ابرخازن‌های بر پایه PTh با دستیابی به ظرفیت ویژه بالا، توانمندی چشمگیری در زمینه‌های گوناگون از خود نشان می‌دهند. با این حال، در مقایسه با باتری‌های معمولی، اغلب با چالش‌هایی در حوزه چگالی انرژی روبه‌رو هستند. تحقیقات حاکی از آن است که هرچند PTh قابلیت‌های شارژ و تخلیه سریع، که از ویژگی‌های بارز ابرخازن‌ها است، را فراهم می‌کند، اما چگالی انرژی آن همچنان از سامانه‌های باتری سنتی کمتر است [۲۱]. با این وجود، زمان پاسخ سریع دستگاه‌های بر پایه PTh، آن‌ها را به گزینه‌ای ایده‌آل برای برنامه‌هایی تبدیل می‌کند که نیاز به انتشار سریع و فوری انرژی دارند.

به‌طور کلی، ابرخازن‌ها در مقایسه با باتری‌های سنتی، از چگالی انرژی کمتری برخوردارند، اما در مقابل، چگالی توان بسیار بالاتری ارائه می‌دهند. در شکل ۶ چگالی توان و ظرفیت ویژه انرژی ذخایر مختلف انرژی نشان داده شده است.

پایداری

پایداری چرخه‌ای یکی از جنبه‌های حیاتی عملکرد ابرخازن‌ها به شمار می‌رود. الکترودهای بر پایه PTh رفتار چرخه‌ای بسیار خوبی از خود نشان داده و ظرفیت خازنی قابل‌توجهی را در چرخه‌های متعدد شارژ و تخلیه حفظ می‌کنند [۲۴]. دوام این



شکل ۶ چگالی توان و ظرفیت ویژه انرژی ذخایر مختلف انرژی [۲۱].

الکترودها در شرایط عملیاتی متنوع، به‌عنوان یکی از محوری‌ترین جنبه‌های تحقیقات اخیر مورد توجه قرار گرفته است. این امر به‌دلیل ضرورت حفظ عملکرد پایدار در طول زمان برای کاربردهای عملی و مؤثر، اهمیت ویژه‌ای یافته است.

یکی دیگر از چالش‌های مهم، پایداری چرخه‌ای چندسازه‌های برپایه PTh است. افزایش ویژگی‌هایی مانند پایداری مکانیکی، رسانایی الکتریکی و فرایندپذیری نقشی حیاتی در غلبه بر چالش‌های مرتبط با تنش‌های مکانیکی دارند. در حالی‌که برخی از چندسازه‌های خاص PTh عملکرد الکتروشیمیایی مطلوبی از خود نشان می‌دهند، حفظ این پایداری در چرخه‌های تکرارشونده همچنان هدفی اساسی محسوب می‌شود.

تحقیقات اخیر

تحقیقات اخیر در زمینه ابرخازن‌ها، اهمیت PTh و چندسازه‌های آن را در ترکیب با مواد کربنی گوناگون برجسته کرده است. از عوامل مهم در توسعه فناوری ابرخازن‌ها، طراحی نوین مواد الکترودی است، به‌ویژه ترکیب PTh با مواد مبتنی بر کربن که بهبود عملکرد الکتروشیمیایی و پایداری چرخه‌ای را ممکن می‌سازد [۲۵].

تحقیقات کنونی بر رفع محدودیت‌های PTh و بهبود کاربردهای آن در راه‌حل‌های ذخیره‌سازی انرژی متمرکز است. نوآوری در روش‌های سنتز و طراحی چندسازه‌های جدید، با هدف ارتقای عملکرد الکتروشیمیایی و افزایش پایداری ابرخازن‌های بر پایه PTh، به پیش می‌رود. این تلاش‌ها همگام با رشد تقاضا برای سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی کارآمد، در چشم‌انداز فناوری که به‌سرعت در حال تحول است، نقش بسزایی ایفا می‌کند [۲۶].

پلی‌آنیلین

پلی‌آنیلین یکی از پلیمرهای رسانای برجسته‌ای است که به‌دلیل ویژگی‌های استثنایی الکتروشیمیایی و تطبیق‌پذیری خود، به‌ویژه در حوزه ذخیره‌سازی انرژی، شهرت یافته است. با هدایت الکتریکی بالا و رفتار برگشت‌پذیر در فرایندهای اکسایش و کاهش، PANI به‌عنوان ماده‌ای کلیدی، به‌ویژه برای کاربردهایی که نیاز به شارژ و تخلیه سریع در چرخه‌های مکرر دارند در توسعه ابرخازن‌ها مطرح شده است. ویژگی‌های ساختاری منحصربه‌فرد آن، امکان حفظ پایداری و رسانایی را فراهم می‌کند. علاوه بر این، مزایای زیست‌محیطی ناشی از روش‌های سنتز سازگار با محیط‌زیست و تولید کم‌هزینه، آن را به گزینه‌ای جذاب برای دستگاه‌های ذخیره‌سازی انرژی نسل بعدی تبدیل کرده است.

تحقیقات نشان می‌دهد که ابرخازن‌های بر پایه PANI می‌توانند به ظرفیت خازنی ویژه قابل‌توجهی دست یابند. طبق گزارش‌ها، این مقدار تا Fg^{-1} ۹۴۰ برآورد شده است. این عملکرد عمدتاً به‌دلیل نانوساختار متخلخل PANI است که انتقال یون و ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی را به حداکثر می‌رساند [۲۷]. اختلاط PANI با مواد دیگر، همچون اکسیدهای فلزات واسطه و چندسازه‌های بر پایه کربن، موجب افزایش پایداری چرخه‌ای و بهبود عملکرد الکتروشیمیایی آن شده است. این ویژگی باعث شده است که چندسازه‌های PANI به‌عنوان گزینه‌ای برتر و جایگزینی مناسب برای مواد الکترودی رایج مورد توجه قرار گیرند [۲۸]. با این حال، علی‌رغم این پیشرفت‌ها، همچنان چالش‌هایی در زمینه پایداری زیست‌محیطی و ثبات چرخه‌ای PANI باقی مانده است. این مسائل می‌توانند عملکرد بلندمدت آن را در کاربردهای عملی تحت تأثیر قرار دهند و موجب محدودیت‌هایی در استفاده گسترده از این ماده شوند.

بحث‌های پیرامون PANI شامل نگرانی‌هایی درباره‌ی اثرات زیست‌محیطی فرآیندهای تولید آن است، به‌ویژه تولید مواد شیمیایی خطرناک و ترکیبات آلی فرّار که در طول سنتز به وجود می‌آیند . در نتیجه، تلاش برای توسعه مسیرهای سنتز سبزتر، مانند استفاده از حلال‌های زیستی و روش‌های بدون حلال، افزایش یافته است. این روند نشان‌دهنده‌ی گرایش گسترده‌تری به سوی شیوه‌های پایدار در صنعت پلیمرهای رسانا است. متعادل‌سازی عملکرد با مسئولیت زیست‌محیطی همچنان یکی از اولویت‌های اصلی برای پژوهشگران و تولیدکنندگان است و بر اهمیت PANI در چشم‌انداز تحول فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی تأکید دارد.

بررسی مداوم پتانسیل PANI نه‌تنها بر اهمیت آن در پیشرفت فناوری ابرخازن‌ها تأکید دارد، بلکه نقش این ماده را در مواجهه با چالش‌های جهانی انرژی از طریق راه‌حل‌های نوآورانه برجسته می‌سازد. با پیشرفت تحقیقات، ترکیبی از بهبود عملکرد الکتروشیمیایی، فن‌های تولید پایدار و توسعه چندسازه‌های جدید، موقعیت PANI را به‌عنوان ماده‌ای پیشرو در آینده ذخیره‌سازی انرژی تقویت می‌کند.

کاربرد پلی‌آنیلین در ابرخازن‌ها

پلی‌آنیلین به‌دلیل خواص استثنایی خود، از جمله هدایت الکتریکی بالا، پایداری محیطی و سهولت سنتز، به‌عنوان ماده‌ای امیدوارکننده برای کاربردهای ابرخازن مطرح شده است. ماهیت همه‌کاره PANI امکان استفاده از آن را در پیکربندی‌های مختلف و فرمول‌های چندسازه‌ها برای افزایش عملکرد دستگاه‌های ذخیره انرژی فراهم می‌کند.

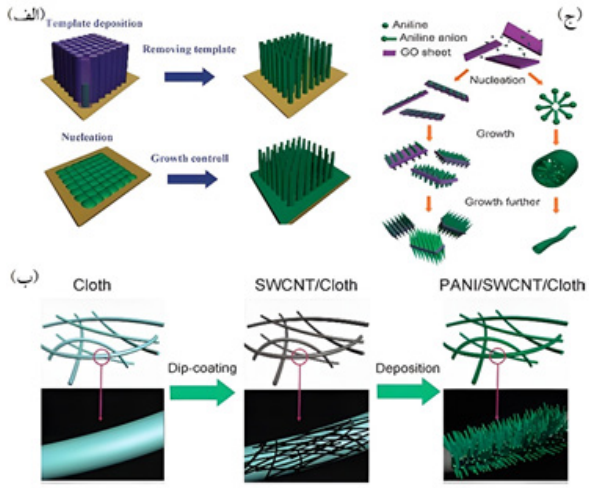
فن‌های سنتز

سنتز PANI معمولاً از روش‌های مقرون‌به‌صرفه‌ی بسپارش شیمیایی یا الکتروشیمیایی بهره می‌برد که تضمین می‌کند مواد هدایت الکتریکی و پایداری خود را حفظ کنند. این ویژگی‌ها برای کاربردهای عملی در شیمی حسگرها و ابرخازن‌ها حیاتی هستند، جایی که تکرارپذیری و قابلیت اطمینان از اهمیت بالایی برخوردارند [۲۸]. پیشرفت‌های اخیر به‌طور چشمگیری بر ترکیب موادی همچون کربن فعال در چندسازه‌های PANI تمرکز داشته و این پیشرفت‌ها باعث افزایش سطح ویژه و چگالی انرژی محصول نهایی شده است.

بسپارش PANI می‌تواند از طریق روش‌های شیمیایی یا الکتروشیمیایی انجام شده و منجر به تولید نانوساختارهایی با مورفولوژی و ساختارهای کاملاً قابل‌کنترل شود. این نانوساختارها شامل انواع مختلفی مانند نانوذرات، نانوالیاف، نانولوله‌ها، نانوصفحات و حتی آرایه‌هایی از نانوساختارها می‌شوند که نمونه‌هایی از آن‌ها در شکل ۷ قابل مشاهده است.

ابرخازن‌های نسل بعد

استفاده از PANI در ابرخازن‌های نسل آینده، به‌طور گسترده‌ای مورد توجه و بررسی قرار گرفته است. تحقیقات اخیر، پتانسیل ترکیب PANI با مواد رسانای دیگر نظیر نانولوله‌های کربنی (Carbon Nanotube) را برجسته‌تر کرده است؛ ترکیباتی که



شکل ۷ PANI با استفاده از روش‌های متنوعی سنتز می‌شود. (الف) رسوب قالب و هسته آرایه‌های نانوسیم PANI. (ب) نانوسیم‌های PANI که روی بستر کربنی رشد کردند. (ج) آرایه‌های نانوسیم PANI که روی بستر اکسیدگرافن رشد کرده‌اند [۷].

نه‌تنها عملکرد الکتروشیمیایی را بهبود می‌بخشند، بلکه ظرفیت‌های ذخیره‌سازی انرژی را نیز ارتقا می‌دهند. این نوآوری‌ها مسیر را برای توسعه فناوری‌های ابرخازن کارآمدتر و انعطاف‌پذیرتر هموار می‌کند [۸]. تحقیقات و توسعه مستمر در این حوزه بر اهمیت نقش پلیمر PANI در تکامل روندهای نوآور ذخیره‌سازی انرژی تأکید دارد.

ارزیابی عملکرد

عملکرد الکترود برپایه PANI در ابرخازن‌ها، به‌دلیل خواص برجسته الکتروشیمیایی، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. به‌طور قابل‌توجهی، مشخص شده است استفاده از نیتروژن، عملکرد الکتروشیمیایی دستگاه‌های ذخیره‌سازی انرژی را افزایش داده و از اثر هم‌افزایی بهره می‌برد که منجر به بهبود ظرفیت و پایداری چرخه این دستگاه‌ها می‌شود [۲۹].

پایداری و انعطاف‌پذیری

چندسازه‌های بر پایه PANI پایداری قابل‌توجهی از خود نشان می‌دهند. مطالعه‌ای نشان داده است که حفظ ۸۷/۴٪ ظرفیت پس از ۵۰۰۰ چرخه در چگالی جریان $5\ Ag^{-1}$، بهبود ۴۴٪ در مقایسه با PANI خالص را نشان می‌دهد. این موضوع پتانسیل نانوچندسازه‌های PANI را برای حفظ عملکرد در استفاده‌های بلندمدت نشان می‌دهد که عاملی حیاتی برای کاربردهای عملی در حوزه ذخیره‌سازی انرژی محسوب می‌شود.

علاوه بر عملکرد الکتروشیمیایی قابل‌توجه، چندسازه‌های PANI به‌دلیل مقرون‌به‌صرفه بودن و انعطاف‌پذیری که در مقایسه با چندسازه‌های الیاف کربن سنتی دارند، شناخته می‌شوند. هرچند ممکن است مقاومت مکانیکی یکسانی نداشته باشند، اما رسانایی الکتریکی برتر و سهولت فرآوری آن‌ها، این مواد را برای کاربردهای گوناگون بسیار جذاب کرده است.

پایداری چرخه‌ای

پایداری چرخه‌ای یکی از محدودیت‌های اساسی این پلیمر محسوب می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد که اگرچه PANI بهبودهای چشمگیری را در پایداری چرخه‌ای مانند افزایش قابل توجه از ۴۳/۴٪ به ۸۷/۴٪ پس از چندین دوره زمانی در ترکیب با نانوذرات خاص نشان می‌دهد، اما این عملکرد همچنان ممکن است در شرایط عملیاتی متفاوت ناسازگار باقی بماند [۳۰]. این نقطه ضعف نیاز به فرمول‌بندی جدید یا استفاده از افزودنی‌های قدرتمندتر برای افزایش پایداری در استفاده‌های بلندمدت دارد.

نتیجه‌گیری

پیشرفت‌های چشمگیری در زمینه توسعه ابرخازن‌های انعطاف‌پذیر بر پایه پلیمرها مشاهده شده است. این ابرخازن‌ها به‌دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فردی مانند انعطاف‌پذیری بالا، پایداری شیمیایی و ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی مناسب، جایگاه ویژه‌ای در کاربردهای الکترونیکی پوشیدنی و سایر فناوری‌های نوین پیدا کرده‌اند. استفاده از پلیمرهای رسانا مانند PANI،PPy و PTh به‌طور خاص باعث افزایش عملکرد این دستگاه‌ها شده و ترکیب این پلیمرها با نانوذرات کربنی به بهبود پایداری و ظرفیت ویژه خازنی ابرخازن‌ها کمک کرده است.

با این حال، ابرخازن‌های بر پایه پلیمر هنوز با چالش‌هایی همچون محدودیت‌های پایداری چرخه‌ای و رسانایی مواجه هستند که ضرورت تحقیقات بیشتر در زمینه مواد نوآورانه و بهینه‌سازی ساختارهای آن‌ها را برجسته می‌کند. در این راستا، ترکیب پلیمرهای رسانا با مواد هیبریدی مانند rGO و CNT نشان داده که می‌تواند به شکل قابل‌توجهی عملکرد این ابرخازن‌ها را ارتقا دهد.

در نهایت، تحقیقات مستمر در این زمینه می‌تواند به پیشرفت نسل تازه‌ای از ابرخازن‌های انعطاف‌پذیر منجر شود که به‌طور مؤثر نیازهای فزاینده کاربردهای الکترونیکی و ذخیره‌سازی انرژی آینده را پاسخ دهد.

این فناوری‌ها همچنین می‌توانند در زمینه‌هایی همچون خودروهای الکتریکی، سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر و فناوری‌های شهرهای هوشمند نقش مؤثری ایفا کنند و پتانسیل بالایی برای بهبود کارایی ذخیره‌سازی انرژی در سطح جهانی ارایه دهند.

مراجع

1. Lakra, R.; Kumar, R.; Sahoo, P. K.; Thatoi, D.; Soam, A. A Mini-Review: Graphene Based Composites for Supercapacitor Application. *Inorganic Chemistry Communications* 133, 108929, **2021**.
2. Manafi, P.; Nazockdast, H.; Karimi, M.; Sadighi, M.; Magagnin, L. A Study on the Microstructural Development of Gel Polymer Electrolytes and Different Imidazolium-Based Ionic Liquids for Dye-Sensitized Solar Cells. *Journal of Power Sources* 481, 228622, **2021**.
3. Manafi, P.; Nazockdast, H.; Karimi, M.; Sadighi, M.; Magagnin, L. Microstructural Development and Rheological Study of a Nanocomposite Gel Polymer Electrolyte Based on Functionalized Graphene for Dye-Sensitized Solar Cells. *Polymers* 12, 1443, **2020**.
4. Cui, J.; Xing, F.-F.; Luo, H.; Qin, J.-Q.; Li, Y.; Zhong, Y.; Wei, F.; Fu, J.; Jing, C.; Cheng, J. General Synthesis of Hollow Mesoporous Conducting Polymers by Dual-Colloid Interface Co-Assembly for High-Energy-Density Micro-Supercapacitors. Jo*urnal of Energy Chemistry* 62, 145-152, **2021**.
5. AbdelHamid, A. A.; Elgamouz, A.; Kawde, A.-N. Enhanced Supercapacitor Performance of Polypyrrole-Coated Graphenized Electrode by Tuning Electrodeposition Technique. *Arabian Journal for Science and Engineering* 49, 9175-9192, **2024**.
6. Wang, Z.; Zhu, M.; Pei, Z.; Xue, Q.; Li, H.; Huang, Y.; Zhi, C. Polymers for Supercapacitors: Boosting the Development of the Flexible and Wearable Energy Storage. *Materials Science and Engineering: R: Reports* 139, 100520, **2020**.
7. Zhong, M.; Zhang, M.; Li, X. Carbon Nanomaterials and Their Composites for Supercapacitors. *Carbon Energy* 4, 950-985, **2022**.
8. Oladele, I.; Adelani, S.; Taiwo, A.; Akinbamiyorin, I.; Olanrewaju, O.; Orisawayi, A. Polymer-Based Nanocomposites for Supercapacitor Applications: A Review on Principles, Production and Products. *RSC Advances* 15, 7509-7534, 2025.
9. Hao, L.; Yu, D. Progress of Conductive Polypyrrole Nanocomposites. Synthetic Metals 290, 117138, **2022**.
10. Rus, Y. B.; Galmiche, L.; Audebert, P.; Miomandre, F. Influence of the Electrolytic Medium on the Performance and Stability of Functionalized Graphene-Polypyrrole Nanocomposites as Materials for Supercapacitors. *Synthetic Metals* 254, 22-28, **2019**.
11. Teng, W.; Zhou, Q.; Lv, G.; Hu, P.; Du, Y.; Li, H.; Hu, Y.; Liu, W.; Wang, J. Hierarchical Poly (3, 4-Ethylenedioxythiophene): Poly (Styrenesulfonate)/Reduced Graphene Oxide/ Polypyrrole Hybrid Electrode with Excellent Rate Capability and Cycling Stability for Fiber-Shaped Supercapacitor. *Journal of Colloid and Interface Science* 636, 245-254, **2023**.
12.Moyseowicz, A.; Minta, D.; Gryglewicz, G. Conductive Polymer/Graphene-Based Composites for Next Generation Energy Storage and Sensing Applications. *Chemelectrochem: E*202201145. **2023**.
13. Tamang, S.; Rai, S.; Bhujel, R.; Bhattacharyya, N. K.; Swain, B. P.; Biswas, J. A Concise Review on Go, Rgo and Metal Oxide/Rgo Composites: Fabrication and Their Supercapacitor and Catalytic Applications. *Journal of Alloys and Compounds* 947, 169588, **2023**.
14. Bonastre, J.; Molina, J.; Cases, F. Surface Modification of Jute Fabrics by Reduced Graphene Oxide-Conducting Polymer Coatings for Their Application in Low-Cost and Eco-Friendly Supercapacitors. *Journal of Energy Storage* 69, 107936, 2023.
15. Abdillah, O. B.; Rus, Y. B.; Ulfa, M.; Iskandar, F. Recent Progress on Reduced Graphene Oxide and Polypyrrole Composites for High Performance Supercapacitors: A Review. *Journal of Energy Storage* 74, 109300, **2023**.
16. Minisy, I. M.; Gupta, S.; Taboubi, O.; Acharya, U.; Bober, P. Polypyrrole/Tungsten Carbide Nanocomposites for Electrochemical Applications. *ACS Applied Polymer Materials* 6, 8244-8253, **2024**.
17. Yadav, R.; Saini, A.; Choudhary, J.; Sardana, S.; Ohlan, A.; Singh, K.; Singh, S. P. High-Performance Flexible Supercapacitor Based on Morphology Tuned Polypyrrole/Molybdenum Disulfide Nanocomposites. *Energy Storage* 5, e477, **2023**.
18. Czagany, M.; Hompoth, S.; Keshri, A. K.; Pandit, N.; Galambos, I.; Gacsi, Z.; Baumli, P. Supercapacitors: An Efficient Way for Energy Storage Application. *Materials* 17, 702, **2024**.
19. Hong, R.; Zhao, X.; Lu, R.; You, M.; Chen, X.; Yang, X. Fabrication of Polypyrrole Hollow Nanospheres by Hard-Template Method for Supercapacitor Electrode Material. *Molecules* 29, 2331, **2024**.
20. Yazar, S.; Arvas, M. B.; Gürkan, K. Synthesis of Polythiophene with Zigzag Morphology on Pencil Graphite Electrode and Investigation of Energy Storage Properties in Supercapacitors. *Journal of Materials Science* 59, 10936-10952, **2024**.
21. Tadesse, M. G.; Ahmmed, A. S.; Lübben, J. F. Review on Conductive Polymer Composites for Supercapacitor Applications. *Journal of Composites Science* 8, 53, **2024**.
22. Ionescu, D.; Kovaci, M. Prediction of the Specific Energy of Supercapacitors with Polymeric Materials Using Advanced Molecular Dynamics Simulations. *Polymers* 16, 3404, **2024**.

23. Zschiebsch, W.; Sturm, Y.; Kucher, M.; Hedayati, D. P.; Behnisch, T.; Modler, N.; Böhm, R. Multifunctionality Analysis of Structural Supercapacitors—a Review. *Materials* 17, 739, **2024**.
24. Tawade, A. K.; Tayade, S. N.; Dubal, D. P.; Mali, S. S.; Hong, C. K.; Sharma, K. K. K. Enhanced Supercapacitor Performance through Synergistic Electrode Design: Reduced Graphene Oxide-Polythiophene (Rgo-Pts) Nanocomposite. *Chemical Engineering Journal* 492, 151843, **2024**.
25. Kamali, A. K.; Glogic, E.; Keppetipola, N. M.; Sonnemann, G.; Toupance, T.; Cojocaru, L. Prospective Life Cycle Assessment of Two Supercapacitor Architectures. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 11, 15898-15909, **2023**.
26. Saadati pour, M.; Delyanee, M.; Pedram, M. Z. Innovative Synthesis and Advancement Strategies for Gcn as Supercapacitor Electrodes: A Comprehensive Review Revealing New Insights. *ACS Applied Energy Materials* **2025**.
27. Galloni, M. G.; Della Pina, C.; Bortolotto, V.; Nikonova, V.; Falletta, E.; Bianchi, C. L. Highly Porous Polyaniline (Pani): A Novel Green Catalytic Method for Morphology Control. *Journal of Materials Science* 1-26, **2025**.
28. Giri, H.; Dowell, T. J.; Almtiri, M.; Scott, C. N. Polyaniline Derivatives and Their Applications. In Trends and Developments in Modern Applications of Polyaniline, *IntechOpen*, **2023**.
29. Ayalew, M. Y.; Bekele, E. A.; Melak, F.; Wangatia, L. M.; Femi, O. E.; Wubieneh, T. A.; Assegie, A. A.; Ashebir, G. Y.; Ayele, D. W.; Worku, A. K. Synthesis of Polyaniline Nanomaterials for an Effective Supercapacitor Applications. *Materials Research Express* 11, 125303, **2024**.
30. Qin, X.; Wan, J.; Zhang, Q.; Zhang, Y.; Yu, H.; Shi, S. Polyaniline-Modified Graphitic Carbon Nitride as Electrode Materials for High-Performance Supercapacitors. *Carbon Letters* 33, 781-790, **2023**.