

باتری‌های آلومینیومی مبتنی بر فیلم سه بعدی گرافن و نانو اسکرول‌های کربنی

مهشید گلستانه

گروه شیمی، دانشگاه فرهنگیان، تهران

چکیده

در این مقاله پیشرفت‌های اخیر در سنتز مواد کاتدی مناسب جهت استفاده در باتری‌های قابل شارژ آلومینیومی بررسی شده است. دو نوع باتری آلومینیومی که طی دو سال اخیر توسعه داده شده‌اند به تفصیل بررسی شده است. مورد اول کاتد فیلم سه بعدی گرافن است که دارای کیفیت بالا، جهت گیری مناسب و توانایی زیاد در ایجاد کانال و ماتریکس هدایت الکترونی پیوسته، شاهراه نفوذ یونی پیوسته و جرم الکترواکتیو برای کل الکتروود است. باتری دوم بر اساس ساخت درجای نانو اسکرول‌های کربنی ویژه‌ای که به عنوان کاتد برای باتری آلومینیومی بکار می‌روند، بنا شده است. ساختارهای مارپیچ توسط چند لایه گرافنی که درون اسکرول کربنی توخالی، پیچ و تاب خورده‌اند، ایجاد می‌شود که دارای کانال‌های انتقال الکترونی سریع، قابلیت عالی ذخیره‌سازی آیون و توانایی فوق العاده برای انطباق با افزایش زیاد حجم در طول پروسه چرخه‌زنی است. هر دو باتری در محدوده دمایی وسیعی عملکرد قابل قبولی دارد. این ویژگی‌ها برای استفاده در سیستم‌های ذخیره انرژی، بسیار امیدوار کننده است.

واژه‌های کلیدی: باتری آلومینیومی، نانو اسکرول کربن، کاتد، گرافن، قابل شارژ

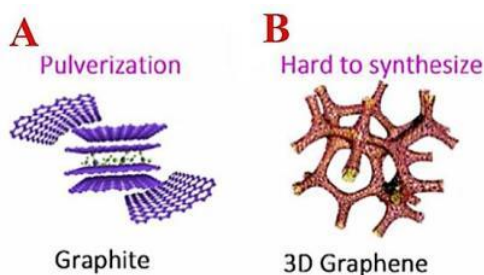
ایمیل نویسنده مسئول: m.golestaneh@cfu.ac.ir

۱- مقدمه

سومین عنصر فراوان در پوسته زمین است و واکنش‌پذیری کمی دارد و در دسترس‌تر از لیتیم است [۱۰]. هم‌چنین آلومینیوم فلزی عملکرد ایمنی بالایی دارد زیرا گالوانیزه کردن آلومینیوم در مایعات یونی، سریع، یکنواخت و بدون دندریت است [۱۱] و از سوی دیگر اشتعال پذیری اندکی دارد. نقش آلومینیوم فلزی در سیستم‌های ذخیره انرژی به قرن نوزدهم می‌رسد، اما اولین باتری آلومینیومی در سال ۱۹۷۳ توسط هولک و گینر^۱ گزارش شده است، که از کاتد کلر در برابر آند فلز آلومینیوم در الکترولیت نمک مذاب اتوکتیک شامل AlCl_3 ، KCl و NaCl استفاده کردند [۱۰]. با این حال، پیشرفت باتری‌های آلومینیومی در طول ۳۰ سال گذشته به دلیل عدم وجود الکترولیت یا مواد کاتدی مناسب، زیاد نبوده است [۱۲]. مواد کاتدی که برای این باتری‌ها گزارش شده است، رضایتبخش نیستند و از بسیاری از مشکلات ذاتی رنج می‌برند، مانند (a) رفتار خازنی بدون فلات ولتاژ و دشارژ (۱/۱) تا ۰/۲ V یا ۱/۸ تا ۰/۸ V)، (b) ولتاژ دشارژ بسیار کم (کمتر از ۰/۵۵ V)، (c) برگشت‌پذیری ضعیف که منجر به کارایی کولومبی پایین می‌شود، (d) ظرفیت‌های دشارژ پایین و ناپایدار همراه با کاهش شدید پس از چند سیکل (۸۵ - ۲۶٪ بالای ۱۰۰ سیکل)، عمر چرخه محدود (۱۰۰~ سیکل)، تخریب ساختار و انبساط حجمی به علت ورود حجم زیاد موادی که وارد می‌شود. همه این مسائل موجب عملکرد ضعیف الکتروشیمیایی مواد کاتدی موجود و محدودیت تجاری‌سازی باتری‌های آلومینیومی شده

در چند دهه گذشته، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه توسعه سیستم‌های تولید و ذخیره انرژی تجدید پذیر انجام شده است. انرژی خورشیدی، باد و دیگر فناوری‌های تجدید پذیر انرژی در حال حاضر به خوبی توسعه یافته است، اما همه این فناوری‌ها تناوبی هستند و برای تعادل بین دوره‌های تولید بیش از حد و تقاضا نیاز به سیستم‌های ذخیره انرژی مانند باتری‌ها و ابررایانه‌ها دارند. متأسفانه، کمتر از یک درصد انرژی کل تولید شده از منابع انرژی تجدیدپذیر، می‌تواند ذخیره شود. به همین دلیل سیستم‌های مختلف دارای باتری‌های قابل شارژ (از جمله باتری‌های Li-Ion [1,2]، باتری‌های Li-S [3] و باتری‌های Li-air [4] توجه بسیاری به این مقوله از خود نشان داده‌اند. با توجه به کمبود منابع لیتیم، گران بودن و نگرانی‌های امنیتی، در حال حاضر تمرکز تحقیقات بر روی سیستم‌های ذخیره انرژی کم هزینه‌تر، ایمن‌تر، همراه با دانسیته انرژی زیاد، فراوانی، سهولت دستیابی و سیستم‌های ذخیره انرژی سازگار با محیط قرار گرفته است و باعث توسعه تکنولوژی باتری‌های قابل شارژی شده است که بر اساس فلزات دارای فراوانی زیاد مانند Na [5, 6]، Mg [7] و Al [8] بنا شده‌اند. از میان این باتری‌ها، باتری‌های آلومینیومی برای ذخیره انرژی الکتریکی ایده‌آل هستند زیرا آلومینیم به عنوان یک فلز سه ظرفیتی، در طی واکنش ردوکس سه الکترون مبادله می‌کند، از این رو ظرفیت حجمی آن (mAh cm^{-3}) تقریباً ۴ برابر ظرفیت حجمی باتری‌های لیتیمی تک والانس (mAh cm^{-3}) (۲۰۶۲) و ۲ برابر باتری‌های منیزیم دو والانس (mAh cm^{-3}) (۳۸۳۳) است [۹]. علاوه بر این، آلومینیوم

آنیون‌های $AlCl_4^-$ و $Al_2Cl_7^-$ بدست آمد، اما گران بودن تولید این مواد در مقیاس صنعتی مانع از تجاری‌سازی آن می‌شود [۱۶]. به همین دلیل تلاش‌های زیادی در حال انجام است تا بتوانند مواد کاتدی را در مقیاس وسیع برای باتری‌های آلومینیومی سنتز کنند که هم آماده‌سازی آن آسان باشد و هم انرژی اندکی مصرف کند. در ادامه دو مورد از جدیدترین مواد کاتدی که برای باتری‌های آلومینیومی بکار رفته است به همراه بررسی عملکرد و مقایسه آن‌ها آورده شده است. اولین مورد، طراحی $3H_3C$ توسط گائو^۱ و همکاران برای دستیابی به یک فیلم کاتد ایده‌آل گرافن (GF-HC) با عملکرد الکتروشیمیایی عالی است. باتری گرافن-آلومینیوم طراحی شده، عمر چرخه بسیار طولانی (۹۱٫۷٪ باقی مانده پس از ۲۵۰٫۰۰۰ سیکل)، سرعت فوق‌العاده (111 mAh g^{-1} در 400 A g^{-1})، محدوده دمای عملیاتی گسترده (۴۰- تا 120°C) به همراه انعطاف پذیری منحصراً به فرد و اشتعال پذیری ناچیزی را از خود نشان داد [۱۳].



شکل ۱: نمودار شماتیک تغییر ساختاری گرافیت کروی پس از ورود آنیون (A)؛ نمودار شماتیک گرافن سه بعدی (B) [۱۷].

عملکرد الکتروشیمیایی کاتد GF-HC

با توجه به طراحی کاملاً انعطاف پذیر، کاتد GF-HC عملکرد الکتروشیمیایی بی‌نظیری را نشان می‌دهد. در یک دانسیته زیاد جریان معادل 6 A g^{-1} (شارژ در ۷۲ ثانیه؛ شکل 2A)، کاتد GF-HC ظرفیت ویژه‌ای معادل 120 mAh g^{-1} همراه با بازده کولومی بالاتر از ۹۸٪ را فراهم می‌کند و پس از ۱۶۰۰۰ سیکل، ۱۰۰٪ ظرفیت کاتدی حفظ می‌شود. منحنی شارژ / دشارژ در طول این چرخه‌ها تقریباً همپوشانی دارد، که نشان‌دهنده برگشت پذیری بسیار عالی کاتد GF-HC است (شکل 2B). بر این اساس، کاتد GF-HC رکوردهای عملکرد الکتروشیمیایی را در بین تمام کاتدهای گرافن ساخته شده برای باتری‌های آلومینیومی تا زمان معرفی آن را پشت سر گذاشته است. ظرفیت دشارژ ویژه ثابت، راندمان کولومی بالا ($> 97\%$)، متوسط ولتاژ دشارژ پایدار و پسماند مغناطیسی کم در گستره وسیعی از دانسیته‌های جریان از جمله مزایای بی‌نظیر این سیستم است. کاتد GF-HC یک ظرفیت برگشت پذیر بالای 111 mAh g^{-1} در دانسیته جریان بسیار بالا 400 A g^{-1} با فلات شارژ / دشارژ واضح از خود نشان می‌دهد. کاتد GF-HC

است [۱۰]. در طول یک دهه گذشته انواع مختلفی از مواد کاتدی برای استفاده در باتری‌های آلومینیومی معرفی شده و مورد ارزیابی گرفته است. آن چه مسلم است این است که توسعه سیستمی کارآمد و با هزینه کم، به منظور پاسخگویی به نیازهای ذخیره انرژی آینده در جامعه مدرن امروزی، ضروری است و پیدا کردن یک طراحی جدید جهت ارتقاء عملکرد کاتد باتری‌های آلومینیومی از اهمیت حیاتی برخوردار است.

به منظور دستیابی به باتری‌های آلومینیومی با هزینه کم و دانسیته انرژی بالا، مواد کاتدی بالقوه نباید تحت هیچ واکنش جانبی با الکترولیت‌ها و یا سایر اجزای باتری قرار گیرند. علاوه بر این، باید از نظر مکانیکی قوی باشند تا مورفولوژی و ساختار آن در طول ورود / خروج آنیون‌های بزرگ $[AlxCl_y]$ حفظ گردد [۱۰]. از بین مواد کاتدی معرفی شده، مواد کربنی از اهمیت و جایگاه ویژه‌ای برخوردار هستند و مورد توجه بسیاری از محققان در سرتاسر دنیا قرار گرفته‌اند.

برای کاتد مبتنی بر کربن، چهار الزام اولیه باید بطور همزمان وجود داشته باشد (i): شبکه گرافن بسیار کریستالی بدون نقص به عنوان یک سایت فعال ورود آنیونی که موجب ظرفیت بالای ذخیره‌سازی انرژی موجود شود؛ (ii) ماتریس هدایت الکترونی پیوسته برای انتقال جریان بزرگ و کاهش قطبش داخلی؛ (iii) مقاومت مکانیکی بالا جهت جلوگیری از ریزش یا تجزیه مواد در طی ورود و خروج مکرر آنیون‌ها؛ و (iv) کانال‌های به هم متصل جهت تسهیل نفوذپذیری بالای الکترولیت، انتشار یون، واکنش ردوکس سریع بین الکترولیت و مواد فعال. مطالعات قبلی نشان داده است که فوم‌های گرافیتی / گرافن و گرافیت طبیعی متراکم می‌توانند عملکرد کاتالیستی باتری آلومینیومی را به نحو مطلوبی افزایش دهند، هرچند که چرخه عمر و سرعت آن‌ها عمدتاً محدود است که سبب عملکرد ناکافی سلول در مقایسه با ابرایانه‌ها می‌شود [۱۳]. در ادامه چند دسته ماده کاتدی برپایه گرافیت و گرافن معرفی می‌شود که بر مشکلات اشاره شده در بالا غلبه می‌کند و بسیار نوید بخش است.

در سال ۲۰۱۶ رویکرد جالبی توسط دای^۱ و همکاران توصیف شد که در آن با استفاده از ساختار لایه‌ای منظم و وسیع گرافیت، از آن به عنوان ماده کاتد برای ذخیره‌سازی آنیون، استفاده شده بود [۱۴]. با این حال، همان‌طور که در شکل 1A نشان داده شده است، گرافیت تجاری، اگر به عنوان کاتد بکار رود، ولتاژ عملیاتی بالایی را ایجاد می‌کند که پس از قرار دادن آنیون در شبکه، گسترش می‌یابد و باعث پودر شدن آن و در نتیجه تضعیف پایداری چرخه‌زنی و کاهش برگشت‌پذیری می‌شود [۱۵]. با استفاده از گرافن سه بعدی تهیه شده توسط رسوب‌دهی بخار شیمیایی^۲ (شکل 1B) تلاش‌های قابل توجهی برای حل این مشکل انجام شد که به علت هدایت الکترونیکی عالی گرافن سه بعدی، نتایج امیدوار کننده‌ای برای ذخیره‌سازی

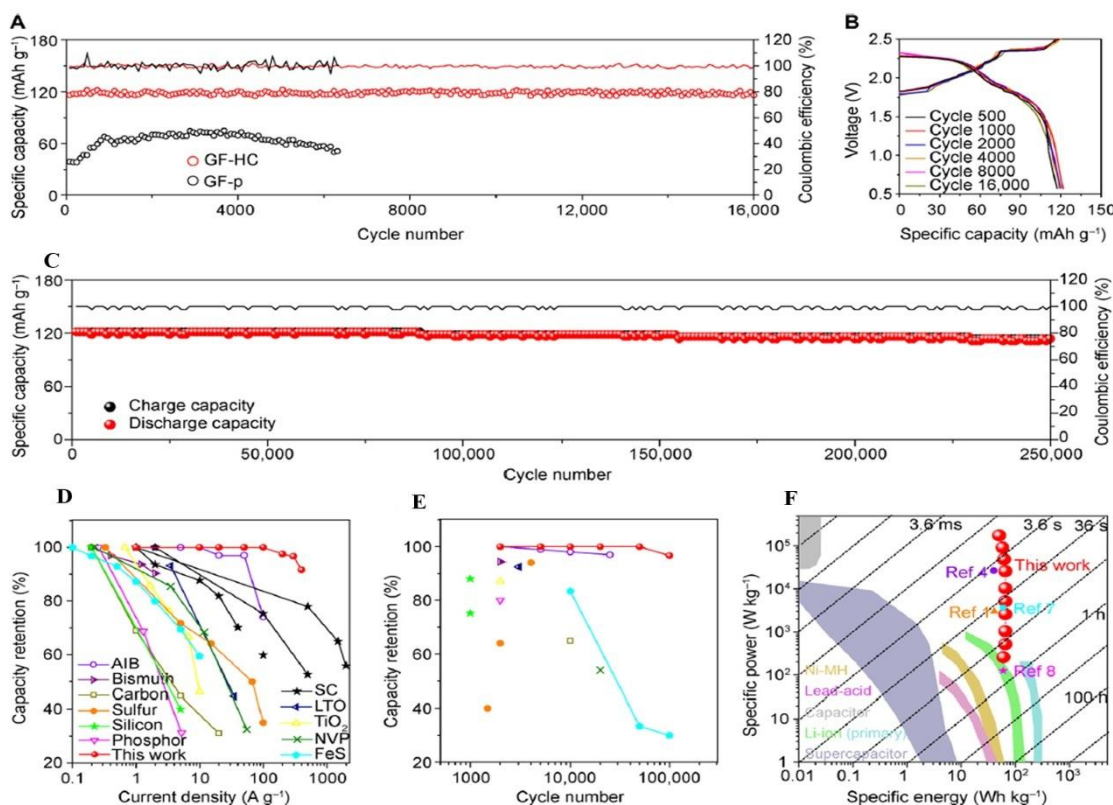
نتایج نشان داد که Al-GB عملکرد بسیار خوبی در دمای بالا و دمای پایین از خود نشان می‌دهد (شکل 3A). به عبارت دیگر یک باتری "تمام آب و هوایی" است. کاتد GF-HC در دمای 60°C همان ظرفیت ویژه و کارایی کولومبی را دارد که در دمای 25°C از خود نشان می‌دهد.

با افزایش دما به 80°C و یا 100°C ، ضمن دستیابی به ظرفیت دشوارر پایدار ($115 < \text{mAh g}^{-1}$)، کاهش در کارایی کولومبی مشاهده می‌گردد. برای کاهش تجربه الکترولیت و افزایش کارایی کولومبی، یک استراتژی بهینه‌سازی ولتاژ قطع جریان برای بهبود ثبات چرخه‌زنی مورد استفاده قرار گرفت. با بهینه‌سازی ولتاژ قطع جریان شارژ در $2/44\text{V}$ در دمای 80°C ، کاهش ناچیزی در ظرفیت‌های ویژه کاتد GF-HC از 119 به 117mAh g^{-1} و افزایش قابل توجهی در کارایی کولومبی (از 53 به 90 درصد) مشاهده گردید. این ظرفیت پس از 12000 سیکل با بازده کولومبی بالاتر از 97% حفظ می‌شود (شکل 3B). استراتژی بهینه‌سازی قطع جریان در دماهای بالاتر (تا 120°C) هم معتبر است بطوری که در 100°C ، 45000 سیکل پایدار حاصل شد [۱۳].

عمر چرخه‌زنی فوق‌العاده با سرعت بسیار بالا دارد (برای مثال 100A g^{-1}): 116mAh g^{-1} پس از 100000 سیکل، و 111 پس از 250000 سیکل (شکل 2C) که بسیار بیشتر از باتری‌های قبلی است. این اجزای الکتروشیمیایی عالی، به ویژه توانایی بالا و عمر طولانی سیگنال (شکل 2، D و E)، نوید یک نسل جدید از سیستم‌های ذخیره انرژی (شکل 2F) را می‌دهد که می‌تواند دانسیته انرژی پایدار و ثابتی را ایجاد نماید (دانسیته انرژی 66Wh kg^{-1} با بالاترین دانسیته توان 175KW kg^{-1}) [۱۳].

محدوده دمایی وسیع

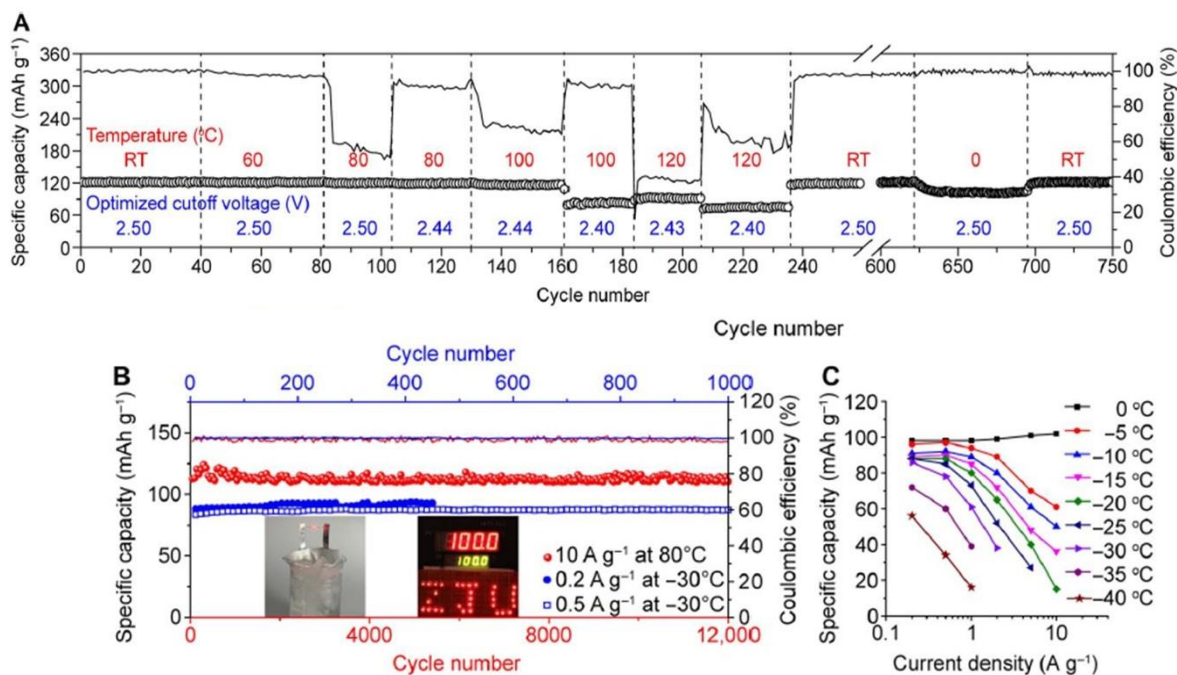
عملکرد الکتروشیمیایی باتری در دمای کم / زیاد در تعیین کارایی سیستم ذخیره انرژی بسیار مهم است. با توجه به کاربرد باتری در موقعیت‌های واقعی مانند استفاده از ماشین‌های الکتریکی در هوای سرد / گرم و یا در ارتفاعات بالا و مناطق گرمسیری، Al-GB در طیف وسیعی از دمای عملیاتی موفقیت‌آمیز است.



شکل ۲. ۲. اجزای الکتروشیمیایی. (A) مقایسه ظرفیت‌های ویژه بین کاتدی GF-p و GF-HC در 6A g^{-1} (B) منحنی‌های شارژ / دشارژ همپوشانی کرده کاتد GF-HC در سیکل‌های مختلف که دو پلات شارژ در $1/7$ تا $2/3$ و $2/3$ تا $2/5 \text{V}$ نشان می‌دهد. (C) عملکرد چرخه‌زنی پایدار کاتد GF-HC در 100A g^{-1} در طی 250000 سیکل. (D و E) مقایسه مشخصات سرعت و عمر چرخه بین کاتد GF-HC و نتایج تحقیقات مختلف. (F) مقایسه دانسیته توان / انرژی Al-GB با تکنولوژی‌های مختلف تجاری شده ذخیره انرژی و نتایج تحقیقات مختلف [۱۳].

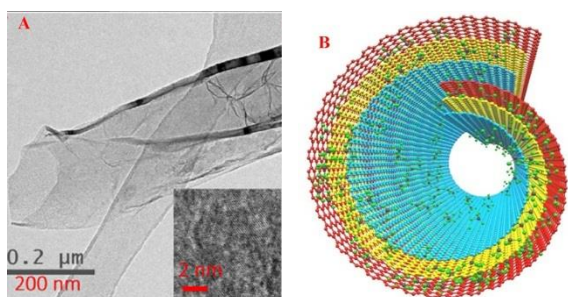
در این پژوهش که توسط لو^۲ و همکاران انجام شده است سنتز نانو اسکروول کربن از طریق یک روش آسان، با استفاده از کربوکسی متیل کیتوزان به عنوان منبع کربن و آهن تری کلرید ۶ آبه به عنوان کاتالیزور انجام شده است [۱۹ و ۱۸]. دیگرام شماتیک نانو اسکروول کربن در شکل 4A نشان داده شده است. یک الگوی شماتیک از مراحل ساخت نانواسکروولهای کربن در شکل 4B نشان داده شده است. ابتدا مواد خام در دمای ۶۰۰ °C به کربن تبدیل می‌شوند. با افزایش دما تا ۱۰۰۰ °C، کربن نرم بدست آمده توسط آهن کاتالیز می‌شود. در نتیجه این کار، ساختاری فلس مانند ایجاد می‌شود. با ادامه کاتالیز مداوم توسط آهن به مدت ۵ ساعت در دمای ۱۱۰۰ °C، کربن فلس مانند، رول می‌شود و محصول نهایی با ساختار اسکروول مانند، شکل می‌گیرد. این ساختار ویژه برای نانو اسکروول کربن، کانال‌های انتقال سریع الکترون و قابلیت عالی ذخیره‌سازی آنیونی را به ارمغان می‌آورد [۲۱ و ۲۰]. باید اشاره نمود که به دلیل قابل تنظیم بودن این ساختار ماریچ، به هنگام قرار گرفتن آنیون‌ها در شبکه، فضای زیادی برای افزایش حجم نانو اسکروولهای کربن در اختیار است و انطباق با افزایش حجم به راحتی صورت می‌گیرد.

هم‌چنین کاتد GF-HC دارای عملکرد قابل توجهی در دمای پایین است: در ۰ تا ۳۰ °C، بیش از ۷۰٪ از ظرفیت اصلی و در دمای ۴۰ °C تا بیش از ۵۵٪ ظرفیت باتری حفظ می‌شود (شکل 3C). در دمای ۳۰ °C، کاتد GF-HC هنوز هم ظرفیت ویژه‌ای بالاتر از ۸۵ mAh g⁻¹ را در ۰/۲ و ۰/۵ A g⁻¹ با ۱۰۰٪ ظرفیت بازداری پس از ۱۰۰۰ سیکل فراهم می‌کند (شکل 3B). این باعث می‌شود Al-GB در محدوده دمایی گسترده‌ای عمل کند. بطوری که سلول Al-GB به راحتی چراغ‌های LED را در یک حمام یخ - نمک یا آون ۱۰۰ °C روشن می‌کند (شکل 3B) [۱۳]. هر چند طراحی فیلم گرافنی که گائو و همکاران به عنوان کاتد برای باتری‌های آلومینیومی گزارش کردند، ظرفیت ویژه بالا در حدود ۱۲۰ mAh g⁻¹ و هم‌چنین سرعت عالی و عمر چرخه بالایی را نشان داد، با این حال، تهیه فیلم‌های گرافن پیچیده است و انرژی زیادی مصرف می‌گردد که مانع تولید انبوه آن می‌شود [۱۷]. از این رو، در ادامه سنتز و کاربرد نانو اسکروولهای کربن^۱ به عنوان ماده‌ای ایده‌آل برای باتری‌های آلومینیومی که هم آماده‌سازی آن آسان است و هم انرژی اندکی مصرف می‌کند، مورد بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۳. عملکرد الکتروشیمیایی Al-GB در دماهای مختلف و حالت خمش. (A) ظرفیت‌های ویژه و کارایی کولومیک کاتدهای GF-HC در دماهای مختلف از ۰ تا ۱۲۰ °C با استراتژی بهینه‌سازی ولتاژ قطع جریان. (RT، دمای اتاق). (B) چرخه‌زنی پایدار کاتد GF-HC در دمای ۸۰ °C (قرمز، ۱۲۰۰۰ سیکل) و ۳۰ °C - (آبی، ۱۰۰۰ سیکل). شکل پایین: سلول‌های Al-GB با موفقیت چراغ‌های LED را در حمام یخ- نمک و آون ۱۰۰ °C روشن می‌کند. (C) خلاصه‌ای از ظرفیت‌های خاص و توانایی سرعت کاتد GF-HC در دماهای مختلف زیر ۰ °C [۱۳].

می‌آید. این ورقه‌های کربنی می‌توانند پیچ بخورند و ورقه‌های کربنی چند لایه‌ای را ایجاد کنند. فاصله بین لایه‌های صفحات کربن حدود 0.377 nm است که بیشتر از فاصله شبکه در گرافیت است و قابلیت ذخیره‌سازی آنیونی بیشتری را فراهم می‌کند. علاوه بر این، نانو اسکرول‌های کربنی مارپیچ می‌توانند تعداد زیادی کانال‌های انتقال الکترون در طول فرایند شارژ / دشارژ فراهم کنند. نانو اسکرول‌های کربن به دلیل ساختار مارپیچی که دارند دارای هدایت الکتریکی بالا و هم‌چنین توانایی عالی ذخیره‌سازی آنیون هستند. بطور خلاصه، این مسیر ویژه منجر به ساخت نانو اسکرول کربن از طریق متراکم کردن صفحات گرافن و ایجاد ساختار مارپیچی می‌شود [۱۷].

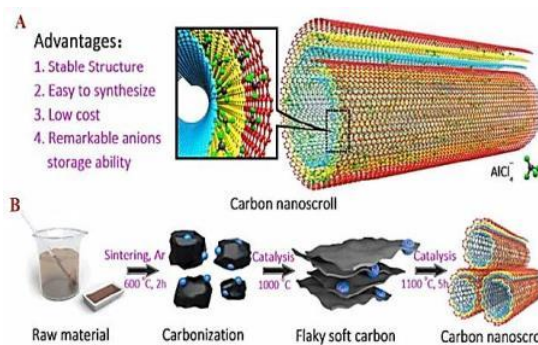


شکل ۵: (A) تصاویر TEM با وضوح بالا (HRTEM) نشان دهنده اسکرول، توخالی، تصویر IFFT در نمایش یک لایه گرافن تک؛ (B) مکانیسم ذخیره‌سازی آنیون‌های AlCl_4^- نانو اسکرول‌های کربن سنتز شده در طول فرایند شارژ / دشارژ [۱۷].

عملکرد الکتروشیمیایی برتر کاتد نانو اسکرول کربن برای باتری آلومینیومی در دمای اتاق در شکل ۶ ارائه شده است. مکانیسم ذخیره‌سازی AlCl_4^- ، نانو اسکرول کربن سنتز شده به شرح زیر است: ساختار مارپیچی به دلیل وجود لایه‌های گرافنی و دیواره‌های داخلی باعث ذخیره‌سازی بالای آنیون می‌شود. علاوه بر این، کانال‌های موازی و با طول زیاد نانو اسکرول‌های کربنی، یک راه راحت برای حمل و نقل الکترونی فراهم می‌کند و سطح تماس بیشتری بین الکتروود و الکترولیت ایجاد می‌کند که به افزایش سرعت مبادله آنیون‌ها در طول فرایند چرخه‌زنی کمک می‌کند (شکل 5B).

شکل 6A منحنی ولتاژ-جریان چرخه‌ای (CV) کاتد نانو اسکرول کربن را در یک باتری جعبه‌ای در اولین سیکل با سرعت اسکن 10 mVs^{-1} در ولتاژ بین 0.4 V و 2.3 V را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود یک پیک اکسایش شدید در حدود 2.05 V در طول فرایند ورود یون، مشاهده می‌شود که به استقرار AlCl_4^- در بین لایه‌های نانو اسکرول کربن نسبت داده می‌شود. در فرایند خروج یون، الکتروود نانو اسکرول کربنی، دو قله کاهش شدید در حدود 1.45 V و 1.85 V نشان می‌دهد که با خروج AlCl_4^- از میان لایه‌های نانو اسکرول کربنی همراه است. همان‌طور که در شکل 6B نشان داده شده است، کاتد

علاوه بر این، به دلیل فراوانی منابع C و Fe، نانو اسکرول‌های کربن به راحتی و با هزینه کم سنتز می‌شوند. برای درک بیشتر کاربردهای نانو اسکرول‌های کربن به عنوان مواد کاتدی در باتری‌های آلومینیومی، این مواد تحت آزمایشات الکتروشیمیایی مختلفی در محدوده پتانسیل 0.4 V تا 2.3 V بررسی شدند و عملکرد الکتروشیمیایی کاتد نانو اسکرول‌های کربن بطور کامل تعیین شد. نتایج بدست آمده یک ظرفیت برگشت پذیر دشارژ عالی برابر با 104 mAh g^{-1} در 1000 mA g^{-1} را نشان داد. علاوه بر این، کاتد پایداری چرخه‌زنی در زمان طولانی را نشان می‌دهد. هم‌چنین این کاتد، ظرفیت بالایی در حدود $101.24 \text{ mAh g}^{-1}$ با دانسیته جریان 5000 mA g^{-1} با بازده کولومی نزدیک به 100% در بیش از 55000 سیکل فراهم می‌کند. علاوه بر این، کاتد نانو اسکرول کربن، عملکرد قابل ملاحظه‌ای در محدوده وسیع دمایی (80°C تا 120°C) را از لحاظ ظرفیت ویژه عالی، بازده کولومی بالا و عمر زیاد چرخه نشان می‌دهد [۱۷]. مهم‌تر از همه، عملکرد چرخه عالی نانو اسکرول‌های کربن تحت شارژ سریع و دشارژ آهسته است (باتری می‌تواند در ۶ ثانیه بطور کامل شارژ و پس از ۴۹۲ ثانیه دشارژ شود و تقریباً 100% نگهداری ظرفیت پس از 6600 سیکل با یک جریان شارژ و دشارژ به ترتیب برابر با 1000 و 100 mA g^{-1} بدست آید). نانو اسکرول‌های کربن بر اساس عملکرد الکتروشیمیایی فوق‌العاده و هم‌چنین مصرف انرژی کم و ساخت ساده، مواد بسیار امیدوار کننده‌ای برای باتری‌های آلومینیومی هستند و می‌تواند به عنوان یک ماده الکتروود مناسب برای سایر دستگاه‌های ذخیره‌سازی انرژی نیز بکار روند.



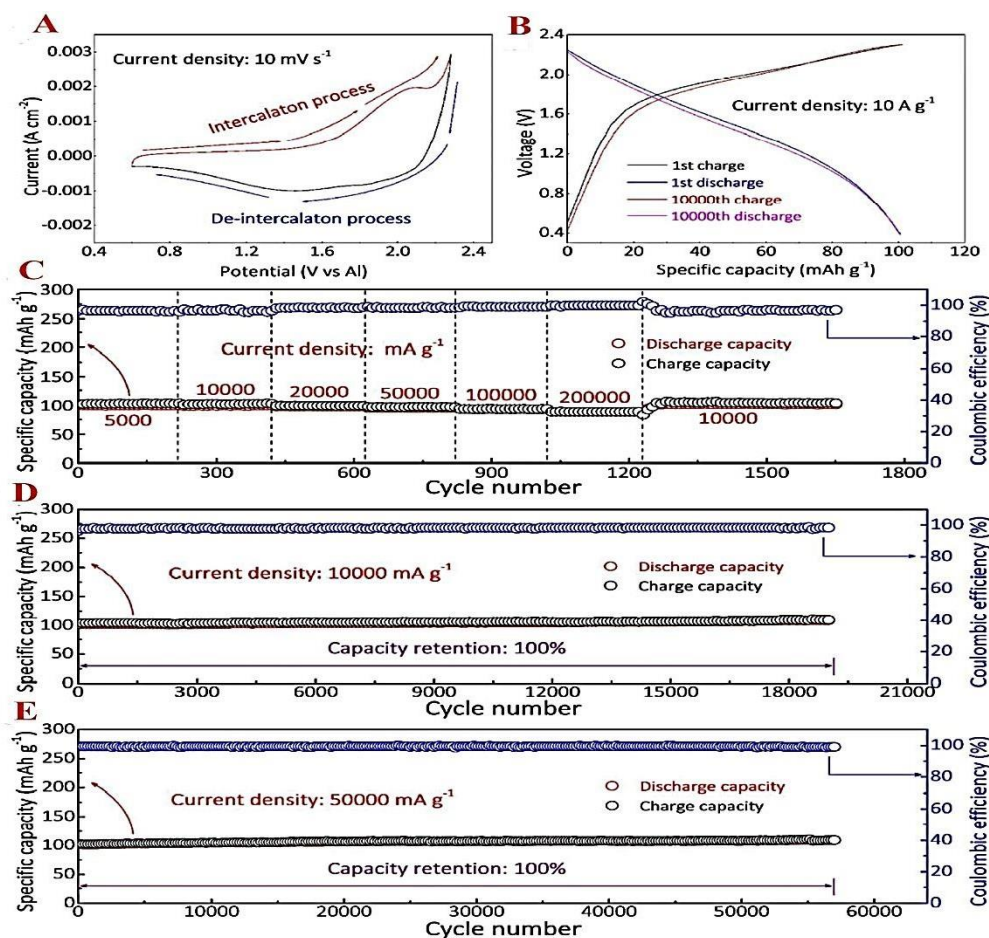
شکل ۴: (A) قرار گرفتن آنیون‌ها در ساختار نانو اسکرول کربن؛ (B) تصویر شماتیک مراحل تولید سنتز نانو اسکرول‌های کربن [۱۷].

نتایج و بحث

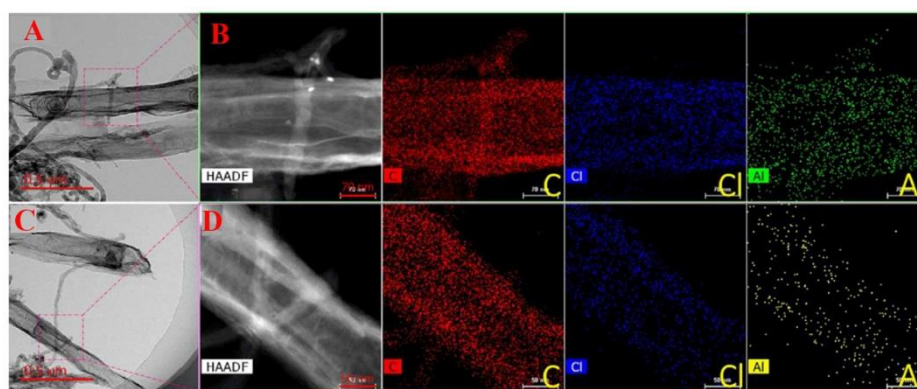
این روش در هر بار به آسانی قادر به تولید 60 g گرم نانو اسکرول کربن با استفاده از آهن کاهش یافته به عنوان کاتالیزور و مقدار استوکیومتری کربوکسی متیل کیتوزان به عنوان ماده اولیه است. برای تجزیه و تحلیل ساختار و مورفولوژی نانو اسکرول کربن، اندازه‌گیری‌های مختلفی انجام شده است. شکل 5A، نشان می‌دهد که نانو اسکرول کربن شامل ورقه‌های کربنی تک یا چند لایه است که از هسته‌های آهن شروع به رشد می‌کند و سپس به صورت اسکرول‌های استوانه‌ای در

نانو اسکرو کربن ظرفیت‌های دشارژ و شارژ اولیه برابر با $100/49$ و $101/11 \text{ mAh g}^{-1}$ را با سرعت 10000 mA g^{-1} ارائه می‌دهد. بازده کولومبی اولیه حدود $99/3$ درصد است. اولین منحنی دشارژ، یک فلات دشارژ متوسط را در حدود $1/45 \text{ V}$ نشان می‌دهد که مربوط به استخراج AlCl_4^- از بین ورق‌های نانو اسکرو کربن در طول پروسه چرخه‌زنی است. برای چرخه 10000 ام، کاتد نانو اسکرو کربن، ظرفیت دشارژ و شارژ $100/54$ و $101/01 \text{ mAh g}^{-1}$ را نشان می‌دهد. هم‌چنین، منحنی دشارژ چرخه 10000 ام، با منحنی اولیه همپوشانی دارد، که نشان دهنده برگشت‌پذیری و تکرارپذیری خوب آن است. علاوه بر این، رفتارهای شارژ / دشارژ مشاهده شده در سیکل اول با نتایج CV همخوانی دارد، که نشان می‌دهد نانو اسکرو کربن دارای قابلیت بالایی برای استفاده به عنوان ماده کاتد برای باتری آلومینیومی است [17]. کارایی سرعت نانو اسکرو کربن در باتری آلومینیومی در دانسیته‌های جریان مختلف در شکل 6C ارائه شده است. بطور قابل توجهی، باتری آلومینیومی مبتنی بر نانو اسکرو کربن سرعت بسیار بالایی را نشان می‌دهد که ظرفیت‌های برگشت‌پذیر عالی را در دانسیته جریان دشارژ افزایشی 5000 تا 20000 mA g^{-1} برای 200 بار نشان می‌دهد. بازده کولومبی بین $97/4$ تا 100 است. علاوه بر این، الکتود پایداری چرخه‌ای بی‌نظیری برای 200 سیکل بدون کاهش ظرفیت را نشان می‌دهد، که تایید می‌کند ساختار نانو اسکرو کربن می‌تواند توانایی مواد را برای مقاومت در برابر حمله جریان‌های بزرگ بهبود بخشد. علاوه بر این، زمانی که دانسیته جریان به 10000 mA g^{-1} بازگردانده می‌شود، دانسیته دشارژ به مقدار اولیه خود باز می‌گردد که نشان‌دهنده سازگاری مجدد و با سرعت بسیار بالای آن است. عملکرد الکتروشیمیایی نانو اسکرو کربن با سرعت 10000 mA g^{-1} برای 19000 دور در شکل 6D نشان داده شده است که نشان می‌دهد الکتود ظرفیتی بالغ بر $101/35 \text{ mAh g}^{-1}$ را با بازدهی ظرفیت معادل 100 ٪ فراهم می‌کند. شایان ذکر است که فرایند شارژ / دشارژ در طول 19000 سیکل، بازده کولومبی بالایی را در حدود 99 ٪ نشان می‌دهد که به علت هدایت الکتریکی بسیار عالی ایجاد شده توسط ساختار اسکرو مارپیچی است. علاوه بر این، همان‌طور که در شکل 6E نشان داده شده است، نانو اسکرو کربنی ظرفیت ویژه عالی $101/24 \text{ mAh g}^{-1}$ در سرعت جریان بسیار زیاد 50000 mA g^{-1} ارائه می‌کند. پس از 55000 سیکل، ظرفیت بازدهی حدود 100 ٪ با بازده کولومبی پایدار 100 ٪ بدست آمد. پایداری عالی چرخه می‌تواند به انباشتگی ورق‌های گرافن مربوط باشد که یک ساختار مارپیچی که برای انتقال الکترون بین مواد الکتود و الکترولیت سودمند است، ایجاد می‌کند. علاوه بر این، وقتی بازده کولومبی بالا و در حدود 100 ٪ است، دانسیته انرژی نانو اسکرو کربن به عنوان کاتد برای باتری آلومینیوم محاسبه شد که چگالی انرژی در سطح سلول 30 Wh kg^{-1} بدست آمد. دانسیته انرژی نانو اسکرو کربنی می‌تواند بیشتر هم بهبود یابد. با توجه به سرعت بالا و عملکرد چرخه‌ای طولانی مدت،

بازده کولومبی بالا و هم‌چنین بازدهی ظرفیت بسیار بالا، می‌توان نتیجه گرفت که نانو اسکرو کربن، دارای مزیت‌های عالی برای باتری آلومینیومی است [17]. به منظور درک کامل مکانیسم ذخیره آنیون توسط نانو اسکرو کربن، تغییر مورفولوژی، توزیع عنصری و تغییر ساختاری در تمام مواد سنتز شده مورد بررسی قرار گرفته است. باتری‌های آلومینیومی بعد از شارژ اولیه تا $2/3 \text{ V}$ و دشارژ تا $0/4 \text{ V}$ در 10000 mA g^{-1} در سیکل اول، و سپس در 10000 mA g^{-1} برای 10000 سیکل در یک جعبه پر از آرگون از هم جدا شدند. الکتودهای بدست آمده چندین بار با محلول دی متیل کربنات شستشو داده شدند و برای آنالیزهای بعدی از جمله XRD، EDS، TEM و XRD در افسر آرگون خشک شدند. در تصویر TEM شکل 7A-B ساختار مارپیچی نانو اسکرو کربنی که تا $2/3 \text{ V}$ شارژ شده است به خوبی مشاهده می‌شود، که نشان می‌دهد ساختار شبیه اسکرو در طول آماده‌سازی الکتود آسیب ندیده است. علاوه بر این، عناصر C، Cl و Al که در تصاویر EDS شناسایی شده‌اند، تایید می‌کند که نمونه از بهم ریختن باتری حاوی کربن با مقدار کمی Cl و Al حاصل از آنیون‌های AlCl_4^- تشکیل شده است. این یافته نشان می‌دهد که آنیون‌های AlCl_4^- در لایه‌های گرافن ساختار اسکرو مانند وارد شده‌اند. پدیده منحصر بفردی که در آن بیشتر عناصر C، Cl و Al در طول مسیر دیواره‌های نانو اسکرو کربنی توزیع می‌شوند ثابت می‌کند که ساختار ویژه نانو اسکرو کربن دارای توانایی عالی ذخیره‌سازی آنیون است. توزیع همگن عناصر C، Cl و Al از نمونه دشارژ شده تا $2/3 \text{ V}$ در شکل 7C-D نشان داده شده است. در مقایسه با حالت شارژ، درصد عناصر Cl و Al در الکتود تحت شرایط دشارژ کاملاً کاهش می‌یابد، که نشان می‌دهد آنیون‌های AlCl_4^- می‌توانند از نانو اسکرو کربن در طول فرایند دشارژ خارج شوند و این بدان معنی است که فرایند وارد شدن آنیون بین لایه‌های گرافن کاتالیتیکی یک فرایند برگشت‌پذیر است [17]. تصاویر TEM نشان می‌دهد پس از چرخه‌زنی در سرعت جریان بالا 10000 mA g^{-1} برای 10000 سیکل، ساختار مارپیچی ویژه حفظ می‌شود. لایه‌های گرافن پیچ خورده بر روی پروفایل شبه اسکرو، توانایی ذخیره‌سازی آنیون‌ها را افزایش می‌دهد، قابلیت ساختاری را در فرایند ذخیره‌سازی آنیون فراهم می‌کند و کانال‌های حمل و نقل الکترونیکی بسیاری را فراهم می‌کند، که منجر به حرکت بسیار سریع الکترون‌ها می‌شود. بطور ویژه، فضای شبکه‌ای افزایش یافته سبب افزایش حجم و تبدیل ساختاری به مواد شبه گرافیتی در طول فرایند چرخه‌زنی می‌شود. از آنجایی که ساختار ترکیبی از لایه‌های مارپیچی گرافن و هسته توخالی اسکرو است، الکتود نانو اسکرو کربن سنتز شده می‌تواند با انبساط حجم بیشتر و حفظ ساختار پایدار انطباق یابد. بطور کلی نانو اسکرو کربن بدست آمده، کانال‌های انتقال الکترونیکی عالی ایجاد می‌کند که توانایی ذخیره‌سازی آنیون و پایداری ساختاری عالی دارد و یک گزینه بسیار نویدبخش برای مواد کاتدی باتری‌های آلومینیوم هستند.



شکل ۶ عملکرد چرخه نانو اسکرویل کربن سنتز شده: (A) منحنی CV کاتد نانو اسکرویل کربن ساخته شده با سرعت اسکن 10 mV s^{-1} ; (B) منحنی‌های شارژ/دشارژ گالوانوستاتیک انتخابی در محدوده پتانسیل $0.4/2.3 \text{ V}$ تا 10000 mA g^{-1} ; (C) قابلیت سرعت نانو اسکرویل‌های کربن در محدوده سرعت $5000-200000 \text{ mA g}^{-1}$; (D) عملکرد چرخه طولانی نانو اسکرویل‌های کربن در 10000 mA g^{-1} ; (E) عملکرد چرخه طولانی نانو اسکرویل‌های کربن در دانسیته جریان 50000 mA g^{-1} در بیش از 55000 دور [۱۷].

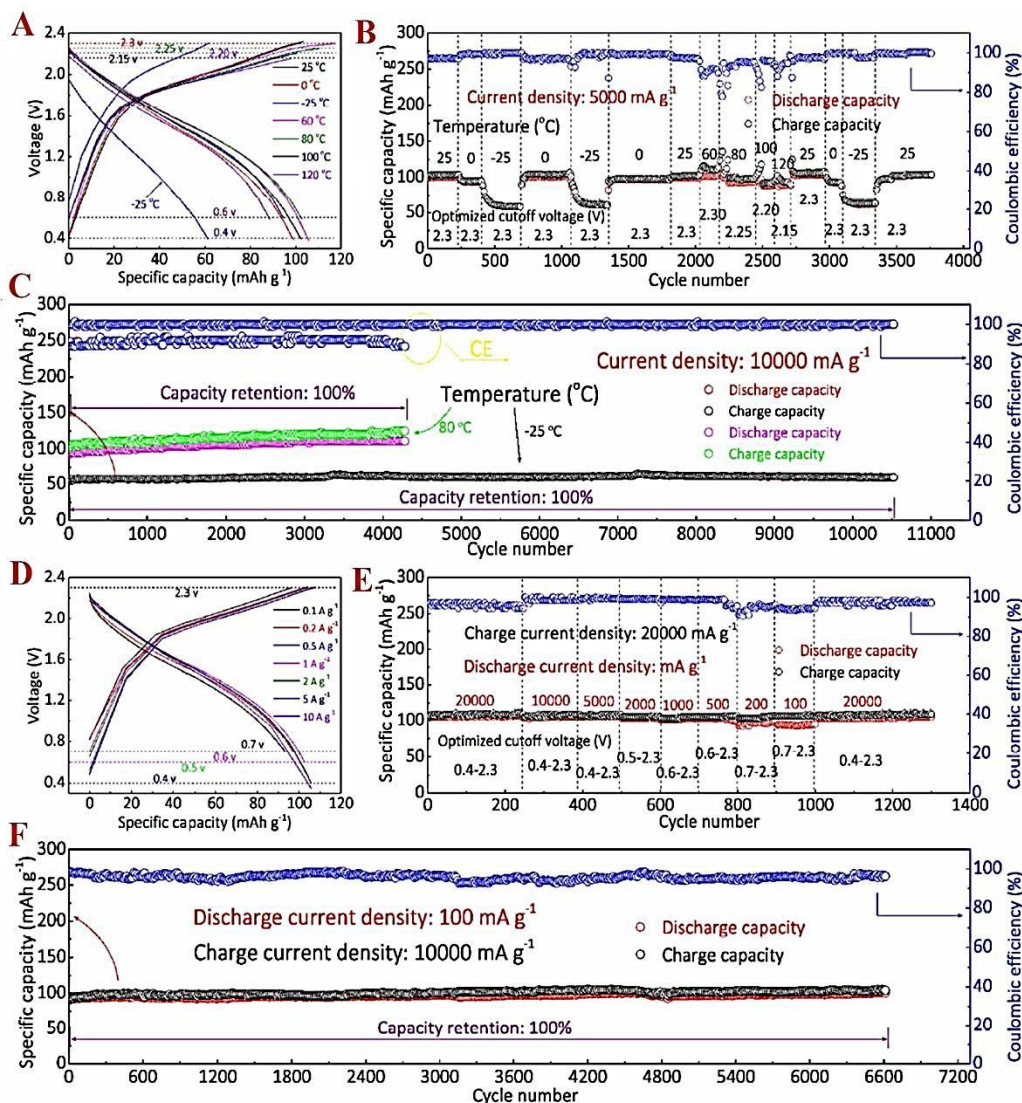


شکل ۷ مورفولوژی و ساختار نانواسکرویل‌های کربنی بدست آمده از مجزا کردن الکترودها پس از اتمام چرخه مشخص در شرایط مختلف. حالت آزمایش الکتروود در (A-B) در دور اول تا $2.3/2.3 \text{ V}$ شارژ می‌شود: (A) تصویر TEM الکتروود که ساختار شبه اسکرویل یکنواخت را در حالت کاملا شارژ نشان می‌دهد؛ (B) تصویر EDS از الکتروود مجزا شده که نشان‌دهنده توزیع عناصر C، Cl و Al است. حالت آزمایش الکتروود در (C-D) در دور اول تا $0.4/2.3 \text{ V}$ دشارژ می‌شود: (C) تصویر TEM ساختار شبه اسکرویل یکنواخت را در حالت کاملا دشارژ نشان می‌دهد؛ (D) تصویر EDS از الکتروود مجزا شده که نشان‌دهنده توزیع عناصر C، Cl و Al است [۱۷].

به هنگام استفاده در شرایط واقعی، باتری یک تغییر دمایی (از جمله سرمای زمستان و گرمای تابستان) را تجربه می‌کند. بنابراین، کارایی الکتروشیمیایی تحت محدوده وسیعی از دما و دانسیته جریان شارژ / دشارژ فوق‌العاده سریع در تعیین قابلیت نانو اسکرول کربن به عنوان کاتد برای باتری آلومینیومی ضروری است. برای مثال، الکتود نانو اسکرول کربن با موفقیت یک دیود نشر نور (LED) را روشن کرده و انعطاف‌پذیری فوق‌العاده‌ای را نشان می‌دهد. شکل 8A پروفیل‌های شارژ/ دشارژ را در دماهای متفاوت از ۲۵- تا ۱۲۰ °C نشان می‌دهد که در آن باتری در دو حمام یخ-مک و کوره ۱۲۰ °C قرار می‌گیرد. اگرچه ظرفیت ویژه دشارژ اولیه در ۰ °C، ($100/0.2 \text{ mAh g}^{-1}$) کمی کمتر از ۲۵ °C، ($101/45 \text{ mAh g}^{-1}$) است اما زمانی که دمای محیط از دمای اتاق تا ۰ °C کاهش می‌یابد، افزایشی در بازده کولومبی از ۹۶-۹۸٪ به ۹۹-۱۰۰٪ مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد باتری آلومینیومی با کاتد نانو اسکرول کربن قادر به مقاومت در برابر دمای پایین است (شکل 8B). به همین ترتیب، هرگاه دمای آزمایشی از ۰ تا ۲۵ °C کاهش یابد، ظرفیت شارژ و دشارژ کاهش می‌یابد در حالی که بازده کولومبی هم‌چنان بدون تغییر است، که می‌تواند به کاهش رسانایی الکترولیت نسبت داده شود که منجر به کاهش اندکی در ظرفیت و افزایش در کارایی چرخه‌ای شود. هم‌زمان که دما به دمای اتاق باز می‌گردد، ظرفیت به سرعت به $101/5 \text{ mAh g}^{-1}$ در جریان شارژ / دشارژ 5000 mA g^{-1} با بازده کولومبی بالاتر از ۹۸٪ می‌رسد. زمانی که دما مستقیماً از دمای اتاق به ۲۵ °C کاهش می‌یابد، نمونه، پایداری مشابهی را نشان می‌دهد. علاوه بر این، ظرفیت ویژه باتری در ۸۰ °C حدود 100 mAh g^{-1} است، در حالی که وقتی دما به ۲۵ °C برمی‌گردد، ظرفیت کامل را از خود نشان می‌دهد. برعکس، الکتود نانو اسکرول کربن، افزایشی در ظرفیت دشارژ ویژه با کاهش بازده کولومبی در دمای ۶۰ °C نسبت به دمای اتاق نشان می‌دهد (شکل 8B) زیرا افزایش دما موجب افزایش انتشار و جابجایی نامنظم یون‌ها می‌شود. در ضمن، پراکنده شدن آنیون‌ها در شبکه نانو اسکرول کربن در دمای بالا افزایش می‌یابد، که منجر به از دست دادن انرژی الکتریکی و کاهش بازده کولومبی می‌شود. با توجه به تجزیه شدید الکترولیت در دمای بالا، یک استراتژی بهینه‌سازی ولتاژ قطع جریان برای بهبود ثبات چرخه‌زنی و هم‌چنین افزایش بازده کولومبی بکار می‌رود. با افزایش دما تا ۸۰ °C، این باتری ظرفیت دشارژ پایدار (حدود $95/8 \text{ mAh g}^{-1}$) همراه با بازده کولومبی در حدود ۹۵/۴٪ در محدوده ولتاژ ۰/۶ تا ۲/۲۵ V همراه با کاهش ناچیزی در ظرفیت دشارژ (از ۱۰۲ تا 101 mAh g^{-1}) و افزایش زیادی در بازده کولومبی (از ۷۸٪ تا ۹۵٪) است. مهم‌تر از همه، استراتژی بهینه‌سازی ولتاژ قطع جریان زمانی که دما به ۱۰۰ و ۱۲۰ °C افزایش یابد نیز معتبر است. همان‌طور که در شکل 8C نشان داده شده است، نانو اسکرول کربن چرخه عمر طولانی در ۸۰ °C همراه با ظرفیت 101 mAh g^{-1} را نشان می‌دهد و بازده کولومبی بالاتر از ۹۲/۲٪ است. علاوه بر این، یک بازدهی ظرفیت ۱۰۰٪ را پس از ۴۰۰۰ سیکل

نشان می‌دهد که بهتر از گزارش‌های قبلی است. عملکرد چرخه-ای گرافن در دمای پایین ۲۵ °C ظرفیت برگشت‌پذیری برابر با $62/83 \text{ mAh g}^{-1}$ در 10000 mA g^{-1} و بازدهی ظرفیت ۱۰۰٪ پس از ۱۰۰۰۰ سیکل را نشان می‌دهد. از این رو، عملکرد عالی در دمای پایین الکتود به ساختار اسکرول نانو اسکرول کربن نسبت داده می‌شود که توانایی نفوذپذیری را در طی چرخه‌زنی فوق‌العاده افزایش می‌دهد [۱۷].

از سوی دیگر برای استفاده عملی از یک باتری، دستیابی به شارژ کامل در یک زمان بسیار کوتاه (شارژ سریع) و هم‌چنین پیوستگی دشارژ در یک زمان طولانی (دشارژ آهسته) ضروری است. با توجه به عملکرد الکتروشیمیایی فوق‌العاده سریع گفته شده در بالا، مطلوب است که میزان شارژ سریع و دشارژ آهسته کاتد نانو اسکرول کربن برای باتری آلومینیومی در دانسیته جریان بهینه، برآورد شده است. پروفیل شارژ/ دشارژ نوعی در جریان شارژ 20000 mA g^{-1} و دانسیته‌های جریان دشارژ نزولی در شکل 8D نشان داده شده است. هنگامی که دانسیته جریان دشارژ در 10000 mA g^{-1} و 5000 mA g^{-1} تنظیم گردد، مشاهده می‌شود که هر دو فرآیند چرخه‌ای، ظرفیت‌های دشارژ مشابهی را به ترتیب برابر با $102/1$ و $102/7 \text{ mAh g}^{-1}$ ، با بازده بالا کولومبی ۱۰۱٪ و ۱۰۲٪ نشان می‌دهد، که کمی بالاتر از ظرفیت $101/5 \text{ mAh g}^{-1}$ و بازده کولومبی (۹۹٪) با سرعت 20000 mA g^{-1} است. از مشاهدات فوق، بازده کولومبی دانسیته جریان دشارژ کاهش یافته، بالاتر از ۱۰۰٪ است. بنابراین بهینه‌سازی ولتاژ قطع جریان دشارژ ضروری است. همان‌طور که تراکم جریان دشارژ کاهش می‌یابد، ولتاژ قطع جریان دشارژ افزایش می‌یابد و منجر به ظرفیت‌های پایدار می‌شود. عملکرد سرعت باتری آلومینیومی در حالت شارژ سریع / دشارژ در زمان طولانی و به صورت متغیر در شکل 8E نشان داده شده است. نانو اسکرول کربن پس از بیش از ۱۰۰ سیکل، عملکرد چرخه‌ای فوق‌العاده را با بازده کولومبی عالی در سرعت دشارژ در محدوده ۱۰۰ تا 5000 mA g^{-1} را نشان می‌دهد. علاوه بر این، ظرفیت‌های ویژه شارژ / دشارژ وقتی که دانسیته جریان شارژ / دشارژ به 20000 mA g^{-1} برگردد، می‌تواند به مقدار اولیه خود بازگردد که نشان می‌دهد کاتد نانو اسکرول کربن دارای بازدهی بالا و ثبات ساختاری است. عملکرد سرعت به دست آمده از نانو اسکرول کربن در شکل 8F نشان داده شده است. بطور قابل توجه، عملکرد چرخه طولانی مدت کاتد نانو اسکرول کربن تحت دانسیته جریان شارژ بالا تا 10000 mA g^{-1} و جریان دشارژ کوچک در 100 mA g^{-1} ایجاد می‌شود که هم ارز شارژ در ۶ ثانیه و زمان دشارژ بیش از ۴۹۲ ثانیه است. این باتری ثبات چرخه‌ای فوق‌العاده‌ای را نشان می‌دهد که پس از ۶۶۰۰ بار سیکل، با راندمان کولومبی بالاتر از ۹۵-۹۹٪، حدود ۹۹٪ کارایی خود را حفظ می‌کند [۱۷].



شکل ۸: عملکرد الکتروشیمیایی جامع مواد نانواسکرول کربنی آماده شده. وضعیت آزمایش الکتروود در حال چرخه‌زنی در یک محدوده وسیع دمایی (A-C): (A) منحنی‌های شارژ و دشارژ در محدوده دمایی -۲۵ تا ۱۲۰ °C؛ (B) به ترتیب کارایی چرخه باتری جعبه‌ای در دمای کم (-۲۵ °C) و دمای بالا (۶۰، ۸۰، ۱۰۰ °C)؛ (C) کارایی چرخه بسیار طولانی باتری جعبه‌ای نانو اسکرول‌های کربنی در -۲۵ و ۸۰ °C. وضعیت آزمایش الکتروود در حال چرخه‌زنی در (D-F) در دانسیته جریان شارژ بسیار سریع / دشارژ متغیر: (D) منحنی‌های شارژ و دشارژ نانو اسکرول‌های کربنی شارژ شده در ۲۰۰۰۰ mA g⁻¹ و دشارژ شده در دانسیته‌های جریان از محدوده ۱۰۰ تا ۱۰۰ mA g⁻¹؛ (E) عملکرد شارژ سریع و دشارژ آهسته باتری جعبه‌ای شارژ شده در ۲۰۰۰۰ mA g⁻¹ و دشارژ شده در دانسیته‌های جریان از ۱۰۰ تا ۲۰۰۰۰ mA g⁻¹؛ (F) عملکرد چرخه طولانی باتری حاوی اسکرول‌های کربن تحت دانسیته جریان شارژ بالا تا ۱۰۰۰۰ mA g⁻¹ و جریان دشارژ کوچک در ۱۰۰ mA g⁻¹ [۱۷].

- [13] H. Chen, H. Xu, S. Wang, T. Huang, J. Xi, S. Cai, F. Guo, *Sci. Adv.* 3: eaao7233 (2017).
- [14] D.Y. Wang, C.Y. Wei, M.C. Lin, C.J. Pan, H.L. Chou, H.A. Chen, *Nat. Commun.* 8, 14283 (2017).
- [15] L. Fan, Q. Liu, Z. Xu, B. Lu, *ACS Energy Lett.* 2, 1614-1620 (2017).
- [16] X. Yu, B. Wang, D. Gong, Z. Xu, B. Lu, *Adv. Mater.*, 29, 1604118 (2017).
- [17] Z. Liu, J. Wang, H. Ding, S. Chen, X. Yu, B. Lu, *ACS Nano.* 12, 8456-8466 (2018).
- [18] H. Hou, X. Qiu, W. Wei, Y. Zhang, X. Ji, *Adv. Energy Mater.* 7, 1602898 (2017).
- [19] H. Lei, T. Yan, H. Wang, L. Shi, J. Zhang, D. Zhang, *J. Mater. Chem. A* 3, 5934-5941 (2015).
- [20] H. Bi, I.W. Chen, T. Lin, F. Huang, *Adv. Mater.* 27, 5943-5949 (2015).
- [21] T. Lin, W. Chen, F. Liu, C. Yang, H. Bi, F. Xu, F. Huang, *Science* 350, 1508-1513 (2015).

نتیجه گیری

کارایی بالا، عمر چرخه زیاد و محدوده دمایی وسیع، باتری‌های آلومینیومی مبتنی بر فیلم سه بعدی گرافن و نانو اسکروول‌های کربنی را به عنوان جایگزینی مناسب برای باتری‌های لیتیومی ساخته است. هرچند که باتری‌های آلومینیومی فیلم سه بعدی گرافن در زمان معرفی از تمام باتری‌های قبلی کارایی بالاتری را نشان دادند اما با معرفی نانو اسکروول‌های کربنی، قابلیت عملکرد باتری‌های آلومینیومی به طرز شگفت‌آوری پیشرفت کرده است که نه تنها نشان دهنده انگیزه‌ای بزرگ برای استفاده از اسکروول کربن به عنوان مواد کاند شگفت‌انگیز برای باتری آلومینیوم است، بلکه یک روش طراحی مواد الکتروود با کارایی بالا برای دستگاه‌های ذخیره‌سازی و تبدیل انرژی است. باتری‌های آلومینیومی با نانو اسکروول کربن به عنوان مواد کاند دارای عملکرد الکتروشیمیایی بسیار عالی، از جمله ظرفیت بالا، عملکرد چرخه‌ای فوق‌العاده سریع، توانایی عملکرد در محدوده وسیع دمایی و ویژگی سرعت شارژ فوق‌العاده سریع / دشارژ متغیر است. بطور ویژه، یک عمر چرخه‌زنی عالی با ظرفیت ویژه برگشت‌پذیر $101/24 \text{ mAh g}^{-1}$ در سرعت فوق‌العاده 50000 mA g^{-1} همراه با حفظ ۱۰۰٪ ظرفیت اولیه خود پس از ۵۵۰۰۰ سیکل را نشان می‌دهد. علاوه بر این، عملکرد چرخه طولانی نانو اسکروول کربن در دمای ۲۵ - و 80°C نشان می‌دهد که این باتری دارای ظرفیت دشارژ $62/83$ و $99/50 \text{ mAh g}^{-1}$ با ظرفیت ذخیره سازی ۱۰۰٪ است.

منابع

- [1] Z. Li, F. Ding, Y. Zhao, Y. Wang, J. Li, K. Yang, F. Gao, *Ceram. Int.* 42, 15464-15470, (2016).
- [2] S. Wang, M. He, M. Walter, F. Krumeich, *Nanoscale* 10, 6827-6831 (2018).
- [3] S. Li, J. Warzywoda, S. Wang, G. Ren, Z. Fan, *Carbon* 124, 212-218 (2017).
- [4] J. Wang, G. Zhang, Z. Liu, H. Li, *Nano Energy*, 44, 272-278 (2018).
- [5] K.V. Kravchyk, T. Zund, M. Worle, M.V. Kovalenko, *Chem. Mater.* 30, 1825-1829 (2018).
- [6] J. Liu, S. Wang, K. Kravchyk, M. Ibanez, *J. Mater. Chem. A* 6, 10958-10966 (2018).
- [7] E.N. Keyzer, H.F. Glass, Z. Liu, P.M. Bayley, *J. Am. Chem. Soc.* 138, 8682-8685 (2016).
- [8] H. Chen, H. Xu, B. Zheng, S. Wang, T. Huang, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 9, 22628-22634 (2017).
- [9] C.B.J Muldoon, T. Gregory, *Chem. Rev.* 114, 11683-11720 (2014).
- [10] Z.A. Zafar, S. Imtiaz, R. Razaq, S. Ji, T. Huang, *J. Mater. Chem. A*, 5, 5646-5660 (2017).
- [11] M. Walter, K.V. Kravchyk, C. Bofor, R. Widmer, *Adv. Mater.* 30, 1705644 (2018).
- [12] M.-C. Lin, M. Gong, B. Lu, Y. Wu, D.-Y. Wang, H. Dai, *Nature*, 520, 325-328 (2015).