

اهمیت آنالیز مواد سازنده باتری

علی شکاریان

گروه علوم داده‌ها و کامپیوتر، دانشکده علوم ریاضی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

انرژی باتری به موضوع مهمی برای بسیاری از پیشرفت‌های فناوری مدرن تبدیل شده است. با توجه به رشد سریع تقاضای مصرف‌کنندگان برای باتری‌های ارتقایافته، محققان و تولیدکنندگان به طور کامل از نیاز به مطالعه و بهبود فناوری‌های باتری فعلی، آگاه هستند. در عین حال، بسیار مهم است که باتری‌های موجود در بازار امروز به دقت مورد بررسی قرار گیرند تا اطمینان حاصل شود که برای استفاده، ایمن هستند. باتری‌های لیتیوم-یونی (Li-ion)، به دلیل ظرفیت ذخیره‌سازی بالا و هزینه نسبتاً کم، در خط مقدم بازار مدرن ذخیره‌سازی انرژی قرار دارند. هم‌زمان با تجاری‌سازی مداوم این باتری‌ها، مهم است که آن‌ها بتوانند سطوح بالایی از ایمنی و کارایی را قبل از اینکه در دست مصرف‌کننده قرار گیرند، نشان دهند. اگر عیب کنترل نشود، خرابی باتری لیتیوم-یونی می‌تواند فاجعه‌بار باشد و منجر به سوختگی، آتش‌سوزی و در برخی موارد، نشت مواد شیمیایی مضر مانند اسید هیدروفلوئوریک شود. برای اطمینان از اینکه باتری‌ها بدون ایراد باشند و طبق برنامه، کار کنند، اجزای باتری نیاز به آنالیز دقیق و بررسی‌های کنترل کیفیت شامل انواع تکنیک‌های تحلیلی دارند. همین تکنیک‌ها می‌توانند توسط دانشمندان برای مطالعه عملکرد داخلی باتری‌ها نیز مورد استفاده قرار گیرند که منجر به توسعه انواع باتری‌های جدید، بهینه‌تر و مناسب برای طیف گسترده‌ای از کاربردهای مختلف ذخیره‌سازی انرژی می‌شود.

واژگان کلیدی: باتری لیتیوم-یونی، تکنیک‌های تحلیلی، آنالیز ناخالصی، آنالیز وزن‌سنجی حرارتی

مقدمه

افزایش تقاضا برای نوآوری‌های تکنولوژیکی متکی به باتری، انقلاب انرژی جایگزین را هدایت می‌کند. باتری‌های لیتیوم-یونی (LIB)، به سرعت به عنوان یک فناوری، سنگ بنای این انقلاب در حال ظهور هستند. LIBs مزایای انرژی کلیدی را برای امکان نوآوری در بخش‌های انرژی، خودرو و فناوری، ارائه می‌دهند. LIBها، اولین بار در سال ۱۹۹۱ در لوازم الکترونیکی مصرفی با طراحی حجیم و ظرفیت انرژی محدود، شروع به کار کردند. از آن زمان، LIBها طراحی فشرده‌تر و ذخیره انرژی بیشتری را به وجود آورده‌اند. ذخیره انرژی به عنوان چگالی انرژی توصیف می‌شود، یعنی، کل انرژی تقسیم بر وزن یا حجم باتری‌ها. با افزایش چگالی انرژی، تولیدکنندگان LIB می‌توانند باتری‌های کوچک‌تر با ظرفیت انرژی بیشتری، تولید کنند. چگالی انرژی یکی از دلایل جذابیت لیتیوم است. سومین عنصر جدول تناوبی، فوق‌العاده سبک است و انرژی زیادی را در یک بسته کوچک، ارائه می‌دهد. علاوه بر چگالی انرژی بالا، LIBها طول عمر طولانی و سمیت کمی دارند (Fan et al., 2019).

باتری لیتیوم-یونی، شامل یک کاتد است که منبع یون لیتیوم است. یک آند که این یون‌های لیتیوم را در مدار خارجی، ذخیره و آزاد می‌کند و یک الکترولیت که به یون‌ها اجازه می‌دهد تا بین این دو، جریان پیدا کنند. در باتری لیتیوم-یونی قابل شارژ، یون‌های لیتیوم در هنگام شارژ به سمت آند، جریان می‌یابند و حرکت آن‌ها از طریق الکترولیت و به سمت کاتد در هنگام تخلیه، باعث آزاد شدن انرژی می‌شود (Zhang & Ramadass, 2012).

باتری‌های قابل شارژ که به عنوان منابع ثانویه نیز شناخته می‌شوند، می‌توانند در بسیاری از مراحل در چرخه عمرشان، آزمایش شوند. آنالیز سیستماتیک مواد اولیه مورد استفاده در تولید باتری می‌تواند بسیار حیاتی و ارزشمند باشد، زیرا این امکان را می‌دهد تا ناخالصی‌ها یا عیوب، در یک دسته شناسایی شوند و از خط تولید، حذف گردند. در پایان عمر قابل استفاده باتری، اجزای باتری را می‌توان دوباره آزمایش کرد تا مشخص شود که آیا مواد در شرایط مناسبی برای بازیافت هستند یا خیر. برای مثال، آزمایش‌های تصویربرداری غیرمخرب می‌تواند تشکیل دندریت لیتیوم را که می‌تواند مواد را به خطر بیندازد، رد کند. به طور مشابه، آزمایش‌های تحلیلی قانونی می‌تواند برای شناسایی علت خرابی باتری یا تعیین اینکه چرا عملکرد باتری ممکن است با سرعت غیرمعمولی، سریعاً کاهش یابد، انجام شود. آنالیز اجزای باتری در طول عمر طبیعی آن‌ها نیز به ویژه برای دانشمندان، ارزشمند است. بررسی وضعیت شیمیایی کاتد، آند، الکترولیت و هر لایه تماس اضافی در حالت‌های مختلف شارژ و دشارژ می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را در رابطه با فرآیندهای الکتروشیمیایی که در داخل این باتری‌ها اتفاق می‌افتد، آشکار کند (Hantanasirisakul & Sawangphruk, 2023; Zhang et al., 2014).

آند در یک باتری لیتیوم-یونی معمولاً از گرافیت، یک بایندر و سایر مواد افزودنی رسانای پوشش داده شده بر روی فویل مسی، تشکیل شده است. گرافیت به دلیل تواناییش در قرار دادن برگشت‌پذیر یون‌های لیتیوم بین لایه‌های ساختاری، باعث عملکرد مناسب یک آند ایده‌آل می‌شود. هر گونه ناخالصی در این گرافیت می‌تواند عملکرد باتری را مختل کند. در نتیجه، مهم است که ذخایر گرافیتی که در تولید باتری استفاده می‌شوند، تحت آنالیز ناخالصی قرار گیرند. این امر معمولاً با استفاده از طیف‌سنجی نشری پلاسما-آپتیکال جفت القایی (ICP-OES)، به دست می‌آید (Yang et al., 2022).

برای دانشگاهیان و محققان، تکنیک‌هایی که امکان مشاهده اتفاقات درون باتری را در طول چرخه‌های شارژ، کارکرد و شارژ مجدد آن فراهم می‌کند، نقش تحلیل باتری را ایفا می‌کند. جان/یروین، استاد شیمی در دانشگاه سنت اندروز، می‌گوید: «آنچه که ما واقعاً می‌توانیم به خوبی انجام دهیم، مشخص کردن موادی است که در باتری‌ها قرار می‌دهیم. اما مانند بسیاری از تکنیک‌های الکتروشیمیایی، گاهی اوقات چیزی که در آن قرار می‌دهید ارتباط زیادی با آنچه که در واقعیت مهم است، ندارد.

با این حال، دو مانع عمده وجود دارد که صنعت LIB با آن مواجه است که باید برای تسلط بر آن غلبه کرد: تهیه مواد خام و جلوگیری از خرابی باتری. از آنجایی که تولید LIB با افزایش تقاضا، زیاد می‌شود، فشارهای بیشتری بر روی تهیه مواد خام کلیدی، وارد می‌گردد. به طور خاص، پیش‌بینی می‌شود که تقاضا برای لیتیوم، کبالت و گرافیت در دهه‌های آینده به میزان قابل‌توجهی افزایش یابد. تهیه مواد خام برای LIBها، ملاحظات زیست محیطی و اجتماعی مختلفی دارد که باید برای اطمینان از شیوه‌های توسعه اخلاقی، مورد توجه قرار گیرند. صنعت LIB همچنین باید با مسائلی که باعث شکست LIB می‌شود، مقابله کند. در حالی که بیشتر خرابی‌های باتری لیتیومی،

رخدادهای کوچک و جداگانه‌ای هستند، حوادثی در مقیاس بزرگ نیز رخ می‌دهد. چنین خرابی‌های باتری منجر به انفجار و آتش‌سوزی شده که منتهی به خسارات و تلفات قابل توجهی می‌گردد. خوشبختانه، اکنون منابع و پیشرفت‌هایی برای جلوگیری از خرابی باتری، طراحی شده است (Haram et al., 2021; Neumann et al., 2022).

روش تحقیق

به عنوان منبع یون‌های لیتیوم در باتری لیتیوم-یونی، کاند را می‌توان از طیف وسیعی از نمک‌های لیتیوم مختلف ساخت. در حال حاضر، دو استاندارد آزمایشگاهی تایید شده و جهانی به منظور غربالگری ناخالصی‌ها در نمک‌های لیتیوم باتری، وجود دارد: ۱- استاندارد چینی GB/T-11064.16-2013 و ۲- کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیکی (IEC) 62321. هر دو روش، استفاده از ICP-OES را به عنوان تکنیک استاندارد طلایی برای این تحلیل، پیشنهاد می‌کنند. انواع مختلفی از الکترولیت‌ها وجود دارد که می‌توان از آن‌ها برای تولید باتری، استفاده کرد. لیتیوم هگزاfluorofosfat (LiPF₆)، پرمصرف‌ترین نمک برای سلول‌های یون لیتیوم تجاری است که با یک حلال آلی برای تشکیل الکترولیت، مخلوط می‌شود. به منظور ارتقای معیارهای عملکرد الکترولیت، مانند پایداری شیمیایی و خواص انتقال یون، مخلوط کردن سایر افزودنی‌ها با الکترولیت نیز رایج است (Horsthemke et al., 2017).

این الکترولیت‌ها به دلیل ترکیب شیمیایی خود می‌توانند بسیار قابل اشتعال باشند. حتی در شرایط کارکرد عادی، باتری‌ها قادر هستند تا گرما تولید کنند که ممکن است باعث واکنش‌های شیمیایی ناخواسته در الکترولیت یا در رابط‌های بین الکترولیت و کاتد/آند شود (Chen et al., 2021). به همین دلیل، آنالیز وزن‌سنجی حرارتی (TGA) می‌تواند ابزار ارزشمندی برای ارزیابی تجزیه حرارتی مواد مختلف در باتری‌های Li-ion باشد (Yang et al., 2006).

باتری‌های لیتیوم-یونی آسیب‌دیده یا قدیمی نیز می‌توانند بسته به ترکیب شیمیایی‌شان، شروع به تولید ترکیبات آلی فرار خطرناکی مانند دی‌متیل-۲،۵-دی‌اکسایزولان دی‌کربوکسیلات (DMDOHC) یا ارگانوفلئورو فسفات‌ها (OFPs) و ارگانوفسفرها (Ops) کنند. اگر این گازهای فرار در طول زمان ایجاد شوند، می‌توانند باعث متورم شدن باتری و خرابی فاجعه‌بارتری شوند. آنالیز این گازهای فرار و محصولات تخریب حرارتی توسط کروماتوگرافی گازی-طیف‌سنجی جرمی (GC-MS) می‌تواند به دانشگاهیان و محققان کمک کند تا درک ما را بهبود بخشند و استراتژی‌هایی را ارائه دهند (Yang et al., 2006).

در چند دهه گذشته، پیشرفت‌ها در تکنیک‌های اشعه ایکس مبتنی بر سنکروترون، ابزار مناسبی را در اختیار محققان قرار داده است تا بتوانند مکانیسم‌های فعال در مواد سازنده باتری را مطالعه کنند. با استفاده از این روش‌ها که همراه با سایر تکنیک‌های پراکندگی، طیف‌سنجی و تصویربرداری، مورد استفاده قرار می‌گیرند، محققان می‌توانند به طور جامع، هرگونه تغییری را که در ساختار بلوری، ساختار الکترونیکی، ترکیب شیمیایی و مورفولوژی مواد الکتروود باتری رخ می‌دهد، تجزیه و تحلیل کنند (Bak et al., 2018).

بحث و نتیجه‌گیری

باتری‌های لیتیوم-یونی، به دلایل مختلفی، امروزه پرمصرف‌ترین نوع باتری هستند. ظرفیت ذخیره‌سازی الکتریکی آنها تقریباً بی‌نظیر است. اما این بدان معنا نیست که آنها لزوماً بهترین انتخاب برای آینده هستند. تولید باتری‌های لیتیوم-یونی، نیازمند استخراج و حمل و نقل فلزات دیگر مانند کبالت است که لزوماً پایدارترین زنجیره تامین را ندارند. در نتیجه، بررسی، آنالیز و توسعه شیمی باتری‌های جایگزین، به یک موضوع کلیدی برای بسیاری از گروه‌های تحقیقاتی، تبدیل شده است (Gulley, 2022).

دکتر اسکات جی لیلی، مدیر پروژه NEXGENNA در مؤسسه فارادی می‌گوید: سدیم اساساً عنصر جالبی است، زیرا ارزان و در همه جا موجود است، برخلاف لیتیوم که در کشورهای کمی، وجود دارد. سراسر بریتانیا برای تسریع توسعه باتری سدیمی، کار می‌کنند. این امر، نوید یک باتری ارزان و پایدار را می‌دهد. هزینه‌ای که برای آن پرداخت می‌شود این است که سدیم از نظر وزن اتمی، سنگین‌تر است، بنابراین چگالی انرژی کمتری، دریافت می‌شود. محققین در حال کار روی راه‌هایی هستند که یون‌های سدیم باتری‌ها را تا حد ممکن پایدار کنند، اما همچنین چگالی انرژی و سایر خواص آن را برای کاربردها به حداکثر برسانند.

منابع

- Bak, S.-M., Shadike, Z., Lin, R., Yu, X., & Yang, X.-Q. (2018). In situ/operando synchrotron-based X-ray techniques for lithium-ion battery research. *NPG Asia Materials*, 10(7), 563-580.
- Chen, Y., Kang, Y., Zhao, Y., Wang, L., Liu, J., Li, Y., Liang, Z., He, X., Li, X., & Tavajohi, N. (2021). A review of lithium-ion battery safety concerns: The issues, strategies, and testing standards. *Journal of Energy Chemistry*, 59, 83-99.
- Fan, E., Li, L., Lin, J., Wu, J., Yang, J., Wu, F., & Chen, R. (2019). Low-temperature molten-salt-assisted recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries. *ACS sustainable chemistry & engineering*, 7(19), 16144-16150.
- Gulley, A. L. (2022). One hundred years of cobalt production in the Democratic Republic of the Congo. *Resources Policy*, 79, 103007.
- Hantanasirisakul, K., & Sawangphruk, M. (2023). Sustainable reuse and recycling of spent Li-ion batteries from electric vehicles: chemical, environmental, and economical perspectives. *Global Challenges*, 7(4), 2200212.
- Haram, M. H. S. M., Lee, J. W., Ramasamy, G., Ngu, E. E., Thiagarajah, S. P., & Lee, Y. H. (2021). Feasibility of utilising second life EV batteries: Applications, lifespan, economics, environmental impact, assessment, and challenges. *Alexandria Engineering Journal*, 60(5), 4517-4536.
- Horsthemke, F., Friesen, A., Mönnighoff, X., Stenzel, Y. P., Grützke, M., Andersson, J. T., Winter, M., & Nowak, S. (2017). Fast screening method to characterize lithium ion battery electrolytes by means of solid phase microextraction–gas chromatography–mass spectrometry. *RSC advances*, 7(74), 46989-46998.
- Neumann, J., Petranikova, M., Meeus, M., Gamarra, J. D., Younesi, R., Winter, M., & Nowak, S. (2022). Recycling of lithium-ion batteries—current state of the art, circular economy, and next generation recycling. *Advanced energy materials*, 12(17), 2102917.
- Yang, D., Yang, Y., Du, H., Ji, Y., Ma, M., Pan, Y., Qi, X., Sun, Q., Shi, K., & Qie, L. (2022). An efficient recycling strategy to eliminate the residual “impurities” while heal the damaged structure of spent graphite anodes. *Green Energy & Environment*.
- Yang, H., Zhuang, G. V., & Ross Jr, P. N. (2006). Thermal stability of LiPF₆ salt and Li-ion battery electrolytes containing LiPF₆. *Journal of Power Sources*, 161(1), 573-579.
- Zhang, H.-W., Liu, Z., Liang, L., Chen, L., Qi, Y., Harris, S. J., Lu, P., & Chen, L.-Q. (2014). Understanding and predicting the lithium dendrite formation in Li-ion batteries: Phase field model. *ECS transactions*, 61(8), 1.
- Zhang, Z. J., & Ramadass, P. (2012). Lithium-ion battery systems and technology. In *Batteries for Sustainability: Selected Entries from the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology* (pp. 319-357). Springer.

The importance of analyzing battery materials

Ali Shekarian

Department of Computer and Data Sciences, Faculty of Mathematical Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract

Battery power has become an important issue for many modern technological developments. Due to the rapid growth of consumer demand for improved batteries, researchers and manufacturers are fully aware of the need to study and improve current battery technologies. At the same time, the batteries on the market today must be carefully examined to ensure they are safe for use. Lithium-ion (Li-ion) batteries are at the forefront of the modern energy storage market due to their high storage capacity and relatively low cost. As these batteries continue to be commercialized, they must demonstrate high levels of safety and performance before they reach the consumer. If left unchecked, lithium-ion battery failure can be catastrophic, leading to burns, fires, and, in some cases, the release of harmful chemicals such as hydrofluoric acid. To ensure that batteries are fault-free and perform as intended, battery components require careful analysis and quality control checks involving a variety of analytical techniques. Scientists can also use these same techniques to study the internal workings of batteries, leading to the development of new, more optimized types of batteries suitable for a wide range of different energy storage applications.

Keywords: Lithium-ion battery, Analytical techniques, Impurity analysis, Thermogravimetric analysis (TGA)