

Baterías de iones sodio: una alternativa competitiva a las de iones litio

Zelada Romero, Henry Michel a; Vázquez, Cristina b

a, b Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ingeniería. Departamento de Energía. Grupo Minerales Estratégicos (MinEs).

Contacto: hzelada@fi.uba.ar
cvazquez@fi.uba.ar



RESUMEN

El creciente interés por soluciones sostenibles y eficientes para el almacenamiento de energía ha destacado el potencial de las baterías de iones sodio (SIB) como una alternativa complementaria a las baterías de iones litio (LIB). El Grupo Minerales Estratégicos (MinEs) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires (FIUBA) encaró el desafío de investigar este tipo de baterías. Se estudiaron los materiales utilizados en los electrodos y electrolitos, destacando las propiedades, ventajas y desafíos de los cátodos, como los óxidos de sodio en capas, compuestos polianiónicos y análogos del azul de Prusia, así como de los ánodos, incluidos los materiales carbonosos y formadores de aleaciones y los diferentes tipos de electrolitos líquidos, sólidos y poliméricos. A pesar de los retos técnicos, como la estabilidad cíclica y la densidad de energía, las SIB ofrecen prometedoras oportunidades para un almacenamiento energético sostenible mediante el desarrollo de materiales y tecnologías avanzadas.

ABSTRACT

The growing interest in sustainable and efficient energy storage solutions has highlighted the potential of sodium ion batteries (SIB) as a complementary alternative to lithium ion batteries (LIB). The Strategic Minerals group (Grupo Minerales Estratégicos-MinEs) at the Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires (FIUBA) took on the challenge of investigating this type of battery by studying the materials used in electrodes and electrolytes, highlighting the properties, advantages and challenges of cathodes, such as layered sodium oxides, polyanionic compounds and Prussian blue analogs, as well as anodes, including carbonaceous and alloy-forming materials, and different types of liquid, solid and polymeric electrolytes. Despite technical challenges, such as cyclic stability and energy density, SIB offer promising opportunities for sustainable energy storage through the development of advanced materials and technologies.

Palabras clave: Baterías de iones de sodio, materiales de electrodos, electrolitos, almacenamiento de energía sostenible, cátodos y ánodos.

INTRODUCCIÓN

La Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, en la búsqueda de soluciones energéticas sostenibles, ha creado el Grupo Minerales Estratégicos (MinEs) con el objetivo de avanzar en diversas áreas relacionadas con la transición energética. Este grupo se dedica a la investigación en minerales estratégicos y su aplicación en tecnologías de movilidad sostenible, así como a la evaluación y caracterización de dichos minerales para su implementación en tecnologías energéticas emergentes. Además, el grupo ofrece asesoramiento en procesos sostenibles de extracción de salmueras y rocas, caracterización geocientífica y electroquímica de minerales, prospecciones en áreas mineras, estudios de impacto ambiental, tratamiento de aguas y suelos, así como el estudio de nuevas materias primas estratégicas para la producción de almacenamiento de energía y movilidad eléctrica. También se enfoca en el reciclaje y reutilización de minerales.

Áreas temáticas de investigación que se vienen realizando dentro del MinEs incluyen el desarrollo y diseño de baterías de iones de sodio (SIB), la extracción directa de litio y la exploración geofísica, con el objetivo de resolver nuevos paradigmas en la minería y el uso de minerales estratégicos que permitan la transición hacia tecnologías más sostenibles.

Este esfuerzo por desarrollar nuevas soluciones energéticas surge en respuesta a la creciente demanda energética global y los avances tecnológicos, que han generado una necesidad crítica de soluciones sostenibles y eficientes para el almacenamiento de energía. En este contexto, el mercado actual de las baterías de iones de litio (LIB) está experimentando un crecimiento sostenido impulsado por la demanda de vehículos eléctricos y dispositivos electrónicos [1], [2]. Sin embargo, la obtención de minerales altamente puros utilizados para la fabricación de las LIB presenta desafíos significativos en términos de costo y sostenibilidad [3].

En respuesta a estos desafíos, las SIB han surgido como una alternativa prometedora [4]. Las SIB se destacan por el uso de sodio (Na) [5], [6], un elemento abundante y económico, lo que podría reducir significativamente los costos y mitigar los problemas de suministro asociados con las LIB [6]. Además, las propiedades electroquímicas del Na permiten que las SIB compartan principios operativos y de construcción similares a los de las LIB [7], aunque con algunas diferencias cruciales en los materiales de electrodos y electrolitos [8].

A pesar de las múltiples ventajas que ofrece el Na, no debemos olvidar que las SIB y las LIB se estudiaron casi simultáneamente en la década de

1970 [9]. Sin embargo, las LIB ganaron viabilidad comercial gracias a los avances en los materiales de los ánodos, haciendo menos atractivos los estudios de las SIB [10]. No obstante, la creciente demanda de almacenamiento energético ha revitalizado el interés en las SIB, con un enfoque renovado en el desarrollo de materiales adecuados [11].

Empresas como Natron Energy y HiNa Battery Technology están invirtiendo significativamente en investigación y desarrollo. Buscan superar las limitaciones actuales de las SIB [12], que son causadas principalmente por el mayor radio iónico de los iones Na en comparación a los iones de Li (1,02 frente a 0,76 Å) [13], [14]. Ello dificulta su inserción en materiales, resultando en baja densidad de energía y estabilidad cíclica deficiente, y provocando colapsos estructurales durante reacciones continuas [14].

Para el desarrollo efectivo de las SIB, las investigaciones actuales se centran en identificar y optimizar materiales para los electrodos y electrolitos que puedan ofrecer un rendimiento comparable o superior al de las LIB [13], [14]. A pesar de los avances, encontrar materiales de cátodo y ánodo que sean estables y eficientes sigue siendo un desafío crítico [15].

Por ello, esta investigación revisará los materiales actuales y emergentes utilizados en el desarrollo de electrodos y electrolitos para SIB, analizando sus propiedades, desafíos y oportunidades.

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LAS SIB

El principio de funcionamiento de las SIB es similar al de las LIB, que es del tipo "mecedora" [9]. El funcionamiento de una SIB implica una serie de procesos electroquímicos que ocurren durante la carga y la descarga [4], [11]. Estos procesos se pueden describir en términos de reacciones de oxidación y reducción que tienen lugar en los electrodos de la batería [12].

Durante la carga, los iones de sodio se eliminan del material del cátodo y se intercalan en el material del ánodo a través del electrolito [16]. El proceso de descarga es lo opuesto al proceso de carga. Para mantener el equilibrio de carga del sistema, el circuito externo mueve electrones del mismo orden de magnitud del electrodo positivo al negativo, y en el proceso de descarga ocurre lo contrario [4], [17] (ver Fig. 1).

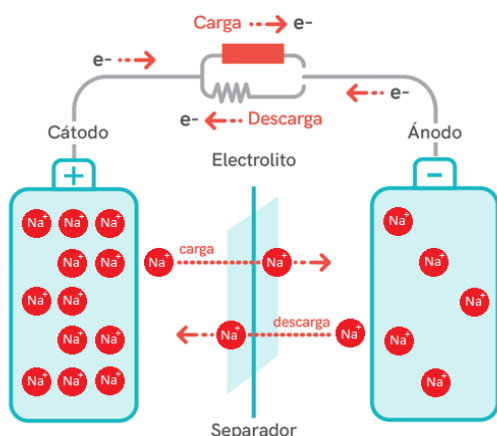
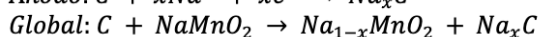
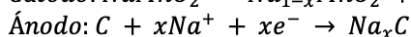
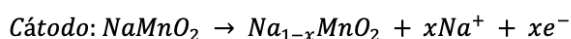


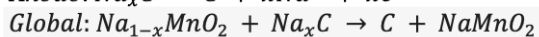
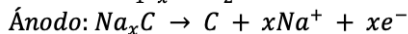
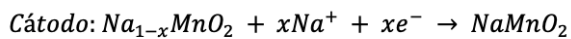
Figura 1: Principio de funcionamiento de las SIB.

De acuerdo con [2], considerando un cátodo de NaMnO_2 y un ánodo de C, las reacciones que ocurren dentro de una SIB son las siguientes:

Para la carga



Para la descarga



MATERIALES UTILIZADOS EN ELECTRODOS Y ELECTROLITOS

Materiales de cátodos

El cátodo es el electrodo positivo de la batería, donde ocurre la reducción durante la descarga [14]. En el caso de las SIB, el cátodo generalmente está compuesto por materiales que pueden alojar iones de sodio durante la descarga y liberarlos durante la carga [15], [19]. Estos materiales incluyen tres grupos principales que exhiben propiedades electroquímicas favorables para el almacenamiento de Na [16] (v. Fig. 2).

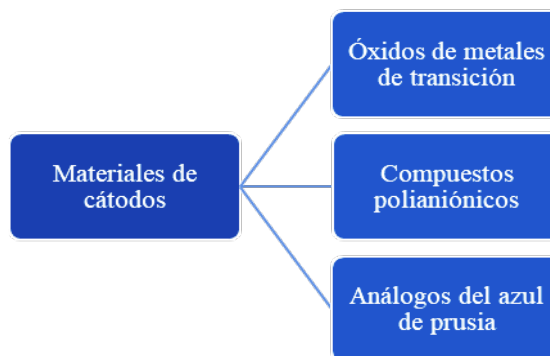


Figura 2: Materiales de cátodos más estudiados.

ÓXIDOS DE SODIO EN CAPAS

Los óxidos en capas de sodio ($\text{Na}_x\text{MM}'\text{O}_2$, donde M y M' son metales de transición) han atraído una considerable atención debido a su capacidad de energía específica comparable a los materiales polianiónicos [12] y su uso potencial de elementos de metales de transición baratos y no tóxicos [11]. Estos materiales pueden exhibir energías específicas ligeramente superiores a las de los materiales polianiónicos [12], [14]. Además, los óxidos en capas tienen una densidad mayor comparada con los análogos de azul de Prusia (PBA), permitiendo una mayor densidad de energía volumétrica [19].

Compuestos polianiónicos

Los compuestos polianiónicos, como los NASICON y los fluorofosfatos, han mostrado ser materiales de cátodo prometedores debido a su robustez y estabilidad térmica en estado cargado [14]. Estos materiales pueden mantener una alta densidad de energía y estabilidad en ambientes húmedos [11].

Análogos del azul de Prusia (PBA)

Los PBA son compuestos de coordinación ciano con una fórmula general $\text{A}_x\text{M}[\text{M}'(\text{CN})_6]_{1-y}\cdot z\text{H}_2\text{O}$, donde A es un metal alcalino y M y M' son iones de metales de transición [18]. Estos materiales poseen una estructura tridimensional con canales abiertos para la conducción rápida de iones alcalinos, haciéndolos atractivos para aplicaciones de alta potencia [19].

Materiales de ánodos

El ánodo es el electrodo negativo de la batería, donde ocurre la oxidación durante la descarga [20]. En las SIB, el ánodo suele estar compuesto por materiales que pueden intercalar o adsorber iones de sodio durante la carga y liberarlos durante la descarga [21]. Los ánodos se pueden clasificar en tres grupos diferentes según su mecanismo de reacción [22] (v. Fig. 2).

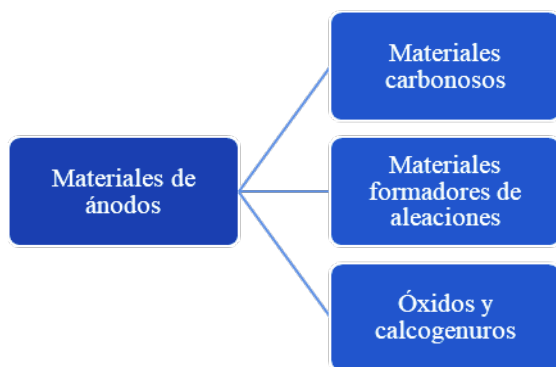


Figura 3: Materiales de ánodos más estudiados.

Materiales carbonosos

Los materiales carbonosos, como el carbono duro y el carbono blando, son ampliamente utilizados como materiales de ánodo en las baterías de iones de sodio debido a su disponibilidad y coste relativamente bajo [11], [12], [20]. Estos materiales ofrecen una buena capacidad de inserción de sodio y estabilidad durante el ciclo [11], [14], [15].

Materiales formadores de aleaciones

Los materiales formadores de aleaciones, como el estaño y el antimonio, tienen una alta capacidad teórica de almacenamiento de Na debido a la formación de aleaciones con el Na [14], [15]. Sin embargo, estos materiales también experimentan grandes cambios de volumen durante el ciclo, lo que puede afectar negativamente su estabilidad [21].

Óxidos y calcogenuros

Los óxidos de metales de transición, como los óxidos de hierro, estaño y cobalto, se consideran potenciales materiales de ánodo debido a su estabilidad intrínseca y abundancia relativa [13], [20], [22]. Además, los calcogenuros de metales de transición, como los sulfuros, ofrecen mejor reversibilidad del proceso de sodiación-desodación [20], [22].

Electrolitos

El electrolito es el medio a través del cual se mueven los iones de sodio entre el cátodo y el ánodo durante la carga y la descarga de la batería [23]. La elección del electrolito tiene un impacto significativo en la conductividad iónica, la estabilidad y la seguridad de la batería [24]. En las SIB, los electrolitos pueden clasificarse en tres grupos principales (v. Fig. 4), de acuerdo a su naturaleza [23], [24].

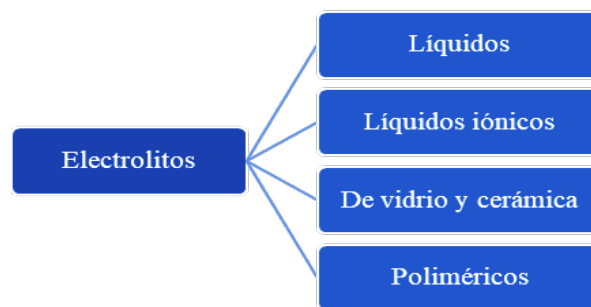


Figura 4: Electrolitos para SIB más estudiados.

Electrolitos líquidos**a. Electrolitos líquidos no acuosos**

Los electrolitos líquidos no acuosos son altamente investigados debido a su alta conductividad iónica en comparación con los electrolitos sólidos [25]. Estos electrolitos se forman al disolver sales de Na en uno o más solventes orgánicos, proporcionando alta movilidad iónica [26]. Son cruciales para el rendimiento de las SIB debido a su capacidad para mantener una buena conductividad a temperatura ambiente [23].

b. Electrolitos líquidos acuosos

Estos electrolitos utilizan agua como solvente, lo que proporciona alta conductividad iónica y es seguro y no inflamable [17]. Sin embargo, su estabilidad electroquímica es limitada debido a la electrólisis del agua a bajos voltajes, lo que restringe su ventana de estabilidad electroquímica [23].

Líquidos iónicos

Los líquidos iónicos son sales en estado líquido a temperatura ambiente, conocidos por su baja volatilidad, alta conductividad iónica y amplia ventana de estabilidad electroquímica [17], [23]. Son una alternativa prometedora para los electrolitos de baterías debido a su estabilidad térmica y capacidad para operar en un amplio rango de temperaturas [24].

Electrolitos de vidrio y cerámicos

Los electrolitos sólidos de vidrio y cerámicos ofrecen alta estabilidad térmica y química, y son menos inflamables que los electrolitos líquidos [24]. Sin embargo, su conductividad iónica suele ser menor en comparación con los electrolitos líquidos, lo que puede limitar su eficiencia en aplicaciones de baterías [23], [24].

Electrolitos poliméricos**a. Electrolitos de polímeros sólidos**

Los electrolitos de polímeros sólidos son flexibles y fáciles de procesar, ofreciendo una buena combinación de conductividad iónica y propiedades mecánicas [23], [24]. Sin embargo, su conductividad iónica puede ser menor en comparación con los electrolitos líquidos [24].

b. Electrolitos de polímeros en gel

Estos electrolitos combinan las ventajas de los electrolitos líquidos y sólidos, proporcionando alta conductividad iónica junto con la flexibilidad y procesabilidad de los polímeros [17]. Son adecuados para aplicaciones donde se requiere una buena interconexión entre el electrodo y el electrolito [24].

DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES**Materiales de cátodos****Óxidos de sodio en capas**

Estabilidad estructural: La inserción/desinserción de Na en estos materiales conduce a transformaciones estructurales continuas. Optimizar el electrolito y las propiedades de la superficie del electrodo puede mejorar la estabilidad [15], [19].

Difusión de Na: La cinética de difusión del Na en los óxidos en capas es un factor crítico [17]. Las fases de difusión lenta pueden ser mitigadas mediante la ingeniería de materiales para reducir los efectos de borde de grano [16].

Compuestos polianiónicos

Sustitución de elementos tóxicos: La eliminación de elementos como el vanadio sigue siendo un reto, aunque se han intentado sustituciones con elementos como Fe y Mn [19].

Optimización de la estructura cristalina: Mejorar las propiedades redox del vanadio mediante sustituciones parciales y alteraciones en la naturaleza de los aniones es crucial [18].

Análogos de azul de Prusia

Síntesis y capacidad: Los PBA pueden ser sintetizados mediante reacciones de precipitación simples a baja temperatura [18]. Prototipos de celdas han demostrado altas tasas de potencia con una retención de capacidad estable (~85% después de 500 ciclos a una tasa de 0.1C) [19].

Estabilidad en aire húmedo: La buena estabilidad en aire húmedo de los PBA reduce la necesidad de un control estricto de la atmósfera durante el almacenamiento y procesamiento del material [18].

MATERIALES DE ÁNODOS**Materiales carbonosos**

Optimización de la microestructura: Mejorar la capacidad de almacenamiento de Na y la estabilidad del ciclo mediante la optimización de la microestructura [20].

Capacidad reversible: La capacidad reversible es crítica para el desempeño a largo plazo en aplicaciones de almacenamiento de energía [22].

Materiales Formadores de Aleaciones

Gestión de los cambios de volumen: La gestión de los cambios de volumen durante el ciclo es crucial para mantener la estabilidad estructural y la capa-

dad de ciclo [20], [21].

Optimización de la composición del electrodo: Mejorar las propiedades electroquímicas mediante la optimización de la composición del electrodo y del electrolito [22].

Óxidos y Calcogenuros

Eficiencia colúmbica y estabilidad: Los calcogenuros de estaño y hierro muestran mejor eficiencia colúmbica y estabilidad en comparación con sus contrapartes de óxidos [20].

Desempeño a alta tasa de carga y descarga: Los sulfuros de hierro presentan mejor desempeño a alta tasa y estabilidad de ciclo en comparación con los óxidos de hierro [21].

Electrolitos**Electrolitos líquidos****a. Electrolitos líquidos no acuosos**

Estabilidad térmica: La estabilidad térmica es crucial para el funcionamiento seguro de las baterías a altas temperaturas [23].

Compatibilidad con el electrodo: La compatibilidad del electrolito con los materiales del electrodo afecta directamente la capacidad de ciclo y la vida útil [24].

b. Electrolitos líquidos acuosos

Ventana de voltaje limitado: La ventana de voltaje limitado puede restringir la densidad de energía de las baterías [23].

Estabilidad química: La estabilidad química en presencia de materiales de cátodo y ánodo es crucial para el desempeño a largo plazo [23], [24].

Líquidos iónicos

Coste y disponibilidad: El alto coste y la disponibilidad limitada pueden restringir su uso en aplicaciones comerciales a gran escala [26].

Compatibilidad con materiales de electrodo: La compatibilidad es esencial para optimizar el desempeño electroquímico de la batería [23], [25].

Electrolitos de vidrio y cerámicos

Interfaz electrodo-electrolito: Optimizar la interfaz para minimizar la resistencia interfacial y mejorar la conductividad iónica [25], [26].

Procesabilidad: La fragilidad y la dificultad para formar contactos íntimos con los electrodos son desafíos significativos [25].

Electrolitos poliméricos**a. Electrolitos poliméricos sólidos**

Conductividad iónica: La conductividad iónica más baja limita la tasa de carga y descarga [23].

Estabilidad térmica y mecánica: La estabilidad térmica y mecánica es crucial para su desempeño en aplicaciones de alta energía [23], [26].

b. Electrolitos de polímero en gel

Compatibilidad con materiales de electrodo: Optimizar la compatibilidad para mejorar el desempeño electroquímico [24].

Estabilidad química: La estabilidad química afecta directamente la vida útil y la capacidad de ciclo [23].

CONCLUSIONES

El desarrollo de materiales de cátodo y ánodo avanzados, junto con la optimización de los electrolitos, es crucial para mejorar el desempeño y la competitividad de las SIB en el mercado de almacenamiento de energía. La investigación y desarrollo continuos en estos aspectos abrirán nuevas oportunidades para aplicaciones a gran escala en el futuro.

Diversidad de materiales y diseños

La investigación en SIB ha demostrado la versatilidad de los materiales utilizados. Esta diversidad de materiales ofrece oportunidades para optimizar el rendimiento de las baterías en función de las necesidades específicas de las aplicaciones. Además, los avances en las formulaciones de electrolitos son esenciales para superar los desafíos y aprovechar todo el potencial de las SIB para diversas aplicaciones.

Desafíos técnicos pendientes

A pesar de los avances realizados, las SIB todavía enfrentan retos importantes, como la vida útil del ciclo, la seguridad y la densidad de energía. Estos desafíos requieren una atención continua en la investigación y el desarrollo para superar las limitaciones actuales y mejorar aún más el rendimiento de estas baterías.

Oportunidades para la innovación futura

Existe un amplio espacio para la innovación futura en el campo de las SIB. Se identifican áreas clave para la investigación, como la exploración de nuevos materiales, el diseño de electrolitos avanzados y la optimización de las técnicas de fabricación. Estas innovaciones tienen el potencial de impulsar aún más el desarrollo de SIB más eficientes y económicas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires por apoyar la iniciativa y brindar los recursos para el desarrollo de esta línea de investigación. Al Dr. Jorge de Celis, director del Laboratorio de Química Ambiental (LaQuiAmb), por el uso de las instalaciones. A la Dra. Ana Curcio, directora del Grupo Minerales Estratégicos (MinEs) por su constante apoyo y nuevas ideas. A la Dra. Valeria Romero por su apoyo en el desarrollo de

los ensayos experimentales; su colaboración y respaldo han sido fundamentales en la realización de esta revisión y en la futura continuación de la parte experimental de nuestra investigación.

REFERENCIAS

- [1] Tarascon, J.M. (2020). Na-ion versus Li-ion Batteries: Complementarity Rather than Competitiveness. *Joule*, 4 (8), 1616-1620. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.06.003>.
- [2] Yu, T.; Li, G.; Duan, Y.; Wu, Y.; Zhang, T.; Zhao, X.; Luo, M.; Liu, Y. (2023). The research and industrialization progress and prospects of sodium ion battery. *Journal of Alloys and Compounds*, 958, 170486. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170486>.
- [3] Eftekhari, A.; Kim, D.W. (2018). Sodium-ion batteries: New opportunities beyond energy storage by lithium. *Journal of Power Sources*, 395, 336-348. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.05.089>.
- [4] Nagmani; Pahari, D.; Verma, P.; Puravankara, S. (2022). Are Na-ion batteries nearing the energy storage tipping point? – Current status of non-aqueous, aqueous, and solid-state Na-ion battery technologies for sustainable energy storage. *Journal of Energy Storage*, 56 (A), 105961. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105961>.
- [5] Kumar, A.; Nagmani; Puravankara, S. (2022). Symmetric sodium-ion batteries- materials, mechanisms, and prospects. *Materials Today Energy*, 29, 101115. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2022.101115>.
- [6] Zhang, W.; Zhang, F.; Ming, F.; Alshareef, H.N. (2019). Sodium-ion battery anodes: Status and future trends. *EnergyChem*, 1 (2), 100012. <https://doi.org/10.1016/j.enchem.2019.100012>.
- [7] Liu, Q.; Hu, Z.; Zou, C.; Jin, H.; Wang, S.; Li, L. (2021). Structural engineering of electrode materials to boost high-performance sodium-ion batteries. *Cell Reports Physical Science*, 2(9), 100551. <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2021.100551>.
- [8] Li, H.; Zhang, X.; Zhao, Z.; Hu, Z.; Liu, X.; Yu, G. (2020). Flexible sodium-ion based energy storage devices: Recent progress and challenges. *Energy Storage Materials*, 26, 83-104. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.12.037>.
- [9] Mamoor, M.; Li, Y.; Wang, L.; Jing, Z.; Wang, B.; Qu, G.; Kong, L.; Li, Y.; Guo, Z.; Xu, L. (2023). Recent progress on advanced high energy electrode materials for sodium ion batteries. *Green Energy and Resources*, 1(3), 100033. <https://doi.org/10.1016/j.gerr.2023.100033>.
- [10] Bai, H.; Song, Z. (2023). Lithium-ion battery, sodium-ion battery, or redox-flow battery: A comprehensive comparison in renewable energy systems. *Journal of Power Sources*, 580, 233426. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233426>.

- [11] Hasa, I.; Mariyappan, S.; Saurel, D.; Adelhelm, P.; Kuposov, A.Y.; Masquelier, C.; Croguennec, L.; Casas-Cabanas, M. (2021). Challenges of today for Na-based batteries of the future: From materials to cell metrics. *Journal of Power Sources*, 482, 228872. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228872>.
- [12] Tomboc, G.M.; Wang, Y.; Wang, H.; Li, J.; Lee, K. (2021). Sn-based metal oxides and sulfides anode materials for Na ion battery. *Energy Storage Materials*, 39, 21-44. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2021.04.009>.
- [13] Li, M.; Du, Z.; Khaleel, M.A.; Belharouak, I. (2020). Materials and engineering endeavors towards practical sodium-ion batteries. *Energy Storage Materials*, 25, 520-536. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.09.030>.
- [14] Liang, J.; Wei, C.; Huo, D.; Li, H. (2024). Research progress on modification and application of two-dimensional anode materials for sodium ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 85, 111044. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111044>.
- [15] Guo, Z.; Qian, G.; Wang, C.; Zhang, G.; Yin, R.; Liu, W.D.; Liu, R.; Chen, Y. (2023). Progress in electrode materials for the industrialization of sodium-ion batteries. *Progress in Natural Science: Materials International*, 33(1), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2022.12.003>.
- [16] Huang, T.; Xue, X.; Zhang, Y.; Miao, Y.; Xiao, B.; Qi, J.; Wei, F.; Sui, Y. (2024). A review of metal sulfide cathode materials for non-aqueous multivalent ion (Mg^{2+} , Ca^{2+} , Al^{3+}) batteries. *Journal of Energy Storage*, 79, 110172. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.110172>.
- [17] Lakshmi, D.; Palaniandy, N.; Bohm, S.; Mamba, B.B. (2023). Understanding the mechanisms of mixed-ion cathode materials for aqueous and non-aqueous lithium/sodium-ion batteries – A review. *Current Opinion in Electrochemistry*, 38, 101217. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2023.101217>.
- [18] Shu, C.; Yuan, S.; Bao, X.; Wang, X.; Cui, G.; Liu, X.; Yu, L.; Wang, G.; Yang, Q.; Ma, Z.F.; Liao, X.Z. (2024). A ZIF-8 modified Prussian blue cathode material for sodium-ion batteries with long cycling life and excellent storage stability. *Electrochimica Acta*, 481, 143930. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.143930>.
- [19] Chen, J.; Wei, L.; Mahmood, A.; Pei, Z.; Zhou, Z.; Chen, X.; Chen, Y. (2020). Prussian blue, its analogues and their derived materials for electrochemical energy storage and conversion. *Energy Storage Materials*, 25, 585-612. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.09.024>.
- [20] Tyagaraj, H.B.; Marje, S.J.; Ranjith, K.S.; Hwang, S.K.; Ghaferi, A.A.; Chodankar, N.R.; Huh, Y.S.; Han, Y.K. (2023). Sodium-ion batteries: Charge storage mechanisms and recent advancements in diglyme-based electrolytes. *Journal of Energy Storage*, 74, 109411. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.109411>.
- [21] Alvira, D.; Antorán, D.; Manyà, J.J. (2022). Plant-derived hard carbon as anode for sodium-ion batteries: A comprehensive review to guide interdisciplinary research. *Chemical Engineering Journal*, 447, 137468. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.137468>.
- [22] Karuppasamy, K.; Lin, J.; Vikraman, D.; Hiremath, V.; Santhoshkumar, P.; Kim, H.S.; Alfantazi, A.; Maiyalagan, T.; Korvink, J.G.; Sharma, B. (2024). Towards greener energy storage: Brief insights into 3D-printed anode materials for sodium-ion batteries. *Current Opinion in Electrochemistry*, 45, 101482. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2024.101482>.
- [23] Mosallanejad, B.; Malek, S.S.; Ershadi, M.; Dar-yakenari, A.A.; Cao, Q.; Ajdari, F.B.; Ramakrishna, S. (2021). Cycling degradation and safety issues in sodium-ion batteries: Promises of electrolyte additives. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 895, 115505. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2021.115505>.
- [24] Vignarooban, K.; Kushagra, R.; Elango, A.; Badami, P.; Mellander, B.E.; Xu, X.; Tucker, T.G.; Nam, C.; Kannan, A.M. (2016). Current trends and future challenges of electrolytes for sodium-ion batteries. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41 (4), 2829-2846. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.12.090>.
- [25] Zhao, L.; Zhang, T.; Li, W.; Li, T.; Zhang, L.; Zhang, X.; Wang, Z. (2023). Engineering of Sodium-Ion Batteries: Opportunities and Challenges. *Engineering*, 24, 172-183. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.08.032>.
- [26] Santamaría, C.; Morales, E.; Del Rio, C.; Herradón, B.; Amarilla, J.M. (2023). Studies on sodium-ion batteries: Searching for the proper combination of the cathode material, the electrolyte and the working voltage. The role of magnesium substitution in layered manganese-rich oxides, and pyrrolidinium ionic liquid. *Electrochimica Acta*, 439, 141654. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2022.141654>.