

Views & Comments

钠离子电池——碳中和世界的储能技术

吴凯^a, Xinwei Dou^b, 张欣欣^{a,b}, 欧阳楚英^{a,b,c}^a Contemporary Amperex Technology Limited (CATL), Ningde 352100, China^b Fujian Science & Technology Innovation Laboratory for Energy Devices (21C Lab), Ningde 352100, China^c Department of Physics, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China

漫步在三都湾的岸边，看着蓝色的海洋和绿色的山脉，我想到了一个问题：我们如何在满足人类的能源需求的同时，最大限度减少其对环境的影响？换句话说，我们如何才能确保在不久的将来实现一个碳中和的世界？要想找出答案，我们需要在不同的方面进行许多努力，但有一件事是明确的：一个可持续和高效的储能系统是必要的。钠离子电池（SIB）作为锂离子电池（LIB）的补充技术，由于其独特的性能、低成本的优势和绿色的理念而受到了广泛的关注。此外，这些确切的特性使钠离子技术具有巨大的潜力来解决碳中和问题。

钠在电池技术中的应用史可以追溯到1968年，当时Ford小组发明了一种以Na-β"-Al₂O₃为固态电解质的高温Na-S电池[1]。当所谓的“摇椅”LIB被发现时，具有相同概念的SIB，几乎在同一时间开始被广泛研究。1981年，Delmas首次报道了NaCoO₂的钠化/再钠化行为，从而揭示了一种可用于SIB阴极的层状氧化物材料[2]。在过去的40年里，关于SIB阴极、阳极和电解质的新材料已经得到了充分的研究。随着越来越多的研究人员致力于这一领域探究，有关SIB的科学研究正保持着快速增长。由于这项研究的成果极其丰富而杰出，SIB终于接近商业化。

近年来，来自不同国家的公司和初创公司声称即将通过不同的技术路线图实现SIB的商业化。在英国，Faradion公司发布了以镍锰铁层状氧化物为阴极、以硬碳为阳极的棱柱状钠离子电池[3]。利用来自法国国家科学研究中心

(CNRS)的技术，法国初创公司Tiamat发布了18 650个圆柱形电池，以Na₃V₂(PO₄)₃为阴极和以硬碳为阳极，显示了在10 C下良好的速率能力[4]。在美国，Novasis公司与Sharp实验室合作，专注于普鲁士蓝阴极和硬碳阳极技术[5]。另一家美国初创公司Natron能源公司也开发了采用对称普鲁士蓝电极和水基电解质的快速充电钠离子技术[6]。同期，中国的研究所和公司也参与了SIB的研发，中科海钠科技有限责任公司开发了Cu-Fe-Mn层状氧化物阴极和软碳阳极的SIB，并成功地将其产品应用于第一个100 kW·h的SIB储能站[7]。浙江钠创新能源有限公司也专注于层状氧化物阴极，但含有Ni-Fe-Mn元素[8]。辽宁星空钠电电池有限公司正在研发普鲁士蓝阴极[9]。

研究人员根据其应用环境选择了不同类别的阴极材料。层状氧化物阴极容量较大，适用于电动汽车，而普鲁士蓝阴极因其良好的功率性能，非常适合小型储能发电站的要求。此外，聚阴离子阴极正显示出具有吸引力的长期能量存储能力。宁德时代新能源科技股份有限公司（CATL）于2021年7月发布了其第一代采用以普鲁士白色（Na₂Mn[Fe(CN)₆]）为阴极和硬碳为阳极的SIB（图1）；其产品的容量为160 W·h·kg⁻¹，具备优秀的快速充电和低温能力[10]。

在回顾了SIB令人兴奋的科研和工业进展之后，一个问题仍然存在：我们如何确定SIB是否是最适合碳中和时代的技术？答案就在上面回顾的文献中。值得注意的是，SIB技术中涉及的大多数元素（包括钠）含量丰富，成本

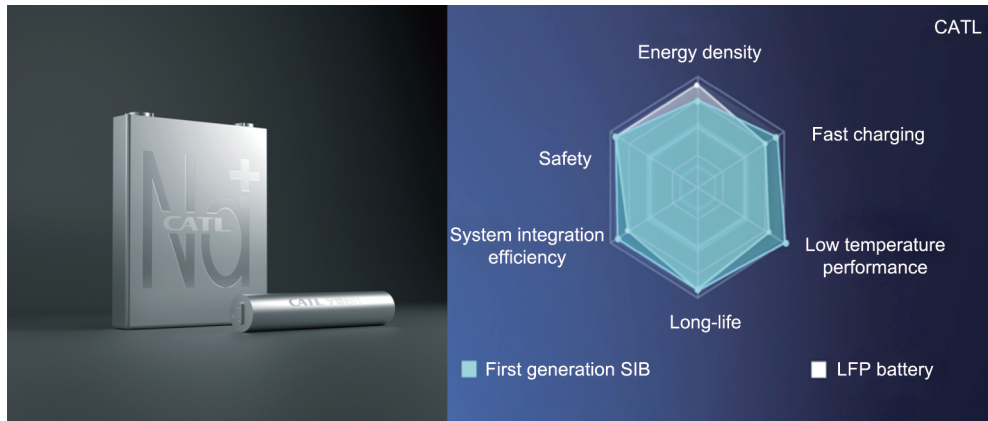


图1. CATL发布的首个具有高度竞争性能的SIB版本。LFP: LiFePO_4 。

较低。此外，铝（Al）集电极可以用于阳极和阴极两侧，以避免使用相对昂贵和稀有的铜（Cu）箔。因此，可以这样说，SIB技术的关键理念是低成本和可持续性。

虽然低成本的重要性在材料水平上很容易理解，但钠离子技术是否也能在系统层面上保持其成本优势可能会受到质疑。2018年，德国卡尔斯鲁厄理工学院（KIT）的一个研究团队进行了成本计算，结果显示SIB技术在未来成本方面具有显著优势，特别是在锂短缺和相关价格上涨的情况下[11]。根据我们的内部评估，当碳酸锂的材料成本达到约 $100 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时，SIB的成本优势将是不可忽视的。无论幸运还是不幸，锂的价格最近一直以难以置信的速度增长。

除了锂，钴是另一个可以使用SIB技术避免的关键元素。KIT研究表明[11]，如果所有的内燃机（ICE）车辆都被电池电动汽车（BEV）取代，我们可能有足够的锂，但只要所有的电化学能源单元都是基于锂技术，我们肯定会遇到钴短缺的问题。事实上，避免使用锂和钴的优势不仅与成本有关；有强有力的证据表明，SIB的供应链比LIB安全得多。锂和钴分别集中在南美洲和刚果。所谓的“石油输出国锂组织”正在阿根廷、玻利维亚和智利之间形成，镍最近表现出不合理的价格波动。最近的新闻清楚地表明，能源安全依赖于安全的供应链。

SIB的低成本和供应链安全都根植于其原材料的丰富。此外，SIB对环境的影响相对良好，这是它作为碳中和时代技术的另一个关键优势。最近的科学研究对SIB技术的不同方面进行了评估[12]，如关键材料的能源需求估计、电池层面的生命周期分析（LCA）和生产过程的兼容性。特别是通常根据LCA方法中的全球变暖潜力（GWP）产生的碳足迹已成为高度关注的焦点。为了满足碳中和的要求，有必要研究和了解整个SIB供应链的关键部件或各个方面的生命周期中排放的 CO_2 的当量值（eq.）。

一个更现实并与经济相关的动机是，更多的相关标准

或政策正在发布或正在制定中，而一项技术对环境的影响将影响其碳税或碳交易。《联合国气候变化框架公约》第26届缔约方大会（COP26）发布了《格拉斯哥气候公约》，指出“保持 $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 目标不变”[13]。在遏制全球变暖的目标上取得的这一重大成就使整个世界肩负起更多的责任，从而为电池行业提供了巨大的动力。欧洲议会在2020年提出了一项关于电池的新法规草案，要求到2024年之前标明容量超过 $2 \text{ kW}\cdot\text{h}$ 的电池的碳足迹。在本文发表的年份（2022年），欧洲议会又发布了《企业可持续发展尽职调查指令》的提案草案，以检查员工权利和环境影响的记录[14]。中国也在2020年发布了第二版《新能源汽车路线图》。与第一版的路线图相比，新版本中已经强调了“低碳排放”的概念[15]。为了支持碳中和，甚至仅仅是考虑遵守即将到来的政策和法规的最低要求，非常有必要及时进行电池价值链碳足迹验证和验证方法研究。

由于其低成本和可持续性的优势，SIB被认为是一种非常有前途的储能技术，特别是在风能和光伏发电领域。考虑到其安全供应链，SIB对A级BEV的兼容性较高；特别是随着电池交换方案（更换放电模块电池）的成熟，如CATL的EVOGO电池交换方案，SIB可以作为Choco-SEB（交换电块）工作，允许不同功能单元的灵活组合（图2）。

钠离子在常规电解质中也比锂离子表现出更高的脱溶出能力[16]；因此，再加上硬碳阳极和普鲁士白阴极的独特结构，SIB在电池水平上表现出优异的功率能力。因此，SIB被认为是电力应用如叉车、电动工具以及 $12 \text{ V}/48 \text{ V}$ 启动、点火、照明和点火（SLI）电池的理想候选者。与传统的电力应用技术铅酸电池相比，SIB具有更长的使用寿命（8年以上 vs 2年）和更高的能量密度（ $160 \text{ W}\cdot\text{h}\cdot\text{kg}^{-1}$ vs $40 \text{ W}\cdot\text{h}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）。随着汽车的智能程度越来越高，动力电池在汽车功能中所占的比例将越来越大；因此，动力电池

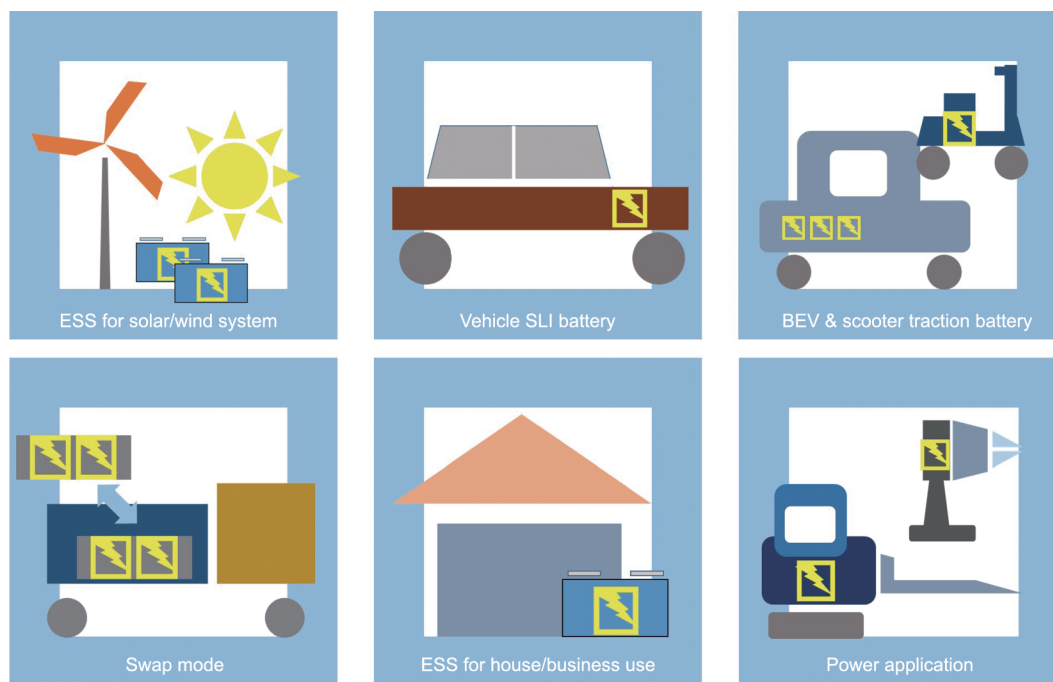


图2. SIB可能的应用包括用于风能/太阳能发电站和住宅/商业的能源存储系统 (ESS)、车辆的启动、照明和点火 (SLI) 电池、A级BEV和摩托车的牵引电池、交换模式以及叉车和电动工具等电力应用。

将需要更多的能源。通过这种方式，SIB为未来的车辆智能概念提供了更多的空间。

钠离子技术的商业化过程绝不是单个公司的独角戏；相反，它将需要整个价值链的充分协调。据谨慎估计，到2025年，SIB的需求量至少会有50 GW·h。为了实现这一目标，必须在不久的将来建立一个成熟的、经济的原材料供应链。这为市场上的所有参与者提供了一个重要的机会，同时也存在着相应的高风险。因此，我们期待市场以更加宽容和理性的态度来看待这项新技术。没有一种电池技术能够满足不同应用的所有需求，所以每一种技术都可以在特定的利基市场上有自己的一席之地。在全社会的努力下，我们相信SIB将很快为加速实现世界碳中和做出贡献。

致谢

感谢国家自然科学基金项目(12174162、51962010)的资助。

References

[1] Yu Yao YF, Kummer JT. Ion exchange properties of and rates of ionic diffusion in beta-alumina. *J Inorg Nucl Chem* 1967;29(9):2453–75.

[2] Delmas C, Braconnier J, Fouassier C, Hagenmuller P. Electrochemical intercalation of sodium in Na_xCoO_2 bronzes. *Solid State Ion* 1981;3–4:165–9.

[3] Transport applications [Internet]. Sheffield: Faradion; c2011–2022 [cited 2022 Mar 30]. Available from: <https://faradion.co.uk/applications/transportapplications/>.

[4] TIAMAT—powerful, chargefast, enduring cells thanks to sodium-ion [Internet]. Amiens: TIAMAT; c2021 [cited 2022 Mar 30]. Available from: <http://www.tiamat-energy.com/en/>.

[5] Bauer A, Song J, Vail S, Pan W, Barker J, Lu Y. The scale-up and commercialization of nonaqueous Na-ion battery technologies. *Adv Energy Mater* 2018;8(17):1702869.

[6] Solutions for EV fast charging [Internet]. Santa Clara: Natron Energy; c2012–2021 [cited 2022 Mar 30]. Available from: <https://natron.energy/ev-fastcharging>.

[7] Na-ion [Internet]. Liyang: HiNa BATTERY; c2017 [cited 2022 Mar 30]. Available from: <https://www.hinabattery.com/en/index.php?catid=12>.

[8] Coreproducts [Internet]. Shaoxing: NATRIUM; c2017 [cited 2022 Mar 30]. Available from: <http://natriumenergy.cn/Content/1984004.html>.

[9] Wang W, Gang Y, Hu Z, Yan Z, Li W, Li Y, et al. Reversible structural evolution of sodium-rich rhombohedral Prussian blue for sodium-ion batteries. *Nat Commun* 2020;11(1).

[10] Sodium-ion battery launch event [Internet]. Ningde: Natron Energy; 2021 Jul 29 [cited 2022 Mar 30]. Available from: <https://www.catl.com/technologybrand/6251.html>.

[11] Vaalma C, Buchholz D, Weil M, Passerini S. A cost and resource analysis of sodium-ion batteries. *Nat Rev Mater* 2018;3(4):18013.

[12] Peters J, Buchholz D, Weil M, Passerini S. Life cycle assessment of sodium-ion batteries. *Energy Environ Sci* 2016;9:1744.

[13] Glasgow Climate Pact. Proposal by the President [Internet]. New York City: United Nations; 2021 Jul 29 [cited 2022 Mar 30]. Available from: <https://unfccc.int/documents/311127>.

[14] CommissionEuropean. Proposal for a regulation of the European Parliament and of the Council concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation EU) No 2019/1020. Brussels, COM 798/3 (2020).

[15] China Society of Automotive Engineers. Energy-saving and new energy vehicle technology roadmap 2.0. Reports. Beijing: China Society of Automotive Engineers; 2020 Oct.

[16] Babu CS, Carmay L. Theory of ionic hydration: insights from molecular dynamics simulations and experiment. *J Phys Chem B* 1999;103(37):7958–68.