

储能钠电池技术发展的挑战与思考

胡英瑛¹, 吴相伟¹, 温兆银¹, 侯明², 衣宝廉²

(1. 中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 200050; 2. 中国科学院大连化学物理研究所, 辽宁大连 116023)

摘要: 储能安全是国家能源安全的重要方面, 是国民经济发展的关键支撑, 对国家安全、可持续发展以及社会稳定具有重要的影响。钠电池技术兼具高功率密度、高能量密度、低成本以及高安全性等优势, 成为一类重要的大规模储能技术。本文重点介绍了包括钠硫电池和钠-金属氯化物电池等在内的典型钠电池体系的技术优势和应用场景, 并通过分析钠电池技术在国内外的发展与应用现状提出了我国钠电池技术可能的发展方向并给出了相应的建议, 包括支持储能钠电池相关材料科学的研究和工程化技术攻关、推动储能钠电池相关上下游产业的聚集发展、建立健全储能钠电池的相关标准和性能评价平台等措施, 以提升我国储能钠电池技术的研发水平和技术成熟度, 为我国的能源安全建设带来新的可靠选择。

关键词: 电化学储能; 钠电池; 钠硫电池; 钠-金属氯化物电池; ZEBRA 电池

中图分类号: TM911 **文献标识码:** A

Challenges and Thoughts on the Development of Sodium Battery Technology for Energy Storage

Hu Yingying¹, Wu Xiangwei¹, Wen Zhaoyin¹, Hou Ming², Yi Baolian²

(1. Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China; 2. Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, Liaoning, China)

Abstract: Energy storage safety is an important component of national energy security and economic development; it has significant impacts on national security, sustainable development, and social stability. The sodium battery technology is considered as one of the most promising grid-scale energy storage technologies owing to its high power density, high energy density, low cost, and high safety. In this article, we highlight the technical advantages and application scenarios of typical sodium battery systems, including sodium-sulfur batteries and sodium-metal chloride batteries. Moreover, we propose the possible development directions of sodium battery technology in China. Furthermore, we suggest supporting the fundamental research and engineering development for sodium batteries, promoting the aggregation of related upstream and downstream industries, and establishing related standards and a performance evaluation platform. These aim to improve the R&D level and technology maturity of China's sodium battery technologies and provide alternative and reliable choices for the safe energy supply in China.

Keywords: electrochemical energy storage; sodium battery; sodium-sulfur battery; sodium-metal chloride battery; ZEBRA battery

收稿日期: 2021-03-26; **修回日期:** 2021-08-30

通讯作者: 温兆银, 中国科学院上海硅酸盐研究所研究员, 主要从事碱金属基化学电源的基础和工程化应用研究;
E-mail: zywen@mail.sic.ac.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“中国储能发展战略研究(2035)”(2019-ZD-20)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

2017 年 10 月, 国家发展和改革委员会、国家能源局等五部委联合出台了《关于促进我国储能技术与产业发展的指导意见》, 指出加快储能技术与产业发展, 对于构建“清洁低碳、安全高效”的现代能源产业体系具有重要的战略意义。这一政策的出台直接推动了“十三五”期间我国储能产业的蓬勃发展。随着“十四五”期间“双碳”目标的提出, 2021 年 4 月, 国家发展和改革委员会、国家能源局再次联合发布了第二部针对储能产业的国家级综合性政策文件《关于加快推动新型储能发展的指导意见(征求意见稿)》, 明确提出到 2025 年, 实现 3×10^7 kW 的储能目标, 实现储能跨越式发展; 到 2030 年, 实现新型储能全面市场化发展。《关于加快推动新型储能发展的指导意见(征求意见稿)》还指出, 储能技术要以需求为导向, 坚持多元化发展, 这为储能技术的发展明确了目标和方向。目前, 储能系统从发电侧、输配电侧到用户侧的一系列支撑服务逐渐成为弹性和高效电网的重要组成部分 [1]。较小型的分布式储能系统今后也将更广泛地在家庭、企业和通信基站中推广应用。

我国储能呈现多元化发展的良好态势: 抽水蓄能发展迅速, 锂离子电池储能技术成熟度飞速提高, 压缩空气储能、飞轮储能、超导储能和超级电容、钠硫电池、液流电池、铅蓄电池等储能技术研发应用加速, 储氢、储热、储冷技术也取得了一定进展。其中, 电化学储能(或二次电池储能)技术相对于水电、火电等常规功率调节手段具有较大技术优势: 响应时间为毫秒级, 跟踪负荷变化能力强, 便于精确控制; 对实施的地理环境要求较低; 具有削峰填谷的双向调节能力。2021 年 4 月, 中关村储能产业技术联盟(CNESA)发布的《储能产业研究白皮书 2021》显示, 截至 2020 年年底, 中国已投运储能项目累计装机规模 35.6 GW, 占全球市场总规模的 18.6%, 同比增长 9.8%, 其中电化学储能的累计装机规模仅次于抽水蓄能, 位列第二。

目前, 各种电化学储能技术的基本特征和成熟度各不相同, 每一种技术都有不同的数量在全球不同的地点进行部署。包括锂离子电池、钠硫电池、钠-金属氯化物电池、液流电池和铅酸电池在内的 5 类电池技术已经被认为是较可靠的能源供应

体系, 在全球范围内有兆瓦级的装机规模。2017 年以来, 锂离子电池急剧发展, 占据了中国和美国储能市场绝大部分份额, 技术成熟度不断提高。随着越来越多锂电储能系统的部署, 安全事故的风险也随之增加, 尤其是电池热失控导致的安全事故频发引起了人们的重视和担忧。2019 年, 国家电网有限公司发布《关于促进电化学储能健康有序发展的指导意见》, 意见强调要严守储能安全红线。不仅如此, 锂等元素昂贵, 地壳中含量少且分布极不均匀, 对于长期规模化应用而言可能会成为一个重要问题。钠元素和锂元素有相似的物理化学特性, 且在地壳中储量丰富, 资源分布广泛, 因此发展针对规模化储能应用的储能钠电池技术具有重要的战略意义, 近年来得到研究者的广泛关注。已经在储能领域规模化应用的钠电池体系主要包括两种, 即基于固体电解质体系的高温钠硫电池和钠-金属氯化物电池体系。它们的负极活性物质均为金属钠, 更准确地被称为钠电池。钠离子电池通常指有机体系钠离子电池, 由于其技术水平提升较快, 成为极有前景的储能电池之一。目前全球从事钠离子电池工程化的公司已有 20 家以上。最近, 中国科学院物理研究所与中科海钠科技有限责任公司联合推出的 1 MWh 钠离子电池光储充智能微网系统在山西太原投入运行。宁德时代新能源科技有限公司(CATL)近期也发布了他们的第一代钠离子电池, 能量密度达到 160 Wh/kg。然而钠离子电池尚未在储能产业上大规模推广, 其应用优势有待验证。水系钠离子电池具有环保、低成本、制造方便、安全性好、易回收等优点, 但是存在电压窗口较低、电极材料副反应等严重影响寿命的问题。因此, 本文主要针对大规模储能用安全性改善的钠硫电池和钠-金属氯化物电池储能钠电池体系进行综述和研究。

二、储能钠电池技术概述

(一) 钠硫电池

钠硫电池是一种基于固体电解质的高温二次电池, 它以钠作为阳极, 以渗入碳毡中的硫作为阴极, 传导钠离子的 β'' -氧化铝陶瓷在中间同时起隔膜和电解质的双重作用 [2]。它的电池形式为 $(-)\text{Na} \mid \beta''\text{-Al}_2\text{O}_3 \mid \text{S}/\text{Na}_2\text{S}_x \mid \text{C} (+)$, 其中 $x=3\sim 5$, 基本的电池反应是: $2\text{Na}+x\text{S} \leftrightarrow \text{Na}_2\text{S}_x$ 。电池的工作温

度控制在 300~350 °C，此时钠与硫均呈液态，β"-氧化铝具有高的离子电导率 (~0.2 S/cm)，电池具有快速的充放电反应动力学。钠硫电池以 Na₂S₃ 为最终产物的正极理论比容量约为 558 mAh·g⁻¹，在 350 °C 的工作温度下具有 2.08 V 的开路电压。

钠硫电池一般设计为中心负极的管式结构，即钠被装载在陶瓷电解质管中形成负极。电池由钠负极、钠极安全管、固体电解质（一般为 β"-氧化铝）及其封接件、硫（或多硫化钠）正极、硫极导电网络（一般为碳毡）、集流体和外壳等部分组成。通常固体电解质陶瓷管一端开口一端封闭，其开口端通过熔融硼硅酸盐玻璃与绝缘陶瓷进行密封，正负极终端与绝缘陶瓷之间通过热压铝环进行密封。

钠硫电池拥有许多优良的特性 [3]：①比能量高。目前，钠硫电池的实际能量密度已达到 240 Wh/kg 和 390 Wh/L 以上，与三元锂离子电池相当。②功率密度高。用于储能的钠硫单体电池功率可达到 120 W 以上，形成模块后，模块功率通常达到数十千瓦，可直接用于储能。③长寿命。电池可满充满放循环 4500 次以上，寿命为 10~15 年。④库伦效率高。由于采用固体电解质，电池几乎没有自放电，充放电效率约为 100%。⑤环境适应性好。由于电池通过保温箱恒温运行，因此环境温度适应范围广，通常为 -40~60 °C。⑥电池运行无污染。电池采用全密封结构，运行中无振动、无噪声，没有气体放出。⑦电池原料成本低廉，无资源争夺隐患，结构简单，维护方便。

（二）钠-金属氯化物电池

钠-金属氯化物电池（也称 ZEBRA 电池）可与钠硫电池统称为钠-beta 二次电池，其结构与钠硫电池类似，负极是液态的金属钠，β"-Al₂O₃ 陶瓷作为固态电解质，不同的是，ZEBRA 电池工作温度略低，为 270~320 °C，正极部分由液态的四氯铝酸钠 (NaAlCl₄) 辅助电解液与固态的金属氯化物组成，其中氯化镍的应用研究最为广泛。钠-氯化镍电池的基本电池反应是： $2\text{Na} + \text{NiCl}_2 \leftrightarrow 2\text{NaCl} + \text{Ni}$ ，300 °C 下开路电压为 2.58 V。

与钠硫电池类似，钠-金属氯化物电池同样具有长寿命、库仑效率高、环境适应性好、无污染运行等特点。钠-金属氯化物电池的实际比能量偏

低，为 110~140 Wh/kg，但仍是铅酸电池的 3 倍左右，而且还具有其他一些值得关注的优良特性 [4]：①高安全性。钠-金属氯化物电池具有短路温和放热和过充过放可逆等特点，确保电池在电气和机械滥用时的高安全性。②无钠组装。电池以放电态组装，仅在正极腔室装填金属粉体、氯化钠和电解液，制造过程安全性高。③高电压。开路电压较钠硫电池提高 20% 以上。④维护成本低。电池内部短路时特有的低电阻损坏模式大大降低了系统的维护成本。

（三）储能钠电池生产制造的核心技术

高温钠硫电池电芯的核心技术包括了 β"-氧化铝精细陶瓷的烧制、电池密封技术、负极润湿保护管设计、正极外壳防腐蚀和正负极装填技术等。首先，β"-氧化铝精细陶瓷的质量和一致性深刻影响电池的电化学性能和安全特性，是最为关键的一环。其次，任何一个密封部件的损坏都会导致正负极材料的蒸汽直接接触而发生反应，因此电池密封技术成为钠硫电池的核心技术之一。再次，熔融硫和多硫化钠对金属具有强腐蚀性，因此包括作为正极集流体的外壳在内的接液部件的防腐蚀技术也是钠硫电池实用化的关键。最后，电池正负极的有效装填及其与固体电解质之间界面的润湿层设计是电池高性能运行的必备要素。相对于钠硫电池，钠-氯化镍电池电芯无须对外壳进行防腐蚀处理，但是正极长循环稳定技术成为电池的核心技术之一。

高温钠电池模组的核心技术包括了绝热保温箱技术、模组热管理技术、模组内/间阻燃技术以及电池管理系统与保护电路设计等。电池的高温运行环境对电池保温箱提出了较高的要求。绝热保温箱技术一方面需要保证电池在待机时的低电耗，另一方面还要保证保温箱轻量化，以提升电池整体的能量密度。由于电池放电模式下的化学反应为放热反应，此时模块内部将出现 22~35 °C 的升温，而充电过程中温度会下降到待机水平。长时间的升降温循环不仅考验电池密封材料的热机械性能，还对模块的热管理提出了快速响应的要求，否则可能造成温度无法及时复原。另外，模组内/间防火技术以及电池管理系统与保护电路设计对电池的长期安全运行也具有重要意义。

三、储能钠电池的应用需求

储能钠电池可针对极端环境（如高热、高寒、高盐腐蚀等）下的风能、太阳能等可再生能源发电企业配套大容量、安全可靠的储能系统；为载人潜艇、陆军战车、水下平台等提供动力，服务国防科技事业；为第五代移动通信技术（5G）通信基站、数据中心等室内用电大户提供备用电源，为国家的节能减排事业及“碳中和”战略做出贡献。储能钠电池的应用领域为锂离子电池技术提供有益补充，其主要的应用场景如下。

（一）极端环境应用

随着全球气候变暖，国内外 50℃ 以上的高温天气频繁，亚热带和热带地区更是如此。电池的高温运行需求逐渐受到重视。油气勘探的井下温度可超过 170℃，能耐受如此高温的电池很少，目前井下仪器的电能供应采用的是锂一次电池 [5]。军用电池需要适应多种恶劣的应用环境，被要求在 -50~70℃ 的温度范围内正常工作。作为下一代无线通信体系的重要组成，高空平台通信系统是位于平流层的高空平台向上连接卫星、向下连接低空无人机和地面节点，作为空中基站或中继节点，提供快速、稳定、灵活的应急通信系统。高空平台通信系统运载器是一个保持在 20 km 高度并停留 5 年时间的静止平台。运载器所需能源由太阳能电池板提供，对其所搭载的储能电池要求高比能 (>110 Wh/kg)、性能的高可靠性和稳定性 (>5 年寿命和性能降低 <10%) 和超低温运行 (-55℃) [6]。另外，海岛、近海等高盐雾环境也限制了大量电池体系的应用。

研究表明，锂离子电池在无人机上的应用受到高低温环境的极大限制 [7]。电池正常使用温度范围是 -15~50℃。低温条件下，锂离子电池面临的锂枝晶问题和离子扩散迟缓问题会更加严重，高温条件则会加速锂离子电池阴极固液界面的副反应和电解液退化，引发严重的热失控 [8]。事实上，传统的液体电解质基二次电池难以满足极端高低温应用需求。具有较高的能量密度、10 年以上运行寿命和对环境温度不敏感等特性的固体电解质基钠硫电池和钠-氯化镍电池则被证明非常适合极端高低温的应用场景。在热带沙漠气候的阿拉伯联合酋长国，钠硫电池被认为是比锂离子电池

更优异的储能技术。在日本，钠硫电池被选择成为火箭发射场的备用电源。ZEBRA 电池作为高低温下可靠耐用的二次电池，目前已成为井下设备电源的优选方案 [5]，同时也针对高空平台通信系统运载器开展应用示范 [6]。

（二）高安全应用

高安全应用场景指发生安全事故时难以止损或事故代价大的应用场景。近年来，随着大数据、物联网、云计算等技术的发展，大型数据中心的建设速度激增，运营规模也越来越大。然而，一方面，数据中心需要大量的电能来维持正常运营，电力成本成为数据中心的重要成本组成。通过智能微网的建设来降低能耗已成为各大数据中心运营公司降本增效的重要途径。另一方面，数据中心需要配备非常安全可靠的备用电源以应对不时之需。大型数据中心等室内储能或备用电源高安全应用场景对其储能系统的安全性提出了更高的要求。交通运输领域的危化品运输车、地下装载机等交通工具以及水下应用领域的载人潜水器、深海平台用电源等也对电源安全性提出了更高的要求。

ZEBRA 电池作为一种电化学本征安全的电池体系，在高安全要求的领域具有其独特优势。它曾被选为英国和北约 LR7 型深潜救生艇的动力电源 [5]。2013 年，通用电气有限公司 (GE) 生产的 ZEBRA 电池成功地为 Coal River Energy 公司位于美国西弗吉尼亚州明矾溪的采矿铲车提供动力支撑 [9]。在储能安全越来越受重视的今天，ZEBRA 电池体系将会有更大的发展空间。

（三）长时储能

长时电化学储能能够更加灵活地以半天甚至几天的时间跨度来管理风能和太阳能的间歇性，将可再生能源转化为全天候资源，为无碳电网铺平道路。随着可再生能源份额的增长，更大的挑战将是在数周或数月的时间跨度上消除可再生能源产量的可变性。发展长时储能技术势在必行。近年来，锂离子电池在新型储能建设中占据绝对主导地位，但它们的供电持续时间很少能超过 4 h。虽然锂离子电池在技术上可以实现更长时间的放电，但是出于资源稀缺和安全性的考虑，将它用于长时储能的成本通常高于它的价值。

钠硫电池已在全球范围内提供容量超过 540 MW/3780 MWh 的储能系统，显示了有效的调峰、负载均衡和节能减排的能力，被认为是最有效的额定输出 6 h 以上的长时电化学储能电池之一 [10]。同时，钠硫电池具有模块化扩展的特性，有潜力提供 8 h 以上或更长时的供电系统。意大利非凡蓄电池公司 (FIAMM) 生产的 ZEBRA 电池在欧洲的意大利、法国以及南美洲的圭亚那等地区部署了多个兆瓦级的储能电站。这些电站的运行情况证实用于大规模电化学储能的高安全性钠-氯化镍电池技术已经成熟 [11]。

四、储能钠电池的国内外发展与应用现状

(一) 钠硫电池在国内外的发展与应用现状

虽然钠硫电池早期在国内外航空航天和电动汽车等领域开展应用示范，但是钠硫电池的储能商业化运作始于 1983 年日本碍子株式会社 (NGK 公司) 和东京电力公司的合作，开发用于静态能量存储的钠硫电池储能系统。2002 年，NGK 公司正式量产钠硫电池，并通过东京电力公司开发储能系统投入商业运行，目前在全球运行了超过 200 个储能电站

项目，4 GWh 以上的钠硫电池储能系统 [10]。然而，2011 年 9 月，东京电力公司为三菱材料株式会社筑波厂安装的钠硫电池 (NGK 生产) 系统发生火灾，这一事件在一定程度上造成了业界对于钠硫电池安全性的担忧。其后，NGK 先对正在运行的钠硫电池电站的模组和系统进行安全隐患维护，并对新生产的电池在电芯层面和模块层面同时采取了多种提高安全保障的新措施 [12]。通过采取一系列应对举措后，从 2013 年开始，NGK 生产的钠硫电池在日本、阿联酋和欧洲等国家和地区持续有大型储能项目上线。2016 年 3 月，NGK 公司和九州电力株式会社共同推出的 50 MW/300 MWh 钠硫电池储能系统改善电力供需平衡的示范项目开始运行，是当时全球最大的大容量储能电站 (见图 1a) [10]。2019 年，NGK 在阿布扎比酋长国完成的一个项目使用了 108 MW/648 MWh 的钠硫电池储能系统，持续放电时间达 6 h。图 1b 显示的是应用于意大利南部高压电网的 34.8 MW 钠硫电池储能电站的局部照片 [12]。在意大利，钠硫电池的电芯和模块经过了严谨的风险评估，包括内源性短路和外源性火灾、地震、洪水、直接和间接闪电、蓄意破坏、高空坠落等滥用场景。评估结果显示，经



(a) 日本 50 MW/300 MWh 钠硫电池储能系统



(b) 意大利南部高压电网的 34.8 MW 钠硫电池储能电站



(c) 2010 年上海世界博览会上展示的 100 kW/800 kW 钠硫电池储能系统



(d) 崇明岛风电场兆瓦时级的商业应用示范

图 1 钠硫电池储能系统 / 电站的商业应用实例

过安全性提升的钠硫电池技术具有较高的安全可靠性和 [13]。

近些年, 钠硫电池技术在日本以外的其他国家也得到了应用研究和推广, 包括美国、中国、韩国、瑞士等。2006 年, 由中国科学院上海硅酸盐研究所 (SICCAS) 与上海电力公司合作开展用于大规模储能应用的钠硫电池研究。SICCAS 开发的 30 Ah 和 650 Ah 两种规格钠硫单体电池具有良好的循环稳定性, 寿命超过 1200 次 [14]。此后, 一条年产能 2 MW 的 650 Ah 单电池中试生产线建成。2010 年上海世界博览会期间, 中国科学院上海硅酸盐研究所和上海电力公司合作, 实现了 100 kW/800 kW 钠硫电池储能系统的并网运行 (见图 1c)。2011 年 10 月, 上海电气集团与中科院上海硅酸盐研究所以及上海电力公司签订合资合同, 成立上海电气钠硫储能技术有限公司, 开始钠硫电池的产业化开发。2015 年, 上海钠硫电池储能技术有限公司在崇明岛风电场实现了兆瓦时级的商业应用示范 (见图 1d)。中科院固体物理研究所近年也突破了 β - Al_2O_3 陶瓷的制备技术, 掌握了陶瓷烧结、陶瓷玻璃封接、金属与陶瓷连接等核心技术, 目前处于钠硫电池组研制的中试阶段。除此之外, 韩国浦项产业科学研究院 (RIST) 针对平板和管式钠硫电池进行较为系统的工程化开发 [15]。RIST 从 2005 年开始申请钠硫

电池材料与制造的专利, 目前持有 53 项以上相关有效专利。

(二) 钠-金属氯化物电池在国内外的现状

美国通用电气有限公司于 2007 年购买了英国 beta R & D 公司的 ZEBRA 电池技术, 建立 “Durathon” 电池品牌, 经过 11 年研发, 投入资金超过 4 亿美元。早期主要面向车用, 图 2a 为装载 Durathon 动力电池的矿车。目前 GE 在全球多个国家和地区的电网和电信领域运行了总计 15 MW 以上、30 余个 ZEBRA 电池储能项目。图 2d 分别为 Durathon 扩展储能系统。2017 年 1 月, 超威电池与 GE 开展技术合作, 合资成立浙江绿能 (安力) 能源有限公司, 进军国内储能电池市场。

2010 年, 与 GE 拥有同一技术源头的 MES-DEA 公司和 FIAMM 成立新公司 FZ SONICK SA, 并推出了 SONICK 商标的 ZEBRA 电池, 主要应用在电动车、备用电源等领域。2015 年, FZ SONICK 的 ZEBRA 电池储能解决方案被德国航空和运输领域的跨国公司庞巴迪公司选中, 为 Innovia Monorail 300 平台列车项目提供备用电源服务 [16]。图 2b 和图 2e 分别为 SONICK 电池应用于微网储能及其储能单元的情况。FZ SONICK 还为萨沃纳大学校园

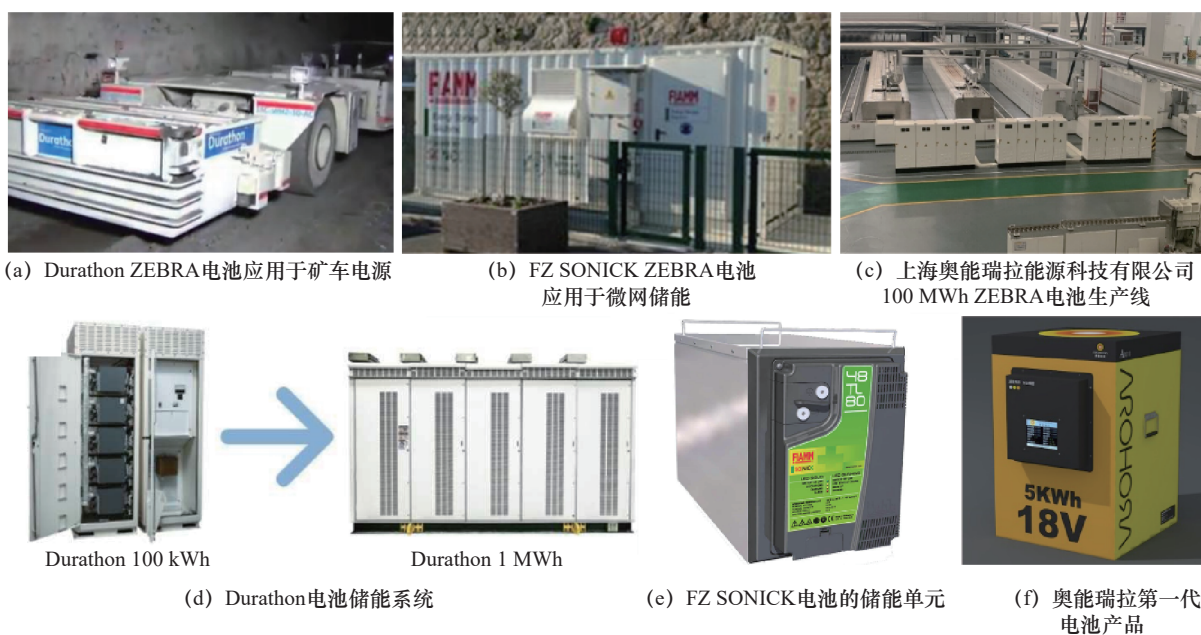


图 2 钠-金属氯化物电池储能产品及其商业应用实例

提供了智能电网储能系统 [17]。从 2016 年开始，德国弗劳恩霍夫陶瓷技术与系统研究所（IKTS）也在 ZEBRA 电池上持续投入。2019 年 3 月，欧洲储能展会上，IKTS 展示其最新开发的“Cerenergy”陶瓷钠-氯化镍高温电池。该型号的钠镍电池容量为 5 kWh，由 20 个单电池组成，每千瓦时成本将低于 100 欧元。2015 年 11 月，作为 SunShot 聚光太阳能发电阿波罗计划的子计划，美国能源部提供犹他州盐湖城 Ceramtec 公司和乔治亚技术研究所总计 234.878 万美元经费支持，重点开发聚光太阳能高温熔盐钠盐蓄电模块，预计实现 92% 以上的蓄电效率目标。同时，美国西北太平洋国家实验室在美国能源部支持下持续开展平板型钠盐电池的产业化研发。在国内，从 2014 年开始，中国科学院上海硅酸盐研究所在前期钠硫电池和钠镍电池的研发基础上，开展钠镍电池产业化的推进工作。2017 年，中国科学院上海硅酸盐研究所参股成立上海奥能瑞拉能源科技有限公司，开展钠镍电池产业化开发。如图 2c 和图 2f，目前该公司已完成年产 100 MWh 的钠镍电池工厂的全线调试，进入第一代产品的试生产阶段。

五、我国储能钠电池发展面临的挑战

储能钠电池在电力系统和电信系统具有极大的应用优势，并得到全球储能市场的普遍认可，但是由于其技术难度大，目前储能钠电池的成熟技术在全球范围内仅由日本 NGK、美国 GE、意大利 FIAMM 等几家企业掌握，我国储能钠电池的发展还面临以下诸多挑战。

（一）储能钠电池技术几乎被国外垄断

近年来，中国科学院上海硅酸盐研究所在储能钠电池的相关领域开展了技术革新和示范应用，基本掌握了钠硫电池和钠镍电池的全套技术，形成了具有自主知识产权的储能钠电池完整技术路线，但是总体而言，我国自主知识产权储能钠电池的技术成熟度不高，规模化生产设备需要高代价的定制，尚未形成储能钠电池的成熟产品体系。超威集团引进美国 GE 的成熟技术，进行储能钠电池国产化的尝试也尚未在国内外市场打开局面，根本原因是我国储能钠电池的发展目前仍然只能依赖和引进日

本和美国公司的技术，尚不具备独立开发新一代储能钠电池的能力，技术革新的速度无法应市场的需求。

（二）储能钠电池上下游产业链供给不足导致高成本

储能钠电池的高温技术瓶颈极大地限制了涉足储能钠电池开发的研究院所和企业的数量，导致储能钠电池在产业链的推动上困难重重。经过测算，1 GWh 钠-氯化镍电池生产线上生产电池的成本约为 1050 元/度电，当生产线产能提高至 10 GWh，电池成本可降至 800 元/度电以下。然而，目前储能钠电池的生产规模不足以带动上下游产业链的快速发展。NGK、GE 等公司同样面临电池成本偏高的困境。对我国而言，储能钠电池中钠硫电池的含耐腐蚀涂层的集流体外壳等零部件、钠-氯化镍电池的关键原材料 T255 镍粉（英国 Inco 公司）还依赖进口，国产化替代方案缺失。储能钠电池的中温运行环境对保温箱等下游供应的要求较高，但我国尚没有类似产品开发。储能钠电池上下游产业链供给不足成为推动储能钠电池技术发展和成本降低的一大障碍。

（三）储能钠电池的评估检测标准和评估平台缺失

1998 年，美国能源部国家可再生能源实验室就钠盐电池的健康状态、滥用安全特性和回收处理办法出具了说明书式的研究报告 [17]。2017 年，FIAMM SoNick 公司根据美国标准 UL 9540A 对 ZEBRA 电池产品进行了安全性测试，从单芯、模组和电池单元架三个层面进行了系统的安全性能评估。2018 年，电气与电子工程师协会（IEEE）出台了编号为 IEEE Std 1679.2—2018，标题为“静态储能应用中钠 -beta 电池的表征和评估指导”的指导性标准。该标准为静态储能应用的用户评估钠 -beta 电池的性能、安全性，以及进行合格评估测试和监管等问题提供了指导。这些研究报告和标准的建立很大程度上促进了美国和欧洲等国家和地区储能钠电池的规范化和市场化。由于我国储能钠电池的产业化处于初级阶段，相关评估检测标准缺失，相应的评估平台和评估机构尚不支持储能钠电池的性能和安全性评估，这也成为储能钠电池产业大步推进的障碍之一。

六、对策建议

(一) 支持储能钠电池相关材料科学的研发和工程化技术攻关

从国外的发展经验来看, 储能钠电池最初的很多成果出自国家能源部门或能源用户部门牵头组织的应用研发和技术攻关。2020 年 1 月, 教育部、国家发展和改革委员会、国家能源局联合制定了《储能技术专业学科发展行动计划(2020—2024 年)》(简称《行动计划》), 旨在立足储能产业发展重大需求, 统筹整合高等教育资源, 加快发展储能技术学科专业, 加快培养储能领域“高精尖缺”人才, 破解共性和瓶颈技术, 增强产业关键核心技术攻关和自主创新能力, 以产教融合发展推动储能产业高质量发展。《行动计划》将为储能行业的发展注入强大的动力。提升我国自主知识产权储能钠电池的技术成熟度同样需要重视相关基础材料的研发, 更重要的是从战略层面组织有研发基础的优质企业和科研院所合作开展工程化技术攻关, 提供相关项目支撑, 集中精力解决储能钠电池中存在的“卡脖子”问题和推进储能钠电池在国外经验基础上的升级换代, 以期在短期内实现我国储能钠电池技术体系的成熟化发展。

(二) 推动储能钠电池相关上下游产业的聚集发展

产业规模是储能钠电池发展的关键因素, 形成一定体量的产业集群对于降低储能钠电池的制造成本, 提高储能钠电池的市场竞争力至关重要。在提升储能钠电池的技术成熟度的中后期, 储能钠电池相关上下游产业的聚集发展是储能钠电池真正走向应用市场的关键一环。引导社会资本, 围绕技术创新链布局产业链, 加强技术、资本与产业的融合, 通过产业链合作及协同, 提高资源利用效率, 提升储能钠电池的市场竞争力。大型储能钠电池示范项目的规划和实施是推动相关上下游产业发展的一个契机, 有望使我国储能钠电池的发展驶入良性循环的快速通道。

(三) 建立健全储能钠电池的相关标准以及推动高温钠电池评估平台的建设

2018 年以来, 国内外频发的起火事故给正在起步的储能产业浇了一盆冷水, 也让储能的安全问题

成为舆论焦点。有业内专家认为, 储能事故并非是一个简单的技术问题, 更多是标准的问题。标准是技术发展的总结, 也需要政策法规从上而下的引导。国家能源局会同其他主管部门曾多次发文, 力推储能标准化工作, 要求建立起较为系统的储能标准体系。储能钠电池作为新型的储能技术, 相关标准缺失的问题尤为突出, 迫切需要建立健全相关检测和评价标准。如果我国以出台储能钠电池的相关行业标准, 甚至能够出台发布国家标准, 相信能在很大程度上推动储能钠电池的商业化发展。认证机构基于相关标准可以推动高温钠电池评估平台的建设, 从而从政策上督促储能钠电池开发市场标准化、规范化, 为其大规模应用、顺利与应用市场接轨打下坚实基础。

参考文献

- [1] 中国储能网新闻中心. 详解储能的3大应用领域13个细分场景 [EB/OL]. (2019-02-14)[2021-03-20]. <http://www.escn.com.cn/news/show-711220.html>.
News center in ESCN. Details of 13 subdivided scenarios in 3 major application areas of energy storage [EB/OL]. (2019-02-14)[2021-03-20]. <http://www.escn.com.cn/news/show-711220.html>.
- [2] Wen Z Y, Hu Y Y, Wu X W, et al. Main challenges for high performance NAS Battery: Materials and interfaces [J]. *Advanced Functional Materials*, 2013, 23(8): 1005–1018.
- [3] Nikiforidis G, van de Sanden M C M, Tsampas M N. High and intermediate temperature sodium–sulfur batteries for energy storage: development, challenges and perspectives [J]. *RSC Advances*, 2019, 9(10): 5649–5673.
- [4] Hueso K B, Palomares V, Armand M, et al. Challenges and perspectives on high and intermediate-temperature sodium batteries [J]. *Nano Research*, 2017, 10(12): 4082–4114.
- [5] Dyer C K, Moseley P T, Ogumi Z, et al. *Encyclopedia of electrochemical power sources* [M]. Oxford: Elsevier, 2009.
- [6] Bull R N, Tilley A R. Development of new types of zebra batteries for various vehicle applications [C]. Berlin: The 18th international electric fuel cell and hybrid vehicle symposium, 2001.
- [7] 李念思, 刘小勇, 李亮, 等. 无人机锂离子电池高低温极端环境适应性研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2020, 30(8): 177–182.
Li N S, Liu X Y, Li L, et al. Research on environmental adaptability of lithium-ion battery used in UAV under extreme high and low temperature [J]. *China Safety Science Journal*, 2020, 30(8): 177–182.
- [8] Ma S, Jiang M, Tao P, et al. Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review [J]. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2018, 28(6): 653–666.
- [9] 何文胜, 赵金元. 国内外动力电池地下装载机现状与发展趋势 [J]. *有色设备*, 2020, 34(4): 87–92.
He W S, Zhao J Y. The future trend and present state of battery LHD [J]. *Non-ferrous Equipment*, 2020, 34(4): 87–92.

- [10] Tamakoshi T. Development of Sodium Sulfur Battery and application [C]. Pacifico Yokohama: Grand Renewable Energy 2018, 2018.
- [11] Benato R, Cosciani N, Crugnola G, et al. Sodium nickel chloride battery technology for large-scale stationary storage in the high voltage network [J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 293: 127–136.
- [12] Andriollo M, Benato R, Dambone Sessa S, et al. Energy intensive electrochemical storage in Italy: 34.8MW sodium–sulphur secondary cells [J]. *Journal of Energy Storage*, 2016, 5: 146–155.
- [13] 胡英瑛, 吴相伟, 温兆银. 储能钠硫电池的工程化研究进展与展望—提高电池安全性的材料与结构设计 [J]. *储能科学与技术*, 2021, 10(3): 781–799.
Hu Y Y, Wu X W, Wen Z Y. Progress and prospect of engineering research on energy storage sodium sulfur battery: Material and structure design for improving battery safety [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2021, 10(3): 781–799.
- [14] Wen Z Y, Gu Z H, Xu X H, et al. Research activities in Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences on the solid electrolytes for sodium sulfur batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 2008, 184(2): 641–645.
- [15] Xu Y H, Jung K Y, Park Y C, et al. Selection of container materials for modern planar sodium sulfur (NaS) energy storage cells towards higher thermo-mechanical stability [J]. *Journal of Energy Storage*, 2017, 12: 215–225.
- [16] FIAMM. FIAMM: Sodium batteries, applications and advantages of environmentally-friendly and efficient technology [EB/OL]. (2015-03-23)[2021-03-20]. https://www.pv-magazine.com/press-releases/fiamm-sodium-batteries-applications-and-advantages-of-environmentally-friendly-and-efficient-technology_100018722/.
- [17] Bracco S, Delfino F, Trucco A, et al. Electrical storage systems based on sodium/nickel chloride batteries: A mathematical model for the cell electrical parameter evaluation validated on a real smart microgrid application [J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 399: 372–382.