

王瑞琦,牟连山,尚永健,等. 钠离子电池产业化进展[J]. 盐湖研究, 2024, 32(2): 72-79.

Wang R Q, Mou L S, Shang Y J, et al. Industrial Progress of the Sodium Ion Batteries[J]. Journal of Salt Lake Research, 2024, 32(2): 72-79.

DOI: 10.12119/j.yhyj.202402010

钠离子电池产业化进展

王瑞琦, 牟连山, 尚永健, 彭尚龙*

(兰州大学材料与能源学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要:随着电动汽车普及和大规模储能应用, 锂离子电池将面临资源短缺的问题。钠离子电池作为一种新型二次化学电源, 具有资源丰富、成本低廉、能量转换效率高、循环寿命长、安全性高、高低温性能优异、高倍率充放电性能良好、维护费用低等优势, 在大规模电化学储能和低速电动车领域有望与锂离子电池形成互补。目前国内外已开始对钠离子电池进行产业化相关布局, 钠离子电池已经具备了大规模产业化的市场条件和技术条件。

关键词:钠离子电池; 储能技术; 产业化

中图分类号: TQ131.12; TM912

文献标志码: A

文章编号: 1008-858X(2024)02-0072-08

能源一直以来是支撑人类社会繁荣发展的物质基础, 目前人类利用的主要能源为煤、石油、天然气等化石能源。但化石能源储量有限, 无法满足日益增长的需求^[1-3]。为了缓解因化石能源过度使用所导致的能源问题与环境危机, 必须尽早实现可再生能源的高效转化、存储和利用。结合我国具体国情, 加之当前世界政治经济格局正面临重大调整, 国际能源供求关系正在发生急剧变化, 我国能源安全问题日益凸显。因此降低能源对外依存度, 保障能源供应安全是目前亟待解决的重大问题。

大规模使用清洁可再生能源, 以替代传统化石能源, 构建绿色清洁的低碳能源互联网可以有效解决上述问题^[4-7]。但是可再生能源具有间歇性, 需要开发高效的储能设备以实现能源的合理储存和输出。同时在国家“碳达峰、碳中和”战略目标的驱动下, 储能体系的变革创新迫在眉睫^[8,9]。

大规模储能器件主要包括抽水蓄能、电化学储能、飞轮储能、压缩空气储能等, 其中电化学电源储能凭借低成本、高能量效率、高功率密度、长寿命、环境适应性强(受地理条件影响较小)、建设周期短、经济性等优势受到广泛关注, 是当前应用范围最广, 发展潜力最大的储能技术^[10-12]。目前电化学储能技术有锂离子电池、钠离子电池、铅蓄电池和钠硫电池等。随着商业化路线的成熟与成本的不断降低, 锂

离子电池逐渐代替价格低廉的铅蓄电池, 目前其主要在新能源汽车和3C领域得到了大规模应用。随着全球电池需求量的日益增长, 导致了锂资源的快速消耗^[7,9]。锂资源的分布十分有限, 地壳丰度0.006%, 且其资源空间分布不均, 主要在澳洲和南美地区, 我国的锂资源储量仅为全球的6%。目前我国80%的锂资源供应依赖于进口, 是全球锂资源第一进口国, 容易受到贸易争端影响。

Na与Li同一主族, 且两者的物理化学性质相似。Na丰度较高, 储量非常丰富, 而且钠资源分布于全球各地, 完全不受地域限制^[6,8]。开发钠离子电池可避免由资源短缺导致的发展瓶颈问题。因此钠离子电池被认为是大规模储能领域的变革性技术, 其产业化前景相当乐观, 具有重要的经济价值和战略意义^[13,14]。

钠离子电池和锂离子电池具有相似的工作机理, 但其有资源丰富、成本更加低廉的优势, 使其成为锂离子电池的有益补充, 尤其是在储能领域将有更大的发展空间。本论文主要围绕钠离子电池产业化现状展开, 从钠离子电池简介、钠离子电池设计制造和成本计算三个方面进行总结和论述。最后针对钠离子电池产业化进程中存在的问题提出可行的解决途径。

收稿日期: 2022-07-17; 修回日期: 2022-08-12

基金项目: 青海省“高端创新人才计划”(引进人才项目)

作者简介: 王瑞琦(1995-), 男, 博士, 主要从事钠离子电池正极材料的研究。Email: 2987396627@qq.com。

通讯作者: 彭尚龙(1980-), 男, 博士, 博导, 主要从事高性能二次电池的研究。Email: pengshl@lzu.edu.cn。

1 钠离子电池简介

1.1 结构与工作原理

钠离子电池主要由正极材料、负极材料、电解质和隔膜等关键部件组成,如图1所示。钠离子电池的工作原理和锂离子电池相似,都属于“摇椅式”。充电时钠离子从正极材料脱出后,经过电解质嵌入负极材料中。与此同时电子则从正极经由外电路运动到负极,以维系整个系统的电荷平衡。放电过程则与充电过程相反。其中钠离子电池正、负极材料体系为决定性因素,电解质主要与正、负极材料体系进行选择匹配使用,因此,正、负极材料直接决定了电池的整体性能。

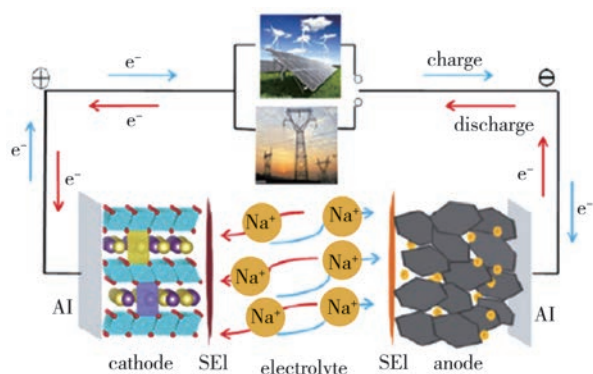


图1 钠离子电池的结构与工作原理

Fig. 1 The structure and working principle of sodium ion batteries

目前钠离子电池正极材料的主要种类有过渡金属氧化物类(包括层状结构和隧道结构)、聚阴离子化合物类、普鲁士蓝类似物类和有机化合物类。其中初具产业化前景的是层状过渡金属氧化物、聚阴离子类以及普鲁士蓝类似物这三种材料^[10,11]。层状过渡金属氧化物材料具有制备方法简单、比容量和能量密度较高且制作成本较低等优点,具有良好的应用前景^[3,5]。但层状材料大多容易吸水,或与空气反应,从而影响材料结构的稳定性和电化学性能。聚阴离子正极材料大多具有开放的三维骨架、较好的倍率性能及循环性能^[10]。但聚阴离子型化合物的导电性一般较差,需要通过纳米化、碳包覆等手段来改善其电子导电性。普鲁士蓝类正极材料具有低成本化潜力^[12],但该类材料结晶水难以去除,压实密度较低,规模化应用面临一定难度。

负极材料是充电过程中主要的钠离子储存载体^[12],目前应用的种类主要有碳基材料、钛基材料、

合金材料和有机材料等,其中碳基材料最具实际应用潜能。目前可以作电池负极材料的碳基类材料主要包括碳纳米材料 and 无定形碳材料。在锂离子电池负极中常用的石墨材料,由于热力学原因,无法与钠离子形成稳定的化合物,因此钠离子电池难以使用石墨作为负极材料。碳纳米材料主要包括石墨烯、碳纳米管等,依靠表面吸附实现钠的存储,可实现快速充放电,但存在库仑效率低、循环性差等问题使其难以获得实际应用^[15,16]。层间距较大的无定形碳材料因具有较高的储钠容量、较低的储钠电位和优异的循环稳定性,成为最具应用前景的钠离子电池负极材料。

1.2 钠离子电池分类

1) 按照电解质体系分类

按照电解质的种类进行分类,可将钠离子电池分为固态钠离子电池和液态钠离子电池,其中液态钠离子电池又包括水系钠离子电池和非水系钠离子电池。

2) 按电池结构分类

根据电池使用的封装形式来进行分类,具体到电池结构方面,主要可分为圆柱、软包装和方形硬壳这三大类,三者差别主要体现在电池内部的装配结构及外壳的封装形式上,不同的内部装配结构及封装形式意味着不同的制造工艺和电池特性。

常见圆柱电池型号有14650、17490、18650、21700、26650、32650以及最新的4680和32183等,其中18650圆柱电池历史最为悠久。

方形硬壳电池通常是指采用方形的铝壳或钢壳作为封装材质的电池,在国内普及率很高。随着近年来动力电池的兴起,电池容量要求越来越高,国内动力电池厂商多采用比能量较高的方形铝壳电池,其结构较为简单,整体附件重量较轻。

软包电池所用的主要材料与圆柱和方形硬壳电池没有明显区别,最大的不同在于其采用铝塑膜作为封装材料。其中尼龙层可防止外力对电池的损伤,起保护作用;铝箔层增加结构强度,并防止电池外部水汽的渗入以及内部电解液的渗出;聚丙烯层增加封装可靠性,并起到耐腐蚀的作用。由于封装结构的因素,软包电池在安全性、重量、电池内阻和电池设计的灵活性等方面具有一些优势,不足之处在于电池一致性较差,成本较高。

1.3 钠离子电池特性

锂和钠在物理化学性质上有许多差异(表1),其中Na⁺较大的离子半径会引起电极材料在离子传输、结构演变和界面性质等方面的变化^[5,7]。

表 1 钠与锂的物理化学性质对比
Table 1 Comparison of physicochemical properties of sodium and lithium

物理化学性质	Li	Na
原子序数	3	11
原子质量, g/mol	6.94	22.99
电子构型	[He]2s ¹	[Ne]3s ¹
原子半径/Å	1.52	1.86
离子半径/Å	0.76	1.02
Stokes 半径, A(碳酸丙烯酯溶剂 PC)	4.8	4.6
标准电极电位 vs. SHE, V	-3.04	-2.71
第一电离能, kJ/mol	520.2	495.8
理论质量比容量, mAh/g	3861	1165
理论体积比容量, mAh/cm ³	2062	1131

然而,这些差异在一些方面会使钠离子电池更具优势。首先,由于钠离子与大部分过渡金属元素离子的半径相差较大,在高温烧结时更容易与过渡金属元素发生分离形成层状结构,使其层状氧化物材料的堆积方式具有多样化^[15]。相比于多为O型结构含锂的层状氧化物,含钠的层状氧化物则具有大量的O型和P型结构。

其次,钠离子的 Stokes 半径比锂离子的小,相同浓度的钠离子电池电解液比锂离子电池电解液具有更高的离子电导率^[8,10]。另外钠离子在极性溶剂中具有更低的溶剂化能,使其在电解液中具有更快的动力学性质,从而具有更高的电导率。

最后,在充放电过程中,钠不会与铝产生合金化反应,因此正负极均可以采用铝箔作为集流体^[16]。这样既可避免集流体氧化,且可以过放电至零伏而有利于电池的储存运输,进一步降低了整体成本。

综上所述,钠离子电池具备高功率快速充放电的理论基础,其安全性能、循环性能、高低温性能、充放电倍率性能等均更具优势(图2)。此外,钠离子电池在规模化生产中可以采用锂离子电池的生产检测设备、工艺技术和制造方法,这样可加快钠离子电池的产业化进度。



图 2 钠离子电池优势
Fig. 2 The advantages of sodium ion batteries

2 钠离子电池设计制造

2.1 工艺流程

以软包电池的制造为例,其工序可基本分为三个部分,即前端电极制造工序,包括电极浆料制备、电极涂布、辊压、极片真空干燥、极片模切等;后端装配工序,包括叠片、焊接、入壳封装、真空干燥、注液等;以及化成分选工序,包括预封、化成、二次封装、分容筛选等。各种材料体系和结构类型的钠离子电池极片制造工序基本一致,只是装配工序根据封装形式和电池内部结构的区别有所不同。化成分选工序受电池外观结构以及容量大小的影响,使用的夹具针对不同化成环境有一定差别。

2.2 钠离子电池生产线

钠离子电池的生产工艺可参照锂离子电池,其生产线与锂离子电池生产线基本类似。不同的地方在于钠离子电池可采用铝箔作为负极集流体,因此正、负极片均采用铝极耳。钠离子电池生产线原理示意图中(图3),每个工序对应的面积基本上与生产线的车间面积成正比。

2.3 钠离子电池产业链

与锂离子电池一样,钠离子电池也是由正极材料、负极材料、电解液和隔膜这四大主材,以及铝箔集流体、粘结剂、溶剂、导电剂、极耳和外壳组件等多种关键辅材组成。钠离子电池组主要由多个电池模

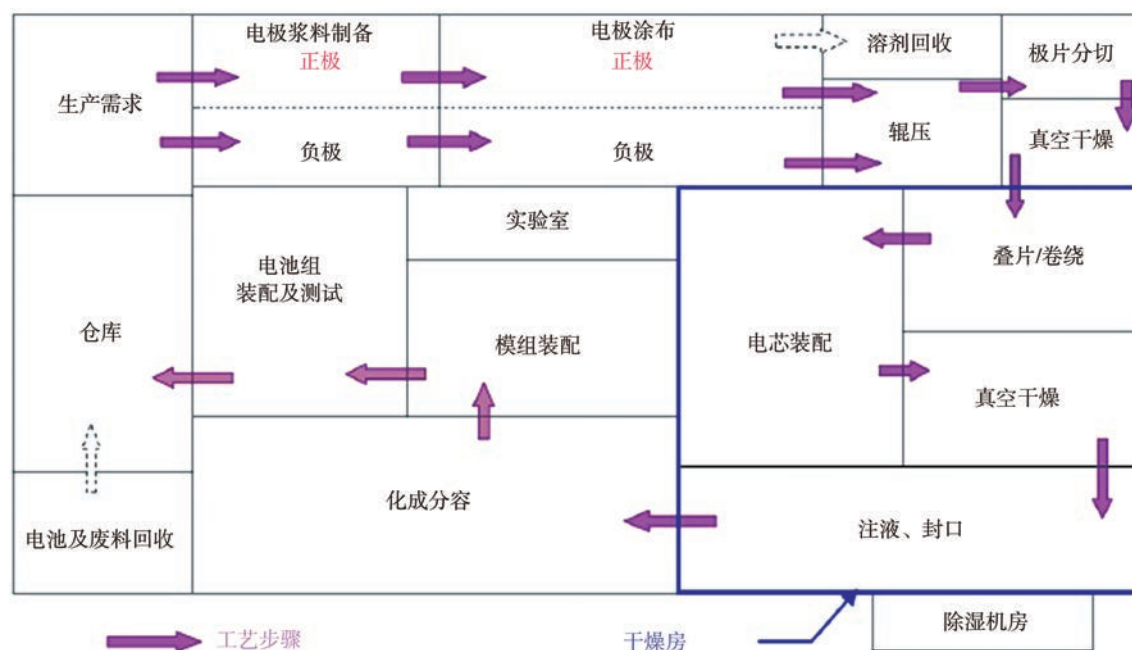
图3 钠离子电池生产线^[14]

Fig. 3 The production line of sodium ion batteries

组通过串并联组合而成,也可以直接采用单体电池通过高效率集成技术制成电池组。

目前钠离子电池产业化还处于初级阶段,相关产业链还不完善。在正负极材料方面,符合钠离子电池的电池级原料(如碳酸钠、氧化铁等)暂无成熟的商业化产品^[14]。而负极则受限于碳源的多样性,目前还没有成熟的商业化产品问世。电解液方面,则主要是钠盐暂无成熟商业化产品,不过借鉴锂盐的产业链,钠盐的合成与应用路径则相对简单,比较容易实现产业化。下游电池组方面,结构上与锂离子电池电池组完全相同。只是针对钠离子电池体系的充放电特性,电池管理系统(Battery Management System)等需要重新设计。

2.4 产业化现状

1) 整体产业化现状

2010年以来,钠离子电池受到了国内外学术界和产业界的广泛关注,其相关研究迎来了爆发式增长。目前,国内外已有多家企业正在进行钠离子电池产业化的相关布局,并取得了重要进展(图4)。目前我国钠离子电池单体电池和电池系统关键技术方面取得了多项重要进展^[19],包括低成本及高性能正负极核心材料制备放大技术、电解液/隔膜体系优选技术、电芯安全可靠设计技术、高倍率和宽温电芯

设计制造技术、电池正负极材料的评价技术、大圆柱及大方形铝壳电芯的制造工艺技术、电池的安全性设计与评价技术、电池大规模筛选及成组技术等,并成功建立了较为完善的失效分析数据库。与钠离子电池相关的产品研发制造、标准制定以及市场推广应用等方面的工作正在全面展开,钠离子电池即将进入商业化应用阶段。

2) 正极材料产业化现状

在钠离子电池中,正极材料的成本占整个器件的最大比重(约32.4%)。因此,钠离子电池正极材料需要兼具低廉的价格和较高的可逆比容量。目前可选用的钠离子电池正极材料主要有三类:层状氧化物、聚阴离子化合物、普鲁士蓝类材料。

层状氧化物与锂离子电池三元材料均为一种嵌入或插层型化合物,二者生产工艺类型相同,且生产线可以共用,工艺成熟度相对较高。同时,层状氧化物具有比容量高、压实密度高等优势。但由于钠离子半径大,在其脱嵌过程中会造成材料的不可逆相变,进而影响材料的循环寿命。此外,层状氧化物极易与空气中的水和二氧化碳等物质反应,在晶体结构表面形成副产物。根据钠离子的配位环境和氧的堆积方式,层状氧化物可分为O3、P3、P2、O2等,其中O3型材料和P2性材料的发展前景较好。O3型材料(如 NaNiO_2 、 NaFeO_2 、 NaCrO_2 等)具有更高的钠含

量,能量密度更高,但由于钠离子迁移的扩散能垒高,故其循环寿命较差。P2型材料(如 $\text{Na}_{2/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{2/3}\text{O}_2$ 、 $\text{Na}_{2/3}\text{Fe}_{1/2}\text{Mn}_{1/2}\text{O}_2$ 等)循环寿命较好、空气稳定性较高,但比容量略低。针对层状氧化物脱嵌过程中的相变问题,常采用引入锰铁铜等元素掺杂来获取稳定的晶体结构。国内电池企业中,宁德时代使用镍基层状氧化物方案,中科海钠选用铜铁锰氧化物方案,钠创新能源选用铁酸钠基氧化物方案。海外企业中,Faradian采用镍基层状氧化物方案。

聚阴离子材料结构稳定、循环寿命长,但是其生产成本低、能量密度较差。聚阴离子材料具有稳定的框架结构,使得该类材料具有良好的循环寿命和安全性。但由于大质量的阴离子基团较多,导致材料的导电性和比容量较差。针对其导电性差造成的倍率性能和能量密度表现不优,可通过碳包覆或添加导电剂的方式来实现材料改性。常见的聚阴离子材料有硫酸铁钠、磷酸铁钠、磷酸钒钠、氟磷酸钒钠、焦磷酸盐等。其中硫酸根比磷酸根电负性强、工作电压更高,且硫酸盐系材料具有低成本的优势,但其易吸潮分解使得材料的循环寿命比较差。钒基聚阴离子材料具有较高的工作电压(3.4~3.8V)和较高的理论比容量,但由于钒成本较高且具有毒性,削弱了其作为钠离子电池材料的性价比优势。国内企业中,众钠能源采用低成本的硫酸铁钠作为解决方案,钠创新能源在积极研发磷酸钒钠、磷酸锰钒钠等材料体系。海外企业中,Naiades和Tiamat均采用了氟

磷酸钒钠作为正极材料。

普鲁士蓝类材料主要优势在于成本低、能量密度较高,不足之处在于导电性和循环寿命较差,且氰化物具有潜在毒性。普鲁士蓝类材料具有开放型三维通道,使得钠离子在隧道中可以快速迁移,因此具有较好的结构稳定性和优异的倍率性能。但由于普鲁士蓝类材料通常是在水溶液中合成的,所以会存在微量的晶格水,这些晶格水在循环过程中可能会脱出,存在短路或与电解液反应腐蚀材料的风险。目前普鲁士蓝类材料主要的制备方法是共沉淀法和水热法。而针对其结晶水、导电性差等问题,常采用包覆、掺杂、高温干燥处理等方式来改善材料性能。国内电池企业中,宁德时代推出普鲁士白材料用于钠离子电池中,星空钠电也提出铁基普鲁士蓝材料用做电池负极。海外企业中,Natron Energy和Altris均在积极布局。

3) 负极材料产业化现状

钠离子电池负极材料主要采用硬碳材料,与锂离子电池主要采用石墨材料相区别。这是因为钠离子摩尔质量是锂离子的3倍、直径是锂离子的1.3倍,进而导致钠离子无法在有效的电位窗口内在石墨层间进行可逆的脱嵌。同时钠离子-石墨嵌入的化合物在热力学上也并不稳定。

目前可选用的钠离子电池负极材料材料主要有四类:碳基材料(软碳/硬碳等)、合金类材料、过渡金属化合物和有机化合物。其中合金类材料主要通过



图4 钠离子电池产业化布局^[14]

Fig. 4 The industrialization layout of sodium ion batteries

合金化反应实现储钠,但在循环过程中会伴随着较大的体积膨胀,进而造成电极材料的粉碎和坍塌;过渡金属化合物比容量偏低,而有机材料也存在库伦效率低等问题。在碳基材料中,相比于石墨等软碳材料而言,硬碳材料无法石墨化。而且硬碳材料的碳层排列规整度低于软碳材料,其层间可以形成较多的微孔以方便钠离子的脱嵌。硬碳材料具备储钠比容量较高、储钠电压较低、循环性能较好等诸多优势,是当前首选的钠离子电池负极材料。

负极材料布局方面,中科海钠以无烟煤作为前驱体制备软碳材料;宁德时代推出了具有独特孔隙结构的硬碳材料;璞泰来、翔丰华目前正在推进中试工作。日本方面,吴羽已实现了硬碳材料的量产化,三菱及松下正在从事钠离子电池负极材料的研发和生产工作。

3 成本计算

对于钠离子电池而言,锂离子电池及铅酸电池是其对标产品。由于体系的自然属性,目前钠离子电池综合性能位于锂离子电池和铅酸电池之间。但钠离子电池作为一项新的电池技术,具有资源丰富,成本低廉等优势。随着产业链的成熟和规模化效应的凸显,钠离子电池的成本可接近铅酸电池的水平^[14,17]。因此成本将是钠离子电池的生命力,是决定其能否实际应用的最关键因素,这一点在大规模储能应用领域尤其重要。

3.1 成本构成

钠离子电池与锂离子电池有类似的工作原理、结构和生产制造工艺等,二者的成本结构也基本相同,主要包括原材料成本、制造成本、管理费用及资金使用成本等。制造成本包含人工成本,以及与电池制造直接相关的成本(如厂房、设备和能源等)。在目前的制造水平下,同样类型、大小和结构的钠离子电池与锂离子电池相比,除主要原材料成本差别较大外,其他辅助材料成本及制造成本基本相当。对于不同材料体系、容量大小和结构类型的电池,各部分成本占比又会有有一定的变化。

3.2 原材料成本

电池组由多个单体电池在串并联组装过程中会

产生设备、软件等使用成本,以及结构件成本,一般相对较为固定。单体电池作为电池组的关键基础,其成本特性属于变动成本。另外值得注意的是,材料的应用前景不应只考虑文献报道中的优异性能,因为文献报道一般是以钠为对电极的半电池,不考虑正极首周真正可脱出容量。亦或是文献报道大多是复杂合成方法下得到的特殊形貌,而这些在工业上实现成本较高,不符合钠离子电池产业化的初衷。

正极材料的性能直接影响钠离子电池的性能,其成本也直接决定电池成本的高低。目前具备产业化前景的钠离子电池正极材料主要有层状氧化物、聚阴离子化合物和普鲁士蓝类似物。聚阴离子类材料的优点在于循环性能优良,并且因为该类材料的工业化生产技术可以直接沿用锂离子电池的生产工艺,因此可工业化性好^[20,21]。但这类材料的导电性不好,需要采用多种手段进行改性,这样会进一步降低材料的能量密度。普鲁士蓝类材料的成本低廉、循环优良,且能量密度已经有所提高。但是工业化上操作性较低,且相容性较差。而层状氧化物,特别是O3型层状氧化物,拥有最好的综合性能,包括能量密度、产业化便利性和相容性^[22],稍微欠缺的是材料的循环寿命和稳定性。

目前具备产业化条件的钠离子电池负极材料一般采用硬碳、软碳以及复合碳等无定形碳材料。国内市场上大多数无定形碳材料的成本约为8~20万元/吨,而煤基的无定形碳材料的成本根据其性能指标的不同预计在0.8~2万元/吨。

在影响电池的性能和稳定性方面,电解液一直居于重要位置。与锂离子电池一样,钠离子电池电解质盐也采用NaPF₆,溶剂为链状碳酸酯和环状碳酸酯共用,一般采用EC、DMC、EMC、DEC和PC等溶剂组成二元或多元混合溶剂体系。

隔膜方面,目前常用的隔膜主要分为干法隔膜和湿法隔膜两类,主要包括PP、PE、PP/PE以及PP/PE/PP隔膜、陶瓷隔膜、涂胶隔膜等。

钠离子电池负极也可采用铝箔作为集流体,可进一步降低电池成本,铝箔的厚度主要为20 μm、16 μm和12 μm。目前市场上电池级铜箔成本(80~100元/kg)约为电池级铝箔成本(22~30元/kg)的3倍。同时钠离子电池负极可采用铝极耳,相比铜箔集流体所对应的铜镀镍极耳或镍极耳,成本有一定的降低。此外铝极耳的焊接加工工艺更为简单,也可以简化对

应工序设备,进一步降低制造成本。

因此,除正负极材料和钠盐外,其余原材料(如隔膜、铝箔、极耳、粘结剂、导电剂、溶剂及外壳组件等)可直接借用锂离子电池业已成熟的商业化产品。

3.3 制造成本

电池的制造成本,是指电池生产企业为制造电池和提供服务而发生的各项间接费用,包括除原材料、管理费用以及资金使用成本等之外的其他费用(如人工成本、能源消耗、设备设施折旧等)。其中,人工成本主要是管理及生产人员的工资,可折算为单个电池的生产工时进行核算。一般对于某个型号的电池来说,单批次生产过程的生产量越大,需求的工时数就越小;能源消耗主要为电池生产制造过程中水电气等资源的消耗,包括动力电、纯水、自来水、压缩空气、氮气、真空及天然气等的消耗;设备设施折旧主要包括电池生产设备、检测设备/仪器、动力辅助性设备及功能设施等的折旧。电池制造成本一定程度上还受电池结构规格、地域差异、产线规模和自动化程度等影响。

3.4 发展趋势

鉴于现阶段钠离子电池的产业化才刚开始起步,其材料体系的选择、材料合成及工艺的调整完善、电池设计及制造工艺优化、产品规模化效应等使得钠离子电池的成本还可以被进一步压缩。接下来,钠离子电池的发展将会更加注重于解决产业发展过程中的技术问题,以及开发符合目标市场需求的技术,其相关技术和产业的发展趋势可以从以下几个方面来进行考虑。

1) 进一步提升正负极材料体系的综合性能,优化生产制备工艺,提高材料稳定性。进一步优化电解液体系,构筑更加稳定的界面。

2) 根据不同应用场景,逐渐形成对应的钠离子电池体系。同时优化电池设计及生产工艺,降低非活性物质的用量,继续提高电池能量密度、循环寿命以及安全性能。

3) 结合钠离子电池特点,针对性发展并优化适用于钠离子电池的相关技术体系,包括电池设计、极片制作、电解液/隔膜选型、化成老化以及电池评测等技术。

4) 根据钠离子电池的特性,针对性开发相应的

电池管理系统,以进一步提升电池组整体寿命以及安全性。同时优化钠离子电池成组技术,如开发无模组电池包技术、双极性电池技术等。

5) 联合更多的科研单位及企业共同攻关,打通钠离子电池上下游供应链。同时统一并规范钠离子电池产品的技术要求,提高我国钠离子电池产业的竞争力,促进整个钠离子电池产业链的健康、可持续发展。

4 展 望

作为新兴的电化学储能器件,钠离子电池由于其具有高能量、低成本以及储量丰富等优势,而引起了研究者和产业界的广泛重视。本文主要介绍了钠离子电池产业化的最新进展,同时分析总结了钠离子电池产业化进程中存在的关键问题,并提出了钠离子电池产业化的可行途径。最后,希望本文的总结,能够对钠离子电池产业化起到一定的借鉴作用。

参考文献:

- [1] Zhao L F, Hu Z, Lai W H, *et al.* Hard Carbon Anodes: Fundamental Understanding and Commercial Perspectives for Na-Ion Batteries beyond Li-Ion and K-Ion Counterparts [J]. *Advance Energy Materials*, 2020, 11(161): 134-148.
- [2] Zhang M, Li Y, Wu F, *et al.* Boost sodium-ion batteries to commercialization: Strategies to enhance initial Coulombic efficiency of hard carbon anode [J]. *Nano Energy*, 2021, 82(67): 248-259.
- [3] Zhao Q, Song A, Ding S, *et al.* Preintercalation Strategy in Manganese Oxides for Electrochemical Energy Storage: Review and Prospects [J]. *Advance Materials*, 2020, 32(50): 200-245.
- [4] Ou X, Li J, Zheng F, *et al.* In situ X-ray diffraction characterization of NiSe₂ as a promising anode material for sodium ion batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 2017(343): 483-491.
- [5] Christensen C K, Ravnsbæk D B, Understanding disorder in oxide-based electrode materials for rechargeable batteries [J]. *Journal of Physics: Energy*. 2021(3): 482-497.
- [6] Wang Y, Wu W, Cheng L, *et al.* A Polyaniline-Intercalated Layered Manganese Oxide Nanocomposite Prepared by an Inorganic/Organic Interface Reaction and Its High Electrochemical Performance for Li Storage [J]. *Advance Materials*, 2008, 20(11): 2166-2170.
- [7] Cao Y, Xia X, Liu Y, *et al.* Scalable synthesizing nanospherical Na₄Fe₃(PO₄)₂(P₂O₇) growing on MCNTs as a high-performance cathode material for sodium-ion batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 2020(461): 242-256.
- [8] Liu Q, Hu Z, Li W, *et al.* Sodium transition metal oxides: the preferred cathode choice for future sodium-ion batteries [J]. *En-*

- ergy & Environmental Science, 2021, 14(1): 158-179.
- [9] Liu X H, Peng J, Lai W H, *et al.* Advanced Characterization Techniques Paving the Way for Commercialization of Low-Cost Prussian Blue Analog Cathodes[J]. *Advance Functional Materials*, 2021, 32(7): 1668-1676.
- [10] Peng J, Zhang W, Liu Q, *et al.* Prussian Blue Analogues for Sodium-Ion Batteries: Past, Present, and Future [J]. *Advance Materials*, 2022, 34 (15): 210-224.
- [11] Liu Q, Hu Z, Chen M, *et al.* Dou, S. X., The Cathode Choice for Commercialization of Sodium - Ion Batteries: Layered Transition Metal Oxides versus Prussian Blue Analogs [J]. *Advance Functional Materials*, 2020, 30(14): 252-266.
- [12] Zhu H, Yang T, Liu X, Flexible 1D Batteries: Recent Progress and Prospects[J]. *Advance Materials*, 2020, 32(5): 124-146.
- [13] Alias N, Mohamad A. Advances of aqueous rechargeable lithium-ion battery: A review [J]. *Journal of Power Sources*, 2015(274): 237-251.
- [14] 戚兴国. 钠离子电池层状氧化物材料研究及其产业化探索[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [15] 曹桂. 富锂锰基氧化物的改性与其电化学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [16] 曹宁, 孟佳欣, 臧晓蓓. 碳基柔性正极制备的综合性实验研究[J]. *实验室研究与探索*, 2021, 40(2): 38-42.
- [17] Huang Q, Wang Q, Redox-assisted Li^+ -storage in lithium-ion batteries[J]. *Chinese Physics B*, 2016, 25(46): 365-372.
- [18] Liu H, Liu X, Li W, *et al.* Porous Carbon Composites for Next Generation Rechargeable Lithium Batteries [J]. *Advance Energy Materials*, 2017, 7(24): 524-538.
- [19] Kulova T, Fateev V, Seregina E, *et al.* A Brief Review of Post-Lithium-Ion Batteries[J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2020, 15(8): 7242-7259.
- [20] Nayak P, Yang L, Brehm W, *et al.* From Lithium-Ion to Sodium-Ion Batteries: Advantages, Challenges, and Surprises [J]. *Angewandte Chemie-international Edition*, 2018, 57(1): 102-120.
- [21] Schipper F, Aurbach D, A Brief Review: Past, Present and Future of Lithium-ion Batteries [J]. *Russian Journal of Electrochemistry*, 2016, 52(12): 1095-1121.
- [22] Walter M, Kovalenko M, Kravchyk K, Challenges and benefits of post lithium-ion batteries [J]. *New Journal of Chemistry*, 2020, 44(5): 1677-1683.

Industrial Progress of the Sodium Ion Batteries

WANG Ruiqi, MOU Lianshan, SHANG Yongjian, PENG Shanglong*

(School of Materials and Energy, Lanzhou University, Lanzhou, 730000, China)

Abstract: With the popularization of electric vehicles and the application of large-scale energy storage, lithium-ion batteries will face the problem of resource shortage. As a new type of secondary chemical power source, sodium ion batteries have a lot of advantages, such as rich resources, low costing, high energy conversion efficiency, long cycle life, high safety, excellent rate performance and low maintenance costs. Sodium-ion batteries are expected to be complementary to lithium-ion batteries in the fields of large-scale electrochemical energy storage and low-speed electric vehicles. At present, the industrial layout of sodium ion batteries has been started at home and abroad, and the market conditions and technical conditions for large-scale industrialization of sodium ion batteries have been met.

Key words: Sodium-ion batteries; Energy storage technology; Industrialization