

超级电容池及其 2018 年基础研究回眸

陈政^{1,2}

1. 英国诺丁汉大学化学与环境工程系, 诺丁汉 NG7 2RD

2. 宁波诺丁汉大学化学与环境工程系, 宁波 315100

摘要 介绍新型电化学储能器件“超级电容池”并回顾其 2018 年的基础研究进展。作为蓄电池和超级电容器的内在结合型电化学储能器件, 超级电容池较好地结合了前者高储能密度和后者可快速充放电、长循环寿命的特性, 可以在移动和固定储能应用中发挥更大作用。

关键词 超级电容池; 储能; 电化学

为了应对长期、大规模化石能源和相关技术应用所产生的各种负面影响, 持续发展经济和文明建设, 近年来, 科技发展主要方向之一是可再生能源的利用和相关技术。其中能源转换和储存技术的发展对可再生能源的有效利用起着关键作用。

在各种已知的能源转换和储存技术中, 电化学技术受到各国青睐, 发展迅速^[1]。原因之一是大多数电化学技术是通过“电能-化学能-电能”的转换这一简单途径来达到应用目的, 能源效率较高。也许由于其直接效果是储存电能(充电)与释放电能(放电), 表观上没有能量转换, 因此在近期文献中普遍被称为“电化学储能”(electrochemical energy storage, EES)。另一个原因是电化学储能主要是通过模块型(组装特征与儿童搭积木特征类似)的各种蓄电池(包括液流电池, redox flow battery)、超级电容器(supercapacitor)以及本文将介绍的超级电容池(supercapattery)来实现的, 因此, 电化学储能装置可以通过合适的方式组合, 达到不同规模的应用, 例如个人电器、电动汽车、轨道交通、风能电场以及电网调峰等。当然, 电化学储能装置还具有其他优势, 包括性能稳定、储能密度高、充放电速度快、循

坏寿命长、对地理与温度等环境变化耐受性好、废弃装置和材料可回收和再生等。需要指出的是, 电化学储能的优势是在资源、制造、性能等技术层面上, 在具体应用领域的商业前景则和资源、环境以及相关竞争技术有关。例如在地理条件允许的情况下, 建设抽水电站对规模较大和规律性强的储能应用可能是更经济的技术选择。限于篇幅, 本文主要介绍超级电容池的概念、原理以及 2018 年相关研究进展和技术应用前景, 不涉及与非电化学储能技术的比较。

1 超级电容池研究背景和设计原理

目前, 已经大规模商业化应用的电化学储能技术的代表是蓄电池。相对于只能放一次电、不可充电的原电池(primary battery), 蓄电池(rechargeable battery)也称二次电池(secondary battery)。例如早期开发的、使用硫酸为电解液的铅酸蓄电池以及近期大规模应用的使用有机电解液的锂离子电池。蓄电池初期发展主要是为小规模储能应用, 例如家用电器、备用照明电源、内燃机启动等。锂离子电池作为蓄电池产业的“骄

收稿日期: 2019-01-11; 修回日期: 2019-01-27

基金项目: 浙江省千人计划项目, 宁波市 3315 计划项目, 宁波科技计划项目(2014A35001-1)

作者简介: 陈政, 教授, 研究方向为电化学工艺, 电子信箱: George.Chen@nottingham.ac.uk

引用格式: 陈政. 超级电容池及其 2018 年基础研究回眸[J]. 科技导报, 2019, 37(3): 102-108; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.03.015

子”,近年来得到快速发展,特别是手机和新能源汽车对锂离子电池的大量需求,更促进了相关材料和制造工艺的改善和提高。蓄电池(尤其是锂离子电池)的特点是储能密度(单位体积内储存的能量)和比能量(单位质量中储存的能量)高、储存时间长、携带便利;不足之处是充放电速度慢、循环寿命短、资源和制造价格高。对锂离子电池而言,由于采用较高电压充/放电(4.5 V/3.5 V)、易燃有机电解液以及薄层卷筒结构,使用锂离子电池的个人电器和电动汽车发生起火和爆炸的事件时有发生。基于同样原因,废弃锂离子电池的回收和再利用也是具有很高安全挑战性的研发课题。

近年来,另一种得到广泛重视的电化学储能装置是超级电容器,其学术名称是电化学电容器(electrochemical capacitor)。它有两种类型:双电层电容器(electric double layer capacitor)和赝电容器(pseudocapacitor)。严格地说,双电层电容器储能是通过在电极和电解液的界面上累积电荷来实现的。当一个电极(正极)的电位升高,其表面产生正电荷累积时,附近电解液中的负(阴)离子在电场作用下向该电极迁移并发生电吸附而累积在其表面。与此同时,该电极的对电极(负极)的电位会相应降低,导致负电荷在电极表面累积,附近电解液中的正(阳)离子亦会在负极上吸附累积。相反电荷在正负极上的累积以及相应的电极电位差别(即电压的存在),实现了电能的储存。由于离子的电吸、脱附过程速度很快,并且基本不涉及化学反应,所以双电层电容器的充放电是完全或高度可逆的,充放电速度(功率)和能源效率比蓄电池高很多。

赝电容器储能是通过“电极/活性物质”界面上有电子转移的化学反应来实现的。为保持电极内部的电中性,电子转移必然引起“活性物质/电解液”界面上相应离子的转移。这一点与蓄电池类似,也就是两种器件的电极上都发生了法拉第过程(Faradaic process),不同之处是蓄电池中电极反应涉及的是定域价电子(localised valence electrons)的转移,电极的电位变化遵循能斯特方程(Nernst equation)。赝电容器中电极反应是由离域价电子(delocalised valence electrons)的转移来实现的,相应的电极电位与电极上通过的电量成正比,与电容器中的电极相同。由于理想电容器中的“电极/介质”界面上电荷只是吸附累积,但不穿过界面,也没有化学反应发生,因此,由离域价电子通过“电极/活性

物质”界面并导致化学反应而获得的电容性电荷储存被称为赝电容。双电层电容器储存电荷发生在二维界面上,赝电容器是在活性材料内部的三维空间中以原子或分子为单位来储存电荷的。因此,赝电容器的能量密度和比能量更高。但是,由于充放电循环过程中,同时有电子和离子出入赝电容活性材料,多次循环必然带来材料疲劳损伤,导致赝电容器循环寿命与蓄电池相似,却远逊于双电层电容器。

显然,如果将双电层电容电极材料和赝电容电极材料进行有效复合,应该得到能量密度高且循环寿命长的电极材料^[1]。这种预测在很多文献中得到验证。相关研究的一个成功方法是,在具有纳米尺度和结构的双电层电容材料(例如碳纳米管或石墨稀)的表面上生成一层具有氧化还原活性的赝电容电极材料或者蓄电池电极材料,这类复合材料的储电机理同时包括电容储能(capacitive charging)和电化学反应储能(也称法拉第过程储能, Faradaic charging),已经有很多成功研究的相关报道;另一种方法是将电容电极和电池电极配对,选用合适的电解液,组装成混合型电化学储能装置,如图1(a)^[1-2]所示,其电化学行为特征分别由图1(b)^[1,3]中的循环伏安谱(cyclic voltammogram, CV)和图1(c)^[1,3]中的恒电流充放电(galvanostatic charging-discharging, GCD)曲线代表。

这些混合型装置在早期研发过程中,被研究者赋予了各种不同的名称,例如锂离子电容器、混合型超级电容器、混合型离子电容器等。这些名称各有不同含义,很容易被误以为是完全不同的技术,显然不利于混合型储能技术的发展。2008年,欧洲最大的能源公司之一——E.ON公布了他们支持的由英国诺丁汉大学提出的结合动力电子技术(power electronics),将超级电容器电极材料和蓄电池电极材料组合成“超级电容池”,用于电网储能和调峰的研发计划。超级电容池这一名称开始出现在科学文献中,而国内也有人将其翻译为“超级电容电池”。需要指出的是,超级电容池是作为一个“超级电容器-蓄电池”混合型电化学储能器件的统一名称而提出的,但是其工作原理在前期的锂离子电容器等研发计划中就已经提出和验证了。另外,作为一个新的名称,超级电容池近年来逐渐被更多学者和研究团队认可和使用。Web of Science、Scopus、Google Scholars等科学数据库中选录的已发表的与超级电容池相关的研究论文开始增加。

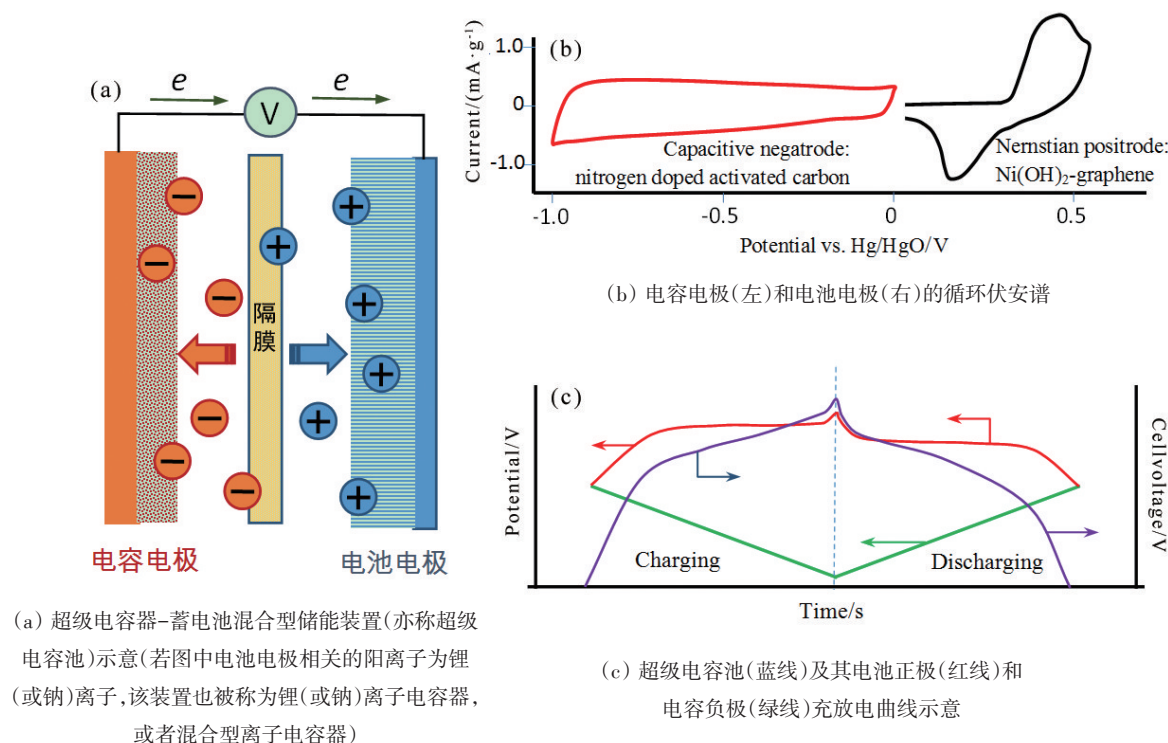


图1 超级电容池结构与电化学特征

Fig. 1 Structural and electrochemical features of supercapattery

2 2018年超级电容池研究进展

在电化学储能研究相关文献中,一个长期存在的问题是概念混用。例如超级电容器,也称电化学电容器,其充放电行为的原理预期和实际测试都应该与传统电容器相同,但是与蓄电池的充放电行为有很大区别。具体到电化学测试方式和结果,蓄电池电极材料的CV上至少有一对氧化和还原电流峰(图1(b)和图2(a)),相关的GCD曲线上则会出现电位平台(图1(c),电池电极)。超级电容器或电容性材料的CV应该是矩形或接近矩形(参见图1(b)和图2(b)),而GCD曲线则是直线形(单一次的充电或者放电)或者三角形(连续充电和放电)。然而,很多已发表的研究论文并没有区分蓄电池电极材料和电容电极材料之间的显著不同,而是将一些有明显蓄电池电极材料特征的材料作为电容电极材料来分析和报道。一个典型的例子是具有典型蓄电池电极特征的氧化镍及其衍生材料。值得注意的是,2018年,有不少作者在报道与氧化镍基电极材料相关的研究时,将其与典型电容电极材料结合制作成超级电容池,并以此为基础进行数据分析。这种趋势有利于理顺和厘清过去文献中的一些概念混淆的超级

电容器的研究结果。

近年来,与超级电容器及材料相关的研究和应用有了快速发展,也有大量研究工作发表。仅2018年,Web of Science就收录了与超级电容器、超级电容池相关的研究论文5400余篇(关键词:supercapacitor、supercapattery或ion capacitor)。其中,与锂、钠离子电容器,混合型离子电容器以及超级电容池相关综述论文有10篇。作者进行对比后,选择其中两篇作简要介绍和评述。

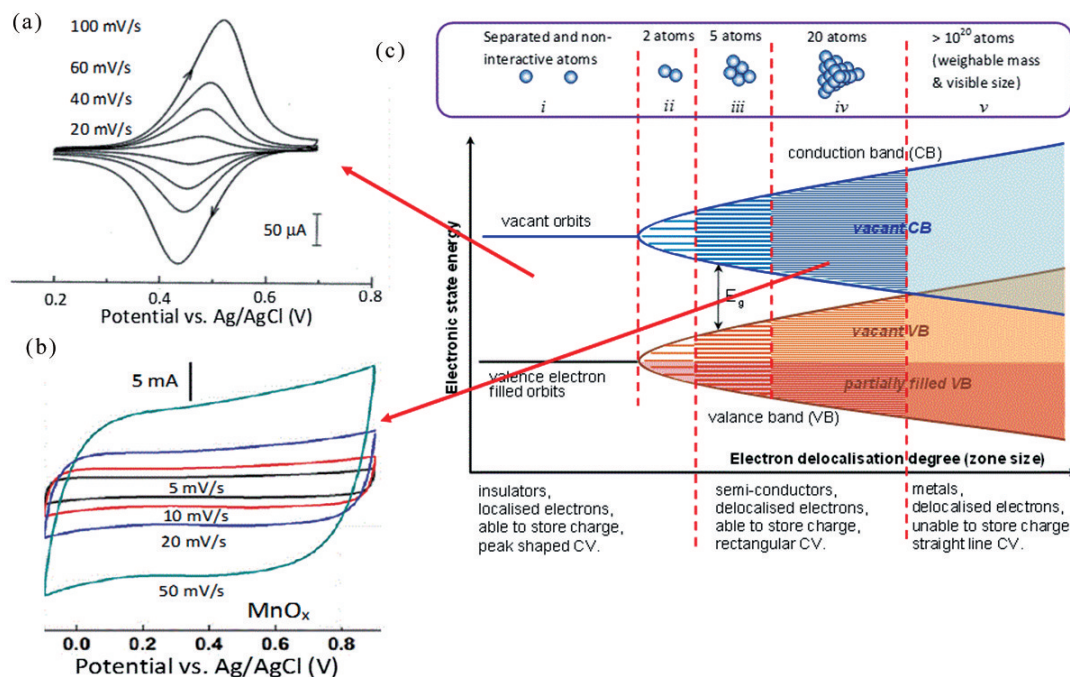
Ding等^[2]以“混合型离子电容器”(hybrid ion capacitor, HIC)为名称,对各种由“电容电极-电池电极”这一方式组合的电化学储能器件进行了较为系统的介绍。根据他们的观点,HIC的发展起源于“水系非对称超级电容器”(asymmetric aqueous ultracapacitors)的研究(早期文献中的ultracapacitor与supercapacitor都是商业用词,都可翻译为超级电容器,等同于电化学术语中的电化学电容器)。水的热力学分解电压在室温和常压下只有1.26 V,而有机电解液的电位窗口一般都较宽(高于2.5 V)。因此,Ding等重点介绍了适用于有机电解液的锂离子电容器和钠离子电容器以及相关正、负电极材料;同时,他们对这两类HIC技术面临的发展和挑

战进行了起因和前瞻性分析。

Ding等收集的数据显示,锂离子电容器电极材料中,碳基材料负极的工作电位最低(负)。相对于 Li/Li^+ 参比电极的电位为 $0\sim 0.40\text{ V}$,比容量为 $360\sim 1200\text{ mAh/g}$,其中参杂型碳(doped carbon)负极的比容量可超过 1000 mAh/g 。其他负极材料包括 Fe_2O_3 、 MnO 、 MoS 的比容量可以达到 $400\sim 1400\text{ mAh/g}$,负极电位为 $0.60\sim 1.2\text{ V}$,高(正)于碳基负极材料。相对于负极材料而言,可以选择的正极材料较少。其中,活性碳正极是电容电极,电位范围较宽($2.80\sim 4.50\text{ V}$),但是比容量小于 40 mAh/g 。其他正极材料皆为蓄电池电极材料,包括 LiFePO_4 、 $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{O}_4$ 以及传统材料—— LiCoO_2 。对钠离子电容器的数据分析显示,其正、负极的电位范围与锂离子电容器情况类似,但是比容量低很多,负极最高比容量是 300 mAh/g ,而正极最高只有 100 mAh/g 左右。

该文章列出的参考文献多达436篇,是一篇覆盖面较全的综述论文。但是,在该文中阴极(cathode)、阳极(anode)、正极(positive electrode)、负极(negative electrode)混合使用,比能量(Wh/kg)、比功率(kW/kg)、能量密度(Wh/L)与功率密度(kW/L)不分,此外,对电容电极行为的界定亦不够清晰。

在另一篇综述论文中,Akinwolemiwa与Chen^[3]从基础概念和工程设计的角度出发,对超级电容池的充放电行为和机理作了详细介绍、解释和分析。对于充放电机理,他们认为,电极上可以发生的、有电子转移的法拉第反应有两种。第一种是传统蓄电池电极上发生的反应。这类反应是由电极活性材料中的定域价电子(localised valence electrons)的转移来实现的,其电化学行为基本符合能斯特方程(Nernst equation),例如在CV上表现为成对的氧化和还原电流峰,如图2(a)^[3]所示。第二种是赝电容电极上的反应,由离域价电子的转移来完成。其电化学行为基本不能用能斯特方程来描述,但是与传统的电容器电极相似,即CV是矩形的,如图2(b)^[3]所示。图2(c)^[1,3]对这两类电极反应及其与材料的价电子能级理论的关系作了进一步说明。其中最左边代表的是定域价电子,存在于电子绝缘体或溶液中的分子或离子,与能斯特方程对应;最右边是完全离域价电子,描述的是金属等高导电材料,在不破坏材料的前提下,一般没有氧化还原活性;绝缘体和导体之间是局域离域价电子,存在于很多本征半导体材料中,与赝电容对应。



(a) 含二茂铁基团的惰性聚合物修饰电极在水性电解质中的循环伏安谱;

(b) 典型的赝电容材料氧化锰修饰电极在水性电解质中的循环伏安谱;

(c) 与不同储电机理相关联的能带理论示意

图2 两种法拉第储能材料循环伏安谱及相关能带理论特征

Fig. 2 CVs and energy band features of two different Faradaic energy storage materials

在超级电容池的制造方面, Akinwolemiwa 与 Chen 介绍了近期发表的双极板内部串联、制作超级电容池电堆的设计和验证研究工作。图 3^[3]显示的是一个由钛双极板串联的 19 个单池的超级电容池堆例子。这样的内部连接设计, 由于相邻的两个单池共用了同一块极板, 因此所用极板的数量比外部连接要少很多。具体来说, 如果需要连接 n 个单池, 外部连接需要 $2n$ 块极板, 而双极板内部连接就只需 $n+1$ 块极板。因此, 对于 n 值较大的电堆, 可以大为节省电极集流体材料和提高电堆整体比能量和能量密度。应该指出的是, 双极板内部串联设计, 不仅适用于超级电容池, 也适用于蓄电池和超级电容器。

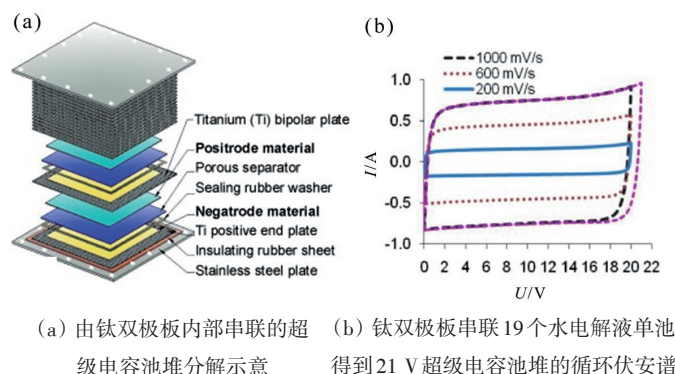


图 3 双极板内部串联超级电容池堆结构和循环伏安谱

Fig. 3 Structure and CVs of a supercapattery stack with bipolar plates

Akinwolemiwa 与 Chen 对目前电化学储能研究中易被混淆的概念及其意义作了相关说明。除了上述关于赝电容电极反应与蓄电池电极反应的区别外, 还包括能量密度、功率密度与比能量、比功率的区别。对于超级电容器-蓄电池混合装置的名称, 他们的观点是, 由于目前文献中已有的一些名称是局限于特殊电极材料和相关电极反应的, 而且每个单池中都存在蓄电池电极反应, 这些混合型装置已经不是电容器了, 因此也不应再称其为某电容器, 或者某混合型超级电容器等, 以避免使人产生误解。超级电容(电)池则可以清楚地表明它是一种新型装置, 与超级电容器和蓄电池相关, 但又有本质上的不同。

2018 年发表的论文中, 与超级电容器-蓄电池混合储能器件相关的名称包括锂离子电容器、钠离子电容器、混合型离子电容器和超级电容池。与往年一样, 2018 年超级电容池的研究重点集中在电极材料的制备

和测试方面。一个明显的热点是以原生或废弃生物质为碳原, 制备具有纳米结构的碳电极材料。例如, Arie 等^[4]以桔子皮为原料, 使用 ZnCl_2 对其进行化学活化, 制备出具有高比表面积活性碳。当 ZnCl_2 /桔子皮的质量比为 1:2 时, 得到活性炭的比表面积达 $1200 \text{ m}^2/\text{g}$, 相应的比电容达 100 F/g 。Vadivazhagan 等^[5]将玉米穗丝进行碳化、活化, 得到的活性碳材料的比表面积达 $2550 \text{ m}^2/\text{g}$ 。将获得的活性碳制成对称型钠离子电容器, 获得了 $126\sim 135 \text{ F/g}$ 的材料比电容, 充放电电流可高至 3 A/g , 而最高比能量和比功率达到 109 Wh/kg 和 12.2 kW/kg 。

由于资源丰富, 钠离子超级电容池的研发是 2018 年的另一个热点。但是, 钠离子电极材料的一个缺点是需要进行预先钠离子活化。Li 与合作者^[6]将 Fe_{1-x}S 做成正极, 与活性碳负极和用乙醚配制的电解液匹配制成钠离子电容器, 获得的比电量、比能量和比功率分别为 340 mAh/g 、 88 kWh/kg 和 11.5 kW/kg 。

由于乙醚和其他常见有机溶剂的沸点低, 易挥发、易燃, 因而在工业生产与产品的存放和应用过程中, 对安全有较高要求。使用有机电解液的一个主要原因是其较宽的电化学窗口以及由此决定的较高的单池工作电压 (2.5 V 以上)。为了保持这种高电压优势, 避免易挥发、易燃的缺点, 近期很多研究都致力于开发由几乎不挥发、不燃烧的有机盐构成的离子液体电解液。例如, Hirota 等^[7]以锂离子、乙-甲基咪唑阳离子和双氟磺酰亚胺阴离子 [1-ethyl-3-methyl imidazolium, bis(fluoro-sulfonyl)imide] 组成的离子液体作为电解液, 并与传统的有机 LiPF_6 电解液在含有多孔碳电极的锂离子电容器单池中进行测试和比较。结果表明, 离子液体有利于提高单池的充放电功率和增宽工作温度范围; 尤其是在 0°C 的低温测试中, 离子液体单池的放电容量明显高于传统有机电解液单池。

2018 年已发表的论文中, 以超级电容池概念为中心的研究工作明显比往年增加。通常情况下, 水系电化学储能装置的比能量低于使用有机电解液的装置。然而, 水系装置在充放电速度、原料和生产成本、安全性能以及对环境影响等方面仍然具有优势。因此, 水系超级电容池技术的研发也是 2018 年引人关注的一个方面。Surendran 等^[8]在碳纳米纤维 (NCF) 表面包覆 NiCoP , 得到了既具有电催化活性, 又有高储能容量的复合电极材料。对以该材料为电极组装的对称型水系超级电容池进行测试, 获得的材料比电容为 333 F/g , 比

能量和比功率分别达 36 Wh/kg 和 4 kW/kg, 稳定循环充放电达 25000 周。从该论文报告的单电极充放电曲线可以注意到, NiCoP-NCF 复合材料作正极时, 其电子转移反应是典型的能斯特反应, 但电化学可逆性不高, 充放电库仑效率较低。然而, 如果用该复合材料作为负极使用, 则表现出较理想的电容行为, 且电位范围达到 1.0 V。虽然从电极材料的组成和质量上讲, 该研究组装的是一个对称装置, 然而由于该复合材料的正极活性(能斯特活性)和负极活性(电容活性)完全不同, 因此该对称装置实际上是非对称的。这个发现有较高的实际应用意义, 因为对称型储能装置的结构和制造设计上都比非对称装置简单, 可以达到与非对称装置相同或相似的实际效果, 会带来经济上的效益。

超级电容池的特点是储能机理同时包括电容性(capacitive)和非电容性(non-capacitive)储电过程。对于非电容性电子转移反应, 反应活性物质可以负载在电极上, 但也可以存留在电解液中。根据应用需求, 后者可能带来很多技术上的优势。Akinwalemiwa 等^[9]在对称型和非对称型活性炭超级电容器的水系电解液中加入具有氧化还原活性的 KBr 和 KI, 并考察了相应的充放电行为。早期研究发现, I^- 和 Br^- 在水溶液中都可以通过发生阳极氧化, 分别生成 I_2 和 I_3^- , 以及 Br_2 和 Br_3^- 。由于 I^- 的氧化电位与活性炭电容器中的正、负极的零电压电位(即电容器放电到 0 V 电压时, 正、负极同时达到的相同电位)非常接近, 因而只对电容器在低电压时充放电量的提高有贡献。但是, 由于是低电压, 这些额外储存的电量对于提高电容器的能量储存容量没有太多帮助。由于同样的原因, 在两电极单池中, I^- 不仅在充电时会在正极上发生氧化反应, 而且在放电时也会在负极上发生氧化反应。然而, Br^- 的氧化电位远高于零电压电位, 因此只能在充电时在正极上发生氧化反应, 在放电时却不会在负极上发生 Br^- 的氧化反应。他们还发现, 由于 I^- 氧化电位低, 电极表面的电场弱, 电极对 I^- 及其氧化反应产物 I_3^- 吸附能力也弱, 这样就会帮助反应物和产物在正负极之间的电解液中循环, 导致电流效率下降。而 Br^- 的氧化电位高, 有利于 Br^- 及其氧化反应产物 Br_3^- 在正极上的吸附。由于这个原因, 活性炭电极在 KBr 电解液的储能容量会大于在 KI 溶液中的储能容量。图 4^[9]是活性炭电容器含有 KI 和 KBr 的循环伏安谱, 可以看出, 在低电压充电和放电时, 在 KI 溶液中记录的循环伏安谱上有额外电流峰出现; 而在 KBr 溶液

中, 电流增加发生在高电压范围, 因而更有利于提高储能容量。

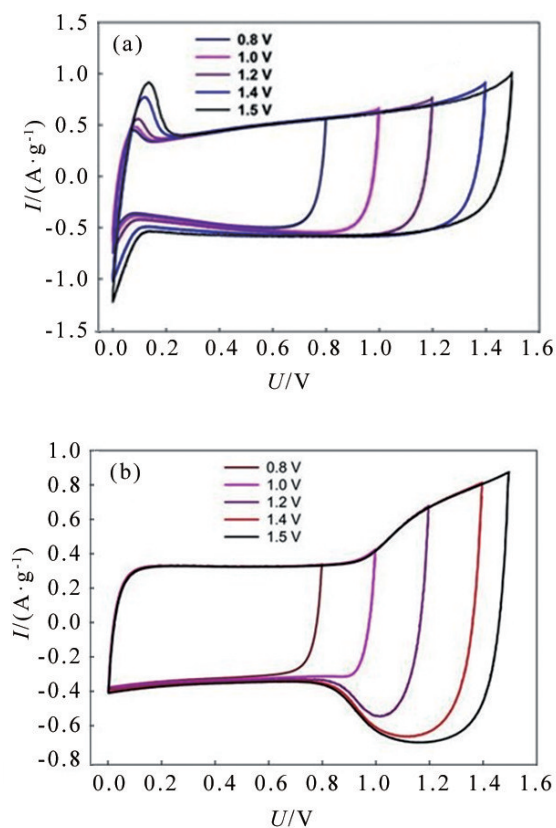


图4 活性炭超级电容器在 2.0 mol/L 的 KI(a) 和 KBr(b) 电解液中的循环伏安谱

Fig. 4 CVs of activated carbon supercapacitor in 2 mol/L KI (a) and KBr (b) electrolytes

3 结论

对超级电容池(包括混合型离子电容器)这种新型电化学储能器件作了原理上的介绍, 并对 2018 年发表的相关研究发展作了选择性分析和评述。从技术层面上讲, 超级电容池同时具有超级电容器和蓄电池优点, 其工作原理已在实验室研究中广泛证明。因此, 工业化规模验证是目前和不久的将来的一个主要研发方向。目前的超级电容池技术进一步发展的另一个方向是需要提高储能密度。采用有机电解液的混合型离子电容器, 特别是锂离子电容器, 由于工作电压较高, 其能量密度已经比传统超级电容器提高很多, 而且随着研究的深入, 还会继续改进。使用离子液体替代常规有机电解液的研究证明了前者在热稳定性和安全性方面的

优势。水系超级电容池的研究也带来很多技术指标上的进步,其高功率密度、长循环寿命、安全环保、低成本等优势,让水系储能技术的发展成为大规模储能应用的优选,同时也是高能量密度的有机电解液储能技术的有益补充。在工艺设计方面,文献中尚未多见的、双极板内部连接的多单池电堆的研究也为超级电容池的工业应用提供了另一条低成本发展路线。

参考文献(References)

- [1] Chen G Z. Supercapacitor and supercapattery as emerging electrochemical energy stores[J]. *International Materials Review*, 2017, 62(4): 173–202.
- [2] Ding J, Hu W B, Paek E, et al. Review of hybrid ion capacitors: From aqueous to lithium to sodium[J]. *Chemical Reviews*, 2018, 118: 6457–6498.
- [3] Akinwolemiwa B, Chen G Z. Fundamental consideration for electrochemical engineering of supercapattery[J]. *Journal of Brazilian Chemical Society*, 2018, 29(5): 960–972.
- [4] Arie A A, Kristianto H, Halim M, et al. Preparation of orange peel based activated carbons using chemical activation and surface modification method as electrode's materials for lithium ion capacitor[J]. *Science of Advanced Materials*, 2018, 10(1): 119–123.
- [5] Vadivazhagan M, Parameswaran P, Mani U, et al. Waste-driven bio-carbon electrode material for na-ion storage applications[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, 6(11): 13915–13923.
- [6] Li S H, Chen J W, Gong X F, et al. A nonpresodiate sodium-ion capacitor with high performance[J]. *Small*, 2018, 14(50), doi: 10.1002/sml.201804035.
- [7] Hirota N, Okuno K, Majima M, et al. High-performance lithium-ion capacitor composed of electrodes with porous three-dimensional current collector and bis(fluorosulfonyl) imide-based ionic liquid electrolyte[J]. *Electrochimica Acta*, 2018, 276: 125–133.
- [8] Surendran S, Shanmugapriya S, Sivanantham A, et al. Electropun carbon nanofibers encapsulated with NiCoP: A multifunctional electrode for supercapattery and oxygen reduction, oxygen evolution, and hydrogen evolution reactions[J]. *Advanced Energy Materials*, 2018, 8(4), doi: 10.1002/aenm.201800555.
- [9] Akinwolemiwa B, Wei C H, Yang Q H, et al. Optimal utilisation of combined double layer and Nernstian charging of activated carbon 1 electrodes in aqueous halide supercapattery through capacitance unequalisation[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2018, 165(16): A4067–A4076.

Supercapattery and its fundamental research in 2018

CHEN George Zheng^{1,2}

1. Department of Chemical and Environmental Engineering, University of Nottingham, Nottingham NG7 2RD, UK

2. Department of Chemical and Environmental Engineering, University of Nottingham Ningbo China, Ningbo 315100, China

Abstract The new electrochemical energy storage device, supercapattery, is introduced as a hybrid of supercapacitor and rechargeable battery. Selected research publications in 2018 on supercapattery and related topics are reviewed with critical analysis and comments. It is anticipated that supercapattery can and will play an important role in both mobile and stationary applications involving energy storage. ●

Keywords supercapattery; energy storage; electrochemistry ●



(责任编辑 王丽娜)