

基于银氧化物电极的高比能电池研究进展

王维宇, 郑春满*, 堵永国, 王震, 余翠娟
(国防科技大学 空天科学学院, 长沙 410073)

摘要: 基于银氧化物电极(银电极)的高比能电池具有比能量大、输出功率高、放电平稳、安全可靠等优点; 银电极作为此类电池的关键部件, 决定着电池性能的优劣。简要介绍了银电极的工作原理和制备方法; 详细分析了银电极中 AgO 分解、两坪阶电位、活性物质利用率和高倍率放电性能等研究现状; 综述了锌银、铝银和锂银等几类基于银电极的高比能电池的原理与特点、发展与应用、性能与改进方法等; 对基于银电极的高比能电池的发展方向进行展望。

关键词: 金属材料; 氧化银电极; 高比能电池; 活性物质

中图分类号: TM911 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2020)02-0082-07

Research Progress of High Specific Energy Batteries Based on Silver Oxide Electrode

WANG Wei-yu, ZHEN Chun-man*, DU Yong-guo, WANG Zhen, YU Cui-juan

(College of Aerospace Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The high specific energy battery based on silver oxide electrode (Silver electrode) has the advantages of high specific energy, high output power, stable discharge, safety and reliability, etc. As a key component of this type of battery, silver electrode determines the performance of the battery. The working principle and preparation method of silver electrodes are briefly introduced. The AgO decomposition, two-stage potential, active material utilization rate and high rate discharge performance in silver electrode were analyzed in details. The principle and characteristics, development and application, performance and improvement methods of several types of high specific energy batteries based on silver electrode such as zinc silver, aluminum silver and lithium silver were reviewed. The development direction of high specific energy batteries based on silver electrode was prospected.

Key words: metal material; silver oxide electrode; high specific energy battery; active substance

基于银氧化物电极(银电极)的高比能电池是上世纪 50 年代发展起来的一类电池, 相继发展出锌银电池、镁银电池、铝银电池和锂银电池等多个种类, 它们均以银电极为正极。得益于银电极优异的电化学性能, 基于银电极的高比能电池具有比能量高、比容量高、输出功率高、放电平稳、安全可靠等优点, 在国民生产建设, 尤其是国防领域应用广泛。

随着社会发展和科技进步, 各应用领域对高比能电池的容量、输出功率、安全性和寿命等性能提出了更高要求, 因此进一步提高电池性能是高比能

电池研发的重要工作。银电极作为这类电池的关键部件, 决定着电池性能的优劣, 一直是国内外关注的重点。本文对银电极的发展和研究现状进行综述, 并对基于银电极的高比能电池发展方向进行展望。

1 银电极的工作原理与制备方法

银电极一般由两层活性物质夹以导电网构成, 如图 1 所示。为提高电极性能, 有时也加入粘合剂、添加剂等。银在氧化物中呈+1、+2 和+3 共 3 种价

收稿日期: 2019-11-24

第一作者: 王维宇, 男, 硕士研究生, 研究方向: 能源材料。E-mail: potti18759@163.com

*通讯作者: 郑春满, 男, 教授, 研究方向: 电子材料及器件。E-mail: zhengchunman@nudt.edu.cn

态，对应氧化物为 AgO 、 Ag_2O 、 Ag_2O_3 。高比能电池中，银电极的活性物质为银氧化物的混合物，其成分以 AgO 为主。

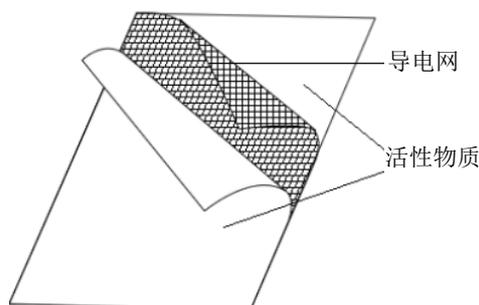
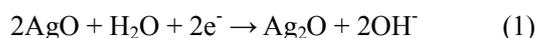


图 1 银电极结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of silver electrode structure

1.1 银电极的工作原理

银的标准电极电位为 0.799 V，一般作为电池正极，在放电过程中高价的银有得到电子向低价银转变的趋势，这个趋势推动电极的放电过程。其放电反应为：



1.2 银电极的制备方法

1.2.1 活性物质的制备

活性物质的制备有两种方法：一是直接制备法，即用化学法或电化学法直接合成；二是间接制备法，即先将活性银粉制成电极，而后化成，间接得到荷电状态的活性物质。其中，间接法制备的电极机械强度高，活性物质均匀，高倍率放电性能好，但活性物质的构成不确定，一般认为是 AgO 、 Ag_2O 和 Ag 的混合物，并有 H_2O 、 KOH 等杂质^[1]，这对 AgO 的稳定性影响极大。直接法制备的电极机械强度略低，但其制备简单，成本低，且活性物质中杂质较少。间接制备法适合大功率放电场合，直接制备法适合小功率放电场合。国内多采用间接法将醋酸银热分解为活性银粉制备活性物质。

1.2.2 银电极的制备

银电极制备一般采用 3 种方式^[2]：烧结式、压成式和薄膜式。

烧结式银电极首先将银粉压制成形，烧结定形，而后化成，经清洗、干燥、剪裁等流程得到荷电状态银电极。烧结使活性物质形成连接紧密而多孔的结构，有利于提高电池的放电功率和循环寿命。烧结式银电极主要有银粉烧结、树脂烧结和氧化银烧

结等 3 种方法^[2]。化成是对成型的电极极板以小电流充电的过程，影响着电极与电解液界面的形貌与状态，不同化成温度、化成制度等处理方法对电极性能产生不同的影响。

由于 AgO 的分解活化能比较小，无法用烧结的方法使活性物质致密化，因此一般采用机械加压和添加粘合剂的方法使其致密化。压成式银电极将直接制备的 AgO 粉经机械施压制得荷电电极，主要分为湿压法和干压法两种制备方法。相比于烧结式电极，压成式电极省去化成步骤，对生产和应用有重要意义。

薄膜式电极一般采用磁控溅射或化学气相沉积等方法制备。相对于传统电极而言，薄膜式电极厚度小，活性物质与电解质的接触面积大，电极吸液率高，并在一定程度上使活性物质分布更加均匀，这对提高放电功率和活性物质利用率十分有利，因而薄膜式电极具有优异的电化学性能。

2 银电极研究现状

银电极电化学性能突出，但存在 AgO 分解、两坪阶放电等问题。因此，解决和完善银电极存在的问题，改进和创新银电极的工艺技术，对电池性能的提高和应用范围的拓宽有积极意义。

2.1 AgO 分解

银电极活性物质 AgO 不稳定。Dallek 等^[3]报道了 AgO 的分解活化能约为 100~133 kJ/mol，较低的活化能使 AgO 容易分解，造成电池容量的损失和电压的降低，并伴有气体产生，增加电池的内压。其反应为：



孟凡明等^[4]采用硅酸钠和氟橡胶对银电极表面进行双重处理，结果表明，处理后的电极在室温具有较高的热力学稳定性。Serenyi^[5]报道了一种高温充电的方法，即在高温下充电会使银电极结构发生改变，提高了活性物质热稳定性。Takeda 等^[6]在制备 AgO 的过程中把 Al 、 Pb 、 Cd 、 Te 和 Tl 的硝酸盐溶液加入到硝酸银溶液中，结果显示添加 0.3% Cd 、0.1% Te 、和 0.1% Tl 可以提高银电极的稳定性。

2.2 两坪阶电位

烧结式银电极的活性物质是 AgO 、 Ag_2O 和 Ag 的混合物。其中， $\text{AgO}/\text{Ag}_2\text{O}$ 的电位为 0.607 V，

$\text{Ag}_2\text{O}/\text{Ag}$ 的电位为 0.345 V, 不同电位差对应不同的电位坪阶。如图 2^[7]所示(以锌为负极), 充电(Charge)时先发生 Ag 到 Ag_2O 的转化, 对应低电位坪阶; 再发生 Ag_2O 到 AgO 的转化, 对应高电位坪阶。放电过程(Discharge)与之相似。这种充放电特点不适合

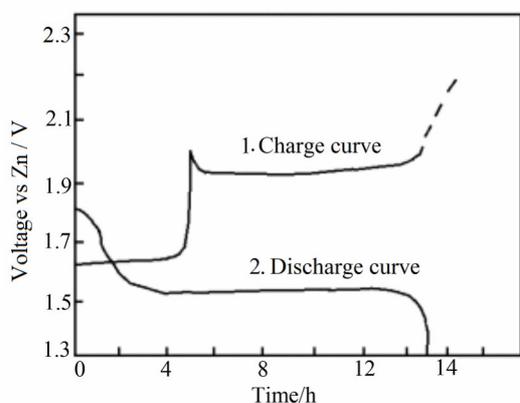


图 2 银电极充放电曲线^[7]

Fig.2 Charge and discharge curve of silver electrode

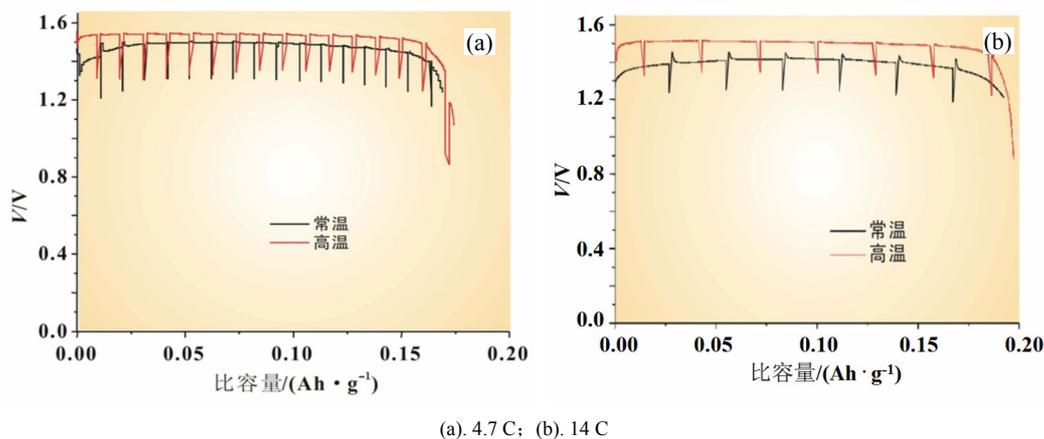


图 3 银电极放电曲线图^[10] Fig.3 Discharge curve of silver electrode

薄膜电极比表面积大, 有利于提高活性物质利用率。张增院^[11]用直流磁控溅射技术, 通过改变反应气压、溅射功率等参数制备了 Ag_xO 薄膜, 并探索了单相 Ag_2O 薄膜的制备工艺参数。熊曹水等^[12]在氧氩比为 1:1 的室温条件下, 通过磁控反应溅射法溅射银粒子与氧反应, 制备氧化银薄膜。魏杰^[13]利用低温气固合成法在基底上直接制备 AgO 薄膜。Jin 等^[14]把银箔浸入盐酸溶液(0.1 mol/L)中, 采用氧化还原法制备了厚度可控的超薄银电极。单秋林^[15]将银电极制成薄片电极, 厚度降低了 1/3, 活性物质的利用率提高了 55%至 60%。Ho 等^[16]报道了利用特种喷墨印刷设备制备三维银电极, 此种银电极比表面积大、容量高、活性物质利用率高。

对电压精度要求高的器件和场合。

Bagotzky 等^[8]在银电极中添加 2%的 PbO , 结果表明, 在小电流放电的情况下, 电极中形成了低电阻的银铅化合物, 高阶电位基本消失。刘伟^[9]指出, 电解液中添加卤素离子和特殊的充电方法均可在一定程度上消除高阶电压。

2.3 活性物质利用率

银作为银电极的原料价格昂贵, 限制了银电极的发展与应用。因此, 提高银的利用率, 尤其是高功率放电条件下的利用率是未来银电极发展亟需解决的问题。

刘延东等^[10]用化学方法制备了纯度为 95.6%的氧化银(Ag_2O)粉末, 其形貌为微米级球状颗粒, 比表面积为 $0.621 \text{ m}^2/\text{g}$ 。如图 3 所示, 电极在 4.7C 和 14 C 下恒流放电电压精度分别为 $\pm 7.9\%$ 和 $\pm 9.8\%$, 在 140 C 脉冲放电下电压高于 71.4%负载最高电压, 电极活性物质利用率可以达到 82%以上。

2.4 高倍率放电性能

高倍率放电性能是衡量高比能电池性能的重要指标。影响银电极高倍率放电性能的因素复杂而多样, 其中电极活性物质与电解质的接触面积是重要影响因素, 接触面积是由电极比表面积和电极吸液率共同决定的。纳米材料具有的特殊效应, 使得采用纳米材料制备的电极具有比表面积大、活性高、利用率高、均匀性好等特点。活性物质纳米化是电极发展的一个重要方向。

刘洪涛等^[17]将纳米 Ag_2O 粒子加入银电极中, 结果表明其电化学性能良好。张钰^[18]合成了一种纳米 AgO 颗粒。用该材料制成的银电极大电流放电性能较好。王震等^[19]利用银纳米线(如图 4 所示)制备

了一种超活性银电极。该电极比表面积高、厚度小、体电阻小、结构稳定，尤其是在比表面积和体电阻方面优势明显。基于此电极的电池比能量、比功率、活性物质利用率等性能均有所提高。

田华等^[20]在浓氢氧化钠溶液中，通过氧化银纳

米颗粒制备得到 AgO 有序阵列结构电极材料，如图 5 所示。所制备的电极材料具有独特的孔阵列结构，这种结构对提高容量、放电倍率和循环寿命以及减小极化是有利的。

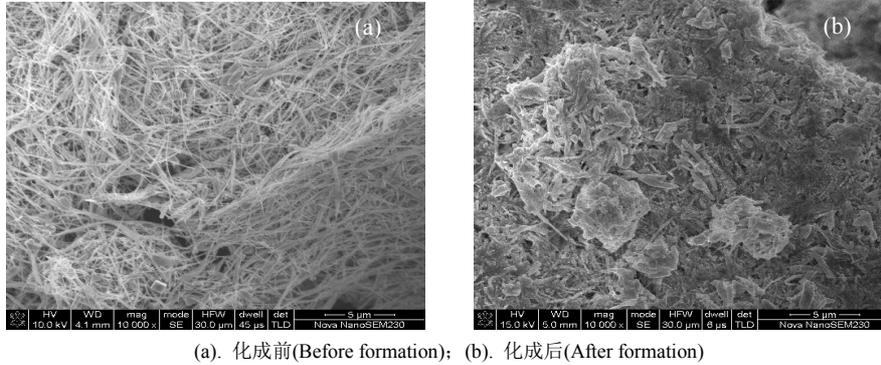


图 4 银纳米线电极微观形貌图^[19] Fig.4 Microstructure of silver nanowire electrode

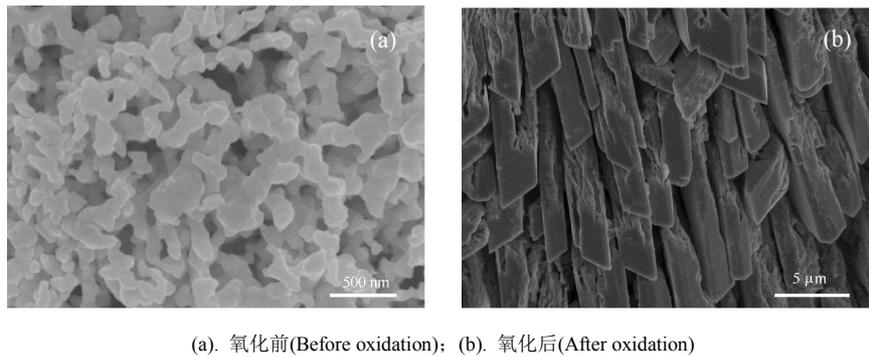


图 5 有序银电极微观形貌图^[20] Fig.5 Microstructure of ordered silver electrode

3 基于银电极的高比能电池

早在 1950 年代，Yardney 公司便开发出第一个实用锌银高比能电池，锌银电池技术成熟、性能稳定，被广泛应用于各型导弹、火箭、航天器、卫星、鱼雷、水雷、潜水艇、救生器等设备上。随着科技进步，铝银电池、锂银电池等高性能电池相继出现，基于银电极的高比能电池得到快速发展和更广泛的应用。

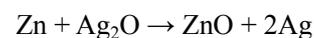
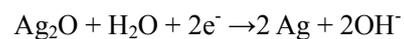
3.1 锌银电池

锌在碱性溶液中的标准电极电位为 -0.763 V，电化学当量为 1.220 g/Ah。从高于铝、镁、锂等元素的电化学当量来看，锌并不是一种理想的负极材料。但锌在碱性溶液中电化学反应活性高、稳定性好，且其储量丰富，应用成本低，被广泛用作负极材料。锌银电池以锌为负极、银电极为正极，多以

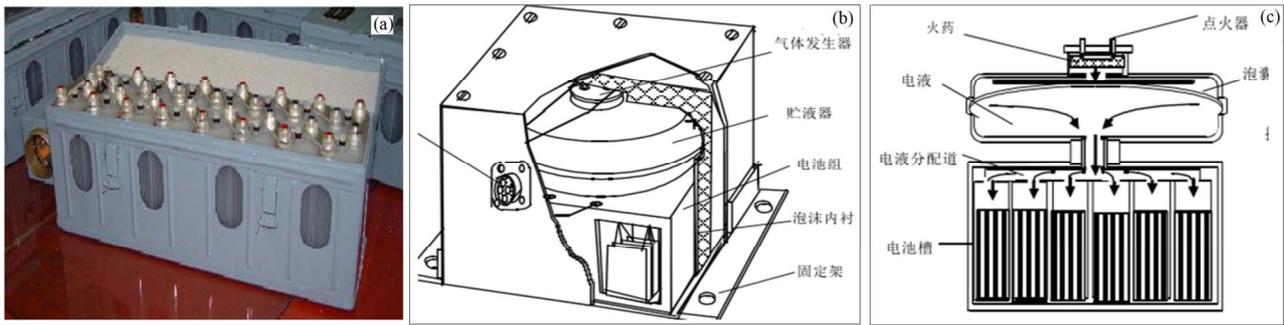
30%~45%(质量分数)的 KOH 水溶液为电解液。以 XYG45 电池(如图 6 所示)为例，电池贮备时电解液不与电极接触；激活时，电解液注入，电池工作。

锌银电池实际比容量高、工作电压高、比能量高、高倍率放电性能好、放电平稳、技术成熟、安全可靠，其理论比能量可达 540 Wh/kg。

锌银电池电极反应为：



银的氧化物略溶于碱性溶液，形成胶体氧化银，在内电势的驱动下移向负极，到达隔膜时，将隔膜氧化，而自身还原成银。这种对隔膜的破坏和银的迁移容易造成短路，对电池危害极大。一种解决思路是采用高性能隔膜或者复合隔膜，以减缓银的迁



(a). 实物图(Figure); (b). 结构图(Structure); (c). 工作图(Process)

图 6 XYG45 型电池 Fig.6 XYG45 battery

移带来的不利影响；另一种思路是对银电极进行表面处理，以减少银的迁移，提高电池寿命。

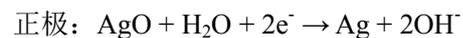
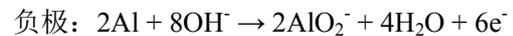
此外锌电极还存在钝化、腐蚀和变形等问题。杨丽兰等^[21]通过在电解液中添加 0.1% 四丁基氢氧化铵，使放电产物 ZnO 变为疏松刺球状结构，这种结构容易从锌负极表面脱落，从而延缓了锌负极的钝化；张艳艳^[22]在锌粉中掺杂高电位金属元素，制备出 Zn-In-Bi、Zn-Pb-Bi、Zn-Pb-In 和 Zn-Pb-In-Bi 等多元合金，该合金组分能够减缓锌电极的析氢腐蚀；夏天等^[23]探索了 PbO 和其他三元合金作为缓蚀剂的效果，在高倍率放电条件下，能有效降低锌负极的析氢量；傅强^[24]指出目前减少电极变形的主要方向是降低氧化锌在碱液中的溶解度、使电极表面电流分布更均匀以及减少电池中的对流传质等。

3.2 铝银电池

铝的标准电极电位为 -1.663 V，电化学当量为 0.335 g/Ah。铝有较高的电导率和较小的密度，其体积比能量为 8.04 Ah/cm³，高于 Zn 的 5.85 Ah/cm³、Mg 的 3.83 Ah/cm³ 和 Li 的 2.06 Ah/cm³。从热力学上来说，铝是一种理想的负极材料，但实际应用中还存在阳极钝化和自腐蚀等问题。

铝银高比能电池由美国于上世纪 70 年代率先研制，此后，ALCAN 公司设计了电液循环系统；

法国 SAFT 公司研发了辅助系统，有力的解决了铝银电池的电液性能衰减、放热、排气等问题。铝银电池主要应用于鱼雷领域，以铝合金为负极、银电极为正极，以 KOH、NaOH 海水溶液为电解液。凭借其性能优势，铝银电池逐步取代锌银、镁银等电池，成为新一代鱼雷的动力电源。法国的“海鳗”、黑鲨 IF21 鱼雷；意大利的 A290、MU-90 鱼雷；德国的 DM2A4 鱼雷，均以铝银电池作为动力，它们代表了上世纪末鱼雷的最高水平。相较于锌银电池，铝银电池具有放电功率大、工作电流大、贮备安全可靠、电池内外压相等优点，其理论比能量可达 1090 Wh/kg。铝银高比能电池是一种海水激活电池(如图 7 所示)^[25]。铝银电池电极反应为：



在贮备阶段，电解质以固体存储，电池不会激活。激活时引入海水，形成液态电解质。随着放电反应进行，电解液逐渐消耗，碱性降低，控制系统会根据电解液浓度继续引入海水，排出铝盐，形成电解液的循环。与此同时，温控系统，排气系统等辅助系统协同工作，完成放电。

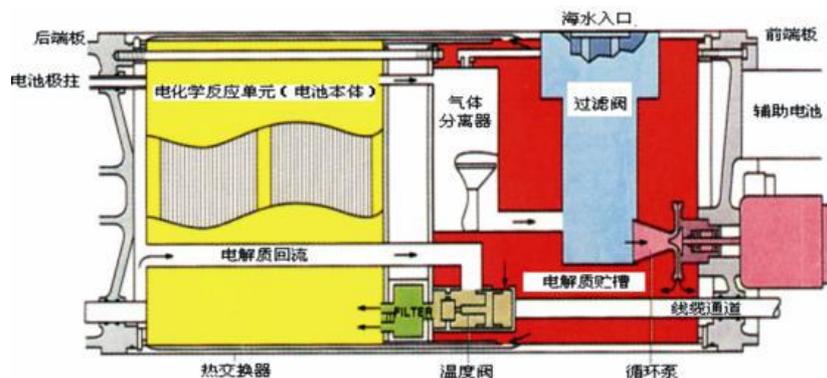


图 7 铝银电池结构示意图^[25] Fig.7 Structure diagram of aluminum-silver battery

循环辅助系统和铝电极合金化对提高铝银电池性能意义重大。蔡年生^[26]研究了铝银电池电解液循环系统的重要性,探讨了不同的循环控制方式对电池性能影响。唐桂林等^[27]对不同温度、不同密度、不同成型方式、不同添加剂的电解质溶解速度进行了初步研究,探讨了电解质固体的制备参数。铝在碱性环境中活性不高,造成电压滞后现象。石治国^[28]指出在铝电极中添加如 In、Mn、Mg、Zn、Ga、Sn、Tl 等合金元素,能够增强铝电极活性。

3.3 锂银电池

金属中锂的标准电极电位最负(-3.045 V),密度最小(0.535 g/cm³),因此锂是理想的负极材料。锂银电池以银电极为正极,锂合金为负极,较浓的 LiOH 海水溶液为电解液。锂银电池是基于铝银电池发展而来的一种高性能水激活电池,需要完整的辅助系统来保证电池放电的稳定进行,其主要应用于鱼雷领域。锂银电池具有相当高的比能量(其理论比能量为 1350 Wh/kg),和较高的工作电压,是未来高比能电池发展的重要方向。国内锂银高比能电池还处于研发状态。

锂银电池电极反应为:

负极: $\text{Li} \rightarrow \text{Li}^+ + \text{e}^-$

正极: $2\text{AgO} + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ag}_2\text{O} + 2\text{OH}^-$

$\text{Ag}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Ag} + 2\text{OH}^-$

锂是一种活泼的金属,与水系电解液反应剧烈,并且锂与水的反应难以完全避免。研究人员发现锂电极放电产物能够在电极表面形成相对稳定的氢氧化锂钝化膜,此钝化膜能够抑制锂与水反应,从而使放电反应成为电极表面的主要反应。

锂电极自腐蚀、钝化膜生成和存在条件以及提高安全性和使用寿命是锂银电池重要的研究方向。Littauer 等^[29-30]研究了锂在水溶液中的阳极行为和碱性条件下的腐蚀行为,探讨了电解液浓度、温度、电极表面流速和放电电流密度等对氢氧化锂膜的影响。为锂银电池体系的设计提供了技术储备。张祥功等^[31]指出锂-铝合金能够降低锂的活性,减少锂与水的直接反应,提高锂的利用率。有学者提出了一种采用两种电解液的新型锂氧化银电池结构,该电池正极以碱金属溶液为电解质,负极以有机溶液为电解质,两种电解质以 Lisicon 隔膜分开,从而解决了锂电极腐蚀析氢的问题。张栋^[32]用 Celgard 隔膜取代 Lisicon 隔膜,将两相电解质分开,以探究其性能,并探讨了全有机电解质锂银电池的性能,取得较好效果。

4 展望

基于银电极的高比能电池在比能量、输出功率、放电平稳性等方面优势突出,但距其理论极限仍有差距,性能均衡性仍有不足,进步空间依然很大。未来技术突破集中在以下方向:

1) 电极材料的纳米化。纳米材料能够表现出完全不同于原材料的性质。纳米材料特殊的理化性质及特殊的效应,使得基于纳米活性物质的电极在比表面积、孔隙率、均匀性等方面具有优势。

2) 电极材料的合金化:合金电极能够改善析氢、钝化、溶解、迁移等问题。电极材料合金化的机理至今还未能统一,但其效果已得到验证。

3) 电源整体结构的优化设计:电源是一个整体,电池各个性能指标很难做到完美,将各类优势性能的电池进行组合以取长补短,能够充分发挥各类电池的突出优势。

参考文献:

- [1] 吕霖娜,林沛,韩雪荣. 铝氧化银电池正极材料 AgO 的分解动力学研究[J]. 电源技术, 2011, 35(8): 976-978.
LÜ L N, LIN P, HAN X R, et al. Decomposition kinetics of AgO cathode material for silver oxide/aluminum battery[J]. Chinese journal of power sources, 2011, 35(8): 976-978.
- [2] 吕霖娜,杨雁博,李学海,等. 银电极制备方法综述[J]. 电源技术, 2016, 40(10): 2088-2091.
LÜ L N, YANG Y B, LI X H, et al. Review of fabrication methods of silver oxide electrode[J]. Chinese journal of power sources, 2016, 40(10): 2088-2091.
- [3] DALLEK S, WEST W A, LARRICK B F. Decomposition kinetics of AgO cathode material by thermogravimetry[J]. Journal of electrochemical society, 1986, 133(12): 2451.
- [4] 孟凡明,李利群,肖定全. Zn/AgO 贮备电池存储寿命研究[J]. 功能材料, 2004, 35(2): 203-205.
MENG F M, LI L Q, XIAO D Q. Researches on the storage life for Zn/AgO reserve batteries[J]. Journal of functional materials, 2004, 35(2): 203-205.
- [5] SERENYI R. Silver-zinc battery technology improvement program[C]. Proceedings of the 41st Power Sources Conference. New Jersey: USA Army Research Laboratory, 2004: 465-468.

- [6] TAKEDA K, HATTORI T. Optimization of the amount of additives to AgO cathodes on high-drain pulse performance of Zn/AgO cells[J]. *Journal of the electrochemical society*, 2001, 148(1): 44-48.
- [7] 张辉, 朱立群. 用于锌银蓄电池氧化银电极的研究进展[J]. *稀有金属材料与工程*, 2008, 37(6): 1124-1128.
ZHANG H, ZHU L Q. Development of silver oxide electrode in silver-zinc storage batteries[J]. *Rare metal materials and engineering*, 2008, 37(6): 1124-1128.
- [8] BAGOTZKY V S, YABLOKOVA I E, KAZAKEVICH G Z. Problems in field of silver-zinc storage batteries[C]. Pennington: The Electrochemical Society, 1995.
- [9] 刘伟. 银电极化成工艺的研究现状[J]. *电源技术*, 2016, 40(8): 1735-1736.
LIU W. Research status of formation process for silver electrode[J]. *Chinese journal of power sources*, 2016, 40(8): 1735-1736.
- [10] 刘延东, 刘孟峰. 锌银贮备电池超高倍率氧化银电极研究[J]. *电源技术*, 2016, 40(8): 1622-1623.
LIU Y D, LIU M F. Study on extra-high rate silver oxide electrodes for silver zinc reserve battery[J]. *Chinese journal of power sources*, 2016, 40(8): 1622-1623.
- [11] 张增院. 氧化银薄膜的制备和相关性质的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2011.
ZHANG Z Y. Study on preparation and properties of silver oxide thin film[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2011.
- [12] 熊曹水, 熊永红, 赵天鹏, 等. AgO_x 薄膜的光开关特性和机理研究[J]. *中国激光杂志*, 2002, 29(5): 436-439.
XIONG C S, XIONG Y H, ZHAO T P, et al. An approach for optical switching property and mechanism of AgO_x thin films[J]. *Chinese journal of lasers*, 2002, 29(5): 436-439.
- [13] 魏杰. 氧化银纳米薄膜的原位气固合成及其在杂化薄膜太阳能电池中的应用[D]. 郑州: 郑州大学, 2014.
WEI J. In-situ gas-solid-phase synthesis of silver oxide nanostructural thin films for hybrid solar cells[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014.
- [14] JIN X, LU J, XIA Y, et al. Ultra-thin silver electrodes for high power density pulse batteries[J]. *Journal of power sources*, 2001, 102: 124-129.
- [15] 单秋林. 高倍率锌-银蓄电池组的研制[J]. *电源技术*, 1999(5): 279-282.
SHAN Q L. Research on high multiple rate zinc silver battery[J]. *Chinese journal of power sources*, 1999(5): 279-282.
- [16] HO C C, MURATA K, STEINGART D A, et al. A super ink jet printed zinc-silver 3D micro battery[J]. *Journal of micro-mechanics and micro-engineering*, 2009(19): 94013.
- [17] 刘洪涛, 夏熙, 李景虹. 电极用纳米 Ag_2O 的电化学阻抗行为[J]. *电池*, 2004, 34(5): 346-348.
LIU H T, XIA X, LI J H, et al. Studies of nano phase Ag_2O on the electrochemical impedance[J]. *Battery bimonthly*, 2004, 34(5): 346-348.
- [18] 张钰. 纳米 AgO 的制备及其电化学性能的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2007.
ZHANG Y. The synthesis of nano- AgO and its electrochemical performance[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2007.
- [19] 王震, 堵永国, 郑春满, 等. 一种锌银电池用银纳米线正极及其制备方法: CN 109411709A[P]. 2019-03-01.
WANG Z, DU Y G, ZHENG C M, et al. The invention relates to a silver nanowire positive electrode for a zinc silver battery and a preparation method thereof: CN 109411709A[P]. 2019-03-01.
- [20] 田华, 张志颖, 刘春艳. AgO 有序阵列结构电极材料的制备与表征[J]. *化工学报*, 2018, 69(8): 3711-3716.
TIAN H, ZHANG Z Y, LIU C Y. Preparation and characterization of AgO ordered array electrode materials [J]. *Journal of chemical industry and engineering (China)*, 2018, 69(8): 3711-3716.
- [21] 杨丽兰, 周德璧, 房尚. 四丁基氢氧化铵对锌负极的影响[J]. *应用化工*, 2012, 41(11): 1943-1946.
YANG L L, ZHOU D B, FANG S. Effects of tetrabutyl ammonium hydroxide on the performance of zinc electrode[J]. *Applied chemical industry*, 2012, 41(11): 1943-1946.
- [22] 张艳艳. 电沉积制备锌合金对改善二次锌电池性能研究[J]. *大众科技*, 2009(12): 98.
ZHANG Y Y. Study on improvement of secondary zinc batteries by electro-deposition of zinc alloy[J]. *Popular science & technology*, 2009(12): 98.
- [23] 夏天, 王平安, 武彩霞. 大功率电池用锌电极代汞缓蚀剂的研究[J]. *电源技术*, 2009, 33(3): 193-196.
XIA T, WANG P A, WU C X. Study on mercury-substituting inhibitors in zinc electrode for high power battery[J]. *Chinese journal of power sources*, 2009, 33(3): 193-196.