

深潜器用蓄电池的研究进展

苑志祥^{1,2}, 张 浩², 张 雪^{1,2}, 杨志林^{1,2}, 张波涛¹, 张建军², 吴天元², 崔光磊²

(1. 青岛大学化学化工学院, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院青岛生物能源与过程研究所, 山东 青岛 266101)

摘 要: 深海蕴藏着人类远未认知和开发的自然资源和宝藏, 要想得到这些, 就必须在深海进入、深海探测、深海开发等方面掌握关键技术。耕海探洋、装备先行。鉴于深海具有超高压、低温等极端苛刻环境, 深潜器成为探索和开发深海资源的重要利器。深海电源系统是深潜器的核心动力, 其性能直接影响到深潜器的作业能力和安全可靠。因此, 世界海洋强国高度重视深海电源的研发。截至目前, 深海电源先后经历了铅酸电池、银锌电池、锂离子电池、高能量密度固态锂电池等不同蓄电池发展阶段。因此本文从深海电源用蓄电池主要分类等方面进行系统阐述, 并在文末对深潜器用蓄电池等方面所存在的挑战和未来发展趋势进行了详细论述。

关键词: 深潜器; 蓄电池; 铅酸电池; 银锌电池; 锂电池

中图分类号: TQ152 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)11-2868-08

网络出版时间: 2023-10-07



Recent Development on Batteries of Deep-Sea Submersibles

YUAN Zhixiang^{1,2}, ZHANG Hao², ZHANG Xue^{1,2}, YANG Zhilin^{1,2}, ZHANG Botao¹, ZHANG Jianjun², WU Tianyuan², CUI Guanglei²

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, Shandong, China; 2. Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266101, Shandong, China)

Abstract: The deep-sea contains an abundant of natural resources and treasures that still remain unrecognized and unexploited. To obtain these resources, developing advanced submersibles that are able to explore the deep-sea becomes a challenge. In the extreme harsh environment such as ultra-high pressure and low temperature in the deep sea, the advanced deep-sea submersibles have to be reliable and stable. In this regard, a power supply system is extremely important for the deep-sea submersibles because its performance directly affects the operation capability, safety and reliability of the deep-sea submersible. Therefore, recent efforts have been devoted to the development of deep-sea power sources. The existing deep-sea power systems have experienced the development stages of lead-acid batteries, silver-zinc batteries, lithium-ion batteries, and high-energy-density solid-state lithium batteries. This review elaborated the main classification of deep-sea power sources. In addition, the challenges and future development trends of batteries for deep-sea submersibles were also discussed. It is expected that this review could provide a reference for the further development of the power supply systems for more reliable and advanced deep-sea submersibles.

Keywords: submersibles; batteries; lead-acid batteries; silver-zinc batteries; lithium batteries

据《2022 世界人口展望》预测, 按现如今的人口增长速度预计到 2030 年全球人口将会增长到 85 亿,

到 2050 年达到 97 亿。随着人口数量的急剧增加, 对资源的需求量也是巨大的。然而, 陆上与沿海资

收稿日期: 2023-07-05。 修订日期: 2023-08-05。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52073298, 52273221); 中国科学院青年创新促进会(2020217); 江苏省高效电化学储能技术重点实验室开放课题基金资助项目(EEST2022-1)。

第一作者: 苑志祥(1999—), 男, 硕士研究生。

通信作者: 张波涛(1973—), 男, 博士, 教授;

张建军(1984—), 男, 博士, 副研究员;

吴天元(1976—), 男, 硕士, 正高级工程师;

崔光磊(1973—), 男, 博士, 研究员。

Received date: 2023-07-05. Revised date: 2023-08-05.

First author: YUAN Zhixiang (1999—), male, Master candidate.

E-mail: 2021020401@qdu.edu.cn

Correspondent author: ZHANG Botao (1973—), male, Ph.D., Professor.

ZHANG Jianjun (1984—), male, Ph.D., Assistant Professor.

WU Tianyuan (1976—), male, Master, Professor.

CUI Guanglei (1973—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: botaozhang@qdu.edu.cn; zhang_jj@qibebt.ac.cn; wuty@qibebt.ac.cn; cuigl@qibebt.ac.cn

源有限, 未来必定会面临资源告罄的局面, 因此资源短缺问题亟待寻求突破口^[1]。在这种背景下, 深海资源的勘探和利用必将成为全世界范围内未来发展的重中之重^[2]。深海区域是一个国家合法具有特殊法律地位的最大的政治地理单元, 它包括国家管辖范围以外的海床、海洋和底图等国际海底区域^[3]。深海区域作为战略新疆域, 是大国、强国利用战略资源, 谋求国家战略优势的重要领域。目前, 世界各国“跑马圈地”运动正在有序展开, 适应于该领域的国际秩序和规则仍不完善^[4]。可以确定的是, 未来整个国际关系博弈的新舞台将会聚焦于国际规则的制订。

《联合国海洋法公约》(下称《公约》)对深海区域的开发给出了一定的约束。《公约》规定, 各沿海国家享有其各自的专属经济区(EEZ), 其范围是从领海基线开始向外延伸的 200 海里区域内, 此外, 部分国家可以根据大陆架延伸原则再申请 150 海里外大陆架, 再向外则是全人类所共同享有的国际海底区域, 是必须重点关注的区域^[5]。我国之所以应更多关注深海, 是因为中国合法拥有的 EEZ 和外大陆架面积十分有限^[6]。“深海蕴藏着地球上远未认知和开发的宝藏, 要得到这些宝藏, 必须在深海进入、深海探测、深海开发等方面掌握关键技术。”国家主席习近平也多次提到深海科研。中国已将深海列为战略新疆域, 它对提升国家的政治、经济、科技、安全等各方面的战略价值日益凸显。要想开拓这一领域, 进而为中国赢得未来更多战略发展空间和战略资源, 离不开重大深海技术装备(如深潜器)的创新和发展^[7]。

世界海洋强国也纷纷制定了海洋发展战略, 并高度重视深潜器的研发^[8]。深海电源系统是深海装备的核心动力, 是保证深海装备实现深海探索和开发的关键部件, 其水平直接影响深海装备的作业能力和安全可靠。近 60 年以来, 世界主流深潜器的能源供给系统大致经历了铅酸电池、银锌电池和锂离子电池(包括固态锂电池) 3 个发展阶段^[9]。3 类电池各有优缺点。铅酸电池成本低廉但能量密度偏低^[10]; 银锌电池能量密度较铅酸电池有提高但循环寿命短、维护繁琐^[11]; 锂离子电池尤其是固态锂电池能量密度高、循环寿命长, 也是目前深海电源系统所普遍采用的^[12]。本综述便是以世界各主要经济体的海洋战略为牵引, 以深潜器能源供给系统(如铅酸电池、银锌电池、锂离子电池等)的迭代升级为重点而展开的, 以期科研人员提供深潜器用电化学

储能器件及其关键材料提供重要参考。同时, 文末还对未来深潜器用电化学储能器件及关键材料发展所面临的机遇和挑战提出了几点见解。

1 世界各国海洋发展战略

1.1 国外主要国家或组织的海洋发展战略

欲探其道, 必览列国。近年来, 世界海洋强国在海洋基础设施建设和相应装备研发方面的“军备竞赛”早已在无形中打响, 只为在未来深海区域资源开发利用的“争夺战”中取得先机^[13-14]。在这其中又以欧盟、美国和日本为典型代表。

欧盟在《欧洲海洋可再生能源——欧洲新能源时代的挑战和机遇》以及《潜得更深: 21 世纪深海研究面临的挑战》中指出, 欧洲需要采取必要措施以确保海洋可再生能源可以满足其自身的需要并从其目前深海研究的现实情况提出了未来关于深海研究的相应目标和关键研究领域^[15]。

作为顶级海洋强国, 美国^[16]则拥有更加全面的海洋科技强国战略, 并且制订了一系列海洋科技发展战略规划。从 20 世纪 80 年代开始便先后出台了《全球海洋科学规划》、《21 世纪海洋蓝图》、《2030 年海洋研究与社会需求的关键基础设施》, 以期美国海洋科学事业发展提供关键决策支撑和全面战略规划。

日本^[17]作为一个海岛国家则更加重视海洋科技的规划和创新发展。其于 1968 年开始相继发布《日本海洋科学技术》、《海洋开发基本构想及推进海洋开发方针政策的长期展望》, 提出了以海洋技术为先导, 着重开发包括海洋卫星和深潜技术、深海资源开发技术等高新海洋技术的方针以推进其“海洋强国”战略行动。

总体而言, 以欧盟、美国和日本为代表的海洋国家或组织相继制定了一系列的海洋发展战略以期能在未来的海洋战略布局上取得先机, 进而为未来深海资源的开发和利用夯实基础。面临此等国际海洋形势, 中国并未固步自封, 而是与时俱进、开拓创新, 制定了一系列海洋发展规划和战略举措。

1.2 中国的海洋发展战略

与国外主要国家和组织争相制订海洋发展战略相比, 中国海洋战略举措的制定起步时间相对较晚, 这要求我们更要迎头赶上、迎难而上、勇于开拓海洋战略新篇章^[18]。

习近平总书记高瞻远瞩地指出: “深海蕴藏着地球上远未认知和开发的宝藏, 但要得到这些宝藏,

就必须在深海进入、深海探测、深海开发方面掌握关键技术。”水下观测和水下探测等大国重器是探索海洋资源并合理利用的基础保障,是建设海洋强国的攻坚利器^[19]。

中国海洋事业自党的十八大以来迎来了前所未有的发展良机^[20]。贯彻落实“深水”战略,向深海不断挺进是我国海洋科技的战略方向。“坚持陆海统筹,加快建设海洋强国”于党的十九大报告提出后,“加快建设海洋强国”的重大部署再次于党的二十大报告作出。以习近平同志为核心的党中央高度重视海洋事业的发展和海洋强国的建设,相继作出一系列重大部署并提出一系列重要举措,为实现建设海洋强国指明了前进方向、提供了根本遵循、赋予了强大动力。

与此同时,中国持续部署国家重点研发计划“深海关键技术与装备”重点专项,现已取得了一系列重大成果突破(如“蛟龙号”深潜器、“深海勇士号”深潜器、“奋斗者号”深潜器等),并逐步实现关键技术的

国产化,表明中国已成功掌握用于开发深海资源的大国重器,为未来深海资源进一步的勘探和开发打下了坚实基础。

2 以往铅酸电池和银锌电池在深潜器上的应用

进入深海是得到深海所孕育的宝藏的前提条件,深潜器则是人类进入深海必不可少的利器。考虑到深潜器深海工作环境的特殊性,电池成为其在水下工作的唯一能量供给来源,可以说深潜器的发展离不开电池的更新迭代。随着深潜器装备能力的不断升级,其电池也经历了由铅酸电池、银锌电池到现如今得到主流应用的锂离子电池(包括固态锂电池)的发展过程^[21]。其中使用铅酸电池和银锌电池作为能源供给的代表性深潜器如表 1 所示。下面将逐一介绍不同类型电池在深潜器上的主要应用。

表 1 使用铅酸电池和银锌电池的代表性深潜器

Table 1 Representative deep-sea submersibles using lead-acid batteries or silver-zinc batteries

Submersible	Country	Launch date	Battery type	Energy/(kW·h ⁻¹)	Diving depth/m	Maximum speed/kt	Time/h
Alvin	Unite States	1964	Lead-acid battery	37	4 500	1.35	4–5
Nautille	France	1984	Lead-acid battery	38	6 000	2.50	5
Tansuo	China	1994	Lead-acid battery		1 000	4.00	6
Shinkai 6500	Japan	1989	Silver-zinc battery	86	6 500	2.50	4
Jiaolong	China	2012	Silver-zinc battery	110	7 000	2.50	8

2.1 铅酸电池在深潜器上的主要应用

20 世纪 60 年代铅酸电池技术已经较为成熟,同时由于成本较低等优点率先被用作深潜器的能量来源^[22]。较为典型的代表是美国的“阿尔文”号载人深潜器^[23],其使用容量为 37 kW·h 的铅酸蓄电池,最大工作深度为 4 500 m,最大速度 1.35 节,可在水下工作 4–5 h。此前,学术界对深潜器的研制并无多大兴趣,直到 1966 年“阿尔文”号载人深潜器在西班牙海域成功打捞出—颗失落的氢弹,其优异的军事应用能力极大激发了研制深潜器的热情,并由此揭开了深潜器研制的序幕。此后各类载人深潜器不断涌现。如法国在 80 年代服役的“鹦鹉螺”号^[24],其仍使用铅酸电池作为能量来源,容量为 38 kW·h,虽然较“阿尔文”号并无多大提升,但最大工作深度可以达到 6 000 m,最大速度为 2.5 节。

相对于西方发达国家,中国在深潜器研制方面起步较晚。1994 年,中国第一台无缆水下机器人“探索者号”在西沙群岛附近海域成功下潜到水下 1 000 m

深处,成为中国到达深海的先驱者(见图 1)。这一水下机器人采用国产充油铅酸电池为动力,最大工作深度 1 000 m,活动范围可达 12 kn,续航能力 6 h,最大前进速度 4 节,巡航速度 2 节,可在 4 级海况(中浪,浪高 1.25~2.50 m,波浪具有明显形状,到处形成白浪)下正常回收。该水下机器人在水下工程、海洋石油及海洋矿藏资源开发、海洋科学考察以及打捞救生等方面展现出广阔应用前景。同期世界上只有美、俄、法、日等少数发达国家掌握这种先进技术,这标志着中国水下机器人技术已趋向成熟。

铅酸电池是 20 世纪 60 年代技术发展最为成熟的电池系统,且由于其较为低廉的造价,其成为第一类被广泛用于深潜器上的能源供给系统。但是铅酸电池的劣势同样明显:1) 大电流放电能力较差,当其高倍率放电以及发生副反应时生成的 PbSO₄ 无法在负极全部还原为海绵铅以致电池负极造成永久的活性物质损失,使其不可逆的容量降低。同时具

有较差的导电性的 PbSO_4 的存在使得负极电化学反应阻抗大大增加, 抑制了电解液的扩散, 直至电池失效。2) 铅酸电池在后期的充电过程中存在严重的析氢以及自放电问题, 使得电解液严重失水并使电池内阻和离子扩散阻力增大, 加速了电池的失效^[25]。这严重限制了其在高性能潜水器上的进一步应用, 随着电池技术的不断发展, 20 世纪 90 年代左右铅酸电池逐渐被能量密度更高的银锌电池所取代。



图 1 搭载铅酸电池的“探索者”号无缆水下机器人^[26]

Fig. 1 “Tansuo” cableless underwater robot with lead-acid batteries^[26]

2.2 银锌电池在深潜器上的主要应用

银锌电池是一种实用的具有高比能量和高比功率的电池, 通常以氧化银(AgO 和 Ag_2O)为正极, 锌(Zn)为负极, 氢氧化钾为电解液, 其能量密度是铅酸电池的数倍, 同时其大电流放电能力极强, 瞬间可达上千安培^[27]。同时其还具有平稳的放电电压、高电压精度, 因此其在水下装备的应用非常广泛。日本于 1989 年建造完成的“深海 6500”号便是以容量为 86 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 的银锌电池为电源, 该潜水器曾下潜到创记录的 6 527 m, 创造了载人潜水器的深潜记录。

中国使用银锌电池作为动力源的载人潜水器的典型代表是“蛟龙”号(图 2), 其配备重达 1.2 t 的主蓄电池箱, 容量高达 110 $\text{kW}\cdot\text{h}$, 接近日本“深海 6500”号的 1.3 倍, 较高的容量使得其可在水下工作时间高达 8 h, 是日本“深海 6500”号的 2 倍。其巡航速度 1 节, 最大前进速度 2.5 节, 可以在 4 级海况下进行水下作业, 在 5 级海况(大浪, 浪高 2.5~4.0 m, 出现高大的波峰, 浪花占了波浪上很大的面积, 风开始削去波峰上的浪花)下进行回收^[28]。

得益于如此优异的性能, “蛟龙”号于 2010 年 7 月下潜到 3 759 m 的海底并顺利完成海底取样和

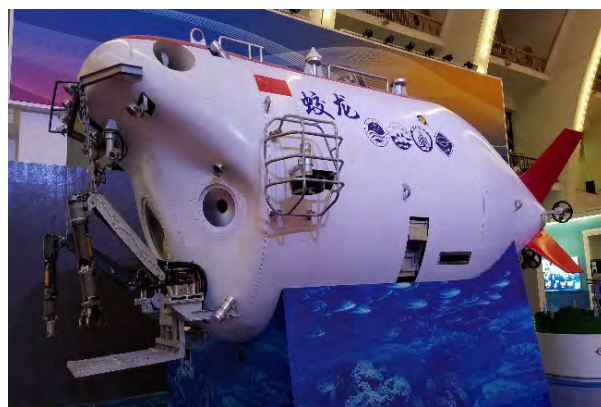


图 2 搭载银锌电池的“蛟龙”号深海载人潜水器^[29]

Fig. 2 “Jiaolong” deep-sea manned submersible with silver-zinc batteries^[29]

海底微地形地貌探测等任务^[30]。2011 年 7 月又在东北太平洋中国多金属结核合同区西区成功进行了 5 000 m 级海上试验与应用并取得一系列技术和应用成果, 使中国成为世界上第 5 个掌握 5 000 m 以上载人深潜技术的国家。2012 年 6 月, “蛟龙”号于马里亚纳海沟顺利完成 7 000 m 海试, 比日本“深海 6500”下潜深度还要多 500 m, 7 000 m 的下潜深度早已实现中华民族“可下五洋捉鳖”的长久梦想。而在“蛟龙”号载人潜水器立项之前中国研制的载人深潜器最大下潜深度只有数百米, 从数百米一步跨越至 7 000 m, 其中技术飞跃所面临的艰难险阻可想而知^[31], 向中国可爱的科研工作者们致敬。

虽然银锌电池在载人深潜器上的应用成效是显而易见的, 但其亦存在固有的劣势: 1) 正极的 AgO 易受热分解为电阻率更大的 Ag_2O , 使得银锌电池的内阻增大, 同时降低其自身电压。此外, 分解过程生成的 O_2 还会进一步增加电池内部的压力, 使得电池寿命下降并存在一定的安全隐患。2) 负极的锌电极在碱性电解液下易被氧化溶解并释放 H_2 。不仅会降低电池的容量还会造成电池槽的破裂, 导致漏液的发生以及微短路。这严重影响其使用寿命及安全性能, 大大限制了其后续在载人潜水器上的应用^[32], 以至接下来越来越多的深潜器转而使用锂离子电池(包括固态锂电池)。

3 当下主流锂离子电池在深潜器上的应用

铅酸电池和银锌电池在其特殊的时代具有特殊的意义, 但这 2 种电池存在比能量低或充电速度慢、

成本高等各自的问题。与之相比,锂离子电池具有远高于铅酸电池和银锌电池的能量密度;具有宽的工作范围,能在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内正常工作;具

有较长的循环寿命,银锌电池使用寿命约为1年且只能循环30余次,锂离子电池的使用寿命则长达8年^[33]。3种电池的性能比较如表2所示。

表2 3种电池用于深潜器时的性能比较

Table 2 Performance comparison of different batteries when used in deep-sea submersibles

Sample	Platform voltage/V	Volumetric energy density/($\text{W}\cdot\text{h}\cdot\text{L}^{-1}$)	Mass-energy density/($\text{W}\cdot\text{h}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Charging time/h	Cycle life/th
Lead-acid battery	2.0	40–80	25–45	8–10	300
Silver-zinc battery	1.5	180–200	80–110	8–10	30
Lithium primary battery	3.6	800–1 000	350–550		
Lithium-ion battery	3.7	320–750	120–270	2–3	>500
Polymer-based solid-state lithium batteries	4.1	450–1 200	220–550	3–10	>1 000

自20世纪90年代锂离子电池实现商业化以来,得益于其比能量高、循环寿命长等优点,越来越多的深潜器开始使用锂离子电池^[34]。在这其中又以能否进行充放电进而重复使用为标准,将锂电池分为一次锂电池和二次锂电池。二次锂电池又根据所采用电解质的不同分为传统液态锂离子电池和聚合物基固态锂电池。上述锂电池在深潜器方面的应用都有其独特的优势,下面将一一介绍。

3.1 锂一次电池

以锂/亚硫酰氯为代表的锂一次电池具有非常高的能量密度,通常高达 $420\text{ W}\cdot\text{h}/\text{kg}$,当在低速率放电的情况下该数值还会进一步增加至 $650\text{ W}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 。该电池还具有高低温性能好的优势,通常可在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内工作,甚至即使在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 也能工作。此外,其还具有高达 3.6 V 的开路电压,同时在以 $1\text{ mA}/\text{cm}^2$ 放电时,电压可保持在 3.3 V ,且在90%的容量范围内电压保持不变^[35]。得益于如此优异的性能早在2000年时该电池便被用于远程水雷侦察系统以用于雷区情报收集和水雷的识别定位。

但同时该电池也存在电压滞后、低温放电时容量衰减大和大电流放电能力差等缺点,这就使得其在用于深海潜水器的储能系统时存在明显钝化和激活时间过长等问题^[36]。此外,锂/亚硫酰氯电池还存在安全性较差的问题,当遇到短路、大电流或高温时容易发生热失控进而导致爆炸。美国和法国在早期采用锂/亚硫酰氯电池作为鱼雷的动力来源的研制过程中均发生过爆炸事故。

除锂/亚硫酰氯外,国内研究者还在 Li/MnO_2 、 Li/CF_x 、 Li/SO_2 等高性能锂一次电池的研究中有所建树,但这些高比能一次电池也存在放电过程膨胀较大、升温较高以及成本高昂等问题,上述不利因

素限制了锂一次电池在深海潜水器上的应用^[37]。

3.2 锂二次电池

相对于锂一次电池而言,锂二次电池具有更长的循环寿命和更高的安全性,因此锂二次电池在深潜器上的应用较锂一次电池要广泛,而这其中又以传统的锂离子电池在深海潜水器上的应用最多。

在无人深潜器方面,美国REMUS-6000无人深潜器搭载锂离子电池组作为电源,最大工作水深高达6 000 m。法国研制的ALISTAR-3000搭载可移动锂离子二次电池组,在充电8 h后可为深潜器提供25 kW的能量。由中国科学院沈阳自动化研究所于2015年研制的“潜龙一号”深潜器亦搭载锂离子电池作为动力来源,其可在6 000 m水深下环境工作,最大续航时间达24 h。“潜龙一号”的成功下水标志着中国深海无人深潜器技术已达国际先进水平^[38–39],在这其中锂离子电池起到的作用不可忽视。

对于载人深潜器,国外较为知名的美国“阿尔文”号和日本“深海6500”号载人深潜器均在后期升级后改为使用锂离子电池,其能量密度高达 $130\text{ W}\cdot\text{h}/\text{kg}$,两者的下潜深度分别达到4 500 m和6 500 m,可单次作业4–8 h。虽然中国载人深潜器的研制起步较这些发达国家较晚,但近年来在相关政策的支持和指导下也踏上了深潜器锂电化的新征程。2017年搭载能量密度为 $120\text{ W}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 的磷酸铁锂电池的“深海勇士号”载人深潜器问世,其可在4 500 m水下环境进行作业,作业时长约6 h。2020年,搭载 $135\text{ W}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 锂离子电池的载人深潜器“奋斗者号”顺利完成万米海试,最大载人深潜10 909 m,最大作业时长约10 h左右^[40]。

具有更高能量密度、更长循环寿命和高安全性的锂离子电池在深潜器上的应用,极大地延长了

深潜器的作业时间, 以及更深的下潜深度, 极大的促进了近代深潜器的发展。但未来深潜器电源系统的新秀或许是具有更高能量密度的聚合物基固态锂电池。

3.3 聚合物基固态锂电池

用聚合物基固态电解质代替传统液体电解质来制备聚合物基固态锂电池, 比传统液态锂离子电池具有更高的能量密度和更高的安全性能。将聚合物基固态锂电池应用于深海潜水器将极大地满足深海潜水器大深度、长续航的苛刻要求^[41]。

将聚合物基固态锂电池用于深海潜水器的知名团队是中国科学院青岛生物能源与过程研究所的崔光磊研究员团队, 该团队历时 10 余年的聚合物基固态锂电池研究历程, 开发出全海深固态电源系统, 极大推进了中国深海探索事业的发展。该团队在 2017 年 3 月研发的固态锂电池电源系统随 TS03 航次科考船远赴马里亚纳海沟, 为“万泉”号着陆器控制系统及 CCD 传感器提供能源, 累计完成 9 次下潜, 其中 6 次超过 10 000 m, 最大工作水深 10 901 m, 累计坐底工作时间 98.5 h, 顺利完成万米全深海示范应用, 这标志着中国成功突破了全海深电源技术瓶颈, 填补了全海深高能量密度深海电源系统的技术空白, 进一步验证了固态锂电池所具有的高可靠性和高安全性。

2018 年 8 月到 10 月, 再次远赴马里亚纳海沟的 TS09 航次科考船所使用的模块化固态电源系统仍来源于该团队, 该电源系统为天涯、海角、万泉等全海深着陆器提供能源动力, 累计完成潜次作业 27 个, 其中下潜深度超过万米共计 15 次, 下潜深度最大为 10 918 m, 单次下潜作业时间最长为 26 d 10 h 43 min, 创世界单次连续作业时间记录, 保障了我国获取首批超万米深度的全海深水文数据以及海底复杂地形下实时勘测的有效能源供给^[42]。

2018 年 12 月到 2019 年 6 月, 该团队再次研制出应用于长潜伏“金鸡”着陆器高能量密度固态锂电池系统并顺利完成了南海坐底作业, 并持续无故障运行长达 198 d, 证明了固态锂电池及 BMS 系统同时具有超高能量密度以及低功耗特性。

2020 年 11 月, “沧海”号视频着陆器搭载该团队研发的全海深固态锂电池系统, 该系统可以提供充足的能量动力, 成功保障了“沧海”与“奋斗者”的万米深海联合作业, 实现了全球首次万米洋底直播, 为“奋斗者”号拍摄了清晰的视频画面, “奋斗者-沧海”号成功标注的中国载人深潜新坐标得以被视频

见证。同月, 该团队研制的高功率固态锂电池系统为“鹿岭”机器人提供了长航时、大功率的动力来源, 成功完成 10 个位点 10 km 的全海深复杂工况下爬游作业, 充分验证了深海固态锂电池系统的高功率、高可靠、高安全、高能量密度等优点, 达到水下装备对大功率及长航时运行的需求。

该团队持续提升固态锂电池的技术以及品质, 成功满足深海特种电源“高耐压”、“高安全”以及“高能量密度”的“三高”苛刻要求, 打破了国外技术的垄断, 为国产深海装备提供了可靠的动力来源。自 2015 年至今共计为各类深海科考装备用户提供了 110 批次的固态锂电池电源系统。8 年内, 该团队研制的全海深电源系统实现惊人的零故障示范性应用, 为我国深海事业发展提供了安全、可靠、零事故运行的特种电源保障, 表明我国深海装备用全海深电源系统技术已趋于成熟。

4 深海能源基站助力深海原位科学实验站

深海资源的勘探离不开深海样品的相关测试, 但传统的自海底取样后拿到陆地实验室检测的海洋调查方式容易因环境变化导致样本数据损坏或确实, 因此有必要在深海原位进行科学实验, 在海底布设原位科学实验站是一较好的解决措施^[43]。

2022 年 10 月 25 日, 中国大深度原位科学实验站在海底成功布设, 由“探索二号”科考船携“深海勇士”号载人潜水器完成^[44]。原位科学实验站采用中国科学院青岛生物能源与过程研究所崔光磊研究员团队研发的固态锂电池, 首次实现了在深海装备上集成兆瓦时级别固态锂电池^[34], 这是目前深海装备所能携带的最大的能源容量, 同时在能量密度以及能源系统集成与管理技术方面实现了新的突破。并且还在千米的洋底成功进行试验性应用海试, 验证了其能源及管理系统的安全性和有效性。

5 总结与展望

陆海天空, 是人类终将抵达的彼岸, 或许我辈无缘亲眼领略无限星空的浩瀚, 但若于人类发展必经之路的深海耕耘, 愿在我辈实现。深海蕴含着无限未知的宝藏, 随着陆上资源日益消耗, 人类不得不变调方向向海洋探索新的能源。要想充分进入海洋, 深潜器或许是第一步。自 20 世纪 60 年代美国“阿尔文”号载人深潜器顺利下水, 到 2020 年中国“奋斗者”号载人深潜器在马里亚纳海沟成功坐地 10 909 m,

回望 60 多年来世界深潜器的发展历程, 深潜器下潜深度不断增加, 工作时间不断增长, 而这离不开深潜器动力心脏——电池的迭代升级。

世界主流深潜器搭载的电源系统大致经历了铅酸电池、银锌电池和锂离子电池 3 个主要发展阶段。铅酸电池能量密度较低; 银锌电池使用寿命短且价格昂贵。当下世界主流深潜器均已将两者摒弃转而选用能量密度更高, 循环寿命更长的锂离子电池。更高的能量密度意味着可以大大降低电池组的质量进而显著提高深潜器的有效载荷能力, 且随着聚合物基固态锂电池在深潜器上的大规模应用, 未来深潜器的作业时间和空间将更加广阔。

目前中国已实现万米海深的成功坐底, 但由于储能系统所携带能源偏低导致单次作业时间十分有限, 无法满足长时间的海底作业需求。笔者认为, 为进一步提高深潜器在水下的工作时间和空间, 未来深潜器电源的发展可以考虑以下几点:

1) 开发更高能量密度的储能电池。“奋斗者”号深潜器搭载的锂离子电池能量密度仅为 $135 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$, 因此开发更高能量密度 $500 \text{ W} \cdot \text{h/kg}$ 的固态锂金属电池非常重要。此外, 探索更高能量密度的锂硫电池也是可以考虑的。

2) 开发高丰度金属离子电池。中国锂资源有限, 主要锂矿资源均分布在国外, 一旦未来国际形势恶化必将导致锂资源的进口遭到严厉限制, 现有的锂电池技术也必将会遭遇严重的“卡脖子”问题。中国钠、镁等资源分布较锂丰富太多, 不会遭到源头上的限制, 且成本较低, 能从根源上免受部分国家恶意的围追堵截。

参考文献:

- [1] WARNER K J, JONES G A. A population-induced renewable energy timeline in nine world regions[J]. *Energy Policy*, 2017, 101: 65–76.
- [2] MESTRE N C, CALADO R, SOARES A M V M. Exploitation of deep-sea resources: The urgent need to understand the role of high pressure in the toxicity of chemical pollutants to deep-sea organisms[J]. *Environ Pollut*, 2014, 185: 369–371.
- [3] OREJAS C, KENCHINGTON E, RICE J, et al. Towards a common approach to the assessment of the environmental status of deep-sea ecosystems in areas beyond national jurisdiction[J]. *Mar Policy*, 2020, 121: 104182.
- [4] WILLAERT K. Deep Sea mining and the United States: unbound powerhouse or odd man out?[J]. *Mar Policy*, 2021, 124: 104339.
- [5] RAYFUSE R. Precaution and the protection of marine biodiversity in areas beyond national jurisdiction[J]. *Int J Mar Coast Law*, 2012, 27(4): 773–781.
- [6] JIA Y, WU J L. The outer continental shelf of coastal states and the common heritage of mankind[J]. *Ocean Dev Int Law*, 2011, 42(4): 317–328.
- [7] CUI W C. An overview of submersible research and development in China[J]. *J Mar Sci Appl*, 2018, 17(4): 459–470.
- [8] 高峰, 王辉, 王凡, 等. 国际海洋科学技术未来战略部署[J]. *世界科技研究与发展*, 2018, 40(2): 113–125.
GAO Feng, WANG Hui, WANG Fan, et al. *World Sci Tech R D (in Chinese)*, 2018, 40(2): 113–125.
- [9] 戴国群, 陈性保, 胡晨. 锂离子电池在深潜器上的应用现状及发展趋势[J]. *电源技术*, 2015, 39(8): 1768–1772.
DAI Guoqun, CHEN Xingbao, HU Chen. *Chin J Power Sources (in Chinese)*, 2015, 39(8): 1768–1772.
- [10] MOSELEY P T. Lead/acid battery myths[J]. *J Power Sources*, 1996, 59(1–2): 81–86.
- [11] KARPINSKI A P, MAKOVETSKI B, RUSSELL S J, et al. Silver-zinc: Status of technology and applications[J]. *J Power Sources*, 1999, 80(1–2): 53–60.
- [12] CHA H, KIM J, LEE Y, et al. Issues and challenges facing flexible lithium-ion batteries for practical application[J]. *Small*, 2018, 14(43): e1702989.
- [13] GISSI E, FRASCHETTI S, MICHELI F. Incorporating change in marine spatial planning: A review[J]. *Environ Sci Policy*, 2019, 92: 191–200.
- [14] FLETCHER S. Converting science to policy through stakeholder involvement: An analysis of the European Marine Strategy Directive[J]. *Mar Pollut Bull*, 2007, 54(12): 1881–1886.
- [15] HILLS J M, MICHALENA E. Renewable energy pioneers are threatened by EU policy reform[J]. *Renew Energy*, 2017, 108: 26–36.
- [16] 高峰, 王金平, 汤天波. 世界主要海洋国家海洋发展战略分析[J]. *世界科技研究与发展*, 2009, 31(5): 973–976.
GAO Feng, WANG Jinping, TANG Tianbo. *World Sci Tech R D (in Chinese)*, 2009, 31(5): 973–976.
- [17] 陈春, 高峰, 鲁景亮, 等. 日本海洋科技战略计划与重点研究布局及其对我国的启示[J]. *地球科学进展*, 2016, 31(12): 1247–1254.
CHEN Chun, GAO Feng, LU Jingliang, et al. *Adv Earth Sci (in Chinese)*, 2016, 31(12): 1247–1254.
- [18] 成志杰. 中国海洋战略的概念内涵与战略设计[J]. *亚太安全与海洋研究*, 2017(6): 26–41.
CHENG Zhijie. *Asia Pac Secur Marit Aff (in Chinese)*, 2017(6): 26–41.
- [19] 于立泉, 王艺霖, 殷昭鲁. 百年未有之大变局视域下中国海洋战略探析[J]. *商业经济*, 2022(3): 43–44.
YU Liquan, WANG Yilin, YIN Zhaolu. *Bus Econ (in Chinese)*, 2022(3): 43–44.
- [20] 袁沙. 全球海洋治理体系演变与中国战略选择[J]. *前线*, 2020(11): 21–24.
YUAN Sha. *Qianxian (in Chinese)*, 2020(11): 21–24.
- [21] ANDERSON E. Economic analysis of lead-acid and silver-zinc battery systems used in navy submersibles[J]. *J Electrochem Soc*, 1973, 120(8): C223.
- [22] KAMENEV Y, LUSHINA M, YAKOVLEV V. New lead-acid battery for submersible vehicles[J]. *J Power Sources*, 2009, 188(2): 613–616.
- [23] STONE G, BUSCH W. Deep ocean science and facility needs[J]. *Mar Technol Soc J*, 1991, 25(2): 14–21.
- [24] HEIRTZLER J R, GRASSLE J F. Deep-sea research by manned submersibles[J]. *Science*, 1976, 194(4262): 294–299.
- [25] CHANG T G, JOCHIM D M. Rapid partial charging of lead/acid

- batteries[J]. *J Power Sources*, 1997, 64(1-2): 103-110.
- [26] 走进新时代 再创新辉煌[EB/OL]. [2021-01-28]. <http://www.syb.cas.cn/>.
- [27] GAINES L. Secondary silver-zinc battery technology[J]. *J Electrochem Soc*, 1969, 116(2): 61C.
- [28] ZHANG T W, TANG J L, LI Z G, et al. Use of the Jiaolong manned submersible for accurate mapping of deep-sea topography and geomorphology[J]. *Sci China Earth Sci*, 2018, 61(8): 1148-1156.
- [29] 沈阳自动化所多项成果亮相“砥砺奋进的五年”大型成就展[EB/OL]. [2017-09-26]. <http://www.sia.cas.cn/>.
- [30] CUI W C. Development of the *Jiaolong* deep manned submersible[J]. *Mar Technol Soc J*, 2013, 47(3): 37-54.
- [31] CUI W C, LIU F, HU Z, et al. On 7 000 m sea trials of the manned submersible *Jiaolong*[J]. *Mar Technol Soc J*, 2013, 47(1): 67-82.
- [32] SCHISMENOS S, CHALARIS M, STEVENS G. Battery hazards and safety: A scoping review for lead acid and silver-zinc batteries[J]. *Saf Sci*, 2021, 140: 105290.
- [33] CHOI S, WANG G X. Advanced lithium-ion batteries for practical applications: Technology, development, and future perspectives[J]. *Adv Mater Technol*, 2018, 3(9): 1700376.
- [34] 吴天元, 江丽霞, 崔光磊. 水下观测和探测装备能源供给技术现状与发展趋势[J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(7): 898-909.
- WU Tianyuan, JIANG Lixia, CUI Guanglei. *Bull Chin Acad Sci (in Chinese)*, 2022, 37(7): 898-909.
- [35] 叶浩亮, 陈涛, 陈遥沛. 一种 AUV 锂-亚硫酰氯电池储存可靠性试验评估方法[J]. *水下无人系统学报*, 2017, 25(2): 76-81.
- YE Haoliang, CHEN Tao, CHEN Yaopei. *J Unmanned Undersea Syst (in Chinese)*, 2017, 25(2): 76-81.
- [36] 赵佳欢, 刘飞, 周思思, 等. 浅析各国深海潜器用锂电池电性能[J]. *船电技术*, 2022, 42(10): 48-51.
- ZHAO Jiahuan, LIU Fei, ZHOU Sisi, et al. *Mar Electr Electron Eng (in Chinese)*, 2022, 42(10): 48-51.
- [37] 代化, 张斌, 徐言哲. UUV 动力电池发展现状与趋势[J]. *舰船科学技术*, 2020, 42(23): 155-158.
- DAI Hua, ZHANG Bin, XU Yanzhe. *Ship Sci Technol (in Chinese)*, 2020, 42(23): 155-158.
- [38] 武建国, 石凯, 刘健, 等. 6 000 m AUV “潜龙一号”浮力调节系统开发及试验研究[J]. *海洋技术学报*, 2014, 33(5): 1-7.
- WU Jianguo, SHI Kai, LIU Jian, et al. *J Ocean Technol (in Chinese)*, 2014, 33(5): 1-7.
- [39] 沈阳自动化所研制的“潜龙一号”6 000 米 AUV 顺利通过课题验收[EB/OL]. [2015-08-31]. <http://www.syb.cas.cn/>.
- [40] 唐琳. “奋斗者”号坐底 10 909 米创造中国载人深潜新纪录[J]. *科学新闻*, 2022, 24(3): 23.
- TANG Lin. *Sci Issues (in Chinese)*, 2022, 24(3): 23.
- [41] MULDOON J, BUCUR C B, BOARETTO N, et al. Polymers: Opening doors to future batteries[J]. *Polym Rev*, 2015, 55(2): 208-246.
- [42] 陈俊, 张奇峰, 李俊, 等. 深渊着陆器技术研究及马里亚纳海沟科考应用[J]. *海洋技术学报*, 2017, 36(1): 63-69.
- CHEN Jun, ZHANG Qifeng, LI Jun, et al. *J Ocean Technol (in Chinese)*, 2017, 36(1): 63-69.
- [43] 王勇, 郑鹏飞, 贺丽生, 等. 深海生物原位实验与生态监测研究进展[J]. *应用海洋学学报*, 2022, 41(3): 543-553.
- WANG Yong, ZHENG Pengfei, HE Lisheng, et al. *J Appl Oceanogr (in Chinese)*, 2022, 41(3): 543-553.
- [44] “探索二号”返航 大深度原位科学实验站在海底成功布设[EB/OL]. [2022-10-25]. <https://content-static.cctvnews.cctv.com/>.