

# 燃料电池水下应用可行性研究

牛勇超<sup>✉</sup>, 程彦森, 成海超, 李学海

(中国电子科技集团公司第十八研究所, 天津 300384)

**摘要:** [目的] 为了进一步提升水中装备的续航作战能力, 高比能量电能源系统是解决问题的关键, 通过对比不同燃料种类对系统比能量的影响, 探究燃料电池在水下应用的可行性。[方法] 通过对目前广泛研究的质子交换膜燃料电池和固体氧化物燃料电池的特点进行对比分析, 依据指标要求对比不同储氢和储氧的方式, 确定燃料系统阴极侧采用液氧方式供给可以满足设计要求, 不同燃料电池类型其阳极侧可采用的供给方式不同, 液氢、有机液体、甲醇重整、直接甲醇和直接丙烷具有应用潜力。[结果] 结合不同燃料电池的特点, 分析尾气处理装置参数, 综合比较水下应用燃料电池能源系统的可行方案, 以液氧、液化丙烷或有机液体为燃料的固体氧化物燃料电池能源系统和以液氧、有机液体为燃料的质子交换膜燃料电池可以满足设计需求。[结论] 燃料电池能源系统可以显著提升能源系统的比能量, 燃料的供给形式是影响电能源系统比能量的主要因素。

**关键词:** 水下无人飞行器; 燃料电池; 储氢方式; 储氧方式; 尾气处理

中图分类号: TK91; TM911.4 文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)03-0128-07

开放科学(资源服务)二维码:



## Feasibility Research of Underwater Application of Fuel Cell

NIU Yongchao<sup>✉</sup>, CHENG Yansen, CHENG Haichao, LI Xuehai

(Tianjin Institute of Power Sources, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** [Introduction] In order to further improve the cruising ability of underwater equipment, the high specific energy electric energy system is the key to the problem. By comparing the impact of different fuel types on the specific energy of the system, the feasibility of underwater application of fuel cells is explored. [Method] By comparing and analyzing the characteristics of proton exchange membrane fuel cells and solid oxide fuel cells in different hydrogen storage and oxygen storage methods according to the index requirements, it is determined that the cathode side could meet the design requirements by using liquid oxygen supply and the anode side could adopt different supply methods, such as liquid hydrogen, organic liquid, methanol reforming, direct methanol and direct propane. [Result] Depending on the characteristics of different fuel cells, the relevant parameters of the tail gas treatment device are calculated and the feasible schemes of underwater fuel cell energy systems are comprehensively compared. The solid oxide fuel cell energy system with liquid oxygen and liquefied propane or organic liquid, the proton exchange membrane fuel cell with liquid oxygen and organic liquid could meet the design requirements. [Conclusion] The fuel cell energy system can significantly improve the specific energy of the energy system, and the fuel supply form is the main factor affecting the specific energy of the electric energy system.

**Key words:** underwater unmanned vehicle; fuel cell; hydrogen storage; oxygen storage; tail gas treatment

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## 0 引言

未来海洋战争是将天空、海洋、陆地各类无人系统集成在一起,进行多维空间、集团化作战。美国《2025年自主水下机器人需求》报告提出海床战、反AUV战等新兴作战概念,旨在通过无人水下航行器的系列发展,构建新型完整的水下无人作战体系<sup>[1]</sup>。无人水下航行器(Unmanned Underwater Vehicle, UUV)是一种无人操作的水下机器人,在工业和军事领域广泛应用。UUV在军事领域具有极大的应用价值,例如:在潜艇战中跟踪和攻击敌方潜艇,作为水下通信的中继站;反潜战中执行警戒任务,组成警戒线;水雷战中绘制出敌方布雷区,进行“航路维护”,防止敌方的侦察和破坏;在水中兵器的试验、鉴定、操练中,充当目标靶<sup>[2-3]</sup>。

为了满足上述要求,需要在有限的空间和重量内,增加UUV能源系统的容量。因此UUV应该具有较大能量存储的可行性,以在给定任务中提供高性能作战能力。目前,广泛应用于UUV能源系统的有柴油机和锂电池。但是柴油机机械噪声振动大,红外隐蔽性差,尾气排放受背压影响等,不利于UUV的潜伏;锂电池虽然具备低噪声和快速响应的特性,但是锂电池的比能量较低(铁锂电池<150 Wh/kg,三元电池<250 Wh/kg);虽然铁锂电池安全性较三元电池有所提高,但是锂电池能源系统只能通过扩大锂电池组规模提升航程,这又面临着大规模成组安全性和快速充电的问题。

燃料电池与锂电池的最大区别在于,锂电池是以化学物质储存电能的容器,是一种能量存储装置,而燃料电池是将燃料气输运至燃料电池内部,不经过燃烧直接转换为电能,是一种发电装置,具有效率高(>45%)、环境友好、比能量高、噪音震动小等特点。德国的Deep C是以质子交换膜燃料电池和蓄电池为动力装置的UUV,输出功率为3.6 kW,总重量约为2.5 t,可下潜4 km,总航行时间长达50 h以上,总携带能量140 kWh,可携带250 kg的装载质量,用来进行检测水下线路和铺设水下电缆等工作。美国海军研究实验室的大排水量无人潜航器(Large Displacement Unmanned Undersea Vehicle, LDUUV)采用固体氧化物燃料电池动力系统,与锂电池搭配形成的混合能源系统将能够在70 d的任务中产生

1.8 MWh的电力,其中燃料电池输出功率2 kW,系统比能量可以达到508 Wh/kg,动力系统由JP-10和液氧提供燃料,发电效率>55%。

但是相比于路面水面应用,燃料电池水下应用还需要携带氧气和尾气处理,其中在水下时二氧化碳的处理方式是难点。通过对燃料电池和不同燃料气储存方式在水下应用的可行性进行计算分析,比较燃料电池能源系统水下应用是否具有比锂电池更高的比能量,可以进一步提升水中装备能源系统的续航能力。

## 1 燃料电池电堆系统

根据设计目标,燃料电池动力装置输出功率不小于5 kW,总能量为1 MWh,要求水中装备能源系统比能量满足不小于400 Wh/kg,不小于350 Wh/L。计算得出,燃料电池能源系统的总质量不大于2.5 t,总体积不大于2857 L。

目前广泛应用并得到深入研究的燃料电池种类主要为固体氧化物燃料电池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)和质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC),一般其系统功率密度如表1所示。从表中可以看出,5 kW功率的由固体聚合物组成的PEMFC相比于陶瓷组成的SOFC重量更轻便、体积更小。但是根据燃料电池自身的特点,PEMFC的阳极侧需要高纯氢(>99.99%),而SOFC阳极中含有具备催化能力的镍(Ni),并且工作温度通常在750℃左右,对氢气的纯度要求不高,可以直接使用部分碳基燃料。结果表明,对于具有1 MWh能量的燃料电池能源系统,电堆系统占据的总质量和总体积占比非常少,因此燃料电池能源系统的比能量大小主要取决于燃料气的储存方式和尾气处理回收的方式。

表1 燃料电池功率密度  
Tab. 1 Power density of fuel cell

参数	PEMFC	SOFC
质量功率密度/[W·(kg) <sup>-1</sup> ]	700	80
体积功率密度/(W·L <sup>-1</sup> )	1000	200
所需质量/kg	7.2	62.5
所需体积/L	5	25

## 2 阳极侧燃料气供应方式

燃料电池供氢方式有液态储氢、高压储氢、金属储氢、有机液体储氢以及重整制氢<sup>[4]</sup>。液态储氢存储温度约为-253 ℃, 具备较高的储氢密度和方便的输送能力。但是, 热量会导致液氢汽化, 内部压力随之上升, 需要定期排放, 安全问题是液态储氢的关键难点。通过低温制冷机对气化的氢气进行二次冷凝, 可以长时间保存液氢, 但这会增加额外的能耗和装置的质量、体积。

高压储氢是目前技术最为成熟, 应用最为广泛的方式。储氢瓶一般为无缝钢, 没有复杂结构部件, 通过流量计可以快速调节输出流量, 存储压力为 15 MPa, 充装过程简便<sup>[5]</sup>。随着技术的不断发展, 无缝钢的低压氢气已经满足不了氢能存储装置的需求, 碳纤维氢气瓶的应用, 将高压氢气推到了 35 MPa 和 70 MPa, 解决了现阶段对氢气的需求。

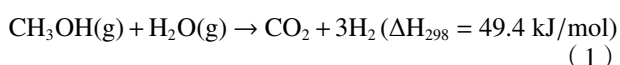
合金储氢是通过合金材料与氢气发生可逆反应储存氢气, 通过控制压力和温度控制氢气的吸附和脱附, 需要的温度和压力较小, 反应过程安全可靠, 可以释放出高纯度氢气。鉴于金属密度较大, 虽然体积储氢密度有极大提升, 但是质量储氢密度较小, 一般为 1.2wt% ~ 2wt%, 价格昂贵并且多次循环后存在疲劳问题<sup>[6]</sup>。

化合物储氢目前备受关注, 其中硼氢化钠水解制氢已经在一些产品上应用、销售。以 35% 的硼氢化钠碱溶液为例, 其储氢效率达 7.4%, 体积储氢量达 78 kg/m<sup>3</sup><sup>[7]</sup>, 但是硼氢化钠制氢存在存储期间需要在碱性条件下, 会腐蚀设备装置, 容易造成泄漏, 并且存储寿命一般为 2 周。

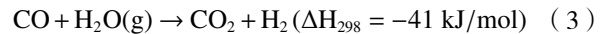
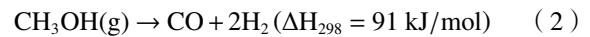
有机液体储氢, 也称为氢油储氢, 是通过加氢脱氢反应实现氢气的存储和释放, 常温常压下为液体, 可以十分方便地运输和存储<sup>[8]</sup>。其中, 甲基环己烷是目前被认为最有潜力的有机液体储氢介质, 体积密度为 47.3 g/L。但是, 有机液体储氢技术还存在技术复杂、能耗大等难题。

甲醇(CH<sub>3</sub>OH)重整制氢, 是在一定温度和压力条件下, 甲醇发生化学催化反应生成氢气和二氧化碳, 再通过膜分离技术获取高纯氢<sup>[9]</sup>, 反应式如下<sup>[10]</sup>:

主反应:



副反应:



除氢气外, 甲醇、丙烷(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>)等碳基液体燃料也可以直接用作 SOFC 阳极侧的燃料气进行发电, 甲醇、丙烷的容器采用商业 118 L 不锈钢瓶, 按照燃料电池发电效率 45% 计算, 具备 1 MWh 容量所需要的氢气、甲醇、丙烷质量如表 2 所示。由此可知氢气作为热值最高的燃料, 仅需要 56 kg 就可以满足容量需求。但这只是需要燃料的质量, 燃料存储装置的质量和体积还需要根据不同存储方式进行计算。

表 2 燃料需求

Tab. 2 Fuel demand

燃料种类	热值/ [MJ·(kg) <sup>-1</sup> ]	电量/[kWh·(kg) <sup>-1</sup> ] (发电效率为45%)	燃料总质量/kg
氢气	142.351	17.8	56.2
甲醇	19.594	2.4	416.7
丙烷	50.300	6.3	158.7

结合不同储料方式的储氢率, 计算出所需要的体积和质量, 得出表 3 不同燃料存储方式的参数对比情况<sup>[11]</sup>。应用最为广泛的高压储氢, 即使采用先进的 70 MPa 高压气瓶存储, 燃料所占据的体积也超过系统设计要求; 液氢可以满足设计要求, 但是低温贮存技术难度大, 液氢汽化等安全问题, 限制了其水中装备的应用; 金属储氢虽然占据的体积较小, 但是由于配位的金属元素一般都较重, 其所占据的质量较大, 超出设计的质量要求; 有机液体储氢、甲醇重整、直接甲醇和直接液化丙烷可以满足系统设计的要求, 其中液化丙烷占据的体积和质量最小。

表 3 不同储燃料方式的参数对比

Tab. 3 Parameter comparison of different fuel storage methods

储燃料方式	体积储氢率/ (kg·m <sup>-3</sup> )	系统体积/ m <sup>3</sup>	质量储氢率/ wt%	系统质量/ t
高压储氢(35 MPa)	16	3.500	3	1.873
高压储氢(70 MPa)	21	2.676	6	0.937
液氢	70.8	0.794	5.3	1.060
硼氢化钠(NaBH <sub>4</sub> )	78	2.0586	7.4	2.1686
金属储氢	115	0.489	1.2~2	2.810~4.683
有机液体储氢	32	1.756	3.5	1.606
甲醇重整	43	1.307	4.2	1.3381
直接甲醇	800	0.521	60	0.695
直接液化丙烷	483	0.329	50	0.317



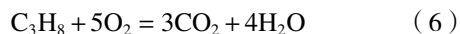
### 3 阴极侧氧气供应方式

目前主要的储氧方式为高压储氧、液氧和化学储氧。高压储氧是最成熟的储氧方式, 虽然 70 MPa 的储罐已经可以应用, 但在 70 MPa 的高压下, 纯氧具有很高的活性, 容易引发燃烧或爆炸。因此在水中装备中, 通常使用较低的压力, 如潜艇中氧气压力不高于 24 MPa<sup>[10]</sup>。

液氧的密度为 1.14 kg/L, 远高于 24 MPa 高压储氧的 0.3 kg/L<sup>[12]</sup>。液氧是将氧气在 -183 °C 下液化并存储, 具有质量和体积储氧密度高, 释放氧气纯度高优点, 在其他领域应用主要面临每日蒸发率的问题, 需要定期泄压保证容器安全使用, 但在燃料电池系统中, 其蒸发的气体可以直接通入燃料电池中, 提高了燃料的利用率。以商业产品快易冷储罐计算, 每日氧气蒸发量在 3 kg 左右, 但是 5 kW 燃料电池每日需要 57.6 kg 的氧气。

化学储氧常用的方式有过氧化氢和氧烛<sup>[13]</sup>。过氧化氢与催化剂接触可以生成氧气, 具有运输方便, 制氧简便的优点。氧烛是在氯酸盐中加入燃料、粘结剂等, 使用时通过点燃的方式释放氧气, 同时产生很多的热量, 放出一氧化碳等杂质气体, 并且一旦反应开始无法停止<sup>[14-15]</sup>。

阳极侧燃料气所需要的氧气根据下列化学反应方程式:



参照上述化学反应方程式, 计算得出不同燃料完全发生反应, 需要的氧气质量以及排放的尾气质量如表 4 所示。

表 4 氧气和尾气参数对比

Tab. 4 Comparison of oxygen and tail gas parameters

燃料种类	O <sub>2</sub> /kg	H <sub>2</sub> O/kg	CO <sub>2</sub> /kg	CO <sub>2</sub> 流量/(g·min <sup>-1</sup> )
氢气	449.6	505.8	—	—
甲醇重整	449.6	505.8	412.1	34.3
甲醇	625.0	468.7	573.0	47.8
丙烷	577.1	258.7	476.1	39.7

目前在潜艇、UUV 等水中装备已经展开应用的储氧方式主要有高压储氧、液氧、过氧化氢水溶液

表 5 不同储氧方式的参数对比

Tab. 5 Parameter comparison of different oxygen storage methods

储氧方式	体积密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	质量密度/gwt%
高压储氧(15 MPa)	166.7	21.3
液氧	661.0	78.6
过氧化氢(70%)	348.8	30.3
氧烛制氧	547.2	27.7

和氧烛制氧。表 5 列举了不同储氧方式的储氧密度, 从表中可以看出, 液氧在各种储氧方式中储氧密度最高, 尤其是在质量密度中优势明显。

根据不同种类燃料对氧气的需求量, 按照不同储氧方式计算得出表 6。高压储氧占据的体积和质量最大, 超出了设计要求。虽然液氧、过氧化氢和氧烛制氧都可以满足设计需求, 但是过氧化氢制氧反应过程中放出大量的热, 需要增加热管理系统, 并且一旦装置中混入铁屑等杂质, 使得过氧化氢分解, 造成容器压力迅速升高, 带来安全隐患。氧烛制氧速率不可控, 一旦开始无法停止。液氧具有在水中装备中应用的潜力。

### 4 燃料电池燃料系统

根据使用不同种类的燃料, 计算出所需要氧气的体积和质量, 液氧、过氧化氢和氧烛制氧可以满足能源系统设计要求, 综合阳极侧储燃方式, 计算得出燃料系统参数如表 7 所示。结合上述储氧技术的优缺点, 液氧储存占据的燃料系统体积和质量最少, 具备水下应用的可行性。甲醇重整、直接甲醇和直接丙烷的燃料系统可以满足能源系统设计要求, 其中以直接丙烷和液氧组成的燃料系统具有最高的比能量。然而水下应用为了提升隐蔽性, 要求不与外界有物质交换, 对于含碳燃料, 最终产物中会有二氧化碳, 为此还需要考虑二氧化碳的处理回收方式。

### 5 二氧化碳吸收装置

氢氧化锂(LiOH)具有高效、重量轻、吸收率高等优点, 是当前最有效的二氧化碳化学吸收剂。美国海军已经将 LiOH 装置应用于核潜艇舱室吸收二氧化碳<sup>[16-17]</sup>。氢氧化锂对二氧化碳吸收量为碱石灰吸收量的 1 倍左右, 1 kg LiOH 可吸收 0.8 ~ 0.92 kg

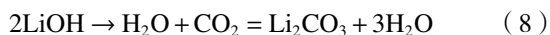
表 6 各种燃料不同储氧方式的参数对比  
Tab. 6 Parameter comparison of different oxygen storage modes of various fuels

燃料种类	储氧方式							
	高压储氧(15 MPa)		液氧		过氧化氢(70%)		氧烛制氧	
	体积/m <sup>3</sup>	质量/t	体积/L	质量/kg	体积/m <sup>3</sup>	质量/t	体积/m <sup>3</sup>	质量/t
氢气	2.697	2.111	680	572	1.292	1.484	0.822	1.623
甲醇重整	2.697	2.111	680	572	1.292	1.484	0.822	1.623
甲醇	3.749	2.934	946	795	1.792	2.063	1.142	2.256
丙烷	3.462	2.709	873	734	1.655	1.905	1.055	2.083

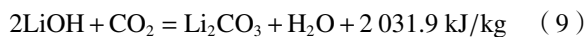
表 7 燃料系统参数对比  
Tab. 7 Comparison of fuel system parameters

燃料种类	储氧方式					
	液氧		过氧化氢(70%)		氧烛制氧	
	体积/m <sup>3</sup>	质量/t	体积/m <sup>3</sup>	质量/t	体积/m <sup>3</sup>	质量/t
有机液体	2.436	2.178	3.048	3.090	2.578	3.229
甲醇重整	1.987	1.9101	2.599	2.8221	2.129	2.9611
甲醇	1.467	1.490	2.313	2.758	1.663	2.951
丙烷	1.202	1.051	1.984	2.222	1.384	2.400

二氧化碳<sup>[18-19]</sup>,在室温下也能良好地吸收二氧化碳,反应产生的热量会进一步促进水的气化,提升反应温度,当反应温度高于 323 K时,反应保持较高的速率<sup>[20-21]</sup>。其反应方程式如下:



总反应:



尾气中的水蒸汽通过换热器后以液体形式留存在系统内部以维持重心,二氧化碳以氢氧化锂球体吸附,其空间利用率为 74%,占装置体积 2/3,理论氢氧化锂吸收量为 20.8 mmol/g,纯氢氧化锂其密度为 1.45 g/cm<sup>3</sup>,二氧化碳吸收率取 90%,主含量取 99%,装置质量系数按 0.5 计算,不同燃料类型的二氧化碳吸附装置计算如表 8 所示。可以看出,二氧化碳吸附装置在整个能源系统的质量和体积占据不小的比例,采用无碳燃料可以省去这一部分的占比,或者设

计开发出比吸附存贮更适合的二氧化碳回收处理装置。

表 8 二氧化碳吸附装置  
Tab. 8 Carbon dioxide adsorption device

燃料种类	CO <sub>2</sub> /kmol	LiOH/kg	装置体积/L	装置质量/t
甲醇重整	9.366	505	706	1.010
甲醇	13.023	703	983	1.406
丙烷	10.820	584	817	1.168

## 6 燃料电池系统

综合上述计算结果,得出燃料电池系统的参数如表 9 所示。依据燃料电池系统质量<2.5 t,体积<2.857 m<sup>3</sup>的设计要求,以丙烷或有机液体和液氧为燃料的固体氧化物燃料电池,以及使用有机液体和液氧为燃料的质子交换膜燃料电池可以满足系统设计需求。虽然以有机液体储氢的方式可以省去二氧

化碳吸收装置,但是丙烷价格更加低廉,获取相对容易,更适合作为水下装备的燃料。

表9 燃料电池系统对比

Tab. 9 Carbon dioxide adsorption device

燃料种类	SOFC+吸附		PEM	
	体积/m <sup>3</sup>	质量/t	体积/m <sup>3</sup>	质量/t
有机液体+液氧	2.461	2.2405	2.441	2.1852
甲醇重整+液氧	2.718	2.9826	2.698	2.9273
甲醇+液氧	2.475	2.9585	—	—
丙烷+液氧	2.044	2.2815	—	—

## 7 结论

文章介绍了各种储氢储氧方式的优缺点和储能密度,概算1 MWh电量所需要燃料的质量和体积。由于高压氧下水受压力限制,存储密度有上限;双氧水、氧烛制氧难以控制启停,水下应用安全性有待提升等问题,确定采用液氧的方式存储可以显著提升水下燃料电池能源系统的比能量。受限于燃料电池各自的特点,以液氧和丙烷为燃料的SOFC能源系统,在包括二氧化碳吸附装置后,1 MWh的SOFC能源系统的质量比能量可以达到438 Wh/kg,体积比能量为489 Wh/L;使用液氧和有机液体为燃料的SOFC能源系统质量比能量可以达到446 Wh/kg,体积比能量为406 Wh/L;以有机液体和液氧为燃料的PEMFC能源系统质量比能量达到457 Wh/kg,体积比能量为409 Wh/L。根据计算结果可以得出,燃料的种类是决定能源系统能量密度的关键。值得明确的是,SOFC的发电效率一般高于PEMFC,意味着相同量的燃料可以释放出更多电能,并且丙烷相较于有机液体储氢成本更低,制备简便,以丙烷和液氧为燃料的SOFC系统,更适合作为水下能源系统。

### 参考文献:

- [1] 袁亚,张木,李翔,等.国外水下预置无人作战装备研究[J].*战术导弹技术*,2018(1):51-55. DOI: 10.16358/j.issn.1009-1300.2018.01.09.  
YUAN Y, ZHANG M, LI X, et al. Research on underwater pre-installed unmanned combat equipment [J]. *Tactical missile technology*, 2018(1): 51-55. DOI: 10.16358/j.issn.1009-1300.2018.01.09.
- [2] 张卫京,高玉英,何峰.水下尖兵——无人水下机器人[J].*轻兵器*,2019(8):22-26. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8810.2019.08.

010.

ZHANG W J, GAO Y Y, HE F. Underwater elite: unmanned underwater robot [J]. *Small arms*, 2019(8): 22-26. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8810.2019.08.010.

- [3] 李红享,项福军,刘强,等.密闭环境燃料电池系统研究进展[J].*船电技术*,2022,42(10):110-113. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4862.2022.10.027.  
LI H X, XIANG F J, LIU Q, et al. Research progress of fuel cell system in confined environment [J]. *Marine electric & electronic engineering*, 2022, 42(10): 110-113. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4862.2022.10.027.
- [4] 陈长聘,王新华,陈立新.燃料电池车车载储氢系统的技术发展与应用现状[J].*太阳能学报*,2005,26(3):435-442. DOI: 10.3321/j.issn.0254-0096.2005.03.027.  
CHEN C P, WANG X H, CHEN L X. Current status of development and applications of onboard hydrogen storage technologies for fuel cell vehicle [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2005, 26(3): 435-442. DOI: 10.3321/j.issn.0254-0096.2005.03.027.
- [5] 郑津洋,刘贤信,徐平,等.高压储氢技术研究进展[J].*工厂动力*,2010,1:39-45.  
ZHENG J Y, LIU X X, XU P, et al. Research progress of high-pressure hydrogen storage technology [J]. *Factory power*, 2010, 1: 39-45.
- [6] 葛静,张沛龙,朱永国,等.金属氢化物储氢装置的研究进展[J].*新材料产业*,2014(7):55-60. DOI: 10.3969/j.issn.1008-892X.2014.07.013.  
GE J, ZHANG P L, ZHU Y G, et al. Research progress of metal hydride hydrogen storage device [J]. *New material industry*, 2014(7): 55-60. DOI: 10.3969/j.issn.1008-892X.2014.07.013.
- [7] 徐东彦,张华民,叶威.硼氢化钠水解制氢[J].*化学进展*,2007,19(10):1598-1605.  
XU D Y, ZHANG H M, YE W. Hydrogen production from sodium borohydride [J]. *Progress in chemistry*, 2007, 19(10): 1598-1605.
- [8] 张剑光.氢能产业发展展望-制氢与氢能储运[J].*化工设计*,2019,29(4):3-6+26. DOI: 10.3969/j.issn.1007-6247.2019.04.002.  
ZHANG J G. Prospect of hydrogen energy industry development: hydrogen production and hydrogen storage & transportation [J]. *Chemical engineering design*, 2019, 29(4): 3-6+26. DOI: 10.3969/j.issn.1007-6247.2019.04.002.
- [9] 苏海兰,史立杰,高殊,等.甲醇水蒸气重整制氢研究进展[J].*工业催化*,2019,27(4):28-31. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1143.2019.04.006.  
SU H L, SHI L J, GAO Z, et al. Research progress of hydrogen production from methanol steam reforming [J]. *Industrial catalysis*, 2019, 27(4): 28-31. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1143.2019.04.006.
- [10] 宋强.水下无人飞行器燃料电池技术浅谈[J].*舰船科学技术*,

- 2020, 42(12): 150-154. DOI: [10.3404/j.issn.1672-7649.2020.12.030](https://doi.org/10.3404/j.issn.1672-7649.2020.12.030).
- SONG Q. Discussion on fuel cell technology for underwater unmanned vehicles [J]. *Ship science and technology*, 2020, 42(12): 150-154. DOI: [10.3404/j.issn.1672-7649.2020.12.030](https://doi.org/10.3404/j.issn.1672-7649.2020.12.030).
- [11] 贾江鑫, 洪浩源, 王振. 几种储氢技术在氢燃料电池船舶应用的对比分析 [J]. *船电技术*, 2022, 42(5): 37-40. DOI: [10.3969/j.issn.1003-4862.2022.05.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-4862.2022.05.010).
- JIA J X, HONG H Y, WANG Z. Comparative analysis of several hydrogen storage technology in hydrogen fuel cell ships [J]. *Marine electric & electronic engineering*, 2022, 42(5): 37-40. DOI: [10.3969/j.issn.1003-4862.2022.05.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-4862.2022.05.010).
- [12] 路骏, 白超, 高育科, 等. 水下燃料电池推进技术研究进展 [J]. *推进技术*, 2020, 41(11): 2450-2464. DOI: [10.13675/j.cnki.tjjs.200282](https://doi.org/10.13675/j.cnki.tjjs.200282).
- LU J, BAI C, GAO Y K, et al. Progress on underwater fuel cell propulsion technology [J]. *Journal of propulsion technology*, 2020, 41(11): 2450-2464. DOI: [10.13675/j.cnki.tjjs.200282](https://doi.org/10.13675/j.cnki.tjjs.200282).
- [13] VAN BIERT L, GODJEVAC M, VISSER K, et al. A review of fuel cell systems for maritime applications [J]. *Journal of power sources*, 2016, 327: 345-364. DOI: [10.1016/j.jpowsour.2016.07.007](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.07.007).
- [14] 吴剑威, 张鲁闽, 马继民, 等. 野战医疗供氧方法探讨 [J]. *中国医学装备*, 2012, 9(4): 23-26. DOI: [10.3969/j.issn.1672-8270.2012.04.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-8270.2012.04.008).
- WU J W, ZHANG L M, MA J M, et al. Discussion on methods of oxygen supply in field operation [J]. *China medical equipment*, 2012, 9(4): 23-26. DOI: [10.3969/j.issn.1672-8270.2012.04.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-8270.2012.04.008).
- [15] MCCARRICK A, HAAS J, JOHNSON K, et al. U.S. navy sodium chlorate oxygen candle safety [C]//American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). 41st International Conference on Environmental Systems, Portland, Oregon, July 17-21, 2011: 5045. Reston: AIAA, 2012.
- [16] 王额尔敦, 强显成, 徐佳. 密闭/半密闭舱室二氧化碳清除技术应用进展 [J]. *医疗卫生装备*, 2013, 34(12): 97-99. DOI: [10.7687/J.ISSN.1003-8868.2013.12.097](https://doi.org/10.7687/J.ISSN.1003-8868.2013.12.097).
- WANG E E D, QIANG X C, XU J. Application progress of carbon dioxide removal technology in airtight/semi-airtight compartment [J]. *Chinese medical equipment journal*, 2013, 34(12): 97-99. DOI: [10.7687/J.ISSN.1003-8868.2013.12.097](https://doi.org/10.7687/J.ISSN.1003-8868.2013.12.097).
- [17] 毛欣. 高强度高吸收性能CO<sub>2</sub>吸收剂LiOH [J]. *煤矿安全*, 2007, 38(6): 52-55. DOI: [10.3969/j.issn.1003-496X.2007.06.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-496X.2007.06.019).
- MAO X. High intensity and high exhaustion performance CO<sub>2</sub> absorbent LiOH [J]. *Safety in coal mines*, 2007, 38(6): 52-55. DOI: [10.3969/j.issn.1003-496X.2007.06.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-496X.2007.06.019).
- [18] 杨国威, 卞强, 余青霓, 等. 密闭空间温湿度条件对LiOH吸收效率的影响 [J]. *载人航天*, 2012, 18(5): 14-18. DOI: [10.3969/j.issn.1674-5825.2012.05.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-5825.2012.05.005).
- YANG G W, BIAN Q, YU Q N, et al. Influence of temperature and humidity on absorption efficiency of LiOH in confined space [J]. *Manned spaceflight*, 2012, 18(5): 14-18. DOI: [10.3969/j.issn.1674-5825.2012.05.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-5825.2012.05.005).
- [19] 王雅娟, 马丽娥, 国德旺, 等. KO<sub>2</sub>药板使用条件下LiOH罐的二氧化碳吸收性能研究 [J]. *舰船防化*, 2012(4): 16-19.
- WANG Y J, MA L E, GUO D W, et al. Performance of LiOH canister on carbon dioxide absorption under conditions suitable for KO<sub>2</sub> [J]. *Chemical defence on ships*, 2012(4): 16-19.
- [20] 酆正能, 程小全, 方卫国, 等. 飞机部件与系统设计 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
- LI Z N, CHENG X Q, FANG W G, et al. Aircraft component and system design [M]. Beijing: Beihang University Press, 2006.
- [21] 赵卓, 傅平丰. LiOH·H<sub>2</sub>O水合结晶与CO<sub>2</sub>的反应动力学 [J]. *航天医学与医学工程*, 2007, 20(5): 344-348. DOI: [10.3969/j.issn.1002-0837.2007.05.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0837.2007.05.008).
- ZHAO Z, FU P F. Kinetics of reaction between LiOH·H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> [J]. *Space medicine & medical engineering*, 2007, 20(5): 344-348. DOI: [10.3969/j.issn.1002-0837.2007.05.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0837.2007.05.008).

---

作者简介:



牛勇超

牛勇超 (第一作者, 通信作者)

1992-, 男, 天津市人, 工程师, 哈尔滨工业大学化学工程与技术博士, 主要研究方向为燃料电池及化学电源(e-mail)hitniuyongchao@163.com。

李学海

1975-, 男, 天津市人, 高级工程师, 哈尔滨工业大学化学硕士, 主要研究方向为化学电源(e-mail)13820141418@163.com。

(编辑 叶筠英)