

【引用格式】刘晨光, 李庆萌, 彭晓盟, 等. 铝水制氢系统设计与试验研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2025, 8 (1): 10-18.

# 铝水制氢系统设计与试验研究

刘晨光<sup>1</sup>, 李庆萌<sup>2</sup>, 彭晓盟<sup>1</sup>, 王 宇<sup>1</sup>, 宋文强<sup>1</sup>, 张倩倩<sup>1</sup>,  
屈 光<sup>1</sup>, 张 国<sup>1</sup>, 赵 阳<sup>1,\*</sup>

(1. 中国海洋工程研究院 (青岛), 山东 青岛, 266555;

2. 蓝海易氢动力 (青岛) 有限公司, 山东 青岛, 266555)

**摘 要** 为解决深远海环境中能源系统续航能力不足的问题, 研究设计并验证了一种基于铝水反应的制氢系统, 并将其与燃料电池系统集成, 以适应水下复杂工况需求。反应器采用井字形加强骨架和轻量化高强度材料, 提高了结构刚度并优化了动态进水调控与散热设计。在模拟深远海密闭环境的实验平台上, 进行了冷启动、热启动、压力稳定性及水下联合运行测试。结果表明: 该系统能够稳定供应氢气, 压力波动较小, 并在不同启动条件下具备良好的运行特性。水下长时间运行过程中, 燃料电池功率输出保持稳定, 未出现明显衰减, 舱内温度变化幅度较小, 体现出较好的热平衡能力和环境适应性。研究成果验证了铝水制氢技术的工程可行性和实用价值, 该系统可为深远海复杂环境中的能源供给提供支持, 并为深海装备的能源优化设计提供参考。

**关键词** 铝水制氢; 燃料电池; 能源系统

中图分类号 TK6

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2025)01-0010-09

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2025.01.002

## Design and Experimental Study of Aluminum-water Hydrogen Generation System

LIU Chengguang<sup>1</sup>, LI Qingmeng<sup>2</sup>, PENG Xiaomeng<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>1</sup>, SONG Wenqiang<sup>1</sup>,  
ZHANG Qianqian<sup>1</sup>, QU Guang<sup>1</sup>, ZHANG Guo<sup>1</sup>, ZHAO Yang<sup>1,\*</sup>

(1. China Institute of Ocean Engineering (Tsing Tao), Qingdao 266555, China;

2. Blue Ocean Easy HyPower (Qingdao) Co., Ltd., Qingdao 266555, China)

**Abstract** To address the challenge of insufficient endurance in energy systems under deep-sea conditions, a hydrogen production system based on aluminum-water reactions is designed, analyzed, and validated. It is integrated with a fuel cell system to meet the demands of complex underwater environments. The reactor features a grid-like reinforced framework and lightweight, high-strength materials, which enhance structural rigidity and optimize dynamic water intake control and heat dissipation. Experimental tests, including cold start, hot start, pressure stability, and underwater integrated operation, are conducted on a simulated deep-sea closed environment platform. The results demonstrate that the system can stably supply hydrogen with minimal pressure fluctuations and exhibits excellent performance under different startup conditions. During extended underwater operations, the fuel cell output remains stable without noticeable degradation, and the variations in cabin temperature and humidity are minor, reflecting the system's effective thermal and humidity balance and environmental adaptability. These findings confirm the engineering feasibility and practical value of aluminum-water hydrogen production technology. This

收稿日期: 2025-01-08

作者简介: 刘晨光 (1989-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事水解制氢, 燃料电池等领域研究。

\*通信作者: 赵阳 (1990-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事水解制氢、质子交换膜燃料电池、高安全消氢等方面的研究工作。

system provides robust energy supply support for complex deep-sea environments and offers valuable insights for optimizing energy systems in deep-sea equipment design.

**Key words** aluminum-water hydrogen generation; fuel cell; energy system

## 0 引言

随着全球科技与经济的快速发展,人类对海洋资源的开发与利用需求日益增长,深远海探索成为承载科学研究、资源勘探等多重任务的关键领域<sup>[1-4]</sup>。深远海区域覆盖地球表面积的绝大部分,蕴藏着丰富的矿产资源、生物资源和新能源,具有巨大的开发潜力。然而,由于深远海环境的极端性和复杂性,包括高压、低温和长期隔绝等特征,对装备的性能和可靠性提出了极高要求。能源系统作为深远海装备的核心技术,其性能直接决定了装备的作业范围、持续时间以及任务完成效果。因此,探索并开发能够满足深远海复杂环境需求的能源技术,成为推动深远海开发与应用的关键研究方向<sup>[5-7]</sup>。燃料电池以其高能量转换效率、低排放、低噪声及适应性强等优势,逐渐成为深远海装备的能源技术之一<sup>[8-9]</sup>。然而,燃料电池技术目前仍面临续航能力不足的限制,其关键瓶颈在于缺乏高效的氢源供给方式<sup>[10]</sup>。

目前,高压气态储氢和液态储氢是地面场景最常用的氢源供给技术<sup>[11]</sup>。高压气态储氢技术以结构简单、反应稳定为特点,但其低储氢密度和水下密闭环境中的安全性风险,限制了其在深海应用中的广泛使用<sup>[12-14]</sup>。液态储氢技术则通过低温液化氢气实现高储氢密度,但无人条件下低温设备的复杂性高<sup>[15]</sup>,同时在深海环境下,液态储氢设备的长期可靠性仍需进一步验证。因此,这些传统储氢技术难以完全满足深远海装备对高密度、安全可靠氢源的需求,制约了燃料电池在深远海环境中的推广与应用<sup>[16]</sup>。

近年来,基于化学反应的制氢技术因其灵活高效的特点,逐渐成为研究热点<sup>[17-18]</sup>。其中,铝水反应制氢技术凭借高反应效率、良好环境适配性和可靠性受到广泛关注<sup>[19]</sup>。铝与水发生反应生成氢气,反应过程中氢气纯度高,与燃料电池系统适配良好,可适应深远海环境的特殊条件<sup>[17]</sup>。铝水反应的核心机制包括以下几种化学反应:



上述反应具有产氢速率快、反应条件可控等优点,但受制于铝表面氧化层的存在,未处理的铝在常温下的反应速率较低<sup>[20]</sup>。此外,反应副产物(如氢氧化铝)的积累可能影响反应器性能<sup>[21]</sup>,这些问题限制了铝水反应在深远海环境中的直接应用。

国内外研究者围绕提升铝水反应速率开展了大量研究。国内研究者通过掺杂金属催化剂和破除了铝表面的氧化层,显著提升了铝水反应的速率与氢气产量<sup>[22-24]</sup>;国外研究团队则在反应动力学建模及反应器优化设计方面取得了重要进展,为系统效率的提升提供了理论支撑<sup>[25]</sup>。

EOM 等人<sup>[26]</sup>设计了一种 Al-Fe 合金,并测试了其于燃料电池联合运行的性能。实验表明,当燃料电池工作电流为 10 A 时,该系统可维持燃料电池运行 37 分钟。ZHUK 等人<sup>[18]</sup>设计了一种移动应用的铝水制氢装置,采用的材料为 Al-Bi (3.5%)-Sn(1.5%),材料理论储氢密度仅为 10.5%,单次反应不超过 50s,可供给 1.5 kw 燃料电池使用。HURTUBISE 等人<sup>[25]</sup>设计了一种基于氢氧化钠水解铝的装置,其最大产氢量为 3.75 kg,但装置运行过程中压力波动较大(400~600 kPa)。上述研究虽然在特定场景下取得一定进展,但在系统集成及运行稳定性等方面仍有较大改进空间,同时这些研究均针对的是陆地场景,并为考虑水下环境的真实应用。

为解决上述问题,本文提出了一种基于铝水反应的制氢系统,旨在为深远海装备的燃料电池提供高效、安全的氢源供给。重点通过优化反应器结构与动态控制策略,提升氢气供给的稳定性与连续性,同时设计并搭建了一个模拟水下环境的实验平台,对制氢系统在深远海特殊条件下的适应性与综合性能进行了系统验证与评估。

## 1 制氢系统设计

### 1.1 总体设计

在深远海环境中,能源系统面临高效、安全氢

源供给的严苛要求,制氢系统的总体设计需要围绕燃料电池的稳定供氢需求展开,同时满足水下密闭环境对系统紧凑性、可靠性和热平衡能力的高标准。针对这些关键问题,本研究提出了一种基于铝水反应的制氢系统总体设计思路。通过采用“以水控氢”反应器技术,系统能够实现对氢气生成压力和流量的精准调控,以适应动态负载变化和复杂环境需求。与此同时,反应器的结构设计结合井字形加强骨架与轻量化高强度材料,不仅优化了体积利用率,还显著提升了系统的抗压能力和长期运行可靠性。

在设计过程中,重点考虑了系统的动态响应能力和多工况适应性。为满足深远海环境中的特殊需求,系统对热管理进行了全面优化,确保在长时间运行中能够有效避免热堆积问题。此外,系统模块化的结构设计为未来的扩展应用提供了便利,使其能够灵活适配不同的水下作业场景。总体设计思路以深远海复杂环境为应用背景,通过结构优化与技术集成,最大限度地提升了系统的性能和适用性,为燃料电池的高效稳定运行提供了可靠的氢源支持。

### 1.2 铝水制氢材料选型

铝水制氢系统采用了赵阳等人<sup>[27]</sup>研发铝基复合材料,基于高能球磨法进行制备,提升了材料的反应性能和储氢密度。制备过程中,通过优化材料成分及球磨工艺,提高了复合材料的活性和表面积,克服了传统铝粉表面氧化膜的钝化问题。复合材料的片层结构设计结合金属催化剂的协同作用,进一步增强了反应速率和产氢效率。同时,金属氢化物的引入,提高了材料的储氢密度,为全系统储氢密度的提升做出了贡献。

### 1.3 控制系统设计

铝水制氢系统结构简图如图 1 所示。反应水通过电控喷水嘴定量注入装有铝基复合材料的反应罐中,与材料发生化学反应生成氢气。为确保反应的高效性与稳定性,反应罐配备了冷却系统和温度传感器。系统通过监测实际温度与目标温度的偏差,控制冷却水流量,从而将反应罐内部温度稳定在预设范围内,有效避免温度波动对反应速率的影响。

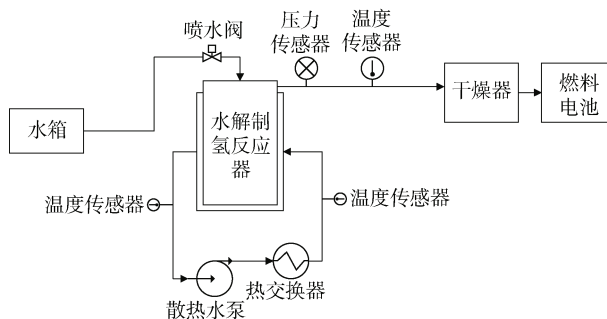


图 1 铝水制氢系统结构简图

Fig. 1 Simplified structural diagram of aluminum-water hydrogen production system

反应罐内装配了压力传感器,用于实时监测内部压力。当实际压力偏离目标值时,控制器对进水量进行控制。通过水量调节,系统能够快速稳定内部压力,降低压力波动幅度。此外,在氢气流量变载的情况下,系统通过快速调整进水量实现对变载需求的灵活响应,同时基于压力变化减少变载过程中可能产生的压力波动,进一步提升系统的稳定性和适应性。生成的氢气经过干燥管处理后,以高纯度和稳定的状态输送至燃料电池系统,为燃料电池的高效运行提供了可靠的氢源支持。

### 1.4 反应器设计

基于水下密闭场景的实际情况,发电运行的安全裕度直接关联于制储氢装置的结构强度与密封性能,这一关键要素是制氢系统在水下应用中的基础保障。基于舱体验证平台的空间约束条件,制氢区域的结构参数设计需要满足舱体安装与运行需求。平台制氢区域底部采用平面支撑架,并通过滑轨支撑实现入舱安装的灵活性。支架底部预留散热区域,以便高效散热。设计过程需综合考虑平台空间适配性、储料容积、结构强度及可拆卸性,确保装置在复杂运行环境下的高效工作。

主体结构采用矩形截面的反应器罐体,其与舱体的连接集中于外部集成水套。罐体由上端盖、壳体、内部加强筋、附件集成组件和水套密封部分构成。

罐体内部设计了井字形加强骨架,不仅显著增强侧壁刚度,还通过合理布局,为填料模块提供装卸间隙空间,提高操作便利性。考虑到焊接的整体强度与加工工艺可行性,罐体采用折弯板对焊方案,法兰部件则通过锻件加工后进行复合焊接。设计中,四角的折弯半径选择为 $\geq 4$ 倍壁厚,以提升

结构强度并降低加工难度。

#### 1.4.1 密封设计

1) 螺栓载荷计算如下。

预紧状态需要螺栓的最小载荷:

$$W_a = F_a = 3.14 D_G b y \quad (4)$$

式中:  $D_G$  为密封压紧力作用中心圆直径;  $b=7$  mm, 为垫片有效密封宽度;  $y=0$ , 为垫片比压力; 经计算  $W_a=0$ 。

操作状态需要螺栓最小载荷:

$$W_p = 0.785 D_G^2 p + 6.28 D_G b m p \quad (5)$$

式中:  $D_G=311$  mm, 为密封压紧力作用中心圆直径;  $p=1$  MPa, 为计算压力,  $b=7$  mm, 为垫片有效密封宽度;  $m=1$ , (为垫片系数;  $y=1.4$ ), 为比压力。

经计算  $W_a=6\ 369$  N,  $W_p=89\ 108$  N。

2) 螺栓面积。

预紧状态下需要最小螺栓面积:

$$A_a = \frac{W_a}{[\sigma]_b} \quad (6)$$

操作状态下需要最小螺栓面积

$$A_p = \frac{W_p}{[\sigma]_b} \quad (7)$$

式中,  $[\sigma]_b$  为螺栓许用应力, 137 MPa, 经计算需要螺栓面积:  $A_m=A_p=650.4$  mm<sup>2</sup>。

取 M16 螺栓, 螺纹根径  $d_1=14.1$  mm, 单个螺栓截面积  $A_s=156.6$  mm<sup>2</sup>, 螺栓数量:

$$n = \frac{A_m}{A_s} = \frac{650.4}{156.6} = 4.15 \quad (8)$$

取  $n=5$  个, 即 5 个 M16 螺栓即可满足产品性能要求, 考虑安全裕度及产品对外预留安装孔位置, 法兰安装螺栓设计 12 个 M16 螺栓, 实际螺栓面积  $A_b=1942.8$  mm<sup>2</sup>  $> A_m$ , 强度要求。

3) 螺栓设计载荷。

预紧状态下螺栓设计载荷:

$$W = 0.5(A_m + A_b)[\sigma]_b \quad (9)$$

操作状态下螺栓设计载荷:

$$W = W_p \quad (10)$$

经计算, 预紧状态下螺栓设计总载荷  $W=162\ 188$  N, 操作状态下设计螺栓总载荷  $W=89\ 108$  N。

4) 法兰紧固力矩。

取预紧状态下螺栓设计总载荷  $W=162\ 188$  N, 确定法兰每个螺栓的所需紧固力矩  $T$ :

$$T = \frac{10^{-3} k W d B}{n} \quad (11)$$

式中:  $dB$  为螺栓公称直径, 16 mm;  $k$  为扭转系数, 0.13 mm; 经计算  $T=28$  N·m, 安装力矩至少 28 N·m, 能够满足紧固密封要求。

按照许用应力  $[\sigma]_b$  为螺栓许用应力, 137 MPa, 经计算:

$$M = KPD = 0.2 \times s_s \times A_s \times d / 1000 \quad (12)$$

式中:  $k$  为拧紧系数, 0.2; M12  $A_s=84.2$  mm<sup>2</sup>; M16  $A_s=156.6$  mm<sup>2</sup>, M16 许用螺栓拧紧力矩为 68 N·m。

本设计围绕制氢系统的密封需求, 结合螺栓连接强度和法兰密封性能要求, 完成了密封结构的优化与校核。通过合理选择螺栓数量和尺寸, 确保了法兰在操作压力下的密封可靠性。预紧状态下的螺栓载荷与法兰紧固力矩设计均满足系统运行需求, 提供了足够的安全裕度。整体密封结构设计充分考虑了高压复杂工况下的密封性能要求, 结构紧凑, 可靠性高。

#### 1.4.2 有限元分析

如图 2 应变云图, 基于 Ansys 建立了有限元结构仿真模型, 采用 1/4 对称模型分析在单次加载情况下施加侧向载荷的响应。通过压力试验的实测

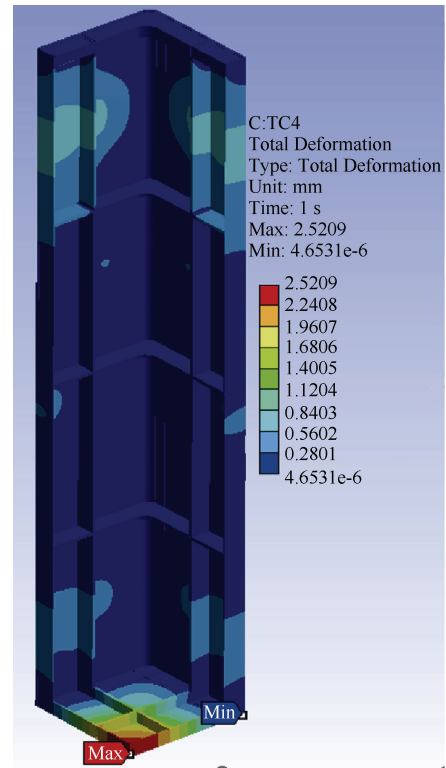


图 2 有限元分析图

Fig. 2 Finite element analysis diagram

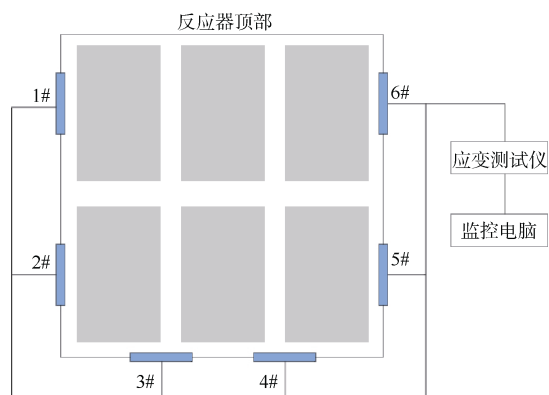
数据,对仿真推导出的侧向力结果进行了修正和验证。在施加均匀内压 1 MPa 的边界条件下,计算得到了最大位移为 2.5 mm。进一步分析考虑了水套间隙 6~10 mm 的工况范围,结果表明,所得位移值满足实际使用要求。

## 2 制氢系统测试

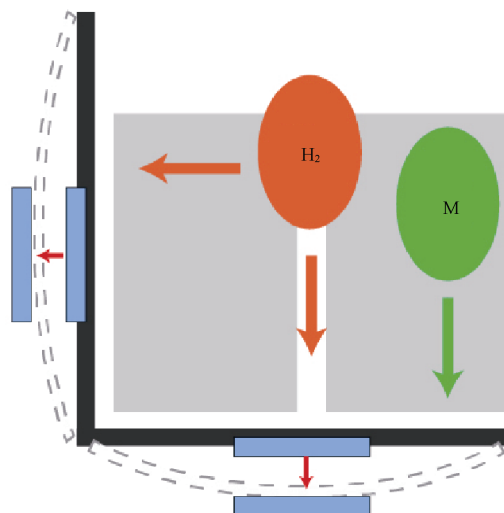
基于高可靠性的要求,对制氢系统的基本性能进行了全面测试。这些测试目的在于验证制氢系统在启动阶段快速建压,长时间连续运行等条件下的稳定性、可靠性和适应性。

### 2.1 反应器形变测试

在制氢过程中,对钛合金 TC4 反应器壳体的应力-应变状态进行了监测,采集频率为 10 Hz。监测装置及应变片的布置如图 7 所示。从侧壁各位置的监测结果(图 8)可以看出,反应器壁面的环向应力与位移分布整体较为均匀。然而,在靠近底部位置,随着反应进行,应力与应变在反应后期出现显著升高。例如,4#监测点在反应中后期的应变值达到  $2\,721\ \mu$ ,明显高于其他位置。这一现象可能是由于底部结构同时受到粉体自重附加作用的影响所致。综合分析表明,反应器的弹性变形对制氢过程的安全性影响较小,整体仍处于可控范围之内。



(a) 应力-应变试验装置图



(b) 反应器受力分析

图 3 应力-应变检测与机理

Fig. 3 Stress-strain measurement and mechanism

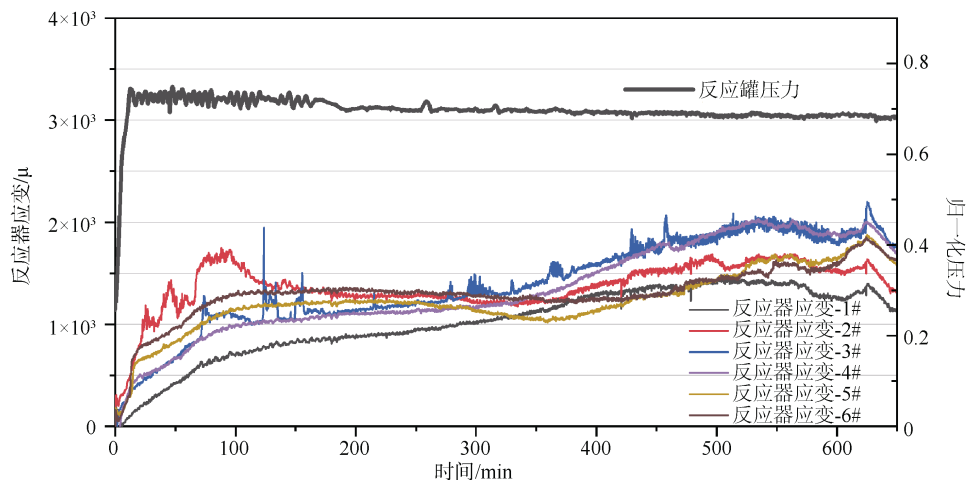


图 4 制氢过程应变片监测数据

Fig. 4 Strain gauge monitoring data of hydrogen production process

### 2.2 制氢系统启动时间测试

测试过程中,系统在冷启动条件下进行了动态

性能验证,相关数据如图 9 所示。从第 1 129 s 开始计时,进水后铝水反应迅速启动,反应罐内压力

逐步升高;至第 1 836 s, 压力达到流量计启动的设定阈值。从进水开始到流量计启动的时间间隔为 707 s, 该时间主要受到进水速率的影响。实验表明, 通过提高进水速率可显著缩短启动时间, 未来可结合实际应用场景的需求, 进一步优化启动流程, 以提升系统的响应效率和整体性能。

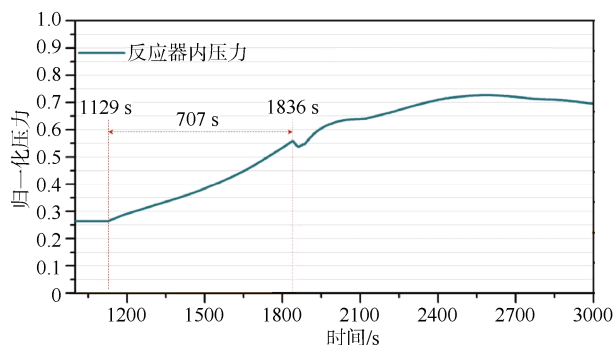


图5 制氢系统冷启动测试

Fig. 5 Cold start test of hydrogen production system

在运行测试期间, 同时完成了热机启动时间的测定。当制氢系统达到预定运行温度后启动进水, 第 9 s 开始注水, 第 30 s 反应器内压力稳步上升; 至第 158 s, 反应器内压力达到流量计启动的设定阈值流量。从进水开始至启动流量的实现, 总耗时为 144 s, 充分验证了热机启动的高效性与可靠性。

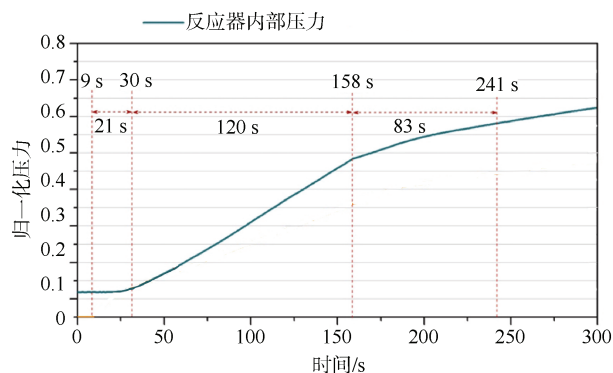


图6 制氢系统热启动测试

Fig. 6 Heat engine start-up test of hydrogen production system

测试结果表明, 制氢系统从冷启动到达额定工况的时间为 707 s, 而热启动仅需 144 s。这种时间差异反映出系统在热机状态下具有更快的响应速

度和更高的运行效率。冷启动时间主要受到低温环境下反应器升温及进水速率的影响。针对未来的应用需求, 通过优化冷启动流程和提高系统预热效率, 可进一步改善系统的启动性能和整体运行效果。

### 2.3 制氢系统压力稳定性测试

如图所示, 为铝水制氢系统在持续供氢条件下的性能测试结果。在实验过程中, 系统以恒定流量进行氢气供给, 反应器内压力保持稳定, 说明系统运行平稳, 具有良好的压力调控能力。在实验的最后阶段, 压力出现快速下降, 表明反应物消耗殆尽, 制氢反应趋于结束。

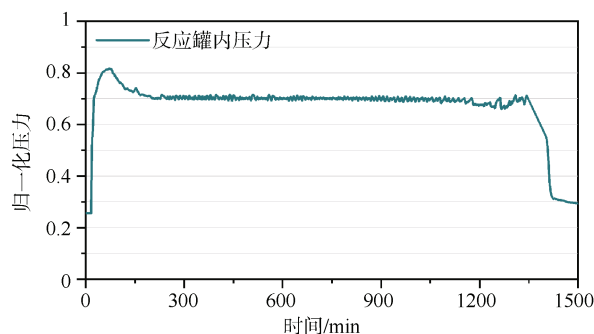


图7 制氢系统压力稳定性测试

Fig. 7 Pressure stability test of hydrogen production system

该实验结果验证了铝水制氢系统在长期运行中的稳定性和可靠性, 为其作为燃料电池供氢装置的应用奠定了实验基础。特别是系统压力的平稳性体现了装置在反应控制和供氢均匀性上的优势, 能够满足燃料电池稳定运行的要求。

### 2.4 反应产物分析

针对铝水制氢系统的反应产物, 进行了进一步分析。随机选取 3 个位置的反应产物进行 XRD 测试, 结果如图 8 所示。分析表明, 反应产物可能包括 3 种主要物质: 未完全反应的铝、铝水反应生成的氢氧化铝 ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) 以及一水合氧化铝 ( $\text{AlOOH}$ )。其中,  $\text{AlOOH}$  的生成有效解释了反应用水量接近理论用水量的现象。根据反应式 (2), 生成  $\text{AlOOH}$  所需的用水量仅为生成  $\text{Al}(\text{OH})_3$  的  $2/3$ , 因此, 综合考虑  $\text{AlOOH}$  和  $\text{Al}(\text{OH})_3$  的生成比例后, 整体用水量趋近于理论值。

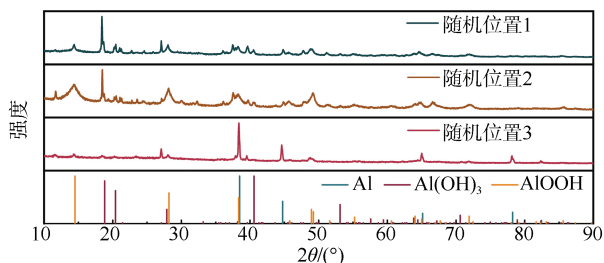


图 8 反应产物 XRD 测试

Fig. 8 XRD analysis of reaction products

### 3 制氢系统-燃料电池系统水下联合测试

#### 3.1 试验方案

为验证铝水制氢系统对燃料电池系统供氢的性能,以及其在水下密闭空间内的适用性,开展了铝水制氢-燃料电池系统水下发 电实验。实验中使用的燃料电池为自主开发的氢氧燃料电池系统,额定功率为 3.2 kW,采用恒电流模式进行输出,氧气来源为高压储氧装置。实验将铝水制氢系统、储氧系统与燃料电池系统集成后置于耐压舱内,并下沉至水下环境中进行测试。系统下水实验过程如图 9。

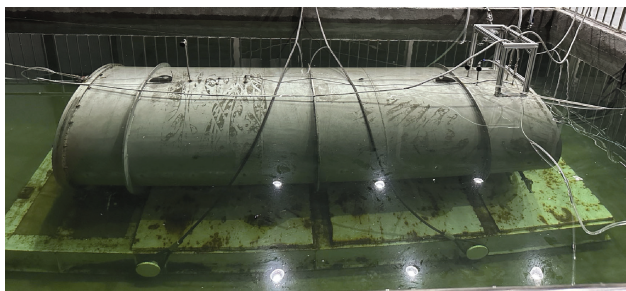


图 9 铝水制氢-燃料电池系统测试:水池环境

Fig. 9 Aluminum-water hydrogen production-fuel cell system test in water pool environment

#### 3.2 性能测试

从图中可以看出,制氢系统的压力始终维持 在目标压力上下,表现出优异的运行稳定性。这种平稳的压力调控能力是燃料电池系统稳定供氢的重要保障。单片电压在运行过程中也保持稳定,未出现显著的波动或衰减,表明燃料电池在联合运行中铝水制氢与燃料电池联合运行在长时间工作条件下的可靠性和适应性,能够满足复杂环境中持续能源供给的需求。

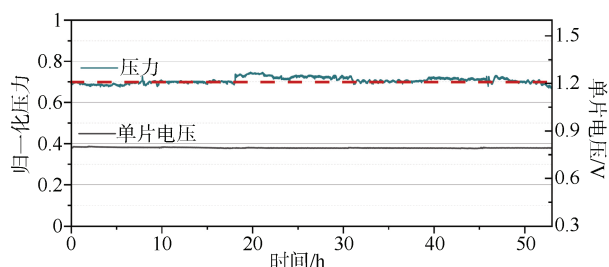


图 10 制氢-燃料电池系统双系统水下运行数据

Fig. 10 Hydrogen production and fuel cell system underwater operation data

燃料电池系统表现出持续稳定的运行状态,几乎无功率衰减现象,表明其在水下密闭环境中具有高度的可靠性和耐久性。

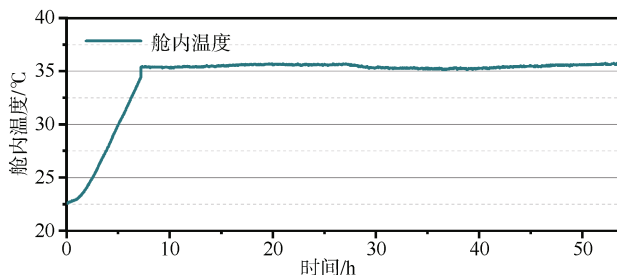


图 11 舱内温度

Fig. 11 Temperature inside cabin

为考察铝水制氢-燃料电池系统在长期运行过程中对密闭环境的影响,在实验平台内设计了温度与湿度检测装置。图 11 展示了铝水制氢-燃料电池系统在水下密闭环境中运行时舱内温度的变化曲线。结果表明,舱内温度在实验初期(0~8 h)经历了明显的上升,由约 22℃快速升高至约 35℃,随后在剩余的测试时间内(8~50 h)维持在稳定状态,波动幅度极小。这一变化趋势表明,在系统运行初期,铝水反应和燃料电池发电过程释放的热量是导致舱内温度迅速升高的主要原因。然而,随着时间的推移,系统的热管理机制逐渐发挥作用,使得舱内热量生成与散失达到动态平衡,成功避免了高温累积的现象。这一结果验证了铝水制氢-燃料电池系统在水下密闭环境中的热稳定性,表明其能够在有限的舱内空间中长期保持温度的稳定,为燃料电池和制氢系统的安全运行提供了保障。此外,舱内温度的平稳性对于设备的耐久性和深远海复杂任务的适应性具有重要意义。未来可通过进一步优

化热管理设计(如提高舱体散热效率或引入主动控温模块),以适应更高功率或更长航时任务的需求。

综上所述,实验结果表明:基于铝水制氢的燃料电池系统在水下密闭环境中表现出优异的适应性和稳定性,成功实现了高效供氢与燃料电池的持续运行,验证了系统设计的工程可行性与实用价值。该系统能够稳定支持燃料电池额定功率输出,并在长时间运行中保持压力波动小、舱内热湿环境平衡等优势,充分满足深远海复杂工况对能源供给系统的高效性、安全性与可靠性的需求。

#### 4 结束语

本研究针对深远海环境对能源系统的高效性和适应性需求,设计了一种基于铝水反应的制氢系统,并进行了相关测试。研究表明,该系统能够稳定供应氢气,压力波动较小,并在不同启动条件下具备良好的运行稳定性和响应能力。通过优化结构设计,如井字形加强骨架与轻量化高强度材料,反应器在保持刚度的同时减轻了质量,并结合复合集成结构,提高了系统的紧凑性和可靠性。在水下密闭环境的联合测试中,该制氢系统与燃料电池的集成运行表现稳定,燃料电池功率输出保持平稳,长时间运行未出现明显衰减,验证了系统在复杂工况下的适应性和持续性能。与设计初期提出的需求相对比,该系统在高效性、稳定性和紧凑性方面均达到了预期目标。在复杂深远海环境中,其设计能够有效满足燃料电池对连续供氢的要求,并通过良好的热平衡设计,保障了系统长期运行的可靠性。此外,实验结果显示,优化后的动态进水控制与散热设计显著提高了系统对多工况的适应能力,表明该工程样机具有较高的实用性和工程价值。未来研究可进一步优化冷启动预热设计和进水控制策略,以缩短响应时间,并提升动态氢气流量调节能力,以满足更复杂任务的需求。综上,该系统可为深远海能源技术提供支持,对深远海探索的应用具有一定参考价值。

#### 参考文献

[1] 汪品先. 发展深海科技的前景与陷阱[J]. 科技导报, 2021, 39(3): 71-79.

- [2] 张景全, 侯闯. 全球深海基础设施治理的现状, 挑战与中国路径[J]. 太平洋学报, 2024, 32(4): 74-88.
- [3] 陈韶阳, 郑清予. 美国海洋思维剖析及对中国海洋强国建设的启示[J]. 太平洋学报, 2021, 29(4): 53-65.
- [4] 吴园涛, 段晓男, 沈刚, 等. 强化我国海洋领域国家战略科技力量的思考与建议[J]. 地球科学进展, 2021, 36(4): 413.
- [5] CHICHE A, LINDBERGH G, STENIUS I, et al. A strategy for sizing and optimizing the energy system on long-range AUVs[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2021, 46(4): 1132-1143.
- [6] WU Y S, ZHAO Y Y, LANG S Y, et al. Development of autonomous underwater vehicles technology[J]. Chinese Journal of Engineering Science, 2020, 22(6): 26.
- [7] MEYER A P. Development of proton exchange membrane fuel cells for underwater applications[C]// Proceedings of OCEANS '93. Victoria: IEEE, 1993.
- [8] BAGHERIAN F H, REZAEI F M, PAHNABI A, et al. Fuel cell power system conceptual design for unmanned underwater vehicle[J]. Iranian Journal of Hydrogen and Fuel Cell, 2023, 10(1): 33-50.
- [9] KWON L, KANG J G, BAIK K D, et al. Advancement and applications of PEMFC energy systems for large-class unmanned underwater vehicles: a review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 79: 277-294.
- [10] HOECKE V L, LAFFINEUR L, CAMPE R, et al. Challenges in the use of hydrogen for maritime applications[J]. Energy & Environmental Science, 2021, 14(2): 815-843.
- [11] USMAN M R. Hydrogen storage methods: Review and current status[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 167: 112743.
- [12] XIU X Y, LIU Y, MA S S, et al. Study on energy storage configurations and energy management strategy of an underwater hydrogen hybrid system[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 104: 114403.
- [13] FAYE O, SZPUNAR J, EDUOK U. A critical review on the current technologies for the generation, storage, and transportation of hydrogen[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(29): 13771-13802.
- [14] LI J C, XU H, ZHOU K, et al. A review on the research progress and application of compressed hydrogen in the marine hydrogen fuel cell power system[J]. Heliyon, 2024, 10(3): e25304.
- [15] GHAFRI S, MUNRO S, CARDELLA U, et al.

- Hydrogen liquefaction: a review of the fundamental physics, engineering practice and future opportunities[J]. Energy & Environmental Science, 2022, 15 ( 7 ): 2690-2731.
- [16] SEZGIN B, DEVRIM Y, OZTURK T, et al. Hydrogen energy systems for underwater applications[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47 ( 45 ): 19780-19796.
- [17] BOLT A, DINCER I, AGELIN-CHAAB M. A review of unique aluminum-water based hydrogen production options[J]. Energy & Fuels, 2021, 35 ( 2 ): 1024-1040.
- [18] ZHUK A Z, SHKOLNIKOV E I, BORODINA T I, et al. Aluminium-water hydrogen generator for domestic and mobile application[J]. Applied Energy, 2023, 334: 120693.
- [19] BOLT A, DINCER I, AGELIN-CHAAB M. A review of unique aluminum-water based hydrogen production options[J]. Energy & Fuels, 2021, 35 ( 2 ): 1024-1040.
- [20] AN Q, HU H Y, LI N, et al. Effects of Bi composition on microstructure and Al-water reactivity of Al-rich alloys with low-In[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43 ( 24 ): 10887-10895.
- [21] CHEN J, XU F, SUN L, et al. Effect of doped Ni-Bi-B alloy on hydrogen generation performance of Al-InCl<sub>3</sub>[J]. Journal of Energy Chemistry, 2019, 39: 268-274.
- [22] ZHAO C, XU F, SUN L X, et al. A novel Al-BiOCl composite for hydrogen generation from water[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44 ( 13 ): 6655-6662.
- [23] CHEN X R, WANG C P, LIU Y H, et al. Popcorn-like aluminum-based powders for instant low-temperature water vapor hydrogen generation[J]. Materials Today Energy, 2021, 19: 100602.
- [24] LIU D, GAO Q, AN Q, et al. Experimental study on Zn-doped Al-rich alloys for fast on-board hydrogen production[J]. Crystals, 2020, 10: 167.
- [25] HURTUBISE D W, KLOSTERMAN D A, MORGAN A B. Development and demonstration of a deployable apparatus for generating hydrogen from the hydrolysis of aluminum via sodium hydroxide[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43( 14 ): 6777-6788.
- [26] WANG H Q, WANG Z, SHI Z H, et al. Facile hydrogen production from Al-water reaction promoted by choline hydroxide[J]. Energy, 2017, 131: 98-105.
- [27] 赵阳, 叶康, 孙汉乔, 等. 铝基复合材料制氢性能与安全性研究[J]. 汽车工程, 2022, 44 ( 5 ): 730-735.
- (责任编辑: 张曼莉)