

## 新型铝水燃烧无人水下航行器混合动力系统优化设计\*

陈显河,夏智勋,黄利亚,那旭东,王德全  
(国防科技大学空天科学学院,湖南长沙 410073)

**摘要:**铝水燃烧无人水下航行器混合动力系统利用铝水燃烧产生的热量来加热水产生高温气流带动涡轮做功从而产生动力,研究表明其具有较高的能量密度。在原混合动力系统基础上,提出三种新的系统方案,分别对其建立数学模型并进行求解,得到并比较各个系统方案净输出功率、能量密度、系统效率等性能参数。计算结果表明:采用直接返回的高温气流与铝进行反应,虽然提高了水蒸气温度,但系统性能有所下降;增加蒸发器和固体换热器系统后充分利用固体氧化剂的热量,使得系统性能提升;采用双燃烧室加壁面冷却换热构型,减少了高温压缩机组件且解决了燃烧室热防护问题,同时系统性能有所提升。研究结果可为今后铝水燃烧无人水下航行器混合动力系统总体设计提供参考。

**关键词:**铝;水;燃烧;能量密度

**中图分类号:**U664.13 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2018)02-007-06

## Optimization design of new unmanned underwater vehicle hybrid propulsion system based on aluminum-water combustion

CHEN Xianhe, XIA Zhixun, HUANG Liya, NA Xudong, WANG Dequan

(College of Aeronautics and Astronautics, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The unmanned underwater vehicle hybrid propulsion system exploits the exothermic reaction between aluminum and water which will produce high temperature, pressure steam and hydrogen mixture that can be used to drive turbine to generate power. The research shows that this system has high energy density. Three new system configurations corresponding to different working cycles were investigated respectively, and their performance parameters in terms of net power, energy density and global efficiency were discussed. The results of the simulation show that the reaction between the direct return of high temperature steam and the aluminum enhances the temperature of steam, and the system's performance is reduced. An evaporator component and a solid heat exchanger are added into system in order to make full use of the solid product heat, and so the system performance is improved. The addition of double combustion chamber and wall cooling structure avoid the design of the high temperature compressor component on one hand, and solve the thermal protection of the combustion chamber on the other hand, which brings the improvement of the system performance. The results can provide useful information for the overall design of the unmanned underwater vehicle hybrid propulsion system.

**Key words:** aluminum; water; combustion; energy density

随着世界各国对于海洋的日益重视,无人水下航行器(Unmanned Underwater Vehicle, UUV)动力技术已经成为科学研究的重要领域<sup>[1-2]</sup>。现有的传统动力电池、锂电池在一定程度上已经难以满足未来对于动力系统的需求,而新兴的燃料电池技术发展不够成熟,尤其是氢气运输和存储是其动力系统的一大难题<sup>[3-6]</sup>,变形壳体可在一定程度上解决这种问题。一直以来,铝作为一种绿色高能金属燃料<sup>[7-9]</sup>成为研究的热点,特别是近几年学者们纷纷提出了基于铝水反应的动力系统方案<sup>[10-13]</sup>如铝水混合动力系统并探讨了铝水在

发电及制氢方面的应用,该类系统主要目的在于采用水作为氧化剂,铝作为燃料,利用反应后产生的热量来加热水产生高温高压水蒸气与氢气推动涡轮做功及收集氢气。根据相关的性能计算结果,认为系统具有高能量密度,可以在一定程度上满足动力系统的需求。由于该类系统由燃料供应组件、燃烧室组件、换热器组件、分离器组件、涡轮、燃料储箱及水泵等组成,因此可以通过增加其他组件或者改变系统组件布局来提高系统的性能。此外,在铝水动力系统构型性能优化以及系统内部燃烧室的热防护方面均没有相关研究

\* 收稿日期:2016-12-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51406231);国防科技创新特区基金资助项目(1716313ZT00802701)

作者简介:陈显河(1986—),男,湖南邵阳人,博士研究生,E-mail:345667610@qq.com;

夏智勋(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:zxixia@nudt.edu.cn

报道。

为了进一步探讨铝水反应动力系统在 UUV 中能达到的系统性能,文中通过采用直接返回高温水蒸气作为一次进水,增加蒸发器和固体换热器系统以及采用双燃烧室加壁面冷却换热等方式,提出了几种新的系统方案,并借鉴文献[10]提出的数学模型及组件质量、体积计算模型,建立各系统数学模型,分别对各系统性能如系统净输出功率、能量密度、系统效率进行了对比分析。

### 1 系统说明

四种方案分别命名为 HAC - 1、HAC - 2、HAC - 3 和 HAC - 4。其中方案 HAC - 1 为文献[10]提出的系统配置,HAC - 2、HAC - 3 和 HAC - 4 为新的系统配置。

方案 HAC - 1 示意图如图 1 所示。由图 1 可知,该类系统主要包括的组件有:燃烧室、燃料供给系统、压缩机、涡轮、换热器、冷凝器等,其中  $\dot{W}$  代表功率。系统工作过程可归纳为:燃料供给系统中,铝颗粒在  $H_2$  作为载气的带动下进入燃烧室,与循环水蒸气按接近化学当量比反应产生氧化铝、氢气及热量,二次冷却水用于降低产物温度,产生大量的水蒸气;高温高压燃烧产物进入分离器,去掉固相氧化铝等。经分离器出来的气流分为两股,小部分气流与冷却水混合后经压缩机进入燃烧室形成循环温水蒸气,用来维持燃烧室持续反应;余下大部分气流用于驱动涡轮做功。气流经过涡轮后进入换热器,用来预热海水。从换热器出来的气流通过冷凝器将水蒸气完全冷却成液态水,经过气液分离器后,液态水反馈回海水进水系统,氢气则经过压缩机进入燃料供给系统,重新用作铝粉的流化气;过量的氢气压缩存储或者排放出去。系统中压缩机能源均由涡轮提供。

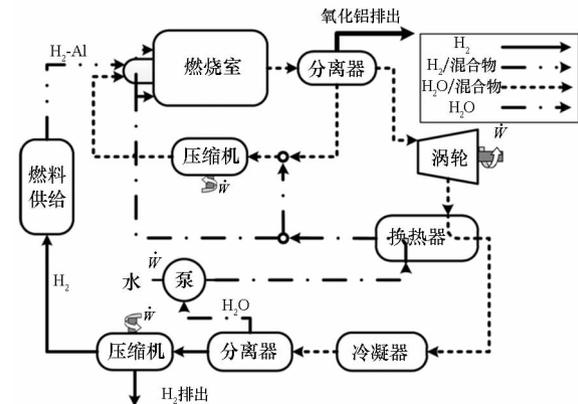


图 1 系统方案 HAC - 1

Fig. 1 Diagram of system HAC - 1

方案 HAC - 2 的示意图如图 2 所示,其是在 HAC - 1 的基础之上进行修改的。考虑铝水燃烧较为困难,特别是铝和液态水燃烧难以实现,因此所有的系统方案采用的均是高温的水蒸气。为了保证铝水高效燃烧,在增加循环水蒸气温度的考虑下,将方案 HAC - 1 进行改进,得到系统方案 HAC - 2。其主要改进之处在于将从分离器内引出的高温气流在压缩机的带动下直接作为一次高温水蒸气进入燃烧室与铝燃料发生反应。

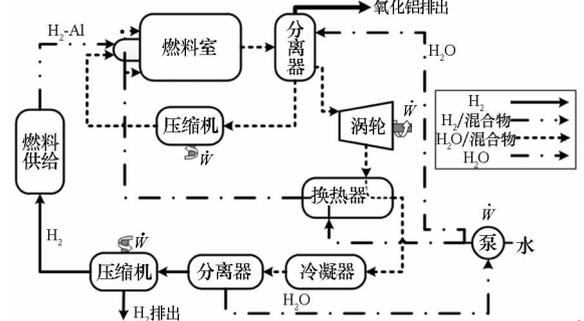


图 2 系统方案 HAC - 2

Fig. 2 Diagram of system HAC - 2

根据文献计算结果,从分离器返回燃烧室的气流约 20%,一方面降低了涡轮的输出功率,另一方面需要消耗大量的能量将其压缩回燃烧室,降低了系统性能,因此提出了改进型系统方案 HAC - 3,如图 3 所示。相比之前的系统方案,此种系统增加了一个蒸发器和一个固体换热器组件,省去了高温水蒸气压缩机组件。蒸发器目的在于将冷却水蒸发为轻微过热水蒸气;固体换热器目的在于利用高温固相产物的热量,将轻微过热水蒸气加热形成循环水蒸气。但此种方案需要提高燃烧温度。

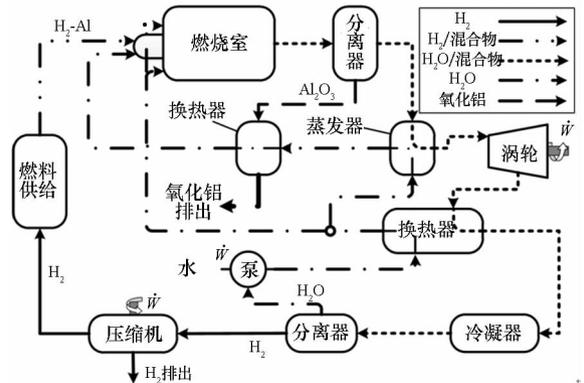


图 3 系统方案 HAC - 3

Fig. 3 Diagram of system HAC - 3

因为铝颗粒可维持点火的温度约 2000 K,且铝颗粒与水完全燃烧的温度为 3000 K 以上,所以,长时间工作条件下,燃烧室的冷却成了必须要解决的问题。为此,提出了双燃烧室构型加壁面冷却换热

热方案 HAC - 4,如图 4 所示。HAC - 4 系统构型采用经过换热器的高温液态水的一部分,通过壁面冷却换热的方式形成高温水蒸气,一方面解决了燃烧室的冷却问题,另一方面充分利用了系统的热量,省去了高温压缩机等部件,提升了系统性能。

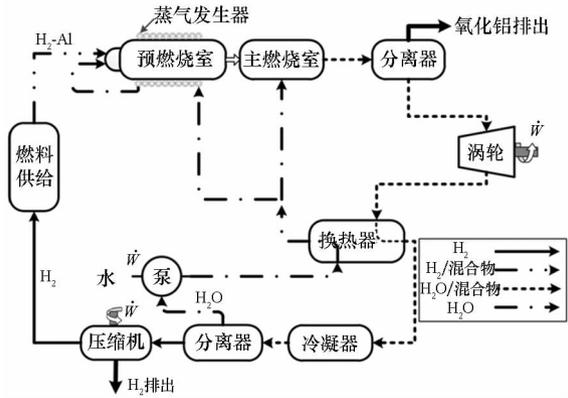
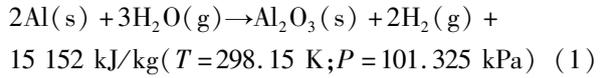


图 4 系统方案 HAC - 4  
Fig. 4 Diagram of system HAC - 4

## 2 数学模型

当前提出的六种系统方案的性能计算模型参见文献[10]。每种系统方案的性能计算数学模型与控制参数如铝粉流量、进水温度、进水流量、燃烧室压力、燃烧室温度、组件效率等相关。模型计算中的氢气及水蒸气等组分的热力学属性来自于 NIST<sup>[14]</sup>,而组分的相变则考虑了热力参数随压力及温度变化的影响。由于燃烧室温度在 1200 K 左右,通过热力计算可知,反应后的产物为氧化铝及氢气,其他组分均为微量,可忽略不计,因此本模型中不考虑化学湍动能及表面反应的影响,热量释放计算仅为单步的铝 - 水反应<sup>[12-13]</sup>。



为了预估几种系统方案的总体性能,输出净功率可表示为:

$$\dot{W}_{sys} = \dot{W}_{turb} - \dot{W}_{comp} - \dot{W}_{pump} \quad (2)$$

式中,  $\dot{W}_{sys}$  表示系统净输出功率,  $\dot{W}_{turb}$  为涡轮输出功率,  $\dot{W}_{comp}$  为压缩机消耗功率,  $\dot{W}_{pump}$  为泵消耗功率,由于氢气排出航行器外,此处不考虑氢气的利用。

为与其他能量系统如锂电池进行对比分析,取能量密度作为系统性能表征。系统能量密度<sup>[10]</sup>  $ED_V$  定义为:

$$ED_V = \dot{W}_{sys} \frac{\rho_{Al}}{m_{Al}} \cdot \frac{V_{Al}}{V_{sys}} \quad (3)$$

式中,  $\rho_{Al}$  为铝粉燃料密度,  $m_{Al}$  为铝粉燃料质量流量,  $V_{Al}$  为铝粉燃料总体积,  $V_{sys}$  为总的系统体积(系统体积取 1000 L<sup>[11]</sup>),  $V_{Al} = V_{sys} - V_C - V_{empty}$ 。  $V_C$  表示系统组件体积,  $V_{empty}$  表示空的体积。

系统总效率<sup>[10]</sup> 为:

$$\eta_{sys} = \frac{\text{净输出功率}}{\text{理论功率}} = \frac{\dot{W}_{sys}}{m_{Al} \Delta H_{reac}} \quad (4)$$

式中,  $\Delta H_{reac}$  为铝与水的反应热。

## 3 结果与讨论

通过对文献[10]中采用绝热压缩条件下的 case1 进行算例验证,结果如图 5 所示。由此可知,涡轮输出功率略大于文献值,而绝热压缩条件下系统净功率略小于文献值,等温压缩条件下则大于文献值;绝热压缩时,效率略低于文献值,而

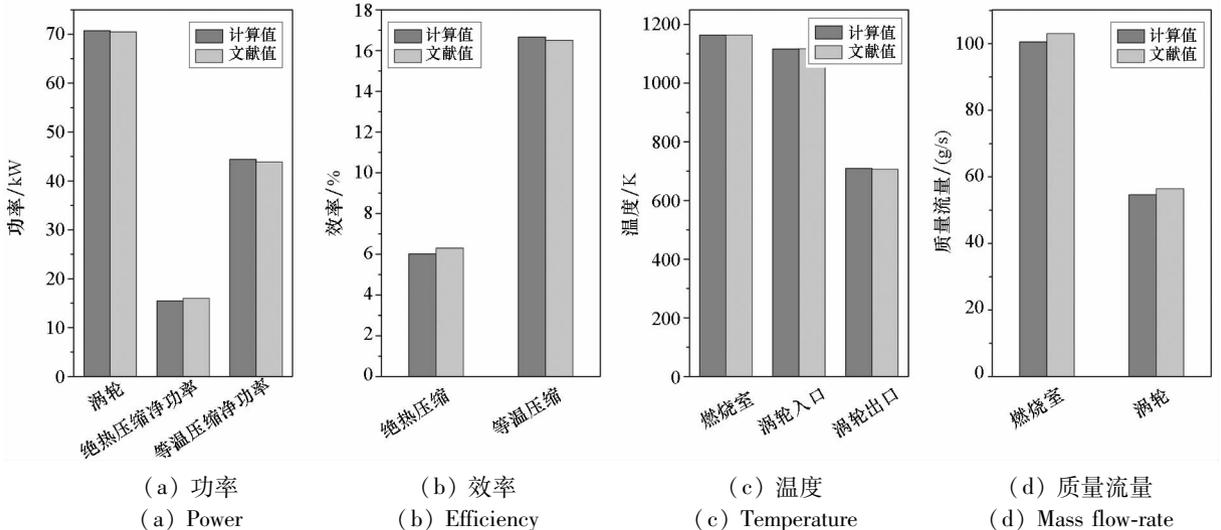


图 5 计算结果验证

Fig. 5 Calculation results verification

等温压缩时,略高于文献值;燃烧室温度取自文献值,因此温度值基本一致;质量流量结果略低于文献值。总体来说,计算结果与文献结果符合较好,证明了本模型计算的准确性。

下面具体就四种不同系统方案进行对比分析。根据文献结果可知,低的涡轮压力比可以提高系统的能量密度,因此取涡轮压力比为 20。铝水的不完全燃烧参照文献中给定的燃烧效率 95% 作为表征<sup>[15-16]</sup>,其他系统参数均与文献基本一致。表 1 为各系统方案的初始计算条件,图 6~11 为四种方案在相同输出功率 15 kW 条件时得到的主要计算结果。

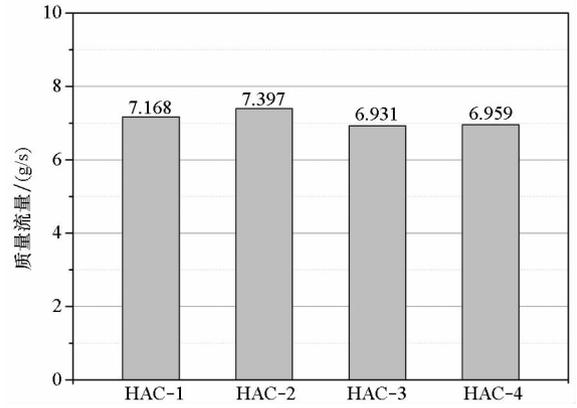
表 1 初始计算条件

Tab. 1 System operating condition

物理量	值
系统净输出功率/kW	15
燃烧室压力/MPa	2.76
水压/MPa	4.0
氢气存储压力/MPa	4.8
一次进水温度/K	755
海水温度/K	298.15
涡轮效率	0.65
绝热压缩效率	0.7
等温压缩效率	0.7
换热效率	0.5
燃烧效率	0.95
涡轮压力比	20
水深/m	3

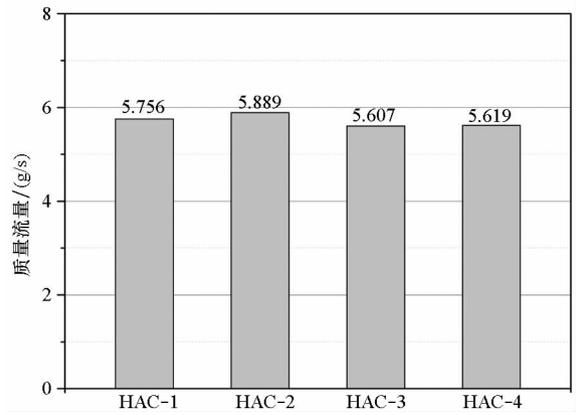
图 6 为相同输出功率 15 kW 条件下需要的铝粉流量对比。首先,绝热压缩条件下需要的铝粉流量大于等温压缩条件下的。这是因为等温压缩消耗的功率较低,使得在相同输出功率下,系统需要的铝粉量降低。其次,各系统铝粉流量分布为 HAC - 2 > HAC - 1 > HAC - 4 > HAC - 3。HAC - 3 系统利用了部分氧化铝产物的热量,因此该系统需要消耗的铝粉最低;而相比 HAC - 1 系统,HAC - 2 直接采用从分离器返回的高温水蒸气作为一次进水,消耗的能量较大,因此铝粉消耗量最大;HAC - 4 省去了气流返回的压缩机部分消耗功率,因此相比 HAC - 1 系统,HAC - 4 系统铝粉流量低于 HAC - 1 系统。

图 7 为绝热压缩条件下涡轮输出功率对比。由于绝热压缩与等温压缩仅影响压缩机而不影响涡轮的输出功率,此处仅给出了绝热压缩条件下的涡轮输出功率变化。由图 7 可知,其分布趋势



(a) 绝热压缩条件

(a) Adiabatic compression condition



(b) 等温压缩条件

(b) Isothermal compression condition

图 6 铝粉质量流量

Fig. 6 Mass flow-rate of aluminum powers

与铝粉流量分布趋势完全一致:HAC - 2 > HAC - 1 > HAC - 4 > HAC - 3。原因在于,当涡轮入口气流温度一致且换热器效率相同时,铝粉流量越大涡轮输出功率越大。

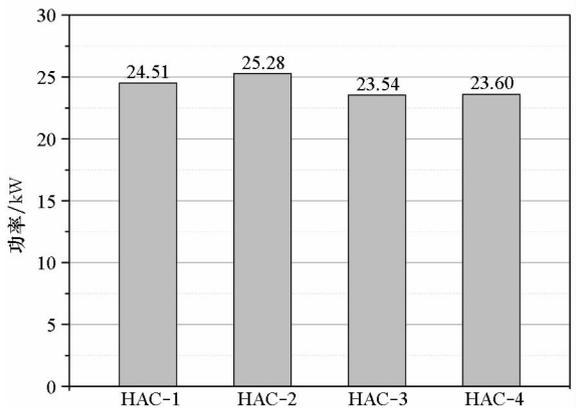


图 7 绝热压缩条件下涡轮输出功率

Fig. 7 Turbine power in adiabatic compression

图 8 为绝热压缩时各系统铝粉燃料体积对比。其分布趋势为:HAC - 4 > HAC - 1 > HAC - 3 > HAC - 2。该分布趋势与铝粉流量及涡轮输出功

率分布趋势不同。一般来说,根据系统组件体积计算方法,系统内部气流流量越大,系统组件体积越大,由于总体积一定,从而得到的铝粉燃料体积越小。但由于 HAC-3 系统增加了固体换热器以及一个高温蒸发器,使得整个系统组件体积增加,从而铝粉燃料体积降低。而 HAC-2 系统由于铝粉流量最大,系统内部气流流量最大,系统组件体积最大,从而该系统铝粉燃料体积最小。

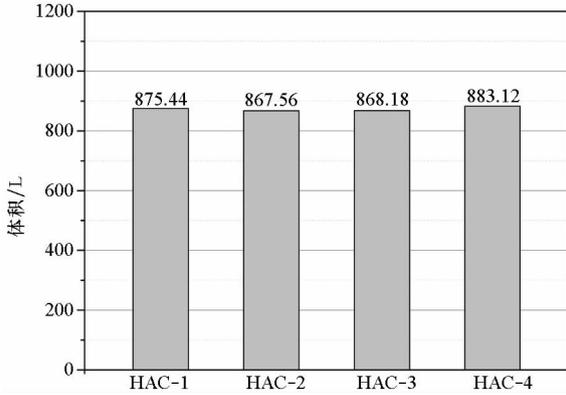
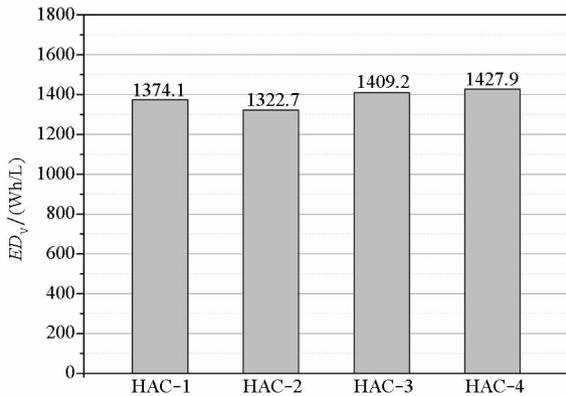


图 8 各系统铝粉体积

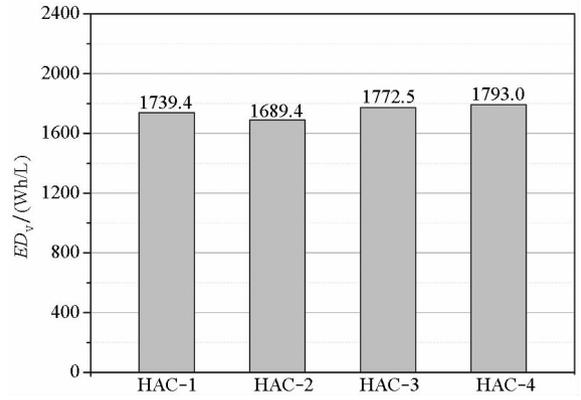
Fig. 8 Aluminum fuel volume for each system

图 9 为各系统的能量密度对比。根据式(3),当系统净输出功率一定时,其值与铝粉燃料体积成正比,与铝粉质量流量成反比。由图 9 可知,两种压缩条件下其分布趋势均为: HAC-4 > HAC-3 > HAC-1 > HAC-2。结合铝粉质量流量(图 6)及铝燃料体积(图 8)。HAC-4 系统铝粉燃料体积最大且铝粉质量流量较小,因此该系统得到的能量密度最大, HAC-4 系统相比原 HAC-1 系统能量密度增加约 53.8 Wh/L。同样, HAC-2 系统铝粉燃料体积最小且铝粉流量最大,因此该系统能量密度最小,但该系统提高了一次进水温度,使其达到 1149 K,可以在一定程度上促进铝水燃烧。



(a) 绝热压缩条件

(a) Adiabatic compression condition



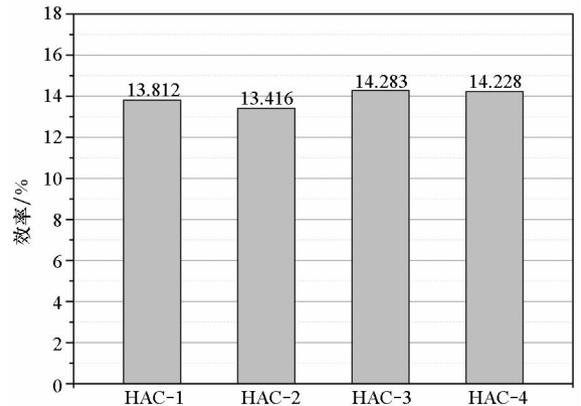
(b) 等温压缩条件

(b) Isothermal compression condition

图 9 各系统能量密度

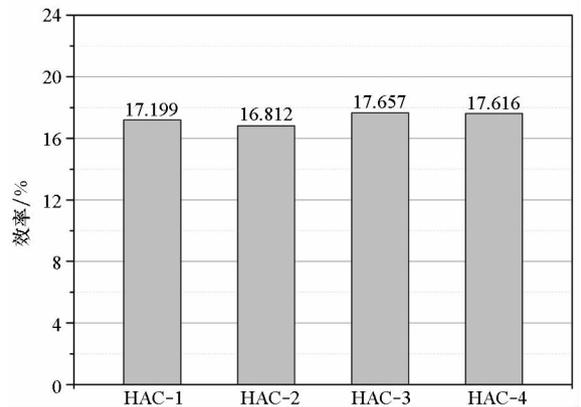
Fig. 9 Energy density for each system

图 10 为系统效率对比。由图 10 可知,在相同输出功率 15 kW 条件下,绝热压缩系统效率在 14% 左右,等温压缩系统效率在 17.5% 左右。各系统总效率中, HAC-3 系统最高, HAC-2 系统效率较低,主要因为 HAC-3 系统充分利用了氧



(a) 绝热压缩条件

(a) Adiabatic compression condition



(b) 等温压缩条件

(b) Isothermal compression condition

图 10 各系统效率对比

Fig. 10 Total efficiency for each system

化铝的热值。HAC-4 相对 HAC-1 也有所提高,主要因为 HAC-4 系统省去了高温压缩部分,使得系统消耗功率降低,总系统效率相对较高。

图 11 为各个 HAC 系统在输出功率为 15 kW 条件下能量密度与目前主流的应用于水下动力系统中的电池(固体燃料电池、锂电池、碱性电池以及铅酸电池)能量密度对比。在 HAC 系统中,深灰色与浅灰色分别代表绝热压缩与等温压缩得到的能量密度。由对比可知,新型系统能量密度值为固体燃料电池的 3.5 倍左右,为传统锂电池的 9 倍左右,由此可知,该类系统具有较高的能量密度特性,使得其在水下动力技术中具有广阔的应用前景。

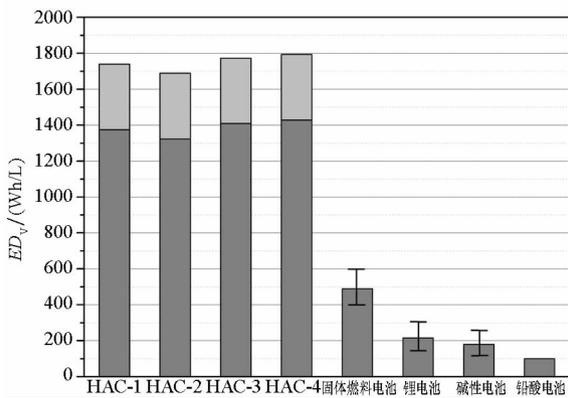


图 11 各系统能量密度对比

Fig. 11 Comparison of energy density for each system

## 4 结论

通过增加系统组件或改变系统组件布局,得到了几种不同的系统方案,结论如下:

1) 从分离器内引出高温气流,在压缩机的带动下直接作为一次高温水蒸气进入燃烧室与铝发生反应,得到的系统能量密度及系统总效率均小幅度下降,但可将一次进水温度提升至 1149 K,有利于铝水燃烧。

2) 增加蒸发器及固体氧化铝换热器组件,同时去除高温蒸汽压缩机组件后,充分利用剩余氧化铝的热量来获得高温水蒸气,可以降低铝粉质量流量,提高铝粉燃料体积以及系统能量密度与系统总效率。

3) 提出双燃烧室构型加壁面再生冷却换热方案,通过壁面冷却换热的方式获得高温水蒸气。一方面解决了燃烧室壁面的冷却问题,另一方面充分利用的系统的热量,省去了高温压缩机等部件。计算结果表明,该系统可以降低铝粉质量流量,提高铝粉燃料体积,提升系统能量密度与系统总效率。

## 参考文献 (References)

- [1] US Naval. The navy unmanned undersea vehicle (UUV) master plan[R]. USA: Department of the Navy, 2004.
- [2] Office of Naval Research. Long endurance undersea vehicle propulsion[R]. Arlington, 2011.
- [3] Chalk S G, Miller J F. Key challenges and recent progress in batteries, fuel cells, and hydrogen storage for clean energy systems[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 159(1): 73-80.
- [4] Vasiliev L L, Kanonchik L E, Kulakov A G, et al. New sorbent materials for the hydrogen storage and transportation [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(18): 5015-5025.
- [5] Kim J, Moon I. Strategic design of hydrogen infrastructure considering cost and safety using multiobjective optimization[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(21): 5887-5896.
- [6] Zheng J Y, Liu X X, Xu P, et al. Development of high pressure gaseous hydrogen storage technologies [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(1): 1048-1057.
- [7] Miller T F, Walter J L, Kiely D H. A next-generation AUV energy system based on aluminum-seawater combustion[C]// *Proceedings of Workshop on Autonomous Underwater Vehicles*, 2002: 111-119.
- [8] 张方方, 张振山, 王晋忠. 水下制氢反应室动态过程数值分析[J]. *国防科技大学学报*, 2015, 37(6): 155-161. ZHANG Fangfang, ZHANG Zhenshan, WANG Jinzhong. Numerical analysis on dynamic process of underwater hydrogen generation reactor [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2015, 37(6): 155-161. (in Chinese)
- [9] 李芳, 张为华, 张炜, 等. 铝基水反应金属燃料性能初步研究[J]. *国防科技大学学报*, 2005, 27(4): 4-7. LI Fang, ZHANG Weihua, ZHANG Wei, et al. A preliminary research on the performance of hydroreactive aluminum metal fuel [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2005, 27(4): 4-7. (in Chinese)
- [10] Waters D F, Cadou C P. Modeling a hybrid Rankine-cycle/fuel-cell underwater propulsion system based on aluminum water combustion [J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 221(1): 272-283.
- [11] Waters D F, Cadou C P. Estimating the neutrally buoyant energy density of a Rankine-cycle/fuel-cell underwater propulsion system [J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 248(1): 714-720.
- [12] Franzoni F, Mercati S, Milani M, et al. Operating maps of a combined hydrogen production and power generation system based on aluminum combustion with water[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(4): 2803-2816.
- [13] Mercati S, Milani M, Montorsi L, et al. Design of the steam generator in an energy conversion system based on the aluminum combustion with water[J]. *Applied Energy*, 2012, 97(9): 686-694.
- [14] NIST Chemistry WebBook. Standard reference database the number 69[DB]. The U. S. Secretary of Commerce on Behalf of the United States of America, 2017.
- [15] Mercati S, Milani M, Montorsi L, et al. Optimization of the working cycle for a hydrogen production and power generation plant based on aluminum combustion with water [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(18): 7209-7217.
- [16] Gabriel D. Advances in chemical propulsion: science to technology[M]. USA: Office of Naval Research, 2002.