

金属/水反应水冲压发动机系统性能估算^{*}

罗 凯, 党建军, 王育才, 张宇文

(西北工业大学 航海工程学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 使用金属/水反应燃料是推进水下超高速航行器的最佳途径, 分析了单次注水和二次注水的铝/水反应燃料水冲压发动机系统, 得出了燃料质量配比、燃烧室温度、燃烧室压强、系统有效推力、效率等关键技术性能指标。指出了二次注水系统的优越性并提出了一种二次注水系统的实施方案。分析结论与实际系统性能指标相吻合, 证明了分析的正确性, 可以为系统研究提供参考。

关键词: 金属/水反应燃料^{*}; 水冲压发动机^{*}; 性能

中图分类号: TJ630.32 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2004) 06-0495-04

System capability estimating for a metal/water reaction fuel ramjet system

LUO Kai, DANG Jian-jun, WANG Yu-cai, ZHANG Yu-wen

(Coll. of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical Univ. Xi'an 710072, China)

Abstract: Using metal/water reaction fuel is the best choice for boosting an underwater high speed vehicle. A single water injection and a dual water injection aluminum/water reaction fuel ramjet system were analyzed. The key technical capability parameters, such as mass proportion of propellant, temperature of combustion chamber, pressure of combustion chamber, effective propulsion force of system and system efficiency were obtained. The advantage of the dual water injection system was proved. An actualization scheme was put forward.

Key words: Metal/water reaction fuel; Water ramjet system^{*}; Performance

1 引 言

水下超高速航行器能以极快的速度(如)发动攻击,任何防御手段对它都无可奈何,该武器将会大大改变海上的作战模式。实现水下超高速运动的两个基本前提是维持稳定的超空泡以及强大的推进系统。金属/水反应燃料是目前能量密度最高的,使用该燃料是推进超高速航行器的最佳途径。基于此,该技术在国际上得到了普遍重视。

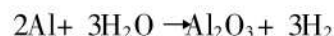
由于采用金属/水反应燃料,航行器可以仅携带金属燃烧剂,而作为氧化剂和冷却剂的海水可以自航行器外部的海洋环境中获取,这样就极大地提高了能源储备量,为大功率、远航程提供了物质基础。

由于航行器的速度很高、前方海水来流速度很高,可以将该高速海水具备的动压通过减速扩压转换为高静压,直接注入燃烧室进行工作,类似于航空上的冲压发动机,这是水冲压发动机的命名来源。

本文针对使用铝/水反应燃料的发动机,分析该系统的基本性能,对于二次喷水的方案也进行了分析。

2 铝/水反应燃料的质量配比

铝/水反应的化学反应方程式为



产物 Al_2O_3 的熔点是 2318K,若燃烧温度低于该熔点,则它将形成固体壳层包覆在液态铝的表面抑制反应进一步进行,尽管液态铝的热膨胀系数更大从而可以

^{*} 收稿日期: 2004-06-22; 修订日期: 2004-09-08。

基金项目: 国防基础科研项目 (K1800060604)。

作者简介: 罗 凯 (1972—), 男, 博士, 副教授, 研究领域为水下动力推进系统。E-mail: lk lucky@163.net

使得 Al_2O_3 固体壳层迸裂, 但是反应面积依旧很小, 反应不能顺畅进行。尽管采用旋流技术可以实现 Al_2O_3 的低温破壁^[1], 但该技术距离产品阶段还很远。在不采取其它措施的情况下, 应使得燃烧室温度高于此熔点。考虑发动机的材料及受力情况, 设定燃烧温度为 2400K, 压强 2.5MPa, 该压强的设定应满足两个条件: 首先该压强应适当低于来流海水所能提供的最大静压, 以保证海水能够顺利通过管道、控制阀、雾化喷嘴等节流环节而进入燃烧室; 其次该压强应尽量高以获得更高的效率, 同时还应使得水蒸气在喷管出口处依旧维持气相以获得更高的喷出速度。

Al_2O_3 的生成热为 167.4 kJ/mol, 水的生成热为 28.55kJ/mol, 所以 2mol 铝与 3mol 水的反应热为:

$$167.4 - 3 \times 28.55 = 81.75 \text{ kJ}$$

温度自 2400K 降至 298K, 1 mol Al_2O_3 放热量为:

$$(92.28 - 2.39) \times 4.18 = 4.13 \text{ kJ}$$

3mol 氢气放热量为:

$$3 \times (18.02 - 2.02) \times 4.18 = 20.06 \text{ kJ}$$

所以 2mol 铝与 3mol 水自 298K 反应至 2400K, 其放热量为

$$(195.5 - 89.89 - 48) \times 4.18 = 241.4 \text{ kJ}$$

在 2.5MPa 压强下, 每 kg 冷却海水从 283K 的液态变至 2400K 的过热蒸汽, 吸热量为 7647kJ。所以 2mol 铝与 3mol 水反应的放热量可使得

$$241.4/7647 = 31.6\text{g}$$

的冷却海水温度上升至 2400K。

所以铝水反应燃料质量配比为

$$\text{Al}/\text{H}_2\text{O} = 54/(54 + 31.6) = 1/1.59$$

其中对应 54g 的铝, 应有 54g 的反应水和 31.6g 的冷却水。

而混合燃烧产物的质量比为:

$$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{H}_2/\text{H}_2\text{O} = 102/6/31.6$$

即 2mol 铝与 3mol 水反应生成 1mol Al_2O_3 和 3mol 氢气, 同时另外含有 1.76 mol 冷却水蒸汽, 产物中气体的质量比为:

$$\text{H}_2/\text{H}_2\text{O} = 16.0\%/84.0\%$$

3 单次注水系统的基本性能指标

混合气体的气体常数 R 为

$$8314 \cdot (0.16/2 + 0.84/18) = 1053 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

氢气和水蒸汽的定压比热分别为 3.55kJ/(mol·K) 和 5.36 kJ/(mol·K), 故混合气体的定压比热 C_p 为

$$0.16 \times 8.50/2 + 0.84 \times 12.83/18 = 5.36 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

混合气体定容比热 C_v 为

$$C_p - R = 4.3 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

比热比 k 为

$$C_p/C_v = 1.25$$

考虑气固两相状态, 设 Al_2O_3 颗粒足够小, 其向气体的传热速度足够快, 二者温度足够趋近, 可令 $T_s = T_g = T$, 下标 s, g 分别表示固体和气体, 于是固体向气体的传热量为

$$dQ = -m_s C_s dT \quad (1)$$

式中 dQ 为对应温差 dT 的固相向气相的换热量, C_s , m_s 为固体的质量, 对于气体则有

$$dU + p dV = m_g (du + p dv) \quad (2)$$

式中 U 为内能, p 为压力, V 为容积, v 为比容, m_g 为气体的质量。忽略气体与发动机固壁之间的换热, 则式(1)与(2)相等

$$dQ = dU + p dV \quad (3)$$

考虑到下式

$$C_v = du/dT \quad (4)$$

以及完全气体方程

$$dp/p + dv/v = dT/T \quad (5)$$

$$pv = RT \quad (6)$$

可以得到

$$dp/p = A dT/T \quad (7)$$

式中

$$A = (C_p + C_s m_s/m_g)/R \quad (8)$$

对式(7)积分得

$$T_1 = T_0 (p_1/p_0)^{1/A} \quad (9)$$

式中下标 0 表示燃烧室内的状态, 1 表示流动状态。设定燃气出口压力 0.2MPa, 得出口温度为 1859K, 压力 0.2MPa 时水的饱和温度约为 393K, 所以水蒸气仍然维持气相。不难求出燃烧室至喷管出口的混合燃烧产物的焓降, 进而得到推力。设定航行器航速, 可得进口海水的冲量, 除过该冲量, 则可得对应铝每 kg/s 消耗量的系统总有效推力为 4.49kN, 总的推进功率为 449kW, 对应铝每 kg/s 的反应热为

$$195.5 \times 4.19 \times 1000/54 = 15169 \text{ kW}$$

得到系统理论效率为

$$449/15169 = 2.96\%$$

考虑燃烧室的热损失、喷管效率等, 系统总效率约为 3%。

4 二次注水系统的基本性能指标

与飞行于空气中的火箭不同,航行器在水中航行的阻力大得多,速度低得多,使得常规火箭发动机的效率很低。如果引入二次冲压海水,则可以降低喷口速度、提高喷口流量,从而可能加大推力和效率;另外航行器在水中航行时需要多次使用,其工作时间很长,如果引入二次冲压海水,则可以降低燃烧室温度、提高发动机寿命。

航行器速度为 100 m/s,航深 10m,海水密度为 $\rho_{sw} = 1025 \text{ kg/m}^3$,则海水来流总压为

$$0.2 \text{ MPa} + 0.5 \times 1025 \times 100^2 = 5.3 \text{ MPa} \quad (10)$$

所以海水经减速扩压后可以自动进入气体流道的任意截面处。

当燃烧产物与二次喷注海水混合后,可以分为两种情况来分别考虑:(1)二次海水被混合燃烧产物完全汽化,而且在喷管出口处依然维持过热状态,此时喷出物主要是气相(包含固相的 Al_2O_3);(2)喷入过量的二次海水,混合燃烧产物中的蒸汽被液化,出口处喷出物主要为液相(包含固相的 Al_2O_3 和不溶解于水的氢气)。

4.1 喷出物主要为气相的情况

其系统可如图 1 所示进行构建。燃烧产物与二次喷注海水混合后,燃烧产物放热降温、二次喷注海水吸热升温并变为过热蒸汽。

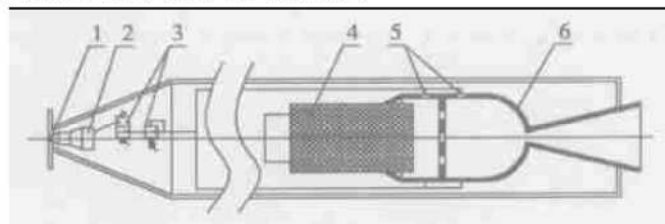


Fig. 1 Schematic representation of a dual water injection system

1-Inlet; 2-Expanding pressure chamber; 3-Control valves;
4-Al Powder pole; 5-Atomizer; 6-Engine

类似于前述的分析方法,重新进行计算,考虑冲压海水进口处的冲量,进而得到系统的有效推力。不同混合温度下的计算结果见表 1 所示。由表 1 看出,随着二次注水量的逐步加大,系统推力逐步加大,同时燃烧室温度下降非常显著,有利于发动机寿命的提高。

以上估算符合某型航行器产品的性能参数指标,分析是合理的。

Table 1 Capability parameters

Temperature of combustion chamber/ K	2400	2000	1600	1200	700
Mass proportion ($\text{H}_2\text{O}:\text{Al}$)	1.59	2.29	2.88	3.71	5.27
Gas temperature in export/ K	1859	1424	1102	785	426
Effective thrust/ (kN/kg Al)	4.49	5.22	5.61	5.94	5.99

4.2 喷出物主要为液相的情况

如果喷入过量的二次海水,冷却水蒸汽将成为液相,而氢气由于不溶解于水而依然维持气相且与液相水同温度,可以假设氢气以微小气泡的形式分布于海水中。由于水的热膨胀性很小,所以水依然可以按照不可压缩性流体来处理,同时可以将固体 Al_2O_3 微粒与海水综合考虑。

燃烧产物与海水混合后,气相与液固混合相的质量比为

$$m_H / (m_{sw} + m_w + m_s)$$

式中 m_H , m_{sw} , m_w , m_s 分别为氢气、海水、蒸馏水以及固体 Al_2O_3 的质量,液固混合相中还应包含反应与冷却海水中的盐分等其它溶解物。

混合燃烧产物与海水混合后,决定气水混合物密度的主要因素是压强,该压强通过改变不溶解于水的氢气微气泡的体积来影响混合物的密度,该密度可以表述为

$$\begin{aligned} \rho_{GSL} &= (m_G + m_{SL}) / (V_G + V_{SL}) \\ &= (m_G + m_{SL}) / (m_G RT / p + m_{SL} / \rho_{SL}) \\ &= (1 + k_{GSL}) / (RT / p + k_{GSL} / \rho_{SL}) \quad (11) \end{aligned}$$

式中

$$K_{GSL} = m_{SL} / m_G$$

m_G , m_{SL} 分别为气相(氢气)和液固相(海水加 Al_2O_3)的质量, V_G , V_{SL} 分别为气相和液固相的体积, ρ_{SL} 为液固相的密度, ρ_{GSL} 为混合物的密度。

对于该混合物,考虑式(11),可得如下不定积分关系

$$\int \frac{dp}{\rho_{GSL}} = \frac{1}{1 + k_{GSL}} \left| \frac{k_{GSL}}{\rho_{SL}} + RT \ln p \right| \quad (12)$$

令下标 1 表示二次注水的进入截面,此处压强为 p_1 ,根据式(9)可得此时混合燃烧产物的温度 T_1 ,根据它们各自的定压比热可得燃烧产物的焓降为

$$\Delta h = (T_0 - T_1) (C_s m_s + C_p m_g) \quad (13)$$

此处混合燃烧产物的速度为

$$\sqrt{2 \Delta h / (m_s + m_H + m_w)}$$

冲量为

$$\sqrt{2 \Delta h / (m_s + m_H + m_w)}$$

如果二次注水沿轴向喷入,忽略沿程损失,则其具备的最大轴向速度为:

$$\sqrt{2 \times (5.3 \text{ MPa} - p_1) / \rho_{\text{SW}}}$$

其冲量为

$$m_{\text{SW}} \sqrt{2 \times (5.3 \text{ MPa} - p_1) / \rho_{\text{SW}}}$$

显然该冲量与燃烧产物的冲量和即为此处燃烧产物与注入海水的混合物的冲量,此处混合物的速度为

$$u_1 = \frac{\sqrt{2 \Delta h / (m_s + m_H + m_W)}}{m_H + m_W + m_s + m_{\text{SW}}} + \frac{m_{\text{SW}} \sqrt{2 \times (5.3 \text{ MPa} - p_1) / \rho_{\text{SW}}}}{m_H + m_W + m_s + m_{\text{SW}}} \quad (14)$$

设冲压海水温度为 T_{SW} , 与燃烧产物混合后的混合物温度为 T , 则冲压海水的吸热量等于燃烧产物的放热量, 即

$$C_{\text{SW}} m_{\text{SW}} (T - T_{\text{SW}}) = (T_1 - T) (C_s m_s + C_p m_g) + m_w L \quad (15)$$

式中 L 为水的汽化潜热, 不难导出混合物温度:

$$T = \frac{T_1 (C_s m_s + C_p m_g) + C_{\text{SW}} m_{\text{SW}} T_{\text{SW}} + m_w L}{C_{\text{SW}} m_{\text{SW}} + C_s m_s + C_p m_g} \quad (16)$$

考虑式(12), 根据伯努力方程可得

$$\frac{1}{1 + k_{\text{GSL}}} \left| \frac{k_{\text{GSL}}}{\rho_{\text{SL}}} p_1 + RT \ln p_1 \right| + \frac{1}{2} u_1^2 = \frac{1}{1 + k_{\text{GSL}}} \left| \frac{k_{\text{GSL}}}{\rho_{\text{SL}}} p_2 + RT \ln p_2 \right| + \frac{1}{2} u_2^2 \quad (17)$$

式中下标 2 表示出口截面, 根据上式可得到混合物的出口速度

$$u_2^2 = \frac{2}{1 + k_{\text{GSL}}} \left| \frac{k_{\text{GSL}}}{\rho_{\text{SL}}} (p_1 - p_2) + RT \ln \frac{p_1}{p_2} \right| + u_1^2 \quad (18)$$

进而取得出口冲量

$$(m_H + m_W + m_s + m_{\text{SW}}) u_2$$

减去冲压海水的进口冲量即得动力系统的有效推力。

计算可知, 喷注过量的二次海水并不能有效提高系统效率, 这种方案不可取。

5 结 论

文中的分析与某产品的性能指标吻合, 证明了分析的正确性。采用金属/水反应燃料的水冲压动力系统可以提供较常规液体推进剂大得多的推力, 可以满足水下超高速航行体对于动力系统的要求。采用二次注水的方案可以显著提高系统效率、降低燃烧室温度、提高发动机寿命, 是较好的方案。

参考文献:

- [1] 郑邯勇. 铝水推进系统的现状与发展前景[J]. 水中兵器, 2002: 175~178.

(编辑: 梅 瑛)

简 讯

中国航天第三专业信息网第 25 届年会会议召开

主题为“安全与贮存技术新进展”的中国航天第三专业信息网第 25 届年会于 2004 年 8 月在湖北省宜昌市举行。主办单位航天科技集团公司 42 所在 37 篇会议投稿中评审录用了 32 篇论文编印成会议文集。会议就固体推进剂及含能材料的安全与贮存性能进行了充分的讨论和交流, 评选出了 6 篇优秀论文, 分别为: 蒲远远、赵孝彬、陈教国、陈华庭的“固体推进剂安全性能学科建设设想”; 骆广梁、李国霞、郭海滨的“关于复合推进剂生产中固体粉料的安全问题”; 彭松、吴丰军、池旭辉的“高能固体推进剂加速寿命预估与可靠性表征”; 唐亚军的“电爆管启动的安全点火机构研究”; 张昊、庞爱民、彭松的“方坯药预测寿命与发动机药柱实际寿命差异的原因分析”; 黄洪勇、卢国强、黄卫华的“二硝酰胺铵的热分解及稳定剂选择”。此次会议还决定第 26 届年会将由航天科技集团公司 41 所承办, 围绕“多样化航天动力技术进展”进行研讨。

(本刊通讯员)