

金属/水反应冲压发动机理论性能计算与分析^{*}

缪万波, 夏智勋, 郭 健, 胡建新, 赵建民, 罗振兵, 焦绍球

(国防科学技术大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 基于水与金属燃料反应的水冲压发动机是一种新型的水下动力装置。为了研究水下冲压发动机的基本性能, 在简述热力计算原理的基础上, 以含铝贫氧推进剂为例对燃气发生器式水冲压发动机、以铝金属燃料为例对湍流式水冲压发动机进行了不同工作状态下的热力计算, 得出了发动机比冲与水燃比、工作压强等之间的定性关系。

关键词: 水冲压发动机⁺; 金属/水反应燃料⁺; 热力计算; 性能

中图分类号: V 231. 12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055(2005) 06-0563-04

Thermodynamic calculation for the water ram jet

MIAO Wan-bo, XIA Zhixun, GUO Jian, HU Jian-xin, ZHAO Jian-min, LUO Zhen-bing, JIAO Shao-qiu

(Inst. of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract The water ram jet based on the reaction of water and fuel is a new kind of underwater engine. To investigate the performance of the engine based on thermodynamic calculation. Furthermore, thermodynamic calculation for the water ram jet which uses fuel-rich propellant containing aluminum or uses aluminum powder under different conditions is carried out as an example. The qualitative relationship of specific impulse versus water/fuel pressure of combustion chamber is obtained.

Key words Water ram jet⁺; Metal/water reaction fuel⁺; Thermodynamic calculation; Performance

1 引 言

水下冲压发动机利用水下推进器外部的水作氧化剂和工质, 与发动机自身携带的金属燃料发生反应, 可以显著提高水下发动机的性能。水下冲压发动机技术与超空泡技术的结合, 使研制高速的水下航行体成为可能。国外从 40 年代开始了相关研究^[1]; 国内这方面的研究刚起步^[2]。

在水下冲压发动机研制过程中, 理论性能计算是很重要的一环、是发动机设计工作中的基本计算之一, 可以为发动机工作过程计算、结构设计等提供依据, 也可以作为推进剂配方和性能评价时的重要参考。

由于水下冲压发动机工作环境的特殊性。水作

为不可压物质, 与大气环境有较大的区别, 如何正确计算水下冲压发动机的理论性能对于相关研究起着关键的作用。

本文采用最小自由能法, 对两种可能的水下冲压发动机的实现形式进行了不同工作条件下的理论计算, 分析了不同参数对水冲压发动机理论性能的影响, 为进一步研究奠定基础。

2 热力计算原理

发动机热力计算的关键是确定燃烧产物的平衡组分。当推进剂 (冲压发动机含冲压组分) 给定后, 在给定的压强和温度条件下计算燃烧产物组分的控制方程为质量守恒方程和化学平衡方程, 计算燃烧产物温度的控制方程为能量守恒方程。文献 [3~6] 给

* 收稿日期: 2005-01-28 修订日期: 2005-07-03

基金项目: 国家自然科学基金 (50376071)。

作者简介: 缪万波 (1978—), 男, 博士生, 研究领域为水冲压发动机。Email: wanban@163.com

出了热力计算相应的简化假设条件。下文的计算基于假设在反应发生器中反应可以正常持续进行的前提下。

2.1 控制方程组

文献[3]给出了基于最小自由能法的计算平衡组分相关的控制方程组:

设产物的排列顺序为: $i = 1, \dots, M$ 为气相; $i = M + 1, \dots, N$ 为凝相。

$$\sum_{j=1}^L \left| \sum_{i=1}^M \alpha_{ki} \alpha_{ji} n_i \right| \pi_j + \left| \sum_{i=1}^M \alpha_{ki} n_i \right| \Delta \ln n_g + \left| \frac{1}{R_0 T} \sum_{i=1}^M \alpha_{ki} n_i H_i \right| \Delta \ln T + \sum_{i=M+1}^N \alpha_{ki} \Delta n_i =$$

$$N_k - \sum_{i=1}^N \alpha_{ki} n_i + \frac{1}{R_0 T} \sum_{i=1}^M \alpha_{ki} n_i \mu_i$$

$$k = 1, \dots, L$$

$$\sum_{j=1}^L \left| \sum_{i=1}^M \alpha_{ji} n_i \right| \pi_j + \left| \sum_{i=1}^M n_i n_g \right| \Delta \ln n_g + \frac{1}{R_0 T} \left| \sum_{i=1}^M n_i H_i \right| \Delta \ln T =$$

$$n_g - \sum_{i=1}^M n_i + \frac{1}{R_0 T} \sum_{i=1}^M n_i \mu_i$$

$$\sum_{j=1}^L \left| \sum_{i=1}^M \alpha_{ji} H_i n_i \right| \pi_j + \left| \sum_{i=1}^M H_i n_i \right| \Delta \ln n_g + \left| \sum_{i=1}^N C_{pi} n_i T + \sum_{i=1}^M \frac{n_i H_i^2}{R_0 T} \right| \Delta \ln T +$$

$$\sum_{i=M+1}^N H_i^e \Delta n_i = h_p - \sum_{i=1}^N H_i n_i + \sum_{i=1}^M \frac{H_i n_i \mu_i}{R_0 T} -$$

$$\sum_{j=1}^L \alpha_{ji} \pi_j - (H_i) R_0 T \Delta \ln T = - \frac{\mu_i}{R_0 T}$$

$$\sum_{j=1}^L \left| \sum_{i=1}^M \frac{S_i n_i}{R_0 \alpha_{ji}} \right| \pi_j + \left| \sum_{i=1}^M \frac{S_i n_i}{R_0} \right| \Delta \ln n_g +$$

$$\left| \sum_{i=1}^N \frac{C_{pi} n_i}{R_0} + \sum_{i=1}^M \frac{S_i n_i H_i}{R_0^2 T} \right| \Delta \ln T + \sum_{i=1}^N \frac{S_i}{R_0} \Delta n_i =$$

$$\frac{s_c - s}{R_0} + n_g - \sum_{i=1}^M n_i + \sum_{i=1}^M \frac{S_i n_i \mu_i}{R_0^2 T}$$

式中 L 为组成推进剂的元素数;

M 为燃烧产物中气相成分数;

μ_i 为产物 i 的化学势;

n_i 为产物 i 的物质的量;

n_g 为气相产物的总物质的量;

π_j 为第 j 个无因次拉格朗日乘子;

T 为产物温度;

S_i^0 为产物 i 的摩尔熵;

s 为产物的比熵;

s_c 为燃烧室产物的比熵;

R_0 为通用气体常数;

S_i 为凝相产物的标准摩尔熵;

H_i 为产物 i 的摩尔焓;

h_p 为推进剂比焓。

计算燃烧室燃烧产物平衡成分和温度用式(1)~(4), 计算喷管中燃烧产物平衡成分和温度用式(1)~(4)。

2.2 边界条件讨论

对于固体火箭发动机, 文献[4]采用总焓表示物质所具有的总能量。总焓为化学能和物理焓的和。

$$I = E_{ch} + H \quad (6)$$

固体火箭发动机的比冲定义为

$$I_{sp} = V_e + \frac{R_e T_e}{V_e} \left| 1 - \frac{P_a}{P_e} \right| \quad (7)$$

对于空气冲压发动机文献[5]通过总温的概念把冲压空气的影响引入推进剂初始总焓中进行了计算。文献[6]在假设进气道的总压恢复系数为1, 且进气道出口气流速度为零的情况下, 以推进剂中增加的氮和氧元素的摩尔质量及增加推进剂焓来等效冲压空气的影响。两者可以用量热完全气体驻点参数下的能量方程来等效。

文献[5, 6]给出了不同空气冲压发动机的比冲公式。两者比冲不同是因为推力的定义不同, 并不影响实际的性能计算, 水冲压发动机取文献[5]的定义计算。

$$I_{sp} = (1 + \Phi) V_e + \frac{R_e T_e}{V_e} \left| 1 - \frac{P_a}{P_e} \right| - \Phi V_0 \quad (8)$$

式中 Φ 为水燃比; V_0 为航行速度。

水下冲压发动机工作环境为不可压的水, 不能使用文献[5, 6]所使用的完全气体的能量方程, 而只能取不可压的 Bernoulli 方程

$$z + \frac{p}{\rho_g} + \frac{V^2}{2g} = C \quad (9)$$

利用式(9), 把水冲压进入发动机的能量影响记入初始总焓中进行计算。

对通过喷注器进入反应器的水流速度对理论性能计算的影响进行了忽略, 主要因为: 水流速度的影响主要体现在水流具有能量、水流可以增强掺混效果

进而提高燃烧效率、非轴向速度分量的影响等方面。

由于水流具有的能量已经通过 Bernoulli 方程进行了考虑, 理论计算假设水铝完全反应而没有考虑燃烧效率的影响, 理论计算假设在反应器中轴向速度为零, 即包括假设非轴向速度所具有的机械能完全损失为其它形式的能 (主要为热能), 所以在计算假设的前提下忽略通过喷注器进入反应器的水流速度的影响是合理的。

3 计算结果及分析

利用上述的原理, 分别对两种形式的水下冲压发动机的理论性能进行了定性计算。若无特殊说明, 则来流速度为 100 m/s , 航行深度为 10 m 。

图 1 所示为类似于空气冲压发动机的一种水下冲压发动机的工作形式。所用的推进剂为含铝贫氧推进剂, 主要成分为 Al/AP, HTPB。

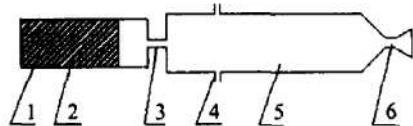


Fig 1 Sketch map of the ducked water ram jet

- 1) G generator; 2) Oxygen-poor propellant
- 3) Nozzle of generator; 4) Water nozzle;
- 5) Second burner; 6) Nozzle of the second burner

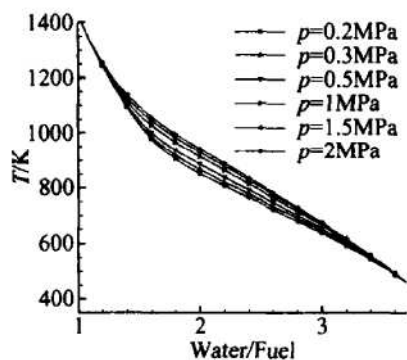


Fig 2 Variation of temperature of the afterburner with water/fuel

由图 2~ 5 的计算结果可以得出, 对燃气发生器式水下冲压发动机, 发动机比冲开始随水燃比增加而增大, 到达某一水燃比后, 发动机比冲达到局部最优, 然后随水燃比的增加而减小。同时反应发生器的温度随水燃比的增加一直降低。当温度低于特定值时不能保证金属燃料与水的持续反应^[27], 为保证反应的持续进行和提高发动机的性能, 可采用二次进水的方式, 第一次进水主要作氧化剂, 第二次进水作工质,

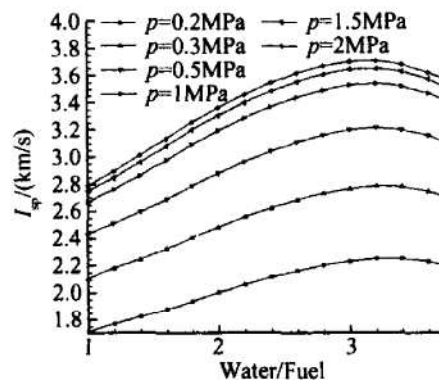


Fig 3 Variation of specific impulse with water/fuel

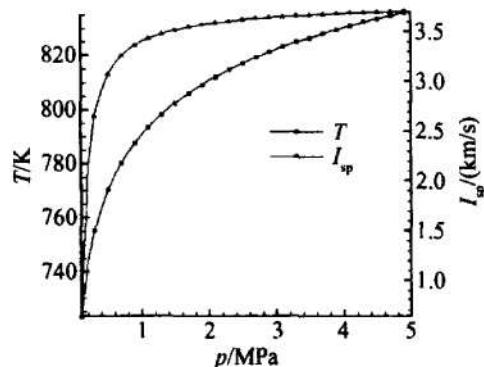


Fig 4 Variation of performance with the pressure of combustion chamber (water/fuel=2.5)

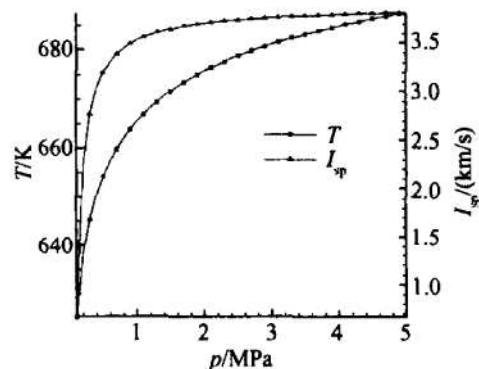


Fig 5 Variation of performance with the pressure of combustion chamber (water/fuel=3)

进水量保证总水燃比能使发动机处于最优性能。发动机比冲随设计压强的变化开始较为剧烈, 在达到一定压强 (1 MPa) 后趋于平缓。

对文献 [7] 中给出的以漩流式反应发生器工作的水下冲压发动机进行了理论计算, 结果如下:

由图 6~ 9 的结果可以得出, 漩流式水下冲压发动机的理论性能高于燃气发生器式水下冲压发动机, 主要因为漩流式燃料全部为金属而燃气发生器式燃料含其它推进剂组分。漩流式水下冲压发动机随水燃比和反应器设计压强的变化趋势基本与燃气发生

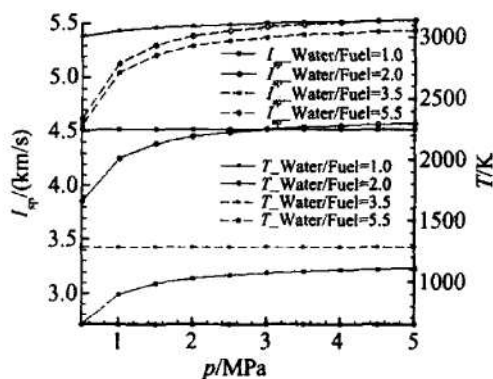


Fig 6 Variation of performance with the pressure of combustion chamber

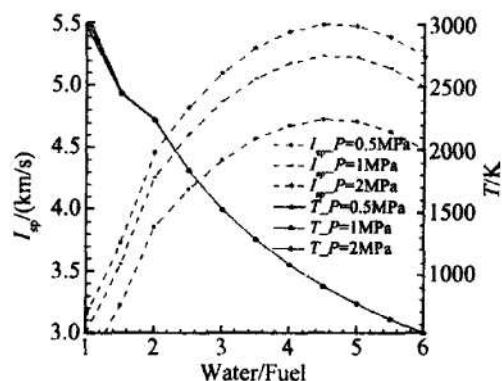


Fig 7 Variation of performance with water/fuel

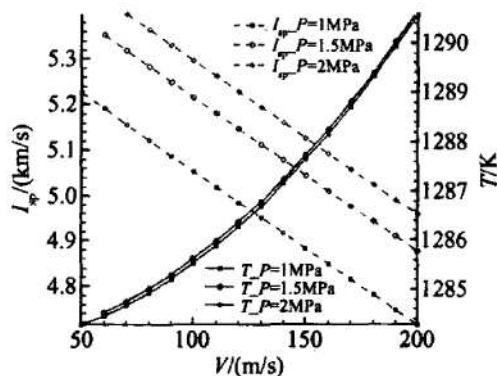


Fig 8 Variation of performance with navigational velocity

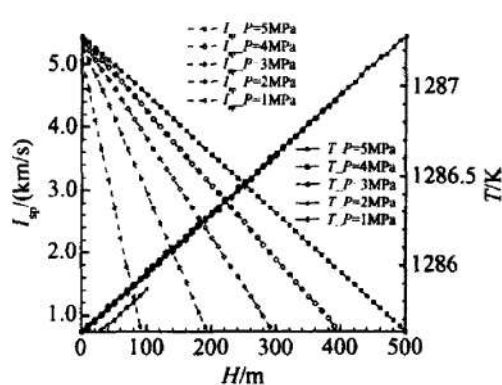


Fig 9 Variation of performance with navigational depth

器式水下冲压发动机相同。发动机性能随航行速度和航行深度的变化较大, 对不同反应器设计压强, 设计压强越高影响越小。

4 结 论

通过水下冲压发动机的两种主要形式的计算结果及分析可以得出:

(1) 漩流式的性能优于燃气发生器式, 但漩流式比燃气发生器式实现困难;

(2) 在某一水燃比下, 发动机性能有最优值, 同时考虑到水燃比对反应器温度的影响, 应采用两次或多次进水的方式;

(3) 发动机性能在反应器压强高于 1 MPa 后变化较平缓, 故反应器设计压强应高于 1 MPa

(4) 燃气发生器式实现方式较为容易, 但不同的推进剂组分对发动机影响较大, 应研究金属含量较高的高热值推进剂。

参考文献:

- [1] Foote J P, Lineberry J T, Thompson B R. Investigation of aluminum particle combustion for underwater propulsion applications[C]. AIAA 96-3086
- [2] 郑邦勇. 铝水推进系统的现状与发展前景[J]. 舰船科学技术, 2003 25(5).
- [3] 方丁酉, 吴德珉. 火箭发动机热力计算软件研制报告[R]. 内部资料, 1993
- [4] 董师颜, 张兆良. 固体火箭发动机原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社.
- [5] 郭 健, 方丁酉. 火箭(冲压)发动机热力计算软件. 长沙, 1999
- [6] 姚 娜. 整体式固体火箭冲压发动机热力计算研究[D]. 西北工业大学硕士论文, 2001, 西安.
- [7] Miller T F, Walter J L, Kiely D H. A next-generation AUV energy system based on aluminum-seawater combustion[C]. IEEE 0-7803-7572-6/02, 2002

(编辑: 崔永刚)