

文章编号: 1001- 2486(2009) 04- 0117- 05

## 水燃比对水冲压发动机性能影响数值模拟与试验研究\*

韩 超, 夏智勋, 胡建新, 赵 宁, 方一酉  
(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘 要:** 为了研究水燃比对二次进水水冲压发动机比冲性能的影响规律, 建立了发动机补燃室两相反应模型, 对镁基水冲压发动机进行了数值模拟, 获得了发动机比冲、喷管出口温度及出口速度随水燃比变化趋势, 在此基础上进行了水冲压发动机地面直连式试验研究。结果表明, 存在最佳水燃比使二次进水水冲压发动机比冲性能较优。

**关键词:** 水冲压发动机; 比冲性能; 水燃比; 数值模拟; 直连式试验

**中图分类号:** V430      **文献标识码:** A

## Numerical and Experiment Studies on Water Ramjet with Effect of Water-fuel Ratio

HAN Chao, XIA Zhi-xun, HU Jian-xin, ZHAO Ning, FANG Ding-you

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

**Abstract:** A two-phase reaction model of the secondary combustor was established to study the effect of water-fuel ratio on engine performance of magnesium-based water ramjet with twice water penetration. The change tendency of specific impulse, temperature and velocity of nozzle exit were obtained with water-fuel ratio. Direct-connected tests were carried out in order to validate the correctness of the numerical simulation. The result shows that there exists the optimum water-fuel ratio, which can improve the performance of water ramjet.

**Key words:** water ramjet; specific impulse; water-fuel ratio; numerical simulation; direct-connected test

作为超高速鱼雷的首选推进系统, 国外水冲压发动机及其关键技术得到了蓬勃的发展<sup>[1-3]</sup>。国内虽然起步较晚, 但在水冲压发动机系统性能、铝/水反应机理、发动机试验等方面也进行了不少研究<sup>[4-6]</sup>。水燃比是水冲压发动机工作中的重要参数, 影响发动机内的燃烧过程和工质膨胀做功过程。

### 1 数值模拟方法

#### 1.1 物理模型

水冲压发动机补燃室内工作过程包括水反应金属燃料的燃烧带来的燃面退移、水的雾化蒸发、两相掺混燃烧, 要系统地模拟实际过程比较复杂。为减小工作量, 忽略次要因素, 在不改变流场特征的前提下对补燃室内流场进行合理的简化:

- (1) 忽略由于燃面退移带来的补燃室容积变化;
- (2) 水反应金属燃料一次燃烧产物全部以气态形式存在, 且只包括大量的镁蒸气、少量的  $N_2$ 、 $H_2$  和  $MgCl_2$ 。
- (3) 不考虑水雾化液滴的直径分布, 按均一粒径计算;
- (4) 假设镁与水反应为一步反应, 且遵循阿累尼乌斯定律:



\* 收稿日期: 2009- 05- 10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50376071)

作者简介: 朝超(1983-), 女, 博士生。

不考虑氧化镁的凝结。

## 1.2 气相控制方程

根据物理模型中的假设和流体力学中的质量、动量、能量、组分和湍流的  $k-\varepsilon$  方程, 补燃室三维气相控制方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \dot{y} \cdot (\rho\phi) - \dot{y} \cdot (\Gamma_\phi \dot{y} \phi) = S_\phi \quad (2)$$

其中,  $\phi$  为流动变量,  $\Gamma_\phi$  为变量  $\phi$  的有效输运系数(包括了湍流的影响),  $S_\phi$  为气相源项及方程中不能写入式(2)左边各项中的项<sup>[7]</sup>。

## 1.3 液滴运动方程

采用随机轨道模型跟踪液滴轨迹, 只考虑作用在液滴上的阻力, 不计重力及其他力的影响, 液滴运动方程如下:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) \quad (3)$$

其中,  $u_p$  为液滴速度,  $F_D$  为液滴阻力,  $u$  为流体速度。

液滴的雾化蒸发采用文献[8]中模型描述。

## 1.4 燃烧模型

本文采用涡团耗散模型(Eddy Dissipation 模型, 即 EDM) 来模拟水冲压发动机补燃室内的两相掺混燃烧过程。EDM 模型认为化学反应速率不但在很大程度上受湍流的影响, 而且反应速率还取决于涡团中包含燃料、氧化剂和产物中浓度最小的一个, 该模型即能用于预混火焰, 也能用于扩散火焰。

## 1.5 计算网格及边界条件

补燃室内流场计算采用燃气流量入口, 根据药柱端面燃烧特点, 假设流量在入口表面均匀分布, 流量值由水反应金属燃料参数及预估燃速获得, 根据假设(2), 燃气成分包括镁蒸气、 $N_2$ 、 $H_2$  和  $MgCl_2$ , 热力计算表明, 各组分的质量分数分别约为 0.6、0.1、0.15、0.15, 燃气入口温度为 1400K; 应用颗粒轨道模型时, 须给定液相初始条件, 其中液滴平均直径为 70 $\mu m$ , 初始温度为 300K, 流量根据水燃比计算; 采用压力出口条件, 出口压力等于环境压强; 壁面为绝热壁, 采用无滑移边界。

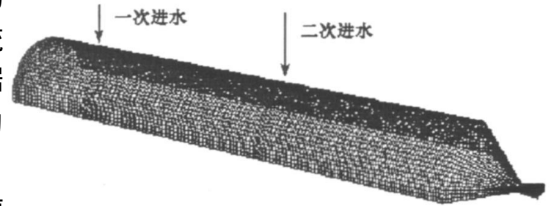


图1 计算网格

Fig. 1 Gridding

计算网格如图1所示。一次进水和二次进水均采用两个对称的进水孔, 因此整个流场结构为对称结构, 计算一半流场即可。

## 2 水冲压发动机直连式试验系统

试验是在国防科大外场水冲压发动机地面直连式试验台进行的。整个试验系统由试验发动机、高精度试车台、供水管路系统和测量控制系统组成, 结构简图如图2所示。水经供水管路由喷嘴喷入燃烧室, 与推进剂一次燃烧产生的富燃燃气在补燃室中掺混、燃烧, 形成高温高压产物并经喷管排出产生推力。

由于比冲效率和喷管效率受推力测量不确定性的影响, 精度较差, 而压强测量比较准确, 因此, 在本文的试验研究过程中, 采用特征速度表示的燃烧效率来判断发动机性能的好坏。燃烧效率定义为特征速度的试验值与理论值之比, 即  $\eta_c^* = c_{exp}^* / c_{th}^*$ , 其中  $c_{th}^*$  由理论计算得出。

## 3 结果与分析

为探索水燃比对水冲压发动机比冲性能的影响规律, 分别进行了不同水燃比下的流场数值模拟和

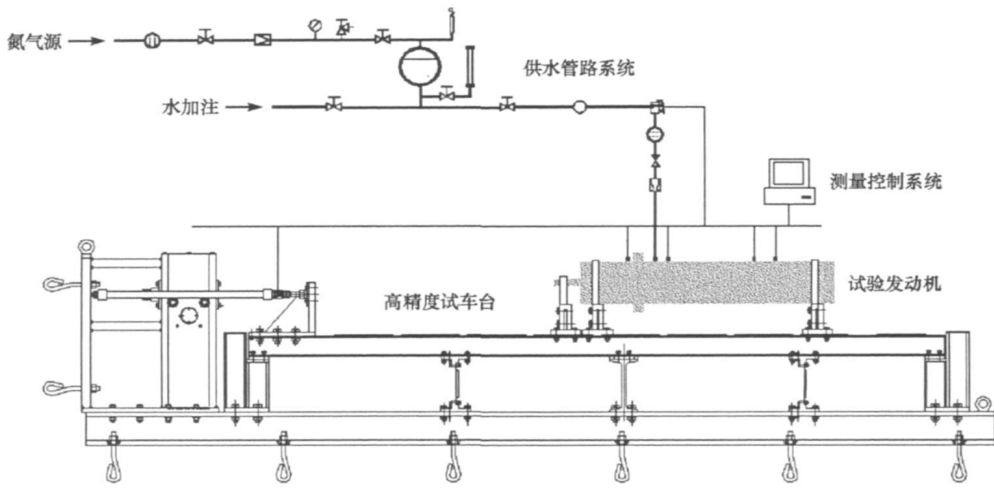


图2 试验系统简图

Fig.2 Schematic of water ramjet experiment system

发动机试验。数值模拟通过 FLUENT 软件进行,采用前文所述模型,保持燃气流量和一次进水量不变,水燃比的变化通过改变二次进水流量实现,其他参数如表 1 所示。

表 1 数值模拟参数

Tab.1 Parameters of numerical simulation

喷管面积膨胀比 $A_d/A_t$	一次进水角( $^\circ$ )	二次进水角( $^\circ$ )	一次水燃比	液滴直径(mm)
2.63	45	90	1	0.07

图3给出了数值模拟所得比冲随水燃比的变化趋势,图中纵坐标为无量纲比冲。由数值模拟结果可以看出,当水燃比小于3.5时,比冲随着水燃比的增大而增大;到3.5时比冲达到最大值;随着水燃比的进一步增加,比冲开始减小。

为了验证数值模拟结果,在直连式试验台上进行了水燃比影响的试验,试验比冲曲线也显示在图3中。由于数值模拟计算的是较为理想的状态,因此与试验值差别较大,但随着水燃比的增加,两曲线呈现相同的变化趋势。表2给出了直连试验获得的性能参数,其中比冲效率定义为比冲实验值与理论值之比。

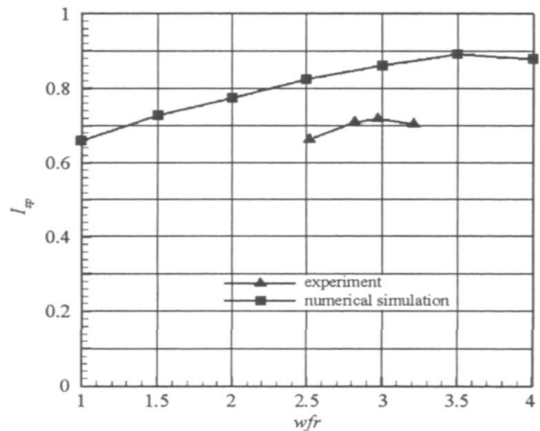


图3 比冲随水燃比变化趋势

Fig.3 Specific impulse changing with different water-fuel ratios

表 2 直连试验结果

Tab.2 Results of direct connected test

试验编号	924- 1	915- 2	912- 1	912- 2
水燃比	2.52	2.82	2.97	3.21
平均压强(MPa)	2.39	2.30	2.20	2.02
平均推力(N)	764.5	729.3	704.7	643.5
特征速度(m/s)	716.2	709.1	693.5	648.1
比冲效率	0.810	0.822	0.832	0.821
燃烧效率	0.875	0.889	0.898	0.887

表3给出了数值模拟获得的补燃室出口平均温度及喷管出口平均温度值,可见,随水燃比增加,补燃室温度逐渐降低,随之喷管出口温度也逐渐降低。

表3 数值模拟结果  
Tab.3 Results of numerical simulation

水燃比	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
补燃室出口 平均温度(K)	2428.4	2005.3	1626.0	1352.1	1152.7	1055.4	886.1
喷管出口 平均温度(K)	1657.8	1367.5	1151.1	983.3	809.3	725.8	597.7
比冲效率	0.896	0.839	0.809	0.805	0.811	0.832	0.830

比冲和喷管出口气流速度分别为

$$I_{sp} = F / \dot{m}_g = \left[ \left( \dot{m}_w + \dot{m}_g \right) \cdot V_e + (P_e - P_a) \cdot A_e - \dot{m}_w \cdot V_0 \right] / \dot{m}_g$$

$$= V_e + ufr \cdot (V_e - V_0) + (P_e - P_a) \cdot A_e / \dot{m}_g \quad (4)$$

$$V_e = M_e \cdot a_e = M_e \cdot \sqrt{\gamma R T_e} \quad (5)$$

其中,  $I_{sp}$  ——比冲;  $F$  ——推力;  $\dot{m}_g$ 、 $\dot{m}_w$  ——分别为燃气流量和水流量;  $V_e$ 、 $V_0$  ——分别为喷管出口气流速度和水的来流速度;  $P_e$  ——喷管出口压力;  $A_e$  ——喷管出口面积;  $ufr$  ——水燃比;  $T_e$  ——喷管出口温度;  $M_e$  ——喷管出口马赫数;  $a_e$  ——喷管出口声速;  $\gamma$  ——比热比。

结合发动机工作过程可知:在  $A_e/A_t$ 、 $\dot{m}_g$ 、 $A_e$ 、 $V_0$  一定时,  $I_{sp}$  随  $ufr$ 、 $T_e$ 、 $P_e$  变化。在式(4)中,等号右边第三项由出口压力带来的比冲对整体比冲的贡献不大,可忽略。随着  $ufr$  的增加,  $T_e$  下降,  $V_e$  下降,  $I_{sp}$  的变化取决于上述哪个因素占主导地位。当  $ufr$  小于某一临界值时,由  $V_e$  下降引起的比冲降低小于由  $ufr$  增加带来的比冲增加量,故  $I_{sp}$  增加;反之,当  $ufr$  大于某一临界值时,前者的影响占主要地位,  $I_{sp}$  开始下降。

图4和图5分别给出了补燃室对称面上温度分布和  $H_2O$  的质量分数分布。由图4可以看出,高温区主要集中在一次进水后,由富燃燃气与一次水进行二次燃烧产生;水燃比为1.0时,没有二次水加入,一次进水之后直到喷管的大段区域内温度都很高,喷管出口温度也较高,大量热量没有得到充分利用;随着水燃比的增加,二次燃烧产生的高温区逐渐缩短,二次水的加入使补燃室后半段温度有所降低,喷管出口温度也降低,热能转化为工质的动能,发动机比冲得到提高;水燃比进一步增加(大于3.5时),二次进水位置到喷管的一段区域温度降低明显,此时喷管出口温度降低的影响超过了水燃比增加带来的影响,比冲开始下降。

图5中出现两个  $H_2O$  质量分数分布集中区,分别对应一次进水和二次进水;一次进水在与燃气进行二次燃烧后所剩无几,表明一次进水几乎全部参与反应,而二次进水入口至喷管一段水的质量分数一直较高,表明二次进水很少参与反应,主要是作为工质对二次燃烧产生的高温产物进行掺混。这一点有利于理解补燃室内的工作过程,对合理进行水燃比的分配也有借鉴意义。

上述结果表明,数值模拟采用的计算模型对发动机比冲性能的预示是正确的。

## 4 结论

(1) 随着水燃比增加,发动机喷管出口温度和出口速度降低,比冲呈现出先增加后减小的趋势;

(2) 存在最佳水燃比使发动机性能较优,结合数值模拟和试验结果可推知,其值约为3。

在发动机设计和研究中,应合理选取水燃比,以最大限度地发挥水冲压发动机的性能。数值模拟与试验研究结果一致,也验证了本文数值模拟研究的正确性。

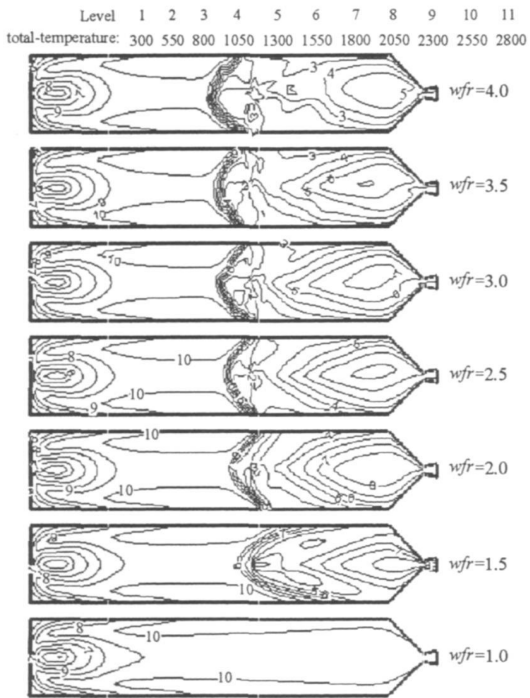


图 4 补燃室对称面温度分布图

Fig. 4 The distribution of temperature in symmetry with different water-fuel ratios

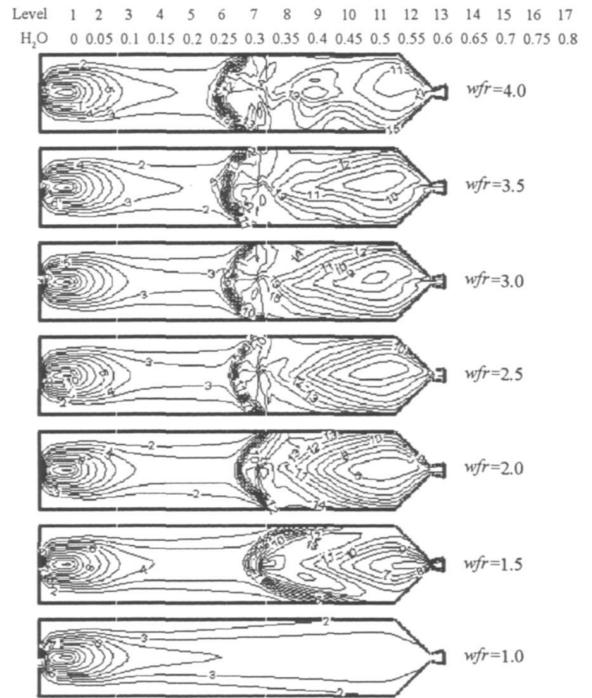
图 5 补燃室对称面 H<sub>2</sub>O 质量分数分布

Fig. 5 The distribution of H<sub>2</sub>O mass fraction in symmetry with different water-fuel ratios

## 参考文献:

- [1] Miller T F. A Next-generation AUV Energy System Based on Aluminum-seawater Combustion[R]. IEEE 0-7803-7572-6/02, 2002.
- [2] Miller T F, Herr J D. Green Rocket Propulsion by Reaction of Al and Mg Powders and Water[R]. AIAA 2004-4037, 2004.
- [3] Risha G A. Combustion of Aluminum Particles with Steam and Liquid Water[R]. AIAA 2006-1154, 2006.
- [4] 缪万波, 夏智勋, 郭健, 等. 金属/水反应冲压发动机理论性能计算与分析[J]. 推进技术, 2005, 26(6).
- [5] 孙展鹏, 乐发仁. 铝水反应机理初探[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2006, 4(2).
- [6] 李是良, 张炜, 张为华, 等. 镁基水反应金属燃料及水冲压发动机初步试验[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(1).
- [7] 周力行. 多相湍流反应流体力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [8] 缪万波, 夏智勋, 胡建新, 等. 金属/水反应冲压发动机内流场数值模拟[J]. 推进技术, 2007, 28(2).