

文章编号: 1000-8055(2008)10-1949-04

金属燃料/水冲压发动机一次进水试验

胡 凡, 张为华, 夏智勋, 胡建新, 李是良, 黄利亚
(国防科学技术大学 航天与材料工程学院, 长沙 410073)

摘 要: 介绍了金属燃料/水冲压发动机试验系统, 采用非壅塞式构型实现了镁基金属燃料发动机一次加水后稳定燃烧, 试验中进水流量稳定, 补燃室与燃烧室压强变化相同. 试验研究了一次水燃比和燃料燃速对发动机燃烧性能的影响, 试验结果表明: 当一次水燃比在一定范围内变化时, 发动机燃烧效率和喷射效率随水燃比增加而先增加后减少; 增加燃料燃速可提高发动机燃烧效率和改善发动机工作性能, 但燃速增加需满足发动机长时间工作需求.

关 键 词: 金属燃料/水冲压发动机; 试验; 水燃比; 工作过程; 燃烧性能

中图分类号: V430

文献标识码: A

Experimental investigation on once injecting water in metal fuel/ water ramjet

HU Fan, ZHANG Wei-hua, XIA Zhi-xun, HU Jian-xin,
LI Shi-liang, HUANG Li-ya

(Institute of Aerospace and Material Engineering,
National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The experimental system of metal fuel/water ramjet was introduced. The unchoked ramjet of metal fuel containing magnesium can burn steadily after once injecting water. In the experiment, the mass flux of water was stable and the pressure of chamber changed similarly with the secondary chamber. The effect of once water/fuel ratio and fuel burn rate for the ramjet was studied through experiments. The results show the combustion and injection efficiency for ramjet firstly increase, and then decrease with the increase of water/fuel ratio in a define range of ratio; also, the combustion efficiency and the operation performance are improved observably by increasing the burn rate of fuel metal whose variation must under the need of the long time operation for the ramjet.

Key words: metal fuel/water ramjet; experiment; water/ fuel ratio;
operation process; combustion performance

金属燃料/水冲压发动机燃气与水掺混涉及多种物理化学过程, 难于从理论上准确建立工作过程模型, 通过试验研究发动机加水后工作特性十分必要. 国外研究以粉末式金属燃料为主, Foote J P 和 Miller T F 研究集中于单颗粒与水反应燃烧过程、颗粒供应系统和旋流燃烧室设计

等^[1-2], 测试了发动机性能和金属颗粒反应时间, 对不同粒径级配金属颗粒反应特性进行了比较; 国内研究主要以药柱式金属燃料为基础, 介绍了金属燃料的研究进展^[3], 进行了发动机理论性能计算分析^[4-5], 并采用镁基燃料进行了初步试验研究^[6], 但由于燃料自身性能和发动机体系两方面

收稿日期: 2007-10-10; 修订日期: 2008-04-01

作者简介: 胡凡(1977-), 男, 吉林省吉林市人, 博士生, 主要从事水冲压发动机工作过程研究.

原因,燃烧室压强出现不稳定脉动现象.理论性能分析^[4]得出发动机需通过多次进水才能达到最佳性能,一次进水与燃气中高温颗粒发生反应,放出热量使过量进水吸收反应热量变为蒸汽作为工质经喷管膨胀做功,所以一次进水发动机燃烧过程优劣是影响发动机性能的重要因素.

本文采用药柱式镁基金属燃料和非壅塞式发动机机构型,稳定了进水流量,提高了燃料燃速,实现一次加水后发动机稳定工作.在此基础上,研究了一次进水下燃料燃速、水燃比等因素对金属燃料/水冲压发动机燃烧性能的影响.

1 试验系统及发动机

金属燃料/水冲压发动机试验系统由管路供应系统、高精度试车台及测量控制系统等组成.试验系统示意图如图1所示.

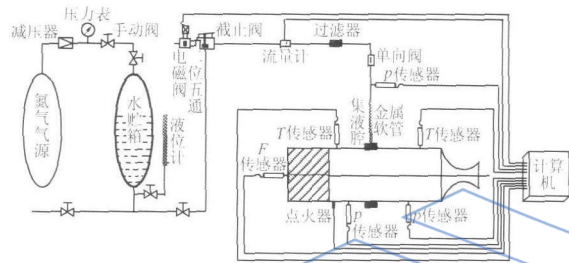


图1 水冲压发动机试验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

管路供应系统包括氮气增压系统、水储箱及相应管路阀门等,氮气经减压阀、压力表和手阀到达储箱,为储箱增压,水通过挤压方式流经气动截止阀及流量计进入发动机.进水时间由计算机时序控制,氮气增压系统最大供应压力10 MPa,水储箱最大供应压力8 MPa,水流量最大可达到1 kg/s.

试车台架包括静架、动架、测力原件、原位校准装置等四部分组成,试验中水进口冲量不能直接测出,影响将台架推力换算到航行推力来确定发动机性能,研究中采用软管将水引入发动机,使设备上水进口冲量轴向分量为零,提高推力测量精度.

为利用发动机对多种设计参数进行优化试验,发动机设计为可拆卸且喉径可换,由燃气发生器、注水室、补燃室和喷管等四部分组成,总长619 mm,喷管面积膨胀比为4.根据可拆卸特点,在基本构型基础上设计不同部件,可对不同发动机组合构型进行试验.试验发动机构型示意图如

图2所示.发动机采用非壅塞结构,前端接头将其固定在台架上,以便测量推力.采用对撞式喷注器侧向进水,增强雾化和掺混效果.

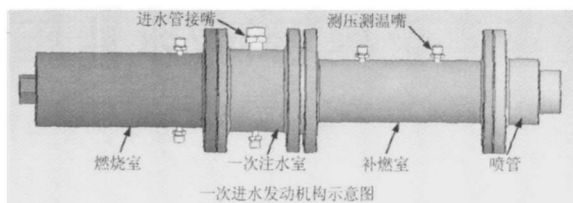


图2 试验发动机构型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental motor

2 试验结果与讨论

燃烧效率是表征发动机性能优劣的重要参数,反映了富燃料推进剂的燃烧性能.由于试验仅进行了一次加水后发动机工作过程研究,所以本文主要采用以特征速度表示的燃烧效率来衡量发动机性能,试验发动机特征速度和燃烧效率分别为

$$C_{\text{exp}}^* = \frac{p_s A_t}{(\dot{m}_w + \dot{m}_g)} \quad (1)$$

式中 p_s 为补燃室压强; A_t 为喷管喉部面积; $\dot{m}_w$ 为平均水流量, $\dot{m}_g$ 为燃气平均流量.

$$\eta_c^* = \frac{C_{\text{exp}}^*}{C_{\text{th}}^*} \quad (2)$$

式中 C_{th}^* 为理论特征速度,由热力计算得到.

喷射效率与排出喷管做功工质的多少和掺混程度密切相关,定义如下:

$$\eta_m = 1 - \frac{m_r}{m_p} \quad (3)$$

式中 m_r 为剩余残渣质量, m_p 为装药质量.

针对某金属燃料(金属含量50%),采用非壅塞式发动机构型,药柱采用端面燃烧,进行了多次试验研究.

2.1 一次进水燃烧试验

水通过挤压方式进入燃烧室,当上游压强确定后,水流量受燃烧室压强影响,药柱点燃后压力小于设计流量下发动机工作压力,造成水流量过大,会使发动机熄火或燃烧室压强振荡.在实际试验中,采用流量稳定装置,控制水流量,实现发动机点火与进水同步进行,减小了发动机加水后过渡段工作时间.发动机试验压强曲线如图3所示.

从试验曲线可看出发动机加水后压强急剧上升至稳定燃烧阶段,发动机点火前水流量尖峰是

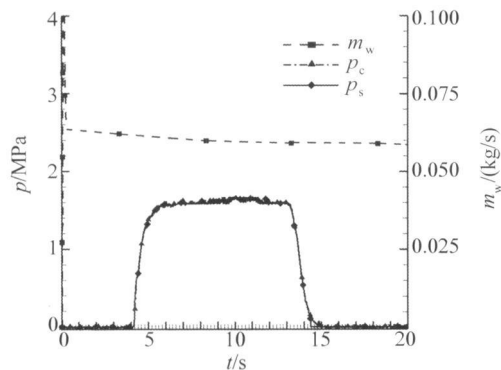


图 3 发动机压强试验曲线
Fig. 3 Pressure test results

由于管路填充时水突然冲击流量计, 使测量值出现峰值, 测量值并非点火前真实水流量, 在试验过程中, 发动机工作稳定, 水流量基本保持恒定, 不随燃烧室压强变化而变化. 由于采用非壅塞结构, 燃烧室压力和补燃室压力变化趋势相同, 当航行深度和航行速度变化引起补燃室压强变化时, 非壅塞构型发动机有较好的自调节能力^[7]. 一次加水后发动机稳定工作为参数对比试验研究奠定了重要基础.

2.2 水燃比对燃烧性能影响

一次进水作用是与发动机燃气中镁颗粒进行燃烧, 进水过少颗粒难以完全反应, 进水过多使温度下降颗粒难以点火, 所以一次水燃比大小是影响发动机燃烧效率、喷射效率和燃烧温度等参数的重要因素. 本文采用相同批次金属燃料和侧向进水方式, 针对水燃比 0.25、0.42 和 0.77 进行了试验研究. 表 1 为水燃比对燃烧性能的影响.

表 1 不同一次水燃比下发动机试验结果对比
Table 1 Experimental case for the effect of water/ fuel ratio

试验编号	No. 1	No. 2	No. 3
水燃比	0.25	0.42	0.77
试验特征速度/(m/ s)	875. 23	1001. 84	864. 3
理论特征速度/(m/ s)	1307. 9	1381. 24	1258. 2
燃烧效率/ %	66. 9	72. 5	68. 7
喷射效率/ %	85. 27	92. 3	85. 09
补燃室测量温度/K	1 413	1 248	973

从试验结果可以看出, 发动机燃烧效率和喷射效率随水燃比增加先升高而后降低, 温度随水燃比增加而降低. 这是由于在较小水燃比下, 水与

燃气掺混不够充分, 进水量不足以与一次燃气中所有金属颗粒完全反应, 部分颗粒未燃烧即从喷管排出, 由于燃烧不完全且流量较小, 燃烧室压强和气体流速也较低, 使喷射效率下降; 当水燃比较大时, 由于水蒸发潜热较大, 一次进水过多, 使燃气温度迅速下降, 颗粒未点火, 造成燃烧效率降低, 且横向射流速度过大, 喷入轴向燃气使其速度下降, 燃烧产物未被带出发动机, 喷射效率进而降低. 虽试验结果显示一次水燃比对燃烧效率影响并不显著, 存在多种因素影响使每次试验难于保证在完全相同工况进行, 但经过分析, 仍可知必然存在最佳一次水燃比使金属燃料/ 水冲压发动机燃烧性能最优.

2.3 燃速对燃烧性能影响

燃料燃速是影响发动机性能的重要因素, 本文针对同等镁金属含量不同燃速的药柱进行了一次进水试验研究. 表 2 是燃料燃速对一次进水发动机燃烧性能的影响试验结果. 图 4 和图 5 分别为 No. 4 和 No. 5 发动机试验补燃室压强曲线.

表 2 不同燃速下发动机试验结果对比
Table 2 Experimental case for the effect of burn rate

试验编号	No. 4	No. 3	No. 5
燃速/(mm/ s)	3. 16	6. 29	14. 23
水燃比	0. 85	0. 77	1. 12
试验特征速度/(m/ s)	714. 4	864. 3	917. 44
理论特征速度/(m/ s)	1 175. 5	1 258. 2	1 134. 69
燃烧效率/ %	60. 8	68. 7	80. 85
喷射效率/ %	—	85. 09	92

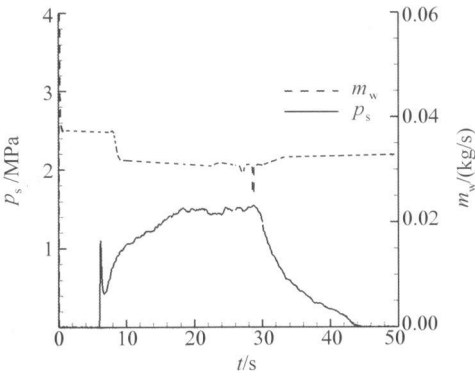


图 4 发动机 No. 4 试验补燃室压强曲线
Fig. 4 Pressure of secondary combustion chamber test results in No. 4 experiment

从试验结果对比可以看出, 燃料燃速对燃烧

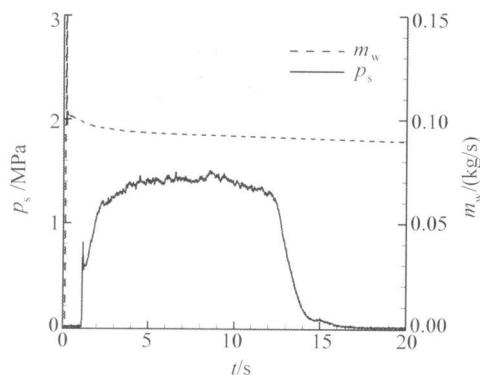


图5 发动机 No.5 试验补燃室压强曲线

Fig. 5 Pressure of secondary combustion chamber test results in No.5 experiment

性能影响极为显著. 主要由于燃速高时, 单位时间内燃料释热量高, 加快水蒸发速度, 使水加速汽化, 利于颗粒点火并与水发生反应, 提高了燃烧效率. 从试验曲线比较可得, 燃速较高时, 单位时间内成气量和释热量均较大, 对于端面燃烧药柱, 可在较短时间内完成自由容积填充, 减小工作过程中热损失, 迅速达到稳定工作状态, 较好的改善了发动机性能. No. 5 试验虽然水燃比较大, 横向射流对燃气产生较大影响, 但由于燃气流速快, 使喷射效率仍大于低燃速下喷射效率, 燃速对燃烧性能影响要大于水燃比的影响. 提高燃速虽可改善金属燃料/水冲压发动机燃烧性能, 但发动机必须满足长时间工作特性, 燃速的选择仍需在燃烧性能和工作时间中做出权衡, 在满足工作时间要求下, 尽可能提高燃速.

3 结 论

1) 在适当一次水燃比下, 镁基金属燃料加水后可稳定燃烧. 采用流量控制装置, 可使发动机工作时段内水流量恒定, 不随燃烧室压强变化而变化. 非壅塞构型发动机补燃室与燃烧室压强变化相同, 当航行速度和航行深度变化引起补燃室压强变化时, 非壅塞构型发动机应有较好自调节能力.

2) 一次水燃比是保证金属燃料加水后正常燃烧和影响发动机性能的重要参数. 在一定范围内, 发动机燃烧效率和喷射效率随一次水燃比增

加而先增加后减少, 存在最佳一次水燃比使发动机性能最优.

3) 金属燃料燃速对发动机燃烧效率和性能有显著影响, 燃速提高可缩短发动机过渡工作段时间, 改善发动机性能, 并使燃烧效率显著增加. 但为满足发动机长时间工作要求, 燃速选择需在燃烧性能和工作时间中做出权衡.

参考文献

- [1] Foote J P, Lineberry J T, Thompson B R, et al. Investigation of aluminium particle combustion for underwater propulsion applications[R]. AIAA 96-3086.
- [2] Miller T F, Walter J L, Kiely D H. A next generation AUV energy system based on aluminum seawater combustion[R]. IEEE 0 7803-7572 6/02, 2002.
- [3] 李是良, 张伟, 朱慧, 等. 水冲压发动机用金属燃料的研究进展[J]. 火炸药学报, 2006, 29(6): 69-73.
LI Shiliang, ZHANG Wei, ZHU Hui, et al. The research development of the hydroreactive metal fuel used for water ramjet engine[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2006, 29(6): 69-73. (in Chinese)
- [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): 563-566.
MIAO Wanbo, XIA Zhixun, GUO Jian, et al. Thermodynamic calculation for the water ramjet[J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(6): 563-566. (in Chinese)
- [5] 田维平, 蔡体敏, 陆贺建, 等. 水冲压发动机热力计算[J]. 固体火箭技术, 2006, 29(2): 95-98.
TIAN Weiping, CAI Timin, LU Hejian, et al. Thermodynamic calculation for water ramjet[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2006, 29(2): 95-98. (in Chinese)
- [6] 李是良, 张伟, 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): 35-38.
LI Shiliang, ZHANG Wei, ZHANG Weihua, et al. Primary experimental study on the performance of water ramjet engine and the magnesium based fuel[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2007, 29(1): 35-38. (in Chinese)
- [7] 夏智勋, 胡建新, 王志吉, 等. 非壅塞固体火箭冲压发动机二次燃烧试验研究[J]. 航空动力学报, 2004, 19(5): 713-717.
XIA Zhixun, HU Jianxin, WANG Zhiji, et al. Experimental investigation on secondary combustion in unchoked ducted rocket[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(5): 713-717. (in Chinese)