

镁基水反应金属燃料及水冲压发动机初步试验*

李是良 张 炜 张为华 阳世清 朱 慧 何 博

(国防科技大学 航天与材料工程学院 湖南 长沙 410073)

摘 要 通过热力学计算预估水冲压发动机的性能,确定了燃料配方,并研制出试验用镁基水反应金属燃料。成功进行了水冲压发动机原理样机热试车,对水冲压发动机及其燃料的性能进行了初步研究。

关键词 水冲压发动机 水反应金属燃料 水下高速推进

中图分类号 :V435 文献标识码 :A

Primary Experimental Study on the Performance of Water-ramjet Engine and the Magnesium-based Fuel

LI Shi-liang, ZHANG Wei, ZHANG Wei-hua, YANG Shi-qing, ZHU Hui, HE Bo

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

Abstract The performance of water-ramjet engine was calculated by the thermodynamic calculation software, then the basic composition of the magnesium-based hydro-reactive metal fuel was determined and the fuel grain was produced. The model water-ramjet engines with the fuel have been tested successfully. The performance of the engine and the attributes of the fuel were investigated primarily.

Key words water-ramjet engine; hydroreactive metal fuel; high speed propulsion underwater

俄罗斯“暴风雪”超高速鱼雷利用“超空泡”(supercavitation)原理突破了水下航行体的速度限制,远远超过了常规鱼雷 30~70 节的速度而达到了 200 节,能使常规水下或水面舰艇来不及反应而被击中,将改变未来海战的模式^[1]。因此,研究超高速鱼雷的巡航动力推进系统——水冲压发动机具有非常重要的现实意义。

水冲压发动机具有能量密度高、比冲高、工作时间长等特性,是实现超高速鱼雷高航速、大航程和维持超空泡稳定所需的必备条件。美国早在 19 世纪 40 年代就已经考虑将“吸入水分+固体推进剂”体系作为水下火箭推进系统的燃料^[2],最近一直在研究 Mg、Al 或合金粉末作为燃料的吸水式推进器以应用于水下推进^[3-4]。

我国在水冲压发动机研究方面还处于理论研究及试验探索阶段^[5],本研究通过热力计算,确定了镁基水反应金属燃料的配方,并制备了燃料药柱,以自行研制的镁基水反应金属燃料作为水冲压发动机的推进剂,进行了直连式原理发动机试验。

1 水冲压发动机工作原理及试验系统

1.1 水冲压发动机工作原理

水冲压发动机采用新型水反应金属燃料作为推进剂,该燃料由镁基金属燃料、助燃剂、粘合剂和添加剂等组成。燃料在燃烧区热反馈作用下,维持自身的一次燃烧,生成富含金属颗粒、液滴或蒸气的高温燃气。海水依靠高速流体动压进入燃烧室,一部分经喷射雾化后与高温混合燃气中的金属成分进行燃烧,另一部分作为工质进入燃烧室,吸收金属与水反应放出的热量,转变为蒸汽,最终的燃烧产物,经喷管高速排出膨胀做功产生推力。

* 收稿日期 2006-08-30

作者简介:李是良(1979—),男,博士生。

1.2 水冲压发动机试验系统

水冲压发动机试验系统由水供应与流量调节机构、镁基水反应金属燃料药柱、燃烧室和喷管、测试系统等构成,见图1。

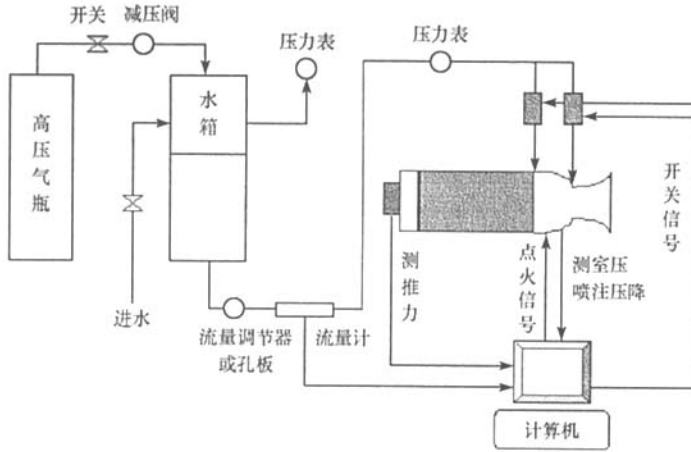


图1 实验系统

Fig.1 Experimentation system

工作过程包括水流量的调节与控制、水的喷注与雾化、金属燃料燃烧、金属与水的反应或燃烧等物理化学过程。与空气冲压发动机相比,水冲压发动机的最大差别在于系统中水的喷注、雾化、冲压机构,这是影响水冲压发动机性能的重要因素。水冲压发动机工作过程的核心是水反应金属燃料与水的反应或燃烧体系的组织,它决定了发动机的综合性能。

2 理论计算与试验结果分析

2.1 水冲压发动机性能的理论计算

利用自行开发的热力计算软件,对水冲压发动机的性能参数进行理论计算。计算条件为:燃烧室压强4MPa,出口压强0.16MPa,水流入口速度100m/s,分别考察在不同水燃比(W/F)条件下,氧化剂(Mg/AP/HTPB配方①80/10/10,②70/20/10,③60/30/10)和粘合剂Mg/AP/HTPB配方①80/10/10,④70/10/20,⑤60/10/30)含量变化对镁基水反应金属燃料理论比冲和燃温的影响,计算结果见图2。

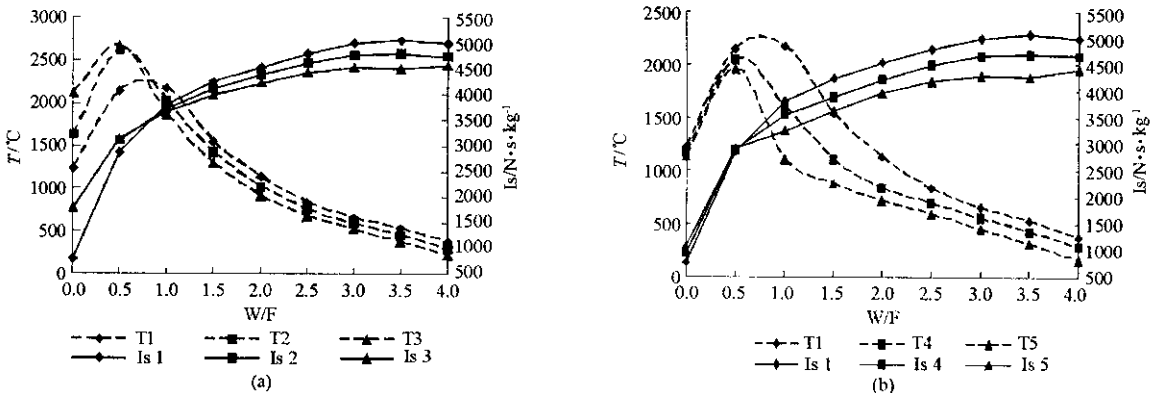


图2 燃烧室温度、比冲随水燃比变化

Fig.2 Temperature and Is vs W/F

从图2(a)中可知,随水燃比的增大,理论比冲初始显著升高,最后趋于平稳,燃烧室温度先升高后降低,在理论水燃比处达到最高点。在水燃比较小时,增大镁含量、减少氧化剂含量使燃烧室温度降低,理

论比冲降低,但在水燃比较大时,增大镁含量、减少氧化剂含量使燃烧室温度升高,理论比冲升高。但为了得到较高的比冲,一般水燃比都较大(约为3),因此镁含量的提高有利于燃料能量性能的提高。

从图 2(b)中可知,随水燃比的增大,理论比冲和燃烧室温度变化趋势同图 2(a);但随镁含量增加、粘合剂含量减少,燃烧室温度升高,理论比冲升高。说明减少粘合剂含量(提高镁含量)有利于燃料能量性能的提高,但将给推进剂制备工艺带来困难。

由于镁的密度($1.74\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)和堆积密度($0.35\sim 0.85\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)较小,这都不利于推进剂的制备工艺,因此综合考虑水反应金属燃料的能量性能和制备工艺,我们最终选择了 Mg/AP/HTPB 质量比为 65/20/15 作为燃料试验的基础配方,以 1kg 基础配方燃料作为对象对其性能进行理论计算,结果见图 3、图 4。

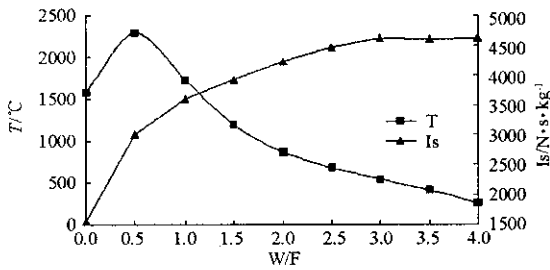


图 3 燃烧室温度、比冲随水燃比变化
Fig. 3 Temperature and I_s vs W/F

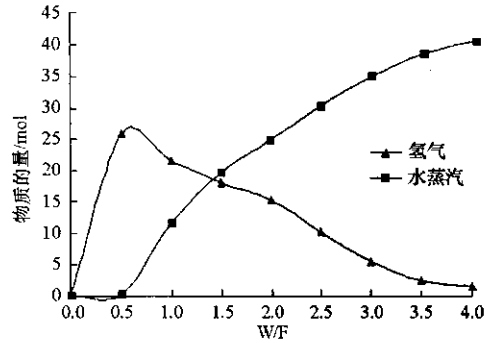


图 4 气态产物中氢气、水蒸汽物质的量的变化
Fig. 4 Mole vs W/F

由理论计算结果可知,该配方水反应金属燃料的理论水燃比约为 0.6。当未喷水时,燃烧室的温度可以达到 1500°C ,远远高于镁的熔点(648.5°C)和沸点(1107°C),有利于镁与水的反应。当 $W/F < 0.6$ 时,燃烧产物的主要成分逐渐变成氢气,产物平均分子量逐渐减小,燃烧室温度逐渐升高,最高达到 2300°C 左右,理论比冲迅速升高。当 $0.6 < W/F < 4.0$ 时,燃烧产物主要是水蒸汽,产物平均分子量逐渐增大,过量的水起到降温作用,燃烧室温度逐渐降低,理论比冲缓慢上升,当 W/F 为 3 时,理论比冲可升至 $4600\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右。

为了满足能量性能要求同时考虑发动机所能承受的温度,试验时选择水燃比为 3.0。

2.2 水冲压发动机原理样机的试验结果

依据理论计算的结果,选择试验参数如下:

推进剂:镁基水反应金属燃料(基础配方为 Mg 65/AP 20/HTPB 15),压装固化成型,详细配方及制备方法见文献[6];发动机类型: $\phi 50$ 直连式发动机;装药方式:固体药柱,端面燃烧;注水方式: $4\phi 0.2$ 注水孔垂直于燃烧室轴向,点火 8s 后开始加水,总加水时间大于 30s,水燃比: $W/F = 3.0$ 。试验所得到的燃速和燃烧室压强数据见图 5 和图 6。

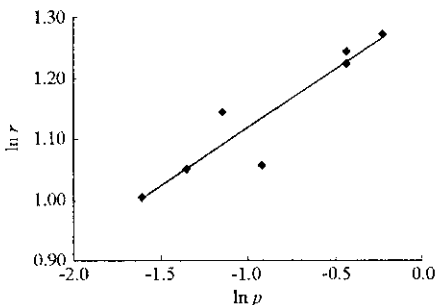


图 5 燃速与燃烧室压强对数关系曲线
Fig. 5 $\ln r$ vs. $\ln P$ curves

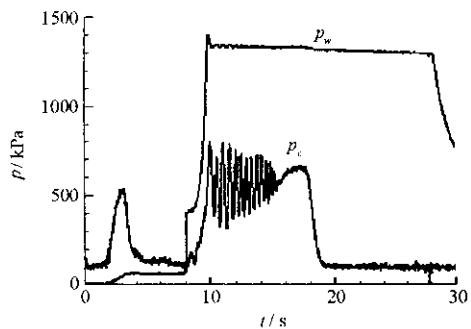


图 6 燃烧室压力与时间曲线图
Fig. 6 Pressure vs. time curves

根据 Viellie 燃速经验公式,可以用最小二乘法拟合出 $\ln r$ 与 $\ln p$ 之间的关系式:

$$\ln r = 0.1898 \ln p + 1.3079$$

因此该镁基水反应金属燃料的燃速公式为:

$$r = 3.6984 p^{0.1898} \quad (\text{压强单位 MPa, 燃速单位 mm} \cdot \text{s}^{-1})$$

燃速压强指数 $n = 0.1898$ 。

从燃烧室压强曲线(图6中 p_c 为燃烧室压强变化线, p_w 为注水孔出口处压强变化线)可以看到,当水加入到燃烧室后,室内压强迅速升高,喷管火焰录像也证实了喷注水后的反应效果,燃烧室压强由不稳定的脉冲波动逐渐趋于平稳,最终实现稳定燃烧。

2.3 试验结果分析

由于水反应金属燃料自身金属含量高,氧化剂含量低,因此造成试验中燃料的燃速低,燃速压强指数小,这是预料之中的。但为了改善发动机性能,有必要深入研究水反应金属燃料的燃烧性能调节技术。

发动机工作初期燃烧室内压强出现不稳定的脉动现象,体系逐渐达到平衡后燃烧室压强才能稳定于某一值,这种现象可能是由燃料自身性能和发动机体系两方面原因造成。

首先,由于试验用药柱采用手工混合、压装固化成型,因此药柱自身的不均匀性可能是造成脉动燃烧的主要原因,对于这个问题,我们正在研究水反应金属燃料药柱的浇注固化成型技术,未来的研究将采用浇注固化药柱。

其次,由于水的喷注、撞击、雾化、高速湍流流动,金属燃料的燃烧,金属颗粒、液滴或蒸气与水的掺混、反应及燃烧产生的大量固态金属氧化物与气态产物的混合等过程相互耦合,构成了复杂的多相反应燃烧体系,也有可能是造成脉动燃烧的原因之一,我们也正在逐步优化发动机系统,争取尽快掌握影响水冲压发动机性能的各种关键技术。

3 结论

理论计算结果显示水冲压发动机具有诱人的应用前景,原理样机试验验证了水冲压发动机的理论可行性。现有的试验系统和镁基水反应金属燃料能够进行水冲压发动机原理样机热试车,初步研究了镁基水反应金属燃料燃烧特性和水冲压发动机性能的影响因素,积累了一些水冲压发动机试验经验。但另一方面,由于本试验是国内首次针对水冲压发动机的热试车,因此在某种意义上也是一次探索性试验研究,今后将在燃速、燃速压强指数、一次燃烧喷射效率、燃烧稳定性等方面对燃料进行深入系统的研究,以改善水冲压发动机的综合性能。

参考文献:

- [1] 宋伟峰. 超空泡技术将改变海战模式[J]. 舰载武器, 2003(2): 20-22.
- [2] Foote J P, et al. Investigation of Aluminum Particle Combustion for Underwater Propulsion[C]//32nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, AIAA 96-3086, 1996.
- [3] Stinebring D R, et al. High-speed Supercavitating Vehicles[C]//Applied Research Laboratory Review 2000, 31-38, 2001.
- [4] Miller T F, et al. A Next-generation AUV Energy System Based on Aluminum-seawater Combustion[C]//AIAA 02-3788, 2002.
- [5] 李芳,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.
- [6] 李是良. 镁基水反应金属燃料性能研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2004.

