

文章编号:1001-2486(2005)04-0004-04

铝基水反应金属燃料性能初步研究*

李芳,张为华,张炜,阳世清,夏智勋

(国防科技大学 航天与材料工程学院,湖南长沙 410073)

摘要:提出水反应金属燃料双反应区模型,结合化学反应过程对其进行了热力特性分析,初步研究了铝基水反应金属燃料配方等因素对发动机性能的影响。

关键词:水反应金属燃料;双反应区模型;热力特性

中图分类号:V435 **文献标识码:**A

A Preliminary Research on the Performance of Hydroreactive Aluminium Metal Fuel

LI Fang, ZHANG Wei-hua, ZHANG Wei, YANG Shi-qing, XIA Zhi-xun

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

Abstract: The model of bi-reaction region of hydroreactive metal fuel is presented. In consideration of chemical reaction process, the thermodynamics character of hydroreactive metal fuel is analyzed. The influence of prescription and other factors on motor performance are investigated preliminarily.

Key words: hydroreactive metal fuel; model of bi-reaction region; thermodynamics character

水反应金属燃料是一种应用于水下高速武器推进的新型高能量密度燃料,包括镁、铝、锂以及相关化合物或其合金。水反应金属燃料与取之不竭的海水发生强烈放热反应,产生的热量使未参与反应的海水加热蒸发,并以高压蒸汽形式膨胀做功,从而推动水下航行体运动。水反应金属燃料在能量密度方面有明显优势,是固体火箭发动机的 4 倍以上^[1]。铝基水反应金属燃料使用最多,它反应产生的燃气温度高达 1060°C^[2]。20 世纪 90 年代以来,铝水反应水下热推进系统得到空前重视^[3]。

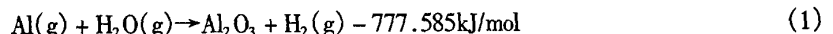
1 水反应金属燃料双反应区模型

铝基水反应金属燃料一般由金属铝或铝基合金(占 60%~95%)、氧化剂、粘合剂和添加剂等组成。与铝含量高的固体推进剂不同,铝基水反应金属燃料只有很少一部分发生自身燃烧反应,占主要地位的是熔融态或气态金属燃料与外界水蒸气反应,反应按两个区域考虑(如图 1 所示)。

点火后自身携带的固体氧化剂分解,气相分解产物与部分金属燃料反应,放出大量热量。这步反应一方面提高了反应区温度,使未反应的金属燃料预热、液化或汽化,另一方面喷出的气相产物将熔融态或气态金属燃料带到下一个反应区,为金属燃料与水反应提供了条件。这个反应在燃料表面进行,反应区较短。

金属燃料与水反应区主要是来自上一反应区的未反应金属燃料与水反应,金属 Al 的物态不同,反应效果不同。

铝蒸气—水蒸气反应:



此反应最先完成,反应放出的热量一部分提供给“液态铝—水蒸气”反应和“固态铝—水蒸气”反应,

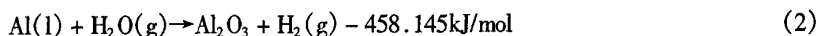
* 收稿日期:2004-11-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50376071)

作者简介:李芳(1980—),女,博士生。

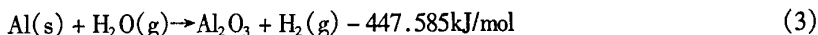
促进液态铝蒸发和固态铝熔化,另一部分提高区间温度。

液态铝—水蒸气反应:



液态铝一部分汽化,起到加长“铝蒸气—水蒸气”反应区的作用,另一部分与固态铝一起进入水雾区,在其运动轨迹上激起“液态铝—水蒸气”反应,直到反应完全,液态铝消亡。

固态铝—水蒸气反应:



固态铝表层受热升温,同时与遇到的水蒸气反应(其反应速度比前二者要慢),表层熔化形成熔化区,熔化区随颗粒的运动受热而扩大并深入内部。该反应区对颗粒大小有重要影响。

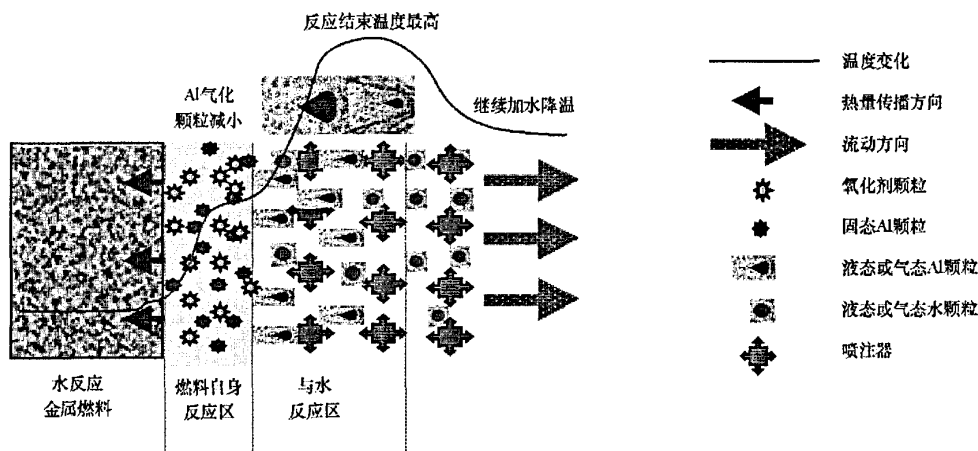


图1 水反应金属燃料双反应区模型

Fig.1 The model of bi-reaction region of hydroreactive metal fuel

2 铝基水反应金属燃料性能计算结果分析

2.1 铝基水反应金属燃料自身燃烧特性

根据水反应金属燃料反应模型,铝基水反应金属燃料自身燃烧的主要作用是释放热量,促进金属Al熔化或汽化,并产生大量气相产物,将未反应的金属Al带入下一反应区。为了保证足够的Al单质与水反应,要求这一步反应的燃烧产物中有效铝含量,即Al单质的质量百分比高。因此,平衡温度、气相产物摩尔数和有效铝含量是考察反应效果,指导推进剂配方研制的重要参数。

利用我们开发的铝基水反应金属燃料热力计算软件,对基础配方为金属铝、 KClO_4 (氧化剂)和HTPB(粘合剂)的铝基水反应金属燃料进行了理论计算。计算燃烧室压强为6MPa,推进剂组分百分含量改变时平衡温度、气相产物摩尔数和有效铝含量变化情况如图2~4所示。计算表明,同样的铝含量,氧化剂 KClO_4 增加,粘合剂减少时表现出如下趋势:

(1) 除铝含量很高时平衡温度变化不大以外,其他情况平衡温度显著升高,氧化剂 KClO_4 含量增加10%,平衡温度升高1000K;

(2) 凝相产物中KCl含量增加,导致气相总摩尔数明显减少,特别是Al含量为90%,无HTPB时,几乎所有产物为凝相;

(3) 推进剂自身燃烧消耗的的金属铝增加,导致有效铝含量降低。

分析表明,增加氧化剂 KClO_4 含量,虽然能够提高平衡温度,但由于 KClO_4 热分解产物KCl为凝相,影响了气相产物摩尔数,给燃烧产物流动和做功带来不利影响,所以应考虑采用其他氧化剂代替(如高氯酸铵分解产物都是气体)。计算发现,粘合剂HTPB同时起到增加气相产物摩尔数的作用。

从图2可看出,同样的氧化剂含量,增加金属铝有利于提高推进剂能量特性,使平衡温度升高。但如图3所示,同时增加了未反应的凝相产物含量,导致气相产物摩尔数下降。

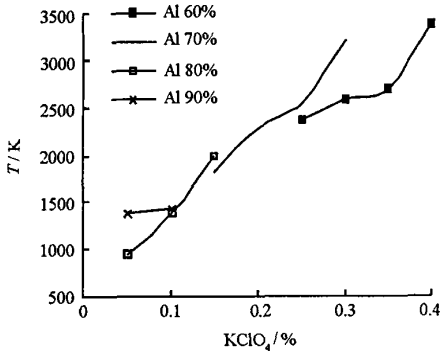


图2 燃烧温度随 KClO₄ 含量变化
Fig.2 Temperature vs KClO₄ %

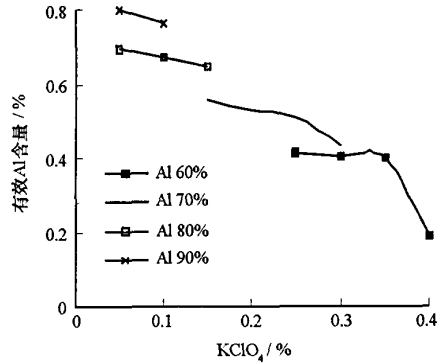


图3 有效铝含量随 KClO₄ 含量变化
Fig.3 Effective Al% vs KClO₄ %

2.2 加水后金属 Al 与水反应特性

根据铝基水反应金属燃料反应模型,加水后自身反应区的部分燃烧产物和未反应的三态铝与水继续发生放热反应。铝/水反应是铝基水反应金属燃料的主要反应,反应效果直接影响燃烧室、喷管的热力参数和发动机性能参数。利用铝基水反应金属燃料热力计算软件,通过三种配方(配方 1: Al 80%、HTPB 10%、KClO₄ 10%;配方 2: Al 75%、HTPB 10%、KClO₄ 15%;配方 3: Al 70%、HTPB 15%、KClO₄ 15%)考察了燃烧室压强为 6MPa,水燃比(W/F:加水量和水反应金属燃料质量之比)从 0 到 4 变化时,铝基水反应金属燃料平衡温度 T 、特征速度 C^* 和理论比冲 I_s 的变化。计算结果如图 5~7 所示。

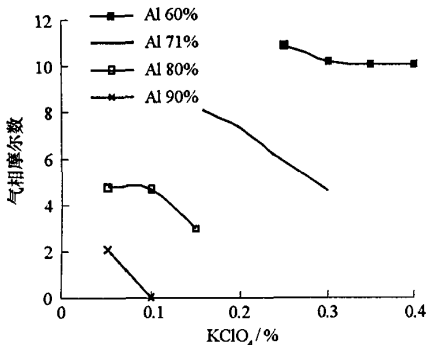


图4 气相摩尔数随 KClO₄ 含量变化
Fig.4 Gas mol Number vs KClO₄ %

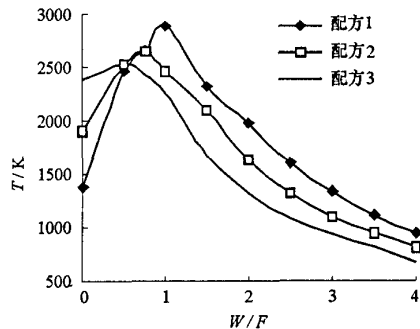


图5 温度随水燃比变化
Fig.5 Temperature vs W/F

三种配方下完全反应所需水燃比,即理论水燃比分别为:0.9、0.75 和 0.6。从图 5 可看出,达到理论水燃比之前,随着水的加入,平衡温度不断升高;超过理论水燃比后,再加入的水将起降温作用。金属铝含量越高,最终达到的平衡温度越高;但由于金属熔化或汽化吸收大量热量,所以未完全反应时,平衡温度反而较金属含量少的配方低。由此可见,为了使铝基水反应金属燃料达到预期能量特性,金属 Al 充分燃烧是关键。

特征速度是评定推进剂能量特性的重要指标。类似火箭发动机,水/金属燃料发动机特征速度正比于 $\sqrt{T/M}$ 。其中 T 为平衡温度; M 为燃烧产物平均分子量。小于理论水燃比时,随着铝/水反应的进行,氢气逐渐成为燃烧产物的主要成分, M 逐渐减小;大于理论水燃比后,燃烧产物主要成分由水蒸气取代, M 不断增加。由此可见, M 随 W/F 变化趋势与 T (图 5)相反,于是出现了图 6 所示的结果:特征速度的变化趋势与平衡温度一致,但变化幅度更大。

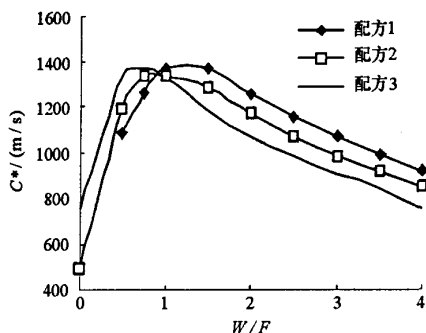


图6 特征速度随水燃比变化

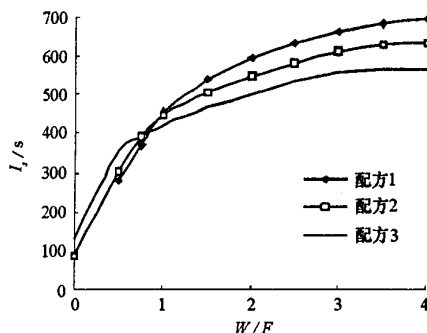
Fig.6 C^* vs W/F 

图7 比冲随水燃比变化

Fig.7 I_t vs W/F

类似火箭冲压发动机,水/金属燃料发动机理论比冲 I_t 由下式决定:

$$I_t = I/M_p * (1 + W/F) - V_{in} * W/F \quad (4)$$

其中, I_t 为发动机总冲; M_p 为推进剂质量; V_{in} 为进水速度。

从图7可看出, W/F 达到理论水燃比之前,理论比冲随着水的加入显著升高; W/F 在理论水燃比与4之间时,根据式(4),尽管总冲 I_t 因平衡温度和特征速度的显著下降而减小,但由于 W/F 的增加占主导地位,理论比冲 I_t 仍呈现缓慢上升趋势。计算表明,增加金属铝含量,有利于提高铝基水反应金属燃料能量特性和理论比冲。

铝基水反应金属燃料性能计算结果与物理现象吻合,定性表明水反应金属燃料双反应区模型合理。

3 结论

(1) 增加氧化剂含量,平衡温度显著升高,有效铝含量降低;

(2) $KClO_4$ 的凝相分解产物减少了气相摩尔数,对燃烧产物流动和做功造成影响;

(3) 小于或大于理论水燃比,水反应金属燃料平衡温度和特征速度变化趋势相反,比冲在研究范围内始终升高。

参考文献:

- [1] Kiely D H. Review of Underwater Thermal Propulsion[A]. Joint Propulsion Conference July 1-3, 1966, Lake Buena Vista, FL.
- [2] Kuehl D K. Ignition and Combustion of Aluminum and Beryllium[J]. AIAA J. 1965, 3(12).
- [3] Catoire L, et al. Kinetic Model for Aluminum-Sensitized Ram Accelerator Combustion[J]. Journal of Propulsion and Power, 2003, 19(2): 196-202.

