

镁基水反应金属燃料冲压发动机的工作特性

杨亚晶¹, 何茂刚²

(1. 西安交通大学 航天航空学院 机械结构强度与振动国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

摘 要: 针对水下高速航行器用镁基水反应金属燃料冲压发动机, 设定了 3 种质量组分配比的燃料, 结合热力计算和二维轴对称数值模拟研究其工作特性。其中, 两进水口处观测到的漩涡预言了在燃料燃烧过程中引发热声振荡的可能性。在 3 种燃料发动机各自的有效水燃比范围内, 通过数值模拟可知两次水燃比的分配直接影响发动机内的燃烧稳定性; 总水燃比的增加会引发一个最大的比冲值, 同时热效率和推进效率分别单调增加和降低。另外, 数值模拟和热力计算结果均显示燃料中镁含量的增加有益于发动机比冲及热效率的增加。本研究中燃烧特性、比冲及效率等工作特性随发动机工况的变化规律特征, 可指导发动机整体结构构型及总体性能优化的方向, 同时对发动机内潜在的热声振荡特性进行预估以便设计相应的抑制策略。

关 键 词: 镁基水反应金属燃料; 冲压发动机; 水燃比; 比冲; 数值模拟

中图分类号: TK48

文献标识码: A

引 言

20 世纪 90 年代以来国内外对金属基燃料冲压发动机的基础研究已经展开^[1~11], 铝基和镁基燃料冲压发动机的质量比冲, 明显高于传统液体(煤油 RP-1)及固体燃料(FR-DC)冲压发动机的比冲。

文献[5~6]已经对镁基水反应金属燃料(Mg/AP/HTPB)冲压发动机的推进性能和循环性能进行了理论预估, 本研究是以镁基水反应金属燃料冲压发动机为研究对象, 通过热力计算和二维轴对称多相流燃烧数值仿真, 对发动机内部流场特性进行模拟分析。同时, 探讨水燃比及镁基水反应金属燃料质量组分配比对发动机工作特性的影响规律, 进而为发动机系统构型研究提供理论基础, 加快镁基水反应金属燃料冲压发动机在高速水下航行器中应用的进程。

1 物理模型与计算方法

本研究的热力计算和数值分析均假定在燃烧室恒定压力 $p_c = 2.5 \text{ MPa}$ 下进行, 发动机采用两次进水方式, 如图 1 所示。其中, 镁基水反应金属燃料自身燃烧称为一次燃烧, 而一次燃烧产物与冲压海水的燃烧为二次燃烧。

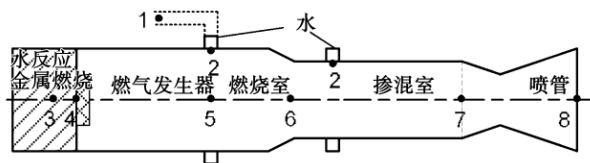


图 1 镁基水反应金属燃料
冲压发动机系统构型图

Fig. 1 Structural and model chart of a magnesium-based
hydroreactive metal fuel ramjet system

对于海水冲压模式, 水燃比 R_{wf} 是影响发动机性能的重要参数, 所以定义其为进水质量流量 $q_{m,w}$ 与水反应金属燃料质量流量 $q_{m,f}$ 之比, 即:

$$R_{wf} = q_{m,w} / q_{m,f} \quad (1)$$

理论水燃比 $R_{wf,t}$ 来界定 $\text{Mg}/\text{H}_2\text{O}$ 燃烧反应的完善程度, 定义为 1 kg 镁基水反应金属燃料一次燃烧产物中的活性物质恰好燃烧完全所需的进水量。所以, 选定了 3 种质量组分配比的燃料 F1、F2 和 F3, 假定均满足药柱的工艺性能, 其基本物性如表 1 所示。

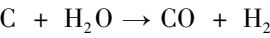
已知一次燃烧区很短, 在绝热、定压环境下快速完成, 针对二次燃烧进行重点模拟研究。通过热力计算得知镁基水反应金属燃料一次燃烧产物中含一定量的凝相颗粒 (MgO 、 MgCl_2 、C)^[12], 故在数值模拟中需引入惰性颗粒模型反映其对气相流场的影响。

收稿日期: 2011-05-19; 修订日期: 2011-09-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (NSFC1102151); 高等学校博士点学科专项基金资助项目 (20110201120022)。

作者简介: 杨亚晶 (1981-), 女, 内蒙古赤峰人, 西安交通大学讲师, 博士。

而控制方程组分为气相和离散相,气相方程采用非耦合求解器和隐式格式在二维轴对称坐标下求解,在 Lagrangian 坐标下,采用颗粒轨道模型跟踪离散相在流场中的运动和输运,离散相包括 MgO 惰性颗粒、Mg 燃烧颗粒和蒸发中的水滴。压力-速度修正采用 SIMPLE 算法,湍流模型采用 Spalart-Allmaras 模型,该模型对数值误差敏感性小,且在近壁面处输运变量梯度比 $k-\varepsilon$ 模型小。其中,一次燃烧产物中的活性 Mg 颗粒及析出的碳颗粒 $C(s)$ 均参与二次燃烧反应,由于发动机内典型 $C(s)$ 球平均粒径约为 70 nm ^[8],远小于金属颗粒,为简化计算,将 $C(s)$ 作为气相处理。气相化学反应采用一步总包反应,即:



上述反应为吸热反应,采用涡耗散模型来进行化学反应速率的计算,采用该模型可避免了复杂的 Arrhenius 化学动力学计算,同时每个反应都有相同的涡流速率。

表 1 F1、F2、F3 燃料对应的主要参数

Tab. 1 Main parameters corresponding to the F1, F2 and F3 fuel

燃料	质量 / %			ρ / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	R_{ufl}
	Mg	AP	HTPB		
F1	50	30	20	1507.33	0.4303
F2	60	24	16	1548.75	0.5215
F3	70	18	12	1592.51	0.5671

对于一次燃烧产物中的 Mg 颗粒,其燃烧速率可表示为:

$$r_{\text{Mg}} = -\frac{\rho_{\text{Mg}} \pi d^2}{2} \times \frac{dd}{dt} \tag{2}$$

式中: ρ_{Mg} —镁颗粒密度; d —镁颗粒直径。

已知水蒸气中镁颗粒燃烧时间表达式为^[9]:

$$t = \frac{Cd_0^2}{x_{\text{H}_2\text{O}}^{0.9} (1 + 0.25Re^{1/2})} \tag{3}$$

式中: d_0 —镁颗粒初始粒径, $x_{\text{H}_2\text{O}}$ —水蒸气的摩尔分数; Re —相对液滴雷诺数; C —常数,

$$C = \begin{cases} 0.007 \times 10^9, p_c = 0.1\text{ MPa} \\ 0.020 \times 10^9, p_c > 0.4\text{ MPa} \end{cases}$$

由式(2)、式(3)可得中等雷诺数下水蒸气中镁颗粒的燃烧模型,即:

$$r_{\text{Mg}} = \frac{\rho_{\text{Mg}} \pi x_{\text{H}_2\text{O}}^{0.9} (1 + 0.25Re^{1/2}) d}{4C} \tag{4}$$

由于一次燃烧产物温度很高且分布不均匀,其主要物性参数包括粘性系数 μ 、导热系数 λ 及比定压

热容 c_p 需考虑随温度 T 的变化。其中,产物 N_2 、 H_2 、 H_2O 和 $C(s)$ 的 μ 和 λ 随温度的变化规律取自模拟软件数据库,表 2 列出了 Mg、CO、 CO_2 的拟合关系式^[10], MgO 、 $MgCl_2$ 的 μ 和 λ 根据各自的基本物性取定值。各产物组分的比定压热容 c_p 随温度变化的规律获得:

$$c_p = A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4 \tag{5}$$

式中: A、B、C、D、E—系数。

表 2 一次燃烧产物的粘性系数和导热系数

Tab. 2 Viscosity coefficient and heat conduction coefficient of the primary combustion products

组分	$\mu = a + bT / \text{kg} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$		$\lambda = c + dT / \text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	
	$a \times 10^6$	$b \times 10^6$	$c \times 10^6$	$d \times 10^6$
Mg	3.51	2.17	209	30.43
CO	22.57	0.02	324000	400
CO_2	7.06	0.01	89995.40	81.51

2 初始边界条件

图 2 为镁基水反应金属燃料冲压发动机计算域的结构尺寸。气相控制方程入口为水反应金属燃料一次燃烧产物质量入口,其总温和各组分质量分数来自一次燃烧的热力计算结果。气相入口质量不计凝相颗粒和活性镁,二者由离散相入口进入流场,初始速度和温度与当地气相流动参数一致;壁面采用无滑移条件;温度采用绝热壁条件;由流场对称性给出轴对称边界条件;出口为超声速流动,无需解析边界条件,数值边界条件采用二阶外推。

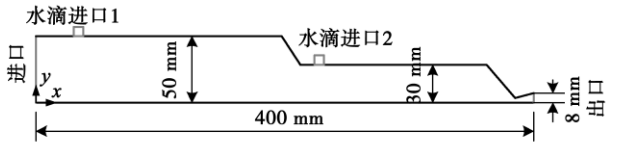


图 2 计算域结构尺寸

Fig. 2 Computational domain structure and dimensions

本研究将不考虑喷嘴的形式及安装角对液滴粒径分布的影响^[11],两次注入水均为组射流源 group 喷注模式,液滴分为 10 组,采用 Rosin-Rammler 分布函数计算粒径分布,分布指数为 3.5,初始温度为 298 K,出口速度由流量和出口面积获得,方向垂直于出口平面。

3 计算结果及分析

3.1 水燃比 R_{wf} 对发动机工作特性的影响规律

根据热力计算初步获得的有效水燃比范围,初步设定 F1 燃料冲压发动机两次进水的水燃比分别为 0.5 和 1.0,一次燃烧产物组分可据热力计算程序获得。

图 3 显示了气相流线及轴向速度分布。很明显,两次冲压水的喷射会对气相流动造成干扰和阻碍,两喷注位置聚集了大量液滴使得部分连续相暂时分离,在液滴群上游各形成一漩涡,气体流线在漩涡处发生扭曲。



图 3 气相流线图 (F1)

Fig. 3 Gas-phase streamline diagram (F1)

由于涡脱落自身具有周期不稳定性,当其发生在火焰前沿时,就可能与燃烧室的声压波动相互耦合,形成耦合自激振荡^[4]。显然,进水口处观测到的漩涡会随着水的喷射、蒸发、参与反应等过程完成产生-脱落-产生的交替过程。该现象会引发燃烧室内热释放的不均匀和不稳定,存在潜在的热声振荡,可能会给发动机的正常工作带来负面的影响,故在实际设计中要考虑热声振荡的抑制。

设定一次进水水燃比 $R_{wf,1}$ 分别为 0.5、0.8 和 1.0 (总水燃比为 1.5),图 4 为 F1 燃料冲压发动机轴线上的温度沿轴向的分布规律。很明显, $R_{wf,1} = 0.5$ 时,燃烧室轴线上的温度均高于 $R_{wf,1} = 0.8$ 和 1.0 的情况,已知 F1 燃料发动机的理论水燃比 $R_{wf,t} = 0.43$,故该一次进水可全部与镁蒸气反应,温度几乎达最高的绝热燃烧温度,如表 1 所示。对于 $R_{wf,1} = 0.8$ 和 1.0 的情况,多于理论水燃比的一次进水将起冷却高温燃气的作用,且燃烧室轴线上均出现了温度的高低波动,这是因为一次进水吸热蒸发为蒸汽后才能与一次燃烧产物中的镁蒸气反应,故温度首先急剧降低,当镁/水燃烧成为主要反应,剧烈的放热促使温度升高直至最高值,随着海水的进一步引入,温度又平缓下降。总之,随着一次水燃比的增加,发动机轴线温度沿轴向的波动加大,该现象预示着燃烧室内不稳定热释放波动的加大,若热释波

动的频率与燃烧室的固有特征频率满足了一定的相位关系,则会引发燃烧不稳定现象,在满足发动机性能的基础上,一次进水不易很大。

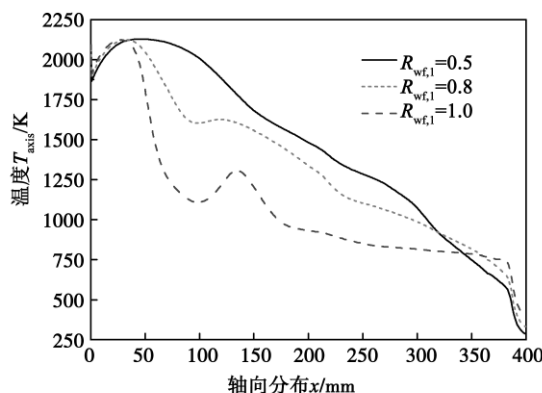


图 4 轴线上温度沿轴向分布 (F1)

Fig. 4 Axial distribution of temperatures at axes

比冲 I_{sp} 为发动机工作特性的重要表征量,研究时采用的计算式为:

$$I_{sp} = (1 + R_{wf}) u_e - R_{wf} u_w \quad (6)$$

式中: u_w 、 u_e —进水速度和燃烧产物在喷管出口处的速度。

热效率 η_t 和推进效率 η_p 为衡量发动机能量转换程度的两个重要的物理量。热效率受推进剂燃烧过程的完善程度和燃烧产物在喷管中流动特性的综合影响,其数值等同于发动机理想热力循环的循环效率,其计算式为^[3]:

$$\eta_t = 1 - Q_{ex}/Q_{en} \quad (7)$$

式中: Q_{ex} 、 Q_{en} —发动机循环放热量和吸热量。

而推进效率为发动机产生的喷气动能转变为推进功的程度,计算式为:

$$\eta_p = \frac{F u_w}{F u_w + q_m (u_e - u_w)^2 / 2} \quad (8)$$

式中: F —发动机产生的推力; q_m —喷管出口燃烧产物的质量流量。

理论比冲、热效率与推进效率均通过自行开发的热力计算程序获得。图 5 显示了 F1 燃料冲压发动机的理论比冲 I_{sp} 、热效率 η_t 和推进效率 η_p 随水燃比 R_{wf} 的变化规律。很明显,比冲量 I_{sp} 随水燃比的增加呈增大趋势,在 $R_{wf} = 3.7$ 时达到极大值 4689.32 N·s/kg,而后又逐渐降低。 η_t 随水燃比的增加单调降低, η_p 单调增加。据此,在发动机实际工作时,可权衡发动机性能的指标优化冲压进水量。

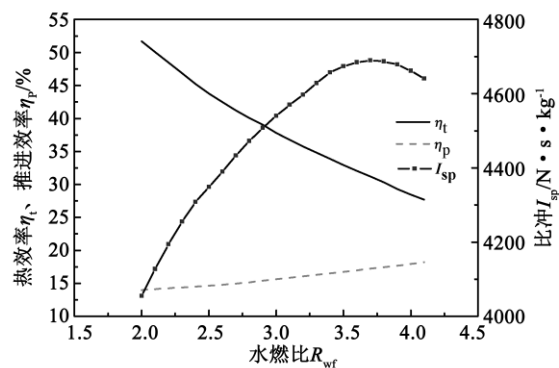


图 5 比冲 I_{sp} 、热效率 η_t 和推进效率 η_p 随水燃比 R_{wf} 的变化规律 (F1)

Fig. 5 Law governing the variation of specific impulse I_{sp} , thermal efficiency η_t and propulsion efficiency η_p with water/fuel ratio R_{wf}

3.2 燃料质量组分配比对发动机工作特性的影响规律

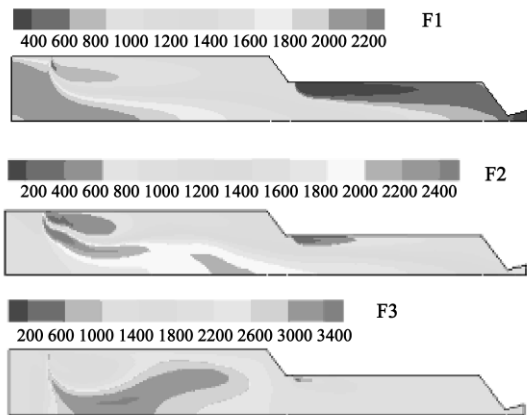


图 6 F1、F2、F3 燃料冲压发动机内气相温度分布 (K)

Fig. 6 Gas-phase temperature distribution inside a F1, F2 and F3 fuel ramjet

在相同的水燃比条件下,图 6 显示了 F1、F2 和 F3 燃料冲压发动机内气相温度场的分布。对于 F1 燃料冲压发动机,一次燃烧产物入口与一次进水之间的温度最高,约为一次燃烧产物的平衡温度(2 186.46 K)。一次进水后,燃烧室内将引发剧烈的二次燃烧反应,此区域的温度较入口区有一个逐渐的下降,因为水滴蒸发及碳/水气相化学反应的吸热量超过镁与水蒸气反应的放热量,从云图可以看出

温度的平均量级约为 1 500 K,该温度能够在水滴蒸发吸热的同时维持镁颗粒的点火和燃烧。掺混室内基本上不会再有反应发生,过量海水吸收热量蒸发汽化,温度逐渐降低为约 650 K。最后,燃烧产物在喷管内膨胀做功,温度急骤下降。

对于 F2 和 F3 燃料冲压发动机,气相温度的分布取决于 Mg/H_2O 燃烧放热、气相反应吸热($C + H_2O$)与过量海水蒸发吸热之间的热量消长,均在燃烧室内温度达到了最高。由于 F3 燃料一次燃烧产物中含有更多的活性镁颗粒,相应的气相产物组分较少,导致喷射效率降低,故一次进水路径几乎在不受一次燃烧产物影响的情况下直达到轴线位置,在中心轴附近碰撞后形成液滴,由于惯性作用,在燃烧室壁面之间会多次碰撞破碎,这增强了液滴与气相之间的掺混,也增加了液滴在燃烧室内的停留时间,故图 6 显示出 F3 燃料冲压发动机的高温区较 F2 燃料冲压发动机集中,几乎分布于整个燃烧室截面。

另外,前述 F3 燃料冲压发动机内大液滴的逐步破碎和蒸发现象,尽管在某种程度上增强了掺混燃烧过程同时增加了滞留时间,但液滴在逐渐破碎的同时还跟随气相向下游流动,更多的情况可能为海水还没来得及完全汽化和参与反应就已经进入温度较低的掺混室中,随着二次进水的引入,未完成的反应不再容易进行,导致镁颗粒的燃烧效率 E_c 和海水蒸发效率 E_v 都会降低($F1 > F2 > F3$),该定性规律在表 3 的数值计算结果中得以体现。

定义镁颗粒燃烧效率 E_c 和水滴蒸发效率 E_v 为:

$$E_c = 1 - \frac{m_{Mg,out}}{m_{Mg,in}} \tag{9}$$

$$E_v = 1 - \frac{m_{w,out}}{m_{w,in}} \tag{10}$$

式中: $m_{w,in}$ —进水总质量; $m_{w,out}$ —喷管出口处尚未蒸发的液滴质量; $m_{Mg,in}$ —一次燃烧产物总的镁颗粒质量; $m_{Mg,out}$ —喷管出口处尚未燃烧的镁颗粒质量。

表 3 F1、F2、F3 燃料冲压发动机的燃烧性能和推进性能 ($R_{wf} = 1.5$)
Tab. 3 Combustion and propulsion performance of a F1, F2 and F3 fuel ramjet ($R_{wf} = 1.5$)

	E_c	E_v	$u_e/m \cdot s^{-1}$	F/N	$I_{sp}/N \cdot s \cdot kg^{-1}$
F1	0.871 7	0.930 2	1 106.59	1 379.36	2 766.48
F2	0.858 8	0.919 0	1 306.91	1 268.73	3 267.28
F3	0.830 1	0.871 2	1 901.77	1 155.80	4 754.42

在水燃比 $R_{wf} = 1.5$ 条件下,表 3 列出了通过数值模拟获得 F1、F2 和 F3 燃料冲压发动机的 E_c 、 E_v 、 F 、 I_{sp} ,很显然,比冲量随着燃料中镁含量的增加而增大。已知热力计算程序可获得 F1、F2 和 F3 燃料发动机的水燃比上限分别为 4.1、4.6 和 5.0,故在保证发动机正常工作的条件下,图 7 显示了在有效的水燃比范围内,随着燃料中镁粉含量的增加,通过热力计算程序获得的理论比冲同样呈递增趋势($F3 > F2 > F1$),初步验证了所建数值模型的可信性,在 $R_{wf} = 1.5$ 时,F1、F2、F3 燃料发动机的比冲分别为 3 611.28、3 693.08、3 756.18 $N \cdot s/kg$,其具体数值与表 3 中实际比冲预示值的差别可能源于数值仿真在模型方面的简化。

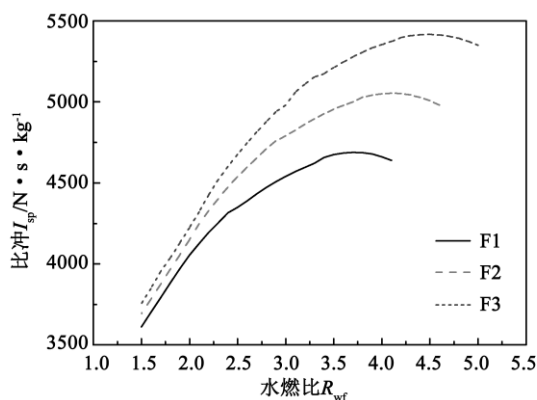


图 7 F1、F2、F3 燃料发动机的理论比冲 I_{sp} 随水燃比 R_{wf} 的变化

Fig. 7 Change of the theoretical specific impulse I_{sp} of a F1, F2 and F3 fuel ramjet with water/fuel ratio R_{wf}

基于热力计算程序,图 8 和图 9 分别呈现了理论热效率 η_t 和理论推进效率 η_p 随发动机工况的变化规律。很明显,在同一水燃比条件下,较高镁含量的燃料发动机对应着较高的热效率、较低的推进效率, $R_{wf} = 2.0$ 时,F1、F2、F3 燃料发动机的 η_t 分别为 51.69%、54.49%、56.71%, η_p 分别为 14.01%、13.85%、13.72%。另外,由于镁基水反应金属燃料冲压发动机更适用于水下航行器,水阻力的存在对继续增大推进效率意义不明显,可能还会花费更多的代价。故在实际发动机构型的设计与性能的预估时,应以提高热效率为主,在比冲性能满足要求的条件下,可适当减小进水水燃比、增加燃料中的镁粉含量,以有助于燃料燃烧及燃烧产物膨胀做功的完善。

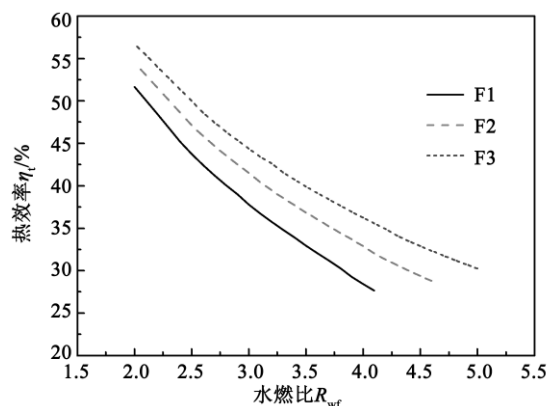


图 8 F1、F2、F3 燃料发动机热效率 η_t 随水燃比 R_{wf} 的变化

Fig. 8 Change of the thermal efficiency η_t of a F1, F2 and F3 fuel ramjet with water/fuel ratio R_{wf}

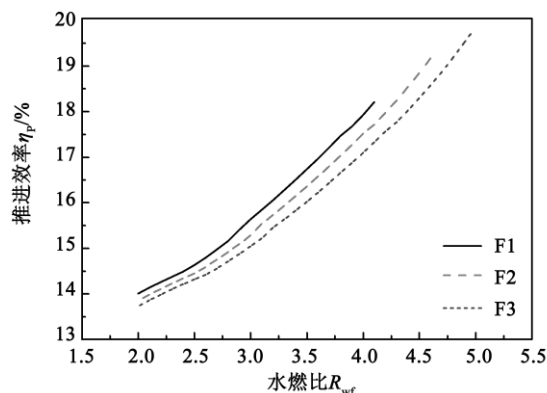


图 9 F1、F2、F3 燃料发动机推进效率 η_p 随水燃比 R_{wf} 的变化

Fig. 9 Change of the propulsion efficiency η_p of a F1, F2 and F3 fuel ramjet with water/fuel ratio R_{wf}

4 结 论

采用结合热力计算和数值模拟相结合的方法,获得了镁基水反应金属燃料冲压发动机的一些基本工作特性。

(1) 水燃比的分配对发动机轴线温度沿轴向的分布影响明显,增加一次进水水燃比,燃烧室内轴向温度波动增大,易激发热声振荡。在有效的工作水燃比范围内,随着总水燃比的增加,发动机比冲量逐渐增加到最大值后又逐渐减小,热效率单调降低,推进效率单调增加。对于 F1 燃料发动机,比冲在水燃比 R_{wf} 为 3.7 时达最大值 4 689.32 $N \cdot s/kg$,在 R_{wf}

= 2.0 ~ 4.1 范围内,热效率从 51.69% 降到 27.67%,推进效率从 14.01% 增加到 18.21%。

(2) 镁基燃料中镁含量的增加使发动机比冲量、热效率均有不同程度的增加,相反,推进效率呈降低趋势。在 $R_{wf} = 2.0$, $p_c = 2.5$ MPa 的条件下, F1、F2、F3 燃料发动机的比冲分别为 4 055.11、4 150.21、4 223.96 N·s/kg,热效率分别为 51.69%、54.49%、56.71%,推进效率分别为 14.01%、13.85%、13.73%。由此,燃料中镁含量增加 10%,比冲平均增加 85 N·s/kg 左右,热效率平均增加 2.5%,而推进效率平均只降低 0.14%,故在发动机实际设计时,可适量增加燃料中镁粉的含量以提高发动机的比冲和热效率,同时能保证有不低的推进效率。

上述关于镁基水反应金属燃料冲压发动机工作特性的理论研究,可指导更多的技术细节,包括有关振荡燃烧方面的进展及结构构型的完善。

参考文献:

- [1] Miller T F, Herr J D. Green rocket propulsion by reaction of Al and Mg powders and water [J]. AIAA-2004-4037, 2004.
- [2] 申慧君,夏智勋,胡建新,等. 粉末燃料冲压发动机燃烧室两相流数值模拟 [J]. 固体火箭技术, 2007, 30(6): 474-477.
SHEN Hui-jun, XIA Zhi-xun, HU Jian-xin, et al. Numerical simulation of the two-phase flow in the combustor of a powder fuel ramjet [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2007, 30(6): 474-477.
- [3] 申慧君,夏智勋,胡建新,等. 粉末燃料冲压发动机理论性能分析 [J]. 推进技术, 2007, 28(2): 181-185.
SHEN Hui-jun, XIA Zhi-xun, HU Jian-xin, et al. Analysis of the theoretical performance of a powder fuel ramjet [J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28(2): 181-185.
- [4] 胡凡,张为华,夏智勋,等. 水反应金属燃料发动机比冲性能与燃烧室长度设计理论研究 [J]. 固体火箭技术, 2007, 30(1): 12-16.
HU Fan, ZHANG Wei-hua, XIA Zhi-xun, et al. Theoretical study of the design of the specific impulse performance and combustor length of a hydrometallurgical fuel engine [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2007, 30(1): 12-16.
- [5] 胡凡,张为华,夏智勋,等. 镁基水反应金属燃料发动机性能分析方法与试验验证 [J]. 固体火箭技术, 2008, 31(2): 133-137.
HU Fan, ZHANG Wei-hua, XIA Zhi-xun, et al. Performance analytic method and test verification of a magnesium-based hydrometallurgical metal fuel engine [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2008, 31(2): 133-137.
- [6] YANG Ya-jing, HE Mao-gang. A theoretical investigation of thermodynamic performance for a ramjet based on a magnesium-water reaction [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2010, 24(1): 61-72.
- [7] YANG Ya-jing, HE Mao-gang. Theoretical investigation on water/metal fuel ramjet motor-thermodynamic cycle and thermodynamic calculation [J]. 航空动力学报(英文版), 2010, 25(5): 1129-1138.
- [8] Stowe R A, Dubois C, Harris P G. Two phase flow combustion modeling of a ducted rocket [J]. AIAA 2001-3461, 2001.
- [9] Svehla R A. Estimated viscosities and thermal conductivities of gases at high temperatures [R]. NASA Technical Report R-132, 1962.
- [10] 杨亭鹏,吴伟亮. 喷嘴安装角对横向气流中雾化液滴粒径影响的研究 [J]. 动力工程学报, 2010, 30(9): 668-672.
YANG Ting-peng, WU Wei-liang. Study of the influence of the installation angle of nozzles on the lateral air flow atomization particle diameters [J]. Journal of Power Engineering, 2010, 30(9): 668-672.
- [11] 张澄宇,孙晓峰. 加力燃烧室流场形态与振荡燃烧数值模拟 [J]. 航空动力学报, 2010, 25(2): 270-277.
ZHANG Cheng-yu, SUN Xiao-feng. Numerical simulation of the flow field configuration and oscillation combustion of an intensified combustion chamber [J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(2): 270-277.
- [12] 杨亚晶,何茂刚,徐厚达. 水冲压发动机的热力循环性能预示 [J]. 推进技术, 2009, 30(4): 474-478.
YANG Ya-jing, HE Mao-gang, XU Hou-da. Thermal circulation performance indication of a hydrometallurgical engine [J]. Propulsion Technology, 2009, 30(4): 474-478.

(辉 编辑)

· 书 讯 ·

《流动态特性的研究》

本书的主要内容是在对气液两相流动基本理论、基本实验和国内外该领域最新研究成果总结、分析研究的基础上,归纳和总结了二十余年来在两相流动动态特性分析方面的研究成果,对目前正被逐渐接受并被应用的各种不同类型的动态研究方法作了较详细的介绍。

第1章 气液两相流动动态特性基础理论

第2章 气液两相流动动态特性研究方法的理论

第3章 非线性动力学理论及其在两相流动动态特性研究中的应用

第4章 两相流动动态特性的实验研究

第5章 油气混输两相流动动态特性的研究

上海交通大学出版社出版

出版时间: 2012-02-29

heat exchange capacity while the cooling effectiveness will depend on the flow status of the air film relative to the blade profile and the mixing and dilution capacity with the main stream. **Key words:** air-film cooling, discrete hole, curvature, air blow ratio, heat transfer coefficient

镁基水反应金属燃料冲压发动机的工作特性 = Operating Characteristics of a Magnesium-based Hydoreactive Metal Fuel Ramjet 刊, 汉 YANG Ya-jing(National Key Laboratory on Mechanical Structural Strength and Vibration, College of Astronautics and Aeronautics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) , HE Mao-gang(College of Energy Source and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27(2) . - 154 ~ 159

For a underwater high speed aircraft-purposed magnesium-based hydoreactive metal fuel ramjet, set were fuels mixed in three component mass proportions and in conjunction with the thermal calculation and two-dimensional axis-symmetrical numerical simulation, studied were its operating characteristics. In this connection, the vortexes observed at both inlets foreshow that during the fuel combustion process, it is possible to result in a thermoacoustic oscillation. Within the effective ranges of water/fuel ratio specific to the ramjet burning three kinds of fuel respectively, the numerical simulation results show that the distribution of water/fuel ratios in two times will directly influence the combustion stability inside the engine. To increase the total water/fuel ratio will produce a maximal specific impulse and in the meantime, the thermal efficiency and the propulsion efficiency will increase and decrease respectively in a monotonous way. In addition, both numerical simulation and thermal calculation result indicate that to increase the magnesium content in the fuel will help increase the specific impulse and thermal efficiency of the engine. The law and characteristics governing the change of such operating characteristics of the engine as combustion characteristics, specific impulse and efficiency etc. can offer guide for optimizing overall structure and performance of an engine and at the same time, predict the intrinsic thermoacoustic oscillation characteristics of an engine so as to design corresponding control tactics. **Key words:** magnesium-based hydoreactive metal fuel, ramjet, water/fuel ratio, numerical simulation

汽轮机级组特征通流面积的应用 = Application of the Steam Turbine Stage Characteristic Flow Path Area 刊, 汉 WANG Yun-min, ZHANG Lun-zhu, MA Hai-long(College of Energy Source and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, China, Post Code: 410076) , XU Da-mao(China Guangdong Nuclear Power Group Co. Ltd. , Shenzhen, China, Post Code: 518031) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012, 27 (2) . - 160 ~ 164

Described were relevant expressions of steam turbine stage characteristic flow path areas in practical engineering ap-