

高过载条件下绝热层烧蚀实验方法研究 (㊦) 收缩管聚集法*

李 江, 何国强, 陈 剑, 刘 洋, 娄永春

(西北工业大学 航天工程学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 发展了一种能开展高过载条件下绝热层烧蚀研究的模拟实验方法——收缩管聚集法, 研制了收缩管聚集高过载模拟烧蚀实验装置。对实验装置及固体火箭发动机过载条件下的三维两相内流场开展了对比数值模拟, 结果表明这种实验装置产生的高浓度粒子流与40g纵横向过载条件下发动机内形成的高浓度粒子流状态很接近, 说明这种实验方法是可以模拟高过载条件下绝热层烧蚀环境的。利用这套实验装置开展了高浓度粒子流冲刷条件下绝热层烧蚀实验, 对6种绝热材料开展的烧蚀实验表明: 所有试件表面均被冲刷出一个凹坑, 说明粒子冲刷对绝热层烧蚀影响很大。凹坑最大烧蚀部位与数值模拟得到的粒子浓度最大部位基本吻合。

关键词: 高加速度; 固体推进剂火箭发动机; 绝热层; 烧蚀

中图分类号: V435.14 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2004) 03-0196-03

Study of experimental method for ablation of insulator of SRM with high acceleration (㊦) Convergent tube experimental method

LI Jiang, HE Guo-qiang, CHEN Jian, LIU Yang, LOU Yong-chun

(Coll. of Astronautics, Northwestern Polytechnical Univ., Xi'an 710072, China)

Abstract: The key technique to the investigation of ablation characteristic of the insulators of solid rocket motor with high acceleration is to develop a method to produce high concentration particles stream. A convergent tube experimental method was developed based on the previous principle experiments. A convergent tube test facility was designed to demonstrate this method. Three-dimensional two-phase numerical simulations were carried to compare the particles distributions of this test facility and the solid rocket motor with high acceleration. Numerical results showed that high concentration particles distribution in test facility was similar to that in the chamber of rocket motor with 40g longitudinal and lateral accelerations. Ablation experiments of six kinds of insulator were carried in this convergent tube facility. The experimental results showed that a cavity was formed on the surface of insulator due to the erosion of high concentration particles stream. This phenomenon indicated that erosion of particles has a strong influence on the insulator ablation. The location of cavity accorded with the location of the highest concentration of particles of numerical results.

Key words: High acceleration; Solid propellant rocket motor; Heat insulation layer; Ablation

1 引 言

新一代防空导弹对机动能力要求越来越高, 导弹在强机动过程中要承受很高的过载, 尤其是横向过载。对于采用含金属推进剂的发动机, 高过载会改变发动机内凝相粒子的运动规律, 粒子有可能在发动机

一侧高度聚集形成高浓度粒子流。它对发动机内流场和装药燃烧会产生很大的影响, 并恶化了发动机绝热层的工作环境, 严重时会导致内绝热层防护失效, 发动机烧穿。高浓度粒子流冲刷条件下绝热材料的烧蚀规律与常规条件下是有很大的差别, 国内外在这方面的研究工作很有限, 重要原因就是缺乏有效的实验

* 收稿日期: 2003-05-26; 修订日期: 2003-12-24。

作者简介: 李 江 (1971—), 男, 博士, 副教授, 研究领域为航空宇航推进理论与工程。E-mail: wmywh@sohu.com

手段。目前的实验方法主要是旋转试验台,但这种方法在模拟横向过载时难于克服哥氏加速度的影响使得其应用受到很大的限制。针对这种情况提出了一种新的研究方法:通过开展过载条件下发动机三维两相流数值模拟获得高浓度粒子流分布;然后通过实验装置产生高过载状态的高浓度粒子流开展绝热层烧蚀实验。模拟高过载状态产生高浓度 Al_2O_3 粒子流是其中的关键技术。前期开展了可行性论证和数值模拟研究^[1],并开展了原理性实验。本文在此基础上提出了一种有效的实验方法——收缩管聚集法,首先通过数值模拟来验证这种方法的可行性,然后研制了实验装置并开展了烧蚀实验。

2 实验装置设计

利用收缩管聚集法模拟高过载高浓度粒子流进行烧蚀实验的装置结构如图1所示,装置由燃气发生器、药柱、点火器、收缩管、转折法兰、试验段、试件和喷管组件等部分构成,其关键部件是一个以一定角度收缩的收缩管,燃气经过收缩通道时,凝相粒子由于惯性大会向中心聚集,从而形成高浓度粒子流。根据前期数值模拟及原理性实验的经验,收敛角选 40° 聚集效果比较好。为了便于调整冲刷角度及试件烧蚀率测量,试验段采用方形结构,通过更换不同的转折法兰来调整试件与来流之间的夹角。

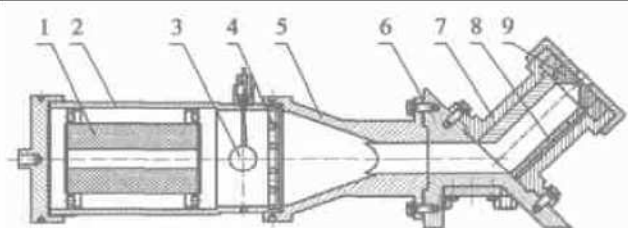


Fig. 1 Ablation test facility with convergence tube

1) Grain; 2) Chamber; 3) Ignitor; 4) Trap; 5) Convergent tube;
6) Transition flange; 7) Test section; 8) Sample; 9) Nozzle

要开展高浓度粒子冲刷条件下绝热层烧蚀研究,首先要确定主要的影响因素,通过改变影响因素开展绝热层烧蚀实验,分析这些影响因素与绝热层烧蚀特性之间的关系,最终建立烧蚀模型。通过对高过载条件下绝热层烧蚀特性的分析,确定出6个主要影响因素:压强、燃气温度、粒子浓度、粒径、燃气冲刷速度和角度,实验装置要能对这6个参数进行调节和控制,并且能够确定实验状态下的参数数值。本文发展的实验装置采用的参数调节和确定方法为:(1)压强可以通过改变装药量和喉径之间的关系来进行调节,实验时测量燃烧室压强;(2)燃气温度可以通过调整推

进剂配方来进行调节,并通过热力计算确定其数值;(3)粒子浓度可以通过调整推进剂中铝粉含量以及调节收缩通道构型来调整,聚集后的粒子浓度要通过两相流数值模拟来确定;(4)粒子粒径可以通过调整推进剂中铝粉粒径来改变,然后通过一种收集和测量装置来进行统计测量。目前的计算仍选取单一粒径 $70\mu\text{m}$;(5)燃气冲刷速度可以通过改变燃气流量、试验段通道面积和喷管喉径之间的匹配关系进行调节,其数值可以通过流场计算确定;(6)燃气冲刷角度可以通过更换转折法兰来进行调节。

3 数值模拟

两相流计算模型采用欧拉-拉格朗日法,即气相流场在欧拉坐标系下求解三维N-S方程,粒子相在拉格朗日坐标下跟踪求解,粒子相与气相之间的质量、动量和能量交换通过控制方程中的源项作用到气相上。气相流场采用二阶迎风格式进行离散,湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 模型。粒子粒径分布和碰撞恢复系数对于计算来说是很关键的参数,但由于缺乏这方面的数据,只能根据文献[2~4]及以往研究中积累的经验来取值。虽然固体火箭发动机中粒子粒径是在一个很宽范围的分布,考虑到对绝热层烧蚀影响较大的是大粒子,因此计算中粒径统一取 $70\mu\text{m}$ 。粒子碰撞恢复系数取0.8。针对某种高过载发动机开展了不同过载条件下的三维两相流场的数值模拟,图2为纵横向过载为 $40g$ 条件下的粒子浓度分布,从图中可以看出,在承受过载一侧的壁面上粒子高浓度聚集,其最大浓度为 $130\text{kg}/\text{m}^3$ 。图3是针对收缩通道实验装置开展的三维两相流数值模拟结果,从粒子浓度云图中可以看出,经过收缩通道后粒子向中心汇聚,粒子到达绝热层壁面的浓度达到了 $130\text{kg}/\text{m}^3$ 。另外对比燃气和粒子的冲刷速度,两种状态也是比较接近的。计算表明:收缩管实验装置产生的高浓度粒子流与高过载条件下发动机内形成的高浓度粒子流状态是比较接近的,最大浓度数量也是相当的,可见收缩管方案是可以用来模拟高过载条件开展烧蚀实验的。

此外还研究了转折角、粒子碰撞恢复系数、粒径等对粒子聚集密度的影响规律,计算结果得到的结论主要有:(1)实验装置中粒子与收缩通道壁面的碰撞只有一次,而且入射角都很小,因此粒子碰撞的能量衰减比较小。(2)冲刷试件表面的粒子速度与气相速度差别不是很大,实验中可以近似用气相速度代表粒子的冲刷速度。(3)粒子碰撞恢复系数对粒子聚集浓

度有一定的影响,因此确定合理的碰撞恢复系数对于粒子浓度计算是比较重要的。(4)绝热层试件夹角从30°到60°范围变化,粒子最大聚集浓度变化不大,可以认为实验中试件夹角在这个范围内变化粒子聚集浓度不变。

4 绝热层烧蚀试验

4.1 实验状态参数

推进剂采用含铝17%的复合推进剂,燃气温度约为3400K。装药为两端包覆内外孔燃烧药柱,燃气流量为0.8kg/s。试验段冲刷速度约为55m/s,近似认为冲刷角度为试件夹角45°。绝热层试件为6种不同



Fig. 2 Concentration distribution of particles in chamber with 40g longitudinal and lateral accelerations

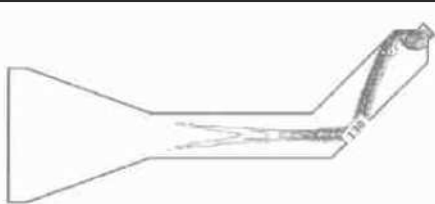


Fig. 3 Concentration distribution of particles in test facility

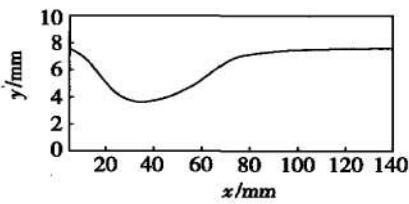


Fig. 4 Left thickness of sample B after ablation

表1为6种绝热材料最大烧蚀部位和烧蚀率的数据,从表中可以看出6种材料的最大烧蚀率有比较明显的差别,烧蚀率最大为1.79mm/s,最小为1.45mm/s。实验条件下6种绝热材料的抗烧蚀能力由强至弱的顺序为:D,F,C,B,E,A。

Table 1 Ablation data of insulators

Sample	Chamber pressure/MPa	Ablation time/s	X coordinate of maximum ablation rate/mm	Maximum ablation rate/(mm/s)
A	5.0	3.75	40	1.79
B	5.5	3.70	35	1.71
C	6.0	3.65	40	1.61
D	5.7	3.70	40	1.45
E	6.0	3.55	30	1.77
F	5.5	3.75	45	1.53

粒子冲刷加剧绝热层烧蚀的主要原因可能是粒子对炭化层的机械剥蚀效应,这种效应加剧了表面炭化层的脱落,使得炭化层对热解层及基体层的保护作用减弱,从而加快了烧蚀速率。此外粒子流造成热流密度增大也是一个重要的原因。

5 结 论

(1)发展了一种能开展高过载条件下绝热层烧蚀研究的模拟实验方法——收缩管聚集法,数值模拟及烧蚀实验证明这种方法是可行的。

配方的三元乙丙绝热材料,试件初始厚度10mm。

4.2 实验结果分析

以试件B为例对高浓度粒子冲刷条件下绝热层烧蚀情况进行分析。从实验的内弹道曲线可以确定烧蚀时间为3.75s,平均压强为5.5MPa。图4为试件中心线的剩余厚度曲线,可以看出 $x=5\sim 80\text{mm}$ 的区间被冲出一个凹坑,最大烧蚀部位为 $x=35\text{mm}$,最大烧蚀率为1.71mm/s,非凹坑区域平均烧蚀率为0.64mm/s。与流场数值模拟结果对照,最大烧蚀部位与粒子浓度最高点位置基本吻合,说明粒子浓度对绝热层烧蚀影响很大,此外还证明了本文采用的数值模型及所取粒径和碰撞恢复系数是基本合理的。

(2)绝热层烧蚀实验表明,绝热层试件正对高浓度粒子流的部位被冲蚀出一个凹坑,最大烧蚀部位与数值模拟得到的粒子浓度最大部位基本吻合,说明粒子浓度是影响绝热层烧蚀的一个很重要的因素,验证了数值模型及所取粒径和碰撞恢复系数的合理性。

(3)对6种绝热材料高浓度粒子冲刷条件下烧蚀特性做出了评判,实验条件下烧蚀率最大为1.79mm/s,最小为1.45mm/s。

参考文献:

[1] 李江,何国强,秦飞,等.高过载条件下绝热层烧蚀实验方法研究(Ⅳ)方案论证及数值模拟[J].推进技术,2003,24(4). (LI Jiang, HE Guo-qiang, QIN Fei, et al. Study of experimental method for ablation of insulator of SRM with high acceleration (Ⅳ) [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2003, 24(4).)

[2] Murphy P J. Measurement and analysis of laser transmission through solid propellant rocket motor exhaust plumes [R]. AIAA 93-2886.

[3] Traineau J C. Particle size distribution in a subscale motor for the Ariane5 solid rocket booster[R]. AIAA 92-3049.

[4] Sambamurthi J K. Plume particle collection and sizing from static firing of solid rocket motor[R]. AIAA 95-2590.

(编辑:梅 瑛)