

文章编号: 1000-8055(2002) 05-0641-04

某典型振动条件下发动机点火试验研究

利凤祥¹, 李越森¹, 周为民²

(1. 陕西动力机械研究所, 陕西 西安 710025;

2. 航天科技集团第四研究院, 陕西 西安 710025)

摘要: 以某飞行器主动段飞行故障中屡屡出现低频振动现象为背景, 通过设计振动点火试验台, 模拟空中飞行的振动环境, 进行了低频振动条件下的发动机点火试验, 研究了该低频振动对固体发动机药柱结构完整性、发动机内弹道性能以及燃烧室内绝热层烧蚀性能等的影响, 研究结果初步证明, 飞行过程中出现的低频振动不破坏发动机药柱的结构完整性, 对发动机主要内弹道性能也不产生较大影响, 但对振动方向上的推进剂燃速与绝热层的烧蚀率产生一定影响。该项研究可为相关的工程问题提供依据。

关键词: 低频; 振动; 固体发动机; 点火试验; 烧蚀

中图分类号: V435+.12

文献标识码: A

A Research of SRM Firing Tests under a Kind of Typical Vibration

LI Feng-xiang¹, LI Yue-sen, ZHOU Wei-min²

(1. Shanxi Inst. of Power Machinery, Xi'an 710025, China;

2. The Fourth Academy of CASC, Xi'an 710025, China)

Abstract: An experimental investigation has been performed and presented in the papaer to clarify the effects of low-frequency vibration on the rocket moter performance which occurred a number of times during the active flight period of a missile. Firing tests of a small-size motor mounted on a vibration stand simulating low-frequency vibration in flight have been conducted. Some problems such as grain structural integrity, motor internal ballistic propereties and insulation erosion have been studied. The preliminary results show that low-frequency vibration in flight does not destroy grain structural integrity and does not remarkably affect main motor performances, but burning rate of propellant and ablation rate of insulation in vibration direction are influenced to some extent. The research results can provid some basis for relevant engineering design.

Key words: low frequency; vibration; SRM; firing test; erosion

1 前言

关于振动对固体发动机性能的影响, 国外的 Greatrix D R 研究了结构振动对发动机内弹道性

能的影响^[1,2]。国内目前仅局限于各种地面振动试验(非点火状态)的研究, 如公路运输振动试验、铁路运输振动试验等, 而对于飞行环境下的振动现象缺乏重视, 研究较少。某飞行器在其主动段飞行

收稿日期: 2001- 11- 15; 修订日期: 2002- 03- 01

作者简介: 利凤祥(1963-), 男, 陕西人, 陕西动力机械研究所研究员, 西北工业大学航天学院博士生, 主要从事固体发动机内弹道研究。

故障前多次出现低频($\leq 100\text{ Hz}$)、高 g 值($\geq 10\text{ g}$) 振动, 此现象对于发动机工作的影响及影响程度值得关注。但由于飞行振动边界条件复杂, 准确建立理论计算模型较为困难^[3, 4], 因此有必要进行低频振动条件下的发动机点火试验研究, 了解其对发动机性能的影响^[5, 6]。

2 模拟振动点火试验

2.1 试验简介

为模拟空中飞行状态, 我们设计了振动点火试验台, 如图 1 所示。试验发动机可在试验台上较为自由地移动, 振动频率与振动加速度由激振器施加。试验的目的是研究某典型低频振动对发动机药柱结构完整性、发动机内弹道性能(即压强、压强冲量、工作时间等)、绝热层烧蚀率等的影响。振动条件分别是: 78 Hz , 12 g ; 78 Hz , 18 g , 共进行了 10 数发试验, 获得了不同振动条件下的 $p-\tau$ 曲线与测试数据。

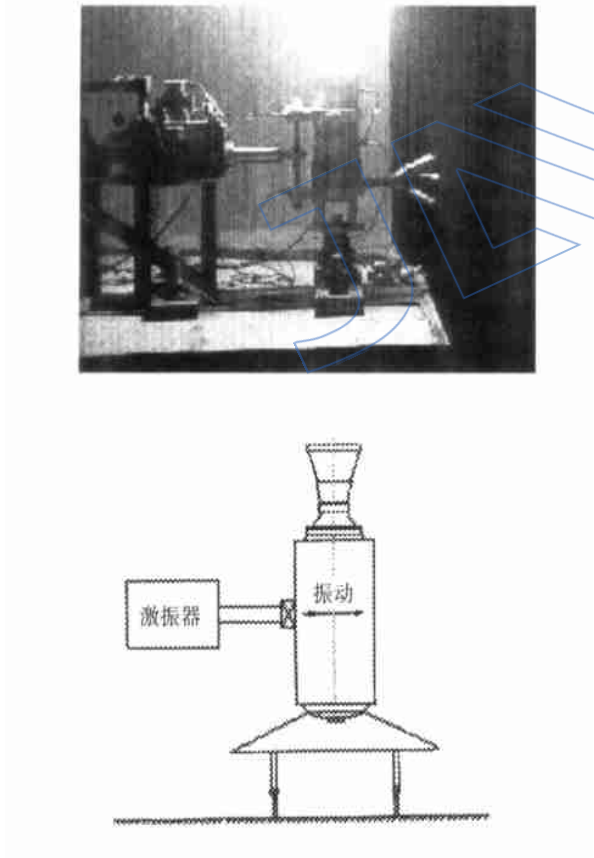


图 1 振动点火试验及其示意图
Fig. 1 Vibration firing test and schematic diagram

2.2 试验现象描述

对历次试验结果进行观察, 发现如下现象:

(1) 采用有翼结构三维药柱的模拟发动机进行完整性试验, 分别在 $30, 60, 150\text{ min}$ 时间内作低频振动考核, 然后对试验发动机进行分解检查, 发现药柱表面完好、药柱翼片部位无裂纹产生、药柱/衬层/绝热层/壳体各界面无脱粘迹象。

(2) 采用内孔药柱的模拟试验发动机进行低频振动点火试验, 试验曲线如图 2 所示。发动机工作末尾, 主火焰消失之后瞬间又有一股火焰喷出, 此时发动机工作完毕。在 $p-\tau$ 曲线上显示出尾端上翘。试验后的绝热层试验件内壁沿振动方向没有明显的 Al_2O_3 粒子沉积, 燃烧室内壁四周也没有发现 Al_2O_3 沉积现象。

3 振动点火试验结果

振动点火试验 $p-\tau$ 曲线如图 2、3 所示, 发动机主要内弹道性能参数见表 1。

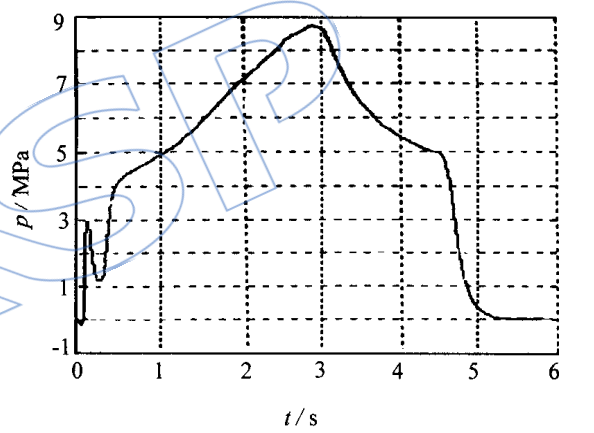


图 2 静态试验 $p-\tau$ 曲线
Fig. 2 $p-\tau$ curve under static test

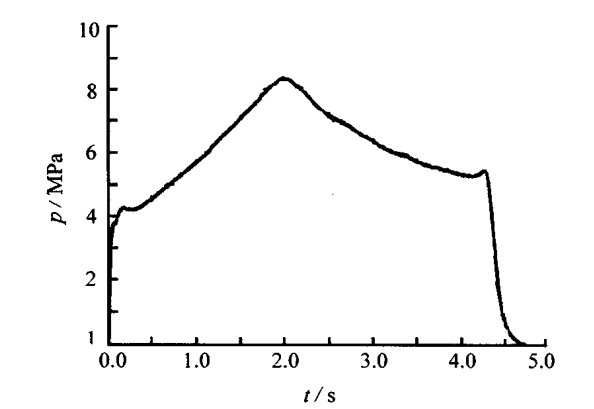


图 3 78 Hz , 12 g 振动试验 $p-\tau$ 曲线
Fig. 3 $p-\tau$ curve under vibration test
(78 Hz , 12 g)

表 1 试验发动机主要性能参数

项 目	最大压强/MPa 及对应时间/s	压强冲量/(MPa·s)	工作时间/s
78 Hz 12 g	9.05/ 2. 19	2. 688	4. 49
	8. 22/ 2. 25	2. 727	4. 51
78 Hz 18 g	8. 23/ 2. 30	2. 696	4. 72
	8. 45/ 1. 98	2. 628	4. 62
静 态	8. 70/ 3. 15	2. 753	4. 60

分别对绝热试验件沿振动方向与垂直于振动方向进行解剖, 选择不同的部位, 对疏松炭化层、绝热层剩余厚度进行精确测量, 计算绝热层最大烧蚀率, 结果见表 2。

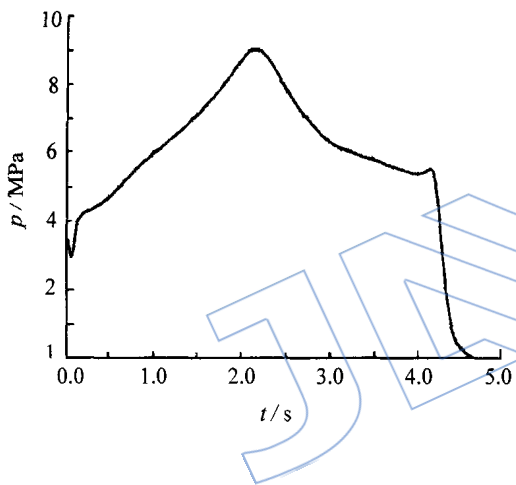


图 4 78 Hz, 18 g 振动试验 $p-t$ 曲线
Fig. 4 $p-t$ curve under vibration test
(78 Hz, 18 g)

表 2 绝热层烧蚀率

项 目	绝热层烧蚀率/(mm/s)	
	振动方向	垂直于振动方向
78 Hz 12g	0. 23	0. 20
	0. 24	0. 19
78 Hz 18 g	0. 26	0. 22
	0. 24	0. 21
静 态	0. 19	

4 试验结果分析^[7]

4. 1 低频振动对发动机药柱结构完整性的影响

如 2. 2 所述, 翼柱型结构药柱试验发动机的振动试验以及低频振动点火试验结果(发动机工作正常、压强- 时间曲线正常) 表明, 复合推进剂本身的力学性能、目前通用的三维翼柱结构药型以及推进剂/ 衬层/ 绝热层/ 壳体各界面的粘接强度能够承受低频振动的破坏, 也就是说低频振动对发动机药柱结构完整性不产生影响。

4. 2 低频振动对发动机内弹道性能的影响分析

表 1 的数据显示, 振动条件下发动机的最大工作压强、压强冲量、工作时间等主要内弹道性能指标与静态下的性能参数比较没有明显差别, 幅值变化在 4. 0% 以内, 属工程允许范围。但是振动条件下, 发动机最大工作压强出现的时间均提前于静态下最大工作压强出现的时间。最大压强提前出现, 而幅值却没有异常变化, 这说明低频振动条件下药柱燃速在局部范围增大了, 导致最大燃面提前出现。局部燃速增大, 导致内孔药柱燃烧产生不均匀, 出现少量残药。振动点火试验中最后喷出的火焰很可能是该残药燃烧所致, 在 $p-t$ 曲线尾端形成凸起。由此初步证实, 低频振动对发动机内弹道性能影响较小, 但对药柱局部燃速存在一定影响。

4. 3 低频振动对燃烧室内绝热层烧蚀的影响分析

与离心过载试验相比, 振动试验没有造成 Al_2O_3 粒子的大量沉积, 因而其对绝热层的烧蚀没有过载试验那样严重。根据表 2 的数据, 78 Hz、12 g 振动条件下, 沿振动方向上的绝热层烧蚀率比静态大约 20%, 并有随振动加速度增大而增大

的趋势;而其它部位绝热层烧蚀率与静态相比几乎没有变化。振动方向上绝热层烧蚀率的增大说明发动机工作过程中的振动引起燃烧室内流场发生变化,流场的这种变化使得振动方向上热传递增大并加快,从而使得该方向上的推进剂燃速升高,绝热层烧蚀加重。

5 结 论

本项研究初步证明,飞行过程中出现的低频振动不破坏发动机药柱的结构完整性,对发动机主要内弹道性能也不产生较大影响,但对振动方向上的推进剂燃速与绝热层的烧蚀率产生一定影响。由此建议导弹总体尽量消除全弹飞行中的低频振动,为固体发动机正常工作创造良好环境。

参考文献:

[1] Greatrix D R. Structural Vibration and Solid Rocket Combustion Instability[J]. Canadian Aeronautics and Space Journal, 1998, 44(1): 9- 24.

[2] Greatrix D R. Internal Ballistic Model for Spinning Star-Grain Motors[J]. Journal of Propulsion and Power, 1996, 12(3): 612- 614.

[3] 胡海昌. 多自由度结构固有振动理论[M]. 北京: 科学出版社, 1981.

[4] 陈塑寰. 结构振动分析的矩阵摄动理论[M]. 重庆: 重庆出版社, 1991.

[5] 张如洲. 加速度对丁羟推进剂燃速的影响[J]. 兵工学报, 1988, 17(2): 28- 31.

[6] Mitani T, Niilka T. An Analytical and Experimental Study for Solid-Propellant Combustion in an Acceleration[J]. Combustion Science and Technology, 1973, 8(3): 61- 66.

[7] 何洪庆, 张振鹏. 固体火箭发动机气体动力学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1988.

(责任编辑 杨再荣)

