

文章编号: 1000-8055 (2004) 02-0278-05

横向加速度对飞行发动机 绝热层烧蚀影响的实验研究

李越森, 叶定友, 利凤祥
(陕西动力机械研究所, 西安 710025)

摘要: 设计了实验发动机与实验装置, 进行了一系列飞行固体火箭发动机横向过载模拟试验, 获得了不同加速度下发动机内绝热层烧蚀率量化的试验数据。验证了横向加速度严重影响局部绝热层烧蚀的事实。机理分析表明, 此种结果是由于横向加速度作用下燃气中 Al_2O_3 液态粒子偏离发动机中心线, 沿离心力方向大量沉积所致。此项研究为相关的工程设计提供了基础性的依据。

关键词: 航空、航天推进系统; 固体发动机; 横向加速度; 绝热层; 烧蚀率
中图分类号: V 435 **文献标识码:** A

An Experimental Study of SRM Insulation Erosion Performance under Transverse g-Load in Flight

LI Yue-sen, YE Ding-you, LI Feng-xiang
(Shaanxi Institute of Power Machinery, Xi'an 710025, China)

Abstract: The research has been carried out resulting from the fact that a motor of ground-to-air missile failed to work during high g-load mobile flight of active section. On the basis of a large number of simulation tests, test data of insulation erosion for different g-load have been processed, and experimental results have been analyzed. As a result, the failure mechanism is validated that the transverse g-load affects the internal flow field of SRM seriously, leading to the erosion aggrandizement along the centrifugal direction. In consequence, the failure of insulation occurs. This research provides the theoretical basis for the relevant engineering design.

Key words: aerospace propulsion system; SRM; transverse g-load; insulation; erosion rate

至目前为止, 在加速度对发动机性能的影响方面, 人们主要进行了由火箭自旋引起的横向加速度对推进剂药柱产生的加速度效应研究, 即燃速增加导致发动机内弹道性能发生畸变, 影响发动机的正常工作^[1~3]。这方面, 国内外学者进行了大量的试验研究和理论分析工作, 并取得了重大进展。然而, 某飞行试验的结果发现, 由自旋产

生的横向加速度与由导弹机动飞行产生的横向加速度对发动机工作产生影响的侧重面是有较大差别的, 后者对发动机内绝热层烧蚀的影响最为突出, 而且长期被人们所忽视, 国内外至今缺乏对其的研究资料, 因此十分必要开展横向加速度对发动机内绝热层烧蚀的影响研究, 获得实验数据, 指导工程型号设计。

收稿日期: 2003- 03- 24; 修订日期: 2003- 06- 23

基金项目: 航天科学基金资助项目 (50276056)

作者简介: 李越森 (1968-), 男, 陕西咸阳人, 陕西动力机械研究所, 主要从事固体发动机总体研究

1 横向加速度模拟试验

1. 1 试验简介

横向加速度模拟试验在离心试验台上进行。当离心臂以某一角速度 ω 旋转且稳定后, 发动机点火, 试验发动机便在一定的横向加速度下工作, 由此可模拟导弹在空中机动拐弯飞行时所受到的横向加速度。

试验发动机有关参数见表 1。

表 1 过载试验发动机参数
Table1 Parameters of test motor

项 目	参数或指标
试验发动机直径 Φ/mm	127
平均工作压强/ MPa	6.0~7.0
工作时间/ s	3.0~5.0
推进剂燃速/ (mm/s)	8.3
推进剂铝粉含量/ $\%$	18.5
铝粉粒度/ μm	10~40
试验发动机药型	锥柱型
内绝热层材料	丁腈橡胶类
燃烧室温度/ K	3500

1. 2 试验现象描述

对历次试验结果进行观察 (见图 1), 发现如下现象。

1. 2. 1 静态试验

试验段内的绝热层沿圆周方向烧蚀均匀, 炭化层开裂, 但无剥落现象, 整个圆周方向无白色 Al_2O_3 粒沉积迹象, 试验发动机外表面无过热迹象。

1. 2. 2 15 g 加速度试验

沿横向加速度方向, Al_2O_3 粒子沉积在炭化层表面; 相对于横向加速度方向, 炭化层开裂, 但几乎无 Al_2O_3 粒子的沉积。在试验发动机的外表面, 横向加速度方向上金属壳体局部过热发蓝, 而其它方向没有过热迹象。

1. 2. 3 25 g 加速度试验

沿横向加速度方向, Al_2O_3 粒子仍然沉积在炭化层表面; 相对于横向加速度方向, 炭化层的开裂加重 (相对于 10 g 加速度试验), Al_2O_3 粒子的沉积现象不明显。在试验发动机的外表面, 横向加速度方向上金属壳体局部过热发蓝也加重,

而其它方向没有过热迹象。

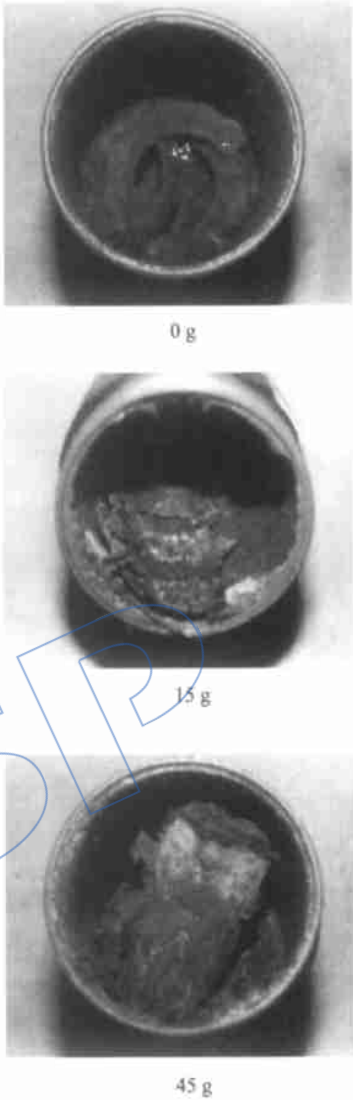


图 1 横向过载作用下燃烧室内 Al_2O_3 的沉积状况
Fig. 1 Deposition of Al_2O_3 under transverse g-load

1. 2. 4 45 g 加速度试验

沿横向加速度方向, Al_2O_3 粒子沉积在炭化层表面, 并随炭化层而剥落; 相对于横向加速度方向, 绝热层的烧蚀, 炭化层的开裂更加严重 (相对于 20 g 加速度试验), 并出现剥落, 而 Al_2O_3 粒子的沉积现象不明显。在试验发动机的外表面, 横向加速度方向上壳体局部过热发蓝进一步加重, 而其它方向没有过热迹象。

1. 3 绝热层烧蚀结果

分别对绝热试验件沿横向加速度方向进行解剖, 见图 2, 对绝热层剩余厚度进行精确测量, 最终处理出了不同横向加速度下绝热层的烧蚀率 (最大) 数据, 分别见表 2 和表 3。

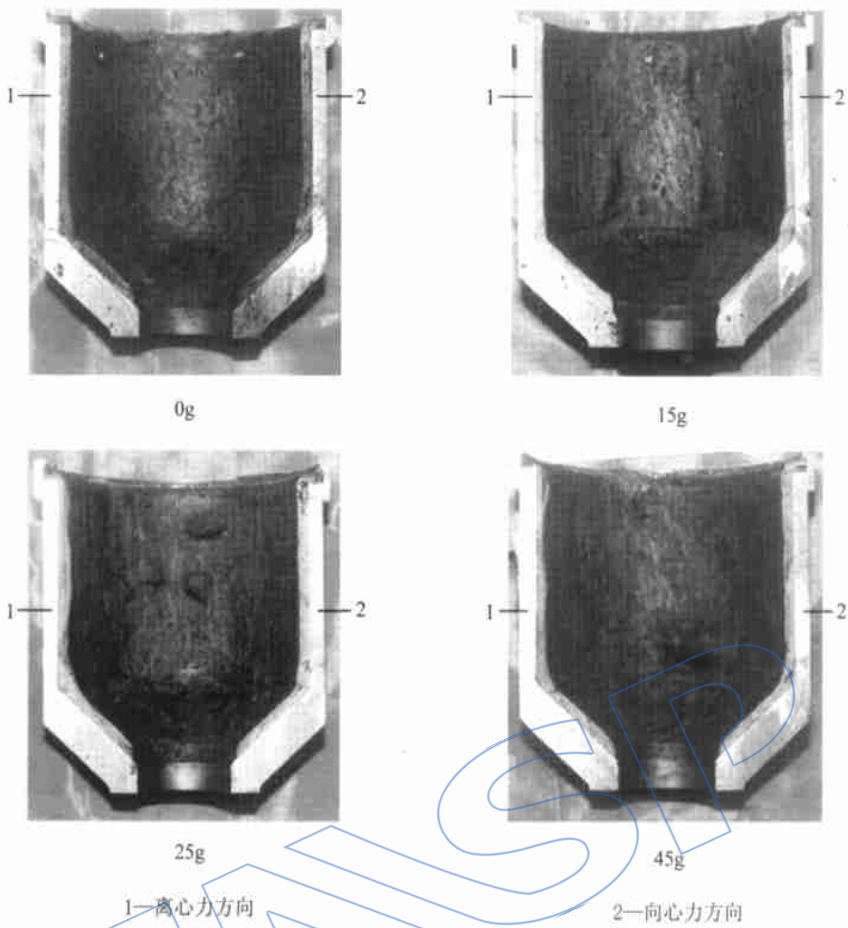


图 2 不同过载下的绝热层烧蚀状况

Fig 2 Insulation erosion under different transverse g-load

表 2 离心加速度方向上绝热层的烧蚀数据

Table 2 Insulation erosion data in centrifugal acceleration direction

项目	绝热层初始厚度/mm	剩余厚度/mm	燃烧时间/s	烧蚀率/(mm/s)
0 g	6.65	5.79	4.55	0.19
15 g	6.61	4.56	4.25	0.48
25 g	6.62	4.18	3.85	0.63
45 g	6.78	3.50	3.65	0.90

表 3 向心加速度方向上绝热层的烧蚀数据

Table 3 Insulation erosion data in centripetal acceleration direction

项目	绝热层初始厚度/mm	剩余厚度/mm	燃烧时间/s	烧蚀率/(mm/s)
0 g	6.65	5.82	4.55	0.18
15 g	6.61	4.87	4.25	0.41
25 g	6.62	4.65	3.85	0.51
45 g	6.78	4.56	3.65	0.60

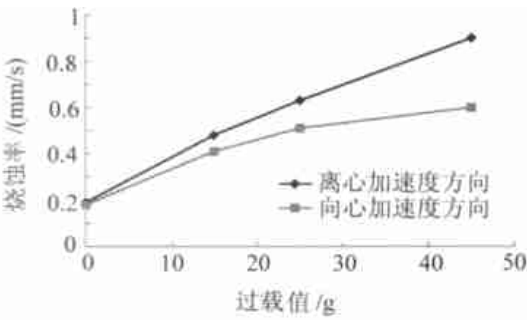


图 3 不同方向上绝热层的烧蚀曲线
Fig 3 Curves of ablation rate

2 横向加速度影响绝热层烧蚀的
试验结果分析^[6, 7]

上述试验数据表明, 在横向加速度存在的情况下, 发动机内绝热层的烧蚀状况恶化, 烧蚀率数倍于静态下的烧蚀率。下面从几个不同的方面加以分析。

2.1 横向加速度大小的影响

表 2 和表 3 的数据表明, 过载试验由静态到 15 g, 离心加速度方向上绝热层的烧蚀率增加到 2.53 倍, 向心加速度方向上的烧蚀率增加到 2.28 倍; 过载增加到 25 g, 离心加速度方向上绝热层的烧蚀率增加到 3.31 倍, 向心加速度方向上的烧蚀率增加到 2.83 倍。由此可见, 随着离心过载的加大, 绝热层的烧蚀成倍加剧, 而沿离心力的方向, 烧蚀更为严重。向心力方向烧蚀增大的原因可能类似于发动机前封头部位的烧蚀, 出现浮力流动现象, 随着过载值的增大, 碳化层剥落程度加快, 导致烧蚀增大。离心力方向烧蚀增大的原因见下面 2.2 节分析。

2.2 AlO_3 粒子冲刷、沉积的影响

从绝热试验件的烧蚀结果看, 沿离心力方向, 出现了大小不等、深浅不一的“坑”; 在静态试验与较小过载 (约 10 g 左右) 的试验中, 却没有此现象发生, 因此“烧蚀坑”的出现显然是横向过载作用的结果。

在静态试验中, 燃烧室内高热高压粒子气流主要沿发动机轴向流动, 其中的 AlO_3 液态粒子基本上沿喷管喷出, 不产生沉积。但在横向力的作用下, 气流的流动方向发生了改变, 由原来主流方向为轴向流动改变成斜侧向流动, 气流内的 AlO_3 液态粒子必然要对侧壁绝热层进行冲刷、沉积, 这种效应加剧了绝热层的烧蚀与炭化。

AlO_3 粒子对绝热层烧蚀的影响主要有两个方面, 一是在横向力的作用下, 横向加速度方向上 AlO_3 粒子沉积的数量明显增多, 粒径增大, 大量的高温液态粒子以热传导的方式直接传热给绝热层, 加速了绝热层的烧蚀; 二是由于燃气流的高速 (燃烧室尾部燃气速度约为 100 m/s) 冲刷, 导致炭化层形成之后迅速剥落, 带着先沉积的 AlO_3 粒子离开绝热层表面, 随之而来的新的 AlO_3 粒子重新沉积在绝热层表面, 进行热传递。这种粒子的沉积传热-冲刷剥落-再沉积传热的模式在药柱的燃烧过程中持续而快速的进行着, 从而在离心加速度方向上的绝热层表面形成“烧蚀坑”, 加剧了绝热层的烧蚀。

值得指出的是, 由于 AlO_3 粒子对绝热层烧蚀存在严重影响, 因此推进剂中的 Al 粉含量是工程设计时必须考虑的重要因素之一。

2.3 绝热层烧蚀部位分析

如 2.2 中所述, 在横向力的作用下, 燃烧室内的流场由近似的二维两相流转变为典型的、复杂的三维两相流动。根据 Fluent 流场分析软件计算, 发动机燃烧室中燃气流在横向加速度作用下的运动轨迹, 如图 4 所示。

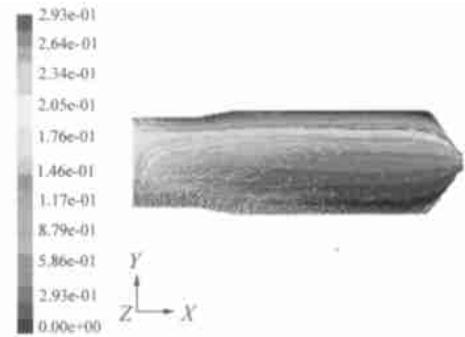


图 4 横向加速度下的发动机燃烧室内流场
Fig 4 Flow field in cross force

我们分析一下烧蚀最为严重部位的具体位置。假设燃气流在燃烧室内流场中作质点运动, 它具有两个速度, 一是沿轴向的 v_x , 另一个是沿径向的 v_y , 它们的合成方向便是质点的运动方向。当 v_x 近似恒定时, 质点在侧壁绝热层上的落点取决于 v_y 的大小, 而 $v_y = v_{y0} + a \cdot t$ (a 为质点的横向加速度), 也就是说绝热层烧蚀最为严重的位置取决于横向加速度 a 的大小和方向。当横向加速度较大时, 此位置靠前; 当横向加速度较小时, 此位置靠后。这与实际飞行发动机的故障情况是一致的。

3 问题讨论

3.1 关于轴向过载的影响

本试验仅考虑了横向加速度, 没有考虑轴向加速度。如 2.4 所述, 轴向加速度仅影响气流的轴向速度 v_x , 也就是说仅影响气流在绝热层上的落点, 即严重烧蚀部位的具体位置, 不影响本试验的机理性结果, 因此, 单纯研究横向加速度存在的情况仍具有代表性。

3.2 关于模拟试验发动机与全尺寸实际发动机的相关性

地面过载模拟试验得到的数据如何应用于全尺寸发动机的相关设计, 并且可信度如何, 是工程设计人员十分关心的高过载问题之一。由于条件所限, 目前还难以进行较大规模的地面加速度模拟试验, 因此尺寸效应不可避免。一种解决试验发动机与全尺寸发动机相关性的途径是, 先通过地面过载模拟试验数据建立加速度效应下的流场计算模型与绝热层烧蚀模型, 用实际发动机飞行试验残骸所取得的真实数据 (主要是绝热层烧蚀率数据) 对理论计算模型进行验证与修正, 获得较为准确烧蚀计算模型, 从而对工程设计进行理论指导。

4 结 论

通过本加速度模拟试验, 机理上验证了飞行

横向加速度对绝热层烧蚀的影响, 其主要原因是由于横向加速度导致燃烧室内流场发生改变, 离心力方向侧壁绝热层在高速燃气流的冲刷与液态 Al_2O_3 粒子的沉积传热的作用下炭化烧蚀加剧, 形成“烧蚀坑”, 并且绝热层的烧蚀率随横向加速度的增加有加倍增长的趋势。

参考文献

- [1] 郭彤 过载对固体发动机内弹道性能影响的研究 [D] 西安: 航天工业总公司第四研究院, 1999
- [2] 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
- [3] Mitani T, Niioka T. An Analytical and Experimental Study for Solid-Propellant Combustion in an Acceleration [J]. Combustion Science and Technology, 1973, 8 (3): 61- 66
- [4] Crowe C T, Wilbushy P G. Effect of Spin on the Internal Ballistics of a Solid-Propellant Motor [R]. AIAA Paper 66- 532, 1986
- [5] Northam G B. Effect of Combustion on Acceleration Induced Burning Rate Augmentation [R]. AIAA, 1973, 11 (6): 115- 126
- [6] 陈汝训 固体火箭发动机设计与研究 (上、下) [M] 北京: 宇航出版社, 1991
- [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