

# 含典型装药裂纹模拟发动机点火瞬态试验研究\*

赵汝岩,王宏伟,朱敏

(海军航空工程学院,山东烟台 264001)

**摘要:**对典型装药裂纹在模拟发动机点火瞬间的压强变化情况进行试验研究,研究了不同深度裂纹在不同点火升压速率、不同裂纹开口方向情况下裂纹尖端、裂纹入口以及燃烧室的压强变化情况。试验结果表明:裂纹开口方向对裂纹内压强变化影响不大,裂纹尖端压强峰值以及与燃烧室压强比的最大值受增压和几何条件的影响;增压越大,裂纹越深,压强峰值和压强比越大。

**关键词:**模拟发动机;裂纹;点火

**中图分类号:**V435 **文献标志码:**A

## The Experimental Research on Ignition Transient in Simulative Motors with Typical Crack

ZHAO Ruyan, WANG Hongwei, ZHU Min

(Naval Aeronautical and Astronautical University, Shandong Yantai 264001, China)

**Abstract:** The pressure in the typical crack of simulative motor was studied by test in order to analyze the effects of pressurization rate, crack-gap depth and crack orientation on the crack tip pressure, crack inlet pressure and chamber pressure. The result indicates the crack orientation has little effect on the pressure in the crack; the maximum pressure in crack tip and the pressure rate between crack tip pressure and chamber pressure increases with an increase in pressurization rate and the depth of crack.

**Keywords:** simulative motor; crack; ignition

### 0 引言

固体火箭发动机装药在研制、生产、运输、储存过程中由于种种原因可能会产生装药裂纹<sup>[1]</sup>。在点火瞬态过程中,裂纹的存在会影响发动机原先设计的内弹道。国外学者对固体推进剂裂纹中的火焰传播和燃烧及裂纹扩展进行了较细致的研究<sup>[2-5]</sup>并取得了较大进展,而国内的何国强、邢耀国<sup>[6-8]</sup>等人对火焰在裂纹内的传播及裂纹内的压强变化也开展了一系列的试验研究,但试验中点火装置位于裂纹入口处,产生的燃气直接进入裂纹而不是流经裂纹入口处。文中在分析总结国内外研究的基础上对不同深度的横向和纵向裂纹在不同点火剂燃气升压速率情况下燃气流经裂纹入口并点燃裂纹内部推进剂导致裂纹尖端、裂纹入口以及燃烧室的压强变化情况进行试验研究。

### 1 实验装置

依据药柱内腔表面的两种典型裂纹(横向表面裂

纹,垂直于纵向剖面;纵向表面裂纹,垂直于横截面)设计了含可拆卸裂纹的模拟发动机。模拟发动机安装一个可拆卸的裂纹件,同时可以旋转以模拟横向裂纹和纵向裂纹(横向裂纹开口方向垂直于点火剂燃气主流流动方向;纵向裂纹平行于点火剂燃气主流流动方向)。不同的裂纹件内铺设不同长度的丁羟推进剂药条以模拟不同深度的裂纹,裂纹入口端面包覆。不同的升压速率通过点火药量进行控制。在点火剂燃气入口、裂纹尖端、裂纹入口以及燃烧室安装压强传感器用以记录不同位置的压强变化。试验装置结构图如图1所示。

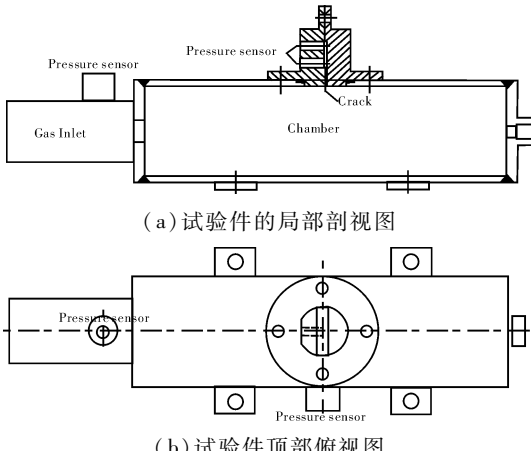
### 2 试验结果

图2为在增压梯度为0.4GPa/s的条件下裂纹深度为40mm的横向裂纹和纵向裂纹尖端、入口、燃烧室压强变化曲线图。

图3为在增压梯度为0.4GPa/s的条件下裂纹深度为70mm的横向裂纹和纵向裂纹尖端、入口、燃烧室压强变化曲线图。

\* 收稿日期:2011-05-07

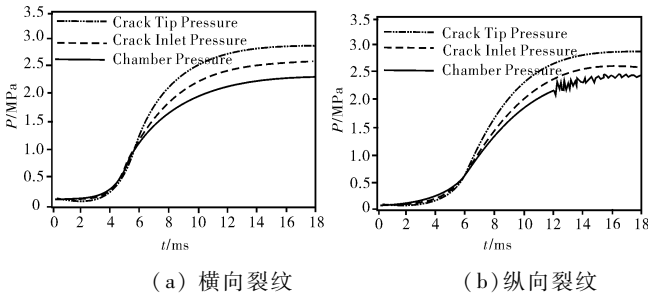
作者简介:赵汝岩(1980-),男,山东烟台人,讲师,博士,研究方向:航空航天发动机工作过程仿真。



(a) 试验件的局部剖视图

(b) 试验件顶部俯视图

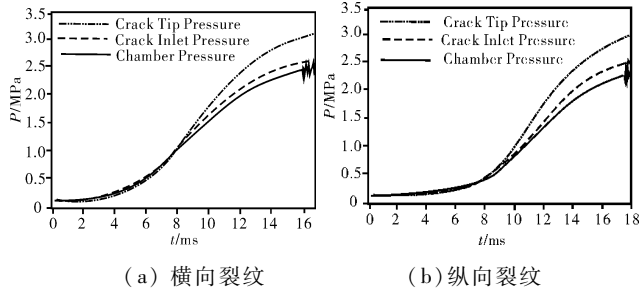
图 1 试验装置结构图



(a) 横向裂纹

(b) 纵向裂纹

图 2 裂纹尖端、入口、燃烧室压强变化曲线图

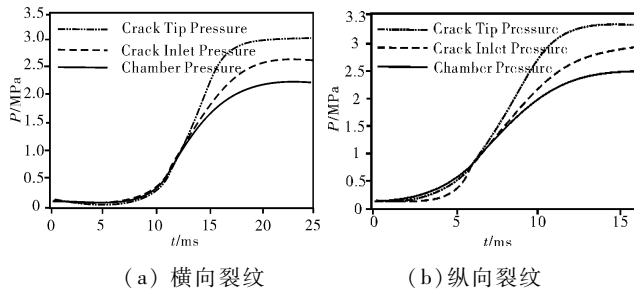


(a) 横向裂纹

(b) 纵向裂纹

图 3 裂纹尖端、入口、燃烧室压强变化曲线图

图 4 为在增压梯度为 0.8GPa/s 的条件下裂纹深度为 40mm 的横向裂纹和纵向裂纹尖端、入口、燃烧室压强变化曲线图。

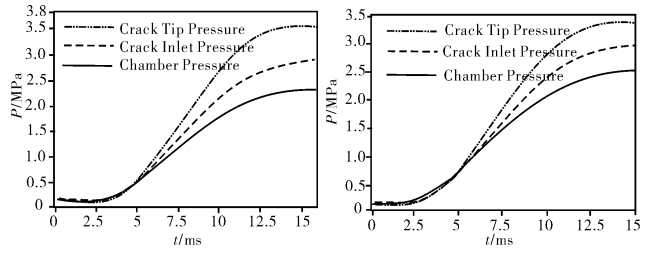


(a) 横向裂纹

(b) 纵向裂纹

图 4 裂纹尖端、入口、燃烧室压强变化曲线图

图 5 为在增压梯度为 0.8GPa/s 的条件下裂纹深度为 70mm 的横向裂纹和纵向裂纹尖端、入口、燃烧室压强变化曲线图。



(a) 横向裂纹

(b) 纵向裂纹

图 5 裂纹尖端、入口、燃烧室压强变化曲线图

### 3 结果分析

#### 3.1 裂纹开口方向的影响

通过图 2 ~ 图 5 不同深度、不同增压速率下裂纹尖端、入口、燃烧室压强变化曲线图可以看出,在相同试验条件下,横向裂纹尖端的压强峰值略微大于纵向裂纹,这是由于裂纹尖端的压强变化当裂纹内推进剂未点燃前由裂纹入口压强控制,当裂纹内推进剂点燃后火焰沿着裂纹表面燃烧,燃烧表面积随之扩大,一部分燃气开始流出裂纹,另一部分继续向裂尖流动,出现双向流动,导致裂纹尖端压强上升。对于相同尺寸的裂纹来说,裂纹内推进剂生成的燃气总量不变,对于纵向裂纹来说生成的燃气更易流出裂纹,流向纵向裂纹尖端的燃气总量略少于横向裂纹,压强峰值也就略微低于横向裂纹尖端的压强峰值。

#### 3.2 裂纹深度的影响

在升压速率为 0.4GPa/s 情况下,40mm 和 70mm 深的横向裂纹尖端压强峰值分别为 2.85MPa 和 3.18 MPa,与燃烧室的压强比值为 1.267 和 1.325;在升压速率为 0.8GPa/s 情况下,40mm 和 70mm 深的横向裂纹尖端压强峰值分别为 3.08MPa 和 3.53MPa,与燃烧室的压强比值为 1.37 和 1.5;在升压速率为 0.4GPa/s 情况下,40mm 和 70mm 深的纵向裂纹尖端压强峰值分别为 2.78MPa 和 3.02 MPa,与燃烧室的压强比值为 1.183 和 1.271;在升压速率为 0.8GPa/s 情况下,40mm 和 70mm 深的纵向裂纹尖端压强峰值分别为 3.0MPa 和 3.38MPa,与燃烧室的压强比值为 1.33 和 1.42;通过数据可以看出,相同开口方向的裂纹在相同升压速率条件下,裂纹尖端的压强峰值以及与燃烧室压强的比值随着裂纹深度的加深而增加。这是由于一方面较深的裂纹有更多的燃气生成流入裂纹尖端导致压强上升;另一方面较深的裂纹导致生成的燃气壅塞在裂纹内不易流出也导致裂纹尖端压强的上升。

#### 3.3 点火燃气升压速率的影响

通过数据可以看出,同一裂纹尖端的压强随着点

### 3 结论

运用颗粒轨道模型对两相流条件下长尾喷管内流场进行了数值模拟,研究发现:

- 1)长尾喷管内流场马赫数和温度受颗粒相的影响较大,颗粒相对压强的影响则很小;
- 2)颗粒直径对颗粒分布有很大影响,颗粒直径越小,随流性越好,颗粒直径越大,与喷管收缩段的碰撞越剧烈;颗粒直径增加到一定值后,颗粒与长尾喷管的直管段也发生碰撞;
- 3)长尾喷管中颗粒分布及在壁面上的沉积率与颗粒轨迹密切相关;
- 4)颗粒相的加入使长尾喷管的工作环境更加恶劣,在长尾喷管的设计中要充分考虑两相流的影响。

#### 参考文献:

[1] 何国强,王国辉,蔡体敏. 过载条件下固体发动机内流场数值模拟[J]. 固体火箭技术, 2002,23(3):182 -

185.

[2] 李军,常见虎,周长省. 推力矢量燃气舵三维气-固两相流的数值分析[J]. 南京理工大学学报,2008,32(5):565 - 569.

[3] 常见虎,周长省,李军,等. 推力矢量发动机气固两相内流场数值模拟[J]. 系统仿真实报, 2008,20(4):892 - 895.

[4] 淡林鹏,张振鹏,张立群. 长尾喷管故障诊断中的两相流动计算[J]. 航空动力学报, 2003,18(5):686 - 691.

[5] 淡林鹏,张振鹏,赵永忠. 长尾喷管中颗粒运动轨迹的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2003,18(2):258 - 263.

[6] 张志峰,刘洋,蔡体敏. 随机颗粒轨道模型在长尾喷管发动机流场计算中的应用[J]. 固体火箭技术, 2007,30(5):376 - 380.

[7] 刘静,徐旭. 随机轨道模型在长尾喷管两相流计算中的应用[J]. 固体火箭技术, 2006,29(5):333 - 336.

[8] 严聪,何国强,刘洋. 旋转条件下长尾喷管发动机三维两相流场数值模拟[J]. 空军工程大学学报, 2009,10(5):10 - 15.

(上接第 132 页)

火剂燃气升压速率的增加而增加,这是由于点火剂燃气升压速率越高,有更多的燃气流入裂纹,裂纹入口的压强也就越高,裂纹内的燃气越不容易流出裂纹并堵塞在裂纹内造成裂纹尖端的压强峰值越大。

#### 3.4 裂纹对燃烧室压强的影响

试验过程中点火剂燃气流经裂纹入口并进入裂纹点燃裂纹内推进剂,说明裂纹内的推进剂在点火剂燃气流作用下能够被点燃,对真实发动机来说,若药柱表面含有较深的裂纹,则裂纹内部与药柱表面几乎会被点火剂燃气同时点燃。通过分析看出,单纯的裂纹内部推进剂燃烧已经造成裂纹尖端的压强高于燃烧室压强,若含裂纹的药柱表面与裂纹内表面推进剂同时燃烧,则裂纹尖端的压强将会远远高于燃烧室内的压强,有可能导致裂纹处燃面燃烧面积的扩大,腔内气体压强升高,压强的升高又加快了推进剂的燃烧速度,进一步增加了裂纹腔中的气体压强。当裂纹腔中的气体压强或增压速度足够高时,裂纹尖端开始扩展或分岔,燃烧表面积进一步扩大,并最终导致燃烧室中的气体压强急剧上升而可能发生爆炸。

大值受增压和几何条件的影响,增压越大,裂纹越深,压强峰值和压强比越大;

3)含较深裂纹的装药发动机,裂纹尖端的压强将会远远高于燃烧室内的压强,导致燃烧室中的气体压强急剧上升而发生爆炸。

#### 参考文献:

[1] K K 郭, M 萨默菲尔德. 固体推进剂燃烧基础(上)[M]. 宋兆武,译. 北京:国防工业出版社,1988.

[2] Todd E. Earnest. RSRMTP-H1148 main grain propellant crack initiation evaluation, AIAA 2005 - 3601[R]. 2005.

[3] Changyu hwang, Luca Massa, Robert Fiedler. Philippe H Geubells. Simulation of convective burning and dynamic fracture in solid propellant, AIAA 2002 - 4342[R]. 2002.

[4] J Mantzaras, J Moreci, K K Kuo. Different modes of crack propagation in burning solid propellants, AIAA - 85 - 1176[R]. 1985.

[5] Y C Lu, K K Kuo, S R Wu. Crack propagation process in a burning AP-Based composite solid propellant, AIAA 93 - 2168[R]. 1993.

[6] 张文普,何国强,刘佩进,等. 固体推进剂装药裂纹内燃烧流动的实验研究[J]. 推进技术, 2000,21(5):58 - 60.

[7] 邢耀国,熊华,董可海,等. 聚硫推进剂燃烧条件下裂纹扩展过程的研究[J]. 推进技术, 2000,21(3):71 - 74.

[8] 徐学文,邢耀国,彭军. 固体火箭发动机装药裂纹危险性研究综述[J]. 海军航空工程学院学报, 2007,22(1):101 - 104.

### 4 结论

- 1)相同升压速率条件下,相同深度的横向裂纹尖端的压强峰值略微大于纵向裂纹尖端的压强峰值;
- 2)裂纹尖端压强峰值以及与燃烧室压强比的最