

固体推进剂裂纹扩展研究综述

胡松启¹, 周宴星², 刘迎吉¹, 陈 静¹

(1. 西北工业大学, 陕西 西安 710072;

2. 中国人民解放军第二炮兵部队, 内蒙古自治区 呼和浩特 010010)

摘 要: 介绍国内外关于固体推进剂裂纹扩展的研究现状, 总结固体推进剂裂纹扩展的试验研究和理论分析方法, 归纳影响固体推进剂裂纹扩展的各种因素。分析认为: 采用拉伸装置研究有裂纹推进剂力学性能和利用高速摄影系统研究裂纹燃烧和扩展情况是当前主要的研究手段; 发动机燃烧室内压力、升压速率、裂纹形状尺寸和推进剂燃速是装药裂纹扩展的重要因素; 必须进一步开展各因素和裂纹扩展的定量关系研究。

关键词: 固体推进剂; 裂纹扩展; 增压速率; 对流燃烧; 断裂韧性

中图分类号: V512 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2012) 05-0086-07

Studies on crack extension in solid propellant

HU Song-qi¹, ZHOU Yan-xing², LIU Ying-ji¹, CHEN Jing¹

(1. Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Second Artillery Forces of PLA, Huhhot 010010, China)

Abstract: The research status of the crack extension in solid propellant at home and abroad are introduced. Experimental study and theoretical analysis of the crack extension in solid propellant are summarized. The advantages and disadvantages of such study are analyzed. The influences of various factors on crack extension in solid propellant are generalized. The results show that the tension machine and high-speed photography are main means for studying the mechanics characteristic of propellant with crack, and the combustion property of propellant and the extension of crack; the working pressure in combustion chamber, pressure boost rate, style and size of crack, and burning rate of propellant are the important factors for the crack extension in solid propellant. It is pointed out that it is necessary to research the quantitative relationship between various factors and crack extension.

Keywords: solid propellant; crack extension; pressure boost rate; convective combustion; fracture toughness

收稿日期: 2012-05-09; 修回日期: 2012-06-29

基金项目: 总装预研基金项目(基金号 9140C5203120906)

作者简介: 胡松启 (1976—), 男, 副教授, 研究领域为固体推进剂及燃烧

0 引言

固体推进剂在生产、贮存、运输和使用过程中,承受环境温度变化、重力载荷、冲击载荷和振动载荷等复杂载荷的作用。这些载荷会使推进剂装药内部产生应力和应变,如果超过其力学性能的允许范围,会使推进剂装药中出现裂纹、脱粘(弱粘)和气泡等缺陷^[1]。国内外对固体发动机中缺陷的研究均发现:在固体推进剂装药缺陷中,与脱粘、弱粘和气泡等相比,裂纹是导致发动机性能异常的最重要因素,产生的危害也最大^[2]。存在裂纹的推进剂装药在点火增压过程中,高温气体可能进入初始裂纹内部,导致裂纹内表面点燃,进一步发生裂纹扩展形成“超”燃面,从而导致固体火箭发动机不能够正常工作,严重时甚至整个发动机炸毁。因此,装药裂纹成为固体推进技术领域关注的重点问题之一^[3]。

由于在储存和工作过程中裂纹要增长或扩展,而且影响裂纹增长或扩展的因素很多,因此,研究裂纹扩展规律,预测裂纹在燃烧过程中是否扩展是裂纹研究的重要方向^[4]。但是,由于固体火箭发动机工作过程涉及因素较多,相互之间作用机理不是十分清楚,导致对固体火箭发动机装药裂纹问题的研究虽然由来已久,但是至今没有建立通用的法则,不能进行准确的预测^[5]。

从20世纪60年代就开始推进剂装药裂纹扩展的试验研究,裂纹扩展理论方面的研究也随之展开。目前,虽没有真正给出适应性强的裂纹扩展规律,但这方面的研究仍然取得了很大进展。

1 裂纹扩展的试验研究和理论综述

1.1 裂纹扩展试验研究综述

要了解裂纹燃烧和扩展的机理和制约因素,试验必不可少,国内外进行了大量试验方法探讨研究。随着科技的进步,试验方法逐渐精确化、可视化。

1.1.1 拉伸应力试验研究

固体推进剂在拉伸应力作用下进行的裂纹扩

展试验,主要研究裂纹起始扩展和极限破坏所需应力值及裂纹随应力变化扩展规律。

Nottin J.P.等人应用填充剂为AP(高氯酸铵)和铝粉的HTPB(端羟基聚丁二烯)推进剂进行了试验。试件为圆盘形,直径为160 mm,中心厚为5 mm,圆周20 mm内厚为20 mm的凸缘,便于20个夹头夹紧试件。试件中心为一圆孔,用来模拟推进剂药柱,用刀片预制不同长度的裂纹。试验得出如下结论:在达到临界负荷之前,裂纹并不扩展;裂纹长度与临界负荷结合在一起可得出临界应力强度因子 K_{IC} ,当应变速度增加时 K_{IC} 稍许增加;裂纹扩展的速度大约与 K_I-K_{IC} 的平方成正比,而且随 K_I 的变化速率的增加而稍许增加;当试件加工成星形内孔时,裂纹可被对称地诱发。

C. T. Liu等用一种高填充的复合固体推进剂,在2.54 mm/min的夹头速度和室温下进行试验,并以统计学来研究裂纹增长数据的特性规律。试验是在四种裂纹长度(0.85 mm, 0.95 mm, 1.05 mm和1.15 mm)下进行的。裂纹扩展速度 da/dt 采用割线法和总多项式法进行计算。研究认为:裂纹扩展速度的平均值 \bar{a} 和应力强度因子的平均值 \bar{K}_I 随裂纹长度的增加而增加。

屈文忠依据R.A. Schapery的粘弹性断裂理论,对国产HTPB复合推进剂进行了I型裂纹扩展试验^[6]。试验采用尺寸为100 mm×50 mm×5 mm矩形片状的试样。试样宽度方向两端粘有铝片作为夹具。在试样中心线上分别开了初始长度为11 mm和22 mm的穿透裂纹。试验时选定的拉伸速率分别为 $R=1, 2, 5$ mm/min。试验得出结论:裂纹开始扩展可以用临界应力强度因子 K_{IC} 来衡量(作为判据);裂纹扩展速度 da/dt 与应力强度因子 K_I-K_{IC} 间均存在幂指数关系;复合推进剂材料的断裂能不是常数,而与裂纹扩展速度相关。

成曙等开展了复合固体推进剂含I型裂纹拉伸实验研究^[6]。采用不同拉伸速率,获得双向拉伸极限特性主曲线和应力-应变破坏曲线,为推进剂材料破坏分析的经验准则提供判据。结果表明,如果复合固体推进剂的断裂阻力被看作是材料常数,则裂纹驱动力必受到平行于裂纹之应力的影

响,在一定范围内裂纹驱动力与平行应力成反比关系。当平行应力超过屈服应力以后,因平行应力太大超过了损伤阈值,在推进剂中造成了损伤,从而断裂韧性下降。

但是在实际工作中,推进剂是处于燃烧状态的,裂纹扩展的规律与纯拉伸应力下的裂纹扩展规律还是有区别的,试验方法还需进一步改进。

1.1.2 燃烧条件试验研究

在燃烧条件下进行推进剂裂纹扩展过程试验,研究裂纹变形对裂纹腔内对流燃烧流场的影响,判断有装药裂纹的发动机能否正常工作。

在裂纹燃烧和裂纹扩展机理方面^[7-10],最有成效的工作是由美国宾西法尼亚州立大学的 Kuo 教授及其合作者完成的。他们利用高速摄影技术、燃烧终止技术和 X 射线分析等手段,对裂纹内的流动燃烧现象进行了长期的研究。他们以规范的扁长六面体形空腔代替裂纹,并假定裂纹不变形、不扩展,腔中参数沿长度方向呈一维分布。在此假设下,讨论裂纹的高度 δ 、长度 l 、腔内气体流速 v 和燃烧室压力 p 等参数对裂纹腔中流场、火焰传播及裂纹扩展的影响。

Kuo 等人在 1987 年用丁羟推进剂预制一个楔形裂纹进行了实验研究^[9],观察、分析在不同的工作条件下裂纹扩展和分支的情况。实验的基本原理是改变初始升压速度而保持其他参数不变,利用中止燃烧的方法,通过摄影观察残留推进剂试件和 $P-t$ 曲线来评定裂纹扩展的情况。实验用推进剂试件和压力传感器安装位置见图 1。实验中,由于初始升压速度的不同,在裂纹尖端区域观察到了四种不同的结构损坏模式:

- 1) 在很低的升压 $\frac{\partial p}{\partial t} < 1 \text{ GPa/s}$ 时,不产生裂纹扩展,裂纹尖端的位移仅由于推进剂燃面的正常推进所致;
- 2) 在低升压速率 $\frac{\partial p}{\partial t} = 1.4 \sim 15 \text{ GPa/s}$ 之间时,可观察到单一的裂纹扩展,即沿其初始方向存在裂纹扩展;
- 3) 在高升压速率 $\frac{\partial p}{\partial t} > 30 \text{ GPa/s}$ 时,裂纹以

多个分支在不同的方向上辐射状扩展;

4) 在很高升压速率情况下,裂纹扩展在分支上伴随有局部多分支。第三种和第四种结构损坏模式所产生的燃烧表面积远大于第二种,所以在真实发动机中可能引起燃烧表积极大地增加,从而导致发动机的破坏。

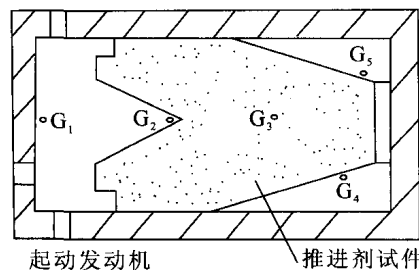


图 1 推进剂试件和压力传感器安装位置简图

Fig. 1 Mounting position of propellant test specimen and pressure sensors

1993 年, Y.C.Lu 等人对燃烧诱发的推进剂裂纹现象进行了大量的实验研究和理论分析^[10]。设计和组装了有透明窗的燃烧室,用高速摄影仪观察了不同增压速率下裂纹的燃烧和扩展情况。根据实验测得的瞬态裂纹扩展速度和数值计算结果,导出了裂纹扩展速度的半经验公式。

2005 年, Todd E. Earnest 在研究裂纹的扩展时也采用了一套高速摄像系统^[11],它包括模拟发动机燃烧室、数据获取系统和点火系统三大部分。模拟发动机燃烧室是一端带透明有机玻璃窗口的圆柱形系统,数据获取系统包括压力测量系统和成像系统。该系统能比较清楚记录下裂纹扩展过程,并且还能进一步推算出裂纹扩展的速度与时间的关系。试验用裂纹扩展室如图 2。

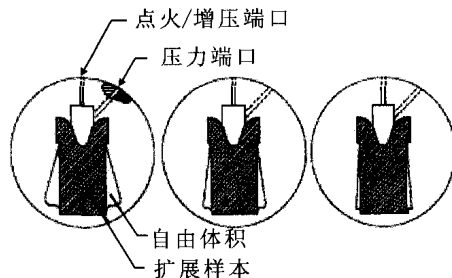


图 2 裂纹扩展室示意图

Fig. 2 Schematic diagram of crack extension

目前, 国内学者大都采用 X 射线实时荧屏分析系统 (RTR) 作为裂纹扩展试验的测试系统。该系统由 X 射线发生器、实验发动机、高速录影系统、时间控制系统、数据采集系统和高速运动分析仪组成。它的主要工作原理是利用 X 射线成像原理来摄取发动机内部的工作过程, 同时利用压力传感器获取压力-时间曲线。但是, 该系统只能进行平面成像, 试验中所采用的模拟发动机为矩形发动机, 与实际发动机工作条件有一定的差距。

熊华、沈伟等人采用上述试验装置和测试系统, 对不同尺寸、不同结构约束条件及不同推进剂制成的试件在不同燃烧室燃气增压速率下进行了大量的燃烧试验^[12-13]。对测试数据和高速摄影图的分析表明: 存在一个增压速率的临界值, 大于该值时, 裂纹发生扩展, 小于该值时, 无裂纹扩展现象发生; 在相同的结构条件和相同的燃气增压速率作用下, 推进剂材料的断裂韧性 J_{IC} 值越低, 裂纹越容易发生扩展。

西北工业大学的张文普、何国强、刘佩进等利用该 X 射线高速实时荧屏分析系统 (RTR), 设计了一种新式的带透明窗的裂纹燃烧模拟试验器^[14]。该试验器用点火装置进行点火, 增压用点火药量来控制。装药采用丁羟推进剂, 将推进剂药浆刷于两条胶木条上, 通过改变胶木条厚度和刷药长度来模拟不同尺寸的裂纹。实验表明: 裂纹内的火焰传播速度受裂纹几何条件和增压的共同影响, 增压越大, 裂纹越窄, 火焰传播速度越大。裂纹尖端压强与裂纹入口压强比的最大值也受增压和几何条件的影响, 增压越大, 裂纹越窄, 该压强比越大。

综上所述, 国内外研究文献报道的实验现象较为一致的结论是发动机燃烧室内增压速率和裂纹几何形状是固体火箭发动机装药裂纹扩展的重要因素。

1.2 裂纹扩展理论综述

裂纹扩展理论研究的难度较大, 这不仅是因

为影响裂纹扩展的因素非常多, 而且因为推进剂本身是一个粘弹性体, 裂纹的扩展过程是一个强烈耦合的过程。为了便于计算机仿真, 研究者们对物理模型进行了相应的简化, 但是, 随着研究的深入和计算手段的提高, 计算模型逐步接近实际模型, 计算结果更加准确。

1.2.1 经典理论

早期采用经验公式来描述裂纹扩展规律, 逐渐发展到采用断裂力学断裂准则来判定裂纹是否发生扩展。

过去, 在预测裂纹扩展方面, PARIS 经典理论是最常用的定律。它是按照弹性材料, 在应力强度因子和裂纹扩展速度 $\frac{da}{dt}$ 之间确立了一个幂函数关系, 其表达式为

$$\frac{da}{dt} = A K_I^n \quad (1)$$

显然, 这种关系式不适于确切表示粘弹材料中的裂纹扩展。R.A.Schapery 将该理论扩展到粘弹材料中^[15]去并被 S.Swanson 试验验证^[16]。从而导出了同类定律:

$$a_T \frac{da}{dt} = A K_I^n \quad (2)$$

式中: a_T 是 WLF 方程中的偏移因子。G.Langlois 等用聚氨酯和 HTPB (端羟基聚丁二烯) 推进剂, 在单棱缺口试件上预制 2 mm 深的裂纹, 并在不同的温度和拉伸速度下进行了三组试验, 得到了下面新的计算公式^[17]

$$\frac{da}{dt} a_T = A \frac{a}{t_m} \quad (3)$$

式中: a 是达到最大应力 σ_m 时裂纹尖端区域的长度; t_m 是在单轴拉伸试验期间达到最大应力的时间。用上述公式计算裂纹扩展与结果的吻合度比经典定律要好得多。

1957 年, Irwin 提出了应力强度因子准则, 即裂纹尖端应力强度因子超过表征材料特性的临界应力强度因子时, 裂纹失稳扩展。因而断裂准则可以写成 $K=K_{IC}$, 式中 K_{IC} 为平面应变断裂韧性

- 825-833.
- [9] KOU K K, KUMAR M, MANTZARAS J. Different modes of crack propagation in burning solid propellants[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1987, 3(1): 22-26.
- [10] LU Y C, KUO K K, WU S R. Crack propagation process in a burning AP-based composite solid propellant, AIAA 93-2168[R]. USA: AIAA, 1993.
- [11] TODD E E. RSRMTP-H1148 main grain propellant crack initiation evaluation, AIAA 2005-3601[R]. USA: AIAA, 2005.
- [12] 熊华. 固体推进剂裂纹燃烧时扩展条件的实验研究和理论分析[D]. 烟台: 海军航空工程学院, 1999.
- [13] 沈伟. 固体推进剂裂纹燃烧与扩展的研究[D]. 烟台: 海军航空工程学院, 2000.
- [14] 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.
- [15] SCHAPCRY R A. A theory of crack initiation and growth in viscoelastic media [J]. *International Journal of Fracture*, 1975, 11(1): 40-47.
- [16] SWANSON S R. Application of schapery's theory of viscoelastic fracture of solid propellant [J]. *J. Spacecraft and Rockets*, 1976, 13(9): 528-535.
- [17] 陈光学. 固体推进剂中裂纹扩展的一条新定律[J]. *国外固体火箭技术*, 1987 (4): 40-45.
- [18] RICE J R, ROSENGREN G F. Plane strain deformation near crack tip in a power law hardening material [J]. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 1968, 16(1): 1-12.
- [19] SMIRNOV N N. Convective burning in channels and cracks in solid propellants [J]. *Fizika Goreniyai Varyva*, 1985, 21: 29-36.
- [20] GRIFFITHS S K, NILSON R H. Similarity analysis of fracture growth and flame spread in deformable gas generating pyrotechnics, SAND90-8472[R]. [S.L.]: SAND, 1990.
- [21] DICK W A, HEALTH M T, FIEDLER R A. Integrated 3-D simulation of solid propellant rockets, AIAA 2001-3949[R]. USA: AIAA, 2001.
- [22] FIELDER R A, BREITENFELD M S. Simulations of slumping propellant and flexing inhibitors in solid rocket motors, AIAA 2002-4341[R]. USA: AIAA, 2002.
- [23] 唐立强, 谭英杰, 蔡艳红. 刚性-粘弹性材料界面 I 型动态扩展裂纹的尖端场[J]. *力学季刊*, 2004, 25(2): 188-194.
- [24] 唐立强, 谭英杰, 蔡艳红. 刚性-粘弹性材料界面 II 型动态扩展裂纹的尖端场[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2004, 36(9): 1206-1209.
- [25] 袁端才, 唐国金, 雷勇军. 固体发动机药柱表面裂纹分析[J]. *试验技术与试验机*, 2006 (1): 9-13.
- [26] 李东, 黄国臣, 周长省, 等. 双基固体推进剂裂纹开裂方向的研究[J]. *弹道学报*, 2008, 20(3): 24-28.
- [27] KNAUSS W G. The mechanics of polymer fracture [J]. *Applied Mechanics Reviews*, 1973, 26: 1-17.
- [28] HUFFERD W. Model of crack propagation in viscoelastic material, ADA-213907[R]. USA: ADA, 2007.
- [29] GODAI T. Flame propagation into the crack of a solid propellant cracks [J]. *AIAA Journal*, 1970 (8): 1322-1327.
- [30] JACOBS H R. An experimental study of the pressure distribution in burning flaws in a solid propellant grains [R]. [S.L.]: AFRPL-TR, 1972.
- [31] 李江, 何国强, 蔡体敏. 固体推进剂裂纹燃烧流场的数值模拟[J]. *推进技术*, 1999, 20(3): 36-39.
- [32] 韩小云, 周建平. 固体推进剂裂纹对流燃烧和扩展的研究分析[J]. *推进技术*, 1997, 18(6): 42-45.
- [33] 韩小云, 周建平. 固体推进剂燃烧断裂边界二维流场特性[J]. *推进技术*, 1998, 19(6): 20-23.
- [34] 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.

(编辑: 张永秀)