

文章编号: 1006-9941(2007)04-0359-04

# 国产 HTPB 复合固体推进剂 I - II 型裂纹断裂性能实验研究

张 亚, 强洪夫, 杨月诚

(第二炮兵工程学院 201 教研室, 陕西 西安 710025)

**摘要:** 采用 WDN-10KN 材料实验机对含 I-II 复合型裂纹的 HTPB 复合固体推进剂进行了拉伸速率为  $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  的单轴拉伸试验, 用摄像机记录了推进剂裂纹扩展至断裂的整个过程。得到了六种不同裂纹倾斜角下的力-变形曲线及裂纹扩展开裂角和断裂载荷。与 T 断裂准则、S 断裂准则和  $\sigma_c$  断裂准则进行比较, 结果表明推进剂裂纹扩展开裂角与 T 断裂准则的数值计算结果较为接近, 说明可以借助于 T 断裂准则对推进剂裂纹扩展的初始开裂角进行初步的理论预测。

**关键词:** 固体力学; HTPB 复合固体推进剂; I - II 复合型裂纹; 初始开裂角

**中图分类号:** TJ55; O334

**文献标识码:** A

## 1 引 言

固体推进剂药柱中裂纹的存在不但对药柱结构完整性产生很大影响, 而且还破坏了原药型的设计燃烧规律, 进而对发动机的内弹道性能产生影响。因此, 开展对固体推进剂断裂特性的实验研究, 详细了解裂纹扩展的特性, 获得可靠的试验数据, 便能预测推进剂药柱中裂纹扩展规律, 可以为固体火箭发动机药柱完整性分析和寿命预估提供依据。

国内外是从 20 世纪末逐渐开展针对复合固体推进剂断裂特性的研究, 屈文忠<sup>[1]</sup>采用恒速拉伸的实验方法对国产 HTPB 复合推进剂裂纹扩展特性进行了研究。黄风雷<sup>[2]</sup>用轻气炮驱动飞片技术研究复合推进剂的动态断裂。王元有、余世方<sup>[3]</sup>等进行了改性双基推进剂的 I 型裂纹断裂试验。刘朝丰<sup>[4]</sup>进行了固体推进剂 I 型裂纹的双轴拉伸试验研究。文献<sup>[5]</sup>采用紧凑拉伸式样对推进剂进行了 I 型裂纹进行了研究。这些研究集中于 HTPB 固体复合推进剂 I 型裂纹的拉伸实验。而对处于复杂应力状态下固体推进剂断裂特性的研究工作开展较少, 它对固体发动机结构完整性将具有重要的实际应用价值。

本试验针对 HTPB 复合固体推进剂 I-II 复合型裂纹断裂性能进行研究, 对裂纹扩展的整个过程进行了观察和分析, 探究了适合推进剂裂纹扩展的断裂准则。

## 2 实 验

### 2.1 试件制备

HTPB 复合固体推进剂方坯药取自航天四院 105

所。参考文献<sup>[6,8]</sup>把方坯药切割成拉伸试件, 本试验中试件尺寸设计为  $115 \text{ mm} \times 48 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。为进行不同复合比下的复合型裂纹的断裂特性实验, 在试件上预制出不同倾斜角度的裂纹, 裂纹长度为  $2a = 10 \text{ mm}$ 。Theocari P S<sup>[8]</sup>对 PCBA 材料进行实验时采用  $0.0003 \text{ m}$  的锯割出相应角度的裂纹, 然后用直径为  $0.0002 \text{ m}$  的铅丝对裂纹两端进行锐化处理, 确保裂纹尖端的足够尖锐和平直。由于条件的限制, 试验中我们做了一个宽度为  $10 \text{ mm}$  的锋利的刀片, 用这个刀片在推进剂材料上割出角度分别为  $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$ 、 $90^\circ$  的中心贯穿裂纹, 每个角度  $\beta$  的裂纹各五个, 见图 1 (中间部分  $70 \text{ mm}$  为标距, 其余部分试验时用夹头夹紧)。

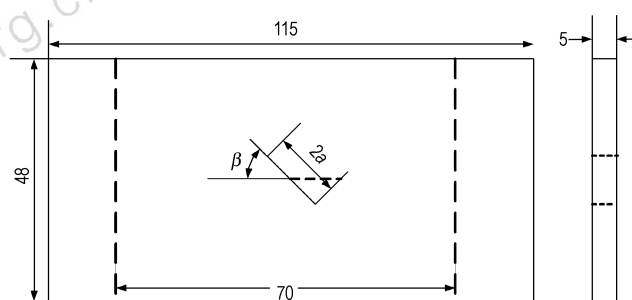


图 1 试件的几何形状

Fig. 1 Geometrical shape of the sample

### 2.2 试验仪器及试验方法

实验采用桂林瑞特材料实验机有限公司生产的万能材料实验机, 型号为 WDN-10KN, 最大载荷为  $10 \text{ KN}$ 。

试验时, 试件挂在 WDN-10KN 试验机上, 以恒定的拉伸速率  $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  加载。裂纹不断扩展, 直至被拉断, 停机卸载。

收稿日期: 2006-09-07; 修回日期: 2007-05-08

基金项目: 国家教育部 NECT 和国家重大基础研究发展计划资助(61338)

作者简介: 张亚(1983 -), 男, 博士研究生, 从事强度理论和计算力学方向研究。e-mail: zhangya\_5759@sina.com

### 3 实验现象观察

试验中我们观察到,复合固体推进剂的断裂由裂纹启裂、稳定扩展和失稳扩展3个阶段组成。裂纹扩展的开始阶段,会产生张开变形,在裂尖前部出现损伤区,当损伤达到一定程度裂纹开始扩展,这一阶段为裂纹启裂阶段;随着载荷的升高裂纹进入稳定扩展阶段,这一阶段占整个裂纹扩展的大部分时间;载荷达到一定程度后裂纹开始失稳加速扩展,这一阶段时间持续很短,试件很快被拉断。在裂纹不断扩展时,裂尖前端裂纹扩展路径上出现用肉眼都可以看到的乳白色细丝状的长条,这是由于推进剂填充颗粒“脱湿”后基体产生的银纹。

I型(图1中裂纹倾斜角 $\beta = \pi/2$ 时)、近I型(图1中裂纹倾斜角 $\beta$ 约在 $5\pi/12 - \pi/2$ 之间时)裂纹状态时,裂纹扩展过程中尖端的变形比较大,随着的裂纹倾斜角 $\beta$ 逐渐减小,逐渐变化到II型裂纹(图1中裂纹倾斜角 $\beta = 0$ ),裂纹尖端的变形越来越小。

试验中用相机拍摄下裂纹扩展的过程,裂纹倾斜角 $\beta = \pi/4$ 拉伸时裂纹扩展的过程见图2。

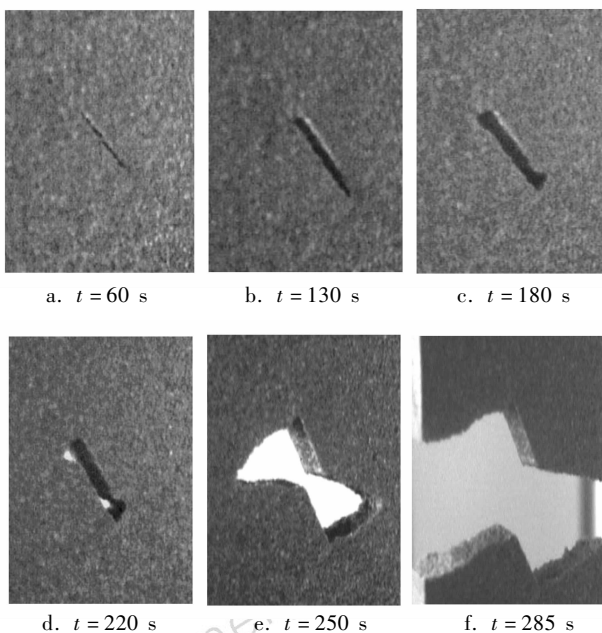


图2 裂纹倾斜角 $\beta = \pi/4$ 拉伸时的裂纹扩展过程

Fig.2 Crack propagation process with the crack inclination angle  $\beta = \pi/4$

Theocariss P S等<sup>[9]</sup>提出复合型裂纹是沿“锯齿形”路径扩展的,并且随着裂纹向前扩展“锯齿”之间的夹角不断变小,裂纹经过一定数量的锯齿形弯曲扩展后有向横向裂纹的转变趋势。试验中,不管开始时试件中裂纹的倾斜角为多少,裂纹开始扩展后都有向横向裂纹的转

变趋势,这与文献[9,10]相一致。从拉断后试件的断口可以看出,越接近试件的边缘,断口越接近于正拉断。从图3中不同裂纹倾斜角对应的试件拉断后的形状也可以看出,越接近拉断后试件的边缘缺口越平直。

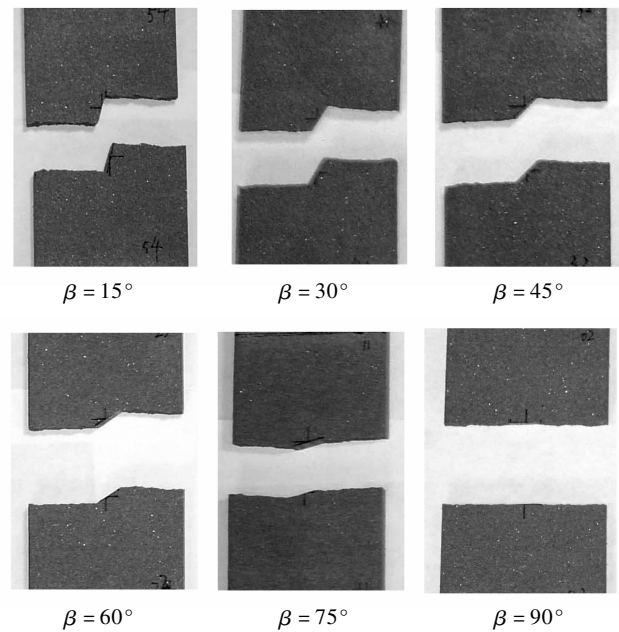


图3 不同裂纹倾斜角 $\beta$ 对应的试件拉断后的形状

Fig.3 Shape of the sample after crack under different crack inclination angle  $\beta$

观察拉断后试件的断口发现在产生新的裂纹之前,裂纹都要沿原裂纹向前扩展,不同裂纹倾斜角 $\beta$ 下扩展的长度不同, $\beta$ 越大越接近I型时沿原裂纹方向扩展长度越长。拉伸断口在厚度方向基本平直,这是由推进剂材料的特性造成的。裂尖处集中的应力使裂尖前部形成损伤区,损伤区内推进剂材料出现填充颗粒“脱湿”,形成沿厚度方向均匀分布的微孔穴和银纹,导致沿厚度方向的约束变得非常小,因此裂尖沿厚度方向是平直的。

实验在拉伸后还出现了微裂纹现象,每一个微裂纹扩展时,力-变形图的载荷突然下降然后又突然上升(见图4)。这是由于试件可能在制备中受损,拉伸时产生微裂纹,导致预制裂纹在拉伸过程中不沿原裂纹扩展,出现试验数据不合理的情况。

### 4 裂纹扩展开裂角及断裂载荷的结果分析

断裂试验完成后,中间厚度平面处的裂纹迹线与初始裂纹的夹角即是复合型裂纹的扩展开裂角。试件断裂后的裂纹扩展开裂角如图5,由图5中可见每个试件都含有两个断裂面,分别对应开裂角 $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 。

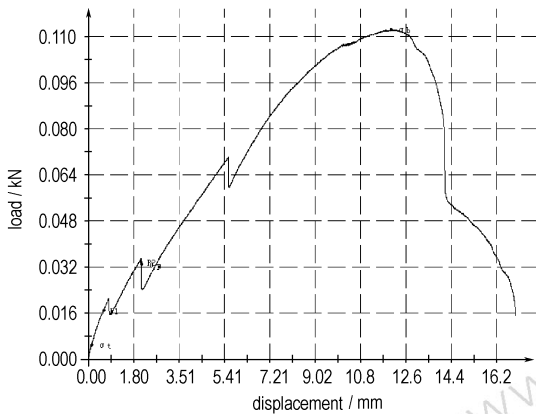


图 4  $\beta = \pi/4$  时受损试件的力-变形曲线

Fig.4 Load-displacement curve of damaged sample with angle  $\beta$  of  $\pi/4$

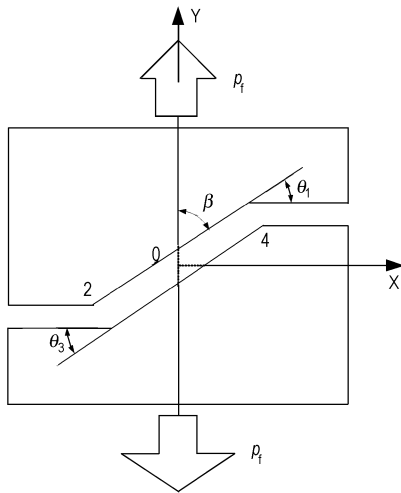


图 5 裂纹扩展开裂角示意图

Fig.5 Schematic representation of initiation propagation angle of the crack

对裂纹扩展开裂角进行处理时,规定裂纹扩展方向与原裂纹延长线方向之间夹角逆时针为正,顺时针为负。并利用 Chauvenett 准则<sup>[11]</sup>去除坏点,从不同复合比下力-应变曲线中读取相应试件的断裂载荷值。六种裂纹倾斜角下实验得到的数据见表 1。

表 1 裂纹扩展开裂角  $\theta$  和断裂载荷  $p_t$  的试验统计数据

Table 1 statistical data for angle of propagation  $\theta$  and fracture load  $p_t$

$\beta$	mean value $\theta_1$ ( $\theta_3$ )	fracture load $p_t$ (N)	coefficient of variation $\theta_1$ ( $\theta_3$ )
15°	-77° (-79.3°)	97.6	3.38% (3.65%)
30°	-63.3° (-64.1°)	94	3.95% (1.83%)
45°	-52.4° (-51.9°)	95	4.53% (4%)
60°	-34.8° (-35.8°)	100	7.58% (3.88%)
75°	-16.9° (-18.4°)	84	12.1% (8.26%)
90°	0° (0°)	87.3	0(0)

根据表 1 作出单轴拉伸下 HTPB 复合固体推进剂裂纹扩展开裂角与裂纹倾斜角的对应关系曲线见图 6, 表 1 中由于测得开裂角数据  $\theta_3$  较  $\theta_1$  偏差率要小,于是取  $\theta_3$  的均值与几种断裂准则的计算结果进行比较。

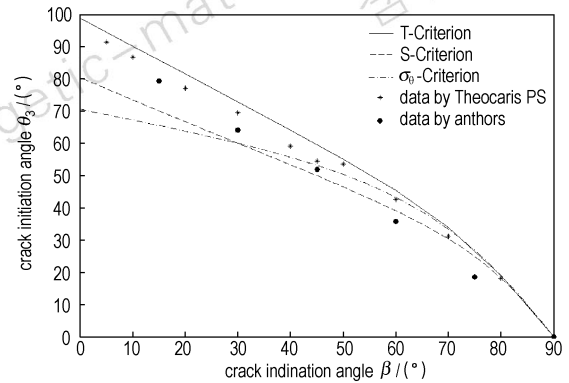


图 6 单轴拉伸下裂纹开裂角  $\theta_3$  随裂纹倾斜角  $\beta$  的变化

Fig.6 The crack initiation angle  $\theta_3$  vs angle  $\beta$  of crack inclination under biaxial loading

图 6 为本试验和 Theocariss<sup>[8]</sup> 试验得到裂纹扩展开裂角  $\theta$  随裂纹倾斜角  $\beta$  之间的变化关系图,为得到适合复合固体推进剂裂纹扩展研究的断裂准则,将 T 断裂准则<sup>[7]</sup>、S 断裂准则和  $\sigma_\theta$ <sup>[13]</sup> 断裂准则的理论计算结果作于图 6 中进行比较。在  $\beta > 30^\circ$  时,各个准则的计算结果区别不大,本试验结果与计算结果差别也不大。在  $\beta < 30^\circ$  时,复合固体推进剂实验得到裂纹扩展开裂角较大,这点不同于 S 断裂准则和断裂准则的计算结果,与 T 断裂准则计算结果和 Theocariss<sup>[8]</sup> 试验结果都很接近。

## 5 结 论

含 I - II 复合型裂纹 HTPB 复合固体推进剂在单轴拉伸后,裂纹沿“锯齿形”路径扩展,在边缘有向横向裂纹转变的趋势。试验中测得了裂纹扩展开裂角及断裂载荷,复合固体推进剂在裂纹倾斜角  $\beta < 30^\circ$  时裂纹扩展开裂角  $\theta$  较大,这与 T 断裂准则的计算结果的变化趋势较为接近,说明 T 断裂准则可以初步预测推进剂裂纹扩展开裂角。

### 参考文献:

[1] 屈文忠. 复合固体推进剂中裂纹扩展特性的研究[D]. 西安: 第二炮兵工程学院,1994.  
 QU Wen-zhong. research on crack growth behavior of Composite solid propellant [D]. Xi'an: The Second Artillery Engineering College. 1994.  
 [2] 黄风雷,王泽平,丁敬. 复合固体推进剂动态断裂研究[J]. 兵工

- 学报, 1995, 2.  
HUANG Feng-lei, WANG Ze-ping, DING Jing. Dynamic fracture of composite solid propellant[J]. *ACTA Armamentar*, 1995, 2.
- [3] 王元有, 余世方, 苑泽生, 等. 改性双基推进剂断裂特性的试验研究[R]. 北京工业学院内部报告, 1985.  
WANG Yuan-you, YU Shi-fang, Fan Ze-sheng, et. al. Experiment on fracture behavior of modified double base solid propellant[R]. Beijing: BeiJing industry college's inside report, 1985.
- [4] 刘朝丰. 固体推进剂 I 型裂纹双轴拉伸研究[D]. 西安: 第二炮兵工程学院, 2003.  
LIU Chao-feng. Research of model-I crack of solid propellant under biaxial tension[D]. Xi'an: The Second Artillery Engineering College. 2003.
- [5] 王善源译. 推进剂破坏: 一种断裂力学方法[J]. 固体导弹技术, 1981.  
WANG Shan-yuan. Solid propellant rupture: A fracture mechanics method [J]. *Solid missile technologic*, 1981, 1.
- [6] QJ924-85. 复合固体推进剂单向拉伸试验方法[S]. 1986.  
QJ924-85. Uniaxial tensile experimental method of Composite solid propellant[S]. 1986.
- [7] Theocaris P S, Andrianopoulos N P. The mises elastic-plastic boundary as the core region in fracture criteria[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1982, 16: 425 - 432.
- [8] Theocaris P S, Kardomates G A, Andrianopoulos N P. Experimental study of the T-criterion in ductile fracture[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1982, 17: 439 - 447.
- [9] Theocaris P S, Papadopoulos G. The distribution of the elastic strain-energy density at the crack tip for fracture mode I and II [J]. *International Journal of Fracture*, 1982, 18: 81 - 112.
- [10] B Cotterell, J R Rice. Slightly curved or kinked cracks[J]. *International Journal of Fracture*, 1980, 16: 155 - 169.
- [11] H D Young. Statistical Treatment of Experiment Data [M]. New York: McGraw-Hill, 1962.
- [12] Sih G C. Strain-energy-density factor applied to mixed mode crack problems[J]. *International Journal of Fracture*, 1974, 10: 305 - 321.
- [13] F Erdogan, G C Sih. On the crack extension in plate loading and transverse shear[J]. *J Basic Eng Trans ASME*, 1963, 88: 519 - 527.

## Fracture Behavior of HTPB Composite Propellant in I - II Mixed Mode Crack

ZHANG Ya, QIANG Hong-fu, YANG Yue-cheng

(The Second Artillery Engineering Academy No. 201 Faculty Shanxi, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** HTPB composite solid propellant containing slant internal cracks under uniaxial tensile load were measured by using of material testing device WDN-10KN, with the tensile rate of  $2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ . The whole progress of Crack propagation was recorded by camera. Curves of the Loading-Displacement, crack initiation angle and fracture loading were obtained. By comparison with series fracture criteria including T-Criterion, S-Criterion,  $\sigma_{\theta}$ -Criterion, the crack initiation angle of solid propellant obtained is in approximately agreement to that from T-Criterion, showing that the T-Criterion can be used as a theory prediction to the crack initiation angle of the composite solid propellant.

**Key words:** solid mechanics; HTPB composite propellant; I - II mixed mode crack; crack initiation angle

(上接 351 页)

## Effects of Chain Extenders and Cross Linkers on Mechanical Characteristics of Binder Film of NEPE Propellant at High Temperature

ZHANG Wei, XIE Wu-xi, FAN Xue-zhong, LI Xu-li, WEI Hong-jian

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The effects of chain extenders and cross linkers on the mechanical characteristics of the binder film of the NEPE propellant at  $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$  were experimentally studied. The results indicate that the aliphatic and low molecular polyether diols (chain extenders) improves the mechanical characteristics of the binder films at high temperature, and the three types of triols (cross linkers) increases the maximum stress of the binder film and decreases the maximum elongation of the bind film. It is found that the aliphatic diols might cause the exudation of nitrate esters from the binder film during the curing process.

**Key words:** solid mechanics; chain extender; cross linker; NEPE propellant; binder system; mechanical characteristic