

# 含 型裂纹复合固体推进剂双轴拉伸实验研究

成 曙<sup>1,2</sup> 路廷镇<sup>1</sup> 蔡国飙<sup>2</sup> 辛 健<sup>1</sup>

(1 第二炮兵 96630部队,北京 102206)

(2 北京航空航天大学,北京 100083)

**文 摘** 开展了复合固体推进剂含 型裂纹拉伸实验研究。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。

**关键词** 固体推进剂,双轴拉伸,裂纹

## Biaxial Tensile Experiment for Composite Solid Propellant With Crack

Cheng Shu<sup>1, 2</sup> Lu Tingzhen<sup>1</sup> Cai Guobiao<sup>2</sup> Xin Jian<sup>1</sup>

(1 Unit 96630 of the Second Artillery, Beijing 102206)

(2 Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

**Abstract** Tensile experiments of composite solid propellant with type are presented in this paper. Through the experiments under different tension speed, the limit characteristic curve of biaxial tension and stress-strain wreck curve are obtained. And this offers criterion for the wreck analysis of propellant material. The results show the driving force of crack is in inverse proportion to the parallel stress when the parallel stress is less than yielding stress.

**Key words** Solid propellant, Biaxial tension, Crack

### 1 引言

目前,有关复合固体推进剂 型裂纹双轴拉伸的文献较少,而玻璃和金属材料的平面裂纹双轴拉伸实验进行的较多,积累了许多有益的经验<sup>[1-2]</sup>。但由于复合固体推进剂的力学性能及安全性能与金属材料完全不同,在 型裂纹双轴拉伸方法上也将有较大的不同。要建立复合固体推进剂的 型裂纹双轴拉伸的测试方法,必须对其进行深入研究:一方面保证满足线弹性断裂力学的要求,准确测试复合固体推进剂的平面应变断裂韧性;另一方面保证复合固体推进剂在测试中的安全性。在实验研究中所涉及的主要研究内容包括:试样形状、裂纹深度及裂纹制备、加载速

度、临界断裂载荷的确定、临界应力强度因子的计算、固体推进剂 型裂纹在双轴应力起裂和扩展的规律等<sup>[3-4]</sup>。本文主要开展复合推进剂含 型裂纹拉伸实验研究。

### 2 实验

#### 2.1 材料

复合固体推进剂的填充颗粒质量分数为 87%。其组分为:高氯酸铵、铝粉、黏合剂、键合剂、防老剂等。推进剂泊松比为 0.49,松弛模量为<sup>[5]</sup>:

$$E(t) = E_0 - \sum_{i=1}^5 E_i [1 - \exp(-\lambda_i t)]$$

式中, $E_i$ 和 $\lambda_i$ ( $i=0, 1, \dots, 5$ )为材料常数,如表 1 所示。

收稿日期:2007-05-24;修回日期:2007-07-01

作者简介:成曙,1967年出生,博士,主要从事兵器发射理论与技术的研究工作

表 1 固体推进剂的材料常数

Tab 1 Material constant of solid propellant

$i$	$E_i$	$\nu_i$
0	2.00000	
1	0.516900	4.100000
2	0.064900	0.232600
3	0.041000	0.022000
4	0.077400	0.002500
5	0.086800	0.000284

表 2 含 I 型裂纹推进剂双轴拉伸实验的试件数量

Tab 2 Number of specimen in biaxial tensile experiment of solid propellant with type I crack

x轴拉力 /N	试件数 /根
0	5
12.07	5
20.07	7
40.07	6

## 2.2 实验方案

含 I 型裂纹推进剂双轴拉伸实验方案共需试件 23 根,分为 4 组,每组试件数量如表 2 所示。

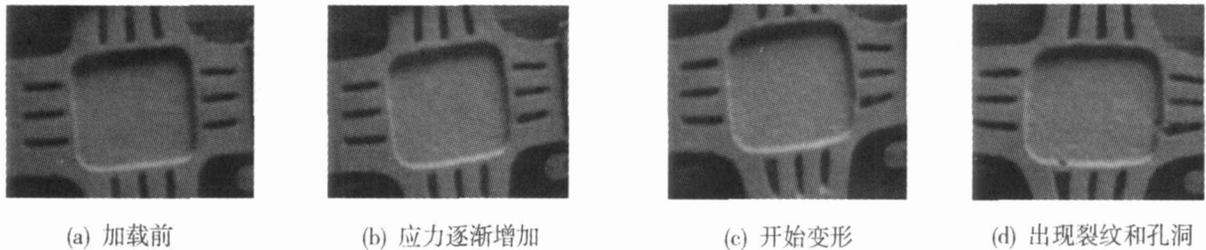


图 1  $\nu_x = \nu_y$  时实验中试件形状变化图

Fig 1 Shape variation of specimen when  $\nu_x = \nu_y$

从图 1 可以看出试件中心区域变形很小,表面随着应力的增加而变得不光滑,临近破坏点时,表面出现了裂纹和孔洞。当应力进一步增加时,试件中心区域与臂的交接处出现了宏观裂纹并迅速扩展,试件马上被撕裂。说明在双轴等拉时,中心区域的形状基本不变、应力均匀,与十字形试件应力分布的有限元计算结果一致。图 2 为典型的  $x$  轴、 $y$  轴应力变化图。

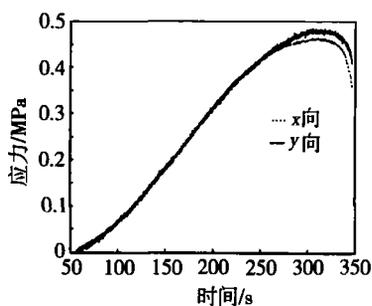


图 2  $x$  轴、 $y$  轴应力变化图

Fig 2 Stress variation in  $x$  axis and  $y$  axis

当  $\nu_x = \nu_y = 8:1$  时,试件中心区域在  $x$  方向变化很大,而在  $y$  方向变化很小,中心区域由正方形变为长方形,如图 3 所示,破坏点的应变  $\epsilon_x = \epsilon_y = 10\%$ 。

由于变速装置是机械的,加上力传感器的电子干扰,造成采集的实验数据波动很大,有毛刺,如图 4 (a) 所示。为了分析的准确性,采用了 Butterworth 低通滤波器对实验数据进行了滤波,低通滤波器的参数

## 2.3 实验过程

图 1 给出了当加载  $\nu_x = \nu_y$  时,试件形状变化过程。

为:通带的截止频率为 0.2 Hz,阻带的截止频率为 0.9 Hz,通带和阻带波纹系数分别为 0.9 和 30,采样频率为 10 Hz。经过滤波后的实验数据如图 4 (b) 所示。

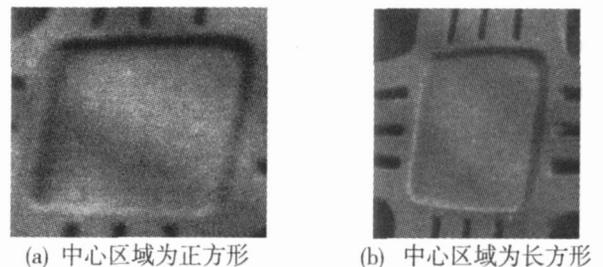


图 3  $\nu_x = \nu_y = 8:1$  时中心区域变化图

Fig 3 Center variation when  $\nu_x = \nu_y = 8:1$

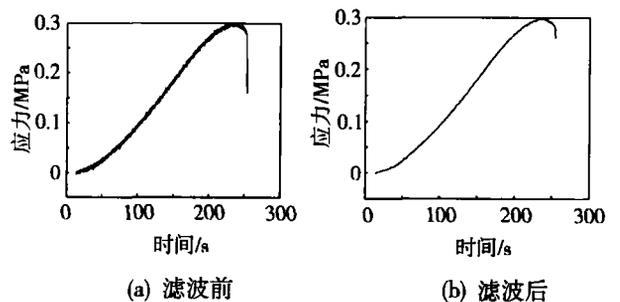


图 4 数据处理对比图

Fig 4 Comparison of data

## 3 结果及分析

在实验过程中,没有观察到明显的裂纹亚临界扩展,注意到裂纹起裂后迅速扩展,拉力随后迅速下降,这与文献[6]的实验现象相吻合。因此可以认为起裂点和最大应力点重合,裂纹开始起裂的应力就等于最大应力。表3是根据上述方法对实验数据所取的值。

从图5可以看出:(1)随着拉伸速率的增加,推进剂的强度增加,模量 $E$ 也增加。这是复合固体推进剂的粘弹性造成的。

(2)随着 $x$ 轴与 $y$ 轴的速率比例增大,复合固体推进剂的强度增大,这表明复合固体推进剂在双轴作

用力下是有弱化效应的,并非以前人们预测的强化效应,这种现象需用统一强度理论来解释。

图6是根据上述数据做出的随时间的变化图。从上述实验数据可以看出实验结果具有分散性,这是由于复合固体推进剂是一种高填充比颗粒增强复合材料。为了便于分析,假定实验结果数据服从高斯分布,且方差相等。那么确定平行应力对断裂韧性的影响只需比较平均数。通过获取实验数据值,可以得出上面四组的平均数分别为0.274 5、0.313 2、0.372 6、0.323 2 MPa。

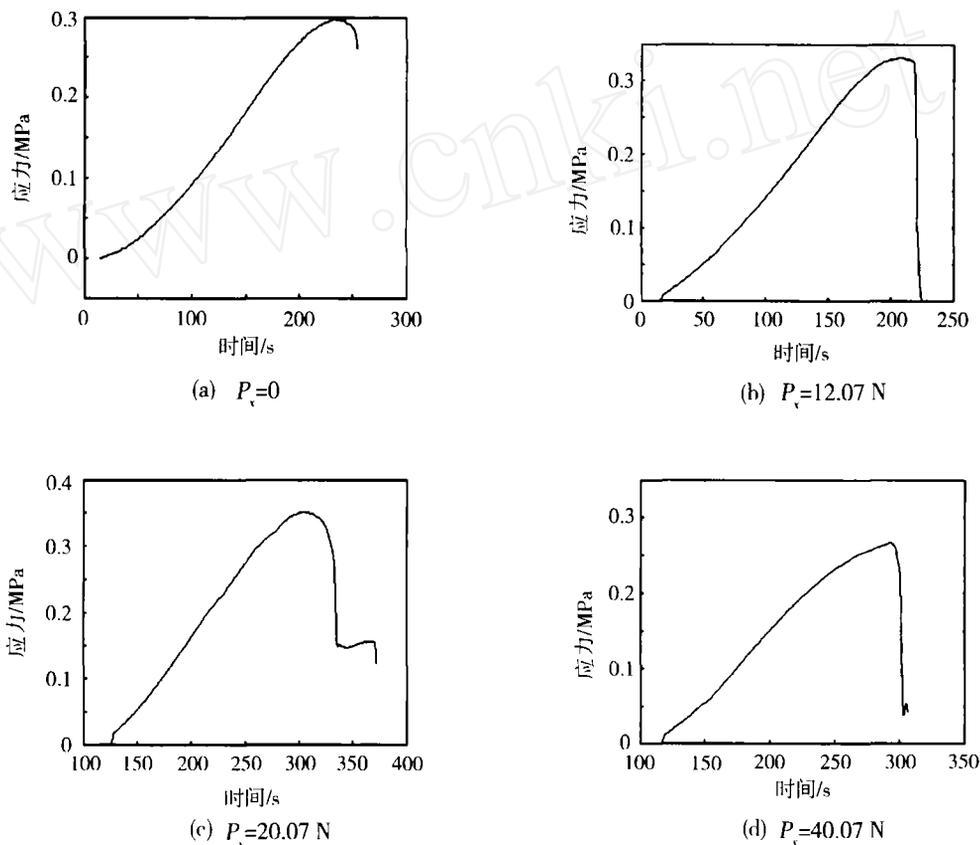


图5  $\sigma_y$  的变化图

Fig 5  $\sigma_y$  variation with time

一般断裂力学观点认为:型裂纹的起裂和扩展只跟垂直于裂纹面的应力有关,而与平行于裂纹的应力无关。这种结论主要基于 Irvin 早期的研究和假设, Irvin 认为裂纹尖端的渐进场是一个角分布函数,应力的大小只与应力强度因子有关,与载荷分布和构件形状无关,于是得到了用应力强度因子作为判据的单参数准则。由于它具有应用上的简便性,仅用应力强度因子来评价断裂问题几乎已成为一种惯例。应力强度因子与平行应力无关,致使人们常常认为:平行于裂纹面的应力不影响裂纹扩展特性。但国内外实验表明,平行于裂纹平面方向的作用力(它虽然不

影响  $K_I$  值)对裂纹扩展方向和速率等有着显著的影响。上述实验可用统一强度理论进行解释,双剪统一强度理论可以表述为:当作用于双剪应力单元体上的两个最大剪应力及其相应作用面上的正应力的函数达到某一特定值时材料发生屈服或破坏。双剪统一强度理论充分考虑到作用在单元上的所有应力分量对材料屈服或破坏的影响,是一种完全意义上的统一强度理论。本文通过分析复合固体推进剂在复杂应力状态下的力学性能,结合实验数据分析,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。因此对于复合固体推进剂,平行拉应力对裂纹有闭合作用。当平行应力超过一定值以后,断裂韧性开始下降,这时因为平行应力太大,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。

#### 4 结论

复合固体推进剂含型裂纹双轴拉伸实验表明,当双轴等拉时,中心区域的形状基本不变,试件中心区域应力均匀,与十字形试件应力分布的有限元计算结果一致。通过利用不同拉伸速率的实验方法,获得了双向拉伸极限特性主曲线和应力—应变破坏曲线。实验结果表明当平行应力小于屈服应力时裂纹驱动力与平行应力成反比关系。当平行应力超过一定值以后,断裂韧性开始下降,这时因为平行应力太大,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。

#### 参考文献

- 1 包亦望, Steinbrech R W. 脆性材料在双向应力下的断裂实验与理论分析. 力学学报, 1998; 30(6): 682 ~ 689
- 2 任家陶, 李冈陵. 双向拉伸实验的进展与钛板双向拉伸的强化研究. 实验力学, 2001; 16(2): 196 ~ 206
- 3 Lu Y C, Kuo K K Modeling and numerical simulation of combustion process inside a solid-propellant crack. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1994; 19: 217 ~ 226
- 4 Shiratori E, Lkegami K A new biaxial tensile testing machine with flat specimen. Bul Tokyo Inst Technol, 1967; 82: 105 ~ 118
- 5 刘朝丰. 复合固体推进剂型裂纹研究. 第二炮兵工程学院硕士学位论文, 2004
- 6 屈文忠. 国产 HTPB 复合推进剂裂纹扩展特性的实验研究. 推进技术, 1994; (6): 88 ~ 92

(编辑 李洪泉)

(上接第 55 页)

(2)利用热等静压工艺制备的 Ti - 46Al - 2Cr - 2Nb - 0.2B - 0.1W 材料的组织细小、均匀,经热处理后材料的伸长率达到了 2.5%。

#### 参考文献

- 1 Equo K, Yoshinao M. Phase stability of intermetallics in the Ti - Al system and their properties for structural materials. LightMetal, 1991; 44(11): 595 ~ 600
- 2 Keizo H. High temperature deformation behavior of TiAl. LightMetal, 1994; 44(11): 609 ~ 613
- 3 Yolton C F, Kim Y W, Ulrike. Powder metallurgy processing of gamma titanium aluminate. In: Gamma Titanium Aluminides 2003, The Minerals, Metals & Materials Society, 2003: 233 ~ 240
- 4 Gerling R, Clemens H, Schimansky F P et al. PM-Process of an advanced  $\gamma$ -TiAl alloy: technologies, microstructures and mechanical properties. In: Structural Intermetallics 2001, The Minerals, Metals & Materials Society, 2001: 139 ~

148

- 5 Habel U, Yolton C F, Moll J H. Gas atomized  $\gamma$ -titanium aluminate based alloys-processing, microstructure and mechanical properties. In: Gamma Titanium Aluminides 1999, The Minerals, Metals & Materials Society, 1999, 301 ~ 306
- 6 Venskutonis A, Ribacher K. Gamma met-100 titanium aluminate sheet-production and component fabrication. From [http://esapub.esrin.esa.it/pff/pffv10n2/pff35\\_full.pdf](http://esapub.esrin.esa.it/pff/pffv10n2/pff35_full.pdf)
- 7 刘咏, 黄伯云, 周科朝等. 粉末冶金 TiAl 基合金显微组织及力学性能的研究. 稀有金属材料与工程, 2000; 29(4): 251 ~ 254
- 8 张永刚等. 金属间化合物结构材料. 北京: 国防工业出版社, 2001: 759
- 9 KM YW. Gamma titanium aluminides: their status and future. JOM, 1995; 47(7): 39 ~ 41

(编辑 李洪泉)