# 基于内聚力模型的改性双基推进剂断裂特性研究\*

郑 健,余家泉,周长省,贾 登

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏南京 210094)

摘 要:为了研究改性双基推进剂的 【型断裂性能,进行了该推进剂材料的三点弯曲试验及单轴拉 伸试验,初步获取了材料的断裂强度及断裂能参数。基于内聚力模型构建材料断裂本构方程,应用于三 点弯曲断裂有限元仿真分析,得到仿真加载点载荷-位移曲线,并采用反演优化算法对内聚参数进行修 正,获取最终准确模型参数。为验证模型准确性,进行了不同初始裂纹长度下的三点弯曲试验及仿真。 结果表明模型能够较好地描述实际裂纹扩展过程中的载荷-位移特性及裂纹扩展特性,仿真结果与试验 结果误差小于7.6%,证明该模型的有效性。

关键词:改性双基推进剂;内聚力模型;断裂特性;参数反演方法 中图分类号: V435 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2016) 11-2181-06 DOI: 10.13675/j. cnki. tjjs. 2016. 11. 024

## **Research on Fracture Property of CMDB Propellant Based on Cohesive Zone Model**

ZHENG Jian, YU Jia-quan, ZHOU Chang-sheng, JIA Deng

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to investigate the type I fracture property of a kind of composite modified double-base propellant, three-point bending test and uniaxial tensile test were conducted to get the fracture strength and the fracture energy. The loading point force-displacement curves were obtained by the finite element analysis of the three-point bending fracture process, and the fracture constitutive equation based on the cohesive zone model was embedded in this finite element program. The parametric inversion method was used to modify the cohesive parameters, and the accurate parameters of the model were finally acquired. Three-point bending test and simulation with different initial crack length were conducted to verify the fracture model. The results show that the model can describe the load-displacement property and crack propagation property well, the maximum deviation between test and simulation is less than 7.6%, which certificates that the model has the validity and some reference values for the propellant fracture research in solid rocket motor.

Key words: Composite modified double-base propellant; Cohesive zone model; Fracture property; Parametric inversion method

#### 1 引 言

改性双基推进剂作为一种高能推进剂广泛应用 于固体火箭发动机装药。在发动机生产、运输、贮存 及使用过程中,由于疲劳、冲击、热应力等复杂载荷 影响,在推进剂内部会产生一定尺度的宏观及微观 裂纹。此类裂纹的存在会破坏固体火箭发动机的装 药结构完整性,影响发动机的内弹道性能,严重时会

 <sup>\*</sup> 收稿日期: 2015-06-19; 修订日期: 2015-09-07。
 基金项目: 总装重点预研项目(ZJ20101019)。
 作者简介: 郑 健, 男, 讲师, 博士, 研究领域为固体火箭发动机总体技术。E-mail: zhengjian@njust.edu.cn

导致发动机爆炸等危险。因此,研究固体推进剂的断裂性能十分必要<sup>[1-4]</sup>。

近年来,国内外学者针对固体推进剂的断裂性 能展开了大量试验研究。Beckwith S W<sup>[5]</sup>进行了双 基推进剂的单轴和双轴断裂试验,研究了温度、应 变率及压强对裂纹起裂及扩展的影响,构建了描述 裂纹扩展的函数关系,对固体推进剂裂纹扩展研究 意义重大。Knauss<sup>[6]</sup>针对固体推进剂进行了断裂实 验研究,通过观测裂纹的扩展过程,指出裂尖处存 在较为明显的应变不均匀性,这将与推进剂中固体 颗粒的形状、尺寸、颗粒方向等因素一起共同影响 着裂纹的扩展。张亚<sup>[7]</sup>对HTPB推进剂的 I-II型裂 纹断裂性能展开试验研究,研究了裂纹起裂至断裂 的整个过程,得到了不同裂纹倾斜角下的力-变形 特性,并验证了T准则预测裂纹扩展初始开裂角的 可靠性。常新龙<sup>[8]</sup>对HTPB推进剂在高温老化下的 材料断裂性能展开了深入研究,指出随着老化温度 及老化时间的增加,推进剂的断裂韧性会不断下 降,同时,结合扫描电镜对推进剂断面形貌进行分 析,指出了老化、应变率及断面位置对颗粒脱湿的 影响。

随着有限元技术的不断发展及其在发动机装药 结构完整性分析中的不断应用,越来越多的学者开 始采用有限元方法分析推进剂的断裂问题。袁端 才<sup>[9]</sup>基于线粘弹三维有限元方法,引入一种裂尖奇异 三维裂纹元,对发动机点火发射过程中的危险部位 进行了裂纹扩展模拟分析,计算裂纹扩展中的应力 强度因子,对裂纹稳定性进行相应评估。韩波<sup>10]</sup>构 建了一种幂指数形式黏聚区本构模型,并通过试验 获取了相关模型参数,对HTPB推进剂的断裂过程进 行仿真分析,所构建模型能够准确模拟HTPB推进剂 裂纹起裂及扩展过程,验证了黏聚区本构用于推进 剂裂纹扩展分析的可靠性。汪文强<sup>[11]</sup>将扩展有限元 方法应用于改性双基推进剂的开裂仿真分析,研究 了开裂机理及裂纹扩展区的应力变化,仿真结果与 试验结果符合性良好,证明了扩展有限元是一种分 析改性双基推进剂断裂过程的有效方法。

为研究改性双基推进剂的 I 型断裂性能,本文 进行了材料的三点弯曲试验和单轴拉伸试验,通过 试验预估了推进剂的断裂能及断裂强度,引入内聚 力模型对推进剂的裂纹扩展过程进行有限元分析, 并采用反演修正方法对内聚参数进行修正,最终得 到模型能够有效预测改性双基推进剂在 I 型断裂过 程中的力-位移特性及裂纹扩展特性。

### 2 实验部分

#### 2.1 实验方法及试件制备

本文实验使用的改性双基推进剂是由山西北方 兴安化学工业有限公司同一批次生产,其主要成分 包括:硝化纤维(NC)、硝化甘油(NG)、黑索金 (RDX)、凡士林(V)、催化剂(Cat)和中定剂(C<sub>2</sub>)等, 其成分和含量百分比见表1。

Table 1 Ingredients composition of CMDB propellant

Ingredient	NC	NG	RDX	V	$C_2$	Cat	CB
Mass fraction/%	20.5	21.0	54.6	0.3	1.0	2.2	0.4

为对上述改性双基推进剂在室温下的Ⅰ型断裂 性能展开研究,获取材料的断裂强度及断裂能,进行 了材料的单轴拉伸试验和三点弯曲试验。单轴拉伸 试验选用标准哑铃型试件进行,试件尺寸根据行业 标准QJ924-85<sup>[12]</sup>确定,在25℃环境温度下,以1mm/ min拉伸速率加载,记录试验曲线,处理得到材料真 实应力-应变曲线。

三点弯曲试验试件厚度,高度及跨度比按B:W: S=1:2:8设计,尺寸如图1所示,试件中部加工有预 制裂纹,裂纹长度a=10mm。在25℃环境温度下,将 加工好的三点弯曲试件置于材料试验机上,实施准 静态加载,如图2所示,选取加载速率v=1mm/min,记 录试验加载点载荷-位移曲线,进行多组试验,选取 有效试验数据进行处理。

#### 2.2 实验结果分析

单轴拉伸试验材料的真实应力-名义应变曲线



Fig. 1 Testing specimen



Fig. 2 Testing system

如图 3 所示,根据试验曲线,可以初步确定材料的断裂强度  $\sigma$  =3.75MPa。



Fig. 3 True stress and strain experimental curve of uniaxial tensile test

三点弯曲试验获取 p-δ曲线如图4所示,载荷 随位移变化分为两个阶段:(1)载荷随位移增大逐步 上升,该阶段裂纹未发生扩展,改性双基推进剂的弯 曲性能得以体现,曲线上升斜率呈现出先恒定后衰 减趋势,分析原因,主要是因为当载荷接近于峰值 时,裂尖裂纹开始萌发,对试件整体的弯曲刚度造成 衰减,同时,改性双基推进剂的粘弹松弛效应也有一 定影响;(2)裂纹开始扩展,载荷由峰值逐步减小,直 至试件完全断裂。



Fig. 4 Experiment load-displacement curve of three-point bending test

文献[13]给出了一种三点弯曲试验获取材料断裂能的方法,该方法考虑到了材料自重在加载过程中所做的功。本文试验试件尺寸较小,试件自重对断裂能获取影响不大,可以采用简化公式(1)获取该改性双基推进剂的 I 型断裂能

$$G = U / (B(W - a)) \tag{1}$$

式中U为试验载荷位移曲线积分,B为试件厚度,W为试件高度,a为初始裂纹长度。

试验获取载荷位移曲线积分U=0.128J,采用式

(1)计算断裂能 G=1.28 kJ/m<sup>2</sup>。

## 3 有限元建模及仿真分析

#### 3.1 内聚力模型

内聚力模型广泛应用于断裂力学分析。其最早 由 Dugdale<sup>[14]</sup>提出用于解决传统断裂力学方法引起的 应力奇异性问题。Needleman<sup>[15]</sup>则将内聚力模型与 有限元方法相结合,实现了对材料断裂过程的数值 模拟。不同内聚力模型对应着不同的内聚本构关 系,典型的双线型内聚力模型如图5所示。



Fig. 5 Typical bilinear cohesive zone model

其中 t 表示內聚力,  $\delta$  表示裂纹张开位移,  $\sigma$  为 內聚强度,  $\delta_0$  为特征位移,  $\delta_r$  为失效位移。内聚力-张开位移曲线积分 G,称为内聚能。当张开位移  $\delta \leq \delta_0$ 时,內聚单元表现出线弹性特性;当张开位移  $\delta > \delta_0$ 时,內聚单元开始出现损伤,表现出线性软化 特性。

双线型内聚本构关系可以表示为

$$t = \begin{cases} \frac{\sigma}{\delta_0} \delta & (\delta \leq \delta_0) \\ (1 - D) \frac{\sigma}{\delta_0} \delta & (\delta > \delta_0) \end{cases}$$
(2)

损伤因子D表示为

$$D = \begin{cases} 0 & (\delta \leq \delta_0) \\ \frac{\delta_f(\delta - \delta_0)}{\delta(\delta_f - \delta_0)} & (\delta > \delta_0) \end{cases}$$
(3)

本文采用常见的双线型内聚力模型对改性双基 推进剂的 I 型断裂特性展开研究。内聚强度 σ 和内 聚能 G 作为决定双线型内聚力模型的重要因素,已 经通过上述试验初步获取,内聚强度 σ =3.75MPa,内 聚能 G=1.28 kJ/m<sup>2</sup>。

#### 3.2 有限元建模

采用商业有限元软件 Abaqus 构建三点弯曲有限 元模型如图 6 所示。改性双基推进剂属于粘弹性材 料,在 15℃环境温度下,进行该推进剂的松弛试验, 获得其松弛模量 Prony 级数表示为

$$E(t) = 356.96 + 82.10e^{-\frac{t}{0.108}} + 92.79e^{-\frac{t}{0.467}} + 179.91e^{-\frac{t}{1573}} + 203.59e^{-\frac{t}{8.857}} + 164.71e^{-\frac{t}{57.439}} + (4)$$

$$105.35e^{-\frac{t}{531.774}}$$

t

考虑到试验加载速率缓慢,材料的粘弹性表征 不明显,为了简化计算模型,将改性双基推进剂作为 线弹性材料处理,选取松弛模量中的平衡模量 E =356.96MPa作为材料弹性模量,单元类型为CPS4R。 裂纹面选用 COH2D4 内聚单元, 内聚强度  $\sigma$  = 3.75MPa, 内聚能 U=1.28 kJ/m<sup>2</sup>。模型边界条件及施 加位移载荷情况如图6所示。



Fig. 6 Finite element model of three-point bending test

模型仿真获取加载点载荷-位移曲线如图7所 示。对比试验曲线与仿真曲线发现,模型能够描述 裂纹扩展过程中的载荷-位移变化趋势,曲线上升段 重合较好,但下降段存在一定误差。分析误差原因, 主要是因为模型参数通过试验直接获取,试件制备、 试验方法等引起的试验误差会对最终的模型参量 产生影响,造成最终仿真曲线与试验曲线存在较大 误差。



Fig. 7 Comparisons between experiment curve and simulation curve

### 3.3 模型参数的反演修正

为了得到更为准确的模型参数,必须对通过试 验获取的内聚能及内聚强度进行一定的修正。本文 采用一种反演识别方法对模型参数进行必要修正, 思路是首先通过试验获取的初始内聚参数建立有限 元模型,采用该模型进行正向求解,获取仿真载荷-位移曲线,然后构建仿真曲线与试验曲线间的误差 目标函数 R,通过优化算法不断更新模型中的内聚

参量  $\sigma$  及 G,使得目标函数小于限度  $R_{im}$ ,将此时内 聚参量作为最终模型内聚参量,具体反演修正过程 如图8所示。

目标函数 R 的构建过程主要分为两个步骤:(1) 将试验曲线与仿真曲线离散成自变量δ,——对应的 的两组点:(2)计算两组点的均方误差作为目标函数 R,可以表示为

$$R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{n} \left[ P(\delta_i) - Q(\delta_i) \right]^2 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n)$$
(5)

式中n为总的离散点数, $\delta_i$ 为i点对应横轴坐标,  $P(\delta_i)$ 为*i*点对应试验载荷值,  $Q(\delta_i)$ 为*i*点对应仿真载 荷值。



Fig. 8 Flow chart of the inversion procedure

采用上述反演修正方法对内聚参数进行不断更新, 得到最终内聚强度  $\sigma$  =3.5MPa, 内聚能 U=1.5 kJ/m<sup>2</sup>, 获取修正后仿真结果如图9所示。比较反演后的仿 真曲线与试验曲线,发现二者具有较好一致性,说 明采用该反演方法能够对模型参数进行很好的 修正。



Fig. 9 Comparisons between experiment curve and inversed simulation curve

#### 3.4 模型验证

为了验证上述建立的界面 I 型断裂模型的准确 性,补充进行了裂纹长度a=12mm的三点弯曲试验及 有限元仿真分析。对比加载位移 δ 为1,2,3,4mm 时,试验及仿真裂纹扩展情况,如图 10 所示,结果显 示采用上文构建的内聚断裂模型能很好的预测改 性双基推进剂在 I 型断裂下的裂纹扩展情况。同 时,比较试验与仿真载荷-位移曲线如图 11 所示,二 者一致性较好,最大误差小于 7.6%。综合上述两 点,可以确定所构建断裂模型能够预测该 CMDB 推 进剂 I 型断裂力学特性,通过反演修正得到参数准 确有效。



 $\delta = 1 \text{mm}$ 







 $\delta = 3 \text{mm}$ 



 $\delta = 4 \text{mm}$ 

Fig. 10 Comparison chart of test and simulation crack growth



Fig. 11 Comparisons between experiment curve and simulation curve of the verification test

### 4 结 论

通过本文研究,得到以下结论:

(1)试验、仿真及反演方法获取了改性双基推进 剂的 I 型断裂内聚力模型,并采用该模型对该推进 剂 I 型断裂过程中的力-位移特性及裂纹扩展特性 进行了试验验证。

(2)比较试验与仿真两者的力-位移曲线,二者 一致性较好,最大误差小于7.6%,证明了该模型的准 确性。

#### 参考文献:

- [1] 常新龙,龙 兵,胡 宽,等.固体推进剂断裂性能 研究进展[J].火炸药学报,2013,36(3):6-13.
- [2] 孟红磊,赵秀超,鞠玉涛,等.基于累积损伤的双基 推进剂强度准则及实验[J].推进技术,2011,32(1): 109-112. (MENG Hong-lei, ZHAO Xiu-chao, JU Yutao, et al. Strength Criterion Based on Accumulative Damage for Double- Base Propellant and Experiment [J]. Journal of Propulsion Technology, 2011, 32(1): 109-112.)
- [3] 孟红磊,鞠玉涛,周长省,等.改性双基推进剂损伤 破坏研究[J].弹道学报,2011,23(2):79-82.
- [4] 郑 健, 汪文强, 陈 雄, 等. 基于微观结构分析的 CMDB推进剂动态断裂韧性加载率敏感性研究[J]. 推进技术, 2015, 36(6): 940-946. (ZHENG Jian, WANG Wen- qiang, CHEN Xiong, et al. Effects of Loading Rate and Microstructure on Dynamic Fracture Toughness of CMDB Propellant[J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(6): 940-946.)
- [5] Beckwith S W, Wang D T. Crack Propagation in Double-Base Propellants [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1978, 15(6): 355-361.

- [6] Knauss W G. Fracture and Failure at and Near Interfaces under Pressure[R]. ADA348939, 1998.
- [7] 张 亚,强洪夫,杨月诚. 国产 HTPB 复合固体推进
   剂 I Ⅱ 型裂纹断裂性能实验研究[J]. 含能材料,
   2007, 15(4): 359-362.
- [8] 常新龙,余堰峰,张有宏,等. HTPB 推进剂老化断裂性能试验[J].推进技术,2011,32(4):564-568.
  (CHANG Xin-Long, YU Yan-feng, ZHANG You-hong, et al. Test on Aging Fracture Properties of HTPB Propellant [J]. Journal of Propulsion Technology, 2011,32(4):564-568.)
- [9] 袁端才,唐国金,雷勇军,等.固体发动机药柱表面
   裂纹分析[J].试验技术与试验机,2006,46(1):9-13.
- [10] 韩 波, 鞠玉涛, 周长省. HTPB 推进剂粘聚区本构 模型反演识别研究[J]. 兵工学报, 2012, 33(11): 1335-1341.

- [11] 汪文强,郑 健,陈 雄,等.基于扩展有限元的改 性双基推进剂的开裂过程模拟研究[J].推进技术, 2015,36(1):149-154.(WANG Wen-qiang, ZHENG Jian, CHEN Xiong, et al. Numerical Simulation of Crack Propagation in CMDB Propellant Based on Extended Finite Element Method [J]. Journal of Propulsion Technology, 2015, 36(1):149-154.)
- [12] QJ924-85复合材料推进剂单向拉伸试验方法[S]. 北 京:航天工业部标准, 1985.
- [13] 高丹盈,张廷毅.三点弯曲下的钢纤维高强混凝土断 裂能[J].水利学报,2007,38(9):1115-1120.
- [14] Dugdale D S. Yielding of Steel Sheets Containing Slits
  [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960, 8(2): 100-104.
- [15] Needleman A. A Continuum Model for Void Nucleation by Inclusion Debonding[J]. Journal of Applied Mechanics, 1987, 54(3): 525-531.

(编辑:田佳莹)