

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2013.06.010

硝胺和复合固体推进剂断裂韧性的试验测定^{*}

岳中豪 刘天生 景晓苏

中北大学化工与环境学院(山西太原, 030051)

[摘 要] 为了研究硝胺推进剂(挤压成型和浇注成型)和复合固体推进剂的断裂韧性,文章采用非接触类型的视频引伸仪对固体推进剂 CT 试样进行断裂测试,测得厚度为 38 mm 的 3 种试样断裂参数 K_{IC} 分别为:0.7546、0.0812、0.3368 MPa·m^{1/2},并且建立推进剂材料的失效评估图。发现挤压成型的硝胺推进剂断裂韧性比浇注成型硝胺推进剂和复合推进剂高,CT 试样预估的失效载荷与试验结果能较好地吻合。

[关键词] 硝胺推进剂 HTPB 推进剂 固有缺陷模型 失效评估图 紧凑拉伸试样

[分类号] TJ55 TQ560.72

引言

固体推进剂广泛应用于战术和战略导弹。双基推进剂由于是无烟推进制导,因此用于反坦克导弹。然而,双基推进剂比冲低于规定的 200 m/s,为提高这些推进剂的能量,添加 RDX/HMX 是一种有效的方法,这种推进剂也被称为硝胺推进剂,可以通过挤压或浇注成型。浇注成型推进剂比挤压成型的力学性能要低,但是挤压推进剂的挤压成型过程十分危险,需要特别小心。复合推进剂是另一种类型的固体推进剂,丁羟(HTPB)推进剂是工业生产规模最大、应用范围最广的复合固体推进剂,其能量、力学、燃烧、贮存和成本等方面的性能较佳,因而表现出优良的综合性能^[1]。

虽然固体推进剂有很多优点,但也存在问题。在压药开始之前或操作期间会产生裂缝。随着时间的推移,微小裂缝开始降低固体推进剂的机械性能,增加形成宏观裂纹的可能性。裂缝形成后,缩短了发动机点火延迟时间并使发动机工作压力升高,使发动机内弹道曲线严重偏离正常状态^[2],甚至导致发动机失效,即使发动机没有失效,裂纹的形成仍会导致推进剂燃速不均匀,从而减少导弹的射程。

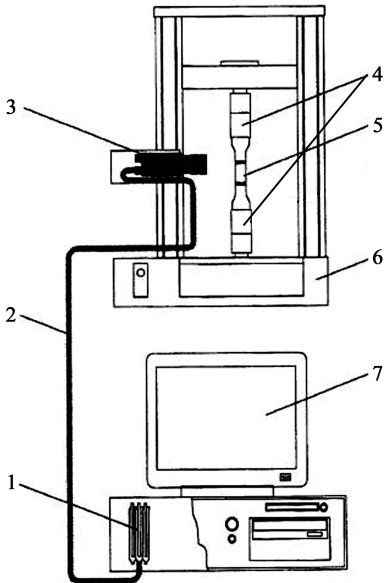
随着聚合物在结构工程中应用的增加,科学家们对有断裂韧性的聚合物产生了极大的兴趣。通过断裂力学的应用,从实验中得到了大量的材料断裂性能,包括韧性、疲劳和应力腐蚀增长率。在预测聚合物的缺口强度时,由于其固有的复杂性并且涉及的因素很多,人们提出了一些半经验破坏准则,有的是根据线弹性断裂力学(LEFM)提出的,有的则是

根据切口附近分布的应力提出的^[3],这些理论主要用于预测断裂的发生。3 种断裂模型即固有的缺陷模型(IFM)、点应力标准(PSC)和平均应力标准(ASC)都用来检测不同复合材料和固体推进剂的中心有孔和有缺口的拉伸试样所产生的缺口强度数据^[4]。

1 试验原理

1.1 非接触式视频引伸仪

本文采用非接触式视频引伸仪(图 1),对 3 种类型的硝胺推进剂断裂韧性进行测试。



1 - 视频卡;2 - 视频电缆;3 - CCD 摄影头;4 - 柄;
5 - 样品;6 - 负载框架;7 - PC 运行应用软件

图 1 非接触式视频引伸仪

Fig. 1 Non-contacting type video extensometer

^{*} 收稿日期: 2013-05-13

作者简介: 岳中豪(1989~),男,硕士研究生,主要从事武器系统与运用的研究。E-mail:314396043@qq.com

视频引伸仪是利用亚像素法原理以无接触方式同时测量纵向和横向两个方向的试样变形,它的核心组件是 CCD 元件,电信号与光强度成比例输出,利用线阵 CCD 测量变形量。其优点在于非接触、无磨损、不引入测量的附加误差、测量精度高、能够测量材料拉伸变形的全过程,特别是能够测量材料在断裂前后的应力应变曲线,从而能够测得材料的各种极限特性参数,其测量范围由镜头焦距决定,配备不同焦距的镜头,可获得各种测量范围的量程。

1.2 失效评估图

失效评估图用式(1)表示:

$$K_Q = K_F \left\{ 1 - m \frac{\sigma_{NC}^\infty}{\sigma_0} \right\} \sqrt{1 - \left(\frac{\sigma_{NC}^\infty}{\sigma_0} \right)^2} \quad (1)$$

式中: K_Q 是应力强度因子; K_F 和 m 是断裂参数; σ_{NC}^∞ 是缺口强度; σ_0 是材料没有缺口的强度。

从式(1)看出,断裂强度随着裂纹大小的增加而减小,即 K_Q 随着 σ_{NC}^∞ 的减小而增加。当 $0 < \sigma_{NC}^\infty < \sigma_0$ 时,有可能建立断裂强度 σ_{NC}^∞ 与断裂尺寸 $2C$ 的曲线^[5]。

据双参数断裂准则, K_{Q_∞} 和 m 的线性关系为:

$$K_{Q_\infty} = K_F \left\{ 1 - m \left(\frac{\sigma_{NC}^\infty}{\sigma_0} \right) \right\} \quad (2)$$

参数 K_F 和 m 在式(2)中是由数据 K_{Q_∞} 、 σ_{NC}^∞ 和 σ_0 最小二乘曲线拟合所决定的。据推测, $0 \leq m \leq 1$ 。当 m 大于 1 时,通过适当修改参数 K_F 的断裂数据,使参数 m 取值为 1。如果 m 小于零时,参数 m 取值为零并且 K_{Q_∞} 的平均值屈服于参数 K_F ^[6]。

图 2 是一个典型的失效评估图。对于指定的缺陷尺寸和应力水平 σ_a ,可以找到相应的应力强度因子 K_a 和 σ_{NC}^∞ 的断裂结构。如果 $A(K_a, \sigma_{NC}^\infty/\sigma_0)$ 位于失效评估图的曲线内,那么断裂结构在应力水平下是安全的。 B 点是失效点, B 点对于指定缺陷尺寸的断裂结构的失效强度是可以估算的。指定应力水

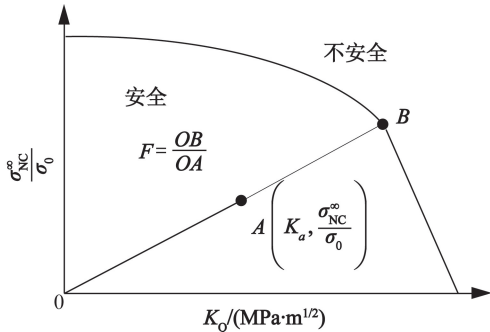


图 2 一个典型的失效评估图(σ_{NC}^∞ 与 K_Q 的曲线)

Fig. 2 A typical failure assessment diagram

(σ_{NC}^∞ vs. K_Q curve)

平下安全因素为: $F = OB/OA$,即以载荷表示的安全裕度, F 的大小反应了结构的安全强度。可以看出,当 $F \leq 1$ 时将不安全或发生破坏;当 $F > 1$ 时结构才是安全的。

1.3 紧凑拉伸 (CT) 试样

$$K_I = \frac{P}{B \sqrt{W}} Y \left(\frac{C}{W} \right) \quad (3)$$

式中: $Y(\zeta) = (2 + \zeta)(1 - \zeta)^{-\frac{3}{2}}(0.886 + 4.64\zeta - 13.32\zeta^2 + 14.72\zeta^3 - 5.6\zeta^4)$; p 是负载, kN; B 是厚度, mm; W 是宽度, mm; C 是 CT 试样裂纹的长度, mm。

紧凑拉伸 (CT) 试样失效情况下弹性 (净截面) 应力为:

$$\sigma_{nf} = \frac{2p_{\max}}{BW} \left(2 + \frac{C}{W} \right) \left(1 - \frac{C}{W} \right)^{-2} \quad (4)$$

式中: p_{\max} 为失效载荷。

1.4 断裂韧性的经验关系

无量纲参数 β_c 、 β_{ic} 与平面应力和平面应变塑性区大小的板厚度比成正比, Irwin 定义:

$$\beta_c = \frac{1}{B} \left(\frac{k_{ic}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (5)$$

$$\beta_{ic} = \frac{1}{B} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (6)$$

式中: K_{IC} 是平面应变条件下的断裂值; k_{ic} 是平面应力条件下的断裂值; B 是厚度, mm; σ_{ys} 是材料的屈服强度。对于 $\beta_c < 2\pi$, 有 Irwin 半经验公式:

$$\beta_c = \beta_{ic} (1 + 1.4\beta_{ic}^2) \quad (7)$$

K_c 值作为平面应变和平面应力贡献的总和, 试样厚度对断裂韧性 (K_c) 的影响为:

$$K_c = K_{IC} + \frac{1}{\pi B} \left(\frac{k_{ic}}{\sigma_{ys}} \right) (k_{ic} - K_{IC}) \quad (8)$$

用式(8)中两种试样不同厚度的 K_c 值, 联立两个方程组求解, 确定未知数 K_{IC} 和 k_{ic} ^[7-10]。

2 试验

2.1 材料

浇注成型硝胺推进剂的组成如下 (以下均为质量分数): 硝化棉 41%, 硝化甘油 38%, RDX 12%, 高氯酸铵 6%, 铝 3%; 挤压成型硝胺推进剂的组成: 硝化棉 56%, 硝化甘油 38%, RDX 6%; HTPB 复合推进剂的组成: 高氯酸铵 68%, 铝 18%, HTPB 14%。

2.2 单轴拉伸试验

固体推进剂单轴拉伸性能采用 Instron 通用测试系统确定。表 1 列出了 3 种固体推进剂单轴拉伸

表 1 单轴拉伸强度和断裂力学固体推进剂材料的试验结果

Tab.1 Uniaxial tensile strength and fracture mechanics test results of solid propellant materials

名称	σ_0 / MPa	裂纹长度 C/mm	C/W	$Y(C/W)$	失效载荷 p_{max}/kN	应力强度因子 K_Q / ($MPa \cdot m^{1/2}$)	净截面应力 σ_{nt}/MPa
硝胺(挤压)	13.00	45.58	0.5950	13.390	0.5566 ^a	0.7140	6.120
		49.58	0.6460	16.550	0.4624 ^a	0.7310	6.761
		43.23	0.5620	11.850	0.6968	0.7880	6.444
硝胺(浇注)	1.80	33.01	0.4280	7.817	0.1034	0.0771	0.531
		33.96	0.4280	8.109	0.1080	0.0836	0.582
复合推进剂	2.60	39.33	0.5110	9.995	0.3429	0.3270	2.493
		35.40	0.4590	8.555	0.3416	0.2790	1.987
		39.50	0.5130	10.050	0.3480	0.3340	2.553

注:紧凑拉伸(CT)的试样宽 $W=76mm$,厚度 $B=38mm$;a 表示用常规的夹式裂纹张开位移计测量,剩余的用非接触类型视频引伸仪测量。

试验结果。其中使用的拉伸材料试样的几何形状见图 3。

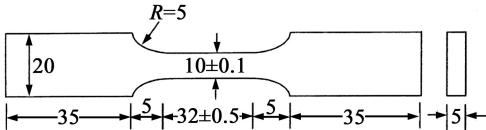


图 3 拉伸试样(单位:mm)

Fig.3 Tensile specimen (unit: mm)

从拉伸强度试验结果可见,挤压成型的硝胺推进剂的强度最高,其次是复合推进剂,浇注成型硝胺推进剂的强度最低。

2.3 断裂力学试验

通过图4所示的紧凑拉伸(CT)试样的断裂韧性试验可以得到固体推进剂临界应力强度因子 K_c 。室温下,在加载速度为0.5 mm/min的Instron 8801试验机上对试样进行加载,直到试样断裂失稳。用5 mm行程12 mm长的常规夹式裂缝张开位移计和20mm长非接触视频引伸仪(图5),测量挤压成型硝胺推进剂的裂缝张开位移。

图6是3种推进剂的负载和裂纹张开位移

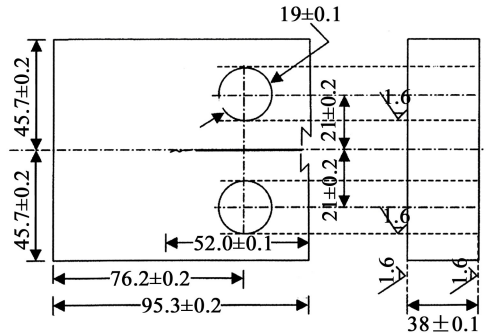


图 4 紧凑拉伸(CT)试样(单位:mm)

Fig.4 Compact tension (CT) specimen (unit: mm)

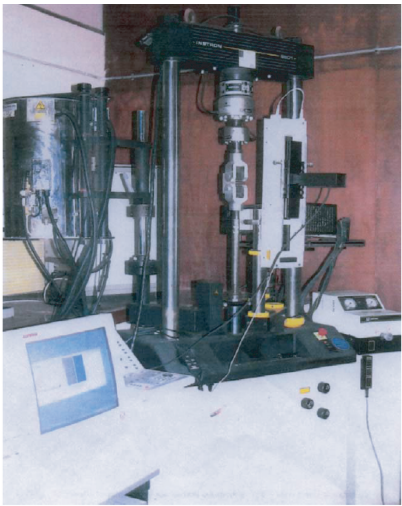
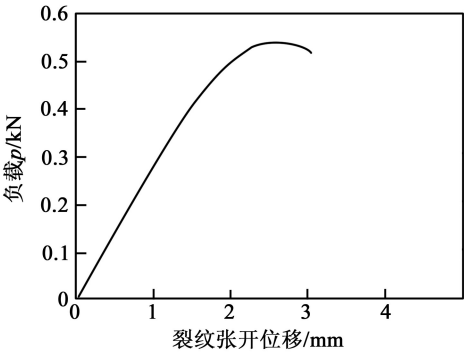


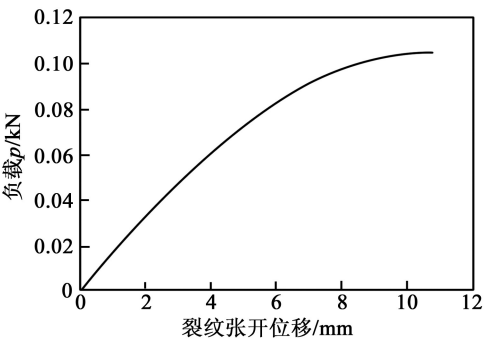
图 5 在 Instron 8801 试验机上用非接触视频引伸仪测试断裂韧性

Fig.5 Fracture toughness test using non-contacting type video extensometer on Instron model 8801

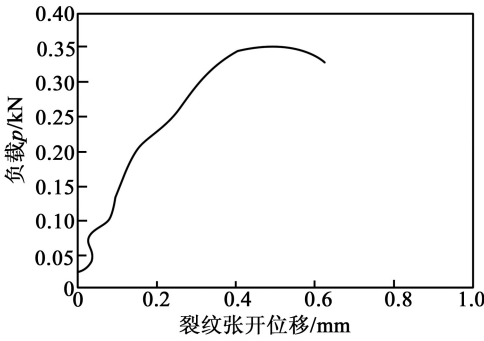
(COD)的曲线图。从图中可见,挤压成型硝胺推进剂的裂纹扩展需要最高的负载,而表1中挤压成型硝胺推进剂的应力强度因子 K_Q 最高。挤压成型硝胺推进剂的这种大拉伸强度以及 K_Q 表明这种推进剂材料不易发生裂纹扩展,因此燃烧不受控制。硝



(a)



(b)



(c)

(a) 挤压成型硝胺推进剂;(b)浇注成型硝胺推进剂;(c)复合固体推进剂

图 6 3 种固体推进剂 CT 试样负荷对比裂纹张开位移
Fig.6 Load vs. crack opening displacement plots of CT specimens for the three solid propellants

胺推进剂表现出来的高抗裂纹扩展性,与金属材料相反。

3 断裂分析结果

试验对硝胺推进剂(挤压和浇注成型)和复合推进剂紧凑拉伸 CT 试样的断裂数据进行了分析。表 2 比较了硝胺推进剂和复合推进剂的 CT 试样的失效载荷,发现预估失效载荷与试验结果比较吻合。

紧凑拉伸 CT 试样是在 ASTM E399 标准基础上,采用两倍标准厚度制作的。从表 1 中可以看出,挤压成型、浇注成型硝胺推进剂和复合推进剂 3 种固体推进剂材料的应力强度因子 K_Q 的平均值分别是 0.7443、0.0803、0.3133 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。如果假设 3 种推进剂材料的 k_{ic} 值分别用 K_Q 的平均值代替, σ_0 等于 σ_{ys} ,厚度 B 为 38mm,用 Irwin 断裂韧性经验公式求得平面应变断裂韧性 K_{IC} 的值分别是 0.7392、0.0801、0.2890 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。值得注意的是,表 2 中 3 种推进剂试样的断裂韧性参数 K_F 值和表 1 中相应的临界应力强度因子 K_Q 的平均值很相近。如果假设断裂参数(K_F)值为 k_{ic} , σ_0 等于 σ_{ys} ,厚度 B 为 38mm,用 Irwin 断裂韧性经验公式求得试样的 K_F 值分别为:0.7492、0.0810、0.3054 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。该结果与 3 种推进剂材料相应的 K_{IC} 值较接近。

用断裂韧性经验公式(8)估算表 2 中 5mm 和 38mm 厚挤压成型硝胺推进剂的断裂试样薄板(平面应力条件)和厚板(平面应变条件)的 K_F 值。平面应力条件下薄板的 K_F 值是 1.3328 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,而平面应变条件下厚板 K_F 值是 0.6880 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,比平面应变条件下断裂韧性 K_{IC} (0.7492 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)低 8%,这些结果的差异可能主要是由于断裂韧性的经验公式(7)和(8)精确性和材料性质的不同。

图 7 是通过 5 mm 和 38 mm 厚断裂试样的指定断裂参数(K_F 和 m)用式(1)建立的挤压成型硝胺推进剂的失效评估图。可以看出,图中测试数据接近失效评估图的失效边界。

4 结论

本文对挤压成型、浇注成型硝胺推进剂和复合推进剂紧凑拉伸(CT)试样进行了断裂测试。试验

表 2 挤压成型、浇注成型硝胺推进剂和复合推进剂紧凑拉伸试样的预估失效载荷
Tab.2 Failure load (p_{\max}) estimates of compact tension specimens made of nitramine (in extruded and slurry cast conditions) propellant and composite propellant

名称	σ_0 / MPa	K_F / ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	m	裂纹长度 C/mm	失效载荷 p_{\max}/kN	$\frac{\sigma_{\text{NC}}^\infty}{\sigma_0}$	K_{Q_∞} / ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	预估失效载荷 p_{\max}/kN	相对误差
硝胺(挤压)	13.0	0.7546	0	45.58	0.5586	0.1579	0.7228	0.5823	-4.200
				49.58	0.4624	0.1553	0.7398	0.4715	-2.000
				43.23	0.6968	0.1793	0.8012	0.6574	5.700
硝胺(浇注)	1.80	0.0812	0	33.01	0.1034	0.1419	0.0778	0.1077	-4.200
				33.96	0.1080	0.1517	0.0846	0.1038	3.900
				39.33	0.3429	0.3744	0.3526	0.3293	4.000
复合推进剂	2.60	0.3368	0	35.40	0.3416	0.3372	0.2965	0.3820	-11.800
				39.50	0.3480	0.3816	0.3613	0.2740	5.900

注:紧凑拉伸(CT)试样宽度 $W=76\text{mm}$,厚度 $B=38\text{mm}$ 。

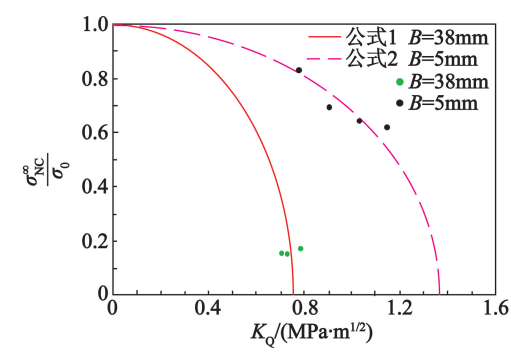


图 7 硝胺(挤压)推进剂的失效评估图

Fig.7 Failure assessment diagrams for nitramine (extruded) propellant

结果表明:

- 1) 挤压成型的硝胺推进剂断裂韧性比浇注成型硝胺推进剂和复合推进剂高;
- 2) CT 试样预估的失效载荷与试验结果能较好地吻合;
- 3) 用断裂韧性经验公式得到的断裂数据对平面应变断裂韧性的预估是可行的。

参 考 文 献

[1] 汪少平. 复合固体推进剂燃烧机理及燃速预估程序研究[D]. 南京:南京理工大学,2007.

[2] 李东. 固体推进剂药柱表面裂纹动力学特性研究[D]. 南京:南京理工大学,2009.

Li Dong. Dynamic mechanics characteristic study of surface cracks in solid propellant grain [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology,2009.

[3] Khashaba U A, EL-Sonbaty I A, Selmy A I, et al. Machinability analysis in drilling woven GFR/epoxy composites: part I-effect of machining parameters [J]. Composites Part A: 2010,41(3):390-400.

[4] 周广盼,尹晓春,鞠玉涛,等. HTPB 固体火箭推进剂启裂断裂韧性的试验测定[J]. 弹道学报,2012,24(3):

96-99.

Zhou Guangpan, Yin Xiaochun, Ju Yutao, et al. Test of crack initiation fracture toughness of HTPB solid rocket propellants[J]. Journal of Ballistics, 2012, 24(3):96-99.

[5] 张华,赵新伟,罗金恒,等. X80 管线钢断裂韧性及失效评估图研究[J]. 压力容器,2009,26(12):1-4,46.

Zhang Hua, Zhao Xinwei, Luo Jinheng, et al. Research on fracture toughness and failure assessment curves of X80 pipeline steel [J]. Pressure Vessel Technology, 2009,26(12):1-4,46.

[6] 胡国胜,李战雄,罗运军. 硝胺发射药的冲击断裂韧性及其增韧机理研究[J]. 兵工学报,1996,17(3):206-209.

Hu Guosheng, Li Zhanxiong, Luo Yunjun. Impact fracture toughness and the mechanism inforcement of nitramine propellants[J]. Acta Armamentarii, 1996,17(3):206-209.

[7] 王慧敏,严红革. 平面应变断裂韧性 K_{IC} 的研究. [J]. 材料导报,2002,16(11):11-13.

Wang Huimin, Yan Hongge. Review of research on plane strain fracture toughness[J]. Materials Review, 2002,16(11):11-13.

[8] Chyuan S W. Study of loading history effect for thermoviscoelastic solid propellant grains[J]. Computer and Structures, 2000,77(6):735-745.

[9] 屈文忠. 国产 HTPB 复合推进剂裂纹扩展特性的实验研究[J]. 推进技术,1994(6):88-92.

Qu Wenzhong. Experiential research on crack growth behavior in HTPB composite propellant [J]. Journal of Propulsion Technology, 1994(6):88-92.

[10] Dienes J K, Zuo Q H, Kershner J D. Impact initiation of explosives and propellants via statistical crack mechanics [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2006,54(6):1237-1275.

Test of Fracture Toughness of Nitramine and Composite Solid Propellants

YUE Zhonghao, LIU Tiansheng, JING Xiaosu

Chemical Engineering and Environment College, North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

[ABSTRACT] To study the fracture toughness of nitramine (in extruded and slurry cast conditions) and composite solid propellants, a non-contacting type video extensometer was applied to test solid propellant CT specimens. The fracture parameters K_f for 3 samples with a thickness of 38mm were 0.7546, 0.0812 and 0.3368MPa · m^{1/2}, respectively. The failure assessment diagrams of propellant material were generated. Fracture toughness of the extruded nitramine propellant was found to be higher than those of slurry cast nitramine propellant and composite propellant. Failure load estimates of CT specimens were found to be in good agreement with test results.

[KEY WORDS] nitramine propellant, HTPB-based propellant, inherent flaw model, failure assessment diagram, compact tension specimen