

双基推进剂的切口强度及切口敏感性

胡少青, 鞠玉涛, 韦 震, 周长省
(南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094)

摘 要: 为了获取双基推进剂的切口强度及切口敏感性, 在环境温度为 $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$, 应变率为 10^{-4} s^{-1} 条件下, 进行了双基推进剂板条状双边 U 型切口试件及标准试件的单轴拉伸试验。结果表明: 在一定的范围内, 双基推进剂的切口强度随着切口试件的应力集中系数的变化而变化。当应力集中系数小于切口敏感因子 $(1.99 \sim 2.22)$ 时, 板条状双边 U 形切口试件的切口强度受应力集中系数影响不大, 近似等于材料的抗拉强度, 材料对切口不敏感。用标准试件单轴拉伸的试验结果对双基推进剂的切口强度及切口敏感因子进行预测, 预测结果与试验结果较吻合, 验证了这种预测方法的有效性。

关 键 词: 双基推进剂; 切口强度; 切口敏感性; 应力集中系数; 断裂

中图分类号: V512⁺.2

文献标志码: A

Notch strength and notch sensitivity of double base propellant

HU Shao-qing, JU Yu-tao, WEI Zhen, ZHOU Chang-sheng

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

Abstract: To obtain the notch strength and notch sensitivity of double base propellant, uniaxial tensile tests on the double-edge U-notched thin plate specimens and standard specimens were carried out under the strain rate of 10^{-4} s^{-1} at $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$. Results show that the stress concentration factor of notched specimens has a significant effect on the notch strength within certain limits. When the stress concentration factor is less than the notch sensitivity factor $(1.99 \sim 2.22)$, the notch strength of double-edge U-notched thin plate specimens is approximately equal to its fracture strength and independent of the stress concentration factor. This indicates that the double base propellant is insensitive to notch in this case. The uniaxial tensile test results of standard specimens is used to predict the value of the notch strength and notch sensitivity factor of double base propellant, and the predictions are consistent with the test results of the notched specimens proving the validity of this prediction method.

Key words: double base propellant; notch strength; notch sensitivity;
stress concentration factor; fracture

固体推进剂装药是固体火箭发动机的重要结构件, 其结构的完整性直接影响到固体火箭发动机工作的可靠性及安全性。在固体火箭发动机装

药上存在着一些广义切口, 诸如星孔装药、轮孔装药及一些阶梯装药。在一些特型装药中, 存在着直接的切口^[1], 而这种装药形式以其大填充比及大

收稿日期: 2013-04-17

基金项目: 重点预研项目 (20101019)

作者简介: 胡少青 (1987—), 男, 江苏新沂人, 博士生, 主要研究方向为固体火箭发动机装药结构完整性分析。

通讯作者: 鞠玉涛 (1967—), 男, 山西太原人, 教授, 博士, 主要研究方向为固体火箭发动机装药完整性分析、固体火箭发动机理论与设计。E-mail: juyutao@mail.njust.edu.cn

燃面越来越受到设计者的青睐.然而这种切口的存在不仅影响到固体装药的燃烧性能及燃气的流动特性,而其对固体装药的结果完整性造成一定的影响.双基推进剂在中小口径火箭弹、火箭增程弹以及各类燃气发生器中得到广泛应用.因此,研究双基推进剂的切口强度及切口敏感性,对装药结构的设计尤为重要.

对于切口强度的研究主要集中在金属、陶瓷及复合材料等材料方面^[2-4].近年来,有学者研究了含切口的固体推进剂力学性能的相关问题^[5],但与推进剂切口强度及切口敏感性分析相关的研究较少.而对于固体装药而言,这方面的研究是有必要的,这对固体装药型面的设计及可靠性分析具有一定的指导意义.

国内外,对双基推进剂力学性能有了较广泛的研究.文献[6]用动态热力学分析仪(DMA)获取了双基推进剂在动态下的松弛主曲线,并与静态试验获得的松弛主曲线进行对比. Dirikolu 等^[7]研究了双基推进剂的力学性能及温度相关性,在后期工作中,建立了双基推进剂的黏-塑性本构模型^[8],同时对双基推进剂的螺压过程进行了数值模拟. Sućeska 等^[9]研究了老化对双基推进剂力学性能的影响.文献[10]利用围压装置与万能试验机测量了双基推进剂的黏聚力及内摩擦角,为衡量双基推进剂抗剪强度提供依据.而关于双基推进剂切口强度的研究,鲜见相关报道.

基于以上讨论,本文研究了双基推进剂板条状双边 U 型切口试件(下文简称切口试件)的切口强度及切口敏感性问题,并分析得到了双基推进剂的切口强度与应力集中系数的关系,并由此获得了双基推进剂的切口敏感因子;同时用标准试件拉伸结果对切口强度进行预估,与试验所得结果进行对比.

1 试验材料及方法

1.1 试验材料及试件

本文中采用的双基推进剂配方组分质量分数为:硝化棉为 59.5%,硝化甘油为 25%,二硝基甲苯为 8.8%,其他为 6.7%.试验材料采用螺压工艺将双基推进剂制造成板条状.在常温下,采用机械加工的方法,切口试件加工成如图 1 所示的试件.图 1 中 δ 为试件厚度, d 为切口处最小截面宽度, L 为试件长度.标准试件参照航天部标准 QJ924-85 要求加工成如图 2 的拉伸试件.切口试件中的切口圆弧半径 R 分别取 1, 2, 3, 5 mm. 对于

切口试件,其拉伸条件下的应力集中系数,可以用 Barrata-Neal 法计算得到^[11]

$$K_t = \left[0.780 + 2.243 \sqrt{\frac{t}{R}} \right] \left[0.933 + 0.180 \left(\frac{2t}{D} \right) - 1.060 \left(\frac{2t}{D} \right)^2 + 1.710 \left(\frac{2t}{D} \right)^3 \right] \left[1 - \frac{2t}{D} \right] \quad (1)$$

式中 K_t 为应力集中系数, t 为切口深度, R 为切口圆弧半径, D 为试件宽度.由式(1)可以得到本文所用的切口试件的应力集中系数如表 1.

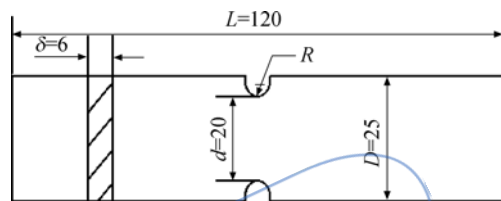


图 1 切口试件示意图(单位:mm)

Fig. 1 Diagram of notched specimen (unit:mm)

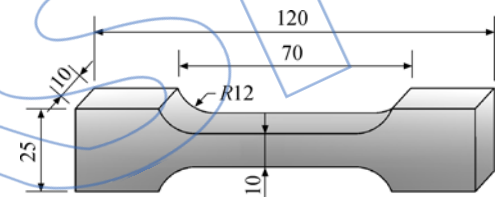


图 2 标准试件示意图(单位:mm)

Fig. 2 Diagram of standard specimen (unit:mm)

表 1 切口试件的应力集中系数

Tabel 1 Stress concentration factor of notched specimen

R/mm	1	2	3	5
K_t	3.20	2.47	2.14	1.81

1.2 试验方法

试件机加工后,在 50 °C 下保温 24 h 后,在保温箱自然冷却至室温,以消除机械加工残余应力.试验前,试件在恒温箱中 20 °C 环境下保温 4 h 以上.标准试件拉伸试验及切口试件拉伸试验均在 QJ211B 微型计算机控制高低温电子万能试验机上完成,试验环境温度为 (20±1) °C.通过控制试验机的拉伸速度保证试件的拉伸的应变率为 10^{-4} s^{-1} ,每组保证 3 个有效试件.

2 试验结果及分析

双基推进剂的力学特性具有明显的应变率相关性^[12-13],因此其切口强度及切口敏感性也是率

相关的.在初步研究中,为了排除应变率效应对试验结果的影响,本文中各组试件的应变率为同一值.有关应变率对切口强度及切口敏感性影响的研究有待进一步解决.

2.1 标准试件拉伸结果

如图3所示为双基推进剂标准试件单轴拉伸情况下的应力-应变(σ - ϵ)关系.由图可以看出,常温下,双基推进剂的应力-应变关系在初始阶段表现出明显的线性相关性.应变达到一定值后(约3%),其力学性能表现出一定的塑性流动,而且随着应变的增加应力的增长并不明显,直至试件断裂.试验中观察发现,材料屈服后会出现明显的“白化”现象^[12-13],而并不会出现明显的颈缩现象,试件在屈服之后被均匀的拉长.由以上试验现象可以表明双基推进剂为低塑性材料^[13],其试件断裂应遵循正应变断裂准则,即当试件切口根部的局部应变达到材料的断裂延性 ϵ_f 时,即 $\epsilon = \epsilon_f$ 时,切口根部材料元发生断裂,从而引起裂纹在切口根部形成^[2],断裂发生.低塑性材料的断裂延性 ϵ_f 及断裂强度 σ_f 可以用标准试件拉伸结果进行估算

$$\epsilon_f = \ln(1 + \Delta) \quad (2)$$

$$\sigma_f = \sigma_b(1 + \Delta) \quad (3)$$

式中 Δ 为试件延伸率, σ_b 为抗拉强度.由标准试件拉伸结果可得双基推进剂在该应变率下的初始弹性模量 $E = 658 \text{ MPa}$.断裂延性为 $\epsilon_f = 0.09 \sim 0.11$,抗拉强度为 $\sigma_b = 16.3 \text{ MPa}$.

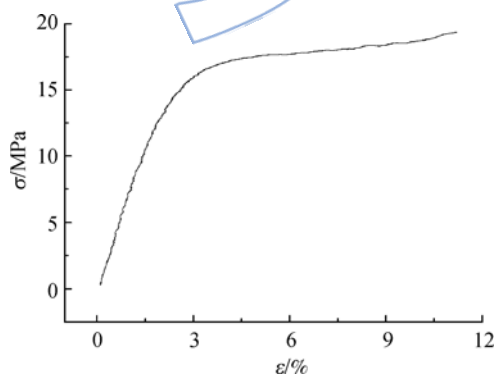


图3 标准试件单轴拉伸情况下应力-应变关系曲线
Fig. 3 Stress-strain curve of uniaxial tensile test of standard specimen

2.2 切口试件拉伸试验结果

图4为切口试件拉伸结果,图5为双基推进剂切口试件断裂的宏观形貌.观察断裂后的试件可以发现,在试件的切口根部材料均存在明显的

“白化”^[12]现象,裂纹的一端终止于切口根部,而另一端的位置较随机.这些现象说明,拉伸到一定阶段,在试件切口根部发生强烈的塑性变形,进而切口根部出现微裂纹,在某一侧由于不稳定因素(试件公差、材料微观不均匀性、试验机系统误差等)首先形成宏观裂纹,已形成的宏观裂纹在向另一侧扩展时,宏观裂纹扩展方向与拉伸方向近似垂直.图4中,1,4,7,10号切口试件所对应的试件的 R 分别为1,2,3,5mm,即切口试件的应力集中系数是逐渐减小的.由拉伸曲线可以看出,在初始阶段切口试件的力学性能不再表现出明显的线性关系,同时随着应力集中系数的增大,这种非线性关系越明显,而切口试件的机械强度也随之减小.而切口试件在整个拉伸过程中宏观上并未表现出明显的塑性流动,因而在距切口较远的“远场”并未出现明显的塑性变形,而是保持着初始弹性状态或者临界屈服状态.但随着切口应力集中系数的减小,切口试件拉伸曲线的屈服段明显增加,而“远场”材料可能出现一定的屈服,以致10号切口试件拉断后整个切口试件出现明显的“白化”^[12]现象.这说明,当切口试件的应力集中系数较小时,切口试件的切口强度 σ_{bn} 接近于材料的屈服强度或抗拉强度.

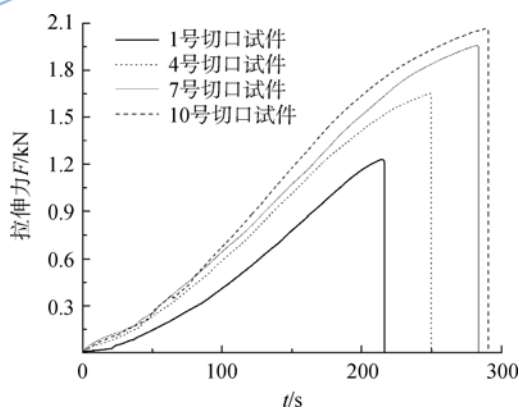


图4 切口试件拉伸结果
Fig. 4 Tensile test results of notched specimens



图5 切口试件断裂的宏观形貌
Fig. 5 Fracture topography of notched specimens

2.3 切口强度与应力集中系数

试件切口强度 σ_{bn} 定义为试件断裂时的载荷除以切口处的净断面积, 对于切口试件

$$\sigma_{bn} = \frac{F_f}{\delta d} \quad (4)$$

式中 F_f 为试件断裂时的载荷. 如表 2 所示为切口试件拉伸的切口强度结果. 可以看出随着应力集中系数的增加, 试件的切口强度是减小的. 而当试件的应力集中系数达到 1.81 时, 试件的切口强度约等于材料的屈服强度.

对于塑性薄板, 切口处的应力状态近似于平面应力状态, 其切口强度可由下式进行预测^[14]

$$\sigma_{bn} = \sqrt{E\sigma_f\epsilon_f}/K_t \quad (5)$$

将 $E=658\text{ MPa}$, $\epsilon_f=0.09\sim0.11$, $\sigma_b=16.3\text{ MPa}$ 代入式(5)可得, 切口试件的切口强度

$$\sigma_{bn} = B/K_t \quad (6)$$

式中系数 B 的取值范围为 32.44~36.19.

表 2 切口试件拉伸的切口强度试验结果

Table 2 Tensile test results of notch strength of notched specimens

试件编号	K_t	σ_f/MPa
1	3.20	10.25
2	3.20	10.13
3	3.20	10.28
4	2.47	13.77
5	2.47	13.36
6	2.47	12.40
7	2.14	16.33
8	2.14	15.75
9	2.14	15.47
10	1.81	17.23
11	1.81	16.83
12	1.81	16.11

图 6 为切口强度预测结果与试验结果对比, 由图可见, 在一定的范围内预测的双基推进剂切口试件的切口强度与试验结果比较吻合. 但当应力集中系数较小时 ($K_t=1.81$), 切口强度不再遵循式(6)的规律, 而是近似等于材料的屈服强度. 即是说, 当切口试件的应力集中系数足够小时, 切口试件对切口不再敏感, 式(5)、式(6)的适用范围的上限是材料的屈服强度或者抗拉强度.

将材料的切口强度与抗拉强度之比, 简称为切口强度比 (σ_{nsr}), 用于评定材料的切口敏感性. 然而切口强度比不是常数, 与切口试件的几何形状与应力状态有关. 可定义一个新材料常数切口敏感因子^[2] $k_{bn} = \sigma_{nsr} \cdot K_t$, 则切口试件的切口敏感因子为

$$k_{bn} = \sigma_{nsr} \cdot K_t = \sqrt{E\sigma_f\epsilon_f}/\sigma_b \quad (7)$$

其工程意义在于: 当 $K_t \geq k_{bn}$ 时, $\sigma_{bn} \leq \sigma_b$, 切口强度受应力集中系数的影响, 材料对切口是敏感的; 当 $K_t \leq k_{bn}$ 时, 估算的 $\sigma_{bn} \geq \sigma_b$, 切口强度不再等于估算值, 而是近似等于材料的抗拉强度, 材料对切口不敏感.

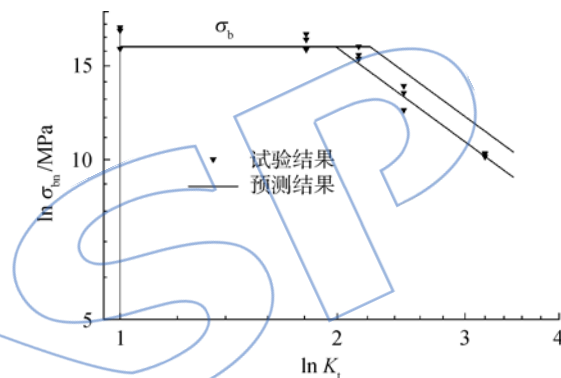


图 6 切口强度的试验结果与预测结果对比图

Fig. 6 Predicted and test results of notch strength

根据式(7)可求得, 平面应力状态下切口试件的切口敏感因子 k_{bn} 为 1.99~2.22, 此参数可以作为工程设计一些装药设计中的参考值, 例如对于星孔装药, 通过改变星尖圆弧半径来改变装药的强度是有一定的调节范围的. 当星尖圆弧半径足够大时, 即当装药结构对切口不再敏感时, 再加大星尖圆弧半径, 并不能增加装药的强度, 反而会减小填充比.

一般地, 固体装药的长径比较大, 在受燃气压力时, 固体装药通常假设为平面应变单元^[15], 对于平面应变条件下的结构, 其切口强度估算式为^[14]

$$\sigma_{bn} = 0.64 \sqrt{E\sigma_f\epsilon_f}/K_t \quad (8)$$

相应地, 平面应变条件下的切口敏感因子为

$$k_{bn} = \sigma_{nsr} \cdot K_t = 0.64 \sqrt{E\sigma_f\epsilon_f}/\sigma_b \quad (9)$$

根据式(8)、式(9), 可得双基推进剂平面应变状态下的切口敏感因子 k_{bn} 为 1.27~1.42, 可见平面应力状态下的结构对切口更为敏感. 这一点是根据文献[7]中的理论所得, 有待试验的进一步

验证.

3 结 论

本文研究了切口试件的切口强度及切口敏感性问题,得到如下结论:

1) 单轴拉伸试验表明,双基推进剂为低塑性材料,其切口试件断裂应遵循正应变断裂准则.

2) 切口试件拉伸断裂过程中,切口试件根部发生强烈的塑性变形,而“远场”不发生塑性变形或塑性变形较小.

3) 一定范围内,切口试件的切口强度随着应力集中系数的增加而减小.但当应力集中系数较小时,切口试件的切口强度受应力集中系数影响较小.

4) 可根据标准试件结果,根据式(5)、式(8)预测切口试件的切口强度,预测的切口强度与试验结果对比有较好的一致性.

5) 可根据式(7)、式(9)估算材料的切口敏感因子 k_{bn} ,当结构的应力集中系数小于 k_{bn} 时,结构受应力集中系数影响较小.对于双基推进剂平面应力状态 $k_{bn} = 1.99 \sim 2.22$,对于平面应力状态 $k_{bn} = 1.27 \sim 1.42$.

参考文献:

- [1] Dupont J H, Loeher R D, Renz R N. Solid propellant rocket motor with notched annular fuel: US, 8181444[P]. 2012-05-22.
- [2] ZHENG Xiulin. Notch strength and notch sensitivity of materials; fracture criterion of notched elements[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [3] Wang F, Zheng X L, Lu M X. Notch strength of ceramics and statistical analysis[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1995, 52(5): 917-921.
- [4] 王泓, 鄢君辉, 郑修麟. 航空有机玻璃切口强度及切口敏感性估算[J]. 机械强度, 2001, 23(2): 131-133.
WANG Hong, YAN Junhui, ZHENG Xiulin. Predicting of notch strength and notch sensitivity in aviation polymethyl methacrylate[J]. Journal of Mechanical Strength, 2001, 23(2): 131-133. (in Chinese)
- [5] Rao A S, Krishna Y, Rao B N. Comparison of fracture models to assess the notched strength of composite/solid propellant tensile specimens[J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 385(1): 429-439.
- [6] Herder G, Weterings F P, de Klerk W P C. Mechanical analysis on rocket propellants[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2003, 72(3): 921-929.
- [7] Dırıkolu M H, Kalaycıoğlu B. Characterisation of mechanical and thermal properties of double base propellant[J]. Materials Research Innovations, 2010, 14(4): 297-300.
- [8] Kalaycıoğlu B, Dırıkolu M H, Çelik V. An elasto-viscoplastic analysis of direct extrusion of a double base solid propellant[J]. Advances in Engineering Software, 2010, 41(9): 1110-1114.
- [9] Sućeska M, Bakija S, Kodvan J J, et al. Study of mechanical properties of naturally aged double base rocket propellants[J]. Central European Journal of Energetic Materials, 2010, 7(1): 47-60.
- [10] ZHANG Jianbin, JU Yutao, ZHOU Changsheng. Experimental research on cohesion and internal friction angle of the double-base propellant[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2013, 38(3): 351-357.
- [11] 张忠平, 张东伟, 傅振堂, 等. 拉伸载荷下 U 形缺口薄板试件应力集中系数修正公式[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2010, 11(1): 74-77.
ZHANG Zhongping, ZHANG Dongwei, FU Zhentang, et al. Stress concentration factor of U-shaped notch sheet under tensile load[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2010, 11(1): 74-77. (in Chinese)
- [12] 胡少青, 鞠玉涛, 孟红磊, 等. 双基推进剂压缩力学性能的应变率相关性研究[J]. 弹道学报, 2011, 23(4): 75-79.
HU Shaoqing, JU Yutao, MENG Honglei, et al. Effects of strain rate on mechanical properties of DBP under uniaxial compression condition[J]. Journal of Ballistics, 2011, 23(4): 75-79. (in Chinese)
- [13] 张建彬, 鞠玉涛, 周省长. 双基固体推进剂率相关性研究[J]. 弹道学报, 2011, 23(4): 80-83.
ZHANG Jianbin, JU Yutao, ZHOU Changsheng. Study on rate correlativity of double-base solid propellant[J]. Journal of Ballistics, 2011, 23(4): 80-83. (in Chinese)
- [14] ZHENG Xiulin. On an unified model for predicting notch strength and fracture toughness of metals[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1989, 33(5): 685-695.
- [15] 申志彬, 唐国金, 雷勇军, 等. 基于 Patran 二次开发的星形药柱结构分析与设计[J]. 固体火箭技术, 2009, 32(2): 175-179.
SHEN Zhibin, TANG Guojin, LEI Yongjun, et al. Analysis and design for star-shaped grain based on secondary development of Patran[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2009, 32(2): 175-179. (in Chinese)