

文章编号: 1006-9941(2010)04-0377-06

# 应变率和加载方式对 HTPB 推进剂力学性能及耗散特性的影响

王玉峰, 李高春, 刘著卿, 丁彪

(海军航空工程学院飞行器工程系, 山东烟台 264001)

**摘要:** 为揭示机械载荷作用下 HTPB 推进剂的力学性能变化规律和破坏机理, 利用单向拉伸法研究了应变率和加载方式对 HTPB 推进剂力学性能的影响, 并基于耗散能方法分析了其在机械载荷作用下的耗散特性。结果表明, 推进剂力学性能有明显的应变率相关性, 抗拉强度、伸长率等与应变率的对数成线性增加关系; 不同的应变控制也影响推进剂的力学性能; 应变率和应变控制对推进剂试件的耗散能有较大的影响, 耗散能与应变率的对数也成线性关系。

**关键词:** 固体力学; HTPB 推进剂; 力学性能; 应力-应变; 耗散能

**中图分类号:** TJ55; V512; O344

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.04.005

## 1 引言

当前, 研究人员在分析复合固体推进剂的寿命及破坏特性时大量运用等速单向拉伸试验。复合固体推进剂是含有大量颗粒状填料的高分子聚合物, 具有粘弹性, 其力学性能受到温度、加载方式和应变率的影响<sup>[1]</sup>。在这些过程中, 推进剂的响应首先表现为材料的力学响应。固体推进剂在贮存和使用过程中, 除了要发生小应变率行为外, 如温度、湿度及其热应力、湿热应力的影响, 还将受到外界机械载荷的作用, 如振动、冲击、点火压力载荷和过载等, 这些都属于大应变率行为。为满足战术技术要求, 固体推进剂要在一定的应变率范围内具有较大的抗拉强度和伸长率。在较宽应变率下的推进剂力学行为特别是在小应变率的力学行为, 一直是研究的热点问题。文献[2-3]分别对 NEPE 推进剂和聚丁二烯丙烯腈(PBAN)推进剂进行了不同拉伸速率下的力学性能分析。一般来说, 应变率越大, 推进剂的抗拉强度和伸长率越高。HTPB 推进剂已广泛应用于固体火箭发动机, 如何很好地表征应变率对 HTPB 推进剂力学性能的影响, 也是一个重要的课题。

在机械载荷的作用下, 推进剂不断耗散能量, 并造成推进剂的损伤, 研究表明, 推进剂能量耗散与材料的破坏关系紧密<sup>[4]</sup>。近年来, 国内外在沥青、岩石等粘弹性材料基于耗散能的损伤和疲劳损伤研究方面开展

了大量的工作, 得到了有益的结论<sup>[5-9]</sup>, 这对开展固体推进剂的能量研究提供了很好的思路和方法。

在上述工作基础上, 本试验主要探讨 HTPB 推进剂在不同应变率下的单向拉伸力学性能和不同加载方式下的力学性能变化规律, 建立力学性能和应变率的关系, 预测推进剂在极端应变率下的力学性能, 并对其耗散能进行计算和分析。

## 2 试验材料及方法

### 2.1 材料

按照标准<sup>[10]</sup>的要求, 把同一批次的端羟基聚丁二烯(HTPB)复合固体推进剂(某固体火箭发动机装药)制作成哑铃型试件, 如图 1 所示。

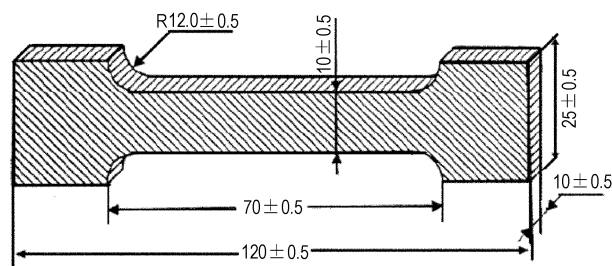


图 1 推进剂试件尺寸

Fig. 1 Dimension of specimen (units: mm)

### 2.2 试验方案

单向拉伸和循环加载试验在 CMT6203 型电子万能(拉力)试验机上完成, 试验条件为: 室温为  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 65%, 每组试验需 5 个试件。

收稿日期: 2009-10-21; 修回日期: 2009-12-14

作者简介: 王玉峰(1978-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事固体推进剂力学性能方面的研究。e-mail: wyf96102@126.com

(1) 单向拉伸

考察单向拉伸速率分别为 0.5, 5, 25, 100, 250 mm · min<sup>-1</sup>, 对应的应变率为 1.57, 15.7, 78.5, 314, 1570 (10<sup>-4</sup> s<sup>-1</sup>) 下的推进剂力学性能 (试验一: 试件分别为 I-1、I-2、I-3、I-4、I-5);

(2) 应变控制

在拉伸速率为 100 mm · min<sup>-1</sup> 下:

① 将试件拉伸到应变分别为 10%、20%、40% 时停止, 然后再以 2 mm · min<sup>-1</sup> 返回 (试验二: 试件分别为 II-1、II-2、II-3);

② 将试件拉伸到应变分别为 10%、20%、40% 时停止, 然后再以 2 mm · min<sup>-1</sup> 返回, 至应力为零时, 再接着以拉伸速率为 100 mm · min<sup>-1</sup> 至试件拉断破坏 (试验三: 试件分别为 III-1、III-2、III-3);

③ 将试件拉伸到应变为 20% 时停止, 按 2 mm · min<sup>-1</sup> 返车, 至应力为零时, 按 100 mm · min<sup>-1</sup> 拉伸, 至应变到 30% 时再停车, 按 2 mm · min<sup>-1</sup> 返回, 直至应力接近零时, 停车 (试验四: 试件为 IV-1)。

3 试验结果分析

3.1 应变率对推进剂力学性能的影响

研究了不同应变率对 HTPB 推进剂力学性能的影响, 结果如图 2 和表 1 所示。

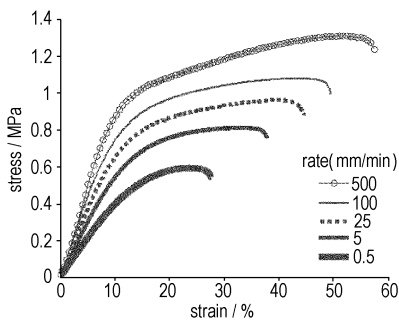


图 2 不同应变率下的应力-应变曲线

Fig. 2 Curves of stress-strain under different strain rates

表 1 不同应变率下的单向拉伸试验数据

Table 1 Test data of uniaxial tension under different strain rate

$v$ /mm · min <sup>-1</sup>	$\dot{\epsilon}$ /10 <sup>-4</sup> s <sup>-1</sup>	$\sigma_m$ /MPa	$\epsilon_m$ / %	$\sigma_b$ /MPa	$\epsilon_b$ / %
0.5	1.57	0.59	23.4	0.54	28.2
5	15.7	0.81	32.8	0.75	38.2
25	78.5	0.95	40.2	0.88	45.1
100	314	1.08	43.6	0.99	50.1
500	1570	1.31	52.5	1.24	58.9

Note:  $v$  is tensile rate;  $\dot{\epsilon}$  is strain rate;  $\sigma_m$  is tensile strength;  $\epsilon_m$  is elongation.

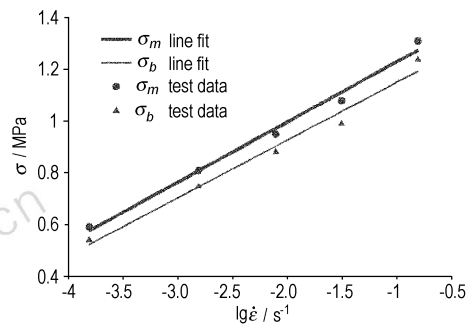
图 2 为试验一中不同应变率下试件的应力-应变曲线。从图中可以看出, 不同应变率下的应力应变关系有明显的分界, 并且应变率越大这种分界越明显, 在拉伸开始阶段, 拉伸应变达到 10% 之前, 其应力应变关系线性关系较好, 之后逐渐呈现非线性关系, 然后又转入线性区, 并且应变率越高, 这个线性区越长。并且在开始拉伸阶段 HTPB 推进剂试件的模量  $E$  随着应变率的增加而增加。

表 1 为不同应变率下的 HTPB 推进剂力学性能。从表 1 中可以看出, 推进剂具有明显的应变率效应, 随着拉伸速率  $v$  的增加, 应变率  $\dot{\epsilon}$  增大, 推进剂的抗拉强度  $\sigma_m$ 、最大力下伸长率  $\epsilon_m$ 、断裂强度  $\sigma_b$ 、断裂伸长率  $\epsilon_b$  也增大, 且  $\sigma_m$ 、 $\sigma_b$ 、 $\epsilon_m$ 、 $\epsilon_b$  与  $\dot{\epsilon}$  的对数 ( $\lg \dot{\epsilon}$ ) 近似成线性关系, 回归方程如表 2 所示, 拟合直线如图 3 所示。

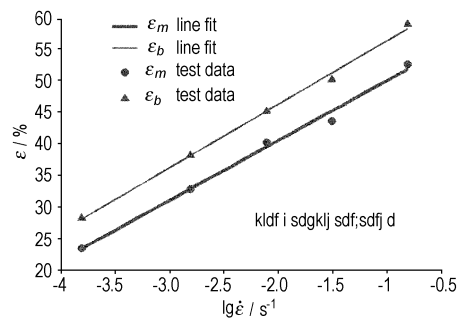
表 2 回归参数

Table 2 Parameters of regression

regression function	correlative coefficient
$\sigma_m = 1.462 + 0.233 \lg \dot{\epsilon}$	0.9950
$\sigma_b = 1.373 + 0.224 \lg \dot{\epsilon}$	0.9905
$\epsilon_m = 59.36 + 9.463 \lg \dot{\epsilon}$	0.9964
$\epsilon_b = 66.22 + 10.036 \lg \dot{\epsilon}$	0.9985



a.  $\sigma_m$  and  $\sigma_b$  vs strain rate



b.  $\epsilon_m$  and  $\epsilon_b$  vs strain rate

图 3 力学性能随应变率变化

Fig. 3 Mechanical properties vs strain rate

从表 2 和图 3 中可以看出,抗拉强度和断裂强度的变化趋势一致,随着应变率的增加而增加,前者变化较快;最大力下伸长率( $\varepsilon_m$ )与断裂伸长率( $\varepsilon_b$ )的变化趋势也较一致,随着应变率的增大而增大,后者的变化较快。

在 HTPB 推进剂的使用过程中,最关心的还是推进剂的抗拉强度( $\sigma_m$ )和伸长率( $\varepsilon_m$ ),特别是在极端应变率下的抗拉强度和伸长率。由于在极端低应变率下的推进剂单向拉伸测试需要时间较长,而在极端高应变率下现有设备又不易完成,而本文建立的模型就可预测这两种情况下推进剂的抗拉强度和伸长率,如表 3 所示。

为了比较不同应变率下力学性能的差别,给出了 0%~20% 应变下应力与对数应变率的关系,同时对各点进行线性拟合,如图 4 所示。

表 3 极端应变率下推进剂的  $\sigma_m$  和  $\varepsilon_m$

Table 3  $\sigma_m$  and  $\varepsilon_m$  under extreme strain rates

$\dot{\varepsilon}/10^{-4} \text{ s}^{-1}$	$\sigma_m/\text{MPa}$	$\varepsilon_m/\%$
low	$1.57 \times 10^{-2}$	0.11
	$1.57 \times 10^{-1}$	0.34
high	$1.57 \times 10^4$	1.51
	$1.57 \times 10^5$	1.74

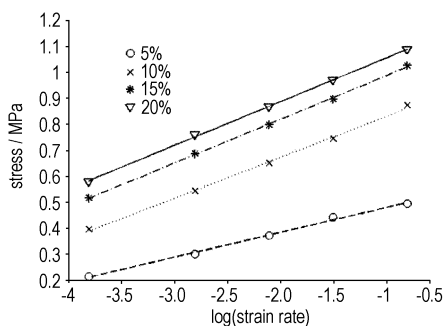


图 4 不同应变下应力与对数应变率的关系

Fig. 4 Stress vs log strain rate under different strains

由图 4 可见,不同应变下应力与对数应变率的关系近似线性,并且应变越大,直线斜率越大,相同的应变率下,其应力也越大。

从上面的试验结果可以看出,HTPB 推进剂在不同应变率下的应力应变行为及抗拉强度、伸长率等都有显著的差别,并且推进剂的破坏机理可能不同,这是因为 HTPB 复合固体推进剂主要由高分子聚合物基体和掺入其中的大量固体氧化剂颗粒及金属燃料颗粒组成,是一种聚合物粘弹性材料。由于固体颗粒在基体中是一种机械混合,在外界载荷作用下,推进剂内部将发生不可逆损伤,包括基体分子链的断裂以及颗粒与

基体界面的“脱湿”<sup>[11]</sup>。在其拉伸过程中,由于应力集中而在粘合剂中产生微裂纹后,需要充分的时间才能完成微裂纹的扩展,直至发展成宏观裂纹。所以在高应变率的情况下,即使推进剂中的应力很高,但是由于裂纹还未来得及发展,推进剂仍可能承受大的载荷而不被破坏,抗拉强度就大,这时推进剂力学性能主要受固体颗粒与基体界面间的“脱湿”速率和分子链断裂速率的共同影响,而此时“脱湿”速率和分子链断裂速率基本相当,只是前者稍高于后者,所以导致“脱湿”现象不明显。但是在低应变率下,裂纹扩展了,推进中的裂纹增多,导致推进剂不能承受大的载荷而被破坏,推进剂的抗拉强度小,并可观察到明显的“脱湿”现象,表明这时推进剂的力学性能主要受“脱湿”速率的影响,可以说,在推进剂处于低应变率的情况下,推进剂内部固体颗粒与基体界面间的“脱湿”速率要远高于基体分子链的断裂速率。从断裂力学的角度<sup>[12]</sup>,可以说 HTPB 推进剂裂纹扩展对低应变率作用更敏感,有缺陷的 HTPB 推进剂在低应变率下更容易破坏,所以低应变率下的抗拉强度和伸长率都很小。

### 3.2 应变控制对推进剂力学性能的影响

根据试验方案,对 HTPB 推进剂试件进行了应变控制加载试验,结果如图 5~图 7 所示。

图 5 为试验二中推进剂试件的应力-应变曲线。从图 5 中可以看出,随着推进剂拉伸应变的增加,应力相应增加,当应变达到 11% 时,应力为 0.32 MPa;当应变增加到 21% 时,应力为 0.81 MPa;应变达到 40% 时,应力则为 0.94 MPa。低应变时,应力应变关系线性较为明显,随着拉伸应变的增加,其应力则呈现非线性增长趋势。

图 6 为试验三中推进剂试件的应力-应变曲线。从图 6 中可以看出,随着应变控制的变化,应力也在变化,力学性能也将发生变化,与  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  拉伸速率直接单向拉伸试验结果(表 1)相比,抗拉强度稍微降低,并且三组试件的值保持一致;伸长率有所增加,分别为:应变达到 10%,应力为 0.38 MPa,抗拉强度为 0.99 MPa,伸长率为 59.3%;应变达到 20%,应力为 0.75 MPa,抗拉强度为 0.98 MPa,伸长率为 50.3%;应变达到 40%,应力为 0.91 MPa,抗拉强度为 1.01 MPa,伸长率为 61.7%。

图 7 为试验四中推进剂试件的应力-应变曲线,可以看出当应变达到 20% 时,应力为 0.72 MPa;应变达到 30%,应力为 0.75 MPa。

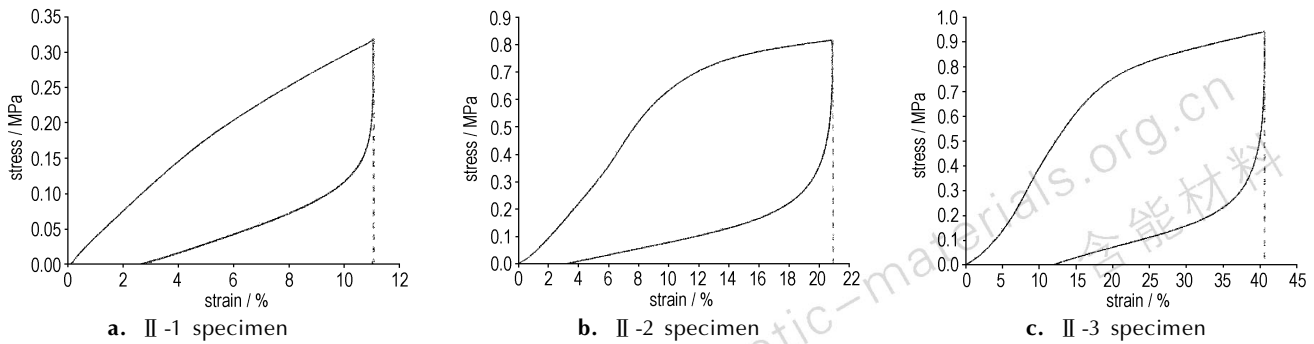


图5 试验二中的应力-应变曲线

Fig. 5 Curves of stress-strain under test 2

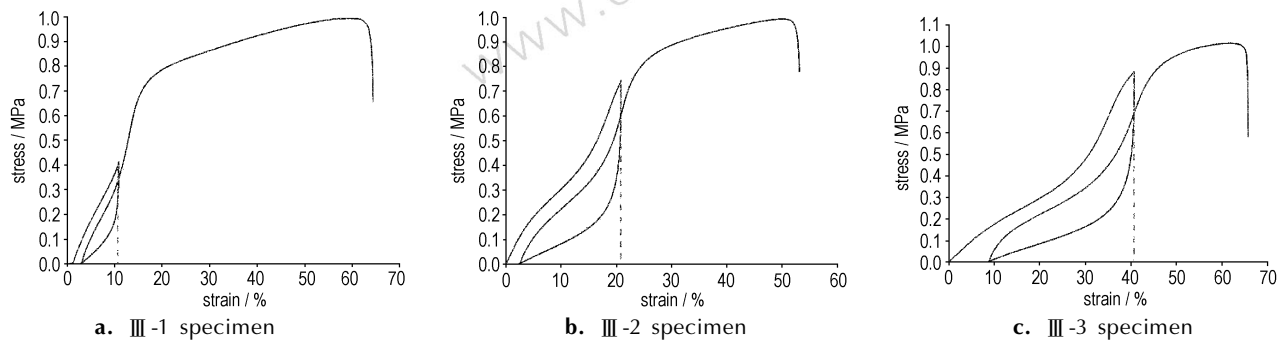


图6 试验三中的应力-应变曲线

Fig. 6 Curves of stress-strain under test 3

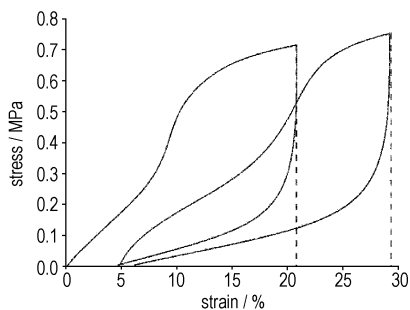


图7 试验四中的应力-应变曲线(试件IV-1)

Fig. 7 Curve of stress-strain under test 3 (IV-1 specimen)

从图5~图7中可以看出,不同的应变控制对推进剂力学性能有较大的影响。但是由于循环加载次数较少,虽然应变控制不同,对推进剂伸长率、抗拉强度特别是抗拉强度的影响不大。

## 4 耗散能分析

### 4.1 耗散能理论模型

固体推进剂在机械载荷作用下的损伤过程从本质上讲是一种能量非均匀耗散的不可逆过程,为使材料破坏必须提供一定的能量来克服内部固体颗粒和基体之间的结合能<sup>[11]</sup>。由于复合固体推进剂是一种粘弹

性材料,在疲劳过程中,应变会滞后于应力,形成滞回环。这种滞后作用会消耗一定的机械功,转变成热能耗散于周围环境,同时材料在疲劳过程中不断有新的损伤出现,形成新的脱粘面,消耗部分能量。

对粘弹性材料而言,单位体积每次加载循环的耗散能为应力-应变曲线所包围的面积<sup>[9]</sup>,即:

$$w_i = \int \sigma(t) d\varepsilon(t) = \int \sigma(t) \frac{d\varepsilon(t)}{dt} dt \quad (1)$$

一个循环过程中的耗散能就是滞回环的面积,这很容易计算,但是对单向拉伸试件来说,所有的试件在断裂前均处于受拉状态,即试件在断裂前没有发生卸载过程,并不是完整的循环,没有形成滞回环。但是若不考虑这半个循环过程的能耗,肯定会产生误差,所以应考虑这半个循环过程的能耗。

对推进剂材料来说,单向拉伸时的耗散能密度为:

$$\Phi(\varepsilon) = U_{\text{total}} - U_{\text{recoverable}} = \int \sigma(\varepsilon) d\varepsilon - \frac{1}{2} \sigma(\varepsilon) \varepsilon \quad (2)$$

其关系如图8所示。通过对单向拉伸试验的应力应变曲线进行积分,可求得耗散能密度的数值。

式(1)和式(2)求出的是耗散能密度,可以看出耗散能密度是应变的函数。

### 4.2 耗散能计算结果与分析

(1) 不同应变率下单向拉伸试件的耗散能

根据耗散能密度的计算公式(2),可计算出不同应变率下的耗散能密度,结果见表4。

对表4中不同应变率下的推进剂试件耗散能密度进行数据拟合,如图9所示,可以发现单向拉伸试件的耗散能密度与应变率的对数呈线性关系,如下式所示:

$$\Phi = 237.08 + 58.58 \lg \dot{\epsilon}$$

可以看出应变率越大,推进剂耗散掉的能量越大,这就要求推进剂在贮存和使用过程中要避免大的冲击和振动。

(2) 应变控制下的耗散能

根据耗散能的理论计算模型,可以求出在各应变控制下的耗散能密度大小,结果如表5所示。

从表5中可以看出,试验二条件下,随着控制应变的增加,耗散能密度成线性增加,推进剂试件耗散掉的能量越多,越容易破坏;试验三条件下,随着控制应变的增加,耗散能密度减小;试验四条件下的耗散能密度为  $139.7 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 。可以看出,不同的应变控制方式对推进剂试件的能量耗散特性有较大的影响。

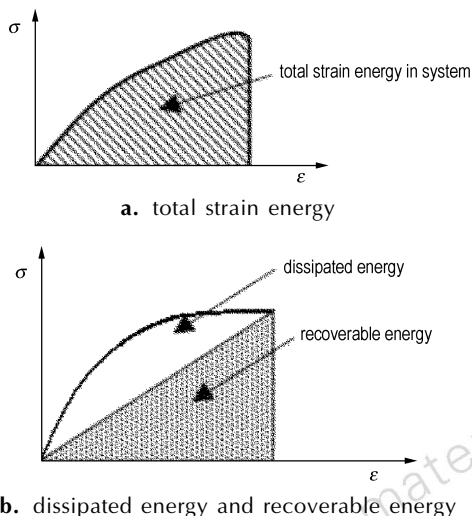


图8 耗散能示意图

Fig.8 Sketch map of dissipated energy

表4 试验一中不同应变率下的能量密度

Table 4 The energy density under different strain rate

$\dot{\epsilon}$ / $10^{-4} \text{ s}^{-1}$	energy density/ $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$		
	total strain energy	recoverable energy	dissipated energy
1.57	94.2	70.8	23.4
15.7	200.5	134.5	66.0
78.5	301.3	193.7	107.6
314	376.0	235.4	140.6
1570	545.9	343.7	202.2

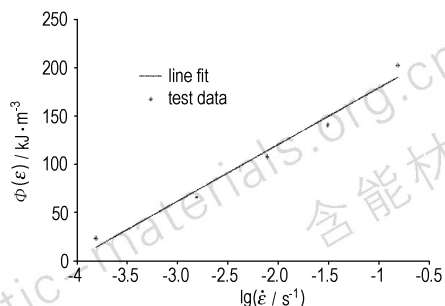


图9 拟合直线

Fig.9 Line of regression

表5 不同应变控制下的耗散能密度

Table 5 The dissipated energy density under different control of strain

test scheme	dissipated energy density/ $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$
test 2 II-1	14.5
II-2	88.8
II-3	209.5
test 3 III-1	163.3
III-2	124.7
III-3	121.0
test 4 IV-1	139.7

## 5 结论

(1) HTPB 复合固体推进剂材料具有明显的应变率效应,不同应变率下,推进剂力学性能差别较大,但在应变达到10%之前,应力应变线性关系明显;推进剂抗拉强度  $\sigma_m$ 、断裂应力  $\sigma_b$ 、最大力下伸长率  $\epsilon_m$ 、断裂伸长率  $\epsilon_b$  随着应变率的增大而增大,  $\sigma_m$ 、 $\sigma_b$ 、 $\epsilon_m$ 、 $\epsilon_b$  与  $\lg \dot{\epsilon}$  近似成线性关系,利用建立的数学模型可以预测推进剂在极端应变率下的  $\sigma_m$  和  $\epsilon_m$ 。

(2) 加载方式对 HTPB 固体推进剂的力学性能有较大的影响,相同应变条件下应力与应变率对数的关系近似线性,在试件的循环加载拉伸破坏过程中,由于循环次数较少,控制应变不同,对推进剂试件的抗拉强度的影响并不大。

(3) 推进剂在受载条件下,外界载荷输入的能量一部分以弹性应变能的形式储存于推进剂中,卸载时可恢复,其余部分以热的形式及支持推进剂破坏的形式耗散。随着应变率的增大,单向拉伸试件的耗散能增加,耗散能密度与应变率的对数呈线性关系,应变率越大,推进剂耗散掉的能量越多。

## 参考文献:

- [1] 侯林法. 复合固体推进剂[M]. 北京: 宇航出版社, 1994: 278 - 280.
- [2] 郭翔, 张小平, 张炜. 拉伸速率对 NEPE 推进剂力学性能的影响[J]. 固体火箭技术, 2007, 30(4): 321 - 323, 327.  
GUO Xiang, ZHANG Xiao-ping, ZHANG Wei. Effect of tensile rate on mechanical properties of NEPE propellant[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2007, 30(4): 321 - 323, 327.
- [3] Sebnem Ozupek. Constitutive equations for solid propellants [D]. The University of Texas at Austin, 1995.
- [4] Alberth L, Arnold A. Energy balances and uniaxial damage of highly filled elastomers[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1975, 19: 2821 - 2830.
- [5] Khalid A G. Fatigue damage analysis in asphalt concrete mixtures based upon dissipated energy concepts[D]. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2001.
- [6] Mast P W, Nash G E, Michopoulos J G, et al. Characterization of strain-induced damage in composites based on the dissipated energy density part I: Basic scheme and formulation [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 1995, 22: 71 - 96.
- [7] Mast P W, Nash G E, Michopoulos J G, et al. Characterization of strain-induced damage in composites based on the dissipated energy density part II: Composite specimens and naval structures [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 1995, 22: 97 - 114.
- [8] Mast P W, Nash G E, Michopoulos J G, et al. Characterization of strain-induced damage in composites based on the dissipated energy density part III: General material constitutive relation [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 1995, 22: 115 - 125.
- [9] Matthew M Z. Characterization of wood-plastic composites by dissipated energy [D]. Master dissertation: Washington State University, 2003.
- [10] QJ924-85. 复合固体推进剂单向拉伸试验方法[S]. 航天工业部标准, 1992.
- [11] 李高春. 固体推进剂的细观损伤及宏观力学性能研究[D]. 烟台: 海军航空工程学院, 2007.
- [12] 王亚平, 王北海. 环境湿度及拉伸速度对丁羟推进剂伸长率的影响[J]. 含能材料, 1998, 6(2): 59 - 64.  
WANG Ya-ping, WANG Bei-hai. Effect of environmental humidity on elongation of HTPB propellant at different stretching rate [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 1998, 6(2): 59 - 64.

## Effect of Strain Rate and Loading on Mechanical Properties and Dissipated Energy for HTPB Propellant

WANG Yu-feng, LI Gao-chun, LIU Zhu-qing, DING Biao

(Department of Airborne Vehicle Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** In order to understand the change of mechanical properties and damage mechanism of HTPB propellant, the influence of strain rate and loading on tensile properties of HTPB propellant was studied by means of uniaxial tension. The dissipated characteristics under mechanical loading was analyzed based on dissipated energy model. Results show that the mechanical properties and the dissipated energy of HTPB propellant were distinctly influenced by strain rate and by different control of strain. Tensile strength, elongation and dissipated energy increased linearly with the logarithm of strain rate. The results can be used as reference to research on properties of HTPB propellant in storage and use.

**Key words:** solid mechanics; HTPB propellant; mechanical property; stress-strain; dissipated energy

**CLC number:** TJ55; V512; O344

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.04.005