

文章编号:1006-9941(2024)02-0183-10

# 宽温域宽应变率下丁羟四组元 HTPB 推进剂单轴压缩力学行为

王冉<sup>1</sup>, 武毅<sup>1</sup>, 白龙<sup>2</sup>, 张益铭<sup>1</sup>, 王宁飞<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学宇航学院, 北京 100081; 2. 西安长峰机电研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 为研究丁羟四组元端羟基聚丁二烯(HTPB)推进剂在宽温域宽应变率下的单轴压缩力学行为,基于万能材料试验机、高速液压伺服试验机、分离式霍普金森压杆,结合程式恒温恒湿试验箱等温控手段,开展了宽温域宽应变率下的推进剂单轴压缩力学性能实验,获取了-40,-25,-10,20,50 °C 5个温度下 $10^{-4}\sim 10^3\text{ s}^{-1}$ 应变率的丁羟四组元 HTPB 推进剂的应力应变曲线,并建立了 HTPB 推进剂的分段式单轴压缩率温本构关系。结果表明,HTPB 推进剂的力学响应存在显著的率温相关性,在任意应变率下其力学响应都呈阶段性变化,即线弹性阶段-非线性屈服阶段-应变软化阶段或应变硬化阶段;且在高应变率下,非线性屈服行为后的应变软化现象明显弱于低、中应变率。此外,高应变率时,随着温度的降低,应力应变曲线的变化速率逐渐减缓;而低、中应变率却恰恰相反,随着温度的降低,应力应变曲线的变化速率逐渐加快。HTPB 推进剂的力学强度随着温度的降低显著增大,温度从 50 °C 降低至-40 °C 时,HTPB 推进剂试件在宽应变率作用下的最大应力从 2.2~8.8 MPa 增长至约 11~22 MPa。同时基于实验数据构建了分段式率温本构关系,发现其在温度较高时拟合效果更好,能够较好地预测 HTPB 推进剂的力学行为。

**关键词:** 丁羟四组元 HTPB 推进剂;宽温域;宽应变率;力学性能;单轴压缩本构关系

中图分类号: TJ55;V435

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2023119

## 0 引言

随着现代化武器需求的提高,对导弹性能的要求也日趋提升。固体发动机作为导弹的重要部件,相对脆弱的推进剂装药结构完整性随之面临严峻挑战<sup>[1-2]</sup>。

端羟基聚丁二烯(HTPB)推进剂作为固体发动机中常见的一种复合推进剂,具有典型的粘弹性材料属性,其力学性能依赖于时间、温度和加载历史等多种因素。能否明晰其在极端恶劣复杂环境下的粘弹性力学性能,已经成为推进剂应用的重要考虑因素。推进剂的力学性能受加载速率影响较大,低(小于 $1\text{ s}^{-1}$ )应变率的推进剂力学试验技术已相对成熟<sup>[3]</sup>,研究较多,而中( $1\sim 10^2\text{ s}^{-1}$ )、高( $10^2\text{ s}^{-1}$ 以上)应变率的力学性能由于测试技术不成熟,数据较为缺乏。2016年 Wang

等<sup>[4]</sup>用高速液压拉伸试验机获得了丁羟三组元 HTPB 推进剂 $0.4\sim 42.86\text{ s}^{-1}$ 应变率下的拉伸应力应变数据,发现三组元 HTPB 推进剂在较高应变率下的拉伸行为与准静态测试条件下的拉伸行为存在较大差异。2016年 Yang 等<sup>[5-6]</sup>研究了复合改性双基推进剂(CMDB)和 HTPB 推进剂在不同应变率下的压缩力学行为,分别构建了率相关的本构模型,发现屈服应力随着应变率的对数呈双线性增长。2017年杨龙等<sup>[7]</sup>采用万能试验机和液压试验机开展了 HTPB 推进剂在 $1.2\times 10^{-4}\sim 80\text{ s}^{-1}$ 应变率下的拉伸试验,并构建了可以预测 30% 应变内的拉伸力学行为的率相关本构模型。此外,推进剂的力学性能还受温度影响较大<sup>[8]</sup>。李辉等<sup>[9]</sup>通过开展不同温度下 HTPB 推进剂应力松弛实验得到了-40 °C 条件下准静态拉伸下的失效判据。强洪夫等<sup>[10]</sup>通过不同加载温度(-50,-40,-30,-20,25 °C)以及不同应变率下的单轴和准双轴拉伸力学性能实验,确定了单轴和准双轴拉伸下推进剂的失效判据,结果表明动态准双轴拉伸加载下,推进剂的最大伸长率较单轴加载时明显降低。上述研究均表明 HTPB 推进剂力学性能具有典型的率温相关性。

收稿日期: 2023-05-31; 修回日期: 2023-09-18

网络出版日期: 2024-01-17

作者简介: 王冉(1995-),男,博士研究生,主要从事固体火箭发动机装药结构完整性研究。e-mail: wr.wangran@outlook.com

通信联系人: 武毅(1988-),男,博士,副教授,主要从事固体火箭发动机安全性及推进剂力学行为研究。e-mail: yi.wu@bit.edu.cn

引用本文: 王冉,武毅,白龙,等. 宽温域宽应变率下丁羟四组元 HTPB 推进剂单轴压缩力学行为[J]. 含能材料, 2024, 32(2):183-192.

WANG Ran, WU Yi, BAI Long, et al. Uniaxial Compressive Mechanical Behavior of Four-component HTPB Propellant under Wide Temperature and Strain Rate Range[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2024, 32(2):183-192.

相关文献的研究多集中于丁羟三组元推进剂高氯酸铵(AP)/Al/HTPB在某些特定温度工况或某段应变率区间的力学行为,随着性能要求不断提高,丁羟四组元推进剂AP/黑索今(RDX)或奥克托今(HMX)/Al/HTPB因其高能、低特征信号等特点广泛应用于多种战术导弹和火箭的推进系统,成为目前常用的高能复合推进剂之一<sup>[11]</sup>。与此同时,在火箭增程等技术广泛应用和战场环境日益复杂化的背景下,固体火箭发动机需可承受轴向大过载,并且满足极端高低温度环境下的使用需求。然而,目前丁羟四组元HTPB推进剂在极端高低温、宽应变率载荷下的力学性能研究尚不充分。因此,研究宽温域宽应变率条件下固体推进剂的压缩力学性能并构建相应的本构关系十分必要。

本研究以丁羟四组元HTPB推进剂为研究对象,基于万能材料试验机、高速液压伺服试验机、分离式霍普金森压杆,结合可编程恒温恒湿试验机等温控手段,开展了宽温域宽应变率下的推进剂压缩力学性能试验,获取了-40,-25,-10,20,50℃温度下 $10^{-4}\sim 10^3\text{ s}^{-1}$ 应变率作用的HTPB推进剂应力应变曲线,以分析温度和应变率对HTPB推进剂力学性能的影响规律,并构建单轴压缩率温非线性本构关系。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料与样品制备

研究选用的HTPB推进剂配方如表1所示。原料均来自西安北方惠安化学工业有限公司,其中AP颗粒粒径分布区间为200~400  $\mu\text{m}$ ;RDX颗粒平均直径为90  $\mu\text{m}$ ;Al颗粒平均直径为30  $\mu\text{m}$ 。

为开展低、中应变率压缩实验,参照GJB770B-2005火药试验方法,将推进剂试样设计为 $\Phi 16\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 的圆柱型(图1a);对于高应变率压缩实验,推进剂试样设计为长径比为1:2、 $\Phi 10\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 的圆柱型(图1b),以减少应变信号的衰减。试样严格按照工艺流程,通过圆柱型模具浇注制备。推进剂中的Al、AP、RDX等各种固体颗粒均匀地分散在HTPB黏

表1 HTPB推进剂配方

Table 1 Formulation of HTPB propellant

| component         | HTPB | AP | RDX | Al | others<br>(plasticizer,<br>curing agent) |
|-------------------|------|----|-----|----|--|
| mass fraction / % | 10   | 53 | 20  | 14 | 3  |

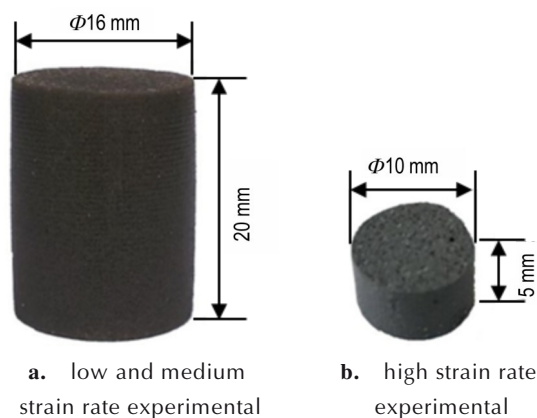


图1 推进剂试样

Fig.1 Images of propellant samples

结剂基体中,没有明显的孔隙和裂纹区域。试验样品经同一批次加工,试验前储存在干燥罐中以消除湿度变化对材料压缩性能的影响。

### 1.2 实验装置及方案

图2为实验装置示意图,其中低应变率压缩实验采用万能材料试验机(Reger RGM-2003)开展,通过机械传动结构使压头匀速运动,从而实现恒定应变率的试验条件,材料试验机配有原位温度控制系统,以实现试件的预备保温与试验过程的温度控制;中应变率压缩实验采用高速液压伺服试验机(Instron VHS 160/100-20)开展,配套可编程恒温恒湿试验机实现试件的预备保温;高应变率压缩实验采用分离式霍普金森压杆(SHPB)装置开展,并在试件夹持位置加装半开放保温箱,分别使用电热丝、液氮实现高、低温条件控制。

SHPB装置尺寸及参数见表2,由于HTPB推进剂的低阻抗特性,为了获得更高质量的透射信号,本研究采用高强度铝合金空心透射杆以增加投射信号的幅值。实验条件如表3所示,每个工况下重复3次,以保证结果的可靠性,所有试样均在目标温度条件下保温2 h后进行力学实验。

### 1.3 数据处理

对于低、中应变率压缩实验,通过施加表3中恒定的加载速率 $\nu$ ,可以得到时间 $t$ 、力 $F$ 、位移 $x$ 。在一维假设下,可以通过式(1)~(3)得到推进剂试件压缩过程的工程应力 $\sigma_E$ 、工程应变 $\varepsilon_E$ 和工程应变率 $\dot{\varepsilon}_E$ <sup>[12]</sup>:

$$\dot{\varepsilon}_E = \nu/l_0 \quad (1)$$

$$\sigma_E = F/A_0 \quad (2)$$

$$\varepsilon_E = (l - l_0)/l_0 \quad (3)$$

式中, $F$ 为轴向力,N; $l_0$ 为试件的原始长度, $l$ 为试件变形后的长度,mm; $A_0$ 为试件的横截面积, $\text{mm}^2$ 。工程

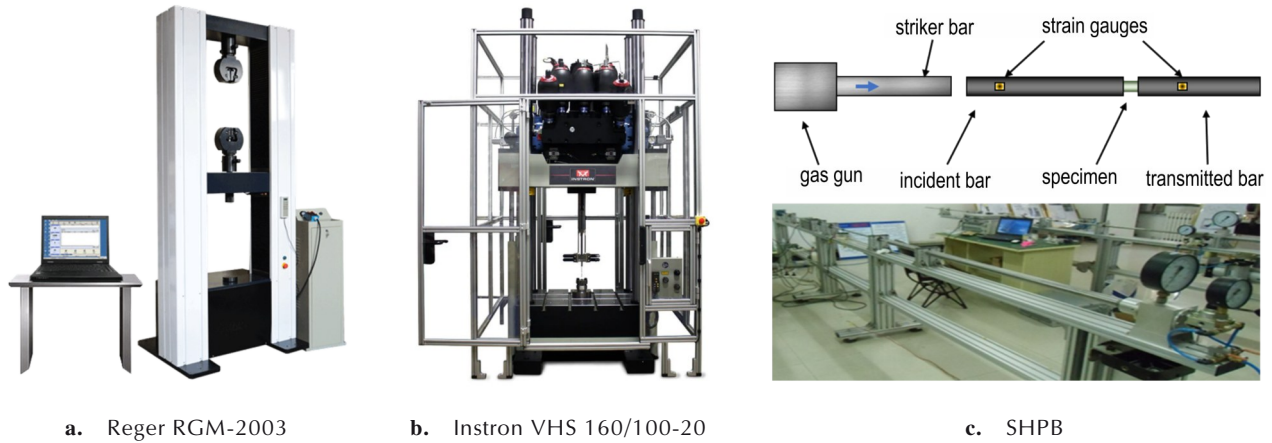


图 2 实验装置图

Fig.2 Images of experimental devices

表 2 SHPB 装置尺寸与参数

Table 2 Parameters and size of the SHPB setup

| bar type        | mass / g | diameter / mm                                | length / mm | density / kg·m <sup>-3</sup> | wave speed / m·s <sup>-1</sup> | Young's modulus / GPa |
|-----------------|----------|--|-------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| striker bar     | —        | 19.1   | 450         | —                            | —                              | —                     |
| incident bar    | 1163.2   | 19.1   | 1499        | 2680                         | 5024                           | 68.38                 |
| transmitted bar | 264.8    | outer diameter: 16.4<br>inner diameter: 12.6 | 1200        | 2550                         | 5025                           | 64.13                 |

表 3 宽温域宽应变率压缩力学性能实验方案

Table 3 Test scheme of compressive mechanical properties in wide temperature range and wide strain rate

| test               | equipment              | engineering strain rate / s <sup>-1</sup> | loading speed / mm·min <sup>-1</sup> | temperature / °C |
|--------------------|------------------------|---|--------------------------------------|------------------|
| low strain rate    | Reger RGM-2003         | 1.67×10 <sup>-4</sup>                     | 0.2                                  |                  |
|                    |                        | 1.67×10 <sup>-3</sup>                     | 2                                    |                  |
|                    |                        | 1.67×10 <sup>-2</sup>                     | 20                                   |                  |
|                    |                        | 1.67×10 <sup>-1</sup>                     | 200                                  |                  |
| medium strain rate | Instron VHS 160/100-20 | 1   | 1200                                 | -40              |
|                    |                        | 10  | 12000                                | -25              |
|                    |                        | 40  | 48000                                | -10              |
|                    |                        | 100                                       | 120000                               | 20               |
|                    |                        | 700                                       | —                                    | 50               |
| high strain rate   | SHPB                   | 1400                                      | —                                    |                  |
|                    |                        | 2500                                      | —                                    |                  |
|                    |                        | 3200                                      | —                                    |                  |

应力、工程应变通过式(4)~(6)计算得到真实应力  $\sigma$ 、真实应变  $\varepsilon$  与真实应变率  $\dot{\varepsilon}^{[12]}$ ;

$$\sigma = \sigma_E (1 - \varepsilon_E) \quad (4)$$

$$\varepsilon = -\ln(1 - \varepsilon_E) \quad (5)$$

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_E (1 - \varepsilon_E) \quad (6)$$

对于高应变率压缩实验,在轴向一维响应假设下,通过式(7)~(9)计算得到推进剂试件的工程应变率  $\dot{\varepsilon}_E$ 、工程应力  $\sigma_E$  和工程应变  $\varepsilon_E^{[13]}$ ;

$$\dot{\varepsilon}_E = -\frac{2C_1}{l_0} \varepsilon_R \quad (7)$$

$$\varepsilon_E = -\frac{2C_1}{L_S} \int_0^t \varepsilon_R dt \quad (8)$$

$$\sigma_E = \frac{A_T}{A_0} E_T \varepsilon_T \quad (9)$$

式中,  $C_1$  为入射杆传递波速,  $m \cdot s^{-1}$ ;  $A_1$ 、 $A_T$  分别为入射杆和透射杆的横截面积,  $mm^2$ ;  $E_1$  与  $E_T$  分别为入射杆与

透射杆的杨氏模量, GPa;  $L_s$  为样品的长度, mm;  $A_s$  为样品的横截面积,  $\text{mm}^2$ ;  $\varepsilon_R$ 、 $\varepsilon_T$  分别为反射应变和透射应变。

## 2 结果与讨论

### 2.1 应力-应变曲线特性分析

对丁羟四组元 HTPB 推进剂进行不同温度条件下宽应变率的压缩实验研究, 为保证数据可靠性, 每个工况测试均重复三次取平均值, 得到各个温度下推进剂在宽应变率范围内的真实应力-应变曲线, 如图 3 所示。从图 3 可以看出: 丁羟四组元 HTPB 推进剂的应力-应变曲线呈现明显的非线性关系, 且受应变率和温度影响显著; 同一温度下, 应力最大值

与应变率大小呈正相关, 并且随着应变率提高, 最大应力的增长率也明显增大。在任意应变率下, 该 HTPB 推进剂的应力应变曲线都呈阶段性变化: 线弹性阶段—非线性屈服阶段—应变软化阶段或应变硬化阶段, 其中非线性屈服阶段的发生随着应变率的增大而提前。在低、中应变率 ( $1.67 \times 10^{-4} \sim 1.67 \times 10^{-1}$ ,  $1 \sim 100 \text{ s}^{-1}$ ) 下, 应变软化阶段发生在非线性屈服阶段后; 在高应变率 ( $700 \sim 3200 \text{ s}^{-1}$ ) 下, 由于实验原理的差异, 部分曲线未能达到 50% 以上的目标应变, 导致非线性屈服行为后的应变软化现象明显弱于低、中应变率。此外,  $50^\circ\text{C}$  高应变率 (图 3a) 下的应力-应变曲线尾部表现为应变硬化状态, 在  $20^\circ\text{C}$ 、 $-10^\circ\text{C}$ 、 $-25^\circ\text{C}$ 、 $-40^\circ\text{C}$  的相同应变率下, 则呈现出应变软化状态。

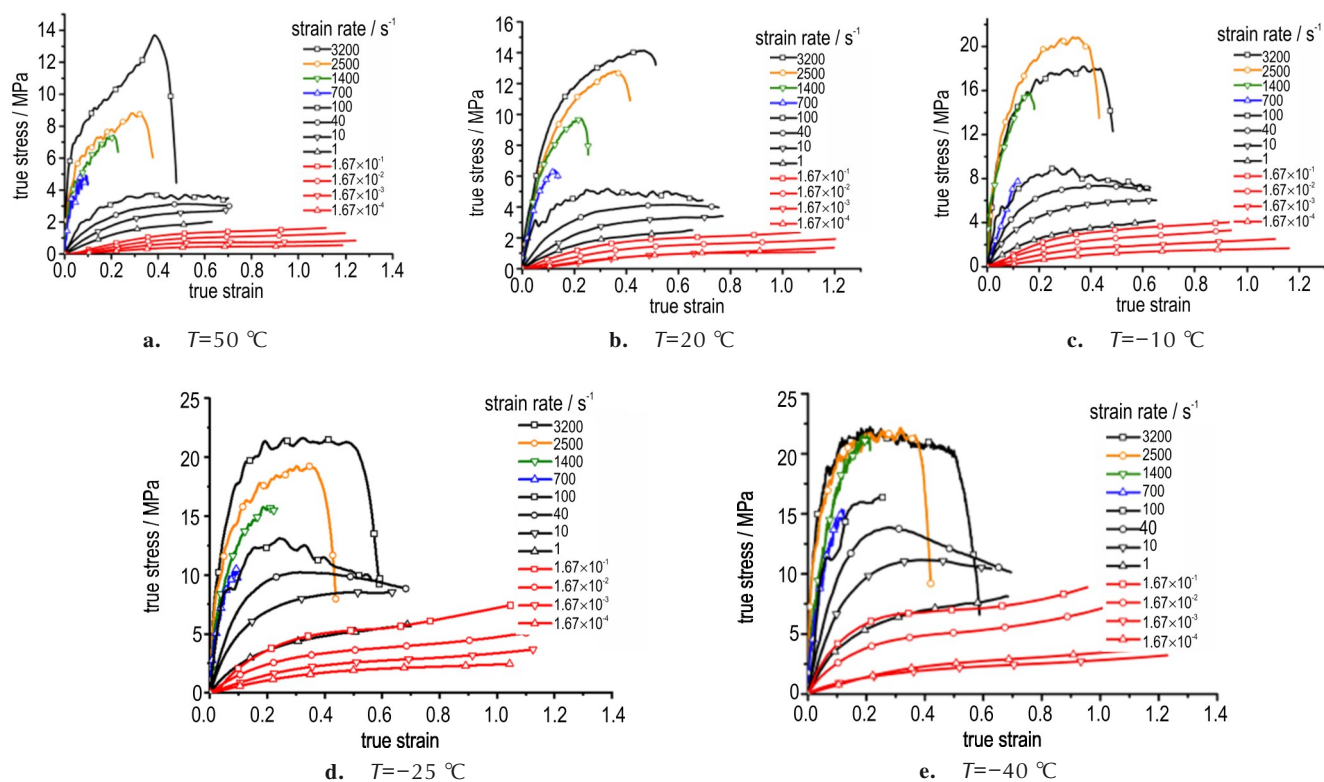


图 3 不同温度下 HTPB 推进剂宽应变率力学响应

Fig.3 Mechanical response of HTPB propellant with wide strain rate at different temperatures

为更直观地反映温度对推进剂力学性能的影响, 各选取低中高 3 个应变率水平的一个代表进行分析。图 4 给出了 HTPB 推进剂在  $3200$ 、 $10 \text{ s}^{-1}$  和  $1.67 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  3 个应变率条件下应力应变曲线随温度的变化, 可以看出, 高应变率时, 随着温度的降低, 应力应变曲线的变化速率逐渐减缓 (图 4a); 而低、中应变率时却恰恰相反, 随着温度的降低, 应力应变曲线的变化速率逐渐

加剧 (图 4b、4c)。当温度从  $50^\circ\text{C}$  降低至  $-40^\circ\text{C}$  时, HTPB 推进剂试件在宽应变率作用下的最大应力从约  $2.2 \sim 8.8 \text{ MPa}$  增长至约  $11 \sim 22 \text{ MPa}$ 。此外, 随着温度的降低和应变率增大, HTPB 推进剂发生应变软化的应变值逐渐减小。

### 2.2 力学机制分析

从图 3 可以看出, 四组元 HTPB 推进剂作为颗粒

填充的聚合物,在宽应变率下的变形过程中应变软化与应变硬化行为是同时存在的<sup>[14]</sup>,其产生机制可以从以下角度进行分析。

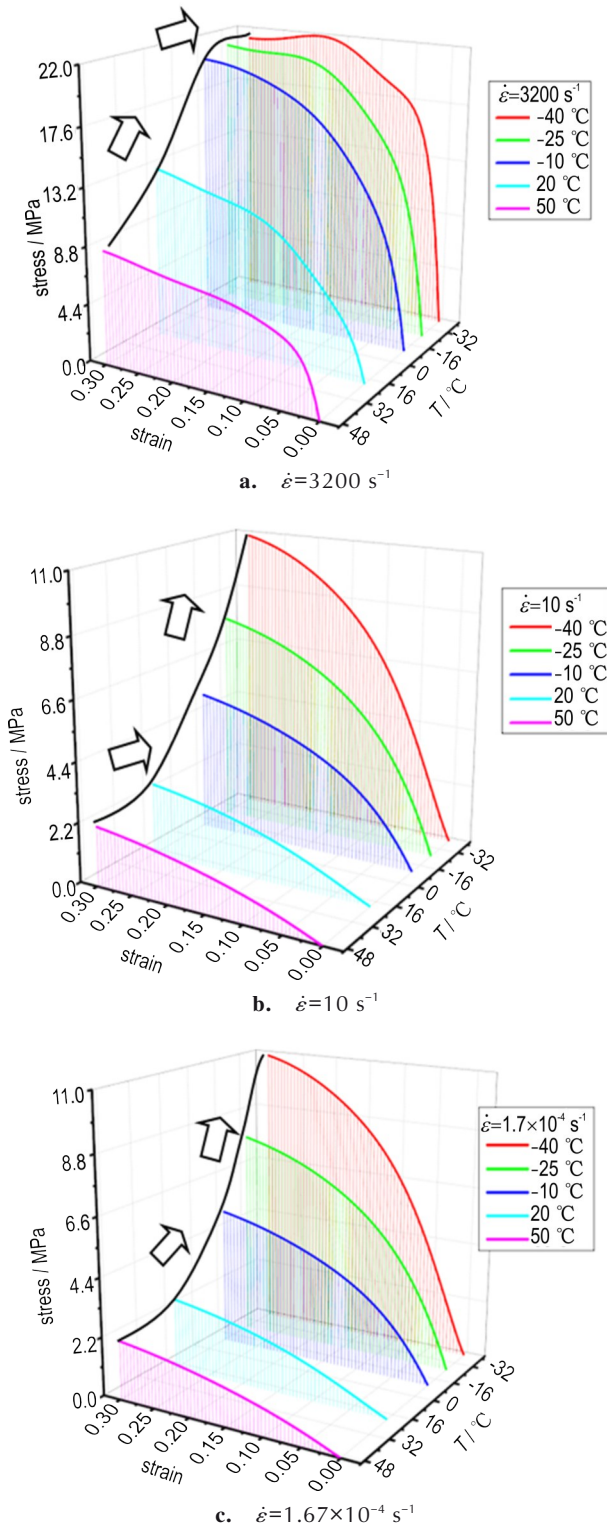
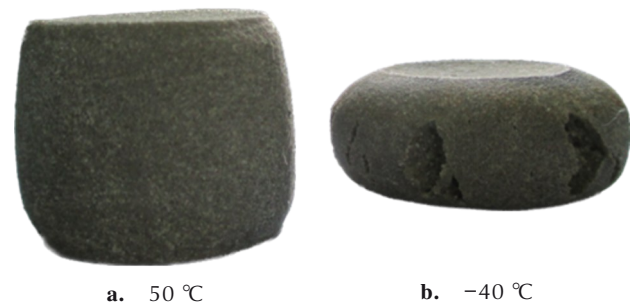


图4 不同应变率下应力-应变曲线随温度变化趋势

Fig.4 Trend of stress-strain curves with temperature at different strain rates

从细观尺度下固体颗粒与高分子基体混合角度分析,固体颗粒与高聚物基体之间的相互作用、固体颗粒自身强度、高聚物基体自身强度三方面共同承担推进剂材料的宏观力学强度<sup>[15-16]</sup>。在变形初期,高聚物基体的粘弹性对宏观力学强度的表达起主要作用;随着变形的加剧,固体颗粒与高聚物基体之间的相互作用对宏观强度的贡献占比逐渐提高,固体颗粒与推进剂基体脱粘的比例逐渐增加,推进剂呈现出应变软化现象<sup>[17]</sup>。此外,固体颗粒本身强度对推进剂宏观力学强度的贡献占比取决于固体颗粒本身的力学特性,通常认为固体颗粒的强度高于粘接强度和聚物基体的强度,但当应变率不断提高时,高聚物的应力响应快速增长,在剧烈变形下颗粒的破碎、基体的断裂和颗粒与基体的脱粘同时发生,表现为推进剂应变硬化直至发生塑性变形与宏观破坏<sup>[18-19]</sup>。

对比图3中不同温度条件下的高应变率力学响应,可以发现应变硬化现象随着温度的降低逐渐减弱,可以推测在低温条件下,高聚物内部可自由运动的链段数量减少,材料性能向玻璃态靠近,表现为高聚物基体脆性增强、强度增加,高聚物基体的强度迅速趋近固体颗粒本身强度甚至反超,造成与高温或低、中应变率时不同的情况,即颗粒本身强度提前参与材料宏观力学强度的表达;同时,随着变形加剧、固体颗粒发生破碎、高聚物基体分子链开始断裂,低温造成的硬化效应无法抵消颗粒与分子链断裂造成的强度损失。因此,应力应变曲线所表现出的“软化”现象(图3d、3e)实质为推进剂试件已经不同程度发生了明显的塑性破坏。图5为HTPB推进剂在中应变率( $10\text{ s}^{-1}$ )下压缩后的试件,温度条件分别为高温 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和低温 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,可见试件在高温条件下基本保持完整性并有较大的回弹,相比之下低温条件下中应变率的加载对推进剂试件造成了不可恢复的塑性破坏。



a.  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$

b.  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

图5  $10\text{ s}^{-1}$ 应变率下压缩后的试件

Fig.5 Samples after compression at  $10\text{ s}^{-1}$

### 3 单轴压缩本构关系

#### 3.1 常温本构关系构建

为深入研究宽温域宽应变率条件下丁羟四组元 HTPB 推进剂的压缩力学性能,研究依据常温(20 °C)条件下的应力应变曲线,构建丁羟四组元 HTPB 推进剂的常温本构关系。

在描述较宽应变率内聚合物材料变形时,Prony 模型较为通用<sup>[20]</sup>。Prony 模型是由一个弹性弹簧元件和一系列 Maxwell 元件并联组成的粘弹性模型,其模型示意图如图 6 所示。在本研究中,常温(20 °C)下率相关本构关系采用分段式 Prony 模型进行拟合,本构关系中的材料参数通过 20 °C 条件下的实验数据采用遗传算法获取<sup>[21]</sup>。

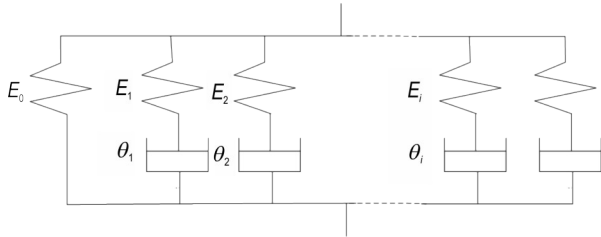


图 6 Prony 级数模型

Fig.6 Prony series model

对于低、中应变率,即应变率小于 100 s<sup>-1</sup>时,为提高拟合效果,采用式(10)所示的 4 阶 Prony 级数拟合<sup>[22]</sup>,拟合结果如表 4 所示。

$$\sigma = \sum_{i=1}^n E_i \theta_i \dot{\epsilon} (1 - \exp(-\frac{\epsilon}{\theta_i \dot{\epsilon}})), \quad n = 4 \quad (10)$$

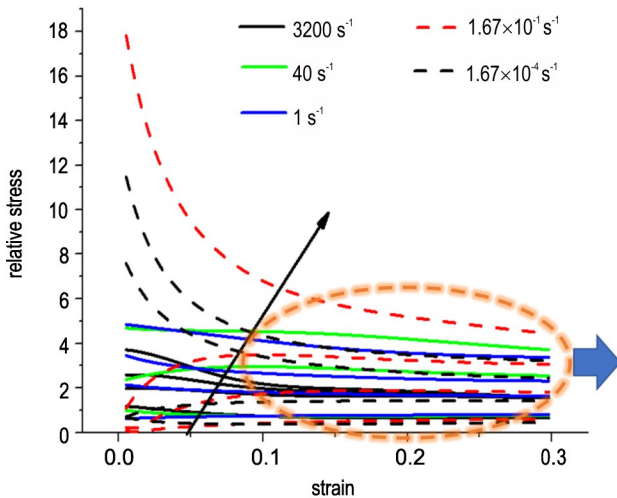


图 7 不同温度下的相对应力与应变的关系

Fig.7 Relationship between the relative stress and strain at different temperatures

表 4 低、中应变率 Prony 模型参数表

Table 4 Parameters of Prony model at low and medium strain rates

| parameter | $E_0$<br>/MPa | $E_1$<br>/MPa | $\theta_1$<br>/s | $E_2$<br>/MPa | $\theta_2$<br>/s | $E_3$<br>/MPa | $\theta_3$<br>/s | $E_4$<br>/MPa | $\theta_4$<br>/s     |
|-----------|---------------|---------------|------------------|---------------|------------------|---------------|------------------|---------------|----------------------|
| value     | 1.74          | 2.85          | 10.4             | 2.5           | 0.59             | 3.03          | 0.03             | 99.4          | $2.5 \times 10^{-4}$ |

Note:  $E_0$  is the instantaneous modulus,  $E_i$  is the  $i$ -th order relaxation modulus,  $\theta_i$  is the  $i$ -th order relaxation time.

对于高应变率,即应变率大于 100 s<sup>-1</sup>时,本研究使用二阶 Prony 模型,此处将模量表达为应变率对数的函数,得到模型公式(式(11)~(13))<sup>[22-23]</sup>。依据实验数据拟合得到高应变率下 Prony 模型的参数如表 5 所示。

$$\sigma = \sum_{i=1}^n E_i \theta_i \dot{\epsilon} (1 - \exp(-\frac{\epsilon}{\theta_i \dot{\epsilon}})), \quad n = 2 \quad (11)$$

$$E_1 = a - b \times \lg(\dot{\epsilon}) \quad (12)$$

$$E_2 = y + c \times e^{\lg(\dot{\epsilon}/d)} \quad (13)$$

表 5 高应变率 Prony 模型参数表

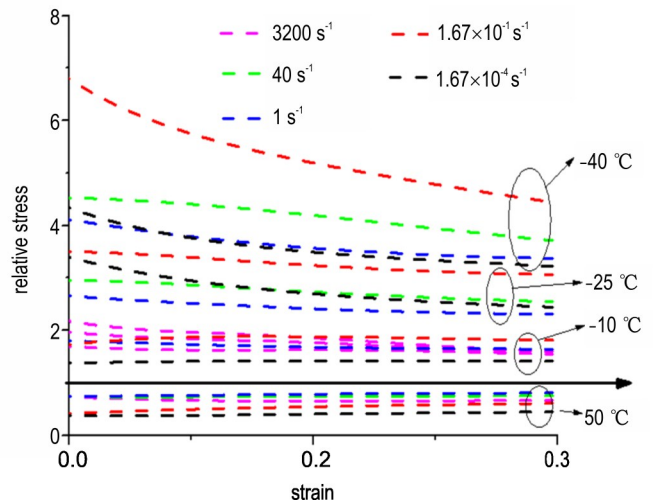
Table 5 Parameters of Prony model at high strain rates

| parameter | $a$ | $b$ | $y$    | $c$     | $d$     | $\theta_1$ /s      | $\theta_2$ /s      |
|-----------|-----|-----|--------|---------|---------|--------------------|--------------------|
| value     | 409 | 104 | -0.139 | 0.00569 | 0.33912 | $1 \times 10^{-4}$ | $1 \times 10^{-5}$ |

Note:  $a, b, y, c, d$  are the modulus parameters.

#### 3.2 率温本构关系构建

为提出合适的率温唯象本构关系,研究了各个温度下应力应变曲线相对于 20 °C 的变化趋势。以 20 °C 条件下不同应变率的应力应变曲线作为参考曲线,用不同温度下的应力数值除以对应应变下 20 °C 的应力数值,得到如图 7 所示的相对应力与应变的关系图。



由图7可以看出,当应变在0.1~0.3内变化时,相对应力与应变近似成线性关系。以温度为横坐标,可以得到不同应变率下相对应力与温度的关系,如图8所示。从图8可以看出低、中、高应变率下相对应力随

温度的变化规律具有相似性,随着温度的升高,相对应力不断下降(图8a)。在高应变率下,相对应力下降相对较慢(图8b);在低应变率下,相对应力下降得更快(图8d)。

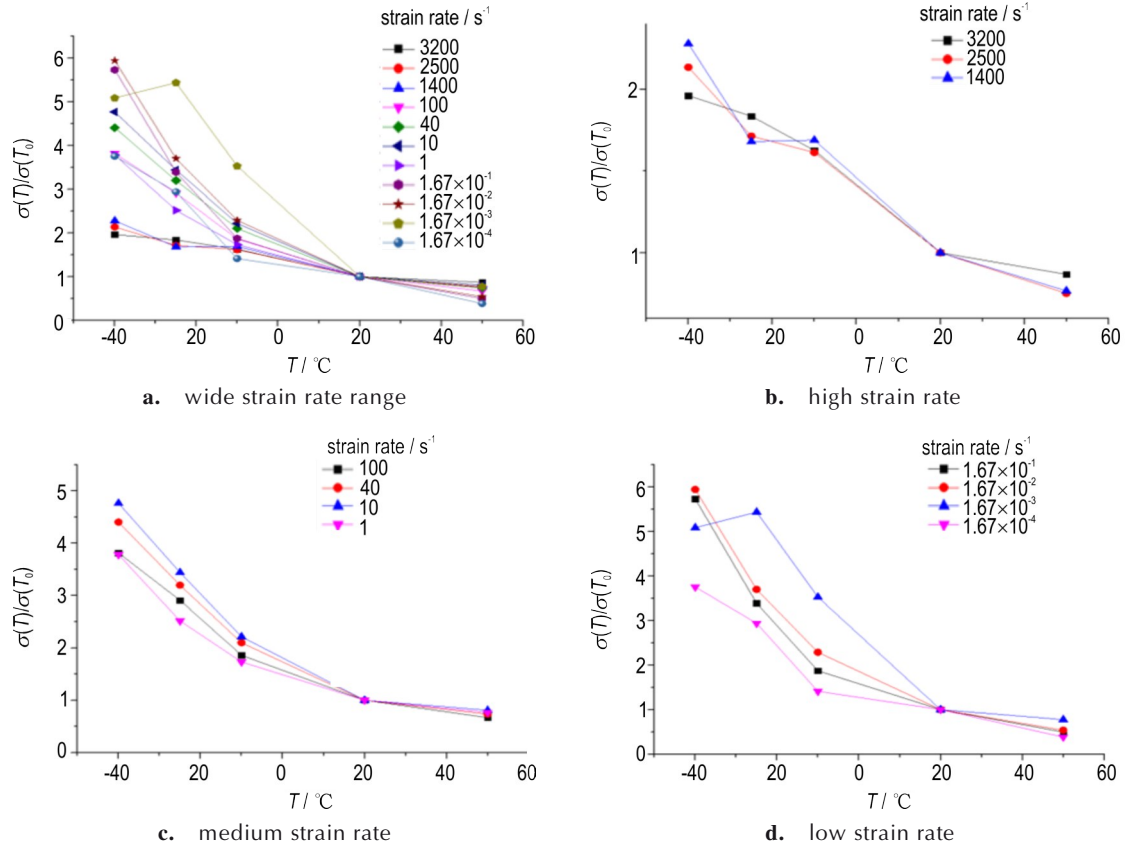


图8 不同应变率下的相对应力与温度的关系

Fig.8 Relationship between the relative stress and temperature at different strain rates

综合以上分析,依据不同温度下的相对应力与应变的变化关系(图7)及不同应变率下的相对应力与温度的变化关系(图8),在20℃条件下本构关系基础上提出如下唯象单轴压缩率温本构关系:

$$\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T) = \sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T_0) \times \exp\left(\frac{C_1(T - T_0)}{C_2 + e^{4 \times (T - T_0)/(3 \times T_0)}}\right) \quad (14)$$

式中,  $T$  为温度变量,  $T_0$  为参考温度(20℃),  $\sigma(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T_0)$  为3.1节构建的常温(20℃)本构模型,  $C_1$ 、 $C_2$  为2个无量纲模型参数,低中高低应变率下分别采用50℃及-25℃条件下的实验数据通过最小二乘法拟合得到最优解,得到如表6的参数。

### 3.3 本构关系验证

将所有实验工况代入建立的本构关系中获得模型数据,模型数据与实验数据的部分对比如图9所示,可见本研究构建的模型在温度较高时(20, 50℃)拟合效

表6 宽应变率模型参数表

Table 6 Parameters of Prony model at wide strain rates

| strain rate        | $C_1$   | $C_2$   |
|--------------------|---------|---------|
| low strain rate    | -0.3732 | 14.1425 |
| medium strain rate | -0.1708 | 7.5092  |
| high strain rate   | -0.0959 | -0.0959 |

Note:  $C_1$ ,  $C_2$  are the modulus parameters.

果更好,且随着温度的降低模型预测结果与实验结果逐渐产生偏差。由2.2节分析可知,可能是低温条件下(-40, -25, -10℃)推进剂产生了不同程度的损伤,需要在本构关系中进一步引入描述损伤的函数,开展更深层次研究<sup>[17-19]</sup>。

综合而言,本研究构建的本构关系具有一定的可靠性,可研究宽温宽应变率下丁羟四组元HTPB推进剂的力学性能。

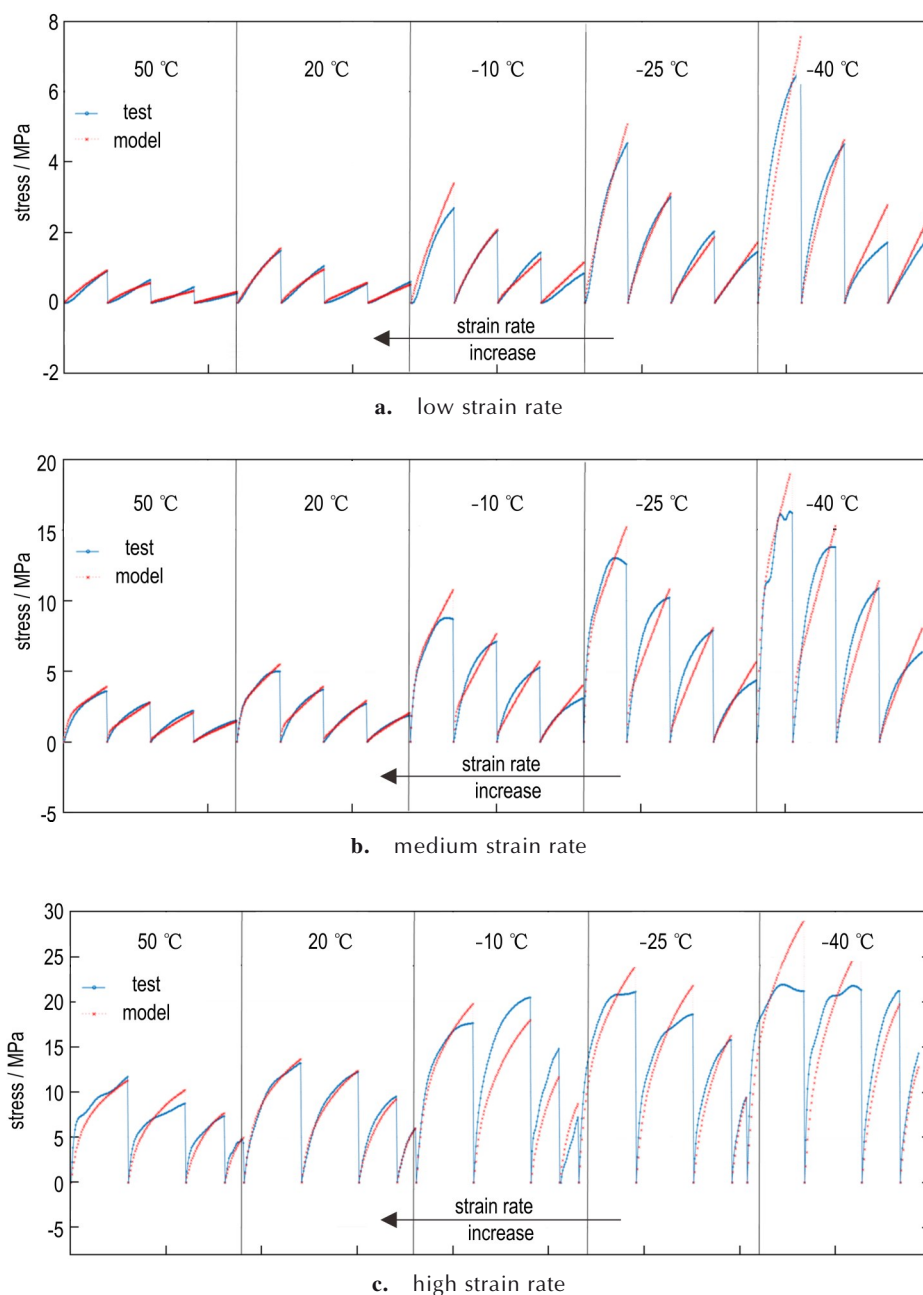


图9 不同应变率下实验与模型数据对比图

Fig.9 Comparison of experimental and model data at different strain rates

## 4 结论

(1) HTPB 推进剂的力学响应存在显著的应变率相关性。在任意应变率下, HTPB 推进剂力学响应都呈阶段性变化: 线弹性阶段—非线性屈服阶段—应变软化阶段或应变硬化阶段。在低、中应变率下, 应变软化阶段发生在非线性屈服阶段后; 在高应变率下, 非线性屈服行为后的应变软化现象明显弱于低、中应变率。

(2) 不同温度下 HTPB 推进剂的应力应变曲线变化趋势存在差别。高应变率时, 随着温度的降低, 应力应变曲线的变化速率逐渐减缓; 而低中应变率却恰恰相反, 随着温度的降低, 应力应变曲线的变化速率逐渐加剧。当温度从 50 °C 降低至 -40 °C 时, HTPB 推进剂试件在宽应变率作用下的最大应力从约 2.2~8.8 MPa 增长至约 11~22 MPa。

(3) 本研究构建了综合温度和应变率效应的分段式单轴压缩率温本构关系, 高温下模型预测结果与实



验数据具有较好的吻合性,但低温下因推进剂损伤,模型预测结果与实验数据会产生一定偏差。

#### 参考文献:

- [1] 侯晓, 张旭, 刘向阳, 等. 固体火箭发动机药柱结构完整性研究进展[J]. 宇航学报, 2023, 44(4): 14.  
HOU Xiao, ZHANG Xu, LIU Xiang-yang, et al. Research progress on structural integrity of solid rocket motor grain[J]. *Journal of Astronautics*, 2023, 44(4): 14.
- [2] 秦鹏举, 侯晓, 张翔宇, 等. HTPB推进剂装药工艺研究及力学性能预测[J]. 推进技术, 2023: 14.  
QIN Peng-ju, HOU Xiao, ZHANG Xiang-yu, et al. HTPB propellant charging process and prediction of its mechanical properties[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023: 14.
- [3] 王哲君, 强洪夫, 王广, 等. 固体推进剂力学性能和本构模型的研究进展[J]. 含能材料, 2016, 24(4): 403-416.  
WANG Zhe-jun, QIANG Hong-fu, WANG Guang, et al. Review on the mechanical properties and constitutive models of solid propellants [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(4): 403-416.
- [4] WANG Z, QIANG H, WANG G. Experimental investigation on high strain rate tensile behaviors of HTPB propellant at low temperatures [J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2016, 40(6): 814-820.
- [5] YANG L, WANG N, XIE K, et al. Influence of strain rate on the compressive yield stress of CMDB propellant at low, intermediate and high strain rates [J]. *Polymer Testing*, 2016, 51: 49-57.
- [6] YANG L, XIE K, PEI J, et al. Compressive mechanical properties of HTPB propellant at low, intermediate, and high strain rates [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2016, 133(23).
- [7] 杨龙, 谢侃, 裴江峰, 等. HTPB推进剂拉伸力学行为的应变速率相关超弹本构模型[J]. 推进技术, 2017, 38(3): 687-694.  
YANG Long, XIE Kan, PEI Jiang-feng, et al. A strain-rate-dependent hyperelastic constitutive model for tensile mechanical behaviour of HTPB propellant [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(3): 687-694.
- [8] 李翥, 徐秉恒, 郭运强, 等. 固体火箭发动机药柱低温损伤研究进展[J]. 固体火箭技术, 2020, 43(6): 808-816.  
LI Zhu, XU Bing-heng, GUO Yun-qiang, et al. Research progress on low temperature damage of SRM grain [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2020, 43(6): 808-816.
- [9] 李辉, 许进升, 周长省, 等. HTPB推进剂温度相关性失效准则[J]. 含能材料, 2018, 26(9): 7.  
LI Hui, XU Jin-sheng, ZHOU Chang-sheng, et al. Failure criterion related to temperature for HTPB propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(9): 7.
- [10] 强洪夫, 王哲君, 王广, 等. 低温动态加载下三组元HTPB复合固体推进剂的失效判据[J]. 含能材料, 2019, 27(4): 274-281.  
QIANG Hong-fu, WANG Zhe-jun, WANG Guang, et al. Failure criteria of three-component HTPB composite solid propellant at low temperature under dynamic loading [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(4): 274-281.
- [11] 李军伟, 王茹瑶, 宋岸忱, 等. 丁羟四组元复合推进剂燃烧稳定性机理研究综述[J]. 火炸药学报, 2021, 44(3): 284-294.  
LI Jun-wei, WANG Ru-yao, SONG An-chen, et al. Review on combustion stability mechanism of four-component HTPB propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2021, 44(3): 284-294.
- [12] 王哲君, 强洪夫, 王广, 等. 中应变率下HTPB推进剂压缩力学性能和本构模型研究[J]. 推进技术, 2016, 37(4): 7.  
WANG Zhe-jun, QIANG Hong-fu, WANG Guang, et al. Mechanical properties and constitutive model for HTPB propellant under intermediate strain rate compression [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(4): 7.
- [13] HE H, DENG Q, WANG C, et al. A novel methodology for large strain under intermediate strain rate loading [J]. *Polymer Testing*, 2021, 97: 107142.
- [14] WARD I, SWEENEY J. Mechanical properties of solid polymers [M]. John Wiley & Sons, 2012.
- [15] 李高春, 李树谦, 郭宇, 等. 不同温度和拉伸速率下复合推进剂力学性能及破坏模式分析[J]. 固体火箭技术, 2019, 42(3): 297-302.  
LI Gao-chun, LI Shu-qian, GUO Yu, et al. Mechanical properties and failure mode of composite solid propellant under different temperatures and tensile rates [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2019, 42(3): 297-302.
- [16] 职世君, 沈欣, 曹军伟. 低温高应变率下复合固体推进剂损伤机理分析[J]. 固体火箭技术, 2018, 41(5): 574-579.  
ZHI Shi-jun, SHEN Xin, CAO Jun-wei. Damage mechanism analysis of composite solid propellants under low temperature and high strain rate [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2018, 41(5): 574-579.
- [17] 常武军, 鞠玉涛, 王蓬勃. HTPB推进剂脱湿与力学性能的相关性研究[J]. 兵工学报, 2012, 33(3): 261-266.  
CHANG Wu-jun, JU Yu-tao, WANG Peng-bo. Research on correlation between dewetting and mechanical property of HTPB propellant [J]. *Acta Armamentarii*, 2012, 33(3): 261-266.
- [18] 乌布力艾散·麦麦提图尔荪, 吴艳青, 侯晓, 等. 微观结构参量对推进剂力学性能影响的数值研究[J]. 复合材料学报, 2022, 39(6): 2949-2961.  
MAIMAITIUSUN Wubuliaisan, WU Yan-qing, HOU Xiao, et al. Numerical investigations on mesoscopic structure parameters affecting mechanical responses of propellant [J]. *Acta Material Compositae Sinica*, 2022, 39(6): 2949-2961.
- [19] HOU Y, XU J, ZHOU C, et al. Microstructural simulations of debonding, nucleation, and crack propagation in an HMX-MDB propellant [J]. *Materials & Design*, 2021, 207: 109854.
- [20] 夏剑冬, 徐滨, 廖昕. 双基发射药黏弹特性与本构模型研究[J]. 含能材料, 2023, 31(11): 1124-1133.  
XIA Jian-dong, XU Bin, LIAO Xin. Viscoelastic properties and constitutive model of double-base propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2023, 31(11): 1124-1133.
- [21] 杨龙. CMDB和HTPB推进剂力学行为的应变率相关性及其本构模型[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.  
YANG Long. Strain-rate dependency and constitutive model of mechanical behaviours of CMDB and HTPB propellant [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [22] 马伟华. 高过载下固体推进剂装药结构完整性试验与仿真分析[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.  
MA Wei-hua. Experimental and simulational analyses of struc-

tural integrity of solid propellant grain under high overload [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018.

[23] 袁康博, 姚小虎, 王瑞丰, 等. 金属材料的率-温耦合响应与动态本构关系综述[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(9): 4-37.

YUAN Kang-bo, YAO Xiao-hu, WANG Rui-feng, et al. A review on rate-temperature coupling response and dynamic constitutive relation of metallic materials[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(9): 4-37.

## Uniaxial Compressive Mechanical Behavior of Four-component HTPB Propellant under Wide Temperature and Strain Rate Range

WANG Ran<sup>1</sup>, WU Yi<sup>1</sup>, BAI Long<sup>2</sup>, ZHANG Yi-ming<sup>1</sup>, WANG Ning-fei<sup>1</sup>

(1. School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Xi'an Changfeng Research Institute of Mechanism and Electricity, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In order to investigate the uniaxial compression mechanical behavior of four-component HTPB propellant under wide temperature and wide strain rate ranges, uniaxial compressive mechanical performance tests of propellant were conducted under wide temperature and strain rate ranges based on universal material testing machine, high-speed hydraulic servo testing machine, split Hopkinson pressure bar, and programmatic constant temperature and humidity testing machine. Stress-strain curves of HTPB propellant under  $10^{-4}$ – $10^3$  s<sup>-1</sup> at -40, -25, -10, 20 °C and 50 °C were obtained, and the segmented uniaxial compression rate-temperature constitutive relationship of HTPB propellant was established. The results indicate that the mechanical response of HTPB propellant exhibits a significant rate-temperature correlation. At any strain rate, its mechanical response undergoes staged changes, i.e., linear elastic stage-nonlinear yield stage-strain softening or strain hardening stage. Moreover, at high strain rates, the strain softening phenomenon after the nonlinear yield behavior is significantly weaker than that at low and medium strain rates. In addition, at high strain rates, as the temperature decreases, the changing rate of the stress-strain curve gradually slows down; while at low and medium strain rates, the changing rate of the stress-strain curve gradually increases as the temperature decreases. The mechanical strength of HTPB propellant increases significantly with decreasing temperature. When the temperature drops from 50 °C to -40 °C, the maximum stress under wide strain rate increases from about 2.2–8.8 MPa to 11–22 MPa. The segmented rate-temperature constitutive relationship constructed based on the experimental data has a better fitting effect at higher temperatures, which can better predict the mechanical behavior of HTPB propellant.

**Key words:** four-component HTPB propellant; wide temperature range; wide strain rate range; mechanical properties; uniaxial compression constitutive relationship

**CLC number:** TJ55;V435

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2023119

(责编: 卢学敏)