

doi: 10.7690/bgzd.2024.06.003

## 两种新型炸药的准静态力学性能

王 锋<sup>1,2</sup>, 李东伟<sup>2</sup>, 朱英中<sup>2</sup>, 肖 伟<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 2. 重庆红宇精密工业集团有限公司研究一所, 重庆 402760)

**摘要:** 为推动炸药在侵爆战斗部中的应用, 采用万能材料试验机对 HMX 基压装高聚物粘结炸药 (polymer bonded explosive, PBX) 和 DNAN 基熔铸炸药的准静态力学性能进行研究。获得 2 种炸药在  $2.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1} \sim 1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  应变率范围内的应力应变试验数据。结果表明: 2 种炸药的力学性能均具有明显的应变率效应, 但前者失效应变约为后者的 6 倍, 呈现出较大区别。基于唯象方法, 建立描述 2 种炸药 1 维准静态压缩力学行为的幂指数硬化本构模型, 并拟合得到本构模型参数。通过与试验结果对比表明, 模型计算结果与试验结果误差小于 3%, 吻合较好。该研究结果可为描述 2 种炸药的力学行为提供参考。

**关键词:** 压装 PBX; DNAN 基熔铸炸药; 力学性能; 本构关系

**中图分类号:** TJ55; O347.3 **文献标志码:** A

## Quasi-static Mechanical Properties of Two New Explosives

Wang Feng<sup>1,2</sup>, Li Dongwei<sup>2</sup>, Zhu Yingzhong<sup>2</sup>, Xiao Wei<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. No. 1 Institute, Chongqing Hongyu Precision Industrial Group Co., Ltd., Chongqing 402760, China)

**Abstract:** In order to promote the application of explosives in penetration and explosion warhead, the quasi-static mechanical properties of HMX-based pressed high energy bonded explosive (PBX) and DNAN-based melt-cast explosive were studied by universal material testing machine. The stress-strain test data of the two explosives were obtained in the strain rate range of  $2.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  to  $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . The results show that the mechanical properties of the two kinds of explosives have obvious strain rate effect, but the failure strain of the former is about 6 times of the latter, showing a big difference. Based on the phenomenological method, the exponential hardening constitutive model was established to describe the one-dimensional quasi-static compressive mechanical behavior of the two kinds of explosives, and the parameters of the constitutive model were fitted. The comparison between the calculated results of the model and the experimental results shows that the error is less than 3%, which is in good agreement. The results can provide a reference for describing the mechanical behavior of the two explosives.

**Keywords:** pressed PBX; DNAN-based melt-cast explosive; mechanical properties; constitutive relationship

### 0 引言

战斗部在使用过程中, 无法避免地面临运输振动、发射冲击以及与目标碰撞等复杂的不同加载速率的力学刺激<sup>[1]</sup>。作为战斗部中的敏感部件, 炸药在力学载荷作用下的响应情况将直接影响战斗部的安定性和贮存性<sup>[2]</sup>; 因此, 研究炸药在不同加载率下的力学响应具有重要科学和工程意义。

高聚物粘结炸药 (PBX) 具有能量密度高、力学性能好和机械感度低等优点, 被作为多种武器系统中的主装药<sup>[3]</sup>。目前, 研究者们对浇注型 PBX 在多种维度加载下的力学性能进行了大量研究。王鹏飞等<sup>[4]</sup>研究了某浇注 PBX 的准静态力学性能, 并建立了 Drucker-Prager 本构模型。唐明峰等<sup>[5]</sup>研究了 RDX 基浇注 PBX 准静态循环加载-卸载力学性能, 并建立了 Dorfmann&Ogden 本构模型。段晓畅等<sup>[6]</sup>

研究了 TATB 基浇注 PBX 的单轴准静态力学性能, 得到了不同温度下炸药的应力应变关系。近年来, 压装 PBX 逐渐成为高性能侵彻战斗部主装药首选。同时, DNAN 作为一种新型不敏感载体<sup>[7]</sup>, 以其为载体的混合熔铸炸药已被用于装填侵彻战斗部。然而, 对压装型 PBX 力学性能研究鲜有报道, 且 DNAN 基熔铸炸药的力学性能研究主要集中在拉伸强度、剪切强度等单一力学参量方面<sup>[8]</sup>, 对不同应变率在炸药的力学性能研究不足。

鉴于此, 笔者采用万能材料试验机对 HMX 基压装 PBX 和 DNAN 基熔铸炸药的准静态力学性能进行研究, 对比不同加载速率下炸药的响应情况。通过对试验数据拟合, 标定本构模型参数, 并对模型准确性进行验证。研究结果可为描述 2 种炸药的力学行为提供参考, 支撑 DNAN 体系熔铸炸药和压

收稿日期: 2024-02-20; 修回日期: 2024-03-25

第一作者: 王 锋 (1982—), 男, 河北人, 博士。

装 PBX 炸药的安全性设计。

### 1 实验部分

笔者研究的 JOL (HMX 50%/Al30%/TATB10%/Binder10%) 和 DMCX (DNAN 25%/RDX36%/Al31%/助剂 8%) 理论密度分别为 2.086 和 1.818 g·cm<sup>-3</sup>, 成型样品密度分别为 2.03 和 1.76 g·cm<sup>-3</sup>。考虑准静态压缩过程中炸药样品可能存在失稳的问题, 样品制成长径比为 1 的圆柱形药柱。炸药样品尺寸均为 φ10 mm×10 mm。图 1 给出了被试炸药样品实物照片。

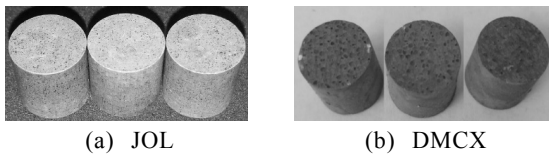


图 1 炸药样品实物照片

准静态力学加载试验所用材料试验机为美国英斯特朗公司的 INSTRON 5965 机电万能材料试验机。该型材料试验机可提供最大载荷 5 kN, 加载速率范围 0.001~3 000 mm/min。

### 2 结果与讨论

#### 2.1 力学性能

利用万能材料试验机对两型炸药样品分别进行了 3 种加载速率的压缩试验, 得到了不同的加载应变率下 2 种炸药的应力-应变曲线见图 2。

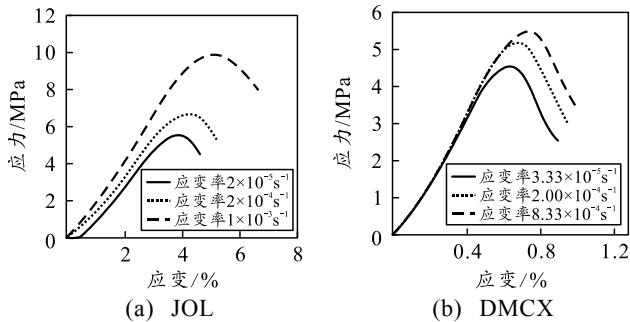


图 2 炸药应力应变曲线

由上图可以看到:

2 种炸药样品的应力应变曲线可分为线弹性阶段、非线性应变强化阶段和应变软化阶段, 且整个应力应变曲线均未出现明显的屈服行为;

JOL 炸药失效(断裂)应变约为 3.8%~5.1%, 而 DMCX 炸药失效(断裂)应变仅约为 0.6%~0.8%, 2 种炸药力学性能呈现明显区别。

#### 2.2 本构模型

JOL 及 DMCX 炸药均为载体复合固相颗粒的

非均质材料。炸药材料结构复杂, 在力学加载下将呈现高度非线性特征。通过研究 JOL 炸药准静态应力应变曲线, 提出了一种改进的幂指数硬化模型, 建立如下唯象型本构模型:

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= (1 + A\varepsilon^*)E_0\varepsilon & 0 < \varepsilon < \varepsilon_p \\ \sigma &= [1 - D(\varepsilon - \varepsilon_p)^n](1 + A\varepsilon^*)\eta E_0\varepsilon & \varepsilon \geq \varepsilon_p \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $\sigma$ 、 $\varepsilon$ 、 $\varepsilon^p$  分别为炸药应力、应变和屈服应力;  $D = D_0(1 - \alpha \ln \varepsilon^*)$ ,  $D_0$  为损伤参数,  $\alpha$  为损伤系数;  $\eta = 1 - \varepsilon(0)/\varepsilon^p$  为杨氏模量修正系数, 用于修正药柱加载端面不平整和药柱存在孔隙引起的初期非线性行为。

通过研究 DMCX 炸药准静态应力应变曲线, 提出了一种改进的幂指数硬化模型, 建立唯象型本构模型:

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= E_1\varepsilon & 0 < \varepsilon < \varepsilon_p \\ \sigma &= [1 - D_1(\varepsilon - \varepsilon_p)^n]\eta E_1\varepsilon & \varepsilon \geq \varepsilon_p \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中:  $E_1$  为 DMCX 弹性模量;  $D_1 = D_0(1 - \alpha \varepsilon^*)$ 。

采用 Origin 软件对 JOL 和 DMCX 炸药应变率分别为  $2.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  和  $3.33 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  条件下炸药的应力应变曲线进行非线性曲线拟合, 结果如图 3 所示。

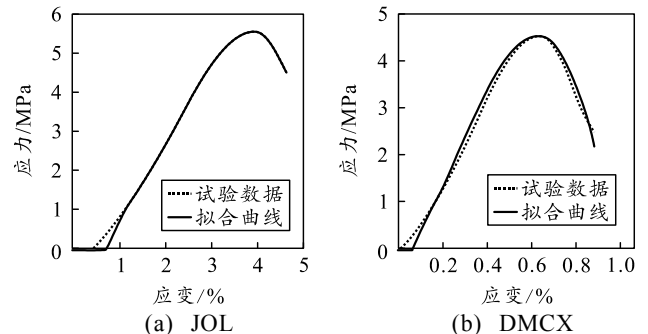


图 3 炸药力学本构拟合曲线

由上图可以看到, 所建立的唯象本构模型可以很好的描述 JOL 和 DMCX 炸药准静态力学行为。拟合得到本构模型参数如表 1 所示。

表 1 炸药的准静态本构方程参数

试样	A	E <sub>0</sub> /MPa	D <sub>0</sub>	α	n
JOL	5.3×10 <sup>-3</sup>	207.33	1.74×10 <sup>4</sup>	0.2	2.66
DMCX	-	1 000	2.55×10 <sup>4</sup>	5.8×10 <sup>-3</sup>	2.0

基于拟合得到的本构模型, 对应变率为  $2.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  实线和  $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  虚线条件下 JOL 准静态力学性能和应变率为  $2.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  实线和  $8.33 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  虚线条件下 DMCX 准静态力学性能进行预测, 并与试验测试曲线对比, 结果如图 4 所示。