

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.02.008

典型浇注 PBX 炸药的准静态压缩力学行为^{*}

席 鹏 孙培培 郑亚峰 南 海 潘 文
西安近代化学研究所(陕西西安, 710065)

[摘 要] 采用定应变压缩试验研究了准静态压缩条件下浇注 PBX 炸药(浇注型高聚物黏结炸药)的力学行为,测试了典型浇注炸药 PBX-1 在损伤前、后的性能,获得了炸药的真应力-应变曲线。试验结果表明,浇注 PBX 炸药在准静态压缩条件下的力学行为分为接触压缩、弹性变形、损伤破坏和应变软化 4 个阶段。在压缩应变不超过损伤应变时,PBX-1 炸药主要以弹性变形为主,屈服强度和屈服应变没有发生明显改变;在压缩应变超过损伤应变后,炸药中黏结剂断裂,颗粒脱黏,发生塑性变形。压缩应变增加至 8% 后,PBX-1 炸药密度降低,残余应变增大;PBX-1 炸药的屈服强度为 0.6 MPa,屈服应变为 10.6%,损伤应变为 8%,炸药的损伤应变可以作为强度校核的依据。

[关键词] 浇注 PBX 炸药;准静态压缩;损伤行为;压缩应变

[分类号] TQ564; TD235.2⁺¹

Mechanical Behaviors of Typical Casting-PBX Explosives under Quasi-Static Compression

XI Peng, SUN Peipei, ZHENG Yafeng, NAN Hai, PAN Wen
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] Mechanical behaviors of casting-PBX explosives under the quasi-static compression were studied by constant strain compression test. Properties of PBX-1, a typical casting explosive, were tested before and after its damage. The tress-strain curves of PBX-1 were obtained. The results show that the distortion of casting-PBX explosives under quasi-static compression can be divided into four stages: contact compression, elastic deformation, damage and fracture, and strain softening. When the compression strain is less than the damage strain, explosive PBX-1 mainly presents the elastic deformation, and the yield strength and the yield strain nearly unchange. When the compression strain is more than the damage strain, binder in PBX-1 fractures and the particles debond from the binder, which can result in the plastic deformation of the explosive. Density declines and residual strain increases when the compression strain of the explosives increases to more than 8%. Yield strength, yield strain, and damage strain of the PBX-1 are 0.6 MPa, 10.6%, and 8%, respectively. The damage strain of explosive can be used as the basis of the strength check.

[KEYWORDS] casting-PBX explosive; quasi-static compression; damage behaviors; compressive strain

引言

炸药是武器系统中弹药和战斗部的能源,通过爆轰实现毁伤效应。作为结构材料,炸药在运输、储存和使用过程中需要耐受一定的应力和变形。炸药的强度和刚度较低,在一定外载荷作用下会产生不同程度的损伤,影响炸药的点火阈值和爆轰波传播。炸药损伤后的力学行为直接关系到自身的应用安全

性、爆轰稳定性和起爆可靠性等,从而影响武器系统的使用寿命、安全性和作战效果。针对军事需求的迫切性,炸药损伤的研究越来越受到关注。有学者对压装 PBX 炸药(高聚物黏结炸药)进行径向压缩试验,观察到了颗粒断裂、界面脱黏、变形孪晶等多种损伤破坏形式,并在试验研究的基础上对 PBX 材料几种可能的变形破坏机理进行了分析^[1-2]。陈鹏万等^[3]利用巴西试验对高聚物黏结炸药的变形破坏机理进行了研究,结果表明,试样最主要的破坏机

^{*} 收稿日期:2020-05-24
第一作者:席鹏(1985-),男,硕士,高级工程师,主要从事炸药配方及工艺研究。E-mail:xipeng-57@163.com

理是界面脱黏和黏结剂的成穴失效。目前,国内研究人员对炸药损伤的研究大多集中在压装 PBX 方面,对浇注 PBX 炸药损伤研究主要集中在损伤形貌特征方面,对于损伤后的力学行为讨论较少。

浇注 PBX 炸药是一种聚合物基复合材料,具有优异的低易损性能和爆轰性能,广泛应用于侵彻战斗部、水下战斗部等^[4-6]。浇注 PBX 炸药的配方体系和力学性能与压装 PBX 炸药差异较大^[7]。研究浇注 PBX 炸药的损伤行为,可以分析炸药在储存、运输等准静态条件下的安全性,获取的力学性能参数也是炸药数值仿真计算的必备条件,有助于炸药在侵彻、冲击、跌落等应用工况下的安全性^[8-9]。

本文中,主要以准静态压缩试验作为实施损伤的手段,通过压缩应变控制炸药的损伤程度,研究典型浇注炸药 PBX-1 损伤过程中的力学行为,讨论浇注 PBX 炸药材料的微观结构和破坏性能,分析炸药的损伤演化过程,为其安全性预估提供基础数据。

1 试验部分

1.1 试样制备

PBX-1 炸药配方(质量分数)由 64% 黑索今(RDX)、20% 铝粉(Al)和黏结剂组成。黏结剂配比参考文献[10]中的 PBXN-109 炸药,外加 0.01% 的 TPB 催化剂^[11]。炸药药柱尺寸 $\varnothing 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 密度 1.645 g/cm^3 。

1.2 仪器设备

防爆材料试验机,西安近代化学研究所研制,最大压力 30 kN,压力相对误差 0.29%,位移相对误差 0.28%;微观扫描电子显微镜,FEI QUANTA-600 型,环境为高真空模式。

1.3 试验条件

固定应变条件下连续进行 3 次压缩-恢复试验,压缩速率与恢复速率均为 5 mm/min ,当位移恢复到起始点后,立即进行第 2 次压缩,试验温度 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。定应变压缩后立即进行真应力-应变^[7]测试。密度测试参考 GJB772A—1997 方法 401.2 液体静力称量法,分度值 0.001 g/cm^3 。

2 结果和分析

2.1 压缩损伤后的真应力-应变曲线

图 1 为 PBX-1 炸药在准静态压缩损伤前、后的真应力-应变曲线。其中,曲线 1[#] 是炸药损伤前的真

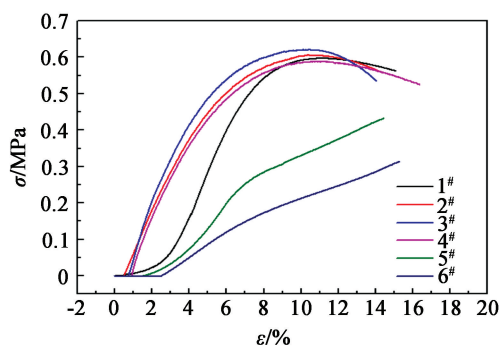


图 1 连续压缩 3 次后的真应力-应变曲线

Fig. 1 True stress-strain curves after compression by three cycles

应力-应变曲线;曲线 2[#] ~ 曲线 6[#] 分别是 PBX-1 炸药在经历压缩应变分别为 4%、6%、8%、10%、14% 条件下连续压缩 3 次后的真应力-应变曲线。从曲线 1[#] 可以看出,在准静态压缩条件下,PBX-1 炸药的应力应变曲线表现出显著的非线性,主要由 3 个阶段组成:低模量的线性阶段、强化阶段和应变软化阶段。PBX-1 炸药存在丰富的界面层,在应变初始阶段产生界面压缩变形,表现出较低的压缩模量。随着应变增加,聚合物刚度逐渐增大,炸药处于一种高模量状态,发生大应变变形。当压缩应变大于 6%,高弹形变逐渐向黏性流动转变,压缩模量逐渐降低;在越过屈服点后,应力逐渐下降,表现为明显的应变软化特征。

从曲线 2[#] ~ 曲线 6[#] 可以看出,在压缩应变不超过 8% 时,由于浇注 PBX 炸药丰富的聚合物的蠕变特征,在 3 次低应变压缩后界面压缩尚未恢复,颗粒填充更加密实,曲线表现为弹性段和软化段,在弹性段炸药的刚度增加;在压缩应变大于 10% 后,炸药损伤导致应变软化,失去弹性自持性,表现出聚合物黏性特征。此外,从曲线 2[#] ~ 曲线 6[#] 还可以看出,由于损伤后的力学性能曲线是在连续 3 次损伤后直接测量,损伤应变没有恢复,PBX-1 炸药在压缩初期存在 0.5% ~ 2.5% 的残余应变。

表 1 给出了损伤前、后 PBX-1 炸药的力学性能参数,未损伤炸药屈服强度 σ_m 为 0.60 MPa,屈服应变 ε_m 为 10.6%。在定应变压缩 $\leq 8\%$ 并连续压缩 3 次后,炸药的 σ_m 和 ε_m 没有发生显著变化,压缩处于 PBX-1 炸药的弹性压缩阶段;当定应变压缩 $\geq 10\%$ 以后,炸药损伤导致应变软化,失去弹性自持性,表现出聚合物黏性特征。

2.2 准静态压缩条件下的残余应变和密度变化

样品在压缩后的残余应变测试结果如图 2 所示。浇注 PBX 炸药是一种介于理想弹性体和理想

表1 损伤前、后的力学性能参数

Tab.1 Mechanical property parameters
before and after damage

曲线编号	σ_m /MPa	ε_m /%
1 [#]	0.60	10.6
2 [#]	0.61	10.4
3 [#]	0.62	10.2
4 [#]	0.59	10.8
5 [#]	—	—
6 [#]	—	—

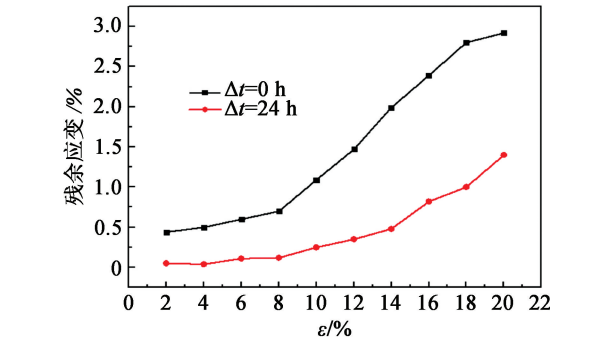


图2 PBX-1 在不同压缩应变下的残余变形
Fig.2 Residual deformation of PBX-1 under different compression strains

黏性体之间的黏弹性材料,当受到外力作用后,平衡形变迅速完成,与理想弹性体相关;在外力卸去后,形变还会随时间发展,又与黏性材料相似^[7]。PBX-1 炸药在宏观上表现为黏弹性材料,其力学松弛也表现在蠕变、滞后等方面,即使在 2% 压缩应变后,也存在接近 0.5% 的残余应变。虽然在压缩应变小于 6% 时的残余应变差异不大,但是,总体上依然体现出残余应变随压缩应变增加而增长的趋势。从压缩 24 h 后的残余应变曲线可以看出,在压缩应变小于 8% 时,残余应变经过 24 h 得到恢复;当压缩应变大于 8% 以后,残余应变随着压缩应变的增加而增大,表明在压缩应变大于 8% 以后,损伤逐渐增大,炸药发生明显的塑性变形。

图 3 是 PBX-1 炸药在定应变压缩前、后的密度变化曲线。在压缩后立即进行密度测量,炸药密度随着压缩应变的增大而逐渐增大;在压缩应变 8% 时,密度达到最大值 1.65 g/cm³;随后密度迅速减小。定应变压缩 24 h,炸药的密度变化相对平缓,在压缩应变小于 8% 时,密度与压缩前基本一致;在压缩应变大于 8% 以后,密度显著降低。

2.3 PBX-1 炸药的损伤形貌

在定应变压缩过程中,炸药在达到最大应力之前已经可以目测到局部微小裂纹和裂纹增长现象。

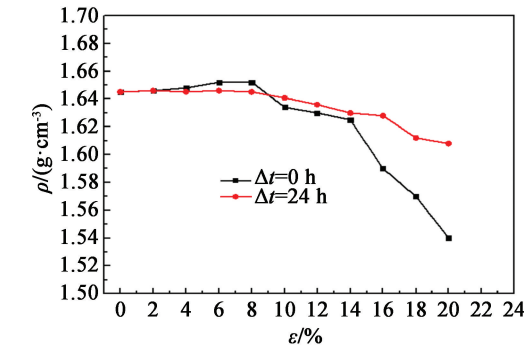


图3 PBX-1 在不同压缩应变下的密度
Fig.3 Density of PBX-1 under different compression strains

图 4 是 PBX-1 炸药在 3 次定应变压缩后的表面形貌。从图 4(a) 可以看出, PBX-1 炸药在较小应变压缩下无明显损伤, RDX 与铝颗粒分布均匀, 颗粒之间通过黏结剂密实填充。由图 4(b) 可知, 在定应变 6% 压缩后, 黏结剂发生弹性变形, 颗粒之间受到挤压, 炸药颗粒被黏结剂紧密包裹。由图 4(c)、图 4(d) 可知, 在应变大于 10% 以后, 炸药在微观上表现出明显的不均匀性, 黏结剂发生松弛或断裂, 伴随着颗粒脱黏现象, 表现为明显的损伤状态。从微观形貌可以看出, 在准静态压缩过程中, 浇注 PBX 炸药的力学行为主要表现为黏结剂的变形和损伤, 未发现炸药穿晶断裂、粉碎等变化。

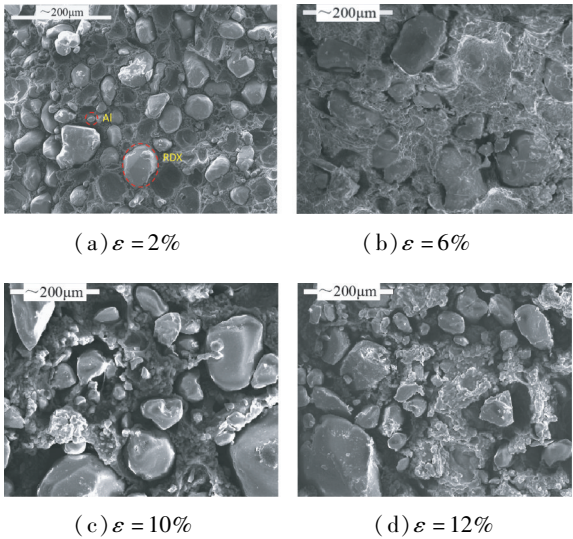


图4 不同应变下 PBX-1 炸药的 SEM 图(200 ×)
Fig.4 SEM of PBX-1 under different strains (200 ×)

2.4 PBX-1 炸药的力学行为分析

从炸药损伤前的真应力-应变曲线(图 1, 曲线 1[#]) 可以看出, 在准静态压缩条件下, 未损伤 PBX-1 炸药在小应力(<0.05 MPa) 下存在一个低模量的线性阶段。根据文献[12] 报道, 在如此小的应力下

不可能发生聚合物断裂、沿晶断裂、穿晶断裂和塑性变形。与单一聚合物和其他聚合物基复合材料不同, PBX-1 炸药是一种带有预损伤的复合材料, 压缩过程中填料与黏结剂之间丰富的界面层贡献给压缩应变的压缩量远远高于其他材料。在应变较小时, 界面压缩是浇注 PBX 炸药的主要卸载方式。结合准静态压缩条件下的残余应变和密度变化分析, 屈服应变并不能表达炸药的损伤过程, PBX-1 炸药在屈服应变之前已经发生明显的损伤, 因此存在一个损伤临界点, 临界点的应力和应变假定为损伤强度 σ_c 和损伤应变 ε_c , 屈服过程如图 5 所示。

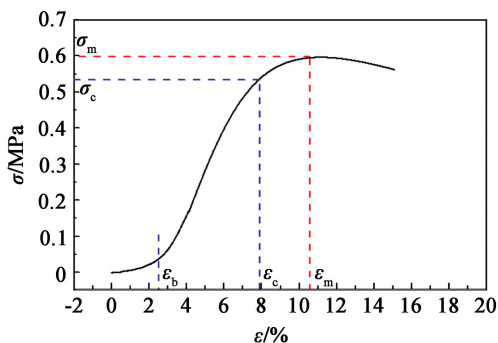


图 5 PBX-1 炸药的屈服过程

Fig. 5 Yield procedure of explosive PBX-1

如图 5 推理, PBX-1 炸药的准静态压缩过程分为 4 个阶段: 接触压缩阶段 ($0 < \varepsilon < \varepsilon_b$)、弹性压缩阶段 ($\varepsilon_b \leq \varepsilon < \varepsilon_c$)、损伤阶段 ($\varepsilon_c \leq \varepsilon < \varepsilon_m$) 和应变软化阶段 ($\varepsilon \geq \varepsilon_m$)。在接触压缩阶段, 炸药受到的压缩载荷较小, 炸药界面被压缩成密实状态。随着应力增大, 炸药中的弹性体被压缩, 聚合物组分以弹性变形作为主导因素; 当载荷卸去时, 弹性体的弹性变形恢复, 由于界面压缩的滞后性和聚合物的蠕变, 原有的颗粒间隙减小, 导致炸药密度增高、刚度增大, 在下一次的压缩过程中表现为刚度强化的特点。当炸药压缩应变大于损伤应变 ε_c 时, 炸药中的黏结剂发生损伤破坏, 逐渐失去对炸药的保护作用; 但是由于炸药中的 RDX、铝颗粒堆积, 导致炸药的真应力-应变曲线继续上升, 表现为屈服点前、后的屈服阶段和应变软化阶段。

基于上述分析可知, 浇注炸药在压缩应变大于损伤应变 ε_c 时, 炸药已经发生损伤。根据 PBX-1 炸药在不同压缩应变下的力学性能参数和残余变形曲线变化趋势, 以及扫描电镜图的对比, 可以得出 PBX-1 炸药的损伤应变为 8%。在材料应用或者数值模拟计算时, 参考损伤强度 σ_c 和损伤应变 ε_c 进行强度校核, 并赋予一定的安全余量, 其真实性 and 可行性更优于屈服应力和屈服应变。

3 结论

1) 测试了典型浇注 PBX 炸药 PBX-1 在准静态压缩损伤前、后的真应力-应变曲线。PBX-1 炸药的真应力-应变曲线表现出显著的非线性。当应变小于 8% 时, 炸药的屈服强度和屈服应变没有发生显著改变; 在压应变大于 10% 后, 炸药损伤导致应变软化, 失去弹性的自持性, 表现出聚合物黏性特征。PBX-1 炸药的屈服强度 σ_m 为 0.6 MPa, 屈服应变 ε_m 为 10.6%。

2) PBX-1 炸药在准静态压缩条件下的力学行为分为接触压缩、弹性变形、损伤破坏和应变软化 4 个过程。在压缩应变小于损伤应变时, 浇注炸药主要以弹性变形为主; 在压缩应变超过损伤应变后, 炸药中黏结剂断裂, 发生塑性变形。

3) PBX-1 炸药在较小压缩应变下无明显损伤, 颗粒之间通过黏结剂密实填充; 在压缩应变超过损伤应变后, 密度降低, 残余应变增大。PBX-1 炸药的损伤应变为 8%。

参 考 文 献

- [1] ELLIS K, LEPPARD C, RADESK H. Mechanical properties and damage evaluation of a UK PBX[J]. Journal of Materials Science, 2005, 40(9): 6241-6248.
- [2] 唐明峰, 庞海燕, 蓝林钢, 等. RDX 基 PBX 的本构行为与应变历史、应变率效应[J]. 含能材料, 2016, 24(9): 832-837.
TANG M F, PANG H Y, LAN L G, et al. Constitutive behavior of RDX-based PBX with loading-history and loading-rate effects [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2016, 24(9): 832-837.
- [3] 陈鹏万, 黄风雷, 张瑜, 等. 用巴西试验评价炸药的力学性能[J]. 兵工学报, 2001, 22(4): 533-537.
CHEN P W, HUANG F L, ZHANG Y, et al. Brazilian test and its application in the study of the mechanical properties of explosives [J]. Acta Armamentarii, 2001, 22(4): 533-537.
- [4] 李媛媛, 高立龙. 国外高聚物粘结炸药在中口径炮弹中的应用[J]. 飞航导弹, 2016(2): 80-83.
LI Y Y, GAO L L. Application of polymer bonded explosives in large diameter shells abroad [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2016(2): 80-83.
- [5] 席鹏, 南海. 串联侵彻战斗部装药技术特点及发展趋势[J]. 飞航导弹, 2014(6): 87-89.

- [illegible]