

doi: 10.7690/bgzd.2025.12.005

温度环境对压装与熔铸炸药力学性能的影响

李庆春¹, 吴欣欣², 刘攀², 江涛², 肖伟²

(1. 中国人民解放军海军装备部, 北京 100071; 2. 重庆红宇精密工业集团有限公司研究二所, 重庆 402760)

摘要: 通过准静态、动态力学试验装置分别对压装和熔铸 2 种炸药在不同温度环境 (-30 °C、20 °C 和 50 °C) 中的力学性能开展研究, 得到 2 种炸药在不同温度环境下的应力-应变曲线及力学性能特性。在相同温度条件下, 压装、熔铸炸药的屈服强度和弹性模量均随着加载应变率的增加而增大, 具有应变率增强效应。在不同温度条件下, 随着温度增大, 压装、熔铸炸药的屈服强度和弹性模量均快速降低。结果表明, 该研究能为装药力学性能设计提供理论参考。

关键词: 准静态力学; 动态力学; 应变率; 压装炸药; 熔铸炸药

中图分类号: TJ55; O38 **文献标志码:** A

Influence of Temperature Environment on Mechanical Properties of Pressed and Fused Explosives

Li Qingchun¹, Wu Xinxin², Liu Pan², Jiang Tao², Xiao Wei²

(1. Armaments Department of Navy, Beijing 100071, China;

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

Abstract: The mechanical properties of two types of explosives, press fit and melt cast, were studied at different temperature environments (-30 °C, 20 °C, and 50 °C) using quasi-static and dynamic mechanical testing devices. The stress-strain curves and mechanical performance characteristics of the two explosives at different temperature environments were obtained. Under the same temperature conditions, the yield strength and elastic modulus of press fit and melt cast explosives increase with the increase of loading strain rate, exhibiting a strain rate enhancement effect. Under different temperature conditions, as the temperature increases, the yield strength and elastic modulus of press fit and melt cast explosives both rapidly decrease. The results show that this study can provide theoretical reference for the design of mechanical properties of charges.

Keywords: quasi-static mechanics; dynamic mechanics; strain rate; pressed explosive; fused explosive

0 引言

弹药在侵彻过程中要承受数万个地球重力加速度的过载。石啸海等^[1]用内聚力裂纹模型计算了侵彻过程中装药的过载情况、裂纹状态、轴向压缩和头部应力曲线。试验弹内部装药在侵彻期间, 头部装药首先破裂, 然后装药的破裂区域开始沿着轴从头部向尾部扩展。最后在内部装药的顶部、中间和尾部形成径向的裂纹区间。在高过载条件下, 装药尾部反射的拉伸波向头部传播, 将与装药头部传来的压缩应力波相互作用, 并如此往复。炸药装药在压缩-拉伸等高过载条件下的循环往复运动下, 将可能发生压缩或拉伸破坏^[2]; 因此, 炸药在高过载条件下的压缩应变性能是评价这类炸药综合性能的关键。

Goudrean^[3]采用霍普金森压杆 (SHPB) 试验装

置研究了应变率为 $10^3 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ 的浇注 PBX 炸药的动态压缩和拉伸力学性能。Gray 等^[4]采用动态和静态试验对 3 种 PBX 炸药进行了不同应变率 $0.001 \sim 2800 \text{ s}^{-1}$ 的高、低温 (-55 °C ~ 55 °C) 试验, 通过 SEM 分析了试验后回收的样品的断面形态; 加载应变率和加载温度对 3 种材料的压应力-应变曲线具有显著的影响。Chen 等^[5]采用动态力学试验和高速摄影方法, 研究了含铝炸药的断裂力学性能, 炸药的断裂参数主要分为粗糙度、传播韧性、裂纹传播速度和表面能。炸药的动态断裂应变率与炸药的初始密度呈正相关。李俊玲等^[6]采用巴西拉伸试验研究了不同粒径炸药在拉伸加载条件下的损伤情况, 在拉伸作用下粗颗粒炸药更加容易产生晶体断裂, 而细颗粒炸药更容易产生晶体与界面的脱粘; 在拉伸作用下, 炸药内部晶体颗粒的断裂是导致装药力学性能降低的重要原因。李明等^[7]在基于 TATB 的 PBX

收稿日期: 2024-10-16; 修回日期: 2024-11-16

第一作者: 李庆春 (1995—), 男, 北京人。

炸药上进行 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的压缩蠕变试验, PBX 炸药的力学性能受温度的影响很大; 采用 WLF 方程对试验数据进行了拟合, 得到了炸药力学性能随温度的变化关系。

上述多是针对 PBX 炸药开展力学性能研究, 在压装炸药与熔铸炸药方面的可参考文献有限。因此, 笔者通过准静态、动态力学试验装置分别对压装和熔铸 2 种炸药在不同温度环境 ($-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$) 中的力学性能开展研究, 获取 2 种炸药在不同温度环境下的应力-应变曲线, 为装药力学本构参数的确定与应力仿真计算提供支撑。

1 试验方法与样品

1.1 试验方法

1.1.1 准静态试验

笔者采用由美国生产的 INSTRON5900 型万能材料试验机对炸药开展准静态试验, 试验机如图 1 所示。万能材料试验机的最大载荷为 5 kN , 加载速度范围为 $0.001\sim 3\text{ }000\text{ mm/min}$, 返回速度为 $3\text{ }200\text{ mm/min}$, 垂直试验空间为 $1\text{ }256\text{ mm}$ 。试验机具有与其配套的 BLUEHIL 数据处理软件, 可精确控制试验机的加载速度, 能够分别记录压力传感器、引伸计采集到的加载压力和位移, 并通过显示设备观测到应力-位移曲线。

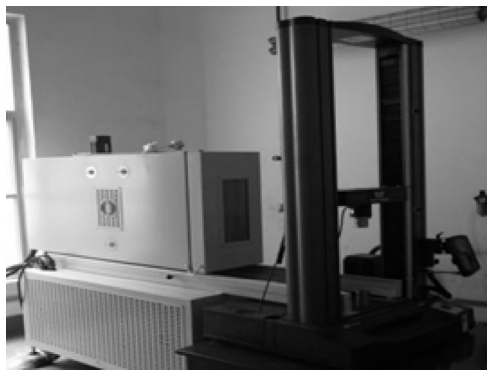


图 1 万能材料试验机

1.1.2 动态试验

SHPB 对试样加载时, 加载应变率一般在 $10^2\sim 10^4\text{ s}^{-1}$ 之间, 与装药在侵彻混凝土过程中的应变率相接近, 是研究炸药装药在力学响应的重要试验方法。笔者采用霍普金森压杆对炸药开展动态试验, 试验装置如图 2 所示。霍普金森压杆装置可以分为 3 部分: 压杆系统 (包含撞击杆、入射杆、透射杆和阻尼杆)、测量系统 (红外测速、应变测速) 及其数据处理系统。SHPB 试验最大加载应变率为 $4\text{ }000\text{ s}^{-1}$,

激光测速装置的精度为 $0.1\text{ }\mu\text{s}$ 。应变片为电阻应变片, 试验前采用胶水将应变片紧密粘贴到入射杆和透射杆相应的位置, 确保应变片能够有效采集压杆系统在试验过程中的应力应变响应数据。



图 2 Hopkinson 压杆试验装置

在试验过程中, 将撞击杆插入压缩空气枪中, 设定压缩空气输出压力, 在压缩空气的驱动下, 子弹以一定的速度沿着炮膛撞击入射杆, 使压缩应力波在杆内传播。通过控制压缩空气的压力, 可以控制子弹的速度, 使得输入杆和输出杆仅弹性变形, 并且杆中的应力波在一个维度上传播。当应力波到达样品时, 在入射杆和样品之间的界面处, 部分应力波被反射回输入杆, 部分应力波被传递到样品。然后, 应力波在样品和传动杆之间的界面处被反射并再次传播。当应力波的脉冲宽度远大于波通过样品所需的时间时, 认为样品在加载期间处于均匀变形和应力平衡的状态。

由于炸药密度较低, 与金属材料相比阻抗较低, 透射信号较弱, 笔者采用简化的“三波法”来计算炸药的应变与应力。炸药的应变率、应变及应力计算公式为:

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{C_0}{l_s} (\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t); \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{C_0}{l_s} \int_0^t (\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t) dt; \quad (2)$$

$$\sigma = E(A/A_s)\varepsilon_t. \quad (3)$$

式中: l_s 为实样的初始长度; C_0 为杆中弹性波波速; E 为试验杆的弹性模量; A 、 A_s 分别为试样和试验杆的横截面积; ε_i 、 ε_r 、 ε_t 分别为入射、反射和透射应变。

1.2 试验样品

采用 SHPB 动态测试材料的应力-应变曲线时, 由于未径向约束, 试验件在轴向压缩过程中, 存在径向拉伸作用, 为了尽可能地消除径向拉伸作用对应力-应变曲线的影响, 试验件的长度 L 与直径 D 的比值越小越好。此外, 考虑到准静态压缩过程可能存在的失稳现象, 以及熔铸炸药的最大抗压强度 (可达 40 MPa), 将试验样品的尺寸设置为 $\Phi 10\times$

5 mm。压装及熔铸炸药试验样品如图 3 所示。压装试样为 HMX 基含铝炸药, 熔铸试样为 DNAN 基含铝炸药。试验过程中保持压装及熔铸 2 种炸药的尺寸一致, 并且控制温度环境分别为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

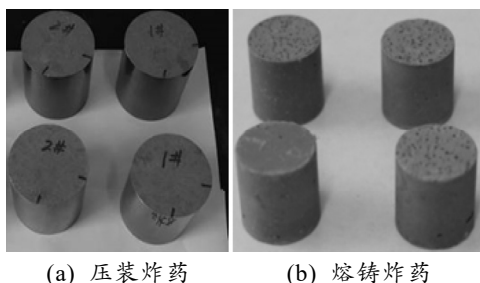


图 3 压装及熔铸炸药试验样品

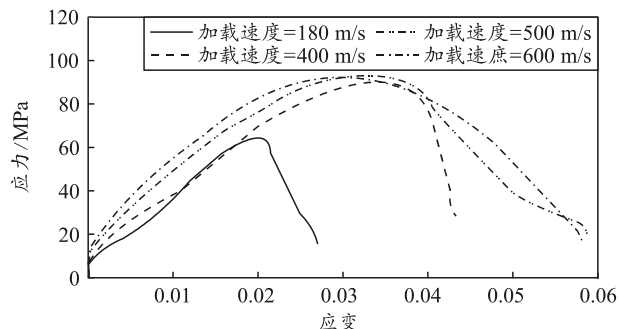
DNAN 基熔铸炸药为准脆性材料, 在动态条件下的失效应变小于 2%, 药柱端面平行度的微小变化就会引起测试过程的应力集中, 导致药柱在测试过程中发生提前破裂, 使得应力均匀性假设不成立; 因此, 在药柱加工过程中, 需保证药柱端面的粗糙度小于 1.6, 两端面的平行度小于 0.01 mm 。在试验过程中, 压杆与试验件端面的摩擦作用会导致试验件产生剪切应力, 使得试验测试应力偏高, 所以在试验过程中, 在压杆与试验件端面涂抹一层凡士林润滑剂, 降低撞击过程中试验件端面与压杆端面的摩擦效应。

笔者采用万能材料试验机对炸药开展准静态试验, 其加载应变率均设置为 10^{-2} 、 10^{-3} 和 10^{-4} s^{-1} 。针对炸药试样开展的动态试验, 将其加载速度控制在 $180\sim 750\text{ m/s}$ 范围内, 以获得炸药应力与应变之间的关联关系及作用规律。

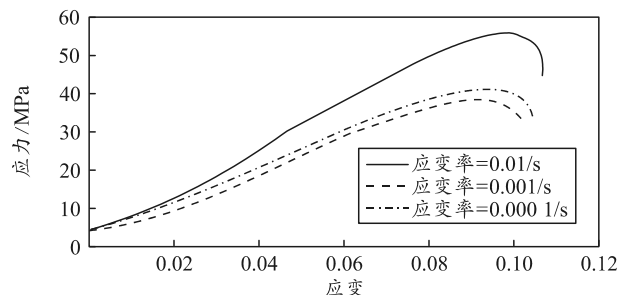
2 结果与分析

2.1 压装炸药

压装炸药试样在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下的加载速度分别为 180 、 400 、 500 和 600 m/s , 其应力-应变曲线如图 4 所示。



(a) 不同加载速度条件下的应力

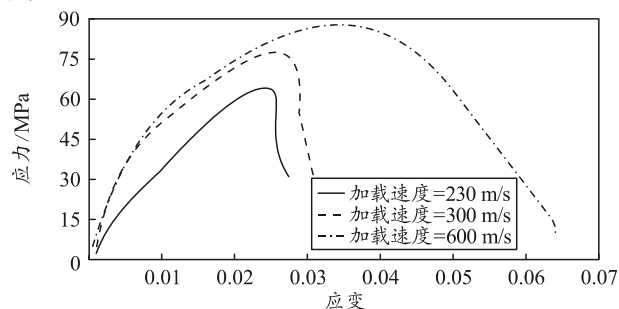


(b) 不同应变率条件下的应力

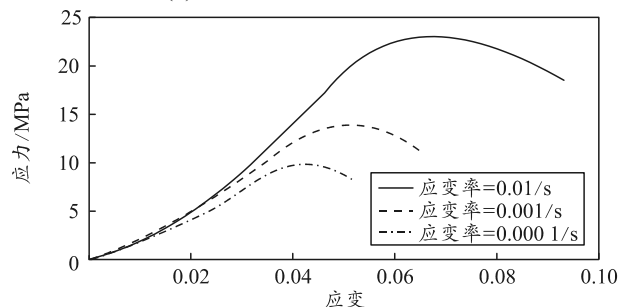
图 4 压装炸药在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下的应力-应变曲线

从图 4 可以看出: 随着加载速度的增大, 炸药试样所能承受的抗压强度呈现逐渐增大的趋势, 特别是将加载速度从 180 提升至 400 m/s 后, 应力值达到 85 MPa ; 之后, 继续增大加载速度, 应力增大的趋势不再显著。结果表明: 在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下, 压装炸药随着应变率从 10^{-4} 提高至 10^{-2} s^{-1} , 其弹性模量和强度均增大。

压装炸药试样在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下的加载速度分别为 230 、 300 和 600 m/s , 其应力-应变曲线如图 5 所示。



(a) 不同加载速度条件下的应力



(b) 不同应变率条件下的应力

图 5 压装炸药在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下的应力-应变曲线

从图 5 可以看出: 随着加载速度的增大, 试样的最大应力值从 60 提高至 90 MPa , 效果显著。应变率的增大, 也是出现试样应力迅速增大的现象。结果表明, 随着加载速度和应变率的增大, 试样在压缩条件下的损伤模式发生了转变, 改变了药柱内部的受力环境及力学状态分布, 从而进一步提高了炸药的弹性模量和抗压强度。

压装炸药试样在 50 °C 条件下的加载速度分别为 450、600 和 650 m/s, 其应力-应变曲线如图 6 所示。

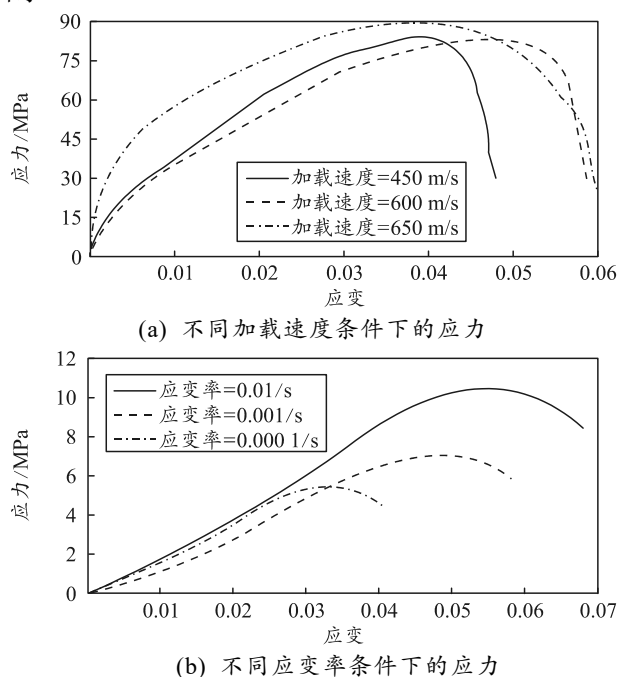


图 6 压装炸药在 50 °C 条件下的应力-应变曲线

从图 6 可以看出: 在 50 °C 高温环境中, 药柱所受应力随加载速度的增大变化不明显, 总体上是缓慢增大的趋势。并且, 炸药试样随着加载应变率的增加, 其弹性模量和强度均增大。结果表明, 高温环境能够影响压装炸药内部的裂纹分布状态, 可能与粘结剂受热膨胀有关, 从而在一定程度上微弱地提高了炸药受强冲击时的强度。

结合图 4—6 中的应力-应变曲线中还可以看出: 随着环境温度从 -30 °C 增大至 50 °C, 压装炸药试样在同一加载速度(如 600 m/s)条件下所受到的应力持续降低, 即环境温度的增大会导致炸药的抗压强度降低。同时, 在同一加载应变率(如 10^{-2} s^{-1})条件下, 炸药试样能够承受的最大应力呈现显著减小的趋势, 且其发生的形变也随之减小。结果表明, 压装炸药随着温度的增大, 其强度和弹性模量均降低。

由于压装炸药粘结剂包覆不全、颗粒含量很高、颗粒间的接触效应引起应力集中等原因, 导致炸药压制过程中产生塑性变形、颗粒断裂等不利现象, 产生了初始损伤。在受到外界应力加载时, 压装炸药中会出现更多的颗粒结构损伤, 使得初始微裂纹沿颗粒边界继续扩展, 导致炸药结构进一步被破坏, 强度降低。特别是随着环境温度的升高, 炸药

颗粒在应力作用下会出现界面脱粘、粘结剂开裂等现象, 成为炸药被破坏的主要模式^[8]。在更高的应变率条件下, 炸药还会发生穿晶断裂, 导致炸药的强度和弹性模量显著降低。

2.2 熔铸炸药

熔铸炸药试样在 -30 °C 条件下的加载速度分别为 370 和 450 m/s, 其应力-应变曲线如图 7 所示。

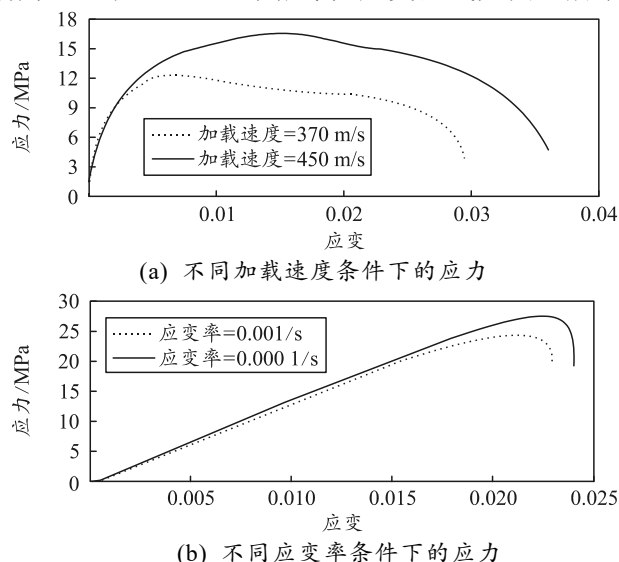


图 7 熔铸炸药在 -30 °C 条件下的应力-应变曲线

从图 7 可以看出: 由于加载速度的增大, 减少了药柱内缺陷的延展时间, 从而提高了炸药的屈服应力。在 10^{-2} 和 10^{-4} s^{-1} 2 种准静态加载条件下的结果也表明, 熔铸炸药的弹性模量与屈服应力均随着加载应变率的增大而降低。

熔铸炸药试样在 20 °C 条件下的加载速度分别为 240 和 750 m/s, 其应力-应变曲线如图 8 所示。

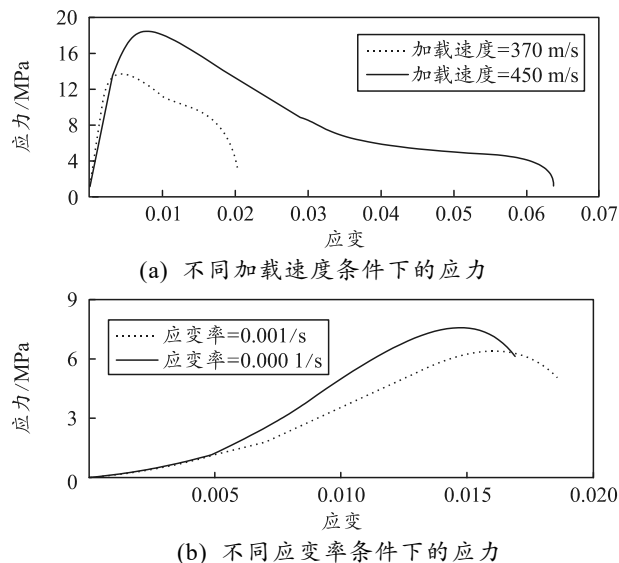
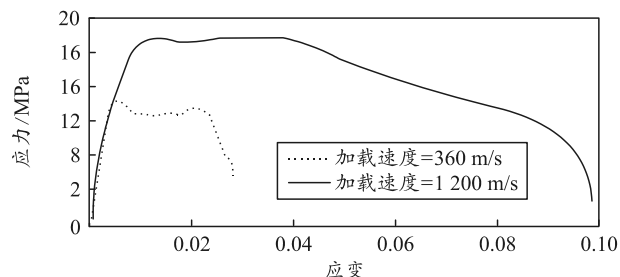


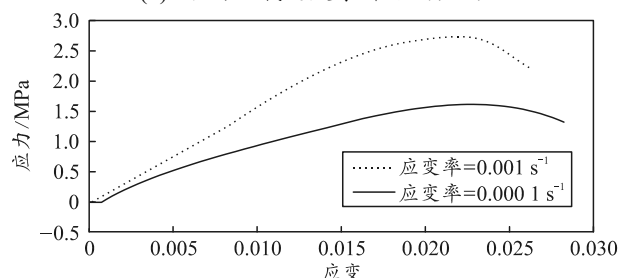
图 8 熔铸炸药在 20 °C 条件下的应力-应变曲线

从图 8 可以看出: 动态加载试验过程中, 随着加载速度的快速增大, 试样的屈服应力提高了近 30%, 且其被破坏的时间也延长了, 表明高速加载条件对熔铸炸药强度的影响至关重要。从准静态的应力-应变曲线也可看出: 在 20 °C 条件下, 熔铸炸药随着加载应变率的增加, 其强度和模量均呈现减小的趋势。

熔铸炸药试样在 50 °C 条件下的加载速度分别为 360 和 1 200 m/s, 其应力-应变曲线如图 9 所示。



(a) 不同加载速度条件下的应力



(b) 不同应变率条件下的应力

图 9 熔铸炸药在 50 °C 条件下的应力-应变曲线

从图 9 可以看出: 在加载速度增大近 4 倍时, 试样药柱的屈服应力提高了约 55%, 且其被破坏时间显著延长。此外, 准静态的应力-应变曲线结果表明在 50 °C 条件下, 熔铸炸药随着加载应变率的增加, 其强度降低。

结合图 7—9 中的应力-应变曲线中还可以看出: 随着环境温度的增大, 熔铸炸药在同一加载速度下的屈服应力逐渐减小, 即药柱的强度降低。DNAN 基熔铸炸药在熔铸成形的过程中不可避免地会产生缺陷, 如裂纹、缩孔等。当外界应力对炸药进行加载时, 炸药内部缺陷将发生变形, 特别是持续加载的过程中, 炸药由可逆的弹性变形转变为不可逆的塑性变形, 该过程炸药从损伤累积发展成严重损伤甚至破坏, 导致炸药的力学性能快速降低。

DNAN 基熔铸炸药是应变率相关材料, 在动态高加载速度及应变率条件下, 由于缺乏裂纹扩展与相互作用时间, 炸药表现出承受更高压应力的能力,

因此其失效力更高^[9]。此外, 高温条件导致熔铸炸药内部出现部分熔化及软化现象, 其强度和弹性模量显著降低。在软化的炸药受到外界应力加载时, 微裂纹和宏观裂纹不断扩展, 损伤速度快速增大, 直至炸药被破坏。

3 结束语

笔者通过对压装和熔铸 2 种炸药动、静态力学性能开展研究, 获得以下结论:

1) 在相同温度条件下, 压装炸药和熔铸炸药随着加载应变率的增加, 其屈服强度和弹性模量均呈现增大的趋势; 并且 2 种炸药均具有显著的应变率增强效应, 表明高加载速度及应变率能够在一定程度上提高炸药的失效力。

2) 在不同温度条件下, 随着环境温度从 -30 °C 增大至 50 °C, 压装炸药和熔铸炸药由于结构损伤、微裂纹扩展等原因导致其屈服强度和弹性模量快速降低, 表明炸药的力学性能与环境温度密切相关。

参考文献:

- [1] 石嘴海, 戴开达, 陈鹏万, 等. 战斗部侵彻过程中 PBX 装药动态损伤数值模拟[J]. 中国测试, 2016, 42(10): 138-142.
- [2] GUIRGUIS R H. Ignition due to macroscopic shear[C]. Proceedings of the Shock Compression of Condensed Matter-1999. Snowbird, Utah, 1999: 647-650.
- [3] GOUDREAN G. Evaluation of Mechanical Properties of PBXW-113 Explosive[R]. UCID-20358, 1985.
- [4] GRAY III G T, IDAR D J, BLUMENTHAL W R, et al. High- and Low-strain Rate Compression Properties of Several Energetic Material Composites as a Function of Strain Rate and Temperature[C]. Proceedings of the 11th International Detonation Symposium. Snowmass, Colorado, 1998: 76-84.
- [5] CHEN R, XIA K, DAI F, et al. Determination of Dynamic Fracture Parameters Using a Semi-circular Bend Technique in Split Hopkinson Pressure Bar Testing[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76(9): 1268-1276.
- [6] 李俊玲, 傅华, 谭多望, 等. PBX 炸药的拉伸断裂损伤分析[J]. 爆炸与冲击, 2012, 31(6): 624-629.
- [7] 李明, 温茂萍, 何强, 等. TATB 基高聚物粘结炸药的蠕变特性研究[J]. 含能材料, 2005, 13(3): 150-154.
- [8] 陈鹏万, 丁雁生, 陈力. 含能材料装药的损伤及力学性能研究进展[J]. 力学进展, 2002, 32(2): 212-222.
- [9] 张思危, 崔庆忠. DNAN 基高固含量熔铸炸药力学性能研究[J]. 兵工自动化, 2022, 41(12): 100-113.