

文章编号:1006-9941(2019)10-0824-06

SHPB 实验加载方式对 PBX 炸药力学响应的影响研究

李俊玲^{1,3},王 硕²,傅 华³,谭多望³,卢芳云²

(1. 中国空气动力研究与发展中心超高速碰撞研究中心, 四川 绵阳 621000; 2. 国防科技大学文理学院, 湖南 长沙 410072; 3. 中国工程物理研究院冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 高聚物粘结剂炸药(PBX)炸药的损伤本构关系是炸药安全性研究的重要基础课题之一。研究 PBX 炸药的损伤本构关系需要建立在准确获取和认识 PBX 炸药的动态力学响应基础之上。为此,针对某 PBX 炸药的 SHPB 实验,详细探讨加载方式的细节设计对 PBX 炸药力学响应的影响。通过采用不同应变加速度、不同加载脉宽以及重复加载等方法,分析了不同加载条件对 PBX 炸药力学响应的影响,并获得了一系列不同加载脉宽、不同加载应变率的应力应变曲线。采用扫描电镜观察回收试样最终损伤形态,分析了 PBX 炸药动态单轴压缩下的损伤发展过程及其在应力应变关系上的表现。结果表明:应变加速度过大仍会对 PBX 炸药形成一定的冲击加载,造成额外损伤;经历动态单轴压缩后破坏的试样表现为晶体多次穿晶断裂甚至碎裂;典型 PBX 炸药的损伤本构关系可从微裂纹的产生、稳定扩展,穿越晶界失稳扩展来描述。

关键词: 固体力学;高聚物粘结剂炸药(PBX);霍普金森压杆(SHPB);损伤

中图分类号: TJ55;O341

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2019154

1 引言

炸药在服役前的运输和储存等过程中常常遭受不可忽略的力学刺激,这可能会影响炸药的爆轰性能,从而影响武器的最终作战效能,因而研究炸药的动态力学性能尤其是损伤发展备受关注。近年来,不少学者致力于 PBX 炸药力学性能的研究^[1-5],尤其是本构模型的建立。建立可靠的本构模型需要大量的实验数据支持,那么实验数据的准确性就显得尤为重要。分离式霍普金森压杆(SHPB)实验是研究材料在应变率 $10^2 \sim 10^4$ 范围内力学性能的常用方法,但其实验标准一直是该设备难以跨越的难关。如今基于 SHPB 设备发展了多种多样的力学测试手段,都必须保证其为准静态加载^[6],充分考虑影响结果的细节设计^[7-8]。特别是将其

用于测试 PBX 炸药等强度低的脆性材料时,更需要对实验进行特别的考虑,才能保证测试数据的准确性。

就 PBX 炸药的 SHPB 试验而言,除了采用必要的防护措施(试样外罩一个保护盒)外,大家主要关注两个方面的问题。第一,PBX 炸药的 SHPB 试验加载强度较低,应变片信号比较弱的问题。常用的方法有采用铝杆、空心杆^[9]或者粘弹性杆^[10]等降低杆的波阻抗以增加杆的应变;采用压电石英晶体测试方法^[11-12]直接获取试样两侧应力信号提高灵敏度;或者采用半导体应变仪^[13]同时将入射、反射和透射信号放大,等等。第二,PBX 炸药内有孔隙,试样内部应力和应变在短时间内不易达到均匀状态,因此,需要确保试样受载过程中的应力平衡。常规的方法是采用入射波整形器技术^[14]延缓上升前沿,同时实现常应变率加载,还可以大大减小横向惯性效应对测试的影响。

然而,要想获取规律可循且能精确反应损伤发展的应力应变曲线,还需考虑以下几个细节设计问题:在低加载条件下,加载方式是否会对试样造成额外损伤;不同加载脉宽是否会影响材料的应力应变响应;同一试样重复加载后其力学响应的变化规律。为此,本研究采用不同整形器、不同加载脉宽和相同脉宽重复加

收稿日期:2019-05-30;修回日期:2019-08-18

网络出版日期:2019-09-06

基金项目:国家自然科学基金资助(11672328)

作者简介:李俊玲(1984-),女,助理研究员,主要从事材料动态力学性能研究。e-mail:jl_lee@nudt.edu.cn

通信联系人:李俊玲(1984-),女,助理研究员,主要从事材料动态力学性能研究。e-mail:jl_lee@nudt.edu.cn

引用本文:李俊玲,王硕,傅华,等. SHPB 实验加载方式对 PBX 炸药力学响应的影响研究[J]. 含能材料,2019,27(10):824-829.

LI Jun-ling, WANG Shuo, FU Hua, et al. Investigation into the Influences of SHPB Loading Ways on the Mechanical Response of PBX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(10):824-829.

载等加载方法对某 PBX 炸药进行一系列的实验研究,分析不同加载方式对损伤及应力应变响应的影响;结合回收试样的损伤观测,总结 PBX 炸药的动态单轴加载条件下的损伤发展规律。期望通过上述工作,建立针对 PBX 炸药更完善的 SHPB 实验方法,获取准确的应力应变响应,为后续的 PBX 炸药含损伤本构关系研究奠定基础。

2 不同应变加速度对试样损伤的影响

对 PBX 炸药的 SHPB 实验,首先需要弄清楚应变加速度过大是否会使强度较低的 PBX 炸药提前发生破坏。因此,需要研究不同应变加速度对试样损伤的影响,这可通过入射波整形技术来实现。整形器的材料一般选塑性较好的已知材料,通过它们的塑性变形来有效延伸上升前沿,避免冲击加载,确保实验中试样达到变形均匀和应力平衡的要求。合理的整形器设计可方便地实现常应变率加载。橡皮作为整形器虽然能有效减小应变加速度,避免冲击加载,但对加载应变率及加载应变率历史可控性较差,即使是加工成型的橡皮整形器也很难控制每次加载的应变率精确一致。黄铜,作为典型的弹塑性材料,是目前金属 SHPB 实验中广为采用的一种整形器。通过所用黄铜的面积和体积能估算出入射波形,甚至加载应变率。因此,本文采用黄铜整形器与橡皮整形器一起比较。

将加载应变率同是 200 s^{-1} 的两发实验结果进行比较,两种整形器都很好地保证试样两端应力平衡。从图 1 中两发实验的反射波波形可以看出,橡皮作为整形器时,应变加速度较小,达到常应变率平台 200 s^{-1} 的时刻比黄铜整形器延迟了 $62 \mu\text{s}$ 左右。此时测得的该 PBX 炸药强度比采用黄铜时要大 8 MPa 左右,但破坏应变仅大 0.05% 。这个强度的差异完全可以与变化加载应变率所带来的变化量相比拟,不可忽略,需要弄清楚该差异产生的原因。橡皮能大大降低应变加速度,使得在应力明显上升之前试样前后两端能达到充分的平衡,其内部损伤的产生可认为是完全由应力加载所致。采用黄铜整形时试样应变加速度得到一定程度的减缓,但也许还存在一定的冲击加载,对试样造成额外的加载损伤。

为解决上述疑惑,采用高速摄影观察两种整形器下试样的破坏状态(图 2 和图 3)。虽然使用两种整形器加载试样均发生轴向劈裂破坏,但仔细观察后,可发现橡皮作为整形器时损伤发展更为缓慢。加载 $200 \mu\text{s}$

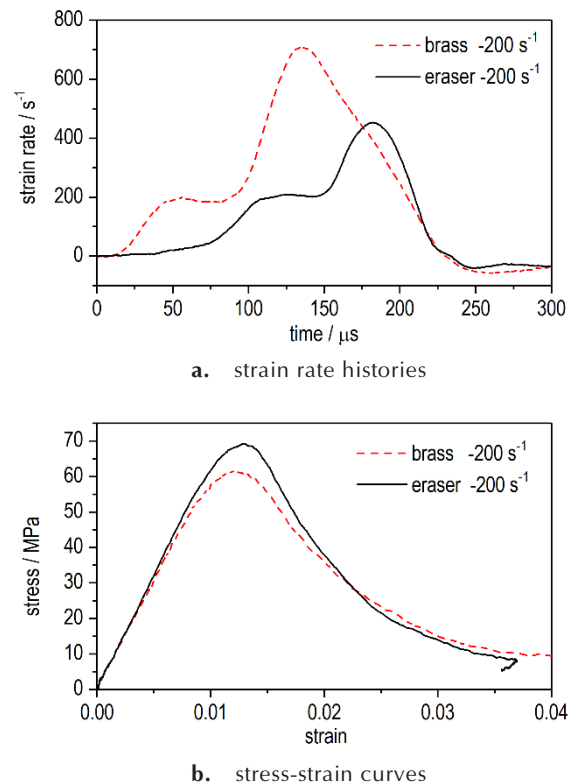


图 1 黄铜整形器与橡皮整形器的比较

Fig. 1 The comparison of the brass shaper and the eraser shaper

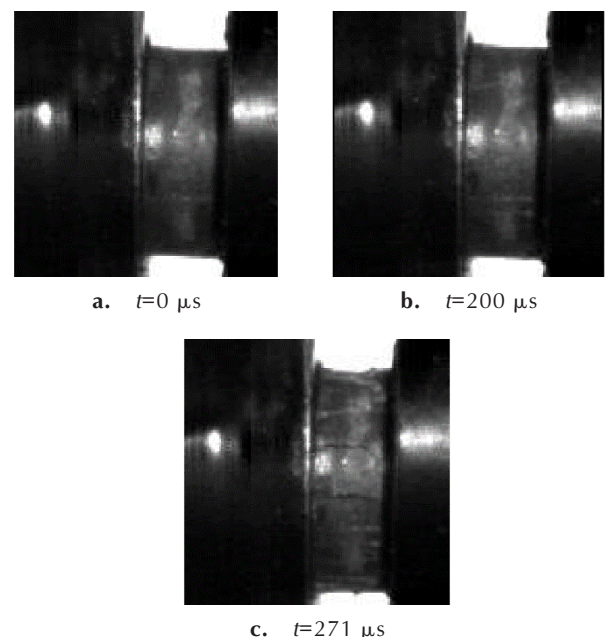


图 2 橡皮作为整形器时试样的破坏过程

Fig. 2 The damage evolution of specimen by use of eraser shaper

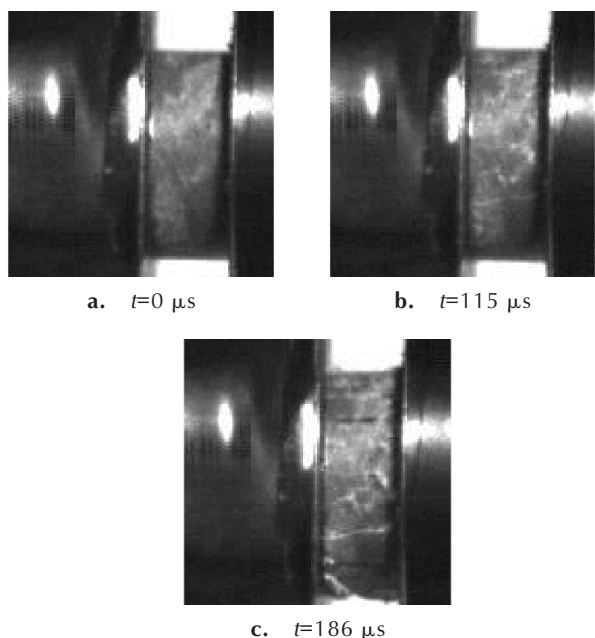


图3 黄铜作为整形器时试样的破坏过程

Fig. 3 The damage evolution of specimen by use of brass shaper

左右,才有两条裂纹隐约浮现(图2中红圈所示),271 μs 时试样最终发生典型劈裂,裂纹在柱面上几近平行地排列。当黄铜作为整形器时,试样破坏相对更剧烈迅猛。115 μs 时圆柱试样侧面就出现裂纹,并且是多条裂纹同时出现并贯穿整个试样,入射加载端还出现明显的弯折裂纹(图3b中红圈所示)。因此,可以认为对PBX炸药试样,采用黄铜整形后应变加速度依然过大,试样内部产生损伤要相对较早较多,使得应力应变曲线的上升斜率较缓,测得的模量和强度都偏低。像PBX炸药这类脆性材料,控制其破坏的力学参量可能是应变,而非应力,所以两种应变加速度加载条件下破坏应变几乎不发生变化,这在后面的实验结果中也会有所体现。这种力学性能的差异可能跟这一类PBX炸药晶体颗粒的力学脆性有关。反过来也说明试样内部应力及强度响应与加载历史很有关系,对动态加载,只选择应变率平台作为参照不够准确。为避免应变加速度过大对试样造成额外的损伤,后面的实验均采用橡皮整形器。

3 相同脉宽重复加载与不同脉宽加载对试样损伤发展的影响

要研究相同脉宽重复加载和不同加载脉宽对试样力学性能的影响,都需要采用单脉冲加载技术保证单次实验试样仅受一次加载。典型的单脉冲加载信号如

图4所示。Ch2为入射杆记录的应变信号,Ch3为石英压电晶体片测得透射杆端的应力信号,Ch4为透射杆记录的应变信号。可见,反射波后紧跟一个反射波,带动入射杆远离试样,使得后续的压缩波不会对试样产生压缩作用。

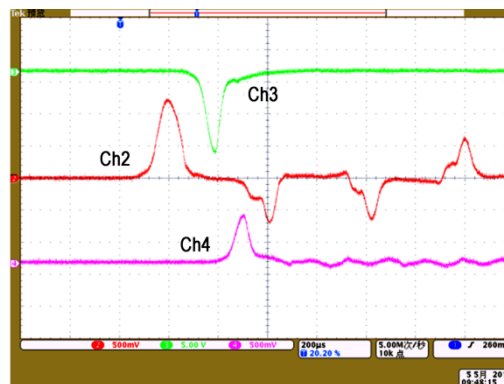


图4 单脉冲加载时的原始记录波形

Fig.4 The original signal of single-pulse loading

图5给出试样被长度分别为100 mm和200 mm的子弹多次加载后的应力应变曲线。当初次加载较小时,试样内部应该没有损伤产生,第二次加载时应力应变曲线的上升沿几乎没发生变化(见图5a)。子弹长度为100 mm时加载脉宽短,需要较高的应变率加载(380 s^{-1})来使试样产生足够的变形以达到临界破坏值。子弹长度为200 mm时,初次加载的应变率为 90 s^{-1} ,试样内部没有损伤产生,因而二次加载时应力应变曲线上上升沿也几乎无变化。二次加载应变率上升到 130 s^{-1} ,应力达到60 MPa后,曲线出现了一点弧度,卸载路径与加载路径差异更明显,这说明此时试样内部出现不可恢复的损伤。第三次加载时,试样的应力应变曲线上上升速率变缓,损伤后试样的模量有所降低,最终破坏强度仅为63 MPa。值得注意的是此时试样的加载应变率仅为 160 s^{-1} ,破坏应变也有所减小(见图5b)。由此可见,材料重复受载后可能会因其新生损伤而改变应力应变响应,在对其损伤本构关系描述时应计及加载历史的影响,或者卸载时损伤造成的残余应变。

接下来研究不同长度脉宽加载对PBX炸药力学性能的影响,采用长度分别为100 mm、200 mm和300 mm的子弹进行实验,得到了一系列不同加载脉宽不同应变率时试样的应力应变曲线(见图6)。子弹较短时,可提高试样的极限应变率,子弹较长时,可在低应变率时试样发生破坏。子弹长度为300 mm时,加载应变率只需要 80 s^{-1} ,试样就会发生轴向劈裂破

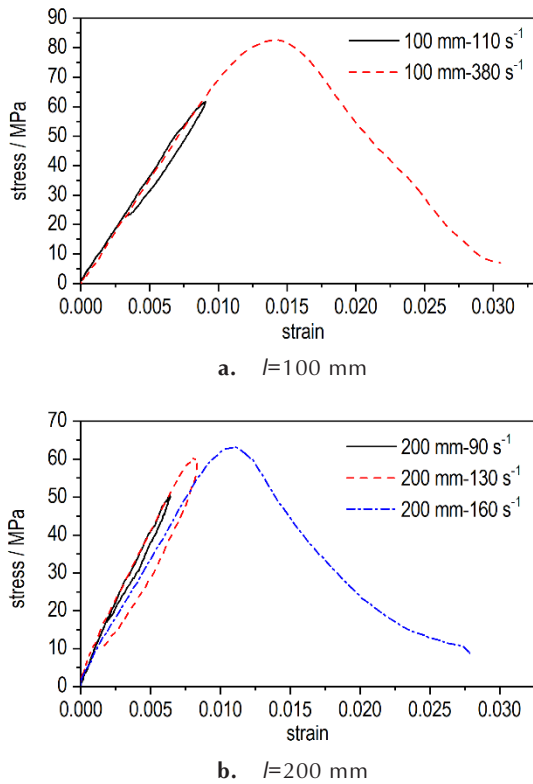


图5 重复加载后的应力应变曲线
Fig. 5 Stress-strain histories of repeated loading

坏。再次说明研究 PBX 炸药的力学响应,仅考虑应变率的影响不够,加载历史与材料的强度密切相关。

由于橡皮作整形器对加载应变率及应变率历史的可控性较差,很难实现不同脉宽相同应变率的加载。比较相同脉宽的加载实验结果,可知试样的强度依然随加载应变率的增加有所增加。该 PBX 炸药在常规测试应变率区间(140~280 s⁻¹)的强度变化幅度较小,然而当应变率低至 80 s⁻¹或高至 380 s⁻¹,材料强度的减小或升高非常明显,大幅增加了材料强度变化范围(约 50~82 MPa),破坏应变的变化范围略有增加(约 10%~15%)。因而当测试像 PBX 炸药这类应变控制破坏的准脆性材料,应尽可能拓展其测试应变率范围,而改变加载脉宽不失为一个有效的实验方法。值得一提的是此类材料的应变率范围极为有限,盲目提高实验加载应变率恐不能满足准静态平衡假设。

4 试样损伤观测及加载过程中的损伤发展描述

如若不采用单脉冲加载,动态压缩后的该种 PBX 试样通常为粉碎状,难以回收。利用单脉冲加载,并合理控制加载强度,可将单次压缩加载后的试样小心回

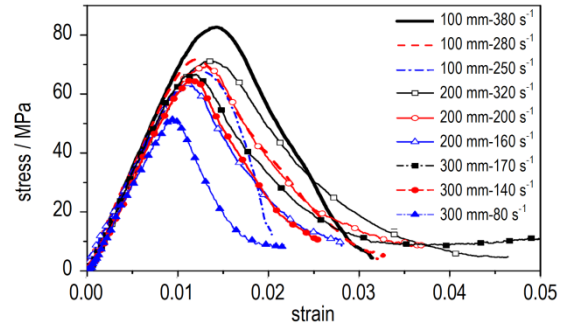


图6 不同加载脉宽时的应力应变曲线
Fig. 6 Stress-strain curves of different loading widths

收。扫描电镜可以察看非平整断裂面的三维立体形貌,故将回收试样放在扫描电镜 SEM 下观察断裂剖面,图中的形貌皆位于发生轴向劈裂的断裂面(图 7)。图 7a 给出了压缩断裂面的整体形貌,断裂面不平整,伴有多条次级裂纹和许多小晶体碎粒。沿压缩方向晶体被紧密压实,在放大倍数较小时很难发现清晰晶体界面(图 7b)。中部的晶体发生整齐的劈裂,同时可见一些方向各异的裂纹。继续增加放大倍数,可以发现晶体与晶体间界面扭曲,表明晶体发生较大变形。部分晶体损伤严重,可能发生多次断裂,不仅断裂面不整齐,常常伴有多条微裂纹(图 7c)。在图 7d 的位置有许多细小的碎粒,表明该处损伤最为严重。

因此,与拉伸破坏试样相比,试样受压缩发生宏观轴向劈裂时的损伤大有不同。不仅试样内部存在严重的挤压损伤,晶体间交界面扭曲,断裂面处的晶体不止

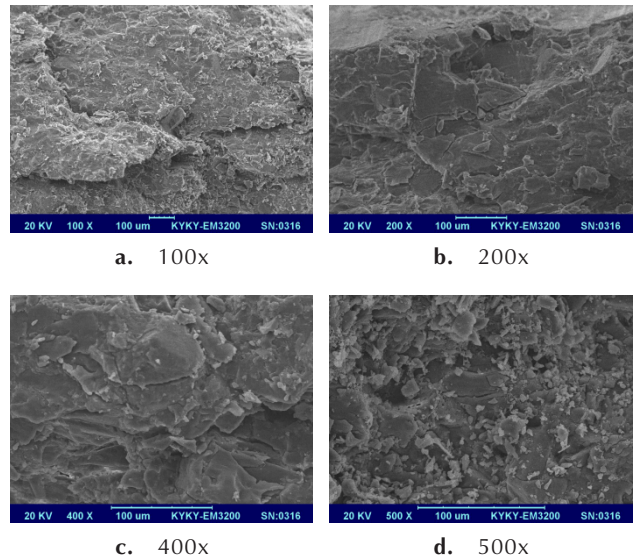


图7 SHPB 实验后某 PBX 炸药回收试样损伤观测
Fig. 7 Damage observation of a recovered specimen after the SHPB experiment

发生一次断裂,严重的部位发生晶体碎裂。

根据前面的实验测试及观测结果,可以将该PBX炸药单轴压缩应力应变响应分为三个阶段:线弹性、非线性强化和应变软化阶段。结合细观损伤分析结果,可以推测PBX炸药受压的细观损伤发展过程。受压后材料内部粘结剂通过自己的大变形来抵御外界载荷,而后晶体开始发生弹性变形;此时材料内部没有损伤演化,晶体和粘结剂以及初始的微裂纹都只发生弹性变形,没有发生微裂纹的扩展,应力应变曲线表现为线弹性。当到达晶体甚至粘结剂的弹性变形极限后,晶体开始发生不可恢复的扭曲变形,粘结剂已被极度压扁,或者填充缝隙,甚至可能被挤压断裂;此时材料内部越来越多的沿晶微裂纹产生,可视为内部发生连续分布的损伤,随着应力的增大,越来越多的微裂纹产生并稳定的扩展,但受到更高强度的能障束缚停止扩展,随着微裂纹扩展区的不断增大,微裂纹对材料有效柔度张量的贡献也随之增大,于是应力应变曲线表现为非线性的应变强化。最后随着外载荷的持续增加,某些取向的沿晶微裂纹穿越晶界障碍,晶体断裂所释放的能量使得裂纹能继续在材料中扩展,导致穿晶断裂大量出现,最终导致试样的宏观破坏,表现为应力应变曲线中的应变软化阶段。

由此,可考虑采用微裂纹扩展区(DMG)损伤本构模型来描述单轴压缩加载下的损伤发展演化过程^[15]。该模型假设初始裂纹服从一定的随机分布,描述在外界加载作用下材料内部微裂纹扩展对应力应变响应的贡献。该模型的表述形式为

$$\varepsilon_{ij} = \left(S_{ijkl}^0 + S_{ijkl}^{iO} + S_{ijkl}^{iS} + S_{ijkl}^{iG} + S_{ijkl}^{iK} \right) \sigma_{kl} \quad (1)$$

式中, S_{ijkl}^0 为基质的柔度张量,这里应该理解为晶体和粘结剂的共同贡献。后四项皆为微裂纹在不同状态下对柔度张量的贡献。 S_{ijkl}^{iO} 为所有张开微裂纹引起的非弹性柔度张量, S_{ijkl}^{iS} 为发生摩擦滑移但尚未扩展的微裂纹对柔度张量的贡献, S_{ijkl}^{iG} 为发生Ⅱ型自相似扩展的闭合裂纹对柔度张量的贡献, S_{ijkl}^{iK} 是所有发生弯折扩展的微裂纹对柔度张量的贡献。它们的数值对应于单个相应类型裂纹对有效柔度张量的贡献在相应的作用区域内的积分,具体的表达式可参看文献[15],因而主要的工作需要分析和计算在特定的加载条件下,各部分贡献的计算表达式及相应的积分区域。将该模型用于描述单轴压缩响应时,需要对软化部分做一些特别的修正分析,可引入导致试样发生突发大变形且应力卸载的机制,比如,晶体的宏观断裂。除此之外,还需计

及惯性效应和材料的率相关特性,将各应力强度因子视为与裂纹扩展速度相关的动态形式,加载应变率的高低体现为裂纹扩展的快慢。后期将开展大量的测试工作,确定细观断裂相关的参数,建立能较好描述PBX炸药力学响应的本构模型。

5 结论

针对PBX炸药这类形变小,强度低的准脆性材料,研究其在SHPB实验加载中的细节设计问题,包括不同加载方式对其损伤发展的影响,并回收观测单次受载后破坏试样的损伤情况,并对PBX炸药在单轴压缩下的损伤发展过程进行了推测性的总结描述。具体结论如下:

(1) 黄铜整形器可以较好地控制加载应变率,但对实验所用PBX炸药来说,采用黄铜整形器时应变加速度仍旧偏大,会对试样造成额外的损伤;

(2) 试样重复受载后其应力应变响应是否会发生变化,取决于前次加载是否使其产生了不可恢复的微损伤,改变加载脉宽可以有效拓展PBX炸药的实验应变率范围;

(3) 受单轴压缩后试样内部晶体因挤压而发生严重的扭曲变形,单个晶体经历多次穿晶断裂甚至碎裂;

(4) PBX炸药的应力应变响应可分为线弹性、应变强化和应变软化三个阶段,研究其损伤本构关系时可从微裂纹的产生、稳定扩展,最后穿越晶界失稳扩展来描述。

在下一步工作中,将研究PBX炸药细观断裂力学性能参数,结合断裂力学通过描述裂纹的扩展对本构关系中的柔度张量的影响,建立能反映其微观损伤发展的本构模型。

参考文献:

- [1] 成丽蓉, 施惠基. PBX炸药含裂纹扩展损伤的粘塑性本构关系[J]. 含能材料, 2015, 23(10): 999-1003.
CHENG Li-rong, SHI Hui-ji. Elastic-viscoplastic constitutive coupled micro-cracks propagation damage of PBX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(10): 999-1003.
- [2] 唐明峰, 蓝林钢, 李明, 等. 以RDX为基的浇注PBX力学性能与本构关系[J]. 含能材料, 2014, 22(2): 215-220.
TANG Ming-feng, LAN Lin-gang, LI Ming, et al. Mechanical properties and constitutive models of RDX based cast PBX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(2): 215-220.
- [3] 蔡宣明, 张伟, 魏刚, 等. PBX模拟材料动态力学响应及细观损伤模式[J]. 含能材料, 2014, 22(5): 658-663.

- CAI Xuan-ming, ZHANG Wei, Wei Gang, et al. Dynamic mechanics response and mesoscopic damage of a PBX simulant. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(5):658-663.
- [4] Chen J K, Li J L, Zhu L M, et al. On the tension-induced microcracks' nucleation in a PBX substitute material under impact compression loading[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2017, 134:263-272.
- [5] Xiao Y C, Sun Y, Li X, et al. Dynamic mechanical behavior of PBX. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2016, 41(4): 629-636.
- [6] Chen R, Yao W, Lu F, et al. Evaluation of the stress equilibrium condition in axially constrained triaxial SHPB tests[J]. *Experimental Mechanics*, 2017, 58(3): 527-531.
- [7] Liu P, Han X, Hu D, et al. Sensitivity and uncertainty analysis of SHPB tests for concrete materials. *International Journal of Applied Mechanics*, 2016, 8(8): 1650088(23).
- [8] Lu F Y, Lin Y L, Wang X Y, et al. A theoretical analysis about the influence of interfacial friction in SHPB tests. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 79:95-101.
- [9] Chen W, Zhang B, Forrestal M J. A split Hopkinson bar technique for low-impedance materials[J]. *Experimental Mechanics*, 1999, 39(2): 81-85.
- [10] Zhao H, Gary G, Klepaczko J R. On the use of a viscoelastic split Hopkinson pressure bar[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 19(4): 319-330.
- [11] Chen W, Lu F, Zhou B. A quartz-crystal-embedded split Hopkinson pressure bar for soft materials[J]. *Experimental Mechanics*, 2000, 40(1): 1-6.
- [12] 林玉亮, 卢芳云, 卢力. 石英压电晶体在霍普金森压杆实验中的应用[J]. *高压物理学报*, 2005, 19(4): 299-304.
LIN Yu-Liang, LU Fang-Yun, LU Li. The application of quartz transducer technique in SHPB. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2005, 19(4): 299-304.
- [13] 李俊玲, 卢芳云, 傅华, 等. 某 PBX 炸药的动态力学性能研究. *高压物理学报*, 2011, 25(2): 159-164.
LI Jun-ling, LU Fang-Yun, FU Hua, et al. Research on the dynamic behavior of a PBX explosive. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2011, 25(2): 159-164.
- [14] Chen W, Lu F, Frew D J, et al. Dynamic compression testing of soft materials[J]. *Journal of Applied Mechanics-Transactions of the Asme*, 2002, 69(3): 214-223.
- [15] 冯西桥. 脆性材料的细观损伤理论和损伤结构的安定性分析[D]. 北京: 清华大学, 1995.
Feng Xi-qiao. Micro-failure theory for brittle materials and shakedown analysis of structures with damage[D]. Beijing: Tsinghua University, 1995.

Investigation into the Influences of SHPB Loading Ways on the Mechanical Response of PBX

LI Jun-ling¹, WANG Shuo², FU Hua³, TAN Duo-wang³, LU Fang-yun²

(1. Hypervelocity Impact Research Center, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China; 2. College of Liberal Arts and Science, National University of Defense Technology, Changsha 410072, China; 3. National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, CAEP, Mianyang 621999, China)

Abstract: The constitutive relationship of polymer bonded explosives (PBX) including damage is one of the key fundamental issues of the safety research of PBX. To study the damage constitutive relationship of PBX explosive, it is necessary to accurately acquire and understand the dynamic mechanical response of PBX explosive. Therefore, in allusion to the SHPB tests on PBX, it is particularly discussed that the influences of loading ways on the mechanical response of PBX. Through different shapers, different loading wave length, and repeated loading, the influences of different loading ways on the mechanical response including damage of PBX have been analyzed, and a series of stress-strain curves were obtained. The ultimate damage morphology of recycled samples was observed by scanning electron microscopy, and the damage development process of PBX explosive under dynamic uniaxial compression and its performance in stress-strain relationship were analyzed. Results show that loading with brass shaper leads to large strain acceleration and still has an impact on PBX, resulting in additional damage. The failure of specimens subjected to dynamic uniaxial compression is characterized by multiple transgranular fracture or even fragmentation of crystals. The constitutive relationship considering damage can be described by the nucleation, stable growth, and unstable propagation through crystals of micro-cracks.

Key words: solid mechanics; polymer bonded explosive (PBX); split Hopkinson pressure bar (SHPB); damage

CLC number: TJ55;O341

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2019154

(责编:高毅)