

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.03.005

# 利用分离式 Hopkinson 压杆技术研究浇注 PBX 炸药的老化性能<sup>\*</sup>

王芳芳 王 琼 于思龙 顾 妍 常 海 张林军  
西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 利用分离式霍普金森压杆(SHPB)技术研究了 HTPB/AP 基浇注 PBX 炸药 70 ℃ 下的老化性能和在不同应变率、不同老化时间、不同温度下的动态力学性能;同时,运用扫描电子显微镜分析了炸药在高应变力下的微观损伤结构。结果表明,高应变率下的应力应变大于低应变率下,应力应变具有应变率效应;随着老化时间的增加,高温试验条件下,浇注 PBX 炸药的失效应变从 0.364 减小到 0.343,失效应变逐渐减小;低温试验条件下,浇注 PBX 炸药的失效应变在 0 到 56 d 时从 0.32 增加到 0.34,之后基本保持不变。同时,微观、宏观损伤模式表明,界面脱黏和晶粒破碎两种损伤模式并存,应变率越高,晶粒的破碎作用越明显。

[关键词] 物理化学;浇注 PBX 炸药;应力应变;SHPB

[分类号] TJ55

## Application of Split Hopkinson Pressure Bar Technique in Aging Properties Study on Casting Polymer Bonded Explosives

WANG Fangfang, WANG Qiong, YU Silong, GU Yan, CHANG Hai, ZHANG Linjun  
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] In order to study aging properties of HTPB/AP based casting polymer bonded explosive (PBX) at 70℃, the split Hopkinson pressure bar technique was selected for dynamical mechanics properties at different strain rates, different aging times, and different temperatures. Microstructure of explosive in high strain was analyzed by scanning electron microscope. Results show that strain-stress in high strain rate is greater than that in low strain rate. Strain-stress has strain rate effect. Failure stress of casting PBX at high temperatures decreases from 0.364 to 0.343 with increasing of aging time, and failure strain increases slowly. Failure stress of casting PBX at low temperatures increases from 0.32 to 0.34, with increasing of aging time from 0 d to 56 d, and then it keeps stable. Ansticking of binder filler/binder and grain crushing coexist, the more strain rate increases, the more obvious and simultaneous appearance of grain crush from damage model of microstructure and macrostructure.

[KEYWORDS] physical chemistry; casting PBX; stress-strain; SHPB

## 引言

炸药作为武器战斗部装药中的核心部件,在生产、加工、运输、储存和发射使用过程中都将经历复杂的应力状态,这些受力过程包括压缩、剪切、摩擦、黏塑性流动等,尤其在使用过程中要承受加载速率较高的动态载荷作用<sup>[1]</sup>。这些载荷可能会使炸药产生各种微裂纹、微孔洞等损伤,这些损伤一方面使

炸药的力学性能劣化,并可能最终导致结构破坏;另一方面,损伤的存在会引起装药结构的强度和刚度降低,并且这些损伤在载荷、温度等的作用下进一步生长、聚合,从而影响炸药的感度、燃烧甚至爆炸性质,对炸药的可靠应用产生影响<sup>[2-3]</sup>。分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)技术可通过简单的约束实现对装药环境的初步模拟,进而确定材料在复杂应力状态下的应力应变响应,分析其损伤及损伤演化的规律。对 PBX 炸药这类脆性

<sup>\*</sup> 收稿日期:2018-10-08

基金项目:国家重大预研专项(编号省略)

第一作者:王芳芳(1987-),女,工程师,从事火炸药理化性能和老化性能研究。E-mail:13259871887@163.com

材料,由于破坏应变很小,精确测量 SHPB 试验中 PBX 炸药的动态力学性能参数也显得尤为重要。

目前,国内外利用 SHPB 技术对 PBX 类炸药的力学性能、损伤模式及本构关系等已开展了相关研究。屈可朋等<sup>[4]</sup>对 RDX 基 PBX 炸药进行了高应变率加载试验,给出了不同应变率范围内的力学性能;Tasker 等<sup>[5]</sup>对 PBXW-128 炸药进行了高应变率下拉伸动态应力-应变关系的研究;卢芳云等<sup>[6]</sup>研究了 PBX 炸药在不同应变率下的压缩试验,分析了炸药的微观结构和响应机制,建立了本构方程;李亮亮等<sup>[7]</sup>研究了不同应变率响应条件下炸药装药安全性试验中存在的问题,介绍了 SHPB 工作原理以及针对炸药装药安全性工作的开展。虽然相关学者已开展了大量的 SHPB 技术的改进研究以及 SHPB 技术在 PBX 炸药的应用研究,但利用 SHPB 对高温加速老化下浇注 PBX 炸药在高冲击载荷下的力学性能及损伤模式的研究,还未发现有相关报道。

本文中,利用 SHPB 技术和扫描电镜(SEM)分析研究了 HTPB/AP 基浇注 PBX 炸药在加速老化过程中, $10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 冲击压缩应变率下,其动态力学性能的变化以及微观损伤模式,为 HTPB/AP 基浇注 PBX 炸药装药的安全储存提供理论依据。

## 1 样品

### 1.1 样品与仪器

HTPB/AP 基浇注 PBX 炸药配方含 HTPB 固化体系、RDX、Al 粉、AP 等,西安近代化学研究所;AHX-1003-FB-2 型热老化箱,南京理工大学机电厂;瞬态波形存储器,Nicolet 公司的 Odyssey x E 型示波器;高温箱,101 系列数显电热鼓风干燥箱;低温箱,DW-50;QUANTA600FEG 型场发射扫描电子显微镜,美国 FEI 公司。

### 1.2 样品制备

采用“捏合-真空-浇注-固化”的制备工艺,试验件经原材料准备与配制、物料真空混合、真空浇注、控温固化(固化温度约  $60^\circ\text{C}$ ,固化时间约 7 d)成型 4 个步骤制成。炸药试样尺寸:高温  $60^\circ\text{C}$ , $\varnothing 8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ ;常温, $\varnothing 8 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ ;低温  $-50^\circ\text{C}$ , $\varnothing 8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 。

## 2 试验

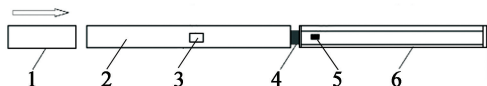
### 2.1 样品的高温加速老化试验

将浇注 PBX 炸药加工成需要的形状,装入复合

铝箔袋后密封,放入油浴热老化箱中加速老化,烘箱温度为  $70^\circ\text{C}$ ,定期取样测试性能。

### 2.2 试验装置及方法

图 1 是 SHPB 试验系统装置,该系统主要由气压驱动装置、撞击杆、入射杆、透射杆以及数据采集设备组成。在进行动态冲击压缩试验前,要保持撞击杆、入射杆和透射杆水平放置,并与试样保持同轴心。试验时,撞击杆在高压气体的驱动下,产生入射脉冲应力波,产生的应力波沿着入射杆向前传播,并被入射杆上的应变片记录,继续传播到入射杆与试样接触面,试样在其加载作用下高速变形,同时波在试样和杆的两个接触面多次反射透射,最终叠加形成反射波和透射波。反射波反射回入射杆,并被入射杆上的应变片采集记录,透射波进入透射杆继续向前传播,被记录在透射杆的应变片上。根据一维应力波假定和均匀性假设,即可得出试样在不同应变率下的应力-应变曲线。入射杆为直径  $18.70 \text{ mm}$  的铝杆,采用灵敏度系数为 2.11 和 1.92、电阻为  $1\,000 \Omega$  的金属应变片,应变片距离试样端  $1.75 \text{ m}$ ;透射杆为直径  $18.04 \text{ mm}$  的 PMMA 有机玻璃杆,采用灵敏度系数为 110、电阻为  $120 \Omega$  的半导体应变片,距离试验端  $0.0315 \text{ m}$ 。



1 - 撞击杆;2 - 入射杆;3 - 应变片;4 - 试样;  
5 - 半导体应变片;6 - PMMA 透射杆。

图 1 SHPB 装置图

Fig. 1 SHPB setting picture

浇注 PBX 炸药的波速很低,导致试件内部的应力不均匀性十分突出。为此,采用入射波整形技术<sup>[8]</sup>,在入射杆与子弹的碰撞端用  $\varnothing 2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  的橡皮泥作为整形器,以过滤加载波中的高频分量,并使加载波变宽,上升沿变缓,使试样内部的应力应变趋于均匀,并很好地实现常应变率加载,同时输出杆采用灵敏度较高的半导体应变片,提高透射波信号的信噪比。每个应变率进行 3 次重复试验,取重复率较好的曲线作为最终试验结果。图 2 和图 3 分别是 SHPB 试验的原始波形和试验波形。图 3 的试验波形可以看出,波形光滑,没有明显震荡,说明波形中的高频成分较少,可以实现常应变率加载。

### 2.3 结果与讨论

#### 2.3.1 HTPB/AP 基浇注 PBX 炸药在不同应变率下的应力应变响应

在 SHPB 试验中,完全精确地控制加载气压值

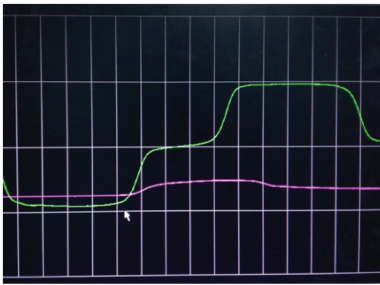


图2 SHPB试验原始波形

Fig.2 Original waveform of SHPB experiment

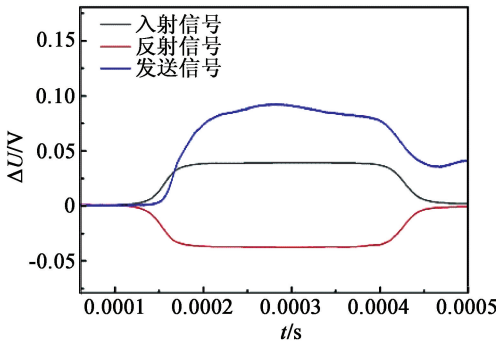


图3 试验波形

Fig.3 Experiment waveform picture

和撞击杆的速度是不可能的。即使对应变应力较为敏感的材料,其应变率效应在相差数倍的量级上应力-应变曲线才会有所不同。因此,对于试验过程中可以将应变率在  $700 \sim 900 \text{ s}^{-1}$  和  $1\,200 \sim 1\,500 \text{ s}^{-1}$  范围内的变化看作是两个量级的同一个加载应变率来考量。以  $\varnothing 8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$  的原始样炸药柱为对象,进行常温条件下 SHPB 试验,图 4 是研究  $790 \text{ s}^{-1}$  和  $1\,470 \text{ s}^{-1}$  两个应变率下 HTPB/AP 基浇注 PBX 炸药的应力-应变关系。

从图4可知,应力-应变曲线具有3个特征段:弹性阶段、强化阶段和应变软化阶段。弹性阶段,线

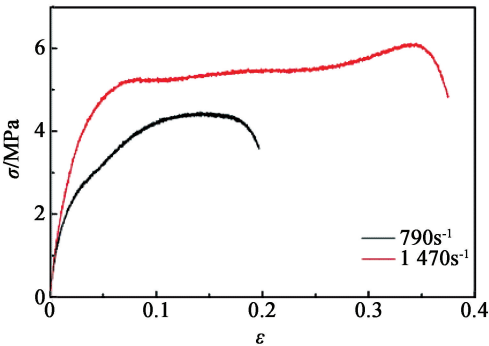


图4 HTPB/AP基浇注PBX炸药原始样在不同应变率下的应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curve of original specimen of HTPB/AP based casting PBX in different strain rate

弹性变形,材料的损伤慢慢产生,但没有累积;强化阶段,非线性变形直至达到峰值应力,损伤累积并将不可逆;应变软化阶段,应力逐渐下降,应变增长,全曲线出现下降,此时损伤继续积累。浇注 PBX 炸药具有软材料特征和大变形能力,更多体现出黏结剂的黏弹性,而非炸药晶体的弹脆性,因此,在宏观上,表现为低强度、低模量及较大的临界应变。从  $790 \text{ s}^{-1}$  和  $1\,470 \text{ s}^{-1}$  两个应变率下的应力幅值来看,  $1\,470 \text{ s}^{-1}$  下的失效力和失效应变均比  $790 \text{ s}^{-1}$  下的大,说明高应变率下材料的应力应变变化更显著,该浇注 PBX 炸药的应力应变对应变率比较敏感,具有明显的应变率效应。

2.3.2 HTPB/AP基浇注PBX炸药在不同老化时间下的应力应变响应

将 HTPB/AP 基浇注 PBX 炸药进行高温和低温条件下  $10^3$  应变率的 SHPB 试验,应力-应变曲线如图 5、图 6、表 1 和表 2 所示。

从图 5、图 6、表 1 和表 2 可知:

1) HTPB/AP基浇注PBX炸药在高温和低温试

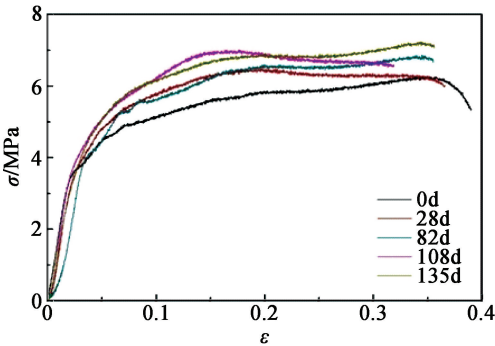


图5 高温条件下 HTPB/AP 基浇注 PBX 炸药老化的应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curve of HTPB/AP based casting PBX at high temperature

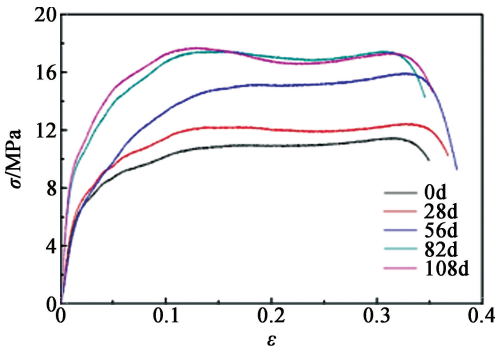


图6 低温条件下 HTPB/AP 基浇注 PBX 炸药老化的应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curve of HTPB/AP based casting PBX at low temperature



表 1 高温条件下 HTPB/AP 基浇注 PBX 炸药老化的失效力应变

Tab.1 Failure stress-strain of HTPB/AP based casting PBX at high temperature

时间/d	失效力/MPa	失效应变
0	6.209	0.364
28	6.263	0.350
82	6.801	0.346
135	7.226	0.343

表 2 低温条件下 HTPB/AP 基浇注 PBX 炸药老化的失效力应变

Tab.2 Failure stress-strain of HTPB/AP based casting PBX at low temperature

时间/d	失效力/MPa	失效应变
0	11.397	0.320
28	12.323	0.338
56	15.724	0.340
82	16.919	0.326
108	17.273	0.325
135	17.492	0.328

验条件下,应力-应变曲线均经历弹性阶段、强化阶段和应变软化阶段;其中,强化阶段高应变率加载效果比较明显。

2)图5、表1说明HTPB/AP基浇注PBX炸药在高温试验条件下,达到应变软化时的应变随着老化时间的增加而减小,其可能的主要原因是,高温时,未老化炸药试样的黏结剂高分子链容易滑动,炸药内部容易出现剪切区域,炸药试样达到的失效力应变增大;而老化后的试样交联密度增加,高分子链受到相对限制。因此,老化时间越长,失效力应变越小。

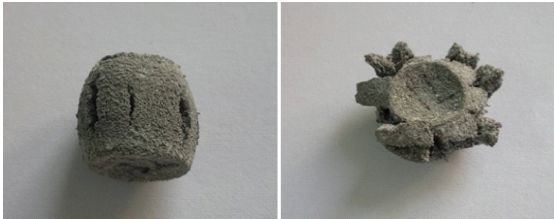
3)图6、表2说明低温试验条件下,HTPB/AP基浇注PBX炸药在0~56 d达到应变软化时的应变是逐渐增加的,56 d以后达到应变软化时的应变基本没有发生变化。其可能的原因是在低温试验条件下,炸药试样本身具有脆性,分子链更难运动,而老化后的炸药试样因交联密度增加,强度更高,在高应变率的冲击作用下,发生失效的应变更大。此外,整体的高、低温试验条件下,在高温条件下的应力变化要大于低温条件下,具有温度效应。

4)随着老化时间的延长,HTPB/AP基浇注PBX炸药在同一个应变下的应力增加,主要是因为老化过程中,交联密度增加,炸药的强度增大,在高应变率冲击加载下,应力随炸药试样强度的增加而升高,这从应力-应变曲线的弹性阶段也可以得出,老化时

间越长,其初始弹性模量越大。

2.3.3 HTPB/AP基浇注PBX炸药宏观损伤和微观损伤模式

1)浇注PBX炸药的宏观损伤模式。图7是HTPB/AP基浇注PBX炸药分别老化15 d和老化135 d时,在高温条件下、 $1\,480\,\text{s}^{-1}$ 应变率冲击作用后进行的宏观观察。结果表明,在高应变率下,老化15 d的试样出现宏观轴线裂纹,但仍保持一个柱状,而老化135 d的试样破坏程度更大,呈饼状,但没有发生粉碎性破坏,这主要是由于黏结剂的黏结作用所致。



(a)老化15 d (b)老化135 d

图7 在 $1\,480\,\text{s}^{-1}$ 应变率下HTPB/AP基浇注PBX炸药试样的宏观损伤

Fig.7 Macroscopic damage of HTPB/AP based casting PBX in  $1480\,\text{s}^{-1}$  strain rate

2)浇注PBX炸药的微观损伤模式。为了确定HTPB/AP基浇注PBX炸药在不同应变率下的损伤模式,以及高低温试验条件对试样损伤的影响,采用SEM分别对未冲击原始样、 $780\,\text{s}^{-1}$ 常温条件下、 $1\,480\,\text{s}^{-1}$ 低温条件下和 $1\,480\,\text{s}^{-1}$ 高温条件下的原始样和老化样进行了微观形貌的观察,结果分别如图8~图11所示。

分析微观形态可见,未冲击的HTPB/AP基浇注PBX炸药原始样,颗粒较完整,没有明显的裂纹,主炸药紧密地嵌入高分子黏结剂内。

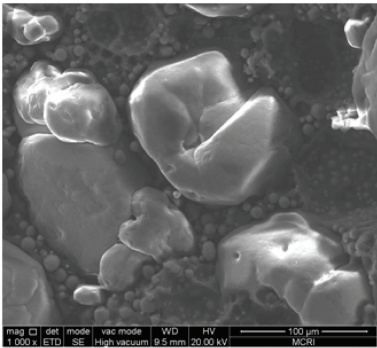


图8 未冲击的HTPB/AP基浇注PBX炸药原始样的SEM( $\times 1000$ )

Fig.8 SEM picture of original sample of HTPB/AP based casting PBX unshocked ( $\times 1000$ )



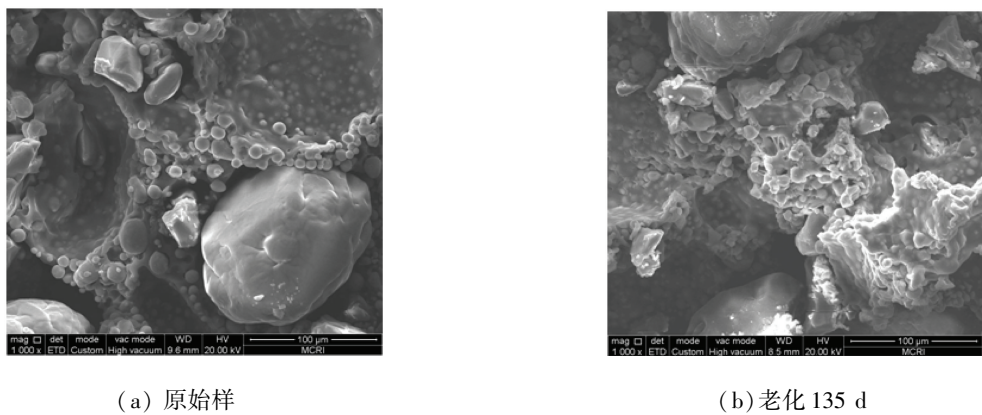


图 9 在  $780\text{ s}^{-1}$  常温条件下 HTPB/AP 基浇注 PBX 炸药不同老化时间的 SEM(  $\times 1000$  )

Fig.9 SEM picture of different aging time of HTPB/AP based casting PBX in  $780\text{ s}^{-1}$  and at room temperature (  $\times 1000$  )

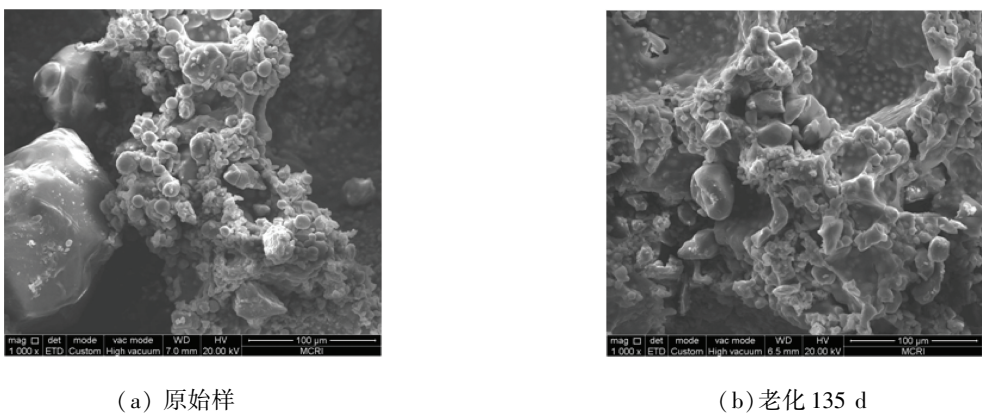


图 10 在  $1480\text{ s}^{-1}$  高温条件下 HTPB/AP 基浇注 PBX 炸药不同老化时间的 SEM(  $\times 1000$  )

Fig.10 SEM picture of different aging time of HTPB/AP based casting PBX in  $1480\text{ s}^{-1}$  and at high temperature (  $\times 1000$  )

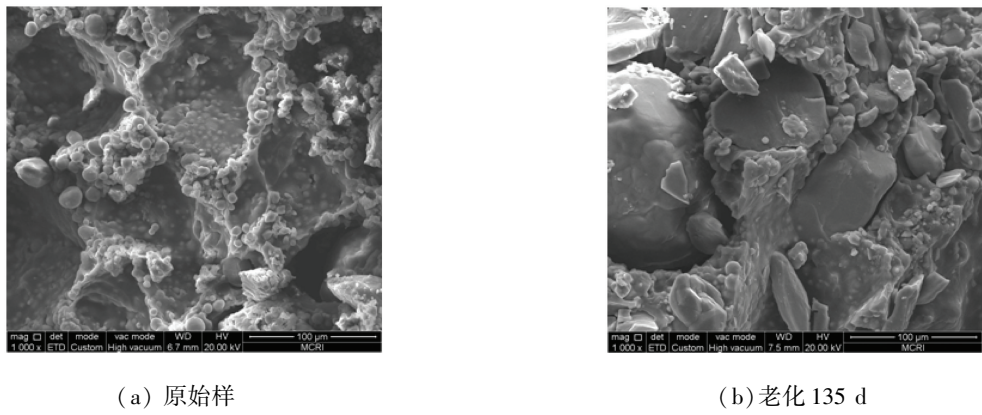


图 11 在  $1480\text{ s}^{-1}$  低温条件下 HTPB/AP 基浇注 PBX 炸药不同老化时间的 SEM(  $\times 1000$  )

Fig.11 SEM picture of different aging time of HTPB/AP based casting PBX in  $1480\text{ s}^{-1}$  and at low temperature (  $\times 1000$  )

从图 9 可以看出:在常温条件、低应变率的冲击作用下,HTPB/AP 基浇注 PBX 炸药原始样的颗粒晶体和黏结剂之间产生了间隙,即脱黏,固体颗粒没有破碎,可以观察到颗粒拔出后留下的凹坑,但黏结剂的结构保持良好,基本完整;老化 135 d 的炸药试样,颗粒晶体和黏结剂脱黏严重,同时,黏结剂之间产生了部分断裂和孔洞现象。

从图 10 可以看出:在高温条件、高应变率加载下,原始样和老化样均发生严重的颗粒晶体和黏结剂脱黏,原始样的黏结剂结构产生孔洞现象;老化 135 d 的试样,黏结剂产生了明显的断裂和孔洞,晶体颗粒被“削平”成小棱形颗粒,小晶体颗粒脱黏留下许多小凹坑和孔洞,结合图 7 (b) 的宏观破坏,表明高温、高应变率条件下,炸药试样完全宏观破碎,

但因黏结剂的存在,仍能保持块状结构。

从图 11 可以看出:在低温、高应变率条件下,原始样的黏结剂整体结构较完整,颗粒晶体和黏结剂有部分脱黏;老化 135 d 的试样,其黏结剂产生严重的脆化碎裂,与颗粒晶体之间的脱黏也较严重。

综上所述,HTPB/AP 基浇注 PBX 炸药在高应变率下的破坏程度要大于低应变率下,高温试验条件下的破坏程度要大于低温试验条件下,老化样的破坏程度要大于原始样的。总之,在冲击载荷下,HTPB/AP 基浇注 PBX 炸药试样内部的应力增加,引起试样内部初始裂纹的扩展、汇集及贯通而形成宏观裂纹;同时宏观裂纹的端部又因为应力集中而出现新的微裂纹,甚至微裂纹区。如此反复,使得材料最后发生碎裂,而正是黏结剂的黏结作用,才使 HTPB/AP 基浇注 PBX 炸药试样保持了原有的块状结构。因此,冲击压缩时,界面脱黏和晶粒破碎两种损伤模式并存,应变率越高,晶粒破碎的作用就越明显。

### 3 结论

1) HTPB/AP 基浇注 PBX 炸药在高应变率下的应力应变变化比低应变率下更显著,应力应变具有明显的应变率效应,失效力和失效应变均随着应变率的增加而增加。

2) HTPB/AP 基浇注 PBX 炸药在高温试验条件下,随着老化时间的延长,应变软化时的应变逐渐减小,其主要原因是高温使得分子链间容易滑动,但同时老化使得交联密度增加,导致最终老化时间越长,失效应变越小;低温试验条件下,0 ~ 56 d 应变软化时应变逐渐增加,其主要原因是低温条件使得炸药脆性较大,同时交联密度增加,强度增高,在高应变率的冲击下,发生的失效应变更大。

3) 随着老化时间的延长,浇注 PBX 炸药的交联密度增加,炸药的强度增大,使得其在同一个应变下的应力增加。

4) 结合浇注 PBX 炸药的微观和宏观损伤模式发现,冲击压缩时,界面脱黏和晶粒破碎两种损伤模式并存,应变率越高,晶粒破碎的作用越明显。

### 参 考 文 献

[1] 李俊玲. PBX 炸药装药的力学性能及损伤破坏研究

[D]. 长沙:国防科学技术大学,2012.

LI J L. Study on PBX's mechanical behavior and damage feature [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.

[2] 屈可朋,肖玮,韩天一,等. RDX 基 PBX 炸药的力学行为和损伤模式[J]. 火炸药学报,2012,35(5):38-40,44.

QU K P, XIAO W, HAN T Y, et al. Mechanical behavior and damage mode of RDX-based PBX explosive[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2012, 35(5):38-40,44.

[3] 张子敏,仲凯,许碧英,等. 浇注型 PBX 炸药的动态力学性能研究[J]. 火工品,2010(6):30-33.

ZHANG Z M, ZHONG K, XU B Y, et al. Study on dynamic mechanical performance of cast PBX explosive[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2010(6):30-33.

[4] 屈可朋,沈飞,肖玮,等. 一种 RDX 基 PBX 炸药力学性能和本构关系研究[J]. 爆破器材,2015,44(3):31-33,38.

QU K P, SHEN F, XIAO W, et al. Mechanical behaviour and constitutive model of one RDX-based PBX explosive[J]. Explosive Materials, 2015,44(3):31-33,38.

[5] TASKER D G, DICK R D, WILSON W H. Mechanical properties of explosives under high deformation loading conditions[C]// 10th American Physical Society Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter. Massachusetts: American Institute of Physics, 1998, 429(1):591-594.

[6] 卢芳云,林玉亮,王晓燕,等. 含能材料的高应变率响应试验[J]. 火炸药学报,2006,29(1):1-4.

LU F Y, LIN Y L, WANG X Y, et al. Experimental investigation on dynamic response of energetic materials at high strain rate[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2006, 29(1):1-4.

[7] 李亮亮,沈飞,屈可朋,等. 炸药装药在不同应变率相应条件下的安全性研究进展[J]. 火炸药学报,2016,39(1):14-22.

LI L L, SHEN F, QU K P, et al. Progress of study on the safety of explosive charge under different strain-rate conditions[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2016, 39(1):14-22.

[8] 苗应刚. 树脂基纳米复合材料力学行为及增强机理研究[D]. 西安:西北工业大学,2015.

MIAO Y G. Study on mechanical behavior and reinforcement mechanisms of epoxy-matrix nanocomposites [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015.