

文章编号: 1006-9941(2013)02-0205-04

温压时效处理 PBX 内部裂纹愈合现象研究

兰琼, 戴斌, 杨白凤, 李敬明, 贺建华

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 采用温压时效处理技术开展 PBX 炸药件裂纹愈合试验, 结合微焦点 X 射线断层扫描技术(μ CT)、超声和力学性能测试, 对 PBX 裂纹愈合现象开展探索研究。结果表明: 经处理后, 400 μ m 以下的内部裂纹愈合, 愈合后的 PBX 抗拉强度和抗压强度接近相同密度下的无损伤试件, 起到了有效改善受损炸药件质量的作用。裂纹类损伤存在阈值, 低于阈值的裂纹可被填充愈合, 而超过阈值的裂纹难愈合。PBX 炸药件损伤程度影响愈合效果。

关键词: 物理化学; PBX; 裂纹; 愈合; 温压时效处理

中图分类号: TJ55; O64

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.02.009

1 引言

炸药是武器杀伤、破坏和动力能源的重要组成部分, 整个武器系统效能的稳定要求炸药具有良好的安全性和可靠性。高聚物粘接炸药(Polymer Bonded Explosive, PBX)是一种晶体颗粒高度填充的含能材料^[1], 为获得满足使用要求的炸药件, 要经历造粒、成型、后处理、加工等过程, 然而, 在炸药合成、结晶、造粒过程中, 不可避免的存在孔穴、气泡等初始缺陷; 造型粉压制成型过程中伴随着炸药晶体的破碎, 则可能形成晶体间和晶体与粘结剂界面间微损伤, 甚至可能因大量微损伤的连通, 在炸药件内形成局部分层和疏松等缺陷。即使已成型的炸药件, 由于成型后残余应力的存在, 在后续加工、储运过程中, 也可能因外载荷作用形成新的损伤^[2]。这些损伤会对炸药件的力学性能、爆轰性能及安全性等产生不利影响, 还可能使炸药件的库存可靠性降低及剩余寿命缩短。

国内外在炸药损伤形成、演化, 损伤对其性能的影响方面开展了大量研究, 也取得了系列研究成果^[3-4], 但是对炸药损伤愈合方面研究相对要少得多。在炸药后处理方法研究过程中, 有研究者^[5-6]提到了损伤愈合相关试验结果。他们采用热-力加载的方法对成型炸药件进行后处理, 使得成型 PBX 炸药件宏观性能有改

善的效果, 甚至还发现该技术能对 1 mm 宽度以下的表面裂纹起到较好的修复作用。但上述研究并未提及热力加载对炸药件微(细)观结构的影响及作用机理。

本研究采用温压时效处理技术, 在高温下对内部存在裂纹的 PBX 炸药件额外施加四周均匀的静液压力, 使其内部均匀分布的低熔点粘结剂软化, 在合适的压缩应力作用下, 带动炸药晶体发生微位移, 填补裂缝及孔隙, 达到愈合炸药件内部裂纹、提高致密化程度、改善内部质量的作用。同时, 结合微焦点 X 射线断层扫描技术(μ CT)、超声检测和力学性能测试技术对处理前后炸药件内部裂纹细观分布及愈合情况, 以及裂纹愈合对炸药件内部质量及力学性能的影响进行综合表征。

2 试验部分

2.1 材料及仪器

HMX 基 PBX 造型粉。WDJ-350 型等静压后处理机; 工业 CT 系统; INSTRON-5582 型材料试验机; PM1200 型电子天平; CTS-36 型全数字超声检测仪; HGY-300F 电热油浴恒温箱; BZB-550/2 防爆真空包装机。

2.2 样品准备

用 PBX 造型粉压制 $\Phi 20$ mm \times 20 mm 药柱, 采用排水法测量整体密度, CT 扫描及超声检测方法表征内部质量, 通过准静态加载方法测量压缩及拉伸强度。

对于 CT 测试样品, 采用激热冲击的方法^[7-8]人为使其产生裂纹损伤; 超声测试和力学性能测试样品为采用同一方法制备的药柱, 通过提高炸药件压制完成后的泄压速率及泄压温度, 使炸药件快速回弹, 人为

收稿日期: 2012-12-29; 修回日期: 2013-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(11102189)资助

作者简介: 兰琼(1979-), 女, 助理研究员, 主要从事含能材料成型及后处理研究。e-mail: lanqiong111@sohu.com

在其内部预置损伤。经超声测试,样品内部均存在不同程度的分层缺陷。部分样品直接进行力学性能测试,部分采用温压时效处理方法处理后再进行超声和力学性能测试。

2.3 试验方法

采用温压时效处理方法开展 PBX 炸药件损伤愈合试验。将样品置于薄膜套中,用真空包装机将其真空封装后放入恒温箱预热至 80 °C,达到预定温度后放入等静压后处理机,在 10 MPa 压力下处理 4 h。试验前后测试样品密度、超声增益、拉伸及压缩强度,分析试验结果。

3 结果与分析

3.1 CT 检测结果与分析

CT 试验采用锥束体扫描方式,CT 检测电压为 130 kV,电流为 180 μ A,样品放大倍率为 11.3,最小体元尺寸为 35.2 μ m。试验前后 CT 检测参数保持相同,以减小测量参数对结果的影响,保证在相同条件下观察裂纹变化情况,实现对炸药内部裂纹愈合过程的变化分析。试验前后样品裂纹区轴向不同深度 CT 切

片结果如图 1 和图 2 所示。其中图 1 为内部较小裂纹经温压时效处理后图片,图 2 为内部较大裂纹经温压时效处理后的对比图。

从图 1a 可以看出,CT 测试能够直观地显示裂纹区域分布、裂缝形状、尺寸等。裂纹区位于样品上端面以下 8.8 ~ 11.6 mm 之间,该区域内有多条裂缝,且裂缝宽度、深度及形状均不同。对 CT 图像进行二值化处理^[9-11],通过设置特定的灰度阈值使图中显示出低于灰度阈值的裂纹损伤,强化裂纹区域以便进行裂纹的提取,如图 1b 所示,其中,最大裂纹宽度约 400 μ m。从图 1c 中可以看出,经过温压时效处理后,该区域在本次测试精度下未发现可探测的裂纹,可以认为该区域裂纹已经有效愈合。但是,如图 2 所示,对于内部较大裂纹(部分裂缝宽度超过 1 mm,且大面积连通)样品,在 10 MPa、4 h 的处理条件下进行一次温压时效处理后,虽然部分裂缝愈合,裂纹面积减小,但并不能使裂缝完全愈合,可见,PBX 炸药件损伤程度影响愈合效果,裂纹类损伤愈合可能存在阈值,在一定条件下,低于阈值的裂纹可以被填充、愈合,超过阈值的裂纹则很难愈合。

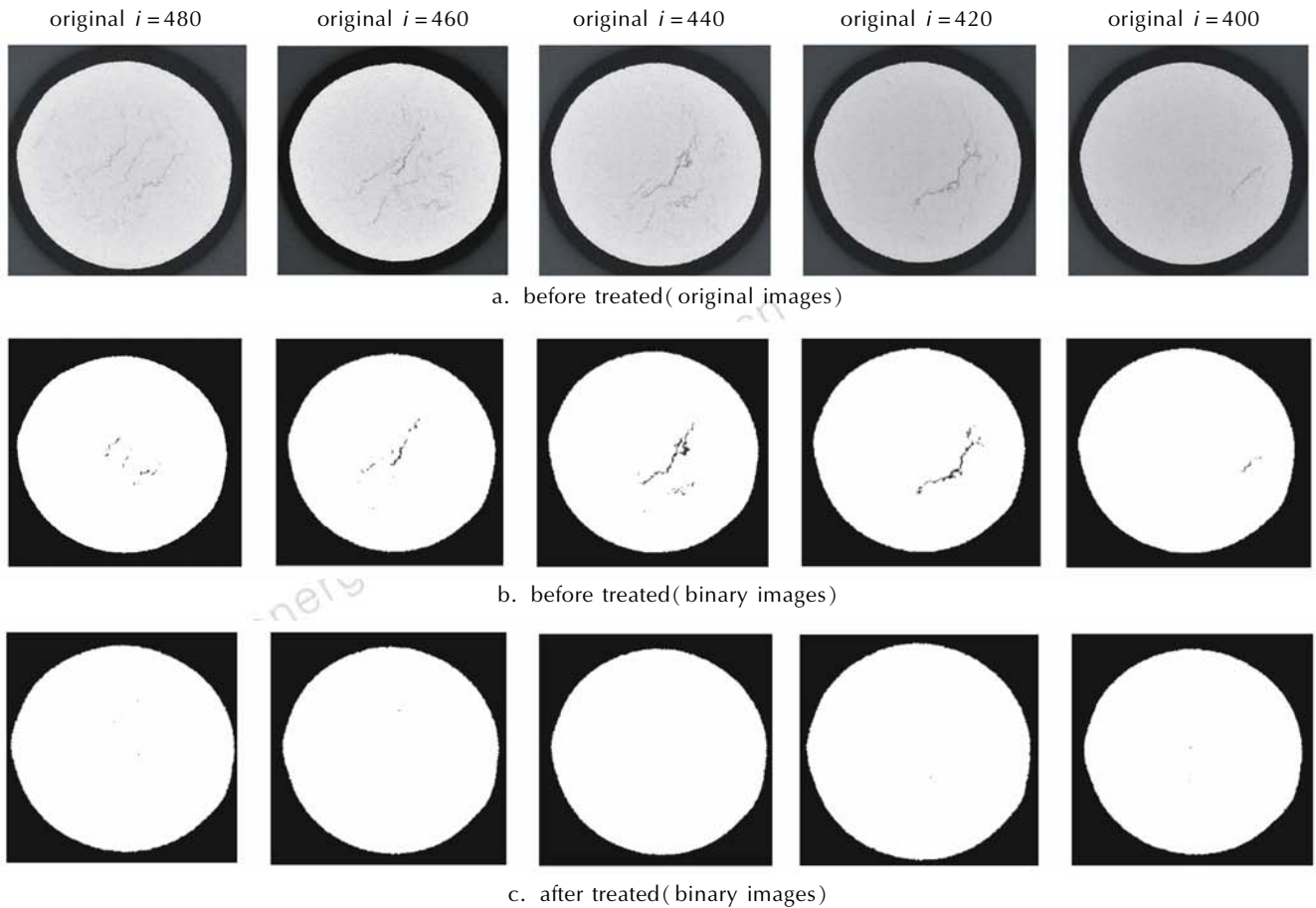


图 1 温压时效处理前后裂纹区 CT 切片图(较小裂纹经处理后愈合)

Fig.1 CT slice images on small crack region of untreated and treated PBX specimens (small cracks healing)

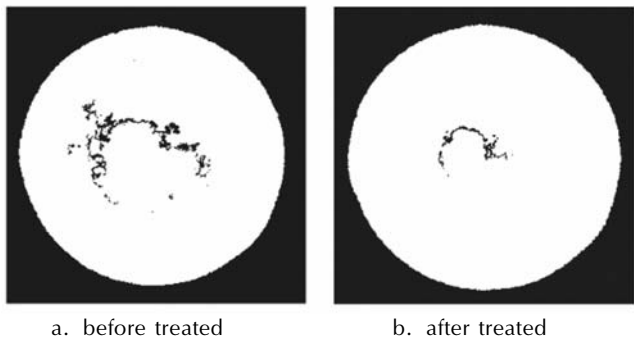


图2 温压时效处理前后裂纹区 CT 切片图(较大裂纹减小)
 Fig.2 CT slice images on big crack region of untreated and treated PBX specimens (big cracks become less)

3.2 超声检测结果与分析

超声测试设备为 CTS-36 型全数字式超声波检测仪,单换能器纵波脉冲反射法测试。超声探头型号 123M33,探头频率 2.5 MHz,晶片尺寸 $\Phi 10$ mm,耦合剂为水,耦合面为试样端面。通过超声增益值和波形等参量表示炸药件内部裂纹分布范围和愈合情况。

从表 1 PBX 炸药件温压时效处理前后超声增益值对比表可以看出, PBX 炸药件经处理后超声增益值减小,说明内部致密化程度提高,质量得到了改善。图 3 和图 4 为温压时效处理前后 PBX-7 炸药件的超声检测波形图。从处理前的超声波形图可以看出, PBX-7 样品示波和底波之间存在多处反射波,说明其内部存在多处分层或裂纹缺陷,从图 4 可以看出,经温压时效处理后,样品反射波基本消失,底波升高,增益值也由 57 dB 减小到 43 dB,说明炸药件的损伤得到了愈合。

3.3 力学性能测试结果与分析

在 INSTRON-5582 型材料试验机上开展力学性能测试试验,负荷传感器量程为 1 kN,测试温度为 20 $^{\circ}\text{C}$,湿度为 60%,抗压及抗拉强度试验的加载速度为 0.5 mm \cdot min $^{-1}$,测量数据为五发平均值,结果如表 2 所示。炸药件温压时效处理前相对密度较低,仅有 96.5%,处理后相对密度提高到 99%,致密化程度的提高,以及内部损伤的愈合都有利于炸药件力学性能的恢复。从表 2 可以看出,无损伤炸药件压缩强度在 40 MPa 以上,拉伸强度大于 6 MPa,而存在内部损伤(多处不等深度分层缺陷)的炸药件强度很低,压缩强度为 22.92 MPa,拉伸强度为 4.42 MPa。温压时效处理后的炸药件,经超声测试内部无可探测缺陷,其抗压强度恢复到 47.34 MPa,比处理前提高了一倍多,甚至高于密度接近的无损伤炸药件,其抗拉强度也有很大程度的提高。

综合分析试验结果,通过高温下对 PBX 炸药件额外施加压缩应力,可使内部均匀分布的低熔点粘结剂软化,在压力作用下,带动炸药晶体发生微位移,填补微小孔隙,未被填补的孔隙尺寸也会减小,可以达到提高炸药件致密化程度和力学强度的作用。

表 1 PBX 炸药件温压时效处理前后超声增益值对比

Table 1 Ultrasonic gain value comparison of untreated and treated PBX specimens

sample	gain value before treat/dB	gain value after treat /dB	Change of gain value/dB
PBX-1	38	30	-8
PBX-2	36	32	-4
PBX-3	42	30	-12
PBX-4	36	34	-2
PBX-5	37	28	-9
PBX-6	37	28	-9
PBX-7	57	43	-14

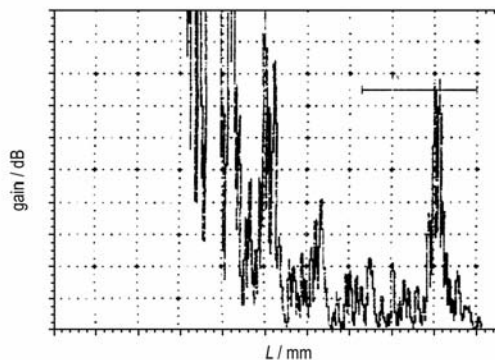


图3 PBX-7 炸药件处理前超声检测波形(检测波形显示存在内部裂纹)

Fig.3 Ultrasonic detection wave of untreated PBX-7 specimens (detection wave of specimens with inner cracks)

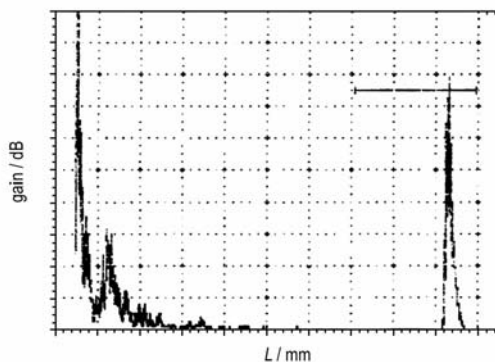


图4 PBX-7 炸药件处理后超声检测波形(检测显示无损伤波形)

Fig.4 Ultrasonic detection wave of treated PBX-7 specimens (detection wave of specimens without damage)

表 2 温压时效处理前后 PBX 炸药件压缩力学性能对比

Table 2 Compressive strength comparison of untreated and treated PBX specimens

sample	compressive strength /MPa	tensile strength /MPa	average density /g · cm ⁻³	relative density /%
untreated	22.92	4.42	1.809	96.5
treated	47.34	6.87	1.856	99.0
without damage ^[1]	44.85	6.47	1.853	98.9
performace changes for untreaed and treated	24.42	2.45	0.047	2.5

4 结 论

(1) 采用温压时效处理方法可以使 PBX 炸药件内部裂纹在一定的温度、应力载荷作用下愈合。

(2) 通过 CT 扫描手段可以直观地分析试验前后炸药件内部裂纹埋深及愈合情况; 通过超声测试手段能够从超声增益值和波形变化上看出炸药件内部裂纹分布范围和愈合情况; 通过力学性能测试表明经过温压时效处理试验后, 炸药件力学性能得到恢复。

(3) PBX 炸药件损伤程度影响愈合效果, 对应一定试验条件, 可能存在愈合阈值, 超过该值的裂纹无法完全愈合。但是, 愈合阈值如何表征以及对应愈合试验条件如何确定, 需要进一步开展研究。

参考文献:

- [1] 陈鹏万, 丁雁生. 高聚物黏结炸药的力学行为及变形破坏机理[J]. 含能材料, 2000, 8(4): 161-164.
CHEN Peng-wan, DING Yan-sheng. Mechanical behaviour and deformation and failure mechanisms of polymer bonded explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2000, 8(4): 161-164.
- [2] 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.
CHEN Peng-wan, DING Yan-sheng, CHEN Li. Progress in the study of damage and mechanical properties of energetic materials[J]. *Advances in Mechanics*, 2002, 32(2): 212-222.
- [3] 李明, 张珏, 李敬明, 等. 高聚物黏结炸药压缩破坏的细观力学

实验研究[J]. 含能材料, 2005, 13(2): 79-83.

LI Ming, ZHANG Jue, LI Jing-ming, et al. Experimental investigation to the damage localization of PBX mechanical failure at mesoscale[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(2): 79-83.

- [4] Rae P J, Goldrein H T, Palmer S J P, et al. Studies of the failure mechanisms of polymer bonded explosives by high resolution moiré interferometry and environmental scanning electron microscopy [C] // Proceedings of 11th Symposium on Detonation, Snowmass, UT, 1998, 66.
- [5] 兰琼, 韩超, 雍炼, 等. 低压热处理对 PBX 炸药密度及内部质量的影响[J]. 含能材料, 2008, 16(2): 185-187.
LAN Qing, HAN Chao, YONG Lian, et al. Effects of low-pressure heat treatment on charge density and inner quality of PBX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(2): 185-187.
- [6] Harrell J D. Bartherm processing of small LX-14 pressings[R]. MHSMP-75-20F, 1975, 1-3.
- [7] 田勇, 张伟斌, 温茂萍, 等. JOB-9003 高聚物黏结炸药热冲击损伤破坏相关性研究[J]. 含能材料, 2004, 12(3): 174-177.
TIAN Yong, ZHANG Wei-bin, WEN Mao-ping, et al. Research on correlation of thermal shock damage of PBX JOB-9003 [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(3): 174-177.
- [8] 张伟斌, 田勇, 温茂萍, 等. JOB-9003 炸药热冲击损伤的超声波检测[J]. 含能材料, 2004, 12(2): 85-88.
ZHANG Wei-bin, TIAN Yong, WEN Mao-ping, et al. Experimental study on the thermal shock damage of explosive by ultrasonic testing [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(2): 85-88.
- [9] Robert A J, John S S, Louis M C, et al. Nondestructive measurements of fracture aperture in crystalline rock cores using X-ray computed tomography [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98 (B2): 1889-1900.
- [10] 尹小涛, 党发宁, 丁卫华, 等. 岩土 CT 图像中裂纹的形态学测量[J]. 岩石力学与工程学报, 2006(3): 539-544.
YIN Xiao-tao, DANG Fa-ning, DING Wei-hua, et al. Morphologic measurement of crack in CT images of rock and soil [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006(3): 539-544.
- [11] 丁卫华, 仵彦卿, 蒲毅彬. 基于 X 射线 CT 的岩石内部裂纹宽度测量[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1421-1425.
DING Wei-hua, WU Yian-qing, PU Yi-bin. Measurement of crack width inrock interior based on X-ray CT [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(9): 1421-1425.

Healing of Cracks in PBX by Thermal Pressure Aging Treatment

LAN Qiong, DAI Bin, YANG Bai-feng, LI Jing-ming, HE Jian-hua

(Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Thermal-pressure aging treatment was used in the study on cracks healing behavior of PBX, combined with μ CT, ultrasonic testing method and mechanical properties testing method. Results show that cracks blow 400 μ m heales after treated, and its tensile strength and compressive strength are close to those of same density sample without damage while the crack in excess of 400 μ m couldn't heal. It indicats the treatmeet improves the internal quality of the damaged samples effectively in certain conditions. The width of cracks will affect the healing results .

Key words: physical chemistry; PBX; cracks; healing; thermal-pressure aging treatment

CLC number: TJ55; O64

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.02.009