

文章编号: 1006-9941 (2015)02-0202-03

# TATB 颗粒温压成形 PBX 的初始细观损伤

张伟斌, 李敬明, 杨雪海, 肖丽, 冯立羊, 雍炼, 杨占锋

(中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 用 X 射线微层析成像 (X- $\mu$ CT) 技术无损研究了 TATB 造型颗粒经单、双向钢模温压 (UWDC 和 BWDC) 法和软模温等静压 (IWSC) 法成形的高聚物粘结炸药 (PBX) 三维微细结构特征。结果表明, 单向、双向压法压成的 PBX 内部存在初始细小裂纹和一些残余孔隙。初始损伤尺度范围从百微米至毫米。在相同温度 (85 °C) 和压力 (90 MPa) 下, UWDC 和 BWDC 法可产生初始细观损伤, 但 IWSC 法能避免初始细观损伤。

**关键词:** TATB 颗粒的温压成形; 介观结构; 初始细观损伤; X 射线微层析成像 (X- $\mu$ CT)

**中图分类号:** TJ55

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.02.018

## 1 引言

高聚物粘结炸药 (polymer bonded explosive, PBX) 损伤问题主要是其宏观裂纹出现前微裂纹、微孔洞等的发生与发展问题, 初始损伤 (尤其微裂纹) 是温压成型 PBX 的普遍性现象, 主要形式为炸药晶体微裂、炸药晶体与粘结剂的微裂隙以及微孔洞等<sup>[1-5]</sup>, 一般由粘结剂约束在压实的颗粒内部。PBX 损伤观察与表征的传统方法是通过光学显微镜和扫描电镜 (SEM) 观察断/剖面微区来实现<sup>[1-5]</sup>, 虽可高精度观察与定量微米量级损伤, 但对 PBX 三维空间结构认识则存在很大困难。

PBX 存在低载荷开裂异常现象, 该问题会对其服役有着严重影响。研究表明微损伤 (微裂纹、微孔洞) 一般会使 PBX 力学性能降低<sup>[6-7]</sup>, 该尺度及以下的初始损伤不应是导致低载荷开裂异常现象的主要原因, 更可能的主要原因之一是初始细观损伤 (更接近于宏观裂纹的百微米量级初始细小裂纹和数量较多的残余孔隙), 因此, 如能无损观察到并定量出 PBX 内部存在的初始细观损伤, 则有可能为研究其低载荷开裂机制奠定重要基础。

TATB 造粒结构具有复杂性、多样性<sup>[8]</sup>, 其温压成

型 PBX 初始损伤及发展研究将是今后一段时期内重要基础性问题。本研究主要利用 X 射线微层析成像 (X-ray microtomography, X- $\mu$ CT) 技术研究 TATB 造型颗粒经单、双向钢模温压和软模温等静压成形 (uni/bi-directional warm die compaction and isostatic warm soft compaction, UWDC/BWDC/IWSC) PBX 三维微细结构特征, 对比分析其初始细观损伤及形式, 为不同温压成形 PBX 热力承载内变形与断裂机制研究提供基础。

## 2 材料成形与 CT 试验

### 2.1 材料成形

TATB 粉末晶体 (中国工程物理研究院化工材料研究所) 经水悬浮法造粒呈颗粒状 (即 TATB 造型颗粒, TATB granules), TATB 造型颗粒直径在 1 ~ 3 mm 范围, 外观如图 1a 所示。造粒后同批 TATB 造型颗粒经单、双向钢模温压和软模温等静压成型, 示意图如图 1b、图 1c、图 1d 所示。单、双向钢模内径和软模内径均为  $\Phi 40$  mm, 成形温度与成形压力均为 85 °C 和 90 MPa。成形样品尺寸分别为  $\Phi 40$  mm  $\times$  50 mm、 $\Phi 40$  mm  $\times$  50 mm 和  $\Phi 31$  mm  $\times$  130 mm。其中, 双向钢模温压下端有支撑弹簧。

### 2.2 X- $\mu$ CT 试验

样品在室温中放置较长时间充分释放残余应力后进行 X- $\mu$ CT 扫描成像 (其中, 考虑等静压力特征, 其成形样品仅扫描一半高), 扫描装置与文献 [9] 相同, 主要条件为管电压 80 kV, 管电流 480  $\mu$ A, 0.5 mm Cu

收稿日期: 2014-05-26; 修回日期: 2014-06-18

基金项目: 国家自然科学基金 NSAF 重点基金 (U1330202)、国家自然科学基金青年基金 (11204279)

作者简介: 张伟斌 (1972-), 男, 研究员, 主要方向为先进材料检测与无损评价、CT 应用技术研究、凝聚态物理。e-mail: weibinzhang1@163.com

片滤射线,探测器采集时间 2000 ms,样品分辨体元均为  $58 \mu\text{m}$ 。

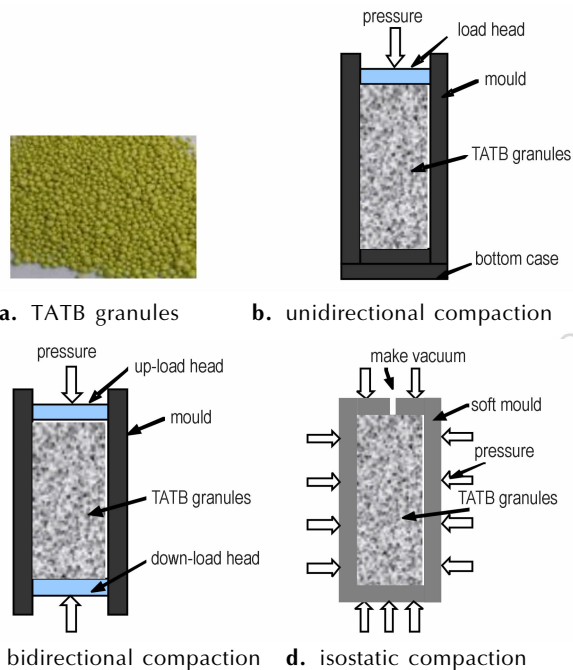


图 1 TATB 造型颗粒及成型方式

Fig.1 Schematic diagram of modeling granules of TATB and forming ways

### 3 结果与分析

图 2、图 3、图 4a 给出了温压 PBX 样品 CT 三维图,分析全三维 CT 切片可发现:软模温等静压成形样品未发现细小裂纹、也未发现残余孔隙(图 2);单向钢模温压样品中部存在初始细小裂纹(图 3),典型特征为线/面型缝隙且穿透致密接触颗粒;双向钢模温压样品支撑面至压制端(Slice number: 69 ~ 700)存在初始残余孔隙(颗粒间孔隙,图 4a),典型特征为体积型空隙残留在未致密接触的颗粒间,孔隙的径向当量直径范围为  $370 \sim 1340 \mu\text{m}$ ,孔隙个数由支撑端向压制端呈减小趋势(图 4b)。结果说明该单向温压试验中 90 MPa 载荷压力会产生局部应力集中,而双向温压试验中 90 MPa 载荷压力会导致局部应力不足以使颗粒致密而残留孔隙,其主要原因可能来自支撑弹簧的压力损耗。

表 1 列出利用 X- $\mu$ CT 得出的 TATB 造型颗粒经三种温压成形后样品的初始损伤对比情况,结果说明在相同的成形温度、成形压力下(85 °C、90 MPa),TATB 造型颗粒单、双向温压存在初始细小裂纹或残余孔隙,而软模温等静压则同时避免初始细小裂纹和残余孔隙。

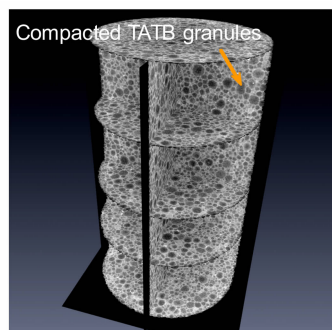


图 2 用 IWSC 成形的 PBX 的三维结构  
Fig.2 3D structure of PBX pressed by IWSC

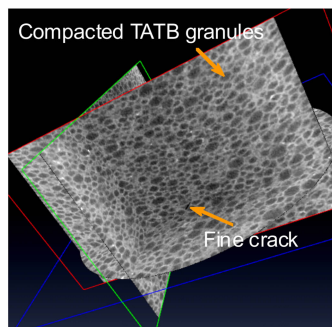


图 3 用 UWDC 成形的 PBX 的初始微细裂纹  
Fig.3 Initial fine crack of PBX pressed by UWDC

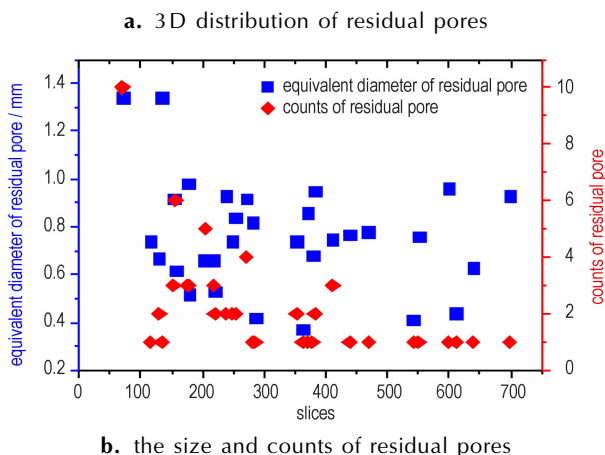
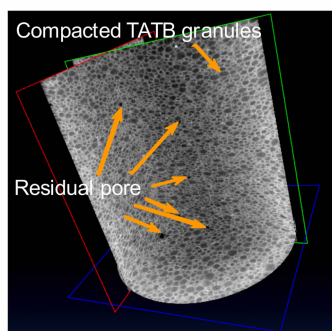


图 4 用 BWDC 成形的 PBX 的残余孔隙  
Fig.4 Initial residual pores in the PBX pressed by BWDC

表1 用 UWDC, BWDC 和 IWSC 成型的 PBX 的初始损伤

Table 1 Initial damage of PBX pressed by UWDC, BWDC and IWSC

Initial mesoscopic damage	UWDC	BWDC	IWSC
residual pores (equivalent diameter) / $\mu\text{m}$	-	370 ~ 1340	-
fine crack (width $\times$ length) / $\mu\text{m}$	150 $\times$ 1300	-	-

## 4 结 论

利用 X- $\mu$ CT 无损观察到单、双向压的 PBX 内部存在细小裂纹与残余孔隙, 尺度在百微米到毫米量级范围, 该现象对模压 PBX 低载荷开裂问题研究具有重要意义。

在相同的成形温度和成形压力 (85  $^{\circ}\text{C}$ 、90 MPa) 下, TATB 造型颗粒单、双向温压存在初始细观损伤, 而软模温等静压则避免初始细观损伤。

### 参考文献:

- [1] 梁华琼, 雍炼, 唐常良, 等. RDX 为基的 PBX 炸药压制过程损伤形成研究[J]. 含能材料, 2009, 17(6): 713-716.  
LIANG Hua-qiong, YONG Lian, TANG Chang-liang, et al. Pressing damage of RDX-based polymer bonded explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(6): 713-716.
- [2] 梁华琼, 雍炼, 唐常良, 等. 压制过程中 PBX 炸药颗粒的破碎及损伤[J]. 火炸药学报, 2010, 33(1): 27-30.  
LIANG Hua-qiong, YONG Lian, TANG Chang-liang, et al. Crack and damage of PBX during pressing[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2010, 33(1): 27-30.
- [3] 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 Ke-peng, XIAO Wei, HAN Tian-yi, et al. Mechanical behavior and damage mode of RDX-based PBX explosive[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2012, 35(5): 38-40, 44.

- [4] 刘佳辉, 刘世俊, 黄明, 等. 压制 PBX 中炸药晶体损伤的研究进展[J]. 含能材料, 2013, 21(3): 372-378.  
LIU Jia-hui, LIU Shi-jun, HUANG Ming, et al. Progress on crystal damage in pressed polymer bonded explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(3): 372-378.
- [5] Victor Stepanov, Trevor M Willey, Jan Ilavsky, et al. Structural characterization of RDX-based explosive nanocomposites[J]. *Propellants Explos Pyrotech*, 2013, 38: 386-393.
- [6] 陈鹏万, 丁雁生. 含能材料装药损伤和力学性能研究进展[J]. 力学进展, 2002, 32(2): 212-222.  
CHEN Peng-wan, DING Yan-sheng. Progress in the study of damage and mechanical properties of energetic materials[J]. *Advances in Mechanics*, 2002, 32(2): 212-222.
- [7] 韦兴文, 周筱雨, 涂小珍, 等. HMX 基 PBX 的温度环境适应性[J]. 火炸药学报, 2012, 35(1): 15-18.  
WEI Xing-wen, ZHOU Xiao-yu, TU Xiao-zhen, et al. Thermal environment adaptability of HMX based PBX[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2012, 35(1): 15-18.
- [8] 张伟斌, 杨雪海, 杨仍才, 等. 流固耦合湍流驱动 TATB 造粒凝结涡旋[J]. 含能材料, 2014, 22(3): 376-381  
ZHANG Wei-bin, YANG Reng-cai, YANG Xue-hai, et al. Condensed vortexes in TATB granules driven by fluid-solids coupled turbulent flows[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(3): 376-381
- [9] 张伟斌, 杨雪海, 杨仍才, 等. 单向热模压 TATB 基高聚物粘结炸药 X 射线微层析成像[J]. 含能材料, 2014, 22(2): 202-205.  
ZHANG Wei-bin, YANG Xue-hai, YANG Reng-cai, et al. X-ray micro-tomography of TATB based polymer bonded explosives under unidirectional warm compaction[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(2): 202-205.

## Initial Mesoscopic Damage of TATB based PBX Pressed by Warm Compaction

ZHANG Wei-bin, LI Jing-ming, YANG Xue-hai, XIAO Li, FENG Li-yang, YONG Lian, YANG Zhan-feng

(Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

**Abstract:** Three-dimension (3D) mesoscopic structure features of polymer bonded explosives (PBXs) pressed by unidirectional and bidirectional warm die compaction (UWDC and BWDC) and isostatic warm soft compaction (IWSC) methods with the modeling granules of TATB were nondestructively studied by X-ray micro-tomography (X- $\mu$ CT) technique. Results show that the initial fine crack and some residual pores are existed in the PBXs pressed by unidirectional and bidirectional compaction methods. The scale range of initial mesoscopic damage is from hundred microns to millimeter. At the same temperature (85  $^{\circ}\text{C}$ ) and pressure (90 MPa), the initial mesoscopic damage can be produced by UWDC and BWDC methods, but this damage can avoid by IWSC method.

**Key words:** warm compaction forming of TATB granules; mesoscopic structure; initial mesoscopic damage; X-ray micro-tomography

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.02.018