

文章编号: 1006-9941(2015)10-0982-07

## TATB 造型颗粒模压结构演变的 X 射线层析成像

戴斌<sup>1,2</sup>, 田勇<sup>1</sup>, 张伟斌<sup>1</sup>, 蓝林钢<sup>1</sup>, 兰琼<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999; 2. 中国工程物理研究院研究生部, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 利用 X 射线层析成像技术结合内置变形材料的形变特征, 研究了 TATB 造型颗粒压制过程中颗粒变形和结构演变。CT 图像显示: 中部颗粒主要发生向下的压实变形, 模具壁附近颗粒向下压实同时还会发生拱起变形; 孔隙率变化主要发生在压制初期, 即 0~10 MPa 压力下, 上、中、下各部位(分别距顶面 5, 20, 35 mm 处)孔隙率分别减少了 73%, 62% 和 58%, 压制各阶段孔隙率沿轴向由上至下递增; 颗粒主要在压制方向(轴向)发生位移, 模具与颗粒间的摩擦力大于颗粒间摩擦力, 中部的颗粒向下发生较大位移。结果表明, X 射线层析成像可无损表征造型颗粒受压过程内部结构演变, 颗粒形态变化和相互接触关系揭示了受压颗粒间作用模式, 颗粒位移间接反映了炸药内部应力传递情况。

**关键词:** TATB 造型颗粒; 模压; 结构演变; X 射线层析成像

**中图分类号:** TJ55

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.10.012

### 1 引言

高聚物粘结炸药(PBX)在压制成型过程中, 造型颗粒发生摩擦、挤压、压力传递等行为, 进而影响到压制成型体的微细结构和内部应力分布<sup>[1-2]</sup>。颗粒细观结构包括颗粒的大小、形状、表面特征和颗粒间的联结以及颗粒的排列组合情况和数量关系, 还包括颗粒间的距离、孔隙大小及其分布特征。这些细观结构是决定炸药物理、力学及其他性质的重要因素, 直接影响到压制成型药柱内部的密度分布和应力集中等, 导致炸药的安全性能和使用性能也随之发生改变。梁华琼等<sup>[3]</sup>研究了 PBX 的微显结构和成型过程中的性能参数变化规律, 得到成型件的密度、泊松比、压缩模量和压缩强度与压力呈对数函数关系; 张鹏等<sup>[4]</sup>研究了 PBX 代用材料的动态力学行为和微观结构等; 温茂萍等<sup>[5-6]</sup>研究了等静压和模压两种工艺成型炸药在不同温度和多种加载方式下的力学性能, 常温下等静压和模压成型的炸药力学性能相当, 35~55℃ 范围内等

静压成型炸药力学性能更优, 且其力学性能是各向同性的, 而模压炸药件力学性能是各项异性的。

为探索由压制造成的细观结构的改变和宏观性能的关系, 应对各种细观结构特征等进行准确表征。表征颗粒细观结构有电子显微镜、折光匹配显微镜、偏光显微镜、表观密度等测量方法<sup>[7-18]</sup>, 这些方法无法进行内部结构演变过程的观测, 且有些表征方法还会引入二次损伤。随着控制技术和计算机技术的发展, X 射线层析成像技术逐渐应用到炸药细观结构表征和过程监测中。张伟斌等<sup>[19]</sup>利用微焦点 X 射线层析成像技术, 获取 RDX 晶体在不同压力下的特征信息, 探讨了晶体位移与破碎、压制密度及分布、填充间隙以及微裂纹分布等, 同时利用微焦点 CT 技术获得了单向温模压三氨基三硝基苯(TATB)基炸药微细结构的全三维信息<sup>[20]</sup>。兰琼等<sup>[21]</sup>采用温压时效处理技术结合微焦点 X 射线层析成像对处理前后炸药件内部裂纹细观分布及愈合情况进行了表征; 田勇等<sup>[22]</sup>利用锥束 CT 技术过程观测炸药凝固过程, 定量测试了结晶特性、密度分布, 分析了炸药结晶体取向与凝固过程中内部热应力的分布相关性。

上述研究主要是对成型前后的炸药进行观测和表征, 结合 X 射线断层成像技术的特点和在三维体系研究方面的成功经验, 还需进行动态在线检测并实现热、力及其耦合, 在压制过程中对炸药形态特征、孔隙率和颗粒间接触的变化情况进行研究。本研究将特定形状

收稿日期: 2014-07-25; 修回日期: 2014-11-19

基金项目: 中国工程物理研究院“双百”人才基金(ZX03015)、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(11102189)

作者简介: 戴斌(1983-), 男, 硕士研究生, 助研, 主要方向为先进 CT 应用技术研究。e-mail: marsbear@163.com

通信联系人: 张伟斌(1972-), 男, 研究员, 主要方向为先进材料无损评价、CT 应用技术、凝聚态物理研究。e-mail: weibinzhang1@163.com

和性能的变形材料植入 TATB 造型颗粒中,利用锥束 CT 技术观测压制过程中变形材料和 TATB 造型颗粒的形变特征与规律,研究压制过程中内部结构演变和颗粒运动行为特征,分析颗粒间相互作用规律和随载荷变化的结构变形响应情况,为分析压制过程微观结构和力学响应提供研究基础。

## 2 材料成型与试验方法

### 2.1 材料

试验材料采用中国工程物理研究院化工材料研究所的 TATB 基粉末晶体,经水悬浮法造粒呈颗粒状,松装颗粒粒径为 0.5 ~ 3 mm。

### 2.2 压制试验

#### 2.2.1 模具和试验样品

压制模具采用聚醚醚酮材料(PEEK),该材料强度较高,拉伸强度达 200 MPa 以上,并且可以避免金属介质对 CT 检测的干扰,模具尺寸为  $\Phi 25$  mm $\times$ 40 mm,孔径为 20 mm,孔壁厚为 5 mm,造型颗粒放入模具中后的松装高度为 40 mm,如此得到  $\Phi 20$  mm $\times$ 40 mm 的造型颗粒样品。

#### 2.2.2 植入变形材料

天然橡胶具有优良的回弹性及可压性、较易发生形变、形状特征容易识别,密度为  $0.913 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,弹性模量为 2 ~ 4 MPa,0 ~ 100 °C,回弹性可达 85% 以上<sup>[23]</sup>。将天然橡胶制备成  $\Phi 20$  mm $\times$ 0.1 mm 圆片状,共 5 片。在压制实验开始之前先在模具内放入一定高度的造型颗粒,使最上端面尽量保持平整,在上端面放置一块制备好的橡胶圆片,然后继续加入造型颗粒到需要的高度,通过在上部,中部和下部不同位置分别植入 5 片橡胶片以研究不同位置处的典型颗粒变化状态,如图 1,橡胶片层从上到下依次编号为 1# ~ 5#。

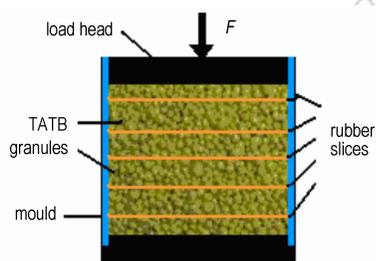


图 1 橡胶片植入方式

Fig.1 Schematic diagram of implantation rubber slices

#### 2.2.3 压制成型

将制备的造型颗粒样品放置于材料试验机上进行

压制试验,见图 1,压制温度为 22 °C,压制分为 5 个阶段,首先对样品施加 5 MPa 的载荷,保压 10 min 后卸载,取出进行 CT 检测。然后对该样品进行复压,压制压力分别为 10,20,30 MPa 和 40 MPa。

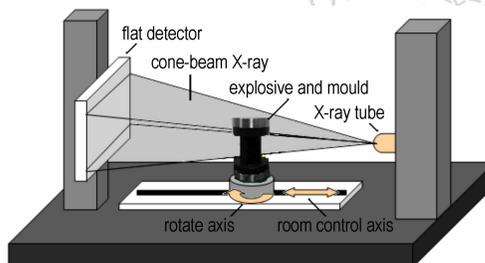


图 2 CT 检测示意图

Fig.2 Schematic diagram of CT scanning

### 2.3 CT 试验

首先对初始松装状态进行 CT 扫描,每个阶段保压结束后都进行一次 CT 检测。CT 检测电压为 130 kV,电流为 170  $\mu$ A,放大倍率为 18,最小体元尺寸为 32  $\mu$ m。模具在旋转平台上旋转 360°,且每旋转 0.3°得到一幅基于 X 射线吸收的射线图像,如图 2 所示。每次 CT 检测参数保持相同,以保证在相同条件下观察造型颗粒和橡胶片的变化情况。

## 3 结果与分析

### 3.1 颗粒形态

图 3 为造型颗粒在不同成型压力下的三维图像。在 0 ~ 5 MPa 阶段,样品尺寸大幅度减小,颗粒主要在压制方向(轴向)发生位移,靠近上压头的颗粒位移最大,模具中部和底部的颗粒位移较小,颗粒间仍存在明显空隙。在 5 ~ 20 MPa 阶段,样品尺寸变化率开始减小,造型颗粒堆内部变得致密。增大到 30 MPa 以后,尺寸变化率更小,颗粒间接触点增多,作用力增大,密度增高趋势明显。压力为 40 MPa 时,颗粒间的孔隙基本消失,造型颗粒基本被压制密实。

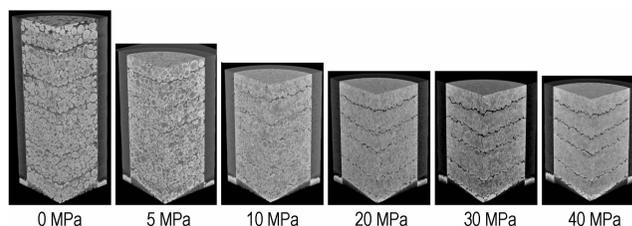


图 3 造型颗粒在不同成型压力下的三维图像

Fig.3 3D images of explosive granules under different forming pressures

图4给出了各成型压力下造型颗粒轴向的CT结果,在整个压制过程中,造型颗粒基本保持了完整,未发现明显的破碎现象。压制的初始阶段,颗粒形状基本上保持不变,随着成型压力增大,一些强度较低的颗粒会变形为椭圆形颗粒,在10~20 MPa阶段,随着颗粒的变形和部分颗粒受力发生重排转动,造型颗粒的长径方向基本沿着模具的径向排布。压力达到30 MPa时,颗粒之间互相镶嵌和咬合形成稳定的集合体,颗粒间联结由松散变得紧密。

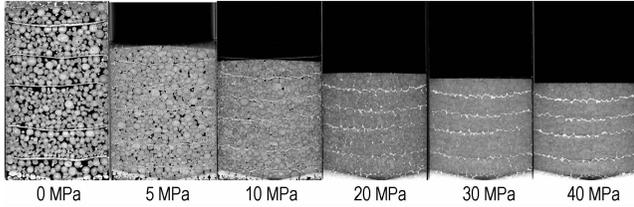


图4 不同成型压力下造型颗粒CT图像(中轴面)

Fig. 4 CT images of explosive granules under different forming pressures (the medial axis slices)

### 3.2 孔隙变化

#### 3.2.1 一次孔隙与二次孔隙

压制过程中,孔隙包括了颗粒内部的孔隙(一次孔隙)和颗粒之间的孔隙(二次孔隙),如图5和图6。由图5可看出,在0~10 MPa压力下,这一阶段颗粒主要发生的是孔隙填充和颗粒重排,颗粒没有发生大的形变,因此一次孔隙变化幅度较小,而且一次孔隙一直到30 MPa时依然存在。由图6可以看出,在0~10 MPa压力下,二次孔隙率的改变量明显,总孔隙体积和总孔隙率大幅度减小。10 MPa以后二次孔隙已经减少了绝大部分,孔隙率的变化开始以颗粒的定向排列起主导作用。随着压力的增大,孔隙率的改变量将越来越小。20 MPa后大多数二次孔隙都消失只剩下部分小孔隙,基本在压制过程中大孔隙体积减少较多,变化较大,大孔隙首先改变,某些大孔隙分成了两个或多个,初始小孔隙同后来受压而演化成的小孔隙越来越小,而且小孔隙的体积改变幅度不大。

另外,在压制的过程中可发现靠近模具壁的区域孔隙比中间区域孔隙减少快,上部孔隙减少比下部快。这与炸药的成型模式有关。在施加压力成型过程中,造型颗粒向侧面膨胀对模壁施加作用力,模壁也对造型颗粒产生反作用力即侧压力。而边缘区域是受到侧压力挤压最严重的区域,因而颗粒间隙较小,密实性更好。

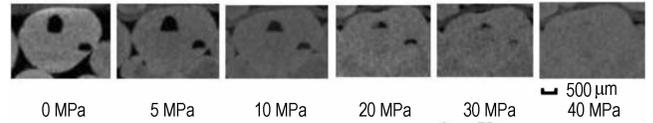


图5 典型颗粒内部一次孔隙演变

Fig. 5 Deformation images of pores inside a representative granule under different forming pressures

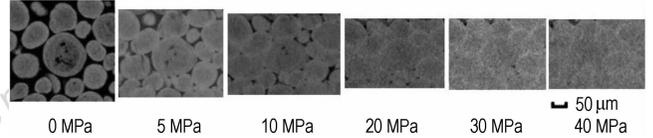


图6 典型颗粒堆二次孔隙演变

Fig. 6 Deformation images of pores between the representative granules

#### 3.2.2 截面局部孔隙

图7和图8为压制不同阶段距顶面5 mm和距底面5 mm处的造型颗粒横截面。由图可知,横截面的不同位置处的粒径大小和分布存在差别,在距顶面5 mm处(图7),颗粒分布比较均匀,较为致密,孔隙率相对较小;而在距底面5 mm位置处(图8),颗粒相对松散,孔隙率相对较大。

图9为孔隙率随压力的变化规律,表1为上、中、下各部位的孔隙率变化统计,由图9和表1可知,在压制初期(0~10 MPa),上、中、下各部位孔隙率下降都很快,孔隙率分别减少了73%,62%和58%,

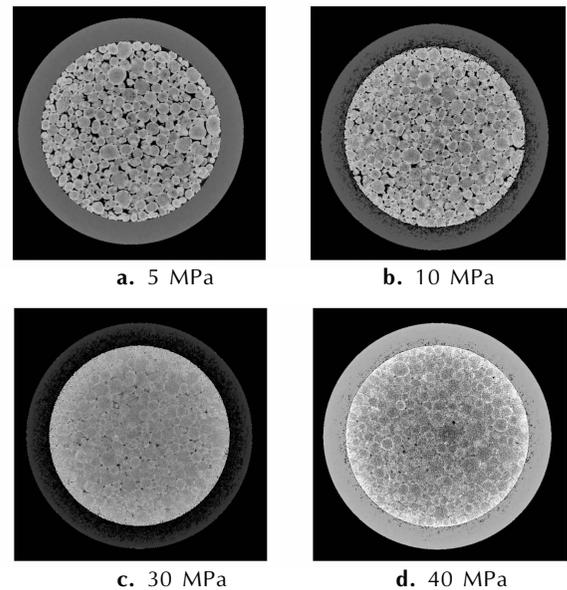


图7 不同成型压力下距顶面5 mm处造型颗粒横截面

Fig. 7 The cross sections 5 mm away from the top surface of explosive granules under different forming pressures

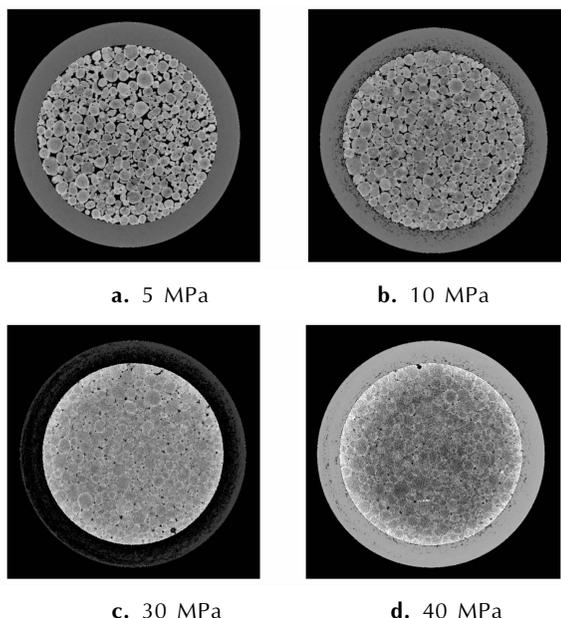


图 8 不同成型压力下距底面 5 mm 处造型颗粒横截面

Fig. 8 The cross sections 5 mm away from the root of explosive granules under different forming pressures

上部孔隙减少相对较快。20 MPa 后各部分孔隙率变化不大。在整个压制阶段,上部孔隙率总共减少了 99.9%,而中部和下部分别是 97.9% 和 95%。在压制每个阶段孔隙率都是沿轴向由上至下递增。

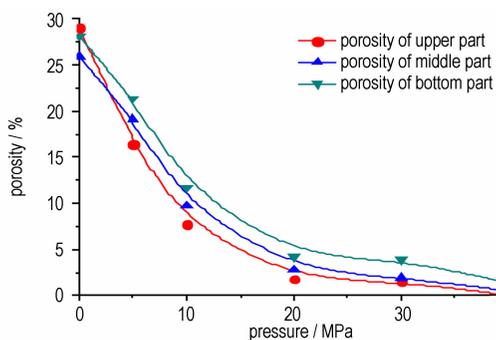


图 9 孔隙率变化规律

Fig. 9 Curves of porosity vs pressure at different position

表 1 孔隙率变化统计

Table 1 Porosity change statistics

position	pressure / MPa					
	0	5	10	20	30	40
upper part (5 mm away from the top surface)	29.0	16.4	7.7	1.75	1.50	0.03
middle part (20 mm away from the top surface)	25.9	19.1	9.7	2.79	1.92	0.53
bottom part (35 mm away from the top surface)	28.1	21.3	11.7	4.20	3.90	1.40

### 3.3 颗粒相互作用

在压制过程中,造型颗粒堆在径向上大致分为两个部分:即中间区域和靠近模具壁的周边区域。从中间区域和周边区域中分别提取部分边界清晰和运动明显的颗粒堆 I 和颗粒堆 II 进行颗粒运动和相互作用力分析。

图 10 为颗粒堆 I 中颗粒随成型压力增大的变化过程。其中颗粒 1 和颗粒 2 在压制过程中基本只发生了垂直的平动,本身没有发生转动,而颗粒 3,5,6 在向下运动的同时还发生了顺时针的转动,颗粒 4 发生了沿径向的变形,由比较规则的球体变为椭球体。所有颗粒在向下运动的同时向中间聚集,形成密实的颗粒集合体,说明颗粒之间还存在径向的作用力使得颗粒间发生团聚,以至于在 30 MPa 成型压力以上时已经不能清楚地分辨颗粒间的边界。

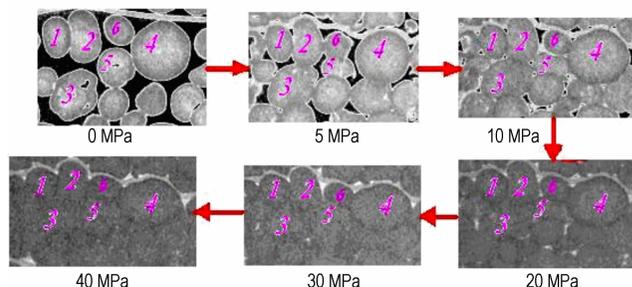


图 10 颗粒堆 I 压实变化过程 CT 图像

Fig. 10 CT images of granular pile I deformation during compacting

颗粒堆 I 颗粒间受力如图 11 所示,施加外力后,部分颗粒挤入孔隙中,颗粒的相对位置错动调整,颗粒间发生剪切位移。由于大部分颗粒间接触较松散,剪切作用只需克服颗粒之间点接触阻力,较小的外加压力即可实现。这一阶段颗粒主要向下运动,大量颗粒向下运动填充孔隙累积的结果在宏观上表现为非线性的压实变形。在孔隙填充达到一定的程度时,一些区域的颗粒将基本处于紧密排列的状态。若继续加压,颗粒除继续被压实外,还会在颗粒间的最薄弱接触界面上产生界面滑动。

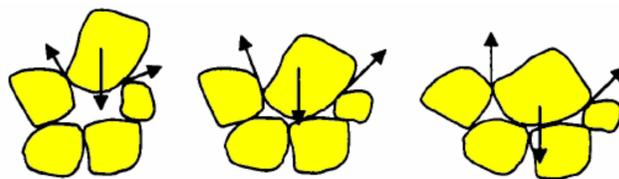


图 11 颗粒堆 I 压实变形过程

Fig. 11 Compacting deformation of granular pile I

图 12 为颗粒堆 II 中颗粒随成型压力增大的变化过程。其中颗粒 1 沿顺时针方向发生了小角度的转动, 颗粒 3 在转动的同时由球体变形为椭球体, 颗粒 5 由于上下颗粒的挤压变成形状不规则的颗粒, 颗粒 2 在 10 MPa 时由于颗粒间的充填作用下降到颗粒 3 和颗粒 4 之间, 但是随着成型压力的增大, 颗粒 2 受到来自下方颗粒较大的作用力又重新回到了颗粒 1 和颗粒 3 之间。

模具周边部位的颗粒在载荷作用下的密实过程变化阶段与中间区域基本类似, 但是各个阶段的变化并不完全相同。在刚开始时仍然表现为孔隙填充, 但有部分颗粒的运动不是向下而是向侧下方发展。这一过程处于运动颗粒下方的颗粒向下压实, 处于运动颗粒侧上方的造型颗粒则向上变形, 如图 13 所示。当压实进行到一定程度后, 两侧颗粒中的孔隙大部分被颗粒填充, 被拱起的颗粒又由于上方颗粒向下挤压继续向下运动。

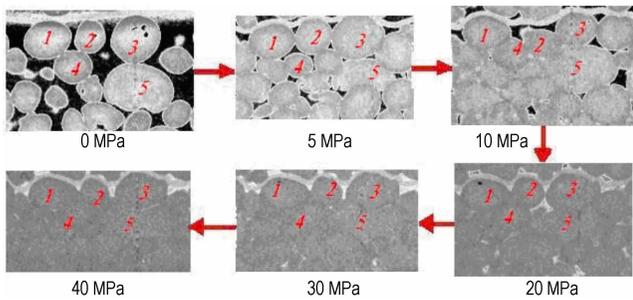


图 12 颗粒堆 II 压实变化过程 CT 图像  
Fig. 12 CT images of granular pile II deformation during compacting

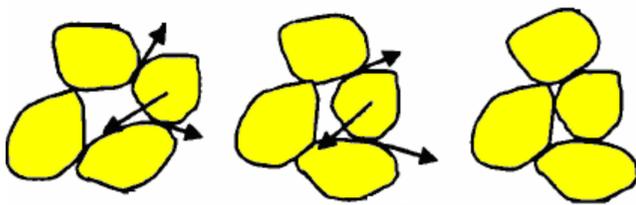


图 13 颗粒堆 II 拱起变形过程  
Fig. 13 Arching deformation of granular pile II

### 3.4 颗粒位移

图 14 反映了不同成型压力下内置于造型颗粒中不同橡胶片层发生的形变情况。在松装状态下, 每层橡胶片表面都保持较平整状态。当上压头向下行接触到颗粒, 橡胶片层也相应地发生变形。上压头下方的颗粒受到压头的压力垂直往下运动。由于模具的对称性, 上压头中心线下方附近的颗粒受到两边颗粒的约

束, 难以侧向流动, 最后橡胶片呈现向下凹的弧状的分布。由该形状可知在样品中部颗粒向下发生的位移大于靠近模具壁的颗粒。

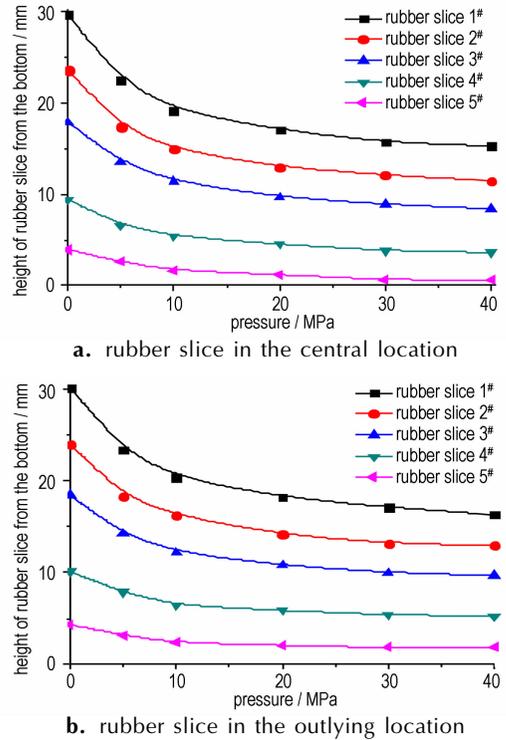


图 14 橡胶片位移随成型压力的变化曲线  
Fig. 14 Curves of rubber slice displacement varying with pressure

由图 14 可以看出, 橡胶片的中部和边缘的位移趋势几乎是一致的, 由此可知在径向方向上颗粒力的传递是相对均匀的。在轴向方向上, 橡胶片的位移主要发生在 0 ~ 10 MPa, 在 20 MPa 之后只向下发生较小位移。而且橡胶片 1#, 2#, 3# 随成型压力变化位移量较大, 而位于底部附近橡胶片 4# 和 5# 随成型压力变化位移量较小, 说明颗粒间的重排和填充主要发生在上部和中部, 而底部相对较少。

这可能是因为摩擦力是导致橡胶片呈现这种形变的因素之一, 也是产生应力不均匀性的一个主要原因。在压制过程中摩擦力包括: 模具和颗粒间的外摩擦力, 颗粒之间的内摩擦力。摩擦力会阻止成型压力向下传递, 在压制的初始阶段, 外压力远远大于内外摩擦力, 颗粒很容易向下发生位移, 同时内部橡胶片也被带动往下快速地移动, 随着炸药被压缩的同时, 颗粒间产生越来越大的颗粒间作用力, 内摩擦力也随之增大, 颗粒以及橡胶片的移动也越来越慢。由于模具与颗粒间的外摩擦力方向是向上, 而颗粒间的内摩擦力方向是

随机的,所以中间区域的颗粒向下发生的位移比靠近模具壁附近区域颗粒发生的位移要大,这也使得橡胶片中部下降的幅度大于周围的区域。

## 4 结 论

利用 X 射线层析成像技术观察了 TATB 造型颗粒压制过程中颗粒变形和结构演变,得到以下结论:

(1) 在整个压制过程中造型颗粒基本保持了完整,颗粒受压变形后的长径方向基本沿着模具的径向排布。模具中部的颗粒主要发生向下的压实变形,靠近模具壁的颗粒在发生向下的压实变形同时还会发生拱起变形,持续加压后,被拱起的颗粒又由于上方颗粒向下挤压继续向下的运动。

(2) 一次孔隙变化较慢,二次孔隙变化较快,孔隙率减少主要发生在压制初期,上部、中部和下部分别减少了 73%、62% 和 58%,在压制的每个阶段孔隙率都是沿轴向由上至下递增,压制结束后,上部、中部和下部孔隙率分别为 0.03%、0.53% 和 1.40%。

(3) 颗粒主要在压制方向(轴向)发生位移,在径向上位移和形状变化不大。模具与颗粒间的外摩擦力方向是向上,而颗粒间的内摩擦力方向是随机的,这使得中间区域的颗粒向下发生的位移比靠近模具壁附近区域颗粒发生的位移更大。

### 参考文献:

[1] Baillou F, Dartyge J M, Spycykerelle C, et al. Influence of crystal defects on sensitivity of explosives[C]//Tenth Symposium (International) on Detonation, Boston, 1993: 816-823.

[2] 曹阳, 聂福德, 李越生. TATB 基复合材料的微观结构分析[J]. 火炸药学报, 2004, 27(3): 58-61.  
CAO Yang, NIE Fu-de, LI Yue-sheng. Analysis of microstructure of TATB based PBX[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2004, 27(3): 58-61.

[3] 梁华琼, 韩超, 雍炼, 等. 高聚物黏结炸药的压制成型性[J]. 含能材料, 2010, 33(4): 44-47.  
LIANG Hua-qiong, HAN Chao, YONG Lian, et al. Pressing mechanism of polymer-bonded explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2010, 33(4): 44-47.

[4] 张鹏, 赵峰, 白树林. PBX 代用材料动态力学行为和微观结构的实验研究[J]. 高压物理学报, 2007, 21(1): 20-28.  
ZHANG Peng, ZHAO Feng, BAI Shu-lin. Experimental study on the microstructures and dynamic behavior of a PBX substitute material[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2007, 21(1): 20-28.

[5] 温茂萍, 李明, 庞海燕, 等. 炸药件力学性能各项同异性试验研究[J]. 含能材料, 2006, 14(4): 286-289.  
WEN Mao-ping, LI Ming, PANG Hai-yan, et al. Study on mechanical isotropic of PBX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2006, 14(4): 286-289.

[6] 温茂萍, 庞海燕. 等静压与模压 JOB-9003 炸药力学性能比较研究[J]. 含能材料, 2004, 12(6): 338-341.  
WEN Mao-ping, PANG Hai-yan. Comparative study on mechanical properties of two kinds of JOB-9003 shaped by is static pressing and mould pressing[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(6): 338-341.

[7] Antoine E D M, Van der Heijden, Richard H B. Crystallization and characterization of RDX, HMX, and CL-20[J]. *Crystal Growth & Design*, 2004, 4(5): 999-1007.

[8] Proud William G, Walley Stephen M, Williamson David M, et al. Recent trends in research on energetic materials at Cambridge[J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2009, 6(1): 67-102.

[9] Peterson P D, Fletcher M A, Roemer R L. Influence of pressing intensity on the microstructure of PBX9501[J]. *J Energ Mater*, 2004, 21: 247-260.

[10] Burnside N J, Son S F, Asay B W, et al. Particle characterization of pressed granular HMX[J]. *Shock Compression of Condensed Matter*, 1997: 571.

[11] 陈鹏万. 高聚物粘结炸药的微观结构和力学性能[R]. 中科院力学所博士后工作报告, 2001.  
CHEN Peng-wan. The microstructure and mechanical properties of PBX[R]. The postdoctoral research reports of institute of mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2001.

[12] 陈鹏万, 黄风雷. 含能材料损伤理论及应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.  
CHEN Peng-wan, HUANG Feng-lei. Damage theory and applications of energetic materials[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006.

[13] 梁华琼, 周旭辉, 唐常良, 等. HMX 钢模压制的微观结构演变的研究[J]. 含能材料, 2008(2): 188-190.  
LIANG Hua-qiong, ZHOU Xu-hui, TANG Chan-liang, et al. Micro-structural evolution of HMX during pressing[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2008(2): 188-190.

[14] 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 behavior and deformation and failure mechanisms of polymer bonded explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2000, 8(4): 161-164.

[15] Baer M R. Modeling heterogeneous energetic materials at the mesoscale[J]. *Thermochimica Acta*, 2002, 384: 351-367.

[16] Proud W G, Palmer S J P, Field J E, et al. AFM studies of PBX systems[J]. *Thermochimica Acta*, 2002, 384: 245-251.

[17] Renlund A M, Miller J C, Trott W M, et al. Characterization of thermally degraded energetic materials[R]. DE98003979, 1997.

[18] 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[A]. Proceedings of 11th Symposium on Detonation [C]//Snowmass, UT, 1998, 66-75.

[19] 张伟斌, 田勇, 杨仍才, 等. RDX 晶体颗粒压制密度分布的  $\mu$ CT 试验研究[J]. 含能材料, 2012, 20(5): 565-570.  
ZHANG Wei-bin, TIAN yong, YANG Reng-cai, et al. Study on pressing density distribution of RDX crystals with a cone beam micro focus computed tomography[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(5): 565-570.

[20] 张伟斌, 杨雪海, 杨仍才, 等. 单向温模压 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 die compaction[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(2): 202–205.
- [21] 兰琼, 戴斌, 杨白凤, 等. PBX 裂纹愈合行为探索研究[J]. 含能材料, 2013, 21(2): 205–208.  
LAN Qiong, DAI Bin, YANG Bai-feng, et al. Healing of cracks in PBX by thermal pressure aging treatment[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(2): 205–208.
- [22] 田勇, 刘石, 张伟斌, 等. TNT 炸药熔铸结晶成型过程  $\mu$ CT 试验研究[J]. 含能材料, 2009, 17(2): 173–177.  
TIAN Yong, LIU Shi, ZHANG Wei-bin, et al. Experimental study on crystallization of casting TNT explosive during solidification molding by high-resolution X-ray computed tomography [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(2): 173–177.
- [23] 何映平. 天然橡胶加工学[M]. 海南: 海南出版社, 2007.  
HE Ying-ping. Principles of natural rubber processing[M]. Hainan: Hainan Press, 2007.

## X-ray Tomography of Structural Evolution of TATB Granules During Compaction

DAI Bin<sup>1,2</sup>, TIAN Yong<sup>1</sup>, ZHANG Wei-bin<sup>1</sup>, LAN Lin-gang<sup>1</sup>, LAN Qiong<sup>1</sup>

(1. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China; 2. Graduate School of CAEP, Mianyang 621999, China)

**Abstract:** The triamino trinitrobenzene(TATB) granule deformation and structural evolution during compaction process were studied by x-ray tomography technology and deformation characteristics of deformable material. The CT images show that the deformation orientations of granules in the central part are mostly downwards. In the meanwhile, there are arching between the granules near the edge of mould. The porosity changing mainly happens in the initial stage of compaction with the forming pressures of 0 MPa to 10 MPa, and the porosity of each part(5, 20, 35 mm away from the top surface) decreases 73%, 62% and 58%, respectively. During each compaction process, the porosity increases from the top down and the displacements mainly take place along the axial direction. Friction between the mould and granule is greater than that between the granules, which makes the displacements of the granules in the central part larger than granules at other parts. Results show that X-ray tomography can nondestructively characterize inner structural evolution of TATB granules during compaction. Morphology changes and contact relations of granules reveal the interaction mode between the granules. The displacements of granules indirectly reflect the internal stress transfer in the explosive.

**Key words:** TATB granules; cold compaction; structure evolution; X-ray tomography

**CLC number:** TJ55

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.10.012