

doi: 10.7690/bgzd.2024.08.018

# 高聚物粘结炸药压制成型工艺实验研究综述

曾升<sup>1</sup>, 游国强<sup>1</sup>, 温彤<sup>1</sup>, 黄求安<sup>2</sup>, 史慧芳<sup>2</sup>

(1. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044;

2. 中国兵器装备集团自动化研究所有限公司智能制造事业部, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 为提高高聚物粘结炸药 (polymer bonded explosive, PBX) 药柱生产安全性以及弹药的毁伤威力, 对压制成型方法进行分析。介绍药柱密度与力学性能关系的研究现状, 并分别介绍成型方法和工艺参数对药柱成型质量影响、压制成型过程炸药颗粒损伤 2 方面的研究进展。结果表明, 该研究可为 PBX 压制成型机理的深入研究和技术开发提供参考。

**关键词:** 高聚物粘结炸药; 压制成型; 成型质量; 工艺参数; 颗粒损伤

**中图分类号:** TJ55 **文献标志码:** A

## Review of Experimental Research on PBX Pressing Process

Zeng Sheng<sup>1</sup>, You Guoqiang<sup>1</sup>, Wen Tong<sup>1</sup>, Huang Qiuan<sup>2</sup>, Shi Huifang<sup>2</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Intelligent Manufacturing Department of Automation Research Institute Co., Ltd. of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** In order to improve the production safety of polymer bonded explosive (PBX) grain and the damage power of ammunition, the compression molding method was analyzed. The research status of the relationship between the density and the mechanical properties of the explosive column is introduced, and the research progress of the influence of the molding method and process parameters on the quality of the explosive column and the damage of the explosive particles in the process of compression molding are introduced respectively. The results show that the study can provide a reference for the further study and technology development of the mechanism of PBX compression molding.

**Keywords:** PBX; compression molding; molding quality; process parameters; particle damage

## 0 引言

高聚物粘结炸药 (PBX) 是由含能炸药颗粒、聚合物粘结剂和少量其他添加剂组成含能材料<sup>[1]</sup>。炸药颗粒是 PBX 的主体, 常见的有黑索今 (RDX)<sup>[2-4]</sup>、奥克托今 (HMX)<sup>[5-6]</sup> 和三氨基三硝基甲苯 (TATB)<sup>[7-9]</sup> 等。聚合物粘结剂为高分子材料, 包括橡胶、塑料和聚氨酯<sup>[10]</sup> 等, 通常添加量为 5~10 wt%。在某种意义上, PBX 属于颗粒填充度较高的复合材料。

PBX 成型质量对于后期使用性能至关重要, 如炸药装药的发射安全性以及弹药的毁伤威力<sup>[11]</sup>, 其成型质量除了与药剂配方有关外, 还与工艺方法及工艺参数密切相关。PBX 目前主要通过压制或浇铸方法成型, 其中压制成型有利于制备高密度、高力学性能的炸药部件。现有认知表明, PBX 压制成型是包覆粘结剂的炸药颗粒在热-力耦合作用下移动、变形、致密化和粘结一体化等多种行为的集合, 其间还伴随着炸药颗粒的局部破碎损伤, 是一个复杂的动态过程。

目前, 虽然国内外已经开展了不少相关研究, 但关于 PBX 成型过程及缺陷产生的力学机理和材料机制并不完全清楚, 基本还处于“黑匣子”或者“灰匣子”状态, 工业生产实际中进行工艺参数和品质调控依然以经验和大量试错实验为主, 压制生产中的安全事故偶有发生, 缺乏足够的理论支撑。

笔者对 PBX 压制成型实验研究进展进行文献整理和综述, 介绍了药柱密度与力学性能之间的关系, 并重点综述了成型方法和工艺参数对药柱成型质量影响、压制成型过程炸药颗粒损伤 2 方面的研究进展, 旨在为 PBX 压制机理的深入研究和技术开发提供参考。

## 1 药柱密度与力学性能的关系

研究表明: 无论何种成型方法制备的 PBX 药柱, 药柱成型密度对力学性能具有重要影响, 在一定范围内, 提高药柱成型密度有利于力学性能提高。早期, Thompson 等<sup>[12]</sup> 和 Olinger<sup>[13]</sup> 都探究过 PBX

收稿日期: 2024-04-22; 修回日期: 2024-05-25

第一作者: 曾升 (1995—), 男, 重庆人, 博士。

药柱密度与力学性能之间的关系。Thompson 等采用 2 种成型方法，等静压和模压的工艺制备出 PBX9501 药柱，统计发现，随着药柱密度提高，大部分样品拉伸强度和拉伸模量以及压缩强度和压缩模量均呈增长趋势；而少量样品拉伸强度和拉伸模量先降后增，压缩强度和压缩模量先增后降但并没有深入探讨这些少量药柱性能变化规律有差异的原因，单从文献中初步分析，可能是测试结果误差波动较大，而作图时取值为平均值，可能存在一定的差异，导致最终分析变化规律时出现偏差。Olinger 则是延长保压时间来获得不同密度的 PBX 药柱，并通过线性拟合得到密度与拉伸强度之间呈正相关，与压缩强度之间亦如此。国内学者也开展了相关研究，涂小珍等<sup>[14]</sup>对密度指标范围内的某 TATB 基 PBX 进行了 45 °C 高温拉伸性能测试，结果显示，样品在 45 °C 下的拉伸强度随密度增大呈增强趋势，拉伸模量和拉伸破坏应变随密度变化不明显；从药柱高温拉伸的断面分析，失效原因一部分是由于炸药晶体断裂分离，另一部分是粘结剂脱粘，且药柱密度越高，粘结剂脱粘现象越少，拉伸强度则越高，反之则反。王芳芳等<sup>[15]</sup>在研究药柱老化现象时也发现类似的规律：药柱在老化过程中，如果密度降低，力学性能降低；如果密度提高，抗压和抗拉强度得到提高。该作者分析认为，在药柱老化过程中会发生一系列物理化学变化，如后固化、降解断链和氧化交联作用，造成药柱密度发生显著变化：当降解断链占主导作用时，密度减低，药柱力学性能相比老化前有所降低；当氧化交联为主时，密度提高，力学性能提高。其本质上在于老化过程中粘结剂分子链的行为影响了粘结强度，从而宏观上表现为药柱密度和力学性能变化。

总之，药柱密度与力学性能之间基本呈正相关的关系，其机理应该是：随着密度提高，一方面药柱内部孔隙率下降，减少了内部潜在裂纹源数量，同时提高了受载时的有效承载面积；另一方面粘接强度提高，粘结剂在应力作用下的脱粘现象减少，从而提高了药柱承载能力。

## 2 成型工艺对 PBX 成型质量的影响

PBX 成型过程中，使用合适的成型方法和工艺参数制备 PBX 是确保成型质量的基础和关键。实际生产中，常用的 PBX 压制成型方法主要有模压和等静压：前者采用机械压力，工艺过程及装备相对简单、生产效率和尺寸精度高，但压力均匀性相对更

低，炸药性能的各向异性倾向更大；后者压力均匀性高，炸药的各向异性倾向低<sup>[16]</sup>，但工艺装备较为复杂，产品加工余量大，生产效率更低，成本往往更高<sup>[17-18]</sup>；主要工艺参数有压力、温度、保压时间和循环次数等，这些工艺参数会对药柱成型质量产生很大影响，如加载在冲头上的压力过大或过小，可能导致药柱内部结构发生改变，出现密度不均匀、颗粒破裂损伤，从而降低成型制品质量等问题；保压时间和压制温度主要对炸药颗粒延展性和粘结剂流动性产生重要影响<sup>[19]</sup>。

Olinger<sup>[13]</sup>用模压和等静压的方法，综合研究了压力、温度、保压时间和循环次数对药柱密度的影响，结果显示：增加压力、提高压制温度、增加循环次数以及延长保压时间都有利于提高 PBX 密度，获得力学性能更高的药柱，且使用高的压力值密度的增加速率更快，但随之会带来药柱内部结构发生破坏。延长保压时间密度增加速率降低，长时间保压主要对粘结剂产生影响，一方面，粘结剂在炸药颗粒间能够充分流动，填充间隙，并与炸药颗粒界面结合更好，提高了压制密度；另一方面，粘结剂的润滑作用削弱了炸药颗粒之间的摩擦，促进颗粒流动和重排，减少了颗粒的裂纹、破碎及内应力，从而表现出较好的力学性能。高温的作用机理与延长保压时间类似，主要影响晶体颗粒的延展性和粘结剂粘度。此外，还发现虽然药柱整体密度得到了提高，但药柱内部的密度分布不均匀，如图 1 和 2 所示，这也是影响药柱成型质量的重要问题，目前尚未有完整系统的机理解释。

延长保压时间和循环次数虽能有效提高药柱密度，但不可避免会降低生产效率；提高压力虽然不影响生产率，但可能增加炸药晶体破裂损伤；因此，一些研究者把焦点放在了温度对压制密度的影响上。

较高的压制温度能够明显降低样品孔隙率<sup>[20]</sup>，且在升温过程中，孔隙率的降低和密度的提高存在一个突变温度，该突变温度可能与粘结剂的比例有关，当压制温度高于突变温度时，孔隙率降低变得缓慢，密度小幅度提高。庞海燕等<sup>[21]</sup>以 HMX、氟橡胶 (F2311) 和其他添加剂 (装药量为 1.495 g，质量比为 90:5:5) 制备的造型粉为原料，分别在常温冷压和 80 °C 热压。如图 3 所示，80 °C 下热压的样品压缩强度相比常温下高出近一倍，密度也有所提高，更接近炸药的理论密度 (1.874 g/cm<sup>3</sup>)，高温下造型

粉之间的相互摩擦减小，降低了粘结体系的应力梯度，尤其是当压制温度超过粘结体系的熔融温度后，粘结体熔化，填充粉粒间隙，提高致密度；因此，压制温度越高，压制样品的密度和压缩强度越高。由此来看，粘结剂作为 PBX 中的辅助材料，在成型过程中起到了关键作用，成型过程中自身性质的变化决定了与炸药晶体之间的连接质量，从而改善药柱密度，优化药柱成型质量。此外，不同的装药量也会影响样品成型后的密度和压缩强度，在相同条件下，装药量越少，样品密度越大，破坏强度越高，这是由于造型粉颗粒间的摩擦导致压制过程中样品内部存在应力梯度，即样品表面的应力大于中部的应力，而小样品的高度较低；因此，应力梯度较小，承受的压力更加均匀，裂纹愈合越充分，从这个方面来看，药柱内部密度不均匀现象有部分原因可能来源于此。

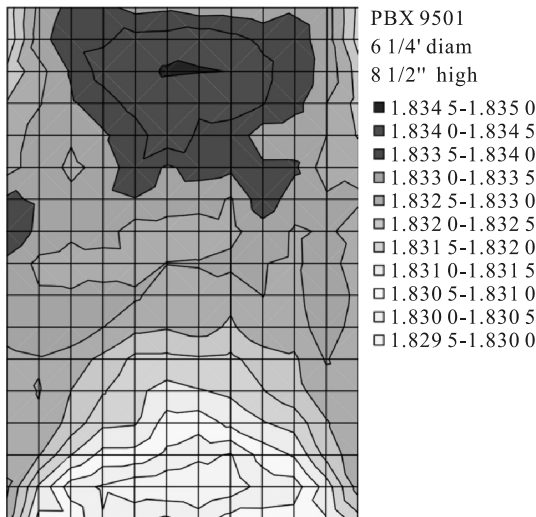


图 1 PBX9501 药柱的密度分布

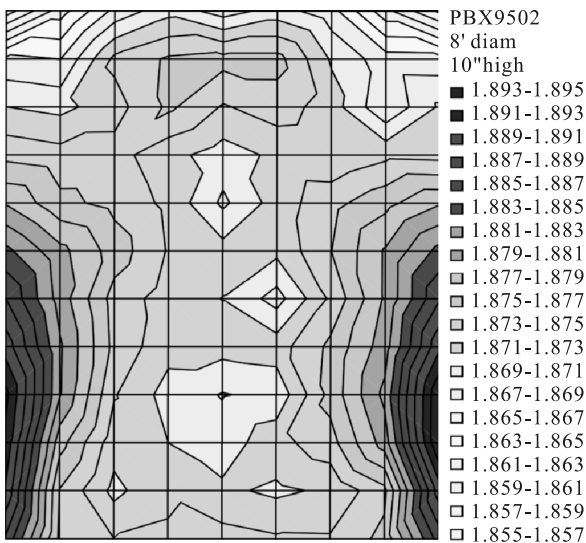


图 2 PBX9502 药柱的密度分布

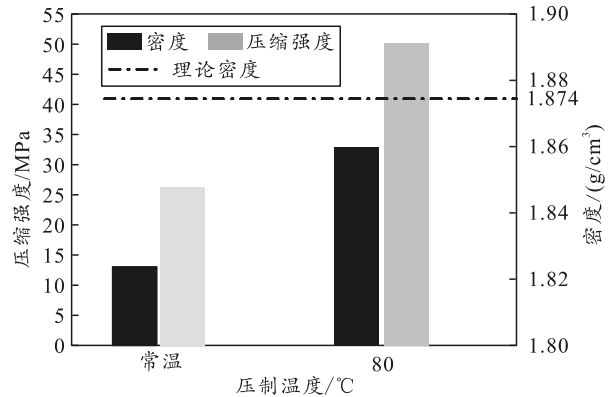


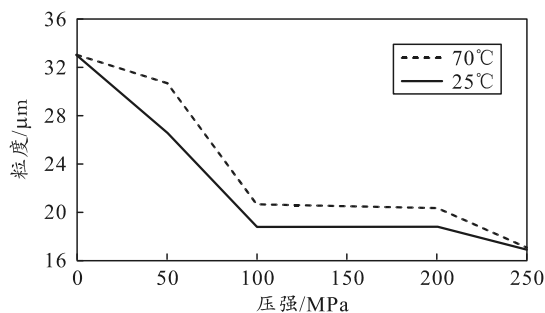
图 3 压制温度与密度和压缩强度关系

对工艺参数采用单一变量的方法来探究和调控药柱成型质量，容易导致实验大量重复且很难在此基础上进一步提高力学性能，而且不同的炸药晶体、粘结剂和添加剂组成的药柱适用的工艺参数也不一样，只有找到各工艺参数的变化对药柱的影响规律后，配合使用各工艺参数，更高效地探讨其对药柱成型质量的影响。Thompson 等<sup>[12]</sup>认为压制温度对 PBX 药柱力学性能的影响程度大于延长保压时间；因此，采用较高的压实温度和较短的保压时间配合，使得颗粒体系具有更好的流动和熔合粘接力，相比仅用高温或延长保压时间制备的药柱，拉伸强度和拉伸模量均得到了提高。

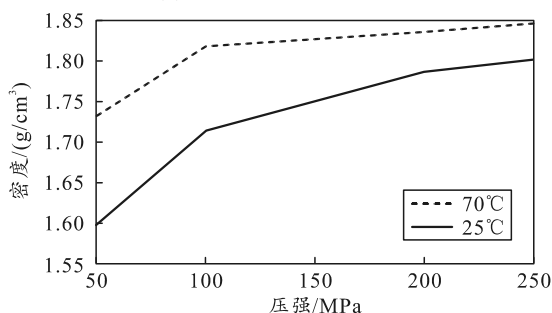
梁华琼等<sup>[22]</sup>探究了不同压力和温度的配合下，药柱的粒度大小和密度变化情况，根据作者所得数据制得如图 4 所示的图像。成型后颗粒的平均粒径在压力作用下逐渐减小，压力越大，颗粒的破碎及孪晶的形成现象越严重，从而改变了晶体颗粒的粒度分布。冷压过程中颗粒的破碎比热压更严重，热压样品具有更高的致密度，说明高温下粘结剂软化，流塑性得到了改善，在致密化压制成型过程中起到了润滑作用。此外，随压力增加密度增加率降低，这与 Olinger 得到的“高的压力值密度的增加速率更快”有所不同，原因可能是 Olinger 所研究的压强范围在 80~140 MPa 之间，而梁华琼等所探究压强范围更广，在 50~250 MPa 之间；因此，二者得出的变化规律具有差异，同时也表明了较高的温度和相对低的压力配合能够获得成型质量更好的药柱。

减小药柱内部粉粒间的间隙是提高成品密度的重要条件，除了通过温度、压力等方法减小间隙，王蔚等<sup>[23]</sup>采用超声波辅助技术，期望在成型过程中减小粉粒间隙，结果发现：超声加上预压力 10 MPa 的 C 密度高于无超声无预压力的 A 和有超声无预压

力的 B；有超声无预压的 B 密度低于无超声波无预压力的 A，其原因可能是由于样品单独在超声振动下，原有的孔隙虽然被消除，但在样品其他部位又引起新的孔隙；因此，对样品施加超声的同时，需对其加载预压力，从而抵消因超声加载引起的新的孔隙。等静压和模压方法虽然都能制备出合格的 PBX 药柱，但在特定工况环境下的力学性能和内部结构仍有差异，温茂萍等<sup>[24]</sup>采用等静压和模压 2 种工艺压制成型了 HMX 基 PBX 炸药，发现采用等静压方法制备的炸药高温性能更优，而力学性能出现差异的原因有可能就是成型方法导致的内部结构不同；另外，无论是等静压还是模压，PBX 的拉伸、压缩和三点弯曲等力学性能随着温度的升高呈降低趋势，该文献的结果与大多数研究有所不同，作者也未对其原因进行深入探讨。此外，在炸药中添加功能助剂的方法，使粘结剂与晶体界面结合更紧密，提高炸药的机械强度和韧性<sup>[25]</sup>，获得优质的成型药柱，这也侧面验证了界面结合强度会对 PBX 力学性能产生一定影响。



(a) 粒度随压强的变化



(b) 密度随压强的变化

图 4 温度和压力对成型后粒度分布及密度的影响<sup>[22]</sup>

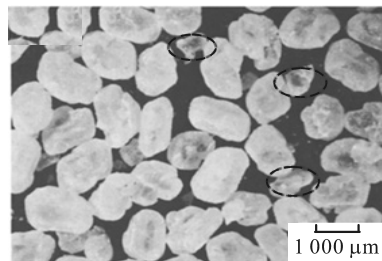
总之，成型工艺方法和工艺参数是决定药柱最终质量的关键因素。等静压成型方法比机械加压方式更有利于提高药柱品质，但生产成本低、效率低。成型工艺参数能够在一定程度上提高药柱质量，高的压制温度有利于颗粒间的流动与熔合；增加压力能填充间隙，促进颗粒间结合反应；虽然延长保压时间和增加循环次数都能够提高药柱质量，但相比

于调控温度和压力，延长保压时间和增加循环次数大大降低生产效率，增加成本。因此，实际生产中，抓住影响成型质量的主要因素，将不同的成型方法与工艺配合使用，才能获得高品质的成型药柱。

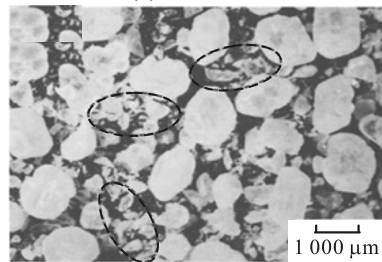
### 3 压制过程中的颗粒损伤

如前所述，现有许多研究结果显示，PBX 药柱的压制密度越高，其强度越高；但也有研究表明，随着压制压力和药柱密度增加，炸药晶体颗粒还可能发生破裂损伤，主要表现为炸药晶体颗粒与粘结剂的脱粘损伤（沿晶断裂）、晶体颗粒自身的断裂损伤（穿晶断裂）、孪晶带和孔隙等损伤形式<sup>[26]</sup>，对力学性能和爆轰性能产生不利影响<sup>[27-29]</sup>。一般来说，炸药晶体颗粒与粘结剂组成的混合体系在压制成型过程中可分为 3 个阶段：1) 颗粒发生明显流动，大小颗粒之间互相填充并重排；2) 颗粒的损伤破碎阶段，随着颗粒间隙的减少，颗粒间的作用力逐渐增大，颗粒出现裂纹或断裂，以释放其受到的压力；随着压力的进一步提高，颗粒破碎达到一定程度，颗粒间基本无间隙；3) 压实阶段，这一阶段也存在晶体的损伤断裂，但没有第 2 阶段产生的多。

20 世纪 80 年代，Elban 等<sup>[30]</sup>用 900 μm 左右的粒状 HMX 进行了压缩实验研究，结果发现，即使在较低的压力下（压力低于 1.1 MPa、压缩率低于 80%），颗粒就出现了明显的裂纹损伤，如图 5 所示，压力提升后颗粒损伤明显增多，较高的压力导致粗大颗粒分裂为弥散分布的细小颗粒孪晶。



(a) 0.83 MPa



(b) 1.07 MPa

图 5 900 μm 左右的粗大 HMX 颗粒在较低压强下开裂的实验结果

Burnside 等<sup>[31]</sup>以平均尺寸相对较小 HMX 颗粒

为对象, 约 200  $\mu\text{m}$ , 研究了颗粒在压制压力下的致密化和开裂损伤; 同样的, 高的压力虽然对颗粒的压实效果更显著, 拉伸性能更好, 但随着压力增大, 药柱密度提高, 炸药颗粒的平均尺寸减小, 颗粒在压力作用下相互摩擦、挤压和剪切, 内部出现明显的开裂和损伤(如图 6 所示), 这种损伤随着压力增加越发严重, 大幅降低了药柱的力学性能。研究发现: 压力变化主要对弹性孪晶带产生影响, 当压力增加后, 受晶体缺陷的影响, 孪晶变形被抑制, 发生断裂, 压力越大, 断裂就越严重, 断裂裂纹产生位置主要是沿粘结剂与颗粒晶体的界面传播, 少部分沿颗粒晶体和粘结剂内部传播<sup>[32-34]</sup>, 且颗粒间接触点和孪晶晶面都易存在应力集中。也就是说, 粘结剂脱粘一般发生在大颗粒晶体边缘, 也有可能是在颗粒的多个位置成核, 随着载荷的增加裂纹生长并贯通。

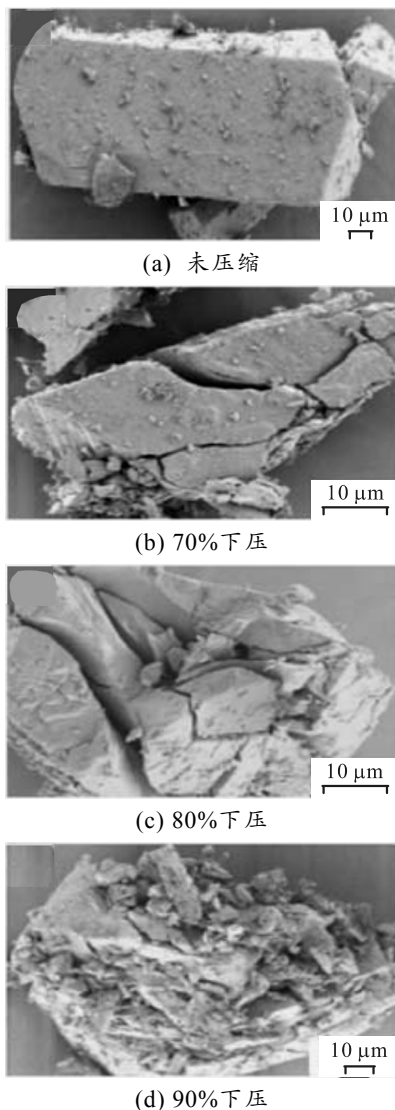


图 6 不同压实密度下颗粒开裂 SEM 图

也有学者研究了减少颗粒损伤的方法, Skidmore 等<sup>[35]</sup>采用模压成型在常温和 90  $^{\circ}\text{C}$  分别压制 PBX 颗粒, 结果表明, 提高压制温度有利于降低炸药颗粒在压制过程中的破裂。常温下, 压制到 2% 孔隙率时, 出现明显颗粒破裂; 而在 90  $^{\circ}\text{C}$  高温时, 压制到 1% 孔隙率时才出现了颗粒破裂。这是因为高温下, 粘结剂受热软化, 在压制过程中起到一定的润滑作用, 降低了颗粒晶体的破碎程度, 促进颗粒在压制过程中的重新排列, 从而增大了 PBX 的致密度; 同时, 颗粒晶体间界面以及晶内的其他非连续界面上能够发生化学变化, 产生晶体的融合、变形及损伤自愈合等现象。张伟斌等<sup>[36]</sup>用 X 射线微层析成像技术(X- $\mu\text{CT}$ )无损研究了 TATB 造型颗粒经单、双向钢模温压法和软模温等静压法成形的 PBX3 维微细结构特征, 在相同温度(85  $^{\circ}\text{C}$ )和压力(90 MPa)下, 经单向或双向钢模温压样品均存在初始细小裂纹和残余孔隙, 双向钢模温压样品残余孔隙数量由支撑端向压制端呈减小趋势, 尺度范围从百微米至毫米, 而软模温等静压成型样品未发现细小裂纹或残余孔隙, 避免了初始细观损伤; 因此, 软模温等静压成型更能有效地减少成型过程中颗粒损伤。

实际上在 PBX 成型过程中, 晶体断裂损伤产生的位置, 主要集中在炸药的上部(靠近压头)、底部(远离压头)和边缘部分, 而中心区域为所谓的安全区域, 晶体仅发生少量的断裂, 断裂后的晶体存在最小极限粒径, 很少有小于最小极限粒径的晶体存在。这说明晶体粒径分布达到某一级配时, 即使该级配是在压制过程中晶体断裂破碎后达到的, 这种合理的级配会增加颗粒间的接触点, 有利于分散压力, 减少晶体进一步损伤<sup>[37-38]</sup>, 且晶体粒度还会影响粘结剂脱粘的路径。从这方面来看, 级配装药方式有利于减少晶体损伤, 制备前, 使用双峰分布的晶体级配方式, 即将不同粒径的炸药晶体混合粘结, 小粒径晶体接近大粒径晶体间空隙时, 能够最大限度提升炸药晶体含量, 且适当增加小晶体的占比可以提高晶体的比表面积, 使炸药晶体在 PBX 中分布更均匀, 减少内部空隙, 提高制品致密度和性能<sup>[39-40]</sup>。

总之, 颗粒在成型时的损伤不仅影响药柱力学和爆轰性能, 而且可能增加工艺过程的安全风险; 此外, 还会在贮存过程中加速老化(易发生分解和变质), 不利于安全储存和后期使用性能的保障。合理选择成型方法和调控成型工艺参数有利于减少颗

粒损伤，如选择等静压或是模压、压力与温度控制。但目前对于颗粒的损伤机理尚不完全，亟待深入研究。

#### 4 结束语

PBX 压制成型可视为炸药颗粒、聚合物粘结剂和少量其他添加剂的混合物在热-力耦合外部刺激下的响应行为，包括了力学和材料层面最终的成型质量，如致密度、均匀性、内部缺陷、尺寸精度会直接影响其后续的使用性能和安全性；此外，炸药颗粒毕竟为含能材料，压制过程涉及热和高压，有一定的安全风险。从实验研究的角度，应深入开展以下工作：

1) PBX 压制成型品质参数与使用性能之间的精确对应关系及其机理研究：目前的研究表明 PBX 的成型质量对其使用性能和安全性都有直接影响，但大多停留在定性或半定量水平，缺乏精准定量的模型，且前者对后者的根本影响机理尚不明确，使得 PBX 品质控制缺乏精确理论指导。

2) PBX 压制过程的宏观力学行为及机理：生产实践中比较突出的密度不均和回弹变形 2 大问题都可归结为宏观尺度的问题，也是目前研究者们关注较多的问题；但由于缺乏实时研究手段，目前的实验研究大多采用事后观察表征，对于压制过程中炸药颗粒体系在外部热-力耦合作用下的移动、变形、局部损伤、致密化、粘结成型等具体行为难以深入研究，造成了过程“盲区”。建议采用或者开发新的实时研究方法，如基于射线或超声波等穿透能量的实时观察手段，对压制过程进行在线实时表征研究，探明 PBX 在压制过程的宏观力学行为及其机理。

3) 炸药颗粒细/微观力学及材料机理研究：目前从细观和微观层面对 PBX 压制过程的研究较少，这不利于从根本上揭示其机理。建议后续采用环境扫描/透射电镜(与聚焦离子束技术/FIB 相结合)等实时-微观研究手段，在加热条件下以多颗粒体系、单颗粒和亚颗粒(用 FIB 从颗粒局部取样)为对象，开展压制过程的实时显微观察，获得颗粒体在热-力耦合作用下的细观和微观力学响应特征、显微结构变化和损伤规律，探明其机理并建立细观/微观的热-力-材料模型。

4) PBX 压制成型工艺软件包和新方法开发：基于上述科学机理研究，清晰地掌握 PBX 压制过程的成型和缺陷形成机理，针对不同的配方体系开发具

有指导意义的工艺软件包，使实际生产过程脱离经验和试错模式。另外，产业界的需求永远是更高效、更高品质和更安全的生产技术和装备，这也是学术界不懈努力的方向。

#### 参考文献：

- [1] KANG G, NING Y J, CHEN P W. Meso-scale failure simulation of polymer bonded explosive with initial defects by the numerical manifold method[J]. *Computational Materials Science*, 2020, 173: 109425.
- [2] YAN Q L, ZEMAN S, ELBEIH A. Recent advances in thermal analysis and stability evaluation of insensitive plastic bonded explosives (PBXs)[J]. *Thermochimica Acta*, 2012, 537: 1-12.
- [3] ZHU W, XIAO J J, ZHU W H, et al. Molecular dynamics simulations of RDX and RDX-based plastic-bonded explosives[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 164(2-3): 1082-1088.
- [4] HOBBS M L, KANESHIGE M J, YARRINGTON C D. Large deformation and gas retention during cookoff of a plastic bonded explosive (PBX9407)[J]. *Combustion and Flame*, 2018, 198: 278-289.
- [5] WANG Z, CAO D L, XU Z S, et al. Thermal safety study on the synthesis of HMX by nitrourea method [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 137: 282-288.
- [6] KROONBLAWD M P, AUSTIN R A. Sensitivity of pore collapse heating to the melting temperature and shear viscosity of HMX[J]. *Mechanics of Materials*, 2021, 152: 103644.
- [7] PLASSART G, PICART D, GRATTON M, et al. Quasistatic mechanical behavior of HMX- and TATB-based plastic-bonded explosives[J]. *Mechanics of Materials*, 2020, 150: 103561.
- [8] FAN H, LONG Y, DING L, et al. A theoretical study of elastic anisotropy and thermal conductivity for TATB under pressure[J]. *Computational Materials Science*, 2017, 131: 321-332.
- [9] GASNIER J B, WILLOT F, TRUMEL H, et al. Thermoelastic properties of microcracked polycrystals. Part II: The case of jointed polycrystalline TATB[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2018, 155: 257-274.
- [10] KIM D, KIM H, HUH E N, et al. Effect of a polymer binder on the extraction and crystallization-based recovery of HMX from polymer-bonded explosives[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2019, 79: 124-130.
- [11] 孟庆均, 郭齐胜, 曹玉坤, 等. 装备在役考核评估指标体系[J]. *装甲兵工程学院学报*, 2018, 32(1): 18-24.
- [12] THOMPSON D G, OLINGER B, DELUCA R. The effect of pressing parameters on the mechanical properties of plastic bonded explosives[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2005, 30(6): 391-396.

- [13] OLINGER B. Compacting plastic-bonded explosive molding powders to dense solids, Report LA-14173[R]. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, USA, 2005.
- [14] 涂小珍, 韦兴文, 王培, 等. 成型密度对高聚物粘结炸药拉伸力学性能影响分析[C]// 全国危险物质与安全应急技术研讨会. 中国化学会; 中国工程物理研究院; 北京理工大学, 2013.
- [15] 王芳芳, 常海, 张林军, 等. 浇注 PBX 炸药老化过程中交联密度与力学性能的关系[J]. 火炸药学报, 2017, 40(2): 69-74.
- [16] 温茂萍, 李明, 李敬明, 等. 静压、模压某 HMX 基 PBX 炸药件力学性能各向同性[R]. 中国工程物理研究院科技年报, 2005: 432-433.
- [17] TIMOKHOVA M. I. Quasi-Isostatic Pressing Technique for Powdered Materials[J]. Refractories and Industrial Ceramics, 2003, 44(6): 364-366.
- [18] 孙建. 等静压炸药装药技术发展与应用[J]. 含能材料, 2012, 20(5): 638-642.
- [19] 武雪芳, 陈家宜. 定量风险评估标准探讨[J]. 上海环境科学, 2000, 19(4): 155-158.
- [20] 刘鹏华, 李云欣, 张浩斌, 等. 氟聚物黏结剂对 TATB 基 PBX 造型粉可压性的影响[J]. 火炸药学报, 2022, 45(3): 396-403.
- [21] 鹿海燕, 李明, 温茂萍, 等. 温度对 PBX 炸药压制的作用[J]. 兵器材料科学与工程, 2011, 34(1): 21-23.
- [22] 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.
- [23] 王蔚, 肖俊, 冉振, 等. 基于超声辅助等静压成型含能材料致密度的提升[J]. 含能材料, 2021, 29(6): 521-529.
- [24] 温茂萍, 鹿海燕, 敬仕明, 等. 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.
- [25] 蒙君暉, 周霖, 金大勇, 等. 功能助剂对 DNAN/RDX 熔铸炸药界面黏结强度的影响[J]. 含能材料, 2018, 26(9): 765-771.
- [26] 郭虎, 罗景润, 谢朝阳. PBX 细观损伤特征及表征方法研究综述[J]. 四川兵工学报, 2012, 33(1): 125-129.
- [27] CHEN P W, HUANG F L, DING Y S. Microstructure, deformation and failure of polymer bonded explosives[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(13): 5272-5280.
- [28] PETERSON P D, MORTENSEN K S, IDAR D J, et al. Strain field formation in plastic bonded explosives under compressional punch loading[J]. Journal of Materials Science, 2001, 36(6): 1395-1400.
- [29] 杨昆, 吴艳青, 黄风雷. HMX 晶体热致相变对损伤的影响[J]. 高压物理学报, 2022, 36(3): 8.
- [30] ELBAN W L, CHIARITO M A. Quasi-static compaction study of coarse HMX explosive[J]. Powder Technology, 1986, 46(2-3): 181-193.
- [31] BURNSIDE N J, SON S F, ASAY B W, et al. Particle characterization of pressed granular HMX [C]// AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 1998.
- [32] 朱敏, 邵照群, 黄璜, 等. 高聚物粘接炸药失效机理与寿命评估研究综述[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(2): 455-462.
- [33] 吴德俊, 陈愿, 徐森, 等. 老化对含铝温压炸药爆速及力学性能影响的研究[J]. 爆破器材, 2015, 44(3): 34-38.
- [34] TAN H, HUANG Y G, LIU C, et al. The Mori-Tanaka method for composite materials with nonlinear interface debonding[J]. International Journal of Plasticity, 2015, 21(10): 1890-1918.
- [35] SKIDMORE C B, PHILLIPS D S, HOWE P, et al. The evolution of microstructural changes in pressed HMX explosives[C]//11th International Detonation Symposium Snowmass Conference Center. US: Snowmass Colorado, 1998: 556-567.
- [36] 张伟斌, 李敬明, 雪海, 等. TATB 颗粒温压成形 PBX 的初始细观损伤[J]. 含能材料, 2015, 23(2): 202-204.
- [37] 柴涛, 张景林. HMX 粒度、粒度级配对混合传爆药性能影响的研究[J]. 中国安全科学学报, 2000, 10(3): 71-74.
- [38] 金浩博. 粒度及粒度级配对 HMX 基浇注 PBX 炸药的性能影响研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.
- [39] 王竟成. 高聚物粘结炸药力学性能的细观预测方法[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2018.
- [40] SIVIOUR C R, GIFFORD M, WALLEY S M, et al. Particle size effects on the mechanical properties of a polymer bonded explosive[J]. Journal of Materials Science, 2004, 39(4): 1255-1258.