

doi: 10.7690/bgzdh.2021.01.019

压药工艺参数对成型药柱质量的影响研究

岳晓媛^{1,2}, 张会锁¹, 黄鸿鑫¹, 张帆¹, 王蒙¹, 王彦杰³(1. 中北大学机电工程学院, 太原 030051; 2. 先进装药技术协同创新中心, 太原 030051;
3. 晋西集团江阳化工有限公司, 太原 030041)

摘要: 为解决弹药压装法技术中关键工艺参数的选择与控制问题, 对影响药粒压制成型质量的因素进行研究。以 PBX 炸药为例, 采用试验和仿真相结合的方法, 结合炸药的特性, 将 PBX 炸药粉末简化成有限个包覆有粘结剂的 HMX 球形颗粒, 建立炸药体系的 3 维细观模型, 对压药过程进行有限元仿真模拟, 得出压力和保压时间对药柱质量产生影响的规律。结果表明: 该研究可为弹药装药的研制与生产提供参考, 具有一定的实用价值。

关键词: 压药工艺; 数值模拟; 高聚物粘结炸药(PBX)

中图分类号: TQ560.6 **文献标志码:** A

Study on Influence of Explosive Pressing Technique Parameter on Quality of Press-forming Grain

Yue Xiaoyuan^{1,2}, Zhang Huisuo¹, Huang Hongxin¹, Zhang Fan¹, Wang Meng¹, Wang Yanjie²(1. College of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Collaborative Innovation Center for Advanced Charging Technology, Taiyuan 030051, China;
3. Shanxi Jiangyang Chemical Co., Ltd., Jinxi Industries Group Co., Ltd., Taiyuan 030041, China)

Abstract: In order to solve the problem of selection and control of key process parameters in ammunition press-fitting technology, the factors that affect the quality of pellet press-forming are studied. Taking the PBX explosive as an example, a combination of test and simulation, combined with the characteristics of the explosive, simplified the PBX explosive powder into a limited number of HMX spherical particles coated with a binder, and established a 3-dimensional mesoscopic model of the explosive system. The finite element simulation is used to simulate the pressure pressing process, and the rule that the pressure and pressure holding time have an effect on the quality of the pillar is obtained. The results show that the research can provide a reference for the development and production of ammunition charges and has certain practical value.

Keywords: explosive pressing technique; numerical simulation; polymer bonded explosive (PBX)

0 引言

压装法作为一种传统的装药方式, 因其具有生产周期短、适用炸药广, 以及药柱爆轰感度相对较高的优势, 仍然属于一种相对广泛且不可缺少的装药方式^[1]。装药质量直接关系到弹药性能, 如炸药装药的发射安全性以及弹药的毁伤效能^[2]。成型药柱质量除了与药剂配方有关外, 还与药柱的生产工艺及工艺参数的控制密切相关^[3]。获得精确的工艺参数是保障产品质量的关键。

在压药试验中, 压药工艺对药柱成型质量的影响因素很多, 如加载在冲头上的压力大小、保压时间等^[4]。压力过大或过小, 都可能使成型药柱的内部结构发生变化, 产生药柱密度不均匀等问题, 从而降低成型药柱的质量。在压制药柱过程中, 当压力已达到规定的数值时, 若保压一段时间, 则药柱

密度会因加载时间的增长而提高, 这是药柱的一种蠕变现象, 根据药柱在保压过程中的蠕变应变 ε 和应变率 $d\varepsilon/dt$, 可以衡量药柱在长期储存中保持其形状尺寸的能力, 其值越大, 则表示蠕变越严重, 即药柱的物理稳定性越差^[5-7]; 因此, 合适的保压时间是提高成型药柱质量的关键。

由于试验法成本较高、耗费时间长, 且存在偶然性等缺陷, 随着新技术的发展, 利用仿真法对压药过程进行数据仿真已经成为一种趋势。目前, 该方向的仿真研究大多是将药粉视为可压缩的连续体, 用连续体塑性理论解决粉体压制的问题^[8-9], 但是这种方法忽略了粉末的“颗粒性”以及颗粒的微观性质和颗粒间的相互关系。

为了使仿真结果更加贴近实际情况, 笔者采用试验与仿真相结合的方法, 根据 PBX 炸药的特性以及压药过程的影响因素, 将炸药简化成一颗颗近似

收稿日期: 2020-09-12; 修回日期: 2020-10-29

作者简介: 岳晓媛(1996—), 女, 山西人, 硕士, 从事装药仿真优化研究。E-mail: 2499686938@qq.com。

于球形的药粒，对炸药颗粒压制成型的过程进行数值模拟仿真，得到压力大小和保压时间对药柱质量产生影响的规律。

1 压药试验

1.1 试剂与仪器

试验对象是以 HMX 为基的 PBX 炸药粉末。其中的粘结剂用热塑性聚氨酯 (Estance)，炸药配方比为 95:5。试验用仪器：Atlas 手动液压机 (如图 1)、压机配套模具 (如图 2)、垫片、螺旋测微仪、电子天平。



图 1 Atlas 手动液压机



(a) 模具组成

(b) 模具

图 2 模具分装和组装

1.2 工艺试验参数

粉末质量： $m=0.07\text{ g}$ ；

松装密度： $\rho=1.1\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ；

压力大小： $p=50\text{ kg}$ ；

保压时间： $t=10\text{ s}$ ；

模具内腔： $\Phi=3\text{ mm}$ ， $h=9\text{ mm}$ ；

垫片厚度： $l=5\text{ mm}$ 。

1.3 试验过程

用电子天平称出 0.07 g 的 PBX 粉末，将其装入压药模具中，放置厚度为 5 mm 的垫片在模具上，将装有药粉的模具放置在压机上，加压到 50 kg ，保压 10 s 之后将药柱取出，用螺旋测微仪测量其高度并记录 (如图 3)。



图 3 螺旋测微仪测量药柱长度

在上述工艺条件下，得到合格的炸药柱。数值模拟仿真也是基于此试验工艺，通过设计仿真方案，

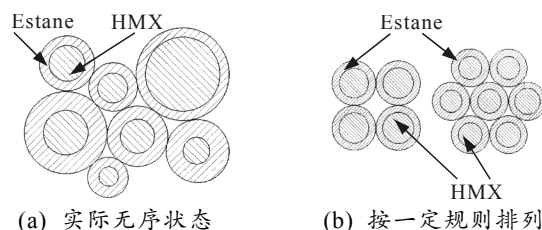
得到最佳工艺参数。

2 数值模拟计算

2.1 简化假设

粉末颗粒之间存在大量的孔隙。在药柱成型过程中，粉末材料应该被看作是一个非连续体，非连续体的变形过程非常复杂，需要将各个颗粒的变形、颗粒之间、颗粒与模具之间的相互作用协调起来进行整体研究^[10]；因此，需要建立以药粒为单位的模型。

根据试验结果，选择以 HMX 为基的 PBX 炸药作为研究对象。实际的 PBX 炸药颗粒应为随机的不规则形状，里面的 HMX 炸药颗粒大小不同、形状各异，外部包裹的 Estance 粘结剂也薄厚不均。如果要在仿真过程中考虑每颗药粒的形状和尺寸，随机性太强，会产生很大的计算量；因此，在仿真计算中假设每颗 HMX 药粒都是直径相同的球形，且每颗 HMX 药粒外部包裹的粘结剂也是薄厚均匀的。如图 4(a)所示，在自由装填条件下，实际炸药颗粒排列是随机、无序的。为减少计算量，在模型中需要假设药粒按一定的规则排列且药粒间有固定的接触类型，图 4(b)是球形药粒的矩形排列和正六边形排列方式^[11]。



(a) 实际无序状态

(b) 按一定规则排列

图 4 药粒 2 种排列方式

2.2 模型的建立

设定药粒直径为 1 mm ，呈正六边形排布，共排 10 层，初始松装高度为 10 mm 。建立药粒排布的模型如图 5 所示，内部为 HMX 药粒，外层为 Estance 粘结剂。

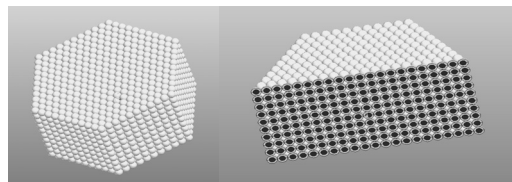


图 5 药粒模型

盛放药粒的模具为刚性柱形圆筒，高度为 12 mm ，厚度为 2 mm 。冲头也为 2 mm 厚的柱形刚体。装配好的模型如图 6 所示。

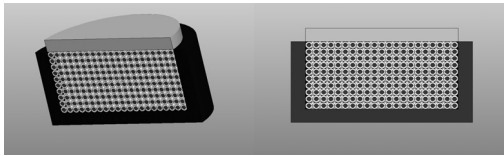


图 6 压药试验模型

2.3 仿真过程

建模画网完成后, 将其导入 Autodyn 软件进行仿真操作, 先为各个 Part 赋予材料, 每颗药粒由 HMX 以及外部包裹的粘结剂 Estance 组成。HMX 在软件自带材料数据库中可以找到, 这里选择带有失效模型的 HMX 材料。由于软件材料数据库中没有粘结剂材料, 需要自行新建。查阅资料得到 Estance 的材料参数见表 1,

表 1 粘结剂 Estance 的相关材料参数^[12]

| 参数 | 数值 |
|--|-------|
| 密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | 1.18 |
| 体积模量 K/GPa | 3.6 |
| 比热容 $C/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$ | 5 702 |
| 热导率 $\lambda/(\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-1})$ | 0.148 |
| 剪切模量 G/GPa | 0.27 |
| 瞬时剪切模量 g/GPa | 0.3 |

在模具上施加初始条件以及边界条件, 使模具始终保持速度为零。

根据 1.2 节工艺试验参数, 设计仿真压力大小, 试验中 50 kg 的力加载在直径为 3 mm 的药柱上, 换算得其压强为 70.74 MPa, 则设计方案分别以 50 和 100 MPa 的压力保压特定时间。在冲头上分别以 50 和 100 MPa 施加边界条件。

3 结果分析

3.1 小压力保压时间分析

从图 7(a)可以看出: 施加压力 50 MPa 时, 药粒在受压初期, 应力沿炸药颗粒间的接触面向刚性模具底板传播, 形成了多条应力链。同一个 PBX 炸药内部应力分布不均匀, 炸药体系顶部处于高应力状态, 底部部分应力较小。应力集中点主要集中在颗粒与刚性冲头的接触部分, PBX 炸药内部存在应力梯度, 各炸药颗粒之间应力差较大。保压至 56 μs 后, 药柱内部情况如图 7(b)所示, 这时压力基本已经传递至最底层, 且全部的炸药颗粒由于挤压产生了塑性变形, 应力梯度有明显下降, 越靠近模具底部所受压力越大; 因此, 内部受压未能达到均匀, 需要继续保压。如图 7(c), 对药柱保压 78 μs 后, 可以看出药柱内部受力云图呈现颜色基本一致, 炸药体系已基本处于紧实状态, 受力大小没有太大区

别, 但仍可以分辨出靠近模具的部分 (尤其是药柱底部) 受力要比内部大一些。

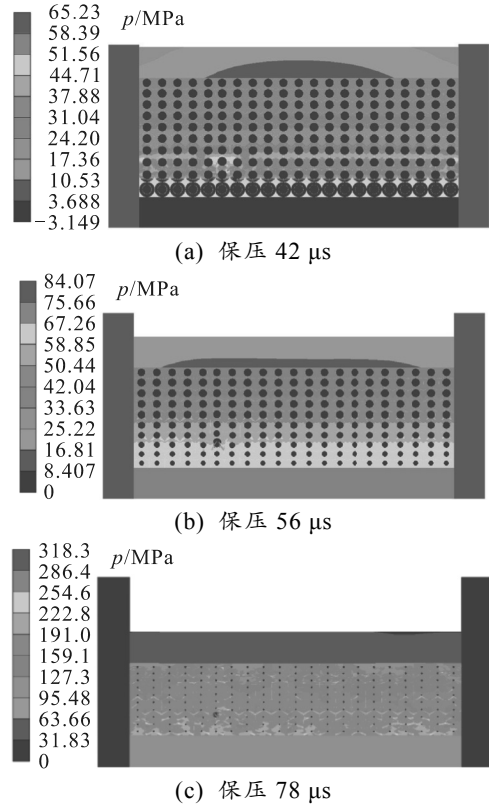
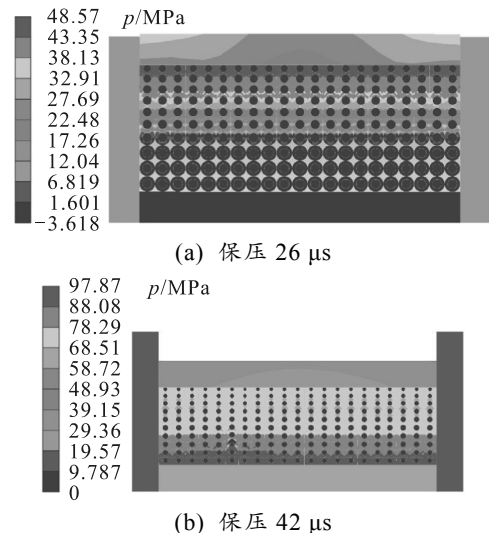
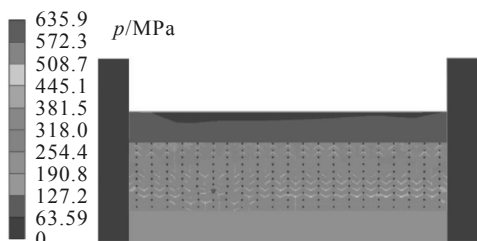


图 7 小压力下保压不同时长药柱内部受力情况

3.2 大压力保压时间分析

施加压力改为 100 MPa 时, 压力在药粒中传递得更快, 炸药体系也能更快地达到均匀密实的状态。保压不同时长药柱内部受力情况如图 8 所示。图 8(a)为压力还未传递到整个药柱。保压 42 μs 后, 压力已经传递至药柱的最底层, 但压力大小有明显分层, 产生应力梯度。当继续施加压力至 50 μs 时, 药柱已经达到了整体均匀的状态。





(c) 保压 50 μs

图 8 大压力下保压不同时长药柱内部受力情况

较之于小压力情况，炸药体系在大压力作用下整体变化趋势基本一致，不同点只是能够在更短的时间内达到均匀状态，得到颗粒均匀一致的药柱所需的保压时间更短。从压药过程来看，炸药体系在受压初期呈现出比较松散的状态，不论是药粒与模具，还是药粒之间接触面都很小，而在保压过程中，模具空间不断受到压缩，各颗粒之间受到压力越来越大，开始产生接触，受到相互作用力挤压而导致应力变化。应力集中首先出现在药粒与冲头接触的地方，继而出现在模具内壁以及底部，最后应力集中不再存在，整个炸药体系紧密接触且受力均匀。

3.3 压药历程分析

如图 9 所示，在炸药内部设置 4 个高斯点。可以看出：高斯点 1 和高斯点 2 位于炸药上靠近模具侧壁的位置，而高斯点 3 和高斯点 4 位于炸药上靠近冲头的位置。

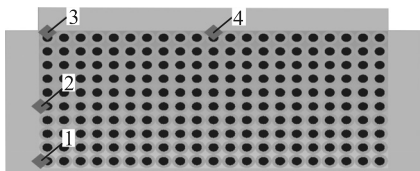


图 9 高斯点位置分布情况

图 10 分别是加压 50 MPa 时 4 个点处的药柱内部应力曲线。可以看出：高斯点 1、2 在压药初期应力为零，在压药后期才出现应力集中，其中高斯点 1 处的应力集中大小约为 180 MPa，高斯点 2 处的应力集中大小约为 200 MPa；高斯点 3 和 4 的应力集中在压药初期出现一次，在压药后期又出现一次。其中，高斯点 3 的第 1 次应力集中大小约为 80 MPa，第 2 次应力集中大小约为 200 MPa，高斯点 4 的第 1 次应力集中大小约为 75 MPa，第 2 次应力集中大小约为 250 MPa。说明炸药体系与刚性冲头接触的位置在压药初期就会出现一次应力集中，而容器侧壁接触的位置在压药后期才会出现应力集中，此结果与上述从云图中得到的结论基本一致。在整个压制过程中，内部应力最高达 250 MPa。

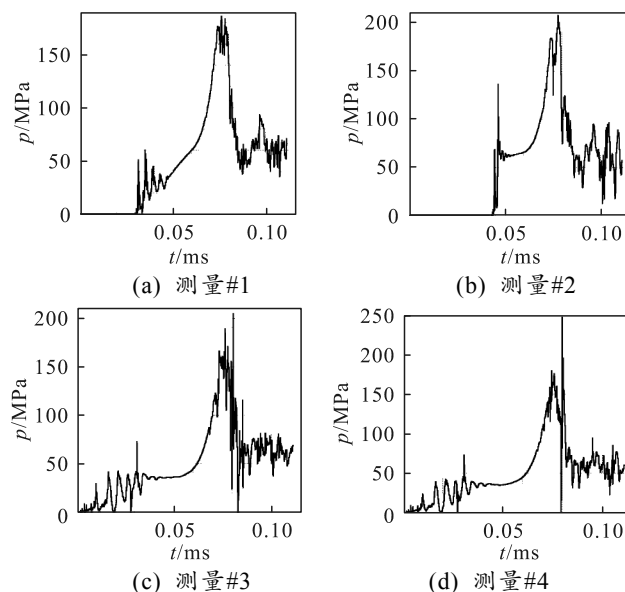


图 10 小压力下药柱内部 4 点处的压力

当加压 100 MPa 时，4 点处的内部应力曲线如图 11 所示。可以看出：药柱在加载大压力的情况下，整体趋势与加载小压力完全一致。这再次证实了“应力集中主要出现在药粒与约束面的接触部分；当药粒之间空隙被填满，药粒进入塑性变形后，药粒内部压力迅速升高且压力趋于一致”^[7]的理论。

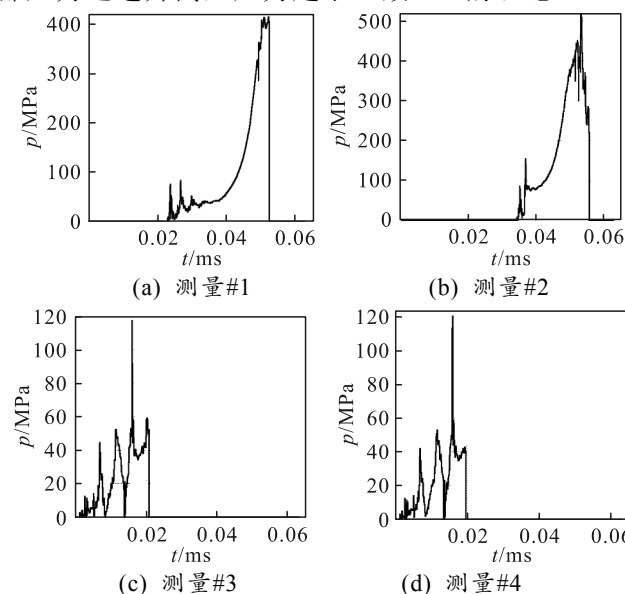


图 11 大压力下药柱内部 4 点处的压力

分析图 11 可知：高斯点 1、2 在压药后期出现的压力集中高达 410 和 510 MPa，高斯点 3、4 在压药初期压力集中分别达到 110 和 120 MPa，这些应力集中比小压力下对应位置高出很多，最大应力集中为 510 MPa，是小压力下最大应力集中的 2 倍以上。