

doi: 10.7690/bgzd.2026.02.002

## 黑火药压制成形实验因素分析

张雷, 王洋, 李威, 王勇, 郭华东, 张鼎

(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:** 为提高黑火药的成形质量, 对压制成型实验因素进行分析。对黑火药压制过程中的压制压力、保压时间、粉末药量和温度对黑火药成形质量的影响进行研究, 得到黑火药压制过程相关参数。研究结果表明: 在粉末药量为 7 g、常温时, 满足密度要求的最小压制压力为 490 MPa; 单次压制下, 保压时间对压坯密度影响较小, 并且压制 2 次不保压的压坯密度明显优于其他 3 种工艺; 当粉末药量为 8.5 g 时, 30 min 后的压坯密度相对于立即测量减小了 8%; 而 6.5、7.0、7.5 和 8.0 g 最多减小了 3%; 当粉末与模具温度为 50 °C 时, 在 150~400 MPa, 密度随压制压力的增加而呈现出线性增长。当压制压力超过 400 MPa 时, 压坯密度增加缓慢。对不同实验因素的分析结果, 为改进黑火药压药工艺和提高炸药部件质量提供了理论依据。

**关键词:** 压制压力; 成形质量; 保压时间; 温度

**中图分类号:** TJ412 **文献标志码:** A

## Analysis of Factors in the Experiment of Pressing Black Powder into Shape

Zhang Lei, Wang Yang, Li Wei, Wang Yong, Guo Huadong, Zhang Ding

*(Department of Intelligent Manufacture, Automation Research Institute Co., Ltd. of  
China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China)*

**Abstract:** To improve the forming quality of black powder, analyze the experimental factors of compression forming. Study the influence of pressing pressure, holding time, powder dosage, and temperature on the forming quality of black powder during the process of black powder pressing, and obtain relevant parameters of the black powder pressing process. The research results indicate that at a powder dosage of 7 g and room temperature, the minimum pressing pressure required to meet density requirements is 490 MPa; Under single pressing, the holding time has little effect on the density of the billet, and the density of the billet without holding after pressing twice is significantly better than the other three processes; When the powder dosage is 8.5 g, the green density after 30 minutes decreases by 8% compared to the immediate measurement; And 6.5 g, 7.0 g, 7.5 g, and 8.0 g decreased by up to 3%; When the temperature of the powder and mold is 50 °C, the density shows a linear increase with the increase of pressing pressure in the range of 150~400 MPa. When the pressing pressure exceeds 400 MPa, the density of the billet increases slowly. By analyzing different experimental factors, theoretical basis is provided for improving the black powder pressing process and enhancing the quality of explosive components.

**Keywords:** pressing pressure; forming quality; pressure holding time; temperature

### 0 引言

装药质量作为评价战斗部毁伤效能的重要指标<sup>[1-2]</sup>, 不仅影响着弹药的毁伤能力和精准打击能力, 而且影响着弹药的安定性和发射的安全性<sup>[3-4]</sup>。压装法作为弹药生产过程中的常用方法, 可以适用于多种炸药的压制成形<sup>[5-6]</sup>。

在压制过程中, 粉末在成形压力的作用下会发生塑性变形, 当卸载去除压力后, 可能引起炸药尺寸变大、产生裂纹等缺陷。并且温度<sup>[7-8]</sup>、压制压力<sup>[9-10]</sup>、保压时间<sup>[11-12]</sup>都会对成形质量造成影响; 因此, 应该合理地设定压装工艺参数, 保证成形质量<sup>[13]</sup>。

周忠彬等<sup>[14-15]</sup>对比了冷压和热压 2 种方式对

PBX 成形质量的影响。研究结果表明: 相对于冷压成形, 热压成形的药柱在 PBX 药柱的内部质量和静态力学性能更优。

白亮飞等<sup>[16]</sup>研究了冷压成形对 PBX 微结构的影响。研究结果表明: 在冷压成形中随着成形压力的增大颗粒损伤破碎并不严重。周志平等<sup>[17]</sup>采用实验与仿真相对比的方式研究了压装工艺参数对火药致密化的影响。研究结果表明, 增大保压时间和成形压力可以提高成形密度及一致性。

姚李娜等<sup>[18]</sup>通过对比不同温度下 RDX 基含铝炸药的抗压、抗拉及泊松比性能参数, 得到了温度对 RDX 基含铝炸药的影响规律。Thompson 等<sup>[19]</sup>研究了不同压制参数对炸药成形质量的影响, 并且

收稿日期: 2024-11-06; 修回日期: 2024-12-08

第一作者: 张雷(1989—), 男, 四川人, 硕士。

对压制成形的炸药部件进行了静态力学测试。研究表明,压装温度的影响大于保压时间。Lei 等<sup>[20]</sup>采用实验的方法验证了多次压制对 PBX 成形质量的影响。研究表明:多次压制可以在更短的时间内得到较高的成形密度,并且在第 2 次压制结束后,成形密度上升明显。

岳晓媛等<sup>[21]</sup>采用实验和仿真相结合的方式研究了压装技术中关键工艺参数对成形质量的影响,通过研究得到了成形压力和保压时间对成形质量的影响规律,对实际生产具有一定的指导意义。曹兴等<sup>[22-23]</sup>采用 Shima-Oyane 材料模型研究了压制速率、初始密度对炸药成形质量的影响。研究表明:Shima-Oyane 材料模型可以很好地模拟炸药的成形过程,提高初始密度有助于提高成形质量及一致性。

笔者以黑火药作为研究对象,分析成形压力、保压时间、药粉质量和压制温度对成形质量的影响,为下一步的工艺参数敏感度分析奠定基础。

## 1 试验

### 1.1 试验准备

试验用药:黑火药,压制前药粉堆积密度  $0.45 \text{ g/cm}^3$ ,压制后压坯理论密度  $1.7 \text{ g/cm}^3$ 。

模具:内腔直径 18 mm。

器具:烧杯、药勺、天平、卡尺、恒温水浴桶、温度计。

测量仪器:在线近红外分析仪(型号为 DA200)、接触式测温仪(UT320A)。

伺服压机:伺服压机采用交流伺服电机驱动,通过高精度滚珠丝杠把回转力改变为垂直方向力,依靠装载于驱动部位前端的压力传感器精确管控压力,依靠编码器精确管控移动位置,同时向工作模具施加压力,从而达到压制药饼的目的。压制过程中能随时控制压力/停止位置/驱动速度/停止时间等参数,实现压制力与压制深度的全过程闭环控制。主要参数如表 1 所示。

表 1 压机参数

项目	参数指标	项目	参数指标
压力范围/kN	2~200	保压时间/s	0~99.9
移动定位精度/mm	$\pm 0.005$	最大行程/mm	150
测力分辨率/N	10	电机功率/kW	15
压强范围/MPa	0~700	电源电压/V	三相交流 380

### 1.2 试验方法

试验的具体步骤:

- 1) 根据实验要求称量指定定量药粉;
- 2) 通过药勺和漏斗将药粉装入模具内腔;
- 3) 轻放顶杆,保证顶杆接触到药粉;
- 4) 将装有药粉的模具放到伺服压机压制工位(根据实验条件,在压制前可以对模具和药粉进行加热等操作);
- 5) 根据实验条件调整压制参数,开始压制;
- 6) 完成压制后,去除顶杆完成退膜,去除压坯;
- 7) 分别对压坯进行称重和测量尺寸,并记录相关数据。

### 1.3 检测方法

立即测量:压制退膜后,在 1 min 内对压坯进行测量;

30 min 后测量:压制退膜后,在 30 min 后对压坯进行测量;

24 h 后测量:间隔 24 h 后对压坯进行测量;

粉末测量方法:采用电子秤进行测量,称量精度为 0.01 g;

压坯高度测量方法:采用卡尺(精度为 0.02 mm)在压坯轴线方向上进行测量,旋转压坯取 4 个  $90^\circ$  方位进行测量,取平均值作为压坯高度;

压坯直径测量方法:采用卡尺在压坯径向进行测量,均匀取 4 个不同高度位置进行测量,取平均值作为压坯直径。

## 2 结果与讨论

### 2.1 压制压力对密度的影响

为了确定满足黑火药粉末压制后密度的压强,在压制压力 100~600 MPa 进行压制实验(如表 2 所示),确定大致范围。设置药粉的初始质量为 7 g,保压时间为 5 s,测量方式为立即测量,每个压力测 10 组。

表 2 压强为 200~600 MPa 下压坯性能参数

压制压力/ MPa	粉末质量/ m	压坯高度/ mm	压坯质量/ m	压坯直径/ mm
200	7.03	18.84	7.00	18.81
300	7.03	17.51	6.99	18.61
400	7.01	16.69	6.98	18.48
500	7.00	15.67	6.98	18.26
600	7.02	15.35	7.00	18.17

从表 2 中可以看出:压坯压制后的直径相比较模具内腔均变大,并且随着压强的增大而减小。压制后直径增大是因为在成形过程中,粉末在外界压力的作用下发生塑性变形和弹性变形,在粉末压坯内部聚集了大量的弹性内应力,即储存了大量的弹

性应变能，当压坯从模具中取出后，弹性内应力发生松弛，弹性应变能需要释放出来，这就使得粉末颗粒的弹性变形得以恢复，这对于已经压制成形的压坯来说就会发生弹性膨胀和尺寸涨大的情况。随着压强的增大，粉末之间的结合会更加牢固，粉末颗粒的弹性应变能受到的约束加强，压坯只能通过有限的弹性膨胀来抵消部分弹性变形应力，因此，呈现出压坯压制后的直径随着压强的增大而减小的现象。不同压强下压坯形态如图 1 所示。

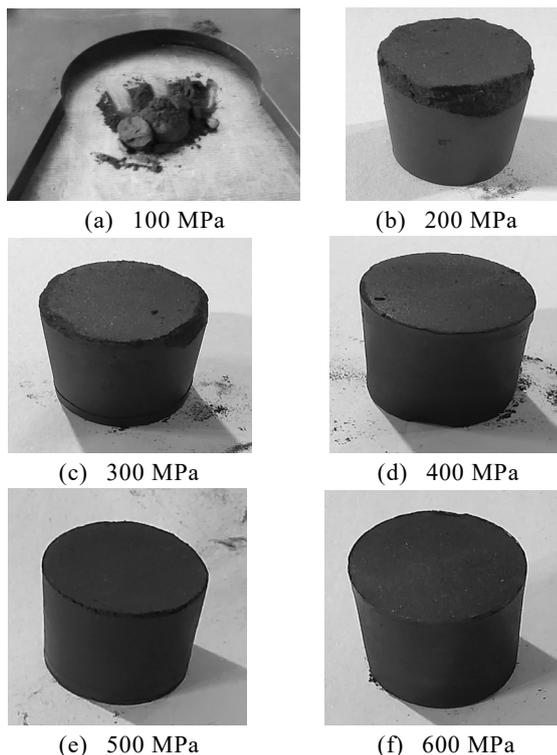


图 1 不同压强下压坯形态

从图 1 中可以看出：压坯的成形质量随着压强的增大而变好，当压制压力为 100 MPa 时，压坯无法成形。随着压强的增大，压坯的成形质量逐渐变好，压坯的光洁度和致密性也随之提高。由于摩擦力的存在，压坯靠近模具侧壁的致密性相对较差，这就导致在退模后，压坯周围出现裂纹或破碎。密度变化如图 2 所示。

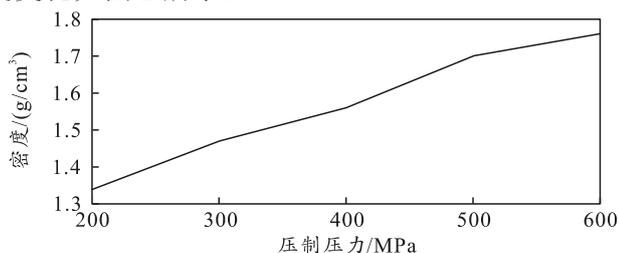


图 2 压强为 200~600 MPa 下密度变化

从图 2 可以看出：在压制压力 200~600 MPa

时，黑火药压坯密度随着压力的增加而增强，且近似线性增加。当压制压力为 500 MPa 左右时，压坯密度达到 1.7 g/cm<sup>3</sup>。

为了得到满足致密性要求的最低压强，需要在 450~550 MPa 内进一步试验，如表 3 所示。

表 3 压强为 460 MPa~560 MPa 下压坯性能参数

压制压力/ MPa	粉末质量/ m	压坯高度/ mm	压坯质量/ m	压坯直径/ mm	密度/ (g/cm <sup>3</sup> )
450	7.05	16.08	7.05	18.28	1.67
470	7.04	15.93	7.01	18.28	1.68
490	7.03	15.78	7.04	18.26	1.70
510	7.05	15.71	7.02	18.22	1.71
530	7.04	15.72	7.04	18.21	1.72
550	7.04	15.57	7.04	18.22	1.73

当压强为 490 MPa 时，压坯的密度为 1.7 g/cm<sup>3</sup>；因此，在后续的压制中采用的压制压力为 490 MPa。密度变化如图 3 所示。

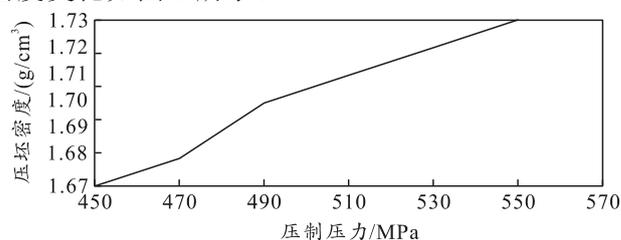


图 3 压强为 460~560 MPa 下密度变化

从图 3 中可以看出：在压制压力 450~550 MPa 时，随着压制压力的增加压坯密度也随之增加，并且随着压强的增大，压坯密度的增加梯度随之减弱。

## 2.2 不同保压时间对密度的影响

为了确定不同保压时间对压坯密度的影响，采用压强为 490 MPa，保压时间为 0、5、10 和 30 s。不同保压时间下压坯性能参数如表 4 所示。

表 4 不同保压时间下压坯性能参数

保压 时间/s	实际 质量/g	立即测量		30 min 后		24 h 后	
		高度/ mm	直径/ mm	高度/ mm	直径/ mm	高度/ mm	直径/ mm
0	7.96	17.37	18.10	17.65	18.19	17.93	18.28
5	7.97	17.66	18.15	18.02	18.23	18.25	18.29
10	8.00	17.69	18.16	18.04	18.18	18.26	18.33
30	7.97	17.61	18.16	18.04	18.26	18.24	18.36

从表 4 中可以看出：不同保压时间下压坯高度随着时间的增加几乎没有变化，而压坯直径随着时间的增加而逐渐增大；因此，为了减小压坯直径的膨胀，可以增加保压时间。在保压阶段，黑火药粉末致密化过程主要包括充填、颗粒变形和破碎 3 种方式。一般来说，随着保压时间的增加，不仅可以增强压坯的致密化程度，而且有利于保证压力的充分传递，减小弹性内应力，从而提高压坯的密度和强度，减少裂纹的产生。

图 4 为不同保压时间下的压坯密度变化。

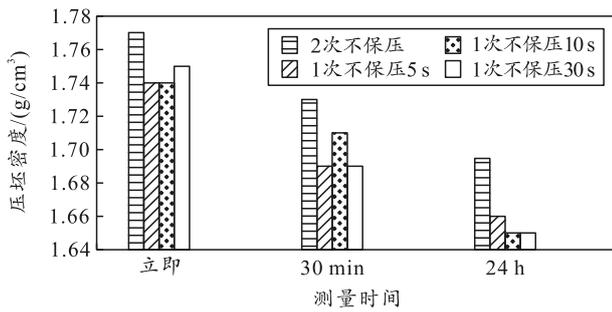


图 4 不同保压时间下的密度变化

从图 4 中可以看出：压坯密度随着时间的增加

逐渐减小；在 490 MPa 下，4 种压制工艺在立即测量和 30 min 后测量密度均大于 1.65 g/cm<sup>3</sup>，满足实际的使用要求，并且压制 2 次不保压的密度明显优于其他 3 种压制形式。30 min 后测量，压坯密度为 1.73 g/cm<sup>3</sup>，明显高于 1.70 g/cm<sup>3</sup>，结合生产经验，在后续的压制过程中将压强调整为 450 MPa。

2.3 粉末药量对密度的影响

为了研究不同粉末药量对密度的影响，对比了在 450 MPa 下 6.5~8.5 g 压坯的性能参数，如表 5 所示。

表 5 不同粉末药量下的压坯性能参数

实际质量/g	立即			30 min 后			24 h 后		
	高度/mm	直径/mm	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	高度/mm	直径/mm	密度/(g/cm <sup>3</sup> )	高度/mm	直径/mm	密度/(g/cm <sup>3</sup> )
6.49	14.41	18.16	1.73	18.23	14.71	1.69	18.31	14.88	1.65
6.95	15.46	18.20	1.73	18.25	15.75	1.69	18.30	15.92	1.66
7.45	16.50	18.22	1.74	18.26	16.92	1.68	18.31	17.08	1.67
7.96	17.57	18.15	1.75	18.26	17.98	1.69	18.27	18.20	1.67
8.50	18.74	18.18	1.75	18.34	20.18	1.60	18.37	20.48	1.57

从表 5 中可以看出：在立即测量和 30 min 后测量时，压坯高度和直径都迅速增大，这是由于弹性内应力迅速释放造成的。随着时间的增加，在 24 h 后测量，压坯直径也随之增加，但压坯高度基本没有变化。这是由于粉末在轴向压力的作用下发生堆积，粘结力较大，使得弹性内应力沿着径向进行释放，造成压坯直径增加。图 5 为不同粉末药量下的压坯密度变化。

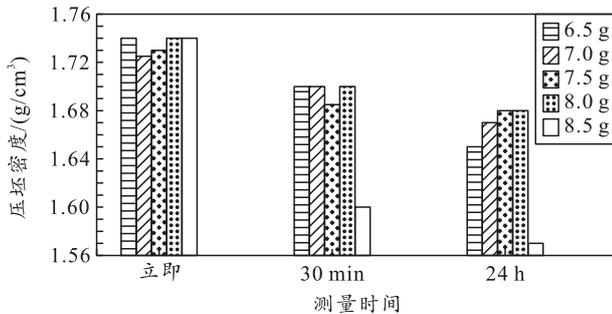


图 5 不同粉末药量下的压坯密度变化

从图 5 中可以看出：压坯的密度随着时间的增加而逐渐减小，尤其是在 30 min 内，变化迅速。当粉末质量为 8.5 g 时，压坯密度变化最为迅速，24 h 后测量时密度为 1.57 g/cm<sup>3</sup>，小于规定值 1.65 g/cm<sup>3</sup>，所以不符合要求。当粉末质量为 8 g 时，压坯密度较优，不仅能够满足密度要求，而且能够减小粉末用量。

2.4 温度对密度的影响

为了确定不同温度对压坯密度的影响，对粉末和模具进行同时加热，加热方式如图 6 所示。



图 6 模具与药粉加热

将药粉装入模具内，然后放入密封袋中进行密封，随后放入水桶中进行水浴加热，待药粉和模具达到一定温度后再取出进行压制实验。

粉末在温压状态下，塑性性能得到很大的提高，使得黑火药粉末在高压状态下可以通过变性实现重新排列，从而提高粉末的填充和坍塌能力，增强粉末的流动能力，提高压坯的密度。

不同温度下的压坯形态如图 7 所示。

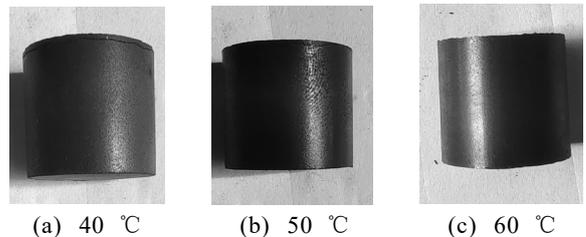


图 7 不同温度下的压坯形态

从图 7 中可以看出：40 °C 时有轻微裂痕，50 °C 时极轻微裂痕，60 °C 时无裂痕，并且在 40 °C~60 °C 范围内，随温度升高，整体光洁度和致密性

更好。不同温度下的压坯密度变化如图 8 所示。

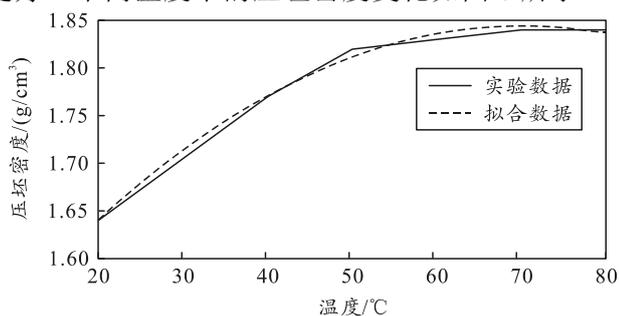


图 8 不同温度下的压坯密度变化

从图 8 中可以看出：黑火药粉末的压坯密度随着压制温度的升高，其压坯密度逐渐增加。这是由于在 20 °C~50 °C 范围内，黑火药颗粒的屈服强度、加工硬化速度随着温度的升高而降低，这就增大了黑火药颗粒的塑性变形能力，有利于提高黑火药颗粒的压坯密度。在 20 °C~50 °C 时，压坯密度提升明显，在 10 °C 内提升 0.05 g/cm<sup>3</sup>。但是当温度升高到 60 °C 时，黑火药颗粒的压坯密度增加缓慢，甚至减弱。因此在后续的实验中采用 50 °C，并且该温度更有利于降温。

通过对温度与压坯密度之间的关系进行 2 次拟合，可以得到如下关系：

$$\rho = 1.44 + 0.011 \times t - 8.09 \times 10^{-5} \times t^2 \quad (1)$$

450 MPa 下压坯密度与压制压力之间呈抛物线关系。

50 °C 下压坯密度变化如图 9 所示。

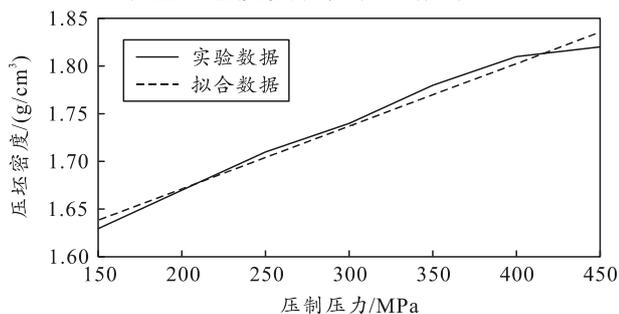


图 9 50 °C 下压坯密度变化

当温度设为 50 °C 时，随着压制压力的增大，黑火药粉末的压坯密度随之增加，在 400 MPa 之后，密度增加变缓。这是由于在 150~400 MPa 时，粉末通过塔桥的方式松散堆积，存在大量间隙，在压力的作用下粉末颗粒通过相对滑动和转动的方式快速实现填充，因此密度增加较快。在 450 MPa 时，粉末颗粒先从松散的塔桥堆积向紧密堆积方式转变，粉末颗粒间的缝隙变小，形成了紧密堆垛，因此密度增加较慢。

在 50 °C 时，对压坯密度与压制压力进行拟合，可以得到如下关系：

$$y = 1.54 + 6.57 \times 10^{-4} \times x \quad (2)$$

在此温度下，压坯密度与压制压力之间呈线性关系。

### 3 结论

笔者以黑火药成形质量为研究目标，通过实验分析了压制压力、保压时间、粉末药量和温度对压坯密度的影响，得到了以下结论：

1) 在粉末药量为 7 g、常温时，满足密度要求的最小压制压力为 490 MPa。

2) 单次压制下，保压时间对压坯密度影响较小，并且压制 2 次不保压的压坯密度明显优于其他 3 种工艺。

3) 当粉末药量为 8.5 g 时，30 min 后的压坯密度相对于立即测量减小了 8%；而 6.5、7.0、7.5 和 8.0 g 最多减小了 3%。

4) 随着温度的升高，压坯整体的光洁度和致密性也随之增加。当粉末与模具温度为 50 °C 时，在 150~400 MPa 范围内，密度随压制压力的增加而呈现出线性增长。当压制压力超过 400 MPa 时，压坯密度增加缓慢。

### 参考文献：

- [1] 孙海涛, 詹梅, 樊晓光, 等. 高性能 PBX 炸药压制成型研究进展与展望[J]. 中国机械工程, 2024, 35(1): 160-180.
- [2] 吴凯, 刘玉存, 刘仕瑞. PBX 炸药概述及其发展与前景[J]. 山西化工, 2012, 32 (2): 36-39.
- [3] 郭惠丽, 黄亚峰, 金朋刚, 等. 炸药撞击感度研究进展[J]. 化工新型材料, 2022, 50(5): 10-15.
- [4] 张为鹏, 郭惠丽, 邓雅静, 等. 压装不敏感炸药相关技术最新进展[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42 (12): 52-56.
- [5] PERCHACZ M, ROZANSKI A, KARGARZADEH H, et al. Cavitation in high density polyethylene/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposites[J]. Composites Science & Technology, 2020, 199(1): 108323.
- [6] 张远航. PBX 造型粉的致密化行为与密度演化规律研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2018.
- [7] FERREIRA A A, MARRERO Y C, CASTRO G A, et al. Study of secondary porosity by SAXS and N<sub>2</sub> adsorption in composite materials obtained from a Cuban natural clinoptilolite[J]. Surface and Interface Analysis, 2020, 52(11): 735-741.
- [8] 滕婉婷. 温压炸药发射安全性相关研究[D]. 南京: 南

京理工大学, 2013.

[9] YANG K, WU Y, HUANG F. Microcrack and microvoid dominated damage behaviors for polymer bonded explosives under different dynamic loading conditions[J]. Mechanics of Materials, 2019, 137(1): 103131.

[10] LI Y, WU P, HUA C, et al. Determination of the mechanical and thermal properties, and impact sensitivity of pressed HMX-based PBX[J]. Energetic Materials, 2019, 16(2): 299-315.

[11] XIAO Y, SUN T, LI S, et al. Molecular dynamics simulation studies of the CL-20/DNB Co-crystal based PBX with HTPB[J]. Conference Series, 2021, 1721(1): 012010.

[12] CHIQUETE C, JACKSON S I, ANDERSON E K, et al. Detonation performance experiments and modeling for the DAAF-based high explosive PBX 9701-sciencedirect[J]. Combustion and Flame, 2021, 223: 382-397.

[13] 曹少庭, 牛磊, 任秀秀, 等. 分步压装用炸药装药工艺安全性模拟试验研究[J]. 火工品, 2020, (5): 44-47.

[14] 周忠彬, 高金霞, 刘龔龙, 等. 成型温度对 PBX 药柱力学性能及破坏形式的影响研究[J]. 火工品, 2022(6): 56-59.

[15] 周忠彬, 高金霞, 袁宝慧. 成型温度对 PBX 装药内部质

量及性能的影响[J]. 爆破器材, 2022, 51(5): 20-23, 30.

[16] 白亮飞, 田强, 屠小青, 等. 冷压成型压力对 HMX 基 PBX 微结构影响的 SANS 研究[J]. 含能材料, 2019, 27(10): 853-860.

[17] 周志平, 崔庆忠, 王自豪, 等. 黑火药致密化成型及数值模拟分析[J]. 兵工自动化, 2021, 40(2): 88-92.

[18] 姚李娜, 王海清, 赵省向, 等. 温度对压装 RDX 基含铝炸药力学性能的影响[J]. 火工品, 2017(3): 45-48.

[19] GRAFFTHOMPSON D, 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.

[20] LEI S, WANG S, LU F, et al. Research on irreversible growth mechanism of PBX due to thermal cycling[J]. E3S Web of Conferences, 2021, 257(6): 01051.

[21] 岳晓媛, 张会锁, 黄鸿鑫, 等. 压药工艺参数对成型药柱质量的影响研究[J]. 兵工自动化, 2021, 40(1): 84-87, 96.

[22] 曹兴. 粉体炸药压制成型工艺仿真与质量预测[D]. 太原: 中北大学, 2021.

[23] 曹兴, 赵捍东, 曹红松, 等. 炸药粉末压制工艺参数对药柱质量的影响[J]. 火炸药学报, 2021, 44(1): 72-77.

\*\*\*\*\*

(上接第 4 页)

参考文献:

[1] 谈乐斌, 张相炎. 火炮概论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005.

[2] 李礼, 戴煜. 迫击炮轻量化应用现状及趋势[J]. 新材料产业, 2019, 2: 50-54.

[3] 吴同晗, 张仕新, 陈春良, 等. 基于能力需求的维修保障人员专业种类确定方法[J]. 兵工自动化, 2018, 37(6): 73-77.

[4] 师会生. 象限仪校准装置的设计与实现[J]. 中国计量, 2019, 4: 71-73.

[5] 文海, 程斌, 张开维. 炮用象限仪角度测量不确定度的评定方法[J]. 兵工学报, 2017, 38(4): 817-823.

[6] 段长林, 毛联山, 王纯亮. 传感器技术在火炮零位零线检测中的应用[J]. 测试技术学报, 2012, 26(5): 455-460.

[7] 康小勇, 张军挪, 田昊. 随伴火炮构造与勤务[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.

[8] 贾云非, 曹金荣, 康小勇. 随伴火炮结构原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2021.

[9] 郭彪, 董治华, 邓博. 迫击炮射角测量装置及方法的改进[J]. 兵工自动化, 2009, 30(8): 35-37.

[10] 孙章毅. 迫击炮发射条件对炮口扰动的影响分析[J]. 指挥控制与仿真, 2023, 45(2): 69-75.