

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2025.01.004

工艺参数对空心药柱压制成型后回弹的影响*

卢洋^① 李自胜^① 肖晓萍^② 赵海波^①

①西南科技大学制造科学与工程学院(四川绵阳, 621010)

②西南科技大学工程技术中心(四川绵阳, 621010)

[摘要] 针对解决高聚物黏结炸药(polymer bonded explosives, PBX)粉末压制成型后药柱回弹量过大,导致药柱密度分布不均匀并影响药柱质量的问题,基于连续介质力学炸药粉末模压成型方法,采用 Shima-Oyane 材料模型,建立了 JOB-9003 空心药柱压制模型,分析了不同工艺参数对空心药柱压制成型后回弹量的影响。研究表明,Shima-Oyane 材料模型能够有效地分析空心药柱压制后的回弹量。在轴向上,药柱的回弹量表现为两端大、中间小;在径向上,内、外圆区域回弹量波动较大,中间层区域变化较小。当压制力 20 MPa、保压时长 60 s、压制速度 2 mm/s 时,药柱的回弹量最低,为 0.271 mm;平均相对密度最大,为 0.974。此时,药柱的致密化程度高,成型质量较好。

[关键词] PBX; 粉末压制; Shima-Oyane; 工艺参数; 药柱回弹

[分类号] TQ560.7; TJ55

Influence of Process Parameters on the Springback of Hollow Grain Formed by Pressing Molding

LU Yang^①, LI Zisheng^①, XIAO Xiaoping^②, ZHAO Haibo^①

① School of Manufacturing Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology (Sichuan Mianyang, 621010)

② Engineering Technology Center, Southwest University of Science and Technology (Sichuan Mianyang, 621010)

[ABSTRACT] The springback of grain formed by pressing molding from polymer bonded explosive (PBX) powder is too large, resulting in uneven density distribution of the grain and affecting the quality of the grain. Based on the pressing molding method of explosive powder in continuum mechanics, a hollow grain pressing model of JOB-9003 was established using Shima-Oyane material model. And the influence of different process parameters on the springback of hollow grain formed by pressing molding was analyzed. The results show that Shima-Oyane material model can effectively analyze the springback of hollow grain formed by pressing molding. The springback of the grain is larger at both ends and smaller in the middle in the axial direction. In the radial direction, the springback fluctuations in the inner and outer circular areas are larger, while the changes in the middle layer areas are smaller. When the pressing force is 20 MPa, the holding time is 60 s, and the pressing speed is 2 mm/s, the springback of the grain is the lowest, at 0.271 mm. And the average relative density is the highest, at 0.974. The densification degree of the grain is high, and the molding quality is good.

[KEYWORDS] PBX; powder pressing; Shima-Oyane; process parameter; grain rebound

0 引言

装药的密度及密度均匀性对聚能破甲战斗部的性能有重要影响。装药密度不均匀可能导致战斗部

在发射过程中出现振动或破裂,影响射击精度或毁伤威力^[1]。药柱成型质量主要依赖于药柱密度和回弹量。药柱压制生产过程中存在黑箱现象,药柱密度不能直接测量;因此,不能实时根据密度变化情况调整工艺参数,以控制药柱压制成型的质量^[2]。药

* 收稿日期:2024-06-26

基金项目:四川省科技计划项目(2017GZ0350,2018GZ0083)

第一作者:卢洋(1995—),男,硕士研究生,研究方向为含能材料压制成型及数值仿真。E-mail:bzly@mails.swust.edu.cn

通信作者:李自胜(1976—),男,副教授,博士,研究方向为智能制造技术、数字孪生技术。E-mail:lizisheng@swust.edu.cn

柱压制成型后,药柱内部的应力会导致药柱形状和尺寸发生改变^[3],产生回弹。如果回弹量过大,可能会造成药柱密度不均匀,进而导致裂纹产生,影响战斗部的毁伤威力^[4]。同时,药柱回弹量也涉及到阴模内腔尺寸的设计,往往需要反复试模来达到理想尺寸,影响模具的研制周期和时间成本^[5]。

随着计算机仿真技术的发展,使用有限元软件可以分析药柱压制成型过程中药柱密度的均匀性和回弹量,为药柱压制成型质量和阴模设计优化提供了支持。曹兴等^[6]采用基于连续介质力学的方法,对药柱压制成型过程中的相对密度、位移和等效应力变化进行了模拟分析。张涛等^[7]使用有限元分析软件 MSC. Marc,基于更新拉格朗日方法的热-机耦合分析技术,对 PBX(高聚物黏结炸药)粉末在温压成型过程中的行为进行了数值模拟。分析发现:随着成型压力的不断增大,PBX 内部的应力、粉末的位移以及整体的相对密度均呈现出逐渐上升的趋势。岳晓媛等^[8]以 PBX 为具体研究对象,结合实验数据与仿真技术,充分考虑炸药的独特性质,对压药过程进行了有限元仿真模拟。结果揭示了压力和保压时间对药柱质量影响的规律,为优化炸药生产工艺提供了有力依据。

文章中,根据 PBX 粉末压制过程,构建了 JOB-9003 炸药药柱压制成型的连续体计算模型,通过模拟炸药粉末的压制成型过程,研究了炸药粉末压制成型的相对密度和回弹量,分析了压制力、保压时长、压制速度等工艺参数对药柱脱模后回弹量的影响,为炸药粉末压制成型工艺提供最优参数。

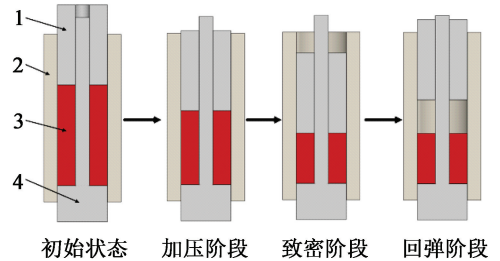
1 有限元模型的建立

炸药粉末压制过程是一种高度复杂的变形过程,涉及到几何非线性、材料非线性和边界条件非线性等多方面的因素,且压制过程中发生了大变形和大位移^[9]。因此,采用增量非线性有限元对非线性方程组进行交替迭代求解,可以对压制过程中的各种参数进行精确控制,从而得到更准确的结果^[10]。炸药粉末压制是一个逐步累积变形的过程,每一步的变形都是基于前一步的变形结果。更新拉格朗日法在处理复杂约束优化问题时,能够更有效地找到全局最优解,且收敛速度更快。因此,选择更新拉格朗日法进行分析。

1.1 空心药柱压制流程

炸药粉末双向压制阶段划分如图 1 所示。初始状态下,炸药粉末在压制力的作用下相互堆积和

重新排列,较小的颗粒逐渐填充到相邻较大孔隙中;加压阶段,随着压制力的施加,颗粒发生弹性和塑性形变,颗粒间结合力逐渐增强^[11];致密阶段,由于形变过程短暂,颗粒受到冲击产生高应变,大部分塑性形变产生的热能无法迅速消散,积聚在粉末颗粒的边界上,导致绝热升温,产生热-力耦合效应^[12];卸压后,进入回弹阶段,残余应力释放,体积尺寸会增大,发生膨胀回弹现象,导致压坯的密度略有降低,表现出弹性恢复状态。



1 - 上模冲;2 - 阴模;3 - 炸药粉末;4 - 下模冲。

图 1 炸药粉末双向压制阶段划分

Fig. 1 Division of stages in two-way pressing of explosive powder

1.2 本构关系

屈服函数是描述材料在屈服过程中所应满足的数学关系的重要工具。对于炸药粉末而言,Shima-Oyane 屈服函数^[13]提供了一种用以揭示流动规律以及相对密度的分布规律的分析方法。该函数考虑了粉末在压制、变形过程中的体积变化、流动应力以及静水压力对屈服强度的影响。Shima-Oyane 屈服函数不仅考虑了粉末颗粒之间的相互作用和摩擦,还充分考虑了粉末压制成型后在受到外力作用时体积的变化情况;同时,纳入了由粉末颗粒间的相互作用以及颗粒与周围介质之间的摩擦所产生的流动应力的影响。Shima-Oyane 屈服函数能够更准确地描述粉末材料在变形过程中的力学行为,所以炸药本构关系采用 Shima-Oyane 屈服准则,表达式^[14]为

$$F = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{3}{2} \sigma^d \sigma^d + \frac{p^2}{\beta^2} \right)^{\frac{1}{2}} - \sigma_y. \quad (1)$$

式中: σ_y 是单轴屈服应力,与保压时长和粉末的相对密度有关; σ^d 是偏应力张量; p 是静水压力; β 、 γ 是材料的相对密度的函数^[15],且与材料种类有关。

PBX 药柱致密体 JOB-9003 的密度为 1.80 g/cm³,弹性模量与相对密度的关系为

$$E = E_0 \times \rho. \quad (2)$$

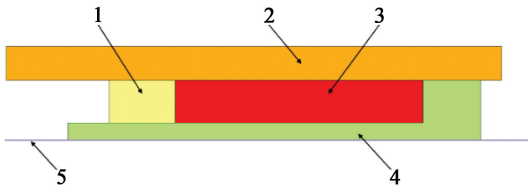
泊松比随相对密度的变化规律^[16]为

$$\mu = \mu_0 \times E^{-12.5(1-\rho)^2}. \quad (3)$$

式中: E_0 为药柱致密体的弹性模量,取10.0 GPa; ρ 是相对密度,初始值取0.5; μ_0 为药柱致密体的泊松比,取0.27^[17]。

1.3 有限元模型

为了简化分析过程,将上、下模冲和阴模视作刚体,把炸药粉末单元化,并设定为变形体。为了确保压坯模型具备疏松体的特性,设置初始的相对密度。这种疏松体模型可以更准确地反映压坯整体密度的变化及分布规律。成型药柱为圆柱形空心药柱,初始半径是75 mm,内圆半径是21 mm,高度是300 mm。几何模型和阴模的几何结构是轴对称图形,且上、下模冲施加的压力也是对称的;因此,使用2D平面单元进行模拟,将模型简化为二维轴对称模型。有限元模型使用MSC. Marc中的10号轴对称单元。空心药柱的二维轴对称模型如图2所示。



1 - 上模冲; 2 - 阴模; 3 - 炸药粉末; 4 - 下模冲; 5 - 对称轴。

图2 炸药粉末压制的二维轴对称模型

Fig. 2 Two-dimensional axisymmetric model of pressing of explosive powder

1.4 参数设置

根据实际生产加工的工艺条件,设置药柱压制的工艺参数:JOB-9003药柱压制方式为上、下模冲双向同时压制,上、下模冲的压制力设置为15 MPa;压制速度2 mm/s;压制过程中,模具和炸药粉末保压时长设置为100 s;炸药粉末与阴模之间存在摩擦,摩擦系数设置为0.2^[18]。根据以上工艺参数,分析炸药粉末在压制过程中的流动分布状态、位移、相对密度、等效米塞斯应力和药柱回弹量变化等。

根据区域的回弹量,分析药柱不同轴向位置的回弹情况。由上到下,药柱轴向取样点区域为 $H_1 \sim H_5$ 上所有的节点数据,每个区域包括径向取样点共21个(分别标记为点位1#~21#),取样区域中心节点依次为 $P_1 \sim P_5$,不同位置的取样点区域如图3所示。仿真分析选取药柱多个轴向位置的径向平均回弹量为药柱在该区域的回弹量。

2 模拟仿真与结果分析

2.1 压制成型过程

通过模拟炸药粉末双向压制过程,获得PBX粉

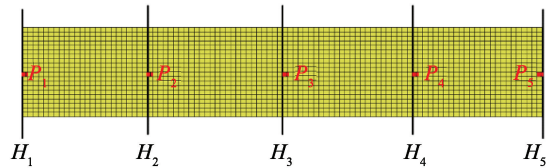


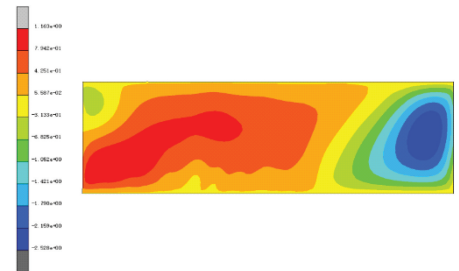
图3 不同轴向位置采样点区域

Fig. 3 Sampling point areas at different axial positions

末压制位移云图,如图4所示。分析图4可知,药柱轴向位移大,在上模冲靠近模套以及下模冲靠近内圆下端处位移最大;径向位移变化相对较小,径向最大位移出现在药柱中层,靠近上、下模冲处;炸药粉末压制成型过程中的整体位移变化符合实际生产压制成型规律^[6]。



(a) X轴位移



(b) Y轴位移



(c) 整体位移

图4 药柱压制位移变化云图

Fig. 4 Displacement cloud maps of the grain during the pressing process

炸药粉末双向压制成型的相对密度分布云图如图5所示。分析图5可知,药柱最大相对密度分布在药柱内圆和外圆靠近上模冲区域,以及药柱外圆靠近下模冲区域;最小相对密度出现在内圆下端,靠

近下模冲区域。药柱压制成型后的整体相对密度分布在 0.948 ~ 0.984 区间内,表明药柱的压装密度分布整体均匀,符合药柱成型的质量要求。

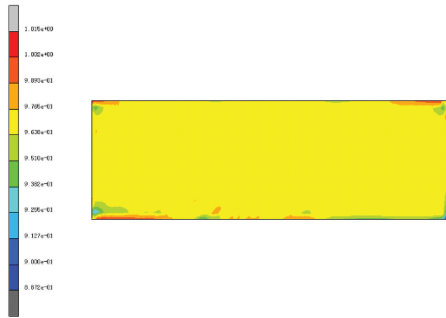


图 5 药柱相对密度变化云图

Fig. 5 Cloud maps of the changes in relative density of the grain

图 6 是不同取样点相对密度随压制增量步的变化曲线。分析图 6 可知, $P_1 \sim P_5$ 的相对密度整体呈先快速增加、后趋于稳定的趋势。在 0 ~ 60 增量步区间内,药柱的相对密度从 0.500 快速增加到 0.700,这一阶段药柱上、中、下区域内的相对密度差异较大。达到 100 增量步后, $P_1 \sim P_5$ 的相对密度在 0.980 附近波动,且变化量小,达到致密阶段。

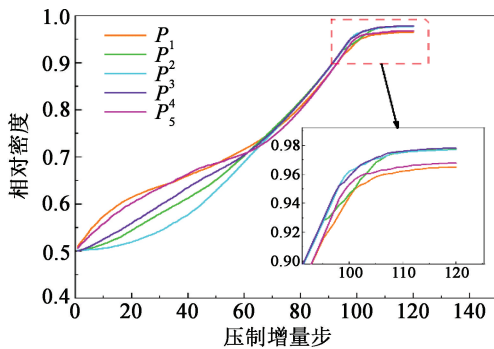


图 6 不同取样点相对密度随压制增量步的变化

Fig. 6 Variation curves of relative density at different sampling points with pressing increment step

等效米塞斯应力云图如图 7 所示。分析图 7 可知,药柱的等效米塞斯应力分布差异较小,最大应力主要分布在内圆靠近上模冲区域,为 40.76 MPa;最小应力分布在药柱外圆中间区域和内圆靠近下模冲区域,为 3.45 MPa。

2.2 药柱的回弹量与相对密度

压制力 20 MPa 下取样区域的回弹量如图 8 所示。分析图 8 可知,药柱 H_1 区域的径向回弹量由内向外逐渐减小; H_2 区域的径向回弹量由内向外呈现先增加、后减小的趋势; H_3 区域的径向回弹量由内往外逐渐减小; H_4 区域的回弹量由内向外呈现先减



图 7 等效米塞斯应力分布云图

Fig. 7 Cloud map of equivalent Mises stress distribution

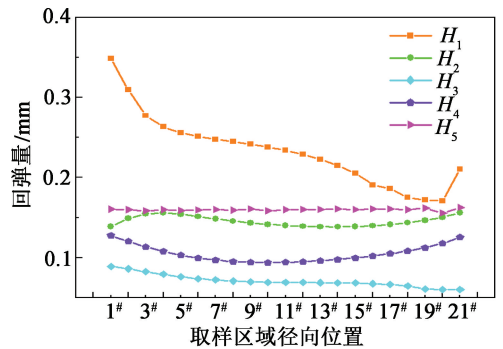


图 8 压制力 20 MPa 下取样区域的回弹量

Fig. 8 Springback of the sampling area when the pressing force is 20 MPa

小、后增加的趋势; H_5 区域的回弹量在径向位置上变化不大。考虑各轴向位置上采样区域的径向回弹量,靠近上模冲的区域 H_1 回弹量最大,药柱中间区域 H_3 的回弹量最小。分析药柱在内圆和外圆处的回弹量,可以得出:药柱在内圆区域和外圆区域的回弹量波动幅度较大;在内圆和外圆的中间层区域回弹量变化浮动小;回弹量在轴向上表现为上、下两端大,中间小。

成型药柱不同采样点处的相对密度变化曲线如图 9 所示。分析图 9 可知,在 $H_1 \sim H_5$ 取样区域内,径向取样点位在 3# ~ 16# 的范围区间内,药柱的相对

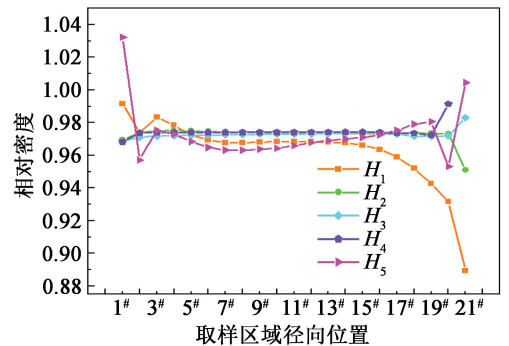


图 9 不同采样点的相对密度的变化

Fig. 9 Variation of relative density at different sampling points

密度在 0.970 左右波动,相对密度分布较为均匀,且变化幅度较小;在每个取样区域的点位 1# ~ 3# 和点位 17# ~ 21# 处,药柱的相对密度与点位 3# ~ 16# 处差异较大。分析这种现象,由于炸药粉末与模具相接触的内、外圆位置上,模具与炸药粉末之间存在摩擦,压制过程中使得内、外圆周上的粉末受力较大,可能该区域范围内部分粉末首先发生塑性变形,使得炸药粉末的相对密度变化范围较大。

3 工艺参数对药柱回弹量的影响

不同的工艺参数对空心药柱压制成型后的回弹量有不同的影响;因此,对压制力、压制速度、保压时长各设置了 5 组不同的实验参数。对比不同工艺参数对药柱回弹的影响,分析影响药柱回弹的主要工艺参数,为后续工业生产提供参数优化。设置的不同压制工艺参数如表 1 所示。

表 1 不同压制工艺参数

Tab. 1 Different pressing process parameters

序号	压制力/ MPa	保压时长/ s	压制速度/ (mm · s ⁻¹)
1#	10	20	2
2#	15	40	4
3#	20	60	6
4#	25	80	8
5#	30	100	10

3.1 压制力

设定工艺参数药柱的保压时长 100 s,压制速度 4 mm/s。施加不同的压制力,不同采样点药柱的平均回弹量随压制力的变化曲线如图 10 所示。由图 10 可知,药柱在 H₁ 区域的回弹量最大;在 H₃ 区域的回弹量最小。整体回弹量表现为上采样区域和下

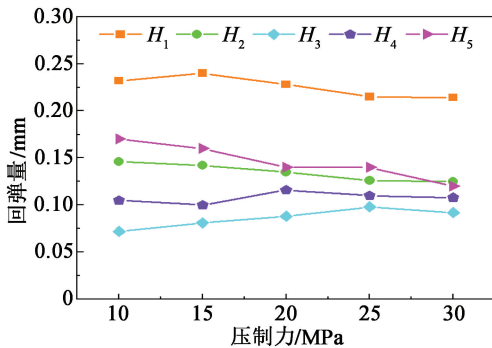


图 10 H₁ ~ H₅ 采样点回弹量随压制力的变化曲线

Fig. 10 Variation curves of springback with pressing force at sampling points H₁-H₅

采样区域大,中间区域回弹量小。分析可知,该药柱压制完成后,首先,上模冲退出阴模卸压,药柱的内应力得到释放,接触上模冲区域的变形量较大;随着压制力的增加,各个采样点区域整体上的回弹量减小;当压制力达到 25 MPa 后,继续增加压制力,各个采样区域的回弹量变化较小。

药柱的平均相对密度随压制力的变化曲线如图 11 所示。分析图 11 可知:随着压制力的增加,药柱平均相对密度先减小至 0.965、后增加至 0.974;当压制力为 20 MPa 时,平均相对密度最大,表明药柱致密化程度越高,成型质量更好;继续增加压制力后,得到的平均相对密度变化范围较小。这表明,过大的压制力不能改善药柱成型后的平均相对密度,反而会消耗过多的生产资源。因此,在所选压制力范围内,选择较小的压制力有助于减小药柱压制成型后的回弹量,提升药柱的平均相对密度,提高药柱的成型质量。

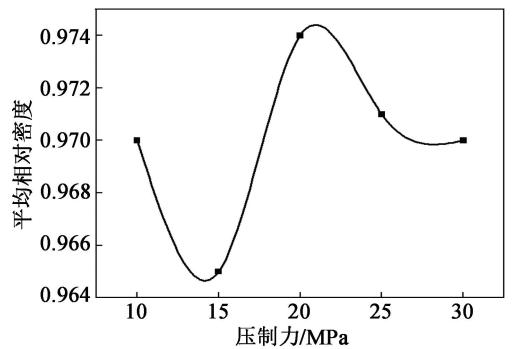


图 11 平均相对密度随压制力的变化曲线

Fig. 11 Variation curves of average relative density with pressing force

压制力为 15 MPa 时,药柱压制成型回弹位移云图如图 12 所示。药柱压制成型后,上模冲没有卸压时,轴向最大位移为 48.15 mm;卸压完成后,轴向最大位移为 47.90 mm,药柱最大回弹量为 0.25 mm;



图 12 药柱在 15 MPa 压制力下回弹后的位移云图

Fig. 12 Cloud map of displacement of the grain after springback under a pressing force of 15 MPa

上模冲卸压后,轴向位移变动与压制成型过程中位移变化趋势相同,药柱各部位的回弹量大体上相似,且未出现局部裂纹、断裂情况。

3.2 保压时长

图 13 是药柱的回弹量随保压时长的变化曲线。分析可知,较长的保压时长可以有效降低药柱的回弹量。当保压时长超过 40 s 后,随着保压时长上升,回弹量逐渐降低。在压制力 20 MPa、保压时长 60 s 时,药柱的回弹量最低,为 0.271 mm,药柱相对密度分布较为均匀;在压制力 30 MPa、保压时长是 20 s 时,药柱的回弹量最高,为 0.300 mm。压制力和保压时长同时增加,药柱的整体回弹量呈现逐渐降低的趋势。较长的保压时长的工艺条件有助于减少药柱的回弹量,可以保证药柱压制成型后的相对密度分布均匀,成型质量更好。

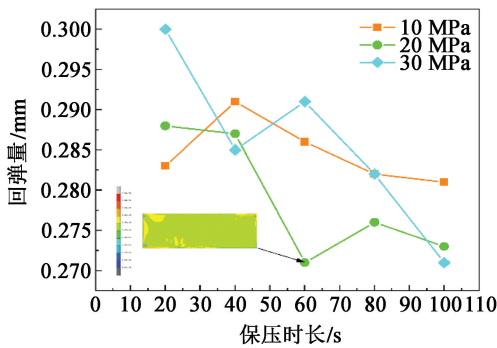


图 13 回弹量随保压时长的变化曲线

Fig. 13 Variation curves of springback with holding time

3.3 压制速度

回弹量随压制速度的变化曲线如图 14 所示。分析图 14 可知,压制速度在 2 mm/s 时,药柱的回弹量最小,为 0.28 mm;当压制速度为 10 mm/s 时,药柱的回弹量最大,为 0.33 mm。随着压制速度的增加,药柱的回弹量呈现逐渐增加趋势。因此,选择较小的压制速度可以降低药柱的回弹量,提高药柱的压制成型质量。

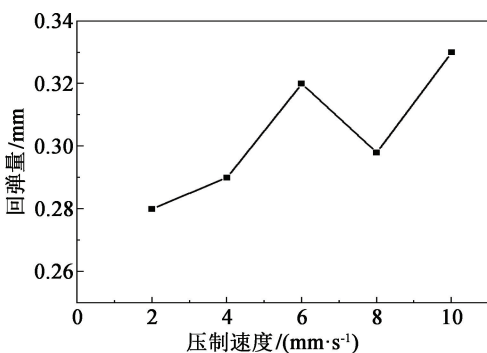


图 14 回弹量随压制速度的变化曲线

Fig. 14 Variation curves of springback with pressing speed

4 结论

1) 利用 Shima-Oyane 材料模型,通过调整不同工艺参数,分析得出压制力、保压时长、压制速度会影响 JOB-9003 药柱压制成型回弹量。

2) 药柱的回弹量在轴向位置上变化大,回弹量表现为两端大、中间小;径向位置上,内圆区域和外圆区域的回弹量波动幅度较大,中间层区域回弹量变化幅度小,密度分布更加均匀。

3) 不同的压制速度、压制力、保压时长会影响药柱的回弹量。较小的压制力和较长的保压时长有助于减少药柱压制成型后的回弹量。随着压制速度的增加,药柱回弹量逐渐增加。因此,选择较小的压制速度可以降低药柱压制的回弹量。

参 考 文 献

[1] 孙海涛,詹梅,樊晓光,等. 高性能高聚物黏结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.
SUN H T, ZHAN M, FAN X G, et al. Research progresses and prospectsof compression molding of high-performance PBX [J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(1): 160-180.

[2] 唐红,周俊辉,吕珂臻,等. PBX 压制过程中细观力学行为的二维数值模拟[J]. 含能材料, 2016, 24(7): 651-656.
TANG H, ZHOU J H, LÜ K Z, et al. Two dimensional numerical simulation for mesoscopic mechanics behaviors of PBX pressing processes [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2016, 24(7): 651-656.

[3] PAN Q, LI S, LIU Y, et al. Meso-simulation and experimental research on the mechanical behavior of an energetic explosive [J]. Coatings, 2021, 11(1): 64.

[4] 袁洪魏,唐维. PBX 炸药断裂行为仿真计算方法研究[J]. 火炸药学报, 2023, 46(6): 484-494.
YUAN H W, TANG W. Simulation method of fracture behavior for PBXs [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2023, 46(6): 484-494.

[5] 罗鹏,张洪宇,宋继秋. 火药装药模具的优化设计[J]. 山东工业技术, 2019(12): 42.

[6] 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.
CAO X, ZHAO H D, CAO H S, et al. Influence of process parameters of explosive powder pressing on the

- quality of grains [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2021, 44(1): 72-77.
- [7] 张涛, 赵北君, 朱世富, 等. PBX 粉末成形的数值模拟研究[J]. 材料工程, 2009(5): 68-72.
ZHANG T, ZHAO B J, ZHU S F, et al. Numerical simulation study of PBX powder-forming [J]. Journal of Material Engineering, 2009(5): 68-72.
- [8] 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.
YUE X Y, ZHANG H S, HUANG H X, et al. Study on influence of explosive pressing technique parameter on quality of press-forming grain [J]. Ordnance Industry Automation, 2021, 40(1): 84-87, 96.
- [9] 孙文旭, 罗智恒, 唐明峰, 等. PBX-1 炸药的力学性能和本构关系[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(7): 36-42.
SUN W X, LUO Z H, TANG M F, et al. Compressive mechanical properties and constitutive relations of PBX-1 [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(7): 36-42.
- [10] 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.
LIU P H, LI Y X, ZHANG H B, et al. Effect of fluoropolymer binder on the compressibility of TATB-based PBX molding powder [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2022, 45(3): 396-403.
- [11] 张小粉, 白瑀, 李磊. 基于 MARC 的 FC0205 铁基粉末压制模拟技术[J]. 粉末冶金工业, 2023, 33(5): 81-88.
ZHANG X F, BAI Y, LI L. FC0205 iron base powder pressing simulation technology based on MARC [J]. Powder Metallurgy Industry, 2023, 33(5): 81-88.
- [12] 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.
ZHOU Z B, GAO J X, YUAN B H. Influence of molding temperature on the internal quality and properties of PBX explosive charge [J]. Explosive Materials, 2022, 51(5): 20-23, 30.
- [13] SHIMA S, OYANE M. Plasticity theory for porous metals [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1976, 18(6): 285-291.
- [14] 刘劲松, 张士宏, 肖寒, 等. MSC.MARC 在材料加工工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 325-357.
- [15] 尤萌萌, 潘诗琰, 申小平, 等. 粉末压制过程数值模拟的研究现状及展望[J]. 粉末冶金工业, 2017, 27(4): 49-58.
YOU M M, PAN S Y, SHEN X P, et al. Current progress and prospect of numerical simulation in powder compaction [J]. Powder Metallurgy Industry, 2017, 27(4): 49-58.
- [16] 曹兴, 曹红松, 张根生, 等. 炸药压制工艺参数对空心装药质量影响的仿真研究[J]. 含能材料, 2021, 29(3): 202-210.
CAO X, CAO H S, ZHANG G S, et al. Simulation study on the influence of compression process parameters on the quality of hollow charges [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2021, 29(3): 202-210.
- [17] 董海山, 周芬芬. 高能炸药及相关物性能[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 301-305.
- [18] 于世伟, 周剑, 张炜, 等. 粉末高速压制成形件密度影响因素分析[J]. 中国机械工程, 2018, 29(9): 1120-1126.
YU S W, ZHOU J, ZHANG W, et al. Analysis of influence factors for density of compressed powder products during high velocity compaction [J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(9): 1120-1126.