

文章编号:1006-9941(2025)06-0635-10

## 压装工艺参数对异形药柱装药影响的模拟研究

罗春旺<sup>1</sup>, 苟瑞君<sup>1</sup>, 于晓东<sup>2</sup>, 张树海<sup>1</sup>, 张鹏<sup>2</sup>, 裴水旺<sup>2</sup>

(1. 中北大学环境与安全工程学院, 山西 太原 030051; 2. 山西江阳化工有限公司, 山西 太原 030041)

**摘要:** 为了探究异形装药结构药柱压制效果以及压制安全性的影响因素,采用 Marc 有限元软件的连续介质动力学方法对装药直径  $D=88$  mm、成型高度  $H=132$  mm、锥角  $\alpha=60^\circ$  的异形 JH-2 药柱压制成型过程进行了数值模拟分析,系统研究了压制压力、压制速率、初始相对密度、摩擦系数以及保压时间等工艺参数对药柱成型密度及内部应力的影响。结果表明:成型异形装药内部密度和应力分布不均匀,存在明显的密度松散区和应力集中区域;压制压力、初始相对密度、保压时间和摩擦系数同时影响药柱的成型密度和应力分布,压制压力、初始相对密度和压制速率以及装药结构则是影响异形药柱应力集中的主要因素;针对此异形装药结构,当压制压力取 300~350 MPa、压制速率为  $1.5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 、初始相对密度为 0.65、摩擦系数为 0.15、保压时间选择 120 s 时,异形药柱的密度分布相对均匀,应力梯度差小,能提高成型质量,减小应力集中并避免裂纹产生,保证装药安全。

**关键词:** 异形装药;粉末压制;装药工艺;数值模拟;装药安全性

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2024279

## 0 引言

聚能装药结构以其特殊的聚能作用效果,被广泛应用于破甲战斗部、射孔弹以及切割索等军事和民用领域。但随着国防工业领域对毁伤性能要求的不断提高,聚能装药结构出现了带有隔板的异形装药结构<sup>[1]</sup>。异形装药常采用压装工艺,该工艺不仅能显著提高高能炸药的含量,而且有利于毁伤效果的增强。然而,异形药柱压装存在装药质量和安全性的问题,若工艺参数设置不合理,会导致装药密度分布不均匀、药柱长大、裂纹以及断裂等装药疵病,影响异形药柱后续地装配和使用效果。此外,装药过程还存在应力集中引发压爆等危险<sup>[2]</sup>。实际装药中,一般通过成型药柱的密度与回弹量评估药柱的装药质量,无法直观地观察异形药柱内部密度、应力等分布,因此有必要采用新方法揭示工艺参数对异

形药柱成型的影响规律,提高装药质量,降低装药过程中的安全隐患。

近年来,随着数值模拟技术的发展,有限元和离散元分析法在炸药装药以及装药安全性的研究中得到了应用。赵海波等<sup>[3]</sup>利用多颗粒有限元法对 PBX-3 颗粒的成型过程进行仿真,得到了压制过程中造型粉颗粒的温度与预紧力大小对炸药致密化效果的影响规律。曹兴等<sup>[4-5]</sup>使用 Marc 软件结合连续动力学方法分析了工艺参数对圆柱形药柱成型质量的影响,发现炸药粉末主要为轴向流动,松装密度和压制速率会影响粉末成型后的质量。Xiao<sup>[6]</sup>、Guo<sup>[7]</sup>等通过离散元法 (DEM) 模拟炸药晶体和颗粒在压制作用下的损伤、失效以及裂纹扩展行为,揭示了炸药粉末在模压过程中的细观力学行为。Sun 等<sup>[8]</sup>结合炸药晶体的细观真实形态建立了双尺度 3D 离散元模型,得到了不同尺度炸药的致密化行为,并首次从能量耗散的角度解释了密度不均匀和应力衰减的潜在诱发机制。

基于此,为深入研究异形装药成型密度均匀性和应力集中性、以及工艺参数对其的影响规律,本研究采用 Marc 软件对不同工况下的异形药柱压制成型进行了数值模拟,从成型密度和应力分布的角度,

收稿日期: 2024-10-31; 修回日期: 2024-11-25

网络出版日期: 2025-04-07

作者简介: 罗春旺(1999-),男,硕士研究生,主要从事爆炸力学及高效毁伤技术研究。e-mail: lcw2603@163.com

通信联系人: 苟瑞君(1968-),女,教授,主要从事爆炸力学和弹药工程研究。e-mail: grjzsh@163.com

引用本文: 罗春旺, 苟瑞君, 于晓东, 等. 压装工艺参数对异形药柱装药影响的模拟研究[J]. 含能材料, 2025, 33(6): 635-644.

LUO Chun-wang, GOU Rui-jun, YU Xiao-dong, et al. Simulation Study on the Impact of Pressing Process Parameters on Irregular-Shaped Charges[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2025, 33(6): 635-644.

系统分析压制压力、压制速率、初始相对密度、摩擦系数以及保压时间等工艺参数对异形装药成型质量以及压制安全性的影响,为选择合理可靠的压装工艺参数提供借鉴。

## 1 异形装药结构的数值计算模型

### 1.1 模型的建立

传统的破甲战斗部常采用异形装药结构。该结构主要通过压装工艺压制而成,具有特定形状和强度<sup>[9]</sup>,成型结构如图 1a,装药直径  $D=88\text{ mm}$ ,成型高度  $H=132\text{ mm}$ ,喇叭形锥角  $\alpha=60^\circ$ 。

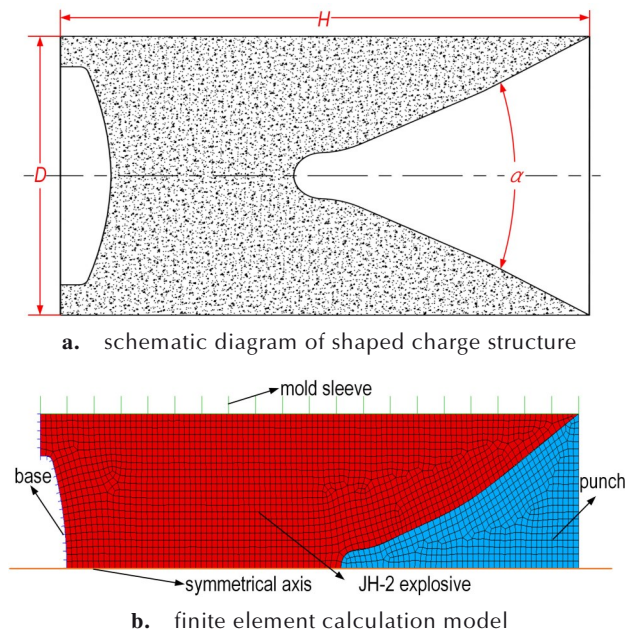


图 1 异形装药结构和压装有限元模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of irregular-shaped charge structure and pressing finite element model

采用非线性有限元软件 Marc 建立异形装药结构压制成型过程的二维轴对称模型,如图 1b 所示,包括冲头、模套、底座和炸药 4 部分。其中,炸药视为变形体,冲头、底座和模套为刚体材料,变形体与刚体的接触方式定义为摩擦接触。由于压制过程发生显著的大变形和大位移,采用网格重画分技术和更新的拉格朗日方法进行求解,通过表格定义加压、保压和泄压 3 个求解阶段<sup>[10-11]</sup>。

炸药材料为 JH-2,采用塑性动力学模型描述炸药的动态压制过程,并通过 Marc 材料库中的 Shima-Oyane 材料模型表征炸药的屈服准则<sup>[12-13]</sup>,此模型能准确描述粉末的流动特性和相对密度分布,表

达如式(1):

$$F = \frac{1}{(q_1 + q_2 \rho^{q_3})^{q_4}} \left( \frac{3}{2} \sigma^d \sigma^d + \frac{p^2}{(b_1 + b_2 \rho^{b_3})^{2b_4}} \right)^2 - \sigma_y \quad (1)$$

式中,  $\sigma^d$  表示偏应力分量张量, MPa;  $\sigma_y$  为单轴屈服应力, MPa;  $p$  表示静水压力, MPa;  $\rho$  为相对密度,  $\rho = \rho_1 / \rho_2$ ,  $\rho_1$  为粉体炸药的松装密度,  $\rho_2$  为炸药的理论压实密度;  $q_1, q_2, q_3, q_4, b_1, b_2, b_3, b_4$  为系数<sup>[14]</sup>。

### 1.2 模型的实验验证

#### 1.2.1 实验研究

为验证有限元模型和材料参数设定的可靠性,对圆柱形药柱的压制成型过程展开了试验研究。图 2 为试验布置及成型实物图,试验设备包括四柱液压机、压药模具、定位块等;结合文献[5]的研究方法,使用 210 MPa 压力对 JH-2 药柱进行压制, JH-2 药柱的成型尺寸为  $\Phi 80\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ 。

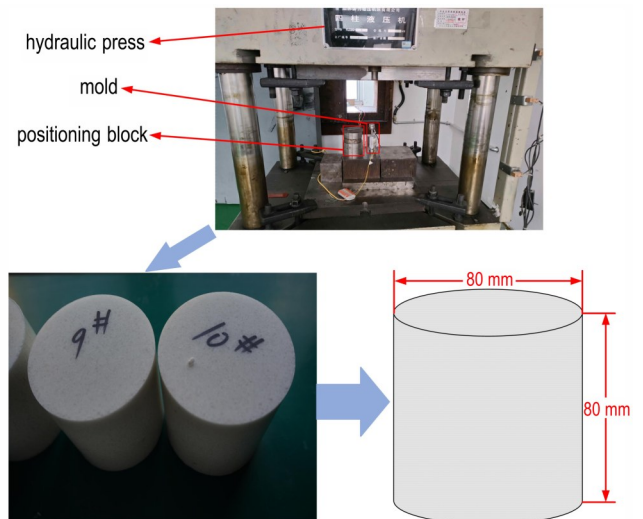


图 2 圆柱形药柱压制试验布置及成型示意图

Fig. 2 Layout and forming diagram of cylindrical charges' compression test

针对试验压制得到 JH-2 药柱,采用 CT 扫描成像设备对药柱不同高度 ( $h=20, 30, 50, 60, 70\text{ mm}$ ) 位置进行 X 光水平扇束扫描,其试验参考电压为 100 kV,样品旋转角度为  $360^\circ$ ,且设备密度分布率的可靠性误差在 0.3% 以内,试验布置见图 3。通过 CT 扫描和切片可以得到药柱上  $h_1, h_2, h_3, h_4, h_5$  高度处横截面位置的灰度分布图像,随后利用 MATLAB 进行图像灰度校正、数据分割与提取<sup>[15]</sup>,获得药柱上  $h_1, h_2, h_3, h_4, h_5$  截面的平均密度,由密度分布和大小来验证模拟的可靠性。

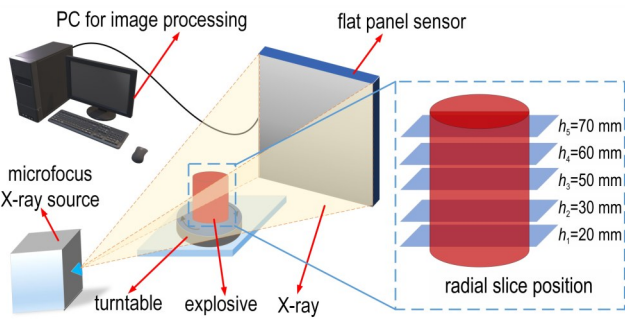


图3 CT扫描设备布置图

Fig.3 Layout of CT scanning equipment

1.2.2 模型的模拟与验证

采用 Marc 软件<sup>[12]</sup>建立  $\Phi 80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$  圆柱形 JH-2 药柱压制过程的数值计算模型,其中加载压力设置为 210 MPa,药柱压制过程模型如图 4 所示,

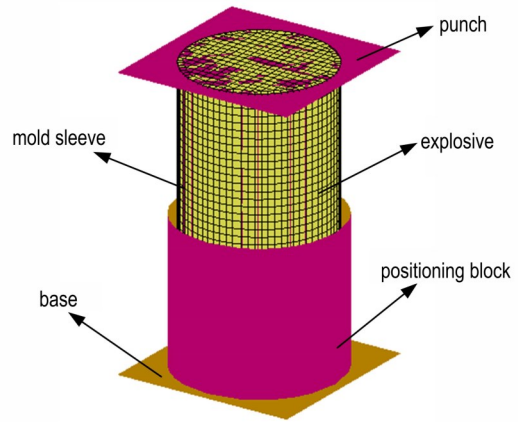


图4 JH-2药柱有限元模型

Fig.4 Finite element model of JH-2 charge

所采用的炸药材料及 Shima-Oyane 模型参数见表 1、2<sup>[16]</sup>。

表1 JH-2炸药材料参数<sup>[16]</sup>

Table 1 Material parameters of JH-2 explosive<sup>[16]</sup>

material	density / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	elastic modulus / GPa	Poisson's ratio	yield strength / MPa	coefficient of friction	coefficient of expansion
JH-2	1.68	0.816	0.25	8.94	0.1	4.75e-05

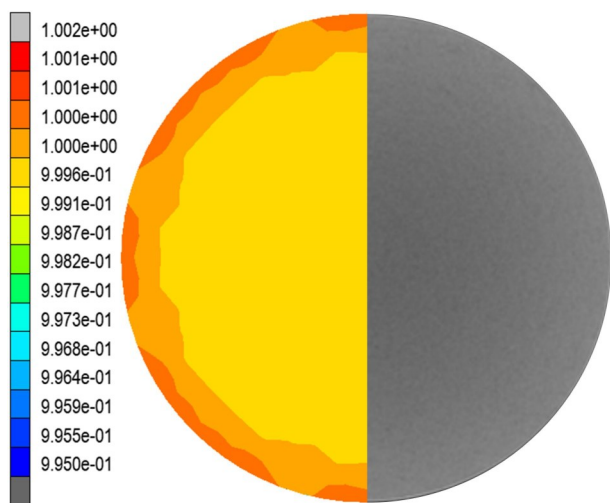
表2 Shima-Oyane 参数<sup>[16]</sup>

Table 2 Shima-Oyane parameters<sup>[16]</sup>

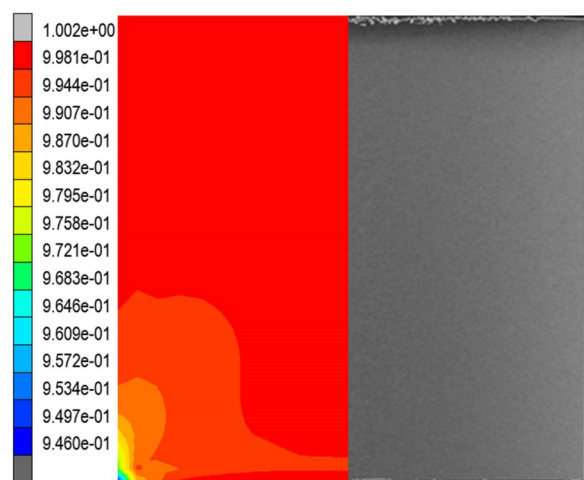
$q_1$	$q_2$	$q_3$	$q_4$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
0	1	1	5.5	6.25	-6.25	1	-0.5

压制成型后,分别在冲头与炸药的接触面、药柱轴向对称面处提取相对密度分布的模拟结果,与压制 CT 扫描试验的密度分布结果,得到密度分布对比图,如

图 5 所示。图 5a 为炸药与冲头接触位置的径向密度分布,CT 扫描图像越黑,表示密度越低,因此,由图 5a 左侧的模拟结果和右侧的 CT 图像可见,药柱中心的密度低,外缘处的密度高;图 5b 为药柱轴向对称面上的密度分布,靠近冲头一端,轴线处的密度低,外侧密度大,而靠近底座一端,密度分布恰好相反,图 5b 左侧模拟结果与右侧 CT 图像保持一致。



a. radial section at the contact position with the punch



b. axial section with the plane of symmetry as the cross-section

图5 压装密度数值模拟与试验结果对比

Fig.5 Comparison of numerical simulation and experimental results of pressing density

为分析成型药柱不同位置处的密度分布,按照图3药柱上 $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$ 、 $h_4$ 、 $h_5$ 的截面位置,分别对模拟和试验压制得到的药柱进行切片,计算各截面的平均密度,得到了如表3所示的在不同轴向位置对药柱切片的模拟与试验结果。由表3可以看出,不同区域的平均密度相差最大值为 $0.0314 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,相对误差均小于2%,且不同位置的密度变化保持一致,说明数值模拟结果与试验结果较吻合。可见,Marc软件的模拟方法能够可靠地描述JH-2药柱压制成型的过程,为此,研究将通过Marc软件对异形JH-2药柱的压制过程进行相关研究。

表3 不同切片位置平均密度的实验值与模拟值对比

Table 3 Comparison of simulated and experimental average densities at different slice positions

slice position / mm	numerical / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	experimental / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	relative error
$h_1=20$	1.6585	1.6845	1.54%
$h_2=30$	1.6644	1.6958	1.85%
$h_3=50$	1.6694	1.6971	1.63%
$h_4=60$	1.6692	1.6918	1.34%
$h_5=70$	1.6662	1.6912	1.51%

### 1.3 异形药柱成型的模拟

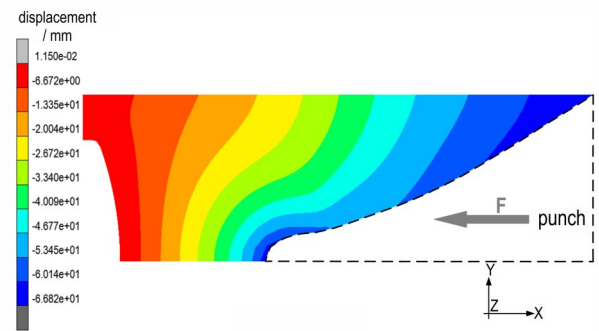
#### 1.3.1 药柱内部变化的模拟

为分析异形药柱的药内部位移、相对密度和应力分布规律,将得到的异形装药有限元模型,结合实际压药工艺,模拟异形装药结构中JH-2炸药的压制过程,分析了药内部位移、相对密度与应力,其中,压制方法为定压法<sup>[10]</sup>,冲头压制压力设置为450 MPa,炸药为松装JH-2炸药,其它相关炸药参数见表1。

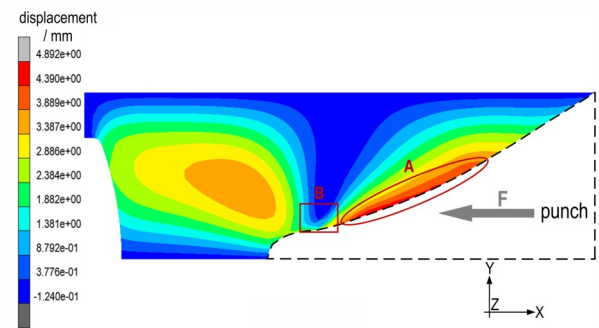
#### 1.3.2 药内部位移、相对密度及应力分布

采用图1b所示模型对异形药柱压制过程进行模拟,得到压制成型后的药内部位移、相对密度与应力,分别如图6~图8所示。

由图6a可以看出,装药内部的不同位置出现的位移不同,靠近冲头一侧的药内部位移最大,离冲头越远,药内部位移越小,且呈阶梯式递减,最大轴向位移为66.82 mm;由图6b可见,径向的药内部位移主要集中在炸药与冲头接触的A区域,径向最大位移为4.89 mm,此外,B区域的粉末径向位移明显小于其他区域,原因是冲头在与B区域炸药的接触位置存在结构突变,不利于粉末的流动。轴向的药内部位移明显大于径向,说明异形药柱中粉末的流动方向主要为轴向流动,此结果与粉末成型理论<sup>[16]</sup>一致。



a. axial displacement



b. radial displacement

图6 药柱内部不同方向位移云图

Fig.6 Displacement contour inside the charge at different directions

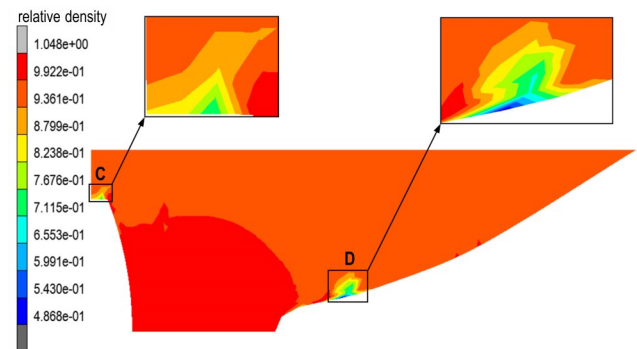


图7 药柱内部相对密度分布云图

Fig.7 Contour of relative density distribution inside the charge

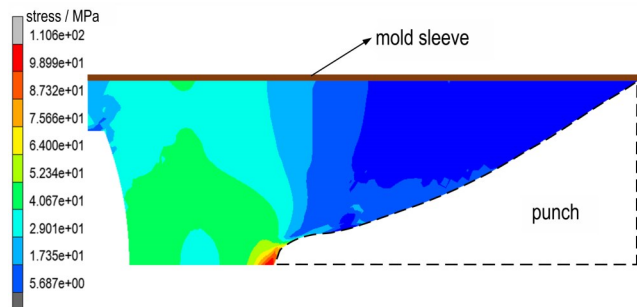


图8 药柱内部应力分布云图

Fig.8 Contour of stress distribution inside the charge

异形药柱内部相对密度分布如图7所示,药柱内部的相对密度分布明显不均匀。靠近轴线区域的相对密度最大,相对密度值达到0.99~1,最小相对密度分布主要集中在图示的C、D两区域。从整体上看,除了C、D两区域,异形药柱内部其他位置的相对密度分布比较均匀,相对密度达到0.93以上,C区域附近的相对密度为0.76~0.93,D区域的相对密度则为0.48~0.87,相对密度分布梯度较大。

结合图7的相对密度云图可知,轴线位置的相对密度最大,达0.99以上,其次是模套附近,相对密度为0.96,而C、D区域的相对密度为0.65,属于最小相对密度区域。其原因是,轴线区域炸药粉末流动空间明显小于模套区域,导致轴线区域的炸药密度更高;此外,C、D区域的炸药由于装药结构的限制,这两个位置的模具存在一定的弧度,不利于炸药粉末的流动和密实,造成C、D位置出现炸药粉末松散区,可能会造成药柱裂纹、掉块等缺陷,在实际应用中影响炸药爆轰波的传播,降低毁伤效果<sup>[17]</sup>,因此可根据压制效果进行模具改进等,以提高压药质量。

在压制过程中,受异形装药结构、炸药粉末运动等多因素的影响,异形药柱内部的应力分布不均匀,如图8所示。最大应力集中在炸药与冲头头部接触区域,其最大应力值达到110.6 MPa,最小应力主要分布在冲头与模套之间的区域,最小应力值为5.687 MPa,应力从轴线区域向模套方向逐渐减小。结合图7可知,C、D区域位置的应力值也处于较小值,与低密度分布的位置相吻合。应力分布不均匀不仅影响异形药柱的密度分布,还会造成某一区域的应力集中,不利于压药过程的安全;若应力集中区域存在较大的应力梯度,还可能导致药柱内部裂纹的生长和扩张。

结合以上分析,异形药柱压制过程中,炸药粉末主要流动方向为轴向。中心轴线区域的相对密度和应力值最高,相对密度和应力的分布梯度较大,此外,在装药结构突变位置,存在明显的低密度和应力集中现象。研究将进一步探究工艺参数对异形药柱压制质量与安全性的影响。

## 2 工艺参数对异形药柱成型影响的模拟研究

### 2.1 工艺参数的选取

压制工艺参数对药柱的成型质量与安全性至关重要,不合理的工艺参数可能导致成型药柱密度分布不均,药柱内部出现应力集中等问题<sup>[18]</sup>。压制压力和初

始相对密度决定了药柱的成型密度,但压力过大会存在爆炸的危险;在压制过程中模具与炸药直接接触,炸药与模具间的摩擦系数则影响炸药粉末的流动速度和方向,是导致密度不均匀的重要因素之一;合理的压制速率和保压时间可以促进应力传递和释放,提高药柱的相对密度和力学性能<sup>[19]</sup>。因此,研究选取压制压力、压制速率、初始相对密度、摩擦系数、保压时间等5个工艺参数,分析其对药柱密度与应力的影响,以进行对异形药柱成型质量与安全性的影响研究。

### 2.2 影响规律的模拟研究

本研究采用单一变量控制原则<sup>[20]</sup>,在装药为松装JH-2炸药,压制方法为定压法的情况下,结合图1b的有限元模型,每次改变一组压制工艺参数,分别模拟压制压力、压制速率、初始相对密度、摩擦系数及保压时间对异形药柱成型的影响。成型质量和压装安全性通过相对密度、内部应力和回弹量等参量评估。其中,各工艺参数的具体选值见表4。

由于内部应力分布不均匀会导致应力集中,造成压药过程中的安全性问题,因此,研究进一步模拟分析了成型药柱内部残余应力及其分布,图9为节点路径上的监测点位置。

表4 各工艺参数的选值列表

Table 4 List of selected value for each process parameter

pressing pressure / MPa	pressing rate / mm·s <sup>-1</sup>	initial relative density	friction coefficient	holding time / s
250	0.1	0.55	0.10	30
300	0.5	0.60	0.15	60
350	1.0	0.65	0.20	90
400	1.5	0.70	0.25	120
450	2.0	0.75	0.30	150

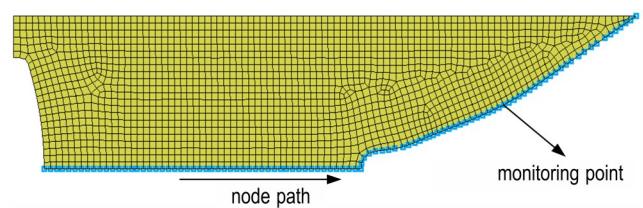


图9 监测点位置示意图

Fig.9 Schematic diagram of the locations of monitoring points

### 2.3 工艺参数对异形药柱成型影响规律的结果与讨论

#### 2.3.1 压制压力对异形药柱成型的影响

为分析研究冲头压制压力变化对异形装药结构药柱成型的影响,统计不同压制压力下药柱内部的相对

密度的最大值和最小值, 绘制如图 10 所示变化曲线。由图 10 可以看出, 随着压制压力的增大, 最大相对密度都能达到 1, 最小相对密度则是呈先减小后增大再减小的变化趋势, 压力为 300~350 MPa 时, 最小相对密度达到最大; 可见, 此时药柱内部的相对密度差最小, 成型密度均匀性最好。

对图 9 监测点的应力值进行统计, 得到了不同压制压力下的监测点应力变化, 结果如图 11 所示。由图 11 可以看出, 压制压力越大, 药柱内部的应力越大, 异形药柱内部各监测点处的应力值也越大, 炸药与冲头头部接触区域的应力集中越明显, 其最大应力值能够达到 100 MPa 左右, 应力过大会形成热点, 可能在压药过程中发生爆炸。同时, 压制力越大, 炸药与冲头头部接触区域的应力差也越大, 造成药柱出现裂纹的风险也越高。当压制力为 250 MPa 和 350 MPa 时, 监测点处的最大应力值最小, 为 75 MPa 左右, 应力梯度变化也最小。结合以上分析, 取 300~350 MPa 的压力对异形药柱进行压制时, 相对密度分布更均匀, 内部应力相对较低, 既能保证成型质量, 还能减小应力集中, 保证压药安全。

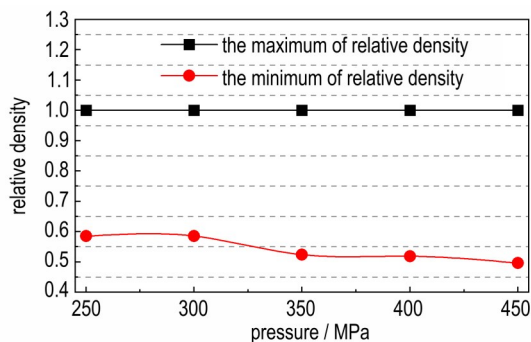


图 10 相对密度随压力变化曲线  
Fig. 10 Variation curves of relative densities with pressures

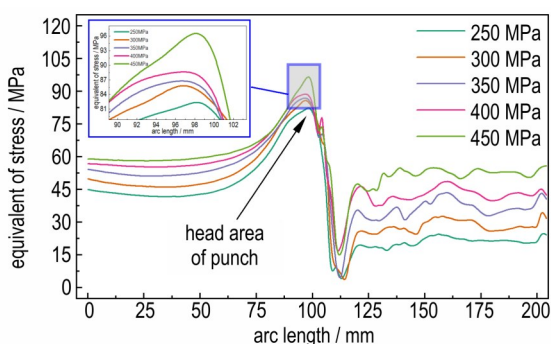


图 11 不同压制压力下各监测点应力随路径变化曲线  
Fig. 11 Variation curves of stresses at monitoring points with paths for different pressing pressures

### 2.3.2 压制速率对异形药柱成型的影响

为分析压制速率对异形药柱成型质量的影响, 提取了速率为 0.1、1.0、2.0  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  时的相对密度分布, 如图 12 所示。在不同的压制速率下, 相对密度分布规律和密度值大小相似, 密度分布的位置和大小受压制速率的影响较小, 但相比于图 12b、图 12c, 低速压制导致内部应力传递速度减缓, 粉末流动受限<sup>[9]</sup>, 所以图 12a 的密度分布均匀性较差。因此, 在 0.1~2.0  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  的速率范围内, 采用高速压制可以提高密度分布均匀性, 成型质量更好。

对图 9 监测点的应力值进行统计, 得到了不同压制速率下的监测点应力变化, 结果如图 13 所示。低速压制时, 内部应力的最大值要大于高速压制, 药柱内部的应力梯度更大, 更容易出现内部裂纹, 原因是低速压制时内部应力的传递速度较慢, 应力主要集中在炸药与冲头头部的接触位置。当压制速率为 0.1~1.0  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 最大应力呈下降趋势; 当速率达到 1.5  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  及以上时, 最大应力基本一致, 应力梯度差也最小。因此, 压制速率在 1.5  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$  左右时, 药柱内部相对密度均

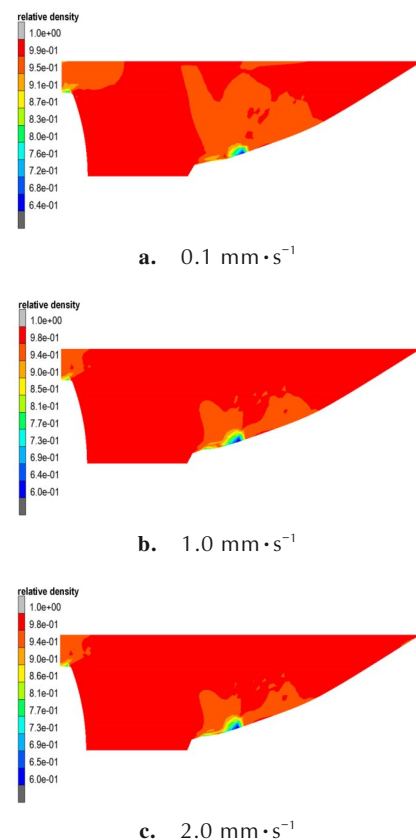


图 12 不同压制速率下异形药柱相对密度分布云图  
Fig. 12 Contours of relative density distribution of the irregular-shaped charge for different pressing rates

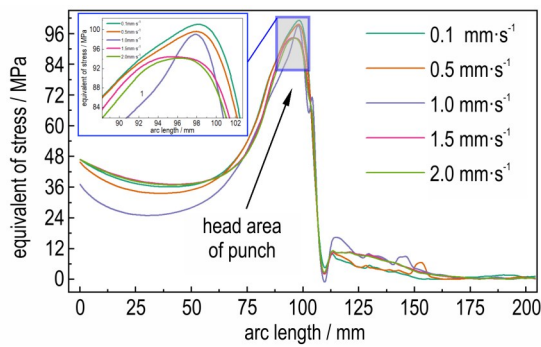


图 13 不同压制速率下各监测点应力随路径变化曲线  
**Fig.13** Variation curves of stresses at monitoring points with paths for different pressing rates

匀性好,应力梯度差小,出现裂纹和应力集中等安全问题的可能性也最小。

### 2.3.3 初始相对密度对异形药柱成型的影响

为分析研究初始相对密度变化对异形药柱成型的影响,统计不同初始相对密度下药柱内部的相对密度的最大值和最小值,绘制如图 14 所示变化曲线。由图 14 可知,初始相对密度为 0.55~0.65 时,成型药柱的最小相对密度随初始相对密度的增大而增大,密度分布越来越均匀,当初始相对密度达到 0.65 后,最小相对密度不再明显增大,而是基本保持稳定,说明炸药粉末的初始相对密度越大,压制过程中粉末向低密度区域的流动量增加,冲头结构突变位置等异形装药结构所造成的限制减弱,药柱成型密度也越大,密度分布更均匀。

对图 9 监测点的应力值进行统计,得到了不同初始相对密度下的监测点应力变化,结果如图 15 所示。药柱内部的最大应力随 JH-2 炸药初始相对密度的增大而减小,松装密度越小,应力集中越明显。其原因是,初始相对密度越大,在压制过程中药柱内部克服粉末间相互作用力的力越多,导致内部残余应力减小,应

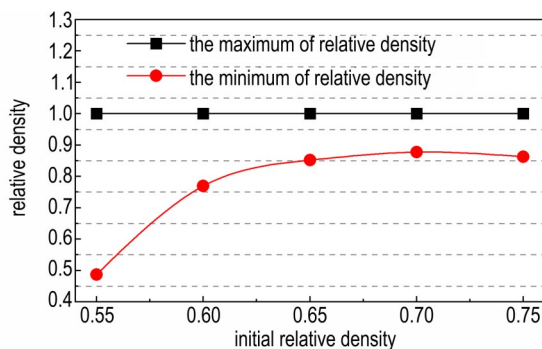


图 14 相对密度随初始相对密度变化曲线  
**Fig.14** Variation curves of relative densities with initial relative densities

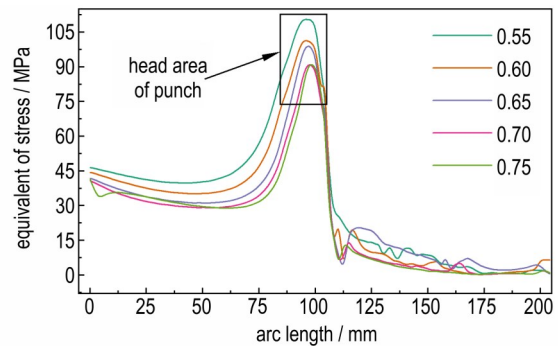


图 15 不同初始相对密度下各监测点应力随路径变化曲线  
**Fig.15** Variation curves of stresses at monitoring points with paths for different initial relative densities

力梯度差也变小<sup>[21]</sup>。因此,从成型质量和安全性方面考虑,初始相对密度选择 0.65 及以上较为合适。

### 2.3.4 摩擦系数对异形药柱成型的影响

为分析研究摩擦系数变化对异形药柱成型的影响,统计不同摩擦系数下药柱内部的相对密度的最大值和最小值,绘制如图 16 所示变化曲线。结合图 16,最大相对密度都能达到 1,但最小相对密度的变化较明显,摩擦系数为 0.10~0.15 时,最小相对密度不断增大;摩擦系数为 0.15 时,最小相对密度达到所有工况中的最大值;摩擦系数为 0.15~0.25 时,最小相对密度逐渐降低;摩擦系数大于 0.25 时,最小相对密度又开始上升。摩擦系数过大时,用于克服摩擦力的应力损耗增大,低密度区受力减弱,不利于药柱密实;摩擦系数过小时,对低密度区颗粒的约束减弱,也不利于药柱压实。

对图 9 监测点的应力值进行统计,得到了不同摩擦系数下的监测点应力变化,结果如图 17 所示。内部最大应力随摩擦系数的增大而减小,最大应力的变化量在 10 MPa 以内,摩擦系数越小,应力集中越明显,是因为摩擦系数越大,压制过程中需要克服摩擦力的

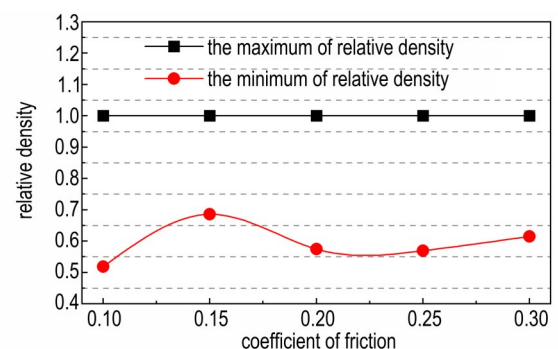


图 16 相对密度随摩擦系数变化曲线  
**Fig.16** Variation curves of relative densities with friction coefficients

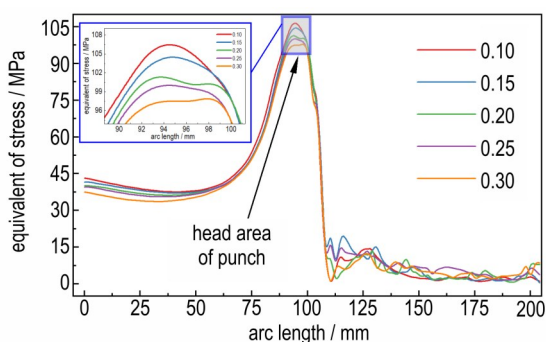


图 17 不同摩擦系数下各监测点应力随路径变化曲线

Fig. 17 Variation curve of stresses at monitoring points with paths for different friction coefficients

值也越大, 导致压力损失也增大, 药柱内部的应力传递受到影响, 使得药柱内部的密度分布更加不均匀。总的来说, 模具越光滑, 药柱成型质量越好, 其中摩擦系数为 0.15 左右时, 应力传递更加充分, 相对密度分布均匀, 应力梯度差小, 且能满足压药安全性。

### 2.3.5 保压时间对异形药柱成型的影响

为分析研究保压时间变化对异形药柱成型的影响, 统计不同保压时间下药柱内部的相对密度的最大值和最小值及药柱回弹量, 绘制如图 18 所示变化曲线。根据图 18 可知, 随着保压时间的加长, 最大相对密度保持不变, 最小相对密度则有一个微小的增加, 保压时间从 30 s 延长到 150 s 时, 最小相对密度增量为 0.00907, 说明保压时间越久, 成型药柱内部的密度分布均匀性会有所提高。进一步分析回弹量的变化, 保压时间低于 90 s 时, 药柱回弹量随保压时间缓慢减小; 保压时间达到 120 s 时, 回弹量趋于稳定。其原因是保压可以使药柱内部的压力传递更加充分, 为炸药粉末间的黏合、破碎以及变形提供时间, 有利于链段的力学松弛, 从而提高密度均匀性, 减小药柱回弹。

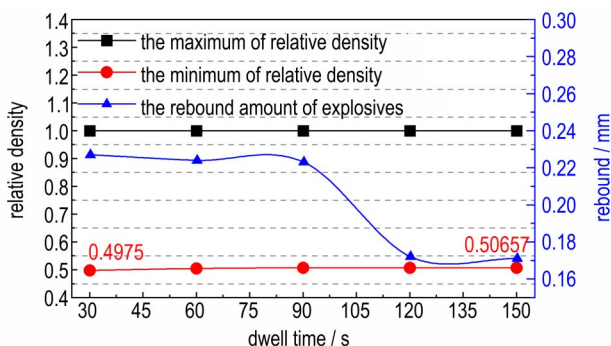


图 18 相对密度随保压时间变化曲线

Fig. 18 Variation curves of relative densities with holding time

对图 9 监测点的应力值进行统计, 得到了不同保压时间下的监测点应力变化, 结果如图 19 所示。从图 19 可以看出, 在不同的保压时间下, 内部应力最大值相差不大, 均为 110 MPa 左右。但在炸药与冲头锥形母线接触区域, 保压时间越长, 此位置的应力值也越大, 其原因是随着保压时间的增加, 药柱内部的应力传递和释放更加充分, 使得低密度区域的应力值升高, 应力梯度差减小, 降低裂纹等缺陷产生的可能性。综上, 保压可以提高密度均匀性, 减小回弹量, 降低应力梯度, 避免药柱出现缺陷, 但保压时间达到一定值后, 其作用效果不再增加<sup>[22]</sup>, 在此异形装药中, 保压时间选择 120 s 左右较为合适。

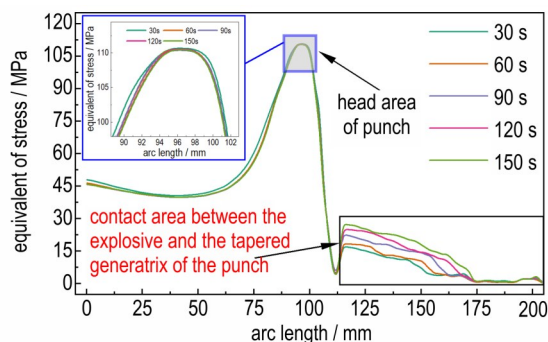


图 19 不同保压时间下各监测点应力随路径变化曲线

Fig. 19 Variation curve of stresses at monitoring points with paths for different holding time

## 3 结论

研究通过 Marc 有限元分析软件, 利用连续塑性动力学方法对异形药柱的压制成型过程进行模拟分析, 系统研究了压制工艺参数对异形装药成型质量及安全性的影响因素, 主要结论如下:

(1) 异形装药内部密度和应力分布不均匀, 存在明显的密度松散区和应力集中区域, 容易出现装药缺陷和安全隐患; 轴线处的相对密度最大, 最小相对密度出现在炸药与冲头母线突变位置的接触区域, 内部应力主要集中在冲头头部与炸药接触区域; 最小相对密度和应力集中受装药结构的限制, 可通过改进模具减小其影响。

(2) 压制压力、初始相对密度、保压时间和摩擦系数 4 个工艺参数同时影响药柱的成型密度和应力分布; 压制压力、初始相对密度和压制速率则是影响异形药柱应力集中的主要因素; 压制压力越大、初始相对密度越高、保压时间越长, 药柱成型相对密度也越大, 压



制速率和摩擦系数对密度和应力分布的影响则不呈现特定规律。

(3)当压制压力取 300~350 MPa、压制速率为  $1.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 、初始相对密度为 0.65、摩擦系数为 0.15、保压时间选择 120 s 时,此异形装药内部的密度分布相对均匀,应力梯度差低,既能保证成型质量,还能减小应力集中、避免裂纹产生,保证压药安全性。

#### 参考文献:

- [1] MEHMANNVAZ H, RAMEZANI A, NABAKHTEH M, et al. A practical review study on shaped charge in the last two decades (2000–2020) [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2021, 12(4): 665–693.
- [2] 智小琦. 弹箭炸药装药技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2012: 142–148.  
ZHI Xiao-qi. Charge technology of explosive on projectile and rocket[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2012: 142–148.
- [3] 赵海波, 李自胜, 肖晓萍, 等. PBX-3 造型粉颗粒压制成型过程仿真分析[J]. 火工品, 2024, (06): 48–54.  
ZHAO Hai-bo, LI Zi-sheng, XIAO Xiao-ping, et al. Simulation analysis of PBX-3 powder particle densification [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2024, (06): 48–54.
- [4] 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 Xing, ZHAO Han-dong, CAO Hong-song, 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.
- [5] 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.  
CAO Xing. Process Simulation and Quality Prediction of Powder Explosive Compression Molding [D]. Taiyuan: North University of China, 2021.
- [6] XIAO Y, ZHANG Q, FAN C. et al. Numerical analysis of the damage and failure behavior of polymer-bonded explosives using discrete element method [J]. *Comp. Part. Mech*, 2024, 11: 579–598.
- [7] GUO Y, LIU R, CHEN P, et al. Mechanical behavior of PBX with different HMX crystal size during die pressing: Experimental study and DEM simulation [J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 222: 109378.
- [8] SUN H, FAN X, ZHAN M, et al. Mechanism of uneven densification in PBX compression molding [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 282: 109683.
- [9] 黄振亚, 罗运军, 赵省向. 火炸药成型加工工艺学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020: 186–312.  
HUAN Zhen-ya, LUO Yun-jun, Zhao Xing-xiang. Technology of Forming and Processing of Explosive Materials [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2020: 186–312.
- [10] 董林峰著. 粉末金属成形过程的计算机仿真与成形中的缺陷预测[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011: 4–14.  
DONG Lin-feng. Computer simulation of powder metal forming process and prediction of defects in forming [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011: 4–14.
- [11] 王勖成, 邵敏. 有限单元法基本原理与数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997: 531–548.  
WANG Xu-cheng, SHAO Min. The basic principles and numerical methods of the finite element method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997: 531–548.
- [12] 刘劲松, 张士宏, 肖寒. 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.  
LIU Jin-song, ZHANG Shi-hong, XIAO Han. Application of MSC.MARC in Material Processing Engineering [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2010: 325–357.
- [13] SHIMA S, OYANE M. Plasticity theory for porous metals [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1976, 18(6): 285–291.
- [14] 郭岩岩, 历长云, 冀国良, 等. 粉末致密化过程数值模拟研究现状 [J]. 材料导报, 2022, 36(18): 174–180.  
GUO Yan-yan, LI Chang-yun, JI Guo-liang, et al. Research status of numerical simulation of powder densification process [J]. *MATERIALS REPORTS*, 2022, 36(18): 174–180.
- [15] 杨雪海, 张伟斌, 杨仍才, 等. 复杂构型 PBX 截面密度分布 CT 测试方法 [J]. 含能材料, 2016, 24(6): 609–613.  
YANG Xue-hai, ZHANG Wei-bin, YANG Reng-cai, et al. CT test method for the cross-section density distribution of pbx component with complex configuration [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(6): 609–613.
- [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 Xing, CAO Hong-song, ZHANG Gen-sheng, et al. Simulation study on the influence of compression process parameters on the quality of hollow charges [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(3): 202–210.
- [17] 柯华. 现代粉末冶金基础与技术 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2020: 106–122.  
KE Hua. Introduction of Modern Powder Metallurgy [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2020: 106–122.
- [18] 何海龙. PBX 代料制备和压制成型性能研究 [D]. 北京化工大学, 2024.  
HE Hai-long. Study on the Preparation and Compression Molding Properties of PBX Substitutes [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2024.
- [19] 焦云多, 毕晓露, 邹琅, 等. 异形压装药柱精密成型工艺 [J]. 兵工自动化, 2024, 43(11): 83–86.  
JIAO Yun-duo, BI Xiao-lu, ZOU Lang, et al. Technology of precise formation of heteromorphic grain by pressing [J]. *Ordinance Industry Automation*, 2024, 43(11): 83–86.
- [20] 李全贵, 邹全乐. 工程实验设计 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2024: 11–15.  
LI Quan-gui, ZOU Quan-le. Engineering Design of Experiments [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2024: 11–15.
- [21] 刘鹏华. 高聚物粘结炸药 (PBX) 的可压性研究 [D]. 太原: 中北大学, 2022.  
LIU Peng-hua. The Research on Compressibility of Polymer Bonded Explosives (PBX) [D]. Taiyuan: North University of China, 2022.
- [22] 卢洋, 李自胜, 肖晓萍, 等. 工艺参数对空心药柱压制成型后回弹的影响 [J]. 爆破器材, 2025, 54(1): 21–27.  
LU Yang, LI Zi-sheng, XIAO Xiao-ping, et al. Influence of process parameters on the springback of hollow grain formed by pressing molding [J]. *Explosive Materials*, 2025, 54(1): 21–27.

## Simulation Study on the Impact of Pressing Process Parameters on Irregular-Shaped Charges

LUO Chun-wang<sup>1</sup>, GOU Rui-jun<sup>1</sup>, YU Xiao-dong<sup>2</sup>, ZHANG Shu-hai<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>2</sup>, PEI Shui-wang<sup>2</sup>

(1. School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Shanxi Jiangyang Chemical Co., Ltd., Taiyuan 030041, China)

**Abstract:** In order to investigate the influencing factors of the pressing effect and safety of the irregular-shaped charges, numerical simulation of the pressing process of the irregular-shaped JH-2 charge, with a diameter of  $D=88$  mm, a molding height of  $H=132$  mm, and a wedge angle of  $\alpha=60^\circ$ , was carried out by using the dynamics of continuous media method in the Marc finite element software, and the effects of process parameters such as pressing pressure, pressing rate, initial relative density, friction coefficient, and holding time on the forming of the charges, including the molding density and internal stress, were studied systematically. The results show that the density and stress distributions inside the irregular-shaped charge are nonuniform, and there are obvious regions of density loose and stress concentration. The pressing pressure, initial relative density, holding time and friction coefficient affect the molding density and stress distribution of charges simultaneously, while the pressing pressure, initial relative density and pressing rate are the main factors affecting the stress concentration of the irregular-shaped charge. In view of this irregular-shaped structure, when the pressing pressure is 300–350 MPa, pressing rate is  $1.5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , initial relative density is 0.65, friction coefficient is 0.15, and holding time is 120 s, the density distribution of the irregular-shaped charge is relatively uniform, and the stress gradient difference is small, which can improve the molding quality, reduce the stress concentration and avoid cracks, and ensure the charging safety.

**Key words:** irregular-shaped charge; powder compacting; charging process; numerical simulation; charging safety

**CLC number:** TJ55

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2024279

(责编: 姜梅)