

文章编号:1006-9941(2021)03-0202-09

炸药压制工艺参数对空心装药质量影响的仿真研究

曹兴¹,曹红松¹,张根生²,吴宗娅²,赵捍东¹,刘恒著¹,王琪¹,罗普光³

(1. 中北大学机电工程学院, 山西 太原 030051; 2. 山西华阳化工有限公司, 山西 太原 030041; 3. 北京航天长征飞行器研究所, 北京 100076)

摘要: 空心装药通常采用压制成型工艺,为了研究工艺参数对装药质量的影响,采用基于连续介质力学的方法,建立了空心JO-9159炸药压制过程有限元仿真模型,仿真分析了JO-9159炸药压制成型过程的相对密度、位移以及等效应力变化规律。在此基础上,针对压制速率、初始相对密度以及摩擦系数3种主要工艺参数对JO-9159炸药压制成型质量的影响进行了仿真与分析。结果显示:压制过程中JO-9159炸药粉末主要是轴向流动,靠近阴模区炸药流动相对缓慢;压制速率为 $0.5\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时、摩擦系数为0.25时,成型后装药相对密度较为均匀,回弹量较小。

关键词: 空心装药;JO-9159炸药粉末;压制成型;工艺参数

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2020224

1 引言

聚能破甲战斗部装药采用压装法装药,该方法将颗粒状的粉末炸药倒入模具,在压机上通过冲头加压成为具有一定形状、一定强度的药柱^[1]。聚能破甲战斗部装药要求装药密度高且均匀,这样在产生足够能量的同时形成稳定的爆轰波,从而压垮药型罩,产生稳定的射流。装药密度及其均匀性^[2-3]影响聚能破甲战斗部装药质量、发射安全以及毁伤威力。采用压装法装药时,压制速率、温度、压制方式、松装密度等工艺参数影响着成型装药密度及其均匀性,传统压装法控制成型装药质量是通过检测成型药柱的密度以及回弹量来判断装药质量的好坏,根据经验数据不断调整工艺参数,从而达到满足要求的成型装药。这种方法费时、费力,不能直观地观察到药柱内部应力及相对密度状态,难以保证成型药柱质量的一致性。

随着计算机数值模拟技术的发展,针对炸药粉末压

制成型的模拟研究有不少成果,梁华琼等^[4]对以HMX为基的高聚物粘结炸药进行了压制实验,用扫描电镜及激光粒度仪测试表征,揭示了炸药压制过程中,炸药颗粒粒径变化和颗粒破碎等相关规律。张涛等^[5]采用更新拉格朗日方法的热机-耦合分析法对PBX粉末温压成型过程进行了数值模拟,分析了炸药压制过程的应力及相对密度的变化。刘群等^[6]建立了模压条件下炸药颗粒压制成型的计算模型,分析了压制过程中,炸药颗粒的变形、受力和温度变化情况。唐红^[7]等采用物质点法对PBX炸药压制过程进行了数值模拟,分析了PBX炸药压制成型过程中的应力、温度变化以及颗粒的变形。

上述研究主要是针对圆柱型装药压制成型过程,目前针对锥形装药压制成型过程的研究相对较少,而且装药密度及其均匀性影响着聚能破甲战斗部装药质量和毁伤威力。为此,本研究以小口径聚能装药为背景,借助高级非线性有限元仿真软件MSC.Marc模拟仿真了锥形JO-9159炸药装药压制成型过程,分析了压制速率、松装密度等工艺参数对JO-9159炸药装药成型质量的影响。

2 空心装药压制过程仿真模型建立

聚能装药压制成型是将炸药粉末视为可压缩的连

收稿日期: 2020-08-17; 修回日期: 2020-09-18

网络出版日期: 2021-01-21

基金项目: 国家自然科学基金资助(XJJ201806)

作者简介: 曹兴(1993-),男,硕士生,主要从事弹药毁伤研究。

e-mail: 18434365782@163.com

通信联系人: 曹红松(1967-),女,教授,主要从事弹箭虚拟仿真技术

研究。e-mail: chs@nuc.edu.cn

引用本文: 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.

续体,运用连续体塑性力学模型^[8]来分析炸药压制过程的变形行为及相关参数变化规律。压制过程中,粉末材料遵循质量不变定律,局部遵循体积不变原则。求解方法采用更新的拉格朗日方法,该方法是各参量参考每一载荷或时间步长开始时的位形,即在分析过程中参考位形是不断更新的^[9]。

2.1 空心炸药粉末压制工艺流程

炸药压制成型过程原理示意图如图1所示。作用过程如下:首先施加压力给冲头,使冲头向下运动,之后冲头便与炸药接触,炸药粉末受到冲头的挤压发生塑性变形从而达到致密化,最终形成和冲头一致形状的炸药。

在实际生产工程中,聚能装药压制开始时,冲头是埋在炸药里边的,如图2a所示。以聚能装药尺寸直径为20 mm,装药高 H 为 $1.2D$,为24 mm,锥角 α 为 60° 为例,进行JO-9159炸药压制成型仿真。假定初始炸药松装密度为致密体的一半,所以经过计算,压制开始时,JO-9159炸药的初始药高 H_0 为42.2267 mm,冲头下降高度为初始药高减去装药高,为18.2267 mm。

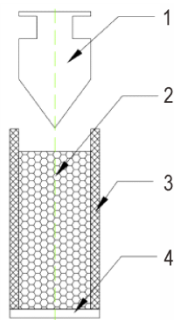


图1 聚能装药压制示意图
1—冲头, 2—炸药粉末, 3—阴模, 4—下模冲
Fig.1 Schematic diagram of shaped charge suppression
1—punch, 2—explosive powder, 3—female mold, 4—lower die punch

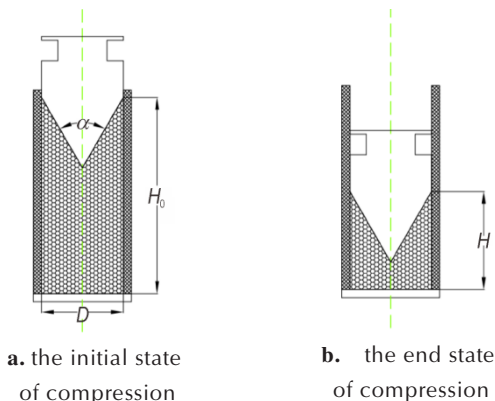


图2 模型几何尺寸
Fig.2 Geometry of the model

2.2 炸药粉末压制有限元模型

由于聚能装药压制成型过程中施加的载荷条件是对称的,且其几何模型是轴对称图形,故为减少计算量,根据实际生产构建了如图3所示的炸药压制二维轴对称有限元模型,其轴线为对称轴。设置初始单元网格大小为0.2。

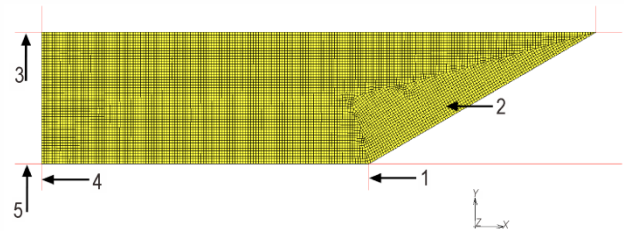


图3 JO-9159炸药压制有限元计算模型
1—冲头, 2—JO-9159炸药, 3—阴模, 4—下模冲, 5—对称轴
Fig.3 Finite element calculation model for JO-9159 explosive compression
1—punch, 2—JO-9159 explosive, 3—female mold, 4—lower die punch, 5—symmetrical axis

2.3 炸药粉末材料本构模型

本次仿真研究JO-9159炸药粉末屈服准则选择Shima-oyane^[10]模型,该模型在模拟粉末压制成型的应用较广泛,并且该模型被集成到Msc.Marc商业软件中,Shima-oyane屈服函数如式(1)^[11-12]:

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

式中, σ_y 为单轴屈服应力,Pa; σ^d 表示偏应力分量张量,Pa; p 表示静水压,Pa; β 、 γ 为只与相对密度有关材料参数,且该参数需要通过材料试验确定。在实践中,一般用如式(2)和式(3)表达:

$$\gamma = (q_1 + q_2 \rho^{q_3})^{q_4} \quad (2)$$

$$\beta = (b_1 + b_2 \rho^{b_3})^{b_4} \quad (3)$$

式中, ρ 为相对密度, $\rho = \frac{\rho_1}{\rho_2}$, ρ_1 为粉末体自由装填的密度, ρ_2 为粉末体的压实密度; q_1 、 q_2 、 q_3 、 q_4 、 b_1 、 b_2 、 b_3 和 b_4 为参数,由单轴压缩试验测得,用以确定 β 、 γ 。本次仿真采用的 β 、 γ ^[13]如式(4)和式(5):

$$\gamma = (6.25(1 - \rho))^{-0.5} \quad (4)$$

$$\beta = \rho^{5.5} \quad (5)$$

式(2)和式(4)以及式(3)和式(5)对比分别可得到 q_1 、 q_2 、 q_3 、 q_4 和 b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 的值,如表1所示。以下仿真基于此参数开展。

仿真采用JO-9159炸药^[14]的材料参数见表2。

表1 Shima-oyane参数

Table 1 Shima-oyane parameters

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

表2 JO-9159炸药材料参数^[14]

Table 2 Material parameters of JO-9159 explosive^[14]

material	density /g·cm ⁻³	elastic modulus /GPa	Poisson's ratio	yield strength /MPa
JO-9159	1.864	8.4	0.224	30

压制过程,炸药由松散状态变为致密状态,其泊松比、弹性模量以及摩擦系数等均为变值,所以本文泊松比与相对密度关系如式(6)^[15]:

$$\mu = \mu_0 e^{-12.5(1-\rho)^2} \quad (6)$$

式中, μ_0 表示致密炸药的泊松比, ρ 为相对密度。

弹性模量与相对密度的关系采用线性变化,如式(7):

$$E = E_0 \rho \quad (7)$$

式中, E_0 表示致密炸药的弹性模量,Pa。

影响摩擦系数的因素有很多,如粉末颗粒大小、模具光滑度、温度等,且摩擦系数并没有一个特定的表达式来表达它的变化,所以本文初步设定摩擦系数的值为0.2。

2.4 仿真参数设置

JO-9159炸药粉末压制成型有三道工序,分别是加载、保压和卸载过程,所以在模拟压制成型过程需要设置加载工况、保压工况和卸载工况共3个工况,其中保压时间设置为180 s;冲头运动状态的实现采取控制点控制的方式,将边界条件添加到控制点上来控制冲头的运动,运动方式用表格实现;网格重划分参数需要根据几何模型的不同,不断调节重划分网格参数,网格重划分参数设置不合理会导致仿真计算无法进行。本次仿真重划分网格方法选择前沿法四边形,网格重划分参数选择单元数,重划分单元数量设置为1100;收敛判据采取残余力或位移准则,并设置收敛容差为0.1,收敛容差决定计算精度,可根据实际需要进行调整。

3 空心炸药压制成型仿真结果及分析

根据实际装药工艺参数范围,这里设定加载时间

为18 s,则压制速率 $v = \frac{18.2267}{18} \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} \approx 1.01 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,

初始相对密度为0.5,摩擦系数0.2时,分析聚能JO-9159炸药装药压制成型后炸药相对密度、位移以及应力变化等情况。

3.1 炸药压制成型相对密度分布

JO-9159炸药的相对密度变化云图如图4所示。分析图4发现,JO-9159炸药相对密度分布是不均匀的。为研究JO-9159炸药在压制成型过程中,JO-9159炸药轴线位置处、冲头与JO-9159炸药接触位置处、阴模与JO-9159炸药接触处以及下模冲与JO-9159炸药接触处相对密度变化情况,故在接触区域设定采样点,图5为JO-9159炸药不同区域处采样点位置示意图。图6为不同区域采样点相对密度变化曲线。从图6a可以得出,靠近下模冲区域的相对密度要大于靠近冲头区域及中间区域的相对密度,并且中间区域相对密度是最小的。分析图6b发现,冲头区域相对密度分布较为均匀,除了冲头头部外,其他区域相对密度值均在0.90以上。观察图6c发现,阴模区相对密度变化波动较大,但其相对密度差值不超过0.04,整体上看,该区域相对密度在0.92以上。从图6d可以看出,下模冲附近区整体相对密度为0.95~1。

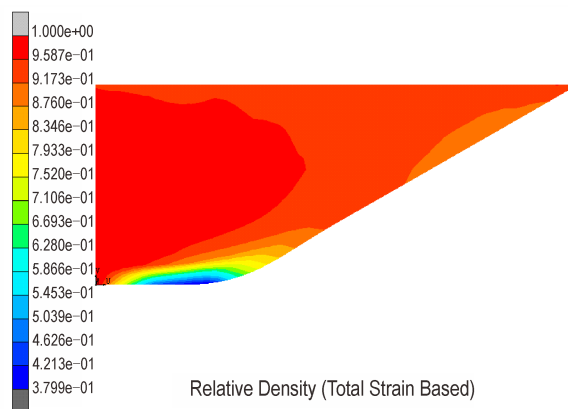


图4 JO-9159炸药的相对密度变化云图

Fig.4 Cloud map of relative density change of JO-9159 explosive

上述结果分析表明,相对密度最大是靠近下模冲区域,其次是靠近阴模区,再之后是冲头区,最后是轴线区。产生这种现象的原因是,在JO-9159炸药压制成型过程中,冲头向下运动时,轴心处的炸药向下运动所受的阻力较小,而靠近阴模和下模冲的区域,炸药与其发生摩擦,从而造成向下运动时产生较大的阻力,所以轴线处的相对密度较小,靠近阴模及下模冲相对密度较大。

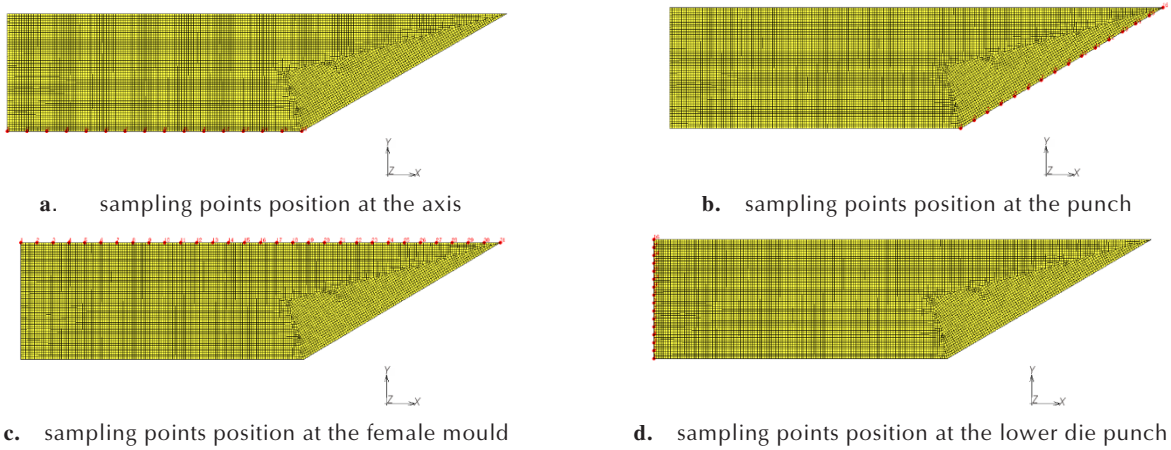


图5 JO-9159炸药不同区域采样点位置

Fig.5 Location of sampling points in different areas of JO-9159 explosive

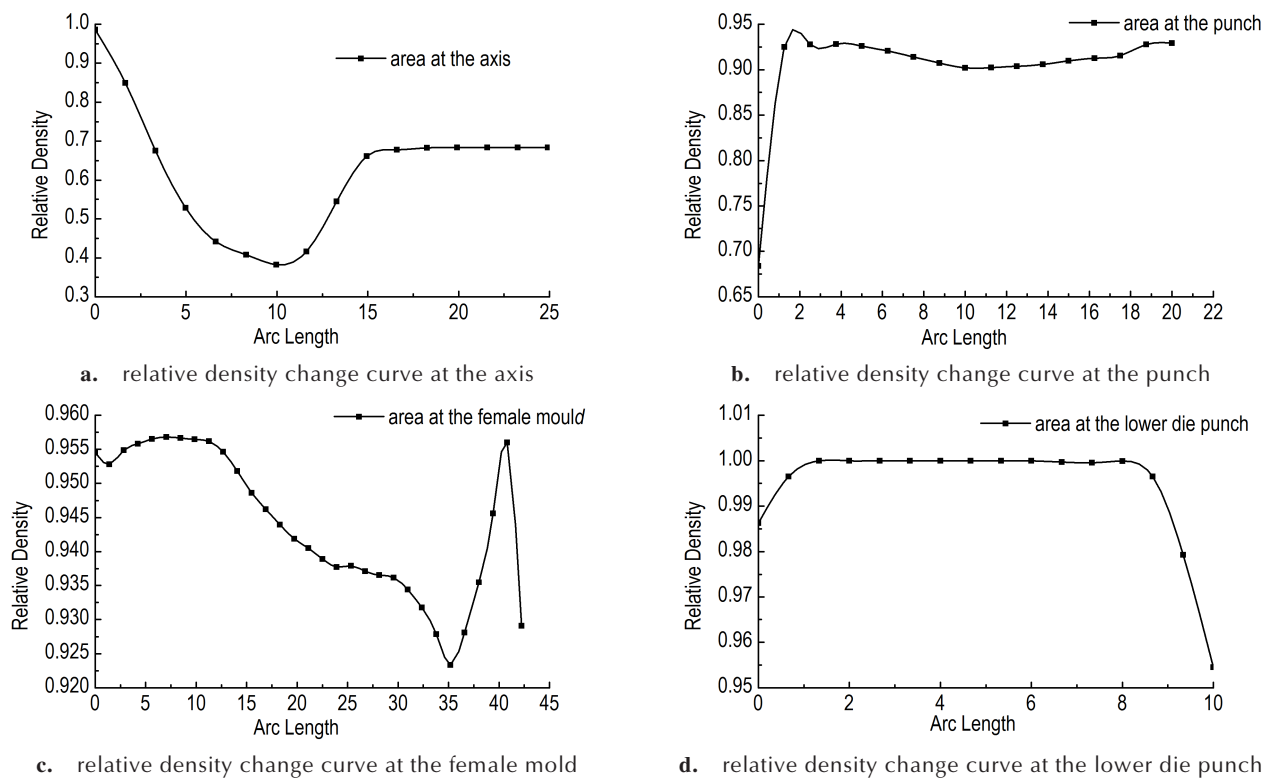


图6 不同区域采样点相对密度变化曲线

Fig.6 Relative density change curve of sampling points in different regions

为研究不同轴向位置处,径向相对密度分布状况,故设置采样点,图7为不同轴向位置采样点位置示意图,图8为不同轴向位置处径向密度曲线。分析图8得知,径向位置小于1.5 mm区域,同一径向,下模冲及冲头头部附近的相对密度总是大于其他区域;径向位置大于3.5 mm区域,同一径向,则呈现出下模冲及其他区域相对密度较大,靠近冲头区密度较小。整体上看,阴模区的相对密度较大,这是由于存在摩擦力的缘故。

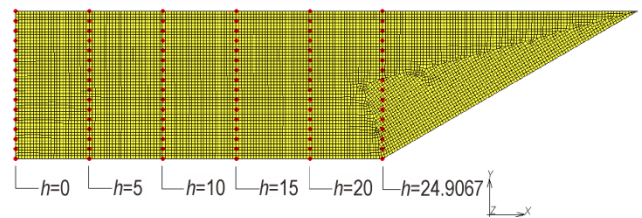


图7 不同轴向位置采样点位置

Fig.7 Location of sampling points at different axial positions

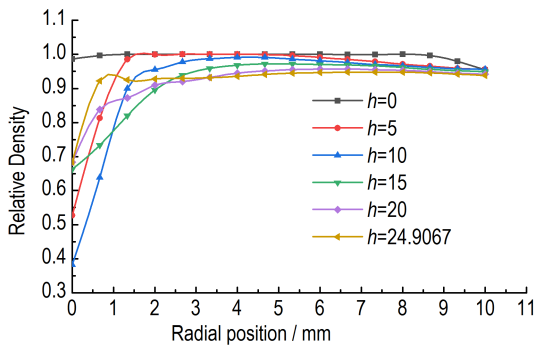


图 8 不同轴向位置相对密度随径向位置变化曲线

Fig.8 The relative density of different axial positions varies with radial position

3.2 炸药压制成型位移分布

以下表述的位移是指位移变化量的绝对值。图 9 为 JO-9159 炸药总体位移变化云图,分析图 9 可以得出:JO-9159 炸药成型后最大位移为 18.14 mm,发生在与冲头接触处,而理论计算 JO-9159 炸药达到最终成型高度时,其最大位移应该为 18.2267 mm,这说明了 JO-9159 炸药成型后在卸载过程中发生了回弹,其回弹量为 0.0867 mm。图 10 为 JO-9159 炸药成型后轴向(X方向)、径向(Y方向)位移变化云图,分析图 10 发现,JO-9159 炸药轴向位移最大达到 17.31 mm,而径向位移最大为 0.3884 mm,由此可见,JO-9159 炸药压制成型过程中炸药流动方向主要是轴向流动。这验证了张涛等^[5]学者的结论,粉末压制流动方向为轴向流动,证明了 Shima-oyane 模型是可以模拟炸药粉末压制成型过程的。图 11 为以图 7 采样点所做的位移变化曲线。从图 10 以及图 11 可以得出:JO-9159 炸药位移云图呈现中间下凹的状态;从图 11 可以得出,靠近下模冲的位置,JO-9159 炸药发生的位移较小,其

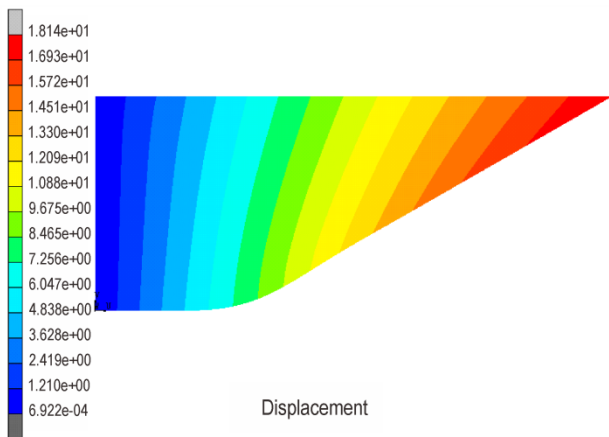
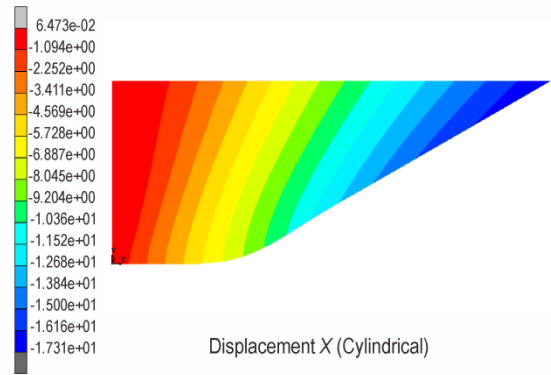


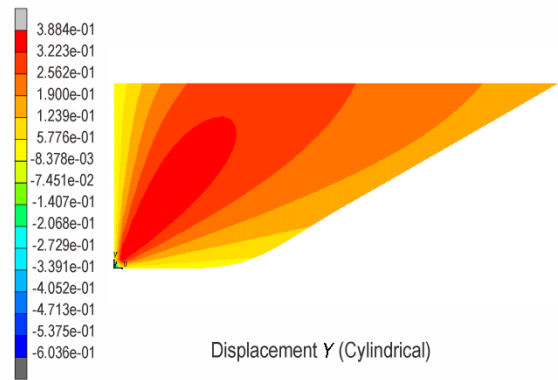
图 9 JO-9159 炸药总体位移变化云图

Fig.9 Cloud map of overall displacement change of JO-9159 explosive

他位置处炸药发生的位移较大,对比不同曲线发现,总体上,JO-9159 炸药呈现中间流动较快,靠近阴模处流动较慢,这是由于阴模存在摩擦力,在压制过程,JO-9159 炸药与阴模发生摩擦,导致 JO-9159 炸药受到摩擦力阻碍其向下运动。



a. cloud map of explosive axial (X direction) displacement change



b. cloud map of explosive radial (Y direction) displacement change

图 10 JO-9159 炸药不同方向位移变化云图

Fig.10 Cloud map of the displacement changes of JO-9159 explosive in different directions

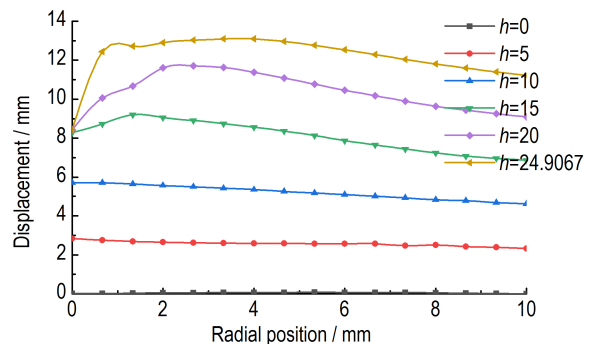


图 11 不同轴向位置位移随径向位置变化曲线

Fig.11 The variation curves of displacement at different axial positions with radial position

3.3 炸药压制成型后应力分布

图 12 为 JO-9159 炸药等效应力分布云图。观察图 12 得出,JO-9159 炸药等效应力分布不均匀,最大应力出现在炸药和下模冲及阴模接触区域,其最大应力为 36.65 MPa,最小应力出现在炸药轴线区及冲头与炸药接触区,最小应力为 0.348 MPa。炸药内部中间区域应力不大于 25 MPa。JO-9159 炸药压制成型出现的最大应力为 36 MPa 左右,可能会造成炸药破裂、掉块以及裂纹等其他缺陷,也有可能造成炸药爆炸现象,所以可以根据应力变化云图改进模具等。

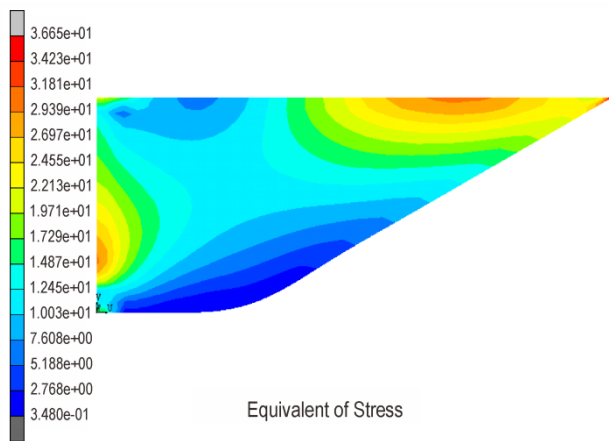


图 12 JO-9159 炸药等效应力分布云图
Fig.12 Cloud map of equivalent stress distribution of JO-9159 explosive

3.4 炸药压制成型模具受力分析

炸药压制过程中,模具的受力状态也是需要考虑的一部分,模具的受力影响着寿命及加工成本。图 13 为模具在压制过程受力随时间变化曲线。从图 13 受力曲线可以看出,在加载过程,模具受力趋势均是先增大,并且呈指数迅速上升到最高点,阴模受到的力是最大的,其值为 1.3×10^5 N,冲头受力最大达到 8.2×10^4 N,而下模冲受到的力最大仅有 2.2×10^4 N;在保压阶段,模具的受力并不是保持最大值不变,而是会减小到一个特定的值,之后保持不变,这与实际也是相吻合的;在卸载阶段,冲头和下模冲的力瞬间下降,而阴模受到的力是瞬间下降到一个不是零的值,这是因为炸药和阴模还存在接触,之后阴模受力有轻微的波动,这可能是冲头回退时,炸药和模套发生相对滑动,从而产生了一部分力,导致受力有波动。模具的受力曲线可以为炸药压制选择模具材料时提供参考,以减小成本,保证安全。

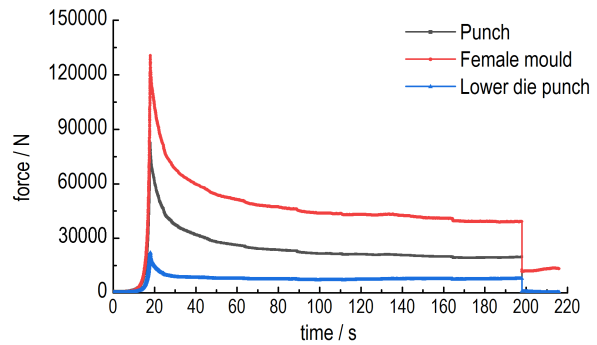


图 13 模具受力随时间变化曲线
Fig.13 The variation curves of the force of the mold with time

4 压制工艺参数对空心装药质量的影响

装药质量的评价是用相对密度及回弹量等来衡量的,所以此次仿真主要是研究压制速率、初始相对密度以及摩擦系数这三种工艺参数对空心 JO-9159 炸药装药的相对密度和回弹量的影响。根据实际压装药工艺参数取值范围,压制速率选取 $0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 共计 6 组试验;初始相对密度选取 $0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ 共计 4 组试验;摩擦系数选取 $0.1, 0.15, 0.2, 0.25$ 共计 4 组。

4.1 压制速率对成型装药质量的影响

本小节研究保证初始相对密度及摩擦系数参数不变,研究不同压制速率对空心成型 JO-9159 炸药装药质量的影响。

4.1.1 压制速率对成型装药相对密度的影响

图 14 为相对密度及相对密度差值随压制速率变化曲线。相对密度差为最大相对密度减去最小相对密度的绝对值。分析图 14 并对比可以得出,压制速率为 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,最小相对密度达到最大,其值在 0.6 以上,密度差值达到最小,其值为 0.36,由此可见,较低的压制速率可以使 JO-9159 炸药成型相对密度提高,变得更加均匀。随着压制速率的升高,JO-9159 炸药相对密度呈现波浪变化,没有特定的规律,但从整体上看,压制速率太大,会使最小相对密度变小,从而造成 JO-9159 炸药成型后密度不均匀,JO-9159 炸药均匀性是通过最大相对密度和最小相对密度差值来衡量的,差值越小越均匀。产生该现象可能是因为不同的压制速率影响 JO-9159 炸药粉末不同区域的流动,相比较而言,速率变大时,使得 JO-9159 炸药粉末不同区域,炸药粉末流动快慢悬殊较大。

从图 14 中发现最小相对密度小于初始相对密度 0.5,在实际空心炸药粉末压制成型过程,锥角处常发

生掉块的现象,这也就是说该区域密度较低,未压实,从而产生这种结果。

因为不同压制速率下相对密度分布基本类似,故选择压制速率 $0.5\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 进行分析。图15为压制速率 $0.5\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 下JO-9159炸药相对密度变化云图。分析图15可以发现,密度最小处出现在轴线处和与冲头接触的区域,这些区域密度较低且分布不均匀。

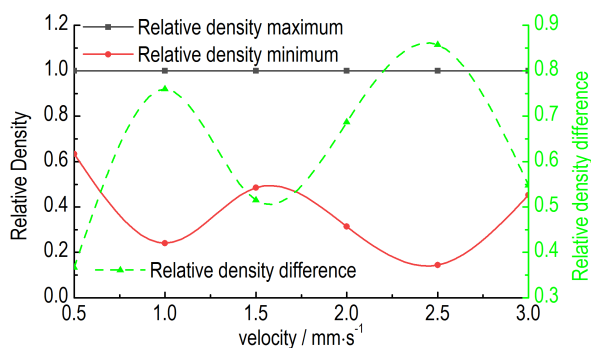


图14 相对密度及相对密度差值随压制速率变化曲线

Fig.14 The variation curves of relative density and relative density difference with pressing rate

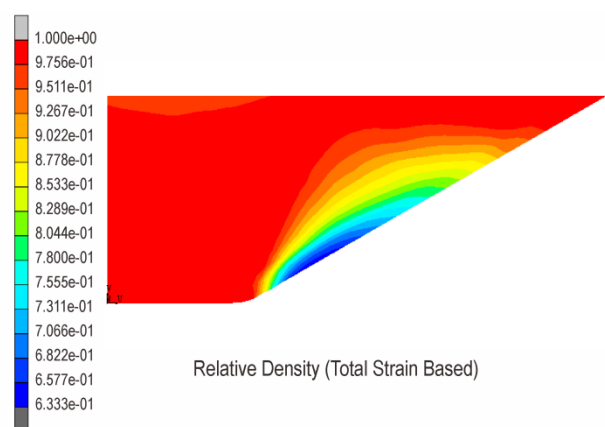


图15 压制速率 $0.5\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时JO-9159炸药相对密度变化云图

Fig.15 Cloud map of JO-9159 explosive relative density change at a pressing rate of $0.5\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

4.1.2 压制速率对成型装药回弹量及等效应力的影响

炸药压制成型后回弹量过大不仅造成炸药密度不均匀,还会造成成型炸药不可装配,更重要的还有可能产生裂纹等。图16中黑线为回弹量随压制速率的变化,随着压制速率的增大,回弹量会变小,但增大到一定程度,回弹量又会增大,之后回弹量又下降。整体上看,回弹量较小,其取值范围在 $0.065\sim 0.1\text{ mm}$ 。产生回弹可能是因为卸压后,JO-9159炸药粉末内部存在一部分应力,未及时释放,而不同的压制速率,造成JO-9159炸药粉末内部的应力不尽相同,故不同压制

速率产生的回弹量也是不同的。

图16中红线为等效应力随压制速率变化曲线。从曲线可以看出,压制速率在 $0.5\sim 1\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内,等效应力有下降趋势;压制速率在 $1.5\sim 2\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,等效应力波动较大,并在压制速率为 $1.5\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,等效应力达到 160 MPa 左右,该应力会使JO-9159炸药发生破裂等其他危险的情况;压制速率在 $2.0\sim 3\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围,等效应力呈现轻微上升趋势,等效应力在 $43.49\sim 50.83\text{ MPa}$ 。不同压制速率下其等效应力是不同的,这可能是因为压制速率影响应力的传递以及释放。

等效应力在不同压制速率下云图分布类似,均是分布不均匀的,所以选择压制速率 $0.5\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 进行分析。图17为压制速率 $0.5\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 等效应力变化云图,观察应力云图发现,应力最大值主要是在阴模、下模冲以及冲头和阴模的交接处。

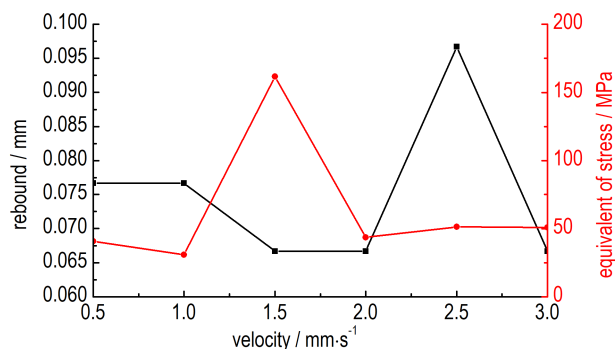


图16 回弹量及等效应力随压制速率的变化曲线

Fig.16 The variation curves of rebound amount and equivalent stress with pressing rate

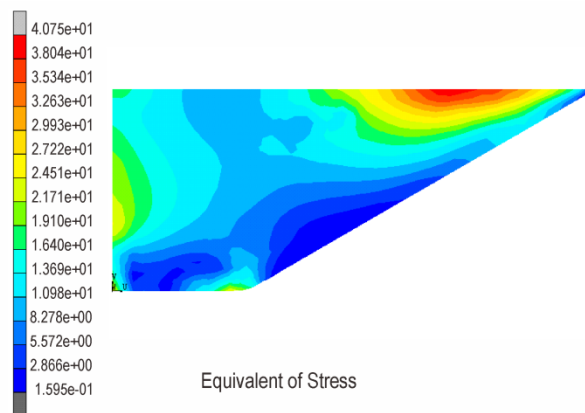


图17 压制速率 $0.5\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的等效应力变化云图

Fig.17 Cloud map of equivalent stress change at a pressing rate of $0.5\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

4.2 初始相对密度对成型装药质量的影响

JO-9159炸药相对密度和回弹量随不同初始相对密度变化的曲线如图18所示。分析图18可以得出,

在保证压制速率和摩擦系数参数不变的条件下,当初始密度为 0.8 时,最小相对密度达到最大,值为 0.6549,密度差值达到最小,值为 0.3451,此时,回弹量也达到最小,为 0.067 mm。随着初始相对密度的增大,JO-9159 炸药成型后最小相对密度有所提升,使得相对密度差值越来越小,炸药装药密度变得更加均匀,同时,在初始相对密度超过 0.6 时,JO-9159 炸药成型后的回弹量降低明显,这说明初始相对密度对 JO-9159 炸药装药质量有一定影响,初始相对密度的提高可以改善 JO-9159 炸药装药质量。

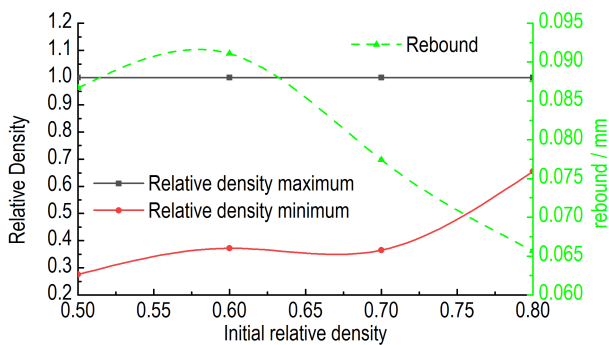


图 18 JO-9159 炸药相对密度和回弹量随不同初始相对密度变化曲线

Fig.18 The variation curves of the relative density and the rebound amount of JO-9159 explosive with different initial relative densities

4.3 摩擦系数对成型装药质量的影响

JO-9159 炸药相对密度和回弹量随不同摩擦系数变化的曲线如图 19 所示。分析图 19 可以得出,在保证压制速率和初始相对密度参数不变的条件下,摩擦系数的提升,可以改善 JO-9159 炸药成型相对密度,提高 JO-9159 炸药密度均匀性。摩擦系数在 0.1~0.2 时,

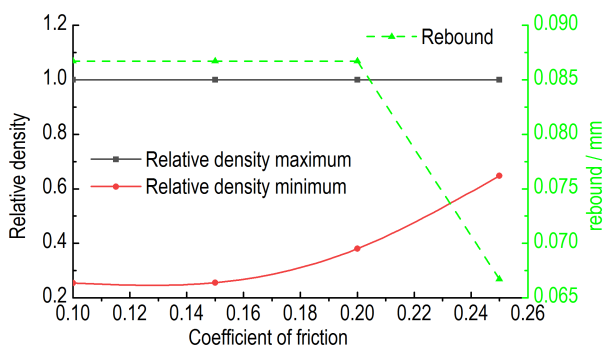


图 19 JO-9159 炸药相对密度和回弹量随不同摩擦系数变化曲线

Fig.19 The variation curves of the relative density and the rebound amount of JO-9159 explosive with different friction coefficients

JO-9159 炸药成型回弹量没有变化,当摩擦系数在 0.2~0.25 时,JO-9159 炸药成型回弹量减小,且摩擦系数为 0.25 时,回弹量达到最小,其值为 0.067 mm。综上所述,摩擦系数为 0.25 时,JO-9159 炸药成型最小相对密度达到最大,为 0.6479,密度差最小,即 JO-9159 炸药密度均匀性较好,同时,JO-9159 炸药回弹量也达到最小,即在该摩擦系数下,JO-9159 炸药成型质量较好。

5 结论

(1) 利用高级非线性有限元软件,采用连续介质力学的方法,模拟仿真了聚能装药压制成型过程,得出 JO-9159 炸药压制成型过程,炸药流动主要是呈现轴向流动,而且靠近模具处流动较为缓慢,这是由于靠近模具处,炸药粉末与模具产生摩擦,阻碍炸药粉末向下流动。

(2) JO-9159 炸药压制成型后,轴线处的相对密度较低且分布不均匀,而靠近模具区域密度较大,密度分布较为均匀。轴线处为锥角所对应的位置,根据实际粉末压制过程,锥角处粉末密度较低且易发生掉块,所以本次模拟也基本符合实际。

(3) JO-9159 炸药压制成型后存在回弹,且回弹量较小,不超过 0.1 mm。本次仿真的压制速率、初始相对密度以及摩擦系数等工艺参数对回弹量及相对密度有影响,但不呈现特定的规律。

参考文献:

- [1] 董素荣, 陈国光, 编著. 弹药制造工艺学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014:338-350.
DONG Su-rong, CHEN Guo-guang, edited. Ammunition Manufacturing Technology[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014:338-350.
- [2] 王淑萍, 王晓峰, 金大勇. 压制密度及密度均匀性对装药撞击安全性的影响[J]. 含能材料, 2011, 19(6):705-708.
WANG Shu-ping, WANG Xiao-feng, JIN Da-yong. Influence of pressed explosive charges density and its distribution on impact safety[J]. Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao), 2011, 19(6):705-708.
- [3] 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.
SUN Jian. Development of isostatic pressing technology of explosive charge[J]. Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao), 2012, 20(5):638-642.
- [4] 梁华琼, 周旭辉, 唐常良, 等. HMX 钢模压制的微观结构演变研究[J]. 含能材料, 2008, 16(2):188-190.
LIANG Hua-qiong, ZHOU Xu-hui, TANG Chang-liang, et al. Research on the evolution of microstructure of HMX steel die pressing [J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng

- Cailiao*), 2008, 16(2):188-190.
- [5] 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 Tao, ZHAO Bei-jun, ZHU Shi-fu, et al. Numerical simulation of PBX powder forming[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2009(5): 68-72.
- [6] 刘群,陈朗,鲁建英,等. 炸药颗粒压制成型数值模拟[J]. 高压物理学报, 2009,23(6):421-426.
LIU Qun, CHEN Lang, LU Jian-ying, et al. Numerical simulation of pressing forming of explosive particles[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2009, 23(06): 421-426.
- [7] 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 Hong, ZHOU Jun-hui, LV Ke-zhen, et al. Two-dimensional numerical simulation of meso-mechanical behavior during PBX pressing [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016,24(7):651-656.
- [8] 董林峰. 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.
- [9] 王勖成,邵敏. 编著. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 1997:531-548.
WANG Xu-cheng, SHAO Min, edited. The basic principles and numerical methods of the finite element method[M]. 2nd edition. Beijing: Tsinghua University Press; 1997:531-548.
- [10] Shima S, Oyane M. Plasticity theory for porous metals[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 1976, 18 (6) : 285-291.
- [11] 周洁. 粉末成形过程的计算机模拟[D]. 昆明:昆明理工大学, 2005.
ZHOU Jie. Computer simulation of powder forming process [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2005.
- [12] 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 Meng-meng, PAN Shi-yan, SHEN Xiao-ping, et al. Research status and prospect of numerical simulation of powder compaction process[J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2017, 27 (4):49-58.
- [13] 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.
LIU Jin-song, ZHANG Shi-hong, XIAO Han, et al. Application of MSC.MARC in material processing engineering [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2010:325-357.
- [14] 董海山,周芬芬. 高能炸药及相关物性能[M]. 北京: 科学出版社, 1989:334-340.
- [15] 任学平,康永林. 粉末塑性加工原理及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998:48-50.
REN Xue-ping, KANG Yong-lin. Principle and application of powder plastic processing[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1998:48-50.

Simulation Study on the Influence of Compression Process Parameters on the Quality of Hollow Charges

CAO Xing¹, CAO Hong-song¹, ZHANG Gen-sheng², WU Zong-ya², ZHAO Han-dong¹, LIU Heng-zhu¹, WANG Qi¹, LUO Pu-guang³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Shanxi Jiangyang Chemical Co., Ltd., Taiyuan 030041, China; 3. Beijing Institute of Space Long March Vehicle, Beijing 100076, China)

Abstract: Hollow charges usually adopt compression molding process. Using the method of continuum mechanics, a finite element simulation of the compression process model was established. First, the relative density, displacement and equivalent stress change laws of the pressing process of the JO-9159 explosive were simulated and analyzed. Then, the influences of pressing rate, initial relative density and friction coefficient on the pressing quality of JO-9159 explosive are simulated and analyzed. Results show that the JO-9159 explosive powder flows mainly in the axial direction during the pressing process, and the explosive powder flows slowly near the female mold area; when the pressing rate is $0.5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ and the friction coefficient is 0.25, the relative density of the charge after molding is more uniform and the amount of rebound is smaller.

Key words: hollow charge; JO-9159 explosive powder; compression molding process; process parameters

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2020224

(责编:王艳秀)