

文章编号: 1673-3193(XXXX)XX-0001-13

PBX 炸药压装成型参数化仿真与机理分析

刘镇洋, 袁俊明*, 王金英, 尚 垒, 刘 阳, 马佳涛

(中北大学 环境与安全工程学院, 山西 太原 030051)

摘 要: 针对 PBX 炸药压装成型中内部力学行为难以直接观测及工艺优化缺乏直观依据的问题, 对 ABAQUS 仿真软件进行二次开发, 基于 Qt Creator 平台构建了一种压装成型参数化仿真软件, 研究了压制工艺参数对装药内部应力传递与炸药造型粉致密化机制的影响。压装 PBX 炸药材料本构模型选用可准确描述造型粉的塑性变化及体积压缩行为的 Drucker-Prager Cap 模型, 并通过实验完成了参数标定与硬化规律验证。结果表明, 仿真计算结果与单轴压缩实验数据高度吻合, 证实该本构模型能够有效表征材料的非线性硬化行为。通过参数化仿真对比揭示了单冲头与双冲头压装工艺的内在机理, 单冲头工艺因应力传递中的摩擦衰减效应, 导致药柱轴向存在显著应力梯度与上高下低的密度分布, 而双冲头工艺通过双向对称加载重构应力传递路径, 提升了应力场均匀性, 从而使药柱整体密度分布更为均匀。压装成型参数化仿真软件为分析 PBX 炸药压装成型机理分析与工艺优化提供了高效的技术支撑。

关键词: PBX 炸药; 压装成型; 应力传递; 致密化; 参数化仿真

中图分类号: TQ56

文献标识码: A

doi: 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.12.0015

引用格式: 刘镇洋, 袁俊明, 王金英等. PBX 炸药压装成型参数化仿真与机理分析[J]. 中北大学学报(自然科学版), DOI:10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.12.0015.

Liu Zhenyang, Yuan Junming, Wang Jinying, et al. Parametric Simulation and Mechanism Analysis of PBX Explosive Compression Molding[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), DOI:10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.12.0015.

Parametric Simulation and Mechanism Analysis of PBX Explosive Compression Molding

Liu Zhenyang, Yuan Junming*, Wang Jinying, Shang Lei, Liu Yang, Ma Jiatao

(School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Addressing the challenges of directly observing the internal mechanical behavior of polymer bonded explosives (PBX) during the compression molding process and the lack of intuitive basis for process optimization, a secondary development of the ABAQUS simulation software was conducted. Based on the Qt Creator platform, a parametric simulation software for compression molding was constructed, enabling the investigation of the impact of compression process parameters on the internal stress transfer within the charge and the densification mechanism of explosive molding powder. The constitutive model for compression-molded PBX explosive materials selected the Drucker-Prager Cap model, which accurately described the plastic deformation and volumetric compression behavior of molding powder. Parameter calibration and verification of the hardening law were completed through experiments. The results show that the simulation results are highly consistent with uniaxial compression experimental data, con-

收稿日期: 2025-12-16

作者简介: 刘镇洋(2000—), 男, 硕士生, 主要从事典型装药工艺安全测评软件技术的研究。

* 通信作者: 袁俊明(1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事含能材料安全与应用技术与方法的研究。E-mail: jmychina@163.com。

firming that the constitutive model effectively characterizes the nonlinear hardening behavior of the material. Through parametric simulation comparisons, the inherent mechanisms of single-punch and double-punch compression molding processes were revealed. Due to the friction attenuation effect in stress transfer, the single-punch process results in a significant stress gradient and a density distribution that is high at the top and low at the bottom along the axial direction of the charge column. In contrast, the double-punch process reconstructs the stress transfer path through bidirectional symmetric loading, enhancing the uniformity of the stress field, thereby achieving a more uniform density distribution throughout the charge column. The parametric simulation software for compression molding provides efficient technical support for analyzing the mechanism and optimizing the process of PBX explosive compression molding.

Key words: polymer bonded explosive; press forming; stress transfer; densification; parametric simulation

0 引言

高聚物粘结炸药(PBX)作为典型的颗粒复合含能材料,广泛应用于现代国防与航天领域,其压装成型质量直接影响装药结构完整性与服役可靠性^[1-2]。在实际压制过程中,PBX材料表现出压力相关塑性与体积压缩特性,已有研究表明,压制条件不当易导致药柱内部应力集中、密度分布不均等缺陷,进而引发力学性能退化甚至安全隐患^[3-7]。因此,深入研究PBX压装成型过程中的应力传递与致密化机理,对工艺优化具有重要工程意义。

由于PBX炸药本身具有高感度、高能量密度的特殊性质,其压装成型过程在实验研究中存在较大的安全风险,且其内部形变与应力演化难以实现直接观测,该过程在一定程度上呈现出“黑箱”特征^[8-9]。在此背景下,数值仿真方法凭借其安全性的优势,逐渐发展为研究PBX压装成型行为的重要技术手段。在工程尺度仿真中,基于连续介质假设的有限元方法应用广泛,通常结合Drucker-Prager等压力相关本构模型,实现对PBX材料压装过程中应力分布特征与致密化演化规律的模拟分析^[10-12]。然而,此类方法通常针对特定模具与药柱结构建立仿真模型,其几何模型、边界条件的构建与修改过程繁琐,导致模型通用性差、重构效率低,难以支撑不同压装工艺的快速参数化研究与系统性对比。此外,也有学者从颗粒或细观尺度出发^[13-14],探讨PBX材料微观结构演化及损伤机理,该类方法在机理层面具有优势,但其计算代价较高,难以直接应用于工程尺度的工艺分析与参数优化。

针对上述现有仿真方法在模型快速重构与多工艺系统性对比方面的不足,本文构建了一种面向PBX炸药压装成型过程的参数化仿真软件架构。该架构

通过对ABAQUS进行二次开发,将压装方式、加载路径、结构尺寸与材料本构等关键变量统一封装为参数化输入体系,并开发集成操作界面,从而在同一软件框架下实现了单冲头与双冲头等不同压装工艺模型的快速重构与自动求解。基于此框架,通过对比分析单冲头与双冲头压装工艺的仿真结果,深入研究不同压装工艺下药柱内部的应力传递路径与致密化演化规律,揭示其成型机理,以及工艺参数对成型质量的影响规律,从而为工艺优化提供依据。

1 压装成型参数化仿真模型的构建

1.1 参数化仿真框架与技术路线

为了系统分析PBX炸药在不同压装工艺条件下的成型行为,并提高数值仿真模型在工程应用中的可重复性与可扩展性,本文在连续介质有限元理论下,基于Qt Creator开发软件,构建了一种面向PBX炸药压装成型过程的参数化数值仿真框架,设计的总体仿真架构如图1所示。

该框架以ABAQUS有限元仿真软件为基础,通过Python脚本将压装成型过程中涉及的几何模型、本构参数及边界条件等关键要素进行统一参数化描述,并连同GUI对应的操作一并录入脚本文件中,使用开发的软件系统调用ABAQUS内核相关模块执行命令,从而跨越GUI交互实现不同压装工艺条件下仿真模型的快速构建与自动求解^[15-17]。

为了分析PBX炸药压装成型过程中的应力传递与致密化机理,本文建立了单冲头与双冲头压装工艺的有限元数值仿真模型。为了建立高效、可靠的参数化仿真模型,基于PBX压装成型过程的物理本质与工艺特征,引入了以下三项基本简化假设:

1) 药柱初始均匀性假设。假设药柱在装填初始阶段为各向同性材料,且初始密度(致密度)在

空间上均匀分布。此假设基于典型 PBX 造型粉在模腔中经初步振实后可近似视为宏观均匀连续介质,是开展连续介质尺度仿真分析的通用前提。

2) 模具刚性假设。假设模具(模套)及冲头材料的刚度远高于 PBX 炸药材料,因此在仿真中忽略其自身的弹性变形,将其视为解析刚体或离散刚体。该假设的依据是,模具钢材的杨氏模量(204 GPa,见表 2)通常比 PBX 炸药的杨氏模量(8.67 GPa)高出两个数量级,在压制过程中其变形量远小于药柱的塑性大变形,因此该简化是合理的,并能显著简化接触计算。

3) 准静态过程假设。假设压制过程以准静态方式进行,因此忽略材料的惯性效应及应变率效应。此假设的条件是实际压制速度较低(如本文设定的冲头速度为 $1\sim 2\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 量级),动态效应不显著,符合 Drucker-Prager Cap 本构模型在描述准静态力学行为时的适用范围(如本文 1.3.4 节所述)。基于此,分析中可采用静态或准静态求解器。

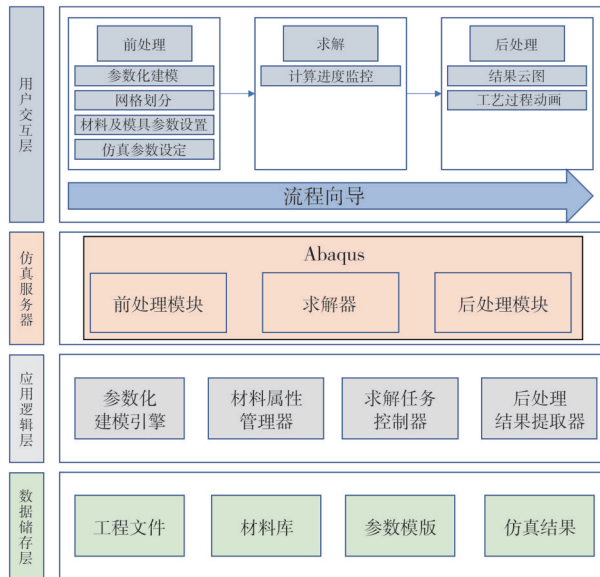


图 1 参数化仿真软件架构

Fig. 1 Parametric simulation architecture

围绕上述总体思路,后续将介绍基于 ABAQUS 二次开发的参数化建模流程,实现从关键几何尺寸输入到二维草图生成、三维旋转建模及自动装配的全流程驱动,以支持不同压装工况的快速重构。介绍了选用 Drucker-Prager Cap (DPC) 本构模型来描述 PBX 炸药压力相关塑性及体积压缩行为的依据,并说明通过单轴压缩实验数据对模型剪切屈服面参数及帽型屈服面硬化规律进行标定与验证的过程。具体说明在有限元模型中对约束和接触等边界条件的定义,介绍采用显式动力学分析步结合质量缩放

的求解策略,以及如何通过参数化脚本自动完成网格划分、作业提交、结果(应力、密度云图)提取与对比分析,从而实现一体化的仿真分析流程。

1.2 参数化几何建模

考虑到典型圆柱形 PBX 药柱及其模具系统在结构和载荷上的轴对称特性,采用二维轴对称建模旋转生成三维模型的方法进行数值模拟。具体实现以模型左下角为坐标原点,计算各关键几何点的坐标,通过 Python 脚本在 ABAQUS 草图模块中生成压装系统的轴对称截面轮廓,如图 2 所示,其中, R_0 和 H_0 为药柱的半径和高度, H_1 为冲头高度, R_1 和 H_2 为模套的厚度和高度,软件中将把这些模型尺寸参数作为参数化建模的输入参数。随后对二维截面绕对称轴进行旋转,分别生成药柱、模套及冲头的三维几何模型。最后完成装配关系的自动建立,如图 3 所示,图中黄色虚线为模型旋转的对称轴线。该方式可以避免重复绘制复杂几何结构,而且在改变药柱尺寸或模具规格时能保持模型拓扑一致。

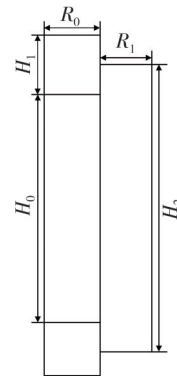


图 2 压制模具系统二维平面图

Fig. 2 Two-dimensional plan of the pressing mold system

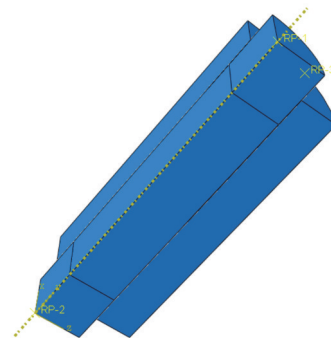


图 3 压制模具系统三维模型

Fig. 3 3D model of compression mold system

1.3 材料本构模型与参数

为了合理刻画 PBX 材料在准静态压装条件下

的屈服、硬化及体积压缩行为,本文选用的修正 Drucker-Prager Cap(DPC)本构模型能够较好地描述 PBX 类颗粒材料在受压条件下的压力相关塑性及体积压缩行为,其已在相关研究中得到应用^[18]。

为避免符号歧义,本文统一采用拉应力为正、压应力为负的应力符号约定,并定义静水压力在受压状态下为正,相关符号定义与 ABAQUS 软件及 DPC 本构模型默认约定保持一致。

1.3.1 Drucker-Prager Cap 本构模型

Drucker-Prager Cap 本构模型是一种广泛应用于粉末冶金、土体及颗粒材料成形分析的压力相关塑性模型,能够同时描述材料在低围压条件下的剪切屈服行为以及在高静水压力作用下的体积致密化特征。该模型在 p - q 应力空间中的屈服面由剪切破坏面(F_s),帽型屈服面(F_c)及它们之间的光滑过渡面(F_t)三部分组成^[19],如图 4 所示。

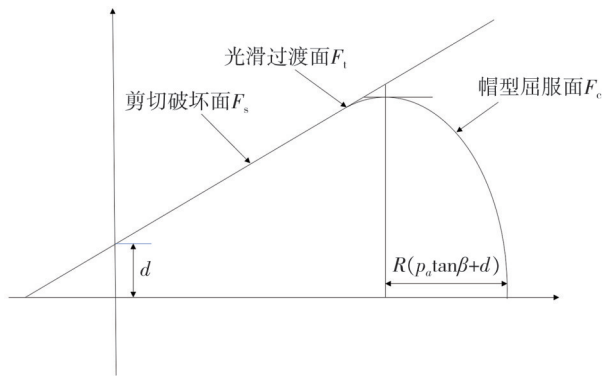


图 4 Drucker-Prager Cap 本构模型

Fig. 4 Drucker-Prager Cap constitutive model

设材料单元的 Cauchy 应力张量为 $\sigma = [\sigma_{ij}]$, 其主应力为 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 。静水压力 p 定义为

$$p = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = -\frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}), \quad (1)$$

式中采用受压为正的符号约定, σ_{kk} 表示应力张量对角分量之和。

偏应力张量 s 定义为

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - p\delta_{ij},$$

式中: δ_{ij} 为 Kronecker 符号, 当 $i=j$ 时取 1, 当 $i \neq j$ 时取 0, 用于表示单位二阶张量的分量形式。

等效应力 q 定义为

$$q = \sqrt{\frac{3}{2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 s_{ij} s_{ij}}. \quad (2)$$

上述 p - q 应力不变量构成了 Drucker-Prager Cap 本构模型的基本应力空间描述。

剪切破坏面采用 Drucker-Prager 准则, 反映材

料在剪切力作用下的屈服行为, 即

$$F_s = q - p \tan \beta - d = 0, \quad (3)$$

式中: d 为内聚力, 反映颗粒间的黏结及摩擦咬合作用; β 为摩擦角, 用于表征材料剪切强度对静水压力变化的敏感性。

在高静水压力作用下, PBX 材料将发生显著体积压缩, 其屈服行为由帽型屈服面描述。本文在理论描述中采用等效椭圆形式对帽型屈服面进行表述, 其表达式为

$$F_c = \sqrt{(p - p_a)^2 + \left(\frac{q}{R}\right)^2} - (p_a - p_b) = 0, \quad (4)$$

式中: p_a 为帽型屈服面的起始压力; p_b 为随体积塑性变化的帽型屈服面压力; R 为帽型屈服面的偏心率参数, 用于控制椭圆屈服面的形状。

为保证剪切屈服面与帽型屈服面在连接处的光滑过渡, Drucker-Prager Cap 模型中引入光滑过渡面 F_t 。该过渡面不引入新的独立材料参数, 其具体数学形式由 ABAQUS 软件在数值实现中自动构造, 以保证屈服函数在应力空间中的连续性与可微性。

1.3.2 材料模型参数及其标定

PBX 材料的 Drucker-Prager Cap 本构模型参数通常需结合力学实验数据进行标定。为保证本文所建立参数化仿真方法在不同 PBX 材料条件下具有可扩展性与通用性, 本研究采用“实验—本构拟合”的参数确定思路。一般而言, 该过程包括基础物性参数确定、剪切屈服面参数标定以及帽型屈服面硬化参数拟合等步骤。本文以某厂提供的 PBX 造型粉颗粒药柱为例, 对参数标定过程进行说明。

该药柱的初始密度为 $1\,380\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 弹性模量为 $8\,670\text{ MPa}$, 泊松比为 0.33 。模具及冲头(底座)采用钢材, 经查阅其密度为 $7\,850\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 热导率为 $50\text{ W}\cdot\text{mm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; 弹性模量为 $204\,000\text{ MPa}$, 泊松比为 0.33 , 比热容为 $460\,000\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

通过室温条件下的单轴压缩实验得到应力-应变曲线, 如图 5 所示。在压制初期, 材料处于低围压条件下, 其力学响应主要受颗粒间摩擦与黏结作用控制, 尚未发生显著体积压缩, 此阶段可近似视为以剪切屈服行为为主。基于实验数据在该阶段下的强度特性, 对 Drucker-Prager 模型中剪切破坏面参数进行拟合, 确定内聚力 d 为 0.001 MPa , 摩擦角 β 为 35° 。帽型屈服面形状参数: Cap 离心率 R 为 0.7 , 初始屈服表面位置 p_a 为 0 , 流动应力比为 1 , 过渡表面半径为 0.02 , 以确保切面与帽型面光滑连接。

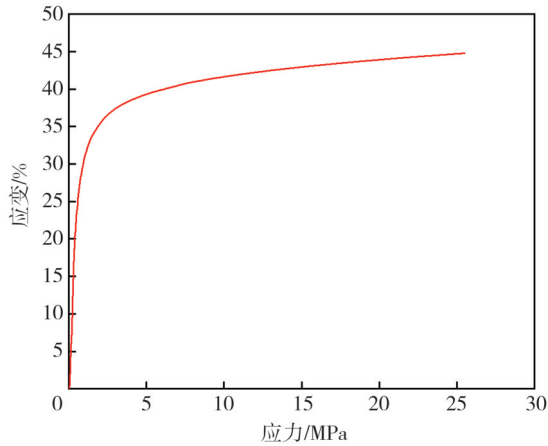


图5 物料应力-应变曲线

Fig. 5 Material stress-strain curve

1.3.3 硬化规律和体积塑性应变关系

PBX材料在压装成型过程中表现出显著的体积硬化行为,其硬化特性通过帽型屈服面的演化进行描述^[20]。体积应变定义为

$$\epsilon_v = \epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}, \quad (5)$$

其中,体积应变在压缩状态下取负值。

为便于描述材料的致密化过程,并保证硬化变量的单调性,体积塑性应变定义为

$$\epsilon_v^p = \ln(\rho/\rho_0), \quad (6)$$

式中: ρ 为材料当前密度; ρ_0 为初始装填密度。该定义下,体积塑性应变随材料致密化程度的增加而单调增大。

模型参数标定是连接理论模型与实验数据的关键^[21]。通过将单轴压缩实验获得的应力-应变数据转换为帽型屈服面压力体积 p_v 与塑性应变之间的对应关系,对帽型屈服面的演化规律进行标定,所得硬化参数如表1所示。

1.3.4 模型适用性说明

本文所采用的Drucker-Prager Cap本构模型及其参数主要适用于室温条件下PBX材料的准静态压装成型过程。对于高应变率加载或存在显著热效应的工况,材料的力学行为可能发生变化,有必要进一步引入应变率效应或热-力耦合模型进行修正。但在常规压装工艺分析及不同压制方式对比研究中,该模型仍具有良好的工程适用性和数值稳定性。

表1 Drucker-Prager Cap 硬化规律

Tab. 1 Drucker-Prager Cap hardening law

屈服应力/MPa	体积塑性应变
0.00	0.0
0.11	0.04
0.21	0.08
0.34	0.16
0.66	0.24
3.10	0.33
18.02	0.38
35.00	0.40

1.4 边界条件与工艺参数设置

边界条件的设置旨在合理反映PBX炸药实际压装成型工艺中的约束与载荷特征。根据不同压装方式的工艺特点,分别建立单冲头压装与双冲头压装两种工况的有限元模型,并对其边界条件与加载方式进行相应配置。

在接触关系设置方面,药柱与上、下冲头(或底座)以及模套之间均定义为面-面有限滑移接触,以模拟压装过程中药柱与模具之间的相对滑移行为。摩擦模型采用库仑摩擦定律,摩擦系数取0.2,摩擦接触力通过罚函数法进行计算。上述设置能够较好地反映PBX造型粉在压装过程中与模具接触界面的摩擦特性。

在约束条件设置中,由于模型具有轴对称特征,在对称轴上施加径向和轴向对称约束,以满足轴对称计算条件。模套在径向和轴向方向均施加完全约束,以模拟实际压装过程中模具的刚性支撑状态。

在载荷与运动方式设置方面,不同压装工艺采用不同的加载路径,具体参数根据具体算例进行设置。

考虑到本文研究对象为室温条件下的准静态压装成型过程,整个模型的初始温度统一设为30℃,忽略温度变化对材料力学行为的影响。将上述工艺参数作为典型压装条件用于数值分析,以对比不同压装方式及加载路径对PBX材料致密化行为和应力分布特征的影响。

将前文的工艺参数在参数化建模过程中作为基准输入条件,用于表征典型PBX压装成型工况,在界面中作为模板参数预先输入,具体如表2所示。

表2 PBX压装成型仿真模型核心参数

Tab. 2 Core parameters of PBX press-fit molding simulation model

炸药参数								模具参数				
密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	内聚力/ MPa	摩擦角/ (°)	Cap 离心率	流动 应力	过渡面 半径	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	热导率/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	比热容/ ($\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
1 380	8 670	0.33	0.001	35	0.7	1	0.02	7 850	50 000	204 000	0.33	460 000

1.5 数值求解与后处理及自动化实现

数值求解与后处理模块为PBX炸药压装成型过程的多工况工艺对比研究提供了重要支撑,该模块在统一建模框架下完成分析步设置、网格划分、数值求解及结果可视化全过程。针对压装成型过程的准静态特征,数值求解采用显式动力学分析步,并通过合理控制时间增量与引入质量缩放方法来提高计算稳定性和效率,在保证计算精度的前提下有效缩短求解时间。网格划分运用分区控制与局部加密相结合的策略,对变形显著的药柱区域进行重点细化,同时对模套等刚性部件采用相对稀疏的网格,从而在确保药柱区域计算精度的同时控制整体计算规模。

完成模型配置后,后处理环节隐藏模具部件,提取应力状态及密度分布等关键物理量,并生成相应云图和压装过程演化动画,直观展示材料致密化行为与应力演化特征。

为保证PBX压装成型过程多工况数值模拟结果的一致性与可比性,在前述参数化建模方法基础上,本文采用参数驱动的批量求解方式开展数值分析,并通过树形功能结构管理工程项目,最终实现多项目的并行处理,如图6所示。通过对几何建模、材料定义及边界条件等关键步骤进行统一参数化描述,实现了不同压装工艺条件下数值模型的快速重构与求解。

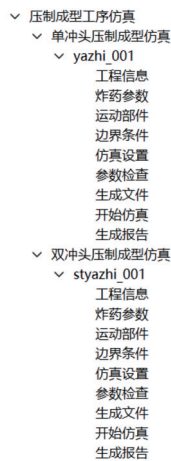


图6 工程树

Fig. 6 project tree

在具体实现过程中,将压装方式、材料属性、成型压力及冲头运动参数等作为输入变量(部分界面如图7和图8所示),通过Qt Creator框架修改脚本文件的对应参数,调用ABAQUS求解器运行脚本文件完成自动化求解计算。不同工况的模拟仅需在操

作界面中调整相应工艺参数,模型的载荷与约束条件,从而避免了人工反复建模可能引入的误差,提高了仿真过程的一致性。

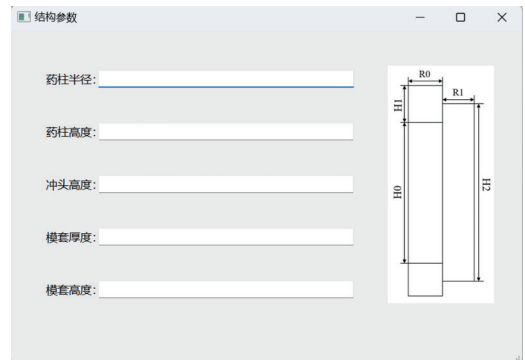


图7 结构参数设置界面

Fig. 7 Structural parameter setting interface

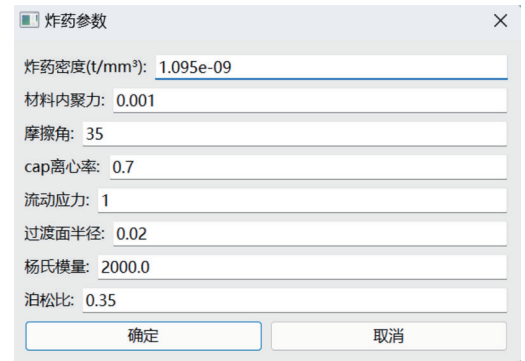


图8 炸药参数设置界面

Fig. 8 Explosive parameter setting interface

在结果分析阶段,采用统一的后处理方法对药柱的应力状态与密度分布进行提取与对比,确保不同工艺参数条件下数值结果具有良好的可比性。具体仿真操作流程如图9所示。

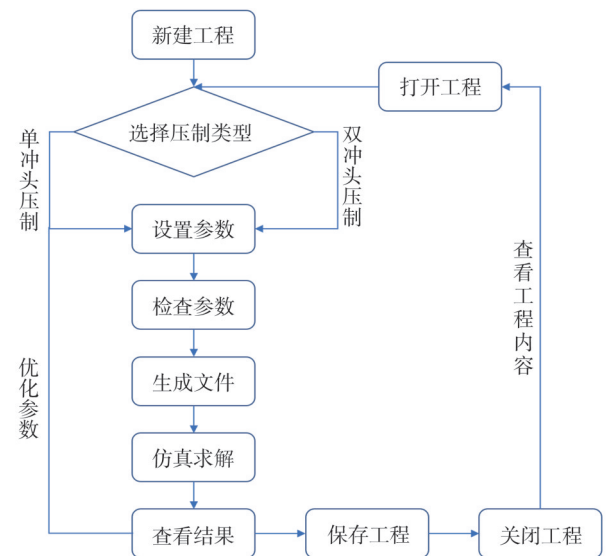


图9 操作流程框图

Fig. 9 Operation flow diagram

2 PBX 炸药压装成型模型性能验证

2.1 DPC 本构模型硬化规律验证

为了验证 Drucker-Prager Cap (DPC) 本构模型在描述 PBX 炸药压装成型过程中材料硬化行为的合理性,同时由于压装药柱密度分布数据实验中难以获取,本文通过对比实验与数值模拟获得的应力-应变以及载荷-位移响应,对模型及其硬化参数的适用性进行评估。

实验采用某厂所提供的 PBX 造型粉压制试样(材料属性见表 2),尺寸为 15 mm×15 mm,在准静态加载条件下进行单轴压缩试验。试验中,通过控制加载速率使材料处于低应变率压缩状态,并实时记录传感器传回的应力、压制力与轴向位移数据,并基于试样横截面积,将压制力换算为压制应力,最终得到应力-应变曲线以及压制应力-位移曲线,该曲线从载荷传递角度展示了压制过程中的力学行为。在数值模拟方面,采用单冲头压制成型工艺以及实验条件一致的试样尺寸、加载路径与边界条件,基于前文标定得到的 DPC 本构参数与材料参数(见表 1 和表 2),对单轴压缩过程进行仿真计算。通过提取模型中上冲头与药柱截面的应力与压制应力数据,得到对应的应力-应变曲线与压制应力-位移曲线,并与实验结果进行对比,如图 10 与图 11 所示。

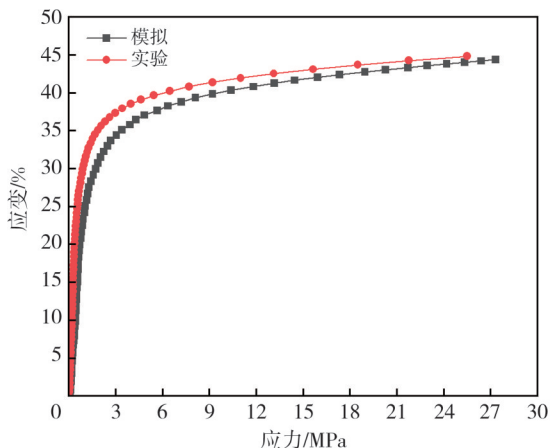


图 10 实验与仿真的应力-应变曲线

Fig. 10 Stress-strain curve from experiment and simulation

由图 10 与图 11 可以看出,数值模拟结果与实验数据在整体变化趋势上高度一致。两条曲线均呈现出典型的非线性压缩特征,即随着应力(或载荷)的增加,应变(或位移)持续增长,曲线由缓变过渡到陡变,反映了材料从松散到致密的转变过程。仿真曲线在主要加载区间内与实验数据稳定贴合,表

明所采用的 DPC 本构模型能够有效表征材料的宏观力学响应。

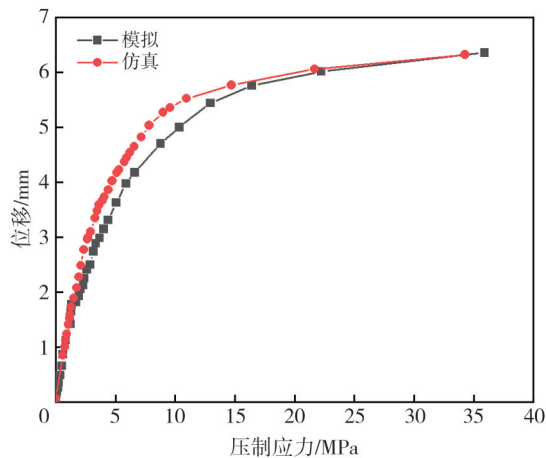


图 11 实验与仿真的压制应力-位移曲线

Fig. 11 Compression stress-displacement curve of experiment and simulation

具体而言,图 10 的应力-应变曲线验证了模型对材料本构关系的描述能力;图 11 的压制应力-位移曲线则进一步表明,该模型能准确预测特定边界条件下结构的整体载荷-位移响应,从而从多个维度确认了模型的有效性。在压缩初期,实验与仿真结果存在一定偏差,这主要源于 PBX 材料在低应力下以颗粒重排和孔隙塌陷为主,其细观行为具有一定的离散性,而连续介质模型难以完全刻画这一阶段的细观机制。当压缩进入以体积塑性变形为主导的阶段后,仿真与实验结果的吻合度显著提高。综上,仿真结果较为准确地复现了 PBX 材料在压缩过程中的非线性硬化行为、致密化演化规律及整体载荷响应,验证了所建立 DPC 本构模型及其参数在本研究工况下的合理性与可靠性。

2.2 典型案例分析

PBX 炸药压装成型工艺的不同压装方式在载荷施加路径和应力传递机制上存在本质差异,研究其对药柱致密化过程与成型均匀性的影响规律具有重要的工程意义。基于前述 Drucker-Prager Cap 本构模型对 PBX 炸药压装硬化行为的合理描述,本文选取单冲头与双冲头两种典型压装工艺作为研究对象。为保证对比分析的合理性,两种工况在几何尺寸、本构参数及求解策略上保持高度一致。本节将首先通过保压结束时刻的应力与密度分布云图直观展示成型差异,进而深入探讨其背后的致密化机理。

2.2.1 单冲头压装成型工艺

单冲头压装成型工艺选取实验室内压装系统的

经典尺寸与边界条件,基于前述软件系统与操作流程,几何尺寸设置如下:药柱半径 R_0 为130 mm,高度 H_0 为615 mm,冲头高度 H_1 为150 mm,模套厚度 R_1 为100 mm,高度 H_2 为775 mm。边界条件设置为冲头施加23 MPa压力并以 $3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度下压。材料参数使用模板参数(详见表1和表2)进行仿真计算,获得了单冲头压制过程前期、中期、结束以及保压过程结束药柱的应力云图与密度云图,如图12和图13所示。

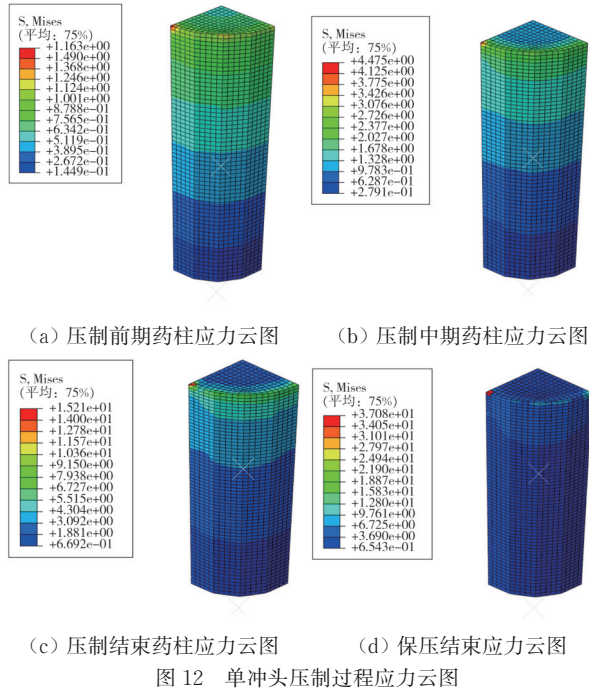


图12 单冲头压制过程应力云图

Fig. 12 Stress nephogram during single punch pressing process

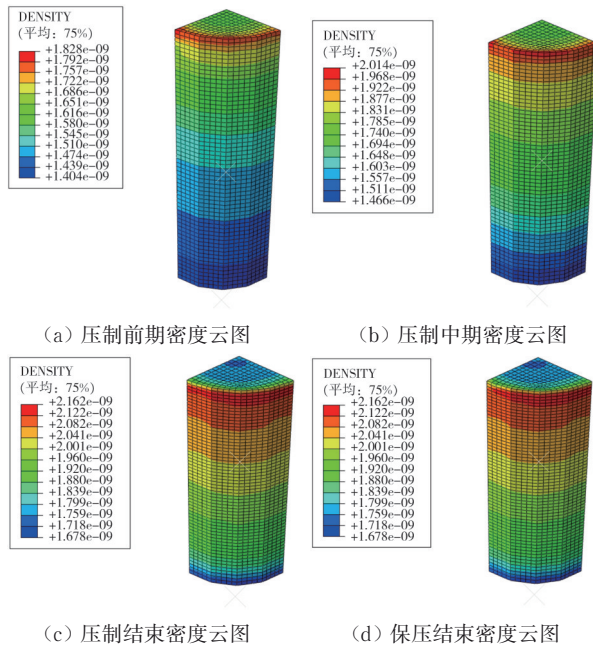


图13 单冲头压制过程密度云图

Fig. 13 Density nephogram during single punch pressing process

在压制前期、中期以及到结束,应力与密度场均呈现自上而下的显著梯度,应力云图显示压力从顶部冲头接触区域开始建立并向上传递,顶部始终存在高应力集中区。相应的密度云图也表现为密度自上而下递增,这与应力传递路径一致,反映了单向压制的特征。保压过程使得动态应力重分布并趋于静态定型,由云图可以看出,应力分布逐渐趋于均匀,最终的密度分布云图相较于压制结束时刻并没有发生太大的变化。总体来看,单冲头压装工艺后,药柱顶部为蓝色低密度区,而中下部则为红、黄色高密度区,形成了“上低下高”的分布。

2.2.2 双冲头压装成型工艺

双冲头压装成型工艺选取某厂内压装系统的尺寸与边界条件,采用相同的软件系统与操作流程,药柱模型尺寸设置同单冲头压装成型工艺。上下冲头均施加23 MPa的保压压力,上冲头下压速度为 $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,下冲头则以 $2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度上顶,材料参数沿用模板参数(详见表1和表2)对双冲头压制过程进行仿真,获得双冲头压制过程前期、中期、结束以及保压过程结束药柱的应力云图与密度云图,如图14和图15所示。

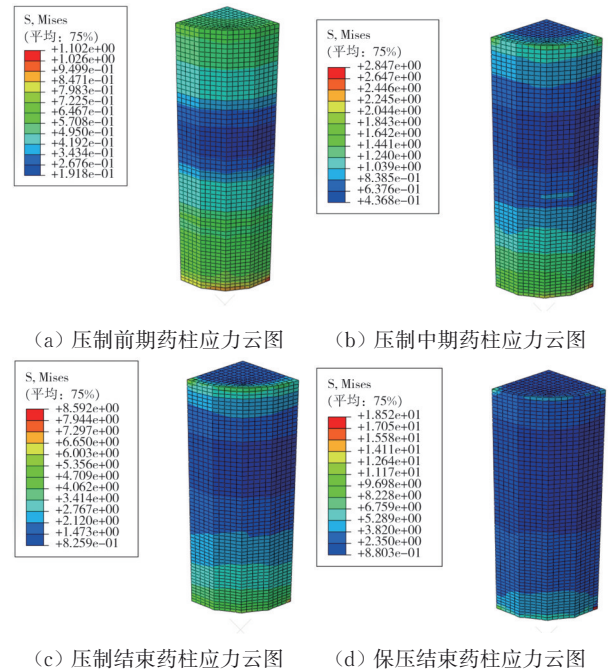


图14 双冲头压制过程应力云图

Fig. 14 Stress nephogram of double-punch pressing process

在压制前期,应力场与密度场均呈现中部低、两端高的马鞍形分布,应力从两端向中心开始传递,但中心尚未充分压实。随着压制的进

行,压制中期与结束时刻的应力与密度场演化显示,两端的高应力区持续向药柱中部传递,同时中间的密度逐渐升高,药柱均匀性逐步提高。压制结束时刻,经过保压阶段的应力重分布与塑性变形固化,药柱应力场逐步均匀,最终的密度云图显示,相较于单冲头压装工艺的最终密度分布,双冲头压装工艺最终更加均匀。

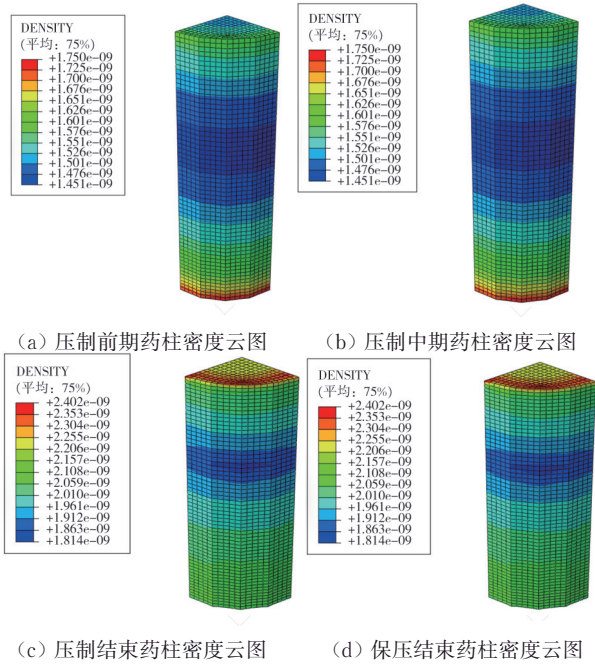


图 15 双冲头压制过程密度云图

Fig. 15 Density nephogram during double-punch pressing process

2.3 压制成型过程的机理分析

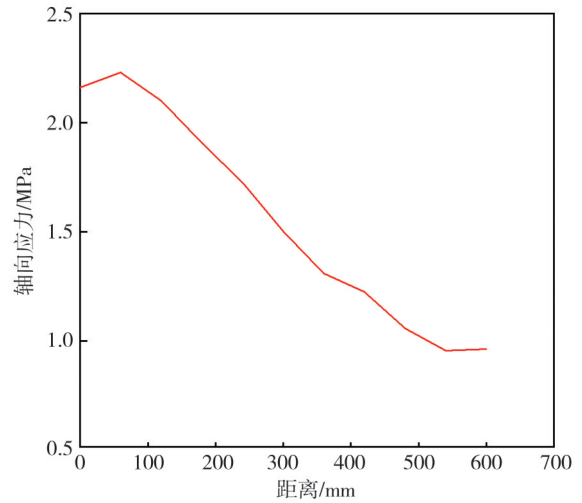
图 12~图 15 的云图从宏观上展示了单冲头与双冲头压装成型工艺下应力与密度场的分布差异,而本节通过对比单、双冲头压制下应力传递路径与致密化程度的关联,从力学内变量演化的角度定量揭示 PBX 炸药的压装成型机理。

2.3.1 应力传递路径与摩擦衰减机理分析

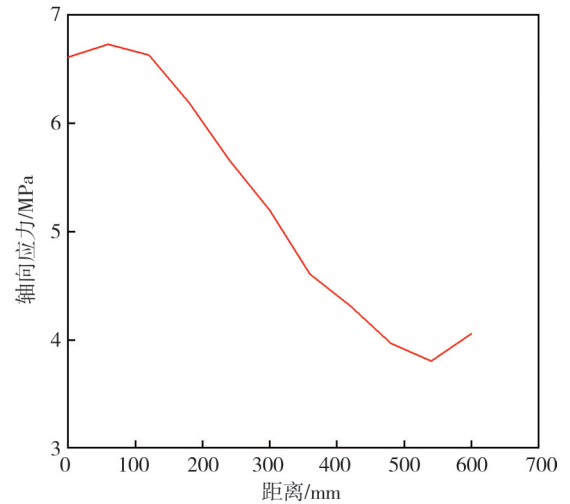
应力作为驱动致密化的动力源,其传递效率直接制约成型质量。提取仿真结果的数据,绘制出不同工艺下的药柱中心对称轴的轴向应力分布曲线图,如图 16 和图 17 所示,横坐标为距药柱顶端的距离。

单向加载下,轴向应力沿药柱高度呈现显著的梯度分布(见图 16)。压制中期,载荷自顶部向底部传递时,峰值由 5.0 MPa 衰减至约 4.7 MPa;至压制结束时,随材料致密化导致的侧壁压力增大,轴向应力差扩大至 1.0~1.2 MPa,衰减幅度达 15%~18%。这种“指数型”衰减源于药柱与模

壁间的库仑摩擦。单向传递路径使得输入能量被持续耗散,导致远冲头端获得的有效载荷不足。



(a) 压制中期药柱轴向应力分布曲线图



(b) 压制结束药柱轴向应力分布曲线图

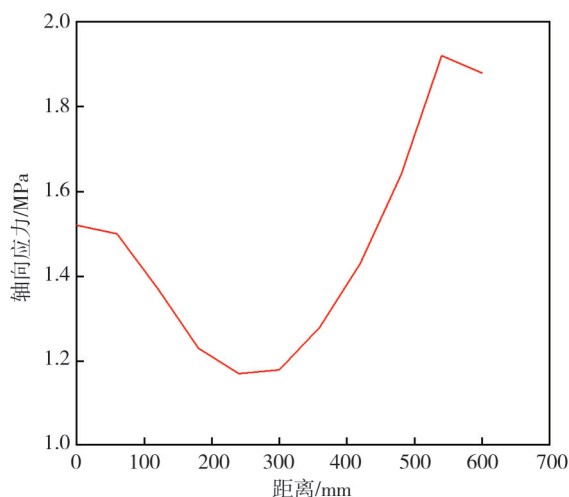
图 16 单冲头压制过程轴向应力分布曲线图

Fig. 16 Axial stress distribution curve during single punch pressing process

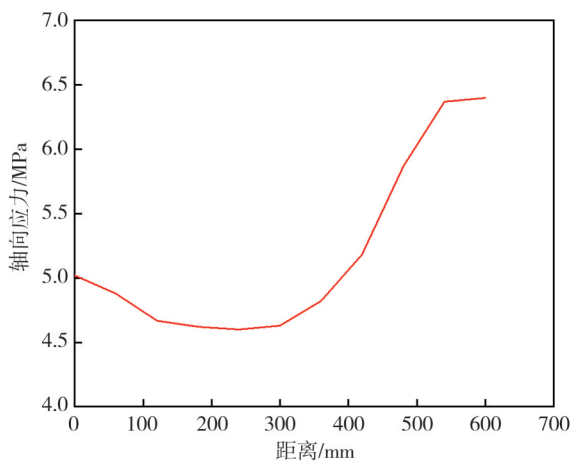
提取单冲头保压时刻特定截面的应力分布曲线如图 18 所示,横坐标变为距药柱中心轴的距离。可见轴向应力均呈现“中心高、边缘低”的态势。随着深度的增加,中心与边缘的应力极差显著扩大。该现象揭示了模壁摩擦对径向应力扩展的剪切约束作用,这种轴、径向应变梯度的耦合是导致药柱密度分布不均的物理根源。

双冲头工艺通过两端同步加载,构建了“双向对称传递路径”(见图 18)。应力曲线呈近似对称的“U”型分布,载荷在药柱中部实现叠加。压制结束时,整体应力水平在 6.2~6.5 MPa 间平稳波动,轴向均匀性显著优于单冲头工况,从机理上有效削弱了侧

壁摩擦的负面干扰。



(a) 压制中期药柱轴向应力分布曲线图



(b) 压制结束药柱轴向应力分布曲线图

图 17 双冲头压制过程轴向应力分布曲线图

Fig. 17 Axial stress distribution curve diagram during double-punch pressing process

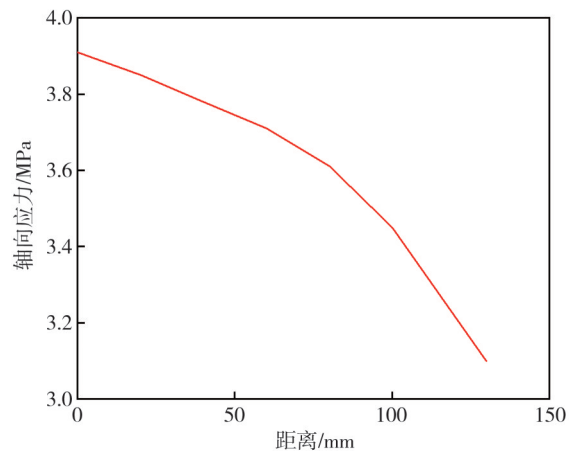


图 18 特定截面轴向应力分布曲线图

Fig. 18 Axial stress distribution curve of a specific cross-section

2.3.2 体积塑性应变与密度分布的映射关系

根据 DPC 本构模型, 材料的宏观致密化本质

上是静水压力驱动下帽型屈服面发生演化、孔隙被体积塑性变形挤压闭合的过程。药柱沿中心轴的密度与体积塑性应变可以定量展示保压结束时刻体积塑性应变与密度的映射关系, 如图 19~图 22 所示, 横坐标为距药柱顶端的距离。

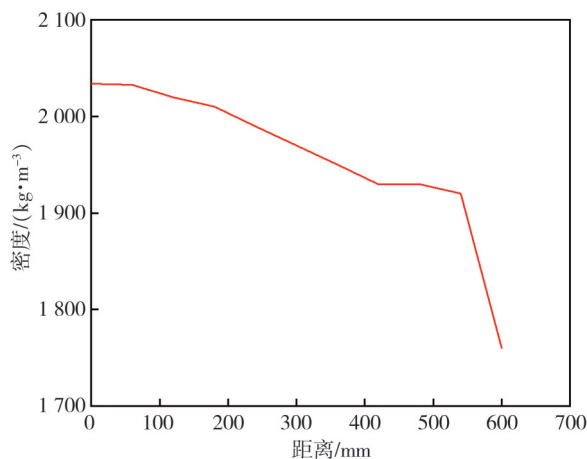


图 19 单冲头药柱中心轴密度分布曲线图

Fig. 19 Density distribution curve of the central axis of a single punch grain

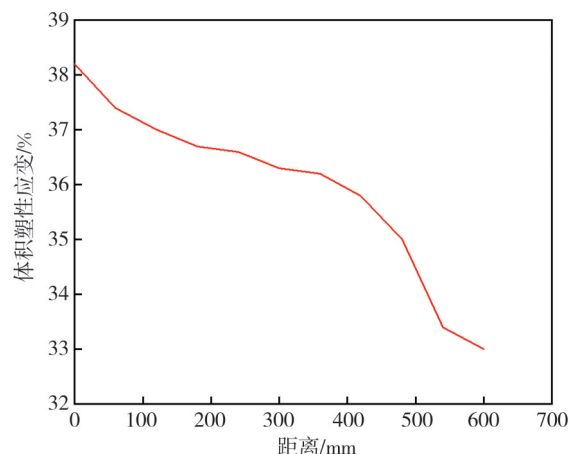


图 20 单冲头药柱中心轴体积塑性应变分布曲线图

Fig. 20 Distribution curve of plastic strain in the central axis volume of a single punch grain

单冲头保压结束时, 药柱内部形成了极高的演化梯度。顶部体积塑性应变达最大值 38.2%, 而底部仅为 33% 左右。对应密度分布显示, 顶部密度高达约 $2\,035\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 而底部致密化严重不足, 密度降至约 $1\,760\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 轴向密度极差约为 $275\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 上述结果表明, 应力衰减会导致底部体积塑性功转化效率低下, 帽型面演化滞后。

双冲头工艺下, 体积塑性应变场得到显著平衡。应变分布呈对称特征, 两端峰值分别约为 37.2% 和 39.1%, 中部谷值维持在 34.5% 左右。对应密度曲

线显示,两端密度均在 $2\,020\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上,中部最低密度也达到约 $1\,965\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。双向加载机制使密度极差缩小至约 $70\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,较单冲头工况有所改善。这说明通过优化塑性应变能的分配,可有效提升药柱全长范围内的屈服强化水平。

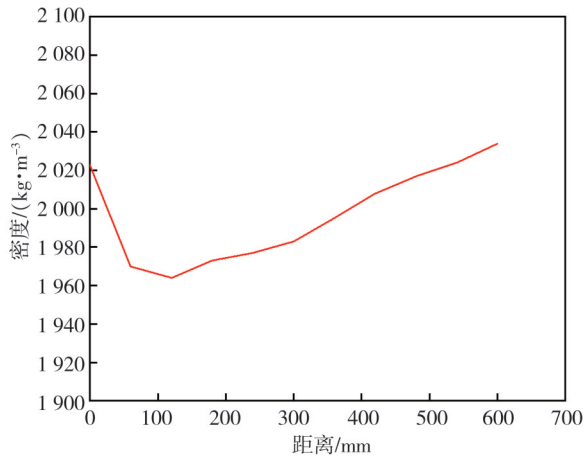


图 21 双冲头药柱中心轴密度分布曲线图

Fig. 21 Density distribution curve of the central axis of double-punch grain

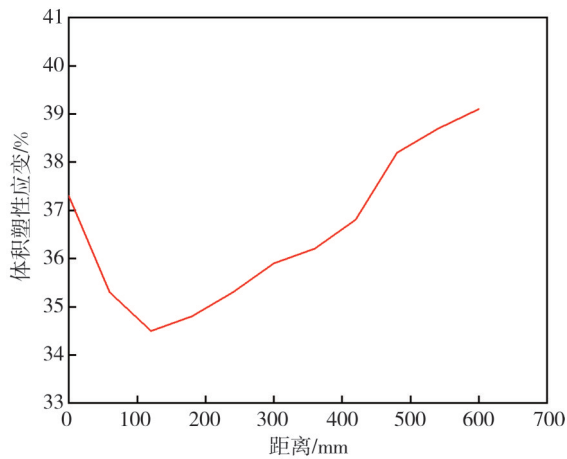


图 22 双冲头药柱中心轴体积塑性应变分布曲线图

Fig. 22 Distribution curve of plastic strain in the central axis volume of double-punch grain

2.3.3 致密化机理分析

综上所述, PBX炸药压装成型的致密化机理可总结为三个逻辑阶段。

在载荷传导与应力场重构的驱动机制中,压制致密化的源动力来自冲头输入的机械能,外部载荷通过药柱内部颗粒间的接触网络进行传递。双冲头工艺与单冲头的物理本质不同,其将单向长程传递重构为双向对称传递,借助中部的应力叠加效应,从源头上抵消了因载荷随行程指数级衰减而导致的驱动力匮乏。

在有效静水压力与侧壁摩擦的功耗竞争的耗

散机制中,致密化效率取决于输入功转化为体积塑性功的比例。侧壁摩擦作为主要的能量耗散项,与有效静水压力形成竞争。单冲头压制时,能量在轴向路径上被剧烈耗散,致使底部物料无法获得使帽型屈服面发生硬化移动所需的临界压力。而双冲头工艺通过缩短单程传递路径,最大程度抑制了摩擦功耗,从而确保了全长范围内塑性变形能的均衡分配。

在塑性应变场对密度场的稳态映射的演化准则中, PBX炸药的局部密度直接由该位置累积的体积塑性应变决定,其密度场的非均匀性系数与体积塑性应变梯度呈正相关。这一规律表明致密化是一个具有路径依赖性的塑性流动过程,体积塑性应变既是孔隙坍塌的几何度量,也是材料硬化状态的物理表征。因此, PBX药柱的致密化质量根本上取决于应力场、应变场和密度场之间的相互作用。优化压装工艺的核心在于通过改善应力传递的对称性来平抑体积塑性应变梯度,最终实现宏观密度分布的高一致性。

3 结 论

本文通过对ABAQUS仿真软件二次开发,基于Qt Creator平台构建了一种压装成型参数化仿真软件,将仿真与实验标定的Drucker-Prager Cap本构模型相结合,然后分别对单冲头与双冲头压装成型工艺的进行仿真求解。仿真结果表明:单冲头压装工艺因应力沿轴向单向传递并受模壁摩擦而显著衰减,导致药柱轴向存在明显应力梯度(压制末期应力差可达 $1.0\sim 1.2\text{ MPa}$)与“上高下低”的密度分布(密度极差约 $275\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)。而双冲头工艺通过双向对称加载重构了应力路径,有效抑制了摩擦衰减,使应力场分布更均匀,从而显著改善了药柱整体的密度均匀性(密度极差缩小至约 $70\text{ kg}/\text{m}^3$),证明了通过工艺设计重构应力传递路径及减少载荷传递距离,是改善PBX炸药压装均匀性的有效途径。本研究明确了通过改善应力场均匀性来优化密度分布的核心思路,所开发的参数化仿真框架能快速对比不同工艺方案,为实际生产中提升装药质量与可靠性提供了高效、直观的分析与优化工具。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献:

- [1] 曾升,游国强,温彤,等. 高聚物粘结炸药压制成型工艺实验研究综述[J]. 兵工自动化, 2024, 43(8): 86-92.
Zeng Sheng, You Guoqiang, Wen Tong, et al. Review of experimental research on PBX pressing process [J]. Ordnance Industry Automation, 2024, 43 (8): 86-92. (in Chinese)
- [2] 赵东,屈可朋,胡雪垚,等. 密度对含铝PBX炸药动态压缩力学行为及点火特性的影响研究[J]. 火工品, 2025(3): 33-40.
Zhao Dong, Qu Kepeng, Hu Xueyao, et al. Study on the effect of density on dynamic compression mechanical behavior and ignition characteristics of aluminized PBX explosive[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2025(3): 33-40. (in Chinese)
- [3] Dai B, Lan L G, Zhang W B, et al. Study on the state of internal stress and strain of TATB-based polymer bonded explosive using strain markers and cone-beam computed tomography [J]. Central European Journal of Energetic Materials, 2017, 14(3): 688-707.
- [4] 杨昆,吴艳青,金朋刚,等. 典型压装与浇注PBX炸药缝隙挤压损伤-点火响应[J]. 含能材料, 2020, 28(10): 975-983.
Yang Kun, Wu Yanqing, Jin Penggang, et al. Damage-ignition simulation for typical pressed and casted PBX under crack-extruded loading [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2020, 28 (10): 975-983. (in Chinese)
- [5] Yang X, Lü X, Jia X Z, et al. Analysis and Research on the crack of a type of pressed PBX column[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2891(5): 052001-052001.
- [6] 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 Haitao, Zhan Mei, Fan Xiaoguang, et al. Research progresses and prospects of compression molding of high-performance PBX[J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(1): 160-180. (in Chinese)
- [7] 柴悦. 典型PBX炸药热分解及恒温热爆炸研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2024.
- [8] 郭霄冉. 炸药压装过程定量风险评估研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2023.
- [9] 姚昕,王辉,沈飞,等. DNAN基含铝炸药在不同冲击载荷下的反应特性及点火阈值研究[J]. 火炸药学报, 2025, 48(12): 1168-1176.
- Yao Xin, Wang Hui, Shen Fei, et al. Research on reaction characteristics and ignition threshold of DNAN-based aluminized explosives under different impact loading conditions [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2025, 48 (12): 1168-1176. (in Chinese)
- [10] 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 Wenxu, Luo Zhiheng, Tang Mingfeng, et al. Compressive mechanical properties and constitutive relations of PBX-1 [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(7): 36-42. (in Chinese)
- [11] 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.
Yue Xiaoyuan, Zhang Huisuo, Huang Hongxin, 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. (in Chinese)
- [12] 衣东龙,王晓明,李庆菲,等. 模压装药工艺的改进[J]. 模具制造, 2021, 21(5): 57-60.
Yi Donglong, Wang Xiaoming, Li Qingfei, et al. Improvement of extruding pressing explosive technology [J]. Die & Mould Manufacture, 2021, 21(5): 57-60. (in Chinese)
- [13] 石婧. 散射方法研究高聚物黏结炸药的微结构与力热损伤[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2022.
- [14] Arora H, Tarleton E, Li-Mayer J, et al. Modelling the damage and deformation process in a plastic bonded explosive microstructure under tension using the finite element method [J]. Computational Materials Science, 2015, 110: 91-101.
- [15] 连昌伟,王兆远,杜传军,等. ABAQUS后处理二次开发在塑性成形模拟中的应用[J]. 锻压技术, 2006, 31(4): 111-114.
Lian Changwei, Wang Zhaoyuan, Du Chuanjun, et al. Application of second-developed ABAQUS post-process on numerical simulation of plastic forming [J]. Forging & Stamping Technology, 2006, 31 (4): 111-114. (in Chinese)
- [16] Zhang X T, Ma W L, Jiao X L. Secondary development and application of satellite dynamic simulation platform based on ABAQUS [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 436: 012012.
- [17] 任树洋,单庆林,陈彤,等. 基于ABAQUS的辊弯成形参数化建模方法[J]. 河北冶金, 2025(8): 42-48.

- Ren Shuyang, Shan Qinglin, Chen Tong, et al. ABAQUS-based parametric modeling method for roll forming[J]. Hebei Metallurgy, 2025(8): 42-48. (in Chinese)
- [18] 周忠彬, 陈鹏万, 丁雁生. PBX代用材料非线性粘弹性本构模型研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(6): 276-281.
- Zhou Zhongbin, Chen Pengwan, Ding Yansheng. Study on nonlinear viscoelastic constitutive model of polymer-bonded explosive mock materials[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(6): 276-281. (in Chinese)
- [19] 孙世民, 黄尚宇, 周梦成, 等. 冷模压制 Ti-6Al-4V 粉末的修正 Drucker-Prager Cap 本构模型[J]. 粉末冶金技术, 2018, 36(4): 261-269.
- Sun Shimin, Huang Shangyu, Zhou Mengcheng, et al. Modified drucker-prager cap model of Ti-6Al-4V powders for cold die compaction[J]. Powder Metallurgy Technology, 2018, 36(4): 261-269. (in Chinese)
- [20] 徐冰. 基于有限元分析的 PBX 颗粒压制工艺优化研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2025.
- [21] Park S Y, Galbraith S C, Liu H L, et al. Prediction of critical quality attributes and optimization of continuous dry granulation process *via* flowsheet modeling and experimental validation [J]. Powder Technology, 2018, 330: 461-470.