

doi: 10.7690/bgzd.2022.12.024

# 单螺杆机筒结构对发射药挤出过程影响研究

季丹丹, 张瀚铭, 胥健, 肖勇, 史慧芳

(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:** 为提高产品质量与生产安全性, 对某发射药单螺杆挤出成型过程进行分析。采用有限元方法分别对光滑机筒单螺杆挤出机与开槽机筒单螺杆挤出机内发射药的挤出成型过程进行数值模拟, 对比流场内的输送速度、最大压力、混合指数和粘性热, 分析不同机筒结构对输送效率、混合效果与安全性能的影响。结果表明: 与光滑机筒单螺杆挤出机相比, 开槽机筒单螺杆挤出机的输送性能与混合效果更好; 槽数为 6, 槽深为 2~3 mm 的开槽机筒为最优结构。

**关键词:** 发射药; 单螺杆挤出机; 机筒; 数值模拟

**中图分类号:** TJ55 **文献标志码:** A

## Influence Research of Single-screw Barrel Structure on Propellant Extrusion Process

Ji Dandan, Zhang Hanming, Xu Jian, Xiao Yong, Shi Huifang

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

**Abstract:** In order to improve the product quality and production safety, the single-screw extrusion molding process of propellant was analyzed. The propellant extrusion process in a single-screw extruder with smooth barrel and a single-screw extruder with slotted barrel was numerically simulated by finite element method. The conveying velocity, maximum pressure, mixing index and viscous heat in the flow field were compared. The influence of different barrel structures on conveying efficiency, mixing effect and safety performance were analyzed. The results showed that compared with the single-screw extruder with smooth barrel, the single-screw extruder with grooved barrel had better conveying performance and mixing effect, and the grooved barrel with 6 grooves and 2~3 mm groove depth was the optimal structure.

**Keywords:** propellant; single-screw extruder; barrel; numerical simulation

### 0 引言

发射药作为枪、炮等身管武器的能量来源, 是弹丸运动的动力保证, 其稳定的力学性能和燃烧性能是武器先进性的保障<sup>[1]</sup>。随着我国武器装备发展, 对发射药的质量和性能提出更高要求<sup>[2]</sup>。目前我国发射药制备大部分采用间歇式工艺, 生产过程人工控制, 存在效率低、危险系数高且批次间质量差异大等一系列问题, 无法满足先进武器发展需求。

发射药挤出成型需要一定的压力, 压力的大小取决于设备结构参数与生产过程的工艺参数。单螺杆挤出机因结构简单、操作方便、可连续稳定出料等优点, 在部分发射药生产过程中已有应用。单螺杆挤出机中应用最多的是光滑机筒, 其输送机理为摩擦拖曳输送<sup>[3]</sup>。为提高固体输送段建压能力, 科研人员设计并制造了开槽机筒挤出机<sup>[4]</sup>, 在机筒加料段内壁开设有轴向直槽。2种输送结构在聚合物

混合输送生产中均有应用。在发射药连续挤出成型过程中, 因材料的特殊性, 如机筒结构设计不合理, 不仅会造成压力波动、建压能力差、产量降低等一系列问题, 还将产生极大的安全隐患。目前, 对发射药单螺杆挤出成型过程的研究主要集中在分析药料配方、加工工艺参数、安全性能<sup>[5-7]</sup>等方面, 机筒结构对发射药挤出过程的影响鲜有报道。

笔者采用数值模拟的方法分别对某发射药在光滑机筒与开槽机筒单螺杆挤出机内的流动过程进行研究, 详细分析不同的机筒结构对连续挤出过程输送速度、最大压力、混合性能和粘性热的影响, 为发射药连续挤出成型设备的设计提供理论支撑。

### 1 发射药的流变特性

发射药的流变特性对加工性能和成型质量有很大的影响。为更好地模拟发射药在单螺杆挤出机内的流动行为, 采用防爆毛细管流变仪对 45 °C 条件下

收稿日期: 2022-08-15; 修回日期: 2022-09-14

作者简介: 季丹丹(1986—), 女, 江苏人, 博士, 高级工程师, 从事发射药配方设计, 发射药成型工艺、装备、仿真计算研究。

E-mail: zihedandan@163.com。

某发射药进行流变性能测试。剪切速率与剪切粘度数据如表 1 所示。

表 1 剪切速率与剪切粘度实验数据

剪切速率/s <sup>-1</sup>	剪切粘度/(Pa·s)	剪切速率/s <sup>-1</sup>	剪切粘度/(Pa·s)
2.00	32 597.192 01	80.71	1 904.988 48
4.71	16 884.615 32	100.70	1 607.106 26
11.08	8 753.156 46	144.71	1 216.489 45
25.86	4 565.333 66	200.80	945.907 57
43.10	3 083.846 01	341.11	629.663 17
61.45	2 348.477 58	837.41	315.903 72

采用 Bird-Carrus 模型对流变数据进行拟合,本构方程如下:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) (1 + \lambda^2 \dot{\gamma}^2)^{(x-1)/2} \quad (1)$$

式中:  $\eta_0$  为零剪切粘度, Pa·s;  $\eta_{\infty}$  为无穷剪切粘度, Pa·s;  $\lambda$  为松弛时间, s;  $\dot{\gamma}$  为剪切速率, s<sup>-1</sup>;  $x$  为非牛顿指数。

拟合结果如图 1、表 2 所示。

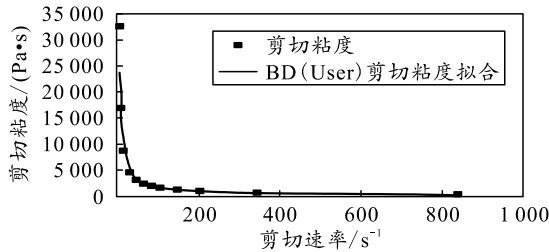


图 1 本构方程拟合结果

表 2 Bird-Carrus 模型拟合结果

$\eta_0$ /(Pa·s)	$\eta_{\infty}$ /(Pa·s)	$\lambda$ /s	$x$	$R^2$
$2.54 \times 10^4$	71.56	0.20	0.076	0.98

## 2 数值仿真计算

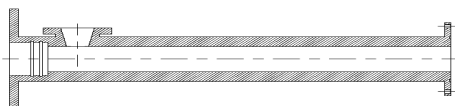
### 2.1 挤出机结构设计

根据发射药的物料特性,设计单螺杆挤出机。单螺杆挤出机主要几何参数如表 3 所示。

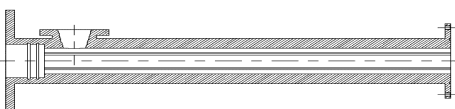
表 3 光滑机筒单螺杆挤出机 mm

机筒长度	螺杆根径	螺杆外径	机筒内径	螺距	间隙
450	32	45	46	45~36	0.5

挤出机机筒分为光滑机筒与开槽机筒,机筒结构如图 2 所示,开槽机筒开 4 个轴向矩形槽,槽深 3 mm,槽宽 8 mm。



(a) 光滑机筒



(b) 直槽机筒

图 2 机筒结构

螺杆结构如图 3 所示,加料段螺距为 45 mm,成型段螺距为 36 mm。

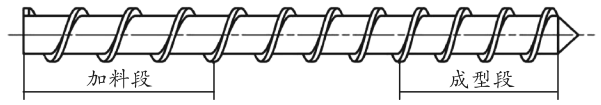
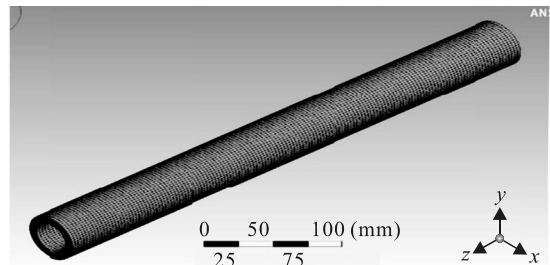


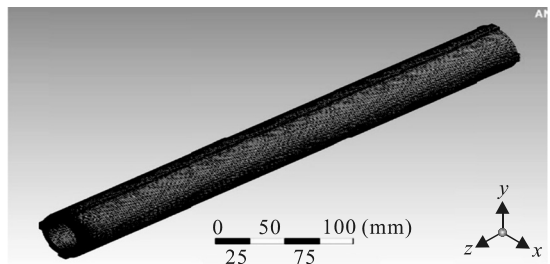
图 3 螺杆结构

### 2.2 网格模型

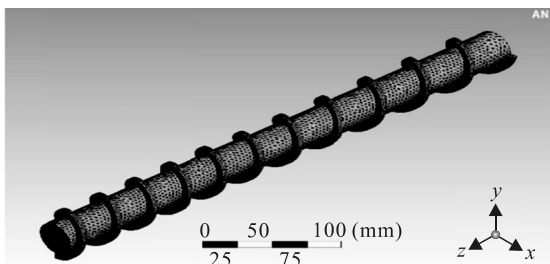
单螺杆挤出机螺杆采用四面体网格划分,流道采用六面体网格划分,机筒内流道与螺杆元件的有限元模型如图 4 所示,对螺棱与机筒开槽处进行细化,提高计算精度。



(a) 光滑机筒流道



(b) 开槽机筒流道



(c) 螺杆

图 4 螺杆与流道有限元模型

### 2.3 数学模型

对于药料的挤出过程,连续性方程为:

$$\partial \rho / \partial t + \partial \rho v_i / \partial x_i = 0; \quad (2)$$

动量平衡方程为:

$$\rho (\partial v_i / \partial t + v_j (\partial v_i / \partial x_j)) = -\partial P / \partial x_i + \partial \tau_{ij} / \partial x_j + \rho g_i; \quad (3)$$

能量平衡方程为:

$$\rho C_v \frac{DT}{Dt} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - T \left( \frac{\partial P}{\partial T} \right)_P \frac{\partial v_i}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \rho S. \quad (4)$$

## 2.4 基本假设

求解上述基本方程须针对工程实际情况进行适当的假设简化处理。考虑药料的特性和稳定挤出时的工艺条件，作如下假设<sup>[8]</sup>：

- 1) 药料是不可压缩的流体，不考虑时间对流动性的影响；
- 2) 流体充满流道，流场稳定、等温；
- 3) 药料在流道壁面无滑移，各个速度分量为 0；
- 4) 不计药料重力和惯性力的影响。

## 2.5 数值计算方法与边界条件

笔者采用有限元方法，使用 POLYFLOW 软件数值求解非线性耦合方程。在计算中，速度采用 mini-element 插值，压力采用线性插值，粘度采用 Picard 迭代，采用隐式欧拉法联立求解离散化的方程。螺杆转速 30 r/min，入口速度恒定  $3 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ，出口压力 0.3 MPa，壁面无滑移，通过 POLYFLOW 软件，计算 2 种挤出机流道内药料的 3 维等温流场。

## 3 仿真结果分析

### 3.1 挤出机结构对发射药挤出过程的影响

对不同机筒结构单螺杆挤出机内发射药挤出过程各物理场进行计算，仿真结果如表 4 所示。为避免出口效应，取距出口 0.5 mm 处的截面，计算该截面药料的流动速度，判断机筒结构对药料输送效率的影响。螺杆内最大压力是影响产品质量的重要因素，如太小则机头无法达到药料挤出成型所需压力，产品的致密性降低；如过大，会导致药料流动过快，在螺杆头部堆积过多，导致燃烧甚至爆炸危险发生。根据试验经验，应控制压力范围在 20~50 MPa 内，在该范围内，压力越大，药料成型质量越高。粘性热是药料在流动过程中由于粘性摩擦力引起的机械能转换成热能的现象，导致流动过程中流体的温度、粘度以及热量传递行为等发生变化，是挤出过程安全性的判断依据之一。混合指数则可表征螺杆挤出机的分散混合效果。

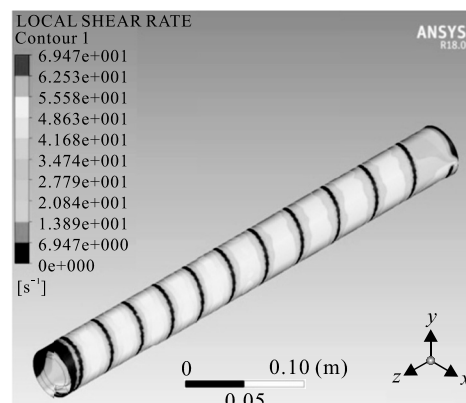
表 4 不同挤出结构仿真计算结果

挤出机结构	速度/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	压力/ MPa	剪切速率/ $\text{s}^{-1}$	粘性热/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ )	混合 指数
光滑机筒	$1.69 \times 10^{-5}$	59.76	69.47	$1.21 \times 10^7$	0.845
开槽机筒	$2.65 \times 10^{-5}$	30.05	127.83	$2.19 \times 10^7$	0.956

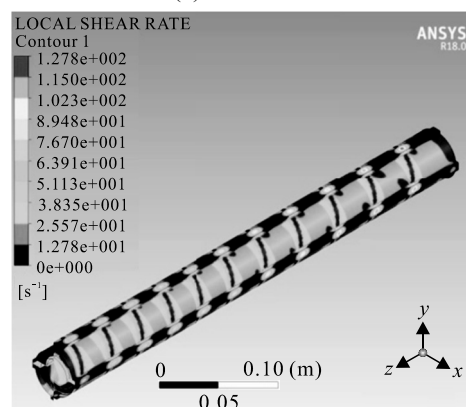
由上表可知，在光滑机筒单螺杆挤出机内，出口处流动速度为  $1.69 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，明显低于开槽机筒内药料流动速度  $2.65 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ，而流道内最大压力为 59.76 MPa，远高于开槽机筒内的 30.05 MPa。

这是因为发射药挤出成型温度低，药料粘度高，流动性差，在光滑机筒内摩擦力小，输送效率低；而机筒内壁开槽，将物料输送过程中的动力由物料与机筒间的外摩擦力转化为物料与物料间的内摩擦力，可有效增大输送的动力，提高输送效率，降低流道内压力，提高安全性。

开槽机筒单螺杆挤出机开设有轴向直槽，直槽内剪切速率明显高于光滑机筒，如图 5 所示。



(a) 光滑机筒



(b) 开槽机筒

图 5 剪切速率分布云图

由表 4 可知，在开槽机筒单螺杆挤出机内的流场最大剪切速率是光滑机筒单螺杆挤出机内的 1.84 倍，所产生的粘性热是光滑机筒单螺杆的 1.81 倍，这说明随着剪切速率的增加，粘性热有所增加。对比混合指数可知，开槽机筒单螺杆挤出机具有更好的分散混合效果。

综合以上分析，开槽机筒单螺杆挤出机挤出输送性能与混合效果较好，虽粘性热有所增加，但成型压力明显降低，可保障生产过程的安全性。

### 3.2 机筒槽数对发射药挤出过程的影响

为研究机筒槽数数量增加对单螺杆螺筒挤出机挤出性能的影响，设计了 4、6、8、10、12 5 种不同槽数的机筒，槽宽均为 8 mm。取不同槽数机筒

内离出口截面 0.5 mm 处截面的速度以及流道内的各物理量分析对比, 结果如图 6 所示。

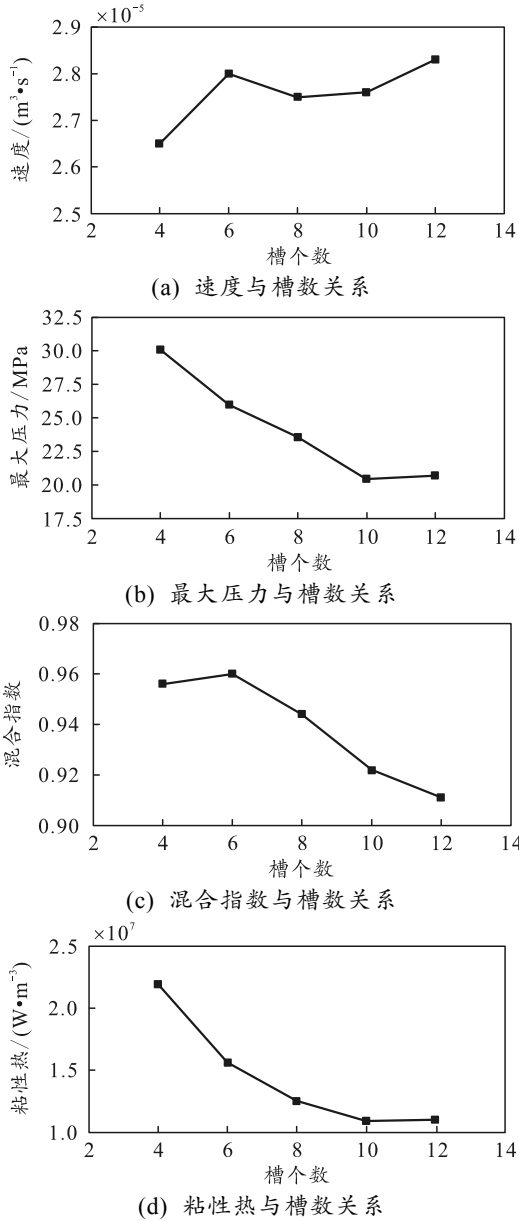


图 6 不同机筒槽数对各物理量的影响

由上图可知, 随着机筒槽数的增加, 流道近出口处速度增大, 输送能力增强, 流道内最大压力、混合指数与粘性热均降低; 槽数为 6、12 时, 挤出机输送能力最好; 槽数为 6 时, 混合指数最高, 说明分散混合效果越好; 槽数为 12 时, 虽粘性热低, 但混合指数低, 分散混合效果差; 开槽机筒内最大压力均在安全范围以内, 此时, 压力越高, 成型质量越好。综上可知, 机筒槽数为 6 时, 单螺杆挤出机的输送性能、分布混合性能、成型质量与安全性均明显较好, 这说明并不是机筒槽数越多越好, 要根据实际情况而定。针对该发射药, 槽数 6 为最

优选择。

### 3.3 机筒槽深对发射药挤出过程的影响

为研究机筒槽深增加对单螺杆螺筒挤出机挤出性能的影响, 设计了 1、2、3 与 4 mm 4 种槽深的机筒, 槽数为 6, 槽宽为 8 mm。取不同槽深机筒内离出口截面 0.5 mm 处截面的速度以及流道内的各物理量分析对比, 结果如图 7 所示。

由下图可知, 随着机筒槽深的增加, 挤出机输送速度提高; 槽深为 1 mm 时, 混合指数最高, 粘性热最低, 但输送效率低, 挤出压力大; 槽深为 4 mm 时, 药料流动所产生的粘性热最高, 混合指数最小, 分散混合效果与安全性较差。因此, 针对该发射药, 单螺杆挤出机槽深 2、3 mm 为较优选择。

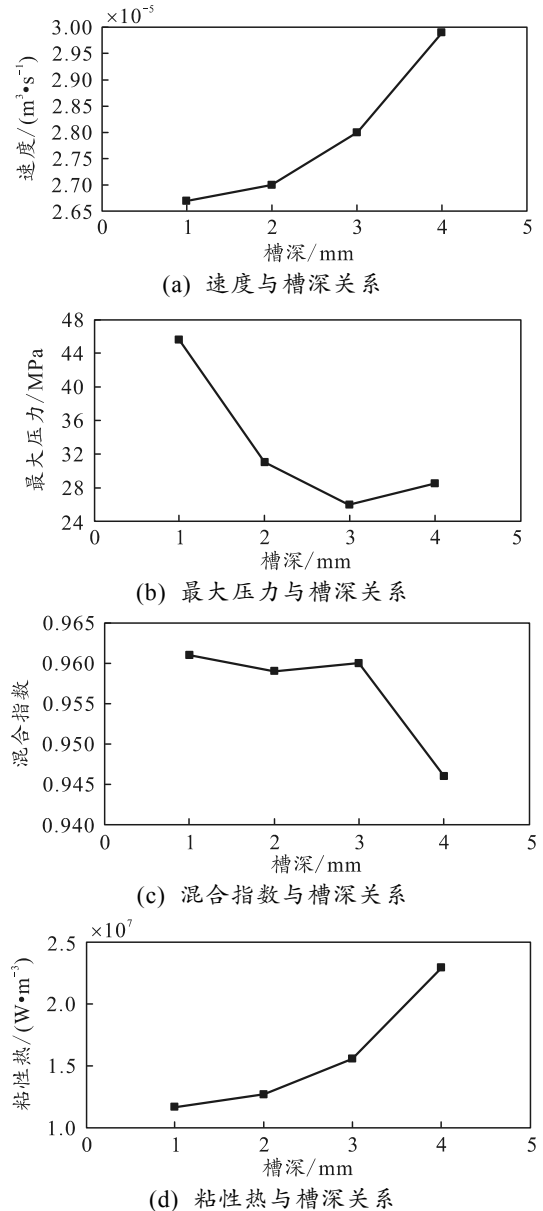


图 7 不同槽深对流道内各物理量的影响

## 4 结论

为提高某发射药单螺杆挤出成型产品质量与生产过程安全性, 笔者采用有限元方法对比不同机筒结构单螺杆挤出机内药料的输送速度、最大压力、混合指数与粘性热, 讨论机筒结构对输送效率、混合效果与安全性能的影响, 得到以下结论:

1) 与光滑机筒单螺杆挤出机相比, 开槽机筒单螺杆挤出机输送效率高、混合效果较好, 同时可保障安全性能;

2) 针对该发射药, 机筒槽数为 6 时单螺杆挤出机的输送性能、混合性能与安全性能均较好, 为最优选择;

3) 针对该发射药, 单螺杆挤出机槽深 2、3 mm 为较优选择。

## 参考文献:

[1] 王泽山, 何卫东, 徐复铭, 等. 火炮发射药装药设计原

\*\*\*\*\*

(上接第 105 页)

[12] DIENES J K, ZUO Q H, KERSHNER J D. Impact initiation of explosives and propellants via statistical crack mechanics[J]. *MechPhys Solids*, 2006, 54: 1237-1275.

[13] ADDESSIO F L, JOHNSON J N. A constitutive model for the dynamic response of brittle materials[J]. *Appl. Phys*, 1990, 67: 3275-3286.

[14] BENNETT J G, HABERMAN K S, JOHNSON J N, et al. A constitutive model for the non-shock ignition and mechanical response of high explosives[J]. *Mech Phys*, 1998, 46: 2303-2322.

[15] HACKETT R M, BENNETT J G. An implicit finite element material model for energetic particulate composite materials[J]. *Int J Numer Methods Eng*, 2000, 49: 1191-1209.

[16] XIAO Y C, SUN Y, LI X, et al. Dynamic Mechanical Behavior of PBX[J]. *Propellants ExplosPyrotech*, 2016, 41: 629-636.

[17] YANG K, WU Y, HUANG F. Numerical simulations of microcrack-related damage and ignition behavior of mild-impacted polymer bonded explosives[J]. *Hazard Mater*, 2018, 356: 34-52.

[18] LIU M, HUANG X, WU Y, et al. Numerical simulations

理与技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 1-6.

[2] 赵辉. 世界武器装备发展趋势[J]. *国防科技*, 2018, 39(6): 40-43.

[3] 贾明印, 薛平, 金晓明, 等. 开槽机筒单螺杆挤出机的对比研究[J]. *工程塑料应用*, 2012, 40(10): 50-53.

[4] SIKORA J W. The effect of the feed section groove taper angle on the performance of a single-screw extruder[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2001, 41(9): 1636-1643.

[5] 马宁, 陈松, 张哲, 等. HTPB/RDX/Al/DOA 复合体系流变特性研究[J]. *化工新型材料*, 2019, 47(7): 194-200.

[6] 殷书盼. 推进剂代料单螺杆压伸过程的数值分析研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.

[7] 丁亚军, 应三九. 螺杆挤出过程中物料在线流变行为及其数值模拟[J]. *兵工学报*, 2015, 36(8): 1437-1442.

[8] MU Y, ZHAO G. Numerical study of nonisothermal polymer extrusion flow with a differential viscoelastic mode[J]. *Polymer Engineering and Science*, 2008, 48(2): 316-328.

\*\*\*\*\*

of the damage evolution for plastic-bonded explosives subjected to complex stress states[J]. *Mech Mater*, 2019, 139: 103179.

[19] DROUET D, HANUS J L, PAVIER J. Mechanical Behaviour of a NTO and RDX-Based Melt Cast Explosive[J]. *Propellants Explos Pyrotech*, 2020, 45: 1281-1292.

[20] XU W Z, GUO F W, LIANG X, et al. Dynamic response properties of polymer bonded explosives under different excitation by deceleration[J]. *Mater Des*, 2021, 206: 109810.

[21] 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.

[22] 李亮亮, 屈可朋, 沈飞, 等. 摩擦效应对某 PBX 炸药动态力学性能的影响[J]. *火炸药学报*, 2016, 39(6): 69-73.

[23] ZHAO H, GARY G, KLEPACZKO J R. On the use of a viscoelastic split Hopkinson pressure bar[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1997, 19(4): 319-330.

[24] WANG L, LABIBES K, AZARI Z, et al. Generalization of split Hopkinson bar technique to use viscoelastic bars[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1994, 15(5): 669-686.