

doi: 10.7690/bgzdh.2024.12.010

## 基于数值仿真的药柱热挤出成型过程分析

刘彬<sup>1</sup>, 覃鹏<sup>1</sup>, 王勇<sup>1</sup>, 李鳌<sup>1</sup>, 郭进勇<sup>1</sup>, 石义官<sup>1,2</sup>

(1. 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;

2. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

**摘要:** 为实现高质量的药剂热挤出成型, 对基于数值仿真的药柱热挤出成型过程进行分析。建立以某高聚物氟碳药剂为研究对象的基础模型, 利用 Polyflow 软件模拟实心药柱的挤出过程。分析该实心药柱在定压和定速挤出过程下的压力分布、速度分布, 以及膨胀率的变化趋势, 探究不同药柱尺寸与工艺参数的变化关系。结果表明: 挤出某实心药柱最佳成型工艺为定速挤压工艺, 其主要工艺温度范围为 60~80 °C, 入口体积流率范围在  $5.10 \times 10^{-9} \sim 1.02 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ 。

**关键词:** 挤塑成型; 仿真分析; Polyflow

中图分类号: TJ410.3 文献标志码: A

## Analysis of Hot Extrusion Molding Process of Propellant Grain Based on Numerical Simulation

Liu Bin<sup>1</sup>, Qin Peng<sup>1</sup>, Wang Yong<sup>1</sup>, Li Ao<sup>1</sup>, Guo Jinyong<sup>1</sup>, Shi Yiguan<sup>1,2</sup>

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

2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to realize the hot extrusion molding of high quality propellant, the hot extrusion molding process of propellant grain based on numerical simulation was analyzed. The basic model of a polymer fluorocarbon propellant was established, and the extrusion process of solid propellant was simulated by polyflow software. The pressure distribution, velocity distribution, and the change trend of expansion rate of the solid grain in the constant pressure and constant speed extrusion process were analyzed, and the relationship between different grain sizes and process parameters was explored. The results show that the best forming process of solid grain is constant speed extrusion process, the main process temperature range is 60 - 80 °C, and the inlet volume flow rate range is  $5.10 \times 10^{-9} - 1.02 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$ .

**Keywords:** extrusion molding; simulation analysis; Polyflow

### 0 引言

在现代火工品生产中, 通过在配方中添加氟碳化合物使药剂具备高聚物特性, 能通过柱塞挤压或螺杆挤压<sup>[1-7]</sup>的方式形成药柱, 以实现大长径比药柱的生产, 满足更广泛的弹药需求。相比于其他成型方法, 挤塑成型技术作为当今聚合物加工领域重要的成型手段之一, 具有生产效率高、适应性广的优势<sup>[8]</sup>。

因药柱热挤出<sup>[9-12]</sup>的过程比较复杂, 试验成本高, 无法在实际生产中得到热挤出过程的数值变化, 笔者以 4 mm 实心药柱的挤出过程为例, 通过 Polyflow 软件的数值模拟, 以进口速度、挤压温度、挤压压力等工艺参数为变量, 探究药柱在挤出成型过程中, 药剂在模具内部的流动状态, 并分析各工艺参数对药柱成型质量的影响, 以建立某药柱热挤

出过程初步工艺参数, 为后续新工艺的试验验证提供理论基础。

### 1 有限元模型建立

#### 1.1 药剂挤塑模具的模型构建

采用 3 维软件 NX 建立某药剂挤塑模具, 其模型截面如图 1 所示。为提高计算效率, 取模具流道截面部分进行模拟计算。

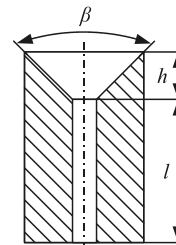


图 1 模具截面

上图中,  $\beta$  为模具收缩角;  $h$  为模具的收缩段长

收稿日期: 2024-06-23; 修回日期: 2024-07-24

第一作者: 刘彬(1976—), 男, 四川人。

度;  $l$  为模具成型段长度。本次计算使用产品为 4 mm 药柱的挤出过程为研究对象, 其模具主要参数如下:  $\beta=90^\circ$ ,  $h=5.5$ ,  $l=39$ , 探讨在不同温度的情况下, 定压挤出和定速挤出 2 种模式下, 产品的成型过程。

## 1.2 药剂挤塑仿真基本假设及模型实现

药剂热挤出工艺过程是将塑化后的药片或药团放入指定温度的模具中, 保温一段时间使药剂温度和模具温度达到一致, 再使用冲杆缓慢加压, 将药剂从出药口挤出。

在仿真时进行适当的工程简化, 综合考虑挤出工艺及材料特性, 对挤塑仿真过程作如下假设:

1) 在挤塑装置中模具各处等温, 实验仅改变模具温度、压强、入口速度的变化, 且流场分布与时间无关, 物料为高黏度非等温流动的非牛顿流体;

2) 流动过程雷诺数较小, 物料在挤出过程中为层流流动且充满整个流道。

## 1.3 数学模型构建

在本挤塑仿真模拟中, 考虑 3 维非等温挤塑系统。假定药剂熔体不可压, 由于药剂的高粘性, 惯性力和质量力相对于粘性力很小, 可忽略不计。

由 Bird-Carreau 模型给出药剂表观黏度与剪切速率的关系为:

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

式中:  $\eta_0$  为零剪切黏度, Pa·s;  $\lambda$  为 Bird-Carreau 模型参数, s;  $n$  为非牛顿指数;  $\dot{\gamma}$  为剪切速率,  $\dot{\gamma} = \sqrt{2\Pi_D}$ , 其中  $\Pi_D$  为形变速率张量的第 2 个不变量。

由 Arrhenius approximate law 模型给出药剂表观黏度与温度的关系为:

$$H(T) = \exp(-b(T-T_0)) \quad (2)$$

最终黏度为  $\eta$  与  $H(T)$  系数的乘数值。

## 1.4 工艺参数设置

热挤出工艺过程仿真通过仿真分析软件对挤塑成型进行仿真模拟, 能够研究在给定边界条件下, 药剂在挤出成药柱过程中, 药剂在模具不同位置时的速度、温度、应力以及应变状态的变化情况, 实现对热挤出过程工艺状态的初步探究, 并通过对仿真结果的分析, 推理判断出实际生产中可能出现的问题和挤出过程的临界条件, 从而获得合适的挤压工艺参数, 以及实现挤压过程的安全控制。

使用 Polyflow 软件对模具 4 (出口直径为 4 mm,  $\beta=90^\circ$ ,  $h=5.5$ ,  $l=39$ ) 分别进行 2 组参数的仿真模拟,

分析定压挤出工艺和定速挤出工艺对药柱成型过程的影响。模具温度和压强工艺优化组别设置如表 1 所示。模具温度和速度入口工艺优化组别设置如表 2 所示。

表 1 模具温度和压强工艺组别设置

组数	模具温度/℃	压强/MPa
1	40	15.0
2	40	17.5
3	60	15.0
4	70	15.0
5	80	15.0
6	80	17.5

表 2 不同模具温度和入口速度工艺组别设置

组数	模具温度/℃	入口体积流率/(m <sup>3</sup> /s)
1	40	5.10E-09
2	40	1.02E-08
3	60	5.10E-09
4	60	1.02E-08
5	80	5.10E-09
6	80	1.02E-08

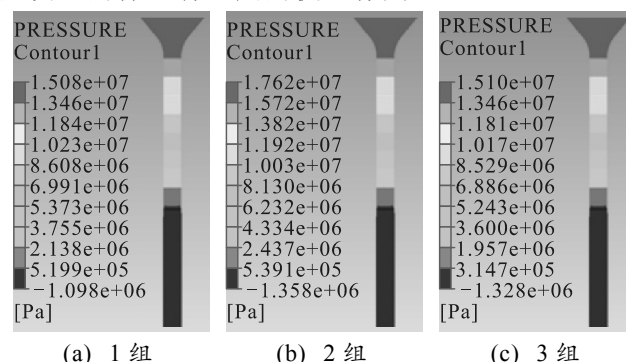
## 2 仿真实验结果

### 2.1 压力分布情况

图 2 和 3 展示了不同挤压工艺下药料压力的分布情况。在定压情况下, 产品进口处药料压力与施加压力基本一致, 同一压强下模具出口处的压强变化也较小, 温度对压力的分布影响不大; 但对于定速挤出工艺, 温度不同直接导致了进口压力和出口压力的不同, 随着温度的升高, 挤出过程中, 进口压力和出口压力越小。这是由于温度越高, 药剂的黏度降低, 会改善药剂在产品内的流动情况。

### 2.2 速度分布情况

表 3 和 4 为定压挤出工艺和定速挤出工艺在不同工艺条件下的出口速度平均值, 由表 3 和 4 可知, 对于定压挤出时, 其速度随着温度的升高逐渐增大, 在挤出过程中亦存在变化的可能; 而定速挤压过程中, 温度的提高会带来挤压压力的减小, 但对于速度的变化不明显, 有利于使产品均匀的挤出, 对产品质量的保证有一定的促进作用。



(a) 1 组

(b) 2 组

(c) 3 组

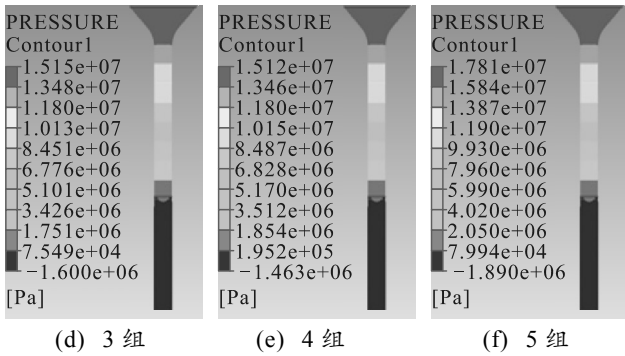


图 2 定压挤出工艺下流道内药剂的压力云图

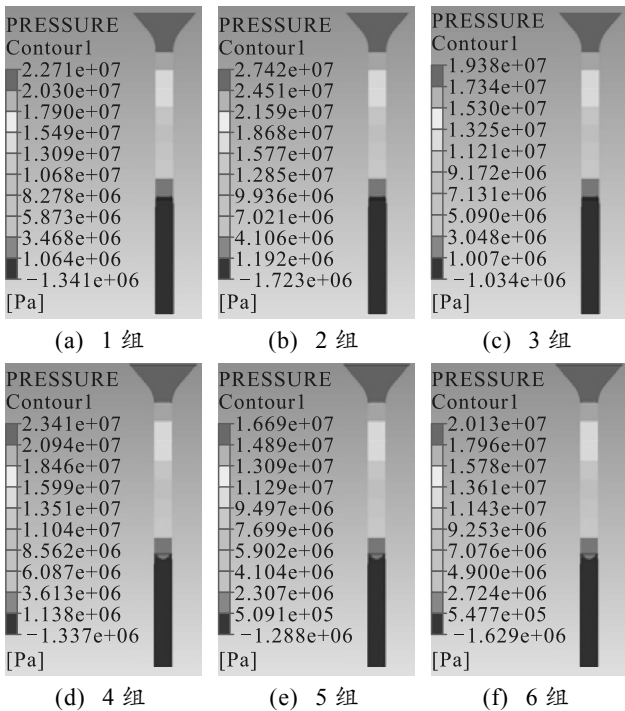


图 3 定速挤压工艺下流道内药剂的压力云图

表 3 定压挤出工艺下不同温度及压强的出口速度

组数	模具温度/℃	压强/MPa	出口速度平均值/(mm/s)
1	40	15.0	0.260 496
2	40	17.5	0.409 825
3	60	15.0	0.402 604
4	70	15.0	0.541 299
5	80	15.0	0.772 493
6	80	17.5	1.094 500

表 4 定速挤压工艺下不同温度及入口速度的出口速度

组数	模具温度/℃	入口体积流率/(m <sup>3</sup> /s)	进口平均压力/MPa	出口速度平均值/(mm/s)
1	40	5.10E-09	22.4	0.390 6
2	40	1.02E-08	26.8	0.841 4
3	60	5.10E-09	19.1	0.393 2
4	60	1.02E-08	22.9	0.847 8
5	80	5.10E-09	16.5	0.483 5
6	80	1.02E-08	19.7	0.823 1

### 2.3 膨胀率分布情况

该物料是含有高聚物的高分子材料，在挤出成型过程中，药料在流动过程中受到拉伸作用，并被

模具束缚，当离开模具口部时，会在材料本身弹性应力的作用下发生膨胀，从而导致产品与模具尺寸不一致。表 5 和 6 为定压挤出工艺和定速挤出工艺在不同工艺条件下的出口膨胀率，由下表可以看出，药柱的离模膨胀程度与挤出时的温度、压强、速度有直接关系。当温度升高时，药柱的力模膨胀率逐渐降低，这是由于温度增加后，药料的黏度逐渐降低，流动性加强，使得药柱成型的压伸压力减小，药柱挤出时的弹性效应也减少，从而导致离模膨胀度降低。同理，当面对低压力或低挤出速度时，药柱与模具的对抗性增强，模具面对药料的速度均匀性影响较大，从而使得产品离模膨胀率增大。在压力不超过 20 MPa 的情况下，产品的膨胀率 < 3% 时的适宜温度为 60~80℃，如表 5 所示。

表 5 模具在不同温度及压强下的膨胀率

组数	模具温度/℃	压强/MPa	膨胀率/%
1	40	15.0	6.980 6
2	40	17.5	4.347 6
3	60	15.0	4.882 1
4	70	15.0	3.511 9
5	80	15.0	2.177 4
6	80	17.5	0.743 9

表 6 模具在不同温度及速度下的膨胀率

组数	模具温度/℃	入口体积流率/(m <sup>3</sup> /s)	膨胀率/%
1	40	5.10E-09	5.574 2
2	40	1.02E-08	1.853 3
3	60	5.10E-09	4.604 4
4	60	1.02E-08	0.734 8
5	80	5.10E-09	4.264 9
6	80	1.02E-08	0.358 0

### 3 结论

通过使用 Polyflow 软件进行仿真模拟分析，成功以出口 4 mm 模具挤出模具，以某高聚物氟碳药剂为研究对象的挤出成型过程模型，对比了不同工艺条件下，药柱挤出过程中进口压力、药柱平均出口速度、药柱膨胀率等关键工艺参数的变化趋势。

研究结果表明：针对该高聚物氟碳药剂，温度的提升有助于降低其挤出压力和提高挤出速度，并对膨胀率的降低有正面影响。2 种不同挤出工艺，应重点考虑定速挤出，以保障产品均匀稳定的出料状态。本药柱的最佳成型工艺为：定速挤压，入口体积流率在  $5.10 \times 10^{-9} \sim 1.02 \times 10^{-9} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  之间，温度范围为 60~80℃。

### 参考文献：

[1] 韩民国, 郑建利, 朱开金, 等. 螺杆结构对一种改性双基推进剂代用料加工工艺的影响[J]. 固体火箭技术, 2011(5): 100-102, 115.

- [2] HE Z Q, ZHOU K, YIN S P. Security Analysis on Single-Screw Extrusion Process of Solid Propellant by Numerical Simulation[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 997: 605-609.
- [3] 马秀清, 金律, 张亚军, 等. 固体推进剂同向双螺杆元件混合性能模拟[J]. *中国塑料*, 2018(8): 131-136.
- [4] 侯成龙, 程玲玲, 侯景杰, 等. 挤出成型技术发展综述[J]. *精密成形工程*, 2023, 15(6): 209-221.
- [5] 雷雯. 挤出机固体输送段塑性能量耗散的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2016.
- [6] MOYSEY P A, THOMPSON M R. Modelling the solids inflow and solids conveying of single screw extruders using the discrete element method[J]. *Powder Technology*, 2005, 153(2): 95-107.
- [7] 柳天磊, 杜遥雪. 基于 POLYFLOW 的管道黏弹性流体

\*\*\*\*\*  
(上接第 22 页)

## 参考文献:

- [1] 曾声奎, MICHAELG P, 吴际. 故障预测及健康监测 (SHM) 技术的现状与发展[J]. *航空学报*, 2005, 26(5): 626-632.
- [2] 张宝珍. 国外综合诊断、预测与健康监测技术的发展及应用[J]. *计算机测量与控制*, 2008, 16(5): 591-594.
- [3] 孙旭升, 周刚, 于洋, 等. 机械设备故障预测与健康监测综述[J]. *兵工自动化*, 2016, 35(1): 30-33.
- [4] 木志高, 胡海峰, 胡葛庆, 等. 武器装备故障预测及健康管理系统设计[J]. *兵工自动化*, 2006, 25(3): 20-21.
- [5] 李杰, 朱涛, 许小斌, 等.  $\Phi 1$  米高超声速风洞自主式维修保障系统设计[J]. *计算机测量与控制*, 2016, 24(2): 126-129.
- [6] 陈宏涛, 吴勇航, 易凡. 自主式维修保障技术在 2.4 米

\*\*\*\*\*  
(上接第 29 页)

- [7] 程泽, 林富生, 靳朝, 等. 基于轻量化卷积神经网络的疲劳驾驶检测[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2022, 36(2): 142-150.
- [8] 金云峰, 路志展, 王瑞利, 等. 基于改进 YOLOv5s 的疲劳驾驶检测[J]. *北华大学学报(自然科学版)*, 2024, 25(2): 255-261.
- 流动数值模拟[J]. *五邑大学学报(自然科学版)*, 2010, 24(4): 7-11.
- [8] 王倩. 基于 POLYFLOW 的发射药挤出过程模拟[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [9] ZHOU K, HE Z Q, YIN S P, et al. Numerical simulation for exploring the effect of viscosity on single-screw extrusion process of propellant[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 84: 933-939.
- [10] 柴俊, 马忠亮. 七孔变燃速发射药挤出胀大的模拟[J]. *四川兵工学报*, 2015, 36(4): 124-126.
- [11] 张丹丹, 何卫东. 硝基胍七孔发射药挤压成型过程的数值模拟[J]. *火炸药学报*, 2015, 38(1): 82-86.
- [12] 陈肖, 孙颖, 陈亚洲. Bird-Carreau 型黏性 van der Waals 流体周期解的渐近稳定性[J]. *北京化工大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(1): 119-123.
- 跨声速风洞中的应用[C]//空气动力学学会测控技术六届六次测控学术交流会议. 惠州: 中国空气动力学学会测控专业委员会, 2015.
- [7] 宋元, 吴勇航, 翁璐, 等. 基于 InTouch 分风洞自主式维修保障系统监控软件设计[J]. *计算机测量与控制*, 2014, 23(12): 4229-4232.
- [8] 郁文山, 易凡, 蔺元臣, 等. 基于 RBR 和 PCA 的 2.4 米风洞故障诊断系统应用研究[J]. *计算机测量与控制*, 2016, 24(7): 31-34.
- [9] 张鹏, 杨兴锐, 陈龙. 基于概率神经网络的风洞设备故障预测诊断方法[J]. *兵工自动化*, 2015, 10(34): 72-75.
- [10] 陈万华, 王元兴, 王超琪, 等. 基于有限元法的风洞结构故障诊断[J]. *实验流体力学*, 2011, 4(25): 63-67.
- [11] SCHULZ K J, SPIEGEL K H. Acoustic calibration of the German Dutch Wind Tunnel anechoic quality of the DNW Test-Hall[R]. DFVLR Braunschweig, 1981.
- [9] HASANAH S A, PRAVITASARI A A, ABDULLAH A S, et al. A deep learning review of ResNet architecture for lung disease identification in CXR Image[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(24): 13111.
- [10] DU Z, XU X, BAI Z, et al. Feature fusion strategy and improved GhostNet for accurate recognition of fish feeding behavior[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 214: 108310. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108310>.