

文章编号: 1006-9941(2010)05-0583-04

变燃速发射药挤出过程中药料流动计算研究

刘林林, 马忠亮, 高可政, 萧忠良

(中北大学 化工与环境学院, 山西 太原 030051)

摘要: 为了研究连续式制备变燃速发射药过程中挤出条件对药型尺寸一致性的影响, 利用 polyflow 软件, 对不同操作条件下药料流动情况进行了三维数值模拟。通过对计算结果的处理, 讨论影响其体积流率波动的因素, 以期给实际制备中操作参数的设置提供参考。研究表明: 药料体积流率与螺杆转速成正比; 不同转速下药料体积流率高频波动值在 0.017% ~ 0.036% 之间; 药料体积流率波动值与螺杆转速波动值成正比。药料体积流率与入口压力成正比; 不同入口压力下体积流率高频波动值在 0.024% ~ 0.025% 之间; 药料体积流率波动值随着入口压力的增大而增大。螺杆转速(入口压力)越大, 药料体积流率随螺杆转速波动(入口压力波动)增大其增大幅度越大。螺杆转速波动与入口压力波动相比, 螺杆转速波动对变燃速发射药药料体积流率波动影响较大。

关键词: 流体力学; 体积流率波动; 非牛顿流体; 变燃速发射药; 数值模拟

中图分类号: TJ55; O35

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.05.023

1 引言

中心开孔双层结构的变燃速发射药是我国近期发展的一种具有高燃烧渐增性的新型发射药, 其内层为高能量层, 外层为低能量层^[1-3]。药型尺寸是研究变燃速发射药燃烧性能与内弹道性能的基础数据, 对其燃烧与内弹道过程有重要影响。而同一批次的变燃速发射药在制备过程中不可避免会出现药型尺寸的散布, 最终影响武器的射击精度^[4-7]。在制备变燃速发射药工艺中, 挤出过程是影响其药型尺寸一致性的最重要阶段。变燃速发射药连续式生产工艺是对间断式生产工艺的重大改进, 有多方面的优点, 其挤压模具如图 1 所示。

Polyflow 是模拟高分子材料流动的优秀软件, 在枪炮发射药、推进剂的挤压成型中应用广泛。本文对变燃速发射药连续化制备过程中外层药料单螺杆及其流道建立三维有限元模型, 采用机筒静止、螺杆旋转的实际运转条件, 在不同操作条件下进行三维等温流场数值模拟。分别改变螺杆转速和入口压力, 计算出外层药料流道内的速度场、压力场、剪切速率场、粘度场和体积流率等物理量。因在挤压过程中通过智能操作

可以对各种操作条件进行精确控制, 故对药料在流道内流动的计算结果可以为现有生产工艺参数的改进提供直接参考。

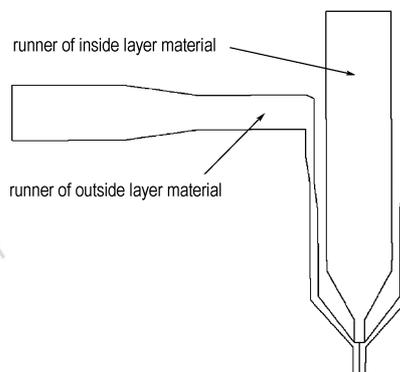


图 1 变燃速发射药连续式挤压模具流道示意图

Fig.1 Sketch map of continuous extrusion mould producing the variable-burning rate propellant

2 物理模型

对变燃速发射药外层药料全流道进行建模, 在螺棱与机筒间划定边界层, 并且适当地加密网格, 为了减小入口边界条件对计算精度的影响, 在入口处对流道多建 10 mm。为了克服因螺杆旋转而带来网格划分的困难, 使用了批 polyflow 软件包提供的网格叠加技术 MST 来生成有限元网格, 大大减少了网格处理的工作量, 流道全部用六面体来划分网格。螺杆利用四面

收稿日期: 2010-01-21; 修回日期: 2010-03-26

基金项目: 火炸药青年创新基金(40406010301)

作者简介: 刘林林(1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为发射药加工成型技术研究。e-mail: viola7788521@yahoo.com.cn

体来划分网格, 并利用自适应网格技术。如图 2 所示。

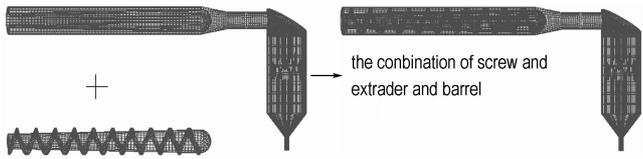


图 2 螺杆与流道计算域网格划分
Fig. 2 The finite element meshing in the computational domains

3 基本假设

- (1) 药料溶剂为不可压缩高黏性流体。
- (2) 流动为等温拟稳态流动, 流道全充满。
- (3) 惯性力和质量力相对于黏性力很小, 可忽略不计。

4 数学模型

描述流场的基本微分方程由连续性方程、动量方程、本构方程所组成^[8]。其表达式为:

$$\begin{cases} \nabla \cdot u = 0 \\ -\nabla p + \nabla \cdot \tau = 0 \\ \tau = 2\eta(\dot{\gamma}) D \end{cases}$$

式中, u 为速度向量, p 为压强, τ 为应力张量, $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, D 为形变速率张量。

本试验中药料选择棉溶比为 1/1.35 的外层药料为挤出物, 该药料的流变实验数据如图 3 所示。利用 polyflow 软件中的 polyfuse 模块选择 Bird-carreau law 模型对流变数据进行拟合, 拟合结果如表 1 所示。

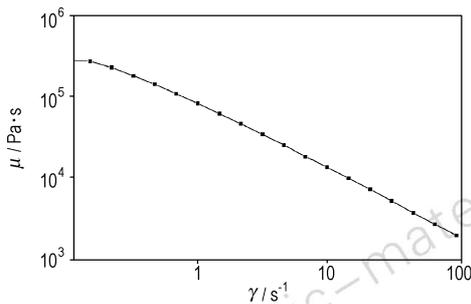


图 3 外层药料流变曲线
Fig. 3 The steady viscosity of the outside layer of propellant

表 1 药料流变数据拟合结果

Table 1 The fitting results of propellant with Bird-carreau model

zero-shear viscosity/Pa·s	infinite-shear viscosity/Pa·s	time constant /s	non-newtonian index
3.049449E5	3.502966E-4	4.894259	0.1871434

5 边界条件及算法

对于确定的药料挤出设备来说, 影响药料体积流率波动的因素主要有螺杆转速、流道入口压力等^[9]。本实验选定螺杆转速、流道入口压力为研究对象。以螺杆转速为 30 r·min⁻¹、入口压力为 0.5 MPa 为参考操作边界条件。在研究螺杆转速因素时, 选择 10, 20, 30, 40, 50 r·min⁻¹ 五组螺杆转速作为研究对象。在研究入口压力因素时, 选择 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 MPa 为研究对象。所有壁面和螺杆处皆采用无滑移边界, 出口为充分发展流动。在计算中速度采用 Mini-element 差值, 压力采用线性差值, 粘度采用 Picard 差值, 用隐式欧拉法。利用 polyflow 软件计算基本微分方程, 螺杆每转过 60° 时输出一个计算结果, 计算每种情况时螺杆都将转过 360°, 计算收敛精度为 10⁻³。

6 结果与讨论

6.1 螺杆转速对体积流率波动的影响

根据计算结果, 对每种情况下六个不同时刻的瞬时体积流率(单位时间内药料体积流量)进行处理。螺杆转速对体积流率波动的影响情况如图 4~图 6 所示。

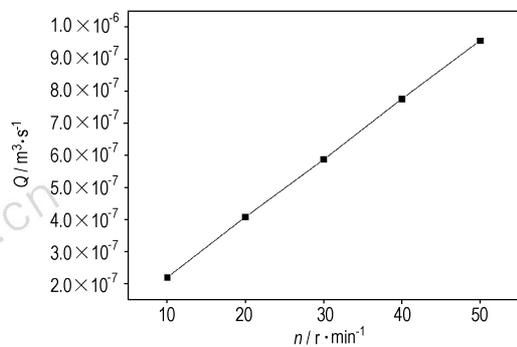


图 4 体积流率与螺杆转速关系
Fig. 4 Curve of volume flow rate vs screw velocity

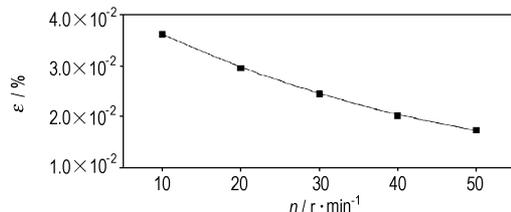


图 5 体积流率高频波动与螺杆转速关系
Fig. 5 Curve of high frequency fluctuation values of volume flow rate vs screw velocity

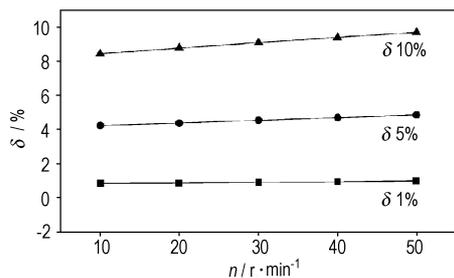


图6 体积流率波动率与螺杆转速关系

Fig. 6 Curves of fluctuation rate of volume flow rate vs screw velocity

从图4中可以看出,随着螺杆转速的增加,药料的体积流率也随之增大。可以解释为随着螺杆转速的增加药料受到的剪切速率增大,药料粘度减小,拖曳流增加幅度大于逆流和漏流之和的增加幅度。而且在所模拟的转速范围内,药料体积流率与螺杆转速基本成正比。从图5中可以看出,不同螺杆转速下药料体积流率高频波动值基本上在0.017%~0.036%的范围之间,该波动值较小且频率较高,因此体积流率高频波动对变燃速发射药药型尺寸的影响可以不予考虑。从图6中可以看出,在转速一定的情况下,当螺杆转速波动较小时,随着螺杆转速的增加,药料体积流率波动值基本不变;当螺杆转速波动较大时,随着螺杆转速的增加,药料体积流率波动值也在逐渐变大;转速越大,药料体积流率波动值随转速波动增大其增大幅度也越大。所以,螺杆转速波动对于药料体积流率波动有较大的影响,其为影响药型尺寸一致性的重要因素,在挤压成型时应尽量减小螺杆转速的波动。

6.2 入口压力对体积流率波动的影响

根据计算结果,对每种情况下五种不同时刻的瞬时体积流率进行处理。入口压力对体积流率波动的影响情况如图7~图9所示。

从图7中可以看出,随着入口压力增大,药料体积流率随之增大。并且在所模拟的入口压力范围内,药料体积流率与入口压力成正比。从图8中可以看出,不同入口压力条件下体积流率高频波动值基本上在0.024%~0.025%的之间,如同螺杆转速波动下的高频波动值一样对于药料体积流率的高频波动影响可忽略不计。从图9中可以看出,在入口压力波动一定的情况下,随着入口压力的增大,药料体积流率波动率也在增大。入口压力波动分别为1%,5%,10%时,药料体积流率波动随着入口压力的增加其变化规律又有所不同:入口压力波动较大时,药料体积流率波动曲线

斜率较大,即在较高的入口压力波动的情况下体积流率波动对入口压力较敏感;当入口压力波动较小时,药料体积流率波动对入口压力较不敏感。可见药料在成型时如果入口压力较小时,较大的入口压力波动在药料成型时也是可以接受的;当入口压力较大时,在药料成型时应尽量减小入口压力的波动。

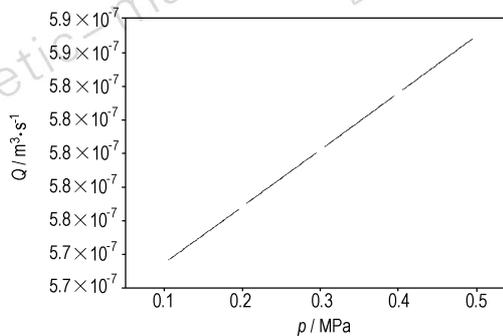


图7 体积流率与入口压力关系

Fig. 7 Curve of volume flow rate vs entrance pressure

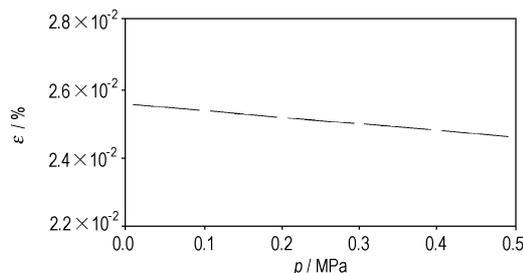


图8 体积流率高频波动与入口压力关系

Fig. 8 Curve of high frequency fluctuation values of volume flow rate vs entrance pressure

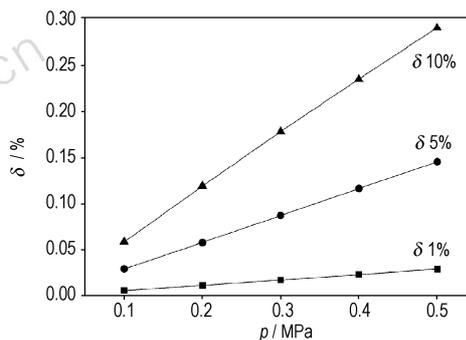


图9 体积流率波动率与入口压力关系

Fig. 9 Curves of fluctuation rate of volume flow rate vs entrance pressure

7 结论

(1) 药料体积流率与螺杆转速成正比;不同转速下高频波动值在0.017%~0.036%之间;随着螺杆转速波动的增大,药料体积流率波动也随着增大,且两

者基本上成正比关系。

(2) 药料体积流率与入口压力成正比; 不同入口压力下高频波动值在 0.024% ~ 0.025% 之间; 药料体积流率波动值随着入口压力的增加而增加。

(3) 螺杆转速越大, 药料体积流率随螺杆转速波动的增大其增大幅度越大; 入口压力越大, 药料体积流率随入口压力波动的增大其增大幅度越大。

(4) 在所模拟的范围内, 螺杆转速波动所引起的药料体积流率波动率远大于入口压力波动, 因此在实际操作中应更加重视螺杆转速波动因素。

参考文献:

- [1] 肖忠良, 吴晓青, 马忠亮, 等. 一种变燃速固体发射药: CN 01101011629 [P]. 2001(5).
XIAO Zhong-liang, WU Xiao-qing, MA Zhong-liang, et al. A kind of variable-burning rate gun propellant: CN 01101011629 [P]. 2001(5).
- [2] 贺增弟, 刘幼平, 马忠亮, 等. 变燃速发射药燃烧性能[J]. 火炸药学报, 2004, 27(3): 10-12.
HE Zeng-di, LIU You-ping, MA Zhong-liang, et al. Combustion property of variable-burning rate gun propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2004, 27(3): 10-12.
- [3] 贺增弟, 刘幼平, 马忠亮, 等. 变燃速发射药低温感性能[J]. 火炸药学报, 2006, 29(1): 65-68.
HE Zeng-di, LIU You-ping, MA Zhong-liang, et al. Low temperature sensitivity of variable-burning rate gun propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2006, 29(1): 65-68.
- [4] 马忠亮, 李志良, 徐方亮, 等. 药型尺寸对变燃速发射药燃烧渐增性的影响[J]. 含能材料, 2007, 15(2): 128-130.
MA Zhong-liang, LI Zhi-liang, XU Fang-liang, et al. Effect of grain size on progressive combustion of the variable burning rate propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(2): 128-130.
- [5] 张丽华, 马忠亮, 刘幼平, 等. 几何尺寸对管状变燃速发射药燃烧性能的影响[J]. 火炸药学报, 2007, 30(2): 13-16.
ZHANG Li-hua, MA Zhong-liang, LIU You-ping, et al. Effects of physical dimension on combustion performance of tubular variable-burning-rate gun propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2007, 30(2): 13-16.
- [6] 朱开金. 变燃速发射药内弹道问题研究 [D]. 太原: 中北大学, 2009.
ZHU Kai-jin. The study on some questions of interior ballistics about variable-burning rate gun propellant [D]. Taiyuan: North University of China, 2009.
- [7] 萧忠良, 贺增弟, 刘幼平, 等. 变燃速发射药的原理与实现方法 [J]. 火炸药学报, 2005, 28(1): 25-27.
XIAO Zhong-liang, HE Zeng-di, LIU You-ping, et al. Principle and realizable approach of variable-burning rate propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2005, 28(1): 25-27.
- [8] 陈晋南. 传递过程原理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
CHEN Jin-nan. The Principle of Transport Process [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [9] 朱复华. 挤出理论及应用 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2001: 222-225.
ZHU Fu-hua. Extrusion Theory and Application [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2001: 222-225.

Computational Study of Flow for Outside Layer of Variable-burning Rate Propellant During Extrusion

LIU Lin-lin, MA Zhong-liang, GAO Ke-zheng, XIAO Zhong-liang

(North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to study the factors affecting the conformity of the type and size of the variable-burning rate propellant and provide a reference to the actual operation for setting the appropriate parameter, three-dimensional flows of variable-burning rate propellant solution in the screw were simulated using the polyflow software under different operating conditions. Simulation results show that the volume flow rate of outside layer is directly proportional to the screw velocity. When the screw velocity is different, the high frequency fluctuation values of the volume flow rate are 0.017% - 0.036%. The fluctuation values of the volume flow rate are directly proportional to the fluctuation values of the screw velocity. The volume flow rate of the outside layer is directly proportional to the entrance pressure. When the entrance pressure is different, the high frequency fluctuation values of the volume flow rate are 0.024% - 0.025%. When the screw velocity is higher, the fluctuation values of the volume flow rate rapidly increase with the increasing of the fluctuation values of the screw velocity. When the entrance pressure is higher, the fluctuation values of the volume flow rate rapidly increase with the increasing of the fluctuation value of entrance pressure. The fluctuation values of the screw velocity affect the volume flow rate of variable-burning rate propellant more largely than the fluctuation values of the entrance pressure.

Key words: hydromechanics; fluctuation of volume flow rate; non-Newtonian fluid; variable-burning rate propellant; numerical simulation

CLC number: TJ55; O35

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.05.023