

文章编号: 1006-9941(2011)04-0445-05

影响变燃速发射药尺寸波动因素数值计算

马忠亮¹, 朱林², 高可政¹, 肖忠良¹

(1. 中北大学化工与环境学院, 山西太原 030051; 2. 泸州北方化学工业有限公司, 四川泸州 64600)

摘要: 为了探索连续化生产工艺中变燃速发射药尺寸波动的影响因素, 选择硝化棉与溶剂的体积比为 1/1.35 和 1/1.50 的单基药物料为挤出物, 采用 Bird-carreaulaw 模型对不同操作条件下挤出物共挤段流动情况进行了数值模拟。研究表明: 螺杆转速波动对变燃速发射药尺寸精度影响比入口压力大, 主要体现在对交界面半径的影响上; 入口压力波动对变燃速发射药尺寸精度有所影响, 特别在 20:30 的螺杆转速组合下对变燃速发射药尺寸波动影响较大; 减小芯料和皮料入口压力波动、适当提高芯料入口压力、减少芯料溶剂量及增加皮料溶剂量都有利于提高变燃速发射药尺寸精度。

关键词: 流体力学; 非牛顿流体; 变燃速发射药; 尺寸波动; 数值模拟

中图分类号: TJ55; O35

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.04.021

1 引言

中心开孔式双层结构的变燃速发射药以其原料来源广泛、能量密度大、燃烧渐增性强以及具有低温感效应等优点而成为一种发展潜力巨大的新型发射药^[1-2]。目前, 制备变燃速发射药的方法主要有间断式和连续式两种。其中, 间断式制备方法应用较早、发展相对成熟, 已在实际生产中积累了大量的工程化经验。与间断式制备方法相比, 连续式制备方法生产效率高、用料节约, 使之成为变燃速发射药制备工艺的改进方向与目标。大量研究表明: 药型尺寸对变燃速发射药的燃烧与内弹道过程有着较大影响, 只有保持其药型尺寸的一致性才能较好地体现出变燃速发射药良好的燃烧规律, 同时保证内弹道性能的稳定^[3-5]。现有变燃速发射药连续化成型工艺生产出的变燃速发射药尺寸波动较大, 其主要原因是由于对药料在流道中的流动规律认识不足而导致生产过程中的操作参数设置不合理造成的。本研究在前期工作的基础上^[6], 利用数值计算方法对变燃速发射药连续化加工过程的全流道建立三维有限元模型, 并进行三维等温流场数值模拟。对不同操作条件(主要是螺杆转速、入口压力)及不同挤出物下求解出全流道的速度场、压力场、剪切速率场、粘度场和药型尺寸等相

关物理量, 用以探索影响变燃速发射药药型尺寸波动因素。由于在变燃速发射药连续化制备过程中可对各操作条件进行有效精确的控制, 故本研究可对于变燃速发射药精密挤出成型工艺操作条件的选择起到指导作用, 具有较强的现实意义。

2 数值模拟

2.1 物理模型

对变燃速发射药全流道进行建模, 图 1 是完整的计算模型, 图 2 为共挤段放大图, 轴心位置上的圆柱体为芯料的计算区域, 其余部分是皮料的计算区域。建模时内孔的起始半径为 0.15 mm, 芯料的起始半径为 3.25 mm, 皮料的起始半径为 4 mm。为了保证计算精度, 在皮料与芯料之间的边界处划定边界层, 并且适当地加密网格, 在计算时利用网格自适应技术^[7]。

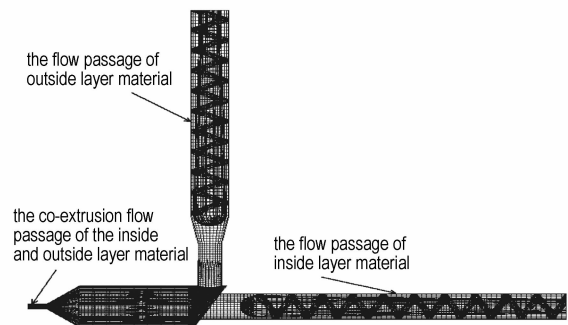


图 1 完整的计算区域网格划分

Fig. 1 The whole grids of computational domain

收稿日期: 2010-08-03; 修回日期: 2010-09-27

基金项目: 火炸药产品创新基金项目(4040601050)

作者简介: 马忠亮(1967-), 男, 教授, 博士, 主要从事新型发射药工艺及装药研究。e-mail: ma19960512@sohu.com

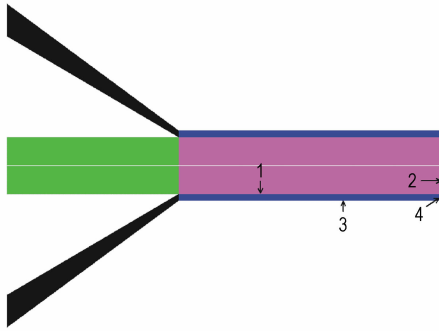


图2 共挤段边界

1—皮芯料层间界面, 2—芯料出口边界, 3—皮料自由边界, 4—皮料出口边界

Fig.2 The combination of co-extrusion process

1—the interface between outside and inside layer materials, 2—the exit boundary of inside layer materials, 3—the free boundary of inside layer materials, 4—the exit boundary of outside layer materials

2.2 数学模型

假设芯、皮料溶体均为不可压缩高粘性流体, 流动为等温拟稳态流动, 流道全充满。且由于芯料溶体具有高粘性, 其惯性力和质量力相对于黏性力很小可忽略不计。因此, 描述流场的基本微分方程简化为:

$$\text{连续性方程 } \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\text{动量方程 } -\nabla p + \nabla \tau = 0 \quad (2)$$

$$\text{本构方程 } \tau = 2\eta(\dot{\gamma})D \quad (3)$$

式中, \mathbf{v} 为速度向量, $m \cdot s^{-1}$; p 为压强, Pa ; τ 为应力张量; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} ; D 为形变速率张量; ∇ 为哈密尔顿算符; η 为粘度函数。

本研究中分别选择硝化棉与溶剂的体积比为 1/1.35 (B1)、1/1.50 (B2) 的单基药物料为挤出物, 其流变实验数据见图 3。

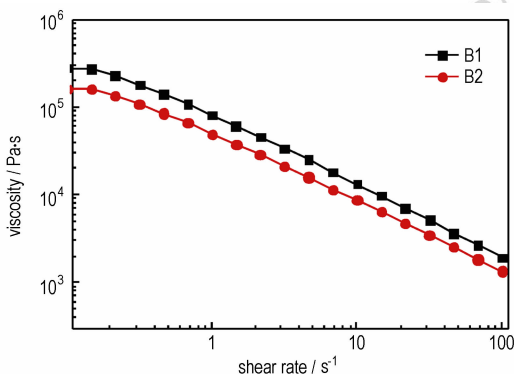


图3 两种发射药流变曲线

Fig.3 Rheological curves of two kinds of single-based propellants

选择 Bird-carreau law 模型^[7-8] 对流变数据进行拟合, 拟合结果见表 1。

表1 芯料流变数据拟合结果

Table 1 Fitting results of rheological data

materials	zero shear viscosity $\eta_0 / Pa \cdot s$	infinite shear viscosity $\eta_\infty / Pa \cdot s$	time constant λ / s	non-Newton index n
B1	3.0494E5	3.5030E-4	4.8943	0.1871
B2	1.7884E5	2.7937E-4	4.8956	0.2145

2.3 边界条件及算法

选取螺杆转速、入口压力、不同药料为研究对象, 通过模拟确定它们对变燃速发射药尺寸波动影响情况。芯、皮螺杆都以转速为 $30 r \cdot \min^{-1}$ 、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, 分别选择 $10, 20, 30, 40, 50 r \cdot \min^{-1}$ 五组螺杆转速作为研究对象。在研究入口压力因素时, 选择 $0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 MPa$ 为研究对象。

在设定边界条件时芯、皮料共挤段的边界条件最为重要, 其边界如图 2 所示, 边界条件为: 边界 1 是皮料与芯料的层间界面, 与芯料螺杆流道相连; 边界 2 是芯料的出口, 设定为充分发展流动; 边界 3 与皮料螺杆流道相连, 固体壁面和螺杆处采用无滑移边界; 边界 4 为皮料出口, 也设定为充分发展流动。

在计算中速度采用平方差值, 压力采用线性差值, 粘度采用 Picard 差值。利用 Spines 网格重置技术, 计算收敛精度为 10^{-3} 。芯料选择棉溶比为 1/1.35 (B1) 的单基药为挤出物, 皮料选择棉溶比为 1/1.50 (B2) 的单基药为挤出物, 利用 POLYFLOW 软件计算本构方程 (1) ~ (3), 计算收敛精度为 10^{-3} 。

3 结果与讨论

3.1 螺杆转速对变燃速发射药尺寸波动的影响

螺杆转速(外层物料螺杆与内芯物料螺杆的转速)对变燃速发射药尺寸波动的影响如图 4 ~ 图 6 所示。

由图 4 可知, 随着芯料螺杆转速波动的变大, 变燃速发射药交界面半径的波动值随之变大。当芯料螺杆转速波动 1% 时, 变燃速发射药交界面半径波动由低转速组合下的 0.16% 降低到高转速组合下的 0.12%; 当芯料螺杆转速波动 5% 时, 变燃速发射药交界面半径波动由低转速组合下的 0.78% 降低到高转速组合下的 0.56%; 当芯料螺杆转速波动 10% 时, 变燃速发射药交界面半径波动由低转速组合下的 1.5% 降低到高转速组合下的

1.1%。这说明变燃速发射药交界面半径在高转速组合下受螺杆转速波动影响较小。这是因为在高转速组合下芯、皮料螺杆的建压能力、产生的最大压力都比低转速组合大,从而使药料得到充分的压实,当药料进入共挤段时,药料的压力势能增加,在较大压力场中螺杆转速波动的影响就被削弱了;同时,在高转速组合下芯、皮料在共挤段的流动速率比低转速组合条件下大,在共挤段处经历的时间较短,由于变燃速发射药高分子链柔性较差。因此高转速组合较低转速组合波动小,且芯料螺杆转速波动越大高转速组合的波动下降越明显。

由图 5 可知,当螺杆转速波动值为 0% 时,从低转速组合到高转速组合,外半径波动基本为定值 0.02%,孔半径波动为 0.15%,交界面半径值在 1.1% ~ 1.5% 之间波动。可见螺杆转速波动较小时对外半径、孔半径的波动影响较小,这是由于成型针及口模对药料流动的限制;但交界面半径波动较大,是因为交界面没有外加限制而主要取决于物料的流变性质,其半径必然受螺杆转速波动影响较大。而图 6 则说明了皮料螺杆转速波动较芯料螺杆转速波动对交界面半径尺寸波动影响较大,故在实际生产中应关注皮料螺杆转速的波动情况。

3.2 入口压力对变燃速发射药尺寸波动的影响

芯料、皮料入口压力对变燃速发射药尺寸波动的影响情况如图 7 ~ 图 9 所示。

由图 7 可知,随着入口压力波动的增加,交界面半径波动值也随之增加,尤其在螺杆转速组合为 20 : 30 时交界面半径波动值最大,并且随着入口压力波动的增大,这一现象就越明显。比较图 4 与图 7,在螺杆转速与入口压力相同波动值时,螺杆转速波动所引起的交界面尺寸波动值是入口压力波动的 100 倍。故螺杆转速是影响交界面半径波动的主要因素。

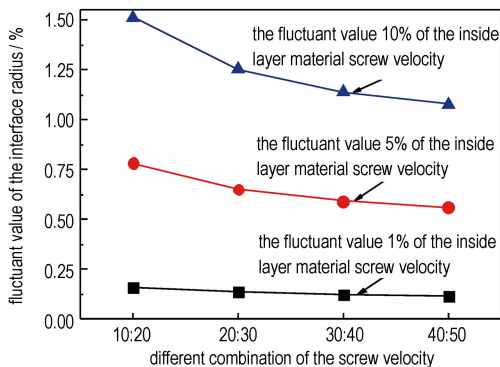


图 4 芯料螺杆转速波动对交界面半径波动影响程度
Fig. 4 Curves of inside layer materials screw velocity fluctuation vs interface radius fluctuation

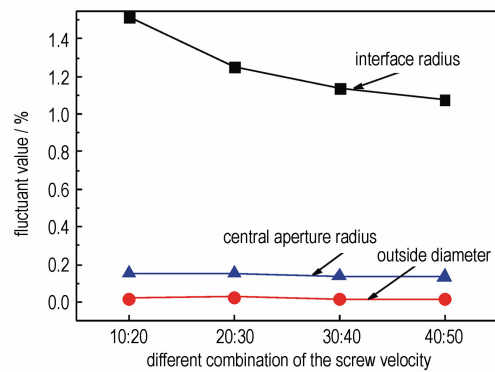


图 5 螺杆转速组合与交界面半径、中心孔径、外径关系曲线
Fig. 5 curves of screw velocity combination vs the fluctuant value of interface radius, the central aperture radius and outside diameter

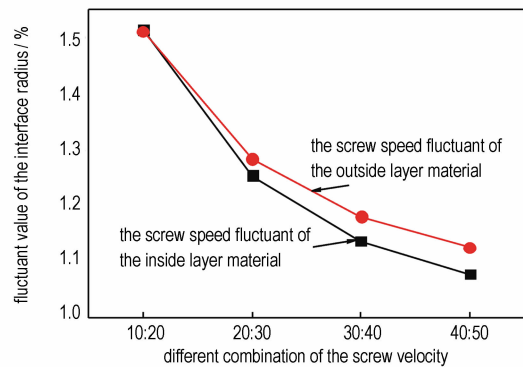


图 6 螺杆转速波动对交界面半径波动影响程度
Fig. 6 Curves of screw velocity fluctuation vs interface radius fluctuation

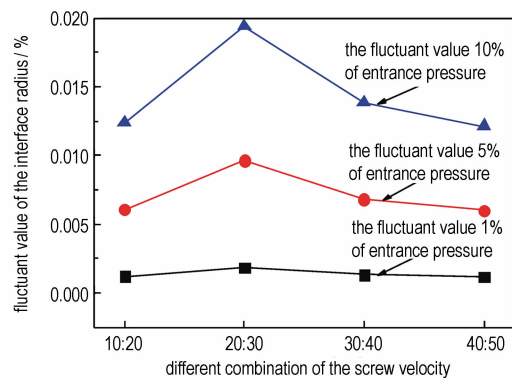


图 7 芯料入口压力波动对交界面半径波动影响程度
Fig. 7 Curves of inside layer materials entrance pressure fluctuation vs interface radius fluctuation

从图 8 可以看出,入口压力波动 10% 时,对中心孔径、药柱外径的波动影响较小,而对于内、皮料交界面半径波动影响较大。从图 9 可以得到,芯、皮料入口压力波动 10% 时,芯料对交界面半径的波动影响大于皮料引起的波动。

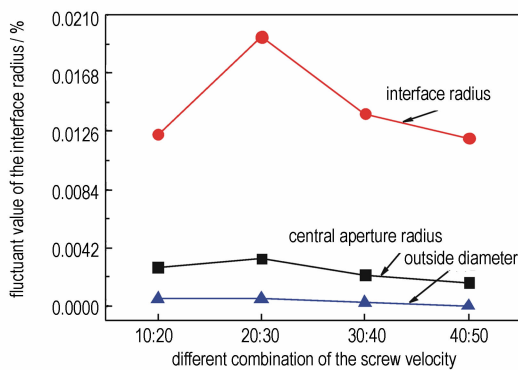


图 8 入口压力波动 10% 药型尺寸变化曲线

Fig. 8 Curves of grain size under entrance pressure fluctuation 10%

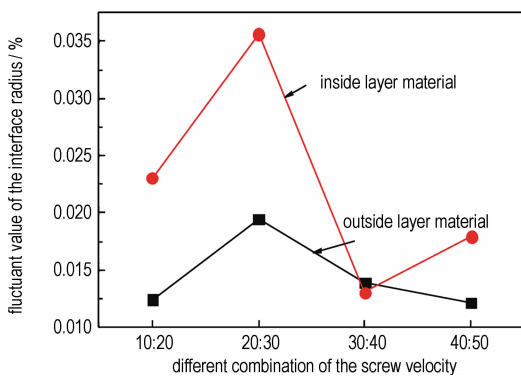


图 9 入口压力波动 10% 交界面半径波动曲线

Fig. 9 Curves of interface radius fluctuation under entrance pressure fluctuation of 10%

3.3 药料流变性对变燃速发射药尺寸波动的影响

芯、皮料采用不同流变性质药料时,即选择硝化棉与溶剂的体积比分别为 1/1.35 (B1)、1/1.50 (B2) 的单基药物料,在芯、皮料螺杆转速波动 5% 的条件下,变燃速发射药药型尺寸波动的影响情况如图 10、图 11 所示。

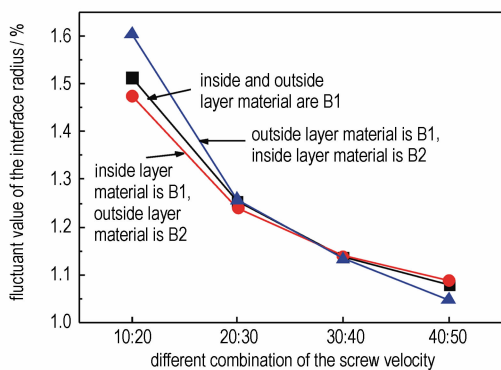


图 10 芯料螺杆转速波动对交界面半径波动影响程度

Fig. 10 Curves of inside layer materials screw velocity fluctuation vs interface radius fluctuation

由图 10 可知,在芯料螺杆转速波动、在低螺杆转速组合下,以 B2 药为皮料、以 B1 药为芯料的变燃速发射药尺寸波动情况较以 B1 药为皮料、以 B2 药为芯料的变燃速发射药尺寸波动较小。而在高螺杆转速组合下,情况与之相反。图 11 说明了在皮料螺杆转速波动、在整个螺杆转速组合下,以 B2 药为皮料、以 B1 药为芯料的变燃速发射药尺寸波动情况较以 B1 药为皮料、以 B2 药为芯料的变燃速发射药尺寸波动较小。

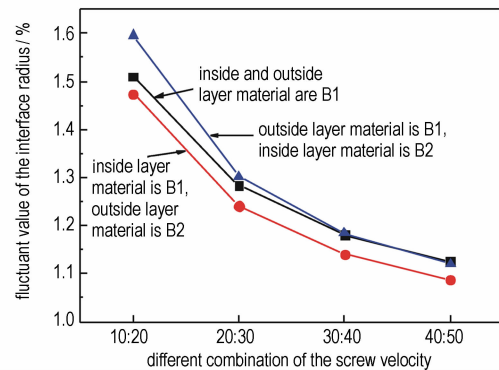


图 11 皮料螺杆转速波动对交界面半径波动影响程度

Fig. 11 Curves of outside layer materials screw velocity fluctuation vs interface radius fluctuation

4 结论

(1) 螺杆转速波动与入口压力波动相比,对变燃速发射药尺寸精度影响大,主要体现在对交界面半径影响上;皮料螺杆转速波动对变燃速发射药尺寸精度影响较芯料螺杆转速波动大。

(2) 入口压力波动对变燃速发射药尺寸精度有所影响,螺杆转速组合为 20:30 时尺寸波动最大,应尽量避开该组合。减小芯料入口压力波动、降低皮料入口压力适当提高芯料入口压力有利于提高变燃速发射药尺寸精度。

(3) 芯料选择溶剂含量较小的药料、皮料选择溶剂含量较大的药料有利于提高变燃速发射药尺寸精度。

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] 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.
- [4] 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.
- [5] 刘林林,马忠亮,萧忠良. 变燃速发射药膛内燃烧与内弹道过程研究[J]. 兵工学报,2010,31(4): 409-413.
LIU Lin-lin, MA Zhong-liang, XIAO Zhong-liang. Research on the actual combustion and interior ballistics process of the variable-burning rate propellant in cannon[J]. *Acta Armamentarii*,2010,31(4): 409-413.
- [6] 高可政,马忠亮,萧忠良. 变燃速发射药芯料体积流率波动值的数值模拟[J]. 火炸药学报,2010,33(1): 71-74.
GAO Ke-zheng, MA Zhong-liang, XIAO Zhong-liang. Numerical simulation on fluctuation value of volume flow rate for the inside layer of the variable-burning rate propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*,2010,33(1): 71-74.
- [7] 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.
- [8] 吴其晔. 高分子材料流变学[M]. 北京: 高等教育出版社,2002.
WU Qi-ye. *The Rheology of Macromolecule Material*[M]. Beijing: Higher Education Press,2002.

Numerical Calculation on the Fluctuation Factors of Grain Size for Variable-burning Rate Propellant

MA Zhong-liang¹, ZHU Lin², GAO Ke-zheng¹, XIAO Zhong-liang¹

(1. School of Chemical Engineering and Environment, Institute North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Luzhou North Chemical Industrial Co. Ltd., Luzhou 646003, China)

Abstract: In order to explore the factors affecting the size fluctuation for the variable-burning rate propellant in the co-extension process, numerical simulation method was used to simulate the flow under different operating conditions. Results show that the screw velocity fluctuation has more influence than the entrance pressure fluctuation on the size fluctuation of the variable-burning rate propellant, especially have an influence on the interface radius. The entrance pressure fluctuations have an impact on the size fluctuation of the variable-burning rate propellant, especially when the screw velocity combination is 20 : 30. The decrease of the entrance pressure fluctuation of the inside layer and outside layer materials, and increase of the entrance pressure of the inside layer materials properly, and reducing the solvent content of the inside layer materials and enhance the solvent content of the outside layer materials will be helpful to improve the precision of grain size for the variable-burning rate propellant.

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

CLC number: TJ55; O35

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.04.021