文章编号：1000-5773(2012)01-0102-05

变燃速发射药两相流内弹道模型及数值模拟*

马忠亮，刘林林，萧忠良

（中北大学化工与环境学院，山西太原　030051）

摘要：为了更好地描述变燃速发射药的膛内燃烧及内弹道过程，对中心开孔式双层结构的变燃速发射药建立了一维两相流内弹道数学模型，在∅30 mm 火炮装填条件下采用二阶精度的 Lax-Wendroff 差分格式进行计算，得到了数值解。计算结果表明：膛内压力和炮口初速度变化曲线的计算值与实测值符合较好，说明此两相流内弹道模型可以准确地反映变燃速发射药的内弹道过程；变燃速发射药可以有效地减少膛内压力波的产生，对于安全射击具有重要意义。通过对气、固相速度及膛内压力波等计算参数进行分析，可以对变燃速发射药的内弹道过程研究起指导作用。

关键词：内弹道；两相流；变燃速发射药；数值模拟

中图分类号：O359.1；TJ012.1　　**文献标识码**：A

1　引　言

以固体发射药作为能源推动弹丸运动的内弹道过程是一个典型的高温高压气、固两相流动过程。两相流内弹道理论的出现与发展从根本上解决了一些经典内弹道理论无法解决的问题（如高膛压火炮压力波异常等），从而成为当前内弹道学发展的重要方向[1-3]。中心开孔式双层结构的变燃速发射药是我国近期发展的一种高能、高渐增性装药，外层为低能低燃速层，内层为高能高燃速层。这种装药可以在最大膛压不变的条件下，使炮口初速度提高 5％以上，同时它还具有低易损性和低温感等良好性能[4-5]。虽然变燃速发射药在制造工艺及实验测试方面已比较成熟，但到目前为止，对于变燃速发射药内弹道过程的理论研究还处于经典内弹道理论阶段，在两相流内弹道方面还处于空白阶段。本研究针对变燃速发射药的药型和燃烧特点，建立一维两相流内弹道模型，在∅30 mm 火炮装填条件下利用此模型进行计算，获得数值解，以期为变燃速发射药装药设计与内弹道理论研究提供参考。

2　变燃速发射药的药型函数

2.1　变燃速发射药的燃烧过程

变燃速发射药中心开孔，外层为含有阻燃剂的慢燃层，内层为增加了能量组分的快燃层，如图 1 所示。这种结构兼顾了对装药的高能量、高渐增性要求，同时在生产工艺上也易于实现。

由于变燃速发射药具有特殊的几何形状，因此其燃烧过程也有别于一般发射药。为了既能准确地

* **收稿日期**：2010-07-09；**修回日期**：2010-09-21

基金项目：火炸药青年创新基金(40406010301)

作者简介：马忠亮(1967－)，男，教授，博士生导师，主要从事含能材料工艺及性能研究.
E-mail：ma19960512@sohu.com

通讯作者：刘林林(1984－)，男，硕士研究生，主要从事发射药燃烧与内弹道过程研究.
E-mail：viola7788521@yahoo.com.cn

描述其燃烧过程,又使所建模型简单、易于求解,通常将燃烧过程分为两个阶段:第 1 阶段为内、外层同时燃烧阶段,因外层较薄,故在很短时间内燃烧完毕;第 2 阶段为内层单独燃烧阶段,可以将其视为管状药燃烧。

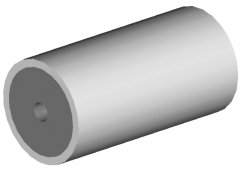


图 1　变燃速发射药结构

Fig. 1　Structure of the variable burning-rate propellant

2.2　药型函数

运用几何燃烧定律,分别对燃烧第 1 阶段的外层药和内层药、燃烧第 2 阶段的内层药求药型函数。

$$\text{第 1 阶段:}\quad \begin{cases}\varphi_{\mathrm{l}} = \chi_{\mathrm{l}} z_{\mathrm{l}}(1+\lambda_{\mathrm{l}} z_{\mathrm{l}} + \mu_{\mathrm{l}} z_{\mathrm{l}}^2)\\ \varphi_{\mathrm{h}} = \chi_{\mathrm{h}} z_{\mathrm{h}}(1+\lambda_{\mathrm{h}} z_{\mathrm{h}} + \mu_{\mathrm{h}} z_{\mathrm{h}}^2)\end{cases} \qquad z_{\mathrm{l}} < 1 \tag{1}$$

$$\text{第 2 阶段:}\quad \varphi'_{\mathrm{h}} = \chi'_{\mathrm{h}} z'_{\mathrm{h}}(1+\lambda'_{\mathrm{h}} z'_{\mathrm{h}} + \mu'_{\mathrm{h}} z'^{2}_{\mathrm{h}}) \qquad z_{\mathrm{l}} = 1,\ z'_{\mathrm{h}} \leqslant 1 \tag{2}$$

式中:φ_{l}、z_{l} 分别为变燃速发射药外层的燃烧百分数和相对厚度,χ_{l}、λ_{l}、μ_{l} 为变燃速发射药外层的药型系数,φ_{h}、z_{h} 分别为第 1 阶段变燃速发射药内层的燃烧百分数和相对厚度,χ_{h}、λ_{h}、μ_{h} 为第 1 阶段变燃速发射药内层的药型系数,φ'_{h}、z'_{h} 分别为第 2 阶段变燃速发射药的燃烧百分数和相对厚度;χ'_{h}、λ'_{h}、μ'_{h} 为第 2 阶段变燃速发射药的药型系数。

3　两相流内弹道模型

3.1　基本假设

建立变燃速发射药两相流内弹道模型时,作如下基本假设:

(1) 将变燃速发射药颗粒作为一种具有连续介质的流体来处理;

(2) 膛内运动为准一维两相流动,考虑药室截面积变化;

(3) 将点火源作为主装药的外界输入“源”函数,在几何空间上不占用特定位置;

(4) 变燃速发射药颗粒的形状、尺寸严格一致,服从几何燃烧定律;

(5) 变燃速发射药颗粒具有不可压缩性,即具有固定的密度,且内、外层密度相同。

(6) 燃烧分为两个阶段,第 1 阶段内、外层同时燃烧,第 2 阶段内层燃烧,不同阶段的基本方程不同,除形状函数外其它辅助方程相同;

(7) 燃烧时,认为内、外层分别为独立燃烧个体,具有不同的燃速系数和燃速指数,涉及气相空隙率、相间阻力等参数时变燃速发射药颗粒均按整体对待。

(8) 内、外层燃气组分相同,具有相同的理化参数和气相运动速度。

3.2　基本方程

两相流内弹道方程组的基本方程由气相连续方程、气相动量方程、气相能量方程、固相连续方程、固相动量方程这 5 个方程组成,可写为守恒型向量形式

$$\frac{\partial \boldsymbol{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial \boldsymbol{F}_i}{\partial x} = \boldsymbol{H}_i \tag{3}$$

式中:$i=1,2$。$i=1$ 时对应燃烧的第 1 阶段,$i=2$ 时对应燃烧的第 2 阶段。

对于燃烧的第 1 阶段,除了要考虑变燃速发射药的燃烧,还要考虑点火药的燃烧,此时对应的向量表达式为

$$\boldsymbol{U}_1 = (\varphi\rho_{\mathrm{g}}A, \varphi\rho_{\mathrm{g}}u_{\mathrm{g}}A, \varphi\rho_{\mathrm{g}}u_{\mathrm{g}}^2A, (1-\varphi)\rho_{\mathrm{p}}A, (1-\varphi)\rho_{\mathrm{p}}u_{\mathrm{p}}A)^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{F}_1 = (\varphi\rho_{\mathrm{g}}u_{\mathrm{g}}A, \varphi\rho_{\mathrm{g}}(u_{\mathrm{g}}^2 + p/\rho_{\mathrm{g}})A, \varphi\rho_{\mathrm{g}}u_{\mathrm{g}}(e_{\mathrm{g}} + p/\rho_{\mathrm{g}} + u_{\mathrm{g}}^2/2)A, (1-\varphi)\rho_{\mathrm{p}}u_{\mathrm{p}}A,$$
$$(1-\varphi)(\rho_{\mathrm{p}}u_{\mathrm{p}}^2 + p + \sigma_{\mathrm{g}})A)^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{H}_1 = \left((\dot{m}_{\mathrm{h}} + \dot{m}_{\mathrm{l}} + \dot{m}_{\mathrm{ign}})A, (\dot{m}_{\mathrm{h}}u_{\mathrm{g}} + \dot{m}_{\mathrm{l}}u_{\mathrm{g}} + \dot{m}_{\mathrm{ign}}u_{\mathrm{ign}} - f_{\mathrm{s}})A + p\frac{\partial(A\varphi)}{\partial x},\right.$$

$$(\dot{m}_h+\dot{m}_l)(e_g+\frac{p}{\rho_g}+\frac{u_g^2}{2})u_gA+\dot{m}_{ign}H_{ign}A-(q+f_su_p+A_pq)A-p\frac{\partial(A\varphi)}{\partial t},$$

$$-(\dot{m}_h+\dot{m}_l+\dot{m}_{ign})A,-(\dot{m}_h+\dot{m}_l+\dot{m}_{ign})u_pA+f_sA+p\frac{\partial[A(1-\varphi)]}{\partial x}+(1-\varphi)\sigma_g\frac{\partial A}{\partial x}\Big)^T \quad (6)$$

式中：A 为炮膛截面积；φ、ρ_g、u_g、p 分别为气相的空隙率、密度、运动速度和压力；$\dot{m}_h$、$\dot{m}_l$、$\dot{m}_{ign}$ 分别为单位时间内变燃速发射药内层、外层、点火药燃气生成速率；f_s 为气、固两相的相间阻力；u_{ign} 为点火药燃气速度；$e_g=RT/(k-1)$，为气相比内能；H_{ign} 为点火药燃气的滞止焓；q 为单位表面气、固两相热交换量；A_p 为固相比表面积；ρ_p、u_p、σ_g 分别为变燃速发射药密度、运动速度和颗粒间应力。

燃烧第 2 阶段，点火药与外层药已经燃烧完毕，只有内层药燃烧，对应的向量表达式为

$$\boldsymbol{U}_2=\boldsymbol{U}_1 \quad (7)$$

$$\boldsymbol{F}_2=\boldsymbol{F}_1 \quad (8)$$

$$\boldsymbol{H}_2=\Big(\dot{m}_hA,\dot{m}_hu_gA+p\frac{\partial(A\varphi)}{\partial x},\dot{m}_h(e_g+\frac{p}{\rho_g}+\frac{u_g^2}{2})u_gA-(q+f_su_p+A_pq)A-p\frac{\partial(A\varphi)}{\partial t},$$

$$-\dot{m}_hA,-\dot{m}_hu_pA+f_sA+p\frac{\partial[A(1-\varphi)]}{\partial x}+(1-\varphi)\sigma_g\frac{\partial A}{\partial x}\Big)^T \quad (9)$$

3.3 辅助方程

变燃速发射药两相流内弹道方程组的辅助方程由气体状态方程、相间阻力方程、相间传热方程、发射药颗粒表面温度方程、颗粒间应力方程、燃烧速度方程及形状函数组成，除形状函数使用 2.2 节的形状函数外，其余辅助方程参见文献[1]。

4 计算结果与讨论

4.1 求解方法与边界条件

变燃速发射药燃烧两个阶段的两相流内弹道方程组均属于拟线性双曲线偏微分方程组，可通过数值计算方法求解。本研究采用比较成熟的具有二阶精度的 Lax-Wendroff 差分格式，边界点采用运动控制体方法及镜面反射法。

4.2 结果与讨论

在∅30 mm 火炮装填条件下，利用新建立的模型对 LMM-1 型变燃速发射药（外径 $D=2.2$ mm，孔径 $d=0.1$ mm，长径比 $L/D=2:1$）进行求解，得到炮口初速度（v）变化曲线、膛压（p）变化曲线与实测数据的比较，如图 2 和图 3 所示。

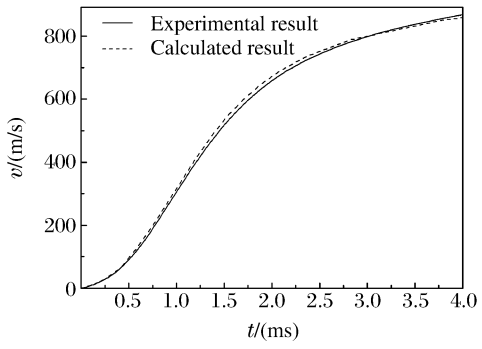


图 2 炮口初速度变化曲线

Fig. 2 Muzzle velocity profiles

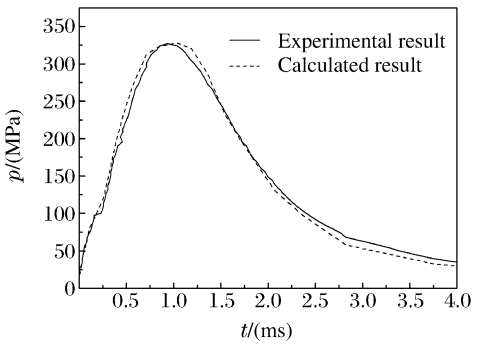


图 3 压力变化曲线

Fig. 3 Pressure profiles

在相同装填条件及点火方式下对其它几种型号的变燃速发射药进行数值模拟，并与实验数据作比较，结果列于表 1，其中 $p_{max,calc}$、$p_{max,exp}$ 分别为最大压力的计算值和实验值，v_{calc}、v_{exp} 分别为炮口速度的计算值和实验值。通过对 4 种型号的变燃速发射药内弹道参数计算值与实验值进行对比，可以看出：无论

是膛内压力还是炮口初速度,实验值与计算值的符合程度均较好。证明此两相流内弹道模型可以比较准确地描述变燃速发射药的内弹道过程。

表 1　不同型号发射药的实验值与计算值

Table 1　Experimental data and calculated values of different kinds of propellants

Propellants	Maxmium pressure			Muzzle velocity		
	$p_{max,calc}$/(MPa)	$p_{max,exp}$/(MPa)	Relative error/(%)	v_{calc}/(m/s)	v_{exp}/(m/s)	Relative error/(%)
LMM-1	325.9	327.2	−0.40	896.4	873.6	2.61
LMM-2	320.3	304.1	−5.33	946.3	977.7	−3.21
LMM-3	324.9	332.8	2.43	905.8	918.7	−1.40
LMM-4	302.7	310.9	2.71	889.7	915.2	−2.79

另外,通过对计算所得的其它数据进行分析,可以从不同角度阐释变燃速发射药的内弹道过程,如膛内压力波、空隙率、气固相温度及气固相运动速度等。图 4 为计算得出的压差-时间(Δp-t)曲线。从图 4 中可以看出:第 1 个正压力波出现在 t = 0.9 ms,压差约为 16 MPa;第 1 个负压力波出现在 t=1.2 ms,压差约为 22 MPa。而对于此火炮的制式装药来说,压差一般大于 25 MPa。运用两相流内弹道模型计算得到的压力波处于较低范围内,这反映出变燃速发射药可以有效地抑制膛内压力波的生成,表现出良好的弹道性能,模拟结果与实际情况一致。

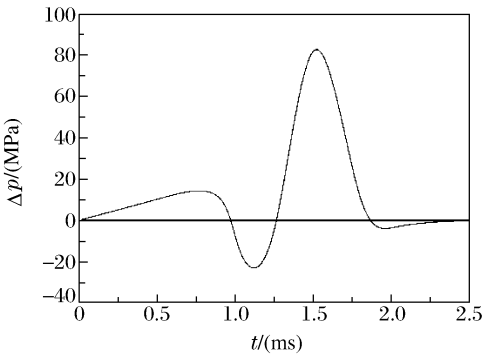


图 4　压差变化曲线

Fig. 4　Pressure difference curve

5　结　论

将变燃速发射药的燃烧分为两个阶段,建立了变燃速发射药两相流内弹道模型。该模型能够准确地描述变燃速发射药膛内燃烧及内弹道过程,模拟结果与实际情况基本符合。在火炮中应用变燃速发射药能够有效地抑制膛内压力波的产生,对于安全射击具有重要作用。

References:

[1] Jin Z M, Weng C S. Advanced interior ballistics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. (in Chinese)
金志明,翁春生. 高等内弹道学 [M]. 北京:高等教育出版社,2003.

[2] Yuan Y X, Zhang X B. Fundamentals of multiphase flow dynamics at high temperature and high pressure [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2005. (in Chinese)
袁亚雄,张小兵. 高温高压多相流体动力学基础 [M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2005.

[3] Mickovic D, Jaramaz S. Two-phase flow model of gun interior ballistics [A]//Proceedings of 19th International Symposium of Ballistics [C]. Interlaken, Switzerland, 2001: 65-72.

[4] He Z D, Liu Y P, Ma Z L, et al. Low temperature sensitivity of variable-burning rate gun propellant [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2006, 29(1): 65-67. (in Chinese)
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):65-67.

[5] Liu L L, Ma Z L, Xiao Z L. 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. (in Chinese)
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.

Mathematical Model and Numerical Simulation of Two-Phase Flow Interior Ballistics of Variable Burning-Rate Propellant

MA Zhong-Liang, LIU Lin-Lin, XIAO Zhong-Liang

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

Abstract: In order to describe the combustion and interior ballistics processes of variable burning-rate propellant more accurately, the model of two-phase flow interior ballistics of variable burning-rate propellant is established, which consists of one center hole and double layers. In the charge condition of 30 mm cannon, Lax-Wendroff difference scheme with second order accuracy is used to get the numerical solutions of the model. The pressure and velocity profiles calculated are in good accordance with the actual ones. Therefore this numerical model can truly and accurately reflect the real physical process of interior ballistics. The simulation results show that it is very effective to restrain the pressure waves in the bore of variable burning-rate propellant, which is great benefit for fire safety. The analysis of the calculation parameters, such as phase velocity and bore pressure, plays a guiding role in the further research of the interior ballistics process of variable burning-rate propellant.

Key words: interior ballistics; two-phase flow; variable burning-rate propellant; numerical simulation