

文章编号: 1001-1455(2007)01-0012-06

考虑两相流内弹道的自行火炮发射动力学计算*

贡来峰^{1,3}, 芮筱亭¹, 侯日升², 何 斌¹

(1. 南京理工大学动力工程学院, 江苏 南京 210094;

2. 中国华阴兵器试验中心, 陕西 华阴 714200;

3. 总装驻扬州地区军代室, 江苏 扬州 225009)

摘要: 为了更加准确地计算火炮弹丸的起始扰动, 将两相流内弹道应用于发射动力学研究。建立了完整的自行火炮系统发射动力学方程组, 包括火炮系统的体动力学方程组、弹丸在膛内运动的动力学方程以及两相流内弹道方程。编制了计算程序, 实现了对某自行火炮发射过程的数值模拟, 在准确计算内弹道过程的同时, 获得了火炮的动力响应、弹丸膛内运动和起始扰动。部分模拟结果与实验实测结果吻合较好。计算表明, 采用两相流内弹道模型将提高发射动力学计算精度。

关键词: 爆炸力学; 起始扰动; 发射动力学; 自行火炮; 内弹道; 两相流

中图分类号: O315; TJ012; TJ301

国标学科代码: 130 · 35

文献标志码: A

1 引言

发射过程对火炮的射击密集度影响明显, 火炮特性对射弹散布的影响通过发射过程赋予弹丸起始扰动来体现。J. F. Newill^[1]通过发射动力学数值模拟, 革新了传统的弹药设计模式, 为配用于 M1A1 坦克的 XM1002 多用途弹性能优化提供了直接技术手段和低成本高效率的设计方法。发射动力学建模、计算、分析时, 必须在准确计算内弹道过程的基础上计算弹丸起始扰动, 才能真正讨论解决诸如弹、炮结构参数对射弹散布的影响, 从而对武器系统进行保证良好射击精度的动态设计。因此, 准确计算内弹道过程是发射动力学研究和弹丸膛内运动计算的重要前提之一。

芮筱亭等^[2]建立了某自行火炮的发射动力学平面运动模型, 应用多体动力学方法获得了发射过程中火炮的动力响应, 但在内弹道计算中采用的是经典模型。由于经典内弹道理论的缺陷, 对内弹道初期的基本假设与实际情况差异较大, 使内弹道计算结果不能完全反映真实情况, 有可能会给弹丸膛内运动和求解火炮动力响应的计算结果带来一定误差。两相流动力学对内弹道的描述能更为切合实际, 对此国内外已形成共识。因此, 在发射动力学中采用两相流内弹道, 对准确计算弹丸膛内运动和起始扰动具有重要意义。

唐静静等^[3]建立了某自行火炮的发射动力学空间运动模型, 应用多体系统传递矩阵法计算获得了武器系统的振动特性。本文中在前人工作的基础上, 将发射动力学与两相流内弹道相结合, 建立了自行火炮系统发射动力学方程组, 以某自行火炮系统为研究对象, 对内弹道过程和弹丸膛内运动进行了数值模拟, 为研究提高武器射击密集度的措施提供了重要基础。

2 自行火炮系统的体动力学方程组

根据自行火炮发射动力学模型^[3], 可建立系统的体动力学方程组

$$M\dot{v}_x + C\dot{v}_t + K\dot{v} = f \quad (1)$$

式中: M 、 C 、 K 为自行火炮系统的参数矩阵, 外力矢量列阵 f 由火炮系统的受力分析得到, v 为系统的体运动参量物理坐标列阵。应用模态技术, 令

* 收稿日期: 2005-10-09; 修回日期: 2005-12-30

作者简介: 贡来峰(1973—), 男, 博士研究生, 工程师。

$$\mathbf{v} = \sum_{k=1}^{+\infty} \mathbf{V}^k q^k(t) \tag{2}$$

式中： $q^k(t)$ 为第 k 阶广义坐标， \mathbf{V} 为系统的增广特征矢量，它的元素既含有离散量，又含连续量。可以证明增广特征矢量 \mathbf{V} 满足如下正交性条件^[3]

$$\langle \mathbf{M}\mathbf{V}^k, \mathbf{V}^p \rangle = \delta_{kp} M_p, \quad \langle \mathbf{K}\mathbf{V}^k, \mathbf{V}^p \rangle = \delta_{kp} \omega_p^2 M_p \tag{3}$$

式中： $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示内积， ω_p 为系统的第 p 阶固有频率， M_p 为系统的第 p 阶模态质量， δ_{kp} 为 Kronecker 函数。利用增广特征矢量的正交性条件式(3)，式(1)变为

$$\ddot{q}^p(t) + (\alpha + \beta\omega_p^2)\dot{q}^p(t) + \omega_p^2 q^p(t) = \langle \mathbf{f}, \mathbf{V}^p \rangle / M_p \quad p = 1, 2, 3, \dots \tag{4}$$

以上各参量的具体形式和表述见文献[4]。

3 弹丸在膛内运动的动力学方程

发射动力学研究中，许多文献大都作了“后定心部中心沿炮膛轴线运动”的假设，以简化所研究的问题。摒弃 Marting 方程^[5]的不足，芮筱亭等^[6]深入研究了推导弹丸膛内运动动力学方程的方法，建立了适用于各种运动模型的统一形式的弹丸发射动力学方程，不但考虑的因素比 Marting 模型更全面而贴近实际，而且运动微分方程的形式远比 Marting 方程简洁。本文中把弹丸的主体看作刚体，其弹炮作用的弹性效应等效为定心部及弹带与身管的弹性接触力，考虑弹丸所受的重力、弹炮间隙、定心部与身管的接触力、弹丸的质量偏心和动不平衡，在混合膛线情况下在火炮系 $O_3x'_0y'_0z'_0$ 中描写弹丸质心运动方程，在弹轴系 $O_1\xi'\eta'\zeta'$ 中描写弹丸转动微分方程，可得非对称弹丸在膛内运动的动力学方程为

$$\begin{cases} a_q = \frac{F_{O_3x'_0}}{m_q} - \frac{\partial^2 X'}{\partial t^2} \\ \ddot{y}'_{O_3C} = \frac{F_{O_3y'_0}}{m_q} - \ddot{y}'_{O_3} \\ \ddot{z}'_{O_3C} = \frac{F_{O_3z'_0}}{m_q} - \ddot{z}'_{O_3} \\ \ddot{\delta}_1^I = \frac{M_{O_1\xi'}}{A} + \left(1 - \frac{C}{A}\right) (\beta_{D_\xi} \ddot{\gamma} + \beta_{D_\eta} \dot{\gamma}^2) - \frac{C}{A} (\dot{\psi}_2^I + \dot{\delta}_2^I) \dot{\gamma} + \frac{L_{m_\eta} (a_p + \partial^2 X' / \partial t^2)}{A} - \ddot{\phi}_1^I \\ \ddot{\delta}_2^I = -\frac{M_{O_1\eta'}}{A} - \left(1 - \frac{C}{A}\right) (\beta_{D_\eta} \ddot{\gamma} - \beta_{D_\xi} \dot{\gamma}^2) + \frac{C}{A} (\dot{\psi}_1^I + \dot{\delta}_1^I) \dot{\gamma} + \frac{L_{m_\xi} (a_p + \partial^2 X' / \partial t^2)}{A} - \ddot{\psi}_2^I \end{cases} \tag{5}$$

式中： a_q 为弹丸质心相对于火炮系 $O_3x'_0y'_0z'_0$ 的加速度在火炮轴线上的分量， m_q 为弹丸质量， X' 为火炮后坐位移量， y_{O_3C} 和 z_{O_3C} 为弹丸质心相对于火炮系 $O_3x'_0y'_0z'_0$ 的位移的铅垂分量和侧向分量， y_{O_3} 和 z_{O_3} 分别为 O_3 位移的铅垂分量和侧向分量， $F_{O_3x'_0}$ ， $F_{O_3y'_0}$ ， $F_{O_3z'_0}$ 分别为弹丸受力在火炮系 3 个方向上的分量， $M_{O_1\xi'}$ 和 $M_{O_1\eta'}$ 分别为外力矩在 ξ' 轴和 η' 轴方向上的分量， C 为弹丸的极转动惯量， A 为弹丸的赤道转动惯量， δ_1^I 为弹轴 ξ' 在 $x'_0O_3y'_0$ 面上的投影与 x'_0 轴的夹角， ξ' 轴在 x'_0 轴上方时为正， δ_2^I 为弹轴 ξ' 与 $x'_0O_3y'_0$ 面的夹角， ξ' 轴在 $x'_0O_3y'_0$ 面右侧时为正， ϕ_1^I 为 x'_0 轴在 $x'O_3y'$ 面上的投影与 x' 轴的夹角， x'_0 轴在 x' 轴上方时为正， ψ_2^I 为 x'_0 轴与 $x'O_3y'$ 面的夹角， x'_0 轴在 $x'O_3y'$ 面的右侧时为正， γ 为弹丸自转角，对于混合膛线

$$\gamma = \begin{cases} \frac{2\tan\alpha_0}{d_0} x_q + \frac{k_a}{d_0} x_q^2 & x_q < l_a \\ \frac{2\tan\alpha_m}{d_0} x_q - \frac{k_a}{d_0} l_a^2 & x_q \geq l_a \end{cases} \tag{6}$$

式中： α_0 为膛线起始缠角， α_m 为膛线炮口缠角。各参量的计算方法以及未交待符号的意义见文献[5]。

4 两相流动力学模型

如图 1 所示，某自行火炮榴弹采用铜质金属药筒分装式结构，主装药为单一粒状硝基胍火药。中心

点火管为金属中心点火管,其内装填由黑火药压成的形如算盘珠状的药饼,排列规整,药饼中部开孔以利于传火通畅,且外形尺寸与点火管内壁尺寸相适应^[7]。采用一维两相流内弹道计算方法处理膛内的两相流动问题,即对主装药区和中心点传火区分别采用

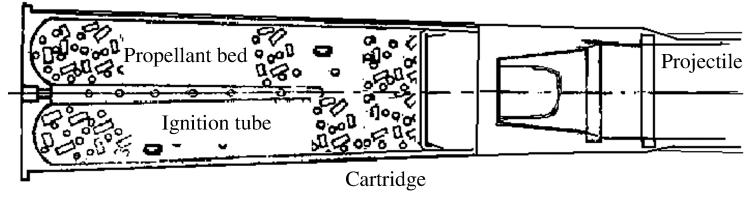


图1 某自行火炮榴弹发射装药

Fig.1 Propellant charge of high explosive projectile for a self-propelled artillery

两排平行的一维网格,使用两相流动力学模型分别来描述各个区中的一维两相流动,考虑质量、动量与能量的交换、气相和固相间的相互作用力、气相和固相间的热交换、固相被点燃的过程、固相颗粒间的应力、弹丸挤进过程、弹丸在膛内运动中受到的阻力等因素。

基本假设如下:(1) 主装药颗粒充分多,可作为连续介质处理;(2) 由于中心点火管内空间狭小,考虑到其内药饼装填和结构特点,不考虑点火管内固体颗粒的运动,只考虑点火管内的气体流动,也只有气体从点火孔流出;(3) 点火管内和膛内的流动是一维的,任一截面内的各处状态参数相等;(4) 膛内物质只有气相和固相两种,固相不可压缩;(5) 火药燃烧服从几何燃烧定律和指数燃速定律;(6) 燃气服从 Nobel-Abel 气体状态方程;(7) 忽略气体的粘性及对管壁的热散失。

5 两相流内弹道方程

(1) 主装药的两相流体动力学基本方程组。参考文献[8-9],在欧拉坐标下主装药的两相流体动力学基本方程组包括气相质量守恒方程、气相动量守恒方程、气相能量守恒方程、固相质量守恒方程、固相动量守恒方程,即

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial(A\phi\rho_g)}{\partial t} + \frac{\partial(A\phi\rho_g u_g)}{\partial x} &= A\dot{m}_c + A\dot{m}_{ign} \\ \frac{\partial(A\phi\rho_g u_g)}{\partial t} + \frac{\partial(A\phi\rho_g u_g^2)}{\partial x} + A\phi \frac{\partial P}{\partial x} &= -AD + A\dot{m}_c u_p \\ \frac{\partial[A\phi\rho_g(e_g + u_g^2/2)]}{\partial t} + \frac{\partial[A\phi\rho_g u_g(e_g + u_g^2/2)]}{\partial x} + \frac{\partial(A\phi u_g P)}{\partial x} + P \frac{\partial(A\phi)}{\partial t} &= \\ &A\dot{m}_c H_c + A\dot{m}_{ign} H_{ign} - ADu_p - AQ_s \\ \frac{\partial[A(1-\phi)\rho_p]}{\partial t} + \frac{\partial[A(1-\phi)\rho_p u_p]}{\partial x} &= -A\dot{m}_c \\ \frac{\partial[A(1-\phi)\rho_p u_p]}{\partial t} + \frac{\partial[A(1-\phi)\rho_p u_p^2]}{\partial x} + A(1-\phi) \frac{\partial P}{\partial x} &= AD - A\dot{m}_c u_p - A(1-\phi) \frac{\partial R_p}{\partial x} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

式中: A 为炮膛截面面积, ϕ 为空隙率, ρ_g 为气相真实密度, u_g 为气相速度, \dot{m}_c 为定义在单位总体积上的主装药燃气质量生成速率, \dot{m}_{ign} 为定义在药室内一个格子总体积上的气体源质量流量, D 为相间阻力, P 为气体压力, u_p 为固相速度, e_g 为气体的内能, H_c 为单位质量主装药燃烧释放焓, H_{ign} 为单位质量流入气体带入焓, Q_s 为定义在单位总体积上固相与气相之间的热交换量, R_p 为固相颗粒间应力。

(2) 中心点火管内的流体动力学基本方程组。参考文献[10],在欧拉坐标下中心点火管流体动力学基本方程组只包括气相质量守恒方程、气相动量守恒方程、气相能量守恒方程,即

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial(A_{ig}\phi_{ig}\rho_{ig})}{\partial t} + \frac{\partial(A_{ig}\phi_{ig}\rho_{ig}u_{ig})}{\partial x} &= A_{ig}\dot{m}_{ig} - A_{ig}\dot{m}_{ign} \\ \frac{\partial(A_{ig}\phi_{ig}\rho_{ig}u_{ig})}{\partial t} + \frac{\partial(A_{ig}\phi_{ig}\rho_{ig}u_{ig}^2)}{\partial x} + A_{ig}\phi_{ig} \frac{\partial P_{ig}}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial[A_{ig}\phi_{ig}\rho_{ig}(e_{ig} + u_{ig}^2/2)]}{\partial t} + \frac{\partial[A_{ig}\phi_{ig}\rho_{ig}u_{ig}(e_{ig} + u_{ig}^2/2)]}{\partial x} + \frac{\partial(A_{ig}\phi_{ig}u_{ig}P_{ig})}{\partial x} + P_{ig} \frac{\partial(A_{ig}\phi_{ig})}{\partial t} &= \\ &A_{ig}\dot{m}_{ig}H_{ig} - A_{ig}\dot{m}_{ign}H_{ign} \end{aligned} \right. \quad (8)$$

式中： A_{ig} 为点火管内截面面积， ϕ_{ig} 为点火管内空隙率， ρ_{ig} 为点火管内气相真实密度， u_{ig} 为气相的轴向速度， \dot{m}_{ig} 为定义在一个格子总体积上的点火药燃气质量生成速率， \dot{m}_{ign} 为定义在一个格子总体积上流出气体的质量流量， P_{ig} 为气体的内能， e_{ig} 为点火药燃烧释放焓， H_{ign} 为流出气体带出焓。

6 数值模拟结果

联立自行火炮系统的体动力学方程组、弹丸在膛内运动的动力学方程以及两相流内弹道方程，就得到自行火炮发射动力学方程组。通过编制计算程序，实例数值模拟了某自行火炮系统在射角和炮车角均为 0° 时的发射动力学过程，得到了内弹道、火炮动力响应、弹丸膛内运动以及弹丸起始扰动。

图 2 给出了两相流内弹道和经典内弹道的膛底压力时间曲线计算结果与实验结果的对比情况，可见计算结果与实验结果吻合较好。图 3 给出了两相流内弹道和经典内弹道的弹底压力时间曲线计算结果的对比情况，可见两者存在较大差异，经典内弹道理论对内弹道初期的基本假设（如弹带瞬间挤进、发射药床同时着火等）以及膛内压力分布的假设与实际情况差异较大，使内弹道计算结果与实际情况差异较大，必然给求解弹丸膛内运动带入一定误差，而两相流内弹道模型则大为改善。图 4 给出了身管后坐位移 X' 的计算结果，可见采用经典或两相流内弹道模型对身管后坐运动的计算影响不大。图 5 给出了弹轴摆动角 φ^1 幅值的计算结果，图 6 给出了 φ^1 轨迹的计算结果，其中 φ_1^1 为高低分量， φ_2^1 为侧向分量。表 1 分别给出了由发射动力学模拟得到的在弹丸离开炮口时刻的起始扰动，包括弹丸质心的横向速度 \dot{y}_c 和 \dot{z}_c 、弹丸起始偏角 ψ_0 、起始摆动角 φ_0 、起始攻角 δ_0 及其对应的角速度，下标 1、2 分别表示高低分量和侧向分量。由图 5~图 6 以及表 1 可见，采用经典内弹道模型时弹丸膛内运动尤其是弹丸起始扰动的计算结果与采用内弹道模型时存在一定差异。

表 1 不同内弹道模型下弹丸起始扰动计算结果

Table 1 Computational results of initial disturbance of projectile under different interior ballistic models

起始扰动量	两相流	经典	起始扰动量	两相流	经典
$\dot{y}_c / (\text{m/s})$	-0.356 2	-0.362 7	$\dot{z}_c / (\text{m/s})$	-0.044 6	-0.363 6
$\psi_{01} / (\text{mrad})$	-0.219 3	-0.215 1	$\psi_{02} / (\text{mrad})$	-0.06 21	-0.400 9
$\varphi_{01} / (\text{mrad})$	-0.507 1	-1.175 7	$\varphi_{02} / (\text{mrad})$	1.989 4	1.403 6
$\delta_{01} / (\text{mrad})$	-0.287 8	-0.960 6	$\delta_{02} / (\text{mrad})$	2.051 5	1.804 5
$\dot{\psi}_{01} / (\text{rad/s})$	0.131 5	-0.301 9	$\dot{\psi}_{02} / (\text{rad/s})$	-0.793 2	0.070 3
$\dot{\varphi}_{01} / (\text{rad/s})$	-2.585 1	-2.989 6	$\dot{\varphi}_{02} / (\text{rad/s})$	-0.546 8	-1.942 8
$\dot{\delta}_{01} / (\text{rad/s})$	-2.716 6	-2.687 6	$\dot{\delta}_{02} / (\text{rad/s})$	0.246 4	-2.013 1

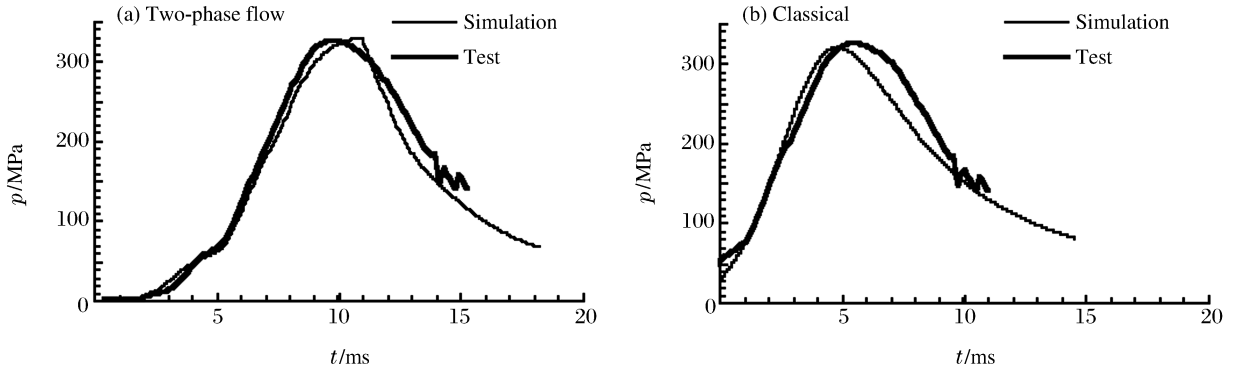


图 2 膛底压力计算结果与实验结果对比

Fig. 2 Comparison about computational and test results of breech pressure

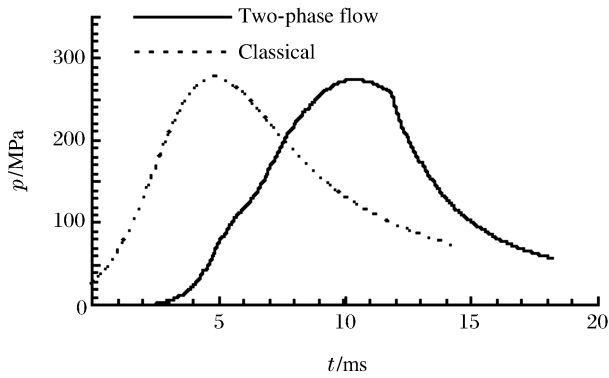


图3 弹底压力计算结果

Fig. 3 Computational results of pressure at the bottom of projectile

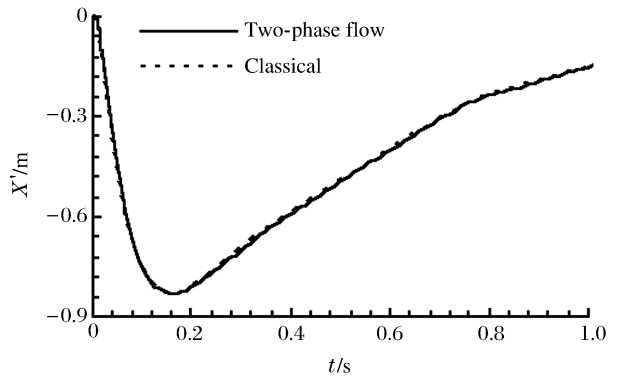


图4 后坐位移计算结果

Fig. 4 Computational results of recoil displacement

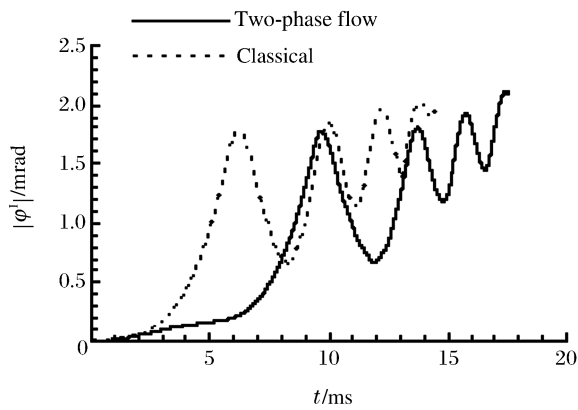


图5 弹轴摆动角幅值的计算结果

Fig. 5 Computational results of amplitude of swing angle of projectile axis

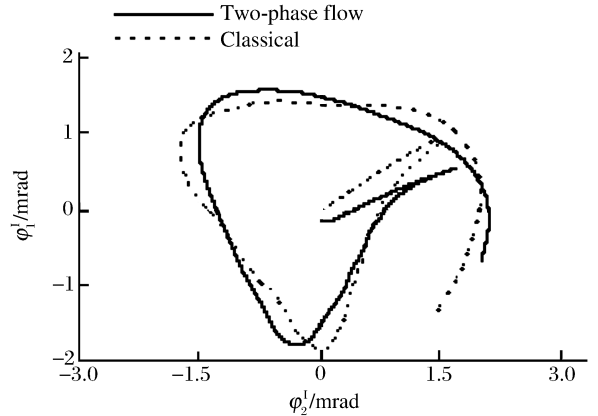


图6 弹轴摆动角轨迹

Fig. 6 Trace of swing angle of projectile axis

7 结论

(1) 建立了完整的自行火炮系统发射动力学方程,包括:自行火炮系统的体动力学方程组、弹丸发射动力学方程以及两相流内弹道方程。

(2) 在两相流内弹道模型下,以某自行火炮为研究对象,实现了对内弹道过程、火炮动力响应、弹丸膛内运动以及弹丸起始扰动的数值模拟,内弹道模拟结果与实验结果吻合较好。

(3) 分别在两相流内弹道模型和经典内弹道模型下,对某自行火炮的发射过程进行了数值模拟,通过对比两种情况下的计算结果,表明采用经典内弹道模型会给发射动力学计算带来一定误差,而采用两相流内弹道模型更切合实际情况,从模型和方法上能有效改善发射动力学计算精度。

本文工作可为进一步分析影响武器射击精度的因素、研究提高武器射击密集度的措施提供参考。

参考文献:

- [1] Newill J F, Garner J, Farina A, et al. Launch Dynamics of the XM1002 Cartridge, 120-mm Target Practice Multi-purpose Projectile[R]. ARL-TR-3068, 2003.
- [2] 芮筱亭,陆毓琪. 自行炮发射动力学研究[J]. 兵工学报, 2000, 21 增刊: 38-40.
RUI Xiao-ting, LU Yu-qi. A study on the launch dynamics of self-propelled artillery[J]. Acta Armamentarii, 2000, 21 suppl: 38-40.
- [3] 唐静静, 芮筱亭, 陆毓琪, 等. 自行火炮振动特性的计算[J]. 弹道学报, 2003, 15(2): 23-27.

TANG Jing-jing, RUI Xiao-ting, LU Yu-qi, et al. Calculation of the self-propelled artillery vibration characteristics [J]. *Journal of Ballistics*, 2003,15(2):23-27.

- [4] 贡来峰. 自行火炮发射动力学研究[D]. 南京:南京理工大学,2002.
- [5] Marting T S, Robert S B. Projectile Motion in a Flexible Gun Tube[R]. ADA140737, 1984.
- [6] 芮筱亭,杨启仁. 弹丸发射过程理论[M]. 南京:东南大学出版社,1992.
- [7] 仁慧,乔小晶,焦清介,等. 提高点火管点火性能的一种方法[J]. *含能材料*, 2001,9(4):168-171.
- REN Hui, QIAO Xiao-jing, JIAO Qing-jie, et al. One way of improving ignition performance of ignition tube[J]. *Energetic Materials*, 2001,9(4):168-171.
- [8] 周彦煌,王升晨. 实用两相流内弹道学[M]. 北京:国防工业出版社,1990.
- [9] 陆中兵,周彦煌. 模块装药火炮膛内两相燃烧模型及压力波模拟[J]. *爆炸与冲击*, 1999,19(3):269-273.
- LU Zhong-bing, ZHOU Yan-huang. Two-phase-combustion model and numerical simulation of pressure wave in the gun with modular charges[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1999,19(3):269-273.
- [10] 冯德成,翁春生,王震,等. 点火管破孔的随机过程的一维两相流计算[J]. *爆炸与冲击*, 2004,24(6):481-486.
- FENG De-cheng, WENG Chun-sheng, WANG Zhen, et al. Numerical simulation of one-dimensional two-phase flow for the random process of vent holes breaking in center-core igniter[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004,24(6):481-486.

Calculation of launch dynamics with two-phase flow interior ballistic model for self-propelled artillery

YUN Lai-feng^{1,3*}, RUI Xiao-ting¹, HOU Ri-sheng², HE Bin¹

(1. *Power Engineering College, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;*

2. *Huayin Ordnance Test Center of China, Huayin 714200, Shaanxi, China;*

3. *Military Representative Office in Yangzhou Area, Yangzhou 225009, Jiangsu, China)*

Abstract: This paper focuses on the study of launch dynamics for self-propelled artillery. In order to exactly compute the motion of projectile in gun tube and the initial disturbance, the theory of two-phase flow interior ballistic is applied to the study on launch dynamics. The equations group of launch dynamics for self-propelled artillery is formed, including the body dynamics equation of gun system, the dynamics equations of projectile moving in gun tube and the equations of the two-phase flow interior ballistic. For a self-propelled artillery the computational program is achieved, by which the simulation of launch process is realized. The interior ballistic, motion of projectile in gun tube, dynamic response of the artillery and initial disturbance of projectile are exactly simulated. Some computational results are in good agreement with test results. The simulation results under the classical and two-phase flow interior ballistic models respectively show that the computational accuracy will be improved when the two-phase flow model is used to study launch dynamics. This work provides a necessary base for researching firing dispersion of self-propelled artillery.

Key words: mechanics of explosion; initial disturbance; launch dynamics; self-propelled artillery; interior ballistic; two-phase flow

* Corresponding author: YUN Lai-feng
E-mail address: yunlaifeng@163.com
Telephone: 86-517-8702821