文章编号：1000-5773(2012)05-0564-07

后效期火药燃气加速弹丸的数值研究*

郭则庆，姜孝海，王 杨

（南京理工大学瞬态物理国家重点实验室，江苏南京 210094）

摘要：弹丸出膛后受高压火药燃气作用将继续加速并达到最大速度，后效期内弹丸增速大小及增速规律对于武器系统的设计和射击精度等具有重要的影响。采用基于动网格的有限体积方法，对不同装药量、弹丸质量和口径等 9 种条件下的发射过程进行了数值模拟，讨论了弹丸出膛后的受力状况和运动过程，对最大速度出现的时间、位置和增速量及其变化特点、影响因素等进行了详细的分析。计算结果显示，后效期弹丸增速率最大可超过 3%，且加速过程受弹丸质量和装药量的影响很小。

关键词：膛口流场；后效期；弹丸加速

中图分类号：O354 **文献标识码**：A

1 引 言

作为武器设计的初始条件，弹丸初速是进行外弹道计算和射表编制的重要原始数据，在机械引信的保险机构和定距空炸炸弹炸点的设计中，弹丸初速是影响精度的主要因素之一。因此，如何准确计算并获取弹丸的最大速度值、弹丸达到最大速度的时间与位置及其规律具有重要的实际意义。

弹丸出膛口后，膛口速度 v_0 并不是最大速度，弹丸将继续受火药燃气的推动而加速达到最大速度 v_m。外弹道设计中一般采用弹丸的虚拟膛口速度 v_{0i} 作为弹丸初速，并将其作为射表编制的依据，v_{0i} 是根据测量得出的一定距离外的弹丸速度，利用简化公式换算出的膛口速度值[1]。目前缺少一种精确计算 v_m 及其位置的有效方法。另外，在引信解除保险机构和空炸炸点的设计中，一般直接采用炮口初速作为弹丸初速[2-3]。虚拟膛口速度 v_{0i} 与实际膛口速度 v_0 以及最大速度 v_m 的概念不同，大小也不一致。图 1 给出了 v_0、v_{0i} 和 v_m 之间的关系。

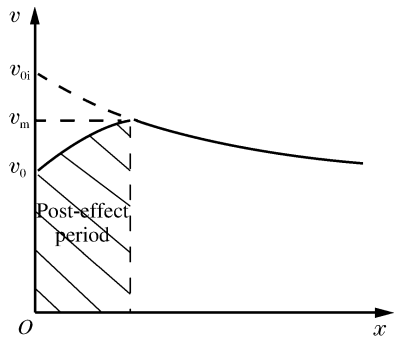


图 1 弹丸速度曲线[1]

Fig. 1 Velocity curve of a projectile[1]

对于计转数定距空炸炸弹，弹丸在膛内每旋转一圈所前进的距离是一定的，只与膛线的缠距有关，与弹丸膛口速度无关。因此，已知弹丸飞行距离和旋转圈数之间的关系，可通过定转数方法实现引信的定距引爆。然而弹丸出炮口后，其轴向速度受火药燃气的作用将增大，而旋转速度不变，即弹丸每转一圈的实际前进距离增大。若计转数空炸炸弹弹丸后效期速度增加 3%，设计炸点距离为1 000 m，如果

* **收稿日期**：2011-01-30；**修回日期**：2011-08-08

基金项目：国家自然科学基金(10902052)；重点实验室基金

作者简介：郭则庆(1986—)，男，博士研究生，主要从事兵器发射理论与技术研究. E-mail：guozeqing@yahoo.com.cn

通讯作者：姜孝海(1975—)，男，博士，副教授，主要从事兵器发射和工业灾害等研究. E-mail：xhjiang@mail.njust.edu.cn

不考虑后效加速,则其理论误差可达 30 m。同样,对于定时空炸引信也存在这种误差。

由于弹丸受后效期影响的时间很短(一般为几百微秒),膛口区域环境复杂,很难通过实验方法研究弹丸加速过程及影响因素。随着计算机及数值计算技术的成熟,采用数值方法精确计算弹丸后效期内的增速量及最大速度所在的位置及时间,可为射表编制提供丰富的参考数据,对引信精度的控制也具有重要意义。Cayzac 等人[4]采用数值方法模拟了 120 mm 火炮发射过程中弹丸的受力过程,但没有描述弹丸在此过程中的速度变化过程与规律。Gopalapillai 等人[5]采用 Chakravarthy-Osher 格式和三阶逆风格式(MUSCL),模拟了弹丸在发射过程中速度和阻力系数的变化过程,分析了弹丸质量和结构对膛口流场的影响,结果显示,弹丸形状对弹丸速度变化的影响很小,但仅比较了相同初速条件下两种不同质量和不同形状的弹丸之间的差异。

本研究采用基于任意拉格朗日-欧拉(Arbitrary Lagrangian-Eulerian,ALE)方程和 AUSM+格式的动网格有限体积法,模拟不同发射条件下后效期弹丸的受力和速度变化过程,根据计算结果详细分析火药燃气作用下的弹丸加速特点,并比较装药量与初速条件、弹丸质量、枪口径对加速过程的影响。

2　数值方法

2.1　控制方程

忽略气体粘性和化学反应,在体积可变的控制体内,理想气体的控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}\iiint_V \boldsymbol{Q}\,\mathrm{d}V+\iint_S \boldsymbol{F}\cdot\boldsymbol{n}\,\mathrm{d}S=0 \tag{1}$$

式中:V 为控制体体积,S为控制体表面积,$\boldsymbol{n}$ 为控制体表面外法线方向的单位矢量,$\boldsymbol{Q}$ 为守恒变量矩阵,$\boldsymbol{F}$ 为控制体界面通量矩阵

$$\boldsymbol{Q}=\begin{pmatrix}\rho\\ \rho u_1\\ \rho u_2\\ \rho u_3\\ e_0\end{pmatrix},\qquad \boldsymbol{F}=(\boldsymbol{G}_1,\boldsymbol{G}_2,\boldsymbol{G}_3),\qquad \boldsymbol{G}_k=\begin{pmatrix}\rho(u_k-u_{\mathrm{g},k})\\ \rho u_1(u_k-u_{\mathrm{g},k})+\delta_{1,k}p\\ \rho u_2(u_k-u_{\mathrm{g},k})+\delta_{2,k}p\\ \rho u_3(u_k-u_{\mathrm{g},k})+\delta_{3,k}p\\ (\rho e_0+p)(u_k-u_{\mathrm{g},k})\end{pmatrix} \tag{2}$$

式中:ρ 为流体密度;$k=1,2,3$;u_1、u_2、u_3 分别为流体沿 x、y、z 方向的速度;e_0 为比总能;p 为压力;$u_{\mathrm{g},1}$、$u_{\mathrm{g},2}$、$u_{\mathrm{g},3}$分别表示控制体表面速度沿 x、y、z 方向的分量;$\delta_{j,k}(j,k=1,2,3)$为 Kronecker 函数。

为使方程闭合,引入理想气体状态方程

$$p=(\gamma-1)\rho e \tag{3}$$

式中:e 表示比内能,即 $e=e_0-(u_1^2+u_2^2+u_3^2)/2$;$\gamma$ 为比热比,本研究中取 $\gamma=1.35$。

考虑轴对称性,控制体界面流量使用 AUSM+格式计算[6],通过 MUSCL 插值及 Minmod 限制器[7]获得二阶精度。

将(1)式在体积可变的控制器中进行离散可得

$$\frac{\boldsymbol{Q}_{n+1}V_{n+1}-\boldsymbol{Q}_nV_n}{\Delta t}+\sum_{i=1}^{N}(\boldsymbol{F}_i\cdot\boldsymbol{n}_i)\Delta S_i=0 \tag{4}$$

式中:V 表示控制体体积,N 表示控制体界面数量,i 表示控制体的第 i 个界面,$\boldsymbol{F}_i$ 表示第 i 个界面的界面通量矩阵,ΔS_i 表示第 i 个界面的面积。(4)式变形后可得

$$\boldsymbol{Q}_{n+1}=\frac{V_n}{V_{n+1}}\left(\boldsymbol{Q}_n-\frac{1}{V_n}\sum_{i=1}^{N}(\boldsymbol{F}_i\cdot\boldsymbol{n}_i)\Delta S_i\Delta t\right) \tag{5}$$

运动弹丸的处理采用动网格和嵌套网格法[8]。

2.2 初始条件与边界条件

计算域如图 2 所示，身管长为 l，内径为 d。考虑轴对称性，膛口外计算域为 $25d\times 50d$，网格尺寸为 $0.05d$。为减小计算量，忽略初始流场的影响，并假定初始时刻弹丸位于膛口。膛内气体初始参数按照经典内弹道程序计算得出[9-10]，膛外气体为常温常压下的静止空气。假设弹丸的质心作直线运动，并忽略分子粘性力和热传导，则弹丸飞行速度只受弹丸表面压力的影响。身管表面采用固壁边界，远场采用外推边界，弹丸表面采用运动固壁边界条件[8]。

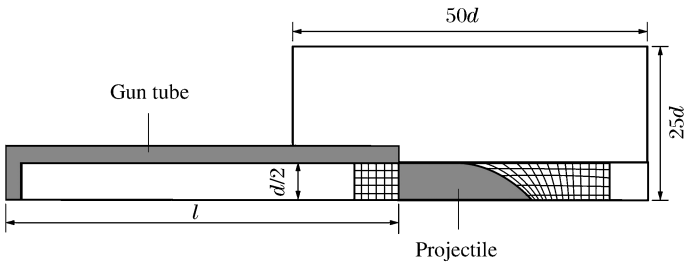


图 2 计算域示意图

Fig. 2 Schematic of computed field

2.3 数值验证

选取 2 张实验照片验证数值方法的准确性。图 3 为步枪发射时弹丸在膛内运动压缩前方空气形成的初始流场，图 4 为弹丸飞出膛口后某时刻的照片。图 3 和图 4 中上半部分为计算阴影图，下半部分为实验阴影照片[11]。通过对比可以看出：初始时刻，不但各种激波位置捕捉得较为准确，而且马赫盘下游的接触间断和涡环也有较好的对应(见图 3)；弹丸出膛后，由于膛口流场受到初始流场、弹丸、火药燃气等多种因素的影响，因此其流场结构相对初始流场较为复杂(见图 4)。另外，上、下两部分膛口冲击波的形状与尺寸也对应得较好。

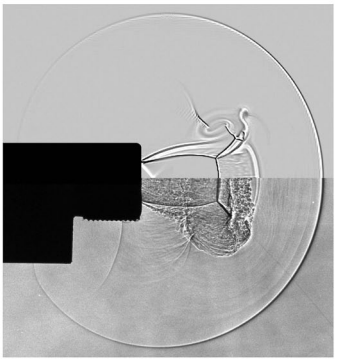


图 3 初始流场

Fig. 3 Precursor flow

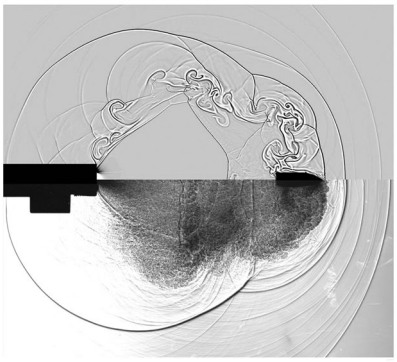


图 4 火药燃气流场

Fig. 4 Propellant flow

3 结果与讨论

首先以典型计算结果分析弹丸在穿越膛口流场过程中的受力和运动学特征，然后分析不同发射条件对弹丸加速结果的影响。

3.1 弹丸后效期速度变化过程

本算例中，身管长度 $l=733$ mm，装药量 $w=1.6$ g，弹丸初速 $v_0=798$ m/s，膛口压力 $p_g=29.5$ MPa。为了减少计算时间，不考虑初始流场的影响。实际上，初始流场对弹丸后效期增速量的影响很小。考虑

与不考虑初始流场时弹丸后效期的增速量分别为 10.3 m/s 和 9.8 m/s。

图 5 为弹头和弹底的平均压力 p_t 和 p_d 以及弹丸所受轴向合力 F 随时间的变化曲线,图 6 为弹丸出膛口后的速度与加速度曲线。从图 5 中可以看出,弹丸出膛口后,弹底压力 p_d 远大于弹头压力 p_t,并且随弹丸离开膛口而迅速衰减,而弹头压力的相对波动则很小。$t=54$ μs 时,弹底压力衰减至与弹头压力相等,弹丸加速度为零,速度达到最大值 v_m(对应图 5 和图 6 中 I 点)。

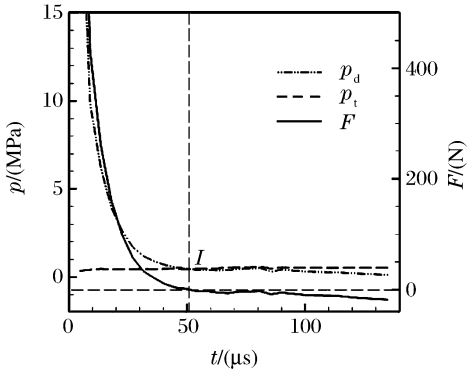


图 5　弹丸受力曲线

Fig. 5　Curve of the force on the projectile

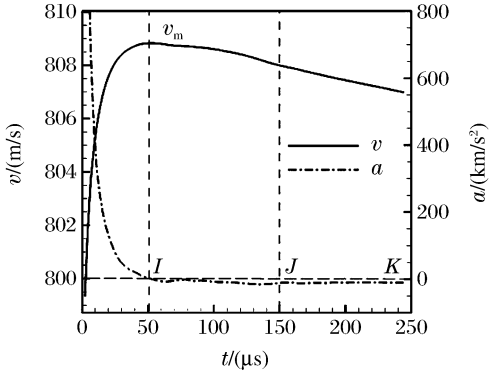


图 6　弹丸速度与加速度曲线

Fig. 6　History of velocity and acceleration of the porjectile

图 7 为弹丸飞越膛口流场过程中的流场压力等值线图(上半部分)和相应时刻的计算阴影图(下半部分)。从图 7 中可以看出,弹丸离开膛口后阻碍了火药燃气的轴向膨胀,形成弹底激波,见图 7(a);随着弹丸向前移动,弹底激波减弱,阵面逐步向上游弯曲,见图 7(b)和图 7(c);之后马赫盘结构在侧方出现,并与弹底激波相交,见图 7(d);随着弹底激波的减弱,马赫盘直径增大,直至形成完整的弧面状马赫盘,见图 7(e);由于马赫盘下游气体为亚音速,弹丸穿越马赫盘后,弹底激波完全消失,因此弹底平均压力与弹头平均压力基本相等,火药燃气射流对弹丸的冲击与加速过程结束;之后弹丸的弹前阻力起主导作用,弹丸进入减速过程,在越过马赫盘下游流场的过程中继续受到火药燃气流场的扰动,加速度出现震荡(图 6 中 I-J 区段),至 150 μs 时弹丸已经飞离火药流场区域,进入自由飞行阶段,此时弹丸的加速度趋于稳定,其曲线近似为水平直线,弹丸速度近似直线衰减(图 6 中 J-K 区段),见图 7(g)。

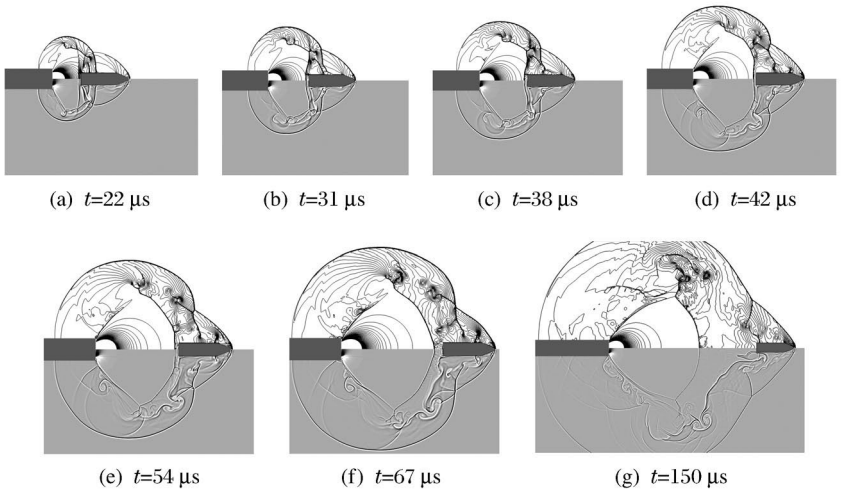


图 7　压力等值线(上部)和计算阴影图(下部)

Fig. 7　Isobars(the upper half) and computational shadow-graphs(the lower half)

根据以上分析可以总结出弹丸在后效期内的受力与速度变化过程:弹丸飞出膛口瞬间,膛内高温高压火药燃气迅速喷出,燃气相对弹丸为超音速,形成弹底激波,弹底压力较大,在弹头和弹底压差的作用下,弹丸经历加速过程;随着弹丸飞离膛口,穿越马赫盘后,弹底激波消失,弹底压力与弹头压力达到平衡,弹丸速度达到最大值;之后,随着弹底压力的降低,弹丸速度在空气阻力的作用下缓慢衰减。

3.2 弹丸后效期影响增速量的因素

通过 9 个算例分析装药量 w、弹丸质量 m 和口径 d 对弹丸后效期增速量的影响。表 1 为各发射条件的膛口流场算例的特征参数。

表 2 给出了计算获得的最大速度值 v_m 及相应时间弹底位置 x_d、增速量 Δv、增速时间 Δt 及其增速率 $\Delta v/v_0$。

表 1 主要初始参数

Table 1 Primary initial parameters

No.	d/(mm)	l/(mm)	m/(g)	w/(g)	v_0/(m/s)	p_g/(MPa)
C1	7.62	733	7.90	0.80	477.5	11.9
C2	7.62	733	7.90	1.03	580.0	17.2
C3	7.62	733	7.90	1.60	798.8	29.5
C4	7.62	733	3.00	1.60	920.0	15.6
C5	7.62	733	5.00	1.60	856.0	22.1
C6	7.62	733	10.00	1.60	769.9	33.8
C7	7.62	733	15.00	1.60	720.1	41.6
C8	5.80	304	4.15	1.73	685.0	68.5
C9	12.70	927	48.28	17.00	814.0	88.7

表 2 计算结果

Table 2 Computational results

No.	x_d/d	v_m/(m/s)	Δv/(m/s)	Δt/(μs)	$(\Delta v/v_0)$/(%)
C1	4.7	483.6	6.1	76	1.28
C2	4.8	587.4	7.4	65	1.27
C3	5.5	808.8	9.8	53	1.22
C4	4.7	933.0	11.8	40	1.28
C5	5.1	866.8	10.8	47	1.26
C6	5.8	779.3	9.4	58	1.21
C7	7.3	728.3	8.3	79	1.15
C8	8.3	708.2	23.2	70	3.38
C9	9.2	836.2	22.2	142	2.72

由表 1 和表 2 可以看出,在算例 C1～C3 中,弹丸质量相同,随装药量的增大,弹丸膛口速度和增速量亦增大,增速率大小相近(最大相差 0.06%)。图 8 给出了算例 C1～C3 中最大速度和增速率随装药量的变化关系。由图 8 可以看出,在本研究的计算条件下,当弹丸与身管不变时,改变装药量使弹丸出口增速量与膛口速度的比率几乎不变。

在口径和装药量不变的情况下,弹丸质量变化(算例 C3～C7)引起膛口压力、初速和增速率的变化如图 9 所示。由图 9 可以看出:在一定范围内,膛口压力与弹丸质量成正比;随着弹丸质量的增加,增速率缓慢下降,并呈线性趋势,但增速率下降幅度较小(最大相差 0.13%),可以认为,在一定范围内,弹丸质量的变化对后效期弹丸增速率的影响并不大。

对于算例 C1～C7、C8 和 C9,口径和计算条件均相差较大。5.8 mm(C8)和 12.7 mm(C9)口径枪的

增速率分别为 3.38%和 2.27%,远大于 7.62 mm(C1～C7)口径的增速率(增速率最大为 1.28%),其主要原因是前两者的膛口压力分别为 68.5 和 88.7 MPa,远大于 7.62 mm 口径枪的膛口压力(最大为 41.6 MPa),使弹丸的加速时间和增速量变大。

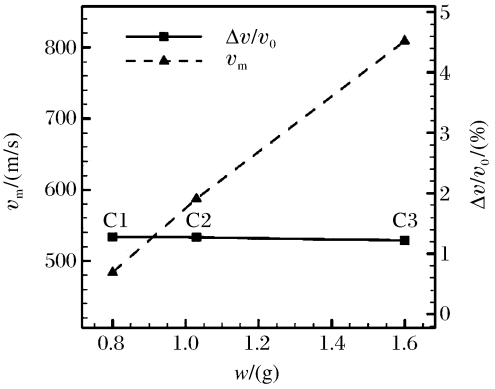


图 8　相同口径和弹丸质量、不同装药量条件下弹丸的最大速度和增速率

Fig. 8　Maximum velocity and growth rate of velocity for different charges and same cabiber and bullet mass

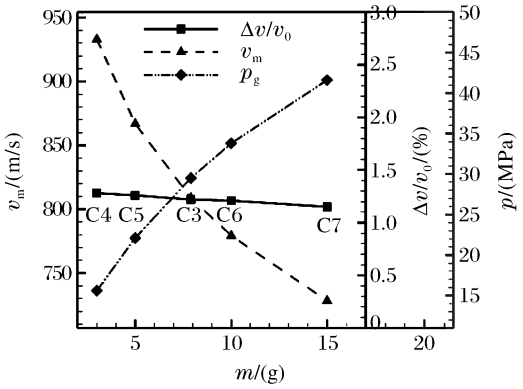


图 9　相同口径和装药量、不同弹丸质量条件下膛口压力、弹丸的最大速度和增速率

Fig. 9　Muzzle pressure, maximum velocity and growth rate of velocity for different bullet mass and same cabiber and charge

4　结　论

通过数值方法对不同装药量、不同弹丸质量和不同口径条件下的 9 个算例进行了数值模拟,根据数值结果对后效期内弹丸穿越膛口流场的动力学过程和弹丸的加速特点等进行了详细分析,得到如下几点结论。

(1) 在本研究计算条件下,弹丸在后效期内的增速率最大可超过 3%,增速量引起的定距引信炸点误差较大,在进行引信设计时需要进行初速修正。

(2) 弹丸出膛口后其最大速度出现在弹丸越过马赫盘时,即弹底平均压力接近大气压力时(在发射方向合力约为零)。

(3) 在身管和弹丸种类不变的情况下,改变装药量对弹丸后效期增速率的影响较小;在身管和装药量不变的条件下,改变弹丸质量对增速率影响较小,增速率在一定范围内呈线性分布。

References:

[1] Editorial Board of Science and Technology Dictionary of Weapon Industry. Science and Technology Dictionary of Weapon Industry: Ballistics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1991: 4-84. (in Chinese)
《兵器工业科学技术词典》编辑委员会. 兵器工业科学技术辞典:弹道学 [M]. 北京:国防工业出版社, 1991: 4-84.

[2] Ma S J, Zhang H. Study on the range systems of small caliber air bursting range fuzes [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missles and Guidance, 2004, 24(4): 338-344. (in Chinese)
马少杰,张　河. 小口径空炸定距引信的定距体制研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2004, 24(4): 338-344.

[3] Fan W T. Implementation study on burst point turns-counting control technique of W fuze [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
范文涛. 计转数炸点控制技术在 W 型引信中的应用研究 [D]. 南京:南京理工大学, 2010.

[4] Cayzac R, Carette E, de Roquefort T A. Intermediate ballistic computations and validations [A]//17th International Symposium on Ballistics [C]. Midrand, South Africa, 1998: 1-8.

[5] Gopalapillai R, Kim H D, Setoguchi T, et al. On the near-field aerodynamics of a projectile launched from a ballistic

range [J]. J Mech Sci Tech,2007,21:1129-1138.

[6] Lious M S. A sequel to AUSM:AUSM+ [J]. J Comput Phys,1996,129(2):364-382.

[7] Yan C. Computational Fluid Dynamics Method and Application [M]. Beijing:Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press,2006:124-131. (in Chinese)
闫 超. 计算流体力学方法及应用 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2006:124-131

[8] Jiang X H,Fan B C,Li H Z. Numerical investigation on the muzzle flow with dynamic mesh based on ALE equation [J]. Journal of Computational Mechanics,2008,25(4):563-567. (in Chinese)
姜孝海,范宝春,李鸿志. 基于 ALE 方程的动网格膛口流场数值研究 [J]. 计算力学学报,2008,25(4):563-567.

[9] Weng C S,Wang H. Computational Interior Ballistics [M]. Beijing:National Defense Industry Press,2006:1-38. (in Chinese)
翁春生,王 浩. 计算内弹道学 [M]. 北京:国防工业出版社,2006:1-38

[10] Wang Y,Guo Z Q,Jiang X H. Numerical simulation of propellant gas emptying process in after-effect period [J]. Journal of Gun Launch and Control,2009,(3):63-67. (in Chinese)
王 杨,郭则庆,姜孝海. 后效期火药气体流空过程数值模拟 [J]. 火炮发射与控制学报,2009,(3):63-67.

Numerical Investigations on Acceleration of Projectile in Post-Effect Period

GUO Ze-Qing, JIANG Xiao-Hai, WANG Yang

(*National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *China*)

Abstract: After exiting the muzzle, the projectile continues being accelerated to maximum velocity by the propellant flow. The increasing of velocity in post-effect period has a great influence in the design of weapons and weapon firing precision. The process of firing under different conditions was numerically studied using finite volume method based on moving grids. Force on the projectile and the movement of the projectile were discussed. When and where the projectile reach its maximum velocity as well as the velocity increasing rate and the factors influences it was analyzed in detail. The result shows that the rate of increasing velocity may be over 3%, and is hardly affected by bullet mass and explosive charge.

Key words: muzzle flow; post-effect period; projectile acceleration