

文章编号: 1001-1455(2008)02-0161-05

随行装药方案提高大口径火炮初速的数值预测*

杨京广^{1,2}, 余永刚²

(1. 空军第一航空学院, 河南 信阳 464000;

2. 南京理工大学, 江苏 南京 210094)

摘要: 采用固体随行装药技术提高现役大口径火炮初速, 为工程应用提供理论指导。基于随行装药在 30 mm 弹道炮上的实验和数值模拟取得的良好结果, 在 100 mm 加农炮火炮构造参数和装填条件不变的条件下, 采用固体随行装药方案, 考虑弹丸改变质量, 建立固体随行装药零维模型, 并依据模型编写模拟软件对内弹道性能进行了模拟分析, 探讨了不同随行装药量、不同点火延迟时间以及不同形状火药对火炮膛压、初速的影响。模拟结果可以用来指导 100 mm 加农炮随行装药的设计和实验。

关键词: 爆炸力学; 随行装药; 数值模拟; 内弹道; 点火延迟

中图分类号: O389; TQ562

国标学科代码: 130 · 35

文献标志码: A

1 引言

为适应未来高技术战争的需要, 对付 21 纪高性能飞机、导弹、舰船、地面装甲车辆和掩体以及在大纵深宽阵面实施火力支援, 要求弹丸速度有较大幅度的提高。传统的方法已经难以有根本性的突破。只有采用新的发射原理和发射技术, 才能给火炮领域带来一场革命。

目前一些新的技术途径有: 电热炮、电磁炮、液体发射药火炮、氢气炮、随行装药、冲压发射等, 但从与现有火炮的相容性来说, 随行装药的技术途径最佳。随行装药技术仅改变装药结构, 在现有火炮最大膛压不变的情况下, 提高弹底压力, 降低了膛底与弹底之间的压力梯度^[1], 达到了改善火炮内弹道性能和提高初速的目的。

国外弹道学者^[2-3]在随行装药的理论和实验上做了大量工作, 美国国防部近年来一直将它列入“超高速射弹”关键技术之一而加以优先重点发展; 笔者^[4-5]也在 30 mm 弹道炮上采用自行设计的随行装药实验弹进行过大量内弹道的实验, 并建立了固体随行装药零维内弹道模型, 编制了模拟软件, 模拟结果与实测结果^[5]吻合较好。由于经典模型在指导实践上的简化、实用, 本文中采用随行装药经典模型从理论上预测大口径火炮提高初速的潜力。

2 随行装药内弹道经典模型^[1]

2.1 物理模型

为了简化推导过程, 使数学模型简单实用, 提出以下假设:

- (1) 弹后空间的火药气体呈热力学平衡态, 用平均参量来近似反映膛内主要特征;
- (2) 所有火药的燃烧服从几何燃烧定律;
- (3) 用次要功计算系数 φ 修正各种次要功, 包括火药燃气的摩擦损耗和热散失等;
- (4) 火药燃烧生成物的成分始终保持不变。即火药力、余容及绝热指数均为常数。

2.2 数学模型

- (1) 主装药形状函数及燃速方程

* 收稿日期: 2006-09-11; 修回日期: 2007-01-08

作者简介: 杨京广(1978—), 男, 硕士, 讲师。

$$\psi_s = \begin{cases} \chi_s z_s (1 + \lambda_s z_s + \mu_s z_s^2) & 0 < z_s \leq 1 \\ \chi_s z_s (1 + \lambda_s z_s) & 1 < z_s \leq z_k \\ 1 & z_s > z_k \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{dz_s}{dt} = \frac{u_s}{e_{s1}} p^{n_s}, \quad z_s = \frac{e_s}{e_{s1}}$$

(2) 随行装药形状函数及燃速方程 ($t > t_D$)

$$\psi_t = \begin{cases} \chi_t z_t (1 + \lambda_t z_t + \mu_t z_t^2) & 0 < z_t \leq 1 \\ \chi_{ts} z_t (1 + \lambda_{ts} z_t) & 1 < z_t \leq z_{tk} \\ 1 & z_t > z_{tk} \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{dz_t}{dt} = u_t p^{n_t}, \quad z_t = \frac{e_t}{e_{t1}}$$

式中: χ 、 λ 、 μ 为主装火药形状函数特征量, χ_s 、 λ_s 为分裂点主装火药形状函数特征量; χ_t 、 λ_t 、 μ_t 为随行火药形状函数特征量, χ_{ts} 、 λ_{ts} 为分裂点随行火药形状函数特征量。下标 s 表示主装药, t 表示随行药, D 表示点火延迟。

(3) 弹丸速度方程

$$v = dl/dt \quad (3)$$

(4) 弹丸运动方程

$$\frac{dv}{dt} = \frac{Sp}{\varphi(m - m_t \psi_t)} \quad (4)$$

(5) 内弹道基本方程

$$Sp(l + l_\psi) = f_s m_s \psi_s + f_t m_t \psi_t - 0.5\theta\varphi(m - m_t \psi_t)v^2 \quad (5)$$

式中:

$$l_\psi = \begin{cases} l_0 [1 - \Delta/\rho_s - \Delta(\alpha - 1/\rho_s)\psi_s] \\ l_0 [1 - \Delta/\rho_s - \Delta(\alpha - 1/\rho_s)\psi_s] + l'_0 [1 - \Delta'/\rho_t - \Delta'(\alpha - 1/\rho_t)\psi_t] \end{cases} \quad t > t_D$$

$\Delta = m_s/V'_0$, 为主装药装填密度; $\Delta' = m_t/V_t$, 为随行药装填密度; $l_0 = V'_0/S$, 为主装药室容积缩径长; $l'_0 = V_t/S$, 为随行药室容积缩径长。

(6) 采用随行装药结构后的药室容积^[6]

$$V'_0 = V_0 - V_t, \quad V_t = (m_t/m_s)V_0 \quad (6)$$

式中: V_0 为常规装药药室容积, V'_0 为采用随行装药结构后的药室容积, V_t 为随行药占去的药室容积。

3 随行装药方案

100 mm 加农炮火炮构造参数和装填条件为: 药室容积 $V_0 = 818 \text{ cm}^3$, 炮膛面积 $S = 78.4 \text{ cm}^2$, 弹丸行程 $l = 4.748 \text{ m}$, 挤进压力 $p_0 = 30 \text{ MPa}$, 次要功因数 $\varphi = 1.22$, 绝热指数 $k = 1.2$, 主装药质量 $m_s = 5.5 \text{ kg}$, 主装药火药力 $f_s = 968 \text{ kJ/kg}$, 主装药密度 $\rho_s = 1.6 \text{ g/cm}^3$, 主装药燃速系数 $u_s = 16.8 \text{ nm}/(\text{s} \cdot \text{Pa}^n)$, 主装药燃速指数 $n_s = 0.827$, 余容 $\alpha = 1 \text{ cm}^3/\text{g}$, 火药形状函数特征量 $\chi = 1.35$, $\chi\lambda = -0.35$ 。发射药采用双芳-3, 18/1 火药, 实测确定的最大膛压为 334.8 MPa , 初速为 886.6 m/s 。我们要在火炮构造参数、装填条件和最大膛压不变的情况下采用随行装药方案, 来提高火炮初速。

采用随行装药后弹丸结构示意图如图 1 所示, 随行药可以采用普通单基火药, 随行药药量可调, 随行药量的增加带来弹重的增加和主装药室容积的变化, 随行药的密封仍然采用点火延迟机构和后螺盖, 延迟时间可调。

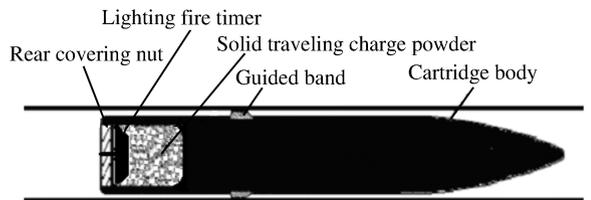


图 1 随行装药结构示意图

Fig. 1 Schematic drawing solid traveling charge structure

4 随行装药参数变化对火炮初速的影响

根据模型编制的软件,对 100 mm 加农炮随行装药方案进行模拟。在保证最大压力为 334.8 MPa 的条件下,针对不同点火延迟时间(t_D)、不同随行装药量(m_t)和不同形状火药对初速的影响进行模拟预测。寻找最佳的点火延迟时间和随行装药量,为大口径火炮进行随行装药试验提供理论指导。

4.1 点火延迟时间的影响

采用 5/7 单基药为随行药,第一峰值压力 334.8 MPa,随行装药量 1.0 kg,弹重 16.6 kg,由公式(6)计算得到药室容积 $V'_0=6.414 \text{ dm}^3$,分别模拟出不同点火延迟时间的 $p-t$ 曲线,如图 2 所示。具体数据参见表 1,其中 v_g 为炮口速度。

表 1 随行装药量为 1.0 kg 的预测结果

Table 1 Predicted results for traveling charge mass 1.0 kg

序号	t_D/ms	p_{m1}/MPa	p_{m2}/MPa	$v_g/(\text{m/s})$	$\Delta v/v_g$
0		334.8		885.6	0
1	5.8	334.8	259.3	906.6	0.024
2	5.2	334.8	318.1	928.7	0.049
3	4.8	334.8	353.6	939.2	0.061

表 1 给出了不同点火延迟时间形成的初速和第二峰值压力等结果,由预测的结果可以分析得到,当点火延迟时间保证在超过第一峰值时间的情况下,点火延迟时间越长,压力曲线下方面积越小,形成的初速越小,因此点火延迟时间应尽量靠近第一峰值。由点火延迟时间为 4.8 ms($p_D/p_{m1}=0.85$)的曲线可以看出,第二峰值超过了第一峰值,会影响射击安全,不满足条件,所以点火延迟时间也不能过于靠近第一峰值出现的时间。由我们研制的点火延迟机构误差在 $\pm 0.3 \text{ ms}$ 之间,可将点火延迟时间设计在 5.2 ms,此时的压力 p_D 为第一峰值压力 p_{m1} 的 80%,初速相对增加量为 4.9%。

4.2 随行装药量的影响

采用 5/7 单基药为随行药,取一个合适的随行药点火延迟时间, $t_D=(5.2\pm 0.3) \text{ ms}$,即压力点取在 $p_D/p_{m1}=0.80$,弹重随随行装药量的增加而增加,药室容积 V'_0 由公式(6)计算得到,作为计算条件的主装药量 m_s 是个未知量,但它的确定可以通过数值模拟程序反复计算,直到主装药量 m_s 的值将第一峰值压力调到 334.8 MPa,即为满足条件的主装药量 m_s ,表 2 中主装药量 m_s 即是多次调试得到的结果。

对表 2 中不同随行装药量条件模拟出的 $p-t$ 曲线如图 3 所示,对预测结果进行分析可看出,在第一峰值压力后 $p_D/p_{m1}=0.80$ 时, $t_D=(5.2\pm 0.3) \text{ ms}$ 的范围之内,初速随着随行装药量的增加而增加,第二峰值也随着随行装药量的增加而增加,当随行药量增至 1.2 kg 时第二峰值过高。因此,随行药量可以取在 $(1.0\pm 0.1) \text{ kg}$ 。

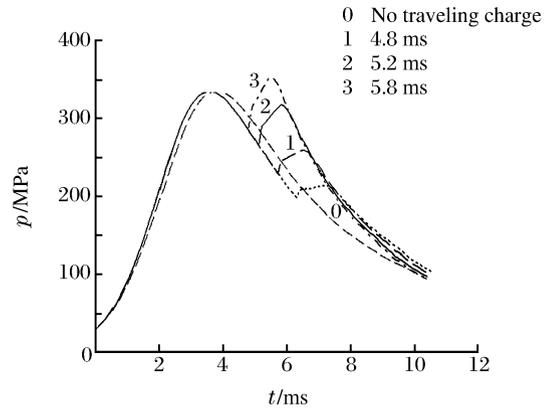


图 2 不同点火延迟时间的 $p-t$ 曲线

Fig. 2 $p-t$ curves for different ignition lag times

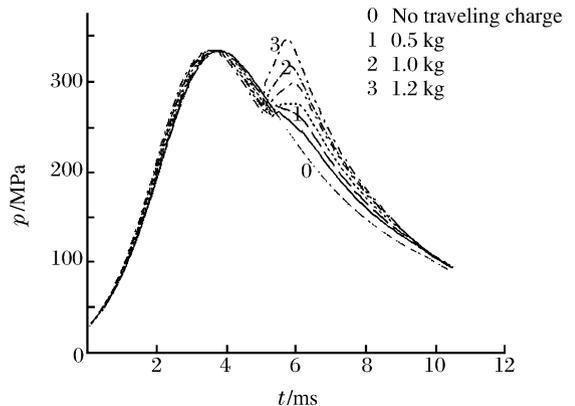


图 3 不同随行装药量的 $p-t$ 曲线

Fig. 3 $p-t$ curves for different traveling charge masses

表 2 改变随行装药量的预测结果 ($p_D/p_{m1}=0.80$)

Table 2 Predicted results of different traveling charge masses

序号	m_t/kg	m_s/kg	m/kg	t_D/ms	p_{m1}/MPa	p_{m2}/MPa	$v_g/(m/s)$	$\Delta v/v_g$
0		5.500	15.6		334.8		885.6	0
1	0.5	5.094	15.6+0.5	5.4	334.8	273.4	904.9	0.022
2	1.0	4.692	15.6+1.0	5.2	334.8	318.1	928.7	0.049
3	1.2	4.532	15.8+1.2	5.1	334.8	348.5	939.6	0.058

4.3 火药形状的影响

不同形状火药作为随行药时也会产生不同的效果。取 4.2 节中效果比较好的随行装药量为 1.0 kg 的条件： $p_D/p_{m1}=0.80$ 时，即 $t_D=(5.2\pm 0.3)$ ms，随行装药量 1.0 kg，弹重 16.6 kg，药室容积 $V'_0=6.414$ dm³，主装药量 $m_s=4.692$ kg。对减面燃烧火药 3/1 和增面燃烧火药 5/7 做随行药情况分别模拟。如图 4 所示，曲线 1 为用减面燃烧火药 3/1 作为随行火药，火药点火后立即产生大量火药气体使压力迅速上升，在 $t_D=(5.2\pm 0.3)$ ms 时，使第二峰值压力超过 334.8 MPa；而曲线 3 为用增面燃烧火药 5/7 作为随行火药，火药点燃时压力上升较缓；曲线 2 为用 3/1、5/7 各 0.5 kg 火药作为随行装药，可以看出压力增长速度在曲线 1、3 之间，第二峰值压力也在 1、3 之间，初速如表 3 所示，变化不大。

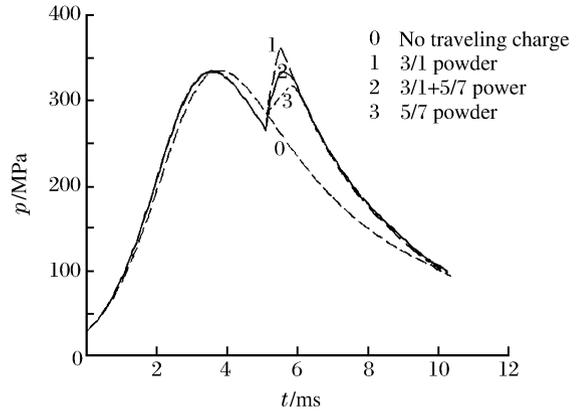


图 4 不同随行装药的 $p-t$ 曲线

Fig. 4 $p-t$ curves for different traveling charges

表 3 不同形状随行火药的预测结果

Table 3 Predicted results of different shape traveling charge powders

序号	随行药形状	t_D/ms	p_{m1}/MPa	p_{m2}/MPa	$v_g/(m/s)$	$\Delta v/v_g$
0			334.8		885.6	0
1	3/1	5.2	334.8	363.5	933.7	0.054
2	5/7	5.2	334.8	318.1	928.7	0.048
3	3/1+5/7	5.2	334.8	333.9	931.6	0.051

5 结 论

(1) 点火延迟不同对初速有一定影响，当点火延迟时间保证在超过第一峰值后，点火延迟时间越长，压力曲线下方面积越小，炮口初速越小，因此点火延迟时间应尽量靠近第一峰值。

(2) 在合适的点火延迟时间内，炮口初速和第二压力峰值随着随行装药量的增加而增大。不恰当的点火延迟时间，可能得不到比常规装药高的初速。

(3) 随行装药采用不同形状的火药会产生不同的效果，可通过调整不同形状火药的比例可以实现较优的内弹道性能。

参考文献：

[1] 翁春生,王浩. 计算内弹道学[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
 [2] Bear P G. Parametric study of a 40 mm air defense gun using conventional and traveling charge[R]. AD2A 193032, 1988.

- [3] Tompkins R E. Traveling charge gun firings using very high burning rate propellants[R]. ADA 203307, 1989.
- [4] 杨京广, 余永刚. 固体随行装药内弹道模型及数值模拟[J]. 火炮发射与控制, 2006(2):1-5.
YANG Jing-guang, YU Yong-gang. Interior ballistic model and numerical simulation of solid traveling charge[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2006(2):1-5.
- [5] 杨京广. 固体随行装药内弹道实验及数值计算[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [6] 金志明. 高速推进内弹道学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.

Velocity prediction of big caliber gun based on traveling charge scheme

YANG Jing-guang^{1,2*}, YU Yong-gang²

(1. *The First Aeronautical Institute of Air Force, Xinyang 464000, Henan, China;*
2. *Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China*)

Abstract: The theory of interior ballistic course of solid traveling charge was studied to increase the initial velocity of a big caliber gun. Based on the good results in tests and numerical simulations in the 30 mm gun of traveling charge, a zero-dimensional interior ballistic model of solid traveling charge was developed by keeping the fire data and charge conditions of the 100 mm gun same and considering the projectile mass variable. The developed model was used to numerically analyze the interior ballistic performances and to explore the effects of traveling charge mass, ignition lag time and charge power shape on the interior pressure and initial velocity of the gun. Computed results can provide an instruction for the design and experiment of the 100 mm gun of traveling charge.

Key words: mechanics of explosion; traveling charge; numerical simulation; interior ballistics; lighting fire delay

* Corresponding author: YANG Jing-guang
E-mail address: yangjingguang78@yahoo.com.cn
Telephone: 86-376-6570069