

文章编号: 1006-9941(2014)06-0834-06

一种提高炮射智能弹药初速的新型发射装药方案

邹华^{1,2}, 陆欣¹, 周彦煌¹, 赵润祥¹

(1. 南京理工大学能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094; 2. 南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 基于再生式液体炮(RLPG)及差动原理,提出了一种提高炮射智能弹药初速的新型随行装药方案,其特点是在保持射弹过载不变条件下,大幅度提高火炮工作容积利用率和初速。这种装药技术便于与次口径脱壳弹设计技术匹配,设计出高升阻比滑翔弹,从而更有利于提高火炮的射程。导出了差动随行装药火炮内弹道模型。数值计算表明,160 mm口径火炮采用这种新型装药方案,在限定最大膛压为350 MPa、射弹底部最大压力为 $p_{2,m} \leq 318$ MPa、飞行弹重为43.4 kg及弹丸行程为7.64 m的条件下,取随行药量9.2 kg、主装药量13.41 kg,弹丸初速相对常规装药可提高26%,火炮工作容积利用率提高约28%。飞行弹丸采用次口径滑翔弹时,弹径为130 mm,采用修正质点外弹道模型计算得到的火炮最大射程可增大到99 km。

关键词: 智能弹药; 随行装药; 内弹道学; 差动原理; 增程技术

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2014.06.023

1 引言

炮射智能弹药发展迅速,已经成为现代战争不可或缺或短缺的弹药之一^[1],然而这类弹药抗过载能力有限。随行装药是与传统火炮发射技术相兼容,又能显著提高火炮初速的有效装药技术^[2-6]。国内外研究过的随行装药方案,按其工作模式有捆绑式、弹底粘结式和包容式等^[7-8]。但所有这些传统随行装药方案^[3-8]在提高射弹初速的同时最终都将伴随射弹底部压力的明显增加,也即伴随射弹过载的增加。对于智能弹药而言,增加过载是不允许的。为了克服传统随行装药的固有缺陷,本研究在汲取传统随行装药技术、脱壳弹设计技术和再生式液体发射药火炮(RLPG)技术^[9]的优点基础上,提出了一种基于差动原理的新型随行装药发射方案,简称为差动随行装药方案。该装药方案不仅能在限定射弹过载条件下大幅度提高初速,而且便于利用次口径脱壳弹技术减小飞行弹丸的飞行阻力,从而有效增大射程。

2 差动随行装药及发射过程理论模型

2.1 结构及原理

图1为研究提出的差动随行装药结构及其发射过

程示意图。差动随行弹药由缸形底座、飞行弹丸(滑翔弹)和贮能室三部分组成,贮能室内填充固体发射药。缸形底座在膛内工作期间相当于活塞缸,出炮口后分离为卡瓣,脱离飞行弹丸。它的底部开有喷射孔。差动随行弹药的设计应满足如下准则:①缸形底座速度(或加速度)始终大于飞行弹丸的速度(或加速度);②贮能室内随行装药及其燃气必须在指定位置($l_{k1} \leq 0.75l_g$)喷射完毕;③喷射进入弹后空间的随行药粒要求在指定位置($l_{k2} \leq 0.85l_g$)燃烧完毕。满足该设计准则的相应数学表达式分别为:

$$\frac{dv_{p2}}{dt} > \frac{dv_{p1}}{dt} \quad (1)$$

$$l_{k1} \leq 0.75l_g \quad (2)$$

$$l_{k2} \leq 0.85l_g \quad (3)$$

$$\text{其中 } l_{k1} = \int_0^{t_{k1}} v_{p2} dt \quad (4)$$

$$l_{k2} = \int_0^{t_{k2}} v_{p2} dt \quad (5)$$

式中, v_{p1} 、 v_{p2} 分别为缸形底座和飞行弹丸运动速度, $m \cdot s^{-1}$; t_{k1} 、 t_{k2} 分别为随行药喷射结束时间和燃烧结束时间,s; l_g 为弹丸行程,m。运用差动原理,即通过合理选择和匹配随行弹药各组合件结构、尺寸、质量(材料)、随行药品号、喷口打开时间与喷口尺寸大小,使不同组合件所承受的推力和产生的加速度(速度)不同,满足式(1)~(5)的要求,迫使随行贮能室容积逐步压缩变小和自行喷射。同时通过控制随行药点

收稿日期: 2013-10-24; 修回日期: 2014-01-15

作者简介: 邹华(1976-),女,讲师,主要从事兵器科学与技术、工程力学方面的研究。e-mail: zouhua_nj@sina.com

火,实现随行装药的点火延迟。当贮能室底部压强大于弹底压强时,随行工质即可从喷射孔喷出实现向弹后空间加质加能。

这种情况下,差动随行弹药的组合设计和内弹道优化设计依赖于全新的发射过程理论模型。本研究给出了差动随行弹药动力学模型。对于弹后空间即内弹道模型,需要考虑随行后喷作用,建立修正 Lagrange 假定条件下的内弹道方程组。限于篇幅,仅扼要给出几个主要方程。

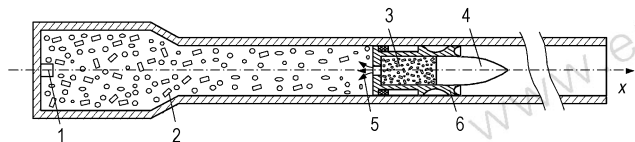


图1 差动随行装药结构及发射过程示意图

1—底火, 2—药粒, 3—贮能室, 4—飞行弹丸(滑翔弹), 5—射流, 6—缸形底座

Fig.1 Schematic diagram of interior ballistic model of differential traveling charge firing concept

1—artillery primer, 2—powder grain, 3—energy storage chamber, 4—projectile(gliding projectile), 5—jet flow, 6—cylinder base

2.2 基本假定

为建立差动随行装药发射过程理论模型,提出如下假定:

- (1) 忽略差动弹药沿身管运动过程中的章动影响,忽略随行药及燃气的转动效应;
- (2) 贮能室内工作介质沿轴向服从 Lagrange 分布;
- (3) 弹后空间采用修正的 Lagrange 假定,工质密度呈均匀分布,速度服从线性分布,但应考虑随行工质后喷的影响(见图2);
- (4) 不考虑贮能室变形及与边界的热交换;
- (5) 其它假定与传统内弹道模型相同。

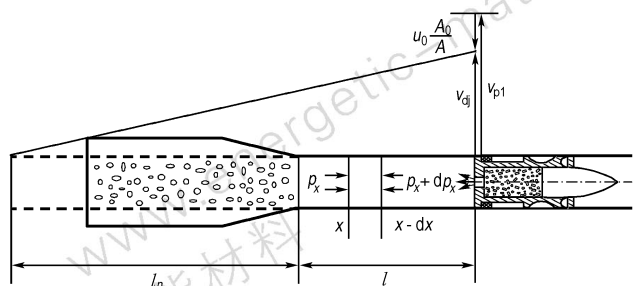


图2 修正 Lagrange 假定条件下弹后空间介质速度沿轴向分布示意图

Fig.2 Schematic diagram of medium velocity distribution behind projectile based on modified Lagrange assumption

2.3 差动随行弹药动力学方程组

(1) 缸形底座运动方程:

$$(A-A_0)p_d - A_2 p_1 = \varphi_1 m_1 \frac{dv_{p1}}{dt} \quad (p_d > p_0) \quad (6)$$

式中, A 、 A_0 、 A_2 分别为喷射孔面积、炮膛横截面积和贮能室内腔横截面积, m^2 ; p_d 、 p_1 分别为弹底压力和贮能室左端面压力, Pa; φ_1 为次要功系数, 无量纲; m_1 为缸形底座的质量, kg; p_0 为启动阻力, Pa。

(2) 飞行弹丸运动方程:

$$A_2 p_2 = m_2 \frac{dv_{p2}}{dt} \quad (7)$$

式中, p_2 为贮能室右端面压力, Pa; m_2 为飞行弹丸的质量, kg。

(3) 随行工质运动方程:

$$A_2(p_1 - p_2) + \dot{m}_t u_0 = m_t \frac{dv_{tm}}{dt} \quad (8)$$

式中, v_{tm} 为随行工质平均速度, $m \cdot s^{-1}$; u_0 为喷孔燃气流出速度, $m \cdot s^{-1}$; m_t 为随行工质质量, kg; \dot{m}_t 为喷孔流出的质量流量, $kg \cdot s^{-1}$ 。

(4) 随行工质质量 m_t :

$$m_t = m_{t0} - \int_0^t \dot{m}_t dt \quad (9)$$

式中, m_{t0} 为初始随行工质质量, kg。

(5) 喷孔流出的质量流量 \dot{m}_t 由气相质量流量和固相质量流量两部分组成, 因此有:

$$\dot{m}_t = \dot{m}_{tg} + \dot{m}_{tp} \quad (10)$$

(6) 喷孔气相质量流量 \dot{m}_{tg} :

$$\dot{m}_{tg} = C_{Dg} A_0 \rho_{gt} \varepsilon u_0 \quad (11)$$

式中, C_{Dg} 为气相流量系数, 无量纲; ρ_{gt} 为喷孔流出的气相密度, $kg \cdot m^{-3}$; ε 为空隙率, 无量纲。

(7) 喷孔颗粒相质量流量 \dot{m}_{tp} :

$$\dot{m}_{tp} = C_{Dp} A_0 \rho_{pt} (1 - \varepsilon) u_0 \quad (12)$$

式中, C_{Dp} 为固相流量系数, 无量纲; ρ_{pt} 为随行工质密度, $kg \cdot m^{-3}$ 。

(8) 喷孔燃气流出速度 u_0 :

$$u_0 = \begin{cases} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} R_t T_g \left[1 - \left(\frac{p_d}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} & \left(\frac{p_d}{p_1} > \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \right) \\ C_a \left(\frac{p_d}{p_1} \leq \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \right) \end{cases} \quad (13)$$

式中, γ 为燃气比热比, 无量纲; T_g 为贮能室内燃气温度, K; C_a 为声速, $m \cdot s^{-1}$; R_t 为燃气常数, $J \cdot (mol \cdot K)^{-1}$ 。

(9) 贮能室气相密度 ρ_{gt} :

$$\rho_{gt} = \frac{m_{tg}}{A_2 x_t \varepsilon} \quad (14)$$

式中, x_t 为贮能室空间长度, m。

(10) 贮能室空率 ε :

$$\varepsilon = 1 - \frac{m_{tp}}{\rho_{pt} A_2 x_t} \quad (15)$$

(11) 贮能室空间长度 x_t :

$$x_t = x_{t0} - \int_0^t (v_{p1} - v_{p2}) dt \quad (16)$$

式中, x_{t0} 为贮能室长度初值, m。

(12) 贮能室气相质量 m_{tg} :

$$m_{tg} = \int_0^t (\dot{m}_{tgc} - \dot{m}_{tg}) dt \quad (17)$$

式中, \dot{m}_{tgc} 为贮能室燃气生成速率, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(13) 贮能室固相质量 m_{tp} :

$$m_{tp} = m_{t0} - \int_0^t (\dot{m}_{tg} + \dot{m}_{tp}) dt - m_{tg} \quad (18)$$

(14) 贮能室燃气生成速率 \dot{m}_{tgc} :

$$\dot{m}_{tgc} = \frac{m_{tp}}{1 - \psi_t} \frac{d\psi_t}{dt} \quad (19)$$

式中, ψ_t 为随行药已燃体积比, 无量纲。

(15) 贮能室留存随行药已燃体积比 ψ_t ^[10]:

$$\psi_t = \begin{cases} \chi z_t (1 + \lambda z_t + \mu z_t^2) & (0 \leq z_t \leq 1) \\ \chi_s z_t (1 + \lambda_s z_t) & (1 < z_t \leq z_k) \end{cases} \quad (20)$$

式中, χ, λ, μ 为随行药药形系数, 无量纲; χ_s, λ_s 为随行药分裂碎块药形系数, 无量纲; Z_t 为相对已燃弧厚, 无量纲。

(16) 随行药相对已燃弧厚 z_t ^[10]:

$$\frac{dz_t}{dt} = \frac{u_1}{e_1} \rho_{tm}^n \quad (21)$$

式中, e_1 为随行药初始弧厚的一半, m; u_1 为燃速系数, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; n 为燃速指数, 无量纲; ρ_{tm} 为贮能室平均压力, Pa。

(17) 贮能室平均压强 ρ_{tm} :

$$\rho_{tm} = p_1 - \frac{1}{2} \rho_t \bar{M} x_t - \frac{1}{6} \rho_t \bar{N} x_t^2 \quad (22)$$

式中, \bar{M}, \bar{N} 为组合量, 分别为:

$$\bar{M} = \frac{(A - A_0) \rho_d - A_2 p_1 v_{p1} (v_{p2} - v_{p1})}{\varphi_1 m_1 + x_t} \quad (23)$$

$$\bar{N} = \frac{1}{x_t} \left[\frac{A_2 p_2}{m_2} - \frac{(A - A_0) \rho_d + A_2 p_1}{\varphi_1 m_1} \right] \quad (24)$$

(18) 贮能室混合密度 ρ_t :

$$\rho_t = \frac{m_{tg} + m_{tp}}{A_2 x_t} \quad (25)$$

(19) 弹芯底部压强 p_2 :

$$p_2 = p_1 - \rho_t \bar{M} x_t - \frac{1}{2} \rho_t \bar{N} x_t^2 \quad (26)$$

(20) 贮能室气体状态方程:

$$\rho_{tm} \left(A_2 x_t - \frac{m_{tp}}{\rho_{pt}} - m_{tg} \alpha_t \right) = m_{tg} R_t T_g \quad (27)$$

式中, α_t 为随行药气体余容, m^3/kg 。

(21) 贮能室能量守恒方程:

$$A_2 x_t [\rho_{gt} \varepsilon h_g + \rho_{pt} (1 - \varepsilon) h_p] = \frac{1}{\theta} \int_0^t \dot{m}_{tgc} dt - \int_0^t \dot{m}_{tg} h_g dt - \int_0^t \dot{m}_{tp} h_p dt + A_2 \int_0^t p_1 v_{p1} dt - A_2 \int_0^t p_2 v_{p2} dt \quad (28)$$

式中, h_p, h_g 分别为随行药及其燃气比焓, $\text{Pa} \cdot \text{m}^3$; f 为随行药火药力, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$; $\theta = \gamma - 1$, γ 为比热比, 无量纲。

2.4 弹后空间主要内弹道方程

(22) 流入弹后的随行药生成燃气质量 m_{tgo} :

$$m_{tgo} = \int_0^t (\dot{m}_{tg} + \dot{m}_{tgi}) dt \quad (29)$$

(23) 流入弹后的随行固相质量 m_{tpo} :

$$m_{tpo} = \int_0^t (\dot{m}_{tp} - \dot{m}_{tgi}) dt \quad (30)$$

(24) 流入弹后的随行药气体生成速率 \dot{m}_{tgi} :

$$\dot{m}_{tgi} = \frac{\int_0^t \dot{m}_{tp} dt d\psi_t}{1 - \psi_t} \quad (31)$$

(25) 弹底工质速度修正值 v_{dj} :

$$v_{dj} = \frac{(\sum_{i=1}^N \omega_i) v_{p1} - 2 \int_0^t \dot{m}_t v_0 dt}{\sum_{i=1}^N \omega_i + \int_0^t \dot{m}_t dt} \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (32)$$

式中, ω_i 为第 i 种主装药量, kg。

(26) 喷孔后喷流体相对身管的速度 v_0 :

$$v_0 = v_{p1} - u_0 \quad (33)$$

(27) 内弹道基本方程

$$\sum_{i=1}^N f_i \omega_i \psi_i + f_t m_{tgo} - A p (l + l_\psi) = \frac{\theta}{2} (\varphi_1 m_1 v_{p1}^2 + m_2 v_{p2}^2 + m_t v_{tm}^2) + \frac{\theta}{6} \left(\sum_{i=1}^N \omega_i + \int_0^t \dot{m}_t dt \right) v_{dj}^2 \quad (34)$$

式中, f_i 为第 i 种主装药火药力, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$; l 为弹丸行程, m; l_ψ 为药室有效自由空间缩颈长, m。

(28) 弹后空间压力分布 p_x :

$$p_x = p_d + \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i \frac{dv_{p1}}{dt} - \dot{m}_t (2v_0 + v_{dj})}{2A(l + l_0)^2} [(l + l_0)^2 - x^2] \quad (35)$$

式中, l_0 为药室缩颈长, m 。

3 差动随行装药发射过程计算分析

基于上述理论模型, 采用龙格-库塔法^[11]编程进行数值求解。对 160 mm 口径火炮采用表 1 基本参量, 其中主要约束条件为最大膛压 p_m 、飞行弹丸底部最大压力 p_{2m} 和弹丸行程长 l_g , 通过调节主装药量 ω_i 、随行药量 m_{10} 及其药形与弧厚 $2e_{1i}$ 等, 得到的结果如表 2。计算中, 选择的优化参量为弹丸初速 v_0 和身管工作容积利用率 η_g 。有必要说明, 表中缸形底座质量 m_1 是影响计算结果的一个重要参量, 在本研究条件下, 经简单估算, 取 $m_1 = 2.0 + 0.5m_{10}$, 单位为 kg, 其右端第一项表 1 计算用基本参量一览表

Table 1 Primary parameters of 160 mm gun for calculation

d/mm	l_g/m	W_0/m^3	p_m/MPa	$f_i/\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	$f/\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	m_{10}/kg	A_2/m^2
160	7.64	25.5×10^{-3}	350	100×10^4	125×10^4	7.2 ~ 9.2	16.286×10^{-3}

Note: d is gun caliber, l_g is run length, W_0 is chamber volume, p_m is maximum bore pressure, f_i is powder force of main charge, f is powder force of traveling charge, m_{10} is mass of traveling charge, A_2 is cross sectional area of energy storage chamber.

表 2 内弹道计算结果

Table 2 Calculated results of interior ballistic

scheme	$2e_{1i}/\text{mm}$	ω_i/kg	m_{10}/kg	m_1/kg	m_2/kg	$v_0/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	p_{dm}/MPa	p_{2m}/MPa	p_g/MPa	η_g	$A_0/\times 10^{-3} \text{m}^2$
1	2.1	14.34	7.2	5.6	44.4	1179.3	322.8	315.8	121.7	0.599	3.551
2	2.1	13.92	8.2	6.1	43.9	1193.2	323.4	315.1	125.8	0.611	3.996
3	2.1	13.41	9.2	6.6	43.4	1204.6	323.6	315.3	129.7	0.619	4.452
4	2.1	14.07	7.2	5.1	50	1112.1	325.5	320.1	118.7	0.596	3.181
5	2.1	13.73	8.2	6.1	50	1115.0	326.5	318.3	121.9	0.611	3.644
6	2.1	13.23	9.2	6.6	50	1117.0	327.9	316.8	125.2	0.616	4.241
common charge	2.3	16.90	—	—	50	957.5	315.4	—	56.0	0.482	—

Note: $2e_{1i}$ is web thickness of main charge, ω_i is mass of main charge, m_1 is mass of cylinder base, m_2 is mass of projectile, v_0 is muzzle velocity, p_{dm} is maximum base pressure, p_{2m} is maximum right-hand pressure of energy storage chamber, p_g is muzzle pressure, η_g is gun working volume utilization rate, A_0 is injection orifice area.

身管工作容积利用率 η_g 及初速 v_0 的增加, 归功于压力分布的改善。从图 3 和图 4 所示弹底压力-弹丸行程曲线 (p_2-l 曲线) 上可以看到这一点。对于常规装药, 当弹底压力上升至最大点之后, 压力呈快速下降趋势。而差动随行装药通过适当调整主装药和随行药药量的比例, 特别通过随行装药自行向弹后持续加质加能, 弹底压力即使过了最大点, 其下降趋势也比较缓慢, 即形成平台效应。由图 3 和图 4 可见, 随着随行药量 m_{10} 增大, 压力曲线下面积不断增大, 即身管工作容积利用率不断提高, 因此弹丸初速必然随之上升。

表 2 中的方案 4 ~ 6, 取飞行弹丸质量 $m_2 = 50 \text{ kg}$ 不变, 发射总弹重随着随行药量的增加而增加。计算结果表明, 尽管缸形底座质量的存在明显增大了发射的组合弹丸总重量, 但差动随行发射方案仍然取得了

考虑了它应具有的基本质量, 第二项考虑了所携带的随行药量对它的影响。表 2 中 p_g 为炮口处压力。

表 2 中的方案 1 ~ 3, 以保持飞行弹丸底部最大压力 p_{2m} 和总弹重 $m_q = m_1 + m_2 = 50 \text{ kg}$ 不变为前提, 调整缸形底座质量 m_1 、飞行弹丸质量 m_2 和随行药量 m_{10} 。计算结果表明, 随着 m_{10} 的增大, 弹丸初速 v_0 和身管工作容积利用率 η_g 都明显增大。如方案 3, $m_{10} = 9.2 \text{ kg}$, 主装药量 $\omega_i = 13.41 \text{ kg}$, 当总装药量 ($\sum \omega_i + m_{10}$) 相对常规装药 ($\sum \omega_i$) 增加约 7.1 kg 时, 初速提高了 $247 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 其增幅约为 26%, 身管工作容积利用率 η_g 增大 28%。

约 16% 左右的增速效果。在这里特别指出, 所有这些计算都是以不增加飞行弹丸底部最大压力 p_{2m} 为前提

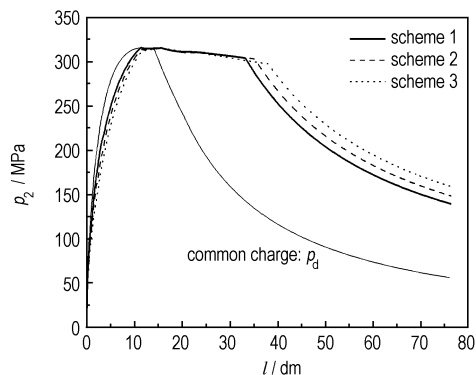


图 3 方案 1 ~ 3 的 p_2-l 曲线

Fig. 3 p_2-l curves of scheme 1 to 3

的, 因为对炮射智能弹药而言, 射弹承受的最大过载或承受的最大压力是限定的, 只有在这种前提下讨论提高初速和射程才是有意义的。

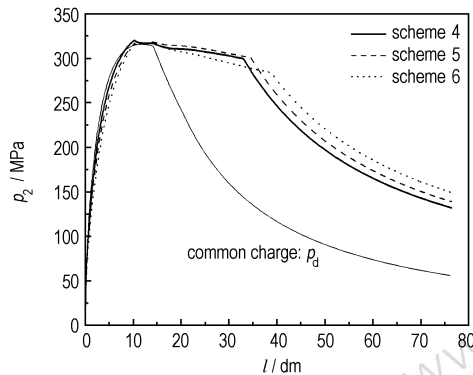


图4 方案4~6的 p_2 - l 曲线

Fig. 4 p_2 - l curves of scheme 4 to 6

4 射程估算

由上述可知, 差动随行装药可以在不增加射弹过载的前提下大幅度地提高射弹初速。在此基础上, 如果再采用次口径脱壳弹设计技术, 即取飞行弹丸直径小于炮膛内径, 优化弹形设计, 提高射弹升阻比, 则可使射弹射程大幅增加。即在内弹道阶段, 利用差动随行发射原理, 使飞行弹丸获得较大的炮口速度; 射弹出炮口后, 缸形底座与飞行弹丸自动分离; 在外弹道阶段, 由于飞行弹丸直径小于火炮身管直径, 具有优化的气动特性, 不仅飞行阻力较小, 而且具有较好的滑翔功能, 最终能使火炮射程显著地提高。

取发射的飞行弹丸直径 $d_2 = 130$ mm, 按低旋尾翼稳定滑翔弹设计。在此基础上, 采用修正质点外弹道模型^[12]计算射程, 计算中不同高程区间取不同标准气象条件。计算结果表明, 对应于表2中方案3, 射弹质量 $m_2 = 43.4$ kg, 初速 $v_0 = 1204.6$ m·s⁻¹, 射程可达99 km; 而常规装药发射50 kg弹重、957.5 m·s⁻¹初速的射程约为64 km, 因此, 表2中方案3比常规装药的射程增加了35 km。对应于表2中的方案6, 射弹质量 $m_2 = 50$ kg时, 初速 $v_0 = 1117.0$ m·s⁻¹, 其射程可达89 km, 相对常规装药增加约25 km。

5 结论

提出了一种以火炮为平台发射智能弹药提高初速的新型随行装药方案。该方案基于再生式液体炮(RLPG)及差动原理提出的发射技术, 其主要优点和

功能在于: 在限定的射弹过载条件下, 能大幅度提高火炮工作容积利用率和初速, 并且便于与次口径脱壳弹设计技术相匹配, 飞行弹丸可采用高升阻比滑翔弹弹形, 为进一步增大火炮射程提供了有利条件。建立了差动随行装药火炮内弹道理论模型。计算表明, 对口径 $d = 160$ mm火炮, 身管长 $l_g = 7.64$ m, 总弹重 $m_q = 50$ kg, 飞行弹丸质量 $m_2 = 43.4$ kg, 随行药量 $m_{10} = 9.2$ kg, 身管工作容积利用率可提高28%; 初速可提高26%。相应射程可增大到99 km, 比常规装药增大了约35 km。本文研究为提高炮射智能弹初速和射程提供了理论支持。

参考文献:

- [1] 杨绍卿. 灵巧弹药工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
YANG Shao-qing. Smart munition engineering[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [2] 邹华, 张领科, 周彦煌. 采用组合发射提高某型火炮初速的理论研究[J]. 火炸药学报, 2013, 36(2): 69-75.
ZOU Hua, ZHANG Ling-ke, ZHOU Yan-huang. Theoretical study of increasing projectile initial velocity by using combined firing[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2013, 36(2): 69-75.
- [3] 赵博文, 余永刚, 潘玉竹. 随行装药退火算法的优化设计及数值模拟[J]. 火炸药学报, 2010, 33(5): 75-78.
ZHAO Bo-wen, YU Yong-gang, PAN Yu-zhu. Numerical simulation and optimization design on annealing algorithm of traveling charge[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2010, 33(5): 75-78.
- [4] 杨京广, 余永刚. 随行装药内弹道一维气动力模型及数值模拟[J]. 火炸药学报, 2009, 32(1): 13-16.
YANG Jing-guang, YU Yong-gang. The one-dimensional interior ballistic aerodynamic model and numerical simulation of traveling charge[J]. Journal of Explosives & Propellants, 2009, 32(1): 13-16.
- [5] 杨京广, 余永刚. 随行装药方案提高大口径火炮初速的数值预测[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(2): 161-165.
YANG Jing-guang, YU Yong-gang. Velocity prediction of big caliber gun based on traveling charge scheme[J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(2): 161-165.
- [6] 周彦煌, 王升晨. 120mm反坦克炮采用随行装药提高初速的理论研究[J]. 兵工学报, 1995(3): 5-10.
ZHOU Yan-huang, WANG Sheng-chen. A theoretical study of muzzle velocity augmentation with traveling charges in the 120 mm anti-tank Gun[J]. Acta Armamentarii, 1995(3): 5-10.
- [7] 周彦煌. 固体随行装药内弹道理论模型. 弹道学术会议论文集[C]//厦门: 中国兵工学会-弹道学会, 1992: 23-33.
ZHOU Yan-huang. Interior ballistic model of solid traveling charge. Ballistic Academic Conference Papers[C]//Xiamen: China Ordnance Society-Ballistic Society, 1992: 23-33.
- [8] 王浩. 随行装药理论研究与实验技术方案[D]. 南京: 南京理工大学博士论文, 1992.
WANG Hao. Theory study and experiment technique scheme of traveling charge[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 1992.

- [9] Coffee T P. A combined lumped parameter/one-dimensional blowdown model for the regenerative liquid propellant gun. Technical Report AD-A251779 [R], BRL-TR-3364, U S Army Ballistic Research Laboratory, 1992.
- [10] 金志明. 高速推进内弹道学[M]. 北京: 国防工业出版社. 2001.
JIN Zhi-ming. Interior ballistics of hypervelocity propulsion[M]. Beijing: National Defense Industry Press. 2001.
- [11] 黄明游, 刘播, 徐涛. 数值计算方法[M]. 北京: 科学出版社. 2009.
HUANG Ming-you, LIU Bo, XU Tao. Numerical computation method[M]. Beijing: Science Press. 2009.
- [12] 宋丕极. 枪炮与火箭外弹道学[M]. 北京: 兵器工业出版社. 1993.
SONG Pi-ji. Exterior ballistics of guns and rockets[M]. Beijing: Weapon Industry Press. 1993.

A New Firing Charge Concept of Increasing Intelligent Ammunition Muzzle Velocity

ZOU Hua^{1,2}, LU Xin¹, ZHOU Yan-huang¹, ZHAO Run-xiang¹

(1. School of Energy and Power Engineering, NUST, Nanjing 210094, China; 2. School of Science, NUST, Nanjing 210094, China)

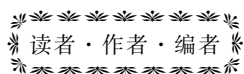
Abstract: A new charge concept for increasing intelligent ammunition muzzle velocity based on differential traveling charge technology which is able to largely increase gun working volume utilization rate and muzzle velocity within the limits of given projectile overload was proposed. With adaption of sub-caliber sabot projectile design technology, this charge technique facilitates the design of high lift-drag ratio gliding projectile, and increases artillery range. A differential traveling principle interior ballistic numeric model was established. Assuming traveling charge mass 9.2 kg and main principal charge mass 13.41 kg, the calculation of 160 mm gun with the new charge technique demonstrates that the projectile muzzle velocity increases by 26% and gun working volume utilization rate increases by 28%, and under the conditions of maximum bore pressure up to 350 MPa, projectile bottom maximum pressure $p_{2m} \leq 318$ MPa, projectile mass 43.4 kg and travel 7.64 m. Through calculation with modified particle external trajectory model for 130mm sub-caliber gliding projectile, this charge technique can extend maximum range to 99 km.

Key words: intelligent ammunition; traveling charge; interior ballistics; differential principle; range extending technology

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2014.06.023



《含能材料》固体推进剂专栏征稿

高能量、低特征信号、低易损、低成本、低污染、灵活能量管理和高可靠性成为当前固体推进剂面临的紧迫课题,为促进其研究,本刊将于2015年开设推进剂研究专栏,以专题报道固体推进剂研究的最新研究进展。欢迎广大学者投稿,来稿时请选择对应的专栏。

《含能材料》编辑部