DOI: 10.11883/1001-1455(2015)01-0070-06

固体差动随行装药高初速火炮内弹道理论分析*

邹 华[1,2],陆 欣[1],周彦煌[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:提出了一种基于差动原理的固体差动随行装药的高初速火炮发射方案,该方案能有效克服传统随行装药技术提高初速必将伴随射弹底部最大压力增加的缺点。它的主要特点是运用差动原理,实现不同组合件之间的速度不同,自动压缩储能室使随行工质向弹后连续喷射,有效抑制和消除了弹丸运动引发的稀疏波影响,提高了火炮工作容积利用率。推导了差动随行组合弹丸不同组合件动力学模型,给出了弹载工质物理量分布关系式。计算结果表明,在最大膛压、飞行弹丸底部最大压力、弹重及弹丸行程等不变条件下,随行药量取 10.2 kg,某大口径火炮的弹丸初速可提高 26%,火炮工作容积利用率提高约 44%。该方案可为火炮提高初速和实现超远程发射提供新的途径。

关键词:爆炸力学;固体随行装药;差动原理;高初速火炮;内弹道学
中图分类号:O389;TJ55 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

近年来,以火炮作为发射平台的智能弹药发展迅速[1]。为实现火炮远程和超远程精确打击,火炮采用随行装药发射智能弹药是一种有效的技术途径。然而,当火炮采用传统随行装药提高初速时,射弹底部最大压力会明显增大,即射弹的过载增加。显然,这对于火炮发射智能弹药是不允许的。为此,本文中在现有随行装药技术[2-5]和液体发射药火炮再生式发射技术[6]基础上,提出一种基于差动原理的新型随行装药方案。该方案不仅能有效控制射弹过载,还能大幅提高射弹的初速,从而增大火炮的射程。

1 固体差动随行发射原理

本文中提出的新型差动随行装药发射方案,随行药可以采用和弹后主装药相同或相近的固体火药,称为固体差动随行装药。图 1 和图 2 分别为传统随行(包容式)和固体差动随行两种装药结构及工质沿轴向的速度与压力分布的示意图。传统随行装药由弹丸、随行容器及储能室内随行药组成。而差动随行装药由缸形底座、飞行弹丸及由它们形成的储能室组成。对比图 1 和图 2 可见,它们在结构和工作原理上有如下不同:

(1)传统随行装药的随行容器与弹丸是固结在一起的,不可相互滑动。而差动随行装药缸形底座与飞行弹丸是可以相互滑动的。

(2)传统随行药室容积是固定不变的,实现喷射的前提是储能室内前端底部压力 p_2、后端底部压力 p_1 和弹底压力 p_d 必须满足 $p_2 > p_1 > p_d$;而差动随行的储能室可以被压缩变小。

(3)弹丸直径不同,差动随行条件下,飞行弹丸直径小于炮管内径,同样质量弹丸的长细比较大。发射过程中,差动随行条件下缸形底座相当于活塞缸,飞行弹丸相当于活塞。飞行弹丸在其底部压力 p_2 作用下加速运动,而活塞缸的运动主要取决于底部外侧压力 p_d 和内侧压力 p_1。设计要求缸形底座与飞行弹丸的加速度满足

$$\frac{\mathrm{d}v_{p1}}{\mathrm{d}t} > \frac{\mathrm{d}v_{p2}}{\mathrm{d}t} \qquad x_t > 0 \tag{1}$$

式中:x_t 为储能室内腔长度,v_{p1}、v_{p2} 分别为活塞缸和活塞的速度。该式是差动随行的充分必要条件,满

* 收稿日期:2013-06-17;修回日期:2013-11-23
第一作者:邹 华(1976—),女,博士研究生,讲师,zouhua_nj@sina.com。

足这一条件，随行储能室内压力分布则满足 $p_1 > p_2$ 和 $p_1 > p_d$，且通过内弹道优化设计可以做到 $p_{2m} < p_{dm}$，p_{2m}、p_{dm} 分别为飞行弹丸底部最大压力和组合弹底最大压力。从而改变了传统随行条件下“弹丸初速提高必将伴随其过载增加”的基本规律。

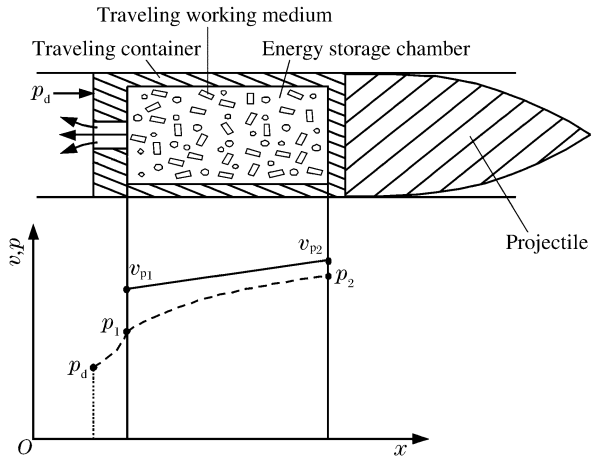

图 1 传统随行工质速度与压力分布

Fig. 1 Velocity and pressure distribution of traditional traveling working medium

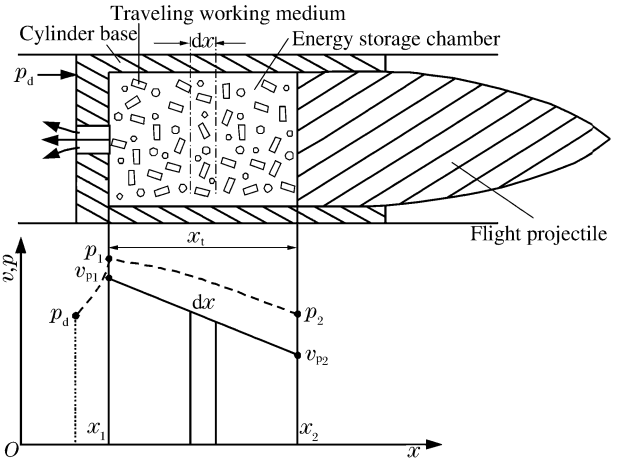

图 2 差动随行工质速度和压力分布

Fig. 2 Velocity and pressure distribution of differential traveling working medium

2　差动随行动力学模型

固体差动随行条件下，与内弹道过程相关的膛内工作区间分为弹后空间和差动随行工作区间两部分。弹后空间与传统随行装药相比没有原则不同，可采用常规内弹道理论与方法建立其内弹道方程组[2]，在此不再重复。本文中重点建立差动随行工作区间动力学方程组。鉴于储能室长度远小于弹后空间长度，所以可采用 Lagrange 假定，即假定随行工质密度均匀分布，而速度呈线性分布。其他假定与传统内弹道模型相同。现将固体差动随行动力学方程组推导如下。

令图 2 中缸形底座、飞行弹丸和弹载随行工质的质量分别为 m_1、m_2 和 m_t，速度分别为 v_{p1}、v_{p2} 和 v_{tm}，其中 v_{tm} 为随行工质(固体药粒及存留燃气)平均速度。分别对缸形底座、飞行弹丸和弹载工质应用牛顿第二定律，则有以下运动方程：

(1) 缸形底座运动方程

$$(A - A_0)p_d - A_2 p_1 = \phi_1 m_1 \frac{dv_{p1}}{dt} \qquad p_d > p_0 \tag{2}$$

式中：A_0、A、A_2 分别为喷射孔面积、炮膛横截面积和储能室内腔横截面积，p_d 和 p_1 分别为缸形底座底部外侧和内侧的压强，ϕ_1 为包含弹带挤进阻力和摩擦作用在内的次要功系数，p_0 为启动阻力。

(2) 飞行弹丸运动方程

$$A_2 p_2 = m_2 \frac{dv_{p2}}{dt} \tag{3}$$

式中：p_2 为飞行弹丸与随行工质相互作用面上的压强。

(3) 弹载随行工质运动方程

$$A_2(p_1 - p_2) + \dot{m}_t u_0 = m_t \frac{dv_{tm}}{dt} \tag{4}$$

式中：u_0 和 $\dot{m}_t$ 分别为通过喷孔的燃气流出速度和流出的气固混合质量流量。

(4) 存留于内腔的随行工质 m_t 是变化的，其当前值为

$$m_t = m_{t0} - \int_0^t \dot{m}_t dt \tag{5}$$

式中：m_{t0} 为弹载随行工质初始质量，而 $\dot{m}_t$ 由下式确定

$$\dot{m}_{\mathrm{t}}=\dot{m}_{\mathrm{tg}}+\dot{m}_{\mathrm{tp}} \tag{6}$$

式中：$\dot{m}_{\mathrm{tg}}$ 和 $\dot{m}_{\mathrm{tp}}$ 分别为通过喷射孔流出的气相和颗粒相的质量流量，分别为

$$\dot{m}_{\mathrm{tg}}=C_{\mathrm{Dg}}A_0\rho_{\mathrm{gt}}\varepsilon u_0 \tag{7}$$

$$\dot{m}_{\mathrm{tp}}=C_{\mathrm{Dp}}A_0\rho_{\mathrm{pt}}(1-\varepsilon)u_0 \tag{8}$$

式中：C_{Dg} 和 C_{Dp} 分别为气相和固相的流量系数，ρ_{gt} 和 ρ_{pt} 分别为随行气相与固相密度，$\rho_{\mathrm{gt}}=m_{\mathrm{tg}}/(A_2x_{\mathrm{t}}\varepsilon)$，$\rho_{\mathrm{pt}}$ 为常量；ε 为随行储能室内腔空隙率，式中空隙率 $\varepsilon=1-m_{\mathrm{tp}}/(\rho_{\mathrm{pt}}A_2x_{\mathrm{t}})$。

(5) 储能室内气、固相质量当前值

$$m_{\mathrm{tg}}=\int_0^t(\dot{m}_{\mathrm{tgc}}-\dot{m}_{\mathrm{tg}})\,\mathrm{d}t \tag{9}$$

$$m_{\mathrm{tp}}=m_{\mathrm{t0}}-\int_0^t(\dot{m}_{\mathrm{tg}}+\dot{m}_{\mathrm{tp}})\,\mathrm{d}t-m_{\mathrm{tg}} \tag{10}$$

式中：$\dot{m}_{\mathrm{tgc}}$ 为储能室内燃气生成速率，由下式确定

$$\dot{m}_{\mathrm{tgc}}=\frac{m_{\mathrm{tp}}}{1-\psi_{\mathrm{t}}}\frac{\mathrm{d}\psi_{\mathrm{t}}}{\mathrm{d}t} \tag{11}$$

式中：ψ_{t} 为储能室内留存随行药粒的已燃相对体积。

(6) 储能室内腔空间长度

$$x_{\mathrm{t}}=x_2-x_1 \tag{12}$$

式中：x_1 和 x_2 分别为储能室内腔左、右端面坐标，分别为 $x_1=\int_0^t v_{\mathrm{p1}}\,\mathrm{d}t+x_{01}$ 和 $x_2=\int_0^t v_{\mathrm{p2}}\,\mathrm{d}t+x_{02}$，其中 x_{01} 和 x_{02} 分别为储能室内腔左、右端面初始坐标。

(7) 储能室内留存随行药相对已燃体积

$$\psi_{\mathrm{t}}=\begin{cases}\chi z_{\mathrm{t}}(1+\lambda z_{\mathrm{t}}+\mu z_{\mathrm{t}}^2) & 0\leqslant z_{\mathrm{t}}\leqslant 1\\ \chi_{\mathrm{s}}z_{\mathrm{t}}(1+\lambda_{\mathrm{s}}z_{\mathrm{t}}) & 1<z_{\mathrm{t}}<z_{\mathrm{k}}\end{cases} \tag{13}$$

式中：z_{t} 为随行药相对已燃弧厚，按下式计算

$$\frac{\mathrm{d}z_{\mathrm{t}}}{\mathrm{d}t}=\frac{u_1}{e_1}p_{\mathrm{tm}}^n \tag{14}$$

式中：u_1 和 n 分别为随行药粒的燃速系数与燃速指数，e_1 为随行药粒初始弧厚的一半，p_{tm} 为储能室内平均压强。

(8) 储能室工质能量守恒方程

$$A_2x_{\mathrm{t}}[\rho_{\mathrm{gt}}\varepsilon h_{\mathrm{g}}+\rho_{\mathrm{pt}}(1-\varepsilon)h_{\mathrm{p}}]=$$
$$\int_0^t f\dot{m}_{\mathrm{tgc}}\,\mathrm{d}t-\int_0^t\dot{m}_{\mathrm{tg}}h_{\mathrm{g}}\,\mathrm{d}t-\int_0^t\dot{m}_{\mathrm{tp}}h_{\mathrm{p}}\,\mathrm{d}t+A_2\int_0^t p_1v_{\mathrm{p2}}\,\mathrm{d}t-A_2\int_0^t p_2v_{\mathrm{p2}}\,\mathrm{d}t \tag{15}$$

式中：f 为随行药的火药力，h_{g} 和 h_{p} 分别为气、固随行工质的比焓。

(9) 储能室内介质沿轴向压力分布

由图 2，由随行工质速度为线性分布假定，即有

$$v_x=\frac{v_{\mathrm{p2}}-v_{\mathrm{p1}}}{x_{\mathrm{t}}}x+v_{\mathrm{p1}} \tag{16}$$

对其求关于 t，x 的偏导数，并应用动量守恒方程，可求得工质的压力分布为

$$p(x)=p_1-\rho_{\mathrm{t}}\overline{M}x-\frac{1}{2}\rho_{\mathrm{t}}\overline{N}x^2 \tag{17}$$

式中：

$$\overline{M}=\frac{(A-A_0)p_{\mathrm{d}}-A_2p_1}{\phi_1m_1}+\frac{v_{\mathrm{p1}}(v_{\mathrm{p2}}-v_{\mathrm{p1}})}{x_{\mathrm{t}}} \tag{18}$$

$$\overline{N}=\frac{1}{x_{\mathrm{t}}}\left[\frac{A_2p_2}{m_2}-\frac{(A-A_0)p_{\mathrm{d}}}{\phi_1m_1}+\frac{A_2p_1}{\phi_1m_1}\right] \tag{19}$$

而混合密度

$$\rho_t = (m_{tg} + m_{tp})/(A_2 x_t) \tag{20}$$

因 $x_1 = 0$ 时，$p(x) = p_1$，所以当 $x = x_t$ 时，有

$$p_2 = p_1 - \rho_t \overline{M} x_t - \frac{1}{2}\rho_t \overline{N} x_t^2 \tag{21}$$

可见，储能室内压力呈抛物型分布。相应可求得储能室平均压力 p_{tm} 表达式为

$$p_{tm} = \frac{1}{x_t}\int_0^{x_t} p(x)\mathrm{d}x = p_1 - \frac{1}{2}\rho_t \overline{M} x_t - \frac{1}{6}\rho_t \overline{N} x_t^2 \tag{22}$$

3　计算结果及分析

对差动随行内弹道方程组采用龙格-库塔法进行数值求解，在计算中，保持火炮最大膛压 p_m 、总弹重（$m_1 + m_2$）及弹丸全行程长 l_g 等参量不变，同时保证飞行弹丸底部最大压力 p_{2m} 不大于常规发射的弹底最大压力 p_{dm} ，通过改变固体随行药量 m_{t0} 、主装药量 ω_1、喷口截面积 A_0 等有关条件，优化差动随行装药发射方案。计算采用的基本参量见表 1。表中 d 为火炮口径，W_0 为药室容积，$2e_1$、$2e_{1t}$ 分别为主装药和随行装药的弧厚，f_1、f_t 分别为主装药和随行装药的火药力。

表 1 某大口径火炮计算参量

Table 1 Calculation parameters of a large caliber gun

d/mm	l_g/m	W_0/m^3	p_m/MPa	$2e_1$/mm	$2e_{1t}$/mm	f_1/(MJ·kg^{-1})	f_t/(MJ·kg^{-1})	A_0/dm^2
155	7.08	0.023	329	2.3～3.2	1.0	1	1	0.28～0.83

计算得到的常规装药和固体差动随行装药不同方案的弹道特征量见表 2，相关的弹道曲线见图 4～7。表 2 中 m_1、m_2 分别为缸形底座和飞行弹丸质量，v_0 为弹丸初速，p_{1m} 为储能室左侧最大压力，p_g 为炮口压力，l_{kt} 为随行药燃烧结束点位置，η_g 为炮膛工作容积利用率。

表 2 不同方案的弹道计算结果

Table 2 Interior ballistic numerical results of different schemes

方案	$2e_1$/mm	m_{t0}/kg	ω_1/kg	m_1/kg	m_2/kg	v_0/(m·s^{-1})	p_{dm}/MPa	p_{1m}/MPa	p_{2m}/MPa	p_g/MPa	l_{kt}/m	η_g
1	2.3	6.2	14.156	7.2	38.3	1 065.0	301.5	315.9	296.5	94.1	3.001	0.626
2	2.3	7.2	13.926	7.2	38.3	1 083.7	302.6	318.3	296.4	102.2	3.237	0.639
3	2.3	8.2	13.695	7.2	38.3	1 100.5	303.4	320.6	296.4	109.4	3.569	0.652
4	2.3	9.2	13.463	7.2	38.3	1 114.1	304.1	322.9	296.4	116.8	3.898	0.662
5	2.6	9.2	15.116	7.2	38.3	1 139.0	301.9	323.0	296.4	128.4	4.279	0.696
6	2.9	9.2	16.510	7.2	38.3	1 165.1	300.9	326.2	296.5	141.7	4.758	0.718
7	2.9	9.2	16.519	5.5	40.0	1 167.4	300.8	325.8	296.9	142.5	4.760	0.718
8	2.9	10.2	16.355	5.5	40.0	1 171.3	301.5	327.5	296.2	148.8	5.035	0.727
常规	2.3		15.248		45.5	930.1	296.6			53.3		0.504

在新的差动随行发射方案条件下，评判弹丸发射过载的弹底压力应该是飞行弹丸底部最大压力 p_{2m}。从表 2 中看到，$p_{2m} < p_{1m}$，$p_{2m} \approx p_{dm}$ 。相反，如果采用传统随行方案，必然有 $p_{2m} > p_{dm}$ 。由图 3 可以看出，当压力上升至最大压力点附近时，常规装药方案的弹底压力呈快速下降趋势，而从图 4 看到，差动随行装药由于通过喷射孔向弹后空间持续加质加能，飞行弹丸底部压力 p_2 会持续一段“平台”时间，之后才缓慢下降。

表 2 中方案 1～4 是在常规装药基础上，通过增大固体随行装药量，改善炮膛工作容积利用率来提高初速。结果表明，在限定 $p_{2m} \leqslant 296.6$ MPa 条件下，当随行药量增大至 9.2 kg（方案 4）时，差动随行装药的炮膛工作容积利用率 η_g 比常规装药增大了 31%，相应的初速提高了 184 m/s，增幅达 20%。

表 2 中方案 5～6 是在方案 4 基础上，通过同时增加主装药量和弧厚来提高初速。计算得出的弹底压力和飞行弹丸底部压力曲线见图 5～6。很显然，调整主装药之后，更能凸显差动随行装药发射方案的优势，特别是使得压力曲线的下降段更加平缓，意味着炮膛工作容积利用率进一步提高，弹丸初速也随之上升。结果表明，方案 6 同样取飞行弹丸底部压力为 $p_{2\mathrm{m}} \leqslant 296.6$ MPa、随行药量 $m_{\mathrm{t}0}=9.2$ kg，当主装药弧厚 $2e_1$ 增大 0.6 mm 时，主装药量又增加了 3.047 kg，与方案 4 比较，初速提高了 51 m/s；炮膛工作容积利用率提高了 0.056，即相对方案 4 又提高了 8%，相对常规方案提高了 42%。

在方案 8 中，将随行药量进一步提高至 10.2 kg，同时考虑到缸形底座可以使用高强度的非金属材料，以减轻其质量，因此取 $m_1=5.5$ kg，而飞行弹丸质量可增大至 $m_2=40$ kg，计算结果表明，相对常规装药，弹丸初速提高了 241 m/s，增幅为 26%，炮膛工作容积利用率提高了 0.223，增幅约 44%。

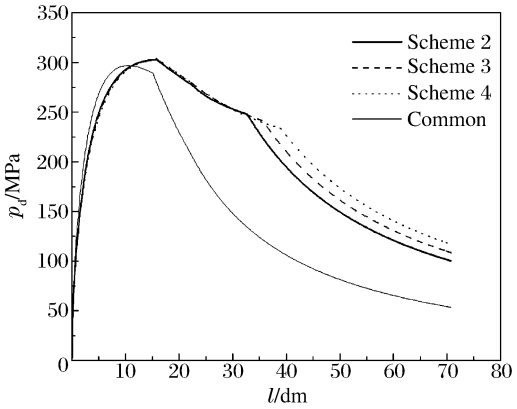

图 3 $m_{\mathrm{t}0}$ 不同时的 p_{d}-l 曲线

Fig. 3 p_{d}-l curves under different $m_{\mathrm{t}0}$

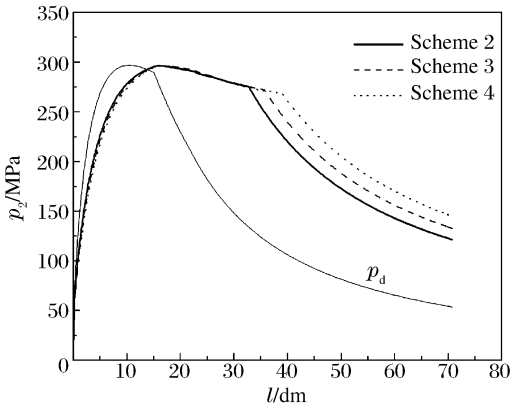

图 4 $m_{\mathrm{t}0}$ 不同时的 p_2-l 曲线

Fig. 4 p_2-l curves under different $m_{\mathrm{t}0}$

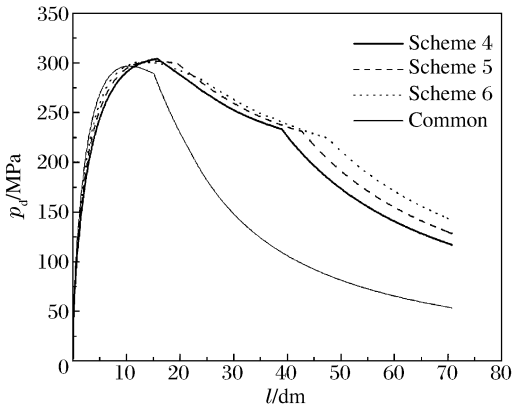

图 5 $2e_1$ 不同时的 p_{d}-l 曲线

Fig. 5 p_{d}-l curves under different $2e_1$

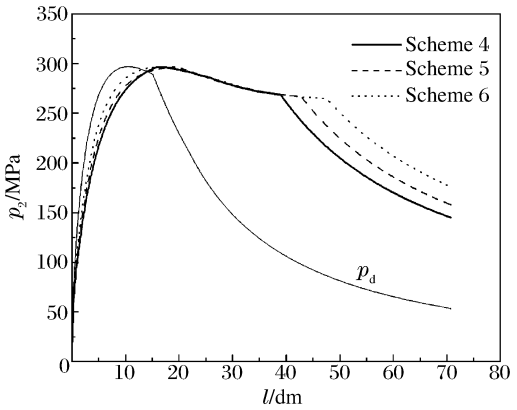

图 6 $2e_1$ 不同时的 p_2-l 曲线

Fig. 6 p_2-l curves under different $2e_1$

4 结 论

提出了一种新的基于差动原理设计的随行装药方案，建立了差动随行动力学模型。通过初步论证表明，运用差动原理实现弹载随行装药向弹后空间自动加质加能是可行的，通过合理设计，可以实现火炮工作容积利用率最大化。算例表明，对某大口径火炮，飞行弹丸底部最大压力 $p_{2\mathrm{m}} \leqslant 296.6$ MPa、弹丸全行程长 $l_{\mathrm{g}}=7.08$ m、发射的全弹重 $m_{\mathrm{q}}=45.5$ kg，当采用差动随行时，取飞行弹重 $m_2=40$ kg、固体随行药量 $m_{\mathrm{t}0}=10.2$ kg，弹丸初速相对常规装药提高了 241 m/s，初速增幅达 26%，相应的炮膛工作容积利用率提高约 44%。特别要指出的是，基于差动原理的新的随行发射方案能有效解决传统随行装药存在的射弹过载问题，同时不再需要使用超高燃速随行火药。

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.

[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] 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.

[4] 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，1992.

[5] 周彦煌，王升晨.120 mm 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.

[6] Morrison W F，Coffee T P. A modified Lagrange pressure gradient for the regenerative liquid propellant gun[R]. BRL-TR-3073. U. S. Army Ballistic Research Laboratory，1990.

Interior ballistic theory based analysis of solid differential traveling charge of high muzzle velocity gun

Zou Hua[1,2]，Lu Xin[1]，Zhou Yan-huang[1]

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

Abstract：A solid traveling charge concept which can be used in high muzzle velocity gun firing is proposed based on differential principle. This concept can effectively overcome disadvantage of traditional traveling charge which increases projectile velocity and projectile base maximum pressure at the same time. A main character of the concept is to realize automatic compression of energy storage chamber and continuous injection of traveling working medium toward the in-bore space through speed difference between different components. Therefore the concept can effectively fill pressure drops of the projectile bottom and improve the utilization rate of gun working volume. The kinetic model of different components of differential traveling projectile and the physical quantity distribution of missile-borne working medium are deduced. With fixed maximum bore pressure，maximum projectile base pressure，projectile mass and travel，etc.，and traveling charge mass 10.2 kg，calculation of some large caliber gun indicates that the projectile muzzle velocity increases by 26% and the utilization rate of gun working volume increases by 44%. This study provides a new technological approach for increasing gun muzzle velocity and realizing ultra-long distance firing.

Key words：mechanics of explosion；solid traveling charge；differential principle；high muzzle velocity gun；interior ballistics

（责任编辑　曾月蓉）