

一种带中心孔的密实随行装药内弹道数值计算及分析

曹永杰¹, 豆松松¹, 赵娜¹, 胡杰^{2,3}, 李志飞¹, 章旺¹

(1. 西北机电工程研究所, 陕西 咸阳 712099; 2. 西安工业大学 机电工程学院, 西安 710021;
3. 中国兵器工业试验测试研究院, 陕西 华阴 714200)

摘要: **目的** 推进密实随行装药技术工程化应用的进程, 提出一种带中心孔的密实随行装药结构方案。**方法** 针对该方案建立相应的内弹道模型, 计算得到不同装药量、不同点火延迟时间条件下随行装药内弹道性能的变化情况。**结果** 受燃尽性约束, 端面燃烧型随行装药药柱设计高度有限, 内弹道性能提升较小。在随行药柱燃速不变的条件下, 带中心孔的随行装药可有效提高随行装药量, 从而显著提高内弹道性能。**结论** 带中心孔的随行装药的点火延迟时间控制精度应为 0.01 ms 级, 对缓燃包覆层设计、加工精度提出了较高要求。

关键词: 火炮; 随行装药; 点火延迟; 内弹道; 发射安全性

中图分类号: TJ410.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)03-0039-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.03.006

Numerical Calculation and Analysis on Interior Ballistics of Compacted Traveling Charge with a Central Hole

CAO Yong-jie¹, DOU Song-song¹, ZHAO Na¹, HU Jie^{2,3}, LI Zhi-fei¹, ZHANG Wang¹

(1. Northwest Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Xianyang 712099, China; 2. School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 7142002, China; 3. Norinco Group Test and Measuring Academy, Huayin 714200, China)

ABSTRACT: In order to promote the engineering application of compacted traveling charge technology, a structured scheme of compacted traveling charge with the central hole was proposed. The corresponding interior ballistic model was established for the scheme, and the variation of the interior ballistic performance of the traveling charge under different charges and different ignition delay time was calculated. The calculation results show that the design height of the end-face combustion traveling charge is limited subject to the flammability constraint, and the interior ballistic performance is improved little. Under the condition of the constant burning rate of the traveling charge, the traveling charge with the central hole can effectively increase the traveling charge mass and thus significantly improve the interior ballistic performance. The control accuracy of the ignition delay time of traveling charge with center hole should be 0.01 ms, which requires high design and machining precision of slow combustion coating layer. The research can guide the design of the delay ignition mechanism of the traveling charge with the

收稿日期: 2022-02-23; 修订日期: 2022-03-15

Received: 2022-02-23; Revised: 2022-03-15

作者简介: 曹永杰 (1987—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为新原理发射与新型弹药技术。

Biography: CAO Yong-jie (1987—), Male, Doctor, Researcher, Research focus: new principle launch and new ammunition technology.

引文格式: 曹永杰, 豆松松, 赵娜, 等. 一种带中心孔的密实随行装药内弹道数值计算及分析[J]. 装备环境工程, 2022, 19(3): 039-045.

CAO Yong-jie, DOU Song-song, ZHAO Na, et al. Numerical Calculation and Analysis on Interior Ballistics of Compacted Traveling Charge with a Central Hole[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(3): 039-045.

coating layer based on slow combustion materials.

KEY WORDS: gun; traveling charge; ignition delay; interior ballistics; firing safety

随行装药技术是一种能有效提高火炮弹丸初速的装药技术,可以在装药与弹丸质量比不变的条件下大幅提高弹道效率,且与现有火炮相容,仅通过改变装药结构即可达到提高弹丸炮口动能的目的^[1]。随行装药概念是 Langweiler 在 1939 年首先提出的,最早的随行装药试验研究起源于第二次世界大战时期的德国。从 20 世纪 50 年代到 90 年代,美国陆军弹道研究所和 Olin 工业公司开展了持续的研究,包括均质和复合的高燃速火药配方、不同的随行装药结构、液体随行装药等研究^[2-4]。我国从 20 世纪 70 年代中期开始研究随行装药技术,在理论和试验方面做了大量工作^[5-10]。如何针对不同的随行方案,合理、有效地控制随行装药的点火时间,是制约随行装药技术工程化应用的一个技术难题^[11]。

进入 21 世纪后,随着发射药技术的发展,随行装药技术在国内外重新获得了高度关注。2006—2009 年,南京理工大学杨京广等人^[12-13]利用 30 mm 弹道炮对包容式固体随行装药进行了内弹道试验,验证了随行装药原理,弹丸初速相对提高 14.9%,并开展了随行装药方案提高大口径火炮初速的数值预测研究^[14]。2012 年,南京理工大学 Liu 等人^[15]开展了阻燃剂包覆药的燃烧特性研究,并在 105 mm 穿甲弹上进行了射击试验。试验结果表明,采用阻燃剂包覆的随行装药方案,在 330、400 MPa 最大膛压下,可以将弹丸初速分别提高 2.8%、4.2%。2014 年,俄罗斯 Ermolaev 等人^[16]将细小的发射药粒进行粘结压实,并包覆聚乙烯醇缩丁醛膜片,制作成随行装药,通过硅橡胶粘在弹丸底部,利用 23 mm 滑膛弹道炮开展了试验研究。结果表明,采用这种压实药块作为随行药,可以提供稳定的燃烧过程,从而使得弹丸初速提高 20% 左右。2015 年,以色列 Michaels 等人^[17]研究了一种基于燃烧室喷射随行装药的推进系统,建立了内弹道模型,与试验结果进行了对比验证。2015 年,中北大学萧忠良团队^[18]将固结应用于随行装药技术,将固结装药直接成形于弹尾圆柱形腔体内,依托固结装药的高密实性,在其端面安装延迟机构。通过开展定容燃烧性能试验,验证了对随行装药点火延迟时间的控制,随行装药燃速最大值是 6/7 发射药的 46 倍。他们采用钢质壳体的随行装药,利用 30 mm 弹道炮进行内弹道试验,在最大膛压基本不变的情况下,弹丸获得了较标准弹丸提高约 6.5%~8.0% 的初速增量^[19-20]。此外,他们还开展了随行药室参数对内弹道性能影响的理论研究^[21]。中北大学祁臣勇等人^[22-23]开展了随行装药优化设计仿真工作。南京理工大学刘怡等人^[24]研究了液体随行装药内弹道计算

中的液滴喷雾模型。

2016 年,西安近代化学研究所梁磊等人^[25]采用 RGD7-4/7 和单樟 2/1 发射药作为随行药,利用 30 mm 火炮开展了内弹道试验验证,在最大膛压 300 MPa 基本不变的条件下,实现了弹丸初速提高 4.3% 的随行效果。2018 年,南京理工大学钱环宇等人^[26]将随行装药与埋头弹药技术相结合,开展了内弹道性能数值分析。2019 年,西北机电工程研究所豆松松等人^[27]开展了包覆随行装药提高炮射导弹内弹道性能的数值研究。

本文在前人研究的基础上,提出了一种带中心孔的密实随行装药方案。针对该方案建立了内弹道模型,开展了内弹道数值计算,分析了各参数变化对弹道性能的影响。

1 内弹道模型

1.1 物理模型

文献[19-20]报道了一种端面燃烧型密实随行装药方案,结构如图 1a 所示。先将多孔小粒药作为基体药,与一定比例的粘结剂预先混合,在适当压力下压制成形于特制的圆柱形金属壳体内;再在药柱端面包覆含能缓燃层,作为延迟点火机构,完成随行装药试样制备。其中,缓燃材料由低燃速火药搭配乙基纤维素在低压条件下压制成形。对于缓燃材料制成的延迟点火机构,主要通过调整缓燃材料的配方或包覆层的厚度来调整点火延迟时间。

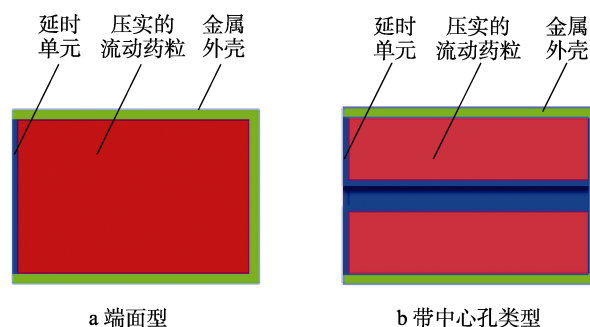


图 1 不同随行装药结构

Fig.1 Schematic diagram of the structure of different traveling charges: a) type of end-face; b) type of central hole

本文在文献[19-20]报道的基础上,提出了一种带中心孔的密实随行装药改进方案,结构如图 1b 所示。预先将带中心孔的密实药压制成形于金属壳体内,利用含能缓燃层对中心孔和端面进行包覆,作为延迟点火机构。在理想条件下,随着弹丸的运动,延迟点火机构以平行层燃烧规律^[28]缓慢燃烧,靠近延迟点火机

构的药柱表面温度上升快。达到着火温度后，随行药柱开始迅速燃烧，生成的高温高压燃气补充了由于弹丸运动造成的压力下降，改善了弹底压力分布，从而提高了高弹丸炮口速度。

该方案的优势在于，将随行药柱的燃烧方式由端面燃烧改进为端面与内孔同时燃烧，药柱等效弧厚从药柱长度改变为径向肉厚（小于半径），从而降低了燃尽性对随行药柱的高燃速要求。当药柱长径比大于 1 时，同等装药条件下对平均燃速的要求可降低 50% 以上，有利于实现工程化应用。

根据带中心孔的密实随行装药内弹道过程特点，建立内弹道模型时，采用如下基本假设：

- 1) 弹后火药气体呈热力学平衡状态，忽略各火药气体之间的热量传递过程；
- 2) 弹后空间火药气体密度和未燃尽主装药颗粒在弹后空间均匀分布，固体颗粒与燃气速度相同；
- 3) 忽略气体黏性及药室断面与炮膛断面之间的影响，过程中各次要功利用次要功计算系数进行修正；
- 4) 包覆层燃烧服从几何燃烧定律，包覆层燃尽时刻，随行药柱开始燃烧；
- 5) 包覆层、随行装药的所有燃烧表面依次被点燃，忽略由于燃气冲刷产生的侵蚀燃烧；
- 6) 包覆层厚度一致，燃烧气体产物不与主装药、随行装药燃气产物发生反应，且忽略其燃烧产物含能；
- 7) 弹丸在达到挤进压力后开始运动；
- 8) 主装药和随行装药均在平均压力下燃烧，且服从几何燃烧定律，燃烧产物组分保持不变。

1.2 数学模型

主装药形状函数：

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

主装药燃速方程：

$$\frac{dz_s}{dt} = \frac{u_{1,s}}{e_{1,s}} p^{n_s} \quad (2)$$

随行装药形状函数：

$$\psi_t = \begin{cases} \chi_t z_t (1 + \lambda_t z_t + \mu_t z_t^2), & 0 < z_t < 1 \\ 1, & z_t \geq 1 \end{cases} \quad (3)$$

随行装药燃速方程：

$$\frac{dz_t}{dt} = \frac{u_{1,t}}{e_{1,t}} p^{n_t} \quad (4)$$

弹丸动力学方程：

$$\frac{dv}{dt} = \frac{Sp}{\varphi(m + \omega_t(1 - \psi_t))} \quad (5)$$

弹丸运动学方程：

$$\frac{dl}{dt} = v \quad (6)$$

能量守恒方程：

$$p(Sl + V_\psi) = f_s \omega_s \psi_s + f_t \omega_t \psi_t - \frac{1}{2} \theta \varphi [m + \omega_t(1 - \psi_t)] v^2 \quad (7)$$

式(7)中：

$$V_\psi = V_0 \left[1 - \frac{\Delta_s}{\rho_s} (1 - \psi_s) - \alpha_s \Delta_s \psi_s \right] + V_{0t} \left[1 - \frac{\Delta_t}{\rho_t} (1 - \psi_t) - \alpha_t \Delta_t \psi_t \right]$$

式(1)~(7)中：下标 s、t 分别表示主装药和随行装药； ψ 为主装药（或随行装药）已燃百分数； z 为主装药（或随行装药）相对燃烧厚度； χ 、 λ 、 μ 为主装药（或随行装药）形状特征量； χ_s 、 λ_s 为主装药药粒分裂后的形状特征量； z_k 为主装药燃烧分裂点； u_1 为主装药（或随行装药）燃速系数； n_1 为主装药（或随行装药）燃速指数； e_1 为主装药弧厚的 1/2（或随行药柱径向肉厚）； p 为膛内平均压力； v 为弹丸速度； S 为火炮身管截面积； m 为弹丸质量； ω_1 为随行药量； l 为弹丸行程； f 为主装药（或随行装药）火药力； k 为主装药（或随行装药）燃气绝热指数； φ 为次要功计算系数； V_0 为药室容积； V_t 为随行药室容积； Δ 为主装药（或随行装药）装填密度； ρ 为主装药（或随行装药）密度； α 为主装药（或随行装药）燃气余容。

2 计算结果与分析

以某型制式火炮为研究对象，以最大膛底压力（膛底压力与平均压力之间的关系见文献[28]）不超过 385 MPa，装药相对燃烧结束点不大于 0.6 为约束条件。主装药选用某高能钝感管状发射药，随行装药选用某高能速燃药，火炮结构诸元见表 1。

表 1 火炮结构诸元

V_0/cm^3	S/cm^2	l/m	m/kg	P_0/MPa
325	10.06	2.96	0.685	30

2.1 端面燃烧型随行装药的内弹道性能

端面燃烧型随行装药的弧厚即为药柱的高度，药柱太长会导致随行药不能在膛内燃尽。因此，针对端面燃烧型随行装药结构，开展了不同药柱高度装药方案的内弹道计算。在相同的点火延迟时间条件下，具有不同药柱高度的端面燃烧型随行装药的内弹道性能计算结果见表 2，膛底压力-时间曲线如图 2 所示。由表 2 可以看出，端面燃烧型随行装药随着药柱高度

表2 端面燃烧型随行装药方案
Tab.2 Traveling charge scheme for end-face combustion

方案	随行药柱高度/mm	随行药量/g	主装药量/g	随行率/%	点火延迟时间/ms	最大膛压/MPa	初速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	主装药燃烧结束点	随行药燃烧结束点
1	15	20.5	291.0	6.6	2.44	384	1190	0.44	0.31
2	20	27.4	286.5	8.7	2.44	383	1187	0.44	0.48
3	25	34.2	282.0	10.8	2.44	380	1180	0.45	0.77

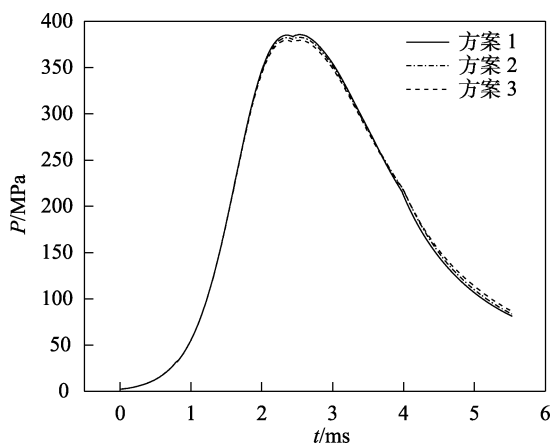


图2 端面燃烧型随行装药的 $P-t$ 曲线

Fig.2 $P-t$ curves of end-face combustion type of traveling charge

的增加,火炮最大膛压、弹丸初速均出现下降,随行药柱的燃烧结束点逐渐靠近炮口位置。由图2可以看出,端面燃烧燃气生成速率低,压力曲线未能形成随行装药典型的压力“双峰”现象,做功面积变化不大。

当药柱高度为15 mm时,燃烧结束点满足要求。当药柱高度达到25 mm时,燃烧结束点为0.77,这明显已不符合内弹道方案设计要求,而这种情况下的随行率(随行药量与总装药量的比值)仅为10.8%,随行率较低。如果药柱高度继续增加,必然出现随行药不能在膛内燃尽的现象,而且内弹道性能也出现明

显下降。端面燃烧不能解决大弧厚随行装药燃尽性的问题,药柱设计高度有限。这就导致装药随行率低,不能产生有效的“压力平台”效应,内弹道性能提升不明显。因此,本文提出了带中心孔密实随行装药的方案。通过设计带中心孔的随行药形,减小随行药柱的弧厚,以降低随行装药对高燃速的要求。下面以中心孔燃烧型随行装药为研究对象,进行不同装药结构的内弹道计算分析。

2.2 药柱高度对中心孔随行装药内弹道性能的影响

在相同的点火延迟时间条件下,具有不同药柱高度的中心孔燃烧型随行装药的内弹道性能计算结果见表3,膛底压力-时间曲线如图3所示。由表3可以看出,采用中心孔燃烧型随行装药方案后,随行装药量明显增加,且随行药都能满足燃尽性要求。在最大膛压基本不变的条件下,中心孔燃烧型方案1的弹丸初速较端面燃烧型方案1提高了18 m/s,弹丸初速增加明显。这是因为中心孔装药增大了燃烧表面积,提高了燃气生成率,从而提高了内弹道性能。但随着随行药量的增加,弹丸初速增加变缓。从图3可以看出,随行装药在最大压力点之后开始燃烧,压力-时间曲线出现了明显的“双峰”现象,且持续时间较长,火药燃气的做功面积明显提升。膛压曲线过渡平滑,内弹道过程较为稳定。

表3 中心孔燃烧型随行装药方案
Tab.3 Traveling charge scheme for central hole combustion

方案	随行药柱高度/mm	随行药量/g	主装药量/g	随行率/%	点火延迟时间/ms	最大膛压/MPa	初速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	主装药燃烧结束点	随行药燃烧结束点
1	40	54.5	268.5	16.9	2.44	384	1208	0.39	0.32
2	50	68.2	259.5	20.8	2.44	384	1217	0.36	0.30
3	60	81.8	250.5	24.6	2.44	384	1222	0.35	0.29

2.3 点火延迟时间对中心孔随行装药内弹道性能的影响

随行装药的关键在于如何精确控制点火延迟时间,以保证在最大压力点之后的某一时刻随行装药开始燃烧,生成的燃气迅速补充弹丸运动造成的弹后压力降,从而保证弹丸能够在较高的弹底压力下不断运动。相同装药量条件下,不同点火延迟时间对内弹道

性能的影响见表4,相应的火炮膛底压力-时间曲线如图4所示。

由表4可以看出,在随行药量不变的条件下,点火延迟时间将对火炮内弹道性能产生较大的影响。以 $t=2.44$ ms为时间基准,当点火延迟时间减小0.02 ms时,二次压力峰值达到389 MPa,略高于设计要求的最大膛压;当点火延迟时间减小0.14 ms时,二次压力峰值出现明显增大,达到410 MPa,这对火炮发射

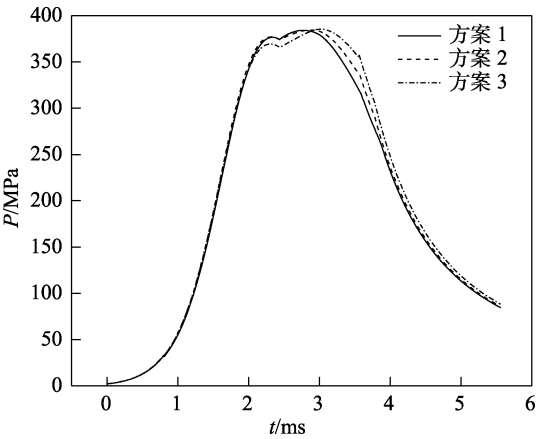


图 3 中心孔燃烧型随行装药的 $P-t$ 曲线
Fig.3 $P-t$ curves of central hole combustion type of traveling charge

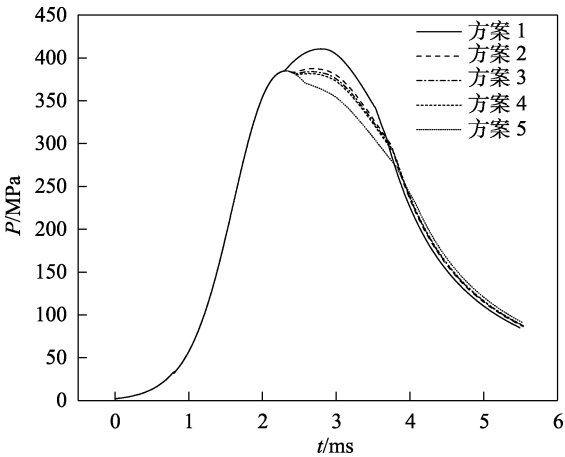


图 4 不同点火延迟时间条件下的 $P-t$ 曲线
Fig.4 $P-t$ curves of different ignition delay time

表 4 不同点火延迟时间条件下的内弹道性能计算结果
Tab.4 Calculation results of interior ballistics under the condition of different ignition delay time

方案	随行药量/ g	主装药量/ g	随行率/ %	点火延迟时间/ ms	最大膛压/ MPa	初速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	主装药燃烧 结束点	随行药燃烧 结束点
1	68.2	259.5	20.8	2.30	410	1228	0.34	0.28
2	68.2	259.5	20.8	2.42	389	1219	0.36	0.29
3	68.2	259.5	20.8	2.44	384	1217	0.36	0.30
4	68.2	259.5	20.8	2.46	384	1208	0.36	0.37
5	68.2	259.5	20.8	2.58	384	1194	0.37	0.44

安全性造成了较大的影响；当点火延迟时间增加 0.02 ms 时，火炮最大膛压保持不变，弹丸初速下降 9 m/s；当点火延迟时间增加 0.14 ms 时，弹丸初速下降达到 13 m/s，燃烧结束点也出现了明显的后移。

结合图 4 可知，对于中心孔燃烧型随行装药方案，当点火延迟时间超过某一时刻之后，随行装药弹道性能虽有所下降，但随行药柱仍可在膛内燃尽。但是当点火延迟时间小于某一时刻之后，随行装药过早着火燃烧，二次压力峰值明显上升，对火炮发射安全性带来不利的影响。从点火延迟时间变化量来看，中心孔随行装药点火延迟时间控制精度应达到 0.01 ms 级。因此，对于中心孔随行装药内弹道研究来说，点火延迟时间的控制精度是一个非常重要的研究内容，它直接关系到随行装药的能量释放时机，是主装药与随行装药之间的重要纽带。

3 结论

- 1) 在现有随行药燃速条件下，端面燃烧型随行装药药柱设计高度空间有限，导致装药随行率较低，内弹道性能提升较小。
- 2) 在随行药燃速需求不变的情况下，中心孔燃烧型随行装药可有效提高随行药的装药量，增加了随行药的燃烧渐增性，提高了装药弹道性能。
- 3) 中心孔燃烧型随行装药点火延迟时间控制精

度应为 0.01 ms 级，这对缓燃包覆层配方设计、加工精度提出了较高的要求。

参考文献：

[1] 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.

[2] BAER P G. Simulation of Closed Chamber Burning of very-High Burning Rate Propellant[R]. US Government science and Technology Report, 1988.

[3] TOMPKINS R E, WHITE K J, OBERLE W F, et al. Traveling Charge Gun Firings Using very High Burning Rate Propellants[R]. US Government science and Technology Report, 1988.

[4] BAER P G. A Parametric Study of a 40-mm Air Defense Gun Using Conventional and Traveling Charge Propellant[R]. US Government science and Technology Report, 1988.

[5] 余永刚, 陆欣, 周彦煌, 等. 30 mm 火炮液体随行装药的实验研究[J]. 弹道学报, 1997, 9(3): 91-93.
YU Yong-gang, LU Xin, ZHOU Yan-huang, et al. Experimental Research on Liquid Propellant Traveling Charge of 30 mm Gun[J]. Journal of Ballistics, 1997, 9(3): 91-93.

- [6] 李锋, 张青藩, 张振铎, 等. 片状火药在随行装药技术中的应用[J]. 兵工学报, 1997, 18(2): 174-177.
LI Feng, ZHANG Qing-fan, ZHANG Zheag-duo, et al. The Application of Disk Propellants in Traveling Charge[J]. Acta Armamentarii, 1997, 18(2): 174-177.
- [7] 王浩. 随行装药效果与敏感性研究[J]. 弹道学报, 1996, 8(1): 20-25.
WANG Hao. Study of the Effect and Sensitivity for Traveling Charge[J]. Journal of Ballistics, 1996, 8(1): 20-25.
- [8] 王浩. 粘结式随行装药两相流内弹道模型及其计算[J]. 弹道学报, 1998, 10(4): 31-36.
WANG Hao. Interballistic Simulation and Computation of Two Phase Flow of Travelling Charge[J]. Journal of Ballistics, 1998, 10(4): 31-36.
- [9] 陆欣, 周彦煌, 余永刚, 等. 整装式液体随行装药燃烧的实验与数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 1998, 18(3): 203-207.
LU Xin, ZHOU Yan-huang, YU Yong-gang, et al. The Numerical Simulation of Bulk Liquid Traveling Charge Combustion[J]. Explosion and Shock Waves, 1998, 18(3): 203-207.
- [10] 李锋, 罗运军. 片状随行装药的两相流数值模拟[J]. 应用力学学报, 1999, 16(3): 1-6.
LI Feng, LUO Yun-jun. The Simulation of Disk Traveling Charge Two Phase Flow[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 1999, 16(3): 1-6.
- [11] 周彦煌, 余永刚, 陆欣, 等. 整装式液体随行装药关键技术研究[J]. 兵工学报, 1997, 18(3): 226-229.
ZHOU Yan-huang, YU Yong-gang, LU Xin, et al. On a Novel Concept in Bulk-Loaded Liquid Traveling Charge[J]. Acta Armamentarii, 1997, 18(3): 226-229.
- [12] 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.
YANG Jing-guang. Experiment and Numerical Simulation on Interior Ballistics of Solid Traveling Charge[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006.
- [13] 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]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2009, 32(1): 13-16.
- [14] 杨京广, 余永刚. 随行装药方案提高大口徑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.
- [15] LIU Dong-yao, ZHAO Zhen-yu, YU Yong-gang, et al. Experiments on the Combustion Characteristics of Detergent-Coated Propellants and Their Application in Traveling Charge Propulsion[J]. Combustion Science and Technology, 2012, 184(2): 178-185.
- [16] ERMOLAEV B S, ROMANKOV A V, SULIMOV A A, et al. Compacted Modified Propellant Blocks as Traveling Charge in the Hybrid Shot Scheme[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2014, 39(6): 881-889.
- [17] MICHAELS D, GANY A. Investigation of a Thruster Based on a Traveling Propellant Charge[J]. International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion, 2015, 14(3): 197-220.
- [18] 范雪坤, 吕秉峰, 马忠亮, 等. 一种随行装药定容燃烧性能研究[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2013, 11(1): 76-78.
FAN Xue-kun, LYU Bing-feng, MA Zhong-liang, et al. A Study on Combustion Performance with Constant Volume of a Traveling Charge[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2013, 11(1): 76-78.
- [19] 梁泰鑫, 吕秉峰, 马忠亮, 等. 一种随行装药的燃烧性能[J]. 兵工学报, 2015, 36(9): 1660-1664.
LIANG Tai-xin, LYU Bing-feng, MA Zhong-liang, et al. Combustion Performance of a Traveling Charge[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(9): 1660-1664.
- [20] 梁泰鑫, 肖忠良, 吕秉峰, 等. 颗粒固结发射药作随行装药的应用研究[J]. 含能材料, 2015, 23(11): 1073-1078.
LIANG Tai-xin, XIAO Zhong-liang, LYU Bing-feng, et al. Applied Study on the Grain Consolidation Propellant as Traveling Charge[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(11): 1073-1078.
- [21] 梁泰鑫, 吕秉峰, 马忠亮, 等. 随行药室参数对内弹道性能的影响[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2015, 36(5): 553-558.
LIANG Tai-xin, LYU Bing-feng, MA Zhong-liang, et al. Effect of Chamber Parameters of Travelling Charge on Internal Ballistics Performance[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2015, 36(5): 553-558.
- [22] 祁臣勇. 随行装药优化设计[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(1): 60-63.
QI Chen-yong. Optimization Design of Traveling Charge[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2015, 36(1): 60-63.
- [23] 祁臣勇, 朱林. 随行装药的响应面分析[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(3): 45-49.
QI Chen-yong, ZHU Lin. Analysis on Response Surface of Traveling Charge[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2015, 36(3): 45-49.
- [24] 刘怡, 余永刚. 液体随行装药内弹道计算中液滴喷雾模型分析[J]. 弹道学报, 2016, 28(2): 74-78.
LIU Yi, YU Yong-gang. Analysis of Droplet Spray Model for Interior Ballistic Calculation of Liquid Traveling Charge[J]. Journal of Ballistics, 2016, 28(2): 74-78.
- [25] 梁磊, 闫光虎, 赵煜华, 等. 一种新型固体随行弹药的实验研究[J]. 火工品, 2016(1): 49-52.

- LIANG Lei, YAN Guang-hu, ZHAO Yu-hua, et al. Experimental Research on a New Solid Traveling Charge of 30mm Gun[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2016(1): 49-52.
- [26] 钱环宇, 余永刚. 埋头弹随行装药内弹道性能的数值分析[J]. 弹道学报, 2018, 30(3): 35-39.
- QIAN Huan-yu, YU Yong-gang. Numerical Analysis of Interior Ballistic Performance of Cased Telescoped Ammunition with Traveling Charge[J]. Journal of Ballistics, 2018, 30(3): 35-39.
- [27] 豆松松, 狄加伟, 聂奎, 等. 采用包覆随行装药提高炮射导弹内弹道性能的数值预测[J]. 火炮发射与控制学报, 2019, 40(1): 84-88.
- DOU Song-song, DI Jia-wei, NIE Kui, et al. Numerical Prediction of Improving Interior Ballistic Performance of Gun-Launched Missile by Coated-Traveling Charge[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2019, 40(1): 84-88.
- [28] 张小兵. 枪炮内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014.
- ZHANG Xiao-bing. Interior ballistics of guns[M]. Beijing: Beijing Insititute of Technology Press, 2014.