



埋头弹两级点火内弹道性能研究

常人九¹, 薛晓春^{1*}, 余永刚¹, 刘毅², 闫光虎²

(1.南京理工大学 能源与动力工程学院, 江苏 南京 210094; 2.西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要:埋头式弹药是一种新型弹药,它采用两级点火燃烧技术,一级点火使弹丸在药筒内具有一定的初速度并沿导向筒向前移动冲击坡膛,两级点火产生火药燃气以推动弹丸高速出膛。为了深入研究埋头式弹药两级点火燃烧技术的内弹道性能特性,设计搭建了 40 mm 短截身管的埋头式弹药两级点火试验平台,利用高速录像和压力传感器测量试验过程中弹丸冲击坡膛的速度及压力。试验结果表明,弹丸在一级点火后会以 22 m/s 的速度冲击坡膛,并在坡膛处停止,两级点火启动后快速飞出炮口。同时建立了试验条件下的埋头弹两级点火零维内弹道数值计算模型,对相同装填条件下埋头弹两级点火过程进行数值模拟。通过与试验结果对比,验证了所建模型的正确性。对 40 mm 埋头式穿甲弹进行内弹道性能模拟计算,分析了不同装药量对弹丸运动过程的影响。研究成果可为之后的埋头式弹药两级点火技术的相关研究提供参考。

关键词:埋头式弹药; 两级点火; 内弹道; 数值模拟

中图分类号: TJ012.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-499X(2025)02-0105-07

Study of Two-stage Ignition Internal Ballistic Performance in Cased Telescoped Ammunition

CHANG Renjiu¹, XUE Xiaochun^{1*}, YU Yonggang¹, LIU Yi², YAN Ganghu²

(1.School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2.Xi'an Institute of Modern Chemistry, Xi'an 710065, China)

Abstract: Cased telescoped ammunition (CTA) is a novel type of ammunition which adopts a two-stage ignition combustion technology. The first-stage ignition provides the projectile with a certain initial velocity along the guiding barrel in the barrel, impacting the slope of chamber. While the second-stage ignition generates propellant gas to drive the projectile out of the barrel at high speed. To deeply study the internal ballistic characteristics of the two-stage ignition combustion technology in CTA, a 40 mm short barrel experimental platform was designed and constructed. High-speed video recording and a pressure sensor were utilized to measure the impacting velocity and pressure of the sloped of chamber during the test. The test results show that the projectile impacts the sloped of chamber with a velocity of 22 m/s after the first-stage ignition and stop at the sloped of chamber. Then, the projectile flies out of the barrel quickly after the two-stage ignition is activated. Additionally, a zero-dimensional internal ballistic numerical model of the two-stage ignition of the CTA under the test conditions was established to simulate the two-stage ignition process of the CTA under identical loading conditions. Comparative analysis between numerical simulations and experimental data validated the accuracy of the proposed model. The internal ballistic performance of the 40 mm armor-piercing projectile of CTA was simulated to analyze the effects of different loading charges on the projectile movement process. This study provides a reference for the

subsequent research on the two-stage ignition technology of the CTA.

Key words: cased telescoped ammunition; two-stage ignition; internal ballistics; numerical simulation

与普通弹丸相比,埋头式弹药是一种新型弹药结构,其将弹丸全部嵌入药筒内部,使得弹药整体结构为标准圆柱体,极大缩短了弹药长度。因此,它可以在不改变原有炮塔尺寸的情况下,更换为更大口径的弹药系统,提高武器的威力和紧凑程度^[1-2]。

由于埋头弹结构的特殊性,弹药在击发点火时采用了两级点火和火药程序燃烧的新原理。当埋头式弹丸发射时,底火击发产生的高温高压燃气首先通过中心传火管进行一级点火,即点燃速燃药。一级点火产生的火药燃气推动弹丸向前运动,使弹丸进入身管,并以一定的初速度冲击坡膛。同时高温火药燃气会再次点燃位于弹丸四周的主装药,进行二级点火,主装药产生的火药燃气会继续推动弹丸在身管内运动。

埋头弹通过结构革新和装药优化,实现了威力、射程、机动性与安全性的综合提升,成为现代装甲车辆和轻型武器平台的火力升级关键。因此,美国^[3-5]、英国^[6]和法国^[7]等多国都对埋头式弹药进行了研究并获得了一定的成果。我国也有许多学者进行了相关研究,张浩等^[8-9]对埋头式弹药的结构特点进行了分析,依据其火药的燃烧特性建立了 35 mm 埋头弹零维内弹道计算模型,通过数值模拟分析了弹丸击发过程中气体泄漏对内弹道性能的影响。王加刚等^[10-11]建立了埋头式弹药内弹道计算模型,研究了在不同装填参量条件下 35 mm 埋头式弹药的内弹道性能,并对其内弹道过程进行了优化计算。唐群英等^[12]采用遗传算法对埋头式弹药的装填条件进行了优化计算,并进行了射击试验,验证了计算的合理性。钱环宇等^[13]分别建立了埋头式弹药固体和随行装药的零维内弹道计算模型,考虑了多参数变化对其内弹道过程的影响。郭俊廷等^[14]建立了考虑半可燃药筒的埋头弹内弹道数值模拟模型,对 105 mm 埋头式穿甲弹进行内弹道性能预测分析。在弹丸发射试验研究方面,杨明等^[15-17]设计了短管火炮发射器,并结合数值模拟方法对不同弹带材料大口径弹丸发射过程进行研究。

本文设计一套埋头弹模拟发射试验平台,试验研究一级点火后弹丸的冲击坡膛速度,结合埋头弹两级点火和火药程序燃烧技术,建立埋头弹两级点

火零维内弹道模型,分析速燃药与主装药的装药量对 40 mm 埋头式穿甲弹内弹道性能的影响。

1 埋头弹点火试验

1.1 试验装置及数据处理

试验装置主要由发射回收系统和测试数据收集系统两部分构成。试验弹的发射回收系统包括短身管火炮、前端有测试杆的试验弹和试验弹回收装置。测试数据收集系统主要包括配装在短管身管火炮上的压力传感器,高速摄像、信号处理与数据采集仪器和计算机等。图 1 为短截身管及埋头弹组装图,其中图 1(a)为短截身管试验装置正视图,图 1(b)为弹丸前端测速杆,图 1(c)为中心轴 A-A 纵截面埋头弹内部装填示意图。

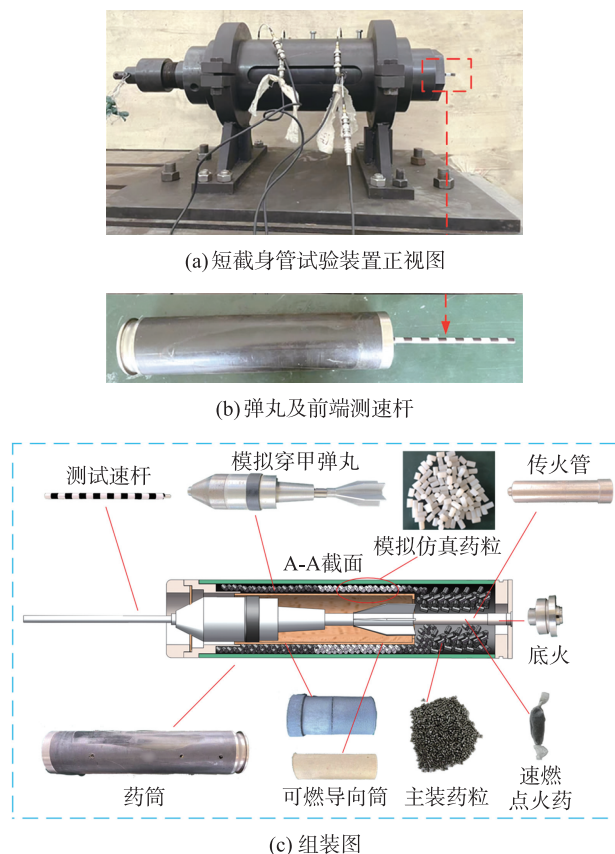


图 1 短截身管及埋头弹组装图

Fig. 1 Assembled short interceptor tube and cased telescoped ammunition

如图 1 所示,埋头式穿甲弹主要包括穿甲弹丸、可燃导向筒、金属传火管(其中装有速燃药)、带有色块标识的位移测定杆、药筒、底火以及主装药(混合有模拟仿真药粒)。本实验着重研究该埋头式弹药一级点火后弹丸冲击坡膛的过程和验证实现两级点火功能,因此在进行试验的过程中埋头式弹药并未采用真实全装药,而是采用了部分真实火药与部分模拟火药颗粒的混合装药形式,其中模拟火药颗粒由外形特征与真实火药相同的非含能材料构成。

身管上压力传感器可以实时测量和记录试验过程中的膛压,以获得埋头弹二次点火过程中的压力变化规律。高速录像可采集其前端测速杆的位移变化,通过图像处理技术,根据图中标定色块尺寸与实际标定色块尺寸的比例关系,可得到对应的弹丸运动速度曲线和埋头式弹丸冲击上膛速度。

1.2 实验结果与分析

采用某 40 mm 埋头式穿甲弹进行点火发射试验,图 2 为其试验过程中的膛压与时间关系曲线。

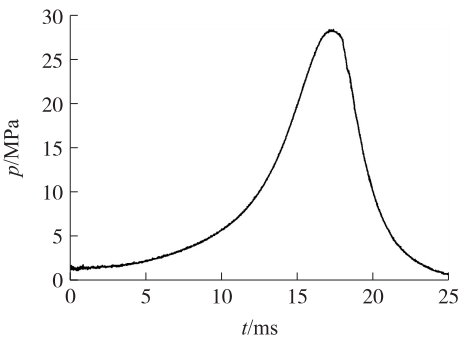


图 2 膛压与时间关系图

Fig. 2 Chamber pressure versus time

如图 2 所示,一级点火后产生的火药燃气由中心传火管中喷出,由于药筒容积相较于中心传火管容积相差太多,且一级点火所用的速燃药的装药量较少,导致此刻膛内压力的上升较为平缓。等到弹丸冲击坡膛时,一级点火产生的高温火药燃气使可燃导向筒破裂,点燃主装药,然后主装药快速燃烧,即埋头式弹丸两级点火阶段。此时膛内压力迅速上升,最大压力达 28.3 MPa,随后弹丸飞出短截身管,膛内压力迅速降低。

图 3 为一次点火弹丸冲击坡膛过程中弹丸头部位移序列图。由图可知,试验过程中弹丸的膛内运动过程可以分为 2 个阶段。0~4.5 ms 时,弹丸在一级点火产生的火药燃气推动下沿导向筒向前运动,达到最大速度,该阶段为一级点火阶段,弹丸运动表

现为药筒内部导向筒加速运动;5~7 ms 时,弹丸以一次点火获取的最大速度冲击坡膛,弹带与坡膛端面接触,发生强烈的相互作用,导致试验弹丸前端测速标杆产生了一定的震动。根据图 3 中测速杆的位移与实际比例进行计算,可得一次点火启动后到弹丸冲击坡膛时的位移-时间关系,将位移曲线进行微分计算可得,弹丸的冲击坡膛的速度-时间曲线。弹丸冲击坡膛的位移和速度随时间变化曲线如图 4 所示。

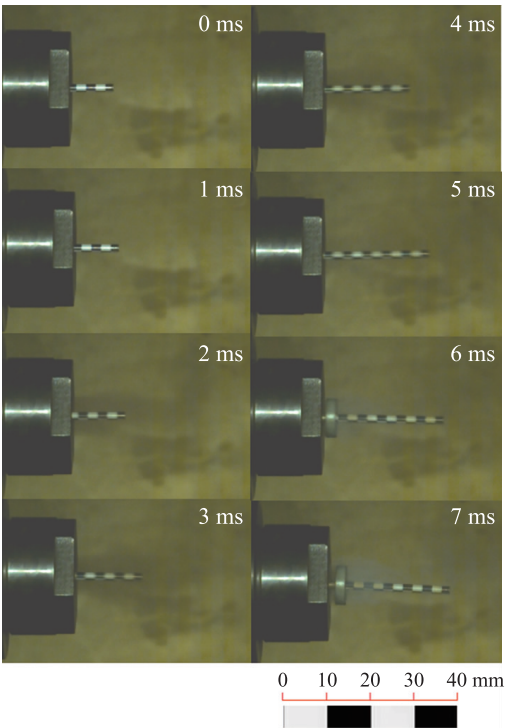


图 3 弹丸冲击上膛位移序列图

Fig. 3 Sequence diagram of projectile displacement

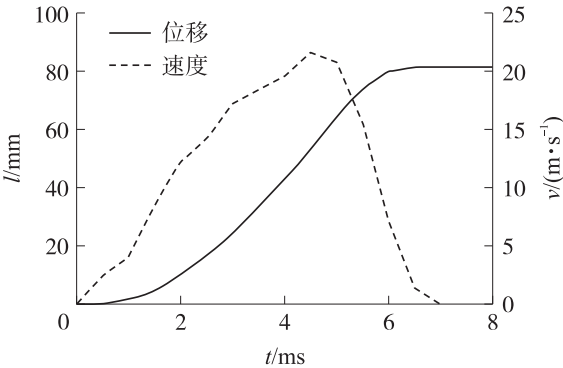


图 4 弹丸冲击坡膛位移和速度曲线

Fig. 4 Displacement and velocity curves of the projectile impacting chamber

由图3和图4可见,一级点火阶段是在药筒内部中心传火管中进行,火药燃烧使中心传火管中压力迅速上升,同时推动弹丸与传火管分离,使其沿导向管加速运动。在 $t=4.5\text{ ms}$ 时,一级点火结束,弹丸速度达到 22.08 m/s 并冲击坡膛,因此 $0\sim 4.5\text{ ms}$ 为一级点火阶段。 4.5 ms 以后为两级点火阶段,在 $4.5\sim 7\text{ ms}$ 阶段为弹丸动态冲击坡膛至弹丸卡膛过程。 4.5 ms 时,弹带接触坡膛后开始减速,此刻弹丸开始冲击坡膛。由于此时两级点火刚刚开始,膛内压力还未提升,火药燃气提供的推力远远小于弹丸冲击坡膛时产生的挤进阻力,因此在挤进阻力的影响下,弹丸在 7 ms 减速至 0 m/s ,弹丸开始卡膛过程,等待主装药继续燃烧使膛内压力迅速提升,以便继续推动弹丸运动。

图5对应为弹丸冲击坡膛挤进过程后重启加速运动过程。此时,随着主装药大量燃烧,弹丸在 16.5 ms 时重新启动加速运动, 20 ms 时弹丸飞出短截身管,炮口处喷出大量火药燃气,膛内压力迅速下降。

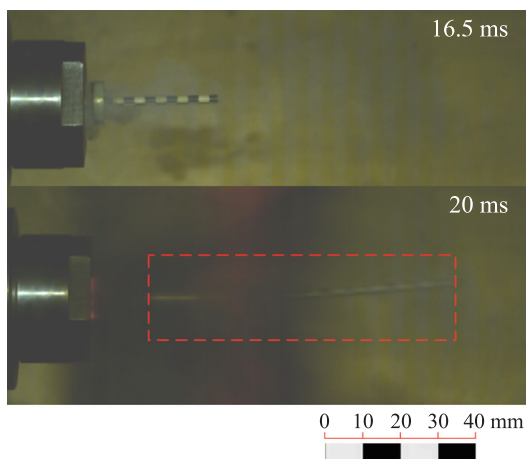


图5 弹丸重启加速飞出位移序列图

Fig. 5 Sequence of projectile exiting the chamber displacement

由试验过程可见,因埋头式穿甲弹膛内装药结构特殊,将点火过程为两个阶段。一级点火阶段时,速燃药点火在中心传火管中被点燃,产生火药燃气推动弹丸药筒内加速运动。而此时由于一次点火在中心传火管中进行,因而药筒内的膛压上升较缓慢。弹丸药筒内开始运动后,一次点火产生的火药燃气同时也点燃了主装药,即两级点火阶段开始,此刻主装药燃气继续推动弹丸冲击坡膛,并在身管内运动直至发射出膛。而弹丸发射过程的动力学响应可以

看成在一级点火作用下先加速达到最大速度后,再进入两级点火阶段。弹丸以初速度动态冲击坡膛,开始减速并卡膛停止运动,主装药继续燃烧,开始积累膛内压力,达到挤进阻力临界状态后加速运动并飞出炮口。

2 数学模型及模型验证

2.1 数学模型

经过对试验装药点火过程的分析,根据埋头弹的点火特性,可将埋头式弹丸的整个内弹道过程分为一级点火(速燃药点火)和两级点火(主装药点火)两阶段,进行埋头弹内弹道建模。

在一级点火阶段,速燃药快速燃烧产生火药燃气推动弹丸沿导向筒加速滑动,所建立的一级点火数学模型如下:

$$\begin{cases} \psi_b = \chi_b Z_b (1 + \lambda_b Z_b + \mu_b Z_b^2) \\ \frac{dZ_b}{dt} = \begin{cases} \frac{u_{1b}}{e_{1b}} p_b^{n_b} & Z_b < Z_{kb} \\ 0 & Z_b \geq Z_{kb} \end{cases} \\ Sp = \varphi_b m \frac{dv}{dt} \\ \frac{dl_1}{dt} = v \\ Sp(l_1 + l_{\psi 1}) = f_b \omega_b \psi_b - \frac{1}{2} \theta \varphi_b m v^2 \\ l_{\psi 1} = l_{01} \left[1 - \frac{\omega_b (1 - \psi_b)}{\rho_{pb} V_{01}} - \frac{\alpha_b \omega_b \psi_b}{V_{01}} \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中: ψ_b 为速燃药已燃百分比, χ_b 和 λ_b 为速燃药的形状函数, Z_b 为速燃药燃烧的相对厚度, u_{1b} 和 n_b 分别为速燃药的燃速系数和燃速指数, e_{1b} 和 Z_{kb} 为速燃药弧厚的一半和燃烧分裂点的相对厚度, l_1 为弹丸药筒内移动距离, S 和 m 为弹丸的最大横截面积和质量, φ_b 为第一阶段次要功系数, $l_{\psi 1}$ 为一级点火级室的自由容积缩径长, V_{01} 为一级点火药室容积, l_{01} 为一级点火药室的容积缩径长, ω_b 和 ρ_{pb} 分别为速燃药质量和密度, α_b 和 f_b 分别为一级速燃药余容和一级速燃药火药力, $\theta = k - 1$, k 为绝热指数。

在两级点火阶段,主装药完全燃烧,弹丸在主装药燃气的推动下在身管内快速移动,直至飞离炮口。两级点火的数学模型如下:

$$\begin{cases} \psi_b = \chi_b Z_b (1 + \lambda_b Z_b + \mu_b Z_b^2) \\ \psi = \begin{cases} \chi Z (1 + \lambda Z + \mu Z^2) & Z < 1 \\ \chi_s \frac{Z}{Z_k} \left(1 + \lambda_s \frac{Z}{Z_k} \right) & 1 \leq Z < Z_k \\ 1 & Z \geq Z_k \end{cases} \\ \frac{dZ_b}{dt} = \begin{cases} \frac{u_{1b}}{e_{1b}} p^{n_b} & Z_b < Z_{bk} \\ 0 & Z_b \geq Z_{bk} \end{cases} \\ \frac{dZ}{dt} = \begin{cases} \frac{u_1}{e_1} p^n & Z < Z_k \\ 0 & Z \geq Z_k \end{cases} \\ Sp = \varphi m \frac{dv}{dt} \\ \frac{dl}{dt} = v \\ Sp(l + l_\psi) = (\omega_b \psi_b + \omega \psi) f - \frac{\theta}{2} \varphi m v^2 \\ l_\psi = l_0 \left[1 - \frac{\omega_b (1 - \psi_b) + \omega (1 - \psi)}{\rho_{pb} V_{02} + \rho_p V_{02}} - \frac{\alpha_b \omega_b \psi_b + \alpha \omega \psi}{V_{02}} \right] \end{cases} \quad (2)$$

式中: ψ 为主装药的已燃百分比, χ 、 λ 、 μ 为主装药的形状函数, Z 为主装药的已燃相对厚度, χ_s 、 λ_s 分别为主装药分裂点后的形状函数, Z_k 为主装药燃烧分裂点已燃的相对厚度, u_1 和 n 分别为主装药的燃速系数和燃速指数, e_1 为主装药弧厚的一半, l_ψ 为主装药药室的自由容积缩径长, V_{02} 为主装药药室容积, l_0 为主装药药室的容积缩径长, ω 和 ρ_p 分别为主装药的质量和密度, α 和 f 分别为主装药容量和火药力。

2.2 模型验证

为验证上节所建立模型的合理性,采用与实验相同的工况进行数值模拟计算,其中速燃药为 1.5 g 的 2/1 火药,主装药为 50 g 的 8/1 火药,穿甲弹质量为 447 g。采用四阶龙格-库塔法对所建立的埋头弹二级点火内弹道模型进行求解,得到第一阶段的弹丸上膛速度和弹丸膛内压力变化曲线,如图 6 和图 7 所示。

如图 6 所示,实验所得弹丸上膛速度为 22.08 m/s,数值模拟计算后得到的弹丸上膛速度为 21.8 m/s,相对误差为 1.27%。如图 7 所示,实验所得膛内最大压力为 28.3 MPa,数值模拟计算后所得膛内最大压力为 27.88 MPa,最大压力相对误差为 1.48%,压力曲线最大相对误差为 3.63%。上膛速度和膛内压力的计算误差均在允许的范围内,说明

所建立的埋头弹两级点火内弹道数学模型合理。

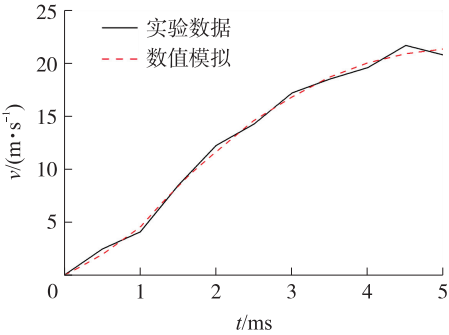


图 6 上膛速度仿真与实验对比
Fig. 6 Comparison of loading velocity between simulation and experiment

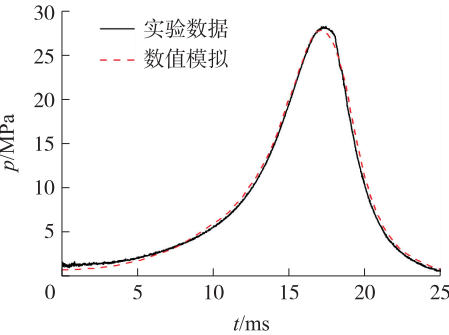


图 7 压力仿真与实验对比
Fig. 7 Comparison of pressure between simulation and experiment

3 内弹道性能分析

基于上节所建立的计算模型,对不同装药量下某 40 mm 埋头式穿甲弹的两级点火内弹道性能进行模拟分析。仿真计算的速燃药为 1 g、1.5 g 和 2 g 立方体火药,主装药为 400 g、430 g 及 460 g 花边七孔火药。相关火药参数如表 1 和表 2 所示,表中, l_{gb} 为速燃药行程, l_g 为主装药行程。

表 1 速燃药参数

Table 1 Parameters of bore		
l_{gb}/m	$f_b/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	$u_{1b}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-n_b})$
0.12	450	1.75e^{-8}
V_{01}/m^3	e_{1b}/m	n_b
3.01×10^{-6}	4×10^{-4}	0.81

表 2 主装药参数

Table 2 Parameters of powder			
l_g/m	$f/(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1})$	d_0/m	n
3.28	1 225	2.6×10^{-4}	0.83
V_0/m^3	e_1/m	$u_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-n})$	—
5.16×10^{-4}	9.3×10^{-4} m	1.7×10^{-8}	—

图 8 与图 9 分别为一级点火阶段的压力、速度与时间关系曲线。此阶段中的膛压指的是中心传火管中的压力变化,随着速燃药量从 1 g 增加至 1.5 g, 第一阶段的最大膛压增加, 分别为 11.4 MPa、13.6 MPa、17.0 MPa;一次上膛速度也会增加, 分别达到了 26.4 m/s、31.5 m/s、36.5 m/s。由于一级点火过程火药燃烧在中心传火管中进行,主装药未参与燃烧,因此主装药药量的变化对弹丸第一阶段的运动没有影响。

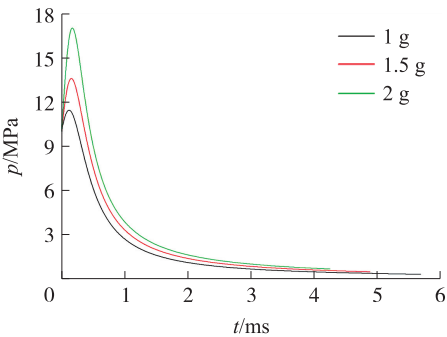


图 8 一级点火阶段中心传火管压力曲线

Fig. 8 Pressure curve of first-stage ignition

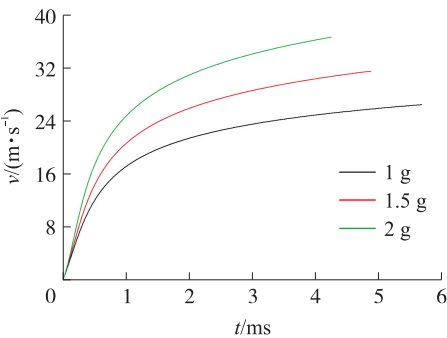


图 9 一级点火阶段速度曲线

Fig. 9 Velocity curve of first-stage ignition

如图 8 和图 9 所示,随着速燃药药量的增加,速燃药的燃烧速率不断上升,中心传火管内压力升压速率、弹丸在导向筒内的运动速度也不断增加,导致弹丸沿导向筒的运动耗时减少。当弹丸运动开始冲击坡膛,表示一级点火过程的结束。

不同装药量下的两级点火计算结果如表 3 所示。从表中可以看出,增加速燃药量对第二阶段弹丸运动状态几乎没有影响。由试验过程中弹丸运动表现可知,这是由于弹丸经一级点火获取初速度冲击坡膛,弹丸会卡在坡膛处。而中心传火管中喷出的火药燃气对药筒内部膛压的影响不大,经两级点火过程点燃主装药,才导致药筒内部膛压升高。随

着主装药量的增加,第二阶段最大压力增加,分别达到 365.9 MPa、442.4 MPa、538.8 MPa;弹丸出膛速度也会增加,分别达到了 1 450.4 m/s、1 539.3 m/s、1 629.3 m/s。因此取 1.5 g 速燃药量与不同主装药量的计算结果,图 10 与图 11 分别为第一阶段的压力、速度与时间关系曲线。

表 3 两级点火阶段计算结果

Table 3 Results of the second phase of calculations			
主装药/g	速燃药/g	最大压力/MPa	速度/(m·s ⁻¹)
400	1	365.9	1 450.4
	1.5	365.9	1 450.4
	2	365.9	1 450.4
430	1	442.4	1 539.3
	1.5	442.4	1 539.3
	2	442.4	1 539.3
460	1	538.8	1 629.3
	1.5	538.8	1 629.3
	2	538.8	1 629.3

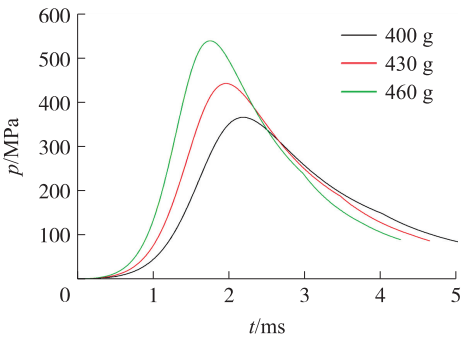


图 10 两级点火压力曲线

Fig. 10 Pressure curve of second stage ignition

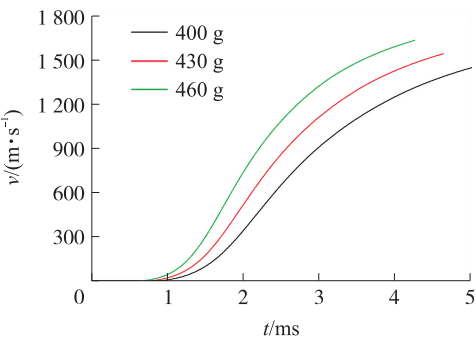


图 11 两级点火速度曲线

Fig. 11 Velocity curve of second-stage ignition

如图所示,主装药量的增加使得主装药燃烧速率增加,膛内压力升压速率增加,导致弹丸在坡膛处的停止时间减少,3 种工况下的停止时间分别为

0.9 ms、0.87 ms、0.85 ms。

4 结束语

本文以某 40 mm 埋头式穿甲弹为研究对象,对其两级点火及上膛速度进行试验研究,建立了两级点火零维内弹道模型,并开展了仿真计算,得到以下结论:

①在一级点火速燃药燃烧阶段,弹丸加速达到最大速度后冲击坡膛。在两级点火阶段,弹丸在挤进阻力的影响下减速到 0 m/s,并在坡膛处停止。随着主装药燃烧膛内压力提升,随后重新启动加速飞出炮口。

②仿真结果与实验结果膛内压力最大误差为 3.63%,验证了计算模型的合理性。

③速燃药量与一级点火后的弹丸药筒运动速度与最大压力呈正相关,且增加药量会减少第一阶段的运动时间;而主装药量与两级点火后的弹丸飞出炮口的速度与最大压力呈正相关,且会降低两级点火弹丸重新启动所用时间。

所建立的内弹道数值模拟模型可对埋头式弹药的两级点火过程的相关研究提供一定的参考价值。

参考文献

- [1] 张浩,陆欣,余永刚,等. 某口径埋头弹火炮的密封与装药设计[J]. 兵工学报,2006,27(4):630-633.
ZHANG Hao, LU Xin, YU Yonggang, et al. Design for the seal system and charge of a CTA gun[J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(4):630-633. (in Chinese)
- [2] TIMOTHY G F. Initial evaluation of the CTA international 40 mm cased telescoped weapon system; ARL-TR-2275[R]. Aberdeen, MD, US: Army Research Laboratory, 2000.
- [3] HUSTON M G, STAVENJORD K H, SANKHILA C. DOD cased telescoped ammunition and gun technology program; ADA370886[R]. USA: Department of Defense, 1999.
- [4] WOODLEY C R. Development of a one-dimensional internal ballistic model of a cased telescoped ammunition gun[C]//15th International Symposium on Ballistics. Jerusalem: The International Ballistics Committee, 1995: 181-188.
- [5] KELLY W J, MARSCHER W D. Cased telescoped ammunition smart seal development; ADA406070[R]. Parsippany NJ: Mechanical Solutions Inc., 2002.
- [6] WAREEN J B. DOD CTA and gun technology program[R]. USA: Evaluation Report of Department of Defense, 1989.
- [7] BOISSON D, SADAT H, RIGOLLET F. Computation of boundary layers and calculation of parietal heat flux during a shot in gun barrel; comparison with the experiment for 45mm CTA gun[C]//

15th International Symposium on Ballistics. Jerusalem: The International Ballistics Committee, 1995.

- [8] 张浩,周彦煌. 埋头弹火炮零维内弹道模型及计算[J]. 弹道学报, 2005, 17(2): 80-83.
ZHANG Hao, ZHOU Yanhuang. A 0-dimensional interior ballistic model and calculation of cased telescoped ammunition gun[J]. Journal of Ballistics, 2005, 17(2): 80-83. (in Chinese)
- [9] 张浩,周彦煌. 埋头弹火炮挤进过程研究[J]. 弹道学报, 2006, 18(1): 76-79.
ZHANG Hao, ZHOU Yanhuang. Research on the engraving process of CTA[J]. Journal of Ballistics, 2006, 18(1): 76-79. (in Chinese)
- [10] 王加刚,余永刚,郭飞,等. 多参数变化对埋头弹火炮内弹道性能的影响[J]. 弹道学报, 2015, 27(2): 69-73.
WANG Jiagang, YU Yonggang, GUO Fei, et al. Effects of multi-parameter change on interior ballistics properties of cased telescoped ammunition gun[J]. Journal of Ballistics, 2015, 27(2): 69-73. (in Chinese)
- [11] WANG Jiagang, YU Yonggang, ZHOU Liangliang, et al. Numerical simulation and optimized design of cased telescoped ammunition interior ballistic[J]. Defence Technology, 2018, 14(2): 120-126.
- [12] 唐群英,陆欣. 基于 NSGA-II 算法的埋头弹药内弹道性能优化[J]. 弹道学报, 2018, 30(2): 42-46.
TANG Qunying, LU Xin. Optimization on interior ballistic performance of cased telescoped ammunition based on NSGA-II genetic algorithm[J]. Journal of Ballistics, 2018, 30(2): 42-46. (in Chinese)
- [13] 钱环宇,余永刚. 埋头弹弹行装药内弹道性能的数值分析[J]. 弹道学报, 2018, 30(3): 35-39.
QIAN Huanyu, YU Yonggang. Numerical analysis of interior ballistic performance of cased telescoped ammunition with traveling charge[J]. Journal of Ballistics, 2018, 30(3): 35-39. (in Chinese)
- [14] 郭俊廷,余永刚. 半可燃药筒埋头弹内弹道性能数值模拟[J]. 弹道学报, 2021, 33(3): 52-56.
GUO Juntao, YU Yonggang. Numerical simulation of interior ballistic performance of cased telescoped ammunition with semi-combustible cartridge[J]. Journal of Ballistics, 2021, 33(3): 42-46. (in Chinese)
- [15] YANG Ming, ZHANG Xinwei. Experimental study and numerical calculation of projectile dynamic engraving process[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2478(8): 082006.
- [16] 杨明,余永刚. 尼龙弹带动态挤进特性试验研究与数值分析[J]. 含能材料, 2023, 31(4): 356-364.
YANG Ming, YU Yonggang. Experimental study and numerical analysis of dynamic engraving characteristics of nylon belt[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2023, 31(4): 356-364. (in Chinese)
- [17] YANG Ming, YU Yonggang. Dynamic engraving characteristics of nylon belt under different charge conditions[J]. Journal of Mechanics, 2024, 40: 155-163.