文章编号:1000-5773(2007)01-0103-05

平衡炮实验弹丸膛内过载计算模型及应用*

段吉员,刘仓理,王彦平,于 川

(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室,四川绵阳 621900)

摘要:针对平衡炮的具体结构特点,为了精确计算弹丸膛内过载变化过程,利用经典内弹道法对某口径的平衡炮进行了仿真计算,得出了内弹道诸元随时间的变化曲线,再根据膛压与过载的关系,推导出了过载随时间变化的曲线图,理论计算与实验结果相吻合,该计算方法可为此类火炮的内弹道参数评估和弹丸设计提供依据。

关键词:平衡炮;过载;经典内弹道;仿真计算

中图分类号:O315;TJ012.1 **文献标识码**:A

1 引 言

平衡炮是一种两头发射的滑膛无后座炮,其特点是利用平衡体在炮管内反向运动,以抵消火炮发射时的后座力,在炮膛轴线方向上,作用力基本平衡,是研究大尺寸、大质量试验件的有效实验加载工具,解决了缩比实验所带来的局限性,对于侵彻动力学研究、侵彻体设计技术、材料动态响应、引战配合技术以及数值模拟技术等方面的研究具有十分重要的意义。平衡炮结构如图 1 所示,在平衡炮实验中,弹丸膛内过载的测试及研究十分重要,因为它是研究弹丸结构设计、壳体强度、装药安定性以及引信设计等方面的基础。

本工作在经典内弹道[1-2]的基础上,结合平衡炮发射的具体特点,考虑到点火药和传火药的影响,建立了内弹道方程组,经过编程计算,求得了内弹道诸元随时间的变化规律,再根据膛压与过载的关系,从而推导出了弹丸膛内过载的变化过程,与实验测得的过载曲线进行比较分析,发现理论值与实测值相吻合,说明内弹道建模和过载分析正确,精度满足实验要求。

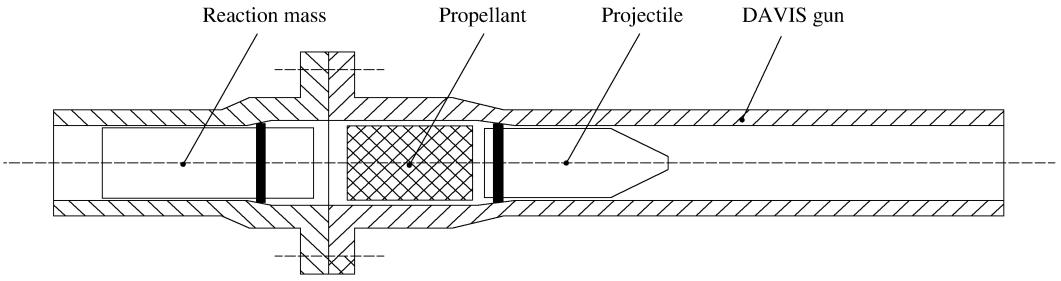


图 1 平衡炮结构示意图

Fig. 1 Schematic of DAVIS gun

* **收稿日期**:2005-06-26;**修回日期**:2006-01-25

作者简介:段吉员(1976—),男,硕士,助理研究员. E-mail:duanjiyuan2005@tom.com

2 理论计算模型的建立

2.1 平衡炮经典内弹道模型的建立

经典内弹道是内弹道学中发展较为充分的一门科学，其思路明晰，计算简单，对于内弹道参数评估十分重要。

2.1.1 基本假设

(1) 发射药的燃烧服从几何燃烧定律。

(2) 发射药的燃烧速度遵从稳态下的指数燃烧定律。

(3) 点传火过程瞬态完成。由于点火药以及传火药用的是速燃药，传火通道畅通，与整个发射药燃烧时间相比，点传火时间是很短暂的，可以认为是瞬态完成的。

(4) 发射药的燃烧和弹丸、平衡体的运动都在平均膛压下进行。

(5) 燃烧生成物的成分始终保持不变。

(6) 不考虑弹带挤进过程，认为当膛压达到启动压力时，弹丸和平衡体开始运动。

(7) 热散失和次要功用 φ_1、φ_2 来考虑。

2.1.2 内弹道方程组的建立

在建立内弹道方程组的过程中，计及点、传火药的影响，考虑到平衡炮的具体结构特点，通过改进常规炮上所用的内弹道基本方程组，使之适合平衡炮这一新型发射机构。

(1) 体现发射药燃烧时气体生成规律的几何燃烧定律和燃烧速度定律

燃烧速度方程

$$\mathrm{d}Z/\mathrm{d}t = u_1 p^n / e_0 \tag{1}$$

式中：Z 为装药的相对燃烧厚度，即 $Z=e/e_0$，e 为已燃烧厚度的一半，e_0 为初始厚度的一半；u_1 为装药的燃速系数；n 为装药的压力指数；p 为火药燃气压力。

发射药形状函数

$$\Psi = \begin{cases} \chi Z(1+\lambda Z+\mu Z^2) & 0 < Z < 1 \\ \chi_s Z(1+\lambda_s Z) & 1 \leqslant Z < Z_s \\ 1 & Z_s \leqslant Z \end{cases} \tag{2}$$

式中：χ、λ、μ 为装药分裂前的形状特征量；χ_s、λ_s 为装药分裂时的形状特征量；Z_s 为装药燃烧结束时相对燃烧厚度，即 $Z_s=1+e_s/e_0$，其中，$e_s=a_0(d/2+e_0)$，a_0 为修正系数，圆柱形多孔火药 $a_0=0.2956$，简单形状火药 $a_0=0$，d 为火药孔径 g。

(2) 体现弹丸、平衡体运动以及考虑各种次要功的运动方程

该方程考虑到了平衡炮的具体发射特点，与常规闭膛炮相比，火药燃气除了推动弹丸外，同时还驱动平衡体反向运动，所以除了分析弹丸运动外，还必须分析平衡体的运动。

$$Sp = \varphi_1 m_1(\mathrm{d}v_1/\mathrm{d}t) \tag{3}$$

$$Sp = \varphi_2 m_2(\mathrm{d}v_2/\mathrm{d}t) \tag{4}$$

$$v_1 = \mathrm{d}l_1/\mathrm{d}t \tag{5}$$

$$v_2 = \mathrm{d}l_2/\mathrm{d}t \tag{6}$$

式中：S 为弹丸最大横截面积；p 为膛内火药燃气压力；m_1 为弹丸质量，m_2 为平衡体质量；l_1 为弹丸行程，l_2 为平衡体行程；v_1 为弹丸速度，v_2 为平衡体速度；φ_1 为弹丸次要功系数，φ_2 为平衡体次要功系数。

(3) 体现膛内气体状态以及能量转换过程的内弹道学基本方程

与常规火炮的内弹道基本方程相比，该方程考虑到了点传火药和平衡体反向运动的影响。

$$Sp(l_1+l_2+l_\Psi) = \omega f\Psi + f_B\omega_B + f_C\omega_C - \frac{\theta}{2}\varphi_1 m_1 v_1^2 - \frac{\theta}{2}\varphi_2 m_2 v_2^2 \tag{7}$$

其中

$$l_\Psi = l_0\left[1-\frac{\Delta}{\rho}(1-\Psi)-\Delta\alpha\Psi-\Delta\frac{\alpha_B\omega_B+\alpha_C\omega_C}{\omega}\right],\quad l_0=\frac{W_0}{S}$$

式中:l_Ψ 为药室自由容积缩径长,l_0 为药室容积缩径长;ω 为装药质量;f 为装药的火药力;θ 为发射药热力参数,$\theta=0.2$;f_B 为点火药火药力,ω_B 为点火药质量;f_C 为传火药火药力,ω_C 为传火药质量;ρ 为装药密度;α 为装药余容,α_B 为点火药余容,α_C 为传火药余容;Δ 为发射药装填密度;W_0 为药室容积。

2.2　弹丸膛内过载的计算

弹丸在膛内运动时,受到火药燃气压力和摩擦阻力的作用,由于平衡炮采用的是光滑内膛结构,而发射药量很大,火药燃气压力很高,一般在 300 MPa 左右,与之相比,摩擦阻力远远小于燃气压力,因而在分析中可以忽略它对弹丸运动的影响。

根据牛顿第二定律 $F=pS=ma$,可得

$$a=pS/m \tag{8}$$

式中:a 为弹丸过载;p 为膛压;S 为弹丸最大横截面积;m 为弹丸质量。根据具体实验,已知 S、m,由内弹道计算可知 p 的变化规律,从而可确定 a 的变化规律。

3　理论计算与实验结果的对比分析

3.1　内弹道计算模型初始参数的确定

结合实验具体情况,发射药选定后,方程(1)中的系数 u_1、e_0 和 n 便可确定,方程(2)中的装药形状特征量也相应确定;实验中,m_1、m_2、ω 和 S 是已知的,次要功系数 φ_1、φ_2 可由下式确定

$$\varphi_1=K_1+\frac{m_2}{3m_1(m_1+m_2)}\omega$$

$$\varphi_2=K_2+\frac{m_1}{3m_2(m_1+m_2)}\omega$$

式中:K_1、K_2 分别为弹丸和平衡体的阻力系数,其取值范围为 1～1.05,从而确定了方程(3)和方程(4)中的系数;根据实验所选的发射药、点传火药的类型和质量,便可确定 f、f_B、f_C、ω_B、ω_C、ρ、α、α_B 和 α_C 的值,由平衡炮结构特点便可确定 l_0 和 Δ 的值,从而方程(7)中的系数及常数项便可确定。

分析上述内弹道方程组,可以看出,7 个方程中含有 Z、Ψ、p、v_1、l_1、v_2、l_2 7 个变量,方程组是封闭的,弹丸和平衡体行程边界值由炮的具体结构确定,可通过编程求得确定解。

3.2　计算结果与分析

根据某次实验中所用某发弹丸及发射药的计算参数见表 1。分析上述内弹道模型中的各个方程,均为常系数一阶微分方程,可用四阶龙格-库塔计算方法编程求解[3-5],得出平衡炮内弹道诸元 p、v_1、v_2 随时间 t 或行程 l 的变化曲线图。在具体实验中,测量了 v_1、v_2 和过载曲线,可与数值计算结果进行对比分析,具体曲线见图 2、图 3 和图 4。

表 1　内弹道数值计算与实验参数

Table 1　Parameters of interior ballistic numerical calculation and experiment

$S/(m^2)$	$W_0/(m^3)$	$m_1/(kg)$	$m_2/(kg)$	$\omega/(kg)$
0.08	0.1	320	1 280	74

图 2 给出了内弹道时期弹丸、平衡体速度历史曲线,它们的变化规律一致,达到了动态平衡,满足了平衡炮发射原理,说明平衡炮经典内弹道建模正确。图 3 给出了弹丸炮口速度计算结果和实测值,计算结果与实测值非常吻合,弹丸初速误差在 1%左右,满足实验所需精度,说明模型参数选取是合理的。

图 4 给出了膛压随时间变化曲线,通过膛压与过载的关系,求得了过载曲线图如图 5 所示,并与过载实测曲线作了对比分析,发现变化规律一致,最大过载误差在 3%左右,计算值与实测值非常吻合,根据一般火炮相似性原理,膛压变化曲线以及弹丸、平衡体速度历史曲线符合火药燃烧的规律,理论计算满足实验精度,进一步证明了平衡炮内弹道建模和过载分析的正确性。

表 2 给出了几发实验的实测弹丸初速及最大过载值与内弹道数值计算结果。从表中数据分析比较可得，弹丸初速理论计算结果和实测结果非常吻合，相对误差在 1%左右，而膛内最大过载值的误差在 3%左右。

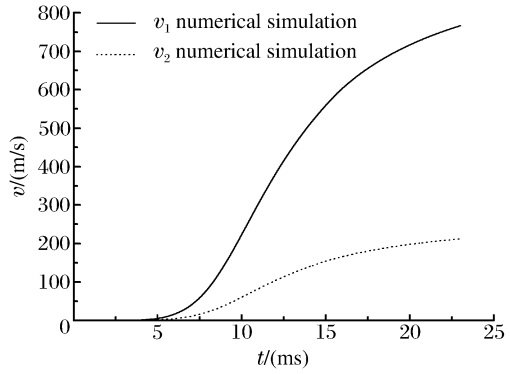


图 2 弹丸和平衡体内弹道 v-t 曲线

Fig. 2 The interior ballistic v-t curves of projectile and reaction mass

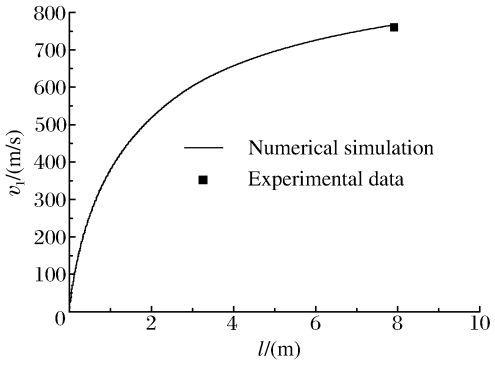


图 3 弹丸炮口速度实验与计算结果

Fig. 3 The calculated and measured muzzle velocity of projectile

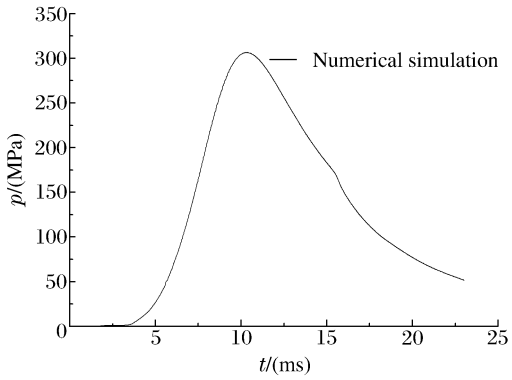


图 4 膛压计算曲线

Fig. 4 The calculated p-t curve

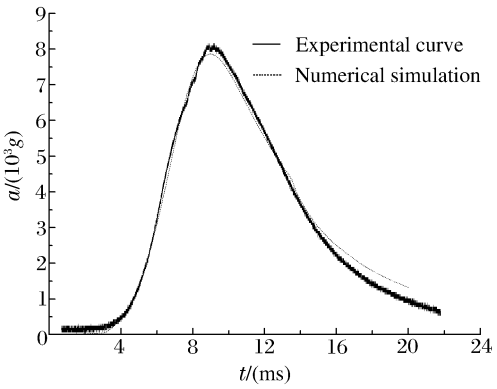


图 5 弹丸膛内过载计算与实测曲线

Fig. 5 The calculated and measured a-t curve

表 2 内弹道数值计算与实验结果

Table 2 Interior ballistic numerical calculation and experimental data

Shot	v_1/(m/s)			Maximal acceleration/(kg)		
	Experimental data	Theoretic data	Relative error/(%)	Experimental data	Theoretic data	Relative error/(%)
1	342.7	343.7	0.3	1.33	1.37	3.1
3	481.3	484.6	0.7	4.55	4.44	2.4
4	593.4	594.6	0.2	7.02	6.89	1.9
5	634.1	626.0	1.3	8.67	9.01	4.0
6	759.6	766.3	0.9	8.37	8.60	2.8

4 结 论

考虑到点传火药对弹道性能的影响，建立了平衡炮经典内弹道模型，并利用龙格-库塔法编制了弹道程序。通过对某次平衡炮实验进行的仿真计算，求得了内弹道诸元 p-t 曲线，再根据牛顿第二定律，推导出了弹丸过载曲线，并与实测结果进行了分析对比，计算结果与实验结果十分吻合，理论计算数值

可靠,满足实验精度要求,表明平衡炮经典内弹道模型是正确的,弹丸膛内过载分析是合理的,可以很好地模拟平衡炮的发射性能,参数选择合理,能满足实验设计者对弹道预估的工程需要。

References:

[1] Zhang B Sh, Li Y E. Interior Ballistic Principle of Guns and Rockets [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996. (in Chinese)
张柏生,李云娥. 火炮与火箭内弹道原理 [M]. 北京:北京理工大学出版社,1996.

[2] Jin Zh M, Yuan Y X, Song M. Nowaday Interior Ballistics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1992. (in Chinese)
金志明,袁压雄,宋　明. 现代内弹道学 [M]. 北京:北京理工大学出版社,1992.

[3] Cai S Zh. Calculational Methods [M]. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1993: 227-255. (in Chinese)
蔡锁章. 计算方法 [M]. 北京:中国科学技术出版社,1993:227-255.

[4] Qian N. C^{++} Programmer Course [M]. Beijing: Tsing Hua University Press, 1999. (in Chinese)
钱　能. C^{++}程序设计教程 [M]. 北京:清华大学出版社,1999.

[5] Xu Sh L. C Common Calculational Programs [M] Beijing: Tsing Hua University Press, 1996: 167-182. (in Chinese)
徐士良. C 常用算法程序集 [M]. 北京:清华大学出版社,1996:167-182.

Calculational Model and Application of Acceleration of Projectile in Bore about DAVIS Gun Experiment

DUAN Ji-Yuan, LIU Cang-Li, WANG Yan-Ping, YU Chuan

(*Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: Aimed at idiographic structure of DAVIS gun, for accurately calculating acceleration of projectile in bore, this article emulationally calculated the launch of a DAVIS gun through classical interior ballistics, acquired the interior ballistic parameters-time curves and educed the acceleration-time curve of projectile according to bore pressure-acceleration relation. The calculated results accorded with the experimental data.

Key words: DAVIS gun; acceleration; classical interior ballistics; emulational calculation