文章编号：1000-5773(2006)02-0189-05

弹丸挤进压力对平衡炮内弹道性能的影响研究*

段吉员，王彦平，刘仓理，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：利用工程法和挤进时期内弹道法计算了某口径平衡炮的弹丸挤进压力，分析了其对内弹道性能的影响。只要参数选取合理，便可用工程值代替挤进时期内弹道计算值，既简化了计算模型，又满足了试验精度，还可为此类火炮内弹道建模和试验提供依据。

关键词：内弹道；平衡炮；挤进压力

中图分类号：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力炮，依靠弹丸和平衡体上的弹带起定位和密封作用，在其内弹道建模中，无论是用经典法还是用两相流内弹道法，均没有考虑弹带的挤进过程，认为膛压达到挤进压力时，弹丸和平衡体就开始运动，这虽然给建模工作带来简便，但给计算程序的起始参数选择增加难度，从而影响程序的计算精度。

目前，挤进压力参数值的选取参照的是一般火炮工程法，而一般火炮其发射原理与平衡炮存在较大差异，因而参数选取不够精确，需根据多次实验结果修正才符合要求。如选取值偏大，膛压、初速以及弹丸过载相应增加，内弹道时间则缩短，理论计算不可靠，失去了其实验指导的意义，如选取值偏低，情况则相反，所以，挤进压力对平衡炮内弹道性能影响非常重大，对其进行分析研究非常必要。

本工作结合平衡炮具体结构特点，分别用工程法和挤进时期内弹道法计算了挤进压力值，并把挤进时期内弹道诸元与整个忽略弹丸挤进过程的内弹道诸元作了对比分析，只要合理选取参数，挤进压力可用工程值代替挤进时期内弹道值，这样就可以忽略弹丸挤进过程对内弹道的影响，大大简化了内弹道计算模型，并满足试验精度。

2 数学建模与数值计算

2.1 挤进压力的工程计算

挤进压力的数值计算问题是内弹道学的重要实际问题之一，目前，对这个重要的弹道参数的物理性质还没有统一的看法，在计算挤进压力的方法中，用得最多、最为方便的就是工程法。

对于平衡炮这种新型滑膛无后座力炮，其结构示意图如图 1 所示，在计算挤进压力的工程法中，将采用带有三项的公式，该公式以明显的形式给出了挤进压力与火药燃气的初始压力和等效弹带的相对宽之间的关系

$$p_0 = K_1 p_H + \frac{K_1 K_2 K_3 H}{d} + \frac{K_1 K_2^2 K_3}{K_4}\left(\frac{H}{d}\right)^2$$

式中：p_0 为弹丸挤进压力；p_H 为弹丸开始运动时刻火药燃气压力；d 为平衡炮口径；H 为弹带宽。

* **收稿日期**：2005-01-04；**修回日期**：2005-03-29

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

在公式中借助系数 K_i 表示了挤进压力与辅助因素之间的关系，根据该炮所用试验弹丸的弹带结构、材料以及装药条件，可以确定各个 K_i 系数值。

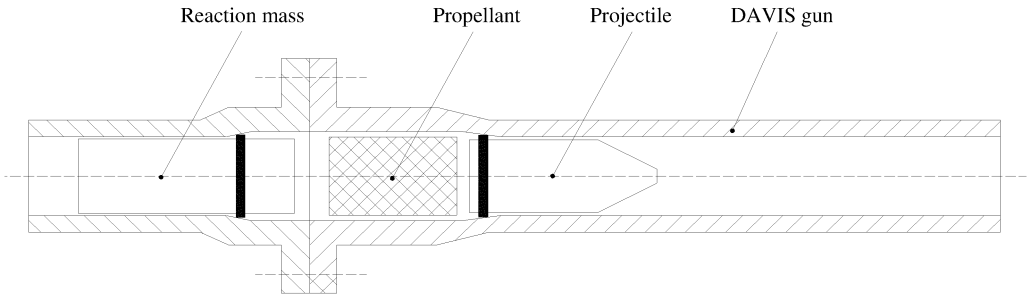


图 1 平衡炮结构示意图

Fig. 1 Schematic of DAVIS gun

K_1 取决于弹带的结构，一条弹带时，$K_1=0.75$，而平衡炮弹丸用的是一条弹带；K_2 取决于弹带的材料和涂层，平衡炮弹丸的弹带上无涂层，材料选的是塑料，可取 $K_2=15$ MPa；K_3 取决于发射装药的相对质量比 ω/m，ω 为装药量，m 为弹丸质量，根据试验所用弹丸质量和装药量，可取 $K_3=4.05$；K_4 取决于火炮的装填方式，在分装式装填条件下，$K_4=25$ MPa，而平衡炮用的是分装式装药。

在火炮分装式装填情况下，当退弹力未知时，用以下公式来计算 p_H。$p_H=400/d$。结合某口径平衡炮试验所用弹丸和弹带的具体结构，便可计算出 p_0。

2.2 挤进时期内弹道诸元的计算

在平衡炮中，采用的是分装结构，弹丸利用弹带卡在坡膛上，避免了火药气体的泄漏，不存在拨弹力和弹丸的自由行程，在挤进时期，弹丸的行程相当于弹带宽，弹后空间变化不明显，挤进段长度与药室长度相比可忽略不计，火药燃气的膨胀是次要因素，火药燃烧接近于静态燃烧。

根据平衡炮具体结构特点和有关的基本假设，从基本内弹道方程组出发，可得到挤进时期自变量为 t 的内弹道诸元的计算公式[1]。

(1) 压力计算公式

$$p=p_H e^{t/\tau} \tag{1}$$

式中：p 为挤进时期压力；τ 为装药的静态燃烧参数；t 为挤进时期时间。

$$\tau=\frac{(1/\Delta-1/\delta)I_k}{f\chi\sigma_{cp}}$$

式中：Δ 为装填密度；δ 为火药密度；I_k 为压力全冲量；f 为火药力；χ 为火药形状特征量；σ_{cp} 为挤进时期渐增性系数平均值。

$$\sigma_{cp}=\frac{1}{t_\Phi}\int_0^{t_\Phi}\sigma dt$$

式中：t_Φ 为挤进时期持续时间。

$$\sigma=\sqrt{1+\frac{4\lambda}{\chi}\psi},\quad \psi=\psi_H+\frac{\chi}{I_k}\tau p_H(e^{t/\tau}-1),\quad \psi_H=\frac{1/\Delta-1/\delta}{f/p_H-\alpha-1/\delta}$$

式中：λ 为火药形状特征量；ψ 为火药燃烧的百分数；ψ_H 为弹丸开始运动时刻火药燃烧的百分数；α 为火药燃气余容。

(2) 挤进时期弹速计算公式

$$v=\frac{S}{\bar{\varphi}m}p_H\tau(e^{t/\tau}-1)-\frac{S}{m}\tau\Pi_{cp}\frac{t}{\tau} \tag{2}$$

式中：v 为挤进时期弹速；S 为炮膛截面积；$\bar{\varphi}$ 为挤进时期弹道压力与弹底压力比的平均值；m 为弹丸质量；Π_{cp} 为嵌入阻力平均值。

$$\Pi_{cp}=\frac{n\Pi_H+\Pi_{max}}{n+1},\quad \bar{\varphi}=\left(\frac{p}{p_{CH}}\right)_{cp}$$

式中:n 为幂指数;Π_H 为初始嵌入阻力;Π_{max}为嵌入阻力最大值。

(3) 挤进时期弹丸行程计算公式

$$l=\frac{S}{\varphi m}p_H\tau^2\left(e^{t/\tau}-1-\frac{t}{\tau}\right)-\frac{S}{2m}\tau^2\Pi'_{cp}\left(\frac{t}{\tau}\right)^2 \tag{3}$$

$$\Pi'_{cp}=\frac{(n^2+3n)\Pi_H+2\Pi_{max}}{(n+1)(n+2)}$$

式中:l 为挤进时期弹丸行程。在分装式装药情况下

$$\Pi_H=p_H,\quad n=3.5$$

通过编程计算,可以得到挤进时期 p-t、v-t、l-t 曲线,如图 2、图 3、图 4 所示。图 2 给出了挤进时期膛压变化规律和挤进压力工程值,挤进压力理论计算值为 25.2 MPa,工程值为 25.1 MPa,两者相差无几。图 3 和图 4 分别给出了弹丸在挤进时期速度和行程的变化规律,在挤进时期结束时,弹速为 1.01 m/s,行程为 14.7 mm,整个挤进时期持续时间为 0.47 ms。

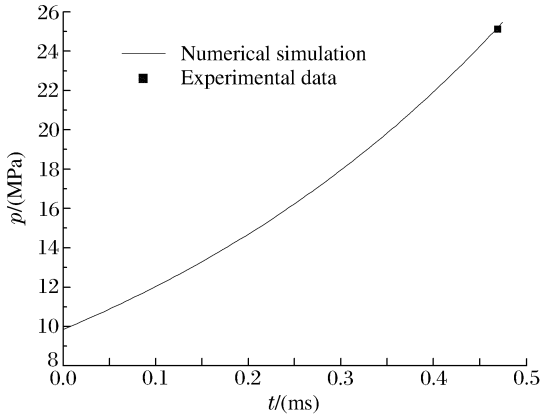


图 2　挤进时期膛压历史曲线与挤进压力工程值

Fig. 2　The p-t curve and experiential p_0 during engraving

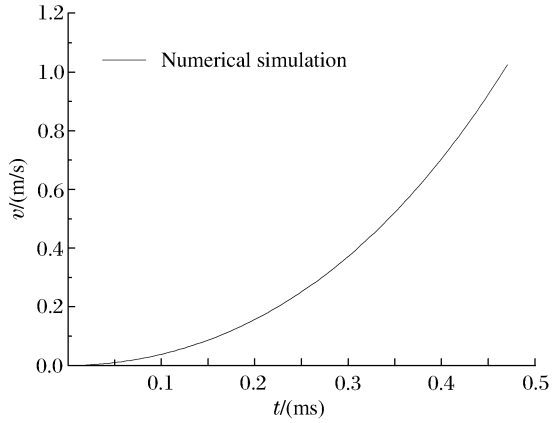


图 3　挤进时期弹丸速度历史曲线

Fig. 3　The v-t curve of projectile during engraving

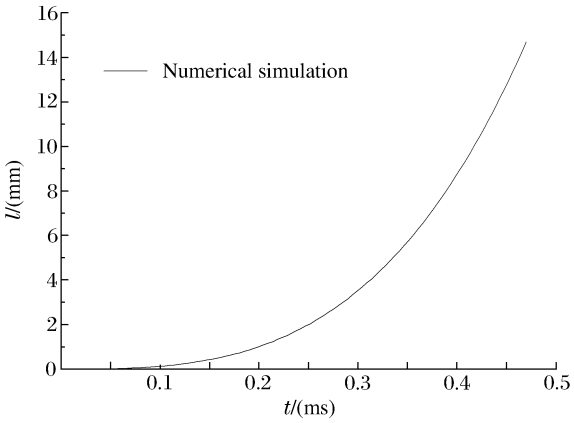


图 4　挤进时期弹丸行程历史曲线

Fig. 4　The l-t curve of projectile during engraving

2.3　忽略弹丸挤进过程的内弹道数值计算结果

在忽略弹丸挤进过程对内弹道性能的影响、认为膛压达到挤进压力时、弹丸开始运动的假设基础上,运用经典内弹道法建立内弹道计算模型[2-4],并通过编程计算[5-7],结果如图 5、图 6、图 7 所示。

图 5 至图 7 给出了内弹道时期膛压、弹丸速度以及行程的变化规律和一些实测数据,在整个内弹道时期内,弹丸行程为 8.2 m,弹初速为 700 m/s,弹丸运行时间为 21.4 ms,与之相比,挤进时期各参数所占比例极小,弹速为 0.14%,行程为 0.18%,运行时间为 2.2%,在上述假设条件下,内弹道模型精度满足试验精度要求,说明建模正确、参数选择合理。

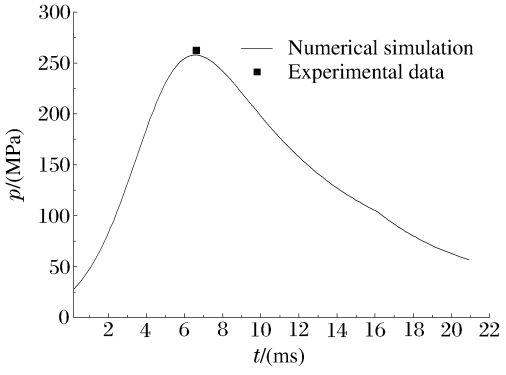


图 5　膛压计算曲线与最大膛压实测值

Fig. 5　The calculated p-t curve and measured p_m

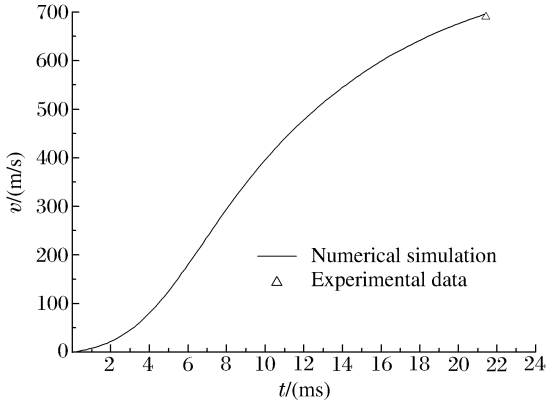


图 6 弹丸内弹道速度历史曲线与炮口速度实测值

Fig. 6 The interior ballistic v-t curve and measured muzzle velocity of projectile

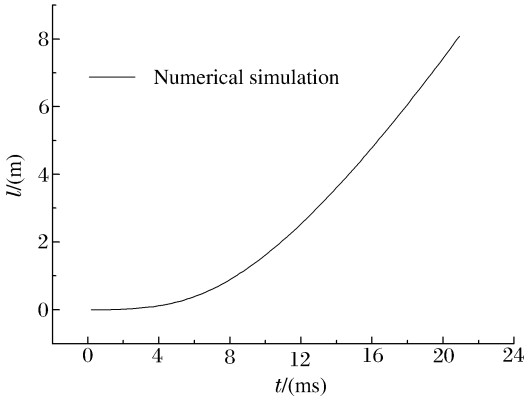


图 7 弹丸内弹道行程历史曲线

Fig. 7 The interior ballistic l-t curve of projectile

3 结果分析

只要合理选取参数，工程法 p_0 与计算的挤进时期末 p 值相差无几，可以用 p_0 代替 p，且挤进时期的所用时间、弹丸行程以及弹丸所获得的速度，在整个内弹道行程中，所占比例极小，可以忽略不计，这给内弹道建模带来极大方便，计算精度满足实验要求。

4 结 论

用两种不同方法，计算了平衡炮试验弹丸的挤进压力，并对挤进时期内弹道性能作了研究，针对某口径的平衡炮，得出了只要参数选择合理，可以用 p_0 代替 p，大大简化了内弹道模型，能满足实验设计者对弹道预估的工程需要。

References:

[1] Qierbarov E B. Interior Ballistics and Engraving Force Calculaion during Engraving of Projectile [M]. Translated by Yang J R. Beijing: National Defense Industry Press, 1997. (in Chinese)
丘尔巴诺夫 E B. 挤进时期内弹道学与挤进压力计算 [M]. 杨敬荣，译. 北京：国防工业出版社，1997.

[2] Zhang B S, 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.

[3] Jing Z 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.

[4] Zhou Y H, Wang S C. Applied Two-Phase Flow Interior Ballistics [M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1990. (in Chinese)
周彦煌，王升晨. 实用两相流内弹道学 [M]. 北京：兵器工业出版社，1990.

[5] Cai S Z. 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.

[6] 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.

[7] Xu S 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.

The Effect of Engraving Force of Projectile on Interior Ballistic Performance of DAVIS Gun

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

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

Abstract: The engraving force of projectile of a DAVIS gun through the way of project and interior ballistics during engraving has been calculated, and its effect on interior ballistic performance has been analyzed. The experiential value for theoretic model was determined, which simplified the calculation, but wih good experimental precision. Our analysis provided a ground for building interior ballistic model and experiment of such gun.

Key words: interior ballistics; DAVIS gun; engraving force