

# 一种非火药驱动气体炮内弹道模型 及发射诸元协调\*

夏正友 张 河 陈家安

(南京理工大学 南京 210094)

**摘要** 介绍一种新型非火药驱动的气体炮,它有五个气室控制气体炮的整个发射过程。给出了该气体炮的结构原理和内弹道数学模型,并通过计算机模拟,分析了这种气体炮的发射参数的协调和优化关系,指出了影响弹丸最大加速度的主要因素。

**关键词** 气体炮 发射参数 最大加速度 内弹道模型

中图法分类号 TJ012.1

## 1 引 言

国内外许多研究单位拥有不同口径和弹速的气体炮<sup>[1~4]</sup>。70 年代以来,我国已建立了口径从 14mm 到 85mm 的多座气体炮。实验研究工作开展得还不够多,安全管理复杂、设备磨损严重和实验费用偏高等是重要制约因素。我们研究的 155mm 的新型非火药驱动气体炮,不同于常见的火药驱动气体炮,也不同于其它非火药驱动的气体炮。这种新型气体炮抛弃了美国人采用的调节环控制进气量方法<sup>[1,4]</sup>,采用了四个气室控制活塞运动,用活塞运动来控制气体炮的进气量,整个气体炮的发射过程由五个气室控制。在本文中主要介绍设计和调试这种 155mm 非火药驱动气体炮的发射参数优化与协调关系,并对这种气体炮建立内弹道模型和进行数值模拟。

## 2 气体炮结构与工作原理

图 1 是 155mm 新型非火药驱动气体炮的结构简图。它由排气孔 1、速后气室 2、速前气室 3、调后气室 4、调前气室 5、活塞 6、弹丸-引信系统 7、高压气室 8、进气孔 9、炮管 10 组成。整个气体炮发射过程由五个气室控制,其中四个气室(调前气室、调后气室、速前气室、速后气室)控制活塞运动,活塞运动控制着进气量。其工作原理为:打开排气孔,活塞失去平衡,活塞开始向后迅速运动,当活塞向后运动 50mm 时,开始打开进气孔,随着活塞运动使进气孔的面积逐渐增大,直到进气孔完全打开。高压气室通过进气孔向炮管进气,炮管底部气压剧增,如果弹丸后有膜片,则气流要冲破膜片,才能推动弹丸飞行。此时进气孔继续向炮管进气,弹丸速度越来越快,加速度越来越高。高压气室的气压一般能达到 25~100MPa,其它四个气室的气压为 4~20MPa,考虑到该空气炮主要用于引信实验,弹丸质量应为 3~7kg。五个气室均充高压空气,这主要是考虑经济性和安全性。

\* 夏正友:男,1974 年 2 月生,硕士研究生。

1998-06-02 收到原稿,1998-09-09 收到修改稿。

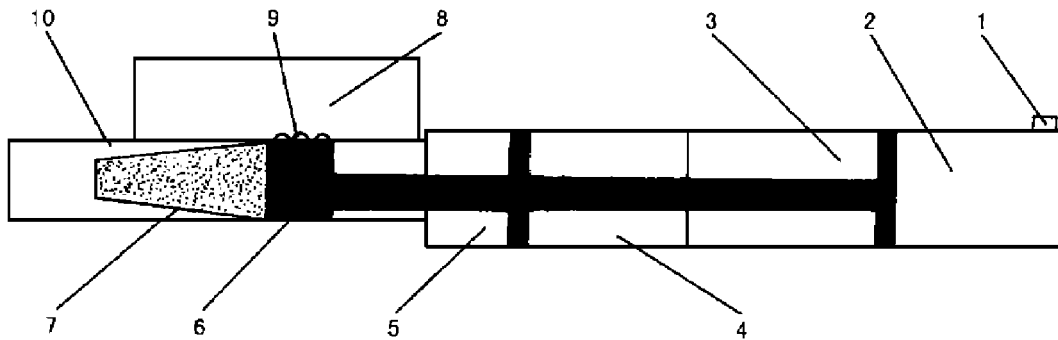


图 1 气体炮结构简图  
Fig.1 Configuration of gas gun

### 3 新型气体炮诸元的协调关系

为了使发射参数更为合理并相互匹配,我们做了大量的实验和计算工作,在现有气体炮尺寸已经确定的情况下,分别改变高压气室、调前气室、调后气室、速前气室、速后气室、弹丸质量,研究它们与最大膛压(或弹丸最大加速度)的关系,其结果如下。

#### 3.1 高压气室对弹丸最大加速度的影响

对于这种新型非火药驱动气体炮来说,高压气室是它的驱动能源,改变高压气室压力会直接导致膛内压力迅速发生变化,图 2 说明了这一点。曲线的变化近似成线性,在其它参数不变的情况下,随着高压气室的压力升高,弹丸的加速度也随着呈近似线性增大。这种变化曲线对提高最大膛压有一定的指导意义。



图 2 高压气室压力与最大加速度的曲线  
Fig.2 Max. acceleration distributions at different high pressure chamber

#### 3.2 调前、调后、速前、速后四个气室对弹丸最大加速度的影响

图 3~5 是四个气室压力与弹丸最大加速度的关系曲线。由图 3 可见,速后气室不影响

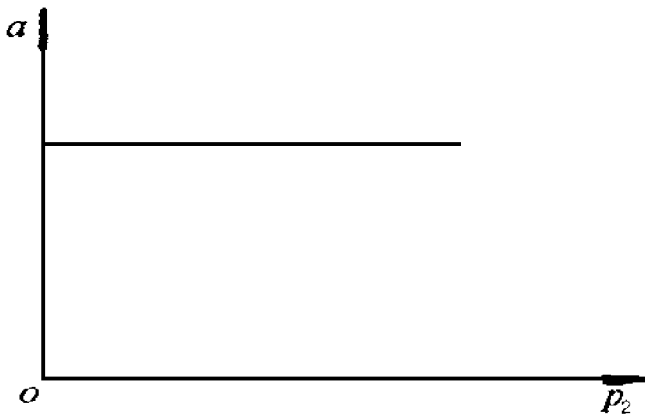


图 3 速后气室压力与最大加速度的曲线  
Fig.3 Max. acceleration distributions at different speed behind pressure chamber

弹丸的最大加速度。速后气室的压力  $p_2$  一般在 4MPa 以上,而排气孔与空气相连,外界环境压力  $p_e$  约等于 0.1MPa。其压力比  $p_2/p_e \gg 0.52828$ ,所以排气孔始终处于壅塞状态。排气孔的排气量是一定的,不会因为速后气室压力增大而增大<sup>[5-6]</sup>,所以提高速后气室压力对弹丸的最大加速度无作用。由图 4 可见,速前气室压力对弹丸的最大加速度呈现非线性变化。因为速前气室压力增大,就加速了活塞的运动,导致了进气孔的排气量迅速增大,最终使弹丸的最大加速度得到增加。图 5 的现象与图 4 类似。根据这些曲线,可以改进、优化、协调参数,

以提高弹丸的最大加速度。

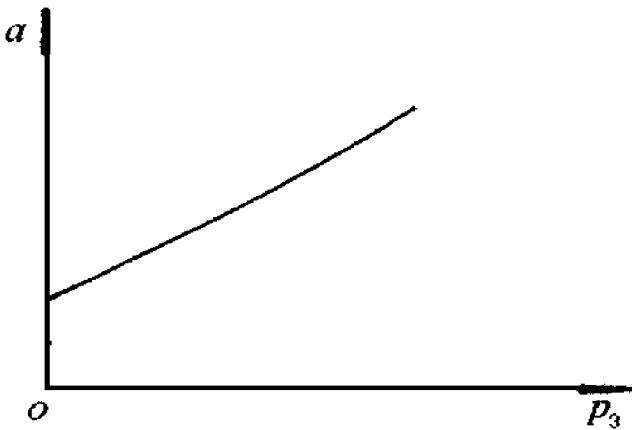


图 4 速前气室压力与最大加速度的曲线

Fig.4 Max. acceleration distributions at different speed front pressure chamber

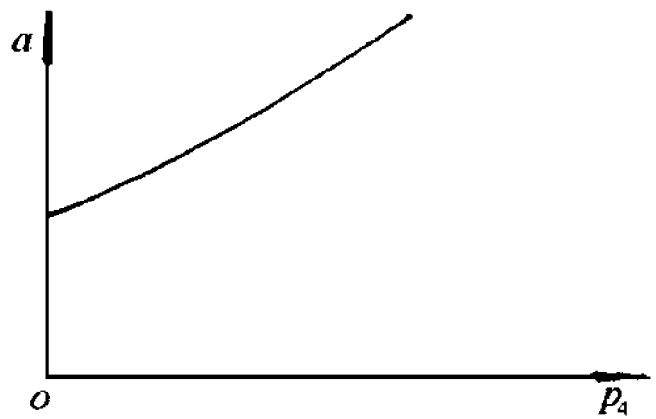


图 5 调前、调后气室压力与最大加速度的曲线

Fig.5 Max. acceleration distributions at different adjust front and adjust behind pressure chamber

### 3.3 弹丸质量对弹丸最大加速度的影响

弹丸是气体炮中最后一个能量传递器件,它吸收高压气体的势能,转变为自身的动能。弹丸加速度为

$$a = (p_d - p_f)A_d / m_d$$

式中: $p_d$  为弹底压力, $p_f$  为弹前压力, $A_d$  为横截面积, $m_d$  为弹丸质量。从图 6 加速度与弹丸质量曲线可以看出,随着弹丸质量的增加,弹丸最大加速度急剧降低,这一段曲线呈现非线性变化;当弹丸的质量进一步增加,此时弹丸的最大加速度呈现近似线性降低。我们在实验中使用 0.45kg 弹丸得到弹丸的最大加速度为  $348880\text{m/s}^2$ 。这表明,减小弹丸质量,不失为提高弹丸最大加速度的一个有效途径。

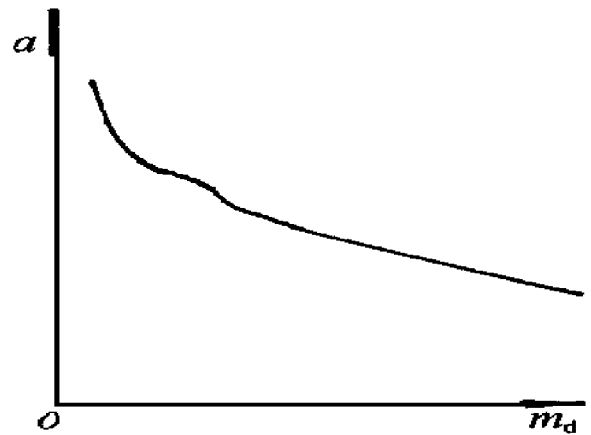


图 6 弹丸质量与加速度的曲线

Fig.6 Max. acceleration distributions at different mass

## 4 气体炮内弹道数学模型

气体炮整个发射过程可以分为三个阶段:第一阶段,从打开排气孔到活塞开始运动;第二阶段,从活塞开始运动到弹丸开始运动;第三阶段,从弹丸开始运动到发射结束。在第一阶段,设活塞受到的合力为  $F_h$ ,则活塞加速度

$$dx/dt = F_h / m_h$$

式中: $m_h$  为活塞质量。进气孔的面积  $S = \varphi(x)$  是活塞位移函数。后两个阶段的数学模型如下。

#### (1) 高压气室、进气孔的物理模型

对于进气孔,可认为是收敛-扩张喷管<sup>[5]</sup>。实验中高压气室在发射瞬间压力变化微小,仅因为进气孔面积大小改变而流量改变,故可将进气孔和高压气室部分作为一个系统,看作定常二维平面流,用特征线方法求解<sup>[5]</sup>。但是根据实际情况,也可以将它简化为定常一维运动

$$m = p_g A_t \Gamma / c_0$$

式中： $m$  为流量， $p_g$  为高压气室压力， $A_t$  为进气孔的面积， $\Gamma$  是常数， $c_0$  是当地声速。

(2) 膛内运动的数学模型

假设膛内流动是一维非定常流动，所有流动参量都是空间坐标  $x$  和时间坐标  $t$  的函数，其内弹道数学模型为

$$\begin{cases} \partial p / \partial t + \partial(\rho u) / \partial x = m / A \\ \partial(\rho u) / \partial t + \partial(\rho u^2) / \partial x + \partial p / \partial x = mu / A \\ \partial[\rho(e + u^2/2)] / \partial t + \partial[\rho u(e + p/\rho + u^2/2)] / \partial x = mH_0 / A \\ e = p(1 - \alpha\rho) / [\rho(k - 1)] \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\alpha$  为余容， $p$ 、 $u$ 、 $e$ 、 $\rho$  分别为质点的压力、速度、能量、密度， $A$  为炮管横截面积。

左边界条件：如果不考虑后座影响，则  $u(0, 0) = u(0, t) = 0$ 。

右边界条件：动边界，在弹丸底部气流速度等于弹丸运动速度

$$u(x_d, t) = \int_0^t \frac{A_d(p_d - p_f)}{\Phi_1 m_d} dt$$

式中： $p_f$  为弹前的激波阻力， $p_d$  是弹底压力， $A_d$  为横截面积， $m_d$  为弹丸质量， $\Phi_1$  是系数。

首先计算进气孔的流量，然后计算方程(1)，又计算一次流量，然后计算方程(1)，如此循环进行。计算方程(1)采用了 1984 年 MacComack 法<sup>[7]</sup>。

### 5 数值模拟结果

图 7 为数值模拟的加速度随时间变化曲线图，其中实线为数值模拟结果，虚线为实际测量结果。从图 7(a)中可知，在开始一段时间里，弹丸的加速度为零，这符合实际测量的结果。这是由于在弹底部加上膜片，而膜片破膜需要一定的压力，在弹底压力没有达到该压力时，弹丸静止不动，故弹丸加速度在一小段时间内为零。图 7(b)和图 7(c)最高峰值有一段平稳期，这是因为在弹丸达到最大值时，虽然弹丸前进弹底的压力降低，但是作为动力源进气孔不同于一般的火炮的燃烧室，没有完全打开，随着进气孔打开，气体的进气量进一步增大，弥补随着弹丸的前进而造成的压力降低，所以在最大值出现一段平缓期。而图 7(a)没有出现平缓期是因为在达到最大加速度时进气孔完全打开。

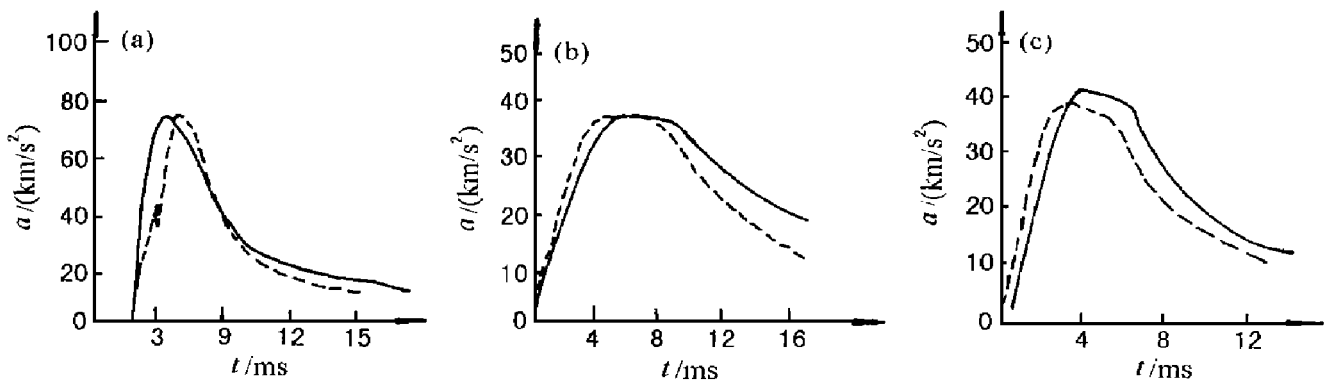


图 7 加速度随时间变化曲线

Fig.7 Acceleration vs. time

## 6 结 论

提高弹丸的加速度,有以下几种途径:(1)有限地减小弹丸的质量;(2)使用膜片;(3)提高高压气室压力;(4)增加加速前气室压力;(5)增加调后和调前气室的压力差值。当然采用这些途径不能无限制地提高弹丸加速度,但是在给定气体炮规格尺寸下,使用这些途径可获得良好的效果。

### 参 考 文 献

- 1 Seigel A E. Theory of High Speed Gas Gun. AD475660, 1965
- 2 林俊德.非火药驱动的二级气体炮的发射参数分析.爆炸与冲击,1995,15(3):229~240
- 3 陈大年.二级气体炮内弹道的数值模拟及性能分析.爆炸与冲击,1989,9(1):37~42
- 4 陈家安.气体炮优化和设计.现代引信,1979,4:34~39
- 5 伊曼扭尔.气体动力学的理论与应用.北京:宇航出版社,1992.356~368
- 6 潘锦珊.气体动力学基础.北京:国防工业出版社,1989.280~312
- 7 马铁犹.计算流体力学.北京:北京航空学院出版社,1986.406~418

## OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF BALLISTIC MODELS FOR A NEW KIND OF NON POWDER GAS GUN PROJECTION

Xia Zhengyou, Zhang He, Chen Jiaan

(*Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094*)

**ABSTRACT** A new kind of non powder gas gun is given in this paper. It has five high gas chambers to control the whole motion of gas gun projection. The structure and principle of the gas gun is described and the ballistic model of gas gun is given in the paper. Parameters of gas gun is analyzed and most of them are optimized.

**KEY WORDS** non powder gas gun, parameters, max. acceleration, ballistic model