

气体炮内弹道建模与发射环境模拟研究*

仲伟君 赵晓利 齐杏林

(军械工程学院弹药工程系, 石家庄 050003)

摘要 气体炮以其优良的性能,在兵器弹道环境模拟领域得到了较好的应用.首先分析了典型弹药的发射环境参数,并找出了其特征值.然后运用气体动力学的相似理论建立了气体炮的内弹道模型,并在计算机上进行了数值模拟.为后续气体炮的结构设计、相关设备的选型、气体炮参数的调整提供了理论依据.

关键词 气体炮,内弹道建模,发射环境模拟

引言

弹药的发射是弹药系统有效作用的一个非常重要的组成部分,在发射过程中,弹药、火炮武器系统要承受比较恶劣的发射冲击.当然,这些冲击的作用是两方面的:一方面可能损坏弹药组件和火炮部件;另一方面则可以利用产生的过载使弹药组件产生相应的作用如弹丸获得速度、引信解除膛内保险等.为了摸清发射过程,比较传统的方法是进行靶场试验,其最大的缺点是耗费大量的人力、财力、物力而且危险性大.因此,人们就想到了实验室试

验,用气体炮进行实验室模拟.之所以选用气体炮,是因为我们可以通过调整气体炮的参数,比较真实地模拟火炮弹药系统的膛内过程.而且设备可重复使用性好、危险性小、经济性好.

1 典型弹药发射环境参数分析及特征值

最能反应弹药发射环境的参数为发射过程中的最大膛压值 p_m (单位 Mpa) 和最大膛压出现的时间(上升沿) T (单位 ms), 此处选择最大加速度(最大膛压时刻弹丸的加速度) 及上升沿 T 为特征值. 不同火炮的最大膛压值和上升沿如表 1 所示.

表 1 火炮的最大膛压及上升沿

Table 1 The maximum bore pressure and ascending time of different cannons

cannon	maximum bore pressure p_m /Mpa	ascending time T /ms
cannons, howitzer cannon, howitzer	200.4 ~ 464.3, approximately 300	2.3 ~ 6.6, generally 3 ~ 6
ack-ack	approximately 300	0.9 ~ 5, approximately 1
tank gun	approximately 500	3 ~ 6
chase gun	approximately 300	1 ~ 3, 3 ~ 6
aircraft cannon	approximately 300	0.5 ~ 1
mortar bomb	26 ~ 103	1 ~ 7
recoilless rifle	30 ~ 75	2.8 ~ 7.5

经分析知,一般火炮的膛压最大值约 300 Mpa,最大不超过 500 Mpa,最大加速度多在 10000 ~ 15000 g 之间,一般不超过 20000 g,最大膛压出现的时间分布在 3 ~ 6 ms 之间的居多,最大不超过 8 ms.这就为我们调节气体炮的参数提供了较好的条件,只要气体炮的内弹道能获得上述参数,就能

比较好的模拟真实的膛内过程.

2 气体炮内弹道模型的建立

讨论建立气体炮内弹道模型^[2].

2.1 实物模型的简化

气体炮是根据动力学相似理论,在结构上应用

2004-10-29 收到第 1 稿,2004-12-20 收到修改稿.

* 国家重点实验室预研课题

气体能源供应方式,满足火炮发射药在膛内燃烧时,气体生成速率和弹丸运动所造成的弹后空间的压力变化规律.换句话说,也即在高压室与炮管之间应增加一个调压装置,该装置应能控制高压室流入炮膛的气量大小与快慢变化程度.使气体炮的膛压大小和变化规律符合火炮的膛压变化规律.调压装置的作用就是控制调节气体炮弹后的气体增长

率,如果该气体炮的气体增长率为火炮的火药气体生成率对弹丸速度的作用相同,那么气体炮就可以完全真实地模拟火炮的发射环境.

将实物气体炮简化为如图 1 所示结构,有 A, B, C, D 4 个腔通过控制 4 个腔的压力来控制前后活塞的运动,打开进气孔,高压气体进入膛内,膨胀推动弹丸运动.

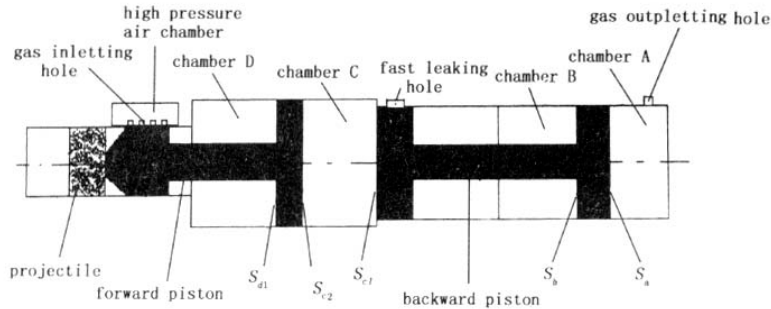


图 1 气体炮结构简化模型

Fig. 1 Simplified model of the structure of the gas gun

工作过程:先向 A 腔充气,使后活塞堵住速泄孔,然后向 B 腔充气,但必须保证后活塞向左压紧;然后向 C 腔充气,使前活塞左端头部进入炮膛,密闭高压室气体进入炮膛的进气孔;再向 D 腔充气但必须保证前活塞向左压紧,充高压气体,准备完毕.

发射时,打开 A 腔的排气阀,A 腔压力下降,后活塞所受向右推力大于向左推力时,向右运动,打开速泄孔,C 腔压力急剧下降,D 对前活塞压力迅速大于 C 腔,推动前活塞向右运动,逐渐打开高压气室到炮膛的进气孔,高压室的气体快速流入炮膛,推动弹丸加速运动,完成发射动作.

2.2 A 腔模型

A 腔为变容情况下有漏气时的绝热压缩(不考虑热交换).充气完毕时刻 A 腔气体参数:压力 p_{ao} , 容积 W_{ao} , 温度 T_{ao} , 气体质量 m_{ao} , 密度 ρ_{ao} ;经某一时间 t 后 A 腔气体参数:压力 p_a , 容积 W_a , 温度 T_a , 气体质量 m_a .后面 B 腔、C 腔、D 腔、高压气室、膛内有关这部分参数与 A 腔类似,不再列举.

根据气体状态方程

$$p_{ao}W_{ao} = m_{ao}RT_{ao} \quad (1)$$

$$p_aW_a = m_aRT_a \quad (2)$$

其中 R 为普适气体常数.

由式(1)/(2)得

$$\frac{p_{ao}W_{ao}}{p_aW_a} = \frac{m_{ao}T_{ao}}{m_aT_a} \quad (3)$$

过程为绝热^[4]

$$\frac{T_{ao}}{T_a} = \left(\frac{p_{ao}}{p_a}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (4)$$

其中 k 为绝热指数.

代入式(3),得

$$\left(\frac{p_{ao}}{p_a}\right)^{\frac{1}{k}} = \frac{W_a m_{ao}}{W_{ao} m_a} \quad (5)$$

设时间 t 后,后活塞的位移为 x_{hb} , A 腔截面积 S_a

$$W_a = W_{ao} - S_a x_{hb} \quad (6)$$

t 时间内漏出气体量 $\int_0^t G_{ea} dt$

$$m_a = m_{ao} - S_a x_{hb} \quad (7)$$

代入方程(5),得

$$\left(\frac{p_a}{p_{ao}}\right)^{\frac{1}{k}} \left(\frac{W_{ao} - S_a x_{hb}}{W_{ao}}\right) = \frac{m_{ao} - \int_0^t G_{ea} dt}{m_{ao}} \quad (8)$$

由于气室压力始终比较高,因此对外界的大气压力可构成临界状态,流量可用临界流量^[4]表示

$$G_{ea} = S_{ea} K_o \sqrt{\frac{\rho_{ao}}{p_{ao}^{\frac{k+1}{k}}}} \quad (9)$$

其中 S_{ea} 为排气阀面积; K_o 为气流参数(与气体有

关的常数).

所以,A腔方程为

$$\frac{S_a}{p_{ao}^{\frac{1}{k}} W_{ao}} p_a \frac{dx_{hb}}{dt} + \frac{1}{k} \frac{1}{p_{ao}^{\frac{1}{k}}} \frac{dp_a}{dt} \left(\frac{W_{ao} - S_a x_{hb}}{W_{ao}} \right) + \frac{S_{ea} K_o}{m_{ao}} \sqrt{\frac{\rho_{ao}}{p_{ao}^{\frac{1}{k}}}} p_a^{\frac{3k-1}{2k}} = 0 \quad (10)$$

2.3 B腔模型

B腔为变容情况下无质量变化时的绝热膨胀^[4],方程为

$$p_b = p_{bo} W_{bo}^k \frac{1}{W_b^k} = p_{bo} W_{bo}^k \frac{1}{(W_{bo} + x_{hb} S_b)^k} \quad (11)$$

2.4 C腔模型

C腔为变容情况下有漏气时的绝热压缩^[4],方程为

$$p_c (S_{c1} \frac{dx_{hb}}{dt} - S_{c2} \frac{dx_{hf}}{dt}) + \frac{1}{k} (W_{co} + S_{c1} x_{hb} - S_{c2} x_{hf}) \frac{dp_c}{dt} + K_o \sqrt{\frac{1}{\rho_{co}}} p_c^{\frac{3k-1}{2k}} S_{ec} = 0 \quad (12)$$

其中 S_{c2} 为前活塞后部在C腔内的截面积; x_{hf} 为前活塞 t 时间内的位移; S_{ec} 为速泄孔面积.

2.5 D腔模型

D腔为变容情况下无质量变化时的绝热膨胀^[4],方程为

$$p_d = p_{do} W_{do}^k \frac{1}{W_d^k} = p_{do} W_{do}^k \frac{1}{(W_{do} + S_{d1} x_{hf})^k} \quad (13)$$

其中 S_{d1} 为前活塞后部在D腔内的截面积.

2.6 高压气室模型

高压气室为绝热定容气室放气^[4],方程为

$$\frac{dp_g}{dt} = G_i \{ [W_{go} - am_{go} + \alpha (p_g/p_{go})^{\frac{1}{k}} m_{go}]^2 \} / \{ p_g^{\frac{2-k}{k}} p_{go}^{(-\frac{2}{k})} \alpha W_{go} m_{go}^2 \frac{1}{k} - [W_{go} - am_{go} + \alpha (p_g/p_{go})^{\frac{1}{k}} m_{go}] \times W_{go} m_{go} \frac{1}{k} p_g^{\frac{1-k}{k}} p_{go}^{(-\frac{1}{k})} \} \quad (14)$$

其中 $\rho_g = m_g/W_{go}$; 流量 $G_i = K_o S_i \sqrt{p_g \rho_g}$; S_i 为进气孔面积; p_g 为高压气室压力; ρ_g 为高压气室气体密度; α 为气体余容.

2.7 膛内模型

膛内过程为有充气时的绝热膨胀^[4],方程为

$$\frac{dp}{dt} = \{ m_o S (\frac{dx}{dt} + \frac{dx_{hf}}{dt}) [(W_o - am_o) p_o^{\frac{1}{k}} p^{(-\frac{1}{k})} + am_o] - G_i [(W_o - am_o) p_o^{\frac{1}{k}} p^{(-\frac{1}{k})} + am_o]^2 \} / \{ [W_o + S(x + x_{hf})] m_o (W_o - am_o) \times p_o^{\frac{1}{k}} (-\frac{1}{k}) p^{(-1/k-k)} \} \quad (15)$$

2.8 后活塞模型

对后活塞,由牛顿第二定律

$$p_c S_{c1} + p_b S_b - p_a S_a = M_{hb} \frac{d^2 x_{hb}}{dt^2} \quad (16)$$

其中 M_{hb} 为后活塞质量; S_{c1} 为后活塞前部在C腔内的截面积; x_{hf} 为后活塞位移.

2.9 前活塞模型

对前活塞,由牛顿第二定律

$$pS + p_d S_{d1} - p_c S_{c2} = M_{hf} \frac{d^2 x_{hf}}{dt^2} \quad (17)$$

2.10 弹丸模型

对弹丸,由牛顿第二定律

$$\frac{dx}{dt} = v_d; \frac{dv_d}{dt} = \frac{S_p}{\varphi m_d} \quad (18)$$

其中 v_d 为弹丸速度; φ 为质量虚拟系数.

3 数值模拟及分析

依据龙格-库塔思想,运用MATLAB语言编制程序,并进行计算机数值计算.下面所列图2~图10为计算机模拟出的曲线,其中纵轴分别为膛压 p ,弹丸速度 v_d ,弹丸位移 x ,横轴为时间 t ,分析如下:

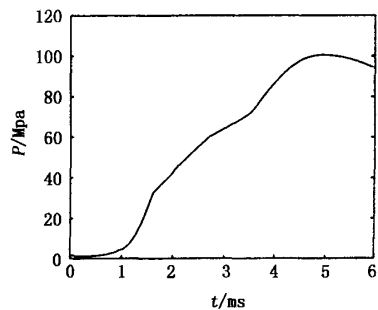


图2 膛压曲线

Fig.2 Curve of the bore pressure

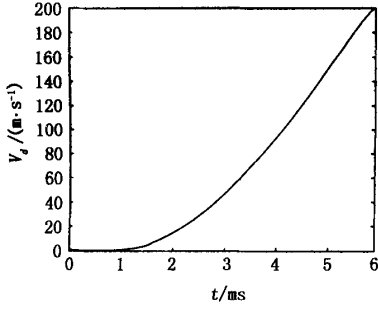


图 3 弹丸速度曲线

Fig. 2 Curve of the velocity of the projectile

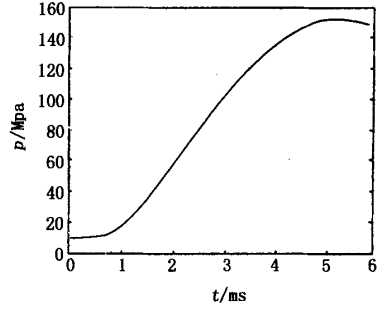


图 7 膛压曲线

Fig. 2 Curve of the bore pressure

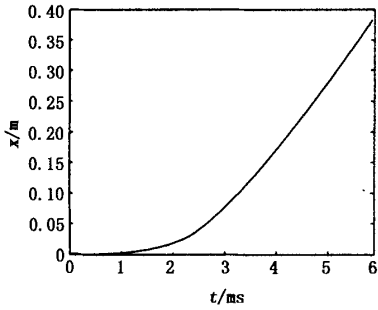


图 4 弹丸位移曲线

Fig. 4 Curve of the displacement of the projectile

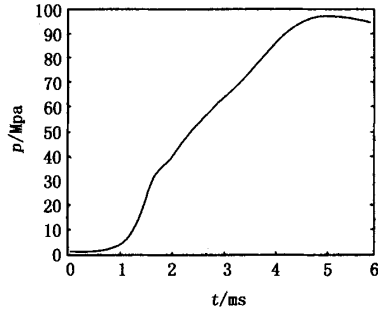


图 8 膛压曲线

Fig. 8 Curve of the bore pressure

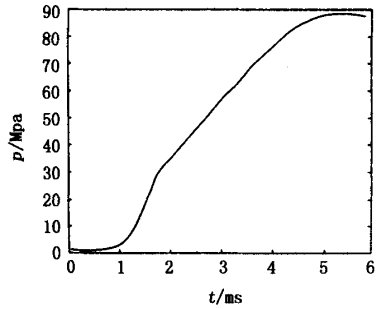


图 5 膛压曲线

Fig. 5 Curve of the bore pressure

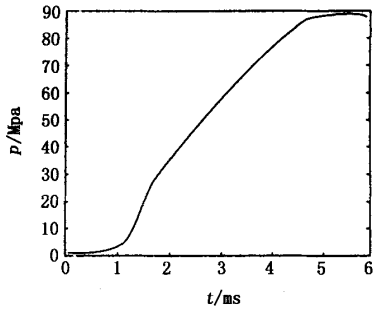


图 9 膛压曲线

Fig. 9 Curve of the bore pressure

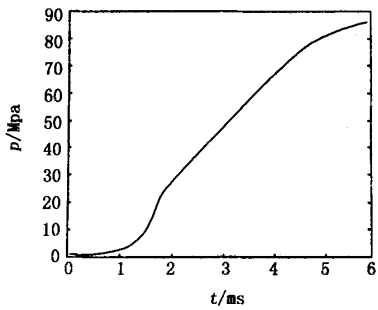


图 6 膛压曲线

Fig. 6 Curve of the bore pressure

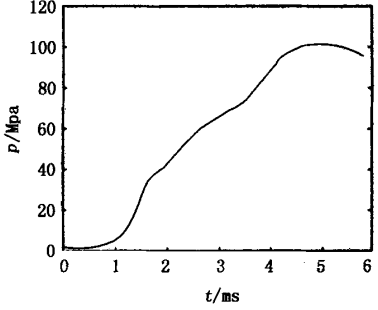


图 10 膛压曲线

Fig. 2 Curve of the bore pressure

1)图2,图3,图4为在同一气体炮参数下的模拟结果,表明该气体炮无论是膛内弹丸加速度,弹丸速度、弹丸位移均于实际发射环境有较好的吻合,满足模拟要求。

2)图5为增大A腔压力所得的模拟结果,由图可见,最大压力有所减小,上升沿有所增大,但不太明显。是因为后活塞运动减慢,导致打开速泄孔的速度减慢,C腔压力减小变慢,前活塞运动减慢,打开进气孔速度变慢,因此最大压力有所减小,上升沿有所增加。

3)图6为减小C腔压力所得的模拟结果,由图可见,上升沿增大(明显),最大压力有所减小(不明显)。

4)图7为增大膛内压力所得模拟结果,由图可见,上升沿减小(明显),最大压力增大(明显),原因是前活塞运动速度加快,打开进气孔速度加快。

5)图8为增大高压气室压力所得模拟结果,由图可见,最大压力增大,上升沿也有所增大,压力增大的作用强于由于弹丸运动压力减小的作用。

6)图9为增大A腔排气阀面积所得模拟结果,由图可见,最大压力有所增大,上升沿有所减小,都不太明显,因为A腔排气加快,相应活塞运动加快,与前面分析类似。

7)图10为增大进气孔所得的模拟结果,上升沿减小,最大压力增大。

4 结论

该气体炮可以实现弹药发射环境的模拟,特别是上升沿部分,无论是最大膛内压力还是上升沿时

间,通过气体炮参数的适当调整,有一个比较理想的模拟范围。一般火炮膛内最大加速度为10000~15000 g,上升沿时间约3~6 ms,这通过调整都可以实现。

参 考 文 献

- 1 王金贵. 气体炮原理及技术. 北京:国防工业出版社, 2001. 1~2 (Wang Jingui. Principle and Technology of Gas Gun. Beijing: National Defense Press, 2001. 1~2 (in Chinese))
- 2 姜志保, 齐杏林, 仲伟君. 一种调节阀式气体炮建模与分析. 军械工程学院学报, 2002, 14(4): 29~33 (Jiang Zhibao, Qi Xinlin, Zhong Weijun. Modeling and analysis of a kind of adjust-valve gas gun. *Journal of Ordnance Engineering College*, 2002, 14(4): 29~33 (in Chinese))
- 3 夏正友, 张河, 陈家安. 一种非火药驱动气体炮内弹道模型及发射诸元协调. 爆炸与冲击, 1999, 19(2): 146~150 (Xia Zhengyou, Zhang He, Chen Jiaan. Optimization of parameters of ballistic models for a new kind of non powder gas gun projection. *Explosion and Shock Waves*, 1999, 19(2): 146~150 (in Chinese))
- 4 陆家鹏. 自动武器学(气体动力学部分). 北京:国防工业出版社, 1988. 205~230. (Lu Jiapeng. Automatic Weapon Science (Gas Dynamics). Beijing: National Defense Press, 1988. 205~230 (in Chinese))
- 5 王沫然. MATLAB6.0与科学计算. 北京:电子工业出版社, 2001. 166~267 (Wang Moran. MATLAB6.0 and Scientific Calculation. Beijing: Electronic Technology Press, 2001. 166~267 (in Chinese))

STUDY ON THE MODELING OF THE INTERNAL BALLISTIC OF A GAS GUN AND LAUNCHING ENVIRONMENT SIMULATION*

Zhong Weijun Zhao Xiaoli Qi Xinglin

(Department of Ammunition Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract The gas gun is well applied in the ballistic environment simulation of weapons by its excellent performance. In the paper, the launching environment parameters are analyzed firstly, and the characteristic value is found. And then the internal ballistic model of the gas gun is established by applying the similar theory of gas kinetics. Finally, the model is simulated on the computer and analyzed. The conclusions in the paper afford theoretical foundations for the following construction design of the gas gun, choosing of the according equipments and adjusting of the parameters of the gas gun.

Key words gas gun, internal ballistic modeling, launching environment simulation