

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.05.019

串式装药两相流模型及数值求解

张江波, 余斌, 张玉成, 李强, 严文荣, 闫光虎, 贾永杰
(西安近代化学研究所, 西安 710065)

摘要: 为改善串式装药的内弹道性能, 对超高射频频弹幕武器的核心技术串式装药进行研究。根据内弹道学及两相流相关基础知识, 通过合理假设建立了串式装药的准两相流内弹道数学物理模型, 给出计算方法, 并采用 MATLAB 编写了计算程序, 以 30 mm 口径武器为基础进行了数值求解, 对求解结果给出了较好的三维图例, 反映了发射药的燃烧规律及弹丸的运动过程。从理论上对侧药室密封和不密封进行了计算。结果表明, 在最大压力保持基本不变的情况下初速由未密封时的 588.4 m/s 提高到密封后的 626.3 m/s, 初速提高了 6.4%, 对侧药室密封能够在一定程度上改善串式装药的内弹道性能。

关键词: 发射药; 内弹道; 两相流; 串式装药; 炮口初速
中图分类号: TJ410.5⁺2 **文献标志码:** A

Two-Phase Flow Model and Numerical Solution for Serial Propellant Charge

Zhang Jiangbo, Yu Bin, Zhang Yucheng, Li Qiang, Yan Wenrong, Yan Guanghu, Jia Yongjie
(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: Research on key technology of the serial propellant charge has been done for the super high firing-rate barrage weapon in order to improve its interior ballistic performance. A quasi-two-phase flow interior ballistic model of mathematics and physics is established based on basic knowledge of interior ballistics and two-phase flow through reasonable hypothesis. A computing method is gained and a computing program is written by using MATLAB. Numerical solution is done on the basis of 30 mm caliber weapons and a better three-dimensional illustration on computing results is gained, the burning rules of gun propellant and process of projectile movement are reflected on the illustration. A calculation for the sealing and unsealing of side chamber is carried out theoretically. The results show that the muzzle velocity is raised from 588.4 m/s (unsealing) to 626.3 m/s (sealing) under the condition in keeping the maximum pressure basically unchanged. It means the sealing of side chamber could improve interior ballistic performance of the serial propellant charge in some extent.

Keywords: gun propellant; interior ballistic; two-phase flow; serial propellant charge; muzzle velocity

0 引言

金属风暴武器是由澳大利亚金属风暴公司推出的一种新概念武器系统, 到目前为止, 这种武器系统发展得较为完善, 国内南京理工大学在这方面做了不少研究, 对侧装药结构及密封结构进行了研究^[1]。串式装药作为超高射频频弹幕武器的核心技术之一, 直接决定了弹幕武器初速的稳定性、发射的可靠性、目标的毁伤性、工程结构的合理性, 因此, 对串式装药的内弹道开展理论研究能够对武器的设计和项目的进展起到推动和促进作用, 能够减少试验次数和提高试验质量, 使试验研究水平更进一步。

笔者以典型串式装药结构作为研究对象, 以两相流基本理论为基础, 建立了串式装药的两相流内弹道模型并编写了相应的计算程序, 对内弹道过程进行了计算求解。

1 弹药结构特点^[2]

根据串式装药的结构及发射原理, 串式装药为前一发弹药与后一发弹药相连, 在弹药体内依次串联了数发弹丸, 发射装药及底火均预装填在火炮膛内, 通过射击频率控制器来控制各个装药的点火时间差。串式装药中每个独立药室可采用不同的发射药和不同的装药量。5 个弹丸的起始位置不同, 运动过程也各不相同。因此, 研究串式装药的膛内燃烧规律及弹丸运动规律相当重要, 可通过适当调节和控制装药量及药型, 来保证弹道性能的一致性。

2 串式装药内弹道模型

2.1 内弹道物理过程

根据以上描述的串式装药结构, 基于一维两相流基础, 对以上的弹道过程有以下描述。A 发弹丸

收稿日期: 2011-01-19; 修回日期: 2011-02-22

作者简介: 张江波 (1982—), 男, 河北人, 硕士, 助理研究员, 从事发射药及装药技术、新概念发射技术、点传火及内弹道研究。

运动时, 即第1发弹丸的弹道过程, 为研究方便假定起始弹道过程遵循零维计算方法, 则当A的底部压力大于启动压力后, 弹丸开始运动, 其中发射药及发射药燃气做气固两相流体进行处理, 其中不考虑气体成分的二次反应, 只考虑气固流体之间的相变及能量的转化, 此时, 在 x 轴方(作为一维计算方法只考虑 x 轴)向上流体压力不断增大, 由于左壁固定(可看作固壁), 因此流体将推动弹丸向右运动, 假定气固速度相等, 即弹底不存在纯气相区, 那么流体左端速度即为弹丸速度。当弹丸开始运动后, 膛内不断进行着固相向气相的转变, 流体的压缩及膨胀, 伴随着温度、压力、相变、流动、压缩、膨胀的交替不断变化推动弹丸前进, 弹丸的高速运动将引起弹前激波, 弹前激波作为阻力项进行考虑。这个复杂的过程遵循质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律, 作为具有两相的流体, 作为系统及整体分项考虑求解即可。不考虑2发及以上弹丸同时处于膛内运动, 忽略前一发弹丸发射后滞留气体对后发弹丸的影响。当第1发弹丸运动出炮口后, B药室(第2发弹丸)发射药被点燃, 由于侧药室与炮管相通, 喷孔面积较大, 不适合小孔流量计算方法, 因此在此作连通考虑, 药室容积要分去一部分能量, 作负能量项考虑。B药室发射药燃烧后弹丸运动有着与A发弹丸相同的燃烧运动过程, 过程描述及处理方法同A。

对于C发弹丸, 与B弹丸不同之处是要经过一个侧药室的膨胀, 在此认为侧药室作为负能量项存在, 其它同上。对于D和E弹丸有着以上相同的燃烧运动机理。

综上所述, 串式装药的一维两相流内弹道过程遵循三大守恒定律, 外加一些必要的辅助方程即可较为详细的进行描述。

2.2 基本假设及方程

为较好地建立数学模型, 特作出以下基本假设^[2-5]:

- 1) 同一批装药由完全相同(包括形状、尺寸、物理化学性能)的药粒所组成。
- 2) 对包含在某单元体内的固体火药来说, 火药燃烧是按平行层或同心层的规律进行的。
- 3) 火药气体状态方程服从阿尔贝方程, 火药气体的物性参数在射击过程中被认为是常量。
- 4) 装药点火规律已知。
- 5) 不直接计算火炮后座、通过管壁的热散失,

而通过虚拟质量系数和减少火药力的方法进行修正。

6) 未燃固体火药由初温升到着火温度从气体吸收的热量, 通过降低火药力进行修正。

7) 固体颗粒比分子大几个量级, 对混合物的压力没有贡献, 气体-颗粒混合物的压力由单独的气体压力所给定。

8) 已知固体颗粒和气体速度的关系。

9) 身管截面积的变化比较缓慢, 气体运动可以看作是变截面管内理想气体的一维运动。

10) 侧药室与炮管相通, 不作小孔流量假设。

11) 侧药室气体与炮膛内气体的交换, 其动量、能量损失通过修正系数修正, 不作单独计算。

采用拉格朗日坐标系对整个内弹道过程进行求解, 数学模型^[6]及求解过程如下:

① 几何燃烧定律

火药已燃部分相对厚度为 z , 相对质量为 ψ , 药形系数为 χ , λ , μ , 则几何燃烧定律为:

$$\psi = \lambda z(1 + \lambda z + \mu z^2) \quad (1)$$

多孔火药分裂后

$$\psi = \chi_s \xi_s (1 - \lambda_s \xi_s) \quad (2)$$

② 燃烧速度定律

用厚度的变化率来描写, 一般关系式为:

$$\frac{dz}{dt} = f(p, T, u) \quad (3)$$

其中, f 是压力、温度、速度的已知函数, 采用指数燃烧定律。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{u_1}{e_1} p \quad (4)$$

③ 火药气体状态方程

在600 MPa以下的范围内, 采用诺贝尔-阿贝尔状态方程与考虑五级维里系数的维里方程和只考虑分子两两作用的范德瓦尔方程误差都在2%左右, 采用诺贝尔-阿贝尔状态方程:

$$p\left(\frac{1}{\rho} - \alpha\psi - \frac{1-\psi}{\delta}\right) = \psi RT \quad (5)$$

④ 连续性方程

固体火药的随体减少量等于因燃烧而由固相变成气相的量。

$$\frac{\partial x}{\partial a} = \frac{\rho_0 F_0}{F\rho} \quad (6)$$

或者表示为:

$$\frac{\partial u}{\partial a} = \frac{F_0 \rho_0}{F} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{\rho} \right) - \frac{F_0 \rho_0 u}{F \rho} \frac{d \ln F}{dx} \quad (7)$$

由速度定律有:

$$\frac{\partial x}{\partial t} = u \quad (8)$$

⑤ 动量方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{F}{F_0 \rho_0} \frac{\partial p}{\partial a} \quad (9)$$

⑥ 能量方程

火药气体的内能方程为:

$$E = \frac{RT}{\gamma - 1} \quad (10)$$

能量守恒方程为:

$$\frac{\partial [\psi E + (1 - \psi) \varepsilon]}{\partial t} = - \frac{p}{F_0 \rho_0} \frac{\partial Fu}{\partial a} \quad (11)$$

展开后为:

$$\frac{\partial \psi E}{\partial t} = - \frac{p}{F_0 \rho_0} \frac{\partial Fu}{\partial a} + E_\Delta \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (12)$$

其中, a 为混合物单元体在初始时刻距膛底的距离; ρ_0 , F_0 分别为单元体在初始时刻的混合物密度和所在位置的身管横截面积; $F(x)$ 是身管横截面积, 它是 x 的已知函数, 所以 $\frac{d \ln F(x)}{dx}$ 也是 x 的已知函数。

这样得到了以 a , t 为自变量关于 ψ , z , p , ρ , T , x , u , E 8 个未知数的 8 个独立方程, 即为拉格朗日坐标下的基本方程组。

2.3 定解条件

由边界条件和初始条件 2 部分组成。

1) 边界条件

$$x(0, t) = 0$$

$$u(0, t) = 0$$

$$F(x) p(m, t) = \varphi M \frac{\partial u}{\partial t}$$

2) 初始条件

$$u(m, 0) = 0$$

$$v(m, 0) = 0$$

$$p(m, 0) = p_0(m)$$

$$z(m, 0) = z_0(m)$$

$$\psi(m, 0) = \chi z(m, 0) + \lambda z(m, 0) + \mu z^2(m, 0) = \psi_0(m)$$

$$E(m, 0) = \frac{p_0(m)}{\gamma - 1} (v_0(m) - \alpha \psi_0(m) - \frac{1 - \psi_0(m)}{\delta}) = E_0(m)$$

2.4 拉格朗日坐标下的串式装药方程组

为求解方便采用质量坐标系, 令 $F_0 \rho_0 \Delta x_0 = \Delta m$ 则有:

$$\int_0^{l_{km}} F(x_0) \rho(x_0) dx_0 = \omega = m_{lk} \quad (13)$$

其中, l_{km} 为药室长度; ω 为装药量。令 $v = \frac{1}{\rho}$ 则有以下的方程组:

$$\frac{\partial x}{\partial t} = u$$

$$\frac{\partial x}{\partial m} = \frac{v}{F}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + F \frac{\partial p}{\partial m} = 0$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + p \frac{\partial Fu}{\partial m} = E_\Delta \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (14)$$

$$E = \frac{p}{\gamma - 1} (v - \alpha \psi - \frac{1 - \psi}{\delta})$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{u_1}{e_1} p$$

$$\psi = \chi z(1 + \lambda z + \mu z^2)$$

$$T = \frac{\gamma - 1}{R} \frac{E}{\psi}$$

对以上方程组进行有限元分析, 选定合适的方法求解即可。

3 模型求解及结果分析

计算过程中所用到的基本参数如表 1。

表 1 计算用基本参数

参量	取值	参量	取值
f /(kJ/kg)	980	ρ /(kg/m ³)	1 600
W_0 /m ³	0.000 071	ω /kg	0.054
α /(m ³ /kg)	0.001	m /kg	0.325
e_1 /m	0.000 29	φ	1.2
c /m	0.001 5	TQ /k	3 000
d_0 /m	0.000 2	u_1 /(cm·MPa ⁻ⁿ ·s ⁻¹)	0.2
p_0 /MPa	50	n_1	0.82
l_0 /m	0.1	l_g /m	2.25

由于弹丸 5 发串联, 所以每发弹丸的行程长都不同, 表 2 为弹丸行程长参数表。

表 2 弹丸行程长参数表

取值次数	1	2	3	4	5
弹丸行程长度 l /m	2.25	2.313	2.376	2.439	2.502

图 1 为膛内平均压力时间曲线图, 能较好地反映实际弹道试验中所测得的结果; 图 2 为弹底压力时间曲线, 能反映弹丸底部的压力变化情况, 对通过微波干涉仪所测得结果有一定的借鉴作用; 图 3 为不同时刻膛内压力分布图, 能对火炮

身管受力分析做出指导; 图 4 描述了膛内不同时刻不同位置的的压力分布, 能为选取测压点提供较好的依据; 图 5 能描述发射药及其燃气在堂内的流场分布情况; 图 6 描述了不同时刻火药气体微团在膛内的分布。

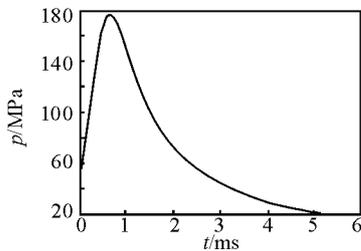


图 1 平均压力时间曲线

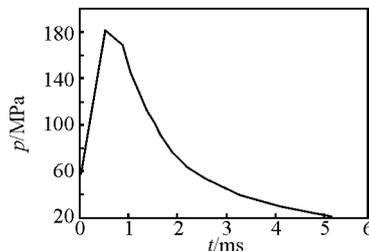


图 2 弹底压力时间曲线

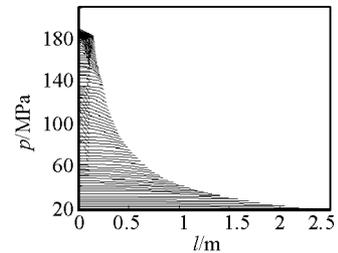


图 3 不同时刻膛内压力分布图

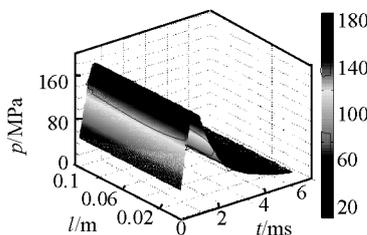


图 4 不同时刻位置膛内压力分布图

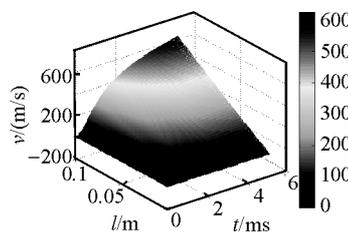


图 5 不同时刻位置火药气体速度分布图

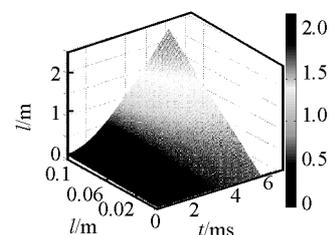


图 6 不同时刻位置火药气体微团在身管中的分布图

相同装填条件下, 侧药室未密封情况下的模拟计算结果如图 7、图 8。

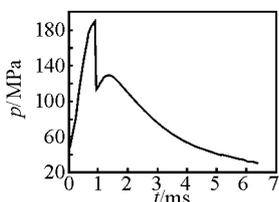


图 7 压力时间曲线

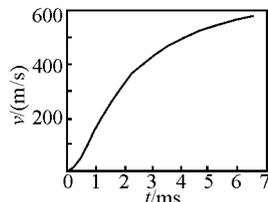


图 8 速度时间曲线

模拟计算的弹道结果如表 3。

表 3 内弹道模拟计算结果表

条件	侧药室密封	侧药室未密封
P_m/MPa	175.9	186.2
$V_0/(\text{m/s})$	626.3	588.4

从理论上对侧药室密封和不密封进行了计算, 由模拟计算结果知, 对侧药室密封能够在一定程度上改善串式装药的內弹道性能, 在最大压力保持基本不变的情况下初速由未密封时的 588.4 m/s 提高到密封后的 626.3 m/s, 初速提高了 6.4%。这主要是由于侧药室存在时有一个因药室截面积变化引起的压力突降, 它的存在使得火药的燃烧跟着产生变化, 由于容积的急剧变化, 內弹道过程也产生的随机变化。在图 7 中很明显地反映了这一点, 当弹丸启动后, 在 1 ms 左右的时刻到达前一药室的扩张出, 因而压力突降, 反映在 p-t 曲线上就是斜率变化明显加大, 这使得火药的有效做功面积减少, 因

此初速降低。压力突降除了影响初速外, 另一个显著的影响就是使得火药燃烧出现间断性, 燃烧规律的控制更难, 因此, 采用侧药室密封的方法能很好地从理论上解决这个问题, 模拟计算结果也证实了该结论。

4 结论

从理论上对侧药室密封和不密封进行了计算, 结果表明, 在最大压力保持基本不变的情况下, 初速由未密封时的 588.4 m/s 提高到密封后的 626.3 m/s, 提高了 6.4%。因此, 对侧药室密封能够在一定程度上改善串式装药的內弹道性能。

参考文献:

- [1] 倪志军, 周克栋, 郝雷, 等. 基于侧装药结构的金属风暴武器內弹道机理研究[J]. 南京理工大学学报, 2005, 29(6): 674-678.
- [2] 姚养无. 轻武器的强劲飓风—“金属风暴”[J]. 轻兵器, 2002(4): 11-12.
- [3] 张江波, 张玉成, 蒋树君, 等. 双药室实现能量补偿的技术研究[J]. 火炸药学报, 2008, 31(2): 68-70.
- [4] 张江波, 蒋树君, 余斌. 序列装药內弹道过程的模拟分析[J]. 火炸药学报, 2008, 31(3): 87-90.
- [5] 朱如华. 增大火炮射程的技术途径[J]. 现代军事, 1995, 7: 11-13.
- [6] 翁春生, 王浩. 计算內弹道学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 23-25.