

doi: 10.7690/bgzdh.2014.12.008

燃烧轻气炮点火对内弹道性能影响的仿真分析

黄滔, 张相炎, 刘宁

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为探索燃烧轻气炮点火对内弹道性能的影响, 应用商业软件对其进行仿真分析, 通过施加能量模拟点火源, 采用计算流体力学方法对燃烧轻气炮内弹道气体流场进行数值模拟分析。计算结果表明: 燃烧轻气炮点火源布置对弹底压力波动影响很大, 在一定范围内合理增加点火源数量、点火能量和放电时间都可以减小弹底压力波动, 但对弹丸初速影响不大。

关键词: 点火; 内弹道; 数值模拟

中图分类号: TJ302 **文献标志码:** A

Simulation Analysis on Influence of Ignition on Internal Ballistics of Combustion Light Gas Gun

Huang Tao, Zhang Xiangyan, Liu Ning

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to explore the impact that the ignition of combustion light gas gun on internal ballistics, the simulation was analyzed by the commercial software, the sources of ignition was simulated by the energy, the numerical simulation analysis of combustion light gas gun interior ballistics flow field was used by the method of computational fluid dynamics. The result shows that, the arrangement of the igniting sources has great impact on the projectile bore pressure oscillations and increasing the amount of the ignition sources, the time and energy of ignition within a limited range, undesirable projectile bore pressure oscillations can be controlled, but has less effect on the muzzle velocity of projectiles.

Keywords: ignition; interior ballistics; numerical simulation

0 前言

燃烧轻气炮是使用可燃轻质气体和氧化剂气体混合后点燃, 利用燃气的化学能推动弹丸前进的新概念火炮。由于利用轻质燃气推动弹丸, 弹底与膛底的压力差比火药气体小, 能获得较大弹丸初速^[1]。

燃烧轻气炮发射药采用低分子量的可燃气体(通常是氢气或甲烷), 由管道加注到膛内, 属于预混燃烧。邓飞等^[2-3]首先建立了燃烧轻气炮三维内弹道模型, 讨论发射药成分和点火过程对内弹道性能影响, 但没有考虑点火具结构。笔者运用 CFX 软件继续探索燃烧轻气炮点火对内弹道性能的影响。

1 物理模型

图 1 为燃烧轻气炮炮膛的二维物理模型。

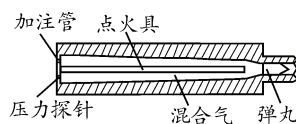


图 1 燃烧轻气炮原理

气体通过加注管道加注到燃烧室内(燃烧室密封), 加注完成后, 由点火具进行多点点火, 多个电极产生电火花点燃混合气推动弹丸高速前进。

2 数学方程

2.1 流体守恒方程

燃烧轻气炮膛内气体属于预混燃烧, 遵循质量、动量、能量和组分的守恒定律, 可以用统一的形式表示^[4]为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j}) + S_\phi \quad (1)$$

式中: 从左开始四项分别为代表时间变化率的非定常项、由流体宏观运动所引起的对流项、由流体分子运动引起的扩散项和源项; Γ_ϕ 和 S_ϕ 分别为与因变量 ϕ 相应的交换系数和源项; ρ 为混合气体的密度; U_j 为相应方向上的速度。

2.2 湍流模型

混合气体湍流流动采用 RNG $k-\epsilon$ 双方程模型^[4]:

收稿日期: 2014-07-06; 修回日期: 2014-08-14

作者简介: 黄滔(1990—), 男, 江苏人, 在读硕士, 从事燃烧轻气炮内弹道性能分析研究。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha v \frac{\partial k}{\partial x_j}) + \nu_i S^2 - \varepsilon \quad (2)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\alpha v \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}) - R + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \nu_i S^2 - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3)$$

式中： $C_1=1.42$ ， $C_2=1.68$ ， $\alpha=1.39$ ； k 为湍动能； ε 为耗散率； U_j 为相应方向上的平均速度； S 为应变率张量； ν 为运动粘度系数。

2.3 燃烧模型

气体燃烧过程采用涡团耗散模型 (eddy dissipating model)。该模型表示^[5]为

$$R_{fu} = -\frac{\rho \varepsilon}{k} \min[A \bar{m}_{fu}, A \frac{\bar{m}_{ox}}{S}, \frac{B \bar{m}_{pr}}{(1+S)}] \quad (4)$$

式中： $A \approx 4$ ， $B \approx 0.5$ ； S 为化学恰当比； \bar{m}_{fu} 、 \bar{m}_{ox} 、 \bar{m}_{pr} 为燃料、氧化剂、生成物浓度的时均值； ρ 为混合气体的密度。

3 仿真分析

3.1 仿真计算与验证

运用网格划分软件 ICEM-CFD 建立 45 mm 口径燃烧轻气炮炮膛的有限元模型，如图 2 所示。整个模型采用六面体网格，炮膛中建立直径为 2 cm 的细长圆柱体模拟点火具，采用轴向多点同时点火(由红色的小球释放能量)，前端面采用动网格模拟弹丸前进，弹丸启动压力为 172.4 MPa。燃烧室容积为 5 L，初始装填压力 30.32 MPa，气体初始温度 300 K。模拟出的弹丸初速为 1 828 m/s，最大膛压 305 MPa，与文献[2]中数据相接近，说明模型是可行的。图 3 为点火 1 ms 后的炮膛内气体温度分布。

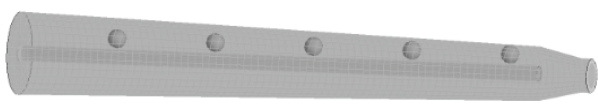


图 2 燃烧室有限元模型

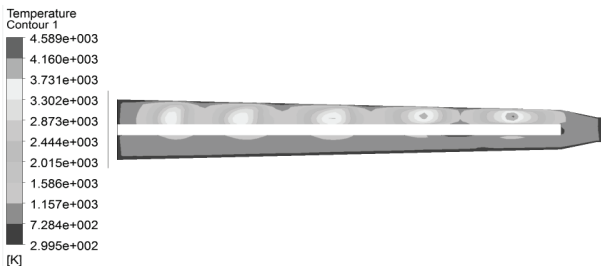


图 3 $t=1$ ms 时燃烧室内温度分布

3.2 点火源布置对内弹道性能的影响

为了分析点火源布置对内弹道性能的影响，采

用图 4 所示的 4 种方案(a、b、c、d)，模拟得到的结果如图 5 所示。

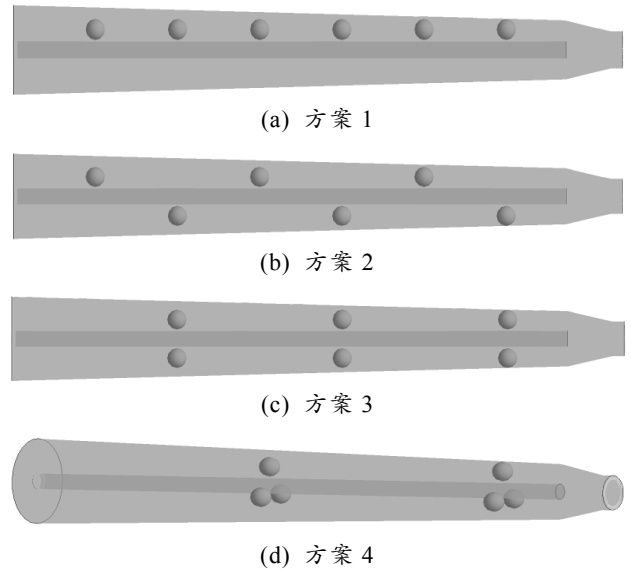


图 4 点火源布置方案

图 5 中方案 1 和 2 的弹底压力曲线相接近，因为燃烧室较长，直径较小，点火源轴向间距相同，燃烧都比较均匀，压力变化相接近。方案 4 中弹底压力曲线波动最大，因为点火源布置密集，形成的火核能量较大，处于点火源四周的气体迅速被点燃参与反应，但由于轴向点火源分布较少，轴向上存在大量未燃区，需要火焰锋面传播，发生化学反应，受气体湍流脉动影响，火焰锋面在传播时将变得皱折与弯曲，这种模糊的燃烧区使得膛内燃烧不均匀，温度和压力梯度较大，弹底压力波动较大。

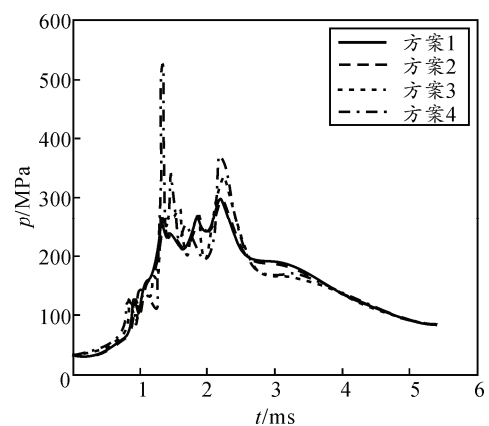


图 5 弹底压力曲线

3.3 点火源个数对内弹道性能的影响

方案 1 中采用 6 个点火源一侧布置，现类似地采用 4、8、10 个点火源一侧布置，其他条件相同，仿真结果如表 1 和图 6 所示。

表1中, 弹丸初速接近, 增加点火源, 初始火核增加, 气体被引燃越多, 传播的火焰锋面越多, 反应进行的越快, 压力上升加快, 弹丸启动加快, 内弹道时间缩短。

表1 方案1中点火源个数与内弹道性能

点火源个数 i	内弹道时间 t/ms	初速 $v/(\text{m/s})$
4	5.46	1 833
6	5.35	1 836
8	5.25	1 822
10	5.18	1 823

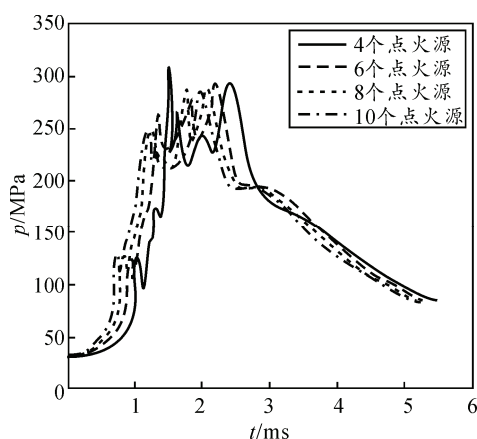


图6 点火源个数与弹底压力曲线

图6中, 4个点火源产生的弹底压力波动最明显, 因为当弹丸前进时, 弹后会形成一个低压区, 由紧挨着弹底的气体填补该区。当点火源个数较少, 火焰锋面较少, 已燃气体不能迅速传播到弹底, 由紧挨着弹底的未燃气体填补该区, 随着火焰在湍流下的不断传播, 低压区后的气体成分变化较大, 燃烧状况复杂, 膛内压力、温度梯度较大。增加轴向点火源, 火焰从更多的位置发出, 燃烧更均匀, 受湍流脉动影响较小, 低压区后的气体成分变化较小, 压力起伏较小。8个和10个点火源产生的弹底压力波动幅度相接近, 因为此时气体已经是多点同步点火, 燃烧过程趋于稳定, 压力均匀上升, 再增加点火源对弹后低压区燃烧状态影响较小, 不能有效减小弹底压力波动。

3.4 点火能量对内弹道性能的影响

由于采用电点火, 不同电源通过电极释放的能量也不同。将方案1中的能量分别改为原来能量的0.4、0.5和1.5倍, 模拟对内弹道性能的影响, 得到的结果如图7和图8所示。

由图7可知, 0.4倍能量产生的压力波动最大, 由于点火能量较小, 形成火核较小, 气体不能充分

被引燃, 压力上升缓慢。较小的初始火焰锋面受湍流脉动影响, 将变得更加模糊, 膛内各处燃烧不均匀, 压力波动较大。1倍和1.5倍能量产生的压力波动幅度接近, 因为点火能量足够大, 火核周围气体被充分点燃, 形成较大的火焰锋面向四周稳定传播, 此时继续增大能量, 对火焰锋面大小和传播影响不大, 对膛内的压力波动影响不大。

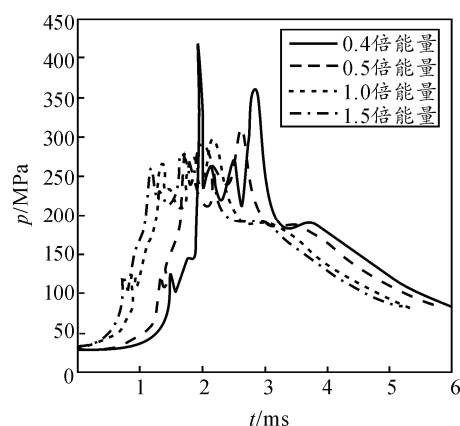


图7 点火能量与弹底压力曲线

由图8可知, 增加点火源能量, 气体被点燃并参与反应的速度加快, 压力上升加快, 弹丸启动时间缩短, 但对于炮口初速影响不大。

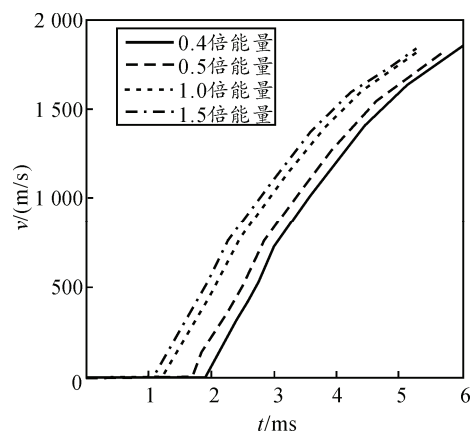


图8 点火能量与弹丸速度曲线

3.5 点火时间对内弹道性能的影响

在方案1中通过施加能量模拟电极放电, 时间为1ms, 现改变放电时间为0.4、0.75ms, 得到的结果如图9和图10所示。

图9中, 放电时间为0.4ms产生的弹底压力波动较大, 这是因为放电时间较短, 混合气被点燃的较少, 形成的火焰锋面较小, 与锋面接触发生反应的气体较少, 压力上升减慢。由于火花引燃时间较短, 火焰锋面较小, 在湍流下, 火焰锋面不断传播

使得燃烧区更加模糊，膛内各处燃烧速度不等，也不均匀。0.75 ms 和 1 ms 产生的曲线几乎完全一致，因为放电时间较长，充分引燃混合气，较大的火焰锋面向四周稳定传播，此时气体的燃烧主要依靠自身化学反应，受点火初始条件影响很小，继续延长放电时间对气体的燃烧作用不大。

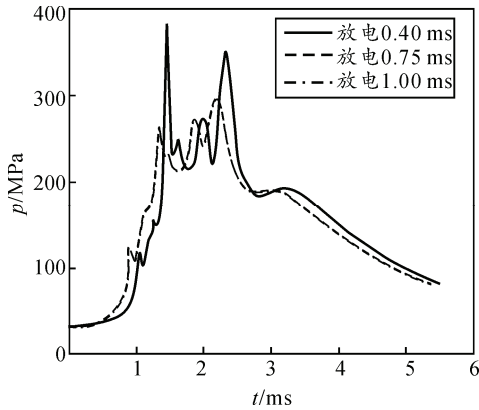


图 9 放电时间与弹底压力曲线

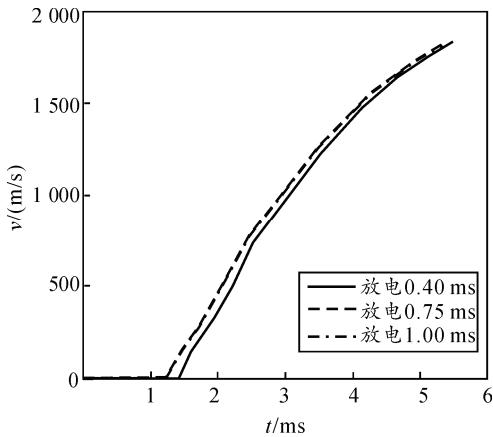


图 10 放电时间与弹丸速度曲线

图 10 中，增加放电时间，有利于形成较大的初始火核，气体燃烧和弹丸启动加快，但对初速影响不大。放电时间为 0.75 ms 和 1 ms 产生的曲线一致，

这是由于放电时间较长，形成了较大火核，火焰锋面将开始稳定传播，此时再增加放电时间对初始火核大小、火焰锋面传播和压力上升速度影响都很小。

4 结束语

笔者通过 CFX 软件模拟了燃烧轻气炮点火对其内弹道性能的影响，计算结果表明：

1) 在气体完全反应下，点火源布置、点火源个数和放电能量与放电时间对弹丸初速都影响不大，增加点火源个数、放电能量和放电时间可以加快弹丸启动，但放电时间增加到足以点燃气体时，再增加放电时间对内弹道性能影响不大^[7]。

2) 轴向均匀布置点火源、合理增加点火源个数和放电能量与放电时间可以有效减小弹底压力波动，但当点火源个数、放电能量和放电时间增加到一定后，对减小弹底压力波动的效果已不明显。实验时需要根据燃烧室容积、气体成分和电容所储的电能选择点火源的布置、个数和放电的能量与时间。

参考文献：

- [1] 于子平, 张相炎. 新概念火炮[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 38-44.
- [2] 邓飞, 刘宁, 张相炎. 燃烧轻气炮发射药成分对内弹道性能的影响分析[J]. 弹道学报, 2012, 24(4): 90-93.
- [3] 邓飞, 张相炎, 刘宁. 点火过程和初始条件对燃烧轻气炮内弹道性能的影响[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(5): 551-555.
- [4] 解茂昭. 内燃机计算燃烧学[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1995: 5-60.
- [5] 赵坚行. 燃烧的数值模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 113-115.
- [6] 高飞, 李昕. ANSYS CFX14.0 超级学习手册[M]. 北京: 北京人民邮电出版社, 2013: 73-110.
- [7] 张绪明, 侯健, 郭栋. 超高射频火炮射击实验及内弹道仿真[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(7): 39-42.