

文章编号: 1001-1455(2013)05-0551-05

# 点火过程和初始条件对燃烧轻气炮 内弹道性能的影响\*

邓 飞, 张相炎, 刘 宁

(南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 采用计算流体力学方法对燃烧轻气炮膛内燃烧过程进行数值模拟, 分析不同的点火点数目和点火能量以及初始温度和压力对燃烧轻气炮内弹道特性的影响。结果表明, 采用合理的点火点数目、初始温度和压力条件可以有效控制氢气的燃烧过程, 减弱燃烧室内的压力波动。模拟结果对燃烧轻气炮膛内燃烧过程控制具有重要参考价值。

**关键词:** 爆炸力学; 内弹道; 点火过程; 燃烧轻气炮; 装填条件

**中图分类号:** O381; TJ302

**国标学科代码:** 13035

**文献标志码:** A

燃烧轻气炮是一种利用低分子量可燃气体燃烧后产生高温高压气体推动弹丸运动的新型火炮发射系统。对燃烧轻气炮发射技术的研究已有十多年的历史<sup>[1]</sup>, 研究表明, 采用这种发射技术获得的炮口动能比采用先进的固体发射药火炮获得的炮口动能高 30% 以上, 因此该发射技术在火炮射程和发射载荷上有明显优势。燃烧轻气炮一般采用氢气、氧气和少量稀释气体作为发射药, 通过点火装置点燃氢氧混合气体发射弹丸。研究<sup>[1]</sup>表明, 点火过程中点火点数目、点火能量以及发射药的初始条件对膛内氢气燃烧过程有重要影响。Liu Ning 等<sup>[2]</sup>建立了燃烧轻气炮的准维内弹道模型, 提出合理控制氢氧混合气体的装填条件能够对氢氧燃烧过程进行有效控制。M. H. Morsy 等<sup>[3]</sup>对 200 kPa 条件下的氢气-空气混合燃烧进行了激光多点点火和点火能量影响规律的实验研究。胡春明等<sup>[4]</sup>分析了点火能量对 CNG 低压直喷发动机燃烧特性的影响, 提出增大点火能量能够提高低压发动机的燃烧稳定性。Miao Hai-yan 等<sup>[5]</sup>研究了不同初始压力对天然气掺氢的层流燃烧特性的影响。为了分析点火过程和发射药初始装填条件对燃烧轻气炮燃烧过程的影响, 本文中通过计算流体力学软件 CFX 建立燃烧轻气炮的三维内弹道模型, 对不同的点火点数目、点火能量以及初始条件下的点火、燃烧过程进行数值模拟, 优化燃烧轻气炮点火过程和初始装填条件, 为下一步的实验研究提供参考。

## 1 控制方程

考虑到燃烧轻气炮装填条件和点火燃烧过程的特点, 提出如下假设: (1) 发射药气体在点火前已经充分混合, 点火后混合气体进行预混燃烧; (2) 膛内混合气体满足 Peng-Robinson 实际气体状态方程, 混合气体临界参数通过简化公式得出, 并且根据发射药总能量计算初始压力; (3) 整个发射过程无气体泄露, 且燃烧过程绝热。

### 1.1 Navier-Stokes 守恒方程

燃烧轻气炮燃烧室内的燃烧流动过程为三维瞬态可压缩黏性反应流动, 各气体成分都满足质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程以及组分输运方程, 其统一形式可写为<sup>[6]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\boldsymbol{\varphi}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\mathbf{U}_i\boldsymbol{\varphi}) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\tau_{\varphi}\frac{\partial\boldsymbol{\varphi}}{\partial x_i}\right) + \mathbf{S}_{\varphi} \quad (1)$$

式中: 各项分别为非定常项、对流项、扩散项和源项, 变量  $\boldsymbol{\varphi}$  分别对应于质量、动量、能量守恒方程中的

\* 收稿日期: 2012-05-03; 修回日期: 2012-09-20

作者简介: 邓 飞(1988—), 男, 博士研究生。

1、 $(u, v, w)$ 和 $e+v^2/2$ ;  $\rho$ 为气体组分的密度,  $U_i$ 为 $x$ 、 $y$ 和 $z$ 方向的速度, 下标 $i$ 依次为坐标轴的 $x$ 、 $y$ 和 $z$ 方向;  $\tau_\varphi$ 为对应于变量 $\varphi$ 的交换系数,  $S_\varphi$ 为源项。

## 1.2 湍流 $k-\epsilon$ 双方程模型

对燃烧室内气体的湍流流动采用 $k-\epsilon$ 双方程湍流模型<sup>[7]</sup>描述, 其中湍动能 $k$ 和湍动能耗散率 $\epsilon$ 由以下方程求得:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{U}) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) + 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \rho \epsilon \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \epsilon \mathbf{U}) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \nabla \epsilon \right) + 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3)$$

式中:  $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 $\sigma_k$ 和 $\sigma_\epsilon$ 均为常数; 湍流黏性 $\mu_t = \rho C_\mu k^2/\epsilon$ ,  $C_\mu$ 为常数;  $S_{ij}$ 为湍流应变率; 上式左起依次为 $k$ 或 $\epsilon$ 的时间变化率、对流输运项、扩散输运项、产生速率项和耗散速率项。

## 1.3 涡耗散燃烧模型

对氢氧混合气体燃烧过程采用涡耗散燃烧模型<sup>[8]</sup>, 该模型认为可燃混合气体化学反应时间尺度小于相应的湍流时间尺度, 当反应物在分子水平混合后瞬间反应形成生成物, 化学反应速率在很大程度上受湍流的影响, 反应物的混合速率控制着燃烧速率, 且反应物的混合速率又取决于湍流脉动衰变速率 $\epsilon/k$ 。涡耗散燃烧模型的控制方程可写为:

$$R_t = -\bar{\rho} \frac{\epsilon}{k} \min \left[ A \bar{m}_f, \frac{A \bar{m}_o}{s}, \frac{B \bar{m}_p}{s} \right] \quad (4)$$

式中:  $\bar{\rho}$ 为未燃烧时混气密度与燃烧后气流密度之间的平均值,  $\bar{m}_f$ 、 $\bar{m}_o$ 和 $\bar{m}_p$ 分别为燃料、氧化剂和生成物浓度的时均值,  $A \approx 4$ ,  $B \approx 0.5$ ,  $s$ 为化学当量比, 该模型适用于预混燃烧和扩散燃烧。

## 2 计算结果与讨论

为了验证上述模型的正确性, 采用文献[1]中的实验数据, 在CFX软件中建立45 mm口径燃烧轻气炮三维数值模型, 发射药能量为4 MJ, 燃烧室容积为5 L, 弹丸质量为0.52 kg, 弹丸启动压力为172.4 MPa。点火采用沿轴线5点同步点火, 图1为 $t=1$  ms时燃烧室内的温度分布。计算结果显示, 炮口初速为1749 m/s, 膛内最大压力为304 MPa。文献[1]中的实验结果炮口初速为1700 m/s, 膛内最大压力为306 MPa。计算结果与实验结果吻合较好, 说明本文中建立的燃烧轻气炮三维数值模型是合理的。

### 2.1 点火点数目对内弹道性能的影响

为了分析不同的点火点数目 $n$ 对燃烧轻气炮内弹道性能的影响, 分别选择不同的点火点数目进行数值模拟, 采用轴线点火的方式, 其他条件相同。图2给出了前5 ms内不同点火点数目条件下膛底压力 $p$ 和弹底压力 $p_p$ 的变化曲线。由图2(a)可知, 随着点火点数目的增加, 氢气质量燃烧速率增大, 压力上升加速度增大, 膛底压力波动幅度减小, 压力变化趋于平缓。由此可见, 增加点火点数目可以提高燃烧稳定性, 有效抑制压力波动的发展传播。从图2(b)可以看出, 弹丸开始运动后, 弹底的压力波动比膛底的压力波动更剧烈。随着点火点数目的增大, 压力波动逐渐减弱。当点火点数取为1时, 压力波动最大幅值超过500 MPa, 而采用沿轴线7点点火时, 弹底压力上升较平缓, 波动幅度明显减小, 压力峰值最大约为300 MPa。

产生以上现象的原因主要是由于弹丸开始运动后, 弹底将产生一个低压区, 紧挨在弹底的第1层气体随着弹丸移动而进入该低压区; 以此类推, 后面的每一层气体都相继进入它前面刚形成的低压区, 从

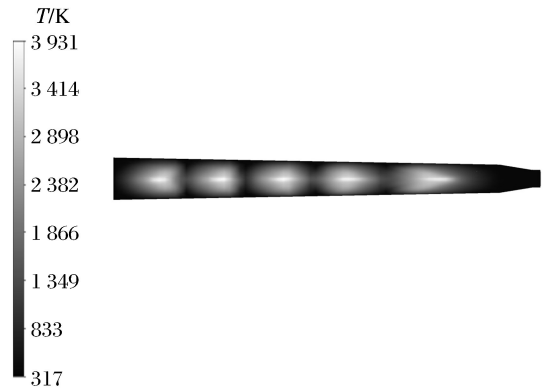


图1  $t=1$  ms时燃烧室内的温度分布  
Fig. 1 Temperature contours  
in the combustion chamber at  $t=1$  ms

而在燃烧室内形成复杂的压力波动。当点火点为 1 点时,氢气质量燃烧速率小,火焰从膛底点火位置沿着身管逐渐向前传播,已燃区域发展速度较慢,弹底及相邻空间长时间处于未燃状态,燃烧室内压力、温度梯度较大;当点火点增加至 7 点时,氢气质量燃烧速率增大,火焰同时从 7 个点火位置向外发展,相同时间内已燃区域发展更快,弹底及相邻空间较早开始燃烧。所以当点火点增加至 7 点,弹丸开始运动后,与单点点火方式相比,弹底低压区能够更迅速地被相邻已燃区的高压气体填充,膛内压力波动减小,同时整个燃烧室内的压力、温度等状态参数分布较均匀,从而使燃烧室内的压力波动现象明显减弱。

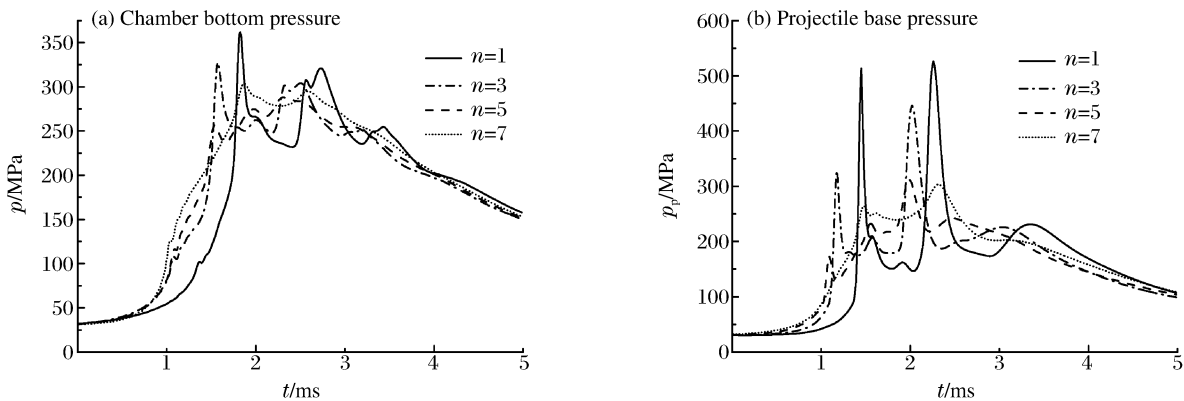


图 2 不同的点火点数目对膛底压力和弹底压力的影响

Fig. 2 Influences of different ignition point amounts on chamber bottom and projectile base pressures

### 2.2 点火能量对内弹道性能的影响

对各个点火点采用不同的点火能量  $E_i$ ,分析点火能量对燃烧轻气炮内弹道性能的影响,点火持续时间为 1 ms,采用沿轴线 5 点点火,其他条件不变。图 3 为膛底压力随着不同点火能量的变化规律。从图 3 可知,随着点火能量的增加,氢气质量燃烧速率增大,到达最大压力的时间提前,燃烧持续时间缩短。这主要是因为相同的点火持续时间下,点火能量的增加能够加快火核的形成和初期火焰的发展,氢气燃烧的火焰传播速度增大,氢气燃烧持续时间缩短,燃烧稳定性增加。但当点火能量增加到一定值后,继续增加点火能量对氢气燃烧特性的改善作用不明显,实际点火过程中应该选取合理的点火能量。

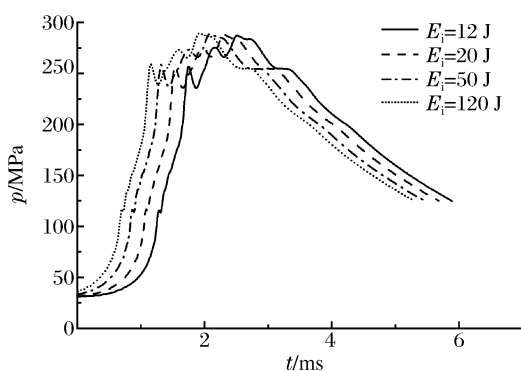


图 3 不同的点火能量对膛底压力的影响

Fig. 3 Influences of different ignition energies on chamber bottom pressures

### 2.3 初始温度对内弹道性能的影响

为了分析初始温度  $T_0$  对内弹道性能的影响,采用 4 种不同的发射药初始装填温度进行数值模拟,且混合气体初始压力相同,模拟结果如图 4 所示。从图 4(a)可以看出,随着初始温度依次降低,燃烧室内压力波动减小,膛内压力峰值和峰值出现时间逐渐增加;当初始温度降低到 180 K 时,燃烧室最大压力不再升高,与初始温度为 240 K 时相比略有下降。这是因为初始温度降低时,发射药质量增加,压力峰值增大,氢气质量燃烧速率减小,燃烧持续时间延长,燃烧稳定性增加,膛内压力波动减小;当初始温度降低到一定值后,氢气的燃烧速率减小,弹丸达到启动压力后开始向前运动,部分未燃气体随弹丸运动离开炮口,氢气燃烧利用率降低,最大压力下降。从图 4(b)可以看出:在相同的初始压力条件下,降低初始温度可提高弹丸初速;当初始温度降低到 180 K 时,弹丸初速与初始温度为 240 K 时的接近,约为 1750 m/s,弹丸初速增幅减小。这是因为降低发射药气体初始温度,可以增加发射药总能量,压力峰值增大,已燃气体对弹丸做功总量增加,弹丸初速增大;同时当初始温度降低到一定程度时,部分未燃气体随弹丸运动离开炮口,氢气燃烧利用率降低,压力峰值不再增大,弹丸初速增加幅度减小。

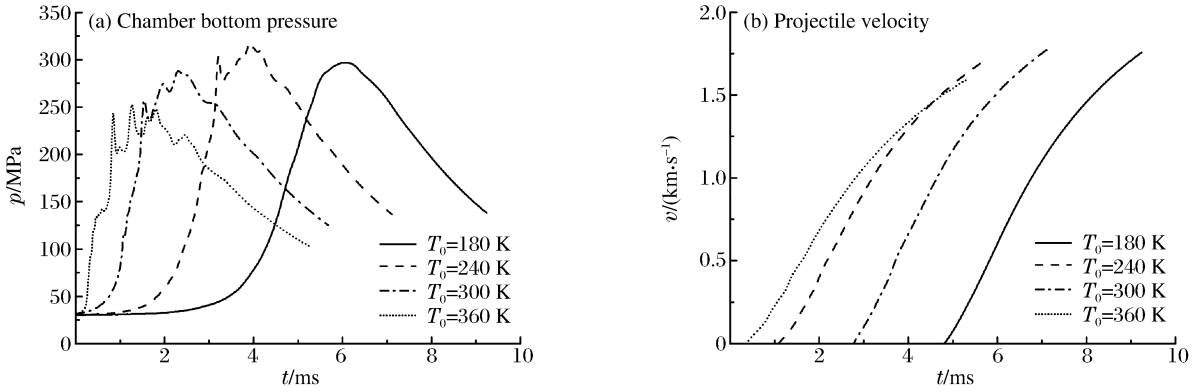


图4 不同初始温度对膛底压力和弹丸速度的影响

Fig. 4 Influences of different initial temperatures on chamber bottom pressures and projectile velocities

## 2.4 初始压力对内弹道性能的影响

初始压力  $p_0$  的高低直接决定了发射药装填质量及化学总能量,为了分析初始压力对内弹道性能的影响,其他条件保持不变,采用3组不同初始压力分别进行数值模拟,模拟结果如图5所示。从图5(a)可知:随着初始压力逐渐升高,膛底压力波动逐渐减弱; $t \approx 1$  ms时, $p_0 = 30$  MPa的压力以较大的加速度增大,其压力曲线迅速上升逼近  $p_0 = 60$  MPa的曲线; $p_0 = 60$  MPa时膛内最大压力约为  $p_0 = 30$  MPa时的2倍。这是因为当初始压力升高时,氢气燃烧火焰传播速度减小,压力上升加速度减小,燃烧稳定性增加,同时由于发射药装填质量增加,膛内最大压力升高。从图5(b)可知,随着初始压力的升高,弹丸启动时间逐渐延迟,弹丸初速依次增大;当初始压力升高到一定程度后,弹丸初速的增加幅度减小,3个不同初始压力下的弹丸初速依次为1 701、1 963、2 141 m/s。这是因为随着初始压力升高,火焰传播速度减小,燃烧室压力达到弹丸启动压力的时间延迟,同时发射药质量增加,膛内压力峰值增大,混合气体对弹丸做功总量增加,弹丸初速增大;当初始压力升高到一定值后,由于弹丸质量和启动压力不变,继续提高初始压力将使更多的未燃氢气随弹丸运动喷出炮口,氢气燃烧利用率降低,弹丸初速增幅减小。

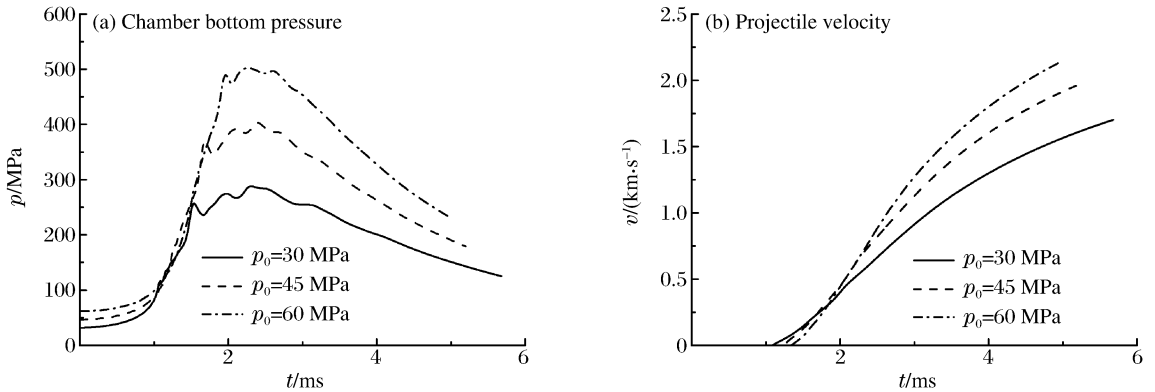


图5 不同初始压力对膛底压力和弹丸速度的影响

Fig. 5 Influences of different initial pressures on chamber bottom pressures and projectile velocities

## 3 结论

(1)在相同的发射药装填条件下,增加点火点数目可以提高氢气的燃烧速度,显著降低燃烧室压力波动幅度,提高氢氧混合气体燃烧稳定性,实现对燃烧过程的有效控制。

(2)增加点火能量,可以加快初期火核形成和火焰发展速度,提高氢气的燃烧速度,使达到压力峰值的时间提前,提高燃烧稳定性。

(3)初始温度对氢气的燃烧过程影响较大,相同条件下,初始温度降低,发射药总量增加,膛内压力波动减弱,膛内最大压力升高,弹丸初速增大。当初始温度降低至一定程度后,继续降低初始温度对内

弹道性能的改善作用减小。

(4)随着初始压力的升高,发射药总能量增加,弹丸初速增大,压力波动现象减弱,燃烧稳定性提高。当初始压力升高到一定程度后,氢气燃烧利用率降低,弹丸初速增加幅度减小,实际应用中应该合理地选择发射药气体的初始装填压力。

### 参考文献:

- [1] Kruczynski D, Massey D, Milligan R, et al. Combustion light gas gun technology demonstration [R]. ADA462130, 2007.
- [2] Liu Ning, Zhang Xiang-yan. Quasi-dimensional interior ballistic model and numerical simulation of combustion light gas gun[C]//Proceedings of the 26th International Symposium on Ballistics, 2011:625-632.
- [3] Morsy M H, Chung S H. Laser-induced multi-point ignition with a single-shot laser using two conical cavities for hydrogen/air mixtures[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2003,27(4):491-497.
- [4] 胡春明,赵文峰,刘娜,等. 点火能量对 CNG 低压直喷发动机燃烧特性的影响[J]. 拖拉机与农用运输车,2010,37(3):46-49.  
Hu Chun-ming, Zhao Wen-feng, Liu Na, et al. Effect of ignition energy on combustion characteristics of CNG low pressure direct-inject engine[J]. Tractor and Farm Transporter, 2010,37(3):46-49.
- [5] Miao Hai-yan, Jiao Qi, Huang Zuo-hua, et al. Effect of initial pressure on laminar combustion characteristics of hydrogen enriched natural gas[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008,33(14):3876-3885.
- [6] 解茂昭. 内燃机计算燃烧学[M]. 2版. 大连:大连理工大学出版社,2005:4-5.
- [7] Versteeg H K, Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method[M]. 2nd ed. London: Pearson Education Limited, 2007:72-80.
- [8] 赵坚行. 燃烧的数值模拟[M]. 北京:科学出版社,2002:113-118.

## Influences of ignition process and initial conditions on interior ballistic characteristics of combustion light gas gun \*

Deng Fei, Zhang Xiang-yan, Liu Ning

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

**Abstract:** The combustion process in the combustion light gas gun chamber was numerically simulated by using the computational fluid dynamics method. And the influences of the different factors on the interior ballistic characteristics of the combustion light gas gun were analyzed and these factors included ignition point amount, ignition energy, initial temperature and initial pressure. The results show that a reasonable ignition point amount, a reasonable initial temperature and a reasonable initial pressure can be adopted to effectively control the hydrogen combustion process and reduce the pressure oscillation in the combustion chamber. The simulated results can provide an important reference for controlling the combustion process in the combustion light gas gun chamber.

**Key words:** mechanics of explosion; interior ballistics; ignition process; combustion light gas gun; loading condition

\* Received 3 May 2012; Revised 20 September 2012

Corresponding author: Deng Fei, artillery1009@163.com