

doi: 10.7690/bgzdh.2023.01.012

## 燃烧轻气炮发射过程数值模拟与优化

周正炜, 张文星, 陈雷, 徐亚凯, 彭松江  
(中国船舶集团公司第七一三研究所第一研究室, 郑州 450015)

**摘要:** 针对常规火炮理论初速极限较低的问题, 基于氢氧燃烧特性建立燃烧轻气炮的内弹道内模型。根据燃烧轻气炮原理得到影响燃烧轻气炮内弹道性能的参数, 采用粒子群优化算法对发射装置结构和内弹道参数进行优化, 使用 Fluent 耦合 Chemkin 的方法进一步验证了内弹道数值仿真优化结果。结果表明: 优化后装置的初速略微下降, 燃烧室的初始压力和最大膛压大幅度下降, 研究结果在燃烧轻气炮初期研究阶段具有较高的参考价值。

**关键词:** 内弹道; 氢氧燃烧; 数值模拟; 粒子群优化

**中图分类号:** TJ302 **文献标志码:** A

## Numerical Simulation and Optimization on Launching Process of Combustion Light Gas Gun

Zhou Zhengwei, Zhang Wenxing, Chen Lei, Xu Yakai, Peng Songjiang  
(No. 1 Research Office, No. 713 Research Institute of CSSC, Zhengzhou 450015, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of low theoretical muzzle velocity limit of conventional guns, the interior ballistic model of combustion light gas gun was established based on the combustion characteristics of hydrogen and oxygen. According to the principle of combustion light gas gun, the parameters affecting the interior ballistic performance of combustion light gas gun were obtained. Particle swarm optimization algorithm was used to optimize the launcher structure and interior ballistic parameters, and the Fluent coupling Chemkin method was used to further verify the optimization results of interior ballistic numerical simulation. The results show that the initial velocity of the optimized device decreases slightly, and the initial pressure and maximum chamber pressure of the combustion chamber decrease significantly, which has a high reference value in the early stage of combustion light gas gun research.

**Keywords:** interior ballistics; hydrogen-oxygen combustion; numerical simulation; particle swarm optimization

### 0 引言

火炮初速作为火炮类武器战斗力的直观体现, 一直以来都是各国研究的重点, 传统的火药气体在推动弹丸运动过程中很大一部分的能量转化为气体自身的动能, 以普通的手段很难提高火炮类武器的初速。

为进一步提高火炮类武器的作战能力, 研究人员开展了一系列关于火炮增程的研究。目前火炮增程方法主要有 2 种: 1) 采用新的发射装置以突破常规火炮的初速极限, 国内外的主要代表性研究有: 美国海军在 2017 年完成了电磁轨道炮样机弹药连续发射试验, 已实现充能、发射、装弹、充能、在发射循环的自动装填功能<sup>[1]</sup>; 郑州机电研究所研制的多层串联增强轨道炮<sup>[2]</sup>; 美国 UTRON 公司研制的燃烧轻气炮能将弹丸加速到 2 000 m/s 以上<sup>[3]</sup>; 邓飞、黄涛等研究了不同发射药成分和点火对燃烧轻气炮内弹道性能的影响<sup>[4-5]</sup>。2) 采用改变炮弹的结

构以提高弹丸射程, 如: 卓长飞对炮弹底部排气减阻机理进行了研究<sup>[6]</sup>; 以色列成功完成了以 SFRJ 为二级动力装置的增程炮弹的试验<sup>[7]</sup>; 徐秋坪以滑翔制导炮弹为对象, 围绕其弹道规划、制导率以及自抗扰控制系统设计等问题开展详细的讨论和研究<sup>[8]</sup>。现有的研究结果中电磁炮和燃烧轻气炮对弹丸射程的提升幅度最大, 但关于燃烧轻气炮的理论研究目前还很少。

笔者根据阿伦尼乌斯公式<sup>[9]</sup>建立了氢氧燃烧反应模型, 编写了燃烧轻气炮的内弹道程序, 对影响燃烧轻气炮内弹道性能的参数进行优化, 并采用 Fluent 仿真软件分析优化前后燃烧轻气炮膛压以及初速的变化情况, 为燃烧轻气炮研究提供初步的理论依据。

### 1 内弹道模型

燃烧轻气炮的燃料一般为过量氢气与氧气的混合气体, 通过氢氧燃烧释放热量加热剩余的氢气来

收稿日期: 2022-09-22; 修回日期: 2022-10-20

作者简介: 周正炜(1995—), 男, 湖南人, 硕士, 从事新概念武器发射技术研究。E-mail: 965439803@qq.com。

推动弹丸运动,由于氢气的分子量远低于火药气体,燃烧轻气炮的炮口动能比传统火炮至少高出 30%。

### 1.1 基本假设

为简化燃烧轻气炮氢氧燃烧计算模型,对其内弹道过程作出以下假设:

- 1) 氢氧混合气体在平均压力下燃烧,整个燃烧室处于平衡状态,化学反应速率公式采用阿仑尼乌斯公式。
- 2) 用次要工系数考虑弹丸的摩擦阻力与空气阻力等。
- 3) 所有工质气体为理想气体,整个内弹道过程中无气体泄漏。
- 4) 单位质量工质气体反应所放出的能量为定值。

### 1.2 数学模型

对于平衡态的热力学开放系统,运用热力学第一定律<sup>[10]</sup>可得:

$$-dE = (e_{out}dm_{out} - e_{in}dm_{in}) + \delta Q + \delta W \quad (1)$$

式中:  $dE$  为系统内能的变化;  $(e_{out}dm_{out} - e_{in}dm_{in})$  为系统与环境因质量交换带出系统的内能;  $\delta Q$  为系统散失热量;  $\delta W$  为系统对外做功。

对于燃烧轻气炮上式推导为:

$$C_v \frac{dT}{dt} = -Q + v \sum_{k=1}^k U_k \omega_k M_k + E_d - \frac{\varphi}{2} mv^2 \quad (2)$$

式中:  $C_v$  为定容比热;  $Q$  为热损失;  $v$  为比容;  $U_k$  为内能;  $\omega_k$  为化学反应速率;  $M_k$  为摩尔质量;  $E_d$  为点火能量;  $\varphi$  为次要功系数;  $m$  为弹丸质量;  $v$  为弹丸速度。

对于氢氧燃烧的化学反应速率采用阿仑尼乌斯公式进行计算:

$$\omega = A[O_2]^{n_{O_2}} [H_2]^{n_{H_2}} \exp(-Ea/RT) \quad (3)$$

式中:  $A$  为指前因子;  $O_2$  为氧气浓度;  $H_2$  为氢气浓度;  $n_{O_2}$  为氧气反应级数;  $n_{H_2}$  为氢气反应级数;  $Ea$  为活化能;  $R$  为气体常数;  $T$  为温度。

根据气体状态方程可推导出燃烧室压力的方程为:

$$p = RT/v\bar{M} \quad (4)$$

式中:  $p$  为燃烧室压力;  $\bar{M}$  为气体平均摩尔质量。

弹丸的运动方程与经典内弹道方程一致为:

$$\left. \begin{aligned} v &= dl/dt \\ Sp &= \varphi m(dv/dt) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中:  $l$  为弹丸行程;  $S$  为身管截面积。

## 2 数值模拟与优化

### 2.1 数值模拟结果

为验证氢氧燃烧单步反应模型的可靠性,以文献[3]的实验参数作为初始条件进行计算,燃烧轻气炮装置口径为 45 mm,身管长度为 4.5 m,弹丸的挤进压力为 172 MPa,氢氧混合气体的摩尔比为 8:1,按不同化学能和弹丸质量对燃烧轻气炮内弹道过程进行计算。

验证工况数值模拟结果如表 1 所示。从表中可以看出,本文中数值模拟结果与文献中 UTRON 公司的实验与计算结果相近,证明了笔者编写的内弹道程序的可靠性。

表 1 验证工况计算结果

工况	化学能/ MJ	弹丸 质量/kg	最大 膛压/MPa	弹丸初速/ (m/s)
文献	3	0.52	228.0	1 700
计算	3	0.52	225.0	1 767
文献	7	0.52	482.0	2 400
计算	7	0.52	526.7	2 465

图 1—4 分别为不同化学能下的压力曲线、速度曲线、行程曲线以及压力-行程曲线。从图中可以看出,当充入的氢氧混合气体化学能增加时,燃烧轻气炮的内弹道时间减少 1.4 ms,点火后氢氧燃烧的时间提前 0.22 ms,燃烧室的最大压力上升,弹丸的初速增加。图 2 压力曲线中的压力开始上升至达到峰值的时间非常短,可以认为在此单区模型中氢氧混合气体在点燃后瞬间燃烧完全,燃烧室内压力达到最大值,此时弹丸的运动距离可以忽略不计。

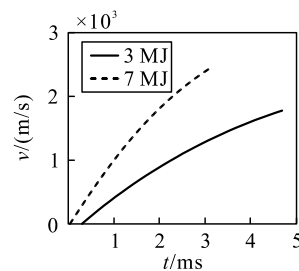


图 1 速度曲线

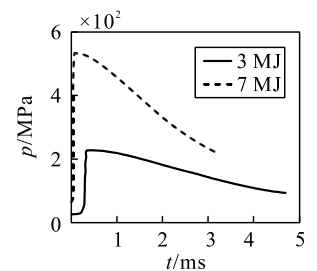


图 2 压力曲线

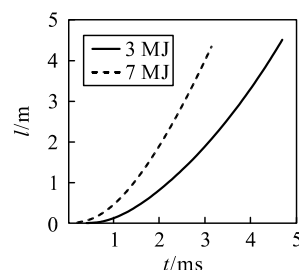


图 3 行程曲线

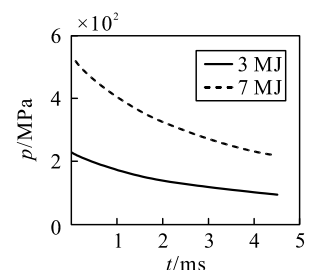


图 4 压力-行程曲线

### 2.2 优化计算结果

根据燃烧轻气炮原理可知影响其弹丸初速的输入参数主要有氢氧混合气体的化学能、混合气体的初始温度、燃烧室的容积，但在发射过程中装置的最大膛压和初始压力对装置的安全性有着重要的影响，笔者用氢氧混合气体的化学能、混合气体的初始温度、燃烧室的容积作为自变量，以数值模拟结果的参数为基础对燃烧室初始压力、燃烧室最大膛压和弹丸初速进行归一化处理，并以此为目标函数对装置进行综合优化，约束条件为初速大于 1 900 m/s，膛内压力小于 400 MPa，初始温度 270~300 K。通过构造函数<sup>[11-12]</sup>：

$$F = X(i) + M \max(g(x_i), 0) \quad (6)$$

式中： $X(i)$ 为优化目标归一化后的值； $M$ 为足够大的正数； $g(x_i)$ 为约束函数与给定值之差。当 $g(x_i) < 0$ 时，说明条件满足约束函数，此时 $F = X(i)$ ；当 $g(x_i) > 0$ 时，由于 $M$ 足够大，所以 $F$ 为一个非常大的值，这样就把问题变成了求解无约束极值问题。

图 5 为归一化后的燃烧室初始压力、燃烧室最大膛压和弹丸初速的优化迭代曲线，图中： $N$ 为迭代次数， $J$ 为归一化后的值。图 6 为优化前后燃烧时压力曲线，从图中可以看出，优化后燃烧时压力峰值大幅度下降，压力曲线更加平稳。图 7 为优化前后弹丸初速曲线，从图中可以看出，优化后弹丸初速下降幅度较小。图 8 为优化前后行程压力曲线，从图中可以看出，行程压力曲线整体下降，对身管强度的需求变低，能有效减少装置。

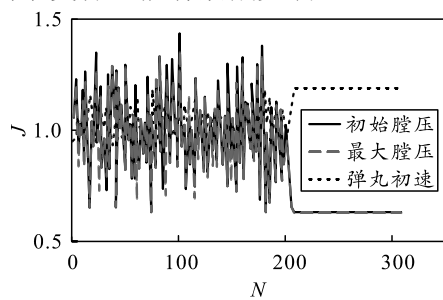


图 5 迭代曲线

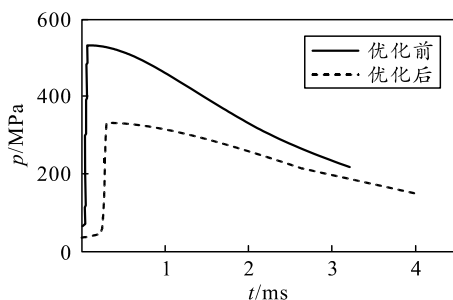


图 6 优化前后燃烧室压力曲线

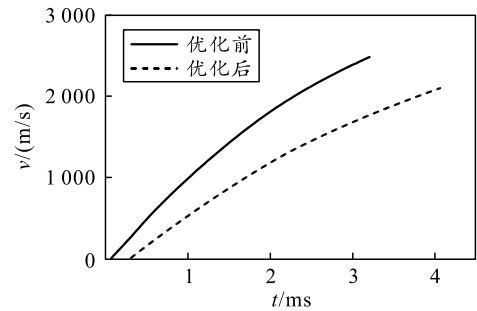


图 7 优化前后弹丸速度曲线

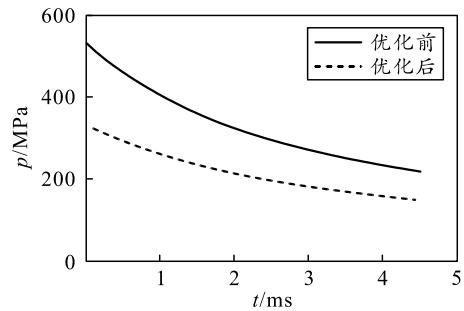


图 8 优化前后压力-行程曲线

优化后燃烧轻气炮参数如表 2 所示。从表中可以看出，优化后装置的初始压力和最大膛压分别下降了 41.5%和 36.8%，通过优化算法在保证一定初速的条件下，大幅降低了装置的初始压力和最大膛压，减小了混合气体填充的难度，增加了装置的安全性。

表 2 优化后燃烧轻气炮参数

参数	优化前	优化后
化学能/MJ	7	5.07
初始温度/K	300	277.5
容积/L	5	5.74
初始压力/MPa	62.9	36.8
最大膛压/MPa	526.7	333
弹丸初速/(m/s)	2 465	2 091

### 3 流体仿真计算

从上述计算结果中可以看出，使用单区模型编写内弹道程序计算时无法对氢氧燃烧过程进行模拟，其计算结果中压力曲线在点燃后瞬间达到最高；因此，笔者使用 Fluent 软件模拟氢氧燃烧过程对燃烧轻气炮内弹道过程进行计算。

以本文中优化前与优化后的燃烧轻气炮参数为基础分别建立其流体仿真模型，编写 udf 子程序提取弹底平均压力，在考虑次要功系数的基础上计算得到弹丸的运动速度，通过动网格方法模拟弹丸运动，使用 Fluent 软件耦合 chemkin 软件对燃烧轻气炮膛内燃烧过程进行仿真。通过设置 5 个电火花点火点进行点火，图 9 为燃烧室点火模型。



图 9 Fluent 点火模型

图 10—11 为仿真计算的优化前后弹丸速度和燃烧室压力曲线。从图中可以看出，相较于内弹道程序的计算结果，Fluent 计算的燃烧室压力曲线上升段时间增加，最大膛压下降，优化后燃烧室的压力曲线的峰均值比更低。

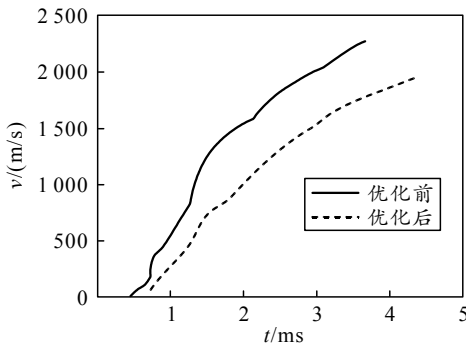


图 10 优化前后仿真计算弹丸速度曲线

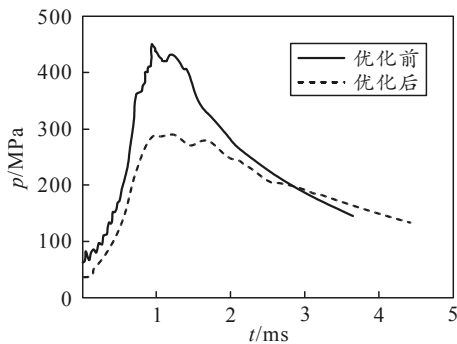


图 11 优化前后仿真计算燃烧室压力曲线

Fluent 与内弹道程序计算结果对比如表 3 所示。从表中可以看出，Fluent 软件的计算结果中膛压与初速相较于内弹道程序偏低，与实验数据接近，但其能够反应燃烧轻气炮发射过程中火焰与压力的传递过程。

表 3 Fluent 与内弹道程序计算结果对比

工况	最大膛压/MPa	弹丸初速/(m/s)
内弹道程序优化前	526.7	2 465
实验数据	482.0	2 400
Fluent 优化前	451.0	2 273
内弹道程序优化后	333.0	2 091
Fluent 优化后	279.0	1 960

## 4 结论

Fluent 计算中使用 19 步化学反应计算氢氧燃烧，能够模拟氢氧燃烧在空间上的传递过程，计算

结果更能反映实际情况，但其计算耗时过长；因此，采用效率更高的内弹道程序对发射装置进行计算与优化，Fluent 软件对优化结果进行进一步仿真分析，具体结论如下：

1) 建立了氢氧燃烧单区反应模型，对燃烧轻气炮内弹道过程进行了数值模拟，模拟结果与实验结果相近，利用该模型可以在研究燃烧轻气炮初期快速了解各参数对内弹道的基本影响规律。

2) 以装置燃烧室初始压力、燃烧室最大膛压和弹丸初速为目标函数，利用粒子群优化算法对燃烧轻气炮结构和发射参数进行优化，优化后装置的初速略微下降，燃烧室的初始压力和最大膛压大幅下降，利用该方法可获得满足设计需求的最佳参数组合。

3) 采用 Fluent 耦合 chemkin 方法对燃烧轻气炮内弹道过程进行仿真分析，能够反映氢氧燃烧的实际过程，对燃烧轻气炮的深入研究有重要的参考价值。

## 参考文献：

- [1] 李阳, 秦涛, 朱捷, 等. 电磁轨道炮发展趋势及其关键控制技术[J]. 现代防御技术, 2019, 47(4): 19-23.
- [2] LI M W, WU Y H, CHEN Y W. DC Constant Current Power Supply used to Power a Multi-layer Launching system [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(1): 308-310.
- [3] UTRON, INC. Combustion Light Gas Gun Technology Demonstration[R]. America: UTRON, 2006.
- [4] 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.
- [5] 黄滔, 张相炎, 刘宁. 燃烧轻气炮点火对内弹道性能影响的仿真分析[J]. 兵工自动化, 2014, 33(12): 25-28.
- [6] 卓长飞. 炮弹底部排气减阻机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [7] 郑健, 周省长, 陈雄. 冲压增程炮弹发展研究[J]. 兵工自动化, 2011, 30(11): 12-15.
- [8] 徐秋坪. 滑翔制导炮弹弹道规划及其自抗扰控制系统研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2018.
- [9] 王婧. Power MEMS 氢氧微燃烧过程的数值模拟[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [10] 张小兵. 枪炮内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 50-52.
- [11] CHENG C, ZHANG X B. Interior ballistic charge design based on a modified particle swarm optimizer[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2012, 46(2): 303-310.
- [12] 周正炜, 程诚, 张小兵. 反无人机捕网装置发射过程的数值模拟与优化[J]. 弹道学报, 2019, 31(2): 1-6.