

doi: 10.7690/bgzd.2025.04.002

超高压氢氧变容燃烧过程压力波动影响因素研究

徐亚凯, 周正炜, 陈 雷, 张文星, 彭松江

(中国船舶集团有限公司第七一三研究所第一研究室, 郑州 450015)

摘要: 针对发射过程燃烧室压力波动异常情况导致的不稳定燃烧会产生足以对发射设备造成破坏的巨大膛压问题, 对其影响因素进行研究。采用仿真与实验结合手段, 分析弹丸质量、药室容积、点火直径和点火位置等因素对压力波动的影响规律。结果表明: 通过合理设计发射条件, 可降低压力波动的幅值, 为氢氧发射安全提供设计依据。

关键词: 压力波动; 氢氧燃烧; 超高压; 流体仿真

中图分类号: TJ012.1 **文献标志码:** A

Study on Influence Factors of Pressure Fluctuation in Hydrogen-oxygen Variable Volume Combustion Process with Ultra-high Pressure

Xu Yakai, Zhou Zhengwei, Chen Lei, Zhang Wenxing, Peng Songjiang

(No. 1 Research Room, No. 713 Research Institute of China State Shipbuilding Corporation Limited, Zhengzhou 450015, China)

Abstract: Aiming at the problem that the unstable combustion caused by the abnormal pressure fluctuation of the combustion chamber during the launch process can produce huge chamber pressure which can cause damage to the launch equipment, the influencing factors were studied. The influence of projectile mass, chamber volume, ignition diameter and ignition position on pressure fluctuation was analyzed by means of simulation and experiment. The results show that the amplitude of pressure fluctuation can be reduced by reasonable design of launch conditions, which provides a design basis for the safety of hydrogen and oxygen launch.

Keywords: pressure fluctuation; hydrogen-oxygen combustion; ultra-high pressure; fluid simulation

0 引言

氢能燃烧发射技术作为一种新概念发射技术, 具有清晰的应用前景, 在超高压氢氧燃烧机理、内弹道控制方面正处于理论探索阶段, 目前仍有许多关键技术亟待解决, 如低温高压发射药供给技术、弹丸密封技术、点火技术和燃烧与压力控制技术^[1]。一般认为当压力超过 180 MPa 即为超高压^[2], 因此氢能发射技术属于超高压燃烧发射技术, 其氢氧混合初始压力超过 30 MPa, 稳态发射过程燃烧室最大压力可达到 450 MPa, 但是压力波动异常情况导致的不稳定燃烧更是会产生超过 1 000 MPa 的极限压力, 对发射设备造成破坏, 存在严重的隐患, 也制约了氢氧燃烧发射技术的工程化应用进程。

美国 UTRON 公司^[3-4]进行氢氧混合的燃烧轻气炮研究, 并在随后发布了大量研究成果, 包括流体仿真计算和实验验证, 解决了弹丸密封、低温高压供储、点火技术等诸多超高压发射工程实现问题。周飞等^[5-9]对超高压氢氧燃烧进行了深入研究, 建立了燃烧与发射过程理论模型, 进行了氢氧火焰

加速剂爆燃转爆轰的数值研究及对内弹道过程的影响规律等。Zhong 等^[10-12]对燃烧轻气炮进行了大量仿真研究, 总结了发射条件对内弹道的影响规律。

目前, 关于氢氧燃烧发射主要集中在内弹道初速、膛压以及发射装置结构安全性等方面研究, 对于燃烧过程的压力波动较少涉及, 笔者以压力波动为研究对象, 旨在为氢氧燃烧发射安全提供理论和数据支撑。

1 数学模型

1.1 守恒方程

燃烧室内的气体流动是非定常可压缩粘性反应流动, 各气体成分满足质量守恒、动量守恒、能量守恒, 其统一形式为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\tau_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x_i}) + S_{\phi} \quad (1)$$

式中: 从左向右各项分别为非定常项、对流项、扩散项和源项; ϕ 为对应于质量、动量、能量守恒方程中的变量; τ_{ϕ} 为对应变量 ϕ 的交换系数; ρ 为混

收稿日期: 2024-08-15; 修回日期: 2024-09-20

第一作者: 徐亚凯(1988—), 男, 河南人, 博士。

合气体密度; U_i 为相应各方向上的速度。

1.2 湍流和燃烧方程

燃烧室内气体流动的湍流计算模型采用标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型。氢氧燃烧过程采用 EDM 涡耗散模型, 其控制方程为:

$$R_{fu} = -\frac{\bar{\rho}\varepsilon}{k} \min \left[A\bar{m}_{fu}, A\frac{\bar{m}_{ox}}{S}, \frac{B\bar{m}_{pr}}{(1+S)} \right] \quad (2)$$

式中: $A \approx 4$; $B \approx 0.5$; $\bar{m}_{fu}$ 、 $\bar{m}_{ox}$ 、 $\bar{m}_{pr}$ 为燃料、氧化剂、生成物浓度均值; S 为化学当量比; $\bar{\rho}$ 为未燃烧时混合气体密度与燃烧后气流密度之间的平均值。

1.3 气体状态方程

氢氧燃烧发射属于超高压燃烧, 高压条件下, 膛内气体采用 $P-R$ 真实气体状态方程。 $P-R$ 方程是一个同时适用于气态和液态的状态方程, 考虑了温度对方程的影响, 非常适合高压状态。

1.4 弹丸运动方程

氢氧燃烧发射弹丸运动方程参照经典内弹道方程, 其控制方程为:

$$v = dl/dt; \quad (3)$$

$$Sp = \varphi m (dv/dt) \quad (4)$$

式中: l 为弹丸行程; m 为弹丸质量; φ 为次要功系数; S 为身管截面积。

2 仿真模型

流体仿真有限元模型如图1所示, 构建2维轴对称模型, 采用 fluent 动网格技术, 耦合弹丸运动方程进行仿真计算, 采用单点点火的方式点燃氢氧混合气体。

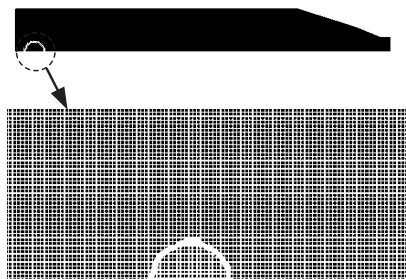


图1 流体仿真有限元模型

3 试验验证

为测试上述仿真模型的准确性, 利用高压燃烧发射装置开展试验验证。试验参数(初始压力、初始温度和氢氧摩尔比等)与仿真参数保持一致, 试验结

果如图2所示。流体仿真计算结果和试验结果在压力上升的前半段吻合一致, 最大膛压也基本一致, 最大膛压计算误差为4.4%, 但在压力下降段仿真曲线更为平缓。基于试验数据, 可以看出仿真模型能较好地模拟真实工况; 因此, 笔者以该模型为基础进行氢氧燃烧压力波动研究。

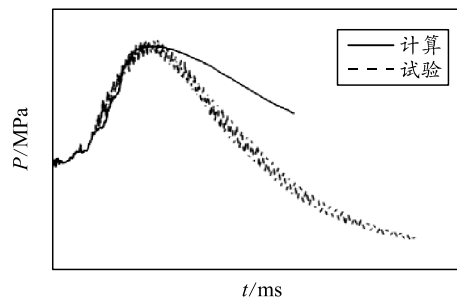


图2 仿真与试验曲线

4 影响因素分析

压力波动可用对应时间上膛底和弹底压力差的变化曲线来表示, 在没有压力波的情况下, 膛底压力总比弹底压力大, 压力差曲线不存在波动情况。压力差曲线不仅可以描述膛内纵向压力波的演变情况, 同时也可以对压力波大小进行定量估计^[13]。实验结果表明, 点火方式对传统火炮膛内压力波影响显著。笔者通过改变不同单一因素条件下分析膛底和弹底的压力差曲线, 研究氢氧燃烧发射过程压力波的影响因素及规律。

4.1 弹丸质量

在其他条件相同的前提下, 采用前述所构建的仿真模型, 分别计算了350和200 g的弹重情况下膛内压力波动情况, 计算结果如图3所示。

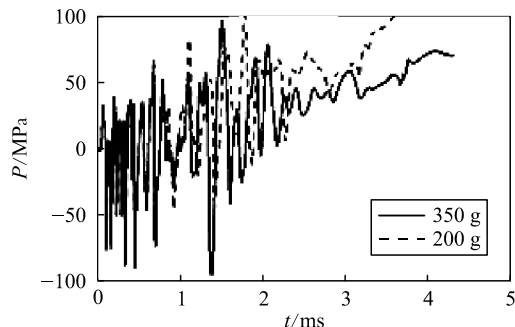


图3 不同弹丸质量下压力波动曲线

从图3可看出, 弹丸质量对燃烧室内压力波动无明显影响。

4.2 坡膛锥度

在同样药室容积的条件下, 采用前述所构建的仿真模型, 分别仿真了不同坡膛锥数和不同角度情

况下膛内压力波动情况, 计算结果如图 4 所示。

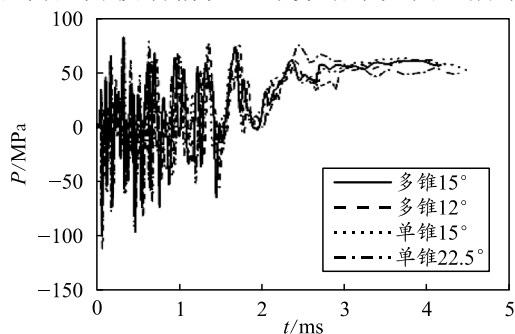


图 4 不同坡膛锥度下压力波动曲线

从图 4 可看出, 坡膛锥度对燃烧室内压力波动无明显影响。

4.3 药室容积

在初始压力、初始温度、点火条件等一致前提下, 分别计算了药室容积 2 和 3 L 情况下膛内压力波动情况, 计算结果如图 5 所示。

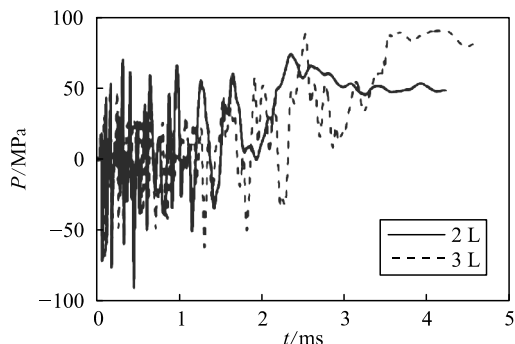


图 5 不同药室容积下压力波动曲线

从图 5 可得到: 药室容积对燃烧室内压力波动有一定影响, 压力波动随燃烧室体积增加而略有增大。

4.4 点火直径

在其他条件相同的前提下, 计算不同的点火直径, 相当于改变点火能量情况下膛内压力波动情况, 计算结果如图 6 所示。

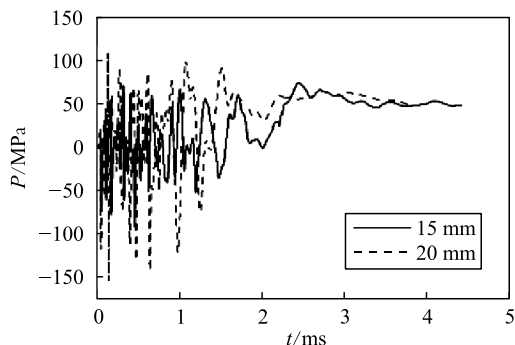


图 6 不同点火直径下压力波动曲线

从图 6 可得到: 随着点火能量的上升, 压力波

动更加剧烈。

4.5 点火位置

在其他条件相同的前提下, 将点火位置分别设置在靠近弹底的一侧和中间均匀的位置, 计算不同的点火位置情况下膛内压力波动情况, 计算结果如图 7 所示。

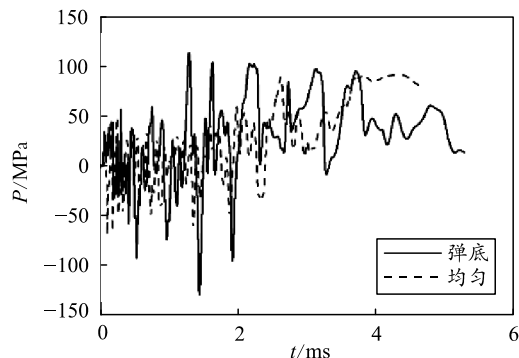


图 7 不同点火位置下压力波动曲线

从图 7 可得到: 当点火位置靠近弹底时, 压力波动幅度明显变大。

4.6 点火数量

在同样的药室容积和药室结构下, 分别仿真了单点、双点、3 点和 5 点点火情况下膛内压力波动情况。计算模型和计算结果如图 8 和 9 所示。

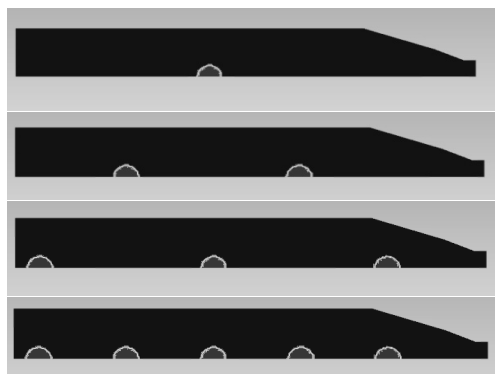


图 8 不同点火数量模型

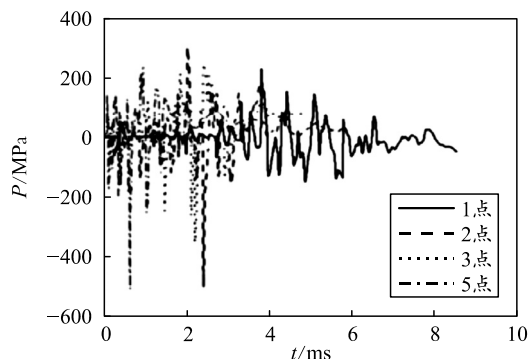


图 9 不同点火数量下压力波动曲线

从图 8—9 中可看出: 不同点火数量对燃烧室内

压力波动有明显影响,且压力波动时间点差异较大,点火数量越多,压力波动峰值时间越靠前。

4.7 初始温度

在药室容积、药室结构、点火条件和初始压力不变的情况下,分别仿真了初始膛内温度在 180、210、240、270 和 300 K 情况下膛内压力波动情况。计算模型和计算结果如图 10 所示。

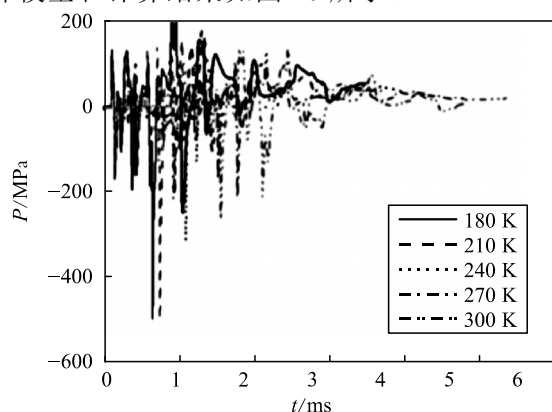


图 10 不同初始温度下压力波动曲线

从图 10 可以得到:初始温度对燃烧室内压力波动有明显影响,温度越低,压力波动越剧烈。

5 结论

笔者构建了氢氧燃烧仿真模型并进行了试验验证,对比结果表明所构建模型与试验结果吻合良好。在此基础上,对氢氧燃烧过程中压力波动进行了仿真计算。仿真计算结果表明:点火条件和初始温度对超高压氢氧燃烧压力波动影响最为明显,可为后续氢氧燃烧发射技术工程应用提供参考依据。

参考文献:

- [1] 张相炎. 新概念火炮技术[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2014.
- [2] QI L, OUYANG G, YANG K, et al. Simulation Study on Characteristic of Combustion and Emission of Super-high Pressure Common Rail Diesel Engine[C]//Zhengzhou: International Conference on Intelligent Systems Research & Mechatronics Engineering, 2015.
- [3] KRUCZYNSKI L D, WITHERSPOON D F, MASSEY D W. Experiments in a 45-mm Combustion Light Gas Gun-An Innovative Approach to Hypervelocity[C]//Cleveland: 1998 JANNAF Propulsion Meeting, 1998.
- [4] KRUCZYNSKI D, MASSEY D, MILLIGAN R, et al. Combustion Light Gas Gun Technology Demonstration[R]. America: UTRON INC MANASSAS VA, 2007.
- [5] 周飞. 燃烧轻气炮爆轰燃烧机理及抑制方法研究[D]. 南京:南京理工大学, 2019.
- [6] DENG F, LIU N, ZHANG X Y, et al. Numerical Analysis of Hydrogen-Oxygen Combustion in Combustion Light Gas Gun with Detailed Kinetic Mechanisms[C]//Ottawa: 2014 IEEE Workshop on Electronics, Computer and Applications, 2014.
- [7] LIU N, DENG F, ZHOU F, et al. Modeling of combustion and propulsion processes of a new concept gun using a gaseous propellant[J]. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2015, 53(3): 531-541.
- [8] ZHOU F, LIU N, ZHANG X Y. Numerical study of hydrogen-oxygen flame acceleration and deflagration to detonation transition in combustion light gas gun[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(10): 5405-5414.
- [9] ZHOU F, LIU N, ZHANG X Y, et al. 1D study of the detonation phenomenon and its influence on the interior ballistics of the combustion light gas gun[J]. Defence Technology, 2020(2): 341-347.
- [10] ZHANG W X, ZHOU Z W, XU Y K, et al. Research on characteristics of combustion light gas gun based on equations of state of real gases[C]//Zhuhai: International Conference on Mechanisms and Robotics, 2022.
- [11] 周正炜, 张文星, 陈雷, 等. 燃烧轻气炮发射过程数值模拟与优化[J]. 兵工自动化, 2023, 42(1): 61-64.
- [12] 胡斌, 王震, 何行, 等. 基于 CFD 的燃烧轻气炮发射过程仿真[J]. 舰船科学技术, 2022(10): 180-184.
- [13] 张小兵. 枪炮内弹道学[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2014.