

RLPG 点火及冷态喷射过程研究

余永刚, 周彦煌, 刘东尧

(南京理工大学动力工程学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 报道了再生式液体发射药火炮(RLPG)点火及模拟工质冷态喷射过程的实验结果, 定量测试了燃烧室、贮液室压力曲线。实验表明, 采用液体阻尼可以有效减弱点火过程中的压力振荡。针对点火喷射过程建立了数学物理模型, 并进行了相应数值模拟, 计算值和实验数据吻合较好。研究结果对深入分析再生式液体发射药火炮内弹道循环有指导意义和参考价值。

关键词: 点火; 喷射; 数值模拟; 液体发射药火炮

* 中图分类号: TJ012 文献标识码: A

1 引言

再生式液体发射药火炮(RLPG)和固体发射药火炮的工作原理不同, 它的工作过程是先由点火器点火, 在初始燃烧室内产生启动压力, 通过再生原理放大施加于贮液室中的液体发射药, 使液体药向燃烧室喷射、雾化、燃烧, 产生的高温高压燃气推动弹丸运动。实验表明: RLPG 点火过程是决定其内弹道稳定性的一个关键因素^[1]。若点火太弱, 喷射活塞启动缓慢, 液体药雾化质量不好, 燃烧不完全, 易造成堆积; 若点火过猛, 喷射活塞启动过于突然, 引起贮液室内流体压力振荡, 严重时将导致回火。因此, 点火过程控制十分重要。I. C. Stobie 等^[2]报道了中等口径再生式液体炮的点火特性, G. Klingenberg^[3]报道了烟火点火具的点火性能, J. DeSpirito^[4]、ZHOU Yan-huang 等^[5]报道了两级电点火具的点火特性。本文主要报道在 23mm RLPG 模拟装置上, 采用固体药点火具研究点火及冷态喷射的实验与理论研究结果, 它对深入分析 RLPG 内弹道过程和改进 RLPG 内弹道设计有指导意义和参考价值。

2 实验研究

2.1 实验装置及测试方法

实验装置示意图如图 1 所示, 它主要由点火器、活塞系统、弹丸及本体组成。在点火实验中, 贮液室注入模拟工质(不燃烧), 弹丸不启动。主要观测多种因素对燃烧室、贮液室压力大小、上升速率及振荡幅度的影响。

贮液室和燃烧室压力随时间的变化关系用压电法测量。该系统包括 SYC 压电传感器、Kistler5007 电荷放大器、DM7100 瞬态记录仪和微机。在实验前测量系统已经过标定。

2.2 实验结果及讨论

在 RLPG 模拟装置的贮液室中灌装模拟液体工质(酒精或煤油、轻机油), 弹丸固定不动。RLPG 点火、喷射过程可简述如下: 点火器经电击发后, 先引燃硝化棉, 随后点燃烧 3/1 和 4/7 火药, 产生的火药

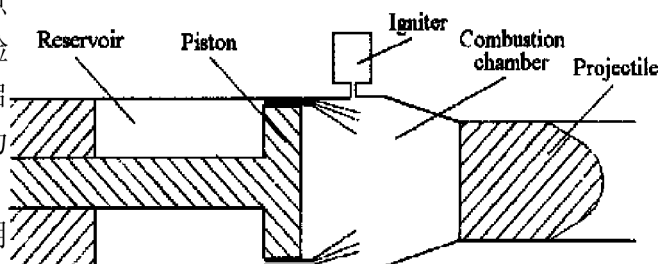


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Sketch of experimental apparatus

* 收稿日期: 2000-11-30; 修回日期: 2001-07-12

基金项目: 国防科技重点实验室基金项目(99JS35.3.1BQ02); 国家自然科学基金项目(50076018)

作者简介: 余永刚(1963—), 男, 博士, 副教授。

气体使点火室的压力升高,当达到破膜压力时,铜膜片破裂,火药气体迅速喷入燃烧室,使燃烧室压力逐渐升高。当达到活塞启动压力后,活塞后退压缩贮液室中的模拟工质,使之从环形间隙喷射到燃烧室。随着火药气体的喷入,活塞继续后退,喷射出的液体在燃烧室里雾化、吸热(不燃烧),由于密闭空间缺氧,故燃烧室压力始终低于弹丸启动压力,这一物理过程于活塞运动到位结束。由于点火压力的冲击作用,一般在贮液室和燃烧室中会形成压力振荡,如图2所示。它有可能在 RLPG 射击过程中被放大,易于出现回火。因此需要尽量减小这种初始振荡。

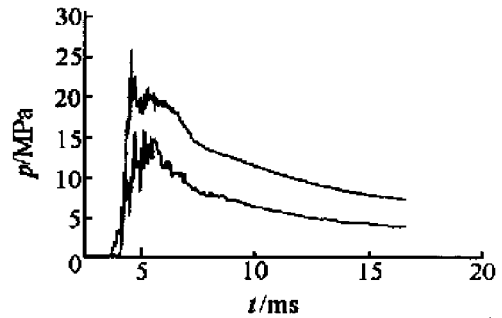


图2 通常条件下的点火试验结果

Fig.2 Recorded pressure versus time under normal conditions

采用在活塞杆后端加液体阻尼的方法,来降低点火压力对活塞的冲击效应,通过调整阻尼液体质量、阻尼腔孔径大小、液体粘度,可实现一个稳定的点火、喷射过程。贮液室、燃烧室典型压力曲线如图3所示。图3(a)、(b)分别为阻尼孔径为4.5mm和4.0mm的试验结果。由图可见,该方法可有效减弱点火过程的压力振荡和贮液室的水锤效应。并且阻尼孔越小,燃烧室和贮液室的最高压力越大。这主要是活塞运动快慢不同造成的。考虑到 RLPG 的点火性能要求,可通过调整点火器的装药量、膜片厚度、RLPG 初始燃烧室大小以及液体阻尼强弱,使燃烧室压力在3~5ms内上升到15~20MPa,以实现可靠点火。

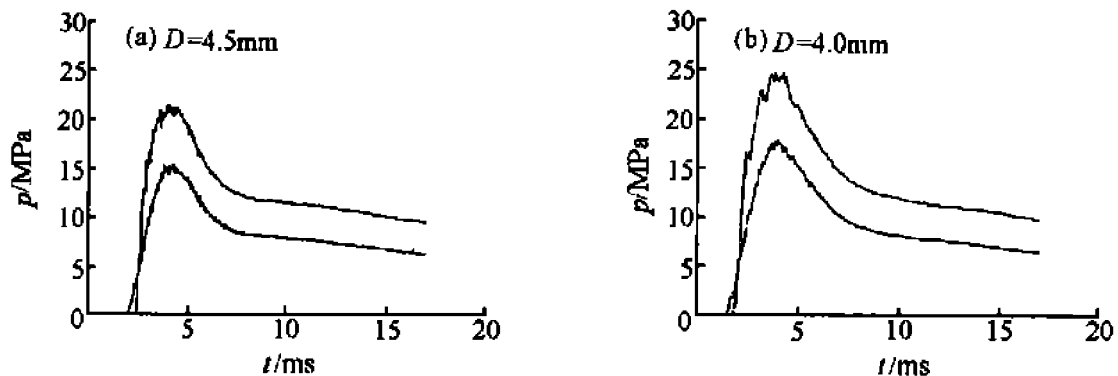


图3 采用液体阻尼的点火试验结果

Fig.3 Recorded pressure versus time with liquid damping

3 理论模型及数值模拟

3.1 物理模型

根据以上 RLPG 点火、冷态喷射现象,采用以下简化假设:

- (1)膜片破裂后,火药气体以当地声速流动;
- (2)考虑过程短暂,射入燃烧室的气体作绝热膨胀;
- (3)模拟液体工质喷入燃烧室后呈雾状,其所占体积在火药气体状态方程中以余容方式修正,其吸收的热量用唯象系数修正;
- (4)活塞运动过程中的阻力通过唯象系数修正。

3.2 数学模型

将全过程分成三个阶段建立数学模型。

3.2.1 膜片破裂前

火药燃速方程

$$dz/dt = (u_1/e_1)p_1^n \quad (1)$$

$$\text{火药形状函数} \quad \Psi = \lambda_z (1 + \lambda_z + t_z^2) \quad (2)$$

$$\text{点火室火药气体密度} \quad \rho_1 = \frac{\omega \Psi}{w_1 - \omega(1 - \Psi)/\delta} \quad (3)$$

式中: w_1 为点火室容积, ω 为装药量, δ 为火药密度。

$$\text{点火室火药气体状态方程} \quad p_1((1/\rho_1) - \alpha_1) = f \quad (4)$$

式中: α_1 为火药气体余容, f 为火药力。

上述四个方程中有 z , Ψ , p_1 , ρ_1 四个未知数, 方程组封闭。

3.2.2 破膜后与活塞启动前

火药燃速方程与形状函数同膜片破裂前。

点火室火药气体流入燃烧室的速度

$$u = \begin{cases} \left[\frac{2\gamma}{\gamma-1} RT_1 [(p_2/p_1)^{2/\gamma} - (p_2/p_1)^{(\gamma+1)/\gamma}] \right]^{1/2} & (p_2/p_1 > 0.528) \\ \left[\frac{2\gamma}{\gamma+1} RT_1 \left[\frac{2}{\gamma+1} \right]^{2/(\gamma+1)} \right]^{1/2} & (p_2/p_1 < 0.528) \end{cases} \quad (5)$$

式中: γ 为绝热比, T_1 为点火室气体温度, p_2 为燃烧室压力。

$$\text{火药气体质量流率方程} \quad dm/dt = A_0 \rho_1 u \quad (6)$$

$$\text{点火室火药气体密度} \quad \rho_1 = \frac{\omega \Psi - m}{w_1 - \omega(1 - \Psi)/\delta} \quad (7)$$

$$\text{点火室火药气体状态方程} \quad p_1(1/\rho_1 - \alpha_1) = RT_1 \quad (8)$$

$$\text{点火室气体能量方程} \quad \frac{\omega f}{\gamma-1} = \frac{(\omega \Psi - m)}{\gamma-1} RT_1 + \int_0^t \left[\frac{\gamma RT_1}{\gamma-1} + \frac{u^2}{2} \right] dm \quad (9)$$

$$\text{燃烧室气体密度} \quad \rho_2 = m/W_2 \quad (10)$$

式中: W_2 为燃烧室容积。

$$\text{燃烧室气体状态方程} \quad p_2(1/\rho_2 - \alpha_2) = RT_2 \quad (11)$$

$$\text{燃烧室气体能量方程} \quad \int_0^t \left[\frac{\gamma RT_1}{\gamma-1} + \frac{u^2}{2} \right] dm = \frac{mRT_2}{\gamma-1} \quad (12)$$

上述十个方程中有 z , Ψ , m , u , p_1 , T_1 , ρ_1 , p_2 , T_2 , ρ_2 十个未知数, 方程组封闭。

3.2.3 活塞启动与液体工质喷射

火药燃速方程、形状函数、火药气体流率、点火室气体密度、状态方程、能量方程分别参见前两阶段相应方程。

$$\text{液体工质相对喷射率} \quad \frac{d\eta}{dt} = \frac{C_D A_D \rho_L u_L}{M_L} \quad (13)$$

式中: C_D 为流量系数, A_D 为环形间隙面积, ρ_L 为液体密度, u_L 为液体喷射速度, M_L 为贮液室液体总质量。

$$\text{液体工质喷射速度} \quad \frac{du_L}{dt} = \frac{1}{\rho_L L_D} \left[p_L - p_2 - \frac{\rho_L}{2} \left[\frac{u_L}{C_D} \right]^2 \right] \quad (14)$$

式中: L_D 为间隙长度, p_L 为贮液室压力。

$$\text{活塞运动方程} \quad \varphi_p m_p (dv_p/dt) = p_2 (A_C - A_D) - p_L (A_R - A_D) \quad (15)$$

式中: φ_p 为活塞次要功系数, A_C 为燃烧室横截面积, A_R 为贮液室横截面积。

$$\text{活塞速度方程} \quad dl_p/dt = v_p \quad (16)$$

$$\text{液体工质质量守恒方程} \quad M_L (1 - \eta) = \rho_L (V_{L0} - A_R l_p) \quad (17)$$

式中: V_{L0} 为贮液室初始容积。

$$\text{液体工质状态方程} \quad \rho_L = \rho_{L0} \left[\frac{C_{pL} + B}{C_{pL0} + B} \right]^{1/c} \quad (18)$$

式中: B 为体积模量, C 为体积模量系数。

$$\text{燃烧室容积方程} \quad W_2 = W_{20} + A_C l_p \quad (19)$$

$$\text{燃烧室气体密度} \quad \rho_2 = m / W_2 \quad (20)$$

$$\text{燃烧室气体能量方程} \quad p_2(1/\rho_2 - \alpha_2) = RT_2 \quad (21)$$

$$\text{燃烧室气体能量方程} \quad \int_0^t \left[\frac{\gamma RT_1}{\gamma - 1} + \frac{u^2}{2} \right] dm - q = \frac{mRT_2}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} m_p v_p^2 \quad (22)$$

$$\text{液体工质吸热方程} \quad q = C_S M_L \eta \quad (23)$$

上述十八个方程中有 $z, \Psi, u, m, p_1, \rho_1, T_1, p_2, \rho_2, T_2, \eta, u_L, v_p, l_p, p_L, \rho_L, W_2, q$ 十八个变量, 方程组封闭。

3.3 数值模拟结果

从数学模型可以看出, 方程组是由常微分方程与代数方程组成, 故可采用四阶龙格-库塔法进行计算, 试验装置的主要结构及装填参数如表 1 所示, 采用这一套参数对实验结果进行了数值模拟, 典型压力曲线如图 4 所示。

表 1 试验装置结构与装填参数

Table 1 Structure and load parameters of the experimental apparatus

W_1/ml	W_{20}/ml	V_{L0}/ml	m_p/g	M_L/g	A_D/mm^2	L_D/cm	A_C/cm^2	A_R/cm^2	A_0/mm^2	ω/g	$\bar{\nu}(\text{g}/\text{m}^3)$
10.8	31.0	40.9	495	31.9	39.4	2.50	13.1	9.93	12.6	2.20	1.60

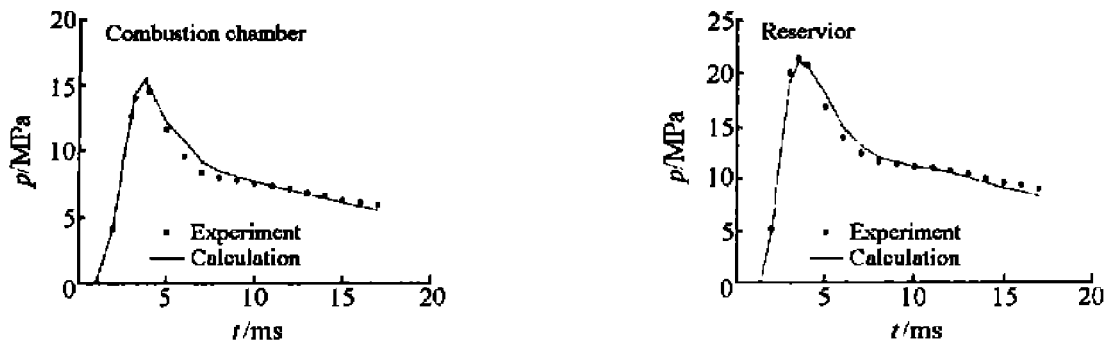


图 4 计算值和实验值的比较

Fig.4 Comparison between experimental and calculated results

4 结 论

(1)通过调整 RLPG 点火器的装药量、膜片厚度、燃烧室初始容积、液压阻尼强度, 可实现稳定的点火、喷射过程。

(2)建立的 RLPG 点火过程模型和实验结果吻合较好。

参考文献:

- [1] Klingenberg G, Knapton J D. Review on Liquid Gun Propellant Ignition Studies [R] . EMI Rept VT/83, 1983: 1-12.
- [2] Stobie I C, Knapton J D, DeSpirito J. Characterization of Solid and Liquid Propellant Igniters for Use in Medium Caliber Regenerative Liquid Propellant Guns [R] . BRL Rept TR 2912, 1988: 1-26.
- [3] Klingenberg G. Experimental Study on the Performance of Pyrotechnic Igniters [J] . Journal of Propellants, Explosives and Pyrotechnics, 1984, 9(1): 91-107.
- [4] DeSpirito J. Electrical Ignition of Liquid Propellant for Use in Guns [J] . Combustion Science and Technology, 1991, 76(3): 251-

263.

- [5] ZHOU Yan-huang, GUAN Han-zhang, YU Yong-gang. A New Two-stage Electrical Igniter of Liquid Propellant for Use in Regenerative Liquid Propellant Guns [A]. Proc of 16th Int Symp on Ballistics [C]. San Francisco, American: CPIA Publication, 1996: 243-247.

Investigations of RLPG' s Ignition and Cold Injection Processes

YU Yong-gang, ZHOU Yan-huang, LIU Dong-yao

(*College of Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China*)

Abstract: Ignition and cold injection processes using simulation medium in regenerative liquid propellant gun were investigated experimentally. Pressure-time curves in reservoirs and combustion chambers were measured. The results show that pressure oscillation during ignition was suppressed by using liquid damper. A physical and mathematical model for the process is suggested, numerical simulation was also presented here. The calculated results are in good accord with the experimental data. These results have instructive meaning and practical value for analyzing interior ballistic cycle of RLPG.

Key words: ignition; injection; numerical simulation; liquid propellant gun