

# 液体药再生喷射燃烧特性的实验研究

栗保明 官汉章 周彦煌 焦化南 张兆钧

(南京理工大学动力工程学院 南京 210094)

**摘要** 利用逆向式再生环形喷射装置,研究了高速喷射条件下液体的点火燃烧性能。实验研究发现:喷射条件下液体药的点火燃烧性能较整装式液体装药容易实现一致性,且燃速大幅度增加。同时研究了伴随再生喷射燃烧过程所出现的高频压力振荡,分析了高频压力振荡产生的原因。提出了液体药喷射条件下点火延迟度的概念,它可作为评价 RLPG 点火器工作性能指标之一。利用喷射点火延迟度的概念,比较了液体药喷射点火延迟性能对于喷口面积、活塞质量、液体药粘度及液体药能量等参量变化的敏感性。

**关键词** 喷射 点火 燃烧 振荡 液体发射药

**中图分类号** TJ 012.13.14

## 1 引言

单元液体发射药(MLR)用于火炮装药使火炮内弹道学研究内容发生了很大的变化。其中最令人关心的问题液体发射药(LP)点火燃烧性能与固体发射药(SP)相比产生那些变化。整装式液体发射药火炮(BLPG)由于基本上不改变现有固体发射药火炮(SPG)的结构,并且从原理上分析能够较大幅度地提高火炮的弹道性能。自四十年代中期提出液体发射药火炮概念后,BLPG是最先研制的一种液体发射药火炮。然而,近三十年的研究发现,由于在整装式液体装药燃烧过程中存在两种固有的流动不稳定因素,使整装式液体装药的燃烧稳定性难于控制。因此,弹道学家提出利用机械方法控制液体药燃面的尺度。最容易联想的方法是采用液体火箭或内燃机中的喷射雾化方法,即利用高速喷射条件下气动力作用使液体药射流破碎雾化成细小的液滴。这种表面积与质量比很高的液雾能够大幅度改善液体药的点火燃烧性能。再生式液体发射药火炮(RLPG)就是采用这种方法的一种新概念火炮。

然而,火炮实际工作环境较液体火箭或内燃机的更为恶劣,其具体表现为:液体发射药火炮中最大压力是液体火箭或内燃机的10倍,在某些情况下甚至达100倍,质量流量为高性能液体火箭发动机的20至50倍,满足如此高的质量流量其喷口尺寸通常较液体火箭的喷嘴尺寸高几倍。由此可见,在液体发射药火炮中,雾化只是一个名义上的泛指,并不代表其物理实质,液体药破碎产物是射流核与不规则的液团、液股及液滴的混合体。因此,高速喷射条件下,实现液体药点火燃烧的一致性具有相当的难度,而此项技术的解决对于控制内弹道性能的稳定性意义重大。我们研制了一种逆向式再生喷射燃烧实验装置。逆向是指液流喷射方向与燃气膨胀方向相反;再生的含义是指通过液体药燃烧而实现其自身的

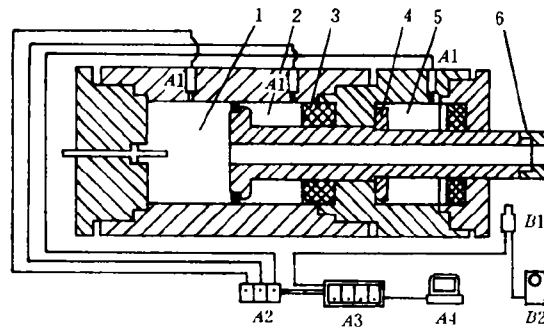
喷射过程,并不需要外部施加作用力。利用实验装置及测试系统,研究了液体药再生喷射点火燃烧特性及对各种参量变化的敏感性。

## 2 实验装置及测试系统

实验装置主要由四大部件组成:(1)燃烧室本体;(2)点火塞头;(3)活塞缸体;(4)轴向外环式差动活塞。整套装置被隔离成三大部分:(1)燃烧室;(2)贮液室;(3)缓冲室。

实验原理采用再生逆向环形喷射的方法,即:实验开始时,接通直流电源,点燃预置于燃烧室中的固体点火药,燃气膨胀推动活塞向后挤压液体药。由于活塞两端面积不同,因而液体压力迅速上升,并且大于燃烧室气体压力。贮液室与燃烧室之间的压差使初始密闭的“O”型圈脱掉,液体药开始喷出并破碎,喷出的液体药着火燃烧后,再继续推动活塞向后运动,从而实现了再生喷射、燃烧过程。同时,气体压力的迅速上升使限压膜片打开(或使弹丸开始运动)。

测试系统包括压力测试系统、活塞位移与速度测试系统。所采用的传感器为压电式压力传感器与GD型位移、速度传感器。实验装置及测试系统如图1所示。



1. 燃烧室; 2. 贮液室; 3. 密封与制动装置; 4. 液压阻尼器; 5. 缓冲室; 6. 限压膜片;  
A1 压电传感器; A2 电荷放大器; A3 瞬态记录仪; A4 微机; B1 GD型位移速度传感器;  
B2 示波器

1. Combustion chamber; 2. Liquid reservoir; 3. Seal and brake; 4. Damper; 5. Liquid damping chamber; 6. Diaphragm; A1 Pressure transducer; A2 Charge amplifier; A3 Data sampling system; A4 Computer; B1 Displacement sensor; B2 Oscilloscope

图1 实验装置及测试系统

Fig. 1 Experimental set-up and measuring system

## 3 实验结果及分析

### 3.1 LP喷射点燃与整装式点燃性能的比较

再生喷射实验采用的液体发射药HY911是一种以硝酸羟胺(HAN)和溶于水有机燃料三乙醇胺硝酸盐(TEAN)为基的稳定均匀液体。固体点火药剂为粉末状硝化棉(NC)与4/7多孔单基药或1/3小粒药的混合物。通过点火信号与活塞起动信号比较发现:活塞质量惯性及密封装置的摩擦作用对于活塞起动的影响较小。对于开始时处于未受力状态的

液体药,当贮液室长度为 20mm,如果液体药没有喷射,由液体药状态方程可算出:贮液室压力升至 17MPa 活塞只需移动 0.1mm。而从实验曲线发现,压力上升至 17MPa 约需 3ms。显然可见,用于初始密闭的 O 型圈当点火压力达到一定值即脱落。静态条件下抽拉活塞发现:O 型圈脱落,只需要很小的压差。由于实验设计的 O 型圈压缩量为 4%,摩擦力很小,克服摩擦力需要 0.1MPa 左右,但为了安装方便,O 型圈沟槽前部设有一凸起。因此,O 型圈脱落压力约需 0.5MPa 左右。由此可以描述实验过程初期各种现象发生顺序为:点火激励后,硝化棉经一延迟时间开始着火,点火压力随即建立,活塞开始启动,O 型圈脱落,液体药喷出。由于喷射初期压差很小,喷射药量很少,点火压力继续上升,喷入燃烧室的液体药发生热分解及混合作用,并开始燃烧,压力迅速上升,随后进入了液体药的主喷射阶段。图 2 是同一条件下两次实验所测出的燃烧室压力曲线。实验设计最大点火压为 15MPa。由图 2 可见,压力上升至 15MPa 对应的时间为 3ms。之后压力开始迅速上升,从压力 15MPa 至喷射结束,喷射时间仅 1.2ms 左右。

由图 2 可见,高速喷射条件下,液体药燃烧的压力曲线重复性较好,表明点火燃烧一致性较好。

图 3 是相同条件下在密闭爆发器中采用 OTTO- I 液体燃料两次实验所测出的压力曲线。液体药量为 18ml,OTTO- I 密度与火药力比 HY911 低。点火压力为 17MPa。由图 3 可见,压力曲线重复性很差,点火燃烧时间是喷射条件下点火燃烧时间的几十倍。因此,整装式液体装药如不采取其它改进措施,其点火燃烧的一致性很难改善,而喷射点火燃烧的一

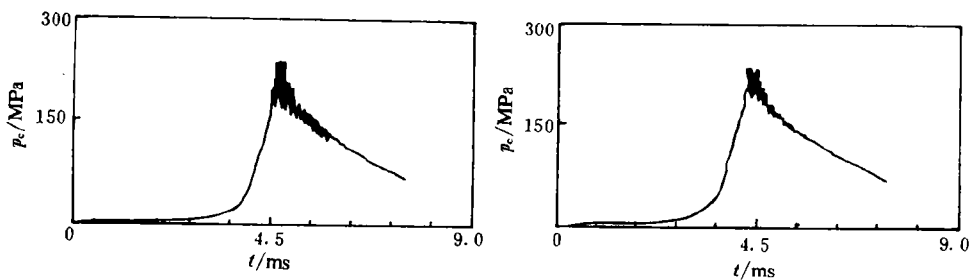


图 2 再生喷射条件下 HY911 压力曲线

Fig. 2 Chamber pressure vs time curve for LP regenerative injection

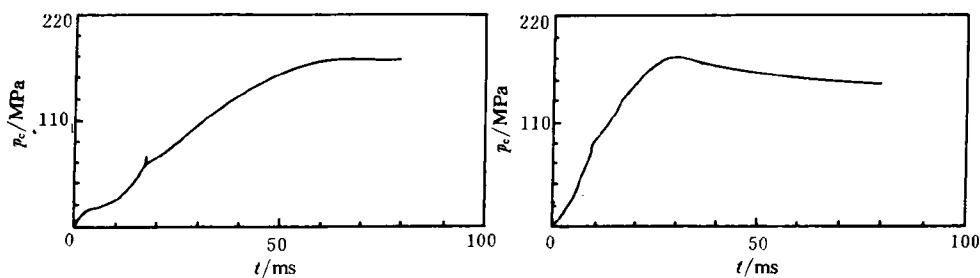


图 3 在密闭爆发器中 OTTO- I 压力曲线

Fig. 3 OTTO- I pressure vs time curve in closed bomb

致性相对而言却较易实现,且燃速能够大幅度提高。

### 3.2 再生喷射燃烧过程中高频压力振荡

在再生喷射燃烧过程中,燃烧室压力曲线会经常出现高频压力振荡。大量实验研究发现,这种高频压力振荡与空腔振荡、射流振荡、活塞与液体药振动、机械结构的耦合振动以及湍流等因素有关<sup>[1]</sup>。如不考虑压力传感器对炮管和燃烧室内的应力波响应、活塞与液体药的机械振动以及喷孔中的不稳定流动,只从燃烧的角度分析高频压力振荡认为:高频压力振荡是声学振型与 LP 不稳定燃烧的耦合,而不稳定燃烧所引起压力振荡的强度与气流速度大小有关。通常情况下,对于再生喷射装置的燃烧室除出口附近流速较大外,其余部分气流速度较小,因而,在燃烧室中 LP 不稳定燃烧导致的压力振荡并不大。因此,高频压力振荡主要是声学振型。声学振型从振荡频带可分为空腔振荡及射流振荡,空腔振荡的频率是由射流边界之间驻波的基频及其谐频决定的,通常在 RLPG 中,其基频为 5KHz 至 25KHz,空腔振荡固有频率可表示为

$$\text{轴向振荡: } f_1 = \frac{na}{2L_c}$$

$$\text{径向振荡: } f_R = \frac{na}{2r_c}$$

$$\text{环向振荡: } f_T = \frac{na}{2\pi r_c}$$

$$\text{径向/环向振荡: } f_c = \frac{a}{2} \left[ \frac{n_1^2}{r_c^2} + \frac{n_2^2}{(\pi r_c)^2} \right]^{1/2}$$

其中: $n, n_1, n_2$  皆为正整数, $a$  为气体音速, $L_c$  为空腔长度, $r_c$  为空腔半径。由此可知,空腔振荡的频率随着燃气的释放而增加,并且取决于燃烧室几何尺寸。因而大口径火炮空腔振荡频率比小口径火炮的低。通常我们可以从频谱分析寻找振荡的主频率,然后反推出音速,从而判定振型及其阶数。

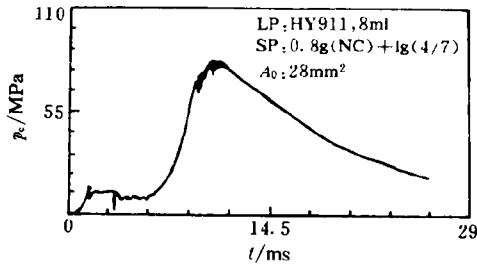
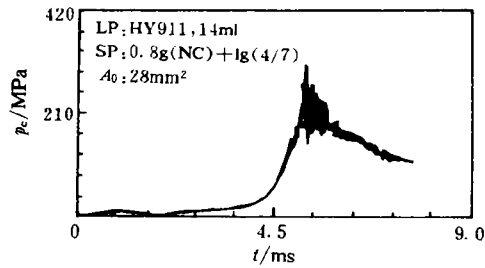
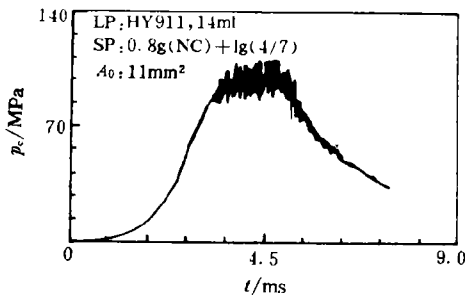
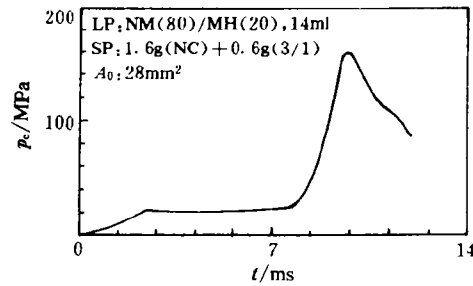
高频带振荡是由于射流核与射流湍流边界层中非稳态火焰阵面相互作用所产生的横向振动。射流核振荡的频率取决于射流的速度及形状与尺寸。其振荡频率  $f_{st}$  由 Strouhal 数所提供

$$St = f_{st} \frac{D_0}{U_0} = C_{st}$$

其中: $C_{st}$  为实验常数; $D_0$  为喷口尺寸,对于环形喷口, $D_0$  取喷口间隙的两倍; $U_0$  为 LP 喷射速度。

压力振荡幅度与波在燃烧室壁面及堆积液体药界面的反射作用及 LP 燃速特性有关。由于膛壁与液体药的声阻尼远大于气体介质的声阻尼,波的透射很小,几乎全部反射。因此,振荡压力经反射作用后而成倍增加。同时,如果液体药燃速对压力较敏感,压力振荡的幅度也会加剧。图 4~图 7 是各种条件下所测出的燃烧室压力-时间曲线。

从图 4 与图 5 比较可以看出,只改变液体药量,而其它条件保持不变,图 4 所示低压情况下只存在很弱的压力振荡。而图 5 所示高压情况下却具有较强的压力振荡,这说明压力振荡产生与燃烧室最大压力有关。图 5 所示高频压力振荡主频率为 8KHz,相应于一阶环向振荡,16KHz 是二阶谐波,而高频带 30~50KHz 相应于射流振荡,但射流振荡的幅度较弱。

图4  $p_c-t$  曲线Fig. 4 Pressure vs time curve  
in combustion chamber图5  $p_c-t$  曲线Fig. 5 Pressure vs time curve  
in combustion chamber图6  $p_c-t$  曲线Fig. 6 Pressure vs time curve  
in combustion chamber图7  $p_c-t$  曲线Fig. 7 Pressure vs time curve  
in combustion chamber

由图5与图6比较可见,仅变化喷口面积,压力振荡幅度相差较大。喷口面积较大的情况,压力振荡较为严重,其振幅高达燃烧室最大压力的40%;而喷口面积较小,压力振荡明显减弱。由此表明,液体药喷射流量对压力振荡影响很大。

图5与图7反映液体药对于压力振荡的影响。NM(80)/MH(20)能量较HY911的低,其压力曲线没有压力振荡,最大压力也比HY911的低。由此表明,液体药能量变化对压力振荡影响较大,这也说明压力振荡与液体药燃速特性有关。

因此,空腔振荡及射流振荡的强度取决于燃烧室最大压力、液体药质量流量以及燃速特性等。

Haberl 观测发现<sup>[2]</sup>,压力振荡能否激励取决于如下特性函数  $I$ ,

$$I = \frac{u}{r_D} \quad (1)$$

式中: $u$  为 LP 燃速, $r_D$  为雾化液滴半径, $I$  的单位为( $s^{-1}$ )。对于燃速采用指数公式表示

$$u = Ap_c^B \quad (2)$$

式中: $A$  为燃速系数, $B$  为燃速指数, $p_c$  为燃烧室压力。

Wolfe 与 Andersen 基于气动力雾化理论推导出一液滴尺寸公式

$$r_D = 2.5713U_0^{-4/3}D_j^{1/6} \sigma_L^{1/2} \mu_L^{1/3} \rho_L^{-1/6} \rho_G^{-2/3} \quad (3)$$

式中:  $U_0$  为喷射速度,  $D_j$  为射流直径, 对于环形喷口,  $D_j$  取外环的直径。  $\sigma_L$  为液体药表面张力,  $\mu_L$  为液体药粘性系数,  $\rho_L$  为液体药密度,  $\rho_G$  为燃气密度。

对于雾化液滴尺寸影响最大的二个参量为  $U_0^{-4/3}$ 、 $\rho_G^{-2/3}$ 。

令  $C_0 = 2.5713D_j^{1/6}\sigma_L^{1/2}\mu_L^{1/3}\rho_L^{-1/6}$ ,  $r_D = C_0U_0^{-4/3}\rho_G^{-2/3}$  因此,

$$I = Cp^b\rho_G^{2/3}U_0^{4/3} \quad (4)$$

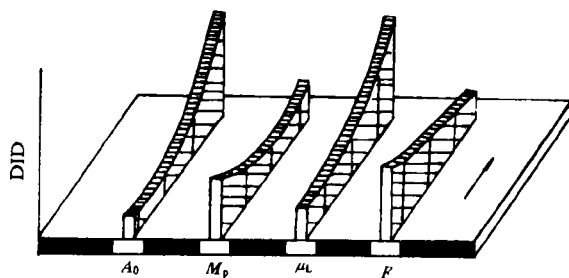
其中,  $C=A/C_0$ 。当  $I>I_c$  (临界范围) 时, 压力振荡将被激励。

由式(4)可以看出, 压力振荡与燃气压力、燃气密度及喷射速度有关, 并且各种因素对压力振荡的激励作用与上述实验结果相符。

### 3.3 LP 再生喷射点火延迟性的分析

实验发现, 再生喷射条件下液体药点火性能与结构参量及装填参量有关。同样的点火条件下, 改变喷口间隙、活塞质量、液体药粘度或液体药, 液体药的点火性能变化很大。其具体表现为点火延迟时间以及燃烧室压力相差较大。

研究喷射条件下的点火延迟性, 应考虑相应的喷射时间。譬如, 同一种点火条件用于两种喷射结构, 使其中之一在 3ms 的喷射时间内初期点火延迟时间为 1ms; 而对于另一种喷射结构在 5ms 的喷射时间内初期点火延迟时间也是 1ms; 如果只从初期点火延迟时间来看, 似乎点火条件对两种情况都是合适的。然而, 如果从喷射的角度来看, 这点火条件对于前一种情况延迟性过大, 而对于后一种情况就比较合适。我们提出一个点火延迟度的概念, 即喷射初期点火延迟时间与喷射时间的比值, 用符号 DID 表示, 利用它可以合理地比较 RLPG 中点火器工作的有效性。图 8 是利用目前的实验结果所整理出的点火延迟度随各种参量变化的趋势图。



$A_0$  喷射面积;  $M_p$  活塞质量;  $\mu_L$  液体药粘度;  $F$  液体药能量

$A_0$  Injection area;  $M_p$  Piston mass;  $\mu_L$  LP viscosity;  $F$  LP energy

图 8 点火延迟度随各参量变化的趋势图

Fig. 8 Trend of DID with variation of the parameter

由图 8 可见, 喷口面积增加, 使初期堆积量增大, 喷射时间缩短, 因而, 点火延迟度相应增大。活塞质量大小影响活塞加速度, 从而影响 LP 质量流量与喷射速度, 也相应影响雾化性能。从图 8 可见, 当活塞质量增加时, 喷射时间的增加超过了初期点火延迟时间的增长, 因而, 点火延迟度相应减小; 当活塞质量增加到一定值之后, 喷射时间的增加低于初

期点火延迟时间的增加,点火延迟度又开始增大。液体药粘度与能量对点火延迟度的影响同样容易理解。

由此可见,点火延迟度这一概念有助于评价点火器的点火性能及喷射结构的合理性。

#### 4 结 论

结合实验结果,分析了 LP 再生喷射燃烧的特性,得出了以下三点结论:

- 1 再生喷射原理是实现 LP 快速稳定燃烧的一种有效方法。
- 2 高频压力振荡是 LP 再生喷射燃烧的一种特性,不考虑应力波及活塞振动,分析认为高频压力振荡主要由空腔振荡与射流振荡引起,其振幅能否放大取决于液体药燃速特性以及波反射作用。
- 3 提出了喷射点火延迟度的概念,利用了此概念分析了再生喷射条件下液体药的点火燃烧性能对结构参量与装填参量变化的敏感性。

#### 参 考 文 献

- 1 Rychnovsky R E, Carling R W. Pressure Oscillation reduction in Liquid Propellant Combustion. In: Proceedings of the 13th International Symposium on Ballistics. Stockholm: National Defence Research Establishment of Sweden, 1992. 321~328
- 2 Klingenberg G. Liquid Propellant propulsion Technology. In: Proceedings of International Symposium on Cannon and Gun Technology. Nanjing: China Ordnance Society. 1993, 176~196

### STUDY OF ANNULAR LP JET IGNITION AND BURNING PROPERTIES IN REGENERATIVE INJECTION PROCESS

Li Baoming, Guan Hanzhang, Jiao Huanan,  
Zhou Yanhuang, Zhang Zaojun

(*Institute of Dynamic and Power Engineering, NUST, Nanjing, 210094, China*)

**ABSTRACT** A new type of LP regenerative injection simulator has been developed. Annular LP jet ignition and burning properties in regenerative injection process are studied with this simulator and compared with bulk LP burning property. Pressure oscillations are observed to form in regenerative LP injection simulator and possible sources forming pressure oscillations are analysed. In this paper, a new idea describing the jet ignition delay time in injection process is proposed and the trend of the jet ignition delay time with the variation of the parameter is described.

**KEY WORDS** injections, ignition, combustion, oscillations, liquid propellant guns