

整装式液体随行装药燃烧的 实验与数值模拟研究^{*}

陆欣 周彦煌 余永刚 官汉章

(南京理工大学动力工程学院 南京 210094)

摘要 报道了在整装式液体随行装药技术研究方面取得的最新实验结果,观测了随行药在不同点火延迟时间下燃烧对膛压曲线的影响,并建立了随行装药的内弹道经典模型,计算结果与实测结果有较好的一致性。

关键词 液体发射药 随行装药 内弹道

中图法分类号 T J012 TQ 562 23

1 引言

随行装药技术,是指弹丸携带一定量的发射药,并在弹丸运动的过程中逐步燃烧的一种新的发射技术。随行装药燃烧提高了弹底压力,因而可以有效地提高弹丸的初速。随行的实现必须具备三个条件,即随行药高燃速、延迟点火、随行结构可靠且弹丸附加质量小。国外早在二战时期就开展了对随行装药技术的研究。美国一直将其列入超高速射弹关键技术计划中。以前他们主要采用的是固体随行方案,由于缺少性能稳定的超高燃速发射药,这方面进展不大。近年来,他们又尝试液体随行方案的研究,但到目前为止,在随行液体药燃速控制及点火延迟方面未取得突破。

我们采用多孔介质整装式液体随行装药的新方案,即在弹尾部腔体内放入多孔介质材料,并灌注液体发射药,再加上具有密封性能的点火延迟结构。多孔介质分割液体药的技术可以有效地控制燃烧,使液体药在整装式条件下迅速而稳定地燃烧^[1~2]。液体药密闭爆发器的静态实验中取得的关键性技术突破,即能实现液体药高燃速,又能控制点火延迟^[2~3]。在此基础上我们进行了火炮试验研究,建立了随行装药的内弹道模型,并将数值结果与实验结果进行了比较和分析。数值研究可以对实验结果进行预测,对实验方案进行筛选和事后分析,指导液体随行装药的设计。

2 液体随行装药的内弹道模型

2.1 物理模型及基本假设

整装式液体药在高温高压气体射流作用下,在液体中将很快形成泰勒(Taylor)空腔,导致气液交换非常猛烈,即Helmholtz不稳定性效应异常激烈。因此,从燃烧机理上说,液体发射

^{*} “八五”期间国防预研基金资助(项目编号KY94020)。

陆欣:男,1969年5月生,博士,讲师。

1997-05-04收到原稿,1997-07-23收到修改稿。

药在通常整装式条件下的燃烧是不稳定的。文献 [1] 介绍了一种整装式液体发射药燃烧的控制技术, 主要途径是采用多孔泡沫介质抑制 Taylor 空腔的发展从而控制燃烧的不稳定性, 这样可以使火焰一层一层沿泡沫孔隙发展。我们由此假设液体按类似于平行层的规律燃烧。为了简化推导过程, 使数学模型简单实用, 共提出 4 条假设: (1) 单个颗粒火药的燃烧服从几何燃烧定律和燃速定律; (2) 液体发射药按类似于平行层的规律燃烧; (3) 整个弹后空间的压力分布满足拉格朗日假设 $\partial d/\partial x = 0$ (4) 液体发射药密度服从泰特 (Tait) 方程

2.2 数学模型

在以下的方程中, m 为弹丸质量, p 为膛压, v 为弹丸速度, l 为弹丸行程, u_1 为燃速系数, d 为密度, j 为火药燃烧的体积分数, z 为火药相对厚度, w 为装药量, h 为次要功系数, k 为火药燃气之比热比, $\theta = k - 1$, Δ 为装填密度, T 为火药气体的余容, S 为面积, V 为燃速指数。下标 B 为主装药, L 为液体随行药, 0 为初始值。

(1) 主装药形状函数及燃速方式

$$j_B = \begin{cases} i_{Bz_B} (1 + \lambda_{Bz_B} + \dots + z_B^2) & z_B < 1 \\ i_s \frac{z_B}{z_k} (1 + \lambda_s \frac{z_B}{z_k}) & 1 \leq z_B < z_k \end{cases}$$

$$\frac{dz_B}{dt} = \frac{u_{1B}}{e_{1B}} p^{V_B}$$

(2) 液体随行药燃速方程

$$\frac{dj_L}{dt} = \frac{d_L S_L}{w_L} u_{1L} p^{V_L} \quad t \geq t_0$$

式中: t_0 为液体药点火延迟时间。

(3) 液体药密度表达式^[4]

$$d_L = d_{L0} \left(\frac{Cp + B}{Cp_{L0} + B} \right)^{\frac{1}{c}}$$

(4) 弹丸运动方程

$$h(m - j_{Lw_L}) \frac{dv}{dt} = Sp$$

(5) 内弹道基本方程

$$Sp(l + l_i) = f_{Bw_B} j_B + f_{Lw_L} j_L - \frac{\theta}{2} h(m - j_{Lw_L}) v^2$$

式中: $l_i = \tau_B l_0 [1 - \frac{\Delta}{d_B} - \Delta (T - \frac{1}{d_B}) j_B] + \tau_L l_0 [1 - \frac{\Delta}{d_{L0}} - \Delta (T - \frac{1}{d_{L0}}) j_L]$, τ_B , τ_L 分别为主装药和液体药占总装药的质量分数, 因此有 $\tau_B + \tau_L = 1$ 。

3 实验结果与数值模拟的比较和分析

实验在 30mm 试验炮上进行, 图 1 为实验采用的随行装药结构示意图。两发典型的实测 $p \sim t$ 曲线如图 2 所示, 曲线上均有两个压力峰值, 其中第一个峰值是由火炮主装药固体发射药燃烧形成的最大膛压, 与常规装药的情形相同, 而后面的第二个尖峰是跟随弹丸一起运动的液体发射药燃烧后使弹底的局部压力突然增加引起的, 这样可以保持压力峰值与常规发射时的最大压力基本相同, 而曲线下的面积明显增加了, 从而使初速得以提高, 这正是随行装药技术的发射原理。随行装药的燃烧必须在最大膛压形成之后才能达到随行的效果, 这就要求随行药

延迟点火。我们在点火延迟技术方面进行了广泛深入的研究, 现在已基本能够控制随行药的点火延迟时间。从图 2 中也可以看出, 点火延迟时间分别为 $t_b = 3.6\text{ms}$ 和 $t_b = 5.35\text{ms}$ 但点火延迟的一致性问题的目前还没有完全解决, 还须改进和完善点火延迟结构, 这是我们今后的一个研究方向。

以上节数学物理模型为基础的数值计算结果与 30mm 试验炮上的实验结果比较见图 2, 可以看出计算膛压曲线与实测膛压曲线具有较好的一致性。

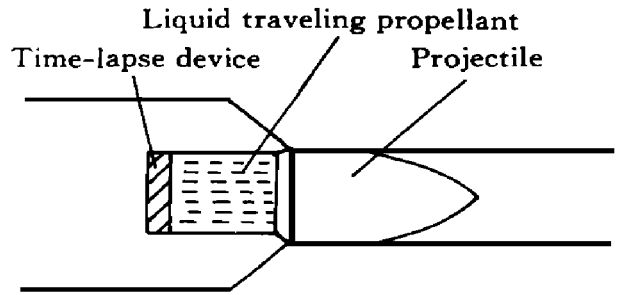


图 1 随行装药结构示意图

Fig. 1 Traveling charge structure scheme

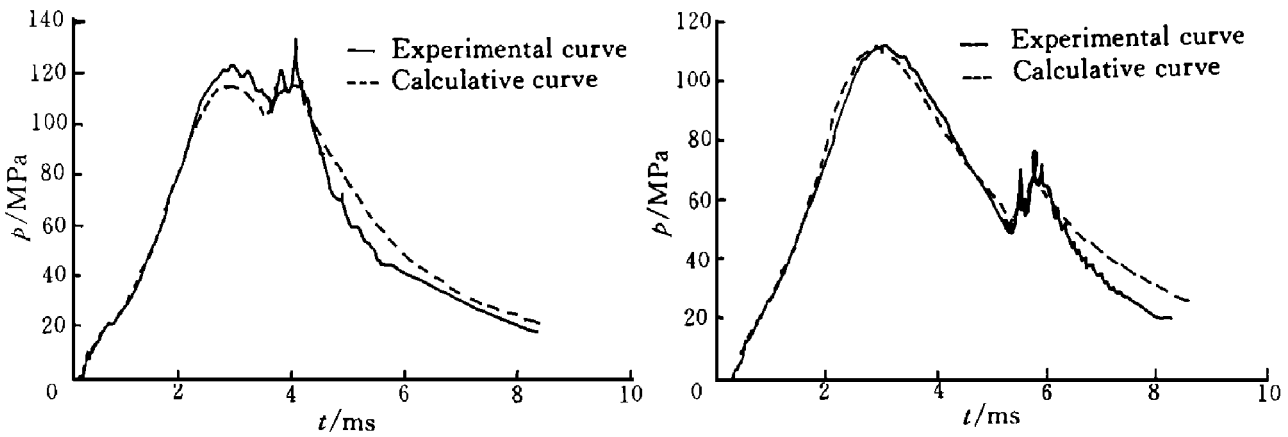


图 2 随行装药的膛压曲线

Fig. 2 Chamber pressure vs time curves of traveling charge

表 1 列出了一些实验结果和计算结果, 可以看出计算结果与实测结果较好符合。随行方案与常规方案相比, 最大膛压基本相同, 初速提高了 8% 左右。这说明, 对于同一弹重, 随行装药方案可以在最大膛压基本保持不变的情况下提高初速, 从而有可能在不改变现有火炮结构的情况下增加弹丸的初速, 这对提高现有火炮的威力是很意义的。另外, 通过实验与计算结果比较, 也表明模型的处理方法是有效的。

表 1 液体随行装药实验与计算结果

Table 1 Experimental and calculative results of liquid traveling charge

方案	w / kg	q / kg	w_L / kg	t_b / ms	p_m / MPa	$v_0 / (\text{m} / \text{s})$
随行	0.07	0.397	0.0144	3.60	132	714
随行	0.07	0.397	0.0144	5.35	113	683
常规	0.07	0.397			111	642
计算	0.07	0.397	0.0144	5.41	111	695
随行	0.09	0.393	0.0144	3.70	156	802
常规	0.09	0.393			152	750
计算	0.09	0.393	0.0144	3.84	152	815
随行	0.12	0.395	0.0144	3.90	260	958
常规	0.12	0.395			250	902
计算	0.12	0.395	0.0144	4.03	240	963

4 数据预测结果

利用编制的计算程序,我们对研究方案进行了预估,表 2 列出在随行药 OTTO-II 为 12ml 不同主装药质量、点火延迟时间下的最大膛压及初速。表 3 列出了主装药 6/7 为 120g, 随行液体药 OTTO-II 的比例不同对火炮膛压和初速的影响。膛压、弹丸行程和弹丸在膛内的速度与时间的关系,见图 3~ 4

表 2 随行装药方案的预测结果 (OTTO-II : 12ml)

Table 2 Predictive results of liquid traveling charge (OTTO-II : 12ml)

序号	w / g	t_b / ms	$u_L / (m / (sPa^n))$	n_L	p_m / MPa	$v_0 / (m / s)$
1	90	2 337	5.5×10^{-6}	0.91	132	798
2	100	2 351	5.5×10^{-6}	0.91	155	845
3	110	2 332	5.5×10^{-6}	0.91	181	892
4	120	2 246	5.5×10^{-6}	0.91	217	945

表 3 随行装药方案的预测结果 (6/7 : 120g)

Table 3 Predictive results of liquid traveling charge (6/7 : 120g)

序号	w_L / ml	t_b / ms	$u_L / (m / (sPa^n))$	n_L	p_m / MPa	$v_0 / (m / s)$
1	12	2 246	5.5×10^{-6}	0.91	217	945
2	15	2 237	5.5×10^{-6}	0.91	218	957
3	20	2 216	5.5×10^{-6}	0.91	221	980
4	25	2 202	5.5×10^{-6}	0.91	223	997

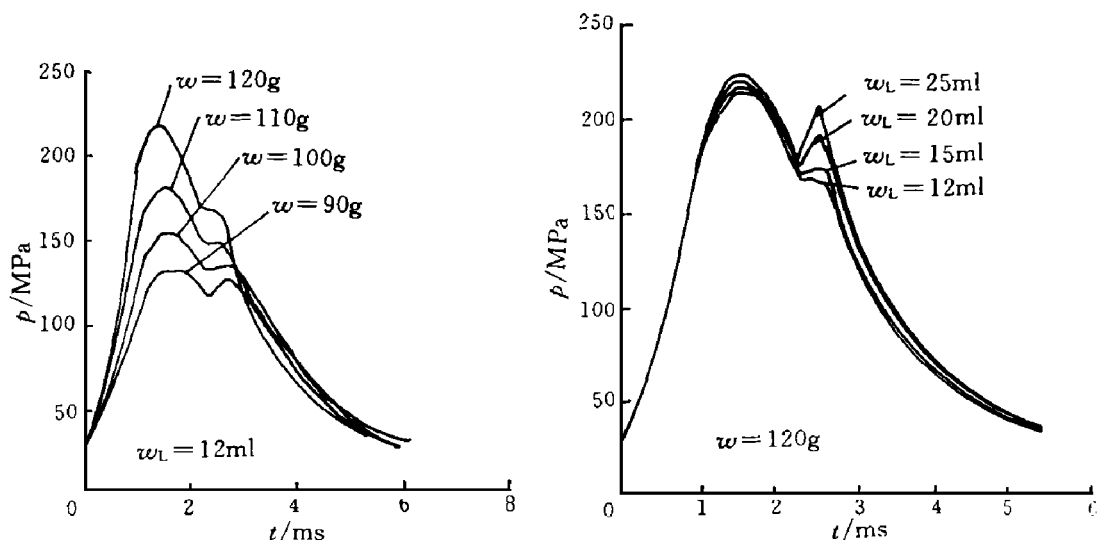


图 3 膛压与时间的关系

Fig. 3 Chamber pressure vs time curves

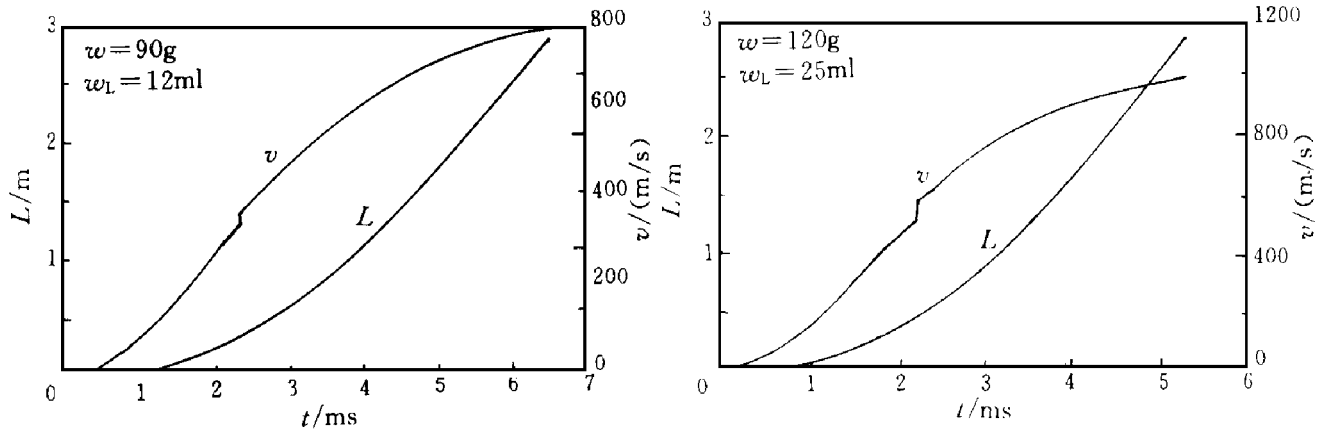


图 4 弹丸行程和弹丸速度

Fig 4 Length and velocity vs time curves

5 结 语

我们在液体随行装药技术研究方面取得了新的实验结果, 讨论了在点火延迟时间控制方面的进展, 建立了整装式液体随行装药内弹道经典模型并编制了计算程序, 计算结果与 30mm 试验炮上的实测结果比较说明, 数值模拟与实验结果具有较好的一致性。

参 考 文 献

- 1 周彦煌, 张兆钧, 官汉章, 等. 一种整装式液体发射药燃烧控制技术. 爆炸与冲击, 1995, 15(3): 275~ 281
- 2 周彦煌, 栗保明, 官汉章, 等. 整装分割式燃烧控制液体装药. 中国专利, 93112284 & 1994
- 3 周彦煌, 余永刚, 陆 欣, 等. 整装式液体随行装药关键技术研究. 兵工学报, 1997, 18(3): 226~ 229
- 4 金志明, 袁亚雄, 宋 明. 现代内弹道学. 北京: 北京理工大学出版社, 1992 237~ 239

THE NUMERICAL SIMULATION OF BULK LIQUID TRAVELING CHARGE COMBUSTION

Lu Xin, Zhou Yanhuang, Yu Yonggang, Guan Hanzhang
(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094)

ABSTRACT This paper reports the firsthand experimental results about bulk liquid traveling charge and observed that the combustion of traveling liquid charge effects on chamber pressure in the condition of various time-lapse ignition. A complete mathematic model of interior ballistics of traveling charge has been developed. The numerical simulation is well matched with the experiment results.

KEY WORDS liquid propellant, traveling charge, interior ballistics