

影响液体发射药压缩点火的因素

贾永杰 赵珍娣 王天佑 彭金凤

(西安近代化学研究所, 西安 710065)

摘要 从试验和理论计算两方面就峰值压力、加压速率和气泡对液体发射药压缩点火的影响及预防压缩点火的技术途径进行了探讨。认为气泡是影响液体发射药压缩点火的主要因素, 预加压是预防液体发射药压缩点火的有效方法。

关键词 压缩点火 液体发射药 再生式液体发射药火炮

1 引言

液体发射药(LP)及再生式液体发射药火炮(RLPG)与传统的固体发射药及火炮相比, 具有容积火药力高、爆温低、烧蚀小、便于后勤处理、装填自动化程度高、通过控制 RLPG 的喷口面积容易产生膛内压力平台和随行装药效应等优点。世界各国都开展了 LP 和 RLPG 的研究, 许多关键技术已获得了重大突破。但是国内外在进行 RLPG 的研究过程中, 先后发生过不同程度的破坏性事故, 事故的原因是多方面的, 其中 LP 的压缩点火是主要原因之一。

所谓 LP 的压缩点火是 LP 在 RLPG 的工作环境中发生的一种意外点火、燃烧现象, 它的起因是在向火炮加注 LP 时带进的空气泡或贮液室内残存的气穴受到活塞迅速压缩时突然形成热点将 LP 点燃, 其后果是贮液室产生异常高压, 致使 RLPG 的机械部件损坏或发生膛炸。

国外同行对此进行了大量研究。国外资料认为^[1,2], 影响 LP 压缩火点的因素有加压速率(dp/dt)、峰值压力(p_m)和气泡大小^[1,2]。国内同行通过大量试验, 也证明了这些观点。那么, 这三者是如何影响 LP 的压缩火点的, 它们之间的关系如何呢? 笔者从试验和理论计算两方面对 LP 的压缩点火进行了初步研究。

2 LP 的压缩点火机理

热点学说认为, 在机械作用下, 机械能会转变成热能, 这些热能聚集在小的局部范围形成热点。热点的形成和发展过程可分为以下几个阶段: (1) 热点的形成; (2) 以热点为中心向周围扩展成长; (3) 热分解; (4) 稳态燃烧。

关于 LP 的压缩点火, 讨论最多、最具有说服力的是气泡热点点火机理。气泡热点是在高的压力和加压速率下, LP 中掺杂的气泡或蒸气受到绝热压缩而形成的。只有当产

生的气泡热点具有足够高的温度、足够大的尺寸和放出足够的能量时,才可能逐渐发展到点燃 LP。峰值压力、加压速率和气泡大小对压缩点火的影响也就是对气泡热点的温度和内能的影响。

3 气泡热点的温度和内能计算

首先对 LP 在火炮中的受压状况作以下基本假定:

(1) 在火炮工作条件下, 升压速率很高, 其压缩过程为绝热过程; (2) LP 为不可压缩液体; (3) 气泡为理想气体; (4) 气泡为球对称。

那么根据内能公式和绝热方程可得气泡热点的内能变化量和温度:

$$\text{气泡内能 } \Delta U = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho c_v T_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right] \quad (1)$$

$$\text{热点温度 } T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \quad (2)$$

式中: p_1 为初始压力, MPa; T_1 为初始温度, K; T_2 为热点温度, K; p_2 为峰值压力, MPa; ρ 为空气密度, g/cm^3 ; c_v 为质量定容热容, $\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})$; R 为气泡半径, cm; γ 为绝热指数。

将 $\rho = 1.205 \times 10^{-3} \text{g}/\text{cm}^3$ (293K), $c_v = 0.838 \text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ (273 ~ 1773K), $\gamma = 1.268$ (273 ~ 1773K)^[3], 代入式(1)得:

$$\Delta U = 4.230 \times 10^3 T_1 R^3 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{0.211} - 1 \right] \quad (3)$$

4 结果与讨论

4.1 气泡是导致 LP 发生压缩点火的根本原因

利用设计的压缩点火试验装置(见图1)进行了含气泡 LP 与不含气泡 LP 的压缩点火试验, 结果表明: 对于不含气泡的 LP, 当加压速率和峰值压力分别增加到 500MPa/ms 和 500MPa 左右时, 试验 38 发, 无一发生压缩点火; 对于含气泡的 LP, 当气泡半径、加压速率和峰值压力分别在 0.8 ~ 4.0mm、150 ~ 450MPa/ms 和 260 ~ 519MPa 之间时, 试验 65 发, 有 17 发发生压缩点火。由此证明气泡的存在是发生压缩点火的根本原因。

4.2 气泡大小和峰值压力对 LP 压缩点火的影响

由内能和热点温度的计算公式可以看出, 气泡半径对内能的影响远大于峰值压力的影响, 而峰值压力又是影响热点温度的唯一因素。气泡热点的内能越大, 温度越高, 传递给周围 LP 的能量越多, 使局部 LP 升温越高, 导致 LP 点燃的危险性也越大。表 1 列出一组含气泡 LP 的压缩实验结果和计算数据, 其初始条件为 $p_1 = 0.1 \text{MPa}$, $T_1 = 293 \text{K}$ 。结果表明, 内能变化较大的三发, 都发生了压缩点火, 而热点温度的变化对压缩点火就没有明显的影响, 我们认为, 这是由于如此高的温度早已达到 LP 的自燃温度, 此时气泡热点能否点燃 LP 决定于气泡热点内能的大小。同时, 表 1 数据还表明气泡半径增大时, 内能显著增加。

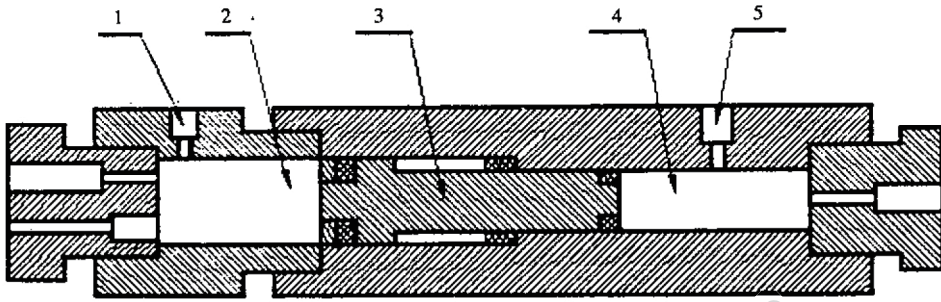


图1 压缩点火试验装置简图

1,5——压力传感器; 2——燃烧室; 3——活塞; 4——压缩室。

Fig. 1 Scheme of compression ignition test device

1,5——Pickup hole, 2——Combustion chamber, 3——Piston, 4——Compression chamber.

表1 典型的计算数据与实验结果

Table 1 The typical calculation data and experimental results

气泡半径 $R/(\text{mm})$	峰值压力 $p_2/(\text{MPa})$	内能变化 $\Delta U \times 10^3/(\text{J})$	热点温度 $T_2/(\text{K})$	实验结果
0.9	458	4	1736	未燃
1.3	477	14	1751	未燃
1.8	407	34	1694	燃
1.8	466	36	1742	燃
2.8	512	137	1777	燃

因此,气泡大小对 LP 压缩点火的影响大于峰值压力的影响,峰值压力变化较大时对气泡热点温度有一定影响。加压速率的大小关系到压缩过程中热损失的大小,火炮工作条件下的加压速率保证了压缩过程为绝热过程。

5 预防 LP 压缩点火的途径

在向火炮注入 LP 时,贮液室中不可避免地要有空气泡或残留的气穴存在,而影响 LP 压缩点火的根本原因是气泡及其大小,因此,必须从消除气泡着手来预防和消除 LP 的压缩点火。

目前,预防 LP 压缩点火的办法除尽可能地减少残留气体外,最有效的要算预加压^[2]。在峰值压力、气泡大小和加压速率等条件相同时,采用预加压至少可起到如下两方面的作用。

(1) 可显著降低气泡热点的温度。

例如:当 $T_1 = 293\text{K}$, $p_1 = 0.1\text{MPa}$, $p_2 = 400\text{MPa}$ 时,取 $\gamma = 1.268(273 \sim 1773\text{K})$ ^[3], 由式(2)计算无预加压时气泡热点的温度 T_2 为 1687K。而采取预加压,当压力由 0.1MPa 缓慢升到 7MPa 时,过程为等温压缩,压力再从 7MPa 升到 400MPa 时,可取 $\gamma = 1.384(273 \sim$

1273K)^[3],计算得: $T_2 = 899\text{K}$ 。由此可见,适当的预加压将明显降低气泡热点的温度。

(2) 降低气泡热点的能量。

经过预加压之后,LP中的气泡会破裂成很多均匀分布的小气泡,由式(1)知,气泡内能的变化与气泡半径的立方成正比,因此它的内能随着半径的减小而迅速下降。另外,当大气泡分散成很多半径很小的气泡时,气泡的比表面增大,从而有利于气泡热点的热散失。当初始气泡的半径变得很小时,压缩产生的热量会更快地传递到周围的整个液体中,因此,造成点火的可能性变小。

6 结 论

在快速加压情况下,气泡是导致LP发生压缩点火的根本原因,气泡大小和峰值压力是影响LP压缩点火的主要因素;在火炮工作条件下,气泡大小对LP压缩点火的影响大于峰值压力的影响。

本文还探讨了预防LP压缩点火的技术途径,认为预加压是预防LP压缩点火的有效方法。

本研究的基本理论是气泡热点点火机理,对于峰值压力、加压速率和气泡大小在其它点火机理(如冲击波、气泡振荡和塌陷等)中的作用还有待进一步探讨。

参 考 文 献

- 1 AD-A 165 969,1986.
- 2 Mandzy J, et al. Progress Report on Compression Ignition Sensitivity of NOS-365 under Rapid Propellant Fill Conditions. 17th JANNAF Combustion Meeting, 1980, 2: 309 ~ 327
- 3 姚允斌等. 物理化学手册. 上海: 科学技术出版社, 1985.

FACTORS EFFECTING ON THE COMPRESSION IGNITION OF LIQUID PROPELLANT

Jia Yongjie Zhao Zhendi Wang Tianyou Peng-Jinfeng

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065)

ABSTRACT The factors which effect on the compression ignition of liquid propellant and the approach for controlling and avoiding the erratic ignition are discussed. Based on the experimental investigation, it is found that the bubbles contained in liquid propellant play a major role in effect on the compressive ignition, and the prepressurization of liquid propellant is an efficient method to reduce the possible compression ignition in regenerative liquid propellant guns.

KEYWORDS compression ignition, liquid propellant, regenerative liquid propellant gun.



作者简介 贾永杰 (Jia Yongjie), 1971 年 7 月生, 1993 年毕业于华北工学院高分子材料专业, 现从事液体发射药配方和性能研究。