

燃速仪压强的自动控制方案

牛嵩高 肖育民 杜幸民

(西北工业大学)

摘要: 本文介绍了一种燃速仪压强的自动控制方案。这种方案结构简单, 工作可靠。经过燃速实验测定, 在 4MPa 压强时, 其压强波动相对误差小于 $\pm 1\%$ 。该方案应用于固体推进剂中止实验时, 没有废气回流污染中止表面, 也不影响降压速率的测量。

主题词: 固体推进剂, 燃烧速度, 测量设备, 气动控制

AN AUTOMATIC CONTROL SCHEME ON PRESSURE IN A COMBUSTION BOMB

Niu Songgao Xiao Yumin Du Xinmin

(Northwestern Polytechnical University)

Abstract: A method about the automatic control of pressure in combustion bomb is presented in this paper. This very simple and reliable equipment consists of six parts: standard voltage, pressure sensor, arithmetic amplifier, power amplifier, relay and electromagnetism valve. The signal from the pressure sensor is compared with the standard voltage and potential difference is amplified by the power amplifier to control the relay thus to control the electromagnetism valve. The relative error of pressure fluctuation under 4MPa is between -1.0% and $+1.0\%$. When this method is used in depressurization extinguishment of solid propellant, there is no waste gas back-flow to pollute the extinguished surface, and no effect on the measurement of depressurization rate.

Keywords: Solid propellant, Combustion rate, Measurement equipment, Pneumatic control

一、前言

推进剂的平均燃速是评价固体推进剂内弹道性能好坏的重要依据。很多研究固体推进剂的厂、所都用测定固体推进剂的平均燃速, 从而求出 r, a, n , 为发动机装药设计提供重要数

据。然而，在燃速测试过程中，要保证燃烧室中压强恒定是不容易的。多年来许多学者在此方面作出了很大的努力，提出了不少方案^[1、2]，并取得较为令人满意的结果。我们另辟新径，设计了一套使用方便的燃速仪压强自动调节装置，经实验证明，结果很满意。

传统的燃速仪压强调节方法主要是恒压箱法^[8]。它是一个容积较大的恒压箱与燃速仪相连接，在实验过程中试件燃烧生成燃气流入恒压箱，从而使燃烧室内的压强基本保持恒定。因此，只要恒压箱的容积足够大，燃烧室中的压强波动也就可以控制在允许的误差范围内。

使用恒压箱，原则上可使压强波动尽可能小，但这要求恒压箱容积足够大。同时，使用恒压箱，还要解决腐蚀和磨损问题，尤其是复合固体推进剂中含有大量的铝粉，燃气中含有大量的腐蚀性气体，使得管路系统和控制阀门需要经常更换。更重要的是，当前固体推进剂燃烧方面的研究，要求对燃烧过程进行中断熄火，以便对燃面进行观察分析，这要求熄火过程中不能污染表面，以保证熄火表面能真实反映燃烧过程中燃面的变化。恒压箱法在中断熄火时产生回流，达不到上述要求。此外，回流还影响降压速率。鉴于上述缺点，我们设计了一套无回流的压强自动调节装置。

二、燃速仪压强的自动调节装置

关于燃速仪压强的自动调节装置，本文首先提出了电接点压强表式控制装置方案。这种装置主要由电接点压强表、电磁阀门两部分组成，特点是原理简单、精度较高、使用方便。整个燃速仪的装置示意图如图 1 所示。

工作原理：将电接点压强表指针调至预定压强，然后给燃烧室充气，当燃烧室中的压强超过预定压强时，压强表接通，电磁阀门打开，停止通气，开始点火。在整个燃烧过程中，每当燃烧室中的压强高于预定压强时，压强表接通，电磁阀门打开；而当燃烧室中压强低于

预定值时，压强表断开，电磁阀门关闭。这样就可以使燃烧室的压强波动保持在一定范围之内。图 2 是典型的压强记录曲线。从曲线可以看出，压强的波动量很小。

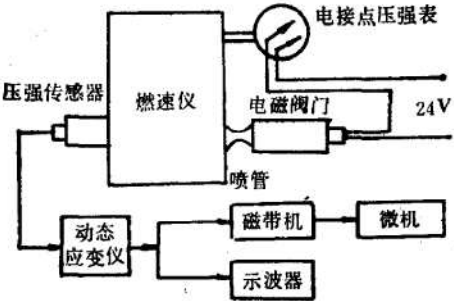


图 1 燃速仪装置示意图

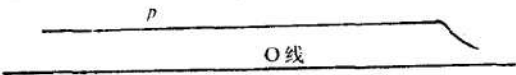


图 2 压强记录曲线

由于电接点压强表是机械式的，因而惯性较大，且受燃气腐蚀后不易清洗，容易损坏。同时，电磁阀门的工作电流较大（2A），电接点压强表的触针烧蚀很快。因此，在上述基础上我们设计了一套电路来代替电接点压强表，图 3 是示意图。这一装置经航空航天部四院四十一所试验，效果很好。

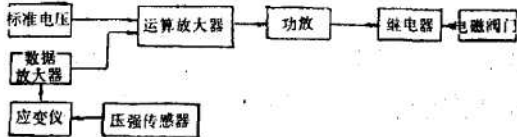


图 3 手控式系统示意图

工作原理：经传感器输出的信号，与稳压电源输出的信号比较后，输入运算放大器进行放大，经过一个三极管（放大）接在继电器的两端，当传感器输出的信号大于比较信号时，运算放大器输出正电压，三极管接通，从而继电器接通，使电磁阀门打开。反之，电磁阀门关闭。整套装置体积小，工作稳定。

三、喷管的确定原则

由于继电器和电磁阀门等的惯性，电磁阀放气一次，可能会使燃烧室中的气体放出太多，从而压强波动太大，因此我们选择一个喷管来节流。这样可以使电磁阀门动作次数不至于太频繁，从而压强波动相对减小。但必须注意，喷管的最大流量还是由电磁阀门的流量来决定的。喷管喉径估算如下：事先按经验估计一个推进剂的燃速，推进剂试件面积为 A ，密度为 ρ ，按稳态燃烧计算：

燃气生成率： $\dot{m}_b = \rho r_0 A$

燃气流出率： $\dot{m}_0 = \Gamma p_c A_1 / \sqrt{RT}$

$$\dot{m}_b = \dot{m}_0 \Rightarrow \rho r_0 A = \Gamma p_c \pi d_1^2 / 4 \sqrt{RT}$$

得： $d_1 = 2 \sqrt{\sqrt{RT} \rho r_0 A / \Gamma p_c \pi}$

这里 T 为燃烧室气体温度，一般在燃烧过程中变化不大，可按经验选择， Γ 为气体的比热比函数。理想状态是测试过程中燃气生成率与流出率完全相等，这样燃烧室压强便可以保持绝对稳定，且电磁阀门动作次数最少。但这是不可能的，因为燃烧过程并非绝对稳态，估计燃速与真实燃速也有差别，同时燃面也有变化，最主要的是有大量水蒸汽存在。当燃烧室中气体含水蒸汽量达到其饱和状态时，会发生凝结现象。最后考虑到工艺问题及燃气中杂质颗粒可能造成的堵塞等，所以一般喷喉的选择都稍偏大。

四、压强波动分析

用上述装置控制燃速仪的压强效果满意。对于电接点压强表式，从压强曲线上我们测得4.0MPa下压强波动（最大压强与最小压强之差）不大于0.2MPa。为了准确计算压强波动，我们用微机对记录在磁带机上的数据进行了处理，发现4.0MPa下最大压强波动为0.075MPa。图4、图5是电接点压强表式、手控式的压强曲线的比较，可以看出前者具有明显的优越性。

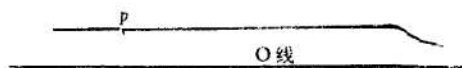


图4 电接点压强表式压强波动曲线

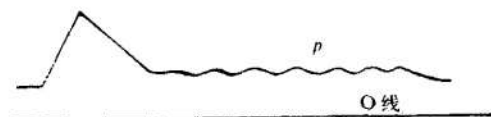


图5 手控式压强波动曲线

经改进后的运算放大器式控制装置，我们只对其压强曲线进行了处理，发现4.0MPa下压强波动为0.04MPa，相对误差小于±1.0%。由于电磁阀门受工作压强的限制，不能在高压下使用。改进后的装置比电接点式恒压性更好，体积也更小，工作寿命更长。

压强波动量的大小与压强的变化率有关,也即与燃速有关。如果认为 dp/dt 是产生压强波动的动力,则波动量与压强变化率成正比,即 $\Delta p = k dp/dt$, k 为常数。

设 t_1 为电磁阀门的响应滞后时间, t_2 为电接点压强表(继电器)的滞后时间, A 为试件面积, r 为燃速, V 为燃烧室自由容积,则:

在 $t_1 + t_2$ 内燃气生成量为: $m = \rho_p A r (t_1 + t_2)$

压强上升为: $\Delta p_1 = mRT/V$

压强下降时,考虑到电接点压强表和继电器的滞后时间可能与上升段不一样,设为 t'_2 , A_1 为喷喉面积,则 $(t_1 + t'_2)$ 内压强下降为:

$\Delta p_2 = (\Gamma p_0 A_1 / \sqrt{RT} - \rho_p A r) \times (t_1 + t'_2) \times RT/V$

总压强波动量为 $\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2$

这里 Γ 是比热比函数, T 为燃烧室气体温度,可取为常数。上面的推导不考虑水蒸汽的凝结。因此,在稳压初始段有效,这也是压强的最大波动量。

五、结论及改进意见

经过近150次试验证明,这个方案是可行的。它精度高、体积小、使用方便,有利于教学和科研。特别是成本低,组装方便,一般实验室都可以在原有基础上借助现有设备进行改装。但也存在一些问题,有待今后进一步完善。

1. 可选用成本较低的电磁阀门,以降低每次实验费用。
2. 由于燃气腐蚀性太大,使电磁阀门寿命缩短。因此,可以考虑在电磁阀门前加过滤装置和中和剂来减小燃气的腐蚀性。
3. 继电器惯性太大,今后如改为可控硅,效果可能更好。

参 考 文 献

- (1) Shan T T and Tao C C. Steady on Combustion Termination of Solid Propellants by Rapid Depressurization, AIAA/SAE, 14th Joint Propulsion Conference
- (2) 陈协坤. 贫氧复合固体推进剂燃速测定的研究.《推进技术》, No.4, 1984
- (3) 殷金其. 负压力指数复合固体推进剂稳态燃烧机理的实验研究. 西北工业大学硕士论文, 1986年