

泵压水下声发射法测定 复合固体推进剂高压燃速*

于恩山 沈鸿宾

(湖北红星化学研究所, 襄樊, 441003)

摘 要: 介绍一种国内最新研制成功的、在高压 ($p \leq 25\text{MPa}$) 条件下测定复合固体推进剂药条燃速的测试技术——泵压水下声发射法。该测试系统采用水泵增压、仪表自动调压、高压电磁阀遥控卸载等多项国内首次应用的先进技术。经过一年多的实际应用证明, 该系统能服务于复合固体推进剂高压 ($p \leq 25\text{MPa}$) 条件下的燃速、燃速压强指数的测定。其变异系数达 0.6%。

主题词: 复合推进剂, 推进剂燃速, 高压试验, 水声测量

分类号: V435.12, V512.3

PUMP-IMPRESSED UNDERWATER ACOUSTIC EMISSION SYSTEM FOR MEASUREMENTS OF HIGH PRESSURE BURNING RATE OF COMPOSITE SOLID PROPELLANTS

Yu Enshan Shen Hongbing

(Hubei Red-Star Chemical Institute, Xiangfan, 441003)

Abstract: The paper describes a newly developed system (the pump-impressed underwater acoustic emission system) to measure burning rate of composite solid propellant strands under high pressure ($p \leq 25\text{MPa}$). The system involves a pump impressing water, instruments adjusting pressure automatically and electromagnetic valves remotely handling high pressure. This advanced technique was combined into appliance for the first time in China. Experimental work of a period of more than a year indicated that the system could serve for measurements of burning rate and pressure exponent of composite solid propellants under high pressure ($p \leq 25\text{MPa}$). The coefficient of deviation was nearly 0.6%, achieving the level of the same mea-

* 本文 1993 年 3 月 15 日收到

surement system in the United States.

Keywords: Composite propellant, Propellant burning rate, High pressure test, Underwater acoustic measurement

1 前言

在固体火箭推进剂的研制中,燃速测试十分重要。目前我国采用的推进剂药条燃速测试方法主要是氮气声发射法和水下声发射法两种,其中又以后者最常见。

近年来,为适应战术固体导弹、双推力固体发动机和固体助推器等动力装置所用固体推进剂的研制需要,急需研究高精度高压测试方法并建立一套测试系统。我们在水下声发射法的基本原理基础上,经过近三年的摸索过程,研制成功了国内第一套新型高压燃速测试系统——水泵增压高压水下声发射燃速测试系统。

经一年多的实际应用证明,本系统在工作压强 $p \leq 25\text{MPa}$ (实际可达 32MPa) 范围内工作稳定,测试精度达 0.6% 。

2 系统原理及组成

2.1 测试原理

本系统采用的是声发射原理:它是基于氧化剂在燃烧过程中产生声信号,利用固定在燃烧室外壁上的声发射探头接收到微弱的声信号,并将声信号变为电信号,经放大后由声发射记录仪接收。这样可以测出定长 L (mm) 的推进剂药条燃烧完所需的时间 t (s),从而计算出该药条的燃速 $r = L/t$ 。

根据药条燃烧时所处的介质不同,声发射法可以分为氮气声发射和水下声发射两种。而且,通过对介质施压,可以测出推进剂药条在不同压强下的燃速,从而求得燃速压强指数。

2.2 系统组成

本系统由高压燃烧室、声信号接收仪、压强调节控制部分、恒温水槽、点火电源和辅助设备六部分组成。整个系统组成如图1所示。

2.3 压强调节控制部分

这是整个系统的关键部分,直接关系到系统的测试精度和使用性能。它由增压装置、稳压装置、压强控制及示值仪表、遥控阀门等单元组成。

2.3.1 增压装置

本系统主要由高压水泵(2PSJ-0.016/600型)向燃烧室内提供以水为介质的试验压强。辅助的增压装置是充氮小车(OPZ-420 Y₁型),它可以将普通钢瓶中的氮气增压至 42MPa 以下。

2.3.2 稳压装置

为了减轻药条燃烧对燃烧室压强产生的波动影响,我们设计了一种囊式蓄能器与燃烧室串联接通。由于囊式蓄能器内衬有柔性很强的皮囊,皮囊内充有相应试验压强的易压缩气体,因而对燃烧室的压强波动响应敏感。当燃烧室内压强增加时,皮囊体积缩小,相当于燃烧室的容积扩大,从而缓解了燃烧室内压强的急速变化,起到了稳压作用,在以水为试验介质的情况下,这种稳压器可以起到良好作用。囊式蓄能器的稳压原理见图2。

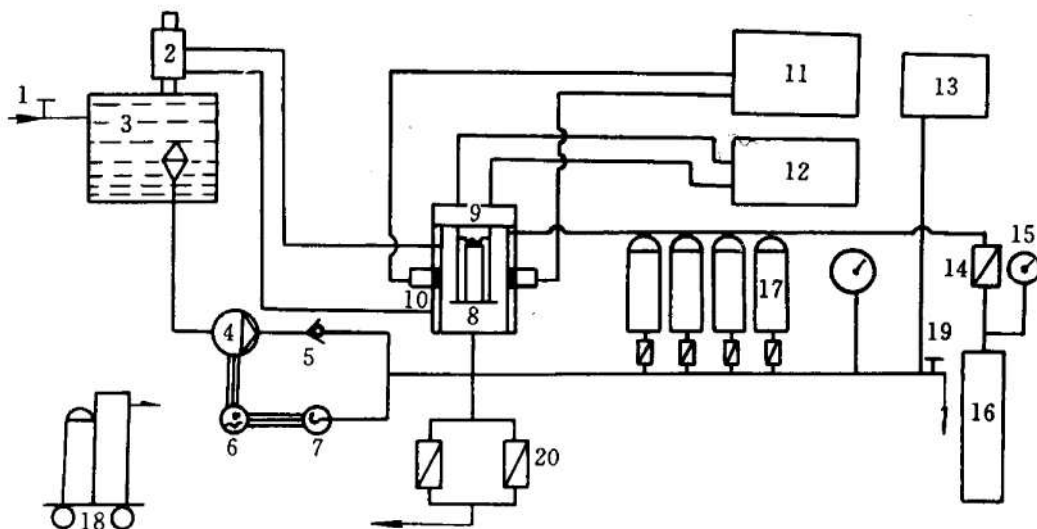


图1 高压燃速测试系统示意图

1. 上水阀 2. 循环水泵 3. 恒温水浴 4. 高压水泵 5. 单向阀 6. 水泵电机 7. 电接点压力表 8. 试验药条 9. 燃烧室上盖 10. 声能转换器 11. 信号检测声发射仪 12. 点火电源 13. 数字式压力表 14. 电磁阀 15. 精密压力表 16. 氮气瓶 17. 蓄能器 18. 充氮小车 19. 放空手阀 20. 电磁阀

2.3.3 压强控制及示值仪表

在系统中,电接点压力表与继电器及交流接触器配套使用,实现向燃烧室内自动充压的目的,消除了因人工调压带来的试验压强误差,既提高了准确性和重复性,也提高了工作效率。图3所示为电控线路图,工作过程如下: p_2 为设定压强, p_1 为控制压强下限,当指示指针达到 p_2 点时,电机停止工作,充压停止;当指示指针降至 p_1 点时,电机启动,充压继续。

试验压强值可同时从精密压力表(0.4级)和数字测力仪(系统误差不高于0.3%)上读出。

2.3.4 遥控阀门

本系统在燃烧室、高压管道、高压稳压器之间的充压、调压和卸荷过程中,由于采用自行研制的高压电磁阀(CGY-A型)来控制,因而全部实行隔离操作。高压电磁阀依据电磁转换和能量转换的原理而设计,其示意图见图4。

3 系统参数及操作过程

3.1 系统参数

温度范围: $0 \sim 50^\circ\text{C}$; 压强范围: $3 \sim 25\text{MPa}$; 压强波动: $< 0.5\%$ 。

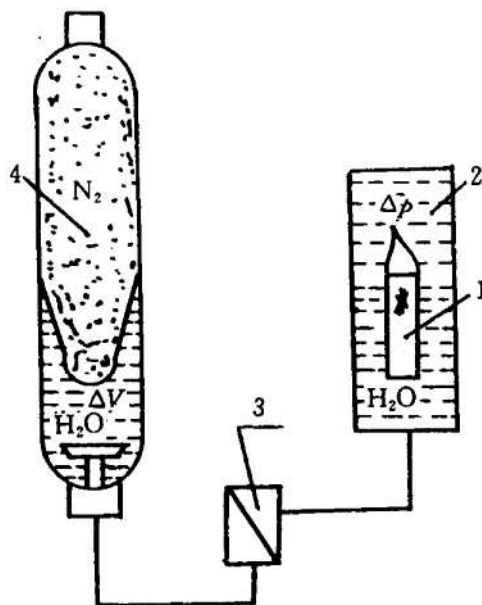


图2 燃烧室稳压原理示意图

1. 试验药条 2. 高压燃烧室
3. 电磁阀 4. 蓄能器
 Δp : 药条燃烧产生的压强;
 ΔV : 蓄能器皮囊收缩变形量

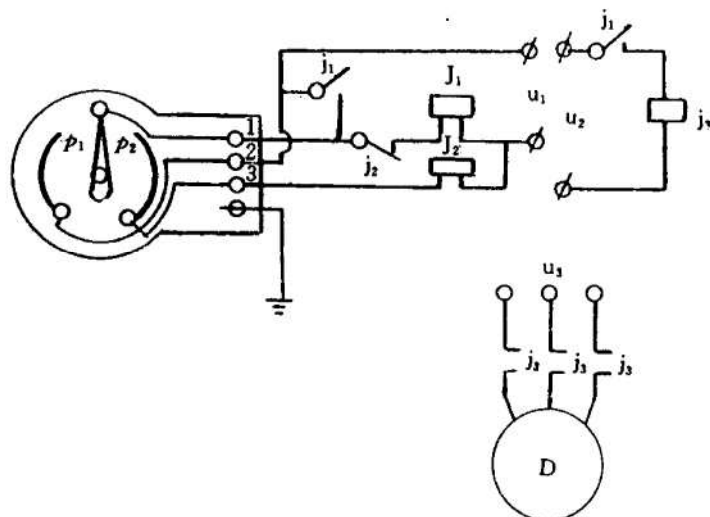


图3 电接点压力表电控线路图

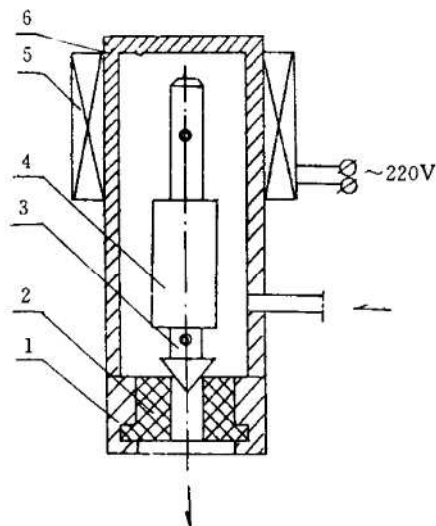


图4 高压电磁阀工作原理示意图

1. 阀芯座 2. 阀芯 3. 阀杆

4. 滑动铁芯 5. 线圈 6. 阀体套筒

3.2 操作过程

- (1) 预先开启电源，声发射仪及数字压力表预热 15min 以上。
- (2) 在燃烧室装好药条及点火丝，接通点火电源线。
- (3) 关闭排水阀，开启稳压阀门。启动水泵，向燃烧室充压至试验压强值。
- (4) 声发射仪清零。点火。记录燃烧时间。
- (5) 开启卸荷阀门，排净污水和废气。
- (6) 当试验压强改动时，须事先调整好电接点压力表，并用充氮小车将蓄能器皮囊内气体压强变至新的试验压强。

4 系统精度分析

4.1 理论系统误差

从燃速测试原理和燃烧理论分别得到：

$$\bar{r} = L/t \quad (1)$$

$$\bar{r} = r_0 p^n e^{\alpha(T-T_0)} \quad (2)$$

式中： $\bar{r}$ ——燃速，mm/s；

L ——药条有效长度，mm；

t ——药条全部燃尽所需时间，s；

r_0 ——燃速系数，mm/s；

T_0 ——标准状态下初始温度，℃；

p ——燃烧室压强，MPa；

T ——初始温度，℃；

α ——燃速温度敏感系数，%/℃；

n ——燃速压强指数。

根据误差传递原理，可以从式 (1) (2) 导出燃速的标准偏差 σ_r ，则系统相对误差为

$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{\sigma_r}{r} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2 + (\alpha \cdot \Delta T)^2 + \left(n \frac{\Delta p}{p}\right)^2} \quad (3)$$

在本系统中, 式 (3) 各项取值如下: $\Delta L/L \leq 0.0025$, $\Delta t/t \leq 0.00103$, $\alpha \cdot \Delta t \leq 0.0025$, $n \frac{\Delta p}{p} \leq 0.0094$ 。因此, 系统相对误差计算为:

$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{\sigma_r}{r} \leq 1.0\%$$

4.2 实测精度

在本系统上, 采用 HTPB/AP/Al 复合固体推进剂的试验配方, 取 1.2kg 固化方坯制样, 进行药条燃速实测试验。试验压强为 25MPa, 试验温度为 20℃, 环境温度为 14℃, 试验样本容量为 80。试验结果表明, 本高压燃速测试系统实测精度为 0.6%。此精度与美国普林斯顿大学建立的同种测试系统的精度相当。实测数据详见表 1。

我们还在不同时间内测量同批药条的燃速, 以检验本系统的时间重现性。采用“RS-I 号”固体地空火箭发动机预装药配方 (742-20-24), 时间区间 5 个月。所有数据表明, 系统工作性能稳定, 时间重现性良好。

4.3 与靶线法测试结果的比较

表 1 实测系统精度原始数据

压 强 MPa	25	试样尺寸 mm	4×4×80	温 度 ℃	20	日 期	1991 年 4 月 16 日
燃 速 mm/s							
16.69	16.60	16.40	16.64	16.77			
16.63	16.85	16.74	16.67	16.82			
16.86	16.70	16.82	16.74	16.78			
16.88	16.59	16.79	16.81	16.79			
16.87	16.61	16.75	16.77	16.75			
16.60	16.77	16.74	16.82	16.76			
16.87	16.83	16.70	16.78	16.68			
16.64	16.65	16.82	16.87	16.64			
16.78	16.75	16.81	16.63	16.82			
16.80	16.68	16.75	16.83	16.63			
16.79	16.61	16.79	16.76	16.75			
16.77	16.62	16.80	16.62	16.74			
16.66	16.50	16.82	16.65	16.77			
16.62	16.50	16.79	16.75	16.76			
16.65	16.49	16.81	16.74	16.80			
	16.45	16.77	16.81	16.78			
		16.76		16.75			
子样容量	80	均 值 mm/s	16.73	标准偏差	0.09815	变异系数 C _w	0.6%

本系统与机械电子工业部西安近代化学研究所的空压机靶线法作了比较试验。采用复合固体推进剂(BG91-001)同一块方坯进行取样,分别于1991年7月8日和15日进行了实测,测试结果列于表2。

表2 同类方法实测数据表

压强 MPa 数 值		10	12	15	18	20
靶 线 法	燃	16.64	18.38	20.08	21.05	22.47
	速	16.37	18.35	19.49	21.19	22.88
	mm/s	16.75	18.33	19.57	21.41	22.68
	均值 mm/s	16.59	18.35	19.71	22.22	22.68
	变异系数%	1.2	0.2	1.6	0.9	0.9
	压强指数	0.43±0.04				
水 下 声 发 射 法	相关系数	0.99182				
	燃	16.33	17.85	19.53	20.88	21.98
		16.31	17.94	19.40	20.94	22.07
	速	16.28	17.82	19.15	20.94	22.24
		16.19	18.07	19.25	20.81	21.82
	mm/s	16.35	18.05	19.29	20.69	22.10
		16.29	17.91	19.22	20.91	22.23
	均值 mm/s	16.29	17.94	19.31	20.86	22.07
	变异系数%	0.4	0.6	0.8	0.5	0.8
	压强指数	0.42±0.02				
	相关系数	0.99584				

注:①试样尺寸:4mm×4mm×80mm。

②试验温度:20±1℃。

③试验日期:靶线法91年7月8日,水下法91年7月15日

由表中数据的对比分析可看出:本方法测试系统精密度较高,而且两种方法在相同条件下对同种试样的压强指数的测定结果符合甚好。

本系统测定的燃速值略低于靶线法的测定值,主要因为靶线法试验介质为氮气,水下声发射法试验介质为水,水介质在试验过程中不但起到保证平行层燃烧而且起到冷却作用。所以,水下声发射法测定的燃速值一般要较靶线法略低。

5 结 论

利用高压水泵($p_{\max}=60\text{MPa}$)提供25MPa以下高压燃速测试所需压强是现实可行的。水泵增压的高压水下声发射法与用氮气增压的其他方法相比,投资较少而同样有较高的测试精度。

利用电接点压力表代替手工调压,具有方便准确的优点。囊式蓄能器具有吸收燃烧室压