

文章编号: 1006-9941(2011)01-0106-07

# 复合固体推进剂高效燃速仪技术构想

江英武

(湖北省襄樊市 156 信箱, 湖北 襄樊 441003)

**摘要:** 将适当简化的药浆涂在不燃带基上, 快速固化后形成复合固体推进剂薄层<sup>[1]</sup>。在此基础上, 本文提出推进剂高效燃速仪的技术构想。该仪器由燃烧室、压强和温度控制系统、数据采集和处理系统等组成。燃烧室容纳 1650 mm 长的燃烧试件, 试件上覆盖 1051 根相隔 1.50 mm 的熔丝。燃烧室压强控制有三种模式: 手工的、台阶式的和线性的。利用手工控压模式可大幅度提高现有燃速测定效率, 一次点火能测出燃速的压强指数或温度敏感系数。台阶式控压和线性控压模式相结合, 便可能测出燃速的压强函数。

**关键词:** 物理化学; 仪器; 推进剂; 燃速; 函数

**中图分类号:** TJ55; O64

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.01.025

## 1 引言

目前, 推进剂燃速测定是按原航天部制定的 QJ912-85 标准, 采用传统的药条法, 根据标准的规定, 测定一个压强指数, 需点火几十次。了解某个初样配方的燃烧性能, 必须点火百千次, 乃至更多。即使如此, 测出来的变化规律往往还不能满足要求, 又得调整配方。另外, 还存在药条中催化剂均匀性, 制药工艺等方面的问题。传统的药条法燃速测定存在着测试效率低, 周期长, 求取合理的燃速压强函数较困难等问题<sup>[2-4]</sup>。因此, 对燃速测试仪器进行改进或研制新的仪器十分迫切。

早期, 很多研究推进剂的单位一般都自行设计制造测定燃速的设备, 因而市场上很少有商品化仪器出售。我国哈尔滨船舶工程学院做得比较好, 但因问题较多, 所研制仪器未被有关部门采用。几十年来, 有关单位对燃速仪的改进主要集中在传感器方面, 从靶线、光纤到声发射……但所有这些仪器, 测定用的试样还是药条, 多次点火才能测定一个压强下的燃速, 点几十次火才能测定一个压强指数。20 世纪 80~90 年代, 美国、法国、日本、荷兰等用超声波测定药条瞬时燃速。其基本原理是, 在药条下方安装超声波脉冲发射-接收器, 从多种反射波中选择燃面回波。通过测定脉冲往

返时间得到瞬时燃速。这是目前被认为最有希望测定出燃速压强关系函数的新方法。但是, 该技术主要用在发动机上, 用在燃速仪上较困难, 因其设备太复杂, 与压力舱的恶劣环境很不相容, 安装试样很麻烦, 如果单纯为测定燃速和压强指数而使用它, 意义不大。国外曾测定出燃速的压强响应函数, 但试用结果不确定度太高<sup>[5]</sup>。到了 21 世纪, 在燃速仪的研制方面, 传感器, 数据处理, 数据保存又有了进步。2008 年我国首次报导超声波测定推进剂燃速<sup>[2]</sup>, 图像清晰, 但燃速曲线不太稳定, 有效燃烧时间约 2 s, 试样有效燃长只有 10 mm(延长有难度)。2009 年, 无锡普泰科技有限公司生产了多功能燃速测试系统, 把现有测试设备改造得更加合理, 但基础技术未见重大突破。总之, 在测定推进剂燃速的仪器研制方面, 国外的水平与我国大体相当, 但在多仪器联合使用, 开展更深入的燃烧机理研究方面, 有些国家比我国先进。十多年前, 针对推进剂燃速测定的上述问题, 文献[1]作者开展了推进剂的薄层法燃速测定研究, 并取得了阶段性成果。近年来, 笔者在此基础上更加深化了这样的理念, 提出了对发动机以外推进剂燃烧性能参数测定较全面的燃速测定仪器技术构想。

## 2 高效燃速仪的构成

本构想设计的仪器由薄层样品燃烧室, 温度、压力控制系统和数据采集处理系统构成。整个仪器模块化计算机管理。主要构件见图 1~图 3。

收稿日期: 2009-10-07; 修回日期: 2010-08-14

作者简介: 江英武(1938-), 男, 高工, 从事推进剂热分析, 90 年代开创推进剂薄层燃烧研究。e-mail: jyw1938@sina.com

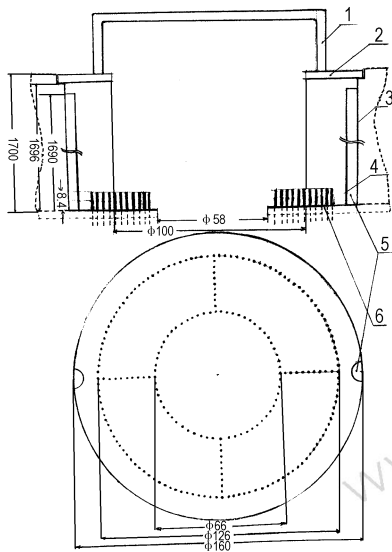


图 1 压力舱内部和试样支架顶部示意图

1—试样支架把手, 2—试样支架顶盖, 3—压力舱, 4—导轨, 5—下接线柱, 6—压力舱内底面

Fig. 1 Demonstration picture both inner combustion chamber and top of sample holder

1—handle of holder, 2—top of holder, 3—pressure chamber, 4—conducting track, 5—nether wiring terminal, 6—inner bottom of pressure chamber

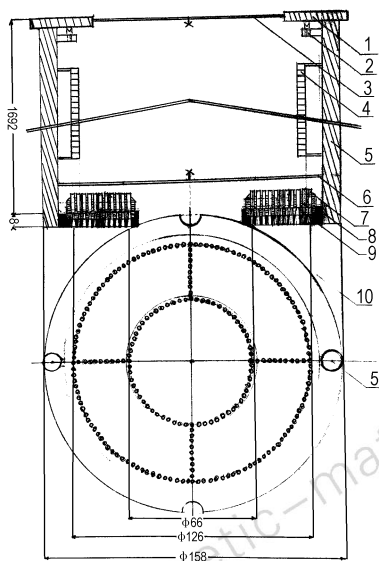


图 2 试样支架示意图

1—顶盖, 2—点火接线螺栓, 3—上挂样横梁, 4—插座, 5— $\phi 10$  mm 连杆, 6—下挂样横梁, 7—上接线柱, 8—增强玻璃钢型插座, 9—导电橡胶, 10—试样支架底座

Fig. 2 Demonstration picture of sample holder

1—top, 2—igniting screw plug, 3—upper beam, 4—socket, 5— $\phi 10$  mm connecting rod, 6—nether beam, 7—upper wiring terminal, 8—great GFRP socket, 9—conductive rubber, 10—bottom of holder

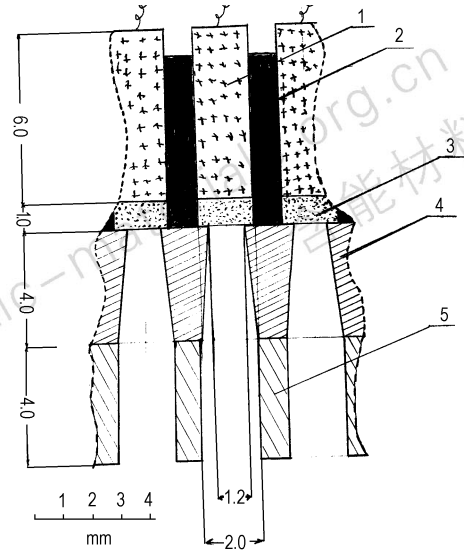


图 3 试样支架底部的一个信号连接装置单元

1—上接线柱, 2—玻璃钢插头, 3—导电橡胶, 4—聚四氟乙烯, 5—试样支架底座

Fig. 3 A unit of signal connection device of sample holder bottom

1—upper wiring terminal, 2—GFRP socket, 3—conductive rubber, 4—polytef, 5—sample holder bottom

### 2.1 薄层样品燃烧室

燃烧室(也称压力舱),内径 160 mm,容纳试样长度 1650 mm,使用初温  $-40 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ ,有效使用压强范围  $3 \sim 40 \text{ MPa}$ ,压强程序可控,控压速率  $0.02 \sim 0.50 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。燃烧室底部伸出 1056 个接线点,1052 个接点用于传递熔丝信号,4 个接点专用于传递舱内两个温度信号。压力舱外侧壁安装两对热电偶,测定与舱内两电偶同高度点的温度。

压力舱熔丝板,也就是双面印刷电路板,印刷导线宽度  $0.05 \text{ mm}$ ,称为熔丝,材料为锡(97%)银(3%)合金。严格控制相隔  $1.50 \text{ mm}$ 。这样的熔丝并排 1051 根。

试样支架,有顶盖和底板,用两根与它们绝缘的  $\phi 10 \text{ mm}$  的连杆连接,从连杆和顶盖分别伸出挂样夹和夹线槽,夹线槽各有 528 个单元,每个夹线单元高  $3 \text{ mm}$ ,双面接线,右侧 1051 根熔丝讯号线全部连成一线,连同 2 根热电偶线,右侧有 3 根导线引入底座;左侧 1051 根熔丝讯号线都分别引到底座,再加 2 根热电偶线,左侧共有 1053 根导线引入底座。

正对着连杆下方的压力舱底部,另有两个接点通到舱外,经柔软弹簧与穿舱金属杠连接,提供点火电源。燃烧室内全部表面,必须作高防腐处理,燃烧室侧

壁和底座用法兰盘链接,便于修理。

## 2.2 温度压力控制系统

### 2.2.1 温度控制

设计两种左右分两半的控温夹套(图4)。A,恒温夹套,单层,长170 cm,上下都比试样长5 cm。B,温差夹套,双层,均高1.6 m,里夹套低于试样5 cm,外夹套高于试样5 cm,总长也是长170 cm,如图4所示。内外夹套之间设隔热层,目的在于控制内外夹套的热交换,可考虑采用聚四氟乙烯,其厚度要按燃烧室器壁材料的导热系数和厚度来设计。控制燃烧室温度稳定的关键是,提供足够流量且温度稳定的介质,采用带搅拌器的恒沸点缸,输送泵工作稳定且有一定可调范围,一般可以满足要求。高效燃速仪里试样很长,恒温控制还包含控制不同高度下试样温度的差别。

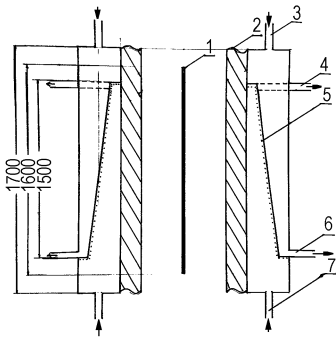


图4 双层夹套示意图

1—试样, 2—燃烧室侧壁, 3—热介质入口, 4—冷介质出口, 5—隔热层, 6—热介质出口, 7—冷介质入口

Fig. 4 Demonstration diagram of double layer jacket

1—sample, 2—side wall of combustion chamber, 3—hot medium inlet, 4—cold medium outlet, 5—thermal insulation layer, 6—hot medium outlet, 7—cold medium inlet

#### A. 恒温控制

这种控制主要用于测定各种静压下的推进剂燃速。以控制试样初温 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近为例,此时应使用恒温夹套,由下而上快速通入同温度的水,夹套外面加隔热效果优良的保温套,一段时间以后,只要试样两端温度稳定且差别不超过 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,就认为控温合格。取两端温度的平均值作为试样燃烧初温,其误差不会超过 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,燃速误差一般不会超过 $0.5\%$ 。

#### B. 小范围温差的温度控制

这种控制主要用于大型发动机的推进剂燃速温度敏感系数的测定。温差小但精度要求高,一般不必考虑低温下的测定。以 $15\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温控为例,使用双层夹套,内夹层由下而上通入约 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水,外夹层自

上而下通入约 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水。经过一段时间调试,温度会稳定落在合适的范围之内。

#### C. 大范围温差的温度控制

这种控制主要用于较小发动机的推进剂燃速温度敏感系数测定。

### 2.2.2 压强控制

高效燃速仪有动态压强和静态压强两种控制模式,三种控压方法。静态压强下用于测燃速,动态压强下用于测燃长。两者都可单独测试,也可联合使用,获得更加令人满意的使用效果。三种控压方法是:

#### A. 手工控压

手工控压用于一次点火完成压强指数测定。为减少变压时缓冲瓶气体倒灌,采用双缓冲瓶法。让两个气瓶都连接到三通管与燃烧室相通,各自又都有阀门通大气。测定是从高压向低压过度的。首先,将第一瓶氮气的初始压强调到测定的第一目标压强,第二瓶氮气调到测定的第二目标压强。不言而喻,用第一瓶氮气作为第一工作压强,此时,第二瓶氮气的阀门是关闭的。点火开始后,实验者从显示屏可以观察到需要转入第二工作压强时,同步关闭第一瓶气阀,开启第二瓶阀门。紧跟着,将第一瓶氮气快速卸压到第三目标压强。依此类推,直到试样烧完为止,测定工作结束。

#### B. 台阶式控压

这种较小区间内密集压强下的燃速测定,也是恒压下的测定。用于一次点火测定一定区间内静态燃速与压强的关系。需要加工一种能够快速放气的阀门,实际上,就是控制一些能来回活动的有洞滑板。

台阶式控压,也可以用手工,也可以自动。前者是实验者根据燃烧情况,临时一次次开动阀门;后者,必须根据计算机的提示,预先输入要改变压强的熔丝号码,系统便会执行操作命令。

每次变压所需时间明显影响每次点火能测定的压强数目,中等燃速推进剂,燃烧时间约 $100\text{ s}$ 。用叠进计算法每 $75\text{ mm}$ 测定一个压强下的一个燃速,平均约需 $4.7\text{ s}$ ,但后面接续测定每个燃速,就只需这段时间的几十分之一。台阶式控压效果可参考表1。

表1 燃长 $75\text{ mm}$ 的台阶式控压效果

每次变压所需时间/s	测定压强数	每压强下测定燃速数
1	15	7
2	13	6
3	11	9
4	10	7

### C. 线性控压

此处只讨论燃烧和变压的关系。测定结果紧密关联,但运行是各自独立的,必须注意适当匹配,减少以下情况发生:试样已经烧完而压强没有达到预定值;或者压强早已达到预定值而试样还在空烧。一般来说,只要估算出试样的平均燃速,确定了变压范围,便可算出合适的变压速率,让变压和燃烧所需全程时间大体相同。线性控压的意义是,一次点火,测出全压强段相关燃烧数据。在低变压速率下,视为稳态燃烧数据,独立或与稳压燃烧数据配合,算出燃速的压强关系函数;在高变压速率下,测定燃速的压强响应函数。

### 2.3 数据采集和处理/显示系统

高效燃速仪中熔丝间的距离和熔丝号码提早存入硬盘,不必测量试样长度,也不跟踪燃面移动。静压燃速是通过测定熔丝间的燃烧时间予以确定的,动态压强下只采集对应每根熔丝的熔断压强和对应时间。

#### 2.3.1 压强和温度测量

压强测定采用数字式测压计。静态压强不必控制得十分精确,但要求测定准确;动态压强要求控制精确,以计算值为准,此时测压计起监测作用。

由于动态压强测定时,线性变压,所以,  $p = p_0 + \beta t$ ,  $dp = \beta dt$  此处,  $p_0$  为初始压强,  $\beta$  为升压速率,  $t$  为有效燃烧时间。时间-压强有等效性,公式推导时自变量  $t-p$  可以自由变换。每次点火前,都预先恒温到里外温度平衡。另外,由于燃烧时火焰喷射方向与火焰移动方向相反,火焰向下运动,热气流向上运动,所以,一般认为,火焰对推进剂初温没有影响。燃烧室顶部和下方的内、外安装热电偶,总共有 4 对热电偶探测燃烧室的温度,包括温度标定时热电偶信号,都经电平-模数转换器扫描后不断在计算机上显示。

对于恒温控制,取两端温度的平均值作为燃烧初温。非恒温控制的温度测定,采用预先标定法。用一排测温电偶代替试样,由 101 对直径 0.1 mm 的 Pt~PtRh(10%) 组成,每对间隔 16 mm,总长 1600 mm。将这排热电偶挂在试样支架上,进入燃烧室后,高度、位置与试样相同,在常用的温差和压强下标定。

#### 2.3.2 测定推进剂燃速的温度敏感系数

推进剂温度敏感系数的定义是,  $\sigma_r = \left(\frac{\partial \ln r}{\partial T}\right)_p$  [6]。因此,在恒压情况下,  $\sigma_r = d \ln r / dT$ 。先求出过渡性敏感系数,  $\sigma = \Delta \ln r / \Delta T$ 。其方法是,把试样划分成 21 等份,并算出每段的平均初温  $T^*$ 。相邻两对相减,可以算出 20 个  $\sigma$ 。把计算的间隔缩小,  $\sigma$  不断逼近  $\sigma_r$ ,达

到预定精度时,画出  $\sigma_r-T$  曲线。高效燃速仪该项测定有较大调节余地,留有大幅提高该项测定精度的空间,一次点火测定  $\sigma_r-T$  曲线是可能的。

#### 2.3.3 数据处理和显示

实验时熔丝板提供大量准确的燃长距离;每根熔丝的断开都读取瞬时燃烧时间和瞬时压强;第 1 根熔丝烧断是计时和有效燃烧长度的原点。最后 1 根是结束实验和卸压讯号;熔丝还是台阶式控压的控制元件。安装试样支架后,计算机立刻显示 1051 个绿色光斑,熔丝烧断时光斑依次变红,便于观察试验状态。实验后,自动显示如下各种曲线:各静压下的燃长-时间曲线;动压下的燃长-压强曲线;变温下测定的燃长-温度曲线等。按需要处理出:不同静压下的燃速,各阶段压强指数;动压强测定情况下宽义和常义压强指数;温度敏感系数  $\sigma_r-T$  曲线;燃速压强关系函数等。

#### 2.3.4 用瞬时燃长求燃速的压强函数

在以  $\beta$  的速率变压时,维耶里经验式的燃长-时间的关系式是:

$$L = \frac{b}{\beta(n+1)} [(p_0 + \beta t)^{n+1} - p_0^{n+1}] \quad (1)$$

只要  $L-p$  关系符合式(1),燃速函数  $R(p)$  就符合维耶里式。当  $n=1$  时,  $L = p_0 b t + b \beta t^2 / 2$ 。燃面移动是以  $p_0 b$  为初速度,以  $b \beta$  为加速度的匀加速运动;当  $n=0$  时,则  $L = b t$ ,燃面作匀速运动;当  $0 < n < 1$  时,用计算机拟合的方法,求出  $L$  和  $p$  之间的函数关系。如果设定萨马菲尔德公式  $p/r = a + b p^{2/3}$  中,  $x = p^{2/3}$ ,那么,该式也有同样效果

$$L = \frac{3}{2\beta b} [0.5(a + bx)^2 - 2a(a + bx) + a^2 \ln(a + bx)] + C$$

如果  $x_0 = 0$ , 则

$$L = \frac{3}{2\beta b^3} [0.5 b^2 x^2 - abx + a^2 \ln(a + bx) - a^2 \ln a] \quad (2)$$

式(1)和式(2)积分式和微分式的函数有所不同,但燃长求导后,仍然变成燃速公式。只要满足相关测定的前提要求,从计算数学角度看,测定瞬时燃速和瞬时燃长,效果是一样的。

## 3 仪器研制方案的实验依据

### 3.1 薄层燃速数据的重复性优于药条

按文献[1],以 AP/HTPB/Al 推进剂为基础,分别在药条和薄层里加入各种催化剂,最后都用现有燃速仪和 QJ912-85 标准测定,结果显示,薄层燃速数据的重复性优于药条。

### 3.2 推进剂燃烧试样的制样工艺大幅度改进

药条中催化剂的均匀性不如薄层,是现有制药工艺的限制造成的。药条制备时组份的均匀性是靠胶化机完成的。胶化机容积越小搅拌效率越差,制备每批药条的投料量一般是1 kg,采用容积1立升胶化机,(推进剂密度约等于 $2\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ ),胶化效率不理想。另一方面,胶化机加料顺序相当严格:首先,出于安全考虑,燃速催化剂总是尽量后加;而固化剂也必须后加,否则工艺关难以通过,两者有所冲突,而两者同时加入问题更多。总之,加料时间,胶化时间在推进剂制备工艺过程中要考虑方方面面的需要,受到方方面面的制约。

薄层制样工艺快捷、安全。药条法和薄层法制样工作特征比较见表2。

表3 推进剂燃烧性能研究的各种方法比较

研究方法	理论研究	热分析	推进剂薄层	推进剂药条	火箭发动机
工作内容	单项测定和理论推导	热分解	薄层的制备和燃烧	药条的燃烧	药柱的燃烧
与燃烧的关系	间接	间接	直接	直接	直接
研究成本	较小	很小	很小	一般	很大

表4 世界现行主流方法与本方法比较

方法	世界现行主流方法	本方法
试样形式	推进剂药条	推进剂薄层
有效燃烧长度	10~70 mm	1600 mm
关键技术	超声波	高效燃速仪
压强控制模式	靠试样燃烧自动增压	3种控压模式
测定关键数据	瞬时燃速	瞬时燃长
初始拟合函数	燃速的压强函数	燃长的压强函数
数据拟合的最终目标	燃速的压强函数	燃速的压强函数
获取燃速的压强函数	不确定度高	很有可能

## 4 关于高效燃速仪的讨论

### 4.1 使用燃速公式可先检查其适用压强范围

以前要判断维耶里经验式和萨玛菲尔德方程适用压强区间是比较麻烦的,有了高效燃速仪就方便多了。一次台阶式静态实验和一次动态实验,便可求得宽压强范围内的维耶里积分式中的全部参数。

### 4.2 燃速仪的特点

#### 4.2.1 以静待动,燃面移动距离的测定精度超过激光法

哈尔滨船舶工程学院以激光技术自动跟踪药条燃面,其空间定位精度达到 $50\text{ }\mu\text{m}$ ,堪称当今世界上最先进的测量技术之一。但高效燃速仪采用“以静待动”的熔丝法,其测距定位精度更高,用精密机床可把熔丝间的距离定准到 $10\text{ }\mu\text{m}$ ,熔丝宽度也不难做到

表2 制备10批燃烧试样工作特征比较

	药条法	薄层法
工种人员	五工种,许多人	一工种,3名专业人员
制造周期	约十天	两天
总投料量	约10 kg	0.5~1 kg
工艺特点	危险,不能直接操作	安全,可以直接操作
工艺限制	胶化、浇注	没有限制

### 3.3 各种燃烧研究方法的比较

由表3可见,推进剂薄层法是唯一既利用推进剂(而不是燃烧性能有所不同的药浆)、成本低又直接研究推进剂燃烧性能的新方法。

本方法与现今世界上最受重视的超声波方法明显不同,比较于表4。

$10\text{ }\mu\text{m}$ 。由于试样足够长,把熔丝宽度定在 $50\text{ }\mu\text{m}$ ,对于燃长测定精度已经足够,也容易加工。

因此,尽管激光技术在测量上普遍精准,但在测量药条火焰移动距离的精度上,并不比熔丝法准确。本方案“以静待动”,不需测量试件的长度,也不跟踪燃面移动,而是以准确的熔丝距离去等待燃面的移动,所以不必怀疑“距离测量不准”。

#### 4.2.2 信号响应时间几乎为零

试件火焰推进速度很快,任何自动跟踪技术都要考虑信号响应时间的长短,熔丝断开的时间几乎为零,而微机的时间响应可达纳秒,这两者的搭配恰到好处,可提供很精确的时间测定精度。这奠定了用静态数据测定动态数据——瞬时燃速的数学物理基础。

#### 4.2.3 超长的燃烧试样

上述的燃面,实际上不存在,确切讲是燃烧层,依配方不同,大约有几十到几百微米,而且不是十分稳定。超声波测瞬时燃速,不确定度相当高。延长试样,是减少燃速误差的正确方法,本方案坚持测定每个燃速的有效燃长 $75\text{ mm}$ ,为燃速精度提供保障,一次点火便可提供大量系统的数据,为拟合法求解 $R(p)$ 奠定坚实的数据量基础。

#### 4.2.4 线性控压

这是全新的设想。目的是在上述很高的测定效率

下,再进一步提高效率。初期用途:用一动一静的方法初步测定燃速的压强函数。然后,对哪段压强有疑问或者对哪段压强有兴趣,可利用它作必要的验证。最终目的是一次点火便测定燃速压强函数。随着专用拟合软件的进一步开发,其用途将越来越宽广。

#### 4.2.5 几乎为空的压力舱设计

燃速仪压力舱工作环境非常恶劣:高压、高腐蚀、高污染。几乎所有在光学原理上建立的燃速仪<sup>[3,5]</sup>,光路很快被污染,至今也没有解决。激光燃速仪的活动螺杆从压力舱内通到舱外,高压下难以保证不漏气,超声波燃速仪在舱内安装复杂设备,难以做到经久耐用。

本方案的高效燃速仪,压力传感器安装在不易污染的地方,整部仪器后处理工作比较容易。

#### 4.3 高效燃速仪的局限性

对低燃速配方,薄层的燃速高于药条;而对高燃速配方尚未开展工作,预计低于药条。低燃速配方产生的问题源于带基传热,可通过建立燃速经验式来解决;高燃速配方产生的问题源于用药量偏少,可通过多次涂覆,让薄层横截面积接近于药条来解决。有专家指出,药条燃速和发动机燃速之间<sup>[7]</sup>可以建立经验关系式,而薄层与药条间燃速的差异跟它们与发动机燃速之间的差异比较起来小得多,当然这只能供参考,最终结果还得用发动机实测。

高效燃速仪的另一个缺点是太大、太精密,普通楼层高度容纳不下,一个插座1000多个接点。如果采用载波技术,或者在试样支架上配备合适的固体微电子模块,有可能大幅减少活动接点的数目,并减少燃烧室直径。

#### 4.4 高效燃速仪的应用前景

高效燃速仪主要用于推进剂配方预研阶段。首先是大幅提高燃速测定效率,其次是使用燃速公式时可检查其适用范围,如果发现所用公式适用范围太窄,则测定出使用范围更宽的燃速公式。后者是业内人士长期以来想解决又没有很好解决的老问题。随着纳米燃速催化剂的引入<sup>[8-9]</sup>,新型壳体材料使发动机工作压力越来越高,实测燃速公式意义将越来越大。另外,高效燃速仪出现以后,获取燃速数据的费用大大降低,验证燃速理论计算公式的成本也大幅下降。一台微机可以接纳好几千道理论燃速计算式,燃烧理论学家们将更加大有作为。可以相信,高效燃速仪的超长试样将给诸多燃烧性能研究带来方便,但总体上,高效燃速仪

的深入应用,例如,有序改变 $\beta$ 产生的一系列效果,还有赖于未来的推进剂燃烧专家。高效燃速仪的试样制备工艺已经解决,仪器研制方案也已做了初步论证。因此,可以进一步开展更详细的技术论证,并按开发压强控制系统的难易程度,循序渐进,着手研制。

#### 参考文献:

- [1] 江英武,刘艳林. 复合固体推进剂薄层燃烧与热分析[J]. 含能材料,1996,4(1): 24-31.  
JIANG Ying-wu, LIU Yan-lin. Combustion and thermal analysis of thin layer of composite solid propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 1996, 4(1): 24-31.
- [2] 张劲民,袁华,张箭,等. 超声法测试固体推进剂的燃速[J]. 火炸药学报,2008,31(4): 64-66.  
ZHANG Jin-min, YUAN Hua, ZHANG Jian, et al. Burning rate measurement of solid propellant by ultrasonic technology[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2008, 31(4): 64-66.
- [3] 孙德川,周伟,汪亮. 超声波法测量燃速初探[J]. 固体推进技术,2007,30(4): 362-364.  
SUN De-chuan, ZHOU Wei, WANG Liang. Burning rate measurement by means of ultrasonic technique[J]. *Journal of Solid Propulsion Technology*, 2007, 30(4): 362-364.
- [4] 张劲民,王志强,袁华. 超声波燃速测试技术在固体推进剂研制中的应用[J]. 火炸药学报,2006,29(3): 9-12.  
ZHANG Jin-min, WANG Zhi-qiang, YUAN Hua. Application ultrasonic measurement for burning rate in solid propellant development[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2006, 29(3): 9-12.
- [5] Dauch, Moser M D, Frederick R A, et al. Uncertainty assessment of ultrasonic measurement of propellant burning rate[C] // 35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit Washington D C: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999.
- [6] 赵银,田德余. 复合固体推进剂初温影响燃速和压力指数的模拟计算分析[J]. 固体火箭技术,1991,3: 64-70.  
ZHAO Yin, TIAN De-yu. Effect of beginning temperature of composite solid propellant on burning rate and the analysis of the simulated[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 1991, 3: 64-70.
- [7] 闵斌,刘国雄. 防空导弹固体火箭发动机设计[M]. 北京: 宇航出版社,1993: 225.
- [8] 曹新富,杨毅,张晓燕,等. 纳米碳酸盐对复合固体推进剂燃烧性能的影响[J]. 推进技术,2010,31(1): 65-68.  
CAO Xin-fu, YANG Yi, ZHANG Xiao-yan, et al. Effect of nanometer carbonate on combustion properties of composite solid propellants[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2010, 31(1): 65-68.
- [9] 杨毅. 纳米复合粒子的制备及催化AP热分解[J]. 含能材料,2009,17(4): 446-450.  
YANG Yi. Nanocomposite particles preparation and catalytic AP thermal decomposition[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(4): 446-450.

## Solution of a New Instrument towards Measuring Burning Rate and Pressure Function of Propellants

JIANG Ying-wu

(P. O. Box 156, Xiangfan 441003, China)

**Abstract:** The thin-layer of composite solid propellant (TLCSP) is fabricated by coating the propellant slurry on a non-combustible tape and subsequently fast curing. This report presents a primary solution towards a high efficient instrument for measuring propellant burning rate based on TLCSP. It consist of combustion chamber, pressure/temperature control system, data acquisition and data processing system. The combustion chamber contains a 1650 mm length of TLCSP sample on which 1051 fuses with 1.50 mm apart each other are covered. There are three modes of pressure control including manual, stepped and linear type. Using manual mode, the pressure exponent of burning rate can be obtained only with one ignition, thus remarkably improving the measurement efficiency. Combining stepped and linear control modes, it is possible that the pressure function of burning rate can be determined. Furthermore, the applicability of pressure range can be checked when using current burning rate equations.

**Key words:** physical chemistry; instrument; propellant; burning rate; function

**CLC number:** TJ55; O64

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.01.025

附注:

### 《复合固体推进剂高效燃速仪技术构想》的说明

全国企业家和相关专家学者:

感谢您读完“复合固体推进剂高效燃速仪技术构想”一文。说明如下:

1. 该项技术的前期工作已获成功。是由原中国航天科技总公司(CASC)批准研究,由CASC出资出人开展工作,完成后经逐级评审,最后按国家有关规定,由该公司组织有CASC以外的全国同行专家、学者参加的鉴定会予以鉴定并确认成功的技术。由于没有实现仪器化,时至今日,该项技术的作用仍然等于零。作者深深感谢十多年前,我国专家、学者给予本项技术客观公正的评价,也感谢CASC有关各级领导给予的支持。作者认为,按照我国专家学者们指明的方向继续向前,我国有可能在该领域领先世界水平,所以对于放弃该项目,深感可惜。今天公开提出初步见解,欢迎有远见有实力的企业家积极响应,也希望广大专家学者继续给予支持。

2. 本方法的高效燃速仪是很精密的大型仪器,制造有难度,需要跨学科、多行业的支持。世界上没有一个人能全面细致具体地负责其技术工作。作者虽然只能提供合格的超长试样,无力实现仪器化,但对国人的聪明才智有信心,对广泛藏于民间的能工巧匠有期待。根据现有国情,本作者坚信这种仪器能够研制出来。在请人评审技术可行性及商业可行性时,一定要慎重。另外,作者认为,1996年鉴定会上评委们指出要对适用仪器做进一步研究,并未限定研究的人员范围,因为研制试样和研制仪器完全是两个行业、两回事。欢迎广大有识之士积极参加论证,期望社会贤达提出更为高明的方案。

3. 受发表篇幅限制,言犹未尽,欢迎索取更为详细的报告。

4. 谁开发这个项目,谁拥有它的全部权益,也要承担其全部风险。论证开发的仪器完全自主创新,实用、高效、功能多,而且领先世界水平,而且可解决一个科技上的老大难问题——实测推进剂燃速压强关系函数。

江英武

2010年8月14日

秉承“百花齐放,百家争鸣”的办刊方针,本刊在本期刊登了江英武先生的《复合固体推进剂高效燃速仪技术构想》一文。此文是在作者最初稿件《复合固体推进剂高效燃速仪研制方案》基础上反复修改而成的。江先生已退休多年,但他仍潜心研究,不为名利,唯一目的是救活该项技术。希望此文的发表能为复合固体推进剂高效燃速仪的研制起到牵线搭桥的作用。

——编者