

# 脉冲式膏体推进剂发动机实验研究

四院四十 一所 李越森\* \* 王德升 李歧海

**【摘要】** 以某种不加固化剂的具有流变性的复合推进剂为膏体推进剂的初始配方,研究其在实验发动机中的挤压输运适应性和摩擦安全性,获得了膏体推进剂的粘度与挤压适应性的关系,并对影响该推进剂挤压适应性和摩擦安全性的因素进行了分析。在此基础上完成了脉冲式膏体推进剂发动机的地面热试,成功地得到了两次脉冲燃烧的  $p-t$  实验曲线。初步验证了膏体推进剂在使用上的安全性和脉冲式膏体推进剂发动机在推力调节和多次起动方面的可行性,为国内在该新领域的研究奠定了必要的基础。

主题词: 脉冲 火箭发动机 推进剂 实验

分类号: V435.6

## 1 前 言

长期以来,以实现固体发动机的随机推力调节为目的,人们提出了许多方案<sup>[1~4]</sup>,如双脉冲发动机、固液混合式发动机以及喉部面积可调式发动机等。这些方案在一定程度上改善了固体推进剂发动机的推力调节功能,但由于各自在技术上存在的难题或方案本身的缺陷,导致它们至今还未能广泛应用于实际。80 年代末,人们从推进剂的角度入手,试图研制出一种象液体推进剂那样易于进行流量控制但又具有固体推进剂密度大、安全性好等优点的新型推进剂。这便是“凝胶/膏体推进剂(Gel Propellant)<sup>[5]</sup>”。凝胶/膏体推进剂发动机较好地兼顾了液体、固体推进剂发动机的特点,而克服了两者的缺点。与液体发动机相比,它比较安全、易于贮存,消除了起动晃动,几乎没有搬运和运输上的困难,并且不会发生象 100% 液体燃料那样的泄漏。此外,凝胶/膏体推进剂比液体推进剂密度大得多,提高了发动机装填密度。结构方面<sup>[6]</sup>,凝胶/膏体推进剂发动机没有液体发动机所需的复杂的喷注管路系统和过多的阀门部件,因而可靠性较高。与固体发动机相比,凝胶/膏体推进剂具有灵活的能量可控性,凝胶/膏体推进剂属假塑性流体,可实现节流,而且燃面调节较固体推进剂易于实施。凝胶/膏体推进剂对力学性能要求较低,避免了固体推进剂苛刻的药柱完整性要求,显而易见,具有推力可控和多次起动能力的凝胶/膏体推进剂具有广泛的应用前景。

## 2 实验发动机冷试

### 2.1 实验原理及装置

我们设计的原理性试验发动机如图 1 所示。膏体推进剂装在圆筒形贮箱中,通过气动挤压

与活塞系统将其挤压进入透明窗燃烧室中进行燃烧。推进剂流量的供给与中断则是由贮箱

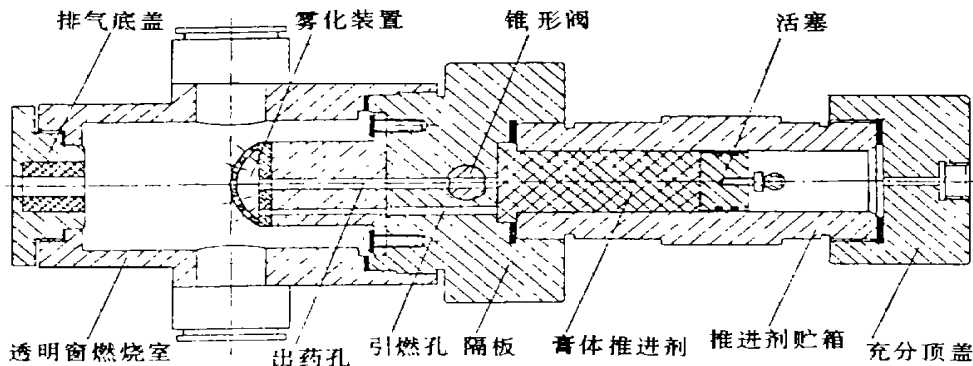


图 1 发动机结构图

与燃烧室之间的锥形阀的开闭来控制, 锥形阀的断续转动由 YJFC 齿轮减速电机带动实施。电机电源的通断由多通道延时控制仪控制, 该仪器有一‘断—通—断’输入输出回路。此回路可以实现电机的‘停—转—停’动作。并且这种动作可以通过选择不同的输入脉冲宽度而使断开和接通电源的时间长短不同。最终可以实现膏体推进剂的断—续供应, 达到脉冲燃烧的目的。 $p-t$  曲线的测量记录由 SC-16 型光线示波器完成。发动机原理试验图如图 2 所示。

## 2.2 冷试结果及分析

冷试的目的主要是验证膏体推进剂的摩擦安全性和挤压输运适应性, 结果如下:

(1) 所用膏体推进剂(起始粘度分别为  $39.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、 $91.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、 $110.6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ) 分别在  $2.5$ 、 $4.0$ 、 $6.0$ 、 $7.5 \text{ MPa}$  下挤压多次均无异常情况发生, 也没有密封部位出现泄漏现象。推进剂温度亦没明显升高。除此之外所用推进剂还承受了  $2.5 \text{ MPa}$  的密闭挤压, 亦无危险情况发生。由此可初步断定, 该推进剂适用于挤压且安全。

(2) 在挤压过程中, 由电机带动锥形阀连续进行开关动作, 结果无异常情况发生。即没有出现因转动摩擦而发生的发烟起火甚至爆炸等现象。由此验证了膏体推进剂的摩擦安全性。

(3) 在膏体推进剂挤压适应性试验中, 选用了两种 AP 粒径不同的推进剂配方, 第 I 种 AP 粒子直径主要分布在  $40 \sim 60$  目 ( $300 \sim 450 \mu\text{m}$ )。第 II 种 AP 粒子直径主要分布在  $100 \sim 140$  目 ( $100 \sim 150 \mu\text{m}$ )。分别将两种推进剂配制成三个不同粘度的样品(标号分别为  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  和  $II_1$ 、 $II_2$ 、 $II_3$ )。其中  $I_1$ 、 $II_1$  粘度最小约为  $39.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。挤压试验却表明他们的适应性并不好。出现挤压过程中的粘度不均匀现象, 每次挤压均不完全。 $I_2$  和  $II_2$  的粘度约为  $91.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ , 试验表明, 他们明显地改善了挤压过程中的粘度不稳定现象, 前后挤出的推进剂粘度几乎没有差异。但  $I_2$  样品搁置数周后出现程度较大的离析分层现象(与  $II_2$  相比)。 $I_3$  和  $II_3$  均加入少量

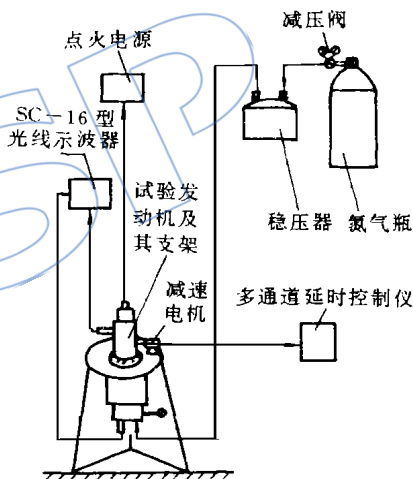


图 2 发动机试验原理图

的某类型树脂,粘度约为  $110.6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。试验表明,它们不仅挤压粘度稳定,且在相同药量、相同挤出压力下挤压完成所需的时间比  $I_2$  和  $II_2$  所需时间均小。说明  $I_3$  和  $II_3$  挤压适应性最好。

(4) 通过反复试验测量,得到了粘度分别为  $39.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  和  $110.6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  两种试样的挤出压强—流量曲线( $p-q$  曲线)和流量—时间曲线( $q-t$  曲线)如图 3 所示。

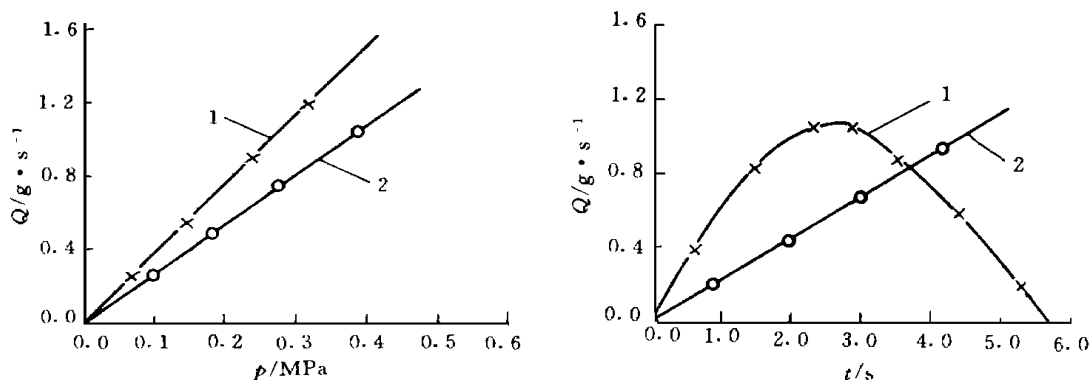


图 3 膏体推进剂的压力流量曲线和流量时间曲线(1. 粘度为  $39.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ; 2. 粘度为  $116.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ )

对上述实验结果进行分析<sup>[7]</sup>:

(1) 锥形阀在连续反复的摩擦转动过程之中之所以安全,一方面是由于粘弹性的推进剂基体容许氧化剂颗粒被重新压入其中;另一方面是由于锥形阀与锥形孔之间的配合间隙尺寸小于氧化剂粒径。这两方面的原因使氧化剂和粘合剂不能一齐进入间隙中承受摩擦,间隙中只有燃料,没有氧化剂,放热的化学反应就不能进行,从而避免了不安全现象的发生。因此,只要遵循阀芯与阀座之间的配合尺寸小于氧化剂粒径这一原则,就能够保证膏体推进剂的摩擦安全性。

(2) 膏体推进剂的挤压适应性试验以及  $p-q$  曲线和  $q-t$  曲线表明,低粘度(如  $39.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  的试样)虽然有好的流动性,但未必有好的挤压适应性(即出现挤出过程中的粘度不稳定现象)。原因是低粘度的膏体推进剂体系中自由液体含量较大,从而降低了固相粒子与假塑性基体之间的粘结力(类似于稀释作用),使液体组分的运动阻力变小。在挤出压力作用下,液相组分就与固相组分产生速度差异,而且这种差异程度越大,推进剂的挤压输运效果就越差。相反,加入适量的胶接剂(如环氧树脂),增大体系的粘稠性后,挤压输运效果明显改善(如  $110.6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  试样)。这说明粘稠性基体可以均匀地分散固相粒子,并且能够在体系运动过程中加以保持,避免了固液两相的速度差异。

### 3 发动机热试

#### 3.1 脉冲燃烧实验

实现发动机的脉冲燃烧,必须解决如下两个问题:(1) 确定燃烧方式;(2) 实现多次点火。

对于膏体/凝胶推进剂来说,燃烧方式有边挤边燃烧和先堆积再燃烧两种方式。根据目前的试验条件和水平,决定暂采用后一种方式进行实验。解决问题(2)的办法是使用了一种可称为引燃管的装置(工作原理类似于长时间工作的燃气发生器)。其中装填某种缓燃型药,管径和药量可根据所需要的脉冲数量来确定。引燃管在发动机工作期间保持常燃,由它一次又一次点燃膏体推进剂的脉冲式出药。在解决了上述关键问题之后,我们进行了大量的实验,得到了如

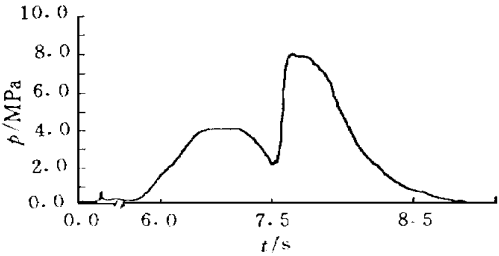


图 4 1 号试验曲线

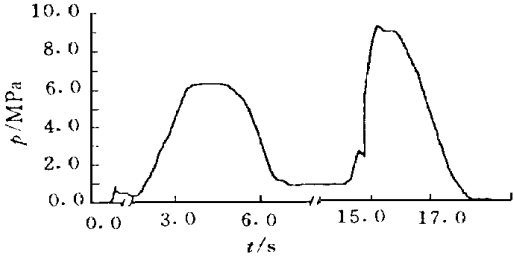


图 5 2 号试验曲线

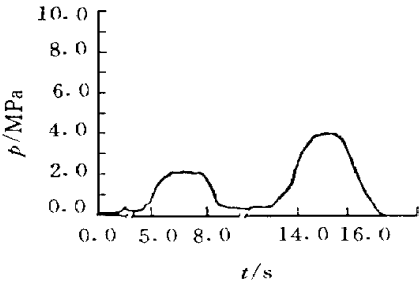


图 6 3 号试验曲线

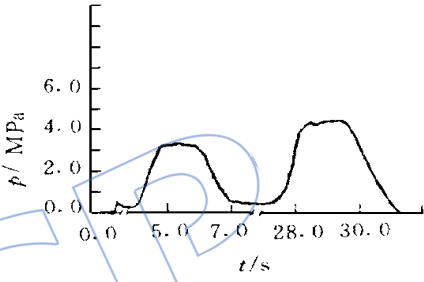


图 7 4 号试验曲线

下一系列 $p-t$ 曲线(记录速度为 50 mm/s)如图 4~7 所示。

3.2 热试分析

虽然只以堆积燃烧方式得到了两次脉冲压强—时间曲线,但通过对这些曲线的分析会有喜人的发现。表 1 列出了各曲线的脉冲参数(平衡段宽度、压力、脉冲间隔时间、压力爬升时间等)。其中数据显示,脉冲式膏体推进剂发动机产生的脉冲工作时间可以任意调节(0.8~2.8 s)。各脉冲的工作时间可以相同(如 4 号试验)也可以不同(如 2 和 3 号试验)。脉冲压力的情况也类似。脉冲间隔时间即可以较长(如 4 号试验为 20.8 s),也可以极短(如 1 号试验的两次脉冲几乎没有间隔);尤其值得注意的是,第二脉冲的压力爬升时间均小于第一脉冲,说明不熄火的情况对后面脉冲的点火性能有所改善,有希望实现快速起动(如 1 号试验第二脉冲的压力爬升时间仅为 0.05 s)。这些试验结果在原理上验证了膏体推进剂发动机所具有的推力可调性和

表 1 脉冲参数

| 实验编号 | 脉冲平衡宽度/s |     | 脉冲压力/MPa |     | 脉冲间隔/s | 压力爬升时间/s |      |
|------|----------|-----|----------|-----|--------|----------|------|
|      | I        | II  | I        | II  |        | I        | II   |
| 1    | 0.8      | 0.5 | 4.0      | 8.1 | 0.0    | 0.6      | 0.05 |
| 2    | 2.8      | 1.3 | 6.1      | 8.9 | 8.4    | 0.4      | 0.30 |
| 3    | 2.6      | 1.7 | 1.9      | 3.2 | 5.6    | 0.5      | 0.40 |
| 4    | 1.4      | 1.6 | 2.9      | 3.8 | 20.8   | 0.4      | 0.30 |

使用灵活性。与固体发动机相比,它可以很容易地实现脉冲推力;与液体发动机相比,它的结构

却简单得多(只有一个推进剂贮箱,推进剂流量调节只有一套阀门控制系统)。膏体推进剂发动机的优越性主要得益于具有流变性的膏体推进剂本身。

此外,堆积式脉冲燃烧试验表明,第二脉冲的燃面往往难以控制,而要以边挤边燃烧方式获得脉冲  $p-t$  曲线,必须在挤出堆积与燃烧消耗的动态过程中保持的稳定(或可控),才能克服由于膏体推进剂强度低而在燃烧过程中发生燃面无规律扩大现象。由此,需要研究一种类似与液体发动机上使用的喷嘴一样的装置。

## 4 结 论

实验研究结果证明,膏体推进剂作为一种拥有广阔发展前景的新型推进剂,其基本的挤压安全性和摩擦安全性能能够得到保证;脉冲式膏体推进剂发动机在推力调节和多次起动方面的确具有很大的灵活性和可行性。但作为进一步的研究,膏体推进剂发动机还需解决许多技术问题,如如何实现推进剂挤出速度与燃速相匹配、如何防止回火(指燃烧室工作压强大于膏体推进剂挤出压强,火焰由燃烧室串至贮箱)以及研制多次点火装置等等。

## 参 考 文 献

- 1 Franing H D. Airframe- Propulsion Consideration for Pulse- Motor Power Missiles. AIAA 86- 0444
- 2 Nishii S, Fukuda K, Kubota N. Combustion Test of Two- Stage Pulse Rocket Motors. AIAA89- 2426
- 3 叶定友,王敬超. 固体发动机多次起动技术及其应用. 推进技术, 1989, (4): 76
- 4 殷金其,吴心平. 固体火箭发动机多次起动研究述评. 固体火箭技术, 1988, (2): 36
- 5 E. cooke Royal ordnance. Recent Developments in Extrudale Composite Propellant Technology. AIAA91- 1946
- 6 Day E E. Demonstration of ALL- Solid Impulse Control Concepts Using State- of- the- Art Solid Propellants. AIAA71- 751
- 7 陈少镇. 聚合物流变学. 北京: 国防工业出版社, 1993: 168

(责任编辑 杨再荣)

lems for the viscoelastical damping structure attached to gears, and a simple model is setup by combining 20- node element technique according to the modal strain energy theory. Thus, a practical and simple approach for engineering application is provided to predict loss factors and optimal location of damping layer in the structure without the difficulty of solving complex eigenvalues. As an example, the loss factors and optimal damping location have been calculated for a real gear. The results are in a good agreement with its experimental data.

**Key Words** Modal analysis Finite elements Viscoelastic Damping Gears

## **A STUDY ON VIBRATION DEPRESSION OF GEAR SYSTEM BY MODIFICATION REANALYSIS OF STRUCTURAL DYNAMICS**

**Shao Changjian , Sun Tao , Shen Yunwen**

*(Mechanical Engineering Department, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)*

**Zhang Xianmin**

*(Mechatronic Engineering Department, Shantou University, Shantou 515063)*

**ABSTRACT** The complex Mode Theorem and Matrix Perturbation Method are applied to execution of the modal sensitivity analysis and the Fourier Series Method for calculation of the vibration responses. The dynamic characteristics of a complicated aerogear system, so-called star gear system, are elaborated thoroughly. The damping enhancement and modifications of other structural parameters for the vibration depression of the system are also considered in order to find the most efficient measures to minimize the vibration responses of the whole gear system. As a result, an accurate and efficient procedure for the dynamic analysis and redesign of viscously damped linear vibration system is developed, and some practically useful conclusions are drawn out.

**Key Words** Gear drives Dynamic structural analysis Modal theory  
Vibration depression

## **AN EXPERIMENTAL RESEARCH OF PULSE- GEL PROPELLANT ROCKET MOTOR**

**Li Yuesen, Wang Desheng, Li Qihai**

*(The 41st Institute of the Fourth Academy of CASC, Xi'an 710000)*

**ABSTRACT** Gel propellant rocket motor has been developed as a new advanced technique in rocket propulsion field since the late eighties. To a great extent, it overcomes respective disadvantages of liquid and solid rocket motors, and especially has flexible and simple controllability of the rocket energy. A kind of rheological composite propellant without curing agent is used as initial formulation of gel propellant, the extrusion adaptability and frictional security of gel propellant have been studied in an experimental motor, and the relations and effective factors of its viscosity and extrusion adaptability have been discussed and double-pulse combustion pressure-time curves have been obtained from its static firing test successfully. Thereby, the security and usability of the gel propellant and the feasibility

and flexibility of pulse gel propellant rocket motor for thrust control and multiple- start have been preliminarily verified.

**Key Words** Experiments Pulse Rocket engines Propellants

## AN IN- FLIGHT ADAPTIVE MODEL OF TURBOFAN

Li Songlin, Sun Jianguo, Huang Jinquan

(2nd Dept. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Li Jianming (Gas Turbine Institute, Xindu, Sichuan 610500)

**ABSTRACT** A real time adaptive model for turbofan engine is developed, which uses Kalman Filter concept to estimate unmeasured output variables and characterizes the effects of off- nominal engine behavior as biases on the measurable output variables. An adaptive engine model is formulated and its block diagram is set up with this method. The estimates of the output variables obtained from the presented model are compared with nonlinear simulation results of the engine for testifying its adaptability to the off- nominal behavior of the engine with deteriorated performance.

**Key Words** Turbofan engine Kalman filter Adaptive control Modeling

## A NEW FAULT DIAGNOSIS METHOD BASED ON NEURAL NETWORKS AND EXPERT SYSTEM

Liu Zhansheng and Zhang Xinjiang

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**ABSTRACT** In order to diagnose the faults in trubomachinery, a new type of diagnosis system based on Expert System (ES) and Neural Network (NN) is proposed. The NN diagnosis system is used to remember directly and associate faults happened before. The NN diagnosis system gives a set of candidate faults. The back reasoning mechanism of the expert system is applied to verifying these candidate faults. This diagnosis method is proved to be reliable and superior to the traditional ones.

**Key Words** Neural network Expert system Fault diagnosis

## TECHNICAL NOTES

### APPLICATION OF BPN TO QUANTITATIVE DIAGNOSIS OF GAS PATH COMPONENT FAULTS IN TURBOFAN

Sun Bin and Zhang Jin

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

Zhang Shaoji (Shenyang Aeroengine Research Institute, Shenyang )

**ABSTRACT** The possibility of using BPN to quantitative diagnosis of turbofan