

## 四氧化二氮凝胶推进剂的配方研究

韩 伟, 杜宗罡, 符全军, 兰海平, 杨 超, 吴 金, 于 君  
(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 针对四氧化二氮 (NTO) 的特殊氧化性, 筛选了三种不同胶凝剂与 NTO 形成凝胶, 对其流变性能进行研究, 并结合发动机试验、限流圈试验、发动机头部液流试验, 验证了其与偏二甲肼 (UDMH) 凝胶组成的双组元推进剂用于凝胶发动机试验的可行性。结果表明: 单一胶凝剂和 NTO 形成的凝胶体系不能满足凝胶发动机的要求, 而复合胶凝剂 YN61+YN71 与 NTO 形成的凝胶体系具有粘度高、所需剪切力低的优异流变性能, 基本能满足凝胶发动机的要求。

**关键词:** NTO; 凝胶推进剂; 胶凝剂; 流变性能

**中图分类号:** V513

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2008) 01-0054-05

## Study on the formulation of NTO gelled propellant

Han Wei, Du Zonggang, Fu Quanjun, Lan Haiping, Yang Chao, Wu Jin, Yu Jun  
(Xi'an Aerospace Propulsion Test Technique Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** Aiming at the special oxidizability of NTO, three different gellants were chosen which could form gel with NTO, and their rheologic properties were studied. By means of rocket motor test, restriction orifice test and fluid flow test of rocket engine head, the feasibilities that NTO gel could constitute gelled bipropellant with UDMH gel were testified. It shows that, single gel system can not meet the requirement of gelled propellant rocket engine design, however composite gel system has excellent rheologic property of high viscosity and low shearing strength can meet the requirement of gelled propellant of rocket engine.

**Key words:** nitrogen tetroxide (NTO); gelled propellant; gellant; rheologic property

收稿日期: 2007-07-30; 修回日期: 2007-08-23。

作者简介: 韩伟 (1975—), 男, 工程师, 研究领域为发动机推进剂。



## 1 引言

凝胶推进剂源于上世纪40年代美国的“添加固相颗粒的液体燃料”概念研究<sup>[1,2]</sup>。一般是在液体推进剂中添加胶凝剂而形成稳定的胶状物,即凝胶推进剂。由于凝胶推进剂具有压力触变/剪切变稀性能,即可像液体推进剂那样具有性能高、可精确调节推力和控制末速度的优点,又兼备固体推进剂的易运输、贮存特点,使得运载火箭、导弹的推进剂预先加注、长期存放、快速发射成为可能。

目前世界各航天大国都在积极进行凝胶推进剂的研究。尤其美国于1999年在艾格林空军基地成功进行了采用凝胶动力系统的导弹首次飞行试验,达到了多次启动、再次瞄准机动飞行等技术验证目标;2002年对用于上面级的凝胶推进剂泵压式发动机方案进行了研究。我国对单推-3单组元凝胶推进剂进行了系统的研究,取得较大进展;而对于UDMH/NTO双组元凝胶推进剂,由于NTO的特殊氧化性,使其凝胶化研究困难重重。

本文从NTO凝胶的流变性能入手,结合发动机试验、限流圈试验、发动机头部液流试验,优化筛选出了粘度高、所需剪切力低的优异流变性能凝胶体系。

## 2 实验制备

### 2.1 实验试剂

实验中凝胶剂均为经过精制的市售试剂。推进剂NTO,淮南化工集团生产,99.6%。

### 2.2 仪器及系统

流变性能测试:Brookfield R/S2000流变仪,测试温度20℃。

冷流试验系统:常规实验系统。

### 2.3 凝胶制备实验

氧化剂凝胶制备是一种物理过程,伴随着网络结构的形成,同时存在胶凝剂粒子在氧化剂中的分散。由于NTO的沸点很低,只有21.15℃,极易挥发,毒性较大,因此实验需在密封的带有

高速搅拌和冷却回流的反应容器中进行。

在冰水浴下,将NTO缓慢加入到反应容器后,边搅拌边加入待选的胶凝剂,并随时注意冷凝情况,以防止NTO的挥发。之后剧烈搅拌2~3小时,得到NTO凝胶。将得到的凝胶静置2小时后,用流变仪测试其流变性能。

## 3 分析与讨论

### 3.1 单一胶凝剂的筛选

由于NTO特殊的氧化性,能被选作NTO胶凝剂的材料十分有限。根据发动机设计人员提出的要求和课题组确定的技术指标,选出了三种胶凝剂YN61、YN71及YN62,并进行了一系列试验。图1~图3为YN61、YN71、YN62在某一值时与NTO形成凝胶体系的流变性能曲线。

从图1可看出,单一胶凝剂YN61与NTO可形成稳定的凝胶体系,初始粘度在6000mPa·s,最大剪切应力260Pa,但是第1秒的粘度和第2秒的粘度相差不大,剪切应力较大,剪切变稀效果不是太理想。

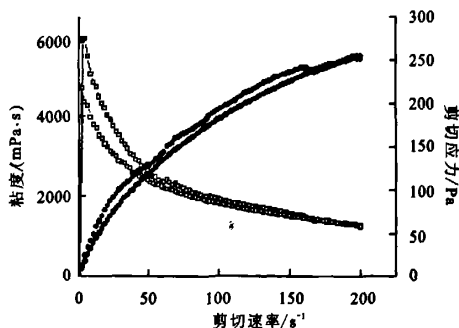


图1 单一胶凝剂YN61在某一值时的流变曲线

Fig.1 The rheologic curve of single gellant YN61

从图2可看出,单一胶凝剂YN71与NTO也可形成稳定的凝胶体系,初始粘度在2700mPa·s,最大剪切应力70Pa,第1秒的粘度和第2秒的粘度相差相对较大,所需剪切应力较小,但粘度不太理想。

从图3可看出,单一胶凝剂YN62与NTO也可形成稳定的凝胶体系,初始粘度在6000mPa·s,最大剪切应力11Pa,第1秒的粘度和第2秒的粘



度相差较大，剪切应力很小，剪切变稀效果理想，从理论上应是理想的凝胶剂。

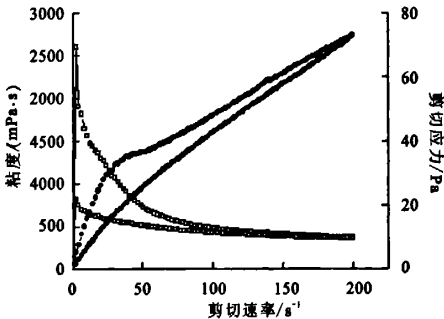


图2 单一凝胶剂 YN71 在某一时值的流变曲线  
Fig.2 The rheologic curve of single gallant YN71

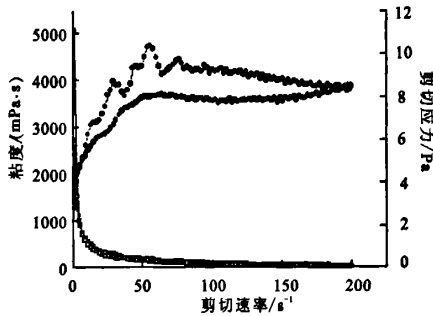


图3 单一凝胶剂 YN62 在某一时值的流变曲线  
Fig.3 The rheologic curve of single gellant YN62

将图3所示的 NTO 凝胶体系与 UDMH 凝胶进行了 200N 的推力室点火试验验证，试验在进行到第三个 10 秒时，凝胶  $N_2O_4$  流动不畅，实施停车。从试验数据分析可以知道，随着贮箱压力的增大氧化剂的流量逐渐减小直到为零，试验管路解剖证明了是由于氧化剂管路的滤网被凝胶剂完全堵死造成的。

3.2 复合凝胶剂的筛选

从上面的单一凝胶剂筛选结果可看出，三种凝胶剂与 NTO 形成的凝胶体系各有优缺点，这就提示能否对它们进行复合筛选，达到既流变性能良好，又不堵塞发动机小孔的目的。

3.2.1 复合凝胶剂 A+C 的凝胶体系研究

单纯使用 YN62 制备的 NTO 凝胶在发动机试验过程中会出现滤网或发动机氧化剂喷注孔堵塞

现象，而 YN61 作为高分子凝胶剂不存在堵塞小孔的问题，YN62 则具有使凝胶体系剪切力减小的特点。因而用 YN61 辅以少量 YN62 的复合体系来制备氧化剂凝胶，得到了触变性能较好且剪切应力较低的 NTO 凝胶。YN61+YN62 体系 NTO 凝胶流变性能如图 4 所示。

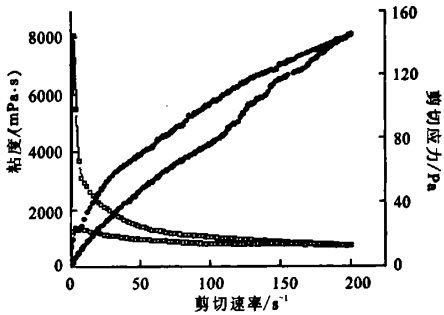


图4 复合凝胶剂 YN61+YN62 的流变性能曲线  
Fig.4 The rheologic curve of composite gellant YN61+YN62

从图4可看出，该体系粘度在 8000 mPa·s 左右，第2秒与第1秒的粘度相差将近一半，只有 5200 mPa·s。与图2相比，触变性稍微增大，而剪切应力降到 150 Pa 左右。

表 1 限流圈孔径试验

Tab.1 Experiment result of restriction orifice

限流圈孔径	基本结论
0.16mm	0.5MPa 不能通过,继续加压至 3.5MPa 渗流且流量不能达到设计要求
0.2mm	0.5MPa 不能通过,继续加压至 3.5MPa 渗流且流量不能达到设计要求
0.24mm	渗出,继续加压喷射,流量不能达到设计要求
0.32mm	通过,继续喷射,流量不能达到设计要求
0.4mm	喷射,流量基本达到设计要求
0.8mm	喷射,流量达到设计要求

为了观察体系 NTO 凝胶推进剂通过限流圈后的压力损失及流动情况，进行了限流圈部分小孔（孔径  $\Phi d$ , mm：分别为  $\Phi 0.16$ 、 $\Phi 0.2$ 、 $\Phi 0.24$ 、 $\Phi 0.32$ 、 $\Phi 0.4$ 、 $\Phi 0.8$ ）试验。限流圈孔径及实验基本结论见表 1 所示。



由于额定推力为 100N 的发动机氧化剂喷注孔为  $\Phi 0.32$ , 从表 2 中知道 YN61+YN62 体系 NTO 凝胶通过  $\Phi 0.32$  小孔时流量比较小, 不能达到设计要求; 另外发动机试验时不同程序间隙或脉冲点火都有可能使凝胶剂析出堵塞小孔, 所以 YN61+YN62 体系 NTO 凝胶对小孔通过性较差, 不能满足发动机试验要求。

3.2.2 YN61+YN71 凝胶体系流变性能研究

高分子凝胶剂 YN61 与 YN71 复合制备的 NTO 凝胶流变曲线如图 5 所示。胶凝剂总量比较少, 从曲线看出触变性比较好, 剪切应力也降到

77 Pa 左右。

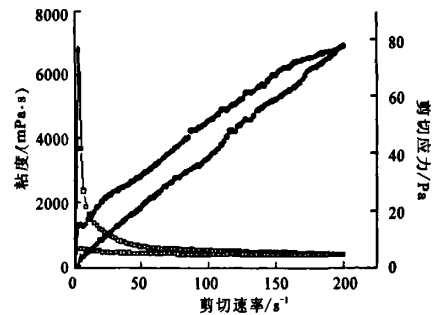


图 5 复合胶凝剂 YN61+YN71 的流变性能曲线  
Fig.5 The rheologic curve of composite gellant YN61+YN71

表 2 单一胶凝剂和复合胶凝剂流变性能对照表  
Tab.2 Comparison of rheologic property between single gallant and the composite

胶凝剂	YN61 <sub>1</sub>	YN61 <sub>1</sub> + YN71	YN61 <sub>2</sub>	YN61 <sub>2</sub> + YN71	YN61 <sub>3</sub>	YN61 <sub>3</sub> + YN71	YN61 <sub>4</sub>	YN61 <sub>4</sub> + YN71
粘度/(mPa·s)	2359(1s)	4619(1s)	4261(1s)	6989(1s)	8103(1s)	8585(1s)	11328(1s)	12629(1s)
	2256(2s)	2394(2s)	4096(2s)	3684(2s)	8095(2s)	4351(2s)	10079(2s)	7007(2s)
剪切力/Pa	172	72	217	77	273	103	267	177

为了更充分说明 YN61+YN71 复合后的优异性能, 改变 YN61 加入量, 固定 YN71 加入量, 得到的粘度和剪切力对照如表 2 所示。

由表 3 可看出, 从粘度来看, 胶凝剂 YN71

的加入对受剪切变稀这一特性比较敏感, 第 2 秒的粘度基本上是第 1 秒的一半。从剪切力来看, 复合胶凝剂的剪切力比单一的配方下降了 50% 以上。

表 3 NTO 凝胶 100N 产品产品头部液流试验部分数据  
Tab.3 Data of NTO gel fluid flow test at 100N rocket motor

序号	程序/s	$p_{a1}$ /MPa	$p_{a2}$ /MPa	$p_{a3}$ /MPa	$p_{a4}$ /MPa	$p_{a5}$ /MPa	$q_{m,s}$ /(g·s <sup>-1</sup> )
1	5	2.544	2.475	2.434	2.064	0.808	19.45
2	5	2.846	2.774	2.731	2.348	0.840	21.76
3	5	3.036	2.962	2.918	2.529	0.858	23.28
4	5	3.552	3.473	3.424	3.005	0.915	27.21
5	5	3.292	3.215	3.167	2.763	0.893	25.51
6	5	2.296	2.226	2.187	1.835	0.773	18.06

注:  $p_{a1}$ -氧化剂系统贮箱压强, MPa;  $p_{a2}$ -氧化剂系统过滤器前压强, MPa;  $p_{a3}$ -氧化剂系统过滤器后压强, MPa;  $p_{a4}$ -氧化剂系统限流圈入口压强, MPa;  $p_{a5}$ -氧化剂系统限流圈出口压强, MPa;  $q_{m,s}$ -氧化剂流量, g·s<sup>-1</sup>。



为了进一步获得 YN61+YN71 体系 NTO 凝胶推进剂与发动机的匹配性, 对其进行 100N 发动机的头部液流试验, 表 3 为部分数据。

从表 3 可以看出, 氧化剂凝胶流量为 23.28g/s 时, 压差为 2.0 MPa 左右, 参照发动机的设计要求 (氧化剂凝胶满负荷设计流量 23.82g/s, 变化  $\pm 10\%$ ), 可以认为 YN61+YN71 体系 NTO 凝胶推进剂基本满足设计对流量和压力的要求, 可用来进行双组元 UDMH/NTO 发动机点火试验。

## 4 结论

通过对不同凝胶剂加入到 NTO 后形成凝胶的流变性能研究, 结合地面试车、限流圈试验、发动机头部液流试验, 可得出如下结论:

(1) 由于 NTO 特殊的理化性质, 能被选作 NTO 的凝胶剂极其有限。

(2) 单一凝胶剂与 NTO 形成的凝胶体系, 其流变性能存在一定缺点, 不能满足凝胶发动机的

要求。

(3) 复合胶凝剂 YN61+YN71 与 NTO 形成的凝胶体系流变性能良好, 是典型的非牛顿流体, 剪切变稀特性明显, 具有粘度高、剪切力低的优异流变性能, 基本满足发动机设计的要求。

## 参考文献:

- [1] Gupta B L, Mohan Varma, Munjal N L. Rheological Studies on Virgin and Metallized Unsymmetrical Dimethyl Hydrazine Gelled Systems [J]. Pyrotechnics, 1986, 14(11): 45-52.
- [2] 符全军, 杜宗昱, 兰海平. UDMH/NTO 双组元凝胶推进剂的制备及性能研究[J]. 火箭推进, 2006, 32(1): 48-53.
- [3] 梁小强. 凝胶试验系统的设计及试后处理工艺[J]. 火箭推进, 2006, 32(4): 51-53.
- [4] 杜宗昱, 刘凯强, 符全军. 过氧化氢凝胶化技术研究[J]. 火箭推进, 2006, 32(2): 52-57.

(编辑: 马 杰)

(上接第 48 页)

故障检测算法原理简单, 易于实现, 容易保证系统的实时性要求。能适应从起动到关机的各种不同的工况, 同时考虑了测量及工况调整偏差等影响因素对该系统的影响, 安全带可根据实际工况调整, 有一定的自适应性和容错能力。门限值根据试车统计结果确定, 减少了人为因素。

系统灵活, 经过简单的改造和训练即可用于其他型号发动机试车, 并已推广应用于某新型号发动机地面热试车, 发挥了良好的作用。

## 参考文献:

- [1] 张育林, 吴建军. 液体火箭发动机健康监控技术[M]. 北京: 国防科技大学出版社出版, 1998.

- [2] 陈启智. 液体火箭推进系统健康监控技术的演变[J]. 推进技术, 1997, 18(1): 1-4.
- [3] Michael W, Hawman. Framework for a Space Shuttle Main Engine Health Monitoring System[R]. NASA-CR-185224.
- [4] Fiorucci T, Lakin II D. Advanced Engine Health Management Applications of the SSME Real-Time Vibration Monitoring System[R]. AIAA 2000-3622.
- [5] 朱恒伟, 王克昌, 陈启智. 基于数据统计的液体火箭发动机地面试车故障检测算法 [J]. 推进技术, 1997, 18(1): 43-47.
- [6] 刘洪刚, 谢廷峰, 丁伟程, 吴建军. 液体火箭发动机实时故障检测与报警原型系统的设计与实现 [J]. 火箭推进, 2005, 31(4): 21-25.

(编辑: 马 杰)