

## 膏体燃气发生器启动特性研究\*

刘成浩, 封 锋, 曹钦柳

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘 要:** 设计了一套膏体燃气发生器, 进行了膏体燃气发生器启动试验, 包括膏体燃气发生器流量实验, 单次和重复启动试验, 以研究基于气源供给方式的流量可调膏体燃气发生器启动特性, 探索使用黑火药点火和热流挂管余热重复启动方案的可行性及其对内弹道特性的影响。结果表明膏体燃气发生器单次和重复启动效果良好, 单次启动试验验证了燃烧室压力受供给流量控制, 可实现推力可调, 燃烧室工作压力分别为1.2MPa和1.9MPa, 重复启动试验验证了重复启动方案的可行性, 重复启动间隔8s; 由于膏体推进剂剪切稀化的特性导致膏体燃气发生器内弹道曲线呈缓慢向上爬升趋势, 点火初期燃速与燃烧室压力匹配过程会出现振荡燃烧现象; 膏体推进剂中的气泡以及工作过程中反向传热均对内弹道特性产生影响; 膏体燃气发生器燃面位置和燃面大小的控制仍为膏体燃气发生器启动过程中的一系列难点。

**关键词:** 膏体燃气发生器; 膏体火箭发动机; 多次启动; 内弹道; 燃烧震荡

中图分类号: TJ55; V512 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2018) 02-0374-06

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2018.02.016

## Study on Starts of Pasty Propellant Gas Generator

LIU Cheng-hao, FENG Feng, CAO Qin-liu

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** A pasty propellant gas generator was designed and a relatively complete start-up test was finished with it, including the determination of average flow rate of the gas generator, single and repeated start test. The purpose was to study the start-up characteristics of the flow adjustable paste gas generator based on gas pressure driven. The feasibility of using black powder ignition and repeating start-up with heat pipe, and its influence on the interior ballistic characteristics were explored. The results show that the paste gas generator has a good single and repeated start-up effect. The single start test verifies that the combustion chamber pressure was controlled by the propellant flow rate, and the thrust could be adjusted by it, and the working pressure of the combustion chamber is 1.2MPa and 1.9MPa. The repeated start test verified the feasibility of the scheme, and the shutdown time was 8s. It was found that the characteristics of shear-thinning of pasty propellant results in a slow upward trend in the internal ballistic curve. At the beginning of the start-up, combustion oscillation was found in combustion chamber during the matching process of burning rate and combustion chamber pressure. The bubble in the pasty propellant caused a certain pressure fluctuation on the internal trajectory and the pasty propellant rheological characteristics were affected by the heat transfer. The control of the position and size of the burning surface area is still a series of difficulties of the pasty propellant gas generator starts.

**Key words:** Pasty propellant gas generator; Pasty propellant rocket; Multiple starts; Internal trajectory; Combustion oscillation

\* 收稿日期: 2016-12-28; 修订日期: 2017-02-21。

基金项目: 航天科技创新基金 (CASC03-02); 中央高校基本科研业务费专项基金 (30920140112001)。

作者简介: 刘成浩, 男, 硕士生, 研究领域为膏体和固体推进技术。E-mail: bjliuchenghao@163.com

通讯作者: 封 锋, 男, 博士, 副教授, 研究领域为航空航天推进理论与工程。E-mail: nust203@aliyun.com

## 1 引言

膏体燃气发生器是由膏体火箭发动机演变而来的一种流量可调燃气发生装置。其主要优点为体积小,推进剂密度同固体推进剂相当,装填系数高,推进剂安全性稳定性好,流量调节比大,可重复启动,根据流量的调节可实现推力可调。膏体燃气发生器应用范围非常广泛,在军事领域,膏体燃气发生器可用于战略导弹弹头中段制导的姿态发动机和末段制导修正发动机,以及动能武器弹头发动机等,在航天领域,膏体燃气发生器可应用于火箭内部燃气伺服系统及卫星用变轨调姿发动机等<sup>[1,2]</sup>。

以前苏联为代表的将固体推进剂改性,类似于未固化彻底的固体推进剂,称为膏体推进剂<sup>[3]</sup>。膏体推进剂是一种新型推进剂,其既具有固体推进剂安全、易存储低毒的优点,又具有液体推进剂具有流量可调的特性<sup>[4]</sup>。膏体推进剂属非牛顿流体,静止时具有较大粘度,兼具一定塑性,可长时间保持固态,同时又具有触变性,在剪切作用下可变稀流动,故被认为是21世纪的高级化学推进剂之一<sup>[5~7]</sup>。

国外的膏体推进技术研究起步较早,其技术水平相对领先,从最初理论设想到进行大量的探索性试验研究,再到目前进行的膏体火箭发动机地面试验和飞行试验,已形成一套较多类别较多方向的膏体火箭发动机技术体系。据乌克兰 Kukushkin V H 教授在1992~1993年AIAA发表的两篇报告<sup>[8,9]</sup>,当时前苏联(现俄罗斯和乌克兰)对膏体推进技术的研究已有几十年经验,前后开展了几十个项目研究,已走在美国前面。据 Kukushkin V H 教授介绍,为验证膏体火箭发动机的整体性能,前苏联研制了多种试验用膏体火箭发动机,有采用液压方式驱动依靠热格栅余热重复启动的膏体火箭发动机,也有由一个推进剂储箱带多个可控燃烧室的膏体火箭发动机,其可用于加速减速等多方向推力控制。据有关文献报道当时俄罗斯、乌克兰对膏体推进技术的研究已解决了膏体推进剂和膏体火箭发动机的关键技术,可将膏体火箭发动机应用于宇宙飞船,其发动机推力调节范围达到80:1,发动机可在60s内不依靠附加点火器可再次启动,总工作时间达到300s以上<sup>[10]</sup>。俄罗斯还将膏体火箭发动机用于改进“喀秋莎”、“暴风雪”及“闪电”等型号导弹,使其射程增加约30%;将膏体火箭发动机应用于气象火箭“天空”型号上也已数年之久;同时针对鱼雷和深水炸弹用膏体推进剂也做过大量得研究<sup>[9,11]</sup>。美国也曾对弹用膏体推

进剂的研究进行过有关报道,其研制的膏体推进剂配方为:TETN 20.1%, $\text{NH}_4\text{NO}_3$  53.8%,淀粉胶凝剂4.0%, $\text{H}_2\text{O}$  10%,该膏体推进剂具有高的冲击稳定性,在压力小于6.3MPa时不会被点燃<sup>[12]</sup>。

国内也有一批人始终进行着膏体推进技术的研究,周守强等<sup>[13]</sup>研究了将复合等离子点火方法应用于膏体火箭发动机启动过程,结果表明复合等离子点火时间较长,不会出现点火压力峰,可满足膏体推进剂火箭发动机多次启动要求;张家仙等<sup>[14]</sup>研究了喷嘴型面对膏体火箭内弹道的影响,认为喷嘴型面的变化对发动机工作平衡时间影响很大;裴庆等<sup>[15]</sup>研究了GAP/ADN/nano-Al膏体推进剂的能量特性与激光点火特性,结果表明膏体推进剂点火延迟时间和点火能量随激光功率密度增加而减小,配方中ADN的增加使得膏体推进剂具有更好的激光点火特性;张明信等<sup>[16]</sup>对膏体推进剂点火和燃烧特性进行了研究,研究了PEPA/AP推进剂燃速与燃温性质;周超等<sup>[17]</sup>提出一种基于变频电机与螺杆传动的膏体推进剂供给系统方案,其可进行流量的精确控制调节。近几年又出现了大量针对膏体推进剂管道流变特性及壁面滑移问题的研究,如文献<sup>[18~24]</sup>等,而对于膏体火箭发动机试验过程相关的文献相对较少。

本文以膏体燃气发生器的研究为背景,完成了一套膏体燃气发生器的设计,进行了膏体燃气发生器流量的测量以及单次和重复启动试验,获得了相应的压力数据并对其燃烧室压力特点进行分析总结,为膏体燃气发生器的研究提供相应的参考依据。

## 2 试验系统及方案

### 2.1 试验系统

试验系统包括:高压氮气源及其管路组件、活塞式储料罐、电磁阀、膏体燃气发生器(包含单向切断阀和推力组件)、膏体推进剂、试验台架和测控系统,试验系统原理如图1所示。

试验以高压氮气瓶(常温)为膏体推进剂供给驱动气源,经过滤减压后以稳定压力作用于储料罐活塞,驱动膏体推进剂在管道内流动,通过电磁阀控制气源开关从而间接对膏体推进剂的供给进行控制。膏体燃气发生器为主动式闭合结构,其单向切断阀可在一定压力下打开,从而使得膏体推进剂流入燃烧室,在储料罐活塞不施加压力情况下,其单向切断阀为关闭状态,可阻隔燃烧室与储料罐从而实现防回火功能。其工作过程为:高压气源挤压储料罐活

塞推动膏体推进剂打开单向切断阀,膏体推进剂进入燃烧室悬挂于热流挂管,此时点火器开始点火燃烧,工作结束时关闭高压气源电磁阀,释放储料罐内残余压力,单向切断阀关闭,阻隔燃烧室火焰,实现膏体燃气发生器熄火。重复启动时,只需重复供给膏体推进剂即可实现热流挂管余热点火。

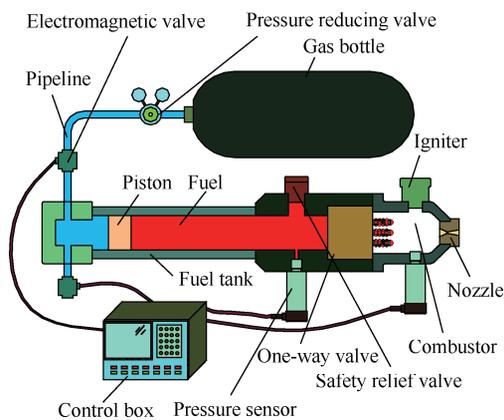


Fig. 1 Schematic of experimental device

试验用测控系统为南京理工大学203教研室自主研制的测控系统,其兼具有电磁阀控制功能和多路压力采集等功能。试验用膏体推进剂如图2所示,该推进剂为单组元膏体推进剂,密度为 $1.35\text{g}/\text{cm}^3$ ,静态燃温约 $1200\text{K}$ ,产气量约 $918\text{L}/\text{kg}$ ,具有良好的点火性能、流动性能和挤压稳定性。



Fig. 2 Pasty propellant

## 2.2 试验方案

试验包括膏体燃气发生器流量实验,单次和重复启动试验。

膏体燃气发生器流量实验采用不加燃烧室的膏体燃气发生器,进行模拟不同供给压力下膏体燃气发生器工作过程,进而对膏体推进剂的流量进行测量得到不同压力情况下的膏体燃气发生器流量。对实验数据进行拟合得到膏体燃气发生器平均流量曲线。

膏体燃气发生器单次启动试验采用在两种储箱压力情况下,测试膏体燃气发生器工作特性并得到其内弹道特性曲线。试验用膏体推进剂在保温箱中保温为 $25^\circ\text{C}$ ,单次启动试验气源额定工作时间分别为 $11\text{s}$ 和 $15\text{s}$ 两次,点火药量分别为 $1\text{g}$ 和 $2\text{g}$ ,点火延迟时间均为 $1\text{s}$ ,喷管喉部直径均为 $2.5\text{mm}$ 。

膏体燃气发生器重复启动试验,测试膏体燃气发生器在两个脉冲情况下的重复启动性能,验证重复启动方案的可行性并得到其内弹道特性曲线。试验用膏体推进剂在保温箱中保温为 $25^\circ\text{C}$ ,在同一供给压力下进行重复启动,气源两次脉冲工作时间均为 $6\text{s}$ ,两次脉冲间隔 $8\text{s}$ ,点火药量 $1\text{g}$ ,点火延迟时间 $0.5\text{s}$ ,喷管喉部直径 $2.5\text{mm}$ 。

实现发动机多次启动的关键在于:

- (1)首次点火的稳定性。
- (2)单向燃料供给机构和防止熄火后逆向燃烧结构的可靠性。
- (3)重复启动点火所需的热源问题。

## 3 结果与分析

### 3.1 膏体燃气发生器流量实验

膏体燃气发生器流量实验测量在一定温度下( $25^\circ\text{C}$ ),不同供给压力 $p$ 下一段时间内膏体燃气发生器供给的膏体推进剂质量 $m$ ,其测量数据与处理结果如表1所示。

由表1可以看出,膏体推进剂流量随压力的增加而增大,根据膏体推进剂流量测量实验得到的不同压强下的平均质量流量进行线性拟合,得到膏体燃气发生器不同压力 $p$ 下的供给流量曲线如图3所示。

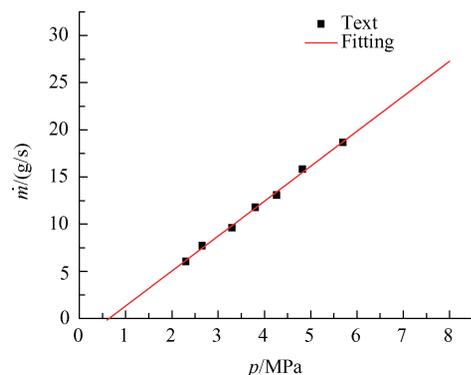


Fig. 3 Fitting curve of mass flow rate

拟合得到膏体燃气发生器平均流量方程为

$$\dot{m} = 3.705p - 2.376 \quad (1)$$

从图3中可以看出,在一定温度一定供给压力条件下,膏体推进剂的流动速度非常缓慢,膏体燃气发

生器平均流量与挤压压力近似呈线性关系。膏体推进剂为非牛顿流体,其具有剪切稀化的属性,瞬时流量曲线为非线性,但在本实验中由于流速缓慢,供给时间较短故可将其平均流量用于膏体燃气发生器工作过程流量的估算<sup>[24]</sup>。

Table 1 Data of flow test & data processing

t/s	p/MPa	m/g	Mass flow rate/(g/s)	Average/(g/s)
10	2.3	60.5	6.05	6.05
10	2.3	60.7	6.07	
10	2.3	60.3	6.03	
10	2.65	76.4	7.64	7.723
10	2.65	78.3	7.83	
10	2.65	77	7.7	
10	3.3	96.7	9.67	9.62
10	3.3	95.8	9.58	
10	3.3	96.1	9.61	
10	3.8	119.3	11.93	11.796
5	3.8	58.1	11.62	
5	3.8	59.2	11.84	
3	4.26	38.4	12.8	13.077
3	4.26	40	13.333	
3	4.26	39.3	13.1	
3	4.82	47.7	15.9	15.833
3	4.82	46.5	15.5	
3	4.82	48.3	16.1	
3	5.7	57.3	19.1	18.866
3	5.7	55.8	18.6	
3	5.7	56.7	18.9	

### 3.2 单次启动试验

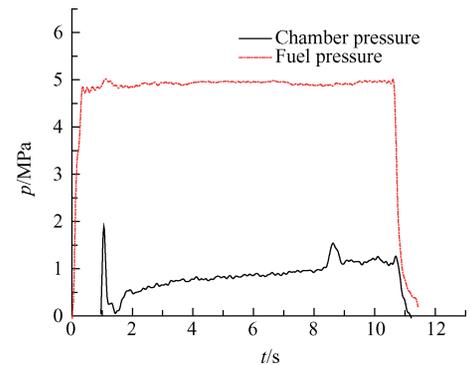
根据不同供给压力情况下的单次启动试验,得到两次推进剂储料罐压力曲线与燃烧室压力曲线,如图4所示,对该曲线进行数据整理获得关键数据如表2所示。

根据平均流量方程(1)计算得到的,第1次与第2次单次启动试验平均流量分别为15.8g/s和22.8g/s。

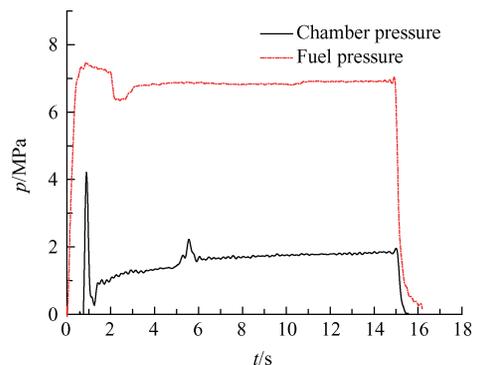
对比图4中(a)和(b)两次试验储料罐压力曲线,可以看出推进剂供给压力较为平缓,始终保持在一个相对稳定的范围内。在供给压力曲线初始段,可以看到出现压力波动,图(b)中更加明显。分析认为,由于点火压力峰的出现,使得燃烧室压力被膏体推进剂反向传播到储料罐内,从而出现压力波动。储料罐压力曲线结尾处出现拖尾段现象,这是由于储料罐每次工作结束后会有一个压力释放过程,故出现排气拖尾段。

对比图4中(a)和(b)两次试验可以看出燃烧室

压力曲线初始段均有一压力峰,平稳段呈缓慢向上爬升趋势,其结尾段与固体火箭发动机类似有一明显拖尾段。燃烧室压力曲线初始段的压力峰为点火压力峰,图4(a)试验采用1g黑火药点火,可看出点火压力峰约为2MPa,图4(b)试验采用2g黑火药点火,可看出点火压力峰约为4MPa,可见点火压力峰随点火药量增加而增大,表明点火药量的控制对于膏体燃气发生器首次点火具有很大的影响,要根据点火药量控制点火压力峰大小,从而控制膏体推进剂点火过程的初始燃速。在图4中(a)和(b)试验点火压力峰之后燃烧室均出现压力震荡现象,分析认为这种震荡现象是由于点火压力峰导致膏体推进剂燃速突变,并随燃烧室压力不断变化,此时的燃烧室压力与燃速均处于动态,二者相互匹配出现震荡燃烧现象。由两次试验流量的大小和两次试验燃烧室平衡压强大小对比可以看出,膏体燃气发生器流量越大其燃烧室平衡压强越高,从而产生的推力越大,故认为可以通过调节膏体燃气发生器的流量实现推力可调。



(a) First start



(b) Second start

Fig. 4 Single start pressure of chamber and fuel

燃烧室压力曲线主体呈缓慢向上爬升现象,其主要原因是膏体推进剂属性为剪切变稀型非牛顿流体,其粘度随剪切力的增加而减小,在膏体推进剂流

动过程中其流量呈非线性增加趋势,从而导致燃烧室压力出现缓慢爬升现象。同时反向传热也对膏体推进剂的温度产生影响,膏体推进剂粘度随温度的升高而降低导致燃烧室流量增加。

由图4(a)中看出燃烧室压力曲线在8s~9s时产生压力突变,在图4(b)中5s~6s时也有出现,分析认为是燃烧室燃面出现突变导致出现压力波动,由于在此前的流量测量实验中遇到过突然挤出气泡的情况,初步分析认为其原因极有可能是推进剂在装填过程中混入了气泡,导致气泡在被高压挤出时爆开使燃烧室燃面产生波动,从而导致出现燃烧室压力突变现象。

Table 2 Data of single start test

Parameter	First	Second
Fuel pressure/MPa	4.9	6.8
Push time/s	11	15
Rocket firing duration/s	10	14
Black powder/g	1	2
Ignition pressure peak/MPa	1.9	4.2
Chamber pressure/MPa	0.9~1.2	1.7~1.9

### 3.3 重复启动试验

重复启动试验得到燃烧室压力曲线与储料罐压力曲线,如图5所示。根据两条压力曲线数据整理获得关键数据如表3所示。

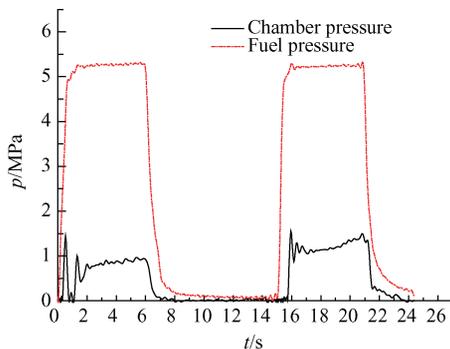


Fig. 5 Multiple start pressure of chamber and fuel

Table 3 Data of multiple start test

Parameter	First pulse	Second pulse
Fuel pressure/MPa	5.25	5.25
Push time/s	6	6
Rocket firing duration/s	8	8
Black powder/g	1	--
Ignition pressure peak/MPa	1.4	--
Chamber pressure/MPa	0.85~0.93	1.2~1.4

根据表3中试验得到的储料罐压力数据,结合膏体燃气发生器平均流量方程(1),计算得到重复启动试验平均流量为17.1g/s。

从图5储料罐压力曲线可以看出两次脉冲压力上升速度很快,供给压力较为平缓,降压过程带有排气拖尾段,两次脉冲的储料罐压力曲线一致性很好,其压力均为5.25MPa,两次脉冲间隔约8s。熄火期间储料罐内压力略高于大气压,其原因可能是排气阀没有完全把储料罐内残余压力排除,但膏体燃气发生器单向切断阀已关闭,故较小的残余压力并不会影响其防回火作用。

从图5燃烧室压力曲线可以看出,膏体燃气发生器两次脉冲工作过程均正常。一脉冲曲线初始为一个较大点火压力峰和一段压力震荡,曲线主体呈缓慢上升趋势,其稳定压强约在0.93MPa左右,一脉冲结束有一拖尾段。二脉冲初始没有明显压力峰直接出现压力震荡,压力曲线主体也呈缓慢上升趋势,其稳定压强约在1.4MPa左右,二脉冲工作结束也同样存在一拖尾段。两次脉冲中间间隔8s,此时燃烧室压力处于大气压状态。

从燃烧室压力曲线可以看出一脉冲的较大压力峰为点火压力峰,一脉冲出现的压力震荡现象与之前分析的情况基本相同,是振荡燃烧导致的。二脉冲为重复启动过程,启动方式为热流挂管余热启动,其不存在点火压力峰,当膏体推进剂被挤出时还没有完全被点燃,只是高温接触面开始燃烧,燃烧开始后膏体推进剂燃面突然增大导致出现一较小压力峰,之后燃速与燃烧室压力进行匹配,出现振荡燃烧,直至震荡消失。

分析认为,两次脉冲过程燃烧室压力呈缓慢上升趋势,与前文所述的原因相同,均为非牛顿流体剪切变稀导致流量上升,从而引起燃烧室压力上升。二脉冲平衡压强略高于一脉冲,其主要原因是二脉冲的燃面与一脉冲燃面位置不同,振荡燃烧过后二脉冲燃面稳定后略大于一脉冲燃面,其燃面大则燃气产量大导致燃烧室平衡压强更高。不排除一脉冲结束后,反向传热导致储料罐内膏体推进剂的温度升高流变性更好,在二脉冲工作过程中其流流量更大,从而燃烧室平衡压力更高。燃烧室两次脉冲结束后均出现了拖尾段,这是由于燃面距离推进剂切断处有一段距离,导致存在一定量的余药,余药燃烧导致燃烧室出现明显拖尾段,二脉冲拖尾段更加明显进一步验证了其燃面到切断位置距离更远,使得其燃面更大。

## 4 结 论

通过本文研究,得到如下结论:

(1)应用气源供给方式的膏体燃气发生器单次和重复启动效果良好,获得了储料罐供给压力曲线和内弹道曲线,单次启动试验验证了膏体燃气发生器不同流量下可实现推力可调,燃烧室工作压力分别为1.2MPa和1.9MPa,重复启动试验验证了重复启动方案的可行性,重复启动时间间隔8s。

(2)膏体燃气发生器内弹道曲线呈缓慢上升趋势,是由于膏体推进剂具有剪切稀化的属性,导致其同一压强下稳定工作过程中流量逐渐升高,使得燃烧室压力升高。

(3)点火初期会出现震荡燃烧,是由于燃烧室内燃速与压力的自匹配导致燃面变化出现燃烧震荡波动。

(4)膏体推进剂在装填过程中出现气泡,气泡被挤出时导致燃烧室压力出现波动,对内弹道特性产生一定影响,膏体燃气发生器的反向传热也对推进剂流变性产生一定影响。

(5)膏体推进剂燃面位置和燃面大小的控制问题是膏体燃气发生器启动过程中的一系列难点。

### 参考文献:

- [ 1 ] 石 建. 膏体火箭发动机的性能特点及应用前景[J]. 飞航导弹, 2008, (10): 61-63.
- [ 2 ] 沈海琴. 膏体推进剂火箭发动机研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2004, 2(4): 32-35.
- [ 3 ] 王宝成, 李 鑫, 赵凤起, 等. 凝胶推进剂研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2015, 13(1): 1-6.
- [ 4 ] 徐亚龙, 陈淑秉. 膏状推进剂——一种新型的能量管理型推进剂[C]. 西安:中国宇航学会固体火箭推进专业委员会年会, 2001.
- [ 5 ] Robert H Frisbee. Advanced Propulsion for the XXIst Century[R]. AIAA 2003-2589.
- [ 6 ] 张广科, 山世华, 樊 超. 卫星推进剂技术发展趋势概述[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2012, 10(1): 71-74.
- [ 7 ] 陈 炜, 张蒙正. 凝胶推进剂的现状与期待[C]. 大连:中国化学会全国化学推进剂学术会议, 2011.
- [ 8 ] Kukushkin V H. State and Prospects of Solid Propellant Rocket Development[R]. AIAA 92-3872.
- [ 9 ] Kukushkin V H. The Pasty Propellant Rocket Engine Development[R]. AIAA 93-1754.
- [ 10 ] 闫大庆, 周宏民, 单建胜. 凝胶/膏状推进剂研究发展状况[J]. 火箭推进, 2003, 29(1): 38-46.
- [ 11 ] Ivanchenko Anatoliy M, Bondarenko Sergiy G, Protsan Yulian V. Deep Regulation and Reusable Rocket Propulsion Using Premixed Slurry Propellant[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2012, 28(5).
- [ 12 ] Burkhardt W C, Diehl M W, Spence W F. Gel Propellant Ammunition[P]. US: 5189249, 1993.
- [ 13 ] 周守强, 鞠玉涛, 周 超, 等. 膏体推进剂等离子弧多次点火引弧器的设计[J]. 火工品, 2007, (6): 29-32.
- [ 14 ] 张家仙, 郑 亚, 鞠玉涛. 喷嘴型面对膏体火箭内弹道的影响[J]. 弹道学报, 2009, 21(4): 76-78.
- [ 15 ] 裴 庆, 郝海霞, 赵凤起, 等. GAP/ADN/nano-Al膏体推进剂的能量特性与激光点火特性[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2015, 13(4): 55-59.
- [ 16 ] 张明信, 张胜勇. 膏体推进剂点火和燃烧特性的实验研究[J]. 固体火箭技术, 2003, 26(2): 30-32.
- [ 17 ] 周 超, 鞠玉涛, 周守强, 等. 膏体推进剂供给系统新方案探索与初步验证[J]. 力学与实践, 2008, 30(5): 62-64.
- [ 18 ] 刘晓辉. 膏体流变行为及其管流阻力特性研究[D]. 北京:北京科技大学, 2015.
- [ 19 ] 张家仙, 郑 亚. 膏体推进剂直圆管流动的壁滑移修正[J]. 固体火箭技术, 2011, (3): 311-313.
- [ 20 ] 曹 琪, 封 锋, 武晓松. 基于壁面滑移修正的凝胶推进剂流变本构方程[J]. 推进技术, 2013, 34(9): 1279-1283. (CAO Qi, FENG Feng, WU Xiao-song. Rheological Constitutive Equations of Gel Propellants Based on Wall Slip Correction[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(9): 1279-1283.)
- [ 21 ] 曹 琪, 封 锋, 武晓松, 等. 凝胶推进剂供给管流的压降数值研究[J]. 推进技术, 2014, 35(5): 701-707. (CAO Qi, FENG Feng, WU Xiao-song, et al. Numerical Study on Pressure Loss for Gel Propellants Supply Pipeline[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2014, 35(5): 701-707.)
- [ 22 ] 刘凯强, 赵珂如, 陈香李, 等. 推进剂模拟液的室温快速胶凝化及其流变学性能[J]. 含能材料, 2011, 19(4): 415-419.
- [ 23 ] 吕少一, 邵自强, 王飞俊, 等. 新型含能胶凝剂的制备及其凝胶流变性能[J]. 火炸药学报, 2011, 34(1): 49-53.
- [ 24 ] 张胜勇, 张明信. 膏体推进剂流动特性实验研究[C]. 上海:中国宇航学会固体火箭推进专业委员会年会, 2004: 521-523.

(编辑:张荣莉)