

高能液体推进剂研究现状和应用前景

杜宗罡, 史雪梅, 符全军

(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

摘要: 高能液体推进剂的发展有四个方面: 金属化凝胶推进剂、高密度吸热型碳氢燃料推进剂、纳米材料液体推进剂、添加含能材料的液体推进剂。本文围绕高能液体推进剂的发展方向, 综合论述了国内外的研究现状和应用前景分析, 并提出了我国技术发展的初步思路。

关键词: 高能液体推进剂; 金属化凝胶; 吸热型碳氢燃料; 添加纳米材料; 添加含能材料
中图分类号: V434 文献标识码: A 文章编号: (2005)03-0030-06

Development status and prospect of higher energy liquid propellant

Du Zonggang, Shi Xuemei, Fu Quanjun

(Xi'an Aerospace Propulsion Test Technique Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: The four directions of higher energy liquid propellant development include: metallized gel, higher energy and consistency hydrocarbon fuels, nanometer materials propellant, adding energetic materials liquid propellant. Based on the four developmental trends of the higher energy liquid propellant, this paper discusses the present studying status and developing trends both in China and abroad. The initial ideas of the technique development are also presented.

Key words: higher energy liquid propellant; metallized gel; hydrocarbon fuels; nanometer materials; energetic materials

1 引言

1950 年至今, 各国对氟类、硼类、胂类、烃类、醇类、过氧化氢、液氢等液体推进剂先后展开了全面研究, 给第二、三代液体火箭发动机的

发展创造了良好条件, 并促进了洲际导弹、人造卫星和宇宙飞船的迅速发展。目前液体火箭发动机多用于发射卫星和空间飞行器, 我国“长征”系列运载火箭均使用的是液体推进剂。

迄今为止, 液体推进剂仍然是各国运载火箭、空间飞行器和武器动力系统使用量最大的推进

收稿日期: 2004-10-25; 修回日期: 2004-12-15。

作者简介: 杜宗罡(1971—), 男, 硕士, 研究领域为应用化学。

剂。目前航天领域采用的液体推进剂以肼类燃料（无水肼、甲基肼、偏二甲肼等）、硝基类氧化剂（四氧化二氮、红烟硝酸等）、低温推进剂（液氧、液氢）为主，通过高性能改进研究可以为导弹武器实现小型化、高速化和远程化等目标提供更为广阔的发展空间。

对于高能液体推进剂的基本性能，首先要求液体推进剂具有更高的热值、密度和比冲。要获得高的比冲，必须满足热值尽可能大、比容尽可能大、燃烧产物的比热与 C_p/C_v 比较尽可能小（ C_p 恒压比热， C_v 恒容比热）以及推进剂密度尽可能大；高能液体推进剂与一般液体推进剂一样，还要具备良好的点火启动性能、燃烧稳定安全性能；高能液体推进剂与金属非金属材料相容性要好，毒性要小；生产工艺尽可能简单，原料来源丰富，价格便宜；无污染或轻微污染。美国和俄罗斯等航天大国较早对此进行了研究，部分高能推进剂已进行了飞行试验，而我国起步较晚，近几年才在一些领域展开研究和试验。

目前，高能液体推进剂的研究主要有如下四个方面：金属化凝胶推进剂；高密度吸热型碳氢燃料推进剂；纳米材料液体推进剂；添加含能材料的液体推进剂。

2 金属化凝胶推进剂

2.1 基本概念

金属化凝胶推进剂是在液体推进剂中加入胶凝剂形成凝胶，并加入高热值金属粉末混合均匀，使金属粒子悬浮于其中而形成稳定的胶状物质。

金属化凝胶推进剂是化学推进剂中的一种新型推进剂，它既克服了液体推进剂密度低、储存性差、毒性大、易泄漏等缺点，又克服了固体推进剂燃烧速率难以随机控制、发动机不易多次启动的缺点，具有高密度、高燃烧能量、高安全性、长期储存性、可调节推力、可多次启动、所用发动机结构简单、能实现能量管理（或灵活能量控制）等优点，是导弹武器和新一代大型运载火箭推进剂的发展趋势，可望在军事、航天领域得到广泛应用。

2.2 研究现状

美国开展金属化凝胶推进剂技术研制工作始

于上世纪40年代“添加固相颗粒的液体燃料”概念研究。在一系列的研究计划中，已研究了这类燃料用于灵巧战术弹、拦截弹（包括动能杀伤器及助推器）、运载火箭上面级、先进飞行员弹射系统以及吸气式发动机等方面的可靠性与安全方面的优势，大量的金属化凝胶推进剂配方已经得到研究和实验。例如，NASA 路易斯研究中心主持了金属化凝胶研究工作，1947~1957年间，着重于烃类(JP)中加入铝、镁、硼等金属添加物以增加推力及冲压发动机的飞行距离；其后关于火箭推进系统金属化研究转向自燃推进剂的组份上，如肼、甲基肼、四氧化二氮、加阻蚀剂的红发烟硝酸（IRFNA）和过氧化氢等。

1959~1965年间，美国空军研制成 Alumizine（铝-肼）和 Berblizine（铍-肼）两种凝胶燃料，此后，又表征和评估了高能液体推进剂的性能，并且开发了与 MZCM（导弹控制）凝胶和 IRFNA 凝胶流变性相适应的混合燃料；美国空军还进行了碳药浆燃料的研究工作，如专利 SFz 碳浆燃料（含碳的 JP-10）。在此期间，美国海军则成功研制了 NOTSGEL-1（肼中含60%的铝）和 NOTSGEL-2（肼中含80%的铝）两种高能推进剂，1969~1973年间，美国海军利用三种烃类凝胶燃料进行了高能冲压发动机燃烧研究。

目前，NASA 路易斯研究中心正在进行将 Al/RP-1/O₂ 体系用于火箭发动机上的研究。TKW 公司已作了大力神IV运载器中使用的燃料体系考察研究。在 FMTI 项目下，1998年11月，TRW 公司与 AMCOM 公司在阿拉巴马州首次点火试验成功，试验验证了一些关键性能，表明该体系可显著增大现有以固体发动机为动力导弹的射程，还可满足与射程和速度无关的战术飞行其它要求，并进行能量管理；1999年3月30日，在佛罗里达州的爱格林空军基地进行了首次飞行试验，试验获得成功，导弹在布莱德利发射车上点火起飞后，沿预定的飞行弹道飞行了8km，在51s的飞行期间点火5次。该试验验证了通过高效的能量管理实现多任务或远距离飞行的能力，实验中推进系统没有发生增压气体和凝胶推进剂泄露情况。

美国金属化凝胶推进剂在动能杀伤器 KKV 上的应用研究，考虑到了先进拦截器推进控制系

统的要求：即需要满足非敏感弹药低成本、低重量、高装填密度，而同时又不牺牲过多的性能。在美国陆军战略系统防御司令部（USASDC）动能武器管理局的液体/凝胶推进剂主发动机的发展合同下，由航空喷气推进分部开发了新一代动能杀伤武器控制系统，该系统于 1993 年进行了热点火演示试验，完全可满足地基或海基战区导弹防御系统（TMD）的战术拦截器的总冲要求。

2.3 应用前景

大多数液体推进剂都可改性为金属化凝胶推进剂。当贮箱压力低于胶体屈服应力时，推进剂呈不流动的半固态；当贮箱压力高于胶体屈服应力时，推进剂呈流动状态。采用金属化凝胶推进剂的轨姿控发动机，不仅进一步提高了可靠性和贮存性，具有液体推进剂的可多次起动、调节精度高、适应性广的优点，而且还具有更高的密度比冲、安全性能、贮存性能以及免维护性能。我国已开展了金属化凝胶推进剂的研究工作，这必将在民用航天和武器推进系统有广泛的用途。

2.3.1 用于运载火箭

大力神 IV 运载火箭如果用金属化混肼-50 胶体代替混-50，有效载荷可提高 11%。

2.3.2 用于重复使用运载器

用四氧化二氮/金属化甲基肼凝胶助推器代替航天飞机固体助推器，助推器长度可以减少 5m。

2.3.3 用于战术导弹

金属化凝胶用于导弹推进系统，可以完全取代目前多型号单一用途固体导弹。凝胶推进剂符合“钝感弹药要求”，燃烧时生成的烟极少，可以在导弹飞行过程中多次起动或调节推力；凝胶推进剂泄漏后很快就凝固，不会造成很大危害。这对于空间有限的海军舰艇非常有利。

2.3.4 用于拦截导弹

先进的拦截导弹推进系统要求推进剂钝感又不能以牺牲高性能为代价，要求低成本、高能高密度，而金属化凝胶推进剂满足这些要求。

2.3.5 用于飞行器逃逸救生系统

美国将金属化凝胶推进剂用于飞行器逃逸系统，已进行了数次试验。目前，美国宇航局着重研究煤油凝胶和四氧化二氮/甲基肼凝胶。

3 高密度吸热型碳氢燃料推进剂

3.1 基本概念

高密度吸热型碳氢燃料是一种新型的推进剂，一般多指密度大于 0.70g/cm^3 、进入燃烧室之前发生化学反应裂解为小分子烯烃时吸收热量（化学热沉）、在燃烧室中能將所裂解的小分子烯烃完全转化为发动机推力而没有任何能量损失的一种燃料。这种燃料与传统燃料相比，不但可以使飞行器体积较小、有效载荷较大、安全性能良好，而且解决了飞行过程中的冷却问题，是未来数十年推进剂发展的方向之一。

3.2 研究现状

高密度吸热型烃类燃料研究有两个主要方向：高密度燃料和吸热燃料。高密度燃料一般指密度大于 0.70g/cm^3 ，其形态可以是液体或固体，组成可以是纯组分或多种烃类的混合物。人工合成高密度燃料以烃类为原料，通过加氢、异构化、分离提纯等工艺得到。其中密度较大的人工合成多环烃类燃料、高张力烃类燃料是各航天大国研究的重点，多环烃类如双环烃、立方烷类化合物等（四氢双环戊二烯密度 0.946g/cm^3 ，多金刚烷的密度是 1.09g/cm^3 ）。研究合成新型、由多个封闭环平面组成的具有空间立体构型的烃类燃料是获得高密度燃料的非常有效的途径，RJ-5 是现在公布密度最高的燃料，其比重大于 1，是由降冰片烯或降冰片二烯通过聚合得到二聚体，然后加氢饱和其双键得到。

吸热型烃类燃料化学反应过程研究有两个重点：一是催化脱氢，二是催化裂解。二十世纪 70~80 年代主要以催化脱氢为研究重点，催化脱氢反应吸热量大，反应产物单一且稳定，并产生大量氢气，对燃烧及催化剂有利，国外研究较多的是甲基环己烷（MCH）和十氢化萘的催化脱氢。MCH 的催化脱氢可以提供热沉 2.72MJ/kg ，满足马赫数 4~6 的飞行，缺点是催化剂为贵金属铂（Pt）系及贵金属熔融盐载体催化剂，成本高、易中毒。对原料环己烷纯度要求较高，增加了原料成本，催化脱氢产物为甲苯，对燃烧室不利。

二十世纪 90 年代，吸热型烃类燃料化学反应过程研究转向热裂解和催化裂解，燃料的裂解生

成乙烯、丙烯、丁烯等不饱和烃，有利于燃料吸热，且烯烃的碳原子越少吸收的热量越多，而不饱和烃则不利于反应的吸热。与热裂解相比，催化裂解需要的反应温度低，吸热反应速率快，产物的选择性高，同时生成的产物点火延迟期短，燃烧速率快，不利于结焦。1993年，美国进行了超高音速飞行器试验，利用了JP-7燃料裂解反应的高温热沉进行冷却。俄罗斯研制的T-15裂解性吸热燃料，质量燃烧热比T-6或JP-7大14%；在小于800℃的条件下裂解，总吸热能力大于4.6MJ/kg；在20℃~760℃温度范围吸热能力是其质量燃烧热的8%~10%，与液氢接近。JP-7燃料热裂解过程的实际化学热沉约为0.7MJ/kg，只达到理论值的2%。然而，在加入催化剂的情况下JP-7燃料（催化裂解）转化率甚至可达到100%。俄罗斯中央航空发动机研究所研制出一种引发剂，在500℃~630℃温度范围内，引发剂浓度小于0.8%时，能使燃料裂解速度提高2~7倍，丙式裂解起始温度低于100℃。

为了降低高速推进系统的温度，美国于1995年开发出热稳定性比JP-8高38℃的JP-8+100吸热燃料，2003年将使用热稳定性比JP-8高300℃的JP-900吸热燃料，2005年将发展吸热能力为JP-900吸热燃料10~15倍的endoJP吸热燃料，2015年将使用人工合成的吸热燃料。

美国军方认为如果在先进的高能高密度碳氢燃料研究领域取得突破，就能研究出体积较小的高超音速巡航导弹，因此美国特别重视高密度吸热型烃类燃料的开发。这种燃料是在碳氢燃料中加入特殊添加剂制成，热压下分解，释放出氢和烯烃，吸热能力比普通燃料高几倍，而且能将释放出的氢能全部转为推力，从而获得高速度，由于这种燃料能在常温下贮存，特别适合在先进导弹上使用。2002年5月底，美国海军研究部(ONR)和美国国防高级计划署(DARPA)，在美国宇航局兰利研究中心进行了高超音速巡航导弹冲压发动机地面试验，发动机采用吸热型碳氢燃料，模拟高度9万英尺，飞行速度达到马赫数6.5；2001年7月试射的洲际导弹即用吸热碳氢燃料作推进剂；德国也于2000年开始研究导弹与技术，导弹采用超燃冲压发动机和高能高密度碳氢燃料，飞行速

度大于马赫数6.5。据报道，在使用了高密度燃料后，可以使美国“战斧-II”型导弹的射程增加50%，运载能力提高17%，而且飞行器无污染。我国浙江大学和天津大学较早对高能碳氢燃料进行研究，已取得了部分进展，西安航天动力技术研究所也已着手对此进行立项研究，但离实际工程应用还有一定的距离。

3.3 应用前景

结合国内外研究现状，还有以下几方面基础工作值得我们进一步研究：

(1) 围绕高密度吸热型烃类进行筛选，并合成（用非石油原料生产）几种高密度吸热烃类燃料，研究其燃烧综合性能。

(2) 高密度吸热烃类推进剂热稳定性（积炭）研究，包括氧化积炭（ $T_1=163\text{℃}\sim 316\text{℃}$ ）和裂解积炭（ $T_2>482\text{℃}$ ），在防止积炭的研究中，防止氧化积炭最具有挑战性，深入研究结焦机理，开发高效复和结焦抑制剂。

(3) 多环烃类的高效催化剂的合成和(或)筛选：催化脱氢/催化裂解的催化剂合成及改进，包括组成、组分分布的有效控制、合成的廉价化以及对其酸性质和催化性能的进一步深入研究；对现有成熟催化剂的改性和新型催化剂的开发研究。

(4) 建立真实系统模拟装置以更好地筛选性能优良的燃料、催化剂、结焦抑制剂；高密度吸热烃类推进剂配方研究；高密度吸热烃类燃烧性能研究(着火延迟期等)及发动机试验。

高密度吸热碳氢燃料是未来武器系统的主要推进剂之一，研究的总目标就是要合成出热值不小于40MJ/L，密度不小于 1g/cm^3 ，总吸热能力不小于4.0MJ/kg的高密度吸热碳氢燃料，并可用于冲压式发动机支撑的各类运载火箭和导弹系列，如高超音速巡航导弹、洲际导弹等。

4 纳米材料液体推进剂

4.1 基本概念

在液体推进剂中添加金属或非金属颗粒，形成相对均匀的“混合物”，能大幅度提高液体推进剂的密度，筛选高热值的金属（如：Al、Be等）和非金属（如B、C等）作为添加物，可大大提高液体推进剂的燃烧热，从而显著提高推进剂比冲。

纳米材料是指一维、二维、三维尺寸在 1~100nm 范围内的颗粒状、片状或液状物质。由于其超细物性，能在液体中均匀的分散，具有良好的“混溶”作用，选用金属或非金属纳米材料添加到液体推进剂中，不仅可以达到两相物质的稳定均匀分散和长期贮存，而且可提高添加比例，从而大幅度提高液体推进剂的性能。

4.2 研究现状

纳米材料是二十世纪八十年代中期发展起来的新型多功能材料，由于纳米材料具有尺寸效应、表面与界面效应和量子、尺寸效应，利用这些性质可以克服传统材料的不足，实现传统材料所无法满足的需求，开拓许多崭新的应用领域。

在推进剂中添加纳米材料，可以改善推进剂的燃烧性能，燃烧效率得到很大的提高，燃速得到显著增大，从而实现大幅度提高比冲的目标。美国纳米材料液体推进剂预计将应用于“灵巧技术弹”、“拦截弹”（包括动能杀伤器 KKV 和助推器）、运载火箭上面级、先进飞行员弹射系统以及吸气式发动机等方面。

国内在液体推进剂中添加纳米材料的研究尚未开展，基于纳米材料液体推进剂的未来发展趋势，对这项技术开展研究将对改善现有武器性能、开发新型高性能武器和民用航天提供技术保障。

4.3 应用前景

纳米材料在液体推进剂中的应用，在军事领域主要是研制高性能液体推进剂，提高液体推进剂比冲、密度和贮存稳定性。根据美国对于“添加固相颗粒的液体燃料”应用研究情况，纳米材料液体推进剂预计可应用于：动能杀伤器 KKV 的动力装置；未来快速机动发射导弹武器系统，还可以改善现役导弹机动使用性能；新一代大运载、运载火箭上面级及飞行员弹射系统；吸气式发动机、宇宙飞船姿控发动机。

5 添加含能材料的液体推进剂

5.1 基本概念

在常规的液体推进剂中，添加一种或几种具有较高能量的材料，来提高液体推进剂的能量密度，从而可以形成一种新型的高能液体推进剂。

在液体推进剂中添加的含能材料可以是液体

也可以是固体，能够添加的液体包括硝基烷类和硝酸酯类，能够添加的固体主要含能材料，如 TNT、RDX、NC 等。

5.2 研究现状

硝酸酯和硝基烷类由于具有较高的能量特性，作为推进剂应用于鱼雷推进、运载火箭以及导弹系列推进上。国外对醇类的硝酸酯进行了广泛的研究，分别研究出了系列推进剂，如美国的 MK-46-1、MK-48、MK-49 鱼雷，英国的“矛鱼”鱼雷即美国的奥托-II，这些型号采用的都是以丙二醇二硝酸酯为主要组分的推进剂，美国、俄罗斯等国家对其的醇类的硝酸酯进行了广泛的研究，分别研究出了系列推进剂，如奥托系列推进剂。因此，研制以乙二醇二硝酸酯为主要组分的单组元推进剂，对满足武器系统和运载火箭上面级分析动力装置的需求具有十分重大的意义。

随着武器系统和航天技术的发展，对该类推进剂的品种和性能有了更高的要求，特别是乙二醇二硝酸酯（EGDN）作为能源剂，比丙二醇二硝酸酯具有更高的能量特性、更好的氧平衡和更好的比推力，在国外已得到更好的研究。国内的这类推进剂种类较为单一，就是以丙二醇二硝酸酯为主要成分的鱼雷-3（用作鱼雷推进剂）。西安航天动力试验技术研究所已初步研制出了乙二醇二硝酸酯为主要含能材料的新兴混酯推进奥托（OTTO），希望进一步能得到工程应用。国内近几年也已开展了添加固体含能材料的液体推进剂的研究工作。

5.3 应用前景

添加含能材料的液体推进剂作为一种新型的推进剂，在鱼雷推进系统、运载火箭、以及导弹系列推进系统有广泛的应用前景。

6 我国高能液体推进剂发展思路

我国高能液体推进剂的研究工作近几年才开始展开，而且研究单位只有少数几个，虽然取得了较大的成果，但与国外相比还有一定的距离。所以应借鉴美国、俄罗斯等发达国家的经验并结合国内实际和发动机设计试验需要展开研究。

（下转第 49 页）

长率趋于下降, 含有防老剂 D 提纯品的 NR 硫化胶的抗老化能力相对较好。

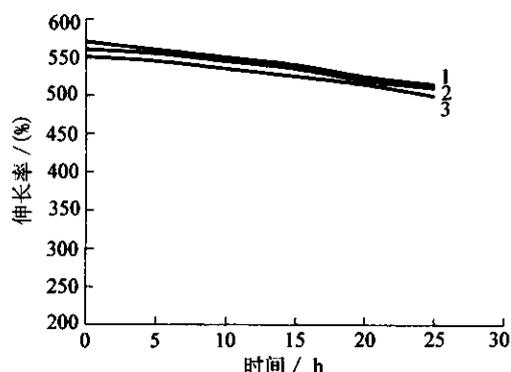


图4 100 老化 NR 伸长率变化曲线

1- 提纯品; 2- 工业品; 3- 空白

Fig.4 Extension rate curve of hot-oxygen ageing NR at 100

总之, 纯度高的防老剂 D 使 NR 的抗热氧化、热失重及热老化均得到改善, 其原因可能不单是防老剂 D 含量高, 同时也减少了防老剂 D 中的杂质对 NR 热氧老化的催化作用。

4 结论

与工业品防老剂 D 相比, 含杂少纯度高的防老剂 D 使 NR 的热氧老化性能得到改善, 热氧化诱导期延长, 热失重减少; 在 NR 的老化过程中, 从橡胶的定伸应力、硬度、外观、拉伸强度以及扯断伸长率变化情况得出, 延缓 NR 老化的防老剂 D 的顺序为: 提纯品>工业品>空白。

参考文献:

- [1] 杨清芝. 现代橡胶工艺学[M]. 中国石化出版社, 1997年.
- [2] 高家武等. 高分子材料近代测试技术[M]. 北京航空航天大学出版社, 1994年.
- [3] 缪桂韶. 橡胶配方设计[M]. 华南理工大学出版社, 2000年.
- [4] 周大纲, 谢鹤成. 塑料老化与防老化技术[M]. 中国轻工出版社, 2000年.

(编辑: 王建喜)

(上接第 34 页)

同时, 加强人才队伍建设及研究机构之间的优势互补和联合, 实现推进剂研制和发动机设计的良性互动。建立推进剂及相关产品的试制生产基地, 并建成液体推进剂研究中心。高度关注国外最新研究动态, 开展预先研究, 拓展液体推进剂研究专业领域。

7 结束语

综上所述, 金属化凝胶、高密度吸热型碳氢燃料等高能液体推进剂是各航天大国目前的研究的重点。我国应加强在这方面的基础研究和应用研究, 以推进国防事业和航天事业的进步。

参考文献:

- [1] Haeseler D. et al. Non-toxic propellants for future advanced launcher propulsion system [R]. AIAA2000-3687.
- [2] Huang H, Sobel D R, Spadaccini L J. Endothermic heat-sink of hydrocarbon fuels for scramjet cooling [R]. AIAA 2002-3871.
- [3] 浙江大学化学系. 天地往返系统新型吸热型碳氢燃料的研制[R]. 中国国防科学技术报告, 2001.
- [4] 张波, 林瑞森, 王彬成等. 银钨改性混合型吸热碳氢燃料裂解分子筛催化剂的研究[J]. 化学学报, 2002, 60(10): 1754-1759.
- [5] 胥会祥, 樊学忠, 刘关利. 纳米材料在推进剂应用中的研究进展[J]. 含能材料, 2003, 11(2): 94~98.

(编辑: 侯 早)