

过氧化氢单元催化分解火箭发动机研究

白云峰, 林庆国, 金盛宇, 汪允武, 张中光
(上海航天动力机械研究所, 上海 200233)

摘 要: 针对航天器推进系统的无毒化, 设计了推力为 200N 的过氧化氢单组元催化分解发动机。发动机喷注器、催化剂床以及分解室结构设计合理, 催化剂连续工作时间长, 90% 浓度过氧化氢适合催化分解, 发动机、过氧化氢、催化剂三者匹配性良好。

关键词: 过氧化氢; 单组元; 催化分解; 液体火箭发动机

中图分类号: V434

文献标识码: A

文章编号: (2006)04-0015-06

Research on rocket engine using hydrogen peroxide of catalytic decomposition

Bai Yunfeng, Lin Qingguo, Jin Shengyu, Wang Yunwu, Zhang Zhongguang
(Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 200233, China)

Abstract: For nontoxic purposes, the monopropellant hydrogen peroxide liquid rocket engine was designed and its characteristics were studied through experiments. And it was proved that the engine and catalyst bed was designed properly and suitable for 90% H_2O_2 decomposition. The combustion, H_2O_2 and catalyst cooperated very well.

Key words: hydrogen peroxide, monopropellant, catalytic decomposition, liquid rocket engine

1 引言

目前, 在国内外运载火箭动力系统、飞船、空间站及其它航天器上应用的单元催化分解系统基本上都采用有毒推进剂推进系统, 这些推进剂的生产、储存、运输和使用都比较复杂, 推进系

统的维修、更换、检查、加注等过程中微小的泄漏都可能危及人员的生命安全。在环境保护和人类健康维护呼声越来越高的情况下, 有毒推进剂推进系统的使用越来越受到限制。采用无毒推进剂推进系统, 将从根本上解决毒性的问题, 无毒、无污染、高性能、廉价的推进系统已成为 21 世纪世界各国推进领域研究的主要方向。

过氧化氢单组元催化分解发动机的突出优点

收稿日期: 2006-04-04; 修回日期: 2006-05-12。

作者简介: 白云峰 (1979—) 男, 助理工程师, 研究领域为液体火箭发动机设计。

表现为无毒、无污染、可储存、密度比冲高，从而改善了操作条件，降低研制成本，并实现空间系统性能的改善和后勤费用的节省。过氧化氢以其水溶液形式用作火箭推进剂，近年来 90%以上的高浓度过氧化氢得到广泛使用。这样的高浓度过氧化氢具有足够的稳定性，容易储存与处理。

2 国内外研究情况

二战时期，德国将过氧化氢作为单元推进剂应用于 V-1 火箭起飞助推器上，同时也用来驱动 V-2 火箭发动机上的涡轮泵。二战后，过氧化氢的应用转移到了英国和美国。在上世纪 70 年代，世界各国使用性能更高的肼系列单元推进剂发动机代替过氧化氢单组元催化分解发动机，到了 70 年代后期，已基本上看不到这种推进剂的应用了。最近由于环保和降低成本等原因，加上过氧化氢提纯技术的发展，过氧化氢作为单组元推进剂的分解方法和催化剂的研制都有很大进展，过氧化氢单组元催化分解发动机再次得到研究，如美国 General Kinetics 公司研制的 100N 过氧化氢单组元发动机。

美国 Lawrence Livermore 国家实验室(LLNL)认为，过氧化氢单组元发动机的比冲介于冷气发动机和肼催化分解发动机之间，由于它的低成本和较高的比冲可以应用到微小卫星系统，该实验室设计了适应微小卫星的 25N 推力室，使用的过氧化氢浓度为 85%。

美国 General Kinetics 公司 M·Ventura 等人分析了过氧化氢的特性，讨论了过氧化氢的使用前景，认为过氧化氢单元发动机可以应用于性能要求不高的推进系统，如：飞机应急动力系统，空间飞行器反作用控制系统(RCS)等。

上世纪六十年代前苏联为“联盟号”载人飞船研制了 98N 过氧化氢单元催化分解发动机。1967 年 4 月 23 日，该发动机被首次应用于“联盟号”载人飞船，其改型产品先后被应用于“联盟号”、“进步号”(1978 年 1 月 20 日)、“进步 M 号”(1989 年 8 月 23 日)货运飞船。

我所从 93 年就开展了过氧化氢推进系统方面的探索，并取得了很大的进展，对于过氧化氢的

安全、使用性能和催化分解等方面的研究都取得了相当的成果。多年来在单元发动机方面的研制经验和在过氧化氢催化分解方面的研究成果，对于过氧化氢单元发动机的研制会有很大的帮助和借鉴作用。

3 过氧化氢单组元催化分解发动机系统

3.1 试车台

100%纯度的过氧化氢性质非常稳定，但是遇到杂质就极易分解爆炸。针对过氧化氢的性质，建立了一套单组元过氧化氢专用的供应系统和地面试车台。

3.2 喷注器

为了使过氧化氢分布均匀，催化分解完全，对催化剂的冲击小，避免喷注器集液过多爆炸，集液腔的设计容积很小，采用莲蓬式直流喷注器(图 1)，压降约为 0.5MPa。



图 1 喷注器示意图

Fig.1 Schematic of the injector

3.3 发动机

设计了推力为 200N 的过氧化氢单组元催化分解发动机。发动机由 SZT255 电磁阀和活联接推力室组成。该发动机催化剂床长为 50mm，催化剂床直径为 50mm，床载荷为 $3.65\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{s}$ ，喉部直径为 16mm。催化剂床分前后两床，前床长 5mm，装填细颗粒催化剂，以抑制分解室压力脉动，提高推力室工作稳定性；后床装粗颗粒催化剂。发动机实物见图 2。



图 2 过氧化氢单组元催化分解发动机

Fig.2 Rocket engine using hydrogen peroxide
of catalytic decomposition

4 发动机性能分析

发动机单次试车中, 发动机累计工作时间 4000 多秒, 稳态工作时间达到 2000 多秒, 进行了 600s 长程稳态试车程序, 进行了脉宽为 20ms、30ms、50ms、100ms、150ms、200ms、300ms、500ms 等 8 种脉冲程序, 累计 13000 多次脉冲, 推进剂的消耗量超过 260kg, 发动机性能、催化剂催化性能没有下降。

4.1 稳态性能

根据稳态试验室压 p_c 和流量 q_m 稳态数据, 以及由此计算得到的特征速度 C^* 和分解效率 η_c , 统计分析可得: 90% 浓度过氧化氢分解效率超过

99%, 特征速度为 $969.5 \pm 15 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{kg}$, 推算面积比 30 (取真空推力系数 $C_{FV} = 1.7$) 下比冲为 $1648 \text{ N} \cdot \text{s} / \text{kg}$ 。

4.1.1 室压品质

发动机室压平稳, 室压粗糙度 Δp_c 不超过 3.33%, 启动压力峰 p_{cs} 不超过 123%。由此可见发动机的催化剂床设计十分合理, 抑制了解室压力的脉动, 保证了发动机平稳工作。图 3 为发动机试验稳态 20s 程序的典型曲线, 图 4 为发动机试验稳态 600s 程序的典型曲线。从图 4 中可以看到, 发动机经过 600s 长程试车后, 发动机入口压力、分解室压力以及流量等参数都非常稳定, 发动机工作平稳。

4.1.2 响应特性

发动机的室压响应特性统计结果如表 1, 图 5 为发动机起动特征的典型曲线。

表 1 发动机的室压响应特性

Tab.1 Response time of p_c of the engine

参 数	数值/s
常温起动加速性 t_{90}	0.162 ± 0.012
热起动加速性 t_{90}	0.120 ± 0.013
关机减速性 t_{10}	0.061 ± 0.008

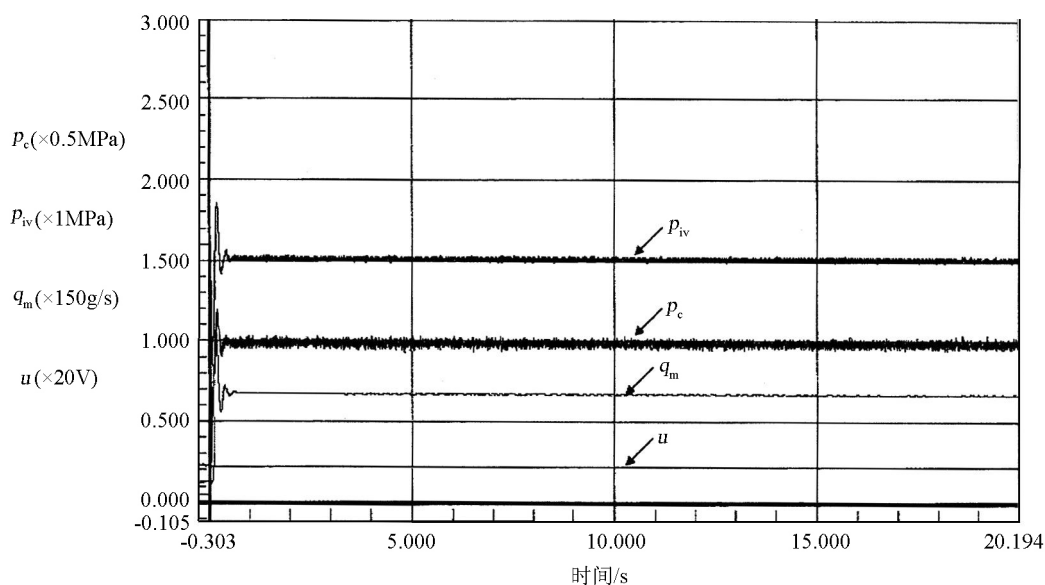


图 3 发动机常温启动稳态 20s 全程压力流量曲线

Fig.3 Performance of 20 seconds stable process

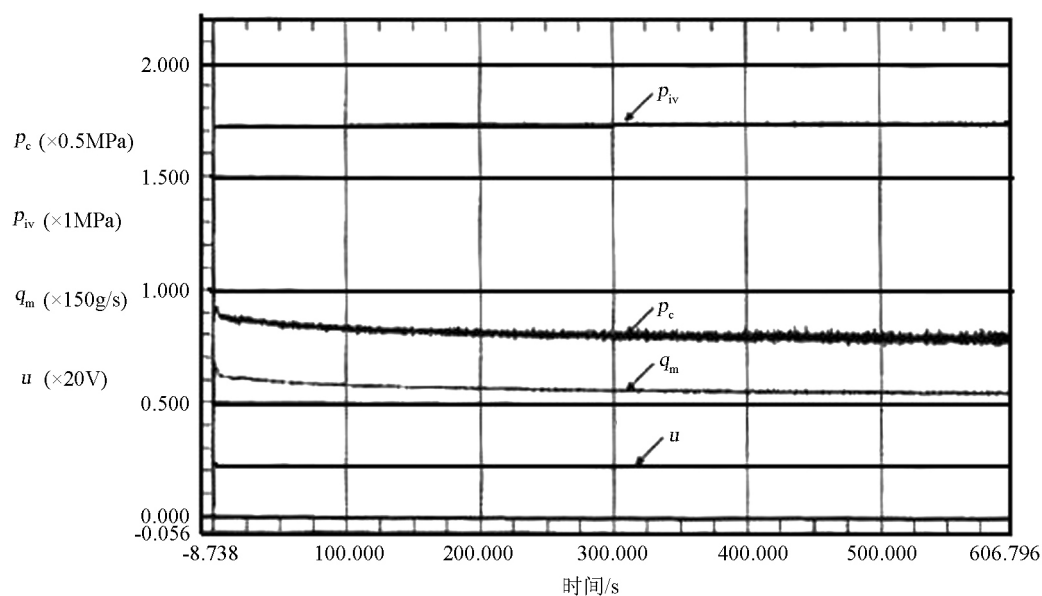


图 4 发动机常温启动稳态 600s 全程压力流量曲线

Fig.4 Performance of 600 seconds stable process

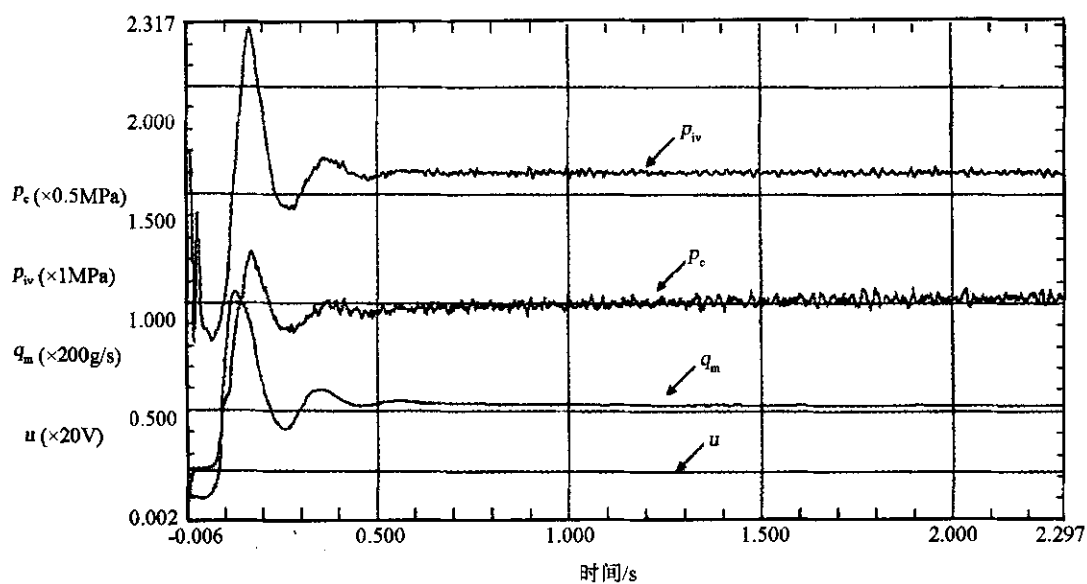


图 5 发动机启动响应曲线

Fig.5 Diagram of start response curves

4.1.3 温度分布

位置见图 6。发动机燃气温度达到 738℃。

发动机试车时各温度测点数据见表 2, 各测点

表 2 温度测量结果

Tab.2 Results of temperature measurement

参数名称	最大值/□	参数名称	最大值/□
阀门温度 T_v	58	法兰壁温 T_f	254
喷注面外壁温度 T_{h1}	101	分解室壁温 T_{b1}	695
喷注面外壁温度 T_{h2}	192	分解室壁温 T_{b2}	738

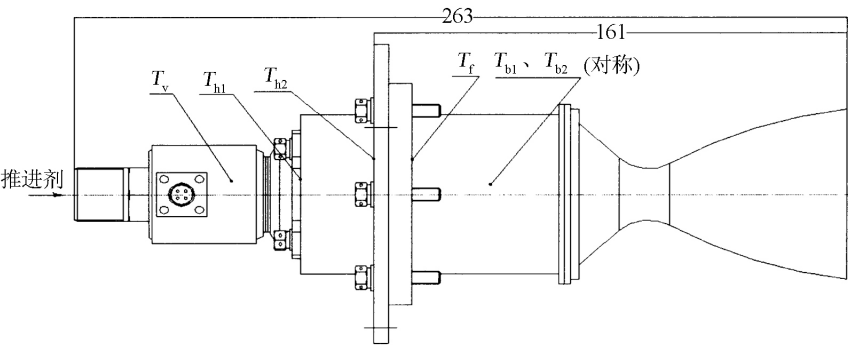


图 6 发动机温度测点分布图

Fig.6 Schematic of temperature measurement distribution

4.2 脉冲性能

发动机试车分别进行了脉宽为 500ms、300ms、200ms、150ms、100ms、50ms、30ms 和 20ms 等 8 种脉冲程序。脉冲典型曲线见图 7，各脉冲波形一致性好，冲量差异在 3% 以内。

4.3 试后产品检查分解

试车后发动机进行了分解，产品内部结构正常，发动机催化剂稍变呈白，有少量粉末，未见明显的破碎颗粒，发动机催化床后部挡板外圈发蓝，中央向出口方向微凸。试验中催化剂损耗率为 4.1%。

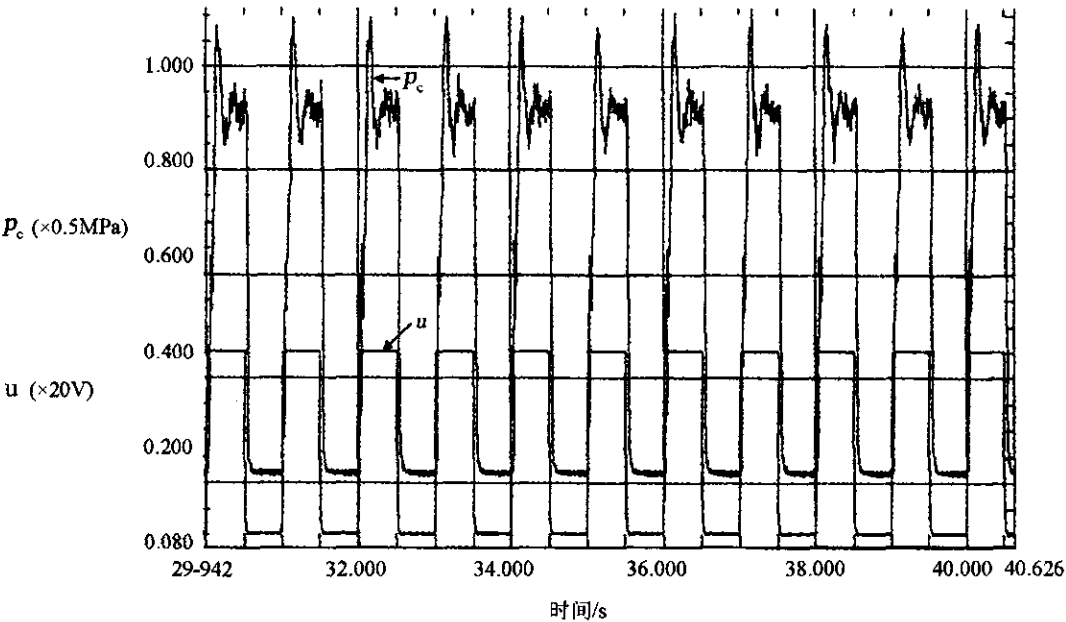


图 7 发动机脉冲曲线-0.5s/0.5s

Fig.7 Diagram of impulse curves

5 结 论

本次过氧化氢催化分解单组元发动机试验获得了成功, 试验初步考核了 90% 浓度过氧化氢的催化分解特性、催化剂性能以及其与发动机分解室的匹配性。

试验结果表明, 发动机性能稳定, 试车过程中未发现性能下降情况。过氧化氢催化分解发动机分解室结构设计合理, 催化剂连续工作寿命长, 过氧化氢、分解室、催化剂三者匹配性良好, 标志着过氧化氢催化分解发动机技术又向前迈进了一步, 为我国航天器推进系统的无毒化提供了技术支持。

参考文献:

- [1] M Ventura, P Mullens. The Use of Hydrogen Peroxide for Propulsion and Power[R]. AIAA99-2880.
- [2] V Sadow. HP-Based Green Rocket Propellants[C]. The First International Conference on Green Propellants for Space Propulsion.
- [3] Zhang Rongjun, Xu Junmin, Li Fuyun, Ling Qiancheng, Yang Baoqing. A Study of Thrust Chamber Technology Using Hydrogen Peroxide[C]. 55th International Astronautical Congress 2004-Vancouver, Canada. IAC-04-IAF-S.3.02.
- [4] Trisha R Beutien, Stephen D Heister, John J Rusek, Scott Meyer. CORDIERITE-BASED CATALYTIC BEDS FOR 98% HYDROGEN PEROXIDE[R]. AIAA 2002-3853.
- [5] 毛根旺. 大型液体火箭发动机的最新发展[J]. 推进技术. 1995, 1.
- [6] 周汉申. 单组元催化分解发动机喷注器的设计与研究[J]. 上海航天, 1993, 1.
- [7] 周汉申, 王玺. 肼及肼-硝酸肼-水发动机催化剂床的设计与研究[J]. 上海航天, 1994, 5.
- [8] 林革, 凌前程, 李福云. 过氧化氢推力室技术研究[J]. 火箭推进, 2005, 3.

(编辑: 王建喜)

(上接第 9 页)

在进行叶轮 CFD 分析时, 可以根据分析结果对叶轮的参数进行修正, 很快的实现三维模型的更新, 从而获得性能优秀的叶轮结构; 在叶轮设计、生产过程中, 尤其是仅有叶轮结构尺寸变化时, 只需改变相应的参数, 即可方便地生成系列化的产品, 极大地减少了一个新产品的的设计周期。

通过 UG/Grip 对低比转速叶轮进行三维造型, 生成的叶片实体在屏幕上可以旋转、放大等, 从而可以帮助设计人员及时直观地在三维空间中多方位的观察叶片的实体。从而能够方便地考察叶片的水力性能, 即: 叶片表面型线是否光滑连接, 叶片弯曲程度与安放角变化是否均匀, 包角大小是否符合要求; 考察叶片的工艺性能, 如需数控机床加工时, 叶片的装夹性能以及走刀特性等。

综上所述, 将 UG/Grip 技术引入流体机械中的叶轮设计领域, 将帮助设计师及时地评价已经设计好的叶轮叶片, 完善设计, 从而将叶轮的水力

设计提高到一个新的水平, 这正是 UG 这一软件在流体机械中的强大生命力的体现。

参考文献:

- [1] 王庆林. UG/OpenGRIP 实用编程基础[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [2] 杨方飞, 阎楚良, 林洪义[J]. 水泵叶片三维造型原理与工程应用. 农业机械学报, 2003, 34 (1).
- [3] 严俊峰, 陈炜. 基于遗传算法的低比转速高速泵优化设计[J]. 火箭推进, 2006, 32 (3).
- [4] A T Troskolanski, S.tazarkiewicz. 叶片泵计算与结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- [5] 潘中永, 曹卫东, 李红, 等. 叶轮轴面控制参数的优化[J]. 流体机械, 2002, 9.

(编辑: 马 杰)