

## 200 N 推力装置上肼类分解催化剂的应用性能

徐涛, 李宁, 贺子君, 贾勐, 张中柱, 邢钢, 赵孟超, 杜宗罡  
(西安航天动力试验技术研究所, 陕西 西安 710100)

**摘要:** 研究制备了一种单组元姿轨控发动机用肼类分解催化剂, 采用 200 N 推力装置对其应用性能进行了研究和考察。在催化剂物化性能指标满足应用要求的基础上, 利用 200 N 推力装置通过力学环境试验考察了催化剂力学环境适应性, 通过双 -10 °C 低温冷启动、低温稳态及脉冲、正负拉偏以及脉冲寿命热试考核程序考察了自制催化剂的低温冷启动性能、低温稳态性能、常温正负拉偏稳态性能以及脉冲寿命性能。结果表明: 该催化剂肼催化分解效率在 99% 以上, 机械强度高且力学环境适应性好, 具有较高的肼催化分解活性和稳定性, 能够在 200 N 推力装置上于双 -10 °C 正常启动, 顺利完成了低温稳态、常温正负拉偏和脉冲寿命等考核程序, 发动机室压平稳, 响应特性良好, 脉冲一致性好, 可满足推力装置的使用要求。

**关键词:** 肼类分解催化剂; 单组元姿轨控发动机; 200 N 推力装置; 热试考核

中图分类号: V511

文献标志码: A

文章编号: 1672-9374(2024)05-0148-09

## Application performance of a hydrazine decomposition catalyst based on a 200 N thruster device

XU Tao, LI Ning, HE Zijun, JIA Meng, ZHANG Zhongzhu, XING Gang,  
ZHAO Mengchao, DU Zonggang  
(Xi'an Aerospace Propulsion Test Technology Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** This study investigates the application performance of a hydrazine decomposition catalyst using a 200 N thruster device. On the basis that the physical and chemical properties of the catalyst meet the application requirements, the mechanical environment adaptability of the catalyst is investigated using a 200 N thruster device. The low-temperature cold start performance, low-temperature steady-state performance, normal temperature positive and negative bias steady-state performance, and pulse lifetime performance of the catalyst are also investigated. The results indicate that the catalyst has a hydrazine catalytic decomposition efficiency above 99%, excellent mechanical strength, good mechanical environment adaptability, and high hydrazine catalytic decomposition activity and stability. The test shows that the catalyst can meet the usage requirements of a 200 N thruster device.

收稿日期: 2024-01-18 修回日期: 2024-06-16

基金项目: 陕西省特种能源化学与材料重点实验室开放基金 (SPCF-SKL-2021-0001)

作者简介: 徐涛 (1987—), 男, 硕士, 研究领域为液体火箭推进剂。

引用格式: 徐涛, 李宁, 贺子君, 等. 200 N 推力装置上肼类分解催化剂的应用性能[J]. 火箭推进, 2024, 50(5): 148-156.

XU T, LI N, HE Z J, et al. Application performance of a hydrazine decomposition catalyst based on a 200 N thruster device[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2024, 50(5): 148-156.

**Keywords:** hydrazine decomposition catalyst; mono-propellant attitude and orbit control engine; 200 N thruster device; hot-firing test and assessment

## 0 引言

单组元肼基催化分解姿轨控发动机具有比冲高、安全性能好、系统结构简单、维护方便、工作温度低( $\leq 1\ 200\ ^\circ\text{C}$ )、稳态和脉冲工作重复性好、可靠性高、研制成本低等优点,被广泛应用于运载火箭末级、导弹弹头和航天飞行器等姿态控制以及正推、末修等领域<sup>[1]</sup>。迄今为止,美国 Shell 公司于 20 世纪 60 年代初研制的 Shell-405 ( $\text{Ir}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 催化剂被认为是最理想的肼类分解催化剂,由活性金属铱负载在结构较好的氧化铝载体上制备而成,铱负载量(即质量分数)约为 32%<sup>[2-3]</sup>。其特点为多孔性好、比表面积大且机械强度优异,环境温度对其催化性能基本无影响,即使在  $-10\ ^\circ\text{C}$  下仍可催化分解肼类推进剂,点火延迟期短且响应迅速。该催化剂至今仍受专利保护,故其制备方法一直处于严格保密状态<sup>[4]</sup>。通过不断研究和试验,德、英、法、日等国家也随之研制开发出了与 Shell-405 催化剂相似的  $\text{Ir}/\text{Al}_2\text{O}_3$  系列催化剂,而且该类催化剂已被世界各国广泛应用于各种飞行器的姿轨控发动机上。据报道,虽然该类铱基催化剂的部分性能指标已经达到甚至超过了 Shell-405,但其综合性能以及机械强度仍无法与 Shell-405 相提并论。迄今为止,在美国发射的各种空间飞行器及卫星姿轨控系统中仍以 Shell-405 催化剂为主<sup>[5-6]</sup>。

我国于 20 世纪 60 年代开始研制肼类分解催化剂,在航天某院全力配合下,大连化学物理研究所成功研制出多种肼类分解催化剂,并广泛应用于我国航空航天飞行器和卫星试验及发射中<sup>[7]</sup>。21 世纪以来,太空探索已成为各国战略角逐的主要领域,而各类飞船及飞行器的姿态控制几乎都是采用催化剂催化分解肼类推进剂以满足飞行轨道改变、入轨定点、调整飞行速度及姿态等需求,因此我国未来太空飞行对肼类分解催化剂的需求量也将大量增加。

肼类分解催化剂具有“长期贮存、频繁运送、一次使用”的特点,在运送过程和贮存期内会受到机械应力、热应力和低温潮湿等复杂加载环境的长

期、频繁作用,催化剂会发生缓慢的物理化学损伤,影响其正常使用性能,不能有效、稳定地启动并工作,导致发射任务受到严重影响甚至失败。迄今,现役肼类分解催化剂仍存在诸多应用可靠性问题,诸如低温冷启动不稳定、抗运输粉化性能差等,优化催化剂低温活性、强化催化剂载体强度是提高其应用可靠性的有效手段。因此,为进一步满足日益增加的单组元姿轨控发动机型号试验和应用需求,开展肼类分解催化剂制备技术研究,深入研究完善肼类分解催化剂的运输振动稳定性、低温应用可靠性等性能是十分必要的。

本文通过 200 N 推力装置考察了一种单组元姿轨控发动机用肼类分解催化剂的应用性能。在催化剂物化性能指标满足应用要求的基础上,采用 200 N 推力装置通过力学环境试验考察了催化剂力学环境适应性,通过双  $-10\ ^\circ\text{C}$  低温冷启动、低温稳态及脉冲、常温稳态正负拉偏以及脉冲寿命等热试考核程序,考察了自制催化剂的低温冷启动性能、低温分解活性、正负拉偏稳态性能以及脉冲寿命性能等相关应用性能。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

实验试剂:拟薄水铝石粉(工业级,天津化工研究院);硝酸(分析纯,天津天泰精细化学品有限公司);田菁粉(工业级,江苏省响水县宏润植物胶有限公司);氯铱酸和氯化钨(分析纯,陕西开达化工有限公司)。

实验仪器:双螺杆挤条机(山东淄博悦诚机械有限公司);马弗炉和高温管式炉(合肥科晶技术有限公司);烘箱(上海皓越电炉技术有限公司)。

### 1.2 催化剂制备

#### 1.2.1 氧化铝载体制备

以拟薄水铝石为氧化铝载体前驱体,以田菁粉为助挤剂,加入稀硝酸溶液作为胶溶剂<sup>[8]</sup>,经混捏、挤条成型后于室温下阴干,  $120\ ^\circ\text{C}$  干燥后置于高温管式炉中经  $700\ ^\circ\text{C}$  高温焙烧 3 h,得到条状载体。载体经裁切/破碎、粉磨后,制成 30~40 目颗粒状载体

和  $\phi 2\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$  柱状载体,分别用作前床铱基和后床钌基催化剂载体。

1.2.2 活性金属负载

准确量取一定浓度  $\text{RuCl}_3$  溶液和  $\text{H}_2\text{IrCl}_6$  溶液分别浸渍到  $\phi 2\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$  柱状载体和 30 ~ 40 目颗粒状载体上,浸渍结束后置于 80  $^\circ\text{C}$  恒温水浴锅上蒸干,转移至烘箱中于 120  $^\circ\text{C}$  烘干 12 h,再于马弗炉中 400  $^\circ\text{C}$  焙烧 4 h。重复上述操作,通过控制浸渍次数计算并获得所需金属负载量的催化剂产品。将浸渍-焙烧后的物料置于管式炉中,在  $\text{H}_2$  气氛中加热至 400  $^\circ\text{C}$  还原 2 h。完全反应后降至室温,通入氧/氮混合气体进行钝化处理,最终制备出前床  $\text{Ir}/\text{Al}_2\text{O}_3$  和后床  $\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂<sup>[9-10]</sup>。

1.3 催化剂物化性能分析实验

形貌特征 (TEM) 采用 JEM-2100F 型透射电子显微镜 (日本 JEOL 公司) 进行表征;晶相构成 (XRD) 采用 Rigaku D/Max2550VB/PC 型 X 射线衍射仪 (日本 Rigaku 公司) 进行表征;比表面积 (BET) 采用 ASAP 2460 型氮气物理吸附仪 (美国 Micromeritics 公司) 进行表征;铱/钌含量根据 GJB 8371 - 2015<sup>[11]</sup> 和 GJB 1960 - 94<sup>[12]</sup> 规定采用质量法进行测定;强度根据 GJB 8371 - 2015 (附录 A) 规定采用 ZQJ-III-500 N 型强度测试仪 (大连仪器制造厂) 进行测定。

1.4 力学环境试验

对装填自制肼类分解催化剂的 200 N 推力装置开展力学环境试验,振动试验系统原理如图 1 所示。

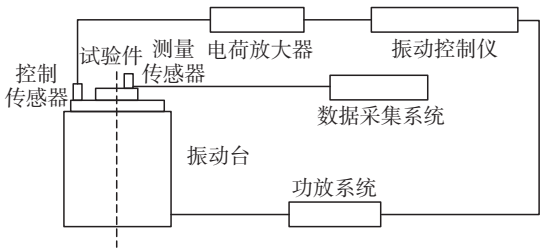


图 1 振动试验系统原理图  
Fig.1 Schematic graph of the vibration test system

通过随机振动试验考核催化剂的力学环境适应性。装填催化剂的推力装置验收量级振动试验条件见表 1,分别在 X、Y、Z 这 3 个方向进行试验,每个方向试验时间为 3 min,每个方向的总均方根值均为 16.13 g。

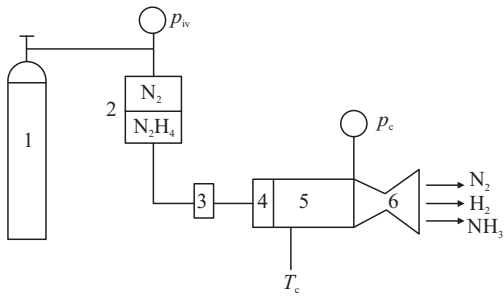
表 1 振动试验条件

Tab.1 Conditions of the vibration test

频谱范围/Hz	功率谱密度/( $\text{g}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$ )
10 ~ 100	0.006 ~ 0.06
100 ~ 200	0.06
200 ~ 300	0.06 ~ 0.12
300 ~ 500	0.12
500 ~ 800	0.12 ~ 0.18
800 ~ 1 500	0.18
1 500 ~ 2 000	0.18 ~ 0.045

1.5 发动机热试考核

单组元姿轨控发动机肼分解性能热试考核装置简略图如图 2 所示。热试过程中调节高压氮气至一定压力 ( $p_w$ ) 后打开电磁阀,高压氮气沿气路系统将储罐内液体肼推进剂经电磁阀、喷头以一定流量挤压并喷入催化剂床层,肼推进剂和床层内装填的催化剂一经接触就会立刻发生催化分解,并生成大量的高温高压氮气、氢气和氨气,推力室迅速建压 ( $p_c$ ),混合气体由推力装置喉管喷出<sup>[13]</sup>。



1-氮气储罐;2-肼储罐;3-电磁阀;4-喷头;5-催化剂床层;6-喉管

图 2 肼分解性能热试考核装置简略图

Fig.2 Simplified diagram of the test and assessment device for hydrazine decomposition performance

采用 200 N 单组元推力装置评价自制催化剂的热试性能,催化剂前床装填  $\text{Ir}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,后床装填  $\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂。通过控制入口压力及电磁阀脉冲控制推进剂流量  $q_m$ ,室压  $p_c$  及催化剂床层温度  $T_c$ 。由测点处压力及温度传感器测量并输出信号,各参数数据变化由测控系统进行实时采集和储存,通过对热试试验数据进行分析得到催化剂的各项热试性

能指标。

推力室床流阻的计算公式为

$$\Delta p_b = p_{iv} - \Delta p_v - \Delta p_{inj} - p_c \quad (1)$$

式中: $p_{iv}$ 为入口压力,MPa; $p_c$ 为分解室室压,MPa; $\Delta p_v$ 为阀门压降,MPa; $\Delta p_{inj}$ 为头部喷注压降,MPa。

催化剂催化分解效率计算公式为

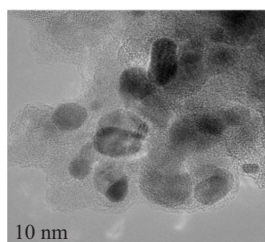
$$\eta_c = \frac{p_c A_t}{q_m C_{th}^*} \quad (2)$$

式中: $p_c$ 为分解室室压,MPa; $A_t$ 为推力室喉部截面积, $\text{mm}^2$ ; $q_m$ 为推进剂流量, $\text{kg/s}$ ; $C_{th}^*$ 为理论特征速度, $\text{m/s}$ 。

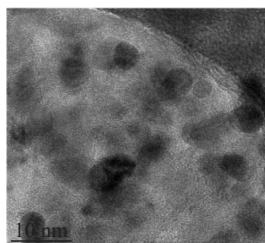
## 2 结果与讨论

### 2.1 催化剂物化性能分析

图 3 为  $\text{Ir}/\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂的 TEM (透射电子显微镜) 照片,可以看出催化剂颗粒呈团聚状,载体上均匀分布着平均粒径约为 5~10 nm 的金属 Ir 和 Ru 颗粒<sup>[14]</sup>。



(a)  $\text{Ir}/\text{Al}_2\text{O}_3$

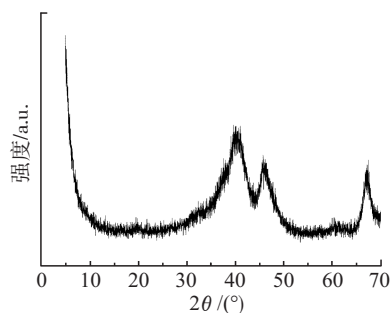


(b)  $\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3$

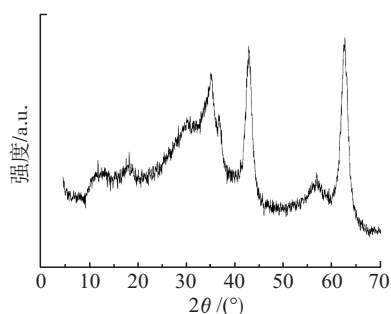
图 3  $\text{Ir}/\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂 TEM 照片

Fig. 3 TEM images of  $\text{Ir}/\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3$  catalyst

图 4 为  $\text{Ir}/\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂的 X 射线衍射 (XRD) 谱图,两种催化剂均在  $37.4^\circ$  (311)、 $45.8^\circ$  (400) 和  $67.3^\circ$  (441) 处出现  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  (PDF no. 04-0880) 的特征衍射峰,表明催化剂中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  载体的晶体结构以  $\gamma$  型为主<sup>[15-16]</sup>。



(a) 前床  $\text{Ir}/\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂



(b) 后床  $\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂

图 4  $\text{Ir}/\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂 XRD 图谱

Fig. 4 XRD spectra of  $\text{Ir}/\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3$  catalyst

采用氮气物理吸附仪 ( $\text{N}_2$ -BET) 对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  载体和催化剂的比表面积进行了表征,图 5 为其吸/脱附等温线,均为 V 型吸/脱附等温线<sup>[17]</sup>。由图 5 可以看出, $\text{Al}_2\text{O}_3$  载体的比表面积为  $195.3 \text{ m}^2/\text{g}$ ,前床  $\text{Ir}/\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂的比表面积为  $166.3 \text{ m}^2/\text{g}$ ,后床  $\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂的比表面积为  $156.1 \text{ m}^2/\text{g}$ 。

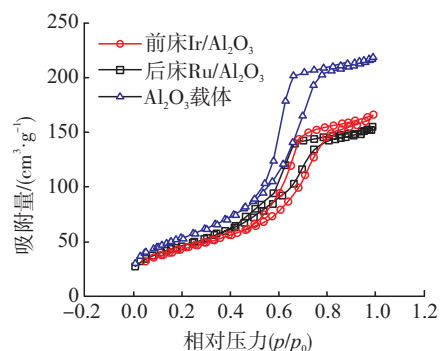


图 5  $\text{Al}_2\text{O}_3$  载体、 $\text{Ir}/\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3$  催化剂的  $\text{N}_2$  吸/脱附等温线

Fig. 5  $\text{N}_2$  adsorption/desorption isotherm curves of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  carrier,  $\text{Ir}/\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Ru}/\text{Al}_2\text{O}_3$  catalyst

采用强度测试仪对自制催化剂的强度进行测试,并按照催化剂活性金属含量测试规范对其负载金属含量进行分析检测,结果见表 2。

表 2 催化剂物化性能参数

Tab.2 Physicochemical property parameters of the catalyst

参数	Ir/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ru/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
铱质量分数/%	26.0	—
钌质量分数/%	—	10.0
比表面积/(m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	166.3	156.1
强度/MPa	24.2	24.3

2.2 力学环境适应性分析

通过 200 N 推力装置进行力学环境试验,按照输入技术条件进行,过程受控,试验系统各组成部分均处于检定有效使用期内,数据有效、可靠。试验完成后,产品外观无明显异常。随机振动试验中,X、Y、Z 这 3 个方向试验中各加速度测点响应与输入比均无明显放大现象,同时各项试验中应变测点响应均较小。

通过称重计量来验证力学环境试验前后催化剂损失情况。力学环境试验前推力装置装填催化剂后的总质量为 1 551 g,试验后再次称重,总质量为 1 551 g,整体质量保持不变。由此证明,经力学环境试验后催化剂状态良好,无催化剂破损和质量损失。

试验正常结束后,通过气密性试验考察推力装置的状态,保持压力为 3.0 MPa,维持 3 min 后推力装置无漏气现象。表明推力装置气密性良好,可以进行后续热试考核验证。

2.3 发动机热试考核分析

2.3.1 低温冷启动性能

准确将推力装置和推进剂储罐冷却并保持在 -10 ℃ 条件下进行冷启动程序考核。冷启动工作压力曲线见图 6。

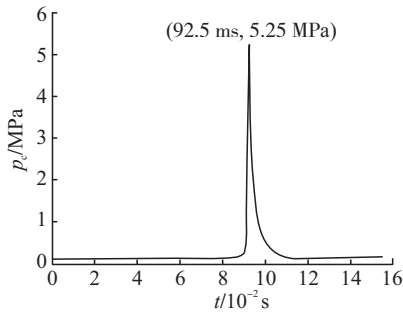


图 6 冷启动工作压力曲线  
Fig.6 Pressure curve of the cold start test

温度测量数据显示冷启动时推进剂温度为 -11.42 ℃,催化剂前床温度为 -11.83 ℃,满足双

-10 ℃冷启动试验要求。由图 6 可以看出,低温冷启动时推力室压力尖峰为 5.25 MPa,峰值对应时间为 92.5 ms。由此证明,双 -10 ℃低温条件下自制催化剂于 200 N 推力装置中能正常启动,冷启动响应迅速且压力峰可控。

2.3.2 低温稳态性能

催化剂在经历双 -10 ℃低温冷启动后,在推进剂保持 -10 ℃条件下进行额定工况稳态及脉冲考核。热试过程中推力装置入口前推进剂测量温度为 -10 ~ -13 ℃。图 7 为相同入口压力下,200 N 推力装置在推进剂 -10 ℃[见图 7(a)]和室温条件下[见图 7(b)]的 20 s 稳态工作曲线,数据分析结果见表 3。

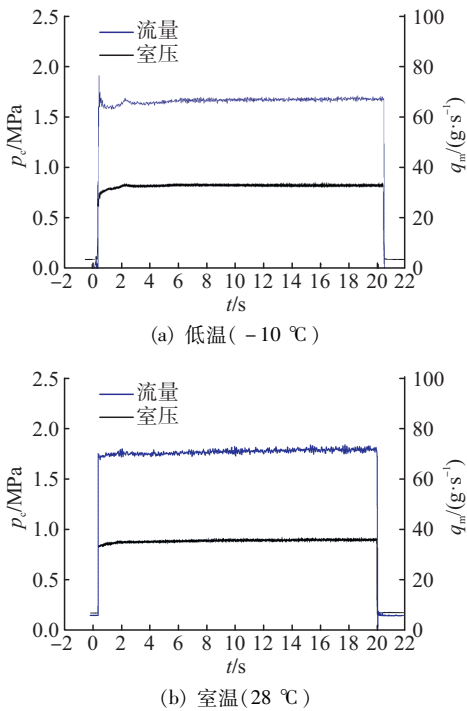


图 7 200 N 推力装置在 -10 ℃和室温下 20 s 稳态工作压力和流量曲线

Fig.7 Pressure and flow rate curves of 200 N thruster in 20 s steady-state firing at -10 ℃ and room temperature condition

表 3 200 N 推力装置在 -10 ℃和室温下稳态工作数据  
Tab.3 Steady-state working data of 200 N thruster at -10 ℃ and room temperature condition

温度	推进剂温度/℃	室压/MPa	流量/(g·s <sup>-1</sup> )	床流阻/MPa	分解效率/%
低温	-11.5	0.82	66.39	0.79	98.90
室温	28.0	0.88	70.03	0.70	99.88

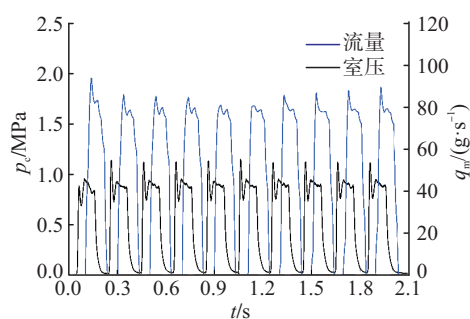


由上述分析结果可以看出,推力装置在入口压力一致的情况下,推进剂在  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下的工作室压(0.82 MPa)和流量(66.39 g/s)均略低于室温状态下的室压(0.88 MPa)和流量(70.03 g/s),室压和流量分别降低了约 6.8% 和 5.2%。由于推进剂温度降低会影响催化剂的催化活性,故分解效率由室温状态下的 99.88% 降低至低温时的 98.90%,而推力室床流阻则由 0.70 MPa 增大至 0.79 MPa。这主要是由于在  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  低温条件下,推进剂黏度增大致使其流动性变差,进而引起流阻增大。另外,低温条件下催化剂的固有催化分解活性会降低,导致其分解效率略有衰减。

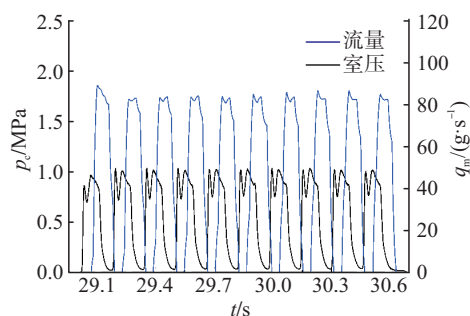
由此可见,200 N 推力装置在推进剂  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下进行稳态工作时,室压较常温状态下略有降低。分析其原因主要有两方面:一方面是推进剂低温条件下其黏度增加引起床流阻上升,导致室压降低;另一方面是推进剂温度降低时其催化活性也会随之降低,进而引起催化分解效率降低,导致室压也随之降低。通过对比分析,这两方面的原因均会引起室压降低,其中推进剂低温条件下黏度增加是推力装置室压降低的主要因素<sup>[18]</sup>。

### 2.3.3 低温脉冲性能

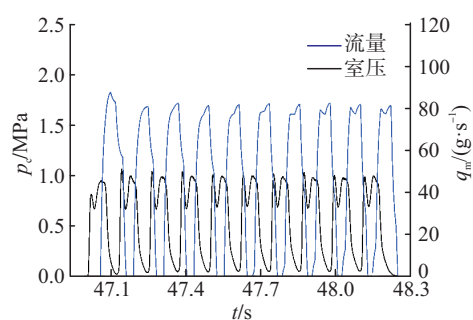
200 N 推力装置在推进剂  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下进行多次短脉冲工作的室压和流量曲线如图 8 所示,可以看出推力室各次脉冲工作启动关机正常,室压平稳,脉冲曲线一致性较好。



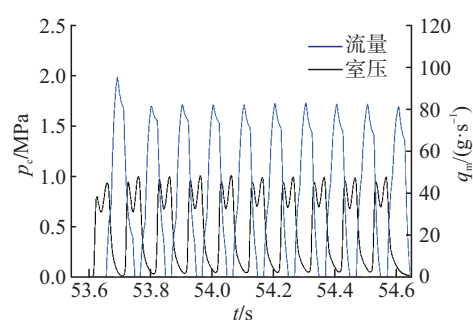
(a) 试验程序 0.10 s/0.1 s (10 次)



(b) 试验程序 0.08 s/0.08 s (10 次)



(c) 试验程序 0.06 s/0.06 s (10 次)



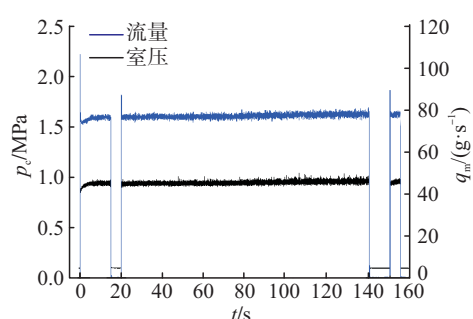
(d) 试验程序 0.04 s/0.04 s (10 次)

图 8 200 N 推力装置在  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  下脉冲工作曲线

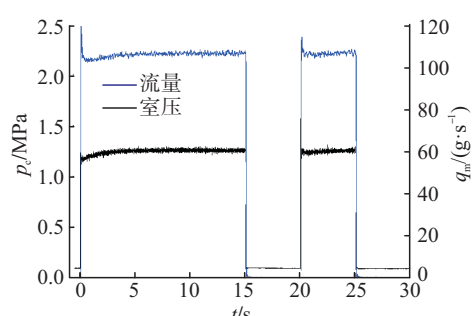
Fig. 8 Pulse-state working curves of 200 N thruster at  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  condition

### 2.3.4 常温稳态性能

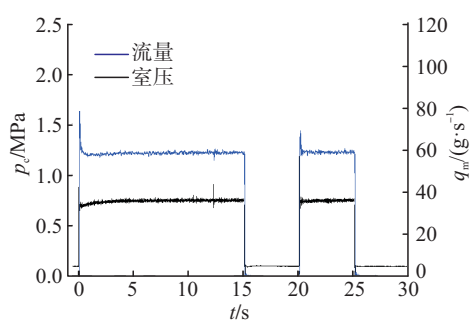
待推进剂温度恢复室温后对推力装置工作参数进行调整,在推进剂处于常温状态下进行额定工况及正负拉偏工况稳态考核,其室压和流量工作曲线如图 9 所示,室压粗糙度、分解效率及催化剂启动、关机响应特性数据分析结果见表 4。



(a) 额定工况



(b) 高工况



(c) 低工况

图 9 常温额定工况及正负拉偏稳态工作曲线

Fig. 9 Steady-state profiles collected in rated and positive/negative bias operation tests at normal temperature

表 4 常温额定工况及正负拉偏稳态工作数据

Tab. 4 Analysis summary of steady-state in rated and positive/negative bias operation tests at normal temperature

推力/ N	室压/ MPa	流量/ (g · s <sup>-1</sup> )	粗糙 度/%	分解 效率/%	响应特性	
					$t_{80c}/\text{ms}$	$t_{20h}/\text{ms}$
200	0.94	76.72	4.26	99.85	41.3	57.3
260	1.26	106.10	2.79	99.56	28.0	46.5
180	0.74	58.27	3.60	99.75	28.5	57.5

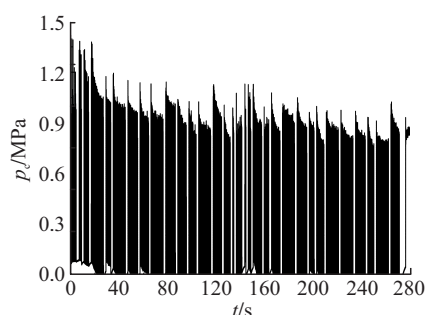
由额定工况及正负拉偏工况稳态室压工作曲线(见图 9)可知,推力室室压基本平稳,连续稳态启动瞬间均有明显的压力峰,表明启动瞬间催化剂床层有少量推进剂积存<sup>[19-20]</sup>。由表 4 可以看出,额定工况下推力室室压为 0.94 MPa,室压及阀前压力平稳无异常;推力室拉偏至高工况时,其室压升高至 1.26 MPa;推力室拉偏至低工况时,其室压降低至 0.74 MPa。在整个稳态考察过程中,室压粗糙度整体较小,不同工况下室压粗糙度均值在 2.79% ~ 4.26% 之间。

由表 4 可以看出:不同工况下的热启动加速性  $t_{80c}$  (燃压达到稳态燃压 80% 时的反应时间)和关机减速性  $t_{20h}$  (燃压达到稳态燃压 20% 时的时间)均较小,其范围在 28.0 ~ 57.5 ms 之间,响应迅速,同时推进剂催化分解效率均在 99.5% 以上。由此可见,自制催化剂具有优异的肼催化分解反应活性和稳定性<sup>[21-22]</sup>。

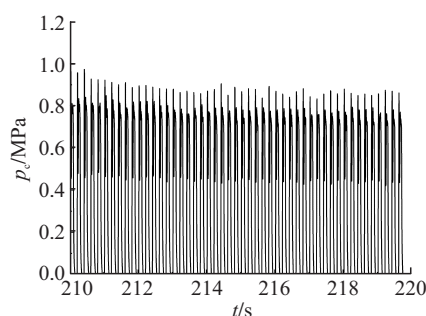
### 2.3.5 脉冲寿命考核

为对催化剂使用寿命进行可靠性摸底考核,对

催化剂进行了总计 2 400 组脉冲工作考核,如图 10 所示,通过寿命程序考核其不同长度脉冲和重复多脉冲条件下的综合性能<sup>[23]</sup>。



(a) 2 400 组脉冲图



(b) 局部放大图

图 10 脉冲寿命考核工作压力曲线

Fig. 10 Pressure curves of pulse life test

图 10(a)为 2 400 组脉冲寿命程序考核结果,自制催化剂顺利完成了 2 400 组不同长度脉冲和重复多脉冲条件下的复杂脉冲冲击考验。从局部放大图[见图 10(b)]可以看出虽然室压脉冲高度略有差别,但差别较小,室压基本保持平稳,工作曲线一致性较好。由此证明自制催化剂机械强度优异,具有较强的耐推进剂高温频繁冲刷的能力和好的脉冲工作性能,其使用寿命满足推力装置使用要求<sup>[24]</sup>。

## 3 结论

采用 200 N 推力装置装填自制肼类分解催化剂,通过力学环境试验、双 -10 ℃ 低温冷启动、低温稳态及脉冲、常温稳态及正负拉偏以及脉冲寿命热试考核程序,考察了自制催化剂的力学环境适应性、低温冷启动性能、低温稳态及脉冲性能、常温正负拉偏稳态性能以及脉冲寿命性能等相关应用性能。通过分析可以得出以下结论。

1) 自制肼类催化剂机械强度优异,具有良好的

力学环境适应性,3 个方向试验中各加速度测点响应与输入比均无明显放大现象,且各项试验中应变测点响应均较小,试后催化剂几乎无破碎和质量损失。

2) 自制催化剂于 200 N 推力装置中顺利实现双-10℃低温冷启动,响应迅速且压力峰可控;顺利通过低温稳态及脉冲和常温稳态及正负拉偏考核,推力室室压平稳且粗糙度均小于 5%,各次脉冲工作启动关机正常且脉冲曲线一致性较好;不同工况下推进剂催化分解效率均在 99% 以上,催化分解性能优异,且推力装置启动、关机响应迅速,满足推力装置使用要求。

3) 自制催化剂顺利完成了 2 400 组复杂脉冲冲击考验,室压基本保持平稳,工作曲线一致性较好,具有较强的耐推进剂高温频繁冲刷的能力和好的脉冲工作性能,机械强度优异,其使用寿命可满足推力装置使用要求。

通过肼类分解催化剂成功研制及其应用性能考核验证的顺利进行,为我国运载火箭和导弹武器等空间飞行器的动力系统提供技术支撑和能力储备,以保障我国航天发射及武器型号研制的安全、高效、可持续发展。

## 参考文献

- [1] VIEIRA R, BERNHARDT P, LEDOUX M J, et al. Performance comparison of Ir/CNF and Ir/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts in a 2 N hydrazine microthruster [J]. *Catalysis Letters*, 2005, 99(3): 177-180.
- [2] CHEN X W, ZHANG T, YING P L, et al. A novel catalyst for hydrazine decomposition: molybdenum carbide supported on  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [J]. *Chemical Communications*, 2002(3): 288-289.
- [3] VIEIRA R, BASTOS-NETTO D, LEDOUX M J, et al. Hydrazine decomposition over iridium supported on carbon nanofibers composite for space applications: Near actual flight conditions tests [J]. *Applied Catalysis A: General*, 2005, 279(1/2): 35-40.
- [4] 张雄伟. 贵金属铱催化剂的制备、表征及其性能研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.  
ZHANG X W. Preparation, characterization and performance of precious metal iridium catalyst [D]. Chengdu: Sichuan University, 2005.
- [5] CONTOUR J. Hydrazine decomposition over a supported iridium catalyst [J]. *Journal of Catalysis*, 1972, 24(3): 434-445.
- [6] 李令成, 蓝蕴基. 肼分解催化剂进展[J]. *工业催化*, 1994(1): 3-7.  
LI L C, LAN Y J. Progress of hydrazine decomposition catalysts [J]. *Industrial Catalysis*, 1994(1): 3-7.
- [7] 湛建阶, 陈朝辉. 肼类分解催化剂研究进展[J]. *材料导报*, 2007, 21(2): 62-66.  
ZHAN J J, CHEN Z H. Progress in research on hydrazine decomposition catalysts [J]. *Materials Review*, 2007, 21(2): 62-66.
- [8] 苗壮, 史建公, 郝建薇, 等. 拟薄水铝石的胶溶性与结构的关系[J]. *石油学报(石油加工)*, 2016, 32(3): 493-500.  
MIAO Z, SHI J G, HAO J W, et al. Relationship between peptization and structure of pseudo-boehmite [J]. *Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section)*, 2016, 32(3): 493-500.
- [9] 张继光. 催化剂制备过程技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2004.
- [10] SOARES NETO T G, COBO A J G, CRUZ G M. Evolution of morphologic properties on the preparation of Ir/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts with high metallic contents [J]. *Applied Surface Science*, 2005, 240(1/2/3/4): 355-365.
- [11] 中国人民解放军总装备部. 卫星用无水肼分解催化剂规范: GJB 8371—2015 [S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2015.
- [12] 国防科学技术工业委员会. 催化剂-814 和催化剂-816 规范: GJB 1960—1994 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [13] SOARES NETO T G, DIAS F F, COBO A J G, et al. Evolution of textural properties and performance of Ir/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts during hydrazine catalytic decomposition in a 2 N satellite thruster [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 173(1): 220-225.
- [14] 孙军, 黄延强, 张涛. 纳米碳纤维/碳毡负载碳化钨和碳氮化钨的肼分解性能[J]. *化工学报*, 2015, 66(8): 2976-2981.  
SUN J, HUANG Y Q, ZHANG T. Catalytic performance of carbon fiber felt supported tungsten carbide and tungsten carbonitride for hydrazine decomposition [J]. *CIESC Journal*, 2015, 66(8): 2976-2981.
- [15] DAI H B, ZHONG Y J, WANG P. Hydrogen generation from decomposition of hydrous hydrazine over Ni-Ir/CeO<sub>2</sub>



- catalyst [J]. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2017, 27(1): 121-125.
- [16] 王学涛, 张小龙, 焦叶凡, 等. 不同载体负载的 Mn 系复合氧化物催化剂性能研究[J]. *锅炉技术*, 2015, 46(4): 7-11.
- WANG X T, ZHANG X L, JIAO Y F, et al. Study on performance of Mn-based oxide catalysts on different supports [J]. *Boiler Technology*, 2015, 46(4): 7-11.
- [17] 刘茜. 中孔氧化铝材料的合成、表征和催化应用研究[D]. 大连: 中国科学院研究生院(大连化学物理研究所), 2006.
- LIU Q. Synthesis, characterization and catalytic application of mesoporous alumina materials [D]. Dalian: Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [18] KOLITCHEFF S, JOLIMAITRE E, HUGON A, et al. Tortuosity of mesoporous alumina catalyst supports: Influence of the pore network organization [J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2017, 248: 91-98.
- [19] JANJUA N K, FIRDOUS N, BHATTI A S, et al. Preparation and catalytic evaluation of Ir and Ru catalysts supported in  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  for hydrazine decomposition in a 1 N microthruster [J]. *Applied Catalysis A: General*, 2014, 479: 9-16.
- [20] SOARES NETO T G, COBO A J G, CRUZ G M. Textural properties evolution of Ir and Ru supported on alumina catalysts during hydrazine decomposition in satellite thruster [J]. *Applied Catalysis A: General*, 2003, 250(2): 331-340.
- [21] 赵许群, 张涛, 孙孝英, 等. 肼分解催化剂的表征及失活机理研究[J]. *催化学报*, 2000, 21(6): 594-596.
- ZHAO X Q, ZHANG T, SUN X Y, et al. Characterization of catalyst for hydrazine decomposition and its deactivation mechanism [J]. *Chinese Journal of Catalysis*, 2000, 21(6): 594-596.
- [22] 鲍世国, 公绪滨, 陈艺, 等. 一种 HAN 基单元推进剂及催化分解性能研究[J]. *火箭推进*, 2018, 44(2): 39-45.
- BAO S G, GONG X B, CHEN Y, et al. Investigation of a novel HAN-based monopropellant and its catalytic decomposition performance [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2018, 44(2): 39-45.
- [23] JOFRE J B F, SOARES NETO T G, DIAS F F, et al. Evaluation of Ir/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Ir-Ru/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  and Ru/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  catalyst performance in a 5 N satellite thruster [J]. *Acta Astronautica*, 2013, 85: 41-50.
- [24] 王镜淇, 王成刚, 陈雪娇, 等. RBCC 组合动力用液体推进剂研究进展[J]. *火箭推进*, 2022, 48(6): 101-112.
- WANG J Q, WANG C G, CHEN X J, et al. Research progress of liquid propellant development for RBCC engine [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2022, 48(6): 101-112.