

新型针式高压隔离阀的设计和试验

王建维¹, 李林², 王平阳¹, 周长斌¹, 杭观荣²

(1.上海交通大学机械与动力工程学院, 上海200240;

2.上海空间发动机工程技术研究中心 上海空间推进研究所, 上海201112)

摘要: 空间推进任务有时需要气体推进剂在高压贮箱内密闭长达数年, 隔离阀作为隔离贮箱内高压气体推进剂的装置, 不仅要求在数年后可正常启动, 而且在高压条件下必须严格控制推进剂的泄漏量。因此, 提出了一种新型高压气体隔离阀, 其采用中空启动针穿破隔离装置的启动方式以减小金属碎屑对气体微通道的影响。对该隔离阀进行了开启验证试验, 并以开启隔离阀前后通过启动针的气体流量之比作为一个重要参数, 分析了金属碎屑对气体微通道的影响。结果表明: 开启隔离阀的功率约为5.6 W, 满足微小卫星对低功率的严格要求; 同时气体流量之比约为95%, 可认为金属碎屑对气体微通道的影响比较小。

关键词: 电推进系统; 微型隔离阀; 启动针; 气体流量

中图分类号: V 431 **文献标志码:** A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2021.01.014

Design and Test of New High-Pressure Isolation Valve

WANG Jianwei¹, LI Lin², WANG Pingyang¹, ZHOU Changbin¹, HANG Guanrong²

(1.School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2.Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai Engineering Research Center of Space Engine, Shanghai 201112, China)

Abstract: Gaseous propellant is sometimes required to be stored in the high-pressure tank for several years. As the isolation valve is used to isolate high-pressure gas propellant in the tank, it is required to be activated normally after several years, and the leakage in the high-pressure condition must be strictly controlled. Therefore, a new type of high-pressure isolation valve is proposed. The mode of a hollow-designed starting needle piercing through the isolation device is adopted to reduce the effect of the metal debris on the gas channel through the radial micropore. It is verified whether the isolation valve can be properly opened. The ratio of the volume flow before activation to that after activation is an important parameter to analyze the effect of metal debris on the gas passage. The results show that the power consumption of opening the valve is 5.6 W, which meets the strict requirements for low power of micro satellites. In addition, the ratio of the volume flow is 95%, which means the metal debris have less effect on the gas passage.

Key words: electric propulsion system; micro isolation valve; starting needle; volume flow

0 引言

用于微小卫星轨道与姿态控制的推力极小, 精度极高, 一般为毫牛甚至微牛量级^[1]。同时, 微小卫星编队飞行要求保持各卫星间的相对位置而非绝对位置, 所需的最小冲量极小, 这就对在轨推进系

统提出了苛刻的要求^[2-3]。冷气推进由于成本低和可靠性高, 在微小卫星姿轨控制中有广泛应用^[4]。同时, 电推进系统以其比冲高、推力小且容易精确控制等优点, 大有赶超之势^[5-6]。气体推进剂作为冷气推进的推进剂, 也是目前电推进系统常用的推进

收稿日期: 2020-01-13; 修回日期: 2020-02-16

基金项目: 上海市科学技术委员会基金(17DZ2280800)

作者简介: 王建维(1993—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电推进系统。

通信作者: 王平阳(1971—), 男, 副教授, 主要研究方向为先进空间推进技术。

剂,存在易泄漏、难以长期储存等问题^[7-8]。根据空间推进任务的需要,气体推进剂有时需要在高压贮箱内密闭长达数年,因此,不仅要保证用于隔离贮箱内高压气体的隔离阀在数年后可正常开启,而且还要求在高压条件下严格控制泄漏量^[9]。

为了降低泄漏或者因故障不能正常开启的风险,隔离阀通常采用常闭一次性的设计^[10]。常闭一次性设计的隔离阀在开启前可以保证良好的密封性能,有效解决了气体推进剂易泄漏的问题。区别于常规阀门可以多次重复使用,此类隔离阀仅能够使用一次,即开启后便失去了作为隔离阀的作用。

采用常闭一次性的火力隔离阀,利用储存于隔离阀内部的爆炸材料在爆炸瞬间产生的高压气体推动活塞装置开启隔离阀^[10]。虽然此设计保证了火力隔离阀良好的气密性能,但是隔离阀内部爆炸材料的存储量以及瞬间剧烈的爆炸过程均难以控制。同时,其火力启动方式在启动时产生较大震动,也会对卫星上的电子元器件造成较大影响^[11]。

之后发展的热启动熔断式隔离阀在沿用传统隔离阀常闭一次性设计的基础上,采用热启动的方式^[12-14]。热启动的方式需先加热并融化用于密封气体通道的焊料金属,利用高压气体吹破熔融的焊料金属打开气体通道。由于气体通道入口位于焊料金属的下游,在此过程中因高压气体吹破熔融的焊料金属所产生金属碎屑极有可能通过气体通道入口进入气体通道。采用热启动的方式尽管很大程度减小了震动,但在此过程中产生的金属碎屑极有可能进入并堵塞下游气体通道造成严重的航天事故^[14]。虽然热启动隔离阀配备了不同尺寸的过滤器,但一方面对气体流动造成较大影响;另一方面很难保证过滤器是否会被金属碎屑堵塞。同时,热启动隔离阀需要多个用来熔化密封焊料金属及垫块金属等部件的加热装置,导致功率消耗较大,难以满足微小卫星对低功率的严格要求^[13]。同时,过滤器的存在限制了热启动熔断式隔离阀尺寸的进一步缩小,限制了其在微小卫星上的应用。

无论火力隔离阀还是熔断式隔离阀,其隔离装置均位于气体通道入口的上游以隔离贮箱内高压气体推进剂。此外,两者均采用破坏隔离装置的方式开启隔离阀,但在此过程中会产生大量金属碎屑。这些金属碎屑会被高压气体推进剂直接吹进位于隔离装置正下方的气体通道,不同于以往隔离

阀直接破坏隔离装置产生金属碎屑并极易堵塞下游气体通道。本文提出的隔离阀采用中空设计的启动针穿透隔离装置,即将位于启动针顶部的径向气体通道入口缓慢送至隔离装置的上游。开启隔离阀后,气体通道入口位于隔离装置的上游,而启动针穿透隔离装置的过程中可能产生的金属碎屑会被高压气体推进剂吹至隔离装置的下游,故可很大程度上减少金属碎屑进入并堵塞气体通道。同时,对该新型隔离阀进行可行性试验和隔离阀性能参数测量。

1 隔离阀的设计

1.1 结构设计

本文提出的隔离阀包括陶瓷套筒、基座、启动针、隔离装置和阀盖等主要部件,如图1所示^[15]。陶瓷套筒固定在基座的外侧,一方面用于固定加热元件;另一方面在基座与加热元件之间起到绝缘作用。支撑装置直接铸造在基座本体内部,与基座本体融为一体组成基座。在基座内部的中心螺纹孔上固定着启动针,启动针正上方放置隔离装置,阀盖放在隔离装置正上方。在阀盖与隔离装置及基座与隔离装置接触的地方,分别装有密封圈保证良好的密闭性。

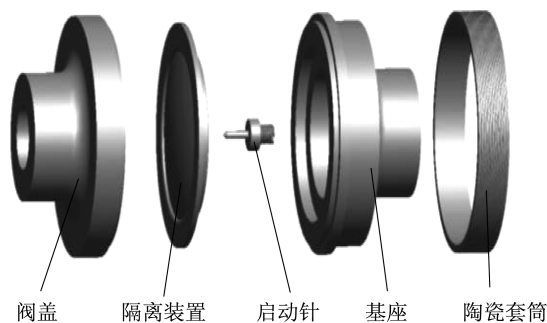


图1 隔离阀的三维分解图

Fig.1 Three-dimensional exploded view of the isolation valve

为了保证用于隔离贮箱内高压气体的隔离阀在数年后可正常开启,不仅要减少启动针穿透隔离装置的过程中产生的金属碎屑进入启动针内部微通道,而且还要保证启动针有足够的强度可以顺利穿透金属隔离装置。为了实现以上这个目标,隔离阀采用中空设计的启动针穿透隔离装置开启隔

离阀,如图 2 所示。中空设计的启动针类似于医用注射器的针头。医用注射器的针头是在针头的顶端设置轴向微孔,这样在穿破隔离装置的过程中,通道入口与隔离装置的接触面积最大,很容易有碎屑进入并堵塞针头内部微通道^[16]。此外,医用针头是用于穿破皮肤组织,其针头的强度很难穿破金属隔离装置。

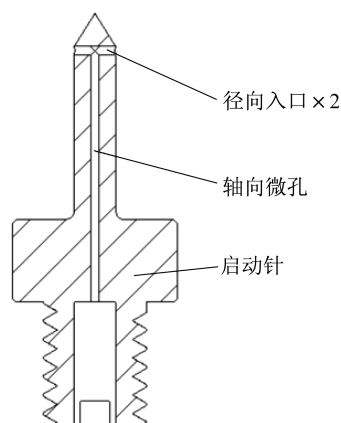


图 2 启动针二维截面图

Fig.2 Two-dimensional sectional view of the starting needle

区别于注射器针头在针头顶端设置轴向微孔,启动针的设计为在针头顶端对称设置两个孔径极小的径向侧孔,使得通道入口与隔离装置的接触面积最小,从而大大减少在启动针穿破隔离装置的过程中可能产生的金属碎屑进入针头内部微通道。从启动针的底端向上设置一个孔径极小的轴向微孔至针头处,且与侧孔连通。径向侧孔作为气体通道的入口,在打开隔离阀后将暴露于上游高压侧,如图 3 所示。启动针的材料采用硬度大、熔点高的不锈钢。启动针的针头部分采用外径为 1 mm、内径为 0.6 mm 的毛细不锈钢管加工而成。启动针的针尖为圆锥面,针尖高度为 0.8 mm。采用电火花打孔技术在针尖处对称设置两个孔径为 0.6 mm 的径向侧孔。径向侧孔距离针尖顶部 1 mm,这样保证了径向侧孔位于针尖锋面的下侧。如果距离小于 1 mm,径向侧孔将位于启动针的针尖圆锥面上;在启动针穿破隔离装置的过程中,气体通道入口与隔离装置接触面积增大,导致更多金属碎屑进入气体微通道。从启动针的底端向上设置一个孔径为 0.6 mm 的轴向微孔至针头处,且与侧孔连通。

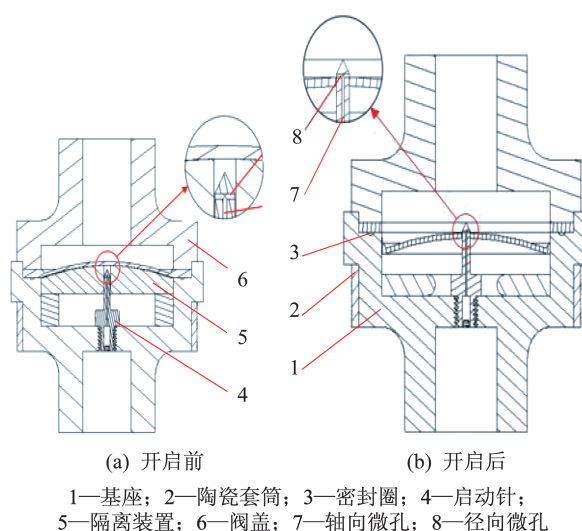


图 3 隔离阀的二维截面

Fig.3 Two-dimensional sectional view of the isolation valve

隔离装置用以隔离上游高压气体推进剂,由球缺状支撑装置和铸造于其上表面的低熔点金属薄层两部分组成。金属薄层采用低熔点、低硬度的金属或者合金,起到隔离高压气体的作用。球缺状支撑装置采用熔点高、硬度高的金属或合金,用于支撑上面金属薄层。同时沿球缺状支撑装置轴向开有微孔,孔径稍大于启动针外径,保证启动针可顺利穿过该微孔。

基座作为阀体的支撑,用以放置上述其他部件。沿基座轴线设置一个孔径较小的螺纹通孔,其作用一方面作为气体通道通向下流,另一方面用以固定启动针。基座采用基座本体和直接铸造于其内部的环状支撑装置组成。环状支撑装置支撑着其正上方的隔离装置以平衡高压侧气体施加的压力。支撑装置采用低熔点金属或合金,当被加热时支撑装置可以快速软化并且易于变形。当启动隔离阀时先加热支撑装置使其软化,上游高压气体能够推动隔离装置压缩软化的支撑装置,从而使隔离装置可向下游移动一定距离。由于隔离阀内部空间有限,环状支撑装置允许被压缩的最大距离仅为 2 mm 左右。

隔离阀的主要部件如图 4 所示,其中图 4(a)为基座本体,基座本体底部颜色比较暗的地方就是螺纹孔。螺纹孔是一个通孔,一方面用于固定启动针,另一方面用于连通下游管道,如图 4(b)所示。基座本体上表面上的环状凹槽即为密封环槽,在阀盖上相应位置也设置了对应的密封环槽。铸造好

的基座,紧贴基座本体内壁面的部分为铸造好的套筒状支撑装置,如图 4(b)所示。加工好的球缺状支撑装置,中间颜色较暗的地方为沿轴向设置的通孔,直径稍大于启动针外径如图 4(c)所示,保证启

动针可顺利穿过。加工好的启动针,启动针的针尖为圆锥面,紧邻圆锥面的黑色小孔即为径向侧孔,如图 4(d)所示,在其下面对称的位置也设置了一个同样的径向侧孔。

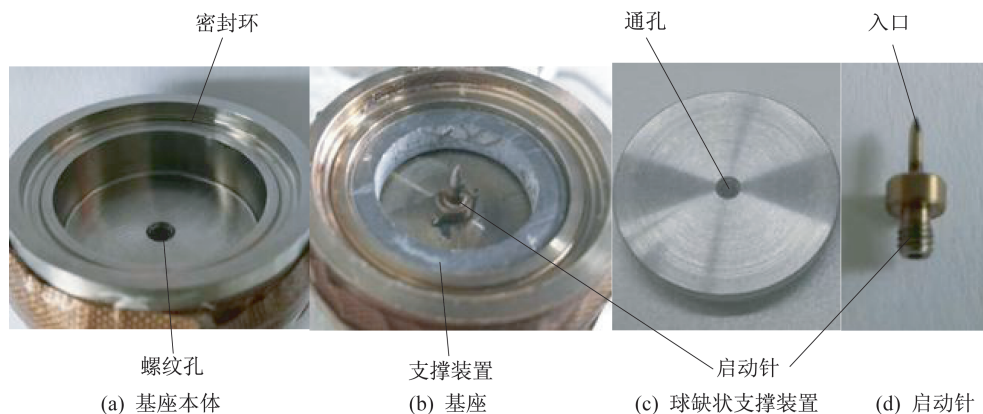


图 4 隔离阀主要部件

Fig.4 Main components of isolation valve

1.2 工作原理

启动隔离阀,首先接通加热装置两端的电源,对铸造于基座内部的支撑装置进行加热。随着支撑装置不断受热软化,上游高压气体将缓慢推动隔离装置不断压缩支撑装置。随着隔离装置向下移动,其正下方的启动针将从隔离装置的微孔穿出直至冲破铸造于隔离装置上表面的金属或合金薄层,如图 3 所示。此时针头处的径向侧孔已暴露于高压气体侧,而径向侧孔与启动针内部通向气体下游的微通道相连通,故通向下游的气体通道被打开。在启动前,需保证铸造于启动装置上表面金属或合金薄层不会被上游高压气体穿透,但在满足一定安全余量的同时金属或合金薄层的厚度尽可能小。实验中选用的金属或合金薄层厚度为 0.5 mm,以保证隔离阀可正常开启。启动过程中隔离装置温度相对较低,有效避免了隔离装置上表面的金属或合金因加热熔化而被气体吹破产生金属碎屑。

2 实验装置及实验

2.1 实验装置

通常要求用于隔离贮箱内高压气体推进剂的隔离阀能够承受比较高的压力,同时还要在数年后可正常开启。由于微型隔离阀采用中空设计的启

动针冲破隔离装置的启动方式,开启过程中有可能会产生金属碎屑。为了测试微型高压隔离阀的耐压性能、能否正常开启、是否会产生金属碎屑以及可能产生的金属碎屑对气体流动的影响,设计了相应的实验装置,如图 5 所示。采用储存于高压贮箱内的高压氮气作为实验气体,依次通过调节阀门、压力计 1(P1)、待测隔离阀、压力计 2(P2)、气体流量计。通过调节阀门可以调节隔离阀上游气体压强的大小。压力计 1、压力计 2 分别测量隔离阀上、下游气体压强。流量计用于测量在不同工况下通过隔离阀的气体流量。

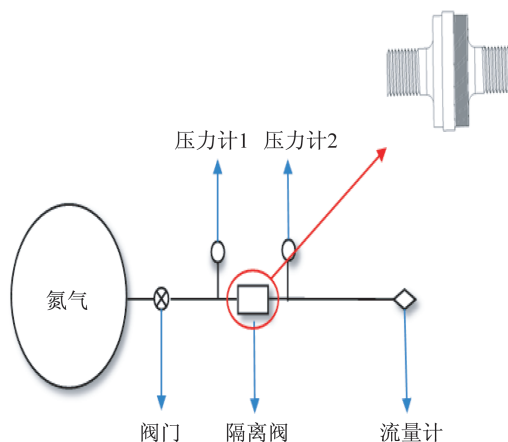


图 5 实验装置示意图

Fig.5 Schematic diagram of the experimental setup

实验将从以下3个方面进行:1)隔离阀耐压测试,测试隔离阀能否承受10 MPa高压;2)隔离阀能否正常开启,同时在实验中对其开启时间及功率进行记录;3)隔离阀的性能分析。启动针内部的微通道为隔离阀内部通道直径最小的部分,金属碎屑对气体微通道的影响主要取决于其对启动针内部微通道的影响。因此,主要是通过对开启隔离阀前后通过启动针的气体流量进行对比,分析金属碎屑对隔离阀内部微通道的影响。

2.2 开启试验及流量测量

隔离阀的开启压强设定为10 MPa,加热元件两端的电压为8 V,通过的电流为0.697 A,即加热功率为5.576 W。在接通加热元件两端的电源之前,经测试隔离阀能够承受该压强。接通加热元件两端的电源,通过检测隔离阀后面的压力计是否有示数来判断隔离阀是否开启。在相同条件下进行多次开启实验,实验测得其平均开启时间为15.56 min。

在开启隔离阀前后,分别测量了启动针两端不同压差下所对应的气体流量,如图6所示。从图中可以看到,通过启动针的气体流量随着隔离阀两端压差的增大而增大。可以发现开启隔离阀前后,通过启动针的流量变化并不大。相应地,可以得出开启隔离阀的过程中,金属碎屑对启动针内部通道的影响是很小的。

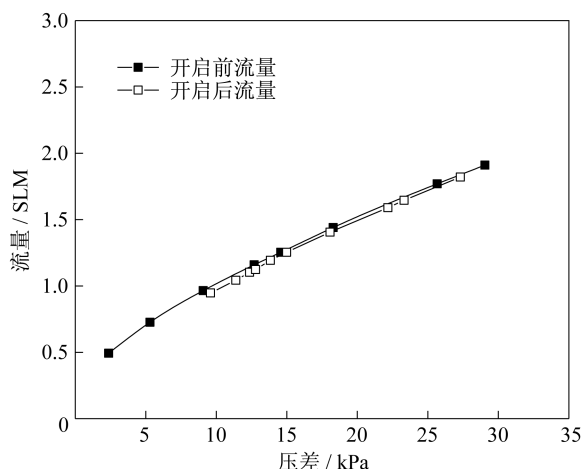


图6 开启隔离阀前后通过启动针的气体流量

Fig.6 Gas flow through the starting needle before and after opening the isolation valve

3 隔离阀性能分析

为定量地分析金属碎屑对启动针内部通道的影响大小,将实验数据通过回归分析进行拟合处理^[17-19]。

根据开启隔离阀之前通过启动针的气体流量的点线图,可设其回归方程为

$$\hat{y} = Ax^{\frac{1}{2}B}, 0 < B < 2 \quad (1)$$

式中: A 和 B 为参数。

对式(1)线性化处理得

$$Y = a + bX \quad (2)$$

式中: $a = \ln A$; $b = \frac{1}{2}B$; $X = \ln x$; $Y = \ln \hat{y}$ 。

经计算,可得式(2)的相关系数为0.999。对比相关系数表,可认为 Y 与 X 之间的线性相关关系特别显著。因此,可认为上述假设的回归方程式(1)是成立的,故可得 y 关于 x 的回归方程:

$$\hat{y} = 0.298x^{0.542}, 2.37 \text{ kPa} < x < 29.05 \text{ kPa} \quad (3)$$

为了验证曲线回归方程式(3)与测量数据的拟合程度,一般采用相关指数 R^2 作为衡量回归效果好坏的指标,即

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (y_n - \hat{y}_n)^2}{\sum_{n=1}^N (y_n - \bar{y})^2} \quad (4)$$

R^2 (或 R)越大,越接近1,则表明所配曲线的效果越好。经计算其值为0.996,故可认为曲线回归方程式(3)与所测量数据拟合较好。

同理,可得开启隔离阀之后通过启动针的气体流量关于压差的曲线回归方程为

$$\hat{y} = 0.227x^{0.627}, 10 \text{ kPa} < x < 27 \text{ kPa} \quad (5)$$

其相关指数 $R^2 = 0.971$ 。故可认为曲线回归方程式(5)与所测数据拟合较好。

利用上述拟合的曲线方程,可得开启隔离阀后通过启动针的气体流量与开启之前气体流量的比率,如图7所示。以气体流量的比率作为衡量开启隔离阀过程中所产生金属碎屑对气体微通道影响的指标。由图7可知,在所测量区间范围内气体流量的比率一直分布在95%附近。气体比率随着压差的增大逐渐增大并接近100%,表明随着压差的增大开启隔离阀之后的气体流量在逐渐接近开启之前的气体流量。因此,可以认为金属碎屑对气体微通道的影响比较小。并且,随着隔离阀两端压差的增大,金属碎屑对气体微通道的影响逐渐减小。

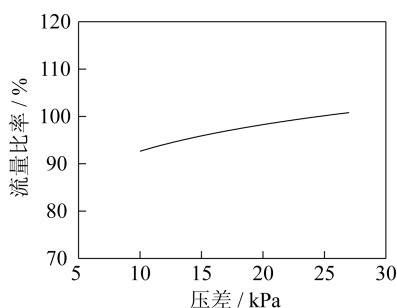


图 7 开启隔离阀前后通过启动针的流量之比随压差的变化
Fig.7 The ratio of volume flow through the starting needle before and after opening the isolation valve varies with the pressure difference

4 结束语

1) 所设计的微型高压隔离阀,用于空间任务中隔离高压气体推进剂,具有结构简单、安全、稳定等特性。在 10 MPa 左右的压强条件下,只需要约 5.6 W 的功率便能打开隔离阀,能很好地满足微小卫星对低功率的严格要求。

2) 金属碎屑对启动针内微通道的影响是一个很重要的因素。在开启隔离阀的过程中,为了尽可能减少金属碎屑的产生量,则要求隔离装置的温度尽可能低。同时,要保证开启隔离阀的过程为启动针穿过隔离装置打开气体通道而非隔离装置被高压气体吹破打开气体通道。

3) 气体通道入口的位置,也就是启动针针尖至径向微孔距离是个十分重要的参数。如果这个距离小于 1.0 mm,可能导致在启动针穿过隔离装置的过程中产生较多的金属碎屑。如果大于 1.5 mm,由于隔离装置金属薄层的厚度为 0.5 mm,气体通道入口距离隔离装置上游的距离将大于 2.0 mm,故在环状支撑装置有效的压缩范围内无法使气体通道入口进入高压气体侧,从而导致隔离阀无法正常开启。因此,要控制气体通道入口至启动针针尖的距离在 1.0~1.5 mm 之间。

参考文献

[1] 康宝鹏,赵学聪,乔大勇,等. Mems 冷气推力器的制作和热性能研究[J]. 推进技术, 2016, 38(7): 1641-1647.
[2] KITTS C, TWIGGS R, PRANAJAYA F, et al. Emerald: a low-cost spacecraft mission for validating formation flying technologies [C]// Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 1999: 217-226.

[3] 吴汉基. 卫星控制用的脉冲等离子体推进系统[J]. 中国空间科学技术, 1981, 1(4): 44-50.
[4] HINKLEY D. A novel cold gas propulsion system for nanosatellites and picosatellites [C]// Proceedings of 22nd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. Reston, USA: AIAA Press, 2008: 44.
[5] 林来兴. 现代小卫星的微推进系统[J]. 航天器工程, 2010(6): 13-20.
[6] 康小录, 张岩. 空间电推进技术应用现状与发展趋势[J]. 上海航天, 2019, 36(6): 24-34.
[7] 李强, 李会峰, 袁媛, 等. 在轨冷气推进系统泄漏估计[J]. 推进技术, 2018, 39(5): 1187-1193.
[8] 吴汉基, 冯学章, 蒋远大, 等. 混合气电弧加热发动机的性能试验[J]. 中国空间科学技术, 2002, 22(4): 57-63.
[9] 李永, 丁凤林, 周成. 深空探测推进技术发展趋势[J]. 深空探测学报, 2018, 5(4): 323-330.
[10] BEMENT L J. Functional performance of pyrovalves [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1997, 34(3): 391-396.
[11] BEMENT L J, SCHIMMEL M L. A manual for pyrotechnic design development and qualification [R]. NASA-TM-110172, 1995.
[12] RANGSTEN P, JOHANSSON H, BENDIXEN M, et al. Mems micro propulsion components for small spacecraft [C]// Proceedings of Technical Session X. Reston, USA: AIAA Press, 2011: 67.
[13] STENMARK L, RANGSTEN P. High pressure isolation valve system: US8141572B2 [P]. 2012-03-27.
[14] BEJHED J, RANGSTEDN P, KOHLER J. Demonstration of a single use microsystem valve for high gas pressure applications [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2007, 17(3): 472-481.
[15] 王平阳, 王建维. 用于冷启动微型高压气体的针式隔离阀: CN201810918980.1 [P]. 2019-08-02.
[16] WHITAKER M A, LANGESTON P, NAYLOR A, et al. Particle size and shape effects in medical syringe needles: experiments and simulations for polymer microparticle injection [J]. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, 2011, 22: 1975-1983.
[17] 蒋萍, 赵建玉, 魏军. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 196-230.
[18] 钱政, 王中宇, 刘桂礼, 等. 测试误差分析与数据处理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008: 134-149.
[19] 石振东. 误差理论与曲线拟合[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010: 243-253.