

# 一种耐高温阀芯密封材料在阀门上的应用

王立君<sup>1,2</sup> 黄爱清<sup>1,2</sup> 唐妹芳<sup>1,2</sup>

(1. 上海空间推进研究所, 上海 201112;

2. 上海空间发动机工程技术研究中心, 上海 201112)

**摘 要:**随着深空探测技术的发展,对深空探测器的环境温度要求越来越高,姿控发动机用电磁阀的最高工作温度由原先的80℃上升为140℃。为满足深空探测技术对阀门的高温环境要求,进行了两组试验,通过常温电磁阀的动作试验、验收级热循环试验(10~90℃)、鉴定级热循环试验(0~100℃)以及流阻试验进行比对,筛选出可耐高温的阀芯密封材料(PFA)。采用该阀芯密封材料的阀门顺利通过高温电磁阀的热循环试验(-15~135℃)、热真空试验(-15~135℃)、力学试验以及50万次寿命试验的验证,试验过程中以及试验后,采用该阀芯密封材料的阀门行程、漏率和响应特性等性能参数稳定。证明该阀芯密封材料可满足深空探测系统对阀门的高温环境要求。

**关键词:**PFA; 阀芯; 耐高温材料; 性能试验

**中图分类号:**V250.2-34    **文献标识码:**A    **文章编号:**1672-9374(2018)05-0061-05

## An application of sealing material for high-temperature resistance valve core in valve

WANG Lijun<sup>1,2</sup>, HUANG Aiqing<sup>1,2</sup>, TANG Meifang<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Space Engine, Shanghai 201112, China)

**Abstract:**Two experiments are conducted to meet the requirements of deep space exploration technology for high-temperature environment of valves. The sealing material PFA for high-temperature resistance valve core was chosen by means of valve action test at normal temperature, thermal cycling test in 10~90℃, thermal cycling test in 0~100℃ and flow resistance test. The valve made from PFA successfully passed the thermal cycling test in -15~135℃, vacuum thermal test in -15~135℃, mechanical test and life test of 500 000 times. Its performance parameters such as spool stroke, leak rate and response characteristic stable in the experiment, which prove that the valve core sealing material can meet the high-temperature environmental requirements of deep space exploration technology for valves. This research can also provide a reference for design of other high-temperature valves.

**Keywords:** PFA; valve core; high-temperature resistance material; performance test

0 引言

随着深空探测技术的发展,对深空探测器的环境温度要求越来越高,姿控发动机用电磁阀的最高工作温度由原先的 80 ℃ 上升为 140 ℃,而传统的阀芯密封材料使用温度小于 100 ℃,不能满足深空探测的环境要求,为了适应系统新的要求,需突破高温阀芯材料技术的应用。

1 电磁阀的原理

电磁阀的工作原理见图 1:电磁阀在线圈未通电时,靠介质压力及弹簧力,将阀芯(与阀芯组件连成一体)压紧在阀座上,在电磁阀内腔流道上形成密封副。当给线圈通以一定电流时,由软磁合金材料构成的壳体组件、阀芯组件和罩壳被磁化,与线圈构成磁回路,对阀芯组件产生轴向吸力,吸引阀芯组件向远离阀座方向运动,直至电磁吸力克服弹簧力和介质压力,使阀门完全开启。只要线圈持续通电,阀门就一直保持开启状态,直到电流切断,电磁吸力下降到不足以克服弹簧力和介质压力的合力时,阀芯复位,阀门关闭。

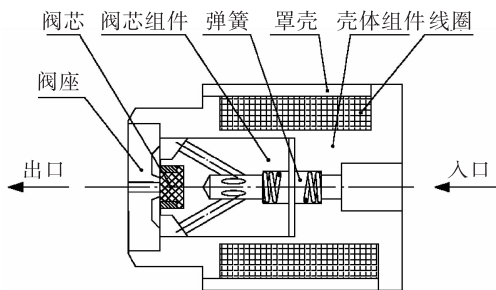


图 1 电磁阀的工作原理图

Fig. 1 Working principle of the solenoid valve

由阀芯和阀座刃口构成的密封副保证产品的密封性能,为了密封性能的良好,需要阀芯和阀座材料在一定的温度范围内性能稳定。

常用的密封副形式有硬密封和软密封两种:硬密封副要求产品零件加工精度高,表面粗糙度小,对中性好,否则很难达到上万次工作寿命和低泄漏率,适用于高压(约 15 MPa 以上)工作压力;软密封副具有良好的抗污染能力,只要较低的密封比压就可达到良好的密封性能。设计上,可以达到上百万次工作寿命。

姿控发动机用电磁阀一般工作压力比较低,小于 2.0 MPa,工作次数要求比较高,因此广泛采用软密封式密封副,即将较软的阀芯材料嵌入阀芯组件,与阀座的硬刃口构成密封副来保证产品的密封性能。

2 耐高温阀芯材料性能

几种耐高温阀芯材料的性能参数对比如表 1。由表 1 中可知 5 种材料(FEP, 16685, 09-1833, N160, PFA)的最高可连续使用温度均大于 200 ℃,可以满足电磁阀最高 140 ℃ 的工作环境。

3 试验验证情况

首先对 5 种耐高温材料阀芯按正常电磁阀环境条件进行对比试验,找出性能最稳定的材料。然后对找出的性能最稳定的材料进行电磁阀的高温环境试验,通过试验前后的数据比对来验证材料的高温性能。

表 1 耐高温阀芯材料性能参数对比表

Tab. 1 Comparison of performance parameters of high-temperature valve core materials

牌号	FEP	16685	09-1833	N160	PFA
熔点/℃	270	270	270	260	302-310
最高连续使用温度/℃	200	200	200	204	260
拉伸强度/MPa	19-22	19-22	19-22	23	27-35
拉伸回弹率/MPa	343	343	343		451
弯曲回弹率/MPa	539-637	539-637	539-637		647-686
硬度	D55	D55	D55	D56	D60
承载变形/%	100 ℃	5.0	5.0		2.4
	25 ℃	3.0	3.0		2.7

3.1 五种阀芯材料的对比试验

3.1.1 试验准备

阀芯采用上述 5 种原料粒子加工而成(如图 2),装在不同的阀门里,进行环境试验。为避免试

验的偶然性,每种阀芯各做三件,试验进行三轮,每轮同种阀芯材料对应不同的阀门,阀门的装配状态及试验内容相同,阀芯编号与阀芯材料的对应如表 2。



图 2 五种原料加工成的阀芯组件  
Fig. 2 Valve core components made from five materials

表 2 不同阀芯材料对应产品编号表  
Tab. 2 Numbers of different valve core materials

产品编号	阀芯批次号	数量
2-0A	16685	3
2-0B	09-1833	3
2-0C	N160	3
2-0D	FEP	3
2-0E	PFA	3

3.1.2 试验过程

阀门性能的稳定性,体现在响应特性、行程、流阻特性和密封性能等方面。几个方面互相关联,互相影响:当阀门的行程超大会造成阀门响应速度变慢,若为发动机阀则会造成发动机不能按照指令准确开关,严重的会造成发动机脉冲工作不正常;阀门行程变小会造成阀门的流阻增大,发动机燃料供应不充足,推力不足,对于双组元发动机,若阀门的流阻变化,严重的会使发动机混合比失控推力不足,甚至无法点火;行程变大后,弹簧压缩量变小,提供的密封力亦相应减小,密封比压下降,造成阀门密封性能变差、阀门泄漏。因此,本试验中,阀门的稳定性主要以阀门的行程参数变化为指标,适当考虑响应特性、密封性能等方面。

按图 3 进行试验,其中:  
验收级热循环:循环温度 10 ~ 90 ℃,循环次数

6 次,每次循环在高温端和低温端至少停留 1 h,并在第一次循环和最后一次循环的最高和最低温度端空载动作两次;

鉴定级热循环:循环温度 0 ~ 100 ℃,循环次数 12 次,每次循环在高温端和低温端至少停留 1 h,并在第一次循环、第六次循环和最后一次循环的最高和最低温度端空载动作两次。

通过测量记录试验每个阶段各个阀门的行程、响应特性以及密封性能等参数,找出性能最稳定的阀门对应的阀芯。

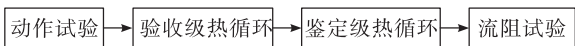


图 3 试验项目及顺序图  
Fig. 3 Experiment contents and sequence

3.1.3 试验结果

1) 第一轮试验结果分析

第一轮试验(试验项目及顺序见图 3)行程参数变化如表 3。对第一轮试验结果进行分析,发现动作试验后、验收级热循环、鉴定级热循环试验后,阀芯 E 的行程变化量最小,流阻试验后,阀芯 E 的行程变化量最大。但从总变化量上看,阀芯 E 的行程变化量 0.12 mm 为最小。阀芯 E 采用的 PFA 表现出优异的耐温性能。

2) 第二轮试验结果分析

将第一轮试验的 5 件阀门分解,更换阀芯,重新

装配并进行第二轮试验,第二轮试验(试验项目及顺序见图 3)行程参数变化如表 4,对第二轮的试验结果进行分析,发现阀芯 E 的行程变化量 0.14 mm 为最小,与第一轮试验的结果一致。

表 3 第一轮试验行程参数变化表

Tab.3 Parameters of spool stroke in the first experiment						mm
阀芯序号	行程	动作试验 行程变化	验收级热循环 行程变化	鉴定级热循环 行程变化	流阻行程 变化	总行程 变化
A	0.71	0.07	0.06	0.04	0.01	0.18
B	0.71	0.09	0.11	0.01	0	0.21
C	0.71	0.11	0.07	0.06	0	0.24
D	0.68	0.08	0.08	0.105	0.005	0.27
E	0.72	0.06	0.03	0.01	0.02	0.12

表 4 第二轮试验行程参数变化表

Tab.4 Parameters of spool stroke in the second experiment						mm
阀芯序号	行程	动作试验 行程变化	验收级热循环 行程变化	鉴定级热循环 行程变化	流阻行程 变化	总行程 变化
A	0.71	0.11	0.1	0	0.01	0.22
B	0.71	0.06	0.13	0.01	0	0.2
C	0.7	0.1	0.12	0.07	0.11	0.4
D	0.72	0.08	0.1	0.05	0	0.23
E	0.72	0.09	0.04	0	0.01	0.14

3)第三轮试验结果分析  
将第二轮试验的 5 件阀门分解,更换阀芯,重新装配并进行第三轮试验,第三轮试验(试验项目及顺序见图 3)行程参数变化如表 5,对第三轮的试验结果进行分析,发现阀芯 E 的行程变化量为 0.18 mm,依然最小,与前两轮试验的结果一致。

表 5 第三轮试验行程参数变化表

Tab.5 Parameters of spool stroke in the third experiment						mm
阀芯序号	行程	动作试验 行程变化	验收级热循环 行程变化	鉴定级热循环 行程变化	流阻行程 变化	总行程 变化
A	0.71	0.09	0.2	0	-0.01	0.28
B	0.7	0.09	0.11	0.02	0.01	0.23
C	0.69	0.04	0.11	0.06	0.02	0.23
D	0.69	0.11	0.16	0.03	0	0.3
E	0.7	0.09	0.05	0.03	0.01	0.18

对三轮试验的结果进行整合,同样情况下,阀芯 E 的行程变化最小,参考阀芯 E 的材料参数,阀芯 E(PFA)的材料力学性能以及耐温能力均强于其它阀芯材料(见表 1),为理想的阀芯密封材料。

3.2 PFA 的电磁阀高温试验

3.2.1 试验准备

将 PFA 材料制成的阀芯装于阀门中,进行环境

试验,本轮试验共装配一台产品。

3.2.2 试验过程

按图 4 进行试验,与筛选试验相比,高温试验在试验最高温度、循环次数、高低温端保持时间方面更严苛,并在环境试验后进行寿命试验,其中:

热循环试验:循环温度 -15 ~ 135 ℃,循环次数 25.5 次,每次循环在高温端和低温端至少停留 4 h,

并在第一次循环和最后一次循环的最高和最低温度端空载动作两次;

热真空试验:循环温度 -15 ~ 135 ℃,循环次数 6.5 次,每次循环在高温端和低温端至少停留 4 h,并在第一次循环和最后一次循环的最高和最低温度端空载动作两次。



图 4 试验项目及顺序图

Fig. 4 Test contents and sequence

表 6 试验过程中行程、响应及漏率变化表

Tab. 6 Spool stroke, response and leak rate in experiment process

测试阶段	内漏率/ (Pa · m <sup>3</sup> /s)	阀芯行程/ mm	29 V 负载 2.0 MPa 响应特性			
			开启时间/	关闭时间/	开启电流比	关闭电流比
			ms	ms		
整机装配后	3.7 E -07	0.267	4.2	5.0	0.63	0.20
热循环后	3.7 E -07	0.270	4.4	5	0.66	0.20
热真空试验后	1.2 E -07	0.271	4.2	5.3	0.66	0.2
力学试验后	3.9 E -07	0.271	5.1	5.3	0.65	0.20
寿命试验后	3.1 E -07	0.275	5.1	5.4	0.65	0.20

4 总结

本文通过常温电磁阀的比对试验,确定了可耐高温的 PFA 做为高温电磁阀的阀芯密封材料,此材料的阀芯通过了 -15 ~ 135 ℃ 的环境试验验证,并经 50 万次寿命试验后,主要性能稳定。可满足深空探测系统对阀门的高温环境要求,该研究成果可为其它高温阀门设计时提供参考。

参考文献:

[1] 廖湘恩. 航天电器[M]. 北京:国防工业出版社,1981.

[2] 刘国球. 液体火箭发动机原理[M]. 北京:宇航出版社,1993.

[3] 赵元修,吴守生. 液体推进剂火箭发动机设计[M]. 北京:宇航出版社,1973.

[4] 朱宁昌. 液体火箭发动机设计(下)[M]. 北京:宇航出版社. 2005.

[5] 吕俊英,游金宗. 聚全氟乙丙烯的聚合[J]. 有机氟工业,

3.2.3 试验结果

试验结果如表 6 所示。由试验过程数据分析可知,经过热学(热循环和热真空)和力学环境试验后,阀门的开启时间变化小于 1 ms,关闭时间变化为 0.3 ms,50 万次寿命试验前后,阀门的性能数据基本没变化。

本次试验表明:由 PFA 材料加工而成的阀芯装配的阀门产品在高温下性能稳定,经过 -15 ~ 135 ℃ 的热试验、力学试验和 50 万次寿命试验后,产品的漏率依然维持在 1.0 × 10<sup>-7</sup> Pa · m<sup>3</sup>/s 量级,可满足深空探测高温环境对阀门的要求。

1997(3):13 - 17.

[6] 傅旭. 树脂与塑料[M]. 北京:化学工业出版社,2005.

[7] 晓力. 聚全氟乙丙烯高分子物化性能[J]. 有机氟工业, 2006(4):46 - 52.

[8] ROSENBAOUM E. Rheology and processability of teflon FEP resins for wire coating [D]. Vancouver: University of British Columbia,1998.

[9] 刘川,刘俊,邱鑫,等. 火星探测器推进系统初步设想[J]. 火箭推进,2014,40(2):44 - 48.

LIU Chuan, LIU Jun, QIU Xin, et al. Preliminary design of propulsion system for Mars exploration [J]. Journal of rocket propulsion, 2014,40(2): 44 - 48.

[10] 杭观荣,洪鑫,康小录. 国外空间推进技术现状和发展趋势[J]. 火箭推进,2013,39(5):7 - 15.

HANG Guanrong, HONG Xin, KANG Xiaolu. Current status and development trend of space propulsion technologies abroad [J]. Journal of rocket propulsion, 2013,39 (5): 7 - 15.