

# 空间流量调节阀的润滑

陈 展, 王可立, 赫伟涛, 祁增强  
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 流量调节阀运动件较多, 工作环境压力 $<10^{-11}$ Pa, 流体润滑不适宜该环境条件。阀芯与推进剂( $N_2O_4$  和 MON-1) 接触, 无成熟解决方案。本文提出的阀门运动件润滑方案, 非接触介质运动件采用自润滑材料或固体润滑膜。阀芯润滑, 提出了物理气象沉积类金刚石膜(DLC)、TiN-Au 复合膜及单质纯金膜三种方案。通过试验研究, 确定阀芯采用全新的润滑方式-离子镀金。

**关键词:** 流量调节阀; 润滑方案; 离子镀金

**中图分类号:** V434-34    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-9374 (2012) 04-0049-06

## Lubrication scheme of flow control valve used in space

CHEN Zhan, WANG Ke-li, HE Wei-tao, QI Zeng-qiang  
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** Since there are many movement components in the flow control valve which works in the pressure of less than  $10^{-11}$  Pa, the liquid-lubrication is unsuitable for it. The valve pintle is marinated in the propellant ( $N_2O_4$  and MON-1), so there is no mature solve scheme at present. In this paper, a lubrication scheme for the movement components of the valve is presented, in which the pairs of movement components that do not contact with propellant are made up of self-lubrication material or are wrapped up in a solid lubrication film; as for the the lubrication of the valve pintle, three methods are proposed such as physical vapor deposition diamond-like carbon (DLC) film, TiN-Au compound film and pure Au film. A brand-new ion-gilding scheme for the pintle lubrication was chosen according to the results of the tests and the comparison.

**Keywords:** flow control valve; lubrication scheme; ion-gilding

## 0 引言

某轨控-软着陆发动机流量调节阀在环境压

力 $<10^{-11}$  Pa 下工作, 阀门运动件较多, 运动部件的润滑、防冷焊为一大技术难题。本文根据我国空间润滑材料现状, 提出了阀门润滑方案, 并根据试验结果, 确定了润滑方案。

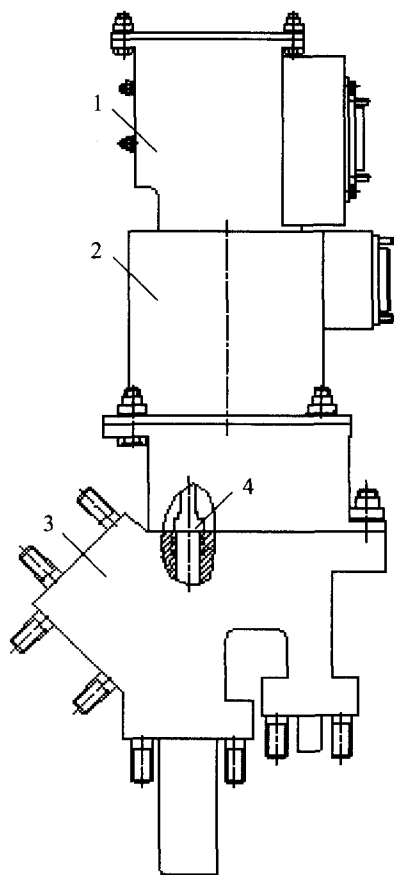
收稿日期: 2011-10-11; 修回日期: 2012-01-05

基金项目: 国家“863”项目(2008AA7050406)

作者简介: 陈展 (1979—), 男, 工程师, 研究领域为液体火箭阀门及自动器设计

## 1 阀门概况

阀门结构示意图见图1。



1-传感器; 2-作动系统; 3-壳体; 4-阀芯

图1 阀门结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of valve structure

阀门工作过程如下: 工作中需要调节流量时, 作动系统 (包括电机和丝杠) 带动阀芯上下运动, 调整阀芯开度, 同时位移传感器测量阀芯位移。

由图1可见, 阀门工作时形成以下4个运动副:

- a. 传感器测量杆导向段与传感器壳体;
- b. 电机转轴轴承 (滚动轴承);
- c. 丝杠副;
- d. 阀芯与壳体。

其中, 传感器和作动系统在真空环境下工

作。阀芯工作环境较为特殊, 阀门不工作时, 阀芯处于真空环境; 阀门工作时, O形圈密封以上部分为真空, 以下部分为介质环境。

高真空环境下, 流体润滑易挥发而失效。金属运动件在静、动摩擦转换过程中, 接触界面容易产生摩擦噪声和粘着磨损, 且摩擦热难以散失, 致使接触表面的温升很高, 从而导致粘着和摩擦磨损加剧。金属件长期接触 (如外太空任务), 在接触表面易发生原子相互扩散, 导致严重的粘着, 发生冷焊。

阀门在工作环境压力 $<10^{-11}$  Pa时, 运动件的润滑、防冷焊是一大技术难题。

## 2 阀门工作环境分析

### 2.1 阀门经历环境

#### 2.1.1 航天发射环境

火箭发动机的燃烧会引起振动, 瞬时响应和峰值 (不规则) 响应要求对临界动力学环境进行设计, 这种环境在下列阶段比较恶劣:

- 1) 火箭起飞后, 来自地面反射燃气流的扰动;
- 2) 来自主发动机的几次低频循环振动;
- 3) 在最大动压下, 火箭超音速速率 (平方) 与大气密度的降低速率的合成往往能引发严重的空气颤动和紊乱。

#### 2.1.2 气压

阀门工作环境压力 $<10^{-11}$  Pa。

在高真空环境中, 相互接触的两机械零部件表面之间很容易发生材料的相互扩散转移与键合, 从而导致冷焊。

任何油脂在低气压下均会产生蒸汽, 蒸汽分子通过吸附作用粘附在固体表面, 给卫星工作带来不可预估的影响。

#### 2.1.3 辐射

由于阀门有外层保护, 质子基本上不能穿透推进舱, 而电子流能对阀门产生辐射。目前数据表明, 在36 000 km同步卫星轨道上, 能产生 $10^5$  拉德/年辐射剂量。电子流具有穿透性, 阀门工作期内不会破坏大部分油脂, 但一些聚合物如

PTFE 在长期的使用中其密度和结晶度会增加。

#### 2.1.4 温度

阀门工作时温度, 热控保证 0℃ 以上。

#### 2.1.5 微重力

阀门处于微重力状态, 摩擦力矩扰动 (摩擦噪声) 容易使机构受到反作用而发生抖动, 尤其微重力状态下的末端抖动效应显著, 导致精确控制速度和位置机构无法正常工作。因此, 要求所采用的润滑剂必须具有低而平稳的摩擦系数。

### 2.2 阀门经历环境易产生的恶劣影响

由 2.1 描述可见, 阀门在工作过程中受到冲击, 在高真空及微重力条件下工作, 如果阀门不进行防冷焊和润滑处理, 其运动副易产生粘着和卡咬。

#### 2.2.1 粘着

当两表面接触时, 在一定的环境下易发生粘着。促使粘着的因素有:

- 1) 无氧化膜表面;
- 2) 无污染膜表面;
- 3) 无润滑剂表面;
- 4) 接触材料类似;
- 5) 真空环境。

一般而言, 软材料比硬材料 (高弹性模量材料) 有更强的粘着力。如果接触表面发生冲击负载, 这时粘着容易发生。阻止粘着可通过以下方式:

- 1) 使用高硬度和高弹性模量材料;
- 2) 使用硬的、抗磨损材料至少涂覆一个对偶面;
- 3) 在截面涂润滑油。

#### 2.2.2 卡咬

由于运动件表面形貌微观不规则及存在微小粒子碎片, 当产品受到冲击时易发生卡咬。卡咬能引起粘着、疲劳和腐蚀。通过使用与基底材料相适应的表面处理可减轻因卡咬引起的损坏。

当粘着和卡咬发生时, 运动件间极易产生冷焊。

冷焊的例子: 伽利略卫星上高位放大天线的某些弯曲零件 (肋材) 未能展开, 原因是肋材的定位销与 V 形托架对偶面之间粘着过高。销是由

钛合金 6AL-4V (TC4) 制成, 其表面经过阳极化处理, 然后用含 MoS<sub>2</sub> 的树脂粘结涂层进行涂覆。V 形块是未经表面处理的 Inconel 718 (镍基合金) 制成。分析和测试结果如下:

- 1) 销在地面运输之前发生了塑性变形, 从而引起销表面阳极化层开裂;
- 2) 地面运输过程中振动引起的磨损可能将涂层磨掉;
- 3) 发射过程中, 真空中的振动引起钛合金表面自然氧化膜的磨损消耗导致了销和插孔之间的高粘着 (冷焊)。

为此, 根据瑞士 CSEM 及奥地利研究中心 (ARC) 的试验结果, 欧空局制定了可防止冷焊的指导性意见, 主要有以下几条:

- 1) 使用具有高硬度和高弹性模量的材料;
- 2) 至少将一个对偶面涂上一层薄的、硬质、抗磨涂层 (如 TiC、TiN) 或进行表面硬化;
- 3) 对粗糙表面 ( $Ra > 1 \mu m$ ), 用含 MoS<sub>2</sub> 或 PTFE 的树脂粘结润滑剂涂覆一个对偶面。

## 3 空间润滑材料

目前空间润滑材料主要有固体和流体两类, 下面进行详细介绍。

### 3.1 固体润滑材料

- 1) 固体薄膜 二硫化钼、二硫化钨、石墨、石墨复合材料、氟化钙、共晶氟化钙/氟化钡
- 2) 聚合物 聚四氟乙烯、聚缩醛、尼龙、超高分子量聚乙烯、聚酰亚胺
- 3) 软金属膜 铅、银、金
- 4) 氧化物 PbO/SiO<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/PbS, MoO<sub>3</sub>

### 3.2 流体润滑材料

- 1) 矿物 (碳氢化合物) 油
- 2) 合成油 合成烃油或聚  $\alpha$  烯烃、全氟油 (全氟聚醚-PFPEs)、多烷基化环戊烷 (MAC)、合成脂、聚硅氧油

运用在空间的流体润滑材料主要参数有: 粘度、粘度指数、倾点、最高温度、分子量、表面张力、润滑剂密度、蒸汽压、VCM (挥发/可冷凝的物质) 试验数据 (包括试验阶段样品总的质

量损失 TML、收集的可挥发的可冷凝物质 CVCM)、比热、热传导、压力-粘度指数等,其中最重要的参数为蒸汽压。目前,国外常用的流体润滑剂为全氟聚醚,典型产品为嘉实多(Cas-trol)公司生产的 Braycote 601 系列高真空润滑脂,其蒸汽压为  $5 \times 10^{-10}$  Pa (20 °C)。但铝、钛及其合金可以导致全氟聚醚分解,因此铝、钛及其合金采用全氟聚醚润滑要进行表面改性处理。

## 4 阀门润滑方案

根据阀门实际工作情况,确定其他运动副的润滑方式:

- 1) 传感器部分运动件采用 PTFE 及聚酰亚胺 (PI), 材料具有良好的自润滑性能;
- 2) 电机转轴轴承滚道、球采用非平衡磁控溅射  $\text{MoS}_2$  方式润滑;
- 3) 传动机构丝杠副采用丝杠上非平衡磁控溅射  $\text{MoS}_2$  方式润滑。

由于阀芯工作环境的特殊性 (工作时接触介质), 因此不能采用  $\text{MoS}_2$ 。阀芯润滑方案需研究, 并通过试验确定。

### 4.1 阀芯运动副概况

阀芯材料为 TC4、与之形成运动副壳体材料为 2A14。钛合金的优点是密度低、力学性能和抗应力腐蚀裂纹性能优异。主要缺点有以下三点:

- 1) 钛合金化学活性高, 具有很强的表面粘结性;
- 2) 自润滑效果极差, 滑动时摩擦系数很大 ( $\mu > 0.5$ );
- 3) 硬度低, 耐磨性能差。当钛合金被加工成运动工件后, 工作时容易出现粘着、咬死和运动不畅等现象。

在真空环境使用的钛合金一般作以下处理:

- 1) 热化学处理, 主要为等离子渗氮;
- 2) 硬质阳极氧化;
- 3) 电镀铬;
- 4) PVD 涂层, 如 TiN、TiC 及 CrN 等。

铝合金的优点是密度低、强度高, 缺点是低刚度、低硬度、高的热膨胀系数和易形成高的粘着磨损和损伤, 在真空条件下, 铝合金表现出高且可变的摩擦系数 ( $\mu > 0.5$ )。真空环境使用的铝合金一般作以下处理:

- 1) 硬质阳极氧化;
- 2) 电镀铬。

### 4.2 阀芯副润滑方案

根据运动副结构, 阀芯上采取润滑措施易于实施, 在研制中, 根据我国空间润滑材料现状, 提出以下三种方案。

#### 4.2.1 阀芯上采用物理气相沉积 (PVD) 类金刚石膜 (DLC)

类金刚石膜具有非常低的摩擦系数、优异的抗磨损性能以及耐腐蚀性能, 各种酸、碱甚至王水都很难侵蚀它, 是一种优异的新型减摩抗磨防护材料, 在航空航天运动部件等领域具有非常大的应用价值。通过对国外样机分析发现, 在欧美等国家, 对航空、航天以及武器装备等常用的斯特林制冷机活塞表面采用镀一层  $2 \sim 3 \mu\text{m}$  的类金刚石膜, 可以有效提高活塞润滑耐磨性能, 其寿命可达 8 000 h 以上; 美国、俄罗斯航空航天惯导系统气体轴承表面通过镀非晶碳膜的技术提高了轴承的耐磨性能, 降低了摩擦系数, 使轴承的启停次数达到了 5 万次以上。

#### 4.2.2 阀芯上物理气相沉积 Ti (基体) -TiN-Au 复合膜

TiN 膜层具有良好的耐磨性和抗氧化性, 但是其摩擦系数高, 而金具有良好的化学稳定性及低剪切强度, 因此其摩擦系数小。单质金膜的缺点是强度低、承载能力和耐磨性能差。因此在阀芯基体上采用 TiN-Au 复合膜, 具有良好的减摩和抗磨性能, 能适应苛刻环境下摩擦副的特殊要求, 摩擦系数与全氟聚醚 (0.12~0.15) 相当。西安钟表研究所 Ti (基体) -TiN-Au 膜层性能如表 1 所示。由表 1 可以看出, TiN-Au 膜在空气中具有良好的摩擦学性能。

#### 4.2.3 阀芯上离子镀单质纯金膜

在满足可靠性寿命的前提下采用此方案。

表 1 Ti-TiN-Au 膜层性能 (大气环境)  
Tab. 1 Performance of Ti-TiN-Au film (atmospheric environment)

薄膜种类	摩擦系数	耐磨寿命/次	临界载荷/N	硬度/HV
TiN	0.3~0.6	$\geq 3 \times 10^5$	38±3	750±25
Au	0.12~0.15	$\geq (1 \pm 0.2) \times 10^5$	15±3	135±15
TiN-Au	0.11~0.14	$\geq 3 \times 10^5$	54±4	250±18

4.3 阀芯润滑膜方案确定及试验情况

4.3.1 润滑膜方案确定

通过摩擦学性能试验确定了阀芯润滑膜方案。

试验条件: 球-盘试验, 6 mm 钢球, 摩擦半径 5 mm, 转速 1 000 r/min, 载荷 30 g。

根据三种润滑方案, 进行阀芯镀膜后摩擦学性能试验, 阀门试验设备见图 2, 试验结果见表 2。



图 2 摩擦学性能试验设备 (CSM 摩擦磨损试验机)  
Fig. 2 Test equipment of tribological properties

表 2 膜层摩擦学性能试验结果  
Tab. 2 Test results of film tribological properties

薄膜种类	大气环境		真空环境( $1 \times 10^{-3}$ Pa)	
	摩擦系数	耐磨寿命/次	摩擦系数	耐磨寿命/次
DLC	0.075~0.1	$\geq 8 \times 10^5$	0.005~0.75	$\leq 900$
TiN-Au	0.15~0.25	$\geq 1 \times 10^5$	0.15~0.25	$\leq 900$
Au	0.15~0.25	$\geq 5 \times 10^4$	0.15~0.25	$\geq 5 \times 10^4$

由表 2 可见, DLC 和 TiN-Au 膜层大气与真空中耐磨寿命差别较大, 说明膜层特性在真空中发生了变化, 且其真空中耐磨寿命较短不能满足飞行任务需要。而单质纯金膜大气与真空中性能一致, 其耐磨寿命能满足阀门飞行任务需要。因此, 阀芯膜层最终采用单质纯金膜方案。

4.3.2 单质纯金膜性能试验

1) 结合强度

利用划格器划透试片镀层后, 用 8 倍放大镜检查划痕情况, 并用透明胶带粘结划痕处的金镀层, 结果表明, 镀层无脱落、剥离现象 (见图 3)。

2) 介质相容性试验

通过镀层试片与介质绿色四氧化二氮 MON-1 及甲基肼 MMH 经过 168 h 的浸泡, 镀金膜层无起泡、剥落、溶解和局部变色现象, 说明介质相容性良好。

