

Driving Mechanism of Ultra-Low Temperature Pneumatic Valve and Anti-Sticking Technology

Wei Zhou¹, Yeru Xu¹, Ying Zhao¹, Zhe Deng², Yankun Wang², Hai Jin²

¹Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing

²Capital Aerospace Machinery Co., Ltd., Beijing

Email: zw2233@139.com

Received: August 1st, 2019; accepted: August 16th, 2019; published: August 23rd, 2019

Abstract

The design of driving mechanism and its anti-sticking technology is a key design technology for valves of cryogenic liquid hydrogen and liquid oxygen engines. Improving the design level of the driving mechanism, preventing valve sticking and improving the reliability of the driving mechanism motion are an important part of the ultra-low temperature pneumatic valve design, especially in ultra-low temperature environment, driving mechanism is more prone to stuck dead fault. Such failures often occur after several actions, not easily discovered. So it's like a "time bomb", it often becomes the greatest threat to valve reliability design. This paper mainly introduces the design technology of valve driving mechanism for hydrogen-oxygen engine in China. The anti-sticking technology and its improvement effect of typical faults in a hydrogen-oxygen engine are discussed in detail. This paper can be used as a reference for cryogenic valve designers in design and development.

Keywords

Ultra Low Temperature, Drive Mechanism, Anti Blocking

超低温气动阀门驱动机构及其防卡滞技术

周 炜¹, 许焯茹¹, 赵 莹¹, 邓 哲², 王艳坤², 金 海²

¹北京航天动力研究所, 北京

²首都航天机械有限公司, 北京

Email: zw2233@139.com

收稿日期: 2019年8月1日; 录用日期: 2019年8月16日; 发布日期: 2019年8月23日

摘要

驱动机构设计及其防卡滞技术是低温火箭发动机阀门的一项关键设计技术。提高驱动机构的设计水平、防止阀门卡滞,从而提高驱动机构运动的可靠性是低温气动阀门设计的一项重要内容,特别是在超低温环境中,阀门更容易发生卡滞、卡死故障。这类故障往往是在动作若干次后才发生,不易被人们所发现,因而它像一颗“定时炸弹”,常常成为阀门可靠性设计的最大威胁。本文重点介绍了我国氢氧发动机阀门驱动机构的设计技术,并对某型氢氧发动机中出现过的典型故障案例,所采用的防卡滞技术及其改进效果进行详细的论述。本文可供低温阀门设计人员设计和研制时参考。

关键词

超低温阀门, 驱动机构, 防卡滞

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

氢氧火箭发动机采用高能燃料液氢、液氧作为其推进剂,液氢、液氧是超低温流体,其中液氢温度为 -252.7°C ,液氧温度为 -183°C 。我国氢氧火箭发动机中通常采用气动控制阀门作为发动机控制的重要部件,实现氢氧火箭发动机的吹除、预冷、起动、调节、关机等功能。驱动机构是把气动能量的能量转化成阀杆的运动,从而实现阀门开启、关闭、控制阀门开度的机械传力装置。驱动机构卡滞是气动阀门最为常见的故障模式之一。从上世纪60年代到现在液体火箭发动机研制中,火箭发动机阀门故障约占发动机故障的30%左右(国内为34%、国外为28.1%),其中卡滞、卡死故障要占阀门故障相当大的比例(国内为48.2%,国外约为30%左右)[1][2],特别是在超低温环境中,驱动机构无法使用润滑剂情况下运动若干次后更容易发生卡滞、卡死故障,若在低温推进剂加注后至火箭飞行期间发生此类故障,会直接导致发射推迟乃至飞行失利,成为火箭成功发射的最大威胁和隐患。因此提高驱动机构设计水平,从而提高驱动机构运动的可靠性已成为低温气动阀门设计、论证及考核的一项关键内容。

2. 低温气动阀门驱动机构设计技术

2.1. 常见低温气动阀门驱动机构

对于低温气动控制阀门来说,不同结构阀门其驱动机构的设计也不尽相同:球阀和蝶阀的开启和关闭是依靠球体和碟盘做旋转运动,其驱动机构主要由旋转运动部件如齿轮齿条、曲柄连杆等组成。除球阀和蝶阀外,其他阀门的驱动机构都是作直线移动的,因此其驱动机构主要为往复直线运动传力部件,如波纹管或者活塞,其驱动部件在气动力作用下,实现阀门开启、关闭或调节功能,进而实现发动机介质流量的控制功能。

适用于低温气动阀门的驱动机构按结构特点一般可分为三种:膜片式驱动机构、气缸式驱动机构及波纹管组件式驱动机构[3]。这三类驱动机构的常用结构组成见图1,结构特点的比较见表1。

以下为常见的驱动机构简图,图2为典型的膜片式驱动机构,图3为气缸式驱动机构,图4为波纹管式驱动机构。

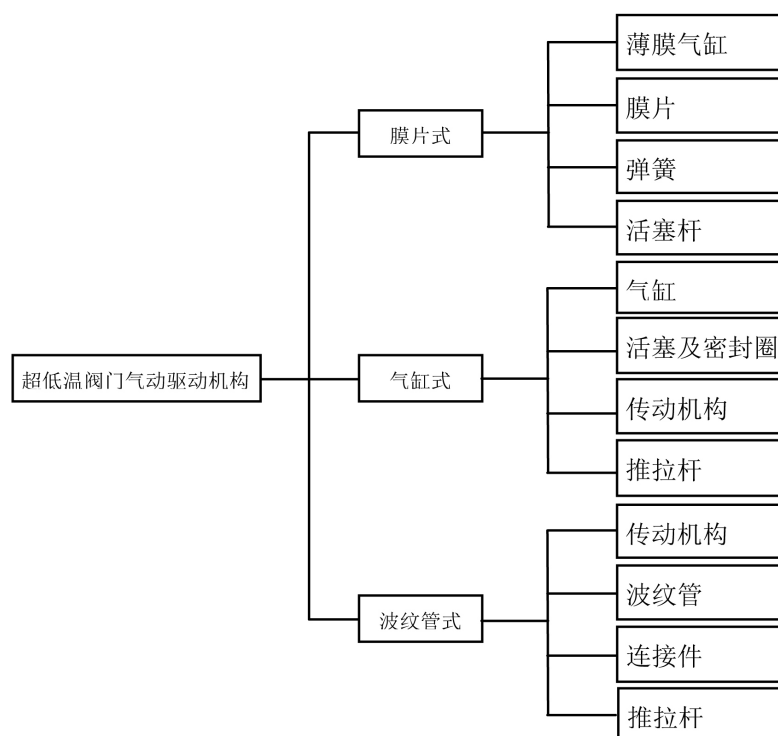


Figure 1. Structure composition of common driving mechanism of low temperature pneumatic valve
图 1. 标准试验系统结果曲线

Table 1. Driving structure characteristics of commonly used low temperature pneumatic valves
表 1. 常用低温气动阀门驱动结构特点

型式	薄膜式	气缸式	波纹管式
特点	行程短,一般小于 40 mm,结构紧凑,可用于高低压,无泄漏,一般用于菌阀结构,可实现零泄漏。但制造工艺较复杂	行程长,必要时需加缓冲机构,作用力不够时可采用双气缸结构,是中、低温阀门常用驱动结构,往复式动密封技术及隔热技术是超低温下的使用的关键,有一定泄漏量。一般用于中、低压球阀、蝶阀及菌阀等气动驱动结构	行程比膜片式长,但受制于波纹管的行程,因此比气缸式的短。可用于高、低压阀门中,承压能力与波纹管的结构型式、材料及尺寸有较大关系。高温及超低温下均能实现零泄漏,可靠性高,可广泛应用于球阀、蝶阀及菌阀中,是目前我国氢氧发动机阀门的主要驱动结构

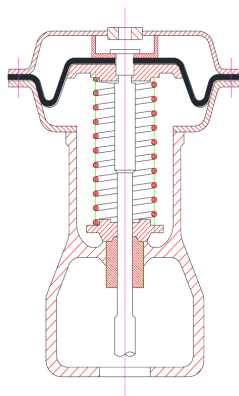


Figure 2. Diaphragm drive mechanism
图 2. 膜片式驱动机构

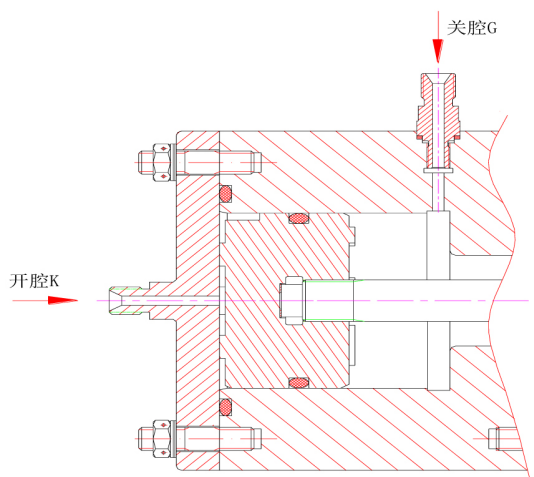


Figure 3. Pneumatic driving mechanism of cylinder
图 3. 气缸气动驱动机构

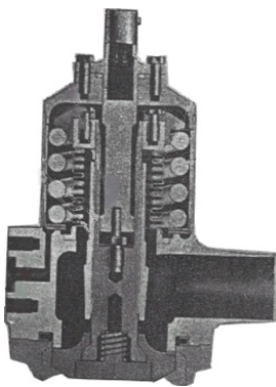


Figure 4. Bellows drive mechanism
图 4. 波纹管式驱动机构

2.2. 氢氧发动机气动驱动机构

2.2.1. 金属波纹管作动机构

我国从 70 年代开始，低温液体火箭发动机阀门开始使用波纹管组件作为气动驱动部件，特别是在液氢液氧火箭发动机阀门中，波纹管气动驱动技术已成为氢氧介质阀门设计及研制的关键。常见的氢氧发动机气动控制系统简图如图 5 所示。气瓶中的氢气，通过气瓶后经减压阀减压后，流过控制气路电磁阀，流向被控阀门控制腔，驱动阀门的作动机构，实现阀门的开启、关闭和调节。

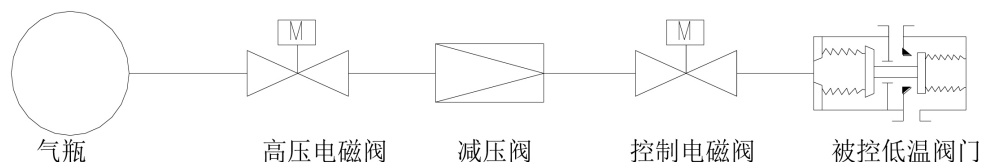
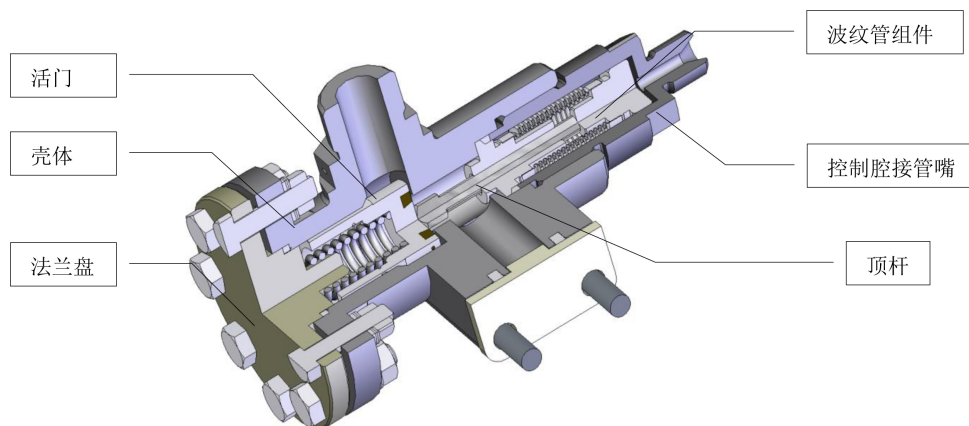


Figure 5. Typical pneumatic control system sketch
图 5. 典型气控系统简图

从 1976 年开始至今 40 多年来，4 种型号液氢液氧火箭发动机多种阀门中采用波纹管气动驱动已从 8

种增加到了 28 种, 波纹管驱动结构已在液氢液氧火箭发动机阀门中占据了相当重要的位置。三十多年来液氢、液氧火箭发动机阀门研制经历充分证明: 采用波纹管作为气动驱动结构是确保低温、高压、高温的火箭发动机阀门关键技术, 是最有效、最可靠的阀门驱动技术。图 6 为典型波纹管气动驱动低温阀门。



1.活门 2. 壳体 3.波纹管组合件 4.法兰盘 5.弹簧 6.顶杆 7.控制腔接管嘴

Figure 6. Typical bellows pneumatic driven ultra-low temperature valve structural diagram
图 6. 典型波纹管气动驱动超低温阀门结构图

金属波纹管组合件一端与移动的活门头相连, 另一端与固定的阀壳体相连, 从而构成轴向移动的运动副。与活门头一起移动时产生压缩或拉伸变形, 以隔绝气控腔和介质腔。不锈钢 316L 和高温合金钢 GH4169 是金属波纹管常用的耐低温材料, 具有焊接工艺性好、耐压强度和疲劳寿命高等优点[4] [5]。

1) 串联波纹管组件设计技术

我国以往氢氧火箭发动机阀门研制要求, 行程较小一般只有 3~5 mm, 单个波纹管设计就能满足。随着发动机性能提升, 高压低温大流量阀门研制要求, 使阀门行程增大, 如某燃烧室氢阀的活门行程需要 16 mm。此时必须把波纹管长度加大, 但较长的波纹管易产生整体失稳, 面临功能失效风险。研究试验表明, 将一个长波纹管改为二个 1/2 原长度短波纹管(图 7), 波纹管抗失稳压力提高约 2 倍, 刚度降低 2 倍, 能适应大流量而带来的阀门大行程的要求。

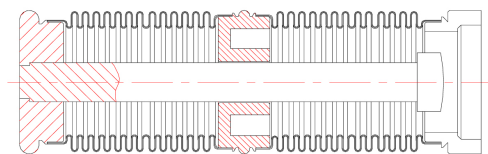


Figure 7. Series bellows assembly
图 7. 串联波纹管组件

2) 并联波纹管组件设计技术

由高压低温大流量阀门研制要求, 阀门腔内的液氢/液氧介质工作压力最高可达 25 MPa, 而控制阀门开关动作的控制气压力仅为 10 MPa, 阀门腔内介质工作压力是控制氢气压力的 2.5 倍。要用低控制气压力, 使活门在高压腔内运动, 用单个波纹管作为动密封元件难以实现。只有采用波纹管并联技术, 将两个波纹管并联焊接在一起成为并联波纹管组合件(图 8), 使低压控制气作用在大波纹管上, 阀门腔内高压介质压力作用在小波纹管上, 利用并联双波纹管的有效面积差和隔离腔的隔压卸荷作用, 用低压控制气

驱动高压阀门腔内的活门运动，达到用低压控制高压活门动作功能。

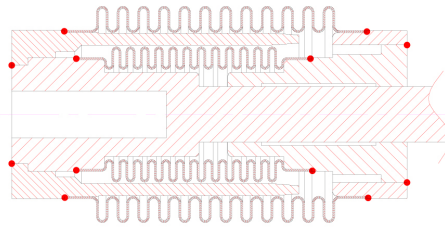


Figure 8. Series bellows assembly
图 8. 串联波纹管组件

3) 波纹管串并联设计技术

根据新一代运载火箭阀门的口径、流量、压力等指标提高，波纹管也需要较大行程并承受较高压力，可采用串并联结合技术(图 9)，将两组内外并联波纹管再进行串联，既能使介质压力得到卸荷，同时也可以使波纹管有效行程倍增，上述设计已成熟运用于新一代大推力运载火箭发动机氢氧路主阀中，并得到了多次地面及飞行试验考核。

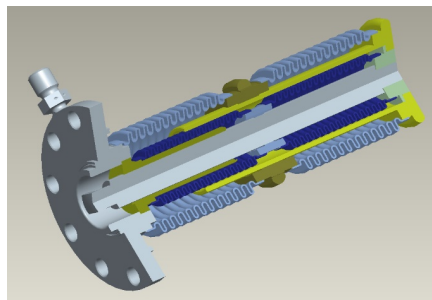


Figure 9. Series bellows assembly
图 9. 串联波纹管组件

2.2.2. 活塞式作动机构设计技术

在重型运载火箭的阀门作动机构采用了活塞式作动机构，其中的动密封组件采用自紧式弹簧蓄能密封圈，非金属材料为改性聚四氟乙烯材料，用于阀门动密封结构时有装配预紧力小、耐低温性能好、结构简单，密封性能可靠，且行程不受限制等优点。动密封在阀门中的位置如图 10 所示。

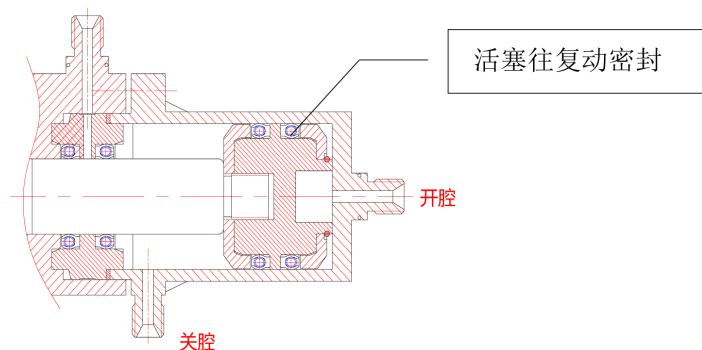


Figure 10. Piston-type actuating mechanism schematic diagram
图 10. 活塞式作动机构示意图

自紧式弹簧蓄能密封圈一般带有一个聚四氟乙烯(或改性聚四氟乙烯)夹套的压力辅助密封装置,在其中装备了一个耐腐蚀的金属蓄能弹簧。当密封圈装在密封沟槽内时,弹簧受压,其反力促使夹套唇边紧贴密封沟槽,形成密封。弹簧的作用是给外层的密封夹套提供永久弹力,并弥补材料磨损及配合零件的偏移和偏心,同时系统压力也会辅助密封夹套蓄能,通过弹簧弹力和系统压力,可实现低压及高压的有效密封,弹簧蓄能密封圈结构见图 11。

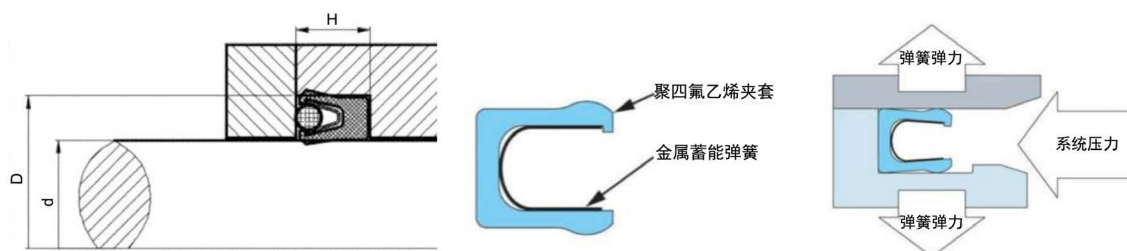


Figure 11. Spring energy storage seal ring
图 11. 弹簧蓄能密封圈

3. 超低温阀门驱动机构防卡滞技术及其典型案例

提高驱动机构运动的可靠性是低温气动阀门设计的一项重要内容。驱动机构在运动中最容易出现的故障就是运动副的卡滞、卡死。阀门的运动副只要相互接触、相对运动,就会发生上述摩擦与磨损,当上述总的摩擦磨损力小于阀门驱动力时,运动副的运动件在驱动力的作用下,阀门运动副能正常动作,但随着运动副的动作次数增加,工况环境的变化等,上述总摩擦磨损力会加大,当还不至于阀门驱动力时,阀门虽还能运动,但阀门的安全裕度下降了,这就是阀门运动副的卡滞,当上述总的摩擦磨损力增大到等于或超过阀门驱动力时,阀门不能运动了,这就是阀门运动副的卡死。在超低温环境中,材料的在低温下收缩会使运动副结构间隙缩小,更容易产生阀门运动副的卡死[6]。下面针对几种防卡滞技术及其典型案例进行详细讲解。

3.1. 奥氏体不锈钢材料深冷处理技术

3.1.1. 低温下奥氏体不锈钢的马氏体转变机理分析

不锈钢中奥氏体相的相对含量受合金元素的影响, Ni、Mn、C 和 N 使奥氏体相扩大,因而会增加奥氏体的稳定性。在不锈钢中加入 Nb、Ti、Ta 等会使其组织稳定,叫做稳定化不锈钢。对于未加稳定剂的不锈钢,其中 γ 相是亚稳定的。亚稳定不锈钢在冷却到低温过程中,将发生马氏体转变,由于马氏体转变伴随着体积的变化,结果会严重影响材料的尺寸精度,尺寸变化量与材料中不稳定奥氏体的含量相关。

温度降低是引起马氏体转变的关键因素,当材料被冷却到转变开始温度 T_{ms} 时,马氏体相开始形成。生成的马氏体结构单位体积比母材奥氏体大 1.7%,因此转变引起体积增大。为了防止马氏体转变导致精密工件尺寸变化,对于亚稳定的不锈钢可在工件精加工之前施行低温处理,促使残余奥氏体的马氏体转变,以保证零件在低温条件下的尺寸稳定性。

3.1.2. 深冷处理对超低温阀门的影响

超低温阀门属于精密级机械产品,对零件尺寸精度要求很高。由于极低温环境下,较多地采用 Cr-Ni 奥氏体不锈钢,这类材料属于亚稳定型不锈钢,超低温下会发生向马氏体的金相转变,引起体积膨胀,导致零件变形[7]。同时,巨大温度交变导致零件各部分收缩不均匀,产生温度应力,也可能导致永久变形,降低零件尺寸精度,导致精密零件重要尺寸的变化影响阀门动作灵活性与密封可靠性,使阀门性能

下降。

深冷处理是将奥氏体不锈钢材料浸在冷却剂中进行冷却、保冷，使之发生马氏体转变的一种工艺方法。经过深冷处理，使金属相变和温差变形充分发生，达到组织结构稳定，然后通过精细加工，使零件的尺寸精度得到保证。因此，深冷处理可稳定和提高阀门综合低温性能。深冷处理一般在零件的精加工之前进行。马氏体的转变量随温度的降低而增加，为确保工件在使用过程中的组织稳定性，深冷处理所用介质的温度需等于或低于阀门工作温度。深冷处理的冷却介质多采用液氮或液氦等溶液。浸在深冷介质中的零件达到介质温度时，即可计算保冷时间。根据实践经验，保冷 1~2 h 即能达到处理目的。时间过长，对马氏体的转变无明显影响。保冷结束即可将零件取出在空气中放置至常温。经过一次深冷处理后，奥氏体不锈钢的马氏体转变基本完成，一般情况下可以满足使用要求。对于密封性要求较严或靠介质压力密封的超低温阀门，可适当增加深冷处理的次数。

3.1.3. 低温深冷典型案例

某型号超低温阀门的波纹管组件在初次装配后进行低温液氮试验时活门大漏，分解阀门，发现波纹管组件导向筒与导向套卡死(图 12)。

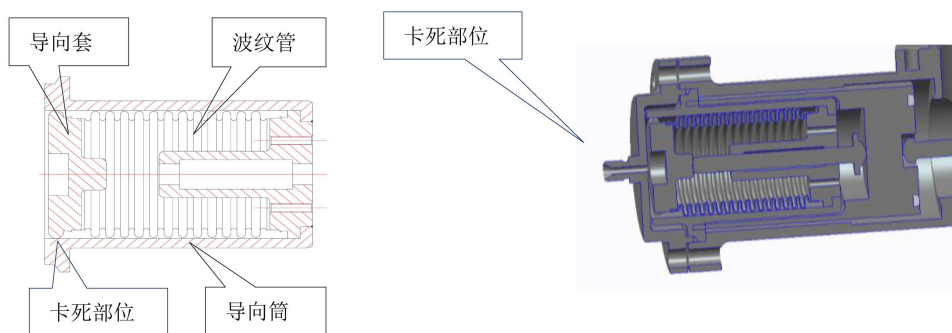


Figure 12. Structural chart of clamping location of ultra-low temperature valve
图 12. 超低温阀门卡滞处结构图

对单个波纹管组件和装配在壳体中的波纹管组件进行液氮浸泡对比试验。试验结果分析：

单独波纹管组件在液氮深冷处理后，运动副配合处两零件尺寸绝对值均有所增加，深冷处理后配合间隙仍符合设计要求。

装配至整阀进行深冷处理后，导向筒内径 $\phi 62$ 收缩量在 0.136~0.174 mm，导向筒外圆 $\phi 93$ 收缩量在 0.081~0.090 mm 之间，减小幅度较大。波纹管组件配合间隙仅有 0.03~0.04 mm 之间，远小于设计值 0.1~0.192 mm。综合上述两组试验结果，经历低温深冷后的不锈钢波纹管组导向筒外圆直径若有显著的增大，变化量超过导向筒与铝壳体之间的间隙值，便会受到铝壳体的制约，体积增长由向外扩张转为向内收缩。由于波纹管组件导向间隙的设计值偏小，而低温深冷后导向间隙进一步减小，导致导向筒与导向套发生卡滞现象。

改进措施：减小导向套径向尺寸，增大配合间隙；增加相关奥氏体不锈钢零组件的深冷处理：在液氮中浸泡 2 h，取出后常温放置 4 h，共进行 2 次，改进状态后的阀门经过了二批产品的常温及低温检查，全部都工作正常。

3.2. 合理选配导向间隙

3.2.1. 低温下奥氏体不锈钢的马氏体转变机理分析

对于高压低温大流量阀门来说，波纹管组件导向运动不但行程长而且采用多个波纹管串、并联结构

导向设计，因此若导向结构设计不合理，运动导向长度过长(导向长度与孔径比不小于 1.2)或配合间隙选取过大或过小都会导致波纹管运动过程出现严重磨损，并逐渐发展为卡滞或卡死等故障。过大的导向间隙不能很好的实现结构运动的导向作用，易发生运动部件的偏斜，尤其是大尺寸阀门偏斜量随尺寸增加而成倍放大极易导致卡滞故障发生；但过小的导向间隙又会引起运动部件之间的协调性差，多次摩擦使密封副表面出现沟犁和磨痕，随着动作次数增多及摩擦生热，容易出现金属密封副烧死及卡死等故障。

3.2.2. 导向间隙过小对阀门运动副的影响

在某型号高压低温气动阀门的研制过程中就曾出现过开关腔控制组件导套和推拉杆有严重磨损，出现卡死的故障(图 13~图 15)，导致发动机热试车曲线与系统设计参数发生了明显偏离。

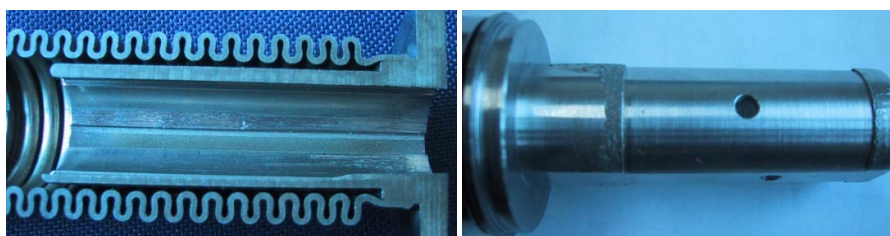


Figure 13. Fault decomposition diagram for clamping of bellows assembly

图 13. 波纹管组件卡滞故障分解图



Figure 14. Fault decomposition diagram for clamping of bellows assembly

图 14. 波纹管组件卡滞故障分解图



Figure 15. Microscopic enlargement map of wear part of guide rod

图 15. 导杆磨损部位微观放大图

在事例中，原来导套和导杆的配合间隙为径向单边 0.1 mm，改进后将间隙增大为径向单边 0.2 mm，再配合加大圆角等措施，该处位置在后面多个批次的产品装配和试验中都没有再发生卡滞。对于超低温使用的阀门设计中还应考虑运动副配对材料的低温收缩系数对结构间隙的影响。

3.3. 运动副表面改性

3.3.1. 接触粘着机理

阀门运动副作为两个固体表面接触，由于表面不平，实际上是微凸体之间的接触，在相对滑动和在

一定载荷作用下, 接触点发生塑性变形或剪切, 摩擦表面温度升高, 严重时表层金属局部软化或熔化, 使接触点发生粘着或焊合[8]。形成粘着 - 剪断 - 再粘着 - 再剪断的循环过程, 形成粘着磨损。接触部位随着外力的加大, 接触面积相应加大。机理图见图 16~图 18。

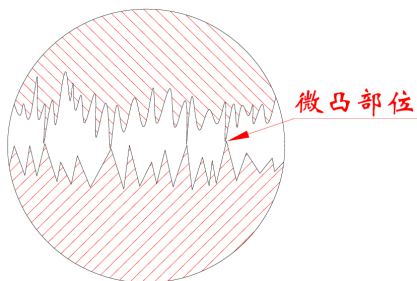


Figure 16. Contact surface sketch of valve motion pair
图 16. 阀门运动副接触面简图

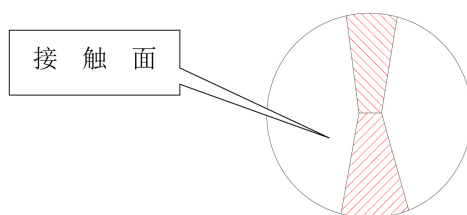


Figure 17. Contact surface sketch with low pressure
图 17. 压力小的接触面简图

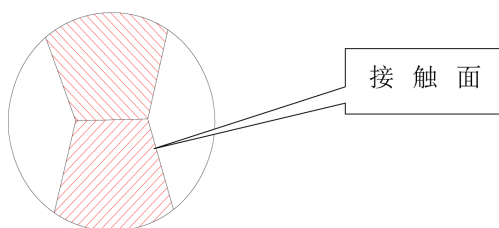


Figure 18. Contact surface sketch with high pressure
图 18. 压力小的接触面简图

就是在这些小小的接触面上, 发生塑性流动、粘着、冷焊、分子间的互相吸引作用。从微观角度解释其机理, 则是高的接触应力造成运动副表面相互嵌入, 破坏了表面膜, 使金属接触部分形成了分子相互吸引的条件进行粘着, 运动中再撕开, 其中产生了一部分分子的转移。当运动副相对滑动运动的时候, 必须剪断这些粘着形成的接触面, 这些剪断力就是摩擦力, 微凸部分的断裂就是磨损[9]。设计上, 选择材料的许用应力必须低于材料硬度(HB)的 1/3, 才有可能减轻或不发生粘着磨损。

3.3.2 表面改性技术在超低温气动阀门上的应用

阀门运动副设计时需选取合适的运动副配对材料, 运动副的导向面若选用同种材料, 多次的往复运动摩擦容易引起烧结而卡死, 因此宜选取硬度不同的材料进行配对。若运动副配对材料不便更换, 可通过硬质阳极化表面处理、喷涂氮化钛、镀铬、表面 Ti + N 离子注入和类金刚石膜等多种方案的表面改性, 通过材料的表面改性改善材料表面力学性能, 提高硬度, 降低摩擦系数, 进而达到减小磨损的目标[10]。图 19、图 20 为常用的表面改性技术。



Figure 19. Titanium ion implantation rack
图 19. 钛离子注入齿条

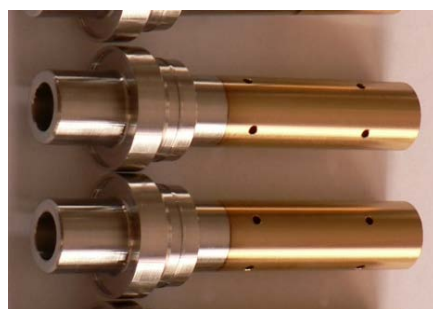


Figure 20. Titanium nitride-coated Guide
图 20. 表面镀氮化钛导向件

4. 结论

驱动机构设计及其防卡滞技术是超低温液氢液氧火箭发动机阀门的一项关键设计技术，提高驱动机构的设计水平、防止阀门卡滞，从而提高驱动机构运动的可靠性是超低温气动阀门设计的一项重要内容。

本文对常见的驱动机构做了简要概述，并对常用的两种驱动形式做了说明，后面针对我们氢氧发动机出现过的卡滞现象进行了介绍，提出了三种防卡滞技术，为超低温阀门设计和研制提供参考。

参考文献

- [1] 张宗美. 航天故障手册[M]. 北京: 宇航出版社, 1994.
- [2] Okita, K. and Fukushima, Y. (1995) Improved LE-7 Engine. AIAA 95-3147.
- [3] 杨源泉. 阀门设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [4] 徐开先. 波纹管类组件的制造及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [5] 张大林, 黄乃宁, 等. 大口径阀门用精密金属波纹管成型工艺[J]. 阀门, 2014(2): 13-31.
- [6] Nagao, R. and Kamiyo, K. (1993) Development Status of the LE-7 Engine. 44th Congress of the International Astronautical Federation, Graz, 16-22 October 1993, IAF-93-470.
- [7] 李楚林. 低温阀门深冷处理. 航天推进与动力[M]. 北京: 北京航天动力研究所, 2015.
- [8] 魏国俭, 乔桂玉, 等. 超低温阀门运动副可靠性设计的研究[J]. 中国航天第七专业信息网, 2009(10): 154-158.
- [9] 廖传军, 满满, 等. 阀门动密封的常用结构、材料及特性[J]. 液压与气动, 2014(5): 118-121.
- [10] 魏国俭, 黄乃宁, 等. 航天阀门中零泄漏金属波纹管动密封技术及其新应用[C]//中国机械工程学会. 第六届全国阀门与管道学术会议论文集. 合肥: 合肥工业大学出版社, 2009: 372-383.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网首页: <http://cnki.net/>, 点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”, 跳转至: <http://scholar.cnki.net/new>, 搜索框内直接输入文章标题, 即可查询;
或点击“高级检索”, 下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2167-6631, 即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版: <http://www.cnki.net/old/>, 左侧选择“国际文献总库”进入, 搜索框直接输入文章标题, 即可查询。

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: met@hanspub.org