

# 液体推进系统高温高压动密封发展趋势分析

杨霞辉, 王少鹏, 侯宁涛  
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 航天液体动力系统液体燃料的供给与调节系统的密封工作条件非常恶劣, 密封压差大、温度高、线速度大、工作时间长, 对密封件技术带来很大挑战。本文介绍了国内外密封技术方面的一些新技术、新工艺、新概念等关键技术的应用, 探讨了密封技术长寿命、高转速、高压、高温环境和泄漏量小 (甚至零泄漏) 的发展趋势, 分析了高温高压动密封的难点及关键技术。

**关键词:** 液体推进系统; 密封技术; 发展趋势

**中图分类号:** V434

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2010) 04-0031-05

## Trend of seals working under high temperatures and pressures for liquid propellant engines

Yang Xiahui, Wang Shaopeng, Hou Ningtao  
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** It is a challenge for sealing technology for seals working under high temperatures, high pressures, great linear speed and long work duration. This paper introduces the applications of new technologies and new concepts used in the world. The development trend of seals of long life, high rotating speed, high temperature or high pressure, and little leakage is discussed. Based on comparing several seal configurations and analyzing their advantages and disadvantages, solutions to the motive seal problems are put forward for liquid propellant engines under high temperatures and high pressures.

**Key words:** liquid propellant engine; seals technology; directions

---

收稿日期: 2010-03-24; 修回日期: 2010-04-16。

作者简介: 杨霞辉 (1970—), 女, 高级工程师, 研究领域为机械密封设计。

## 0 引言

随着液体火箭发动机推力、燃烧室压力和涡轮泵转速等工作参数的不断提高,对密封技术的要求也越来越苛刻。不仅要求承受介质高压、高温、高线速度、动载荷大 ( $PV$  500MPa·m/s) 的条件,而且要与介质绝对相容,还要实现可重复使用。美国和俄罗斯等航天大国,在发动机密封技术的研究方面取得了一些重要成就,中国在发动机动密封技术方面依然存在一定差距。目前涡轮泵用机械密封通常是在边界润滑条件下工作,由于端面摩擦产生了大量热量,即使是具有最好热传导性和冷却特性的摩擦副材料,其  $PV$  值极限也很低 ( $PV \leq 150\text{MPa} \cdot \text{m/s}$ ),已不能满足先进发动机研制的需求。本文就高温高压动密封的发展方向、关键技术以及对材料、制造工艺的需求进行了论述。

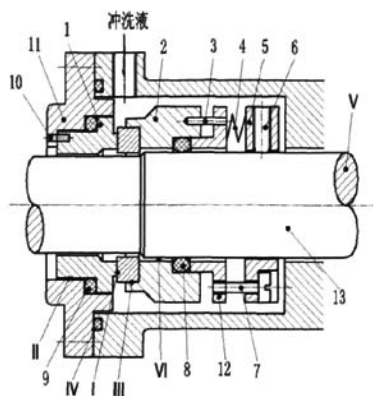
## 1 高温高压动密封发展趋势分析

高温高压旋转动密封在高速运转过程中,密封端面间需形成一层完整的薄膜,改善密封的润滑工况,降低端面摩擦系数,高温滑动密封需采用特殊材料,特殊结构设计及特殊表面处理,达到耐高温、低摩擦、微泄漏的要求。

### 1.1 旋转动密封

高温高压旋转动密封采用机械密封结构较为理想。机械端面密封是一种轴向端面密封,简称机械密封,又称端面密封,是常用的旋转轴密封。与其它形式的密封如压盖软填料密封、迷宫密封相比,具有泄漏量低、摩擦磨损小、使用寿命长、工作可靠、维护简单等一系列优点,因此在现代工业生产中得到了广泛应用,特别是在石油化工装置设备中应用普遍。

典型的机械密封由动环、静环、弹性元件、辅助密封等构成,结构如图1所示。



- 1-静环; 2-动环; 3-传动销; 4-弹簧; 5-弹簧座;  
6-紧定螺钉; 7-传动螺钉; 8-动环O形圈;  
9-静环O形圈; 10-防转销; 11-压盖; 12-推环;  
13-轴套; I、II、III、IV、V、VI-泄漏点

图1 典型机械密封结构

Fig.1 Typical mechanical seal

机械密封的应用已有 100 多年的历史, 1885 年在英国出现了第一个机械密封专利<sup>[1]</sup>, 直到 1900 年才开始用于轴承密封。1930 年用于内燃机水泵轴封。上世纪 50~60 年代期间, 国外在机械密封原理及结构形式方面做了大量工作, 1957 年美国 EG&G Sealol 公司制造出世界上第一套焊接波纹管机械密封用于航天领域。在随后的几十年间, 由于航天、核能、天然气输出和石油化工的飞速发展需要促进了机械密封技术的发展, 不断涌现出机械密封的新结构新材料, 逐步形成了比较系统的密封理论。

上世纪 60 年代以来, 在流体动压润滑和流体静压润滑等理论指导下, 引用轴承等方面的先进技术, 机械密封向着深度发展, 出现了各种高参数和新结构的接触式和非接触式机械密封, 如: 周向圆弧槽、雷列台阶面的流体动压密封, 径向锥面、台阶面和带凹形槽节流孔的流体静压密封, 将机械密封的  $PV$  值提高到 500MPa·m/s。为了满足各种各样特殊工况又纷纷出现了组合密封、弹性变形波度密封、中间多环密封、窄带接触密封和半接触式变载荷系数机械密封等, 并且这些新型结构的机械密封得到了广泛的使用。

目前国际上已有不少专门从事研究、生产和销售机械密封产品的学术团体和跨国公司, 如英国的流体机械学会, 美国的 John Crane 公司, 德国 Burgmann 公司和日本的皮拉公司等。

我国航天领域从上世纪 60 年代开始研究机械密封, 由早期的液封轮、唇式密封发展为弹簧式、膜盒式机械密封以及各种组合密封, 在常规机械密封的设计、生产方面目前已与国外水平大致相当。现在接触式机械密封在航天领域得到了大量应用, 在发动机涡轮泵中得到了广泛应用, 涡轮泵密封采用膜盒式、弹簧式和双端面机械密封, 这类机械密封的设计、生产都已相当成熟。在国内, 一些大学和密封公司<sup>[2-3]</sup>在流体动静压效应的高参数密封技术方面已经取得了不少研究成果。1990 年石油大学(华东)研制了泵出式圆弧槽端面密封, 并获得国家实用新型专利。1994 年张俊玲等研究了一种螺旋槽和雷列台阶组合的油润滑机械密封<sup>[4]</sup>。1999 年, 宋鹏云对液相螺旋槽机械密封进行了深入的研究<sup>[5]</sup>, 并做了相应实验。但总体而言, 在流体动静压效应的高参数密封技术领域, 我国才开始起步, 与国外有很大差距。

西安航天动力研究所先后进行了动环上开  $\mu\text{m}$  级螺旋槽流体动压效应的理论探讨与试验验证, 进行了用于干气密封动环上开  $\mu\text{m}$  级螺旋槽机械密封的理论探讨与试验验证, 进行了静环表面开圆弧深槽的高压高速流体动静压机械密封的研制, 均取得了一定成果。图 2 是涡轮泵外流式旋转动密封结构模型图, 采用这一结构的端面密封能适应高温高压环境。

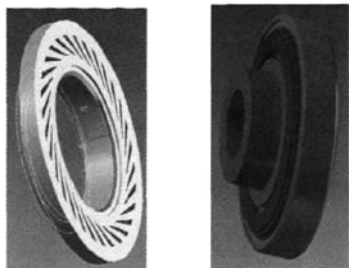


图 2 涡轮泵外流式旋转动密封结构模型图

Fig.2 The structure model of the outside-flowing rotative motive seals for turbo pumps

为开发更高性能的航天发动机, 高温高压旋转动密封技术也在不断发展, 目前密封技术人员正致力于采用先进材料, 设计摩擦副新结构, 利用流体动压效应使摩擦状态是纯粹的流体润滑, 摩擦热小, 功耗小, 辅助静密封可采用膜盒或异型密封圈。这种密封可以在高温、高压和润滑性差的介质密封条件下工作,  $PV$  值可提高到  $500\text{MPa}\cdot\text{m/s}$ 。

## 1.2 滑动密封

高温高压滑动密封工作介质一般为燃料或燃气, 工作温度最高可达  $800^\circ\text{C}$ , 工作压力最高达  $20\text{MPa}$ 。

滑动密封不能单纯依靠封闭结合面间的间隙实现密封, 因为结合面间的间隙密封得愈紧密, 对偶表面相对运动时的摩擦阻力就愈大, 导致结合面发热, 影响润滑膜的形成, 使密封很快失效。使用橡胶、塑料或软金属等材料, 用较小的压紧力就可以完全压紧, 从而阻止流体的泄漏, 若刚度大的金属, 过盈量小不能完全压紧, 以致密封性差, 但如果通过表面改性处理, 增加表面真实接触面积, 用较小的过盈量也可以改善密封性能。

最早使用的滑动密封主要是从实际应用经验出发, 采用皮革、毛毡作为衬垫, 在 1920~1930 年时的油封仍是皮革制成的, 到了 1930 年有了弹簧夹紧的滑环。1930 年德国出现了橡胶, 是一种早期丁腈橡胶, 从此开始使用氯丁橡胶作为密封材料。1942~1943 年发展了耐油合成橡胶(丁腈橡胶), 用以制造往复运动液压缸的 V 形和 U 形唇形密封以及大炮和飞机起落架等的液压系统密封, 1950 年前后才开始大量应用于各行各业。1952 年, Shamban 公司就开始研究开发用于宇航的 PTFE 密封元件, 并革命性地研制出了专利产品斯特封及格莱圈。应该说, 滑动密封的改进主要是随着新材料的出现、制造业水平的提高而不断改进发展的。目前国际上从事研究、生产和销售滑动密封产品的学术团体和跨国公司很多, 如法国的 SAINT-GOBAIN, 美国的 PARKER 公司, 德国的 Busak+Shamban, 日本的 NOK 等。

我国上世纪 50 年代的滑动密封主要是 O 形

圈,经过50多年的发展,密封件的设计技术已逐步采用了国际先进密封系统设计构思,但国内密封件工业制造水平却相对落后。像目前工程机械液压缸滑动密封系统,当今国际上普遍采用的5组件(或3组件)带支承环组合密封组件,制作工艺较复杂,目前国内尚停留在小批量制作阶段,质量稳定性较差,所以,国产类似的工程机械液压缸滑动密封系统仍采用U形密封圈作为主密封。

滑动密封型式种类多种多样,有格来圈、斯特封、泛塞和蓄能密封圈等。如图3所示的格来圈,V形圈;U形圈;Y圈,C形圈,O形圈施力的组合密封圈等应用十分广泛。



图3 典型滑动密封型式

Fig.3 Typical sliding seal

### 1.2.1 蓄能密封圈

随着密封技术的不断发展,国外一些研究学者也对高低温的静密封问题进行了大量研究,主要是在非金属材料方面做了大量工作,目前,采用聚四氟乙烯合成物包覆弹簧的蓄能密封圈(图4)逐渐得到应用,这种密封圈使用独特的缠绕成型不锈钢弹簧,该弹簧具有较宽的偏转能力,回弹力强。在弹簧弹力和介质的压力作用下,促使外侧的聚四氟乙烯合成物夹套唇边紧贴沟槽,起到密封作用。图5是弹簧蓄能密封圈工作原理图。

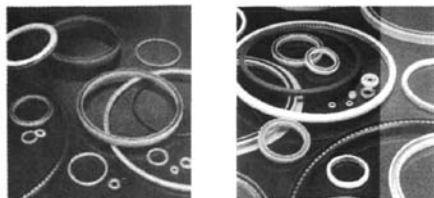


图4 弹簧蓄能密封圈图片

Fig.4 The picture of the spring seal

由于氟塑料和弹簧可以耐较高温度的介质,静密封问题可以解决,同时,由于氟塑料摩擦系

数低,在阀芯往复运动时产生的摩擦热不多,可以很快得到平衡,功耗低,因此这种蓄能密封圈是理想的中温滑动密封。而且随着新型聚合材料合成物的不断配制和开发,蓄能密封圈的抗热性能也在不断提升。

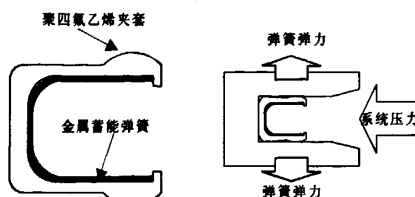


图5 弹簧蓄能密封圈工作原理

Fig.5 Working principle of the spring seal

### 1.2.2 金属密封圈

西安航天动力研究所研制了多种异型金属密封应用于液体火箭发动机中作为低温和热燃气密封件,正确设计的异形金属密封件可在 $-196^{\circ}\text{C}$ ~ $800^{\circ}\text{C}$ 的温度下使用,当用耐高温金属制造时,可用于更高的温度。

使用异形金属密封环的目的就是利用其U、V、W等形状以及在压紧载荷的作用下较容易产生塑性变形的特性,使之填平配合密封面的微小凸凹不平,从而实现密封,并且这种密封在被密封介质高压的作用下,密封件本身的变形可以补偿配合面的变形而保持密封比压不减小,密封性能不降低,因此特别适合高温高压环境。这些密封结构已经过了多次试验考核。

## 2 高温高压动密封的特点及关键技术

由于工作条件恶劣,耐磨损材料制成的密封件会出现热膨胀,同时材料的化学稳定性在高温下往往会变差,因此对材料之间的热配合提出了更高要求,摩擦面温升也要小,由于具有这些特点,密封设计须考虑高温下材料的合适匹配,摩擦热的减少及传导。

### 2.1 对材料的需求

动环材料要具有硬度高、强度大、耐磨损、耐高温、导热系数高、线膨胀系数小、摩擦系数

低和组对性能好等特点,新型金属陶瓷、导热性良好的特殊金属合金等是优秀的机械密封摩擦副材料。

结构材料须尽可能选择热膨胀系数小的材料,这样可减小热应力的影响,有利于保证高温下摩擦副的平面度与垂直度。降低摩擦系数,改善密封的润滑工况,尽量减少摩擦热,是高温高压密封设计需要重点考虑的。

涡轮泵旋转动密封摩擦副材料之一的石墨材料,性能要求很高,需密封高压腐蚀性推进剂,需研制耐高温、抗氧化、抗烧蚀、不爆炸的特殊石墨材料。

## 2.2 对工艺的需求

在超高温下使用的金属U、V、W形截面的环形金属密封件表面要镀金、银或镍。涂镀层应光滑完好,无脱落,镀金属的密封面需抛光,要求无裂纹、压伤和划痕。

异型金属密封、复合材料蓄能密封圈结构形状都特别,有U形、V形、C形和W形等,特殊型面需设计特殊成形模具和刀具并需辅助薄壁焊接等特种工艺。特殊型面的加工手段有尺寸不稳定、刀具复杂且难以定位、生产效率及合格率低的缺陷。为使此类零件实现批产和质量稳定,需进行工艺研究。

高温高压旋转机械密封要求在动环上开几微米到几十微米深的螺旋槽,如何保证流槽均布精度,控制槽深是动环制造过程中的难关。

## 2.3 对制造与检测技术的需求

高温高压密封中弹性补偿元件和滑动密封件一般选用金属膜盒和特型金属薄壁件,其刚度、回弹量、变形量等参数等对其密封性能均有影响。为保证产品质量稳定性,需精确测量元件的刚度参数。

密封在常温下机加和装配,却在高温高压下使用,为了保证高温下的密封,对零件平面度要求高,需要实现非接触无损检测。

## 3 结论

各种新型航空航天液体动力装置的快速发展对密封提出了越来越高的要求,新型高温高压密封的研究势在必行。本文分析了高温高压动密封特点及关键技术,得出如下结论:

(1) 高温高压旋转动密封发展趋势是采用流体动密封结构和能耐高温的异型密封圈或膜盒作为静密封,高温高压滑动密封发展趋势是蓄能密封圈或薄壁异型金属密封环结构。

(2) 新型密封的实现,材料和制造工艺的发展是决定因素,特殊材料的研制、特殊型面加工工艺研究等都需加速推动。

(3) 先进的检验、测量手段是保障研制和制造先进密封的必要条件。

## 参考文献:

- [1] 顾永泉. 发展密封学,提高密封技术水平[R]. 中国工程学会流体工程学会第二届年会大会报告, 1988, 12.
- [2] 王玉明. 高速透平压缩机用螺旋槽端面密封及其系统的研制[J]. 流体工程, 1992, 20(4): 1-6.
- [3] 王玉明. 螺旋槽端面密封在酯交换釜上的应用[J]. 流体机械, 1998, 26(11): 28-31.
- [4] 张俊玲, 沈乐年. 一种新型非接触式机械密封[J]. 清华大学学报, 1994, 34(2): 34-39.
- [5] 宋鹏云. 螺旋槽流体动压型机械密封端面间液膜特性研究[D]. 四川大学.

(编辑:王建喜)