

高压液体火箭发动机新结构密封^{*}

杜天恩

(陕西动力机械设计研究所, 陕西 西安 710100)

摘要: 为提高高压液体火箭发动机上密封的工作可靠性, 对高压密封的设计结构进行了系统的研究。根据高压密封可靠工作的条件, 提出了新结构密封应采用自紧式设计结构的指导思想, 并设计了多种新的密封结构。通过对比试验筛选, 研制了12种新的密封设计结构。试验证明: 新结构密封工作可靠, 性能良好。并已在各型号的发动机上广泛地推广应用。

关键词: 液体推进剂火箭发动机; 密封; 高压密封; 密封材料; 密封试验

中图分类号: V434.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055(2000)04-0016-04

New sealing structure of high pressure liquid rocket engine

DU Tian'en

(Shaanxi Engine Design Inst., Xi'an 710100, China)

Abstract: In order to achieve a higher reliability of high pressure liquid rocket engine sealing structure, a systematic study on high pressure sealing structure was conducted. In accordance with the sealing structure safe working condition: sealing pressure ratio does not drop under the high pressure of sealing medium, it was proposed that a new sealing structure should be self-tight type. Several new sealing structures were designed and 12 were proved to be reliable with high performance and have been used in many types of rocket engines economically.

Key words: Liquid propellant rocket engine; Sealing; High pressure sealing; Sealing material; Sealing test

1 引言

高性能的液体火箭发动机工作压力很高, 给可靠密封造成了很大的困难。密封可靠性对运载火箭是至关重要的, 很多航天灾难都是由密封工作的不可靠引起的。美国航天飞机曾因密封失效泄漏, 升空后爆炸造成了重大的航天悲剧, 我国火箭也曾因密封泄漏造成过卫星不能准确入轨的故障。可见, 研究解决高压密封的可靠性是一件非常重要的工作。

高压密封要求密封工作时有很高的密封比压, 而且压力越高, 密封比压越高。国内目前使用的大都是老式密封结构: 如球头喇叭口密封、法兰平垫密封等^[1]。这些密封解决密封高压的办法是机械拧紧螺纹, 靠螺纹产生的压紧力来增加密封比压, 硬压硬堵。这种密封机构, 在被密封介质高压的作用下由于紧固件的变形, 会使密封比压减小, 密封性

能降低甚至失效。

为了提高高压密封的工作可靠性, 在分析研究国内外相关部件密封结构^[2,3]的基础上, 确定了新结构高压密封采用“自紧式”和“疏导法”设计。

“自紧式”设计就是借密封件自身的弹性变形, 增加密封的比压, 提高密封性能。“疏导法”设计是根据结构上的可能, 将一个很高的压力分成两部分, 变成高压密封与低压密封的串连结构。在高压密封后设置一个疏导腔, 把这个腔与某一低压腔连通, 万一高压密封发生泄漏时, 把泄漏引入低压区。低压密封对这个疏导腔进行可靠密封, 这是一个双保险的密封系统。

本课题在研究中先后提出了几十种设计结构, 经过试验和对比分析最终确定了12种设计结构。本文主要介绍在高压静密封结构设计研究方面的部分成果。

* 收稿日期: 1999-11-28; 修订日期: 2000-01-25。获奖情况: 本课题获航天工业总公司科技进步二等奖(98B2141)。

作者简介: 杜天恩(1948—), 男, 大学, 研究员, 研究领域为液体火箭发动机设计和涡轮泵设计。

2 高压密封的新设计结构

为了说明新的设计结构和旧的设计结构之间的差别,下面列举几种密封的新设计结构。

2.1 橡胶“O”型圈密封

橡胶“O”型圈密封是最常用的,通常只能用于普通介质和不太高的压力。将这种密封研究用于高压、低温条件下,已不仅可以密封普通介质,而且研制的耐低温橡胶可以密封液氧、液氮这样的超低温介质。在研究中,总共设计了五种新结构,其中最常用的三种:

(1) 球面法兰密封。法兰连接是机械连接中应用最广泛的,所以法兰密封也就用的最多。图 1 是新的密封结构。旧的密封结构大都采用在法兰上开平槽,放置 O 型密封圈,靠两个法兰的相互压紧来密封,这种密封的主要缺点是: 由于紧固螺栓的变形或蠕变会使压紧力变小,密封比压降低,容易产生泄漏。④当两个法兰装配时对的不是很正(法兰面不平行),管线发生偏斜或弯曲时会造成密封胶圈局部(或半边)压紧力大,其余部分压紧力小,密封比压不均匀,因此而造成密封泄漏。新结构使法兰的密封面变成一个球面,一个法兰是凸球面,一个法兰是凹球面,胶圈在球面上,管线的偏斜不影响密封面的互相接触,可以保证密封圈所受的压力均匀,实现可靠密封。其次是 O 形圈所处的密封腔是一个变截面的空间,即使螺栓发生变形或蠕变,密封胶圈也能够通过自身的变形来补偿,仍能保持高的密封比压,保证可靠密封。这种球面法兰主要用于管径较大或装配时对正困难的场合。

(2) 锥面法兰。图 2 是这种法兰密封的设计结构。密封圈放在两个法兰的锥面之间, O 形圈处于两锥面围成的变截面空间内。由于锥面前后带有径向定位台,所以这种密封的胶圈受压也是均匀的。

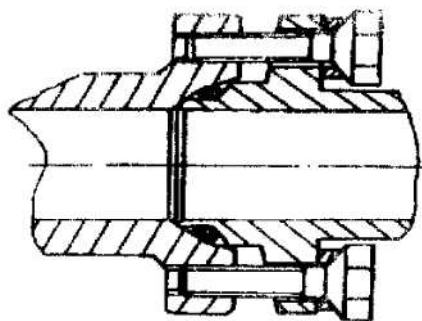


Fig. 1 Spherical surface seal

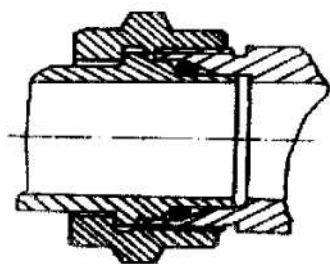


Fig. 2 Taper seal structure

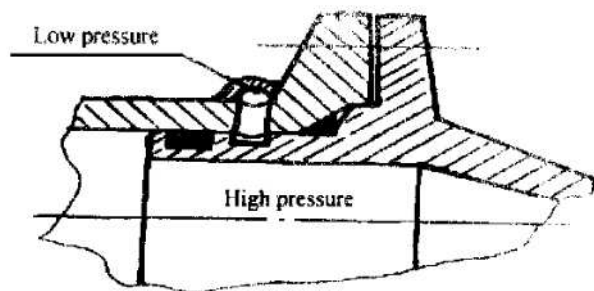


Fig. 3 Radial seal structure

而且在被密封介质压力的作用下,密封胶圈被挤向空间小的位置,补偿紧固件的变形或增大密封比压,实现了可靠密封。这种结构多用于管径比较小的法兰密封。

(3) 径向密封。带回流槽(腔)的径向密封如图 3 所示。与通常的径向密封基本相同,所不同的是共用了两道密封,并在两道密封之间设置了一个回流槽,回流槽与低压腔连通。第一道密封主要密封高压,第二道密封防止泄漏。这种密封的最大特点是,第一道密封允许泄漏,但泄漏的介质由回流槽引入低压腔不会漏入外界。由于回流腔的压力不高,所以第二道密封很容易实现可靠密封。这就是利用疏导的办法将高压密封变成了低压密封。这对于压力特别高又不允许泄漏的介质特别适用。它一般用于大法兰或两个壳体之间的密封。

2.2 软金属密封

软金属密封是指密封环用铜、铝等软金属制作,图 4 示出了软金属密封的新、旧结构。两种结构的主要差别是:旧结构的密封环装配时容易被挤坏,密封环受压不均匀,不能可靠密封。新结构的密封台两端都有径向定位台,装配时容易对正,压紧均匀,而且密封环被挤在一个封闭的空间里容易被压的很紧,因此密封可靠。这种密封特别适用于小管径的高压气路密封。

2.3 特型金属密封

所谓特型金属密封,主要指密封环的形状比较特别的金属密封。这里主要介绍两种法兰密封,它们的设计结构如图 5 所示。

图 5 (a) 是球面法兰密封,它有四个密封面,每个法兰上有两个密封面,在被密封介质压力的作用下密封环产生弹性变形,增大密封比压,提高密封可靠性。这种密封多用于高温、高压或超低温、高压环境中,这种密封的密封环精度要求高,加工

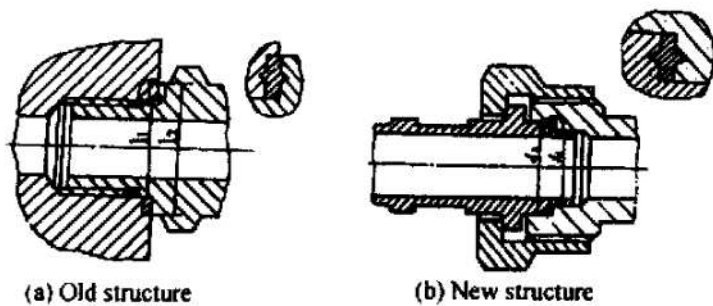


Fig. 4 Soft metal seal structure

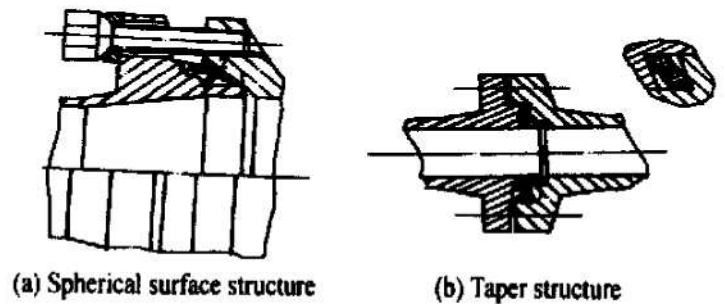


Fig. 5 Special metal seal structure

比较困难, 主要适用于通径 50 mm 以上的连接管路。

图 5 (b) 是锥面密封, 这种密封结构简单, 加工装配都很方便, 而且密封可靠。这种密封主要靠装配时的压紧力和密封环的弹性变形产生密封比压, 保证密封, 也有自紧作用。这种密封可用于高温高压、低温或超低温高压环境, 大小管径都适用。

3 新结构密封试验

新结构密封的试验研究工作分两个阶段进行, 第一阶段为方案选择阶段。在这一阶段中, 每一种密封结构都采用不同设计参数的设计方案进行试验对比, 选择确定出最优的设计方案。第二阶段是对选定的密封结构方案进行鉴定试验。这里只介绍最终方案的鉴定试验情况。基本的试验系统如图 6 所示。

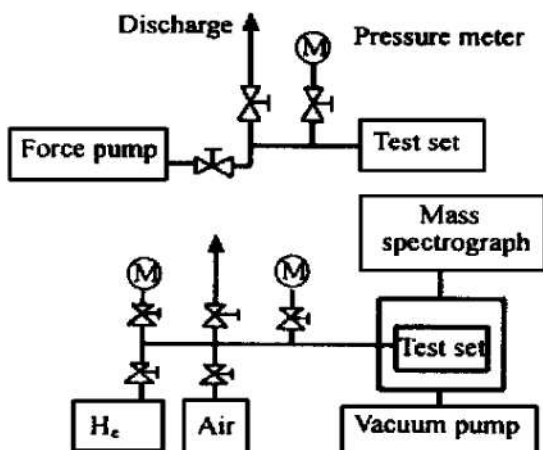


Fig. 6 Test system

(1) 橡胶 O 型圈密封: 橡胶 O 型圈密封有球面外套螺母连接、锥面外套螺母连接、球面法兰连接、锥面法兰连接等结构, 共 6 种规格, 18 个试验件进行了试验。所有试验件首先在常温下做了低压气密试验, 低压气密试验的试验压力为 1 MPa。接着做了高压气密试验和高压液压密封试验, 高压试验按

1.5, 5, 10, 15, 20, 25, ..., MPa 分档进行, 每一档保压 5 min。气密试验采用把试验件浸入水中观察有无气泡冒出的办法检查密封性能, 液压试验直接观察有无液体漏出。高压气密试验做到了 32 MPa (试验设备的最大能力), 高压液压密封试验做到了 63 MPa (试验设备的最大能力)。然后做了低温 (-40°C) 和高温 (50°C) 条件下的高压气密试验, -40°C 的环境是把试验件放入酒精、干冰混合液中获得的, 50°C 的环境是把试验件放入热水中获得的。气密试验的气源是气瓶, 液压试验的压力源是手动试压泵。试验结果表明: 新结构密封结构可靠, 性能良好。

(2) 软金属密封: 软金属密封选 6, 14 和 22 三种通径各三套共 9 个试验件, 在常温下做了低压气密试验、高压气密试验、高压液压密封试验。低压气密试验用 1 MPa 的空气进行, 高压气密试验用的是空气和氦气, 压力做到了 33 MPa, 液压试验的压力做到了 63 MPa。常温试验的试验方法与橡胶 O 型圈试验相同。接下来将试验件浸入液氮创造超低温条件进行超低温试验, 超低温气密试验用空气和氦气的混合气体进行, 受现场条件限制, 压力只做到了 15.2 MPa。最后做了振动试验, 试验件做完高压气密和高压液压试验后, 装在振动试验台上用发动机试车的振动频谱激振进行试验。激振加速度的均方根为 37.58 g, 轴向振动响应最小 81.28 g, 最大 169.82 g; 径向最小 31.26 g, 最大 179.89 g, 振后重复振前的试验。试验结果表明, 密封性能良好。

(3) 特型金属密封: 特型金属密封在常温条件下和在超低温条件下的试验与前面的试验完全相同。高压气密试验的最高压力做到 32 MPa, 液压试验的最高压力做到 52.5 MPa。超低温条件下的高压气密试验做到了 31.8 MPa。高压气密试验采用氦质谱仪检漏, 试验件放在专门设计的容器里, 试前先对容器抽真空, 然后对试验件充压试验, 质谱仪在容器

里检漏。试验结果证明：这种密封结构可靠，性能良好。

4 结 论

密封的可靠性与其设计结构密切相关。好的设计结构是保证密封性能和可靠性的关键。自紧式是一种非常好的密封设计结构，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紧固件的变形而保持密封比压不减小，密封性能不降低，因此，在高压下能保证可靠密封。通过本课题的研究，我们所共研制了 12 种新的密封结构，其中橡胶 O 型圈密封 6 种，软金属密封 1 种，特型金属密封 5 种。这些密封结构都已推广应用到了各型号的液体

发动机上，提高了发动机的工作可靠性。这些密封结构在各行业的推广，必将产生巨大的经济效益和良好的社会效益。

参 考 文 献

- [1] 陈德才，瞿德容编．机械密封设计制造与应用 [M]．北京：机械工业出版社，1993.
- [2] 张宝琨．发动机总装管路的典型密封机构 [R]．陕西动力机械设计研究所，1992.
- [3] 朱宁昌，刘国球．液体火箭发动机设计 [M]．北京：宇航出版社，1994.

(责任编辑：史亚红)

简 讯

1999 年运载火箭的意外事故

1999 年运载火箭共进行了 77 次发射，失败 8 次，成功率为 90%。

8 次失败中，两次原因在于大力神 ④B。其中一次在 4 月 9 日，第一级与第二级没有完成分离，第二级已经点火，但喷管不能按要求延伸。4 月 30 日第二次失败的问题出在半人马座上面级，按计划半人马座应点火 3 次，其间隔仅仅是 90 min，而不是 6.5 h。

质子号失败两次，分别在 7 月 5 日和 10 月 27 日。第一次采用“质子 M”模式，选用了新的上面级 Breeze-M，因第二级的 3 号发动机（而不是新的 Breeze-M 发动机）起火导致失败。起火的原因是焊接缺陷产生的弥散铝粒子引起的，卫星因之销毁。第二次发射采用了常规“质子 K”，被认为是二级的 4 台 RD-0120 发动机中有一台关机后爆炸。

4 月 27 日 Athena 2 发射 Ikonos I 商业卫星的失败则是整流罩电子系统的不正常引起的。5 月 4 日德尔它 ④的失败是运载火箭上面级一台低温发动机不点火造成的。为送升 Orion 3 卫星至地球同步转移轨道，需要发动机进行 151 s 的第二次启动工作，但不巧的是传感器监测的温度突然升高，表明可能是 RL10B-2 发动机燃烧室热燃气骤增引起的。在第一次工作后 4.2 s 产生了两个说不清楚的激波，第二次工作开始后 3.5 s 产生了一个大的激波。

最后两次发射失败是 11 月 15 日日本的 H-2 火箭和 12 月 11 日巴西的 VLS（巴西运载火箭）。H-2 火箭在升空后 239 s（或说大约 107 s），第一级的 LE-7 低温发动机关车。验证结果认为可能是涡轮叶片破裂引起的。而工程师们认为涡轮叶片破裂是燃料中气泡促使振颤的结果。巴西运载火箭的失败是由于第二级 S-40TM 固体火箭发动机未点火。

(本刊通讯员)