

低温阀在液体火箭发动机试验中的应用

王永忠, 王 宁

中国航天科技集团公司第六研究院一六五所

摘 要: 介绍了低温阀在国内外液体火箭发动机试验中的应用情况, 分析了我国低温阀在航天领域的研究现状, 提出了低温阀的研究方向。

关键词: 液体火箭发动机试验; 低温阀

中图分类号: V432

文献标识码: A

文章编号: (2004)01-0032-06

1 引 言

闭式循环的液氧/煤油发动机和液氧/液氢发动机试验时, 必须使用大量的低温阀, 控制推进剂的输送、压力和流量调节等。工业领域使用的阀一般为常温和高温阀, 现有的低温阀品种单一、口径小, 无法满足发动机试验的使用要求。液氧和液氢属于超低温介质, 其温度大约为 $-253\sim-170^{\circ}\text{C}$ 。因此, 超低温阀的研制任务艰巨, 技术难度也很大, 同时对可靠性、绝热、吹除、置换、防火防爆、密封性能等提出了特殊的要求。

2 我国超低温阀研究现状

我国低温阀的结构型式主要有球阀、蝶阀、闸阀、截止阀等。低温球阀以其独特的液流和使用特性在航天领域得到极大的发展和应用, 其中在对重量没有严格要求的地面试验中应用最广, 占低温阀总数的 80% 以上。在液氧/液氢发动机和液氧/煤油发动机试验台及其组合件试验台上, 低温球阀主要应用于液氧、液氢管路, 其中包括主管道截流、排泄、紧急排放、容器放空、管道加注、推进剂转注等。

2.1 低温球阀的主要类型

目前使用的低温球阀根据球的结构分为两种, 即浮动球阀和固定球阀。

浮动球阀球体是浮动的, 其典型结构见图 1, 已使用的主要有下列几种规格, 见表 1。固定球阀的球体是固定的, 其典型结构如图 2, 主要规格有 $\phi 50$ 、 $\phi 70$ 、 $\phi 165$, 额定工作压力为 0.5MPa。

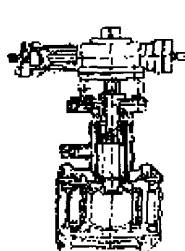


图 1 浮动球阀

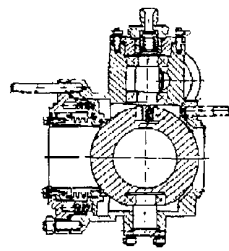


图 2 固定球阀

2.2 低温球阀的结构特点

航天用低温球阀由于用于液氢、液氧等易燃、易爆恶劣环境及其高可靠性要求, 在结构设计上以可靠、便于操作、工作寿命长、结构简单为特点。在球体结构、阀座和密封面结构、传动装置、绝热结构、填料密封结构等方面均考虑了较多影响因素, 其中如低温补偿、转动惯性力、阀重量控制、漏热量等。

收稿日期: 2003-06-05; 修回日期: 2003-07-10。

作者简介: 王永忠 (1968—), 男, 副译审, 研究领域为液体火箭发动机试验技术情报研究。

表 1 已使用的几种浮动球球阀的规格

| 说明 \ 型号 | SF1-7 | SF7-14 | SF7- 24 | PC2435 | SF1-8 | SF7-15 | Sd992-3, Sd992-4 |
|------------|-------|--------|---------|--------|-------|--------|------------------|
| 工作压力 (MPa) | 5 | 5 | 1.6 | 1.6 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| 公称直径 (mm) | 45 | 45 | 80 | 80 | 100 | 100 | 165 |
| 操作方式 | 手动 | 气动 | 手动 | 气动 | 手动 | 气动 | 气动 |

球体结构一般采用整体对称性,但由于球转动时惯性力较大,同时考虑减少重量和初预冷量等要求,因此,在较大口径球阀中又采用空心球或铝球,对于上天产品用阀后两点尤为重要。如地面用 $\phi 80$ 通径以上球阀,上天用 $\phi 70$ 、 $\phi 165$ 通径球阀的球体结构均采用空心球或铝球结构。

阀座和密封面结构采用了聚四氟乙烯镶嵌在金属骨架上作成阀座的形式。由于聚四氟乙烯的一系列较优异的特点,尤其是在液氢、液氧工作环境中的良好性能,使其广泛地在航天低温球阀中得到了应用。

传动装置即用于打开、调节和关闭球阀的机构,根据使用要求、安装位置、口径、压力等情况,航天应用的低温球阀传动装置有手动、气动两种,部分地面球阀根据不同情况使用可同时具备手动和气动传动功能。目前地面系统上球阀气动装置采用气缸曲柄结构,同时保留手动上阀杆的传动位置;而上天产品用低温球阀气动装置则采用气动换向阀、气动纹管组件和齿条齿轮轴组合

形式。

低温球阀的绝热结构有真空夹层绝热和外绝热两种形式。地面用球阀因为不过多考虑重量问题,故采用前者;而上天产品用低温球阀基本采用后者,一般由低温胶、泡沫塑料、密封加固和隔热防火及热反射层等组成。为防止阀杆传热,地面用的低温球阀还采用如图 1 所示的加长热桥和采用隔热套将阀杆分为上、下两部分的形式进行绝热。另外真空夹套中还采用吸附装置提高真空度,液氧球阀中禁止用活性炭作吸附剂,这主要防止因焊缝时间长泄漏造成液氧与活性炭化学反应燃烧的缘故。

2.3 低温球阀的材料选择

航天用低温球阀的材料选择,不仅要考虑材料在低温下强度、刚度、相容性、低温补偿等要求,同时作为上天产品还要考虑其重量,对于地面用则要考虑长期使用的可靠性。表 2 介绍了低温球阀主要零件在地面和上天产品中的材料选择情况。

表 2 低温球阀主要零件材料选择

| 零 件 | 地面用低温球阀材料 | 上天产品用低温球阀材料 |
|-------|------------------------------|-------------|
| 球 体 | 1Cr18Ni9Ti 0Cr19Ni9 | LD10 |
| 阀 体 | ZG1Cr18Ni9TiZg0Cr19Ni9 | |
| 阀 座 | 1Cr18Ni9Ti | LD10 |
| 阀座、垫片 | 聚四氟乙烯 (符合 ZBG33003) | 聚四氟乙烯 |
| 阀 杆 | 1Cr18Ni9Ti 0Cr19Ni9 0Cr19Ni9 | 1Cr18Ni9Ti |
| 填 料 | 聚四氟乙烯 | 聚四氟乙烯 |
| 波 纹 管 | 1Cr18Ni9Ti (部分阀结构有) | 1Cr18Ni9Ti |
| 连接螺栓 | 1Cr18Ni9Ti | LD10 |
| 阀座弹簧 | 无 | 1Cr18Ni9Ti |
| 吸 附 剂 | 分子筛、活性炭 (液氧阀禁用活性炭) | 无吸附剂 |
| 压 盖 | 1Cr18Ni9Ti | LD10 |
| 隔 热 套 | 环氧玻璃钢 | 无 |

上表中所有奥氏体不锈钢零件材料均应进行固溶处理, 阀体、球体、阀杆、阀盖、阀座等奥氏体不锈钢零件在精加工前, 应浸泡在液氮中进行 2 次 1h~2h 深冷处理, 以减少材料相变引起体积变化。当使用介质为液氧时, 所选填料、垫片、吸附剂材料应与液氧相容。

2.4 低温球阀应用中存在的主要问题

低温球阀经过 30 余年的使用与研究, 较好地达到了设计目的, 但在设计和使用方面存在问题, 如:

(1) 地面用低温球阀中腔异常升压问题

地面用的浮动球阀, 因其固有的缺点即装配时预紧力不易控制, 需要用厚度不同的垫片来调整, 同时操作扭矩较大, 致使在常温气密性试验检查时为达到不泄漏的要求, 对阀座装配调整可能较大或存在偏差, 这样就出现在低温时因收缩不均匀造成球阀两侧不能密封的情况。当球阀漏热量大时, 球阀阀体中腔液体介质会汽化, 造成阀体异常升压。在入口端加泄压孔可以解决此问题。

(2) 在低温性能试验时出现手动打不开阀, 采用加长杆打开。

(3) 装配和生产中的问题, 其中如气缸曲柄工作不到位, 球阀没有全开; 球体加工不对称; 密封面氟-4 垫嵌入偏差等。

3 DN200 及 DN300 超低温阀研制

根据发动机试验台总体设计的要求, 研制了用于发动机试验台液氧系统使用的 DN200、DN300 低温气动球阀。

3.1 DN200 低温球阀的研制

3.1.1 DN200 低温球阀的主要技术特性及结构

DN200 低温球阀结构见图 3, 其研制的主要技术指标如下:

公称直径: 200mm;
工作介质: 液氧、液氮;
工作压力: 1.6 MPa;
工作次数: 大于 300 次;
启动时间: 小于 1 秒;
操作性能: 气缸输出力矩 5.5kN·m (操纵气

压力 5.0MPa);

密封性能: 泄漏率小于 $1.68 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

阀体采用多层海绵、玻璃丝带、低温胶包扎的绝热形式。

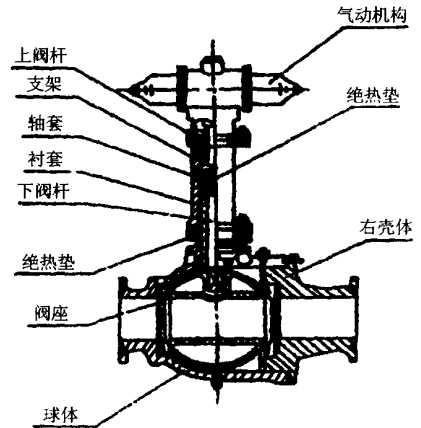


图 3 DN200 低温球阀结构图

3.1.2 低温球阀研制的关键技术

低温球阀研制过程中解决的关键技术有:

(1) 球和阀座的密封性及其材料的选择;

(2) 热桥的结构形式和材料;

(3) 大口径低温气动球阀的工作性能、质量检验方法和试验方法。

为了解决密封材料冷缩渗漏现象, 研制了增强聚四氟乙烯密封材料。这种材料是在聚四氟乙烯中按不同的百分比加入一定量添加剂。经过对不同配方进行多次性能试验以及测试数据比较后, 确定增强聚四氟乙烯的配方为: 聚四氟乙烯+玻璃纤维+石墨。这种材料与聚四氟乙烯相比物理性能和机械性能基本一致, 具有较小的线胀系数、耐磨性和润滑性, 更适合在低温工况下作为密封材料。

3.1.3 使用效果

该低温球阀于 1995 年底研制成功后即批量生产, 并应用于试验台液氧系统, 至今运行 8 年, 基本无故障, 工作次数远大于 300 次, 密封性能稳定。特别是使用于液氧主容器下的隔离阀, 在有液氧 20 余天的情况下, 仍能打开关闭自如, 密封性能可靠。

3.2 DN300 低温球阀的研制

根据液氧/煤油发动机整机试验的要求，以及研制 DN200 低温阀的经验，随后开始研制 DN300 低温球阀。

3.2.1 DN300 低温气动球阀主要技术性能及结构

DN300 低温气动球阀的结构见图 4，其主要技术指标如下：

- 口径： 300mm；
- 工作介质： 液氧、液氮；
- 工作压力： 1.6MPa；
- 操纵气体压力： $5.0 \pm 0.5 \text{ MPa}$ ；
- 启动时间： 1~2s；
- 管路对接形式： 法兰连接；
- 绝热形式： 真空绝热；
- 工作可靠性： 大于 1000 次；
- 阀在开关位置有相应电信号输出；
- 泄漏率（常温）：
 - 外泄漏率不大于 $1 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ （无气泡泄漏）；
 - 内泄漏率不大于 $8.40 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ （5 个气泡/分钟）。

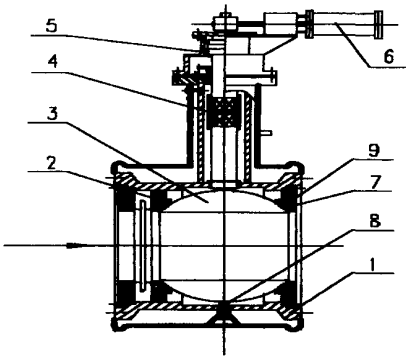


图 4 DN300 低温气动球阀

- 1-阀体；2-进口阀座组件；3-球体；4-连接套；
- 5-滚动轴承；6-气缸；7-密封环；8-支承块；9-出口阀座

3.2.2 DN300 低温球阀的特点

- DN300 低温球阀具有以下特点：
- (1) 低温阀的阀座具有弹性补偿装置，密封面有一定的密封比压，从而具有良好的密封性能；
 - (2) 绝热设计时气动装置与阀之间采取绝热

- 措施，保证气动装置工作温度处于常温；
- (3) 低温阀所采用的所有材料具有良好的低温相容性和低温韧性，以防止材料冷脆裂变；
- (4) 零部件在精加工和装配前进行深冷处理，减小因材料低温冷缩而产生的装配误差；
- (5) 阀体的绝热形式采用真空绝热。

3.2.3 使用效果

该低温气动球阀研制成功后，已生产 5 台。经过两年多的试验考证，该低温阀的技术性能完全满足设计和使用要求，具有工作可靠、启闭动作灵活、密封性能好、绝热效果可靠等优点。

4 欧美的低温阀

4.1 美国航天飞机主发动机（SSME）上的低温球阀

SSME 液氧主阀是火箭发动机中高压低温球阀的典型代表。该阀是一种常闭式、旋转驱动、高压、低温、大流量且可重复使用的球阀，它可通过配有复位装置及防结冰装置的曲轴和液压活塞对其进行连续调节并控制其开度。

球阀的最大优点是流阻小，打开后完全与管路直径相同，所以球阀的压力损失可控制到最小，这对减小泵前压力损失从而达到降低推进剂贮箱增压压力非常有利。美国航天飞机主发动机 SSME 的氧化剂和燃料主阀都采用这种带有凸轮机构的球阀，从而解决了非金属密封唇的磨损问题，最终大大提高了它的密封性能。

4.2 德国航空航天股份公司(Dasa)的低温阀

Dasa 是欧洲空间运载火箭阿里安 5 低温推进剂主阀的最大供应商，阿里安 5 是目前世界上最成功的运载火箭阿里安 4 的替代型号。Dasa 的低温球阀具有阀作动功耗低、泄露率小、耐恶劣环境能力强等特点。该阀系列主要有额定流通直径 $\leq 25\text{mm}$ 的电动阀和额定流通直径 $> 25\text{mm}$ 的气动阀。它们能够在 $78 \sim -228^\circ\text{C}$ 的温度范围内和真空压力为 1.5MPa 下的低温介质中正常工作。Dasa 的阿里安 5 低温推进剂主阀的主要用途为 LOX 和 LH_2 主阀、预冷阀和隔离阀。

4.2.1 LOX 和 LH2 主阀

LOX 和 LH_2 主阀配置有开、闭位置锁定系统的管线中提升阀，其正向和反向液流的密封性是由作用于软质双唇密封系统的锥形提升头来保证

的。为了监视阀的状态，还配置了开、闭位置锁定显示器。为了对供应管路进行预冷，在 LOX 和 LH₂ 主阀壳体的上部安装了一个预冷阀。该预冷阀是由真空膜盒作动器气动控制的，目的是为了保

证正向和反向液流的密封性。

LOX 和 LH₂ 主阀位于阿里安 5 主推进段的 LOX 和 LH₂ 供应管路中，其作用是在发射前将贮箱与发动机隔离。其主要技术数据见表 3。

表 3 LOX 和 LH₂ 主阀主要技术数据

| 参数 \ 阀名称 | 主 阀 | 隔离 阀 |
|---------------------------|----------------------------|-------------------|
| 设计流通直径 (mm) | 185 | 90 |
| 控制压力 (MPa) | 5.0-9.0 | 6.0 |
| 推进剂压力 (MPa) | <1.5 | < 2.2 |
| 压差 (MPa) | 0.017 (235 kg/s LOX) | GH ₂ 6 |
| 外泄漏率 (cm ³ /s) | <10-2 (T-LN ₂) | < 10-2 |
| 内泄漏率 (cm ³ /s) | <10 (T-LN ₂) | < 20 |
| 质量 (kg) | 29 | 5.7 |
| 尺寸 (mm) | 350 × 395 | 200 × 185 |

4.2.2 LOX 和 LH₂ 隔离阀

LOX 和 LH₂ 隔离阀是按比例缩小的 LOX 和 LH₂ 主阀。管路中的气动提升阀装有一个开启状态锁定系统，正向液流的密封性能是由作用于单唇密封系统上的锥形提升头保证的。为了监视阀的状态，还配置了位置显示。

LOX 和 LH₂ 隔离阀位于阿里安 5 主推进段的加注和通风管路中，这些阀可用于推进剂贮箱的加注、泄出、增压和减压。

5 俄罗斯的低温阀

前苏联于二十世纪六十年代末开始研制液氧/煤油火箭发动机。低温阀的研究工作开展得很早，技术上非常成熟。发动机试验台上主要采用手动和气动传动的低温截止阀，球阀几乎不采用。图 5 和图 6 是两种真空粉末绝热和真空屏蔽绝热式低温截止阀。

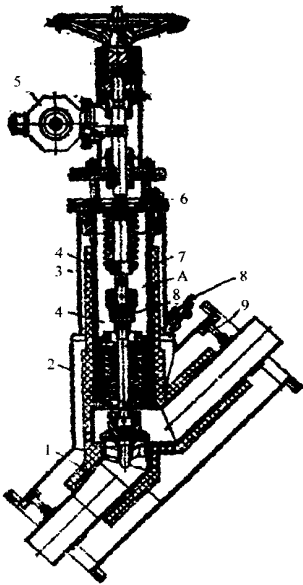


图 5 DN100 的真空绝热低温截止阀

- 1-冷阀体；2-外壳；3,4-薄壁管；5-信号器；
6-垫片；7-绝热层；8-玻璃钢垫片；9-玻璃钢棒；A 腔道

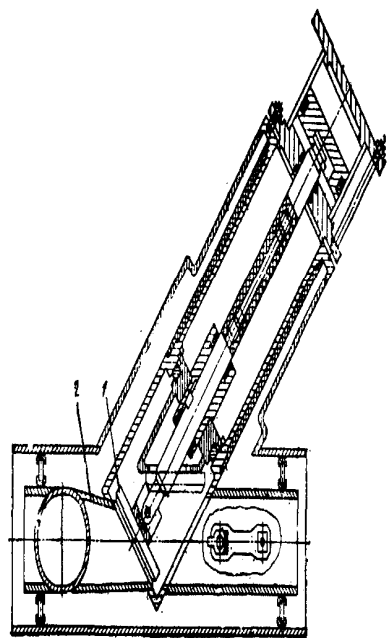


图 6 流通部分阻力很小的气动阀
1-阀体; 2-管路

6 乌克兰的低温阀

乌克兰的试验台液氧系统使用了大量的气动截止阀，这些阀具有结构简单、体积小、工作压力高等优点，液氧主阀用夹层真空绝热，结构紧凑小巧。进出口用法兰连接，气缸内活塞用胶木板制作，用“O”型圈密封，气缸体与阀体之间夹两层胶木板，以隔断冷源，提高密封性能。在试验台上工作三年或动作 5000 次后进行更换。该阀的泄漏为零，而且是在常温下检查密封性能，低温下的密封性能由设计保证。

7 结论与建议

7.1 结论

低温球阀作为一种管道通断装置，30 余年来

在航天领域取得了很大的成功和发展，为航天产品的研制做出了重要贡献，随着我国新一代大推力液氢/液氧火箭发动机和液氧/煤油火箭发动机研制工作的开展，低温球阀必将有更大的发展。低温气动截止阀因其结构紧凑小巧、可靠性高、设计独特等特点在液体火箭发动机试验台上得到广泛的应用。

7.2 建议

- (1) 由于我国低温球阀的研制没有形成系列，所形成的经验和知识也是非常有限的，并具有一定的局限性，这与国外航天用低温阀(包括球阀)系列化、标准化的发展水平还存在差距，因此，必须在此方向加大研究开发力度，进一步改进我国现有低温阀的绝热形式和密封性能。
- (2) 建议尽快提高我国低温球阀的设计、加工水平和批生产能力，适应型号研制和市场发展需求。
- (3) 积极引进先进国家成熟技术的低温阀装置，消化吸收，并尽快加工出产品，推进航天试验技术水平的提高。
- (4) 积极推广军转民项目，将现有的低温球阀和低温气动截止阀技术推向市场。

参考文献:

- [1] 洛马宁柯 Н Т, 库里柯夫 Ю Ф. 沈士良, 译. 低温阀. 机械工业出版社, 1986 年.
- [2] Horstmann M, Langel G. Dasa Cryogenic Valves and Future Development Options. AIAA98-3203, 34th AIAA/ASME/ASEE Joint Propulsion Conference Exhibit, Cleveband, OH, July13-15, 1998.
- [3] Salerno L J. A Cryogenic Valve for Spacecraft Applications. AIAA 82-0077, 20thAIAA Aerospace Sciences Meeting, Orlando, Florida, Jan.11-14, 1982.