

# 低温表面张力贮箱研究

<sup>1</sup>薛国宇, <sup>2</sup>陈志坚, <sup>1</sup>王德忠

(<sup>1</sup>上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200030; <sup>2</sup>上海航天动力机械研究所, 上海 200233)

**摘 要:** 对用于低温液氧推进剂的表面张力贮箱进行了理论上的初步分析, 认为其在理论上是是可以实现的。从低温表面张力贮箱的材料选择、低温推进剂引起的热应力及隔热层结构形式等方面进行了初步探讨。重点介绍了低温表面张力贮箱隔热层的结构形式及选用的隔热材料。分析了低温表面张力贮箱面临的特殊问题。

**关键词:** 表面张力贮箱; 低温推进剂; 隔热

中图分类号: V421.3+3

文献标识码: A

文章编号: (2005)03-0026-04

## Study on cryogenic surface tension propellant tank

<sup>1</sup>Xue Guoyu, <sup>2</sup>Chen Zhijian, <sup>1</sup>Wang Dezhong

(<sup>1</sup>College of Machinery and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;

<sup>2</sup>Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** The cryogenic surface tension LOX tank is theoretically analyzed. The key design parameters such as tank material selection, cryogenic propellant caused structure thermo stress and heat insulation structure are discussed. Insulation layer types and their materials of the tank are introduced. Some special problems are also analyzed.

**Key words:** surface tension propellant tank; cryogenic propellant; heat insulation

### 1 引言

表面张力贮箱以其在失重环境下的高可靠性和长寿命特点被广泛应用于卫星、飞船、空间站、运载火箭等各种航天器上。表面张力贮箱的核心技

术是它内部的管理装置 (Propellant management device, 简称PMD)。PMD的管理能力是贮箱性能的关键指标。表面张力贮箱所用的推进剂一般为无水肼 ( $N_2H_4$ )、一甲基肼、偏二甲肼 ( $(CH_3)_2N_2H_2$ )。此类推进剂均为常温状态工作的推进剂。

进入二十世纪70年代以后, 液体推进剂领域

收稿日期: 2005-02-16; 修回日期: 2005-03-07。

作者简介: 薛国宇 (1975—), 男, 工程师, 研究领域为卫星推进系统。

不断扩展。除了硝基氧化剂和肼类燃料外,煤油、液氢、液氧等廉价、无毒的推进剂也开始广泛应用。70年代初期,美国的马丁·玛丽埃塔空间公司和通用动力公司先后研制成功了用于液氢和液氧推进剂的表面张力贮箱。目前我国还没有在这方面进行深入的研究。

新一代运载火箭辅助动力系统方案之一为采用液氧/煤油推进剂发动机方案。由于液氧只能在低温状态下工作,以前长征系列运载火箭姿控发

动机系统的囊式贮箱已经不适合采用低温推进剂辅助动力系统。本文针对液氧低温推进剂管理特性和贮存特性,提出了低温表面张力贮箱的初步设计方案。

## 2 几种常用推进剂的物化性能比较

航天推进系统的推进剂种类很多,现将几种典型的推进剂的性能参数(表1)列出进行比较。

表1 典型推进剂的性能参数比较

Tab.1 Performance comparisons of typical propellants

推进剂种类	酒精	无水肼	液氧	四氧化二氮
分子式	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	N <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
分子量	46.068	32.05	32	92.016
沸点/	78.5	113.5	-182.99	21.15
冰点/	-114	1.4	218.41	-11.23
密度(20 )×10 <sup>3</sup> /(kg/m <sup>3</sup> )	0.789	1.008	1.14(沸点)	1.4460
粘度(20 )×10 <sup>-3</sup> /(Pa·s)	1.2	0.935	0.196(沸点)	0.4189
表面张力(20 )×10 <sup>-3</sup> /(N/m)	22.03	69.80	13.23(沸点)	25.61
饱和蒸气压(20 )×133.332/Pa	43.9	10.55	4.16×10 <sup>6</sup>	724.0
比热容(20 )×4186.8J/(kg·K)	0.5071(21.0 )	0.738	0.46(沸点)	0.362
热导率(20 )×1.163W/(m·K)	0.144	0.43(25.3 )	0.182	0.132
汽化潜热(20 )×4186.8J/kg	221.1(21.1 )	299.8(沸点)	5.9(沸点)	99.0(沸点)
临界温度/	243.1	345.3	-118.38	158.2
临界压力 ×9.8×10 <sup>4</sup> /(Pa)	63.1	117.89	51.51	99.06

推进剂为一甲基肼和四氧化二氮的表面张力贮箱已经成功应用于双组元推进系统,如东方红三号平台。从液氧和四氧化二氮的物化特性比较分析,四氧化二氮的表面张力系数比液氧表面张力系数大一倍,粘度则为液氧的一半,密度接近。如果贮箱毛细元件采用通常 2300×325 目的不锈钢丝网,其当量孔直径为 20 μm,按照表面张力压差的公式计算:

$$\Delta P_s = \frac{4s}{D_{bp}} \quad (1)$$

式中,  $\Delta P_s$  为表面张力压差, Pa;  $D_{bp}$  为网筛的直径, mm;  $s$  为表面张力系数, N/mm。

根据(1)式,液氧建立的压差为2466Pa,而四氧化二氮建立的压差为5032Pa。液氧的表面张力压差小于四氧化二氮,但处于同一量级,因而液氧推进剂的表面张力管理是可以实现的。液体的表面张力系数会随着温度升高而发生较大程度的减小,所以在实际工作时,低温表面张力贮箱最终能否在毛细元件上建立压差,使其正常工作,就取决于如何使贮箱内液氧的温度不超过其沸点。这个问题最终可归结为贮箱采用隔热设计后结构重量能否满足系统要求的问题。

### 3 低温表面张力贮箱设计需要考虑的特殊问题

在低温表面张力贮箱设计中,除了要考虑一般表面张力贮箱设计的问题以外,还需注意几个与低温推进剂密切相关的问题。

#### 3.1 适合于低温状态工作的贮箱结构材料选择

在低温工作时,需要考虑贮箱结构、材料的机械性能、材料的相容性。通常贮箱采用材料为不锈钢、铝合金、钛合金等,这些材料大都是低温工程上常用的金属材料,它们不仅有很高的机械强度和低温冲击韧性、良好的延展性、焊接性,还有较低的热导系数,并与液氧可以长期相容。铝合金密度最小,而且具有很好的抗腐蚀性能,但它的比强度不高。钛合金比强度高,也能在低温区域内保持较好的机械性能,但钛网或钛合金孔板产生的表面张力压差较小,不宜采用钛合金作为液氧贮箱的毛细元件材料。

采用不锈钢材料的毛细元件后,选用铝合金或钛合金作为壳体材料在焊接工艺上有困难。而选择不锈钢,在工艺上实现比较容易。所以综合考虑,选择不锈钢作为低温表面张力贮箱的结构材料较为合理。

#### 3.2 温度梯度引起的热应力

在设计中,需要考虑由于温度梯度而引起的贮箱结构中的热应力和气液两相混合温度梯度所引起的热应力。贮箱内低温推进剂的温度分布一般是由里向外逐步升高的。贮箱内的低温液体若处于常压下,其温度是均匀的正常沸点温度,外部传入的热量全部用于蒸发。如果贮箱被迅速增压,液体上表面会很快升高到与气垫压力相应的饱和温度,而其它绝大部分液体仍在增压前的初始温度下,由于侧壁也有热量传入,促使靠壁面的液体温度上升。温度高的液体密度低,在重力作用下,沿侧壁向液体上表面流动,形成一个自由对流层。温度高的液体逐渐地浮在上面,温度低的沉在下面,而且液体本身是一个不良的热导体,所以在容器垂直轴向上产生明显的温度梯度,这会导致贮箱结构的热应力产生。

另外由于在密闭的容器内,压力升高比较快。这是因为气垫空间的压力由液面温度决定,而温

度梯度使液面温度升高。存在于容器上部的接近饱和温度的液体,如果在表面张力通道内,将会形成气液两相流。当内部通道有气泡存在时,会严重影响表面张力贮箱的工作,当气泡累计超过气泡陷阱的容量时,完全有可能使贮箱的功能失效。这是设计低温表面张力贮箱的关键。

#### 3.3 低温推进剂沸腾引起的贮箱压力升高

由于低温推进剂的沸点都很低,如液氧的沸点为-182.99℃,所以低温推进剂的沸腾容易发生。对于密封的贮箱,推进剂液体受热,液面上方充满饱和蒸汽压。由于贮箱紧闭,蒸汽压力不断上升,这种升高如不采取措施,可能会导致贮箱破裂。一般为避免此类问题发生,在贮箱上要设计安全放气阀,这是在设计中必须考虑的。

#### 3.4 低温表面张力贮箱的隔热

贮箱完成任务主要经历三个阶段:地面准备阶段、加速段和空中惯性飞行段。在这三个阶段中,低温贮箱的有效隔热是很重要的。贮箱隔热设计要根据贮箱的工作状态确定。当在地面有较长的准备时间时,推进剂蒸发损失是占主要因素的,要有补充措施,在发射前补加推进剂。在加速阶段,来自气动摩擦的热量会进入贮箱。这个热量非常大,容易使贮箱压力和温度急剧升高,需要采用严格的隔热措施。在惯性飞行段,热能主要来自于太阳和行星的辐射,采用辐射屏蔽的方法,可以有效控制贮箱壁的热流。

## 4 低温表面张力贮箱隔热设计

表面张力贮箱管理装置按毛细元件形式可分为筛网式贮箱和叶片式贮箱两类,它们各有优缺点。筛网式贮箱在较大加速度下都能正常工作,但工艺复杂,稳定性差。典型的筛网式贮箱结构见图1。叶片式贮箱为全金属固定结构,结构简单,便于加工,重量轻,稳定性好,但是受加速度影响较为严重,只能在低于 $10^{-3}g$ 的加速度下工作,另外叶片装置的性能受热梯度的影响也很大。典型的叶片式贮箱结构见图2。

对于辅助动力系统液氧低温表面张力贮箱来说,工作中会有加速度段,加速度会大大超过叶片式贮箱的限制要求,且低温贮箱的热梯度很明显。因此,筛网式表面张力贮箱更适合于低温推

进剂。选择了结构形式后,对于内部管理装置和壳体的设计可以依照常温推进剂贮箱进行。

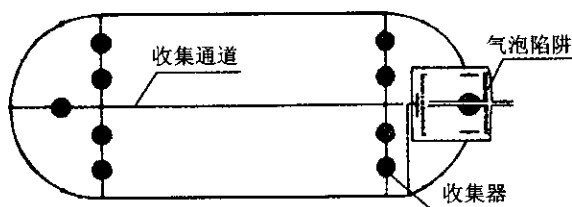


图1 SPOT卫星平台表面张力贮箱示意图

Fig.1 Surface tension tank of the SPOT satellite

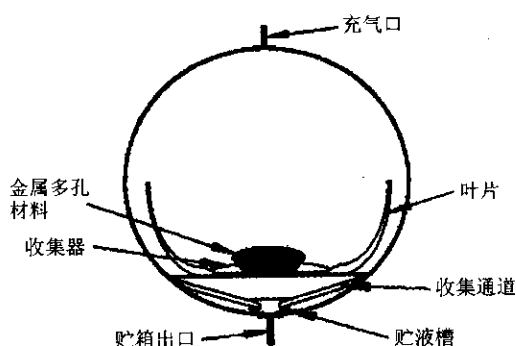


图2 HS601平台表面张力贮箱示意图

Fig.2 Surface tension tank of the HS601 satellite

低温表面张力贮箱除了进行内部管理装置和壳体强度等的计算外。重要的是隔热的设计和计算。隔热的设计关键在于保证隔热性能要求后,贮箱本身的重量不能突破总体对其要求的最大指标,使总体可以接受,而且可靠性要高。

低温工程中一般采用层叠式隔热设计,这是一种铝箔加玻璃纤维构成的多层结构。铝箔主要用于反射热辐射。而中间抽真空用于阻隔热的传导。层叠式隔热形式容易破裂和泄漏气体,使真空度下降,所以近几年采用蜂窝支持结构。这种结构具有较好的适用性。如图3所示。

隔热层的内层由蜂窝芯组成,蜂窝心部充填有泡沫。蜂窝芯有两种:一种由酚醛塑料浸润的玻璃纤维布做成;一种由蜂窝做成。用环氧树脂密封在内层的两面形成外层。在隔热层与贮箱壁之间是聚四氟乙烯隔离层。一般蜂窝芯的厚度为12~20mm;隔热外层的厚度为0.8mm;隔离层厚度为0.2~0.3mm。充填泡沫是一种氰酸盐类的泡

沫,当遇冷时,这种泡沫的闭孔会形成单个的真空空间,起到阻隔热流进入贮箱的作用。经计算,隔热层的导热系数约为 $0.0288\text{W/m}\cdot\text{K}$ 。

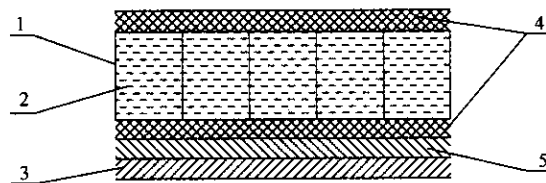


图3 隔热层结构示意图

1- 蜂窝芯; 2- 充填泡沫; 3- 贮箱壁;

4- 隔热外层; 5- 隔离层

Fig.3 Sketch of the heat insulation layer

隔热层可放在贮箱的内表面,将隔热层设计在贮箱内表面,具有保护隔热层不受损伤的明显好处。但隔热层材料与推进剂是否能很好相容,需要很充分的试验。另外也会增加敷设、探测和修理以及清洗的困难。隔热层设计在贮箱外表面,能较好地将加速段的气动热与贮箱内的推进剂隔开。相对在敷设、探测和修理方面比较容易,但对于空气中水汽在贮箱的凝结造成的漏热应采取专门措施。

## 5 结束语

综上所述,低温表面张力贮箱从理论上是可以实现的。但对于解决贮箱隔热问题在工程上要采用较复杂的措施,这不仅会增加贮箱自身重量,同时也增加了制造和发射成本。因此在进行设计时,需要综合考虑,优化设计。

### 参考文献:

- [1] 魏延明,卫星用表面张力贮箱的设计、应用及其发展[J],控制工程,2003,(2)。
- [2] 杨世铭编,传热学[M],北京:高等教育出版社,1993。
- [3] 高思秘主编,导弹与航天丛书[M],液体推进剂,宇航出版社,1989。

(编辑:王建喜)