

小型空间容器及其排气系统

平 田 正 敏

1. 序 言

有关空间容器的文章已经发表了不少^[1~5]，在这里笔者根据自己在电火箭研制中所取得的经验和通过文献调研，着重叙述小型空间容器及其排气系统。

所谓空间容器即是模拟宇宙环境的大型真空装置，用于人造卫星以及星上仪器的研究试验。为此，必须创造出与人造卫星在轨道上遇到的宇宙环境相同效果的条件。

近年来，人造卫星大型化了，所以进行试验的空间容器也必须大型化。即使是自旋稳定卫星，例如预定于1981年2月11日用NⅡ型火箭发射的技术试验卫星(ETS-Ⅳ)的直径也达2.1米，高达2.8米(图1略)。消耗能量大的三轴稳定卫星需要巨大的太阳电池帆板。计划中的地球资源卫星上的天线和帆板的尺寸达10米以上，因此从整个卫星试验来说需要超大型的空间容器。

随着卫星大型化和高级化，星上仪器数量的增加以及性能的提高，其试验内容由于涉及到许多项目而变得复杂。整个卫星系统试验时，星上仪器的详细数据的取得对于仪器评价，尤其是对于运行时的仪器数据的评价是非常重要的。然而由于试验设备及时间的限制，星上仪器全部进行详细试验实际上是不可能的。

因此，星上的每个仪器单个地预先进行详细试验对卫星整体试验也是必不可少的。由于这一理由，试验星上仪器的小型空间容器不仅对于每个仪器的研制必不可少，而且还是总体试验中很重要的一环。

2. 小型空间容器的性能

人造卫星和星上仪器的研制通常按照热结构模型，模拟样机，工程样机，正样以及实际发射的飞行样机顺序进行。小型空间容器供这些样机试验(对正样的鉴定试验，对飞行样机的接收试验)时使用，在样机试制过程中试验则更频繁。

星上仪器的种类繁多。装在卫星外部的有天线，太阳电池，装在内部的有电源，电池，接收机，发射机，记录器，一部分卫星还有外露的太阳传感器，地球传感器，红外传感器，还有喷射高温气体和带电粒子的燃气喷嘴及电火箭等等。

容器中进行的试验内容取决于星上仪器的种类，性能，安装位置等多方面的因素，因此对容器的要求随着其大小，结构，材料，对压力及真空质量等要求而不同。大型容器多设计成多用途的，小型容器则配合热真空试验，清洁超高真空试验，火箭喷射试验以及电磁噪声测定等而做成专用设备。

我们并不希望容器的性能限制试验内容，而且要极力避免试验时对试验件造成污染和使其性能变坏。

星上仪器通常不能加热去气，试验时放出大量气体，加上连接试验件的电缆及支架等也放出大量气体，要获得必要的真空度和缩短排气时间，排气系统的排气速度必须大。

由于反复试验和试验件放出的气体等会对容器造成污染,从而不能维持必要的清洁度和超高真空。要使容器本身清洁,必须具备加热去气性能。

试验中经常用高(电)压和致冷剂,因此必须考虑安全问题。不用说人身事故,就是试验件的意外故障也必须避免。卫星的研制进程是有严格规定的,要夺回因故障而失去的时间是不容易的。

设计中要采用高可靠性的真空部件,整个设备则要考虑发生故障后的安全问题,例如意外停电时必须防止由于低温屏而使试验件的温度降到允许温度以下等等。

3. 空间容器中进行的试验的种类

图2示出不同种类的试验对空间容器的清洁度的要求和气体负荷的要求的大致关系。光学传感器、机械部件试验的气体负荷小,但需要清洁真空。喷射试验需要适应气体负荷的大容量排气系统。关于电磁噪声测定用的容器该图未表示出来。

3.1 热真空试验用空间容器

热真空试验是人造卫星和星上仪器研制过程中最重要的试验之一。为确保星上仪器及其使用的部件的高可靠性,不仅使用温度范围,而且保存温度范围也有严格的规定。人造卫星的温度是由太阳光的入射,卫星内部电力消耗发的热和向宇宙空间放射的热之间的平衡状况决定的。

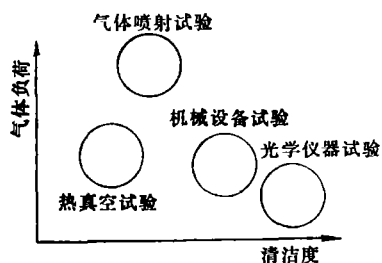


图2 对空间容器的清洁度和气体负荷的要求的大致关系

所谓热真空试验就是对仪器的热设计是否适当的验证试验。即是验证在设想的轨道温度变化范围内仪器的工作是否正常,结构零件是否有足够的温度余量以及仪器的电力消耗,输出电压、电流等特性的变化是否在允许范围之内。

宇宙环境压力随着卫星的轨道和高度而变,大致在 $10^{-7} \sim 10^{-13}$ 帕之内。如果只是为了防止剩余气体形成的热传导和对流,试验压力保持在 10^{-3} 帕以下就足够了。

为模拟卫星在宇宙的热辐射,通常在空间容器中设黑色的液氮冷却屏。试验件的种类不同所要求的屏结构也不一样。

像天线那样的外壳几乎全部处于宇宙环境下的仪器的试验应和整星一样,周围用液氮屏全部复盖。

装在星内的电源和电池的实验不需要液氮屏。将试验件周围的温度控制在常温附近 $-30 \sim +60^{\circ}\text{C}$ 即可。

如传感器等一部分露在星外的仪器的试验,只是暴露于宇宙空间的部分需用液氮屏。

为提高高灵敏度的红外探头的信噪比,需冷却到 -200°C 。该元件试验时冷却用的辐射冷却器只用液氮还不行,还需更低温度的围屏。

3.2 清洁超高真空空间容器

光学仪器,例如传感器,反射镜,太阳电池等受了污染其性能会显著下降。此外,对于在空间中使用的具有可动部分的仪器或部件,解决冷焊问题是仪器研制的重要问题之一。在这些试验中为防止污染和避免试验件吸附气体也需要清洁超高真空。

扩散泵返油,润滑油和粘合剂等放出的气体以及试验件放出的气体在容器壁上反射,再

吸附在试验件上是污染的原因。所以希望采用清洁的排气系统和具有分子沉结构的容器，使放出气体不再返回。

3.3 电磁适应性试验用空间容器

像电火箭等只在真空中动作的装置的电磁噪声测定需要特殊的容器。测量噪声用的天线和测量仪器放在真空容器之外时，容器的材料要选用电波透过率好的玻璃，丙烯，纤维强化塑料等。天线和测量仪器放在容器内时，要使容器反射的电波不影响试验，容器内壁应涂上铁氧体等电波吸收剂。对磁性能有影响时应使用非磁性材料。

3.4 用于喷射试验的空间容器

电火箭试验中需要能够处理喷射大量带电粒子和高温气体的容器，因此要在离子收集极和排气系统上下功夫。

电火箭的加速结构不同，因而有各式各样的，现就最有代表性的以水银为燃料的离子发动机为例，压强高于 10^{-3} 帕时视在喷射的离子束增加，由于离子束和剩余气体的电荷交换所产生的带电粒子的返流，增大了束电流的测定误差和电极的消耗。

在一千~数千伏电压下加速的离子束使收集极的金属材料溅射。由于收集极的构造关系，溅射出来的收集极材料污染发动机，对工作影响很大。

长时间试验时污染尤其成问题。发生故障时很难区别是加高压的绝缘材料绝缘不良引起了实验中断还是发动机电极的消耗和形状变化等发动机本身的特性引起的，还是收集极材料引起的。因此有必要考虑设计一种分子沉，如果从以前研制的实例看，都在这方面下了不少功夫。

排气系统为能处理大量气体，需要气体输送式真空泵。为试验在宇宙空间的起动特性，需要清洁超高真空。

4. 排气系统

空间容器的排气系统需要排气速度大和根据试验件的种类与试验内容需要能获得清洁超高真空的真空泵。喷射大量带电粒子和气体的装置的试验需要气体输送式真空泵。

因为用单一种类的真空泵不能满足所有的要求，所以排气系统多采用几种真空泵的结合。

4.1 屏

为热模拟宇宙环境设置的液氮屏对于从试验件放出的气体中占大部分的水蒸气是一个很有效的真空泵，排气速度很容易达到 $10^2 \sim 10^3$ 米³/秒。此外，高分子量的炭氢化物(气体)在屏上冷凝，容易获得清洁真空。也能有效地防止从试验件放出的气体的再被吸附造成的污染，但屏恢复常温时，凝固物放出往往也会污染试验件。

屏的冷却通常在数十分钟内，而升至常温则需数小时至数十小时，更换试验件不可能在短时间内完成。

4.2 低温泵

低温泵除了氮，氖，氢以外对其它所有气体能容易获得大抽速，它能得到真正的清洁真空，可以说是效果很好的真空泵。

内装液氮屏这种形式特别适合于大抽速， $10^2 \sim 10^3$ 米³/秒的抽速也能够实现。在屏和低温泵的结构上下功夫也可能防止从试验件上放出气体的再被吸附。

缺点是设备庞大，对超高真空中剩余气体的主要成份氢的抽速小，恢复常温时冷凝的气

体再放出会污染试验件，只有屏冷却时才能工作。

带有致冷机的小型低温泵的排气速度最大可达 10^3 米³/秒，因为简便，能像普通低温泵那样使用。泵的安装方向不受限制，不用液氮即可单独工作。通常在低温表面上粘上活性炭和分子筛使之对氢也具有抽速。在冷凝泵和容器之间加一阀门，可以防止冷凝气体再放出时影响试验件。

4.3 扩散泵

油扩散泵是最廉价的可输送气体的高、超高真空泵，排气速度可达 10 米³/秒。缺点是返油造成污染。尤其是抽带电粒子时由于剩余气体中的炭氢化物与带电粒子的电荷交换，试验件容易附着炭化物。最近市场上已有出售炭化物附着少的泵油过氟化聚醚，但很贵。

水银扩散泵没有返油，但一定要设置障板和阱，怕水银侵入的系统不能用。

4.4 溅射离子泵

这种泵是最具有代表性的清洁超高真空泵。最大排气速度为 1 米³/秒，在高真空之前需要粗真空排气系统。因为是气体积存式泵，承受气体负荷能力差，大量气体吸入后需要激活。对惰性气体的排气作用小。泵的安装方向不限。

4.5 钛吸气剂泵

这种泵在清洁超高真空中也可以使用，因为它和溅射离子泵一样是气体积存式泵，承担气体负荷的能力差。排气速度可随着钛吸气剂面增大成比例增加。如果在压力高时使用会消耗大量的钛。要使蒸发的钛不污染试验件和容器，应设置适当的屏。

4.6 分子泵

除水银扩散泵外，分子泵在气体输送式排气泵中是唯一的能够获得清洁超高真空的真空泵。排气速度为 5 米³/秒以下的泵在市场上可买到。因为它能承受的气体负荷大，所以对处理喷射气体的装置和带电粒子的试验，清洁粗抽，加热除气排气等特别有效。

作为空间容器的排气系统采用冷壁和油扩散泵的结合最省钱，可是在气体输送式排气中

又要获得清洁超高真空时以冷壁和分子泵结合为好。需要大排气速度时可再加上低温泵。小型空间容器还是以带小型致冷机的低温泵为好，即便宜又方便。

5. 小型空间容器研制示例

5.1 电火箭性能试验用空间容器

图 3 为电子技术总合研究所的离子发动机性能试验用空间容器^[6,7]。容器本体

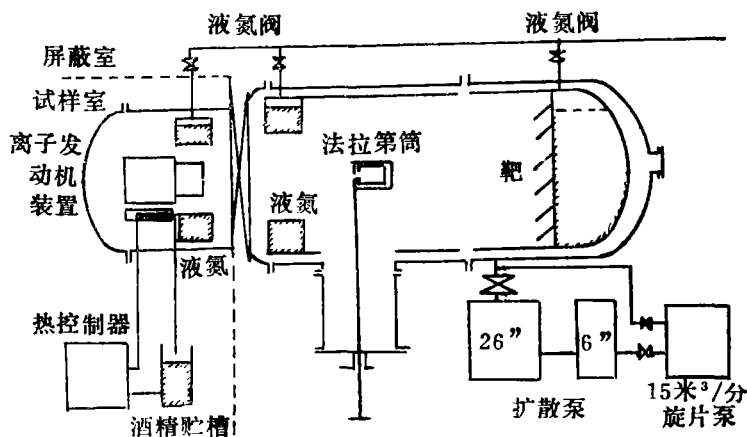


图 3 电总研的离子发动机性能试验用空间容器系统图

是直径 1 米，长 2.5 米的卧式圆筒。安放发动机的试件室直径 0.6 米，长 0.6 米，与容器本体用闸阀连结。在容器本体内由内径 0.8 米的屏复盖，在离子收集极部分为减少因离子束反射和溅射物质对发动机的污染，装着 45° 角的靶。

主排气泵为口径 26 英寸的油扩散泵（泵油 DC-750），有效抽速在容器排气口为 5.5 米³/秒。液氮屏作为冷凝泵对喷射出来的水银离子束以及从收集极材料中放出的气体显示了有效的抽气作用。

我们观察到一个离子碰撞有 2~3 个气体分子放出。当离子束电流为 25 毫安时试验压强大约为 4×10^{-4} 帕，装置的压强为 10^{-5} 帕。

离子发动机的电源系统装在温度控制箱内，将温度控制在设想的轨道温度范围内。为了模拟在宇宙环境中的热辐射，发动机本体周围用液氮屏围起来。液氮阱和围屏对电源系统放出的气体起着有效的排气作用。

为测定发动机发出的电磁噪声，试件室放置在 5 米×5 米×2.5 米的屏蔽室内。此外还专门准备了直径 0.6 米，长 1.0 米的玻璃制试件室。

图 4（略）是西德航空与宇宙飞行试验研究所的空间容器^[8]。直径 4.2 米，高 5 米的立式圆筒，用不锈钢制成。

该容器的第一个特点是假定试验时间长达一万小时，为了消除被溅射出来的收集极材料的影响，离子收集极用一固体水银槽。在发动机旁边溅射出来的物质就是作燃料用的水银，所以不会影响发动机的工作特性。即使在发动机和绝缘材料上吸附了，在常温下也会完全蒸发。

第二个特点是主排气系统由四台水银扩散泵组成，容器的内表面几乎全部由液氮屏复盖，它成了对付水银的低温泵，因此，试验过程中能保持清洁的真空。

与此构造相同的离子发动机长时间试验用的性能良好的空间容器正在 NASA 刘易斯研究所，休斯公司使用^[9,10]。在铯离子发动机中使用蜂巢式收集极收到好的效果^[11]。

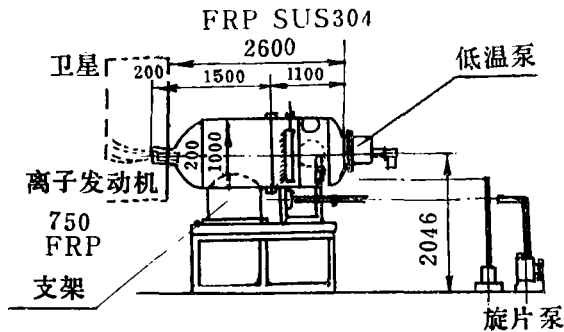


图 5 离子发动机电磁适应性试验用容器^[12]

图 5 为离子发动机和装载它的人造卫星的通讯系统之间的电磁适应性试验用容器^[12]。离子发动机利用放电使水银离子化，喷射离子束产生推力。这时产生很强的电磁噪声，可设想到会干扰通信系统，因此要预先在地面进行与通信系统之间的电磁适应性试验。

所用的容器本体是直径 1 米，全长 2.6 米的卧式圆筒，是由电波透过性良好的 FRP 制容器以及安装离子收集极和排气系统的不锈钢容器组成。

透过电波的材料首先考虑玻璃，但只有 0.6 米直径以下的，而且使用时要特别小心，从而采用了其电波透过性能已在雷达的结构件上使用所证实的纤维强化塑料。这种材料重量轻，不必担心损坏。

因为存在着纤维强化塑料的静态放气和在带电粒子冲击下的放气问题，所以应预先试验放气量是否在允许范围之内。为安全起见，壁厚选用 20 毫米。

因离子收集极用液氮冷却，容器又需要装进电波屏蔽室，所以主排气系统主要排除纤维强化塑料放出的气体，因而选用了对其主要成份水蒸汽有效的低温泵。人们担心水银损害低温泵的金属材料，但由于水银用量少，而且大部分冷凝在收集极上，试验时间短，只有一周左右，所以不大会出问题。

按设计达到的极限压强为 10^{-5} 帕, 试验中达到的压强为 10^{-4} 帕。低温泵的压缩机放在电波屏蔽室以外, 所以低温泵的电磁噪声不影响试验。

5.2 星上仪器一般试验用的空间容器

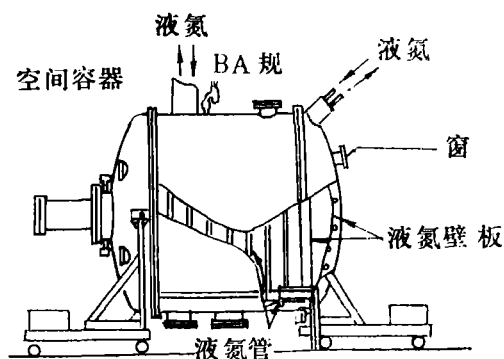


图7 电总研的空间容器

以氙作燃料的离子发动机，装在 ETS-IV 型上的脉冲式等离子体发动机的性能试验，微推力测定，喷气方向分布测定等都使用了该容器。

与此构造大致一样的比电总研的空间容器大许多的容器在 13 年前安装在电波研(现已移交给宇宙开发事业团)。与此同时还设置了直径 0.6 米, 长 1 米的卧式圆筒形的清洁超高真空容器。用低温泵和溅射离子泵抽气, 极限压强可达 3.6×10^{-8} 帕^[14]。

图 8 为电总研（在筑波厅舍）新设置的空间容器。它的直径为 1.5 米，长 2.5 米，用不锈钢制成。为了试验件安装方便，容器为分开结构，内部不需要全部用屏复盖，移动的那一侧没有屏，该部分的试验空间增大。

为使排气系统能以大抽速获得清洁的超高真空，采用了涡轮分子泵和低温泵。低温泵对氮，氧的抽速是良好的，即使在不加冷却屏的试验中也可期待对水蒸汽有大的抽速。排气速度分别为 $5 \text{米}^3/\text{秒}$ 。

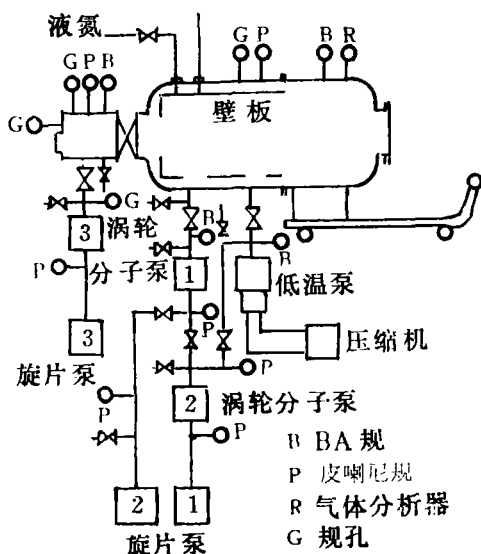


图8 星上仪器试验用的清洁超高真空空间容器^[15] 因为用分子泵排气, 因而有可能在高真空中加热除气和获得清洁真空, 低温泵的负荷也减轻了。极限压强为 2.5×10^{-7} 帕, 单独用分子泵时亦可达到 3×10^{-6} 帕, 所以该容器操作非常方便。现在用于宇宙控制器的研究。

6. 结束语

我认为星上仪器试验用空间容器的直径以1~2米大小的便于使用。在一般情况下,因为所获得的真空质量成问题,所以排气系统以采用即能以输送式进行排气又能获得清洁超高真空的分子泵为好。单用分子泵不能满足大排气量要求时则与低温泵并用。

从操作方便和经济性考虑,小型空间容器以采用带小型致冷机的低温泵较为合适。大型空间容器最好用带冷围屏的低温泵。在屏和低温泵的构造上下功夫,与分子泵的构造相近似是可能的。分子泵能抽除超高真空中的剩余气体的主要成分氢,所以减轻了低温泵的负担。

直径达10米的超大型空间容器配备10台5米³/秒的分子泵已足够了。容器内表面面积为10³米²,若器壁放出的氢气的速率为10⁻⁹帕·米³/秒·米²,氢分压为2×10⁻⁸帕,即使屏不冷却,估计可达10⁻⁴帕。

参 考 文 献

- [1] 大岛,真空,9 3(1966)93
- [2] 中川,角田,日本航空局宇宙学会志,18 193(1970)263
- [3] R.A.Haefer, Le Vide, 146(1970)65
- [4] R.A.Haefer, Vacuum, 228(1972)303
- [5] 西川等,真空,19 8(1976)257
- [6] 平田,中山,真空,16 8(1973)295
- [7] 户田,他,第21届真空联合讲演会文集(1980)59
- [8] G.Krulle et al, AIAA, 76—1024
- [9] C.R.Collet et al, AIAP, 76—1020
- [10] W.S.Williamson et al, AIAA, 76—1026
- [11] E.LeGrives et al, AIAA, 76—1025
- [12] 平田等,第21届真空联合讲演会文集(1980)57
- [13] L.K.Rudolph et al, J.Spacecraft, 17 5(1980)447
- [14] 浅井等,电波研究所季报,16 82(1970)10
- [15] 平田,小野,第21届真空联合讲演会文集(1980)45

穆永阁译自(日)“真空”1980年第三期,胡永年校