

基于空间环模设备的低气压试验技术研究

王亚军, 赛建刚, 高斌, 高博, 段炯

(中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘要: 随着深空探测的快速发展, 为了验证航天器和航空器在飞行过程低气压环境中的适应能力, 需要进行地面低气压试验模拟。此类试验一般采用低气压试验箱进行, 压力下限只能达到 10^2Pa 量级, 不能满足航天器和航空器深空探测的低气压需求; 为了确保该类型试验的有效性, 本文基于空间环境模拟试验设备, 从低气压试验压力分区划分、压力变化速率控制、压力保持控制等方面对空间环境模拟试验设备进行改进, 创新提出了极低气压压力控制方法, 避免了极低气压环境下进气调节不稳定造成的压力波动对试验的影响, 使低气压压力下限从 10^2Pa 量级扩展至 10^{-5}Pa 量级, 提升了7个数量级, 提高了航天器和航空器低气压环境下的可靠性。

关键词: 低气压试验;控制;极低气压;设备改造;空间环模设备

Research On Low Pressure Test Technology Based On The Simulation Equipment Of Space Environment

Wang Yajun , Sai Jiangan, Gao Bin, Gao Bo, Duan Jiong

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, CAS, Xi'an, Shaanxi 710119, China)

Abstract: With the rapid development of deep space exploration, in order to verify the adaptability of spacecraft and aircraft in low-pressure environment during flight, it's necessary to carry out the ground low-pressure simulation test. This kind of test is generally carried out in the low-pressure test chamber, the low-pressure limit can only reach to the magnitude of 10^2Pa , with cannot meet the low-pressure requirements of spacecraft and aircraft for deep space exploration. In order to ensure the effectiveness of this kind of test, this paper makes improvement in space environment simulation test equipment from the aspects of low-pressure test partition, pressure change rate control, pressure maintenance control, and innovatively puts forward pressure control method in an extremely low-pressure environment, the influence of pressure fluctuation to test

caused by unstable air intake regulation in extremely low-pressure environment and improves the reliability of spacecraft and aircraft in low pressure environment.

Keywords: low pressure test; control; extremely low pressure; Equipment Modification; Space Simulation equipment.

1 引言

随着人们对地球大气层及宇宙空间探索的不断深入及航空航天技术的不断发展,对空间环境模拟技术要求越来越高,低气压试验是空间环境模拟试验的重要项目之一。因此低气压试验技术伴随着深空探测的深入发展,朝向高精度方向发展。

在航空器和航天器气压模拟层面,航空器或航天器在飞行发射前,会进行压力变化模拟,然而模拟方法受限于真空泵抽速等原因,不能按照发射过程中压力变化速率精确模拟,模拟装置和模拟方法存在较大误差,目前国内的空间气压模拟试验主要由低气压试验箱完成,但是低气压试验箱存在以下局限性:极限压力只能达到 10^2Pa 气压量级,而深空探测的航天器或航空器在进行低气压试验时要求的气压值低于 10^2Pa 量级,甚至要求气压值达到 10^{-5}Pa 量级,而目前国内在 $10^2\text{Pa}\sim 10^{-5}\text{Pa}$ 的气压量级范围内,低气压试验箱无法满足试验要求,尤其在高真空段气压模拟处于空白。针对上述情况,本文利用中国科学院西安光学精密机械研究所的空间环境模拟设备,对其抽气系统、控制系统、排气系统等方面进行了改造设计,并在改造后的设备上多次开展了航空器和航天器深空探测低气压模拟试验,试验结果表明该系统可以满足低气压试验的需求。

2 低气压模拟机理分析

低气压效应主要有:密封垫密封的壳体漏气、漏液;装备因热传导降低而发生过热;低气压密封失效;真空放电;低气压泄露人员伤亡;低密度材料的物理化学性能变化;发动机启动工作不稳定;润滑剂蒸发;密封容器破损变形、破裂;电子仪器仪表失压异常。低气压模拟的主要任务是在地面建立人工低气压环境,低气压环境从压力段分类来看低于一个大气压,属于真空环境,因此遵从真空下的各种物理现象,真空系统进气方程如下:

$$\sum Q=Q_L + Q_D + Q_P + Q_W + Q_B$$

式中: $\sum Q$ —单位时间进入人工低气压环境的气体量;

Q_L —系统存在漏孔造成的单位时间由外界大气向系统内输送的气体量；

Q_D —单位时间系统内表面吸附的气体解吸的气体量；

Q_P —单位时间容器器壁渗透进入系统的气体量；

Q_W —由于工作需要，单位时间向真空系统输送的气体量；

Q_B —由于真空泵本身存在的返流，单位时间返回真空系统的气体量。

由于 Q_L 、 Q_D 、 Q_P 、 Q_B 在人工低气压环境建立时就已经确定，通常考虑为定值，因此控制进入低气压环境的气体量 Q_W 即可改变进气量。低气压试验还需考虑低气压环境的排气量，因此单位时间总进气量减去单位时间总排气量等于低气压环境单位时间气体量的变化，其排气状态微分方程如下：

$$\sum Q - SP = \frac{d(PV)}{dt} = V \frac{dP}{dt}$$

式中： S —真空泵的有效抽速；

P —真空系统压力；

V —真空系统体积。

通过上式得出，在低气压试验的降压过程中，令 $\sum Q$ 为定值，通过控制排气系统的抽速 S 的大小，即可控制降压过程中压力的变化速率，在压力保持阶段，令 $\sum Q - SP = 0$ ，即可得出单位时间排气量等于进气量，低气压试验系统压力可以保持不变。

按照目前国内航空航天领域低气压试验的压力需求，其压力范围分为两段：第一压力段为 $1 \times 10^5 \text{Pa} \sim 1 \times 10^1 \text{Pa}$ ；第二压力段为 $1 \times 10^1 \text{Pa} \sim 1 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 。在第一压力段范围内，低气压试验系统及系统内附属设备的 Q_L 、 Q_D 、 Q_P 、 Q_B 分压总和在系统总压中所占比重很小，因此可以忽略不计，在降压过程中，调节低气压试验系统排气真空泵抽速。在压力保持阶段，调节进气阀开度和真空泵抽速，使单位时间进气量 Q_W 等于单位时间排气量 SP ，真空系统气体量达到动态平衡，从而保持压力稳定。在第二压力段范围内，低气压试验系统的气体状态逐渐进入分子流，气体的 Q_L 、 Q_D 、 Q_P 、 Q_B 占据主导作用，其和 Q_W 共同影响压力的变化。在此压力段，动态调整敏感，很小的进气量会引起压力的波动，因此成为低气压试验调压难点和重点。

3 空间环模设备改造

空间环境模拟试验设备主要用于完成航天器及其组件的真空热试验,受限于试验设备硬件和软件限制,对低气压试验无能为力,国内的低气压试验箱制造厂家、试验单位、低气压试验相关标准众多,但仅局限于 500Pa 至一个大气压的压力段。因此通过对空间环境模拟试验设备改造优化,突破上述压力范围限制。图 1 为中国科学院西安光学精密机械研究所的 1m 空间环境模拟试验设备实物照片,图 2 为该设备的抽气系统示意图。



图 1 1m 真空环境模拟试验装置

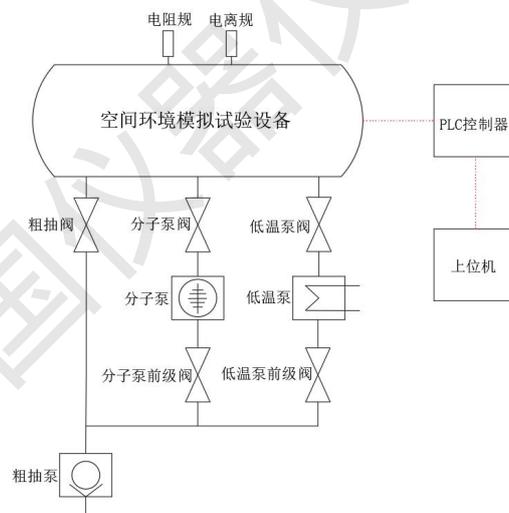


图 2 空间环境模拟试验设备抽气系统示意图

从图 2 可以看出,粗抽泵、分子泵、低温泵在工作过程中抽速为定值,不能实现降压速率的控制和调节,亦不能实现压力值的稳定和保持。为了保证低气压试验的降压、压力保持阶段的精准控制,低气压试验过程中,开启抽真空机组,通过西门子可编程控制器的 PID 控制模块控制抽气管路上调节阀开度的大小,达到所需要的降压速率,在保压控制时,根据

所需要保持压力范围的不同，采用控制设备的抽气速率、充气速率或两者同时起作用来实现,PID 控制原理见图 3 所示。

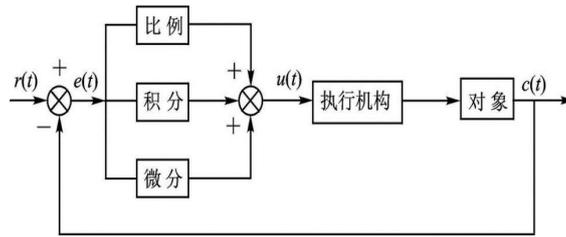


图 3 低气压调压 PID 控制过程示意图

3.1 降压速率控制

按照 GJB150.2A-2009 及压力变化速率对产品的影响，降压速率需要控制的压力段为 $1 \times 10^5 \text{Pa} \sim 1 \times 10^1 \text{Pa}$ ，在此压力段范围内，基于空间环境模拟试验设备控制系统的西门子可编程控制器，在空间环境模拟试验设备粗抽泵和设备本体之间的排气管道上安装调压阀。由于电阻规在 $1 \times 10^5 \text{Pa} \sim 1 \times 10^3 \text{Pa}$ 范围内测量误差超过 $\pm 50\%$ ，无法进行设备本体压力精准测量，因此设备本体安装真空绝压压力变送器，在 $1 \times 10^5 \text{Pa} \sim 1 \times 10^1 \text{Pa}$ 的压力范围内，测量精度可以达到 $\pm 0.5\%$ ，满足国军标对低气压试验的要求。调压阀和西门子可编程控制器的模拟量输出模块连接，真空绝压压力变送器和西门子可编程控制器的模拟量输入模块连接。

在低气压试验降压过程中，上位机 MCGS 组态软件设置降压速率，降压速率通过上位机输入至西门子可编程控制器的背景数据块，调用背景数据块，降压速率作归一化数据处理。真空绝压压力变送器采集的压力数据通过变送器输出模块转化为 $4 \sim 20 \text{mA}$ 电流数据，输入至西门子可编程控制器模拟量输入模块，电流数据作归一化处理，计算单位时间的实际压力变化速率，基于西门子可编程控制器的 PID 控制模块 FB41，对实际压力变化速率和上位机 MCGS 组态软件设置的降压速率进行比较，PID 输出结果送至调节阀，控制调节阀开度，改变排气管路流导，从而控制降压速率。其系统图见图 4 所示。

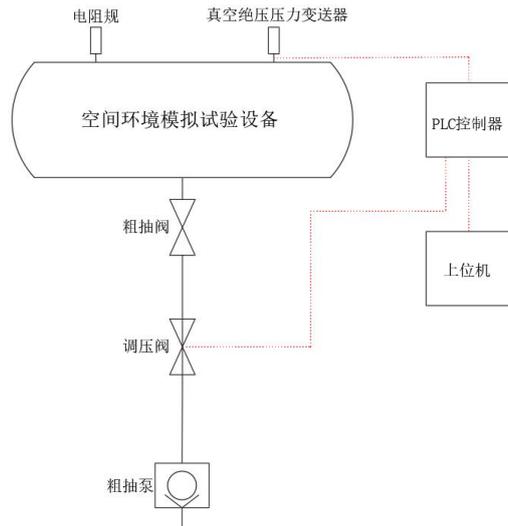


图4 降压速率控制系统图

3.2 高压段压力保持控制

低气压试验不仅对降压速率有要求，而且压力降至规定值时需要保持一定时间，高压段压力范围为： $1 \times 10^5 \text{Pa} \sim 1 \times 10^1 \text{Pa}$ ，高压段压力保持时，进气阀开度固定，通入定值流量空气，按照3.1节控制方法，自动调节粗抽管道调压阀开度，使空间环境模拟试验设备的进气流量等于排气流量，压力达到动态平衡，保持在规定的压力值。高压段压力保持控制系统见图5所示。

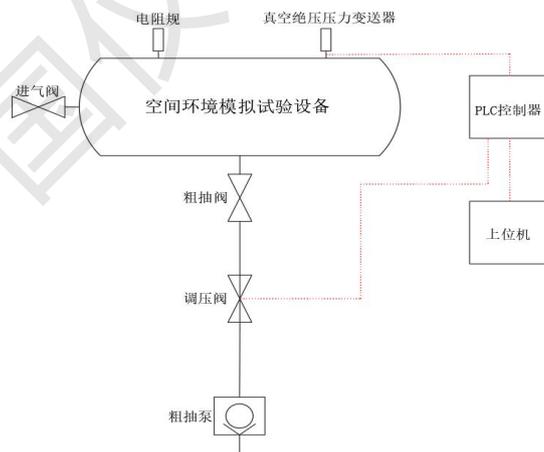


图5 高压段压力保持控制系统图

3.3 低压段压力保持控制

低压段压力范围为： $1 \times 10^1 \text{Pa} \sim 1 \times 10^{-5} \text{Pa}$ ，气体状态由粘滞分子流逐渐转入分子流，工作进气、放气和漏气共同影响压力变化。低压段压力保持分为两段，即分子泵抽气控制阶段和低温泵抽气控制阶段，在分子泵抽气阶段，空间环境模拟试验设备压力范围为 $1 \times 10^1 \text{Pa} \sim$

$1 \times 10^{-2} \text{Pa}$ ，分子泵抽气的同时，通过调节针阀，改变进气流导，使进气漏率、放气漏率和漏气漏率之和等于分子泵有效抽速和设备压力的乘积，从而空间环境模拟试验设备内压力达到动态平衡。在 $1 \times 10^{-2} \text{Pa} \sim 1 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 的压力范围内关闭分子泵阀，打开气温泵阀，利用低温泵降压，压力在 10^{-3}Pa 量级范围内，打开漏孔 1 对应的调节阀 1，通过控制调节阀 1 开度，保证压力在 10^{-3}Pa 量级连续可调；压力在 10^{-4}Pa 量级范围内，打开漏孔 2 对应的调节阀 2，通过控制调节阀 2 开度，保证压力在 10^{-4}Pa 量级连续可调；压力在 10^{-5}Pa 量级范围内，打开漏孔 3 对应的调节阀 3，通过控制调节阀 3 开度，保证压力在 10^{-5}Pa 量级连续可调；漏孔漏率根据低温泵抽速确定，低温泵排气的同时，使进气漏率、放气漏率和漏气漏率之和等于低温泵有效抽速和设备压力的乘积，从而空间环境模拟试验设备内压力达到动态平衡。

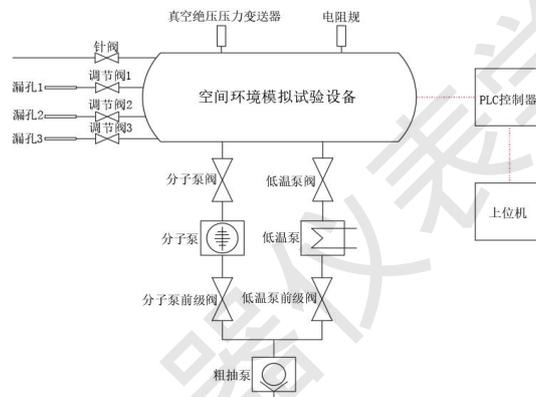


图 6 低压段压力保持控制系统图

4 试验结果

在低气压试验系统完成改造后，进行了多次空载调试测试，确认系统指标能够满足低气压试验要求。并进行了多次航天航空产品低气压试验。

4.1 降压速率控制

降压速率控制试验总计选取了 $10 \text{kPa}/\text{min}$ 、 $5 \text{kPa}/\text{min}$ 、 $3 \text{kPa}/\text{min}$ 三个降压速率，气体压力控制系统采用PID控制，降压过程中速率控制良好，保证容器压力在各个设定工况中均稳定在 $\pm 10 \text{Pa}$ 的高精度内，压力曲线见图7所示。

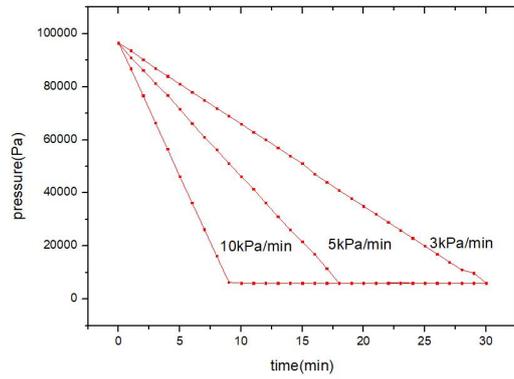


图 7 低气压试验不同降压速率压力曲线

4.2 压力保持控制

压力保持控制分为 2 段，高压段压力范围为： $1 \times 10^5 \text{Pa} \sim 1 \times 10^1 \text{Pa}$ ，在此压力范围内，通过 PID 调节控制，不同压力 10^4Pa 、 10^3Pa 、 10^2Pa 、 10^1Pa 量级都可以达到压力稳定，压力控制曲线见图 8 所示。

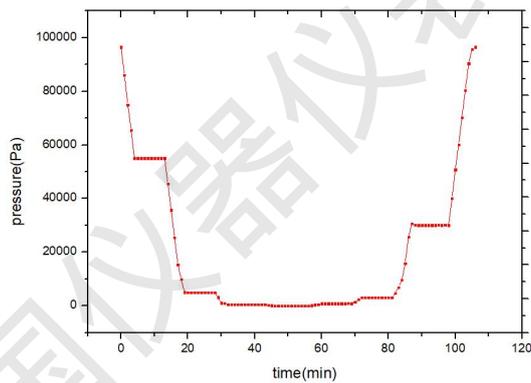
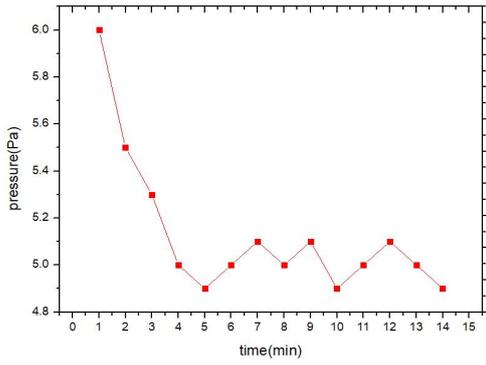
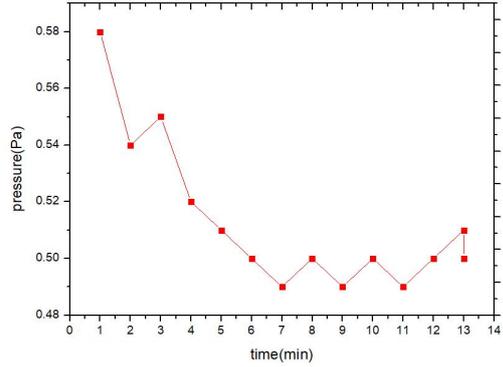


图 8 高压段不同压力段压力稳定曲线

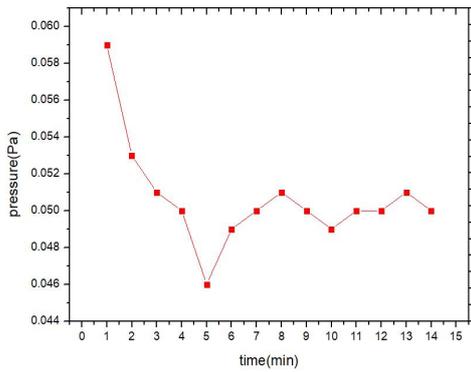
在 10^1Pa 至 10^5Pa 的压力范围内，通过针阀与漏孔调压，漏孔可以满足低压段的压力稳定控制需要。



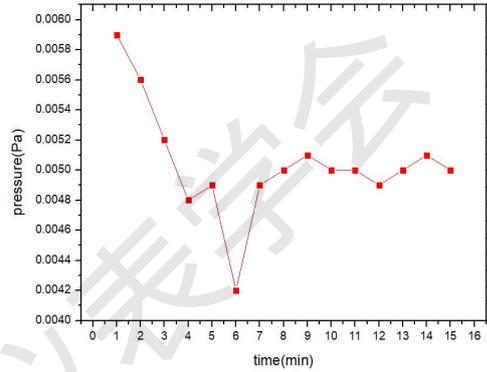
a) 5Pa 针阀调压曲线



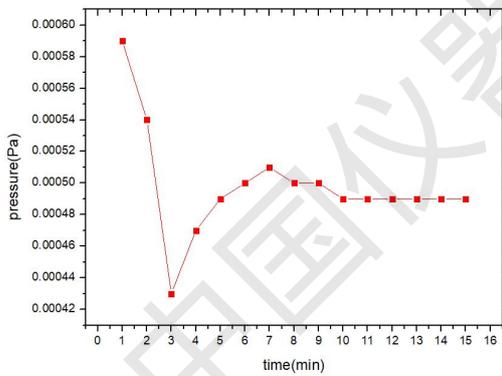
b) 0.5Pa 针阀调压曲线



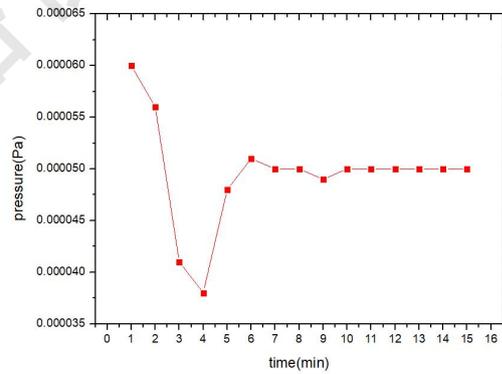
c) 0.05Pa 针阀调压曲线



d) 0.005Pa 漏孔 1 调压曲线



e) 0.0005Pa 漏孔 2 调压曲线



f) 0.00005Pa 漏孔 3 调压曲线

图 9 低压段不同压力段压力稳定曲线

5 结论

本文针对目前国内低气压试验能力不能满足航天器和航空器深空探测的现实需求,基于空间环境模拟试验设备,开展了低气压试验技术研究。通过对低气压试验系统进行理论分析、设计计算,进而对低气压试验压力范围进行分区,从压力变化速率测量控制、压力保持测量控制等方面等方面对空间环境模拟试验设备进行改造优化,实现了压力范围 $1 \times 10^5 \text{Pa} \sim$

$1 \times 10^{-5} \text{Pa}$ 共10个数量级的横跨，全量程控制精度达到 $\pm 5\%$ ，创新性提出了极低气压压力控制方法，避免了极低气压环境下进气调节不稳定造成的压力波动对试验的影响，使低气压压力下限从 10^2Pa 量级扩展至 10^{-5}Pa 量级，提升了7个数量级，首次实现极低气压环境下压力的真实模拟，提高了航天器和航空器低气压环境下的可靠性。

参考文献:

- [1] 史光梅, 王易君. 浅析我国军工产品低气压(高度)试验方法标准[J]. 装备环境工程.2013,10(1): 91-93.
- [2] 袁立峰, 王浚. 低温低气压下温度均匀性分析[J]. 低温工程.2005,146(4): 61-64.
- [3] 李艳娇, 刘志宏. 高低温低气压试验设备的温度漂移问题探讨[J]. 环境技术.2003,(02): 10-12.
- [4] 武越, 许忠旭, 裴一飞. 航天器密封舱压力模拟控制方法研究[J]. 真空科学与技术.2014,34(10): 78-82.
- [5] 袁翔. 西门子 S7 PLC 模拟量输入信号处理简化方法探讨[J]. 工业控制计算机.2007,(03): 76+78.
- [6] 赵世宜, 胡立成, 吴娟, 等. 低气压环境对军用电工电子产品的影响[J]. 装备环境工程. 2009,6(05): 100-102.
- [7] 王莲英, 宋弦, 李云召, 等. 极限高温低气压试验方法分析与运用[J]. 军民两用技术与产品.2022, (04):62-65.
- [8] 陈长辉, 庞成龙, 李金. 压力开关低气压试验方法研究[J]. 装备环境工程.2017,14(01):44-46.
- [9] 王亚军. 一种飞机壳体组件座舱内外压差模拟试验装置及方法: CN106081160B [P]. 2018-08-03.
- [10] 王亚军. 一种火星表面气体成分模拟装置及方法: CN111579261B [P].2021-03-19.