

# 电子仪器泄复压试验与设备研制

许忠旭, 陈金明, 常冬林, 柳晓宁  
(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

**摘要:** 文章提出了载人飞船内电子仪器用泄复压试验设备设计方案, 并完成了真空机组的选型和联调工作。通过多项试验证明, 该设备满足相关设计要求, 可以确保电子设备泄复压试验的顺利开展。

**关键词:** 泄复压; 出舱活动; 真空试验

**中图分类号:** V444.3'3

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1673-1379(2007)04-0223-04

## 1 概述

在载人航天的空间环境试验过程中, 航天员的出舱活动是其中的一项重要的试验项目之一。为了保证完成出舱任务, 载人飞船内的电子仪器需要适应太空出舱期间的泄复压过程。因此, 这些电子仪器以及对压力变化敏感的设备均需通过泄复压试验的考验, 以检验其对泄复压环境的适应性。为此, 需要研制满足出舱要求的泄复压速率的专门泄复压试验设备。

## 2 泄复压的试验要求

### 2.1 泄压要求

(1) 在 101~70 kPa 压力范围, 起始泄压速率不小于 2.0 kPa/s, 至 70 kPa 后保压, 其间压力变化特征值见表 1;

(2) 在 70 kPa~10 Pa 压力范围, 起始泄压速率不小于 2.0 kPa/s, 其间压力变化特征值见表 2;

(3) 在 101 kPa~10 Pa 泄压过程中, 在泄压口外环境压力小于 0.1 倍泄压口内压力;

表 1 101~70 kPa 单机泄压试验压力变化特征值

Table 1 Characteristic values of pressure during the depressurization test from 101 kPa through 70 kPa

时间/s	0	5	10	15
压力特征值/kPa	101.0	88.70	77.90	68.41

表 2 70 kPa 压力以下单机泄压试验压力变化特征值

Table 2 Characteristic values of pressure during the depressurization test below 70 kPa

时间/s	0	31	61	91	121	151	181
压力特征值/kPa	70.00	23.13	7.920	2.710	0.930	0.320	0.110

收稿日期: 2007-02-27; 修回日期: 2007-07-13

作者简介: 许忠旭 (1973-), 男, 工程师, 主要从事航天器真空热试验的研究工作。联系电话: 68746167; E-mail: iverson\_xu0530@sina.com

### 2.2 复压要求

(1) 压力小于 40 kPa 时, 平均复压速率不小于 1.33 kPa/s;

(2) 压力大于 40 kPa 时, 平均复压速率不小于 0.133 kPa/s。

## 3 方案设计及计算

根据上述要求并结合工作实际, 决定基于如图 1 所示的泄复压原理进行泄复压的模拟。利用由罗茨泵和旋片泵组成的真空机组对泄复压容器抽气, 模拟泄压过程。利用复压阀门来实现复压过程, 在复压过程中可以通过控制复压阀门的开度来控制复压的速率。

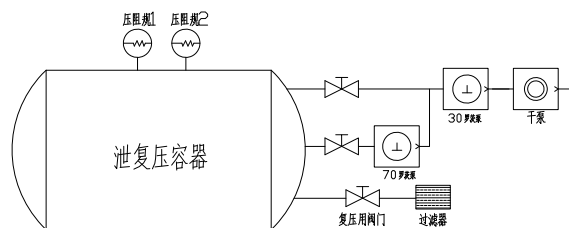


图 1 泄复压设备工作原理图

Fig.1 Operation principle of the depressurization & repressurization facility

### 3.1 容器设计

容器结构形式为圆柱形, 尺寸为  $\Phi 800 \text{ mm} \times 1500 \text{ mm}$ , 卧式, 一端为直径 800 mm 的椭球形大门, 另一端焊接椭球形封头。容器材料选用不锈钢; 容器有效体积约  $0.8 \text{ m}^3$ 。

### 3.2 泄压设计计算

一般认为,从1个大气压到100 Pa的压力范围内,机械泵的抽速近似于恒定<sup>[1]</sup>。真空机组的有效抽速 $S_e$ 及泄复压容器内的压力 $P_x$ 、抽气时间由公式(1)计算。

$$S_e = \frac{V_x}{t} \ln \frac{P_0}{P_x} \quad (1)$$

式中: $t$ 为抽气至某一压力 $P_x$ 时所需时间,s; $V_x$ 为泄复压容器的体积,L; $S_e$ 为真空机组的有效抽速,L/s; $P_0$ 为泄复压容器内的初始压力,kPa; $P_x$ 为泄复压容器内抽至某一时刻的压力,kPa。根据表1、表2中的时间及对应的压力特征值计算真空机组的有效抽速。

(1) 101~70 kPa 泄压阶段真空机组所需要的有效抽速

分别将表1中的时间及对应的特征压力代入公式(1)中,可得真空机组有效抽速值(见表3)。在这个压力段, $S_e=21$  L/s。

表3 在101~70 kPa之间机组所需要的有效抽速  
Table 3 The required effective pumping speed during 101~70 kPa

时间/s	0	5	10	15
压力特征值/kPa	101.0	88.70	77.90	68.41
机组的有效抽速/(L·s <sup>-1</sup> )		20.78	20.78	20.78

(2) 70~0.1 kPa 泄压阶段真空机组所需要的有效抽速

同理,可得对应的真空机组有效抽速值(见表4)。在这个压力段 $S_e=29$  L/s。

表4 70 kPa 压力以下机组所需要的有效抽速  
Table 4 The required effective pumping speed below 70 kPa

时间 /s	0	31	61	91	121	151	181
压力特征值 /kPa	70.00	23.13	7.920	2.710	0.9300	0.3200	0.1100
机组的有效抽速/(L·s <sup>-1</sup> )		28.58	28.58	28.59	28.57	28.55	28.53

(3) 真空机组与泄压口之间的管道流导计算

真空机组与泄压口之间通过管道连接。为了保证管道内在整个抽气过程处于粘滞流状态,要求管道的流导 $C_g$ 大于机组的有效抽速<sup>[2]</sup>。

假设管道直径 $D_g = 80$  mm,管道长度 $L_g = 1000$  mm;则对于20℃的空气,保持管道为粘滞

流态状态的最小管道平均压力 $P$ 为5 Pa,因而该管道的流导 $C_g$ 为274 L/s。 $C_g$ 远大于 $S_e$ ,因此在101~70 kPa及70~0.1 kPa的抽气过程中,管道的流导不会对抽气造成影响,只需合理选择真空机组的抽速。

(4) 真空机组抽速选择

真空机组的名义抽速根据公式(2)计算<sup>[3]</sup>。

$$S_p = \frac{1}{\frac{1}{S_e} - \frac{1}{C_g}} \quad (2)$$

将 $S_e=29$  L/s,  $C_g=274$  L/s 代入,得 $S_p=32.4$  L/s。

根据实际情况,选择70 L/s的罗茨泵、30 L/s的罗茨泵及TriSroll干泵组成的机组作为泄复压容器的抽气机组,在机组与泄复压容器之间安装开度可调的阀门,计算出的抽气曲线如图2所示。

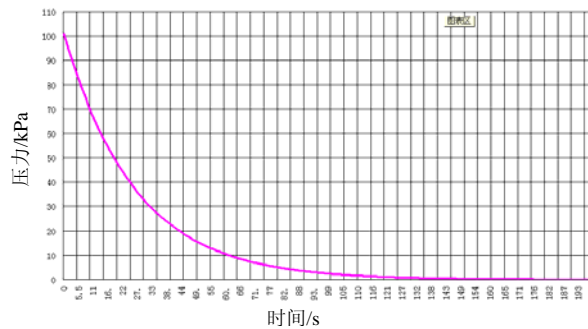


图2 使用罗茨泵及干泵机组所计算出的压力下降曲线  
Fig.2 Calculated depressurization curve in the case of Roots pump units

表5和表6分别为利用抽速为70 L/s的真空机组在101~70 kPa压力范围和在70 kPa以下计算出的压力随时间变化的特征值。

表5 在101~70 kPa 压力范围内压力随时间的变化特征值  
Table 5 Characteristic values of pressure from 101 kPa through 70 kPa

时间/s	0	5	10	13
要求值/kPa	101.0	88.70	77.90	68.41
计算值/kPa	101.0	83.73	69.42	62.03

表6 在70 kPa 压力以下压力随时间的变化特征值  
Table 6 Characteristic values of pressure below 70 kPa

时间/s	0	31	61	91	121	151	181
要求值 /kPa	70.00	23.13	7.920	2.710	0.9300	0.3200	0.1100
计算值 /kPa	70.00	22.12	7.180	2.330	0.7600	0.2500	0.0800

从表 5 和表 6 可见, 利用抽速为 70 L/s 的真空气组, 抽气速率是能够满足要求的。

### 3.3 复压设计计算

通过控制容器上的复压阀门开度来实现对复压速率的控制。当泄压容器内外的压差不断变化时, 复压口的体积流量(常温下)在不同的压差下有不同的近似计算方法<sup>[4]</sup>。

$$\text{令 } x = \frac{P_x}{P_0}, \text{ 当 } 0.525 \leq x \leq 1 \text{ 时,}$$

$$C_x = 766x^{0.712} \cdot \sqrt{1-x^{0.288}} \cdot \frac{A_0}{1-x}; \quad (3)$$

当  $0.1 \leq x \leq 0.525$  时,

$$C_x \approx \frac{200A_0}{1-x}; \quad (4)$$

当  $x < 0.1$  时,  $C_x$  按公式(5)进行计算。

$$C_x = 15.7D^2; \quad (5)$$

式(3)~(5)中:  $C_x$  为泄压口的体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $A_0$  为复压口的面积,  $\text{m}^2$ ;  $D$  为泄压口的直径,  $\text{cm}$ 。

根据式(3)~(5)可求出对应于泄复压容器内外压差的复压口的口径, 如图 3 所示。

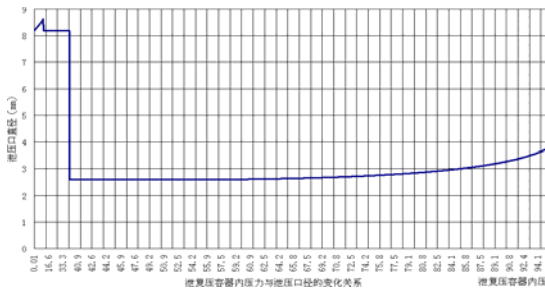


图 3 复压时压力与复压口径的变化关系  
Fig.3 Relation between pressure and repressurization diameter during repressurization

## 4 设备调试

在完成容器检漏后, 将 ZJ-70 罗茨泵、ZJ-30 罗茨泵和 TriSroll 干泵及配套阀门等仪器设备连接到容器上, 并反复进行了泄压调试。采用 ZJ-70 罗茨泵、ZJ-30 罗茨泵和 TriSroll 干泵组成的机组对泄复压容器进行了模拟泄压的抽气调试工作, 泄压指标基本满足要求(见表 7 和表 8), 抽气曲线如图 4 所示。

表 7 101~70 kPa 泄压调试压力变化值  
Table 7 Characteristic values of pressure in the operation test from 101kPa through 70 kPa

时间/s	0	5	10	15
压力特征值/kPa	101.0	88.70	77.90	68.41
实际压力值/kPa	100.8	84.56	68.72	58.85

表 8 70 kPa 以下泄压调试压力变化值  
Table 8 Characteristic values of pressure in the operation test below 70 kPa

时间/s	0	31	61	91	121	151	181
压力特征值/kPa	70.00	23.13	7.920	2.710	0.930	0.320	0.110
实际压力值/kPa	71.65	26.67	11.10	4.690	1.110	0.280	0.170

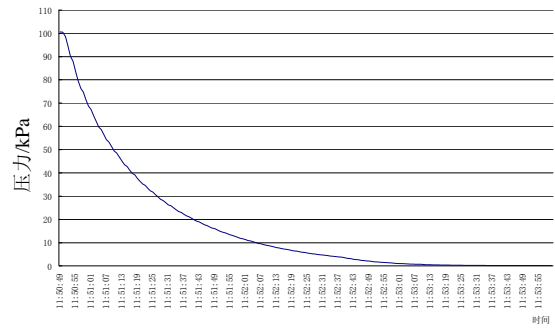


图 4 泄压调试曲线  
Fig. 4 Depressurization curve in the operation test

## 5 电子仪器泄复压试验

系统调试完成后, 在该设备内先后进行了大量的单机泄复压试验。试验的基本操作程序如下:

- 启动机组抽气, 至 70 kPa 后保压;
- 启动机组抽气, 至 0.15 kPa 后保压;
- 将容器复压至 40 kPa 后保压;
- 将容器复压至大气压, 循环结束。

图 5 为热控制器的泄复压试验曲线。泄复压速率满足试验要求。

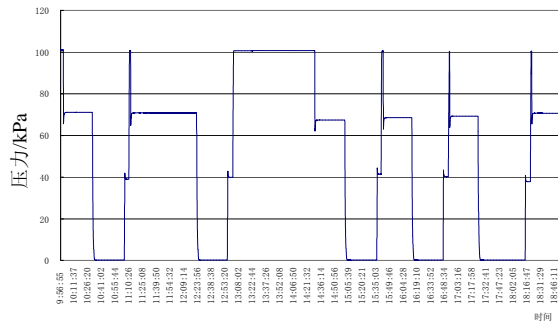


图 5 热控制器泄复压试验曲线  
Fig. 5 Heat controller depressurization & repressurization test curve

## 6 结论

从已经完成的泄复压试验项目来看, 该泄复压设备的真空机组配置及试验中采用的复压过程研究方法是正确的, 并且满足出舱试验所提出的泄复压速率要求, 可用于载人飞船电子仪器泄复压试验研究工作。

### 参考文献 (References)

- [1] 王欲知. 真空技术[M]. 南京: 东南大学, 2000 [Wang Yuzhi. Vacuum technology[M]. Nanjing: Southeast University, 2000]
- [2] 刘玉魁. 真空系统设计原理[M]. 北京: 新时代出版社, 1988: 68-102 [Liu Yukui. The theory of vacuum system design[M]. Beijing: Xinshidai Press, 1988: 68-102]
- [3] 黄本诚, 陈金明. 空间真空环境与真空技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005-01 [Huang Bencheng, Chen Jinming. Space vacuum environment and vacuum technology. Beijing: National Defense Industry Press, 2005-01]
- [4] 杨乃恒. 真空获得设备[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001 [Yang Naiheng. Vacuum obtaining equipment[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2001]