

文章编号:1000-8055(2013)05-1173-07

基于真空羽流试验的洁净真空系统设计

凌桂龙, 蔡国飙, 张建华

(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 研制的洁净真空系统可用于真空羽流试验及热真空试验研究. 详细介绍了真空系统的组成、方案设计及其工作模式; 计算了不同工作模式下的真空抽气时间; 分别对罗茨泵机组、分子泵及低温泵进行了容器极限抽速测试, 测试结果表明, 满足技术指标; 最后对真空容器压力维持能力进行了测试, 测得容器平均压升率为 0.111 Pa/h , 对应的平均漏气率为 $7.24 \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$, 真空容器达到了较高的工艺水平. 真空系统有多种工作模式供选择, 可根据试验需求及故障模式选取, 增加了“真空羽流效应实验系统”运行的实用性和经济性.

关 键 词: 真空系统; 羽流试验; 粗真空系统; 高真空系统; 超高真空系统; 压升率; 漏气率

中图分类号: V21; TB75

文献标志码: A

Oil-free vacuum system design based on vacuum plume experiment

LING Gui-long, CAI Guo-biao, ZHANG Jian-hua

(School of Astronautics,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: An oil-free vacuum system for vacuum plume and thermal vacuum experiments was established. The composition of vacuum system, scheme design and working modes were described in detail. The vacuum pumping time under different working modes was calculated. The vessel ultimate pumping speed tests were conducted on the roots pump, molecular pump and cryopump, respectively. The test results show that the technical indexes of the instruments are attained. Finally, the pressure maintenance ability of the vacuum vessel was measured. The average pressure rise rate of the vessel is 0.111 Pa/h , corresponding to an average leakage rate of $7.24 \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$, which demonstrates that the vacuum vessel has achieved a high process level. According to the experimental requirements and the selection of failure mode, the vacuum system has several working modes to choose, which increases the practicality and economy of the vacuum plume investigation experiment system.

Key words: vacuum system; plume experiment; low vacuum system; high vacuum system; ultra-high vacuum system; pressure rise rate; leakage rate

北京航空航天大学研制的“真空羽流效应实验系统”是多用途试验装置, 主要用于航天姿轨控发动机真空羽流试验研究, 同时兼顾卫星等热真空试验^[1].

该多用途试验装置中的主体试验舱为卧式圆

筒形, 内径为 $\phi 5.2 \text{ m}$, 长为 12.6 m ^[2], 真空系统是其重要分系统, 可为其提供各种真空试验环境. 所设计的清洁真空系统主要包括粗真空系统、高真空系统、超高真空系统、真空测量系统、残余气体分析系统、舱体复压系统及液氮供应系统. 其中,

收稿日期: 2012-05-29

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130508.0949.201305.1173_029.html

作者简介: 凌桂龙(1981—), 男, 黑龙江绥芬河人, 实验师, 硕士, 主要从事液体火箭发动机系统仿真优化及羽流试验研究.

粗真空系统以罗茨泵机组为主,高真空系统以低温泵为主,并配有辅助涡轮分子泵,超高真空系统以液氮热沉、液氮热沉等内置式深冷泵为主。

此外,低温泵还配有预抽系统及再生系统,采用分子泵对低温泵腔体预抽及再生。预抽系统可将低温泵腔体抽至帕级以下,防止低温泵过早饱和;再生系统可抽除低温泵饱和后表面吸附的冷凝气体,使低温泵及时恢复原来的抽气能力。

1 真空系统主要设计指标

所设计的真空系统如图1所示,其主要设计指标如下:

1) 粗真空系统 2 h 内将容器真空抽至 5 Pa;

仅低温泵抽气时,容器极限真空优于 1.3×10^{-4} Pa;低温泵、液氮热沉同时工作时,容器极限真空优于 5×10^{-5} Pa;低温泵、液氮热沉及液氮热沉同时工作时,容器极限真空优于 5×10^{-7} Pa。

2) 发动机真空羽流试验时,以氮气为试验介质,当质量流量为 $2 \sim 10$ g/s、试验气体总温为 $300 \sim 1000$ K时,容器动态真空优于 10^{-2} Pa。

3) 卫星等热真空试验时,当放气量为 50 Pa·L/s时,容器动态真空优于 5×10^{-4} Pa。

4) 洁净复压系统先用氮气将容器复压至 1000 Pa,再用洁净空气 2.5 h 内将容器复压至常压。

5) 真空测量系统的测压范围为 $10^{-8} \sim 10^5$ Pa。

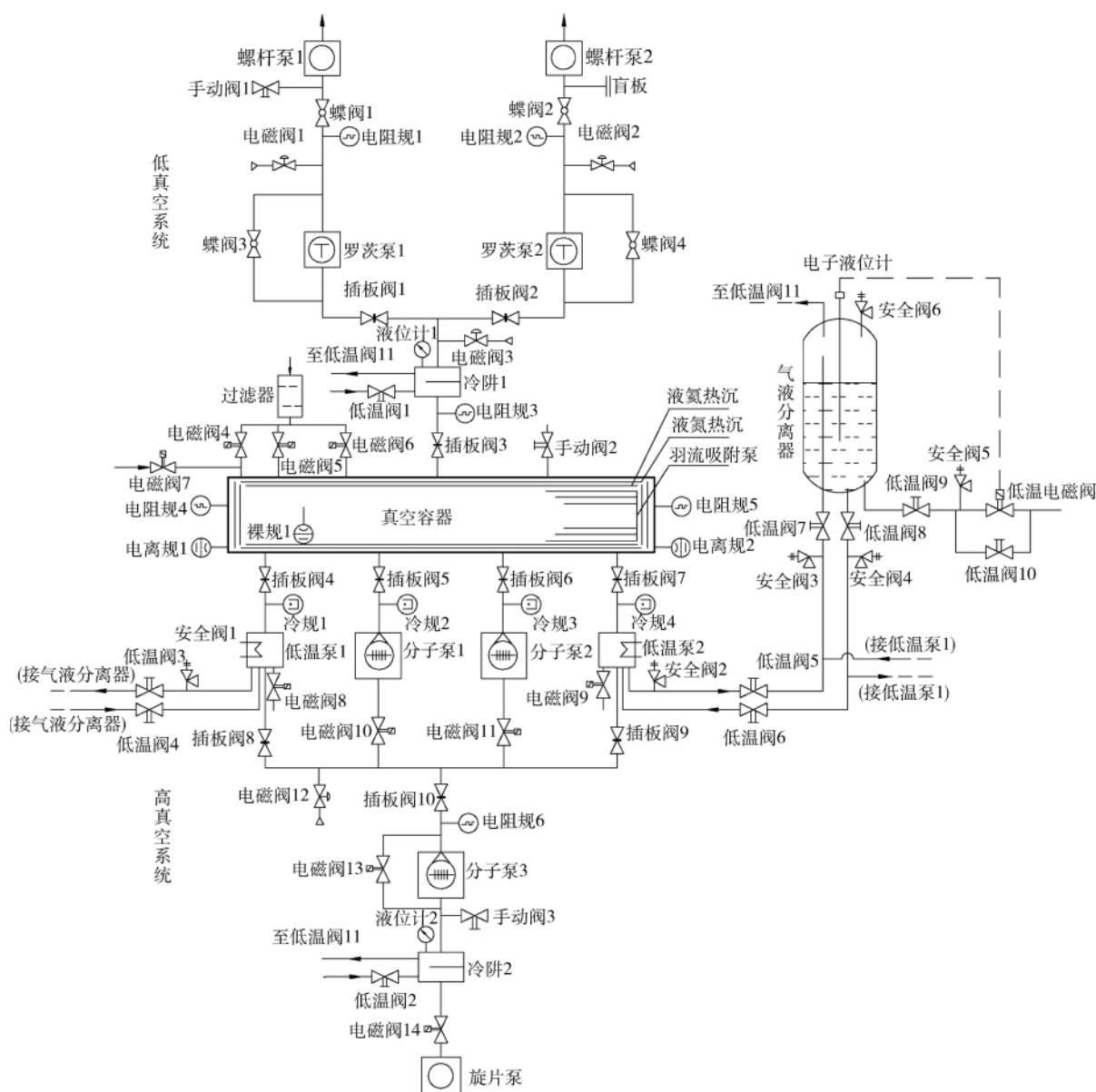


图1 真空系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vacuum system

2 真空系统方案设计

“真空羽流效应实验系统”具有体积大(235 m^3)、环境清洁(无油)、抽速大(最高可达 $1 \times 10^7\text{ L/s}$)、真空度高(静态极限真空为 $5 \times 10^{-7}\text{ Pa}$)等特点。粗真空系统主要由两套罗茨泵机组构成,每套罗茨泵机组均由WSU2001FC变频罗茨泵和SP630螺杆泵组成,同时罗茨泵还配有旁路管道,能够在螺杆泵单独工作时使气体不流经罗茨泵,增加管路流导。高真空系统主要由两台Coolvac 60000 BL-V LN2低温泵、两台TW1600分子泵、一台SL300分子泵、一台SV40BI旋片泵组成,主要靠低温泵获取高真空;TW1600分子泵用于辅助抽气,仅在系统有特殊需求时使用,主要用于抽除氢、氦等惰性气体;SL300分子泵既可以作为TW1600分子泵前级使用,又可以用于低温泵的预抽及再生;SV40BI旋片泵既可以作为SL300分子泵的前级,又可以用于低温泵的预抽及再生。SL300分子泵配有旁路管道,能够在

SV40BI旋片泵单独工作时使气体不流经SL300分子泵,增加管路流导。

防污染设计:由两套液氮冷阱系统组成,一套安装在粗真空系统主抽气管路上,一套安装在高真空系统SV40BI旋片泵进气管路上,用于吸附机械泵工作时产生的油蒸气,防止系统返油至真空容器,保证容器内环境清洁。

复压系统设计:真空容器上开有CF40法兰孔,通过管道连接有高效C级空气过滤器,先后启动电磁阀7充氮气复压至 1000 Pa ,后启动电磁阀4,5,6充空气复压至常压(见图1)。

真空测量系统设计:真空系统配有TTR91热电阻真空计、ITR90热阴极电离规、PTR90冷阴极电离规,以实现 $10^{-8} \sim 10^5\text{ Pa}$ 的全量程测量。

低温泵及冷阱液氮供应系统设计:如图2所示,主要用于向低温泵冷屏及液氮冷阱输送液氮,其中低温泵液氮入口处配有气液分离器,并通过低温电磁阀、电子液位计组成闭合回路,保证液氮的自动调节及供应。

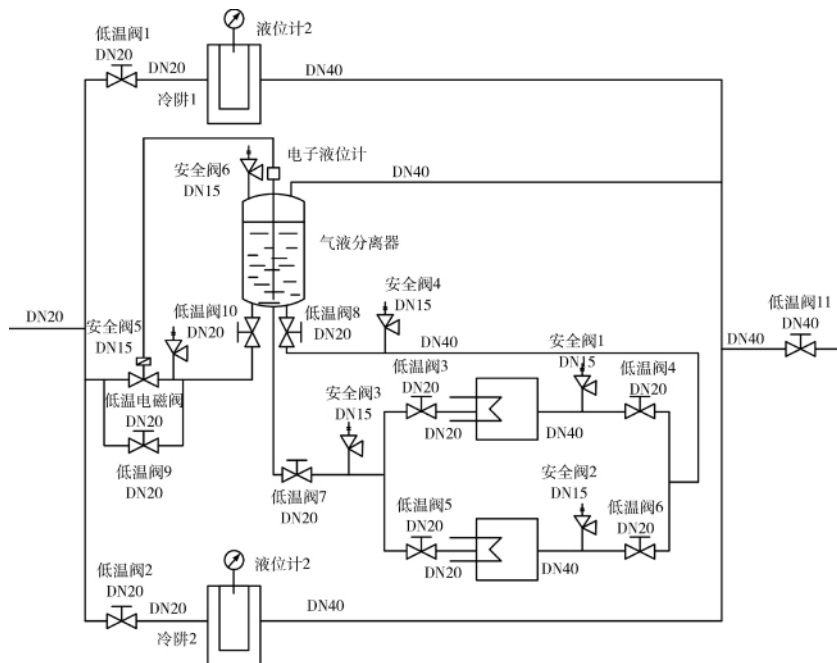


图2 低温泵及冷阱液氮供应系统

Fig. 2 Cryopump and liquid nitrogen trap supply system

3 真空系统工作模式分析及计算^[3-9]

真空系统主要设备如表1所示,系统工作时有多种工作模式可供选择。

粗真空系统工作模式:模式一为正常模式,即两套罗茨泵机组同时工作,工作时先后启动两台

SP630螺杆泵将容器压力从大气压抽至 $2.2 \times 10^3\text{ Pa}$,然后启动两台WSU2001FC变频罗茨泵将容器压力抽至 5 Pa ;模式二为故障模式,即仅一套罗茨泵机组工作,工作时先启动一台SP630螺杆泵将容器压力从大气压抽至 $2.2 \times 10^3\text{ Pa}$,然后启动一台WSU2001FC变频罗茨泵将容器压力

表 1 真空系统主要设备
Table 1 Main equipments for vacuum system

系统名称	型号	用途	数量/ 台	工作范围/ Pa	单泵名义抽速/ (L/s)	极限工作压力/ Pa
粗真空 系统	WSU2001 FC 变频罗茨泵	主泵	2	2 200~1	570(1 140)	$\leq 10^{-1}$
	SP630 螺杆泵	辅泵及主泵前级	2	$10^5 \sim 1$	175	≤ 1
	TW1600 分子泵	辅泵	2	$1 \sim 4 \times 10^{-2}$	1 420	$\leq 10^{-8}$
高真空 系统	SL300 分子泵	前级	1	$1 \sim 4 \times 10^{-2}$	270	$\leq 10^{-8}$
	SV40BI 旋片泵	前级	1	$10^5 \sim 5$	12	≤ 5
	Coolvac 60000 低温泵	主泵	2	$1 \sim 1.3 \times 10^{-4}$	60 000	$\leq 10^{-6}$
超高真空 系统	液氮热沉			面积 166 m ² , 通液氮制冷		
	液氮热沉			面积 155 m ² , 通液氮或液氮制冷		
	羽流吸附泵			面积 65 m ² , 通液氮或液氮制冷		

抽至 5 Pa. 两种模式下的 WSU2001 FC 变频罗茨泵均可通过变频将名义抽速增加 100%, 通过测控系统控制, 用于提高系统抽速, 缩短抽气时间.

高真空系统工作模式: 模式一为正常模式, 即两台低温泵同时工作, 将容器压力从 5 Pa 抽至 1.3×10^{-4} Pa; 模式二为故障模式, 即仅一台低温泵工作, 将容器压力从 5 Pa 抽至 1.3×10^{-4} Pa. 此外高真空系统还选用两台 TW1600 分子泵作为低温泵的辅助泵, 两种模式启动前可利用 TW1600 分子泵辅助抽气, 辅助抽除氢、氦等惰性气体. 试验时, 为防止低温泵过早饱和, 可先启动 TW1600 分子泵将容器从 5 Pa 抽至 5×10^{-3} Pa, 然后启动低温泵抽气.

超高真空系统工作模式: 主要靠热沉抽气, 模式一用于发动机真空羽流试验, 液氮热沉和羽流吸附泵通液氮制冷使表面平均温度低于 10 K, 液氮热沉通液氮制冷使表面平均温度低于 100 K; 模式二用于卫星等热真空试验, 液氮热沉及羽流吸附泵通液氮制冷使表面平均温度低于 100 K, 液氮热沉作为防辐射屏不工作.

3.1 粗真空系统抽气计算

粗真空情况下的抽气主要用于抽除被抽容器内的自由气体, 表面出气可以忽略不计, 在系统没有漏气的情况下, 考虑管道流导 U 的泵有效抽速计算公式为

$$S = \frac{S_p U}{S_p + U} \quad (1)$$

式中 S 为真空泵有效抽速, L/s; S_p 为真空泵名义抽速, L/s; U 为管道流导, L/s.

粗真空系统管道设计长度 $L = 6.5$ m, 管道直

径 $d = 0.32$ m, $L/d = 20.31$, 按圆截面长管计算流导, 计算时必须考虑气体在管路中的流动状态.

$\bar{p}d > 0.67$ Pa·m 时为黏滞流, 对于 20℃ 空气, 圆截面管道流导为

$$U = 1.34 \times 10^6 \frac{d^4 \bar{p}}{L} \quad (2)$$

式中 U 为长管道的流导, L/s; d 为管道直径, m; L 为管道长度, m; $\bar{p}$ 为管道中平均压力, $\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2}$, p_1, p_2 分别为管道两端的气体压力, Pa.

0.02 Pa·m $< \bar{p}d < 0.67$ Pa·m 时为黏滞-分子流, 对于 20℃ 空气, 圆截面管道流导为

$$U = 1.341 \times 10^6 \frac{d^4 \bar{p}}{L} + 1.21 \times 10^5 \frac{d^3}{L} \frac{1 + 189d\bar{p}}{1 + 234d\bar{p}} \quad (3)$$

$\bar{p}d < 0.02$ Pa·m 时为分子流, 对于 20℃ 空气, 圆截面管道流导为

$$U = 1.21 \times 10^5 \times \frac{d^3}{L} \quad (4)$$

流导 U 是压力的函数, 因而泵的有效抽速 S 也是压力的函数, 且随容器内压力下降而变小, 在实际计算中, 可将容器内的压力下降曲线分成 n 段, 分别计算每一小段内泵的平均有效抽速, n 值越大计算越精确, 从而得到容器达到某一压力时的抽气时间

$$t = 2.3V \sum_{i=0}^n \left(\frac{1}{S_i} \lg \frac{p_i - p_0}{p_{i+1} - p_0} \right) \quad (5)$$

式中 t 为抽气时间, s; V 为容器容积, L; S_i 为泵对容器的有效抽速, L/s; n 为分段数; p_i 为设备 i 段开始压力, Pa; p_{i+1} 为设备 i 段结束压力, Pa; p_0 为容器的极限压力, Pa.

经计算,对于模式一,两套罗茨泵机组同时工作,罗茨泵正常工作 105 min 将容器真空抽到 5 Pa,变频后 90 min 将容器真空抽到 5 Pa,可比正常工作时间缩短 15 min;对于模式二,仅一套罗茨泵机组工作,罗茨泵正常工作 150 min 将容器真空抽到 5 Pa,变频后 122 min 将容器真空抽到 5 Pa,可比正常工作时间缩短 28 min.

实际上,WSU2001 FC 变频罗茨泵受自身散热影响不能长时间连续变频,抽气过程中需要不断调节变频速率,实际抽气时间介于两者之间.

3.2 高真空系统抽气计算

高真空系统抽气时,抽气时间主要与容器内表面的材料出气量有关,按热沉不工作计算.

首先,计算容器平衡压力为 p 时的出气量 Q ,其值等于泵(机组)在压力 p 时的排气量,即 $Q = p \times S$. 需要达到的压力为 1.3×10^{-4} Pa,对于模式一,抽速为 120 000 L/s,对应的 $Q = P \times S = 15.6 \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$;对于模式二,抽速为 60 000 L/s, $Q = P \times S = 7.8 \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$.

其次,计算材料的表面积.真空容器内表面积(304 不锈钢)为 $2\,500\,000 \text{ cm}^2$,热沉表面积(304L 不锈钢管、T2 紫铜翅片)为 $8\,000\,000 \text{ cm}^2$,总面积 $A = 10\,500\,000 \text{ cm}^2$.

再次,计算紫铜和不锈钢两者平均出气率.

对于模式一

$$q = \frac{Q}{A} = 1.49 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{L}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$$

对于模式二

$$q = \frac{Q}{A} = 7.43 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{L}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$$

最后,根据材料的平均出气率曲线,得出模式一对应的高真空抽气时间约为 54 min;模式二对应的高真空抽气时间约为 110 min.

3.3 超高真空系统抽气计算

超高真空系统抽气计算方法同高真空系统,为将容器抽至 5×10^{-7} Pa,得出模式一对应的超高真空抽气时间约为 600 min(含热沉预冷时间),模式二对应的超高真空抽气时间约为 700 min(含热沉预冷时间).

4 热沉安装前的容器极限真空测试

热沉装进容器之前,分别对罗茨泵机组、分子泵及低温泵进行了容器极限真空度测试.

4.1 罗茨泵机组抽气能力测试

两台罗茨泵机组同时工作的容器真空曲线如

图 3 所示, $t+0$ 时刻启动两台 SP630 干泵对容器抽气, $t+70 \text{ min}$ 容器真空达到 $2.5 \times 10^4 \text{ Pa}$ 时,启动两台 WSU2001 罗茨泵继续对容器抽气,测得容器极限真空为 $2.5 \times 10^{-1} \text{ Pa}$,整个过程共耗时 150 min. 实际使用过程中,当容器压力达到 5 Pa 以下即可关闭罗茨泵机组,将抽气模式转换至高真空系统,此时对应的抽气时间为 94 min.

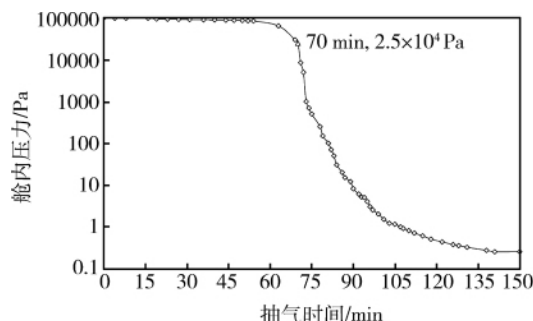


图 3 容器真空度随抽气时间变化关系(罗茨泵)

Fig. 3 Relationship between vessel vacuum and pumping time (Roots pump)

4.2 分子泵抽气能力测试

在粗抽的基础上进行 TW1600 分子泵的容器真空抽气测试,如图 4 所示, $t+0$ 时刻启动 SP630 干泵对容器抽气, $t+70 \text{ min}$ 当容器真空达到 $2.5 \times 10^4 \text{ Pa}$ 时,启动两台 WSU2001 罗茨泵继续对容器抽气, $t+99 \text{ min}$ 测得容器真空为 3.3 Pa,粗抽系统关闭的同时启动两台 TW1600 分子泵继续对容器抽气, $t+102 \text{ min}$ 容器真空为 $4.7 \times 10^{-1} \text{ Pa}$, $t+108 \text{ min}$ 容器真空为 $5 \times 10^{-2} \text{ Pa}$, $t+115 \text{ min}$ 容器真空为 $5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$,此后容器真空度变化缓慢, $t+284 \text{ min}$ 容器真空为 $2.3 \times 10^{-3} \text{ Pa}$,达到容器极限真空,无法继续下降.实际使用过程中,当容器压力小于 $1 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 即可关闭分子泵,启动低温泵继续容器真空抽气,此时对应的抽气时间为 112 min.

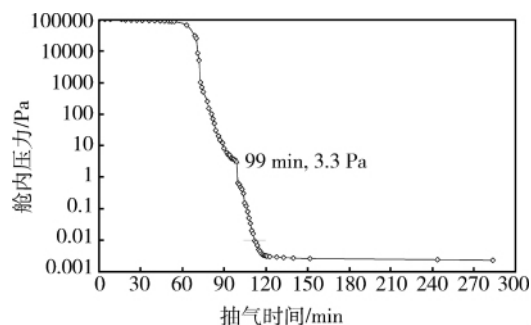


图 4 容器真空度随抽气时间变化关系(TW1600 分子泵)

Fig. 4 Relationship between vessel vacuum and pumping time (TW1600 molecular pump)

4.3 低温泵抽气能力测试^[10-11]

低温泵对容器抽气前必须先对其降温预冷,低温泵腔体降温曲线如图5所示,冷屏采用液氮降温, $t+50\text{ min}$ 冷屏温度降至最低 80.8 K 并维持,然后启动氮压缩机对一级、二级冷头降温, $t+84\text{ min}$ 一级冷头降至最低 26.8 K 并维持, $t+399\text{ min}$ 二级冷头降至最低 11.5 K 并维持,此时低温泵腔体内真空进入 $9\times 10^{-6}\text{ Pa}$,低温泵降温完成并维持,随时可对容器真空抽气。

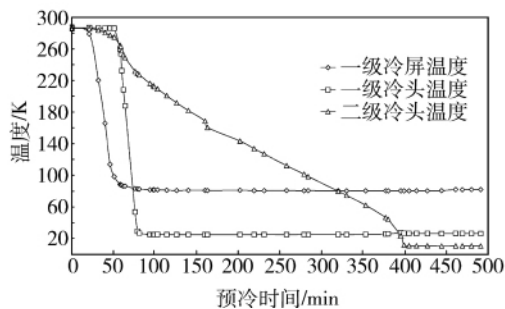


图5 低温泵腔体降温曲线

Fig. 5 Cooling curves of cryopump cavity

如图6所示,测试时,先用两套罗茨泵机组对容器进行粗抽, $t+99\text{ min}$ 达到 3.3 Pa 后,关闭粗抽系统,启动两台TW1600分子泵, $t+150\text{ min}$ 达到 $3.9\times 10^{-3}\text{ Pa}$ 后,关闭分子泵,启动两台低温泵继续对容器真空抽气(预冷完成后方可启动),

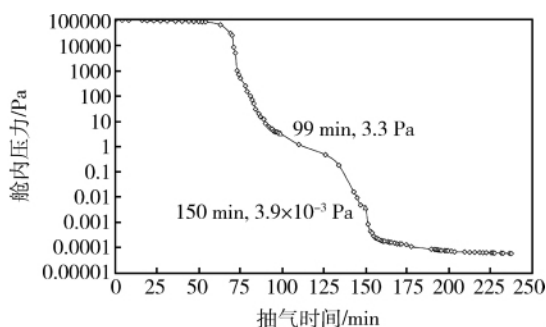


图6 容器真空度随抽气时间变化关系(低温泵)

Fig. 6 Relationship between vessel vacuum and pumping time (cryopump)

$t+237\text{ min}$ 后容器极限真空度达到 $5.8\times 10^{-5}\text{ Pa}$ 。

4.4 压升率与漏气率测试^[12-15]

压升率是反映真空设备保持真空的能力,其测量方法为:在真空容器接近极限真空的状态下,停掉所有抽真空设备,在干净、冷态、空载的状态下分别在 t_1 和 t_2 两个时间点测得真空度为 p_1 和 p_2 的两个值,最终求得的单位时间内容器压力变化值即为压升率,其计算公式为

$$R = \frac{p_2 - p_1}{t_2 - t_1} \quad (6)$$

式中压升率 R 的单位为 Pa/h , t_1 和 t_2 的单位为 h , p_1 和 p_2 的单位为 Pa 。

容器的漏气率直接影响工作压力的变化,从而影响试验过程及产品质量。在真空容器漏气率较大的状况下,虽然依靠强有力的真空抽气系统也能在容器内维持较低的工作压力,但由于空气的污染,将损坏有特殊要求的试验设备。所以在制造真空设备时,应尽可能降低真空容器的漏气率,这对改善试验环境、提高产品质量至关重要。

容器内压力的升高往来源于两方面,一是来自容器外部的漏气,主要通过器壁、焊缝、密封圈等渗漏;二是来自容器内表面的材料放气。因此很难精确测量出容器真实的漏气率,但内表面的材料放气率可以经过烘烤和除气等特殊工艺处理大大降低,且真空状态下随着时间的增加逐渐变小,实际测量时可以通过延长测试时间来降低放气量对漏气率的影响,测试时间越长越接近真实的漏气率。漏气率考虑了真空容器的体积,估算公式如下:

$$F = \frac{VR}{3600} \quad (7)$$

式中漏气率 F 的单位为 $\text{Pa} \cdot \text{L/s}$;体积 V 的单位为 L 。

2011年11月9日至21日利用罗茨泵机组对真空容器进行了3次压升率及漏气率测试,测试数据及计算结果如表2所示,结果显示,真空容器的平均压升率为 0.111 Pa/h ,远小于我国真空

表2 测试数据及计算结果

Table 2 Test data and calculational results

测试次数	t_1	p_1 / Pa	t_2	p_2 / Pa	压升率/ (Pa/h)	漏气率/ ($\text{Pa} \cdot \text{L/s}$)
第1次	2011年11月9日 18:27	2.2	2011年11月10日 10:12	4.5	0.146	9.5
第2次	2011年11月16日 09:00	0.69	2011年11月19日 09:00	9.2	0.118	7.7
第3次	2011年12月20日 21:36	2.1	2011年12月21日 11:58	3.1	0.069	4.5

炉标准 $0.67 \text{ Pa/h}^{[16]}$, 说明来自容器外部的漏气量及容器内表面材料的放气量均非常低, 真空容器的工艺性能很好, 对应的平均漏气率为 $7.24 \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$, 且漏气率随着测试次数的增加逐渐减小, 越来越接近真实的漏气率(真空状态下的材料放气量逐渐减小所致)。

5 结 论

本文设计的洁净真空系统满足发动机真空羽流试验及卫星等热真空试验需求, 实测结果显示, 罗茨泵机组 120 min 内可将容器真空由常压抽至 $5 \times 10^{-1} \text{ Pa}$, 分子泵 30 min 内可将容器真空由 $5 \times 10^{-1} \text{ Pa}$ 抽至 $5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$, 低温泵 60 min 内可将容器真空由 $5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 抽至 $5 \times 10^{-5} \text{ Pa}$, 均优于设计指标; 同时测得的容器平均压升率仅为 0.111 Pa/h , 对应的平均漏气率为 $7.24 \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$, 真空容器达到了较高的工艺水平。

真空系统有多种工作模式供选择, 操作人员可根据试验需求通过测控系统进行选取, 增加了北京航空航天大学“真空羽流效应实验系统”运行的实用性和经济性。

参考文献:

- [1] 凌桂龙, 王文龙, 蔡国飙, 等. 用于发动机羽流试验研究的液氦热沉设计[J]. 航空动力学报, 2011, 26(11): 2630-2635.
LING Guilong, WANG Wenlong, CAI Guobiao, et al. Liquid helium heat sink design for the engine vacuum plume effects experimental study[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(11): 2630-2635. (in Chinese)
- [2] 王文龙, 周建平, 蔡国飙. 羽流效应地面模拟试验系统关键技术发展[J]. 航空动力学报, 2012, 27(4): 900-906.
WANG Wenlong, ZHOU Jianping, CAI Guobiao. Development of vacuum plume effects ground simulation experimental system key technology[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(4): 900-906. (in Chinese)
- [3] 达道安. 真空设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [4] 黄本诚, 童靖宇. 空间环境工程学[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2010.
- [5] 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.
- [6] 黄本诚. 空间模拟器设计[M]. 北京: 宇航出版社, 1994.
- [7] 黄本诚, 马有礼. 航天器空间环境试验技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [8] 成致祥. KM4 空间模拟器的清洁真空改造[J]. 中国空间科学技术, 1993(2): 45-52.
- CHENG Zhixiang. Oil-free transforming of KM4 space environmental simulator[J]. Chinese Space Science and Technology, 1993(2): 45-52. (in Chinese)
- [9] 黄本诚, 刘国青, 成致祥, 等. 特大型空间环境试验设备的超高真空获得技术[J]. 真空科学与技术, 2001, 21(1): 1-4.
HUANG Bencheng, LIU Guoqing, CHENG Zhixiang, et al. Vacuum technology of extra large and ultra-high vacuum space environment simulator[J]. Vacuum Science and Technology, 2001, 21(1): 1-4. (in Chinese)
- [10] 茹晓勤, 祁妍, 吴树迎. 用制冷机低温泵获得清洁无油高真空[J]. 航天器环境工程, 2006, 23(2): 119-121.
RU Xiaojin, QI Yan, WU Shuying. Production of dry-clean high-vacuum with refrigerator's cryopumps[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2006, 23(2): 119-121. (in Chinese)
- [11] 郭欣, 邵容平, 阎荣鑫. 环境模拟器低温泵测试系统设计[J]. 真空, 2011, 48(2): 79-82.
GUO Xin, SHAO Rongping, YAN Rongxin. Design of performance testing system of cryopumps for environment simulator[J]. Vacuum, 2011, 48(2): 79-82. (in Chinese)
- [12] 张璠. 真空容器的漏气率与升压率[J]. 真空, 1993(2): 1-5.
ZHANG Pan. Leak throughput and rate of pressure rise of vacuum chamber[J]. Vacuum, 1993(2): 1-5. (in Chinese)
- [13] 李殿东. 高真空阀门漏率和升压率的区分[J]. 真空, 2003(4): 37-39.
LI Diandong. Difference between leak rate and rate of pressure rise of high vacuum valve[J]. Vacuum, 2003(4): 37-39. (in Chinese)
- [14] 陈涛, 李玉忠, 许忠旭, 等. 真空热试验中材料放气的放气量及其导热问题[J]. 航天器环境工程, 2006, 23(2): 103-106.
CHEN Tao, LI Yuzhong, XU Zhongxu, et al. Material outgassing amount and thermal conduction in vacuum thermal test[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2006, 23(2): 103-106. (in Chinese)
- [15] 田玉林, 黄文学, 王玥, 等. RFQ1L 系统压升率的理论与实验研究[J]. 原子核物理评论, 2008, 25(1): 44-47.
TIAN Yulin, HUANG Wenxue, WANG Yue, et al. Theoretical and experimental study on the pressure rise rate of RFQ1L system[J]. Nuclear Physics Review, 2008, 25(1): 44-47. (in Chinese)
- [16] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 22561-2008 真空热处理[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 22561-2008 vacuum heat treatment[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.