

环境试验与评价

大型空间环境模拟器真空系统配置技术研究

张磊, 王军伟, 付春雨

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 分别对国内外大型空间环境模拟器的真空系统配置进行了介绍, 并对真空系统各个子系统的配置与技术特点进行了分析, 重点针对大型空间环境模拟器真空系统中所需的真空抽气策略进行了研究, 为后续超大型环境试验设备的研制和试验测试提供了参考。

关键词: 空间环境模拟; 真空系统; 抽气技术; 无油真空

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.06.001

中图分类号: TJ07; 174 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2018)06-0001-06

Configuration Strategy of Vacuum System in Large-scale Space Environment Simulator

ZHANG Lei, WANG Jun-wei, FU Chun-yu

(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

ABSTRACT: The configuration of vacuum system of large space environment simulator in China and foreign countries are introduced and each subsystem of vacuum system and technical features are analyzed. The main research is focused on the vacuum pumping strategy and research methods of large space simulator, which provides references for future ground test and facility development.

KEY WORDS: space environment simulation; vacuum system; pumping technology; oil free vacuum

航天器地面热真空环境试验^[1]是在空间环境模拟设备内实现的, 空间环境模拟设备要完成真空、冷黑环境和空间外热流等参数的模拟, 验证航天器热设计的正确性, 及各个飞行阶段热控系统适应各种热环境的能力, 并确定热控系统的最佳参数。其中大型空间环境模拟设备主要用于整星级或飞船级等各型号的热平衡、热真空试验, 以检验飞行器的结构设计、温控设计及整星(船)功能等是否满足设计要求。

目前世界上已有几十台大型空间环境模拟试验设备, 其中以美国数量最多, 分布在美国航空航天局(NASA)附属飞行中心及有关科研单位和私人公司。俄罗斯、欧洲空间局、日本也有规模及用途不同的大型空间模拟试验设备, 以满足大型应用卫星与航天器对空间环境试验的需要。大型空间环境模拟设备

真空系统是重要的功能系统, 其主要功能是通过各类真空工艺设备的有效配置完成环境模拟容器内真空环境的获得与维持, 完成测试对象在模拟空间真空环境下的适应性与可靠性试验验证。对于大型空间环境模拟器, 合理的真空系统配置是一项重要的研究课题。

1 国外大型空间环境模拟设备系统配置

1.1 NASA GRC SPF^[2-3]

SPF 空间环境试验设备是目前世界上最大的空间环境模拟器, 该设备容器有效尺寸: 直径为 30.5 m,

高为 37.2 m，体积约为 22 653 m³，内部安装有活动热沉，最终真空度可达到 1×10⁻⁴ Pa。

该设备真空系统配置中，粗抽系统配置为两套五级罗茨滑阀泵机组，最终可将容器抽至 5 Pa 以下，粗抽机组原理如图 1 所示。高真空系统原配置是 32

套口径约为 DN 1250 mm 的油扩散真空泵，每套抽速约为 43 000 L/s，后续根据需要改造后配置为 5 套抽速 2 400 L/s 的分子泵和 10 套 DN1320 口径低温泵，在 10⁻⁴ Pa 量级可以达到 500 000 L/s 的抽气能力，最终可在 8 h 内将容器抽至 3×10⁻⁴ Pa 以下。

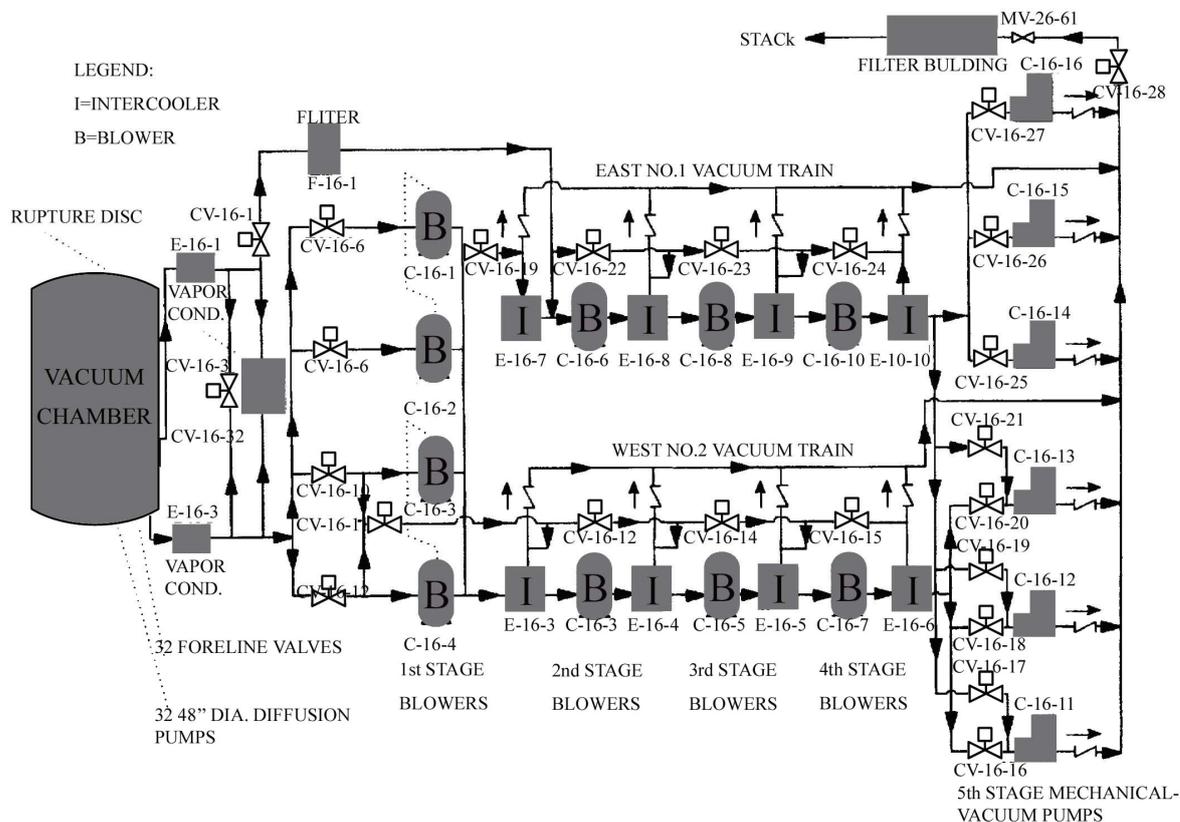


图 1 SPF 真空系统原理

1.2 NASA JSC Chamber A^[4]

该设备真空容器有效尺寸为：直径 19.8 m，高 36.6 m，有效容积约 9 000 m³。内部安装有热沉，内部热沉直径为 16.8 m，高为 27.4 m，热沉温度可达 90 K，为世界第二大空间环境模拟器。

Chamber A 高真空系统原配置为 18 套 DN 900 mm 扩散泵，为了适应韦伯太空望远镜的试验需求，对真空系统进行了适应性改造。改造后的真空系统配置为 12 套 DN 1250 mm 低温泵，通过插板阀与容器连接，并配备 6 套 DN 320 mm 分子泵。分子泵和低温泵前级采用原扩散泵前级泵进行抽气，但在前级泵前加装液氮挡板以防止返油。

改造后的分子泵可以在更高的压力下启动，缩短了极限真空的抽气时间，也便于真空容器的检漏。改造后的真空系统可实现 1.5×10⁻² Pa 的常温极限真空度。在热沉通液氮的状态下，极限真空度优于 2.5×10⁻⁵ Pa；启动液氮热沉后，最终极限真空度优于 3.0×10⁻⁶ Pa。

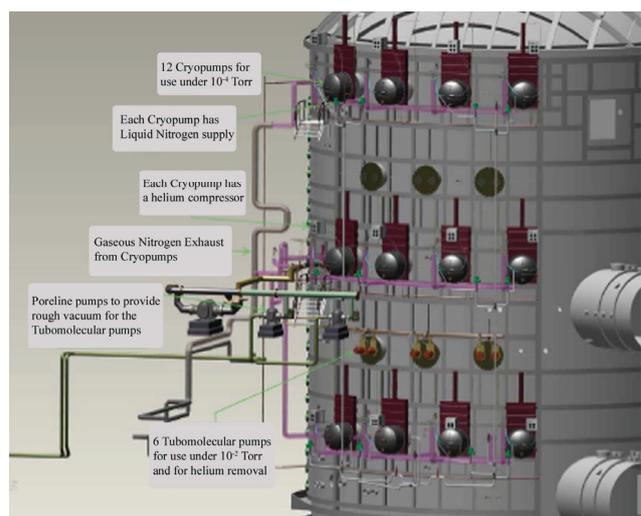


图 2 Chamber 高真空系统布局

1.3 ESA ESTEC LSS

LSS 空间环境模拟器是欧洲最大的单体真空试验设备，真空容器形式为卧式 T 形结构。LSS 真空容

器有效尺寸: 直径为 10 m、高为 15 m, 容积为 2 300 m³。容器内部装有液氮和气氮调温热沉, 温度范围为 100~353 K。

该设备真空系统采用全无油系统配置, 粗抽机组包括 3 套罗茨机组, 每套抽速约 20 000 m³/h, 高真空系统配备 4 套抽速为 8 000 m³/h 的涡轮分子泵和 2 套抽速为 48 m³/s 的自屏蔽低温泵。真空系统可在 2.5 h 内将容器抽至 100 Pa 以下, 6 h 内抽至 5 Pa 以下, 12 h 内抽至优于 7×10⁻³ Pa, 18 h 内抽至 10⁻⁴ Pa 以下, 最终极限优于 7×10⁻⁵ Pa。真空系统抽空曲线如图 3 所示。

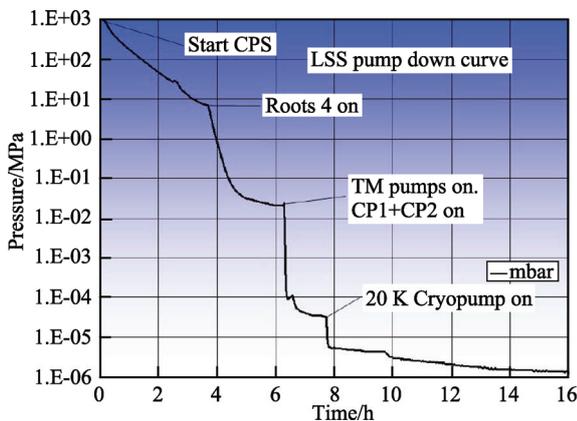


图 3 LSS 空间环境模拟器典型抽空曲线

2 我国大型空间环境模拟设备

2.1 KM6 空间环境模拟器^[5]

KM6 空间环境模拟设备是中国为载人航天建造的基础设施, 由主模拟室、辅助模拟室、副模拟室三舱组合, 丁字形结构, 如图 4 所示。容器总容积约 3 200 m³, 真空系统最终极限真空度达到 4.5×10⁻⁶ Pa。

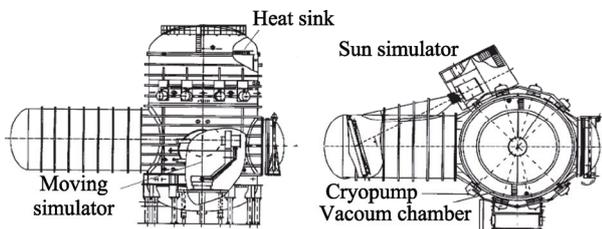


图 4 KM6 空间环境模拟设备

真空系统配置中, 粗抽真空系统由 4 套抽速为 5 000 L/s 的四级罗茨滑阀机械机组及配套的液氮冷阱等设备组成, 可在 3.5 h 内将容器抽至 1 Pa 以下。高真空系统采用 8 套自研氮制冷机低温泵组成, 每套抽速可达 50 000 L/s, 可在启动高真空抽气后 3.5 h 内将容器真空度降至 3×10⁻⁵ Pa 以下, 另外真空系统还配备 3 套抽速为 2 200 L/s 的涡轮分子泵用于完成过渡抽气与系统检漏。为了加大抽速和提高极限真空

度, 该设备安装了内装式低温泵, 在液氮屏蔽下通入氦气进行抽气, 其总抽速可达 2×10⁶ L/s。

2.2 KM8 空间环境模拟器

KM8 空间环境模拟器是我国容积最大、自动化程度最高的空间环境模拟器, 为世界第三大空间环境模拟器, 于 2016 年建成并投入使用。

KM8 空间环境试验系统容器为立式结构, 直径为 17 m, 高约 32 m, 总容积约 6 000 m³。其中底部封头安装在地下, 地面部分高度约为 26 m。主要包括真空容器、真空系统、热沉、氮系统、测控系统、试验工装系统 6 个分系统, 如图 5 所示。

真空系统配置中: 粗抽系统由 8 套干泵+罗茨泵+罗茨泵三级粗抽机组、DN1000 mm 气动插板阀及液氮冷阱组成, 8 套粗抽机组总峰值抽速约 12 600 L/s, 可在 4 h 内将容器从常压抽至 5 Pa 以内。配置 8 套抽速约为 3 200 L/s 的分子泵系统在粗抽结束后, 容器内真空度达到 5 Pa 以下时对容器进行过渡抽气, 以达到低温泵的开启压力。高真空系统设计使用 10 台 DN1250 低温泵进行抽气, 使真空容器能在热沉低于 100 K 情况下空载极限压力达到低于 1.0×10⁻⁵ Pa。

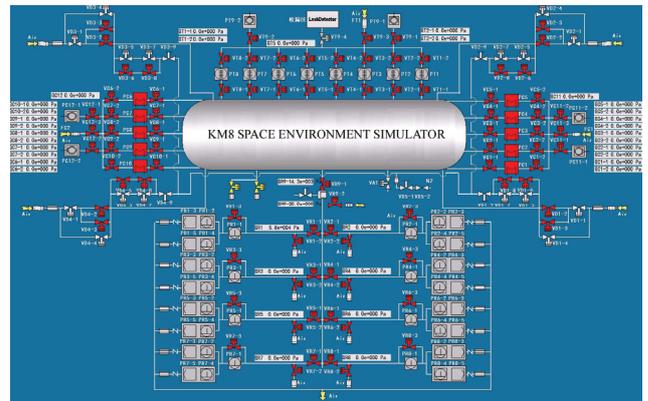


图 5 KM8 空间环境模拟设备真空系统配置

3 真空系统配置技术

通过对国内外大型空间环境模拟器真空系统进行研究, 根据系统流程一般分为粗真空抽气阶段、过渡真空抽气阶段、高真空抽气阶段和超高真空抽气阶段过程。

3.1 粗真空抽气阶段配置技术

大型空间环境模拟器所需真空泵的抽速较大, 对粗抽系统的要求较高。常用的大抽速真空泵有水蒸气喷射机组、水环式真空机组、罗茨式真空机组和无油螺杆式真空机组。由于当前对空间环境无油清洁要求的逐步重视, 近年来粗真空抽气多采用罗茨螺杆式无油真空机组, 通过罗茨泵与螺杆干泵的多套与多级组

合配置实现大容积大抽速的要求。根据工作压力和抽气速率等不同的需求工况,粗抽系统采用三级、四级甚至多级的罗茨干泵机组串联组合,多套机组并联组合的方式获取更大的抽速和更高的真空度。

罗茨真空泵在较低入口压力时具有较高的抽气速率,特别是对于大型罗茨串联机组,需要满足被抽系统中的压力被前级真空泵抽到罗茨真空泵允许的起动入口压力时,罗茨真空泵才能开始工作。在一般情况下,罗茨真空泵不允许在高压差情况下工作,否则将会使罗茨真空泵产生过载和过热而损坏。因此使用罗茨真空泵时必须合理地选用前级真空泵,并且须安装必要的保护设备。最大压缩比是多级罗茨配备中的关键参数,它是随排出压力的变化而变化的,因此,选择前级泵的抽速,要根据罗茨真空泵的长期工作压力范围考虑。一般根据经验,机组中罗茨泵的理论抽速与前级泵理论抽速的配比关系为5:1~8:1,否则将使压缩比过大,造成罗茨真空泵的排气温度过高而不能正常工作。

对于大型空间环境模拟器,抽气时间是真空系统的关键指标,也是决定罗茨机组选型的重要参数。由于被抽体积较大,对于粗抽时间要求较高的系统,需配置较大的前级泵,以使各级罗茨尽早切入抽气。有时为了更好地发挥设备的效率,机组装有较大的预抽干泵,在罗茨正常工作后使用较小的前级泵维持,可以节约机组能耗。

在粗抽阶段,由于设备或系统内表面的放气量与设备的气体负荷相比可以忽略不计,因此,在计算抽气时间时,此过程一般不考虑系统放气量。抽气时间主要与真空室内气体流态和管道内流导有关。气体流态随真空室内气压变化,管道流导既受气体流态影响,也与抽气管道几何尺寸有关。机组确定配置后可根据式(1)完成粗抽时间复核计算:

$$t = 2.3V \left(\frac{1}{S_e} + \frac{1}{U} \right) \lg \frac{P_i - P_0}{P_t - P_0} \quad (1)$$

式中: t 为抽气时间, s; S_e 为机组的有效抽速, L/s; V 为容器的容积, L; P_i 为开始抽气时的压力, Pa; P_t 为 t 时间后所达压力, Pa; P_0 为真空泵的极限真空, Pa。

此外,为了使泵在运行过程中电机不会过载,当前罗茨机组一般通过变频的方法,在高的入口压力范围降低电机转速,而随着入口压力的降低可以不断提高转速以提高有效抽气速率。因此对于大型空间环境模拟器,一般建议罗茨机组配备变频器,既可以降低配套功率,又可以缩短抽气时间,提高运行效率,同时可以实现机组的安全保护运行。

3.2 高真空系统配置技术

真空系统总体方案确定后,需对高真空泵抽速进

行设计,以满足真空室内极限与工作真空度要求。真空主泵抽速设计主要考虑真空室内气源的气体流量。常规空间环境模拟设备实验过程中没有持续且固定的放气过程,真空室内材料放气量为主泵工作时主要气源。真空室工作时所需的工作压力由式(2)决定:

$$P_g = P_0 + \frac{Q_0}{S_p} + \frac{Q_1}{S_p} \quad (2)$$

其中: P_0 为真空泵的极限真空, Pa; Q_0 为一定时间后设备本身的气体负荷, Pa·L/s; S_p 为真空室抽气口附近泵的有效抽速, L/s; P_g 为真空室工作压力, Pa; Q_1 为工艺生产过程中的气体负荷, Pa·L/s。

目前,为满足清洁无油的真空要求,高真空系统一般采用低温泵作为主泵。国外建造时间较早的设备也相应地进行了适应性改造。例如美国 SPF 与 Chamber A 为了适应新型试验的需求,均将原有的扩散泵系统改为清洁无油的低温泵系统,未来空间环境模拟的清洁真空环境获得是主流趋势。

3.3 分子泵检漏系统及过渡抽气配置策略

在大型空间环境模拟设备中,低温泵满足了获得清洁真空大抽速的要求,但对氦气、氢气等气体抽速较小,且易于饱和。如果有额外的氢气和氦气来源,如试件漏气量较大时,需要对氢气和氦气有较大的辅助泵。如“神舟”二号飞船试验时,由于电源系统中氢气泄露,使真空度显著下降。当在试验过程中有较多的轻质气体时就需要对氦、氢等气体有较大抽速的辅助泵进行抽气,因此一般配置分子泵系统作为该类试验设备的过渡抽气和重要补充。

此外,由于泵组能力限制,对于大型空间环境模拟设备,粗抽机组一般可将真空容器抽至几帕量级。特别是对于大型航天器的有载试验,容器内部大量的试件本身、电装电缆、辅助装置会使得粗抽机组的极限真空获得能力受到影响。此时大型真空容器内压力无法满足根据低温泵跨越容量计算可得的最大入口压力,分子泵系统也可作为该区间过渡抽气的重要补充。

根据实际使用经验,对于大型空间环境模拟设备,分子泵系统作为过渡抽气阶段的主要配置也具有一定的局限性。这是由于当前主流分子泵开始具有有效抽速的入口压力为 10^{-1} Pa 量级,而在粗抽机组的极限真空量级范围有效抽气能力有限,无法与粗抽机组有效衔接过渡。分子泵系统过高压力的介入可能会导致分子泵过载或过渡阶段抽气时间过长,而对于大型空间环境试验设备如选择增加分子泵数量的方式解决该问题会导致建造费用的增加。

当前对于该过渡抽气的配置策略一般包括:

1) 使用低温冷板进行过渡抽气。当前对于大型空间环境模拟设备一般可采用冷板抽气的方式进行过渡抽气。冷板采用液氮制冷等方式,同时该冷板也

可与防污染板实现功能合并,在过渡抽气的同时实现真空容器内的防污染保护。美国 SPF 容器内改造增加了五片防污染板,同时实现了过渡抽气功能。

2) 使用低温泵进行过渡抽气。大型空间环境模拟设备一般主泵配备多套大口径低温泵,因此通过改变抽气流程工艺,即在粗抽机组达到抽气极限能力时,通过提前使用 1~2 套低温泵进行抽气也可实现系统的过渡抽气。由于大型空间环境模拟设备此时气体负荷较大,因此提前开启低温泵会导致冷头温度上升,也可将用于过渡抽气的低温泵内活性炭去掉,便于后续低温泵的快速再生。

3.4 超高真空环境配置策略

对于大型空间环境模拟设备,真空系统一般配置液氮抽气冷板或热沉完成对容器的辅助抽气。同样对于大型空间环境模拟设备的超高真空环境获得,可通过配置氦抽气冷板制成的内置深冷泵的方式获得更高的真空度,如图 6 所示。如 KM6 空间环境试验设备、ESTEC 的 LSS 空间环境模拟器均配备了氦制冷抽气冷板,可获得 10^{-6} Pa 的超高真空环境^[4,6-7]。

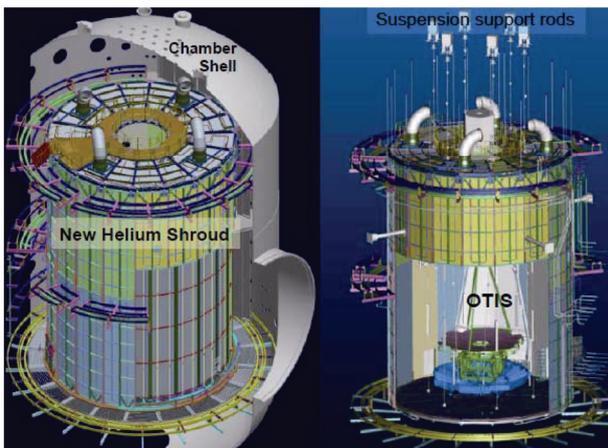


图 6 美国 Chamber A 氦制冷热沉

氦抽气冷板一般是将冷板制成任意形状的内置深冷泵,通过大型氦流程系统在冷板表面实现超低温吸附抽气的方式。该技术具有有效抽速大、真空度高、表面洁净等优点。在大型空间环境模拟设备中,为了减少氦低温冷板的辐射热负荷,一般将冷板制成的内置深冷泵置于液氮热沉包围之中。由于液氮冷却热沉具有辐射挡板的作用,使得容器内穿过挡板到达冷凝面的分子能量足够低,并吸收掉绝大部分来自真空室壁温的辐射热。同时,由于液氮热沉的遮挡效应,阻挡了被抽气体分子运动,使内置深冷的有效抽速降低,所以液氮热沉形成的辐射挡板形式的选择对于深冷泵的高效运行至关重要,也是大型空间环境模拟器超高真空环境获得的关键技术。

低温冷板表面的最大抽速可由式(3)表示:

$$S_{\max} = \frac{1}{4} \bar{V}_1 A = \left(\frac{RT_g}{ZwM} \right)^{1/2} = 3.638A \left(\frac{T_g}{M} \right)^{1/2} \quad (3)$$

式中: A 为冷板抽气有效面积, cm^2 ; T_g 为被抽气体温度, K ; M 为气体分子摩尔质量; R 为气体常数。

上述公式为理论上低温冷板表面的最大抽速,实际有效抽速需考虑气体通过热沉辐射挡板的流导几率,不同形式的挡板具有不同的流导。另外内置深冷泵的抽气能力和被抽气体饱和蒸汽压有关。气体饱和蒸汽压和低温冷凝板温度的关系如图 7 所示。对于空间环境模拟真空容器内的空气,要抽除空气内的不同成分以实现超高真空。从图 7 可以看出,可以根据公式计算出各类气体的有效抽速。当由液氮冷却的内置深冷泵温度到达 5 K 时,低温冷凝泵能够抽走除氦气以外的所有气体,使得深冷泵的真空度达到 10^{-7} Pa。

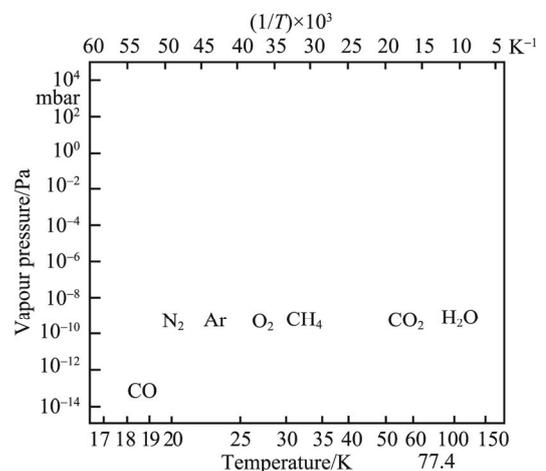


图 7 气体饱和蒸汽压和冷板温度的关系

3.5 污染控制策略

空间环境模拟设备对于污染控制要求很高,航天器在热真空试验阶段的污染会导致光学载荷性能退化等质量问题。大型环模设备真空系统的污染控制涉及从设计到制造、安装调试及后续使用保养等各个方面,一般从以下方面实现污染的有效控制与监测。

1) 无油真空系统。随着地面模拟试验对污染效应的严格控制,真空系统配置逐步趋向清洁无油真空环境。为此,国外建造时间较早的设备也相应地进行了适应性改造。例如美国 SPF 与 Chamber A 均将原有扩散泵系统改为低温泵系统。

2) 对于因建造成本等原因而使用油扩散泵、油机械泵等抽气设备时,为避免油气返流造成对试验环境的污染,一般在入口前配置液氮冷阱、分子筛吸附阱等工艺手段避免污染效应。如世界最大的 SPF 空间环境模拟器真空系统管道中通过安装低温冷阱、分子筛吸附阱、惰性气体吹扫等多种方式有效实现了污染控制^[8]。

3) 内置防污染板。大型空间环境模拟设备内部设计有防污染板,通过液氮冷却等方式在系统开机阶段先于热沉将其冷却至低温,直到试验结束热沉完成回温后,可有效避免容器内有机物等对航天器造成的污染效应。

4) 污染监测。目前我国卫星热试验过程中,通常使用石英微量天平、质谱仪等方式实现污染物监测和成分分析,为卫星的污染防护提供了技术支持。

4 我国大型空间环境模拟器真空系统特点

通过与国外同类设备技术对比与分析,我国大型空间环境模拟设备真空系统技术具有清洁无油、抽气能力强、自动化程度高、可靠性高等特点。

1) 国外大型空间环境模拟设由于建造年代较早,多使用油介质真空泵。国内以近期建设完成的 KM8 为代表的大型设备从设计到安装调试过程,选用低温泵、分子泵、罗茨螺杆机组等无油工艺设备,并在全过程严格进行污染控制。通过残余气体分析及污染量测试分析表明,真空环境满足各类型号的清洁无油的试验需求。

2) 我国大型空间环境模拟器真空系统通过优化设计,合理配置泵组配比与布局,具有较高的抽气能力。如 KM8 空间环境模拟器、KM6 空间环境模拟器均可在 3.5 h 内将真空容器抽至 5 Pa 以下,空载极限真空度达到 10^{-6} Pa 量级的超高真空范围,并配备自动漏率测试及残余气体分析等功能。

3) 我国大型空间环境模拟器真空系统配置多项专利技术的工艺设备用于实现系统的优化配置。如 KM8 配置了专利设计的真空绝热储液式冷阱,可在大气下通入液氮,用于冷凝捕获油、水蒸气,获得洁净真空环境,降低机组气体负荷。复压系统配置内置式复压散流器,可在不影响复压速率、不占用真空室内部空间的条件下,消除高速直射气流对真空室内部的试件、罐内结构的直接冲击。

4) 为实现真空系统的远程自动控制,节省试验人力及时间成本,我国大型空间环境模拟设备真空系统配备自动抽气控制流程,因此真空系统具有集成度、可靠性和自动化水平高等特点,可以实现关键设

备控制互锁、一键起停,急停等控制、监控、诊断及记录等功能。

5 结语

随着载人航天、火星探索等国家重大空间探索工程的稳步实施,并随着“十三五”新型号立项的开展,在大型航天器方面还将有更多的任务需求。大型空间环境模拟试验及其设备研制技术显得尤为必要。我国现有大型空间环境模拟设备的建成将极大地提升大型航天器真空热环境试验的能力,拉近与先进国家在大型航天器真空热试验设备能力与试验水平的差距,为空间站核心舱、实验舱及后续大型航天器成功发射提供有力保障。

参考文献:

- [1] 刘中华. 热真空试验标准与方法分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2016, 34(4): 16-20.
- [2] GERALD M H, RICHARD K E. Advanced Distributed Measurements and Data Processing at the Vibro-acoustic Test Facility, GRC Space Power Facility, Sandusky, Ohio—An Architecture and an Example[C]// 25th Aerospace Testing Conference, 2009.
- [3] ROGER L S. Space Power Facility Readiness for Space Station Power System Testing[R]. NASA Technical Memorandum 106829, 1995.
- [4] JONATHAN L H, MARY P C, MICHAEL E M. Creating the Deep Space Environment for Testing the James Webb Space Telescope at NASA Johnson Space Center's Chamber A[C]// 43rd International Conference on Environmental Systems. 2013.
- [5] 黄本诚. 神舟飞船特大型空间环境模拟器[J]. 航空制造技术, 2005(11): 34-37.
- [6] 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.
- [7] 张春元, 许忠旭. 大型清洁超高真空获得初探[J]. 航天器环境工程, 2002, 19(1): 59-62.
- [8] AARON S, MICHAEL W H, STANLEY P G. Contamination Control Assessment of the World's Largest Space Environment Simulation Chamber[R]. NASA/TM—2012-217823, 2012.