

超大型航天遥感器评价系统漏孔高效定位方法研究

李云恒 何绍栋* 马龙 王华新 王俊成 杨健 邓高
(北京空间机电研究所 北京 100094)

Efficient Method for Locating Leaky Holes in Ultra-Large Spacecraft Remote Sensor Evaluation Systems

LI Yunheng, HE Shaodong*, MA Long, WANG Huaxin, WANG Juncheng, YANG Jian, DENG Gao
(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract The ultra-large spacecraft remote sensor evaluation system is a test device used for performance testing and evaluation of large-diameter optical remote sensors under the conditions of a simulated in-orbit environment on the ground, consisting of a vacuum vessel, a low-temperature heat sink system, a vacuum acquisition system, a nitrogen flow system, an external heat flow simulation device and so on. The vacuum vessel is the main body of the evaluation system of the very large spacecraft remote sensing device, and its structure is complex; the number of openings is large, the volume is huge, there are many leakage factors, its leakage rate index is the key factor affecting the spacecraft ground simulation test work vacuum degree index can be achieved. This paper presents a comparative analysis of the helium mass spectrometry leak detection methods for each stage of the vacuum vessel development process. Based on the analysis of the difficulties in locating leaks in the development process of very large vacuum vessels, the use of helium mass spectrometry vacuum sampling is proposed to achieve rapid and efficient leak location in the development process, and good results are achieved in practical applications.

Keywords Spacecraft remote sensor evaluation systems, Vacuum containers, Leak hole, Effective positioning

摘要 超大型航天遥感器评价系统是用于大口径光学遥感器在地面模拟在轨环境的条件下进行性能测试与评价的试验装置,由真空容器、低温热沉系统、真空获取系统、氮流程系统、外热流模拟装置等组成。真空容器是超大型航天遥感器评价系统的主体,其结构复杂、开孔数量较多、体积庞大,存在泄漏因素多,其漏率指标是影响航天器地面模拟试验工作真空度指标能否实现的关键因素。本文针对真空容器研制过程各个阶段氦质谱检漏方法进行了对比分析,并根据超大型真空容器研制过程的漏孔定位难点进行分析,在研制过程提出了利用氦质谱负压采样法,优化了真空容器氦质谱检漏流程,实现了漏孔快速、高效定位,并在实际工程应用中取得了良好效果。

关键词 航天遥感器评价系统 真空容器 漏孔 高效定位

中图分类号: V9 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202211017

超大型航天遥感器评价系统是用于大口径光学遥感器^[1]在地面模拟在轨环境的条件下进行性能测试与评价的试验装置。大口径光学遥感器发射前需在试验装置内完成产品的真空热试验及光学性能指标检测试验等验证与评价,以保证其在轨工作状态的可靠性。遥感器真空热试验是验证热设计^[2-3]正确性的有效手段,是遥感器成像质量测试模

拟在轨飞行条件下性能指标的验证有效措施,也是对遥感器在轨运行状态最精确的预测。

超大型航天遥感器评价系统为立式圆柱结构,主要由真空容器、低温热沉系统、真空获取系统、氮流程系统、外热流模拟装置等组成。根据航天器真空热试验要求,航天遥感器评价系统需要实现空载真空度 $\leq 5 \times 10^{-5}$ Pa,总漏率 $\leq 1.0 \times 10^{-6}$ Pa·m³/s。为

实现真空度需求,在配置有足够抽速的高真空抽气泵组的基础上同时要求航天遥感器评价系统建设过程中漏率指标进行严格控制。本文所介绍的大型真空容器总容积约为 3600 m^3 ,其具有结构尺寸大、体积庞大、结构复杂、开孔数量庞大、交叉焊缝多等特性,因此如果出现泄漏问题在大多数情况下不是容易解决的,而且要耗费较长时间和较多经费去解决泄漏问题。

本文介绍了不同检漏方法在大型空间环境模拟器研制过程中的应用,并根据某超大型容器在泄漏检测过程中,系统真空度无法满足启动分子泵检漏系统实现氦质谱真空检漏情况下,采用氦质谱负压采样法^[4]快速高效地完成漏孔定位检测的案例,优化了超大型真空容器漏率检测流程、提升了检漏效率、降低了人员工作强度。

1 不同检漏方法及流程分析

真空容器漏率控制与检测是保证超大型真空系统真空度指标实现的一个重要条件。在真空容器研制过程中采用多手段组合方式,能够实现超大

型真空容器漏孔定位、定量检测。根据实际工程经验,真空容器漏率控制及检测主要分为两方面:一是在真空容器设计、加工、安装过程中,尽量避免或减少那些产生漏孔的因素;二是在加工、安装过程中采用正确的检漏方法,将漏孔位置找出来,并加以修补,将真空容器漏率控制在允许范围内^[5]。

1.1 常规泄漏检测方法流程

常用的泄漏检测方法有真空氦质谱罩盒检漏方法、氦质谱真空检漏法、静态压升法等^[6-7]。以下为各种检漏方法介绍。

1.1.1 常用漏孔检测方法介绍

(1) 真空氦质谱罩盒检漏方法

真空氦质谱罩盒检漏方法用于对真空容器各类焊缝、法兰密封面进行漏率检测。其焊缝检漏原理如图 1(a) 所示,其法兰密封面检漏原理如图 1(b) 所示。在真空侧加盖检漏盒,将焊缝罩住抽真空,当检漏仪处于最佳工作状态时,在另一侧喷吹氦气(或氦罩内充入氦气),对焊缝及法兰密封面进行检漏。

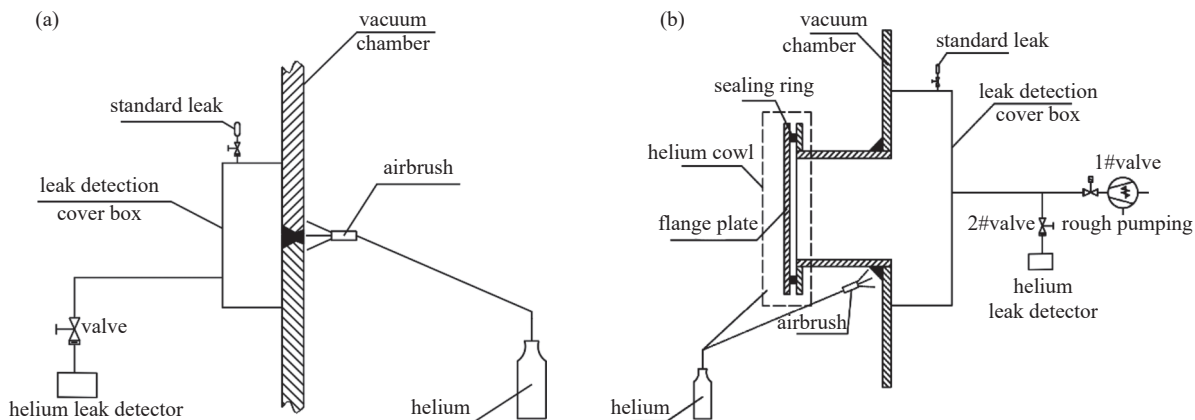


图1 真空氦质谱罩盒检漏方法原理。(a)焊缝漏率检测原理,(b)法兰密封面漏率检测原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the leak detection method for vacuum helium mass spectrometry cartridges. (a) Principle of weld leakage rate detection, (b) schematic diagram of flange sealing surface leakage rate detection

(2) 氦质谱真空检漏法

氦质谱真空检漏法是将检真空容器抽真空,启动检漏系统,示漏气体施加在被检件外表面。如果被检真空容器存在漏孔,示漏气体将通过漏孔进入检漏仪内,从而判定漏孔的位置及漏率。该方法同样适用于小型真空容器总漏率检测。其单点漏率检测系统原理如图 2(a) 所示,总漏率测试系统原理如图 2(b) 所示。

(3) 静态压升法

静态压升法是通过真空抽气泵组将被检测的真空容器抽空至一定的真空状态后,关闭真空抽气阀门使真空容器腔体与真空抽气泵组隔离,然后用真空容器腔体上的真空计及其控制器来测量真空中压力的变化,从而可以算出真空容器总漏率的方法。

使用静态压升法测定系统漏率时,可根据真空

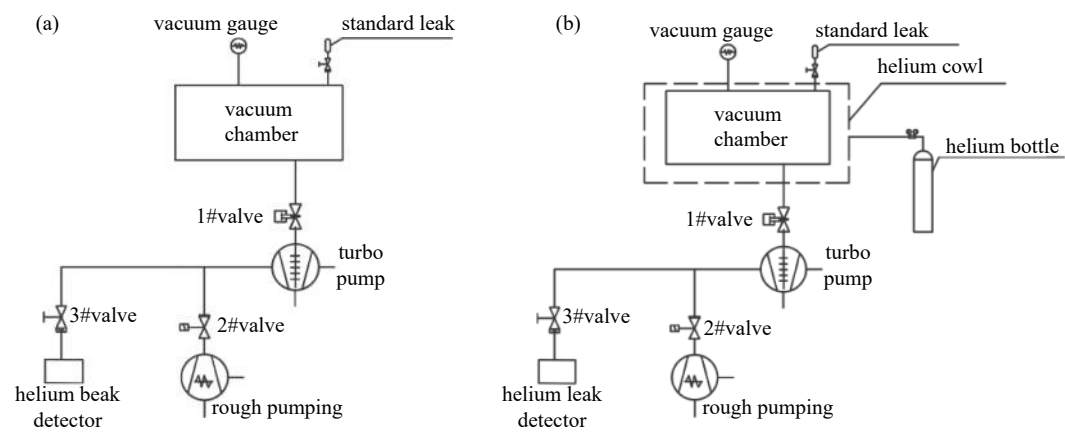


图2 氦质谱真空检漏法系统原理图。(a)焊缝、密封面检漏原理图,(b)容器整体检漏原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the helium mass spectrometry vacuum leak detection system. (a) Schematic diagram of leak detection of weld and sealing surface, (b) schematic diagram of overall leak detection of containers

容器内部真空度变化曲线进行漏率判定。如图3时间—压力曲线中:直线a表示容器漏气很小,放气也很小;直线b表示容器壁放气,漏气很小;直线c表示容器漏气较大,放气可忽略;直线d表示漏气和放气同时存在,斜线部分是漏气决定的。

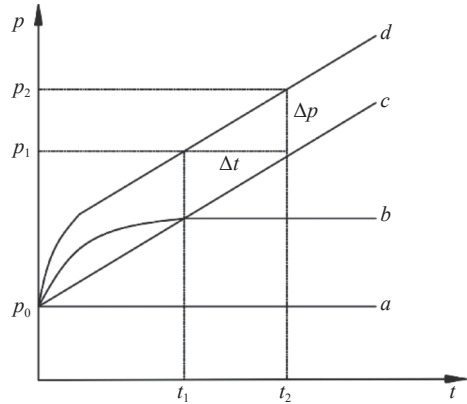


图3 静态压升法时间-压力曲线

Fig. 3 Time pressure curve of static pressure rise method

(4)检漏方法对比

上述三种检漏方法应用于真空容器研制不同阶段,如表1列出了三种方法优缺点。

表 1 三种检漏方法对比表

Tab. 1 Comparison table of three leak detection methods

检漏方法	适用于场景	优点	缺点
真空氦质谱罩盒检漏方法	真空容器制作过程中焊缝、法兰密封面漏率检测	➢ 检漏系统简单 ➢ 检漏灵敏度高	➢ 要定制罩盒 ➢ 操作耗时长
氦质谱真空检漏法	适用于法兰密封面、真空容器总漏率测试	➢ 检漏灵敏度高 ➢ 能准确定位漏孔位置	➢ 检漏系统复杂 ➢ 检漏系统切入真空度高
静态压升法	真空容器制作完成后总漏率测试	➢ 测试方法简单 ➢ 适用于超大漏孔测试	➢ 无法定位漏孔 ➢ 结果需考虑放气、温度等因素

1.1.2 常规泄漏检测流程

为保证空间环境模拟器漏率满足要求,在真空容器加工、制造、安装调试过程中采用多种检漏方法组合形式进行检漏。目前空间环境模拟器真空容器常规泄漏检测流程如图4所示:

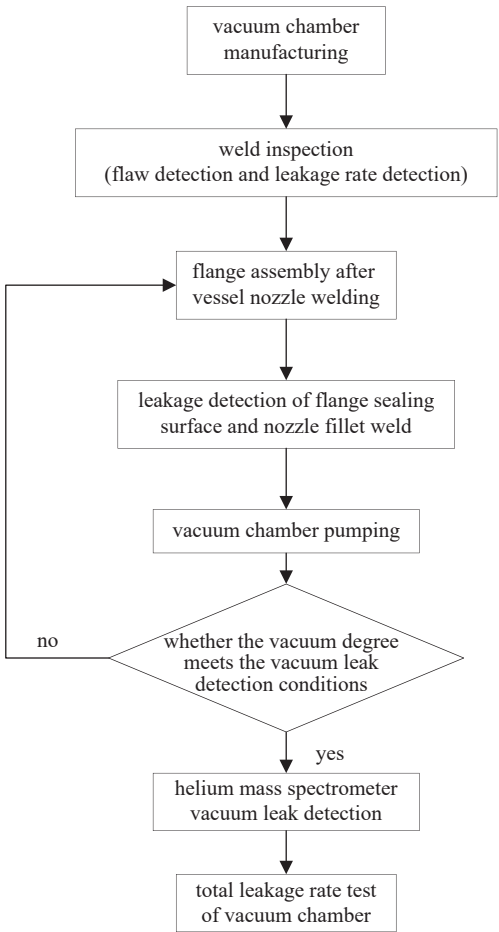


图4 常规漏孔检测流程

Fig. 4 General leak detection process

1.2 快速高效泄漏定位方法

1.2.1 常规方法存在问题

目前大型空间环境模拟器真空容器容积大(容积 1000 m^3 以上)、结构复杂、开孔数量多(100 个以上)等。为解决真空容器存在的漏点,需要对各类焊缝、各个法兰密封面设计专用检漏罩盒进行氦质谱检漏,定位检测真空容器可能存在的漏点问题需要耗费大量人力、时间和经费。即使如此真空容器泄漏检测过程中,存在受结构限制等多种因素影响,无法在生产制造阶段完成漏率检测。当在进入真空容器安装调试阶段后,系统可能出现无法获取氦质谱真空检漏法所需的真空度,无法启动真空检漏系统,而静态升压法能够检测是否存在较大漏孔但是无法进行准确定位,对真空容器安装调试进展产生很大影响。为了解决超大型容器漏孔检测存在的问题,本文引入一种快速、高效的漏孔检测方法,能够实现超大型真空容器或复杂容器结构的漏孔快速定位检测,提升检漏工作效率。

1.2.2 氦质谱负压采样法工作原理

氦质谱负压采样法是将被检容器抽真空,示漏气体施加在被检件外表面。如果被检容器存在漏孔,示漏气体将通过漏孔进入容器内被真空泵抽出。使用检漏仪吸枪在粗抽泵的排气出口处采集示漏气体,从而判定漏孔的位置及漏率。其系统原理如下图 5 所示。

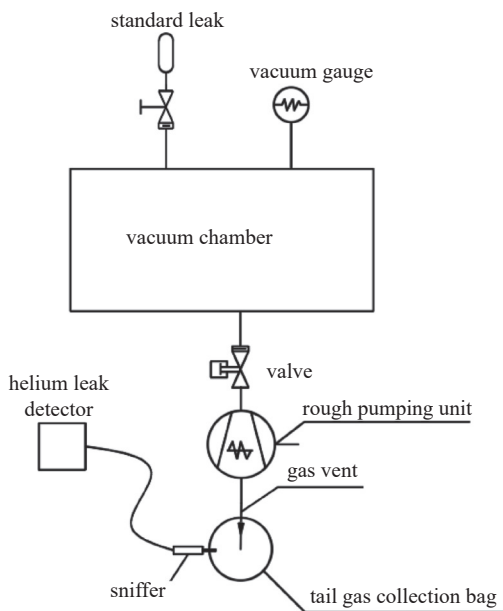


图5 氦质谱负压采样法系统原理图

Fig. 5 Schematic diagram of helium mass spectrometry negative pressure sampling system

氦质谱负压采样法是基于氦质谱吸枪法进行漏点测试。该方法可以实现在系统低真空状态下(真空度无法满足氦质谱真空检漏法需求)实现对真空容器漏点进行定位检测,是一种快速、高效、准确的检漏方案。该方法对真空容器内部真空度要求不高、检漏系统搭建便捷、检漏耗时短,能够快速准确的定位真空容器存在的较大漏点,能够适用于真空容器粗检漏工作。

1.2.3 氦质谱负压采样法灵敏度估算

为提升检漏灵敏度,漏率检测系统设计为全检系统(无分流),即检漏期间真空系统抽走的所有气体通过氦质谱检漏仪,提高质谱室氦气浓度从而提高检漏灵敏度。

氦质谱负压采样法可将真空容器视为一个氦气收集器,当检漏仪切入至吸枪检漏模式,检漏仪达到动态平衡状态时检漏仪检漏入口内有一个实测压力值(p_z)。最小可检示漏气体($Q_{s \min}$)、漏入真空容器的空气(Q_L)及真空容器的释放气体(Q_f),被真空容器粗抽泵组(泵速为 S_1 , 泵口压力为 p_1)抽出排放气至尾气采样集气罩内,检漏仪吸枪全部插入到尾气采样集气罩内,在保证漏出的示漏气体能全部进入检漏仪的条件下,系统检漏灵敏度^[8]按公式(1)计算:

$$Q_{s \min} = Q_{z \min} \cdot p_z / p_{z \min} \quad (1)$$

式中 $Q_{s \min}$ 为系统最小可检漏率, $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$; $Q_{z \min}$ 为检漏仪最小可检漏率, $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$; p_z 为检漏仪入口实际压力, Pa; $p_{z \min}$ 为检漏仪入口最小压力, Pa;

本方法采用英福康 UL-1000 型逆扩散氦质谱检漏仪进行搭建检漏系统。根据 UL-1000 型检漏仪的参数, $Q_{z \min} < 5 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, $p_{z \min} = 40 \text{ Pa}$ (查说明书可得),在使用本方法进行漏率检测时,取 $p_z = 100 \text{ Pa}$,将参数代入式(1)计算可得,系统最小可检漏率 $Q_{s \min} < 1.25 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

1.2.4 检漏时间分析

在实际进行漏率检测过程中,常以 3 倍的系统时间常数 τ 作为反应时间(t),足以判定是否有漏和漏率大小,同样以 3 倍的系统时间常数作为清除时间,完全可以认为氦气已清除干净^[9]。系统时间常数按公式(2)计算。

$$\tau = \frac{V}{S} \quad (2)$$

式中: V 为被检真空容器容积, m^3 ; S 为真空抽气泵

组总抽速, m^3/s ; τ 为系统时间常数, s 。

1.2.5 氮质谱负压采样法操作流程

氮质谱负压采样法检漏流程如下:

(1) 开启粗抽系统, 将真空容器抽气至低真空, 且真空度保持稳定;

(2) 搭建检漏系统, 将检漏仪吸枪及尾气集气罩安装至粗抽系统汇总排气管路出口位置;

(3) 开启检漏系统并标定系统有效可检灵敏度 $Q_{\min}$, 系统有效可检灵敏度按公式(3)计算^[10];

$$Q_{\min} = \frac{I_n}{I_s - I_o} Q_o \quad (3)$$

式中: $Q_{\min}$ 为系统最小可检漏率, $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$; Q_o 为标准漏孔漏率, $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$; I_n 为噪声或最小可读信号, 相对单位; I_o 为本底, 相对单位; I_s 为标准漏孔打开后稳定的输出刻度值, 相对单位。

(4) 开启检漏仪检漏状态, 对真空系统可疑存在漏孔处喷吹氦气, 待检漏仪输出值稳定后, 记录输出值, 可按公式(4)计算漏孔漏率 Q 。

$$Q = \frac{I - I_o}{I_s - I_o} Q_o \cdot \frac{1}{D} \quad (4)$$

式中: Q 为被检件漏孔漏率, $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$; Q_o 为正压标准漏孔漏率, $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$; D 为示漏氦气的浓度, 浓度百分数%; I 为被检件示氦后检漏仪稳定的输出值, 相对单位。

1.2.6 检漏过程数据分析

利用氮质谱负压采样法对真空容器进行漏孔定位检测时, 氮质谱检漏仪的反应值变化曲线^[11]如图6所示。

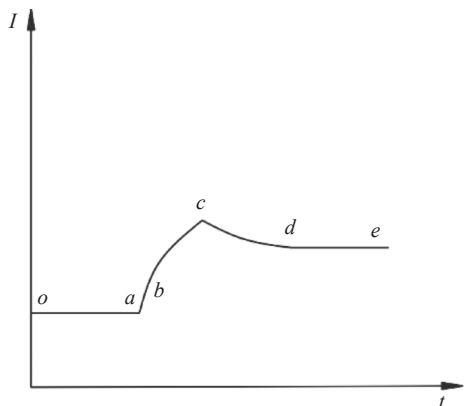


图6 检漏仪反应值变化图

Fig. 6 Response value change diagram of leak detector

检漏仪反应值变化图中显示的 $o \rightarrow a$ 为检漏仪吸枪测得的粗抽系统排气气体本底值(I_o); 曲线图

中 a 点位置表示在漏孔位置喷吹氦气后, 检漏仪吸枪接触真空抽气泵组排气气体中氦气的时刻; 曲线图中 $a \rightarrow b$ 段表示氮质谱负压采样检漏系统的系统反应时间; 曲线图中 $b \rightarrow c$ 段表示真空抽气泵组排出经真空容器漏孔渗入到真空容器内的氦气, 此时被同时吸进了检漏仪中, 到达曲线图中 c 点时达到了峰值; 曲线图中 $c \rightarrow d$ 段表示由于检漏仪吸枪所吸入的氦气量大于氦气泄漏量, 因此, 检漏仪反应值呈现下降趋势; 当检漏仪反应值到达曲线图中 $d \rightarrow e$ 段, 则表示检漏仪反应值稳定, 检漏仪测试时的读数是取曲线图中 $d \rightarrow e$ 段的读数(I)。

1.2.7 检漏过程注意事项

首次氮质谱检漏时需对每个法兰密封面用塑料薄膜进行包裹, 然后再逐个进行检测。将检漏仪吸枪插入尾气集气袋内, 将氦气管路插入到塑料薄膜袋内充入氦气, 如果检漏仪显示漏率值上升, 可确定该位置存在可疑漏点。将该密封法兰位置、编号及检漏仪反应值数据记录在案, 用于后续集中处理。使用塑料薄膜将存在漏点的法兰进行包裹, 用胶带密封, 以免影响其他法兰密封性的检测。

检漏过程中, 为保证检漏灵敏度, 在具备检测状态时必须真空容器内真空度相对保持稳定, 该状态下可保持吸枪入口端压力相对稳定, 保证系统检测灵敏度。

在进行漏孔定位检测时, 检测人员要根据检漏仪反应值的变化大小和反应时间长短来判断真空容器可疑漏孔的位置。如果检漏仪反应值上升速度缓慢, 且反应时间较长, 则说明真空容器可疑漏孔不在当前氦气喷吹位置, 而在喷吹氦气附近的某个位置。

在进行漏率检测过程中, 当检测人员移开吸枪, 如果氮质谱检漏仪显示值长时间不下降, 说明检漏系统已被污染, 真空抽气泵组排气口的尾气集气罩中氦浓度过高, 此时检测人员应将尾气集气罩取下并加强真空抽气泵组排气区域的通风。

检漏过程中, 当发现真空容器真空度上涨, 可能是因尾气集气罩内压力过高, 影响真空泵组抽气效率, 此时需要将尾气集气罩取下, 待真空容器真空度下降且保持稳定后再安装好尾气集气罩继续进行漏率检测。

1.3 检漏方法对比分析

根据上述工作原理分析, 氮质谱负压采样法检

漏系统不受真空容器内部真空度影响,能够快速定位真空容器存在的漏孔位置以及漏率值。经实测,系统能够最小可检漏率为 $\geq 10^{-7} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 。本方法与上述常规检漏方法对比如表 2 所示。

表 2 四种检漏方法对比分析表

Tab. 2 Comparative analysis table of the four leak detection methods

项目	真空氦质谱罩盒检漏方法	氦质谱负压采样法	氦质谱真空检漏法	静态压升法
应用场景	焊缝、法兰密封面漏率进行检测	超大型容器或复杂真空系统存在漏点且系统真空度指标不满足氦质谱真空检漏系统正常启动运行;	真空容器抽真空至检漏系统启动压力对系统法兰密封面位置、焊缝位置、总漏率等进行检测;受超大容器结构限制无法用于真空容器总漏率测试	系统总体漏率
检测时机	真空容器制作过程中	(1) 加工完成后首次对真空容器抽真空进行漏率检测时; (2) 日常维护过程	(1) 加工完成后首次对真空容器抽真空进行漏率检测时; (2) 日常维护过程;	真空容器制作完成后总漏率测试
检漏系统	复杂,需要专用工装	简单	较为复杂	简单
漏孔位置确定	准确定位	准确定位	准确定位	无法定位
检漏灵敏度	$\geq 10^{-11} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$	$\geq 10^{-7} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$	$\geq 10^{-9} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$	$\geq 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$
被检容器真空获得系统要求	/	粗抽系统	粗抽系统+分子泵系统	粗抽系统+分子泵系统
检漏要求容器压力	/	无要求	10^{-1} Pa 以下	10 Pa 以下
工作实效	低	高	较高	较低

1.4 高效的检漏流程

为了提升超大型容器检漏工作效率、降低检漏工作经费,在超大型容器研制检漏流程中引入氦质谱负压采样法。采用该方法可省去容器制造过程中对法兰接管角焊缝、密封面的漏率检测工作,减少了不同规格检漏罩盒的投入。其检漏工艺流程如下图 7 所示。

通过氦质谱负压采样法引用至真空容器检漏流程中,能够将常规泄漏检测流程中对于法兰接管角焊缝、密封面的检测工作进行优化,真空容器漏率检测工作由原 10~15 天的工作量缩短至 2~3 天即可完成,极大的提升了工作效率。

2 实际应用案例

2.1 应用背景

超大型航天遥感器评价系统其主体设备加工完成后首次进行抽真空时,发现容器存在漏点,造成真空度无法达到要求。其主要情况介绍如下:

2.1.1 超大型真空容器参数介绍

超大型真空容器是超大型航天遥感器评价系统的主体设备,其结构尺寸内径为 $\varphi 13 \text{ m}$,采用立式圆柱结构,在水平方向设有直径 $\varphi 7 \text{ m}$ 的水平测试试验舱,总容积约为 3600 m^3 。在真空容器设置有不同规格大小的真空测试法兰近 120 余个。系统要求空载真空度优于 $5\times 10^{-5} \text{ Pa}$;总漏率:优于 1.0×10^{-6}

$\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 。某航天遥感器评价系统结构示意图如图 8 所示。

本装置真空获得系统^[12]主要由粗抽系统、分子泵抽气系统、低温泵抽气系统、氦质谱检漏系统等子系统组成,系统原理如图 9 所示。

粗抽系统由 6 套无油螺杆泵+两级无油罗茨泵组成的三级无油抽气机组、DN800 mm 不锈钢抽气管道、低温冷阱、真空隔断阀门等部组件组成,粗抽系统总峰值抽速约 $42000 \text{ m}^3/\text{h}$,可在 4 h 内将超大型航天遥感器评价系统从大气压抽气至 2 Pa 以内。

分子泵过渡抽气系统由 6 套抽速约为 2200 L/s 的磁悬浮分子泵、前级泵、抽气管路、真空阀门等组成。真空获得系统在粗抽结束后且容器内真空度达到 2 Pa 以下时启动分子泵过渡抽气系统对超大型航天遥感器评价系统进行抽气,以达到低温泵抽气系统的开启压力。

低温泵抽气系统由 6 台液氮预冷的 DN1250 大口径低温泵、前级再生泵、真空阀门、抽气管道等组成,6 台 DN1250 大口径低温泵(试验工况下为 3 主 3 备)同时工作时,能够实现超大型航天遥感器评价系统空载极限压力达到低于 $1.0\times 10^{-5} \text{ Pa}$ (热沉壁板温度 $\leq 100 \text{ K}$)。

2.1.2 存在问题描述

在真空容器加工制作完成后,开始对容器进行单点漏率检测及总漏率测试。首先利用粗抽系统

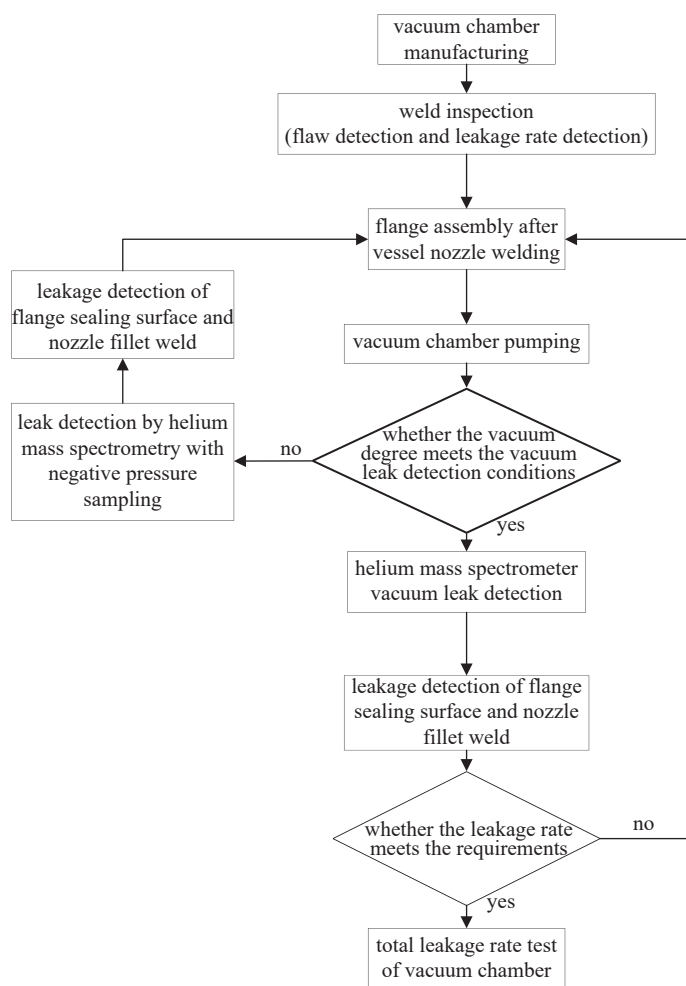


图7 高效的检漏流程

Fig. 7 Efficient leak detection process

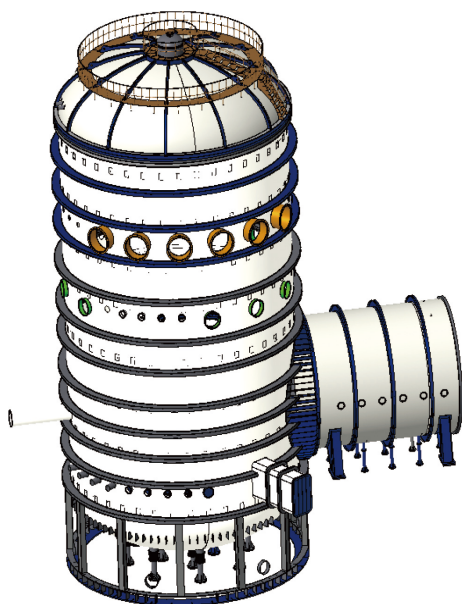


图8 超大型航天遥感器评价系统三维模型图

Fig. 8 3D model drawing of the ultra-large spacecraft remote sensor evaluation system

对真空容器抽真空,容器抽气至 100 Pa 左右,容器真空度保持稳定,在该状态下对容器进行静态压升测试,经保压 12 h 后,真空容器内部真空度上涨至 200 Pa 左右,真空度曲线图如图 10 所示。

根据静态压升计算公式(5)计算可得系统总漏率:

$$Q_{\text{漏}} = V \frac{\Delta P}{\Delta T} \quad (5)$$

式中, $Q_{\text{漏}}$ 为容器总漏率,单位: $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$; V 为容器总容积,单位: m^3 ; Δp 为经过时间 t 后容器真空度差值,单位: Pa; ΔT 为静态升压测试时间,单位: s;

本次计算时,不考虑真空容器材料出气因素影响,将静态压升相关测试参数代入公式计算,可知此状态下容器总漏率 $Q_{\text{漏}}=8.3 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$,远高于容器真空获得系统允许的总漏率指标 $1.0 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。经将真空容器压力保持曲线图 10 与静态压升法曲线图 3 进行对比分析,真空容器存在较大漏孔。

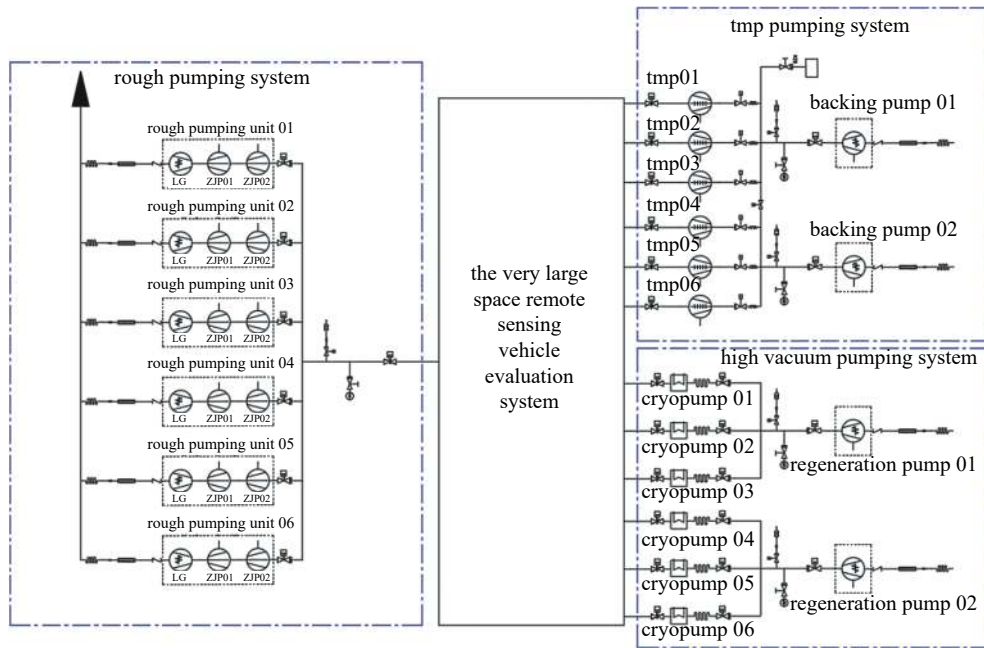


图9 超大型航天遥感器评价系统真空系统原理图

Fig. 9 Schematic diagram of the vacuum system of the ultra-large spacecraft remote sensor evaluation system

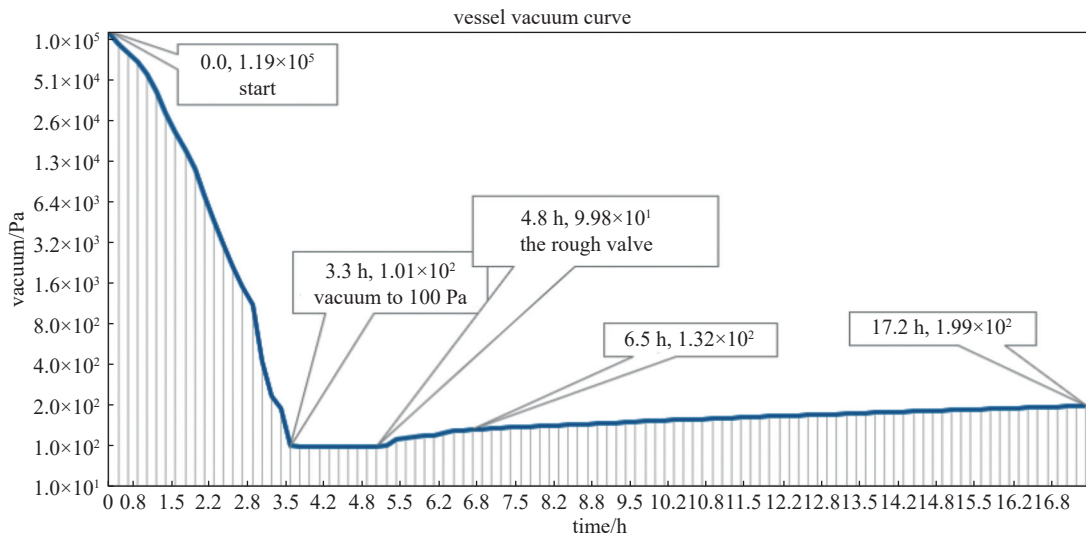


图10 超大型航天遥感器评价系统真空度曲线

Fig. 10 Vacuum curves for ultra-large spacecraft remote sensor evaluation systems

2.2 漏孔高效定位测试

因超大型容器真空度无法满足氮质谱真空检漏法正常启动工作的条件, 根据研制过程焊缝检测结果分析, 初步判定为法兰密封面存在泄漏。该容器共计约 120 余个法兰, 若将全部法兰拆开、检查密封面状态后再次进行重新装配, 工作量巨大, 预计至少需要 5-10 天才能够完成。为能够准确、高效的定位真空容器存在的漏点超标位置, 降低劳动强度、提升工作效率, 本次采用氮质谱负压采样检漏方法对真空容器进行漏率初步检测, 以保证真空

容器能够实现氮质谱真空检漏法正常工作所需的条件。

其检测流程如下:

- (1) 将真空容器各个密封法兰面位置采用塑料薄膜进行包裹, 防止检漏过程互相干扰;
- (2) 启动粗抽机组, 将真空容器抽气至 100 Pa 左右;
- (3) 当容器真空度保持稳定后搭建氮质谱负压采样检漏系统; 检漏系统如图 11 所示;
- (4) 当容器真空度保持稳定且检漏系统搭建完

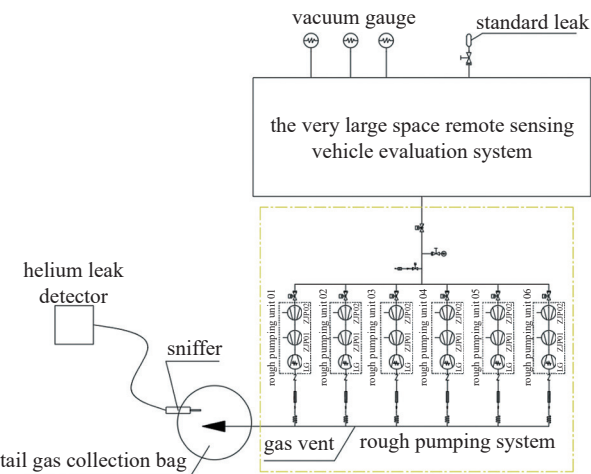


图11 超大型航天遥感器评价系统检漏系统示意图

Fig. 11 Schematic diagram of leakage detection system for evaluation system of ultra-large spacecraft remote sensor

成后开始进行检漏系统标定工作；

(5)系统灵敏度标定

检漏系统本底值 $3.2\times10^{-7}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ ，系统噪声 $0.4\times10^{-7}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ ，打开真空容器上安装的标准漏孔（标称值为 $2.0\times10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ ），其在检漏系统中的反应值为 $6.0\times10^{-6}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ ，按公式(4)计算本套检漏系统检漏灵敏度为 $1.41\times10^{-7}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 。

(6)漏孔检测

系统标定完成后，利用喷氦气枪开始对真空容器可疑的密封面进行逐一喷吹氦气，喷吹氦气时按从真空容器顶部密封面向底部密封面的顺序逐步进行喷吹。

若发现漏孔后立即用塑料薄膜将漏点包裹，用胶带进行密封，以免影响其他法兰的检测；

待检漏仪氦分压降至本底附近再喷吹氦气进行查找下一处漏孔。

经漏率检测，共计发现 7 处法兰密封面位置存在泄漏。

(7)检测完成，关闭粗抽系统，容器复压。

(8)容器复压完成后，拆除漏率超标的法兰，对其密封面进行检查后进行重新装配。

表 3 为超大容器研制过程中检测的法兰泄漏结果及原因分析。

2.3 实现的效果

本次采用氦质谱负压采样检漏方法对真空容器漏孔进行定位，发现定位漏孔及漏孔处理共计耗

表 3 漏率测试结果及原因分析列表

Tab. 3 List of leakage rate test results and analysis of causes

序号	法兰名称	法兰位置	漏率 ($\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$)	原因
1	底部热沉进液接管法兰	容器底部封头	1.5×10^{-6}	密封面存在杂质
2	底部热沉出液接管法兰	容器底部封头	5.7×10^{-6}	密封面存在杂质
3	去污冷屏出液接管法兰	容器底部封头	9.7×10^{-6}	密封圈损伤
4	去污冷屏进液接管法兰	容器底部封头	3.5×10^{-4}	密封圈未压紧
5	活动热沉进液接管法兰	容器底部封头	4.6×10^{-6}	密封面存在杂质
6	水平舱平台穿舱支撑结构法兰	容器水平舱底部	4.2×10^{-4}	密封圈未压紧
7	水平舱平台穿舱结构法兰	容器水平舱底部	1.8×10^{-5}	密封圈未压紧

时 2 天。漏孔处理完成后，启动分子泵抽气系统，并采用氦质谱真空检漏阀对真空容器各密封面进行精确的漏率定位检测，各个密封面位置漏率 $\leq 1.0\times10^{-9}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 。系统总漏率达到 $1.6\times10^{-7}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 。

当前系统已完成联合调试并承接多台套光学遥感器真空热试验为型号任务提供保障。系统联合调试时，在 6 台 DN1250 大口径低温泵同时投入使用且热沉壁板温度低于 100 K 工况下超大型航天遥感器评价系统空载极限压力达到 $9.6\times10^{-6}\text{ Pa}$ 。

在试验过程中投入 3 套大口径低温泵进行获取试验真空度，经试验验证，负载工况下系统真空度 $\leq 7.0\times10^{-4}\text{ Pa}$ ，可满足光学遥感器真空热试验真空度 $\leq 1.3\times10^{-3}\text{ Pa}$ 的需求。本套装置在进行某型号试验时系统真空度曲线如图 12 所示。

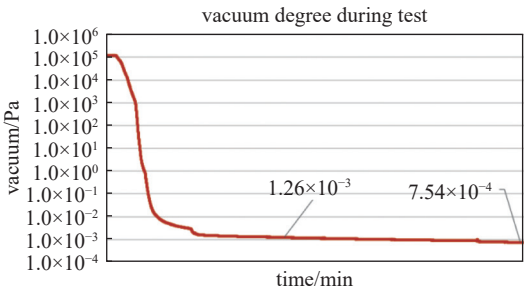


图12 某型号试验时系统真空度曲线

Fig. 12 Vacuum curves of the system during one test

3 总结

本文针对超大型真空容器研制过程中传统泄漏检测方法效率低且耗资大等问题，基于氦质谱检

漏理论, 制定了超大型真空容器漏率检测方法和流程, 提出了在超大型真空容器研制泄漏检测过程中引入氦质谱负压采样法, 有效地解决了因系统存在较大漏点无法启动氦质谱检漏系统而完成泄漏检测的问题, 而且对于法兰接管角焊缝、密封面的检漏工作效率提升了 4 倍。

参 考 文 献

- [1] Chen Xiaoli, Fu Danying. Solutions for space optical remote sensor with large aperture and ultrahigh resolution[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2003, 24(4): 19-24 (陈晓丽, 傅丹鹰. 大口径甚高分辨率空间光学传感器技术途径探讨[J]. *航天返回与遥感*, 2003, 24(4): 19-24(in chinese))
- [2] Zhao Zhenming, Yu Bo, Su Yun, et al. Thermal optical analysis method based on vacuum test[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2013, 34(1): 60-66 (赵振明, 于波, 苏云, 等. 基于真空试验的热光足额集成分析方法[J]. *航天器返回与遥感*, 2013, 34(1): 60-66(in chinese))
- [3] Zhao Zhenming, Wang Bing, Gao Juan. Preliminary research on the thermal design methods of the geosynchronous orbit starting camera[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2010, 31(3): 34-40 (赵振明, 王兵, 高娟. 地球静止轨道凝视型相机热设计与热分析[J]. *航天返回与遥感*, 2010, 31(3): 34-40(in chinese))
- [4] Cao Huiling. A new leak detection method-negative pressure sampling method[J]. *Vacuum Electronic Technology*, 1998(2): 41-45 (曹辉玲. 一种新的检漏方法-负压采样法[J]. *真空电子技术*, 1998(2): 41-45(in chinese))
- [5] Da Daoan, Vacuum Design Manual [M]. Third Edition, Beijing: National Defense Industry Press, 2004.7 (达道安, 真空设计手册[M]. 第三版, 北京: 国防工业出版社, 2004.7(in chinese))
- [6] WU Xiaojian, YAN Rongxin. Leak detection[M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 84-88; (吴孝俭, 闫荣鑫. 泄漏检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 84-88;(in chinese))
- [7] Xu Chenghai, Vacuum engineering technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 387 (徐成海, 真空工程技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 387.(in chinese))
- [8] Yan Zhiping, Huang Shuying. Sensitivity estimation of leak detection method[J]. *China Space Science and Technology*, 2002(1): 59-64 (闫治平, 黄淑英. 检漏方法的灵敏度估算[J]. *中国空间科学技术*, 2002(1): 59-64(in chinese))
- [9] Sun Lichen, Wang Xinya, Wang Li, et al. Leak detection method of spacecraft components[J]. *Spacecraft Environmental Engineering*, 2005(4): 230-233 (孙立臣, 王新亚, 汪力, 等. 飞船部组件的检漏方法[J]. *航天器环境工程*, 2005(4): 230-233(in chinese))
- [10] Ding Qin, Su Wen, Ge Yu, et al. Development of vacuum leak detection equipment for small satellites[J]. *Spacecraft Environmental Engineering*, 2006(4): 169-174 (丁勤, 苏文, 葛宇等. 小卫星真空检漏设备研制[J]. *航天器环境工程*, 2006(4): 169-174(in chinese))
- [11] Chen Haifeng. Application of helium mass spectrometry suction and suction method in the detection of air tightness of electrical penetrations in nuclear power plants[J]. *Science and Technology*, 2095-6835(2019): 15-0042-02. (陈海峰. 氦质谱吸枪法检漏在核电站电气贯穿件气密性检测中的应用[J]. *科技与创新*, 2095-6835(2019)15-0042-02.(in chinese))
- [12] Zhang Lei, Wang Junwei, Fu Chunyu. Research on vacuum system configuration technology of large-scale space environment simulator[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 1672-9242(2018): 06-0001-06. (张磊, 王军伟, 付春雨. 大型空间环境模拟器真空系统配置技术研究[J]. *装备环境工程*, 1672-9242(2018)06-0001-06.(in chinese))