

多腔室容器高温氦检漏技术分析

刘金宏 冯嘉敏 赵守智 范月容 石辰蕾
(中国原子能科学研究院 北京 102400)

摘要: 对较高工作温度和高密封性的密封容器, 焊接组装完成后需要对其进行密封性能检测, 检测环境温度
度为工作温度。为了满足对容器在高温环境下密封性能检测的要求, 需要研制出一套合适的方法和装备。
本文主要介绍了容器高温氦检漏的工作原理、装备的主要构成和高温氦检漏过程。

关键词: 高温; 氦检漏; 容器

0 引言

某工件为多腔室嵌套结构容器, 工作温度约为 700℃, 在该温度下要求氦泄漏率 $< 10^{-11} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。工件由腔室 1、腔室 2 (该腔室分为两部分, 这些腔室均互相连通)、腔室 3 (该腔室分为两个腔室, 腔室互相连通)。为了保证工件在工作温度正常运行, 各腔室介质必须满足设计要求的泄漏率, 因此须对密封边界母材和焊缝进行气密性检测。目前国内外气密性检测应用最广泛、灵敏度最高的密封性检漏方法是氦质谱检漏法。

工件外形尺寸约 $\phi 700 \times 1500 \text{mm}$, 氦检漏温度最高 700℃, 检测漏率最小 $3.0 \times 10^{-11} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ (具体参数要求见表)。用氦质谱检漏仪及简单的工装无法直接检测, 所以需要一套可以在常温和高温环境下检测工件每个腔室整体漏率的设备, 目前国内没有满足此技术指标要求的氦检漏设备, 只能自主进行设计研制。

表 工件各腔室参数表

序号	腔室	温度 /℃	压力 /MPa	漏率要求 ($\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$)
1	腔室 1	700±5	0.1±0.01	$\leq 3.0 \times 10^{-11}$
2	腔室 2	700±5	0.1±0.01	$\leq 5.0 \times 10^{-11}$
3	腔室 3	700±5	0.1±0.01	$\leq 3.0 \times 10^{-11}$

1 氦检原理及方法

氦质谱检漏法是利用氦质谱检漏仪的氦分压力测量原理, 实现被检工件的氦分子泄漏量测量。当被检件密封界面上存在漏孔时, 示漏气体氦气及其他成分的气体均会从漏孔泄出, 泄漏出来的气体进入氦质谱检漏仪后, 由于氦质谱检漏仪的选择性识别能力, 仅给出气体中的氦气分压力信号值。在获得氦气信号值的基础上, 通过标准漏孔对比的方法就可以获得漏孔对氦泄漏量。

根据工件的结构和要求, 密封检测需要采用三种检漏方法: 喷氦法、吸枪法和真空室法。

1.1 喷氦法

利用辅助真空泵或检漏仪对被检件内部密封腔室抽

真空, 采用喷吹的方法在被检产品外表面施加氦气, 当被检件表面有漏孔时, 氦气就会通过漏孔进入被检产品内部, 再进入氦质谱检漏仪, 从而实现被检件泄漏率的测量。这种方法可以判断被检件在正常检测环境下的泄漏位置并测量漏率, 该漏率为单点漏率。

1.2 吸枪法

被检件内充一定压力的示漏气体 (氦气), 当被检件表面有漏孔时, 氦气就会通过漏孔进入被检件外表面的周围大气环境中, 再采用吸枪法检测被检件周围大气环境中氦气浓度增量, 从而实现被检件泄漏率测量。用吸枪法可以反应出被检件漏点和漏率, 该漏率为单点漏率。

1.3 真空室法

将被检工件整体放入真空室中, 真空室与辅助抽真空系统和氦质谱检漏仪相连, 被检产品的充气接口通过连接管道引出真空室, 再与氦气源相连, 对真空室进行抽真空, 对被检件充注氦气至指定压力, 当被检工件腔室密封界面有漏孔时, 氦气就会通过被检件腔室的漏孔进入到真空室中, 进而进入氦质谱检漏仪, 从而反映出被检件的整体漏率值。由于项目工件运行温度大于 700℃, 为了检验高温下工件各腔室的泄漏率, 需要进行高温真空室法检漏。为此, 本项目配备了可升温真空室, 采用真空室内壁辐射加热转工件的方式, 按照热应力计算出的升温速率进行加热, 保证项目工件各处的温度保持在合理的温度范围以内。检漏时, 为了提高检漏效率, 提早发现漏孔, 按照常温、200℃、400℃、700℃四个温度梯度进行检漏。

项目工件每形成一个腔室, 用喷氦法检出腔室负压状态下的漏孔, 用吸枪法粗筛出正压较大漏孔。两种方法检测合格后, 再将工件放入真空室中, 真空室抽真空到 $\leq 10^{-3} \text{Pa}$, 工件腔室充氦气至指定压力 (绝对压力 0.11MPa), 常温下检测腔室的整体漏率。如检测合格, 将真空室和工件腔室抽真空到 $< 10^{-3} \text{Pa}$, 升温到检测温度进行真空室法检测。

2 系统功能及构成

根据氦质谱检漏方法和原理, 经过各方调研研究, 设计了一套满足工件常温与高温氦检漏的热真空检测台架。热真空检测台架可在 $5\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 满足泄漏率 $< 1.0\times 10^{-11}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 漏孔的检漏, 检测的工件最大尺寸为 $\phi 700\text{ mm}\times 1500\text{ mm}$, 可同时 5 个腔室进行检漏。热真空检测台架分为常温检漏平台和高温检漏平台。

常温检漏平台用于检测工件腔室负压状态下焊缝处的漏点和漏率, 由氦质谱检漏仪、旁抽系统、检漏平台和工装组成, 检测漏率 $\leq 1.0\times 10^{-11}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 。由于工件体积较大, 为了提高检漏效率, 采用干式真空泵和分子泵作为旁抽系统。配备 1 支皮拉尼真空计用于显示分子泵前级真空度, 1 支全量程真空计用于显示被检腔室内部真空。

高温检漏平台主要用于工件腔室在不同温度下整体漏率的检测, 由检漏模块、真空系统、真空室、加热组件、水冷组件、控制系统组成。真空系统图如图 1 (有两个腔室抽真空端口为备用端口) 所示, 高温检漏平台模型图如图 2 所示。

检漏模块包括检漏仪、旁抽系统和充气系统。检漏仪管路配备辅助抽真空系统, 包括干式真空泵和分子泵系统, 用于对被检腔室进行抽真空或对氦质谱检漏仪进行增压。配备皮拉尼真空计用于显示低真空度, 配备全量程复合真空计用于显示高真空度。充气系统用于对各腔室进行充气处理, 包括充气管路、阀门、压力计、氦气瓶等。充气管路采用洁净 316 不锈钢管, 充气管路在真空室内采用金属密封, 保证 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下漏率 $< 1\times 10^{-11}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 。炉体上安装了四极质谱计 1 台。

真空系统采用分子泵系统和罗茨泵干泵系统。为了加快抽气速率, 粗抽采用干式涡旋泵和罗茨泵组合, 高真空采用四组磁悬浮分子泵系统, 真空室极限真空小于 $5\times 10^{-4}\text{ Pa}$, 并在 3h 内达到 $5\times 10^{-4}\text{ Pa}$ 。真空测量: 在真空室内采用 1 组皮拉尼真空计、1 组冷阴极电离规、2 组全量程复合真空规, 做到高低真空均有备份。同时采

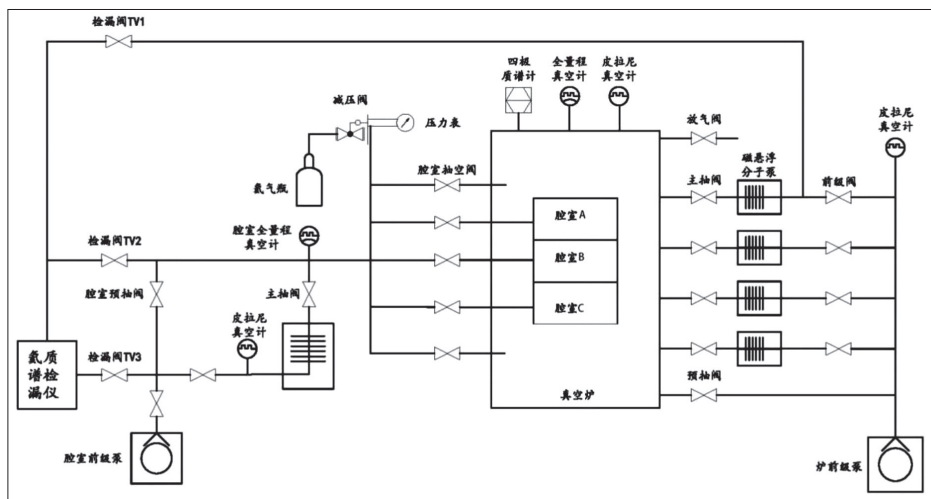


图 1 高温检漏平台系统图

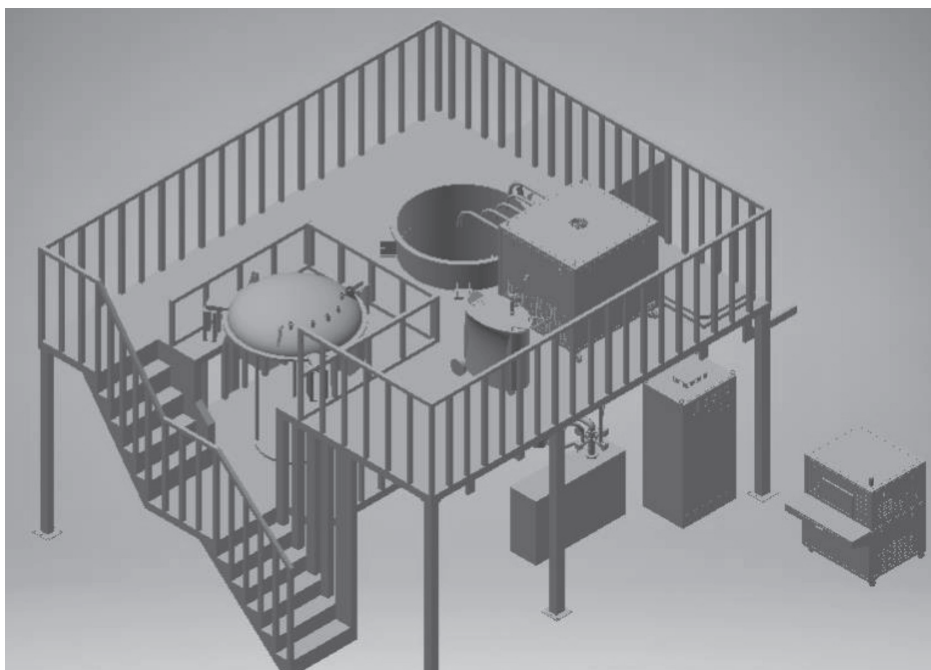


图 2 高温检漏平台模型图

用 1 组皮拉尼真空计用于监视分子泵前级真空度和管路真空度。

高温检漏平台配备一个高温真空室, 型式为立式真空炉。工件采用吊装方式放入炉体。高温真空室分为炉体、炉盖和吊篮三部分。

真空室外径为 $\phi 1200\text{ mm}\times 2000\text{ mm}$, 炉体从外向内分别是炉壳、反射屏和加热器。加热器用于对工件进行辐射加热, 采用高温合金 Cr20Ni80 材料制成, 通过绝缘材料挂在反射屏内部。反射屏为 5 层, 内 2 层为钨板, 外 3 层为不锈钢板, 表面经过抛光处理, 用于降温。炉壳侧壁布置 6 个电极穿过炉壳、反射屏与加热器相连, 用于对 3 组加热器供电, 并布置 3 个热电偶温度计穿过加热器伸入炉内。炉壳底部和炉盖设置专用通道与真空系统相连。

水冷系统为炉体、炉盖、分子泵、电极、热交换器和真空泵等发热部件提供降温用冷却水,防止设备温度过高和人员烫伤。水冷系统采用分体冷水机组,分为水循环机组和制冷机,制冷机位于室外,将冷媒穿墙传输至室内。设备进水管道上各分支分别装有流量开关。冷却水流量不足时设备将报警,同时自动采取保护措施。

控制系统采用PLC实现对整个系统进行总体控制,具有超温、过流、断水、误操作等联锁保护功能,并设有简单故障自诊断功能,能及时显示故障源并且有声光报警系统。

控制面板布置了真空计、压力计、分子泵控制器等仪器,便于观测和操作所有部件和阀门,可对任意一个腔室进行抽真空、充气,并通过真空室和相邻腔室进行漏率检测。

3 高温真空氦检漏工艺过程

工件是多腔室嵌套而成结构,示意如图3所示。各



图3 工件结构示意图

腔室高温氦检试验的顺序也是根据各腔室形成顺序依次进行,其试验顺序为腔室1→腔室2→腔室3。

工件腔室检漏试验过程基本相同,但每个腔室根据其特点检漏流程有不同增减。

3.1 腔室1 高温真空氦检

腔室1形成后,检漏时1个接管与检漏平台相连,其中接管用盲板封堵。

在常温检漏平台上,1个气体入口管与检漏平台相连,利用检漏平台将腔室1室真空抽至 $\leq 1 \times 10^{-3} \text{Pa}$,关闭抽真空系统,打开检漏仪和标准漏孔(漏率 $1 \times 10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$),标定常温检漏平台系统最小可检漏率(按照公式1确定),然后关闭标准漏孔。

$$Q_{\min} = I_n / (I_s - I_0) \cdot Q_s \quad (1)$$

式中: $Q_{\min}$ ——最小可检漏率, $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$;

I_s ——标准漏孔打开后稳定的输出值;

I_n ——噪声或最小可读信号;

I_0 ——本底;

Q_s ——标准漏孔的检定标称值, $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

首先利用喷枪将浓度为99.99%的氦气喷至系统与工件相连的一个气体入口管接口及其余气体入口管封堵处,排除接口处的泄漏,然后利用喷氦法检测被检焊缝处的漏率。检测时,喷枪的喷嘴与被检部位的距离保持小于6mm,喷枪的扫描速度保持小于8mm/s。喷枪扫描应从被检件的最上部分开始,逐渐向下扫描,避免氦气飘散影响检漏准确性。漏点处漏率按照公式2确定。

$$Q = (I - I_0) / (I_s - I_0) \cdot Q_s \cdot 1/D \quad (2)$$

式中:

Q ——被检件漏率, $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$;

I ——漏点处喷氦后稳定的输出值;

D ——喷枪喷出的氦气浓度,浓度百分数, %。

喷氦法检漏完成后,利用吸枪法对腔室1进行正压漏率。将腔室1吊至高温检漏平台上的安装平台上,与真空室顶盖上的检漏系统管路连接,对腔室1抽真空,采用喷氦法对管路连接接口进行喷氦检漏,合格后对腔

室1充入0.1MPa的氦气,用吸枪垂直于被检部位缓慢移动,吸枪探头距离被检表面1~3mm,吸枪移动速度不大于10mm/s,当检漏仪有变化时,记录漏孔位置。由于吸枪法的局限性,检测的最小漏率约为 $1 \times 10^{-8} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$,所以吸枪法只能在腔室1吊入真空室前进行大漏孔的排查。

腔室1吊入真空室,在未升温前对腔室进行整体漏率检测。

将真空室和腔室1抽真空,打开标准漏孔,在控制面板(图4)上将检漏仪切换到检测真空室氦气管路,测量系统的最小可检漏率和系统反应时间,关闭标准漏孔,待检漏仪信号稳定后测定系统本底 I_0 和噪声 I_n 。最小可检漏率按照公式3确定。

$$Q_{\min} = I_n / (I_s - I_0) \cdot Q_s \quad (3)$$

式中: $Q_{\min}$ ——最小可检漏率, $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$;

I_s ——标准漏孔打开后稳定的输出值;

I_n ——噪声或最小可读信号;

I_0 ——本底;

Q_s ——标准漏孔的检定标称值, $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

将腔室1充入0.1MPa的氦气,检漏仪与真空室相连,测出的数值经处理后即为腔室1在常温下的总体漏率。总漏率按照公式4确定。

$$Q = (I - I_0) / (I_s - I_0) \cdot Q_s \cdot 1/D \quad (4)$$

式中:

Q ——被检件总漏率, $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$;

I ——检漏仪稳定的输出值;

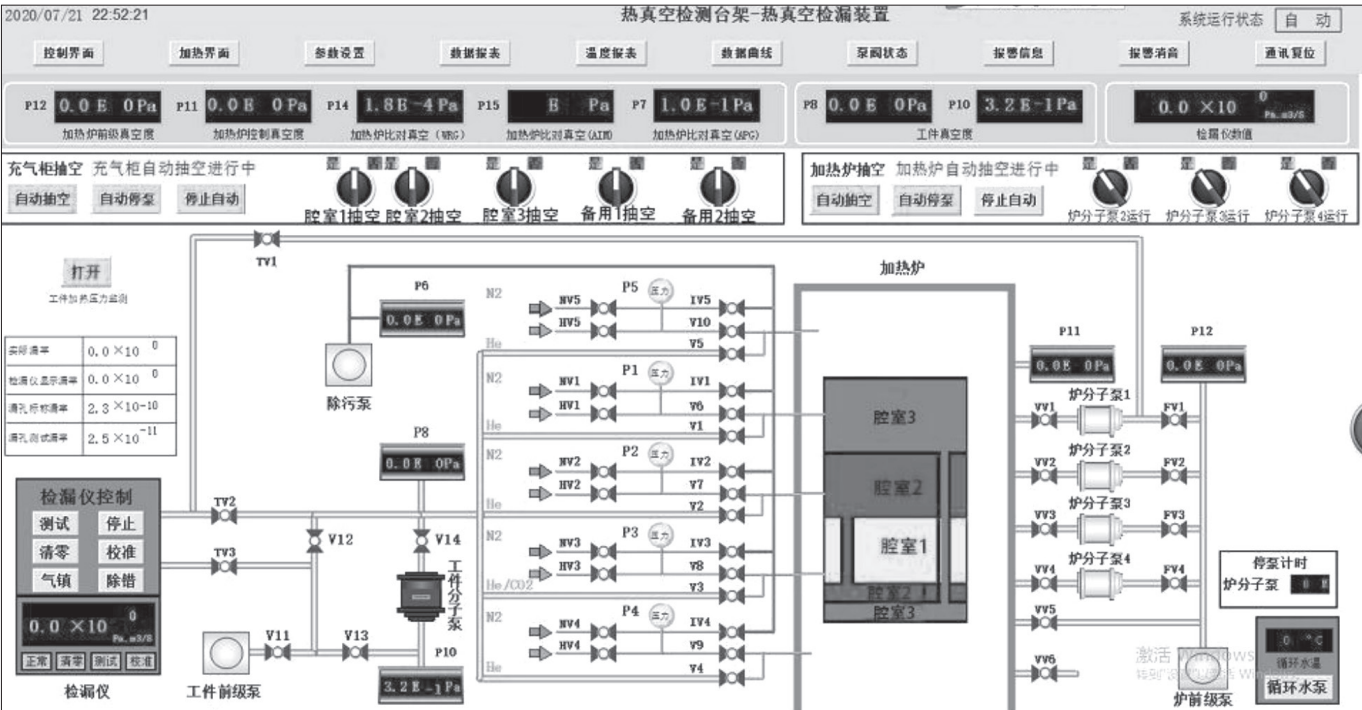


图 4 高温检漏平台控制面板

D——被检件内部充注的氦气浓度，浓度百分数，%。

常温检测合格后，腔室 1 充入 0.1MPa（外部连接有缓冲罐，补偿气体压力变化）的氦气，输入加热工艺开始加热，当工件温度达到 200℃时，打开检漏仪与真空室之间的截止阀开始检测，如漏率不符合要求，降温后取出腔室 1 进行排查补焊，重复之前的检测；如漏率符合要求，继续升温到 400℃，重复上述步骤，直到 700℃检测完成。检验过程中发现漏率不符合要求，降温后取出腔室 1 进行排查补焊，重复之前的检测。按照温度降温程序降到室温后取出腔室进行下一层腔室 2 的组装焊接。

3.2 腔室 2 高温真空氦检

腔室 2 形成后，留一个接口与检漏系统相连，其余接口封堵。

在常温检漏平台上，与腔室 1 检漏工艺基本相同，先测定系统可检最小漏率，然后用喷氦法检验所有焊缝的泄漏情况，检测完成后向腔室 1 充 0.1MPa 的氦气，腔室 2 与检漏仪相连，检验腔室 1 与腔室 2 之间是否因焊接应力造成泄漏。

工件吊至高温检漏平台的安装平台上，将腔室 2 和腔室 1 同时与高温检漏平台检漏系统相连，喷氦法检验各接口处的漏率，然后向腔室 2 和腔室 1 充 0.1MPa 的氦气，利用吸枪法检测工件与检漏系统之间接口漏率和腔室 2 所有焊缝的正压漏率。检漏合格后将工件吊入真空室，确定系统的最小可检漏率，然后向腔室 2 充 0.1MPa 的氦气，检漏仪与真空室接通，测出常温下腔室 2 的整体漏率。

常温检测合格后，腔室 1 充入 0.1MPa 的氦气，腔室 2 抽真空，输入加热工艺开始加热，当工件温度达到 200℃时，打开检漏仪与腔室 2 之间的截止阀，检测腔室 1 与腔室 2 之间的漏率，合格后将腔室 2 充入 0.1MPa 氦气，打开检漏仪与真空室之间的截止阀，检测腔室 2 与真空室之间的焊缝漏率情况。如漏率符合要求，继续升温到 400℃，重复上述步骤，直到 700℃检测完成。检验过程中发现漏率不符合要求，降温后取出工件进行排查补焊，重复之前的检测。按照温度降温程序降到室温后取出工件，进行下一层腔室 3 的组装焊接。

3.3 腔室 3 高温真空氦检

腔室 3 形成后，留一个接口与检漏平台系统相连，其余接口封闭。因腔室隔板中间有 3 个贯穿孔组件，导致腔室 3 在此处下为开口状态，需要做专用工装密封，见图 5。

在常温检漏平台上，与腔室 1 检漏工艺基本相同，先测定系统可检最小漏率，然后用喷氦法检验腔室 3 所有焊缝的泄漏情况，检测完成后向腔室 2 充 0.1MPa 的氦气，腔室 3 与检漏仪相连，检验腔室 3 与腔室 2 之间是否因焊接应力造成泄漏。

工件吊至高温检漏平台的安装平台上，将腔室 3、腔室 2 和腔室 1 同时与高温检漏平台检漏系统相连，喷氦法检验各接口处的漏率，然后向腔室 3、腔室 2 和腔室 1 充 0.1MPa 氦气，利用吸枪法检测工件与检漏系统之间接口漏率和腔室 3 所有焊缝的正压漏率。检漏合格后将工件吊入真空室，确定系统的最小可检漏率，然后向腔室 3 充 0.1MPa 的氦气，检漏仪与真空室接通，测

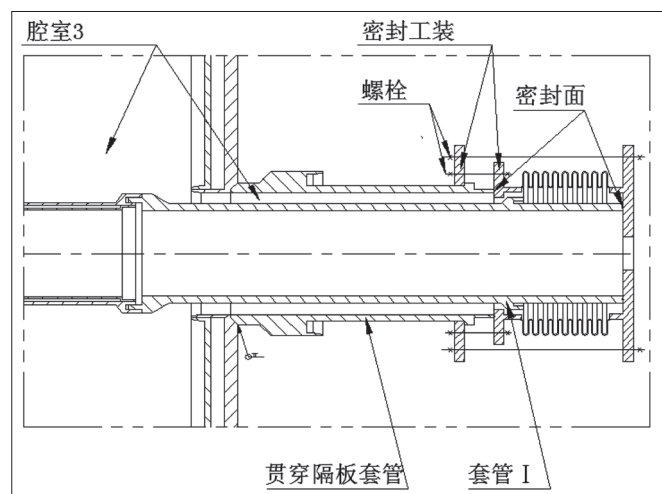


图5 贯穿隔板套管处密封图

出常温下腔室3的整体漏率。将腔室2抽真空,切换检漏仪到腔室2,检测腔室3和腔室2之间的漏率。

常温检测合格后,腔室1充入0.1MPa的氦气,腔室3、腔室2抽真空,输入加热工艺开始加热,当工件温度达到200℃时,切换检漏仪到腔室2,检测腔室1与腔室2之间的漏率,合格后切换检漏仪到真空室,检验腔室1与真空室之间的漏率;腔室2充入0.1MPa的氦气,切换检漏仪到腔室3,检测腔室2向腔室3泄漏漏率,切换检漏仪到真空室,检验腔室2与真空室之间的漏率;合格后向腔室3充入0.1MPa的氦气,将腔室2抽真空,切换检漏仪到腔室2,检测腔室3向腔室2泄漏漏率,切换检漏仪到真空室,检验腔室3与真空室之间的漏率。如漏率符合要求,继续升温到400℃,重复上述步骤,直到700℃检测完成。检验过程中发现漏率不符合要求,降温后取出工件进行排查补焊,重复之前的检测。按照温度降温程序降到室温后取出工件,进行下一层腔室4的组装焊接。

4 试验过程与结果

工件制造完成后,对工件进行了高温氦检,步骤如下:

(1) 利用常温检漏平台,采用喷氦法检测腔室1所有焊缝,发现下隔板有3处焊缝漏孔漏率为 $10^{-10}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$,不满足设计要求。经补焊后泄漏率达到 $4.5\times 10^{-11}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$,由于与设计要求相差甚微,无法确定漏点,决定先放入

真空室进行升温检测。

(2) 将工件吊至高温检漏平台的安装平台上,用喷氦法和吸枪法检测工件与系统连接处和各焊缝漏率。

(3) 将工件吊入真空室,在常温下用真空室法测量腔室1室漏率为 $\leq 3.1\times 10^{-10}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$,不满足要求。

(4) 升温到200℃,腔室1的漏率为 $6.6\times 10^{-4}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 。

(5) 按照降温程序降到室温,取出工件。

(6) 在常温检漏平台上用喷氦法复检定位,确定上隔板焊缝一处漏孔位置。经补焊后检验,泄漏率为 $\leq 1.0\times 10^{-13}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$,满足设计要求。

(7) 将工件吊入真空室进行高温氦检,在200℃、400℃、700℃均检验合格。

(8) 按照降温程序降到室温,降温的过程在400℃、200℃、常温下进行了重复检验,泄漏率均满足要求。

(9) 然后按照程序对后续腔室进行了高温氦检,结果均满足要求。

5 结论与建议

通过多腔室容器的高温氦检试验,并对试验工艺分析和试验数据结果比对,验证了试验平台设置合理、试验工艺能实现检测目的,此高温氦检技术满足多腔室容器的高温密封检测要求。

根据高温真空氦检漏试验经验,对试验台架和工艺过程提出如下建议:

(1) 高温真空氦检试验每次需要约15~20天,所需时间较长。经分析,工件在加热的过程中为了避免工件不同部位温差过大引起热应力破坏密封腔室边界完整性,采用的辐射加热方法需要缓慢地升温才能保证温差在可控范围内,导致加热和冷却时间较长。建议采用对流的方式进行加热,如向密封腔室内充高温气体,经计算加热时间可节省5~7天。

(2) 为了掌握高温氦检泄漏的规律,建议每50~100℃进行一次检验。

参考文献:

- [1] 达道安. 真空设计手册(第3版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [2] 中国航天科技集团. QJ3123-2000 氦质谱真空检漏方法. 北京: 中国航天标准化研究所出版, 2000.