

引用格式: 王瑞英, 钟啸晨, 雷加静, 等. 高温和高压下吊装孔蒸汽微泄漏特性测量的理论与实验研究[J]. 中国舰船研究, 2024, 19(增刊1): 101–108.
WANG R Y, ZHONG X C, LEI J J, et al. Method and experimental study for measuring micro-leakage characteristics of steam from lifting hatch at high temperature and pressure[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2024, 19(Supp 1): 101–108 (in Chinese).

高温和高压下吊装孔蒸汽微泄漏特性 测量的理论与实验研究

王瑞英¹, 钟啸晨², 雷加静^{*}, 曹林冲¹, 张冰¹

1 中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064

2 华中科技大学 能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074

摘要: [目的] 为了研究应用于核动力装置的吊装孔在事故工况下的密封性能, 搭建一套能够实现蒸汽微泄漏量定量测量的实验装置。[方法] 在该装置中, 0.66 MPa 下的饱和蒸汽被充入加压腔以模拟事故工况, 泄漏的蒸汽则通过敷设了保温层的收集腔来收集, 并且不会发生冷凝。实时监测收集腔内温度、湿度和压力等参数的变化情况, 以推算蒸汽的泄漏率。[结果] 实验结果表明: 采用厚度为 1.5 和 3.0 mm 核级垫片的吊装孔模型的蒸汽泄漏率分别为 13.93 和 11.91 g/24 h, 均能满足低漏设计要求, 其中, 3.0 mm 垫片的密封性能更优。对同种垫片和同样压力下的干空气和蒸汽测量的结果进行分析, 得到的密封系数 nd^4 十分接近, 验证了实验装置对蒸汽微泄漏量测量的准确性。[结论] 所提方法可推广应用于各种密封结构或压力系统, 为事故工况下堆舱密封性评估提供了新的测量思路。

关键词: 吊装孔; 事故工况; 蒸汽; 微泄漏; 测量

中图分类号: U664.156

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03412

Method and experimental study for measuring micro-leakage characteristics of steam from lifting hatch at high temperature and pressure

WANG Ruiying¹, ZHONG Xiaochen², LEI Jiajing^{*}, CAO Linchong¹, ZHANG Bing¹

1 China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China

2 School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: [Objectives] This study focuses on the sealing performance of lifting hatches applied to nuclear power plants under accidental working conditions. [Methods] An experimental setup is built to achieve the quantitative measurement of steam micro-leakage. In this device, saturated steam at 0.66 MPa is charged into a pressurized chamber to simulate accident conditions, the leaking steam is collected through a collection chamber with an insulation layer, and no condensation occurs. The changes in temperature, humidity and pressure in the collection chamber are monitored in real time to estimate the steam leakage rate. [Results] The experimental results show that the steam leakage rates of the lifting hatch models with 1.5 mm and 3.0 mm composite gaskets are 13.93 g/24h and 11.91 g/24h respectively, both meeting the low leakage design requirements, with the 3.0 mm gasket providing superior sealing performance. An analysis of the dry air and steam measurements with the same gasket and at the same pressure shows that the sealing coefficients nd^4 obtained for both are very close, which verifies the accuracy of the experimental device for steam microleakage measurements. [Conclusions] The proposed steam microleakage measurement method can be extended to various sealing structures and pressure systems, and provides a new measurement idea for evaluating the sealability of stack chambers under accident conditions.

Key words: lifting hatch; accident conditions; steam; micro-leakage; measurement

收稿日期: 2023-06-15 修回日期: 2023-10-09

作者简介: 王瑞英, 1992 年, 女, 硕士, 工程师

雷加静, 1984 年, 男, 硕士, 高级工程师

*通信作者: 雷加静

0 引言

小型核动力装置因重量轻、体积小、产能高等优势,被广泛应用于发电^[1]、航空^[2]、深海^[3-4]等多个领域。对于核设施而言,必须确保任何情况下,特别是事故工况下的放射性包容性。大口径吊装孔是进出核装置舱段的重要通道口之一,也是舱段潜在泄漏风险的主要来源之一,必须对其在事故工况下的密封性能进行准确评估。

大口径吊装孔采用了螺栓-垫片-法兰连接密封。这类结构被广泛应用于工业领域,其密封性和可靠性研究已得到许多研究者的关注。冯秀等^[5]提出一种紧密性方法对螺栓法兰金属垫片连接结构的可靠性进行了设计和评估。郭秭君等^[6]应用有限元方法对连接结构的完整性和密封性进行了研究。刘磷等^[7]指出大口径法兰存在垫片接触应力不均匀的情况,最大应力出现在垫片外缘。进一步的实验研究表明,垫片外缘最大应力较平均应力对连接结构密封性影响更大。

除了介质压力,温度对螺栓-法兰-垫片连接结构密封性的影响也不可忽略。张琼^[8]对高温环境下设备闸门螺栓-法兰-垫片连接结构进行失效分析,指出该结构长时间处于高温状态下会因蠕变松弛、老化失效等原因造成泄漏;董智等^[9-10]对高温状态下的螺栓-法兰-垫片密封性能进行了研究,结果显示温度升高时垫片应力持续减小,在高温状态下易造成密封结构失效。

相比应力分析和材料研究,泄漏率对连接结构密封性的指示更为直接,是设计选型和可靠性评估的直接检验指标。吕祥奎等^[11]提出了大口径耐压闸门的泄漏率预测模型,并通过实验验证了模型的准确性。但他们的实验研究工况并没有包含高温和水蒸气,与核设施在事故工况下的高温、高压、高湿环境相去甚远。

为明确吊装孔在事故工况下的泄漏特性,需要在与事故工况相当的高温、高压和高湿的环境下测量其密封结构的泄漏量。一般采用同样温度下的饱和蒸汽代替实际事故工况下的湿空气。然而,相比通常的干空气介质,采用水蒸气为介质的密封系统泄漏量的测量要更加困难。因为在泄漏过程中,水蒸气会发生较大的状态变化,尤其是温度下降会导致蒸汽冷凝,常见的流量监测或压力监测方法都难以获取精确的泄漏量。对泄漏率较大的系统,通常采用收集泄漏介质的冷凝液再称重的方法^[12],但该方法应用于微泄漏量测量时存在精度不足的问题。其他一些检漏手段,如

烛光法、薄膜法、红外法^[13,14]、音频法^[15]、声波法^[16]等,都仅适用于蒸汽泄漏的定性检测,不能达到定量分析的目的。实际上,与事故工况下吊装孔或闸门的泄漏特性相关的实验研究并不多,蒸汽泄漏量的定量分析更是鲜有报道。

针对上述难点,本文将搭建一套能够实现蒸汽微泄漏量定量分析的实验装置,对吊装孔密封结构的泄漏特性开展研究。该装置通过在密封结构连接的加压腔中充入饱和蒸汽的方法模拟事故工况高温、高压和高湿的环境;通过在密封结构外部设置收集罩,确保罩内蒸汽不跑漏、不冷凝的同时,监测收集罩内压力、温度和相对湿度的变化;对监测到的加压腔和收集罩状态参数进行分析,计算蒸汽的微泄漏量。基于该实验台架,比较1.5和3.0 mm不同厚度的核级垫片的密封性,并基于界面泄漏机理模型验证蒸汽泄漏测试的准确性。

1 吊装孔密封结构及实验工况

本文大口径吊装孔密封结构工装如图1所示。一个外径为700 mm的耐压筒体,通过螺栓-法兰-垫片密封结构与平面加筋盖板连接,形成加压腔。加压腔盖板上分布着用于加强结构的6条纵向和1条横向的加强筋,用于提高整体强度。

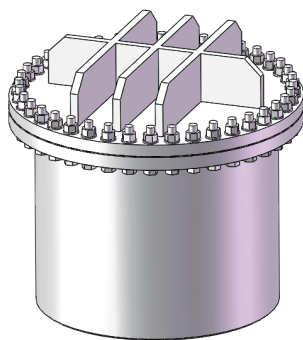


图1 吊装孔密封结构工装件模型图

Fig. 1 Lifting hatch sealing structure tooling model

工装件的螺栓-法兰-垫片的连接结构如图2(a)所示。吊装孔的法兰和盖板之间采用密封垫片密封,并用螺栓连接。密封垫片选用核级垫片,该垫片是一种压缩纤维板式的复合金属垫片,由丁腈橡胶NBR和芳纶/玻璃纤维辊压而成。垫片与法兰面同宽,其平面结构如图2(b)所示。为进一步探究垫片厚度对吊装孔盖泄漏率的影响,实验模型分别选用生产工艺较为成熟的1.5和3.0 mm的核级密封垫片。

根据GB/T 150.3—2011,螺栓设计载荷可根据

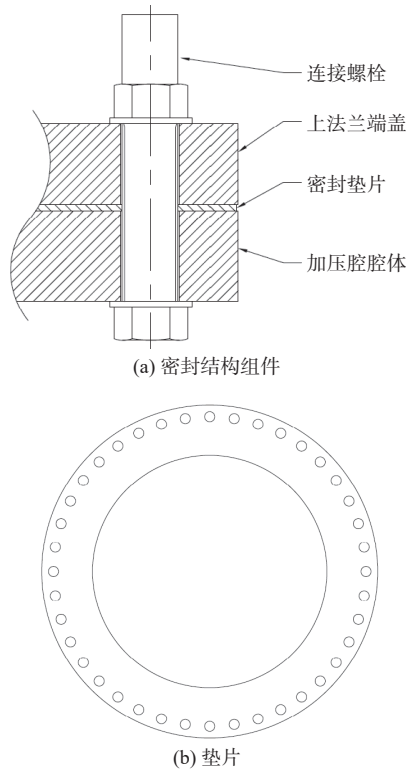


图 2 吊装孔密封结构示意图
Fig. 2 Diagram of lifting hatch seal structure

垫片预紧比压力 y 和垫片系数 m 确定:

$$W_{m1} = \frac{\pi}{4} D_G^2 p + 2b\pi D_G m p \tag{1}$$

$$W_{m2} = b\pi D_G y \tag{2}$$

式中: W_{m1} 为操作工况下需要的最小螺栓载荷; W_{m2} 为预紧垫片需要的最小螺栓载荷; D_G 为垫片压紧应力中心圆处的直径; b 为垫片的有效密封宽度; p 为容器内介质压力。两者中的最大值即为螺栓的设计载荷 W_B , 螺栓预紧力为 $F_n = \frac{W_B}{40} = 135 \text{ kN}$ 。

实验分为预实验和正式实验。预实验与正式实验的压力相同, 但实验介质为常温下的空气。正式实验的介质为高温、高压的饱和蒸汽。两种工况的参数如表 1 所示。

表 1 测试介质及工况参数
Table 1 Test medium and operating parameters

模拟工况	测试介质	工况压力(绝压)/MPa	工况温度/℃
预实验工况	干空气	0.66	30.00
事故工况	饱和蒸汽	0.66	162.59

2 垫片密封原理及泄漏模型

本文吊装孔密封结构形式为螺栓-法兰-垫片密封, 属于静密封。垫片静密封原理如图 3 所

示。法兰在螺栓预紧力的作用下, 密封面之间的垫片被压紧变实, 如图 3(b) 所示。施加于单位面积的压紧应力必须达到一定数值, 才能使垫片变形, 将密封面上由机械加工形成的微小孔隙填满, 形成预密封。所需要的压紧应力被称为垫片的密封比压, 单位为 MPa。密封比压主要取决于垫片材质, 但垫片宽度和厚度、法兰尺寸和螺栓个数等因素也会对密封比压产生影响。

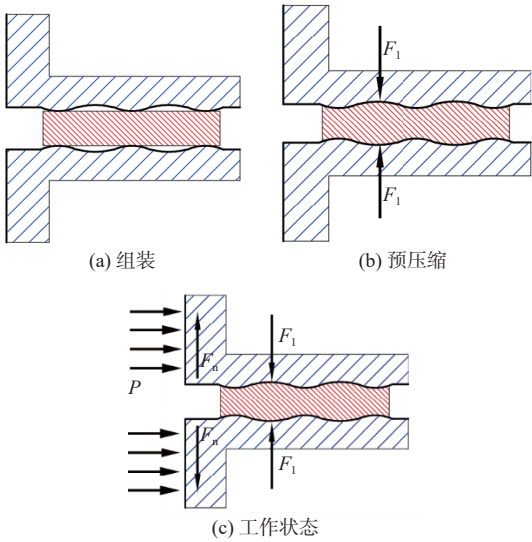


图 3 垫片静密封原理图
Fig. 3 Gasket static sealing principle

事故工况下, 安全舱内介质压力升高。介质内压形成的轴向力使螺栓被拉伸, 密封面沿着彼此分离的方向移动, 降低密封面与垫片之间的压紧应力。若压紧应力不能满足密封比压的需求, 就会导致密封失效。为满足事故工况下的密封性, 吊装孔的螺栓预紧力大小以及垫片的选型非常重要, 需要反复试错来验证其在事故工况下的密封性能。而泄漏率的大小是密封结构密封性能最直接的指标, 因此泄漏实验是最好的密封性能检验方法。

根据垫片密封原理, 泄漏量的大小与密封界面和垫片内部微小泄漏通道的大小和数目有关。将微小的泄漏通道视作直径为 d 的毛细管, 根据毛细管流动理论, 可得通过密封面连接处每毫米长的介质流量公式^[7]:

$$q_m = n \frac{d^4}{b} \frac{\rho}{\eta} (p_1 - p_2) \tag{3}$$

式中: q_m 为泄漏质量流量; n 为密封面周围每 1 mm 直线长度上的毛细管数目; d 为毛细管的直径; b 为密封面接触宽度; ρ 为介质密度; η 为泄漏介质的动力黏度; $(p_1 - p_2)$ 为密封面两侧的压力差。其中毛细管数目 n 与毛细管直径 d 的 4 次方之间的乘积 nd^4 取决于接触密封和垫片变形特性, 需

通过实验来获得。因此,事故工况下实验工作的微泄漏量实验对满足低漏标准的吊装孔的设计和开发有着重要意义。

3 吊装孔密封实验

3.1 实验装置

本文所采用的泄漏蒸汽定量测量系统图如图 4 所示。系统主要部件包括一个加压腔、收集罩、蒸汽发生器、数据采集分析系统以及若干温度、压力和湿度的测量仪表。设定工况下的饱和蒸汽由蒸汽发生器产生后,通过进气通路直接进

入加压腔。加压腔与吊装孔工装件连接形成密封高压空间,微量的蒸汽通过吊装孔法兰与垫片的密封界面泄漏至外部收集罩。收集罩亦为密封容器,外侧敷设保温层及加热装置。温控系统控制加热系统,使收集腔与加压腔的温度保持一致,以确保通过气体形式逸散到收集腔内的泄漏蒸汽不会冷凝。收集腔内的温度、压力和湿度因为泄漏的蒸汽而发生变化,这些变化由高精度温湿度传感器和压力表采集,并传送至数据采集分析系统内进行处理,通过公式计算间接测量加压腔的蒸汽泄漏率。实验结束后,可通过放气管道依次对加压腔和收集腔进行卸压。

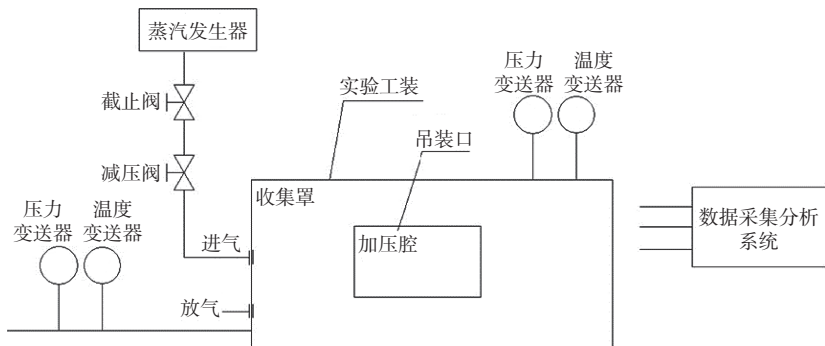


图 4 泄漏蒸汽定量测量装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of leakage vapor quantitative measuring device

3.2 泄漏质量计算方法

泄漏蒸汽是以气体形式进入收集腔并与收集腔内的气体混合。由于收集腔压力略高于大气压,温度远高于环境温度,混合气体及其组成气体均可视为理想气体。通过理想气体状态方程由某一时刻压力、温度、体积等数据求得对应时刻下的混合气体质量。由于收集罩密封性能良好,混合气体的质量变化可视为仅由蒸汽泄漏造成,某一时间段内混合气体的质量变化量即为蒸汽泄漏量。因此,蒸汽泄漏量可以通过收集腔气体参数计算获得,具体计算过程如下。

根据收集腔内的压力表和温湿度变送器示数,可实时获得收集腔内的压力、温度和相对湿度等数据。测试过程中任意时刻 t_1 有对应的压力 P_1 、温度 T_1 和相对湿度 U_1 。根据相对湿度的定义可知:

$$U = \frac{P_{\text{vapor}}}{P_g} \quad (4)$$

式中: P_{vapor} 为水蒸气分压; P_g 为相同温度下的饱和蒸汽压,单位均为 kPa。

由式(4)以及 T_1 所对应的饱和蒸汽压力 P_{s1} 和 U_1 ,可以求得收集腔内 $P_{\text{vapor},1}$ 。根据道尔顿分

压定律,可求得 t_1 时刻下收集腔内干空气分压 $P_{\text{air},1}$ 为:

$$P_{\text{air},1} = P_1 - P_{\text{vapor},1} \quad (5)$$

混合气体的总质量为干空气和水蒸气质量的总和。根据理想气体状态方程,可得如下关系式:

$$m_{\text{total},1} = m_{\text{air},1} + m_{\text{vapor},1} = \frac{M_{\text{air}} P_{\text{air},1} V}{RT_1} + \frac{M_{\text{vapor}} P_{\text{vapor},1} V}{RT_1} \quad (6)$$

式中: $m_{\text{total},1}$, $m_{\text{air},1}$ 和 $m_{\text{vapor},1}$ 分别为 t_1 时刻收集腔内的混合气体、干空气和水蒸气的质量; R 为摩尔气体常数,其值为 $8.31 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; M_{air} 和 M_{vapor} 分别为干空气的摩尔质量 29 g/mol 与水蒸气的摩尔质量 18 g/mol ; n 为气体的物质的量,单位为 mol。

同理可得到任意时刻 $t_2(>t_1)$ 下收集腔内的总质量 $m_{\text{total},2}$,从而得到 t_1 至 t_2 时间段收集腔内气体的变化量 Δm :

$$\Delta m = m_{\text{total},2} - m_{\text{total},1} \quad (7)$$

在收集腔密封性良好的前提下,这一气体质量变化可视为仅由加压腔内的蒸汽泄漏造成,即这一气体质量变化量 Δm 为 $t_1 \sim t_2$ 时刻泄漏的蒸汽质量,可以计算得到 $t_1 \sim t_2$ 时刻的平均质量泄漏率 Q_m 及平均体积泄漏率 Q_v :

$$Q_m = \frac{\Delta m}{t_2 - t_1} \tag{8}$$

$$Q_v = \frac{\Delta m}{(t_2 - t_1)\rho_{\text{vapor}}} \tag{9}$$

3.3 测量不确定度与置信区间

由式(6)可以得到对应时刻下收集腔的气体总质量 m_{total} , 通过不同时刻的计算可以得到多组 m_{total} 与 t 的对应关系。为了更加准确地得到泄漏率的实验值, 采用最小二乘法对 m_{total} 与 t 的函数关系进行拟合, 建立一元线性回归模型:

$$\hat{m}_{\text{total}} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 t \tag{10}$$

式中: $\hat{\beta}_0$ 为收集腔内实验开始前的气体质量; $\hat{\beta}_1$ 为气体总质量 m_{total} 随时间变化的斜率, 即为饱和蒸汽的质量泄漏率。该回归模型的线性相关特性可通过相关系数 R^2 进行验证。

$$\left[\hat{\beta}_1 - t_{\frac{\alpha}{2}}(n-2) \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}}, \hat{\beta}_1 + t_{\frac{\alpha}{2}}(n-2) \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}} \right] \tag{13}$$

3.4 实验流程

首先在正式开始实验前需要对收集罩的密封性能进行检验, 以减小实验误差。采用智能密封诊断仪重点对收集腔的泄漏率进行测量。实验中收集罩的工作压力略高于大气压力, 约为 1.1 倍, 此时泄漏率小于仪器最小测量精度 (0.1 mL/min)。将压力提升至实验最高压力 0.66 MPa 后, 收集罩泄漏率测量值仍小于 1 mL/min。根据测量结果, 可认为收集腔密封性能良好, 对实验中加压腔微泄漏量测量影响较小。

之后采用干空气作为泄漏介质进行预实验。在 30 ℃ 的环境温度下, 向加压腔内充入压缩空气, 当加压腔内压力达到实验工况 0.66 MPa 时停止充入。后保持加压腔内压力稳定, 开始实验, 记录并处理实验过程中各时刻收集的数据, 如腔内压力 P 、温度 T 和相对湿度 U 等。预实验结束后, 导出实验数据, 并将加压腔与收集腔卸至常压。

正式实验中采用 0.66 MPa 的饱和蒸汽作为泄漏介质。正式实验需要开启保温棉内的加热装置, 对加压腔和收集腔进行升温, 以防止通入饱和蒸汽以及蒸汽泄漏时蒸汽冷凝于腔体内壁, 对实验分析产生影响。当温度达到预设工况后启动蒸汽发生器, 使其开始产生设定压力 0.66 MPa 下

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})(m_i - \bar{m})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2 \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2}} \tag{11}$$

式中, $\bar{t}$, $\bar{m}$ 分别为采样时间和气体总质量的样本均值。

同时, 气体总质量估计值 $\hat{m}_{\text{total}}$ 的不确定度可通过标准偏差的无偏估计值 $\hat{\sigma}$ 得到:

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2 - \frac{\left[\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})(m_i - \bar{m}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}}{n-2}} \tag{12}$$

此外, 若选择置信水平为 $1 - \alpha$, 则斜率 $\hat{\beta}_1$ 的置信区间为

的饱和蒸汽。后开启蒸汽进气阀, 向加压腔充入饱和蒸汽的同时, 排出加压腔内部干空气。待达到实验工况后, 关闭蒸汽进气阀并开始实验, 记录并处理实验过程中各时刻收集的数据, 包括 P , T 和 U 。

在两种介质泄漏率测量实验完成后, 重新对收集腔进行密封性测试, 显示收集腔体积泄漏率均小于 1 mL/min, 可认为收集腔在经过两种介质的泄漏率测量实验后依旧具有良好的密封性能。

4 实验结果与分析

4.1 预实验测量结果

预实验中采用干空气介质进行实验, 在实验过程中分别通过压力表、温湿度传感器测得 P , T 和 U , 并使用数据分析处理系统, 以 30 s 的时间间隔进行实时记录, 分别加载 1.5 和 3.0 mm 核级垫片, 输出实验组中收集的腔内气体总质量随时间的变化图, 如图 5 所示。

由图 5 数据曲线, 并根据式(8)和式(9)分别对两种厚度下的垫片泄漏率数值进行一元线性回归分析, 得到回归分析结果如表 2 所示。

根据表 2, 泄漏介质为干空气时, 1.5 与 3.0 mm 垫片下的泄漏率回归方程决定系数 R^2 均大于 0.95, 说明该拟合函数极为接近原函数, 可信度较高。

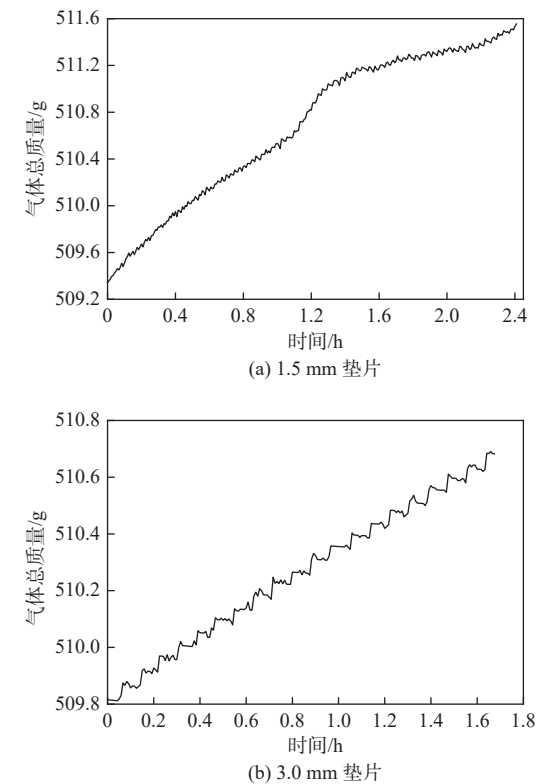


图 5 预实验中气体总质量 m 随时间的变化曲线
Fig. 5 History of the total mass of gas in the pre-experiment

表 2 预实验泄漏率数值线性回归分析表
Table 2 Numerical linear regression analysis of pre-experimental leakage rate

垫片厚度/mm	回归方程	决定系数 R^2	不确定度	泄漏率 ($\text{g}\cdot 24\text{ h}^{-1}$)	泄漏率置信区间($\alpha=0.05$)
1.5	$m=0.8974t+509.5963$	0.9541	1.6624	21.54	(14.93, 28.15)
3.0	$m=0.5081t+509.8327$	0.9970	0.0949	12.19	(11.54, 12.84)

根据回归方程的斜率,得到加载 1.5 mm 核级垫片模型的干空气泄漏率最佳估计值为 21.54 g/24 h, 5% 置信水平下泄漏率的区间估计值为 (14.93 g/24 h, 28.15 g/24 h); 加载 3.0 mm 核级垫片模型的泄漏率最佳估计值为 12.19 g/24 h, 5% 置信水平下泄漏率的区间估计值为 (11.54 g/24 h, 12.84 g/24 h)。

4.2 事故工况测量结果

事故工况时,实验介质选用 0.66 MPa, 162.59 ℃ 下的饱和蒸汽,实验中分别通过压力表、温湿度传感器测得收集腔内的压力、温度和相对湿度,并使用数据分析处理系统以 30 s 的间隔时间实时记录,分别加载 1.5 和 3.0 mm 核级垫片,实时输出实验组中腔内气体质量随时间的变化图(图 6)。同时对泄漏至收集腔内蒸汽的状态进行研究。根据收集腔内的压力与温度信息,可认为实验过程中收集腔内的绝对压力均远未达到饱和水蒸气压

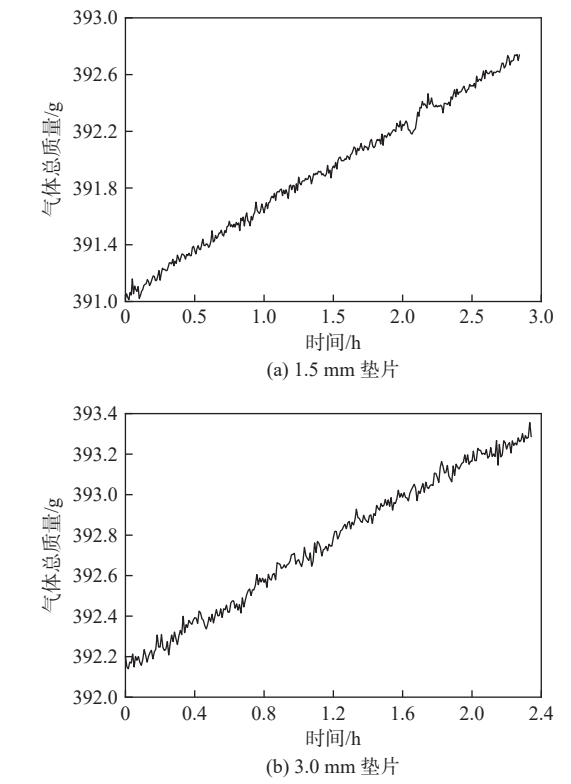


图 6 事故工况实验中气体总质量 m 随时间的变化曲线
Fig. 6 History of the total mass of gas in the accidental working condition experiment

力,说明收集腔内不存在液态水且水分子均以气态形式存在,因此可采用 3.2 节中的计算方法。观察图 6 中的数据曲线,其具有较强的线性特征。对图中气体总质量随时间的变化曲线进行一元线性回归分析,得到回归分析结果(表 3)。

表 3 事故工况实验泄漏率数值线性回归分析表
Table 3 Numerical linear regression analysis of accidental working condition experimental leakage rate

垫片厚度/mm	回归方程	决定系数 R^2	不确定度	泄漏率 ($\text{g}\cdot 24\text{ h}^{-1}$)	泄漏率置信区间($\alpha=0.05$)
1.5	$m=0.5805t+390.7904$	0.9964	0.4448	13.93	(12.55, 15.31)
3.0	$m=0.4963t+391.7072$	0.9931	0.3280	11.91	(10.55, 13.27)

由表 3 可知,两种不同厚度垫片下泄漏质量与时间的回归方程决定系数 R^2 均大于 0.95、不确定度均小于 1,证明原函数线性相关程度高,且拟合函数极为接近原函数,可信度较高。回归方程的斜率可视事故工况下饱和蒸汽泄漏率,因此加载 1.5 mm 核级垫片模型的蒸汽泄漏率最佳估计值为 13.93 g/24 h,同时 5% 置信水平下的区间估计值为(12.55 g/24h, 15.31 g/24h);加载 3.0mm 核级垫片模型的蒸汽泄漏率最佳估计值为 11.91 g/24 h, 5% 置信水平下的区间估计值为 (10.55 g/24 h, 13.27 g/24 h)。

根据预实验及事故工况实验的计算结果,比

较不同厚度垫片下的泄漏率,可认为同一泄漏介质下 3.0 mm 垫片的密封性能优于 1.5 mm 级。

4.3 两种工况测试结果比较

由于各实验条件下被测件恒为加压腔,且螺

栓-法兰加载压力不变,泄漏介质物性参数与被测件内外压力差已知,可通过预实验与正式实验的泄漏率测量值与式(1)计算得到的乘积 nd^d ,探究该系数 nd^d 是否会随泄漏介质以及温度、湿度等工况参数变化而改变,计算结果如表 4 所示。

表 4 不同工况下毛细管系数 nd^d 计算表
Table 4 Capillary coefficient nd^d calculation table for different working conditions

垫片厚度/mm	实验介质	泄漏量测量值/(mg·(s·mm) ⁻¹)	压差 ΔP /MPa	介质物性参数 ρ/η	系数 nd^d /mm ³	系数 nd^d 置信区间($\alpha=0.05$)
1.5	常温干空气	2.17×10 ⁻⁴	0.56	4.05×10 ⁵	1.25×10 ⁻¹⁰	(8.64×10 ⁻¹¹ , 1.63×10 ⁻¹⁰)
	高温饱和蒸汽	1.41×10 ⁻⁴	0.56	2.41×10 ⁵	1.36×10 ⁻¹⁰	(1.22×10 ⁻¹⁰ , 1.49×10 ⁻¹⁰)
3.0	常温干空气	1.23×10 ⁻⁴	0.56	4.05×10 ⁵	7.06×10 ⁻¹¹	(6.68×10 ⁻¹¹ , 7.43×10 ⁻¹¹)
	高温饱和蒸汽	1.20×10 ⁻⁴	0.56	2.41×10 ⁵	1.16×10 ⁻¹⁰	(1.03×10 ⁻¹⁰ , 1.29×10 ⁻¹⁰)

由表 4 计算结果可知,预实验与正式实验中不同垫片厚度下的 nd^d 系数差异很小,该结果一方面验证了蒸汽微泄漏实验测量的准确性,另一方面也说明在所考虑参数范围内高温、高湿环境对 nd^d 系数的影响非常小。据此,在蒸汽泄漏实验不易执行时,可采用同压力下的常温空气替代高温蒸汽进行实验,并应用式(1)进行外推得到蒸汽泄漏量。

5 结 论

本文搭建了一套能够实现蒸汽微泄漏量定量测量的实验装置。该装置通过在被测密封结构的外侧设置收集罩,并在收集罩外设置保温棉及加热装置的方法,确保泄漏的蒸汽被收集在罩中同时不冷凝。对收集腔内气体的相对湿度、压力和温度等状态参数进行分析即可间接计算得到蒸汽泄漏率。基于该实验台架,对某吊装孔密封结构在高温、高压下的蒸汽泄漏特性进行实验研究,得出如下结论:

- 1) 加载 1.5 与 3.0 mm 核级垫片的吊装孔模型饱和蒸汽的质量泄漏率分别为 13.93 和 11.91 g/24h,可认为密封性良好;
- 2) 干空气预实验和饱和蒸汽正式实验的测量数据均显示,加载 3.0 mm 垫片的吊装孔密封结构的泄漏量更低,由此可指导密封结构选型,采用 3.0 mm 垫片密封更优;
- 3) 基于毛细管泄漏量公式,比较了同种垫片和同种压力下,根据干空气和水蒸气泄漏量测量结果得到的密封系数 nd^d ,二者均十分接近,验证了本文的蒸汽微泄漏测量方法的有效性;
- 4) 该蒸汽微泄漏测量方法可推广应用于各种密封结构或压力系统,包括热力管道和阀门,为事故工况下堆舱密封性评估提供了新的测量思路。

参考文献:

[1] 陈小砖,李硕,任晓利,等.中国核能利用现状及未来展望[J].能源与节能,2018(8): 52–55.
CHEN X Z, LI S, REN X L, et al. Present situation and future prospect of nuclear energy utilization in China[J]. Energy and Energy Conservation, 2018(8): 52–55 (in Chinese).

[2] 朱炳聿,丁青青.核动力对无人航空飞行器续航能力提升研究[J].清华大学学报(自然科学版),2021, 61(11): 1295–1300.
ZHU B Y, DING Q Q. Nuclear power to improve the endurance of unmanned aerial vehicles[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(11): 1295–1300 (in Chinese).

[3] 全潘,邹文天,肖友军,等.核动力在深海领域的应用与发展[J].能源与环境,2021(5): 46–48, 56.
TONG P, ZOU W T, XIAO Y J, et al. Application and development of nuclear power in the deep sea[J]. Energy and Environment, 2021(5): 46–48, 56 (in Chinese).

[4] 谭美,李鹏凡,郭健,等.海洋环境条件下浮动堆安全壳设计[J].中国舰船研究,2020, 15(1): 107–112, 144.
TAN M, LI P F, GUO J, et al. Design of floating nuclear power plant containment under marine environment conditions[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(1): 107–112, 144.

[5] 冯秀,顾伯勤.螺栓法兰金属垫片连接结构的紧密性分析方法[J].润滑与密封,2011, 36(9): 95–98, 106.
FENG X, GU B Q. Method for tightness analysis of bolted flanged connections with metallic gaskets[J]. Lubrication Engineering, 2011, 36(9): 95–98, 106 (in Chinese).

[6] 郭祯君,李慧芳,钱才富.螺栓法兰垫片接头整体结构数值模拟和密封性能分析[J].化工设备与管道,2019, 56(2): 6–11.
GUO Z J, LI H F, QIAN C F. Numerical simulation tightness analysis for integral bolted flange and gasket

- joint[J]. *Process Equipment & Piping*, 2019, 56(2): 6–11 (in Chinese).
- [7] 刘麟, 顾伯勤, 李传文. 垫片外缘最大应力对螺栓法兰连接结构泄漏率影响 [J]. *机械设计与制造*, 2012(5): 196–198.
- LIU L, GU B Q, LI C W. The effect of maximum stress located at gasket outer periphery on leakage of bolted flanged connections[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2012(5): 196–198 (in Chinese).
- [8] 张琼. 高温螺栓法兰连接系统的密封性 [J]. *中国特种设备安全*, 2013, 29(4): 1–3.
- ZHANG Q. The seal of bolted flanged joint at high temperature[J]. *China Special Equipment Safety*, 2013, 29(4): 1–3 (in Chinese).
- [9] 董智, 覃文良, 马全, 等. 高温下螺栓法兰联接密封结构三维数值分析 [J]. *压力容器*, 2015, 32(9): 33–38.
- DONG Z, QIN W L, MA Q, et al. Three-dimensional numerical analysis of bolt-flange sealing structure at high temperatures[J]. *Pressure Vessel Technology*, 2015, 32(9): 33–38 (in Chinese).
- [10] 喻健良, 张忠华, 闫兴清, 等. 高温下螺栓-法兰-垫片系统密封性能研究 [J]. *压力容器*, 2012, 29(5): 5–9.
- YU J L, ZHANG Z H, YAN X Q, et al. Sealing performance of bolted flange joints at high temperature[J]. *Pressure Vessel Technology*, 2012, 29(5): 5–9 (in Chinese).
- [11] 吕祥奎, 黄灏, 黄晓明, 等. 耐压闸门密封圈泄漏率预测的理论与实验研究 [J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2017, 45(7): 51–55.
- LÜ X K, HUANG H, HUANG X M, et al. Theoretical and experimental study of the leakage prediction of the rubber sealing structure for pressure gate[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 45(7): 51–55 (in Chinese).
- [12] 张雷, 魏华彤, 闫桂银. “华龙一号”主蒸汽管道局部泄漏监测系统 [J]. *核科学与工程*, 2021, 41(1): 96–102.
- ZHANG L, WEI H T, YAN G Y. Design and application of the main steam line local leakage measuring system in HPR1000[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2021, 41(1): 96–102(in Chinese).
- [13] 张硕, 万捷木思, 张英杰. 基于红外光谱法研究电厂蒸汽泄漏的监测 [J]. *电子世界*, 2015(18): 137–138.
- ZHANG S, WAN J M S, ZHANG Y J. Study of steam leakage monitoring in power plants based on infrared spectroscopy[J]. *Electronics World*, 2015(18): 137–138 (in Chinese).
- [14] 张奇. 基于红外热成像技术的泄漏检测研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- ZHANG Q. Leak detection research based on infrared thermal imaging technology[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017 (in Chinese).
- [15] 朱慧峰. 采用音频控制系统的信息化蒸汽管网泄漏报警系统 [J]. *石油化工技术与经济*, 2019, 35(4): 42–47.
- ZHU H F. Informationized steam pipe network leakage alarming system using audio control system[J]. *Technology & Economics in Petrochemicals*, 2019, 35(4): 42–47 (in Chinese).
- [16] 姜莹莹. 核动力装置主管道 LBB 系统研究与设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
- JIANG Y Y. Research and design of LBB system for main pipeline of nuclear power plant[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020 (in Chinese).
- [17] 陆培文. 核动力装置阀门 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- LU P W. Nuclear power plant valves[M]. Beijing: China Machine Press, 2011 (in Chinese).