

DOI:10.11918/202403040

恒压法安全壳泄漏率理论模型的实验验证

李建发^{1,2,3}, 毕士君^{1,3}, 胡宗文¹, 滑永振^{1,3}, 娄泰山^{1,3}

(1. 中国核电工程有限公司, 北京 100840; 2. 安全壳热工水力联合实验室(中国核电工程有限公司), 河北 廊坊 065000; 3. 中国核电工程有限公司研发中心, 河北 廊坊 065000)

摘要: 为提高恒压法安全壳泄漏率测量技术的成熟度, 评估恒压法安全壳泄漏率理论模型的适用性与可靠性, 提出了标况均值法和工况均值法理论分析模型。理论模型的验证须在壳内压力恒定的环境下获取壳内气体参数并计算泄漏率。首先, 在自由容积 1 000 m³ 的钢制安全壳模拟体内布置传感器监测壳内气体状态, 并在充气管路上设计流量调节装置维持壳内恒压, 分别在正压和负压环境下开展实验, 探究了应用标况均值法和工况均值法计算安全壳泄漏率的稳定性和一致性。其次, 应用恒压法理论模型分析某核电厂降压法试验获取的工程数据, 探究了恒压法理论模型对工程尺度安全壳的适用性和对降压法的包容性。研究结果表明: 两种恒压法理论模型计算的安全壳泄漏率具有较好的一致性, 相对偏差小于 $\pm 0.2\%$; 工程尺度试验数据分析中恒压法理论模型计算的泄漏率可以达到降压法的精度, 两种方法之间相对偏差不足 5%, 恒压法理论模型可用于分析降压法试验数据。本研究成果可为恒压法安全壳泄漏率测量技术的理论研究和工程应用提供支撑。

关键词: 安全壳泄漏率; 恒压法; 测量方法; 工况均值法; 标况均值法

中图分类号: TL331

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2025)05-0166-07

Experimental validation of a theoretical model of constant pressure method for containment leakage rate

LI Jianfa^{1,2,3}, BI Shijun^{1,3}, HU Zongwen¹, HUA Yongzhen^{1,3}, LOU Taishan^{1,3}

(1. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China; 2. Containment Thermal-Hydraulic Joint Laboratory(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd.), Langfang 065000, Hebei, China; 3. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., R&D Center, Langfang 065000, Hebei, China)

Abstract: To improve the maturity of the containment leakage rate measurement technology, this study evaluates the applicability and reliability of the theoretical model of constant pressure method for containment leakage rate. Two theoretical analysis models, namely the standard condition mean method and the operating condition mean method were proposed. The validation of the theoretical models requires the acquisition of gas parameters within the containment under a constant internal pressure environment, followed by the calculation of the leakage rate. Firstly, sensors were arranged in the simulation body of steel containment with a free volume of 1 000 m³ to monitor the gas status, and a flow regulation device was designed in the inflation pipe to maintain constant pressure. Experiments were carried out in the environment of positive pressure and negative pressure. The stability and consistency of the containment leakage rate calculated by means of standard conditions and working conditions were explored. Secondly, the data from engineering test of pressure drop method in a nuclear power plant were analyzed by using the theoretical model of constant pressure method. The applicability of the theoretical model of constant pressure method to engineering scale containment and its compatibility with pressure drop methods were explored. The study indicates that the two theoretical analysis models have good consistency in calculating the containment leakage rate, with a relative deviation of less than $\pm 0.2\%$. The leakage rate calculated by the theoretical model of constant pressure method can achieve the accuracy of the traditional pressure drop method, with a relative deviation of less than 5% between the two methods. Therefore, the theoretical model of constant pressure method can be used to analyze the test data of pressure drop method. The findings of this research can provide support for the theoretical research and engineering application of the constant pressure method for containment leakage rate technology.

Keywords: containment leakage rate; constant pressure method; measuring method; operating condition theoretical method; standard condition theoretical method

收稿日期: 2024-03-15; 录用日期: 2024-05-06; 网络首发日期: 2025-03-11

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20250310.1726.004>

基金项目: 国家重点研发计划项目(KY21004); 中核工程科研基金(KY22236)

作者简介: 李建发(1987—), 男, 高级工程师

通信作者: 李建发, 547531519@qq.com

核电厂安全壳密封性试验,是一项用来检查安全壳整体泄漏水平的重要试验,直接关系到核电厂第3道安全屏障的可靠性。这对于保障核电厂的安全运行和公众安全都具有非常重要的意义。目前国内核电厂安全壳密封性试验均采用“绝对压力衰减法”(又称“压降法”)进行测量^[1-5]。周文权等^[6]曾调研国外安全壳密封性技术路线;郭峰等^[7-10]探究了国内各堆型安全壳密封性试验的技术路线。热室的密封性能关系着工作场所的放射性水平以及附近环境的安全。根据张伟等^[11]的介绍,国内热室密封性试验采用 EJ/T 1096—1999《密封箱室密封性分级及其检验方法》标准中的规定^[12]。可见,国内外对压降法的研究较为成熟。

恒压法安全壳泄漏率测量技术,通过不断补充气体保持壳内压力稳定,已有的研究表明,这种方法优势明显^[13-15]。在应用层面,恒压法安全壳泄漏率测量试验系统是在压降法的基础上增设了恒压测流装置,试验系统对测量传感器的技术要求、布置方案与压降法一致,在硬件方面实现了对压降法的包容,可以根据实际情况随时切换试验方法。此外,与传统的压降法相比,恒压法依赖于更少的假设条件,因此具有更科学的理论支撑。比如,恒压法泄漏率分析理论中采用混合气体计算,而美国标准、法国标准等压降法采用除湿后的干空气计算。恒压法全程壳内压力恒定,泄漏率不会受到压力的影响,而压降法壳内压力非线性单调下降,直线拟合计算的泄漏率存在理论偏差,因此在采用传统压降法试验时相对压力变化明显的场景中,若采用恒压法可以得到更加准确的计算泄漏率。已有研究表明^[10],在微负压环境下,压降法每次实验间的重复性偏差超过15%,而恒压法每次实验间的重复性偏差低于1.3%。正因如此华龙一号、EPR等堆型外层安全壳密封性试验,采用压降法重复多次试验才可以得到可信的测量结果,因此在高泄漏或低压环境下采用恒压法开展试验更加简单和可靠。

但是,国内外对核电厂安全壳、大型热室等大空间内恒压法技术应用的研究尚处于早期阶段,行业内对此研究甚少。为了深化该技术的研究,本文提出了分别在标准状态和试验工况下,计算恒压法安全壳泄漏率的理论模型。本文通过实验,探究了标况均值法和工况均值法,两种不同理论模型计算所得泄漏率的一致性和稳定性。本文还应用文中所提出的恒压法泄漏率计算模型分析了某核电厂压降法安全壳密封性试验的工程数据,阐释了恒压法对压降法试验数据的包容性。

1 恒压法泄漏率计算理论模型

1.1 恒压法泄漏率测量原理

核电厂安全壳泄漏率测量环境分为正压和负压、高压和低压。图1(a)展示了中核工程已设计建设的正压环境下的恒压法安全壳泄漏率技术实验平台,对应研究恒压法在压水堆反应堆厂房等高压环境中的应用。其在安全壳内布置一定数量的温度传感器、湿度传感器、绝对压力传感器以检测壳内气体状态,由此可以计算各采集时刻壳内气体的总体积和水蒸气体积;在安全壳外设置充气管路用于安全壳内部的快速升压;壳外与充气回路并联设置气体补充管路,管路上装有电动调节阀和高精密流量计,已设定的控制逻辑实时根据壳内压力传感器的压力反馈调节电动调节阀的开度,维持安全壳内压力恒定,高精密流量计反馈各时刻由壳外向壳内补充的气体流量。图1(b)展示了中核工程建设负压环境下的安全壳泄漏率测量技术实验平台,对应研究恒压法在第3代压水堆外层安全壳、大型热室等低压环境中的应用。负压实验平台的设计方案与正压平台类似,在环廊模拟空间内布置温度、湿度、绝对压力3类传感器,用真空泵通过抽气回路实现环廊内降压,新增的压差计与补充管路上的电动阀共同作用控制环廊内维持恒定的微负压^[13-15]。

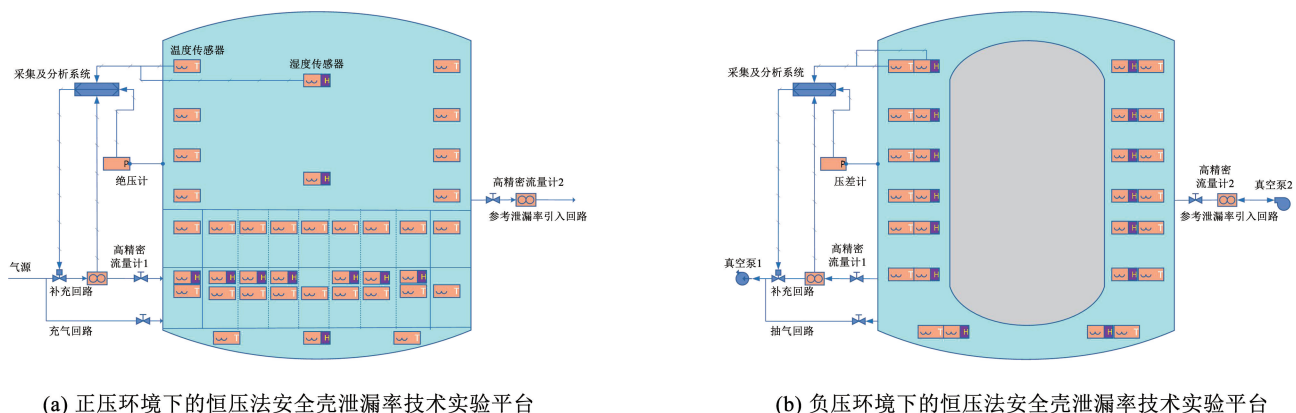


图1 恒压法安全壳泄漏率测量方案

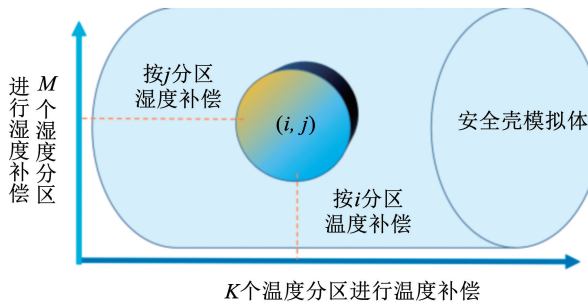
Fig. 1 Constant pressure method for measuring leakage rate in containment vessels

安全壳等大空间中应用恒压法,须在壳内布置多个温度计和湿度计,以提高壳内环境测量的代表性。表 1 对比信息表明,实验平台中温度、湿度、压力传感器的选型、测点布置原则应保持与当前核电工程压降法试验系统完全一致。温度传感器和湿度传感器将壳内自由容积划分为多个温度分区和湿度分区。如图 2(a)所示,壳内自由空间所有坐标点的温度和湿度,由距离该点最近的温度传感器和湿度传感器数据映射,由此确定每个温度传感器代表的温度分区和体积分配系数,并确定每个湿度传感器代表湿度分区和体积分配系数。本文实验平台共布置了 28 个温度传感器和 10 个湿度传感器,测点布置方案和各测点体积分配系数分别见图 3、表 2。为更好阐释本文中提出的理论模型,文中壳内温度计数量取为 k ,壳内湿度计数量取为 m 。

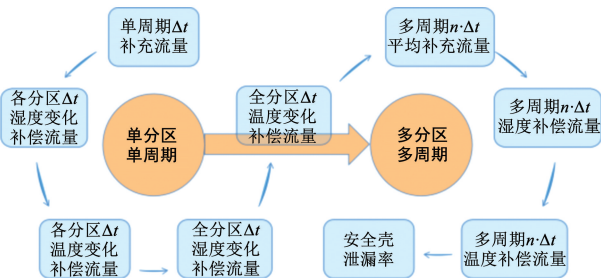
表 1 实验平台与华龙一号传感器选型对比

Tab.1 Comparison of experimental platform and sensor selection for Hualong No. 1

对比项	华龙一号	实验平台
温度传感器	PT100 精度;工业 A 级	PT100 精度;工业 A 级
湿度传感器	HMT333 精度: $\pm 2\%$ RH	HMT333 精度: $\pm 2\%$ RH
压力传感器	Mensor 2500 精度: $\pm 0.01\%$ F. S	Mensor 6100 精度: $\pm 0.01\%$ F. S
数据采集设备	Agilent 34980A	Agilent 34980A
测点布置原则	由中核工程堆工所 提供布置参照	由中核工程堆工所 提供与华龙一号 布置原则保持一致



(a) 空间内坐标点环境补偿



(b) 计算泄漏率的过程

图 2 恒压法安全壳泄漏率计算过程

Fig.2 Calculation process of constant pressure method for containment leakage rate

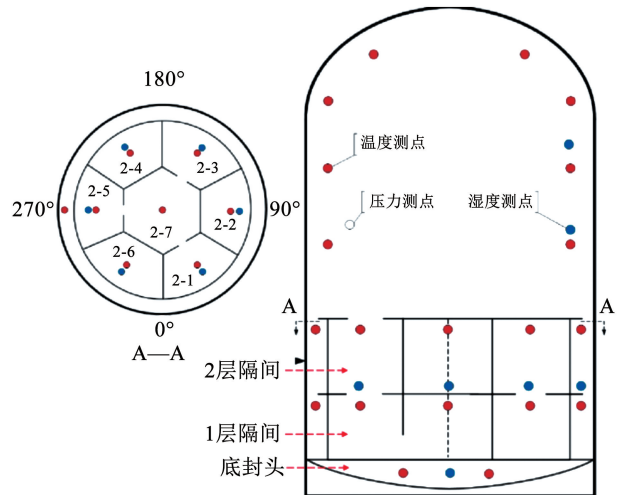


图 3 中核工程实验平台测点布置图

Fig.3 Arrangement layout of measurement points for CNPE engineering experimental platform

表 2 实验平台测点布置及体积分配系数

Tab.2 Layout and volume distribution coefficient of experimental platform measurement points

类型	编号	安装位置/m	安装角度/(°)	容积分配系数
温度测点	T1	4.700	90	0.029 751 65
温度测点	T2	4.700	270	0.029 751 65
温度测点	T3	6.900	90	0.029 751 65
温度测点	T4	6.900	270	0.029 751 65
温度测点	T5	9.500	90	0.088 919 02
温度测点	T6	9.500	270	0.088 919 02
温度测点	T7	12.750	90	0.088 919 02
温度测点	T8	12.750	270	0.088 919 02
温度测点	T9	15.975	90	0.088 919 02
温度测点	T10	15.975	270	0.088 919 02
温度测点	T11	19.625	90	0.079 966 39
温度测点	T12	19.625	270	0.079 966 39
温度测点	T13	隔间 1-1	30	0.009 438 74
温度测点	T14	隔间 1-2	90	0.009 438 74
温度测点	T15	隔间 1-3	150	0.009 438 74
温度测点	T16	隔间 1-4	210	0.009 438 74
温度测点	T17	隔间 1-5	270	0.009 438 74
温度测点	T18	隔间 1-6	330	0.009 438 74
温度测点	T19	隔间 1-7	中心	0.005 791 18
温度测点	T20	隔间 2-1	30	0.009 438 74
温度测点	T21	隔间 2-2	90	0.009 438 74
温度测点	T22	隔间 2-3	150	0.009 438 74
温度测点	T23	隔间 2-4	210	0.009 438 74
温度测点	T24	隔间 2-5	270	0.009 438 74
温度测点	T25	隔间 2-6	330	0.009 438 74

表2(续)

类型	编号	安装位置/m	安装角度/(°)	容积分配系数
温度测点	T26	隔间2-7	中心	0.005 791 18
温度测点	T27	底封头	90	0.031 349 61
温度测点	T28	底封头	270	0.031 349 61
湿度测点	H1	5.800	90	0.119 006 61
湿度测点	H2	12.725	90	0.533 514 11
湿度测点	H3	19.625	90	0.159 932 77
湿度测点	H4	隔间1-1	30	0.020 807 88
湿度测点	H5	隔间1-2	90	0.020 807 88
温度测点	H6	隔间1-3	150	0.020 807 88
温度测点	H7	隔间1-4	210	0.020 807 88
温度测点	H8	隔间1-5	270	0.020 807 88
温度测点	H9	隔间1-6	330	0.020 807 88
温度测点	H10	底封头	中心	0.062 699 22

在控制安全壳恒压的过程中,补充管路的气体补充体积、壳内的气体体积、壳体的气体泄漏体积三者处于动态平衡。平衡过程会受到壳内混合气体状态的影响。壳内温度或湿度上升,会引起壳内滞留气体压力上升,从而抑制补充气体流入;相反,温度或湿度下降,会增加补充气体流入。图4中的实验数据证明,伴随壳内气体状态变化,各采集时刻的补充流量、补偿流量有着显著变化。在实验平台上,将恒压控制期间所有时段的补充流量和补偿流量累积,获取实验全过程中的气体补充体积和环境补偿体积。图2(b)展示了由“单周期、单分区”到“多分区、多周期”,计算实验时段内的温度补偿体积、湿度补偿体积、平均体积泄漏率的过程。累积后的各项体积与壳内气体温度变化关系如图5所示,可见温度补偿体积变化趋势与壳内平均温度保持一致,湿度补偿体积占比低且波动幅度小,气体补充体积虽有波动但保持着总体增加的趋势,因此安全壳泄漏率的计算须考虑壳内环境变化的影响。

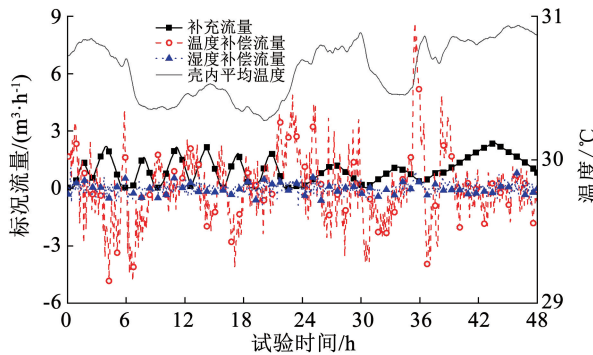


图4 恒压法基础流量及补偿流量曲线

Fig.4 Basic flow rate and compensation flow rate curves of constant pressure method

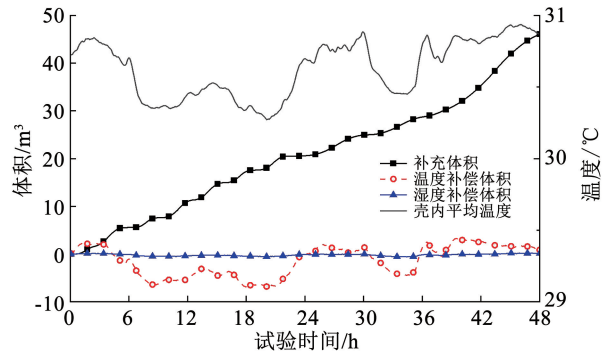


图5 恒压法累计的补充体积和补偿体积曲线

Fig.5 Cumulative supplementary volume and compensation volume curves of constant pressure method

基于上述分析,本文提出的恒压法安全壳泄漏率由4部分组成。泄漏率为

$$L_{\Sigma\Sigma} = L_{Q,\Sigma\Sigma} + L_{T,\Sigma\Sigma} + L_{H,\Sigma\Sigma} + U_L \quad (1)$$

式中: $L_{\Sigma\Sigma}$ 为计算的安全壳泄漏率; $L_{Q,\Sigma\Sigma}$ 为基础泄漏率,是通过补充回路流量计获取的补充流量计算的泄漏率; $L_{T,\Sigma\Sigma}$ 为温度补偿泄漏率,是由于壳内各时刻温度变化计算的体积补偿泄漏率; $L_{H,\Sigma\Sigma}$ 为湿度补偿泄漏率,是由于壳内湿度变化计算的体积补偿泄漏率; U_L 为泄漏率测量不确定度,是按照JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》技术规范计算的不确定度^[16],参照美国标准ANS/ANSI-56.8—2002本文仅分析A类不确定度。

实际工程中,通常补充回路流量计提供的是标准工况下的气体流量,而温度传感器、湿度传感器、压力传感器提供的是试验工况下的数据,需要换算到相同的状态计算泄漏率。根据理想气体状态方程,本文对转换至试验工况的泄漏率计算模型和转换至标准工况的泄漏率计算模型分别进行了研究。

1.2 不同状态下的恒压法理论模型^[13]

1.2.1 工况均值法计算模型

根据理想气体状态方程,工况均值法将各时刻采集的标况状态下的补充气体流量,转换为当前时刻壳内试验工况下所对应的气体流量,代入式(1)计算安全壳泄漏率。以下标A表示工况,式(1)可描述为

$$L_{A\Sigma\Sigma} = L_{Q,A\Sigma\Sigma} + L_{T,A\Sigma\Sigma} + L_{H,A\Sigma\Sigma} + U_{L,A} \quad (2)$$

其中:

$$L_{Q,A\Sigma\Sigma} = \frac{2\ 400}{V_0} \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(Q_i \times \frac{P_N}{P_i} \times \frac{T_{H,j,i-1} + T_{H,j,i}}{2 \cdot T_N} \right)$$

$$L_{T,A\Sigma\Sigma} = \frac{2\ 400}{V_0} \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \left[\left(\frac{T_{j,i}}{T_{j,i-1}} - \frac{P_i}{P_{i-1}} \right) \times v_{T,j} \times V_0 \right]$$

$$L_{H,A\Sigma\Sigma} = \frac{2\ 400}{V_0} \times \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\left(\frac{H_{j,i}}{100} \times \frac{P_{H,j,i}}{P_i} - \frac{H_{j,i-1}}{100} \times \frac{P_{H,j,i-1}}{P_i} \right) \times \right]$$

$$U_{L,A} = 1.96 \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_{A\Sigma,i} - L_{A\Sigma\Sigma})^2}{n(n-1)}} \times \frac{v_{H_j} \times V_0}{\Delta t}$$

式中: n 为时段数, m 为湿度分区的数量, k 为温度分区的数量, i 为 t_i 时刻或 t_{i-1} 至 t_i 时间段, Δt 为 t_{i-1} 至 t_i 时刻的时间长度, h ; j 为第 j 温度分区或第 j 湿度分区, Q_i 为各时刻的补充流量, m^3/h ; T_{ji} 为第 j 温度分区在 t_i 时刻的绝对温度, K ; T_{ji-1} 为第 j 温度分区在 t_{i-1} 时刻的绝对温度, K ; H_{ji} 为第 j 湿度分区在 t_i 时刻的相对湿度, H_{ji-1} 为第 j 湿度分区在 t_{i-1} 时刻的相对湿度, $T_{H,ji}$ 为第 j 湿度分区在 t_i 时刻的绝对温度, K ; $T_{H,ji-1}$ 为第 j 湿度分区在 t_{i-1} 时刻的绝对温度, K ; $P_{H,ji}$ 为第 j 湿度分区在 t_i 时刻的饱和水蒸气分压, Pa ; $P_{H,ji-1}$ 为第 j 湿度分区在 t_{i-1} 时刻的饱和水蒸气分压, Pa ; $v_{T,j}$ 为第 j 温度分区占安全壳的自由容积的百分比, $v_{H,j}$ 为第 j 湿度分区占安全壳的自由容积的百分比, V_0 为安全壳的自由容积, m^3 ; P_i 为 t_i 时刻壳内压力, Pa 。其中下标 A 表示试验工况, 如 $L_{A\Sigma,i}$ 为工况状态各时段的体积泄漏率; $U_{L,A}$ 为工况状态泄漏率的不确定性; 下标 N 表示标况状态, 如 P_N 为标况状态环境下的压力, T_N 为标况状态环境下的温度。

1.2.2 标况均值法计算模型

标况均值法将各采集时刻壳内试验工况下计算的气体补偿体积转换为标况状态下所对应的气体体积, 代入式(1)中计算安全壳泄漏率。以下标 N 表示标况, 则式(1)可描述为

$$L_{N\Sigma\Sigma} = L_{Q,N\Sigma\Sigma} + L_{T,N\Sigma\Sigma} + L_{H,N\Sigma\Sigma} + U_{L,N} \quad (3)$$

其中:

$$L_{Q,N\Sigma\Sigma} = \frac{2400}{V_0} \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i$$

$$L_{T,N\Sigma\Sigma} = \frac{2400}{V_0} \times \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \left[\left(\frac{T_{ji}}{T_{ji-1}} - \frac{P_i}{P_{i-1}} \right) \times \frac{v_{T,j} \times V_0}{\Delta t} \times \frac{P_i}{P_N} \times \frac{2 \cdot T_N}{T_{ji-1} + T_{ji}} \right]$$

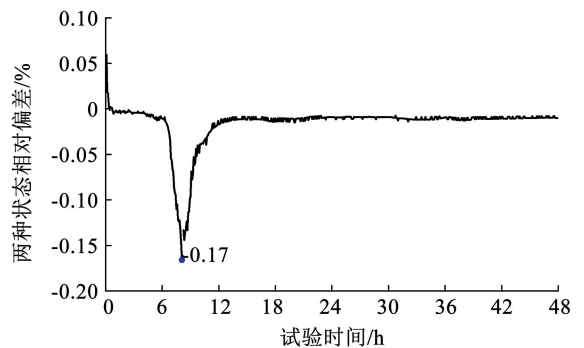
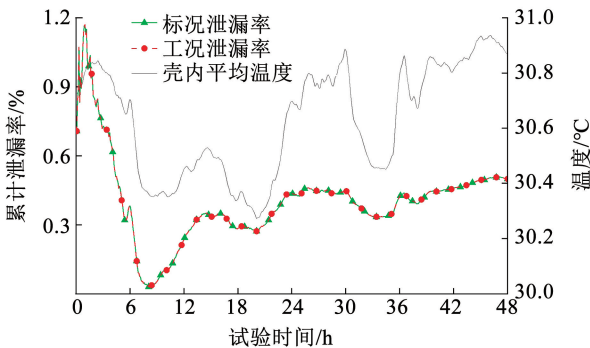
$$L_{H,N\Sigma\Sigma} = \frac{2400}{V_0} \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\left(\frac{H_{ji}}{100} \times \frac{P_{H,ji}}{P_i} - \frac{H_{ji-1}}{100} \times \frac{P_{H,ji-1}}{P_i} \right) \times \frac{v_{H,j} \times V_0}{\Delta t} \times \frac{P_i}{P_N} \times \frac{2 \cdot T_N}{T_{H,ji-1} + T_{H,ji}} \right]$$

$$U_{L,N} = 1.96 \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_{N\Sigma,i} - L_{N\Sigma\Sigma})^2}{n(n-1)}}$$

式中: 下标 N 表示标况状态, 如 $L_{N\Sigma,i}$ 为标况状态各时段的体积泄漏率; $U_{L,N}$ 为标况状态泄漏率的不确定性; 式中其余未定义变量的物理意义同式(2)。

2 恒压法理论模型实验验证

用于正压环境验证研究的实验装置见图 1(a)。其中, 安全壳为覆盖 200 mm 厚度保温层的钢制壳体。壳内自由容积 1 000 m^3 , 根据壳内隔间情况布置温度传感器 28 个, 湿度传感器 10 个, 压力传感器 1 个。由空压机提供 0.8 MPa 气源, 额定流量 3.6 m^3/min , 充气回路在壳内压力提升至 430 kPa·g 后隔离, 运行补充回路进行恒压控制。采用不同状态模型计算安全壳泄漏率, 实验结果见图 6。图 6(a) 表明, 在整个实验过程中, 标况泄漏率 $L_{N\Sigma\Sigma}$ 与工况泄漏率 $L_{A\Sigma\Sigma}$ 有着较高的符合性; 图 6(b) 表明, 在 8 h 附近 $L_{N\Sigma\Sigma}$ 与 $L_{A\Sigma\Sigma}$ 两者间的相对偏差绝对值达到最大, 约为 0.17%。由于实验安全壳保温效果不足, 壳内温度变化剧烈。对比累计泄漏率和壳内平均温度还发现, 泄漏率计算值与壳内平均温度变化有着正向强耦合关系, 两者变化趋势一致。



(a) 正压环境下泄漏率随时间变化

(b) 正压环境下两种状态偏差随时间变化

图 6 正压环境不同状态模型泄漏率曲线

Fig. 6 Leakage rate curves of different state models in positive pressure environment

用于负压环境验证研究的实验装置见图1(b)。采用钢制壳体模拟环廊和热室,自由容积1 000 m³,布置温度传感器28个,湿度传感器10个,压力传感器1个,压差计1个。在环廊与内层安全壳压差到达-300 Pa后隔离抽气回路,运行补充回路进行恒压控制,抽风机流量20 m³/h,实验数据分析结果见图7。图7(a)表明,在安全壳微负压实验中, $L_{N\Sigma\Sigma}$ 与 $L_{A\Sigma\Sigma}$ 同样高度相符;图7(b)表明在初始时刻

$L_{N\Sigma\Sigma}$ 与 $L_{A\Sigma\Sigma}$ 两者间的相对偏差绝对值最大,低于0.01%。另外,图7中展示的壳内平均温度较图6波动平缓,稳定的降温环境不会对泄漏率测量产生明显影响,因此计算泄漏率更快达到了稳定。此外,由于负压验证实验时安全壳本体泄漏率较大,温度所产生的影响相对本体泄漏率较小,在负压验证实验期间泄漏率计算值与壳内平均温度变化没有出现明显的相关性。

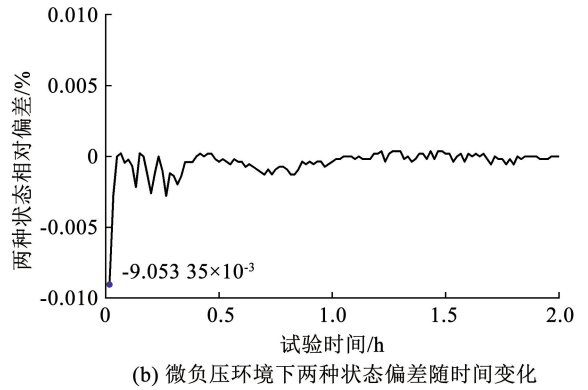
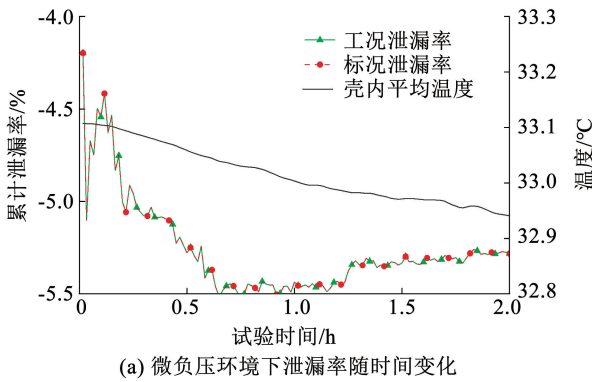


图7 微负压环境不同状态模型泄漏率曲线

Fig. 7 Leakage rate curves of different state models in micro-negative pressure environment

式(2)和式(3)恒压法理论模型通过 P_i 变化,考虑了每个采集周期内压力微幅变化的影响,因此引用某核电厂华龙一号内层安全壳打压试验数据,验证恒压法安全壳泄漏率理论模型对压降法数据的包容性。华龙一号是中国自主知识产权的第3代先进堆型,内层安全壳泄漏率测量采用压降法试验技术,壳内布置72个温度传感器和18个湿度传感器。初始充压至约0.425 MPa·g,充气系统隔离后壳内压力缓慢下降,且试验全程压力高于0.420 MPa·g。根据NB/T 20018—2021《压水堆核电厂安全壳密封性试验》规范^[5]的要求,压降法安全壳密封性试验需要在试验平台持续不少于24 h,工程上通常将最后10 h数据计算的累计泄漏率作为最终测得的安全壳泄漏率,因此选取最后10 h的工程试验数据,分别采用压降法分析模型和不同状态恒压法理论模型计算安全壳泄漏率,计算结果见图8。试验结束时刻的泄漏率,依次为0.016 53%、0.016 81%、0.016 55%,此时压降法泄漏率与恒压法标况、工况泄漏率之间的相对偏差不足5%。上述研究表明,恒压法理论模型可应用于工程核电机组,分析压降法内层安全壳密封性试验数据。

压降法通过对各时刻壳内干空气质量进行直线拟合计算泄漏率,而恒压法由各个采集时段内补充流量、补偿流量累加计算泄漏率,由于两种试验方法对数据处理方式不同,在采样数据较少时计算结果容易受到单个数据点的影响,计算结果存在较大的不确定性,此时不仅泄漏率计算值与泄漏率实际值不符,两种方法计算出来的泄漏率也会存在较大偏差。图8中压降法泄漏率曲线和恒压法泄漏率曲线在整个过程中的符合性证明了这个论点。华龙一号工程数据,采样周期为5 min,试验持续4 h采样数仅为48组,压降法和恒压法的泄漏率仍存在明显偏差。试验持续6 h,采样数据超过70组后,泄漏率计算值趋于稳定,表明计算结果的不确定性已明显降低,两种方法计算的泄漏率也在此后趋于一致。

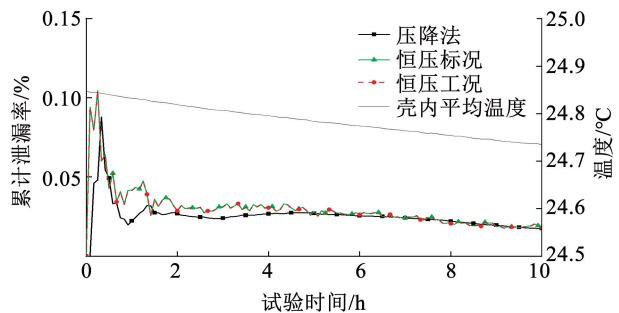


图8 压降法与恒压法计算泄漏率曲线

Fig. 8 Leakage rate curves for pressure drop method and constant pressure method

图8中的趋势还表明,基于工程堆中安全壳壳体良好的绝热效果,工程试验过程中壳内温度变化为近似线性缓慢下降的准稳态,采用恒压法理论模型计算的安全壳泄漏率较图6、7更加稳定。此外,

3 结 论

本文通过钢制安全壳实验装置,完成了恒压法安全壳泄漏率测量的验证实验。在现有研究基础上^[13-15],考察了标况均值法和工况均值法理论模型的适用性。结果表明:

1)在正压和微负压两种实验环境下,采用标况均值法和工况均值法计算的安全壳泄漏率均保持较高的一致性,相对偏差未超过 0.2%。

2)标况均值法和工况均值法的泄漏率测量值对壳内气体温度变化比较敏感,泄漏率测量值与壳内平均气温呈现正相关的变化规律。

3)根据核电厂安全壳泄漏率试验数据的验证,恒压法的泄漏率测量值与传统压降法具有较好的一致性,可以用于工程尺度下的安全壳泄漏率测量。恒压法理论模型对压降法试验数据具有包容性。

参 考 文 献

- [1] American Nuclear Society Standards Committee. Containment system leakage testing requirements; ANSI/ANS-56. 8—2002 [S]. Illinois: American Nuclear Society, 2002: 26
- [2] KEOGH P. The PWR integrated Leak Rate Test, a review of experiences and results[J]. Nuclear Engineering and Design, 1985, 90(2): 135. DOI:10.1016/0029-5493(85)90003-2
- [3] 褚英杰, 欧阳钦. 安全壳整体泄漏率计算方法的比较分析[J]. 核动力工程, 2010, 31(6): 33
CHU Yingjie, OUYANG Qin. Comparison and analysis of methods for containment leakage rate calculation[J]. Nuclear Power Engineering, 2010, 31(6): 33
- [4] TRIES M A, BOBEK L M. A proposed method for the determination of leakage rate for a reactor containment vessel [J]. Nuclear Technology, 2004, 145(3): 319. DOI: 10.13182/NT04-A3481
- [5] 国家能源局. 压水堆核电厂安全壳密封性试验: NB/T 20018—2021 [S]. 北京: 原子能出版社, 2021
National Energy Bureau of the People's Republic of China. Containment tightness test of pressurized water reactor nuclear power plant; NB/T 20018—2021 [S]. Beijing: Atomic Press, 2021
- [6] 周文权, 曲小朋, 孟凡彬. 核电站安全壳整体密封性试验方法 [J]. 核动力工程, 1997, 18(2): 153
ZHOU Wenquan, QU Xiaopeng, MENG Fanbin. Methods of containment integrated leak rate tests for nuclear power plants [J]. Nuclear Power Engineering, 1997, 18(2): 153
- [7] 郭峰, 郑斌贤, 戴晓凯. EPR 安全壳整体打压试验 [C]//2013 先进核电站技术研讨会. 宁波: 中国电机工程学会, 2013: 585
GUO Feng, ZHENG Binxian, DAI Xiaokai. EPR containment test [C]//Advanced Nuclear Power Plant Technology Seminar. Ningbo: Chinese Society for Electrical Engineering, 2013: 585
- [8] 魏盛辉. CPR1000 核电机组安全壳试验浅析[J]. 科技视界, 2014(31): 317

- WEI Shenghui. Brief analysis of containment test of CPR1000 nuclear power unit [J]. Science & Technology Vision, 2014(31): 317. DOI: 10.19694/j.cnki.issn2095-2457.2014.31.256
- [9] 于经纬, 左涛. AP1000 安全壳整体泄漏率试验探讨 [J]. 中国高新技术企业, 2015(16): 38
YU Jingwei, ZUO Tao. Experimental study on overall leakage rate of AP1000 containment [J]. China High-Tech Enterprises, 2015(16): 38. DOI:10.13535/j.cnki.11-4406/n.2015.16.018
- [10] 嵇永臣, 魏建军, 管玉峰. WWER 机组安全壳密封与强度试验技术 [J]. 能源技术与管理, 2019, 44(5): 132
JI Yongchen, WEI Jianjun, GUAN Yufeng. Seal and intensity experimental technique of WWER machinery containing vessel [J]. Energy Technology and Management, 2019, 44(5): 132. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9943.2019.05.050
- [11] 张伟, 杨文辉. 密封箱室气密性验收检测的基本介绍 [J]. 科技视界, 2020(17): 244
ZHANG Wei, YANG Wenhui. Basic introduction of air tightness acceptance test of sealed box room [J]. Science & Technology Vision, 2020(17): 244. DOI:10.19694/j.cnki.issn2095-2457.2020.17.83
- [12] 吴录平. 密封箱室密封性分级及其检验方法: EJ/T 1096—1999 [S]. 北京: 中国核工业总公司, 1998
WU Luping. Containment enclosures: Classification according to leak tightness and associated checking method; EJ/T 1096—1999 [S]. Beijing: China National Nuclear Industry Corporation, 1998
- [13] 李建发, 滑永振, 李传军, 等. 一种安全壳泄漏率的测量方法: CN115240881A [P]. 2022-10-25
LI Jianfa, HUA Yongzhen, LI Chuanjun, et al. Method for measuring the leakage rate of containment; CN115240881A [P]. 2022-10-25
- [14] 李建发, 滑永振, 刘丰, 等. 恒压法测量核电厂安全壳泄漏率的实验研究 [J]. 核动力工程, 2023, 44(5): 175
LI Jianfa, HUA Yongzhen, LIU Feng, et al. Experimental investigation on measuring leakage rate of nuclear power plant containment by constant pressure method [J]. Nuclear Power Engineering, 2023, 44(5): 175. DOI:10.13832/j.jnpe.2023.05.0175
- [15] 李建发, 陈广恒, 张瑞, 等. 恒压法安全壳泄漏率测量技术的开发与可行性研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(7): 1124
LI Jianfa, CHEN Guangheng, ZHANG Rui, et al. Development and feasibility study of the containment leakage rate measurement technology using the constant pressure method [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023, 44(7): 1124. DOI: 10.11990/jheu.202304010
- [16] 国家质量监督检验检疫总局. 测量不确定度评定与表示: JJF 1059.1—2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Evaluation and expression of uncertainty in measurement; JJF 1059.1—2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2013

(编辑 张 红)