

文章编号: 0258-0926(2021)03-0121-05; doi:10.13832/j.jnpe.2021.03.0121

双层安全壳环廊泄漏率分析方法研究

何 锐¹, 沈东明¹, 李少纯¹, 陈 威¹, 黄晓明²

1. 中广核工程有限公司核电安全监控技术与装备国家重点实验室, 广东深圳, 518172;
2. 华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉, 430074

摘要: 双层安全壳核电机组的环廊密封性是核安全的重要保证, 需要准确测量以验证其与设计的符合性。本文以压差和流量之间的二次函数理论为基础推导了环廊负压和时间的函数关系, 并利用此函数计算了环廊密封性试验期间内外压力平衡过程中各时间点的泄漏率, 同时对环廊负压参考端的压力特性进行了分析, 提出了带环廊负压修正的拟合方案。某核电厂实测数据验证结果表明, 使用带环廊负压修正的二次函数拟合方案进行环廊泄漏率分析时精度较高。

关键词: 双层安全壳; 环廊; 密封性; 泄漏率
中图分类号: TL 364+.3 **文献标志码:** A

Research on Double Containment Annulus Leakage Rate Test

He Rui¹, Shen Dongming¹, Li Shaochun¹, Chen Wei¹, Huang Xiaoming²

1. State-Key Laboratory of Nuclear Power Safety Monitoring Technology and Equipment, China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518172, China;
2. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074, China

Abstract: The tightness of the double containment annulus is critical to the safety of nuclear power plants, and the test procedure and data analysis should be reliable and reasonable. The formulation of the pressure in double containment annulus versus time is deduced in this paper with the foundation of the quadratic function law of pressure difference and the rate of air flow, which is used to calculate the leakage rate of the annulus at specified time. The fitting of annulus leakage rate against pressure difference is resulted from the analysis of the property of reference point for the measurement of annulus negative pressure. The quadratic theory is verified with project measured data, and is optimised with a corrected pressure difference, which performs better, and is recommended in the calculation of annulus leakage rate test.

Key words: Double containment, Annulus, Tightness, Leakage rate

0 前 言

目前, 三代核电均采用双层安全壳设计^[1], 其中欧洲先进压水堆(EPR)、中国三代核电技术“华龙一号”等核电机组的内、外安全壳之间的环廊在正常运行和事故工况下需维持负压。法国核岛设备设计建造规则协会(AFCEN)出版的《EPR技术规范土建工程规则》(ETC-C)等技术规范要求核电机组启动前需通过环廊泄漏率测量以验证其密封性是否满足设计要求。外层安全壳的密封性设计要求比内层安全壳低, 环廊密封性试验时内外压力平衡过程存在着明显的非线性

特征, 因此传统的内层安全壳泄漏率测量数据的线性分析方法无法简单套用。国外某公司在执行环廊泄漏率和压差关系计算时, 采用线性拟合方案, 存在试验重复精度低、离散度大的问题。

本文分析了环廊气体泄漏路径, 推导出双层安全壳环廊密封性试验期间环廊负压(P_d)和时间(t)的函数关系。同时研究了环廊负压参考端的特性, 提出带环廊负压修正的二次函数拟合方案。

1 外层安全壳环廊泄漏率的计算

以 EPR 机组为例, 双层安全壳核电机组在装

收稿日期: 2020-04-23; 修回日期: 2021-03-18

作者简介: 何 锐(1985—), 男, 工程师, 现主要从事核电厂安全壳测试工作, E-mail: herui@cgnpc.com.cn

料前, 需要保证双层安全壳环廊负压在 1303 Pa 和 620 Pa 时由环廊外向环廊内泄漏的泄漏率满足设计要求^[2]。双层安全壳环廊泄漏率测量时, 一般采用抽负压方案。在外层安全壳密封性试验过程中, 环廊抽负压及内外压力平衡的过程称为压力循环, 在内外压力平衡过程中进行环廊泄漏率测量。图 1 为某核电机组的 1 个压力循环期间 P_d 随 t 的变化情况。

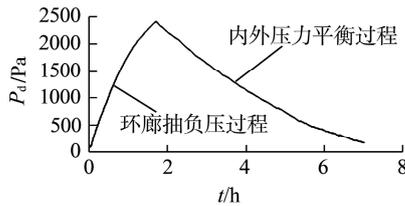


图 1 环廊泄漏率试验压力循环曲线

Fig. 1 Typical Procedure of One Annulus Tightness Test Cycle

进行环廊泄漏率测量时, 每间隔 Δt 时长进行一次环廊气体参数测量, 同时也需要对环廊相对周围环境的压差 (即环廊负压, P_d) 进行测量。某时刻的环廊泄漏率 (L) 可用该时刻前后测量得到的气体参数进行计算, 直至试验结束。

从图 1 可以看出, 与内层安全壳试验相比, 测量过程中 P_d 在整个测量过程中表现出较为明显的非线性特性, 因此不能直接采用现行标准推荐的气体参数梯度法 (《压水堆核电站土建设计和建造准则 (RCC-G)》推荐算法) 或者质量点法 (《安全壳密封性试验要求 (ANSI56.8)》推荐算法) 计算 L 。若已知内外压力平衡过程中 P_d 和 t 的函数形式 $P_d=f(t)$, 则可使用测量数据对函数 $f(t)$ 进行拟合得到该时间段内的函数关系, 进而有:

$$L_i = Vf'(t_i) \quad (1)$$

式中, L_i 为时刻 t_i 环廊的泄漏率; V 为环廊气体自由容积; $f'(t_i)$ 为 $f(t)$ 在 t_i 处的导数。

需要说明的是, 式 (1) 成立的前提条件是环廊内的气体温度不变。由于环廊密封性试验过程中环廊气体平均温度 (T) 变化较小, 因此若参与拟合的数据时间跨度较小, 就可保证式 (1) 的计算精度。

对前述各时刻的 L_i 和各时刻的环廊负压 P_{di} 进行回归, 可得到 P_d 和 L 之间的函数关系, 即可计算出设计压差 (P_{dd}) 下的 L 。

式 (1) 计算结果为环廊湿空气泄漏率, 乘以干空气占比系数 (α) 即可转换为干空气泄漏率, α 的计算式为:

$$\alpha = \frac{P_{H_total} - P_{H_steam}}{P_{H_total}} \quad (2)$$

式中, P_{H_total} 为环廊绝对压力; P_{H_steam} 为水蒸气分压。

2 环廊泄漏特性

2.1 双层安全壳泄漏路径

双层安全壳的主要泄漏路径包括混凝土裂缝、气密门上的缝隙及贯穿件、电缆孔洞、设备闸门和人员闸门膨胀节缝隙、孔洞封堵材料和混凝土框架之间的缝隙等。根据泄漏点的几何特征可分为薄壁小孔、短孔、细长小孔、平行平板缝隙、圆环缝隙等 5 种类型。

上述各种类型的泄漏点在外层安全壳上单独存在, 或以串联、并联、串并联等多种组合形式存在, 其流量与压差的函数关系可用二次函数理论^[3-5]进行表述。

2.2 流量与压差的二次函数理论

薄壁小孔、短孔 (第一类泄漏点)、串联小孔的泄漏率^[6]为 $C_S\sqrt{P_d}$ (C_S 为第一类泄漏点的流量系数), 细长小孔、平行平板缝隙和圆环缝隙 (第二类泄漏点) 的泄漏率为 $C_C P_d$ (C_C 为第二类泄漏点的流量系数)。理论上每个泄漏点的流量系数均有不同。环廊整体泄漏率 (Q_a) 为:

$$Q_a = \sum_{i=1}^m C_{Si}\sqrt{P_d} + \sum_{j=1}^n C_{Cj}P_d = C_1\sqrt{P_d} + C_2P_d \quad (3)$$

式中, m 为环廊第一类泄漏点数量; n 为环廊第二类泄漏点数量; C_{Si} 为第 i 个第一类泄漏点的流量系数; C_{Cj} 为第 j 个第二类泄漏点的流量系数; C_1 、 C_2 分别为环廊第一、二类泄漏点的流量系数之和。

2.3 二次函数理论下环廊负压与时间关系

Q_a 也可表示为:

$$Q_a = \frac{dM}{dt} = C_1\sqrt{P_d} + C_2P_d \quad (4)$$

式中, M 为气体质量。

若认为某时间段内 T 为常数, 由理想气体状态方程微分可得:

$$dM = -\frac{V}{RT} dP_d \quad (5)$$

式中, R 为气体常数。将式 (5) 代入式 (4) 并适当变换, 可得:

$$-\frac{V}{RT} \frac{dP_d}{C_1\sqrt{P_d}+C_2P_d} = dt \quad (6)$$

在时间区间 $(0, t)$ 内, 从环廊负压参考端压力 (P_{d0}) 变化至 P_d , 对式 (6) 两边进行定积分, 可计算得到 P_d 与 t 的函数关系式为:

$$P_d = f(t) = \frac{1}{C_2^2} \left[\left(C_2\sqrt{P_{d0}} + C_1 \right) e^{-\frac{C_2RTt}{2V}} - C_1 \right]^2 \quad (7)$$

由于时间 $(0, t)$ 内 T 不变的假设, 式 (7) 仅适用于较短的时间范围内的计算, 而非整个内外压力平衡过程。

2.4 环廊负压参考端压力的修正

核电厂机组装料前需要完成环廊泄漏率测量, 如某双层安全壳核电机组规范要求测量环廊在负压 620 Pa 和 1303 Pa 时 (相对于大气压力) 的泄漏率。环境风速的伯努利效应、外层安全壳周围厂房内负压维持系统的波动都会导致环廊泄漏点两侧压差变化, 同时也会导致 P_{d0} 变化^[5]。某双层安全壳核电机组外层安全壳约有一半的外表面被包围在周围厂房内, 这些厂房正常运行期间维持着 100 Pa 左右的负压。

考虑各种影响因素, 式 (3) 也可表示为:

$$Q_a = C_{1atm}\sqrt{P_{datm}} + C_{2atm}P_{datm} + C_{1per}\sqrt{P_{dper}} + C_{2per}P_{dper} \quad (8)$$

式中, C_{1atm} 、 C_{2atm} 分别为露天区域外层安全壳的第一类、第二类泄漏点流量系数和; P_{datm} 为露天区域外层安全壳两侧的压差; C_{1per} 、 C_{2per} 分别为被包裹在周围厂房内的外层安全壳的第一、二类泄漏点流量系数和; P_{dper} 为被包裹在周围厂房内的外层安全壳两侧的压差。

明显的, 式 (8) 中的变量较多, 且需要测量的气体参数较多, 所以实用性较差。若要准确测量环廊泄漏率, 应使周围厂房内压力与大气压力相等 ($P_{dper} = P_{datm}$), 即要求将周围厂房的负压维持系统停运。但在环廊泄漏率测量期间, 周围厂房的系统及设备处于核电厂建造关键路径, 不能停运周围厂房的通风系统。为简化测量方案, 在不停运周围厂房负压维持系统的情况下执行环廊泄漏率测量试验, 可引入 P_{d0} 。该参数可理解为所有外层安全壳泄漏点外侧的等效压力, 若测量

过程中环境风速干扰较小, 则 P_{d0} 应介于 0 和周围厂房负压之间; 若环境风速较大, 则 P_{d0} 可能大于周围厂房最大负压。式 (8) 则被改写为:

$$Q_a = C_3\sqrt{P_d + P_{d0}} + C_4(P_d + P_{d0}) \quad (9)$$

式中, C_3 、 C_4 分别为环廊所有第一、二类泄漏点的等效流量系数。

2.5 环廊负压参考端 P_{d0} 的取值

根据实际经验, 外层安全壳的主要泄漏点集中在电缆孔洞、人员闸门、设备闸门、气密门等位置。这些泄漏通道均位于外层安全壳周围厂房内部, 外层安全壳露天区域的泄漏点较少。因此, P_{d0} 应当与外层安全壳周围厂房的实际运行负压较为接近。这个原则也可以用来判定式 (9) 与实际情况的匹配程度。

实际工程应用中, P_{d0} 可取函数拟合时拟合的残差平方和 (RSS) 最小时的值, 或者拟合优度 (r^2) 最大时的值。

3 实测数据验证

本文利用 2019 年某核电厂 2 号机组环廊泄漏率测量试验数据进行验证, 试验期间外层安全壳周围厂房负压为 90~110 Pa; 测量时间间隔 Δt 为 2 min; 瞬时泄漏率计算时间跨度为 60 min。本次试验进行了 6 次压力循环 (代号为 C1~C6), 其中 5 个循环数据为有效数据 (C2~C6)。拟合分析软件为 MATLAB 12.0, 整个数据分析过程中未进行数据剔除操作。

分析过程中, 首先使用式 (1)、式 (7) 计算各个压力循环、各时刻的环廊泄漏率, 由于此计算过程不涉及本文核心内容, 故不赘述。

利用式 (9) 对每个时刻下环廊泄漏率数据进行拟合, 计算环廊泄漏率与其负压之间的函数关系, 并与国外某公司的线性拟合方案进行对比。

3.1 二次函数拟合

对于循环 C2, 在区间 $P_{d0} \in [0 \text{ Pa}, 200 \text{ Pa}]$ 内的 15 个点上使用式 (9) 进行了拟合。这 15 次拟合的 RSS 和 r^2 变化趋势见图 2。由此可知, RSS 的最小值和 r^2 的最大值均在 $P_{d0}=135 \text{ Pa}$ 时。因此, 可将 $P_{d0}=135 \text{ Pa}$ 时的拟合结果 (C_3 , C_4) 作为 C2 循环的二次函数拟合最终结果。

C2 循环的拟合结果见图 3, 参与图 3 中拟合曲线计算的数据点有 131 个, 但图 3 仅等间隔抽

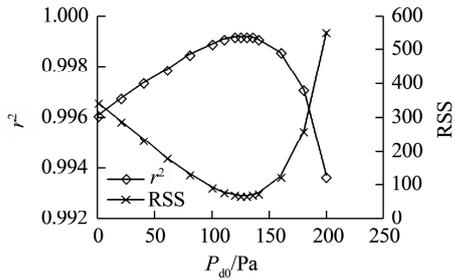


图2 不同 P_{d0} 时使用二次函数对 C2 循环拟合结果
Fig. 2 Result of Quadratic Fitting Analysis on C2 with Different P_{d0}

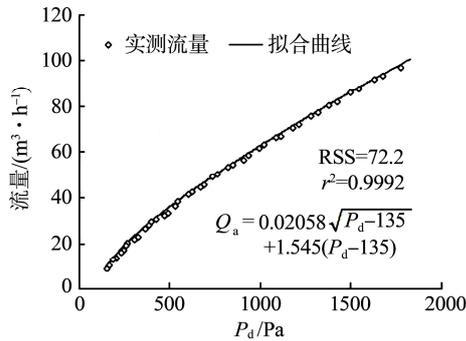


图3 $P_{d0} = 135$ Pa 时 C2 循环的二次曲线拟合结果
Fig. 3 Result of Quadratic Fitting Analysis on C2 with $P_{d0} = 135$ Pa

取了 43 个数据点用于显示。

由图 4 可以发现大部分拟合残差在 $-1 \sim 1 \text{ m}^3/\text{h}$ 范围内。

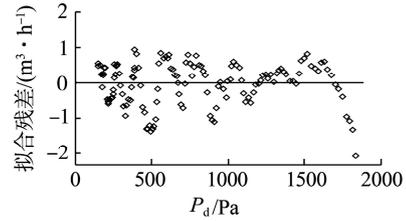


图4 使用二次函数对 C2 循环进行拟合时的残差
Fig. 4 Residual of Quadratic Fitting Analysis on C2

与 C2 循环拟合过程类似，C3~C6 循环的二次函数拟合结果见表 1。由于双层安全壳机组要求测量 P_{dd} 为 620、1303 Pa 时的泄漏率，且要求在全厂失电一定时间后环廊的最低负压为 286 Pa，因此本文对此 3 个环廊负压值均进行了分析。

3.2 线性函数拟合

国外某公司在进行环廊泄漏率和环廊负压之间的函数拟合时，采用了最小二乘法线性拟合，图 5 为该公司推荐方案的拟合结果。可以看出该方案的拟合曲线在 P_d 为 0 时仍有 $11.46 \text{ m}^3/\text{h}$ 的流量，与实际情况不符。若强制使拟合直线过零，则 $\text{RSS}=2758$ 、 $r^2=0.9693$ ，其拟合效果更差。

该拟合的残差分布见图 6，可以发现拟合残差在 $-7 \sim 4 \text{ m}^3/\text{h}$ 范围内，且有明显的中间大、两端小的趋势。使用线性回归拟合方案对 C2~C6 循环的拟合结果见表 2。

表 1 使用二次函数进行拟合的结果
Tab. 1 Result of Quadratic Fitting Analysis

| 循环编号 | C_3 | C_4 | P_{d0}/Pa | RSS | r^2 | 目标环廊负压时的拟合值/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) | | |
|------|---------|-------|--------------------|------|--------|---|--------|---------|
| | | | | | | 286 Pa | 620 Pa | 1303 Pa |
| C2 | 0.02058 | 1.545 | 135 | 72.2 | 0.9992 | 22.09 | 44.00 | 78.00 |
| C3 | 0.02339 | 1.360 | 85 | 84.7 | 0.9994 | 23.98 | 43.97 | 77.10 |
| C4 | 0.02231 | 1.462 | 115 | 23.5 | 0.9995 | 22.93 | 44.11 | 78.05 |
| C5 | 0.02188 | 1.502 | 115 | 47.7 | 0.9994 | 23.39 | 44.81 | 78.95 |
| C6 | 0.02859 | 1.245 | 105 | 46.2 | 0.9995 | 21.92 | 42.97 | 78.59 |

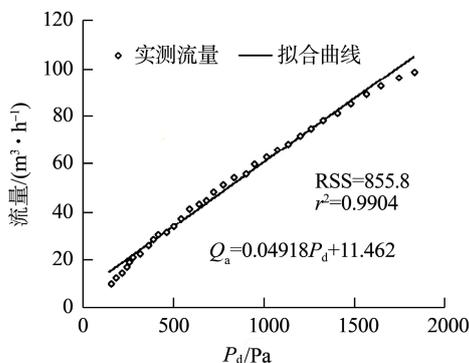


图5 使用线性回归法对 C2 循环的拟合结果
Fig. 5 Result of Linear Fitting Analysis on C2

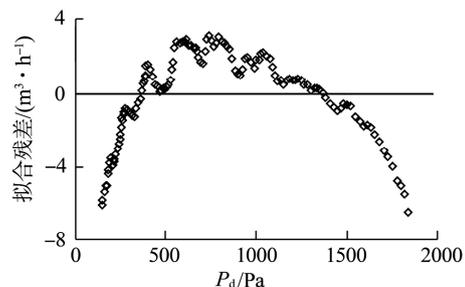


图6 使用线性回归对 C2 循环进行拟合时的残差
Fig. 6 Residual of Linear Fitting Analysis on C2

表 2 使用线性回归拟合的结果
Tab. 2 Result of Linear Fitting Analysis

| 循环编号 | 斜率 | 截距 | RSS | r^2 | 目标环廊负压时的拟合值/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) | | |
|------|---------|--------|--------|--------|--|--------|---------|
| | | | | | 286 Pa | 620 Pa | 1303 Pa |
| C2 | 0.04918 | 11.462 | 855.8 | 0.9904 | 25.53 | 41.95 | 76.87 |
| C3 | 0.04778 | 11.956 | 1174.7 | 0.9915 | 25.62 | 41.58 | 75.50 |
| C4 | 0.04800 | 13.428 | 315.8 | 0.9936 | 27.16 | 43.19 | 77.27 |
| C5 | 0.04721 | 14.265 | 634.1 | 0.9924 | 27.77 | 43.54 | 77.05 |
| C6 | 0.05342 | 7.536 | 741.5 | 0.9918 | 22.81 | 40.66 | 78.58 |

3.3 拟合方案结果比较

对表 1 和表 2 中的数据进行比较可以看出：

(1) 线性回归拟合的 r^2 略小于二次函数拟合，但二者均大于 0.99。由图 7 可看出线性回归拟合方案的 RSS 明显大于二次函数拟合。

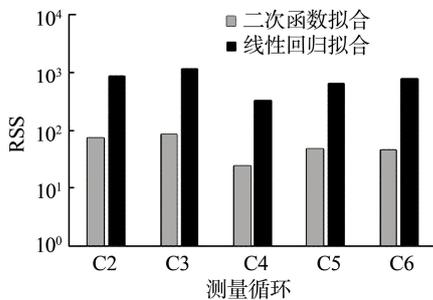


图 7 2 种拟合方案下的 RSS 对比

Fig. 7 RSS of Linear Fitting Analysis Compared with Quadratic Method

(2) 对于 5 个独立的压力循环，由图 8 可看出使用线性回归拟合方案计算的平均值偏差平方和明显大于二次函数拟合方案，说明线性回归拟合方案计算结果离散度大、不稳定、不符合实际工况的物理含义。但在压力循环的中间部位 (P_d 为 620 Pa 和 1303 Pa 时) 结果尚可接受。

(3) 使用二次函数拟合时，不同压力循环的 P_{d0} 不一致；但由于数据量有限，暂无法分析其具

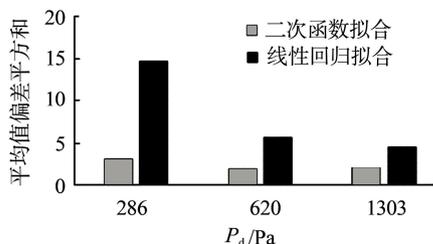


图 8 2 种拟合方案计算结果对比

Fig. 8 Result of Linear Fitting Analysis Compared with Quadratic Method

体原因；使用二次函数拟合时的 P_{d0} 的取值区间为 85 ~ 135 Pa，与试验期间周围厂房的负压值 (90 ~ 110 Pa) 吻合程度良好。

4 结 论

(1) 计算某时刻环廊泄漏率时，可分段、滑动使用二次函数理论下的环廊负压和时间函数。

(2) 进行环廊泄漏率与压差函数关系拟合时，推荐使用带环廊负压参考端压力修正的二次函数拟合方案。

(3) 测量环廊泄漏率时，建议环廊负压参考端 (压力传感器参考端连接的引压管) 放置在受环境风速影响较小的位置，同时也尽量对外层安全壳周围各厂房进行负压测量，以便对试验结果进行综合分析。

参考文献：

- [1] 种毅敏, 石雪珏, 杨志义, 等. 严重事故下开启双层安全壳环形空间通风过滤系统对缓解放射性向环境释放影响研究[J]. 核科学与工程, 2016, 36(4): 504-509.
- [2] 法国电力公司 (EDF). Technical code for civil works: part 3: ETC-C[S]. 法国: 法国核电规范标准协会 (AFCEN), 2006.
- [3] IAIN S WALKER, DAVID J WILSON, MAX H SHERMAN. A comparison of the power law to quadratic formulations for air infiltration calculations[J]. Energy and Buildings, 1997, 27(3): 293-299.
- [4] 袁秀玲, 陈志明, 樊珍. 气体通过小间隙泄漏量的计算模型[J]. 流体工程, 1993, 21(3): 77-81.
- [5] 吴楠, 黄树明, 刘新建, 等. 核电厂严重事故下双层安全壳环形空间通风系统延迟停运的放射性后果影响分析[J]. 核安全, 2016, 15(3): 64-71.
- [6] 彭光正, 纪春华, 葛楠. 微流量串联小孔流场特性研究[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(5): 1305-1308.

(责任编辑: 刘 君)