

文章编号 : 0258-0926(2016)02-129-03 ; doi: 10.13832/j.jnpe.2016.02.0129

反应堆舱密封性试验技术

林晓玲, 田沿杰

核化安全研究所, 北京, 100077

摘要 : 提出 2 种堆舱密封性试验方法: 压力衰减法和示踪剂泄漏试验法。针对 2 种试验方法的原理依据, 给出试验测量和分析方法。经分析论证, 示踪剂泄漏试验可采用 SF₆ 气体作为示踪剂。

关键词 : 反应堆舱; 密封性; 试验

中图分类号 : TL364 **文献标志码 :** A

Airtightness Test Technology for Reactor Compartment

Lin Xiaoling, Tian Yanjie

Nuclear Safety and Chemical Defense Institute, Beijing, 100077, China

Abstract: Two different methods to test the reactor compartment airtightness have been set up, which are the pressure reduction and the indicator leakage. Measurement and analysis ways in the two methods have been separately presented according to their principle bases. Based on the theory analysis, SF₆ has been verified to act as the indicator in the indicator leakage test.

Key words: Reactor compartment, Airtightness, Test

0 引言

核动力舰船中, 核反应堆所在的舱室称为反应堆舱, 包容了包括反应堆在内的所有含有放射性的系统设备和管道, 是阻止放射性物质泄漏到工作舱室和生活舱室的最后一道屏障。反应堆舱压力边界上含有密封门和众多贯穿件, 是反应堆舱泄漏的主要途径。正常情况下, 反应堆舱应处于负压状态, 堆舱放射性核素不会释放到邻舱。当发生核事故时, 一回路系统的高温高压水释放到堆舱, 堆舱负压瞬间消失, 正压不断增大, 经一回路系统释放到堆舱的放射性物质, 将经贯穿件和密封门泄漏到邻舱。邻舱中的放射性物质又将经通风系统、空气再生系统、空调系统等扩散到其他舱室, 造成整个核舰船的放射性污染。可见, 堆舱泄漏率与核事故的后果正相关, 泄漏率越大, 事故后果将越严重。由于核潜艇空间狭窄,

所以较小的泄漏率可能造成很严重的辐射后果。因此, 反应堆舱必需具有足够的强度和密封性, 以承受设计基准事故造成的压力, 防止不可接受的放射性物质释放到工作舱室。

堆舱泄漏率是堆舱密封性的表征数据, 该数据无法通过理论计算得到, 必需进行相关试验确定。本文介绍 2 种反应堆舱密封性试验方法, 为今后开展核动力舰船反应堆舱密封性试验提供技术方法。

1 压力衰减法

1.1 基本原理

压力衰减法也称绝对压力法(简称压力法), 堆舱空气的泄漏将造成压力的下降, 压力法就是将堆舱加至一定压力, 然后测量堆舱在一定时间内的压力、温度和湿度, 计算堆舱泄漏的空气量,

收稿日期: 2015-05-28; 修回日期: 2015-10-08

作者简介: 林晓玲(1968—), 女, 高级工程师, 硕士, 现主要从事辐射安全研究

从而确定泄漏率,其基本原理是基于理想气体定律。

根据 Boyle-Charles 法则,堆舱内的气体遵循下列公式:

$$PV=MRT \quad (1)$$

式中, P 为堆舱空气的绝对压力, kg/m^3 ; V 为堆舱体积, m^3 ; M 为堆舱中空气的质量, kg ; R 为空气的气体常数, $\text{kg} \cdot \text{m}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T 为堆舱中空气的绝对温度, K 。

堆舱体积 V 不变,通过测量不同时间堆舱的 P 和 T ,可计算堆舱空气质量 M 或不同时间间隔内的质量变化 ΔM ,从而推算堆舱泄漏率 L 。

某一时间间隔内 (t) 堆舱的泄漏率 L 计算公式如下:

$$L = \left(1 - \frac{p_2 T_1}{p_1 T_2}\right) \times 100\% \quad (2)$$

每小时的泄漏率为:

$$L_m = \left(1 - \frac{p_2 T_1}{p_1 T_2}\right) \frac{1}{t} \times 100\% \quad (3)$$

式中, t 为由 t_1 时刻到 t_2 时刻的时间间隔; p_1 、 T_1 、 M_1 分别为 t_1 时刻堆舱中空气的绝对压力、绝对温度和空气质量; p_2 、 T_2 、 M_2 分别为 t_2 时刻堆舱中空气的绝对压力、绝对温度和空气质量。

由上述公式可知,堆舱泄漏率由堆舱中的空气温度、压力和湿度决定。

若 2 次测量的时间间隔 t 很短,堆舱温度可视为没有变化,则该时间间隔内堆舱泄漏率只与堆舱压力有关,其公式为:

$$L = \left(1 - \frac{p_2}{p_1}\right) \frac{1}{t} \times 100\% \quad (4)$$

1.2 试验方法

核舰船发生核事故时,将引起堆舱温度和压力的升高,而温度和压力是影响堆舱泄漏率的重要因素,因此,试验中应尽量使堆舱环境与事故情况相符合。可参考“安全分析报告”计算给出的典型核事故时堆舱的温度和压力为堆舱升温升压。当堆舱温度和压力达到预定值后,开始测量堆舱温度和压力的下降情况,每隔 10 min 计数 1 次,计算不同时刻堆舱的平均泄漏率,绘制堆舱压力随时间的变化图。根据 ΔM 对时间 t 的变化规律进行最小二乘法拟合,得到 ΔM 的相对变化

率,从而得出堆舱泄漏率的变化。

如果堆舱压力和温度过高,可能损坏堆舱中的设施设备,因此,尽可能选择退役舰船开展该试验。

2 示踪剂泄漏试验法

2.1 原理方法

用示踪剂模拟放射性物质,将示踪剂释放到堆舱,示踪剂经贯穿件和屏蔽门泄漏到邻舱,并在空调系统等的作用下,又传输到其他各舱室。通过检测各工作舱和生活舱示踪剂浓度,可计算堆舱的泄漏量,从而确定堆舱泄漏率。

某时间间隔内堆舱泄漏率计算方法如下:

$$L_0 = \frac{1}{T_{k+1} - T_k} \times \frac{1}{C_0} \times 100\% \times \left[\sum_{i=1, i \neq n_0}^n (C_i \cdot V_i) \right]_{k+1} - \left[\sum_{i=1, i \neq n_0}^n (C_i \cdot V_i) \right]_k \quad (5)$$

式中, L_0 为 T_{k+1} 与 T_k 时间间隔内堆舱的平均泄漏率, $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$; T_k 为从释放开始至第 k 次采样时经过的时间, s ; C_0 为堆舱中示踪剂初始源项, g ; C_i 为第 i 舱的示踪剂平均积分浓度, $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; $i \neq n_0$ 表示堆舱以外的其他舱室; V_i 为第 i 舱的有效空间体积, m^3 ; n 为舱室总个数。

从释放开始到某一时刻,堆舱平均泄漏率计算方法见下式:

$$L_0 = \frac{1}{TC_0} \left[\sum_{i=1, i \neq n_0}^n (C_i \cdot V_i) \right] \times 100\% \quad (6)$$

2.2 示踪剂选择

可采用 SF_6 气体作为示踪剂模拟放射性源项, SF_6 气体符合示踪剂选择的 2 条基本原则:

(1) 在扩散方面与被模拟对象具有相似性:核动力舰船反应堆发生核事故时释放到堆舱中的放射性核素主要以惰性气体和气溶胶形态存在; SF_6 气体具有与惰性气体相同的释放和扩散特征,与放射性气溶胶具有相似的运动学和动力学特征,比气溶胶易于扩散,因此用它模拟气溶胶具有保守性。

(2) SF_6 气体环境本底浓度低、化学惰性、无毒、释放简易、取样方便、探测灵敏度高。

2.3 试验方法

结合核舰船系统设备布局 and 空间结构,确定

各舱室（堆舱除外）取样监测点。在每个监测点布放 1 套采样仪器，确保试验中各舱室同时采样。

假设核动力舰船处于（或模拟）水下状态或水面状态，模拟核事故时堆舱情景，给堆舱升温升压至预定值，向堆舱释放示踪剂，按一定时间间隔在各舱室采集示踪剂。采用气相色谱-电子捕获检测法（GC-ECD 法）分析 SF₆ 气体样品，采用 5A 分子筛填充柱分离 SF₆，由电子捕获检测器分析测量样品中 SF₆ 的含量。

3 结束语

反应堆舱密封性直接影响核动力舰船的辐射安全和核事故后果，在核安全分析和评价中具有

不可或缺的重要地位，因此建议新型号核动力舰船在设计建造阶段就应开展相关试验，以掌握该型号舰船的堆舱密封性。

试验可在实艇装备上开展，也可建立模拟舱段开展。若在实艇装备上开展，建议选择同类退役装备，因为模拟核事故情景可能造成堆舱系统设备的损伤；若建立模拟舱段开展试验，则模拟舱段在布局、结构、形状、尺寸和材质等方面应与实际装备保持一致，这是保证试验数据真实可信的基本条件。

（责任编辑：马 蓉）