# 基于互相关时差法的核电安全壳泄 漏定位方法研究

# 陈英瑜<sup>1</sup>,李尚科<sup>1</sup>,石宁波<sup>2\*</sup>,张庆阳<sup>3</sup>,张智新<sup>3</sup>,李刚<sup>1</sup>, 杨中华<sup>1</sup>,綦磊<sup>2</sup>,肖庆生<sup>2</sup>,芮小博<sup>3</sup>

(1.中广核核电运营有限公司,广东 深圳 518000; 2.北京卫星环境工程研究所,北京 100094;3.天津大学,天津 300072)

摘要:目的 基于声发射检测原理,探究一种适用于核电安全壳的泄漏定位方法。方法 首先,开展安全壳 结构的声波传播特性研究;其次,基于时频分析,对安全壳泄漏产生的声信号进行滤波预处理,基于分布式 传感网络,利用互相关系数曲线,估计不同传感器信号时延;最后,采用双曲线法,对泄漏源进行定位,得 到定位观测点,对观测点进行离散系数加权,得到预测泄漏源位置。结果 安全壳上波速平均值为 3 026.2 m/s, 泄漏声信号的频带主要集中在 15~80 kHz,没有明显的时域特征。采用该方法对模拟安全壳上的泄漏源进行 定位,平均定位误差为 4.31 cm。结论 安全壳上周向和轴向的波速差异不大,可近似认为是各项同性的。基 于离散系数加权的互相关时差法定位效果良好,满足安全壳结构泄漏定位需求。

关键词:声发射;安全壳;泄漏;互相关;离散系数;定位

中图分类号: TM623 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2023)11-0133-09 **DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2023.11.017

## Nuclear Power Containment Leakage Location Method Based on Cross correlation Time Difference Method

CHEN Ying-yu<sup>1</sup>, LI Shang-ke<sup>1</sup>, SHI Ning-bo<sup>2\*</sup>, ZHANG Qing-yang<sup>3</sup>, ZHANG Zhi-xin<sup>3</sup>, LI Gang<sup>1</sup>, YANG Zhong-hua<sup>1</sup>, QI Lei<sup>2</sup>, XIAO Qing-sheng<sup>2</sup>, RUI Xiao-bo<sup>3</sup>

(1. China Nuclear Power Operations Co., Ltd., Guangdong Shenzhen, 518000, China; 2. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China; 3. Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**ABSTRACT:** The work aims to explore a leak location method suitable for nuclear power containment based on the principle of acoustic emission detection. Firstly, the acoustic propagation characteristics of the containment structure were studied. Secondly, based on time–frequency analysis, the acoustic signals generated by the containment leakage were filtered. Based on the distributed sensor network, the time delay of different sensor signals was estimated with the cross-correlation coefficient curve. Finally, the hyperbola method was used to locate the leakage source to obtain the location observation point, and the discrete coefficient weighting was used to obtain the predicted leakage source location. The average wave velocity on the containment

收稿日期: 2023-06-12; 修订日期: 2023-09-06

Received: 2023-06-12; Revised: 2023-09-06

**引文格式:** 陈英瑜, 李尚科, 石宁波, 等. 基于互相关时差法的核电安全壳泄漏定位方法研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(11): 133-141. CHEN Ying-yu, LI Shang-ke, SHI Ning-bo, et al. Nuclear Power Containment Leakage Location Method Based on Cross correlation Time Difference Method[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(11): 133-141.

<sup>\*</sup>通信作者(Corresponding author)

vessel was 3 026.2 m/s, and the frequency band of the leakage sound signal was mainly concentrated in the range of 15-80 kHz, without obvious time-domain characteristics. This method was used to locate the leakage source on the simulated containment vessel, the average location error was 4.31 cm. The difference in wave velocity between the circumferential and axial directions of the containment vessel is not significant, and can be approximated as isotropic. The cross correlation time difference method based on discrete coefficient weighting has good localization effect and meets the leakage localization requirements of the containment structure.

KEY WORDS: acoustic emission; containment; leakage; cross-correlation; discrete coefficient; location

安全壳即核反应堆安全壳<sup>[1]</sup>,是防止发生事故时 放射性物质外逸的密闭容器<sup>[2]</sup>。安全壳大多是内衬钢 板的预应力混凝土厚壁容器<sup>[3]</sup>,顶部为半球形,内径 约 40 m,壁厚约 1 m,高约 60~70 m<sup>[4]</sup>。核反应堆一 旦发生核物质泄漏,其带来的后果将会是毁灭性的<sup>[5]</sup>。 核反应堆中的放射性物质发生泄漏,放射性物质渗透 到地下,将会导致饮用水受到污染,放射性物质泄漏 到海洋中,给海洋中的生物带来辐射危害<sup>[6]</sup>。

历史上的3次重大核事故,美国三里岛核事故<sup>[7]</sup>、 前苏联切尔诺贝利核事故<sup>[8]</sup>以及日本福岛核事故<sup>[9]</sup>, 不仅造成了大量人员伤亡和财产损失,还带来严重的 环境污染。因此,对核电站安全壳泄漏检测和精准定 位是一项具有重大意义的安全工程<sup>[10-11]</sup>。

国内外核电站安全壳的泄漏主要产生于数量庞大的贯穿件缝隙<sup>[12]</sup>,典型的贯穿件泄漏如图 1 所示<sup>[13]</sup>。 核电运营商的工程师要定期检测安全壳的密封性能, 并对密封性能未满足要求的部位开展维修和再验证, 从而保证安全壳结构的完整性和完好的辐射屏蔽作 用,确保反应堆的安全运行<sup>[14]</sup>。

国内外学者针对安全壳泄漏进行了大量研究<sup>[15]</sup>, 形成了一些可行的方法总结如下:

1)示踪剂法。采用氦气作为示踪剂<sup>[16]</sup>,按照一 定比例充压到安全壳内,利用电厂辐射监测系统 (Plant Radiation Monitoring System, KRT)<sup>[17]</sup>在安 全壳厂房周围的分布点,捕捉从安全壳泄漏出来的气 体,分析判断泄漏区域<sup>[18]</sup>。

2) 皂泡法。通过在待测区域上涂抹肥皂水观察 是否有气泡来判断有无泄漏发生<sup>[19]</sup>。EDF(法国核电 站运营商)使用一种将肥皂溶液喷雾和流量计<sup>[20]</sup>相结 合的方法来定位和量化泄漏,并决定进行强制或预防 性维修的区域。该方法可以获得非常清晰的泄漏图, 检测阈值约为 10 L/h。然而由于整个墙面需要人工 扫描,导致这种方法耗时较长,并且参与检测的人 员众多。

3) 声波巡检定位法。当安全壳结构产生泄漏时, 在漏孔两侧压力差作用下,壳内物质会持续流过漏孔 而发生泄漏现象。壳内物质发生泄漏时,将产生高速 流动,形成湍流,在与漏孔的相互作用下,将会产生 声波信号,并进入到空气中<sup>[21]</sup>。基于以上原理,可利 用非接触式的声传感器对声波信号进行检测,实现对



a 耐压圆门泄漏



b 电缆贯穿件泄漏 图 1 贯穿件部件典型泄漏<sup>[13]</sup> Fig.1 Typical leakage of penetration components<sup>[13]</sup>: a) leakage of pressure resistant circular door; b) leakage of cable penetration piece

泄漏源的定位。目前声波巡检定位法的应用形式主要 有手持式超声检漏仪、空气麦克风阵列等<sup>[22]</sup>。

4)声发射法。声发射法是指利用泄漏产生的声信 号参数特性进行检测的方法。泄漏孔处介质与孔相互 作用会产生泄漏声信号,这种声信号包含了大量的信 息,如信号的幅值和能量、信号传播的相对时间等<sup>[23]</sup>。 2018 年法国核电站运营商(EDF)和勒芒大学声学实 验室联合研究了一种适用于安全壳建筑模型的波束 形成泄漏定位方法,在一个名为 VERCORS 的双层混 凝土安全壳建筑模型上进行了试验,验证了该方法的 可行性,如图 2 所示<sup>[24]</sup>。中国核电有限公司周正平开 发了一套核电厂声学泄漏监测系统(Acoustic Leak Monitoring System, ALMS),并应用在田湾核电厂 1、2 号机组。结果表明,该系统判断泄漏的产生时 间小于 1 min,泄漏位置和泄漏量的确定均能满足系 统的设计要求<sup>[25]</sup>。



Fig.2 Schematic diagram of containment air vibration detection process<sup>[24]</sup>

上述方法中,示踪剂法难以准确定位泄漏位置, 只能大概估计泄漏区域,需要结合其他方法进行准确 定位; 皂泡法不仅耗时,而且占用较大人力资源;声 波巡检法通常要求泄漏源的漏率较高,信号较强。其 中基于声发射的泄漏监测定位技术近几年得到了长 足的发展,但整体上具有耗时长、成本高、精度不足 等问题。究其原因在于,安全壳结构复杂、声波传播 规律复杂、泄漏率较低而信噪比低、泄漏信号连续定 位算法复杂等。因此,有必要探究一种适用于安全壳 泄漏监测与定位的方法。

### 1 基于离散系数加权的互相关时差法

当发生泄漏时,由于安全壳内外存在较大的压力 差,安全壳内的高压流体会以较大的速度冲向低压一 侧,冲出来的流体在漏孔处与安全壳相互作用会形成 声源。产生的声波除了会进入空气中,在安全壳壁上 也会以超声导波的形式远距离传播,导波的实质是一 种以超声频率或声频率在波导中平行于边界传播的 弹性波<sup>[26]</sup>。基于以上原理,可利用安全壳壁上的声传 感器采集泄漏信号进行分析计算实现泄漏定位。

安全壳泄漏信号一般是连续泄漏信号,针对连续 型泄漏信号定位,主要采用衰减测量定位方法、互相 关时差法和波束形成法<sup>[27]</sup>。其中衰减式测量定位方法 要求所有传感器与安全壳的耦合程度一致,但是安全 壳为钢筋混凝土结构声波随距离衰减关系复杂,难以 量化衰减特性曲线,无法实现精确定位。波束形成法 对传感器布局要求较高,并且占用传感器数量较多。 互相关时差法主要通过分布式传感器对泄漏信号进 行采集,通过互相关法进行时延估计,然后根据传感 器之间的几何关系,结合双曲线法进行泄漏定位。本 文提出的定位算法流程如图 3 所示。

1)互相关时延计算。传感器采集到的泄漏信号 夹杂着噪声信号,为了提高时延估计的准确性,首先 依据信号时频分析,选择合适的频段,对泄漏信号进 行数字滤波。为了提高运算速度,对滤波后的信号进 行截取,用于后续的互相关计算。理想情况下,任意 传感器接收到的信号相当于原始泄漏信号的延时副 本,其表达式为:

$$S_i(t) = S_0(t - \Delta t_i) + n_i(t) \tag{1}$$



图 3 基于离散系数加权的互相关时差法定位流程 Fig.3 Cross correlation time difference localization process based on discrete coefficient weighting

$$\Delta t_{i} = \frac{\sqrt{\left(x_{0} - x_{i}\right)^{2} + \left(y_{0} - y_{i}\right)^{2}}}{y_{i}}$$
(2)

式中:  $S_0(t)$ 是原始泄漏信号;  $\Delta t_i$ 是传感器 i 接收 到原始泄漏信号的时间延迟;  $n_i(t)$ 是传感器 i 采集的 噪声信号。 $(x_0, y_0)$ 和 $(x_i, y_i)$ 是泄漏源和传感器 i 的位置 坐标。互相关函数可以反映任意一段时间内 2 个信号 的相关程度,其计算公式为:

$$R_{ij}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_i(\tau) S_j(\tau+t) d\tau$$
(3)

将式(1)代入(3),化简得:

$$R_{ij}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_0(\tau - \Delta t_i) S_0(\tau - \Delta t_j + t) \mathrm{d}\tau$$
(4)

由互相关函数性质可知,当 $t=\Delta t_f-\Delta t_i$ ,互相关函数取得最大值, $t=\Delta t_f-\Delta t_i$ 是原始泄漏信号到达2个传感器的时间差, $v(\Delta t_f-\Delta t_i)$ 得到泄漏声源到任意2个传感器之间的距离差,结合传感器的位置关系可以确定 一条双曲线,见式(5)。

$$\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} - \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2} = (5)$$
  
$$v(\Delta t_i - \Delta t_i)$$

式中: (x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>)、(x<sub>j</sub>, y<sub>j</sub>)分别为传感器 *i* 和传感器 *j* 的坐标; v 为声波波速。N 组传感器对可以获得 N 条双曲线,双曲线交点位置即为声源位置,如图 4 所示。

2)离散系数加权。理想情况下, N 条双曲线两 两相交会得到 C<sub>N</sub><sup>2</sup>个定位观测点,不同观测点相对于 算术平均值分布的离散程度有差异,为减小偏差较大 点对定位结果的影响,分别在水平方向和竖直方向上 对观测点的位置坐标进行离散系数加权,假设有 *m* 个观测点,声源坐标计算公式为:

$$\begin{cases} x_{w} = \sum_{i=1}^{m} c_{ix} x_{oi} \\ y_{w} = \sum_{i=1}^{m} c_{iy} y_{oi} \end{cases}$$
(6)



图 4 双曲线法定位 Fig.4 Hyperbola method location

式中:(x<sub>w</sub>, y<sub>w</sub>)、(x<sub>oi</sub>, y<sub>oi</sub>)表示预测声源坐标和第 *i* 个观测点的坐标; c<sub>ix</sub>、c<sub>iy</sub>为第 *i* 个观测点水平和竖直 方向的离散系数。离散系数的求解公式为:

$$\begin{cases} c_{ix} = \frac{|x_{oi} - x_{avg}|^{-1}}{\sum_{j=1}^{m} |x_{oj} - x_{avg}|^{-1}} \\ c_{iy} = \frac{|y_{oi} - y_{avg}|^{-1}}{\sum_{j=1}^{m} |y_{oj} - y_{avg}|^{-1}} \end{cases}$$
(7)

式中: x<sub>avg</sub>、y<sub>avg</sub>为所有观测点的水平和竖直坐标 位置的算术平均值。

#### 2 缩比模型试验

根据核电站实际安全壳结构,建造了一个以1: 30的安全壳模型,尺寸:高为2m,内径为1.3m, 内壁为6mm厚的碳钢内衬,外面为100mm厚的钢 筋混凝土。以安全壳模型为试验对象,搭建的声发射 信号检测系统如图6所示。该系统主要分为安全壳模 型和信号采集系统2部分。

信号采集系统由声发射传感器、信号前置放大器、数据采集卡以及计算机组成。在整个系统中,声 发射传感器完成振动信号向电信号的转换;信号前置 放大器对电信号进行放大处理,以满足数据采集卡的 要求;数据采集卡完成电信号由模拟信号向数字信号 的转换,并通过 USB 数据传输线与计算机连接,完 成数据的实时显示与压缩存储等功能。

安全壳模型上有多个非连续结构,根据安全壳的 尺寸要求拟布置传感网络如图7所示。以图7中1号 传感器位置为坐标原点,建立平面直角坐标系,传感 器的坐标见表1。试验中采用断铅激励、气体泄漏2 种方式来产生声信号并进行定位分析,各个测试点的 位置见表2。



图 6 试验系统 Fig.6 Schematic diagram of experimental system

表 1 传感器位置 Tab.1 Sensor position						表 2 测试点位置 Tab.2 Position of test point				
编号	1	2	3	4	编号	0.5 mm	1.0 mm	2.0 mm	断铅点1	断铅点2
位置/cm	(0, 0)	(100, 0)	(100, 150)	(0, 150)	位置/cm	(30, 115)	(30, 75)	(30, 35)	(30, 95)	(30, 55)
	▲ 150 cm 載 K	0.5 mm	• 断铅点1 • 断铅点2 • 断铅点2 	3 2 X轴	10	h ž				
			x x2131111715 反 7	· 定位试验	传咸묋和测试	占布局				

Fig.7 Layout of location experimental sensor and test point: a) experimental layout; b) experimental scene map

# 3 结果及分析

#### 3.1 波速测量试验分析

波速是定位算法中的关键参数,以断铅信号为激励信号,在安全壳模型内壁周向和轴向分别布置2个接收传感器,通过距离差与时间差的比例关系计算周向和轴向的波速。试验设置采样率为2 MHz,重复

#### 10次, 传感器布置如图 8 所示。

首先对传感器采集到的断铅信号进行数字滤波, 并利用自适应阈值法获取断铅信号到达各个传感器 的时间,如图 9 所示。多次测量计算取平均值,得出 周向波速为 3 058.1 m/s,轴向波速为 2 994.0 m/s,周 向和轴向的波速差异不大,取两方向上波速平均值 3 026.2 m/s 用于后续定位分析。





b 试验现场 图 8 波速测量试验 Fig.8 Experimental diagram of wave velocity measurement: a) experimental layout; b) experimental scene map



for each channel

#### 3.2 定位试验分析

为验证试验测得的波速的准确性,按照图 7 布置 传感网络,以断铅为激励信号,选择 2 个测试点进行 试验,每个测试点进行 3 次重复性试验。断铅点位置 如图 7 所示,将试验测得的波速代入算法进行定位分 析,定位结果见表 3,测试点 1 的某一组断铅定位结 果如图 10 所示。2 个测试点 6 组断铅试验的平均定位 误差为 2.18 cm,定位结果良好,证明 3 026.2 m/s 的 波速用于声源定位是可靠的。



图 10 测试点 1 的断铅定位结果 Fig.10 Schematic diagram of pencil-lead break location results of test point 1

表 3 断铅试验定位结果

Tab.3 Location results of	pencil-lead	breaking	experiment
---------------------------	-------------	----------	------------

测试点位置/cm	试验序号	定位结果/cm	定位误差/cm
	1	(28.41, 97.18)	2.70
(30, 95)	2	(28.78, 96.51)	1.95
	3	(30.96, 96.90)	2.13
	1	(27.34, 54.94)	2.66
(30, 55)	2	(28.80, 55.66)	1.54
	3	(29.70, 52.92)	2.10

保持传感器位置不变,在传感网络范围内有 0.5、 1.0、2.0 mm 的漏孔,各个漏孔的位置见表 2。空压 机通过气动软管与选通阀门连接,选通阀门连接焊接 在漏孔处的管道形成泄漏通路。通过开启与泄漏孔相 连的选通阀门进行不同漏孔的泄漏试验,采集到的泄 漏信号如图 11 所示。

从时域信号波形来看,连续的泄漏信号较为稳定,不存在明显的时域特征。对比不同孔径漏孔的泄漏信号幅值特性可以发现,泄漏信号幅值大小与泄漏孔径大小正相关。从信号频域来看,泄漏信号为宽频信号,噪声和泄漏信号的频带主要集中在 15~80 kHz(传感器的频带为 15~75 kHz)。因此,后续定位分析中,设置滤波频段为 15~75 kHz 对信号进行滤波处理。

选取3个尺寸不同的漏孔进行泄漏试验,每个漏 孔重复进行10次试验。采用基于离散系数加权的互 相关时差法进行定位分析,统计结果见表4。



图 1	1 不回禰北的滙禰信	亏时颜图
Fig.11 Time frequency	plots of leakage signals	from different leakage holes

表 4 泄漏定位结果 Tab.4 Leakage location results

泄漏孔/mm	试验序号	定位结果/cm	定位误差/cm	泄漏孔/mm	试验序号	定位结果/cm	定位误差/cm
	1	(30.41, 37.55)	2.58		6	(24.87 81.95)	8.64
	2	(23.54, 34.33)	6.49	1.0	7	(29.41, 74.59)	0.72
	3	(25.46, 37.15)	5.02		8	(31.61, 71.81)	357
	4	(26.46 37.27)	4.21		9	(29.20, 74.49)	0.95
2.0	5	(22.26, 38.88)	8.66		10	(31.64, 82.67)	7.84
2.0	6	(23.08, 39.20)	8.09		1	(27.52, 114.25)	2.59
	7	(27.59, 39.86)	5.42	0.5	2	(29.00, 115.57)	1.15
	8	(23.76 30.68)	7.59		3	(28.08 122.67)	7.91
	9	(26.90 34.52)	3.14		4	(32.71, 123.38)	8.81
	10	(28.27, 40.39)	5.67		5	(26.18, 113.87)	3.99
	1	(25.97, 74.69)	4.03	0.5	6	(27.55 116.22)	2.74
	2	(28.63, 79.90)	4.89		7	(28.22, 115.81)	1.96
1.0	3	(35.35, 75.11)	1.36		8	(29.24, 116.68)	1.85
	4	(34.62, 74.34)	4.66		9	(30.39, 113.56)	1.49
	5	(30.02, 75.73)	0.73		10	(29.01, 112.78)	2.43

在 100 cm×150 cm 的范围内, 2.0、1.0、0.5 mm 漏孔的泄漏平均定位误差分别为 5.61、3.76、3.49 cm, 3 个漏孔的泄漏平均定位误差为 4.31 cm,相对误差 为 2.39%(相对于传感器网络中传感器间的最大距离 180 cm)。通过以上定位试验,表明基于离散系数加 权的互相关定位算法能够准确定位安全壳模型上的 声发射事件,该方法定位气体泄漏的平均误差为 4.31 cm,定位效果良好。

第 20 卷

第 11 期

在理想条件下,预测的泄漏源应与实际泄漏源一致,但实际中往往存在定位误差。这是由于与理想情况相比,2个信号互相关曲线的最大值在对应时间轴上的位置存在偏差。传感器3和传感器4到1.0 mm

漏孔的距离差为 21.81 cm,结合实测波速计算得到泄漏信号到达 2 个传感器的时延是 72.07 μs,但是实际 计算得到的是 116 μs 的时间延迟(如图 12 所示), 峰值和周围点之间的差异不够大,导致时间延迟计 算易受周边互相关系数较大点的影响,这将导致定 位误差。

此外,系统误差也会带来定位误差。系统误差 是由波速测量和数字采样率(来自 NI 采集卡)引 起的,通过多次波速测量取平均的方法存在一定误 差。该算法的时间分辨率为1 µs,基于试验测得的 波速 3 026.2 m/s,每偏移一个点将引入 0.30 cm 的 距离误差。



图 12 1.0 mm 漏孔传感器 3 和 4 的互相关系数曲线 Fig.12 Cross correlation coefficient curve of 1.0 mm leak hole sensors 3 and 4

#### 3 结语

本文提出了一种基于离散系数加权的互相关时 差定位方法,根据各个传感器信号之间的互相关系数 曲线计算时延,结合双曲线法进行初步泄漏定位,采 用离散系数加权对定位结果优化得到最终定位结果。 相较于传统阈值法<sup>[28]</sup>,该方法可以实现连续泄漏信号 的声源定位。试验证明本文方法具有可行性,3个漏 孔气体泄漏平均定位误差为 4.31 cm,相对误差为 2.39%,满足安全壳结构泄漏定位需求。

#### 参考文献:

- 邓豪放,王安庆,吕续舰. 基于 CFD 的安全壳内浮力 驱动自然对流特性分析[J]. 核技术, 2022, 45(9): 79-88.
   DENG Hao-fang, WANG An-qing, LYU Xu-jian. Analysis of Natural Convection Characteristics Driven by Buoyancy in Containment Based on CFD[J]. Nuclear Techniques, 2022, 45(9): 79-88.
- [2] 钱源. 核电厂安全壳结构监测系统改造及应用[J]. 仪器仪表用户, 2022, 29(5): 61-64.
   QIAN Yuan. Modification and Application of On-Line Monitoring System for Containment Structure in Nuclear Power Plant[J]. Instrumentation, 2022, 29(5): 61-64.
- [3] 常元智. 核电站安全壳内 <sup>13</sup>N 和 <sup>18</sup>F 输运模拟研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2019.
   CHANG Yuan-zhi. Study on Transport Simulation of <sup>13</sup>N and <sup>18</sup>F in Containment of Nuclear Power Plant[D]. Hen-gyang: University of South China, 2019.
- [4] 张大魏. 某核电站反应堆双层安全壳结构施工关键技术研究[D]. 南京:东南大学,2019.
   ZHANG Da-wei. Research on Key Technologies of Double Containment Structure Construction of a Nuclear Power Plant Reactor[D].Nanjing: Southeast University, 2019.
- [5] 张耀,张大发,陈登科,等.反应堆冷却剂承压边界泄漏监测技术及其发展[J].原子能科学技术,2008, 42(S1):100-105.

ZHANG Yao, ZHANG Da-fa, CHEN Deng-ke, et al. Development of Pressure Boundaries Leak Detection Technology for Nuclear Reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(S1): 100-105.

- [6] 林武辉, 余克服, 杜金秋, 等. 日本福岛核废水排海情 景下海洋生态环境影响与应对[J]. 科学通报, 2021, 66(35): 4500-4509.
  LIN Wu-hui, YU Ke-fu, DU Jin-qiu, et al. Consequences of Marine Ecological Environment and our Preparedness for Fukushima Radioactive Wastewater Discharge into the Ocean[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(35): 4500-4509.
- [7] 张馨文,诸葛蔚东,马晨一.从三里岛到福岛:《纽约时报》核事故报道框架分析[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2019, 11(4): 328-337.
  ZHANG Xin-wen, ZHUGE Wei-dong, MA Chen-yi. From Three Mile Island to Fukushima: A Content Analysis of the New York Times's Coverage Frames on Nuclear Accidents[J]. Journal of Engineering Studies, 2019, 11(4): 328-337.
- [8] 王燕君,李文红,邓君,等.切尔诺贝利和福岛核事故的今昔对比及引发世人的深思[J].中国辐射卫生, 2016, 25(4): 459-462.

WANG Yan-jun, LI Wen-hong, DENG Jun, et al. Comparison of Past and Present the Chernobyl and the Fukushima Nuclear Accident and Elicit Thinking[J]. Chinese Journal of Radiological Health, 2016, 25(4): 459-462.

[9] 王群, 耿云玲. 日本福岛核事故分析与思考[J]. 国防科技, 2012, 33(6): 11-19.
WANG Qun, GENG Yun-ling. Analysis and Thinking of Fukushima Nuclear Accident in Japan[J]. National Defense Technology, 2012, 33(6): 11-19.

- [10] 王斌. 切尔诺贝利和福岛核事故的传播比较研究[D]. 保定:河北大学, 2012.
  WANG Bin. Comparative Study on the Spread of Chernobyl and Fukushima Nuclear Accidents[D]. Baoding: Hebei University, 2012.
- [11] 华雄飞, 张松, 梅义俊. 核电站安全壳监检测技术发展 现状及探讨[J]. 无损检测, 2017, 39(10): 28-32.

HUA Xiong-fei, ZHANG Song, MEI Yi-jun. Development Status and Discussion of Monitoring Technology for the Safety Shell in Nuclear Power Station[J]. Nondestructive Testing Technologying, 2017, 39(10): 28-32.

- [12] 贡金鑫, 万广泽, 郭俊营, 等. 核电站安全壳老化研究 状况及进展[J]. 工业建筑, 2017, 47(1): 1-9.
   GONG Jin-xin, WAN Guang-ze, GUO Jun-ying, et al.
   State of the Art Studies of Containment Ageing of Npp[J].
   Industrial Construction, 2017, 47(1): 1-9.
- [13] 黄灏. 压力容器典型贯穿件密封泄漏的理论与实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
  HUANG Hao. Theoretical and Experimental Study on Seal Leakage of Typical Penetration of Pressure Vessel[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [14] 廖开星,李毅,孔祥龙,等. 核电站安全壳混凝土结构 长期预应力预测模型初步研究[J]. 混凝土, 2015(5): 140-144.
  LIAO Kai-xing, LI Yi, KONG Xiang-long, et al. Primary Research on Nuclear Power Station Containment Concrete Structure Long-Term Prestress Forecasting Model[J]. Concrete, 2015(5): 140-144.
- [15] 冯利法,黄海涛.核电厂钢制安全壳泄漏率测试系统的开发与验证[J].核科学与工程,2021,41(6):1159-1168.
   FENG Li-fa, HUANG Hai-tao. Development and Verifi-

cation of Steel Containment Vessel Leakage Rate Testing System of Nuclear Power Plant[J]. Nuclear Science and Engineering, 2021, 41(6): 1159-1168.

- [16] 冯春杰,柏佳磊.安全壳过滤排放系统泄漏检测试验研究[J].无损探伤,2019,43(2):45-47. FENG Chun-jie, BAI Jia-lei. Experimental Study on Leakage Detection of Containment Filtration and Discharge System[J]. Nondestructive Testing Technologying Technology, 2019, 43(2):45-47.
- [17] 张军旗,杜俊涛,花锋.华龙一号核电厂辐射监测系统 国产化情况与发展建议[J].核安全,2023,22(1):11-15. ZHANG Jun-qi, DU Jun-tao, HUA Feng. Localization and Development Suggestions of Radiation Monitoring System in Hualong No.1 Nuclear Power Plant[J]. Nuclear Safety, 2023, 22(1): 11-15.
- [18] 姚岩岩,高琳锋,吴振龙,等.核电厂通风系统碘吸附 器效率试验安全性分析[J].辐射防护,2020,40(1): 45-51.

YAO Yan-yan, GAO Lin-feng, WU Zhen-long, et al. Safety Analysis on Efficiency Test of Iodine Absorbers in Ventilation Systems of Nuclear Power Plants[J]. Radiation Protection, 2020, 40(1): 45-51.

[19] 吴建平, 陈昇, 曾凡粱, 等. 浅谈压力容器泄漏检测方

法现状及发展[J]. 中国特种设备安全, 2020, 36(8): 47-51.

WU Jian-ping, CHEN Sheng, ZENG Fan-liang, et al.
Discussion on the Present Situation and Development of Leakage Detection Methods for Pressure Vessels[J].
China Special Equipment Safety, 2020, 36(8): 47-51.

- [20] KEOGH P. The PWR Integrated Leak Rate Test, a Review of Experiences and Results[J]. Nuclear Engineering and Design, 1985, 90(2): 135-141.
- [21] 闫荣鑫,孙伟,李唯丹. 便携式舱内超声检漏仪的研制
  [J]. 中国空间科学技术, 2015, 35(3): 58-65.
  YAN Rong-xin, SUN Wei, LI Wei-dan. Research and Design on a Portable Intravehicular Ultrasonic Leak Detector for Manned Spacecraft[J]. Chinese Space Science and Technology, 2015, 35(3): 58-65.
- [22] 綦磊. 航天器在轨泄漏声阵列定位技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.

QI Lei. Research on Acoustic Array Positioning Technology of Spacecraft In-Orbit Leakage[D].Tianjin: Tianjin University, 2021.

- [23] 刘泽军. 便携式超声波气体泄漏检测仪的设计与实现
  [D]. 太原: 中北大学, 2022.
  LIU Ze-jun. Design and Implementation of Portable Ultrasonic Gas Leakage Detector[D]. Taiyuan: North University of China, 2022.
- [24] MORA P, VAUTRIN D, URSO G D, et al. Air Leak Detection in a Pressurized Containment Building Mock-up Using Elastic Guided Waves[J]. NDT & E International, 2022, 125: 102553.
- [25] 周正平. 核电厂声学泄漏监测系统的设计和验证[J]. 核动力工程, 2018, 39(3): 110-113.
   ZHOU Zheng-ping. Design and Verification of Acoustic Leak Monitoring System for Nuclear Power Plants[J].
   Nuclear Power Engineering, 2018, 39(3): 110-113.
- [26] 李绍星. 基于导波 B 扫成像的管道缺陷监测关键技术 研究[D]. 杭州:浙江大学, 2019.
  LI Shao-xing. Research on Key Technology of Pipeline Defect Monitoring Based on Guided Wave B-Scan Imaging[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [27] 付佳. 圆筒形容器表面声源定位方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
   FU Jia. Study on Sound Source Localization Method of Cylindrical Container Surface[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [28] LI Yi-bo, WANG Zhe, RUI Xiao-bo, et al. Impact Location on a Fan-Ring Shaped High-Stiffened Panel Using Adaptive Energy Compensation Threshold Filtering Method[J]. Applied Sciences, 2019, 9(9): 1763.

责任编辑:刘世忠