

## 核电厂主控室可居留性内漏剂量模型的研究

王超, 石艳明, 张延乐

### Study on the Habitable Dose Model of Internal Leakage in Main Control Room of Nuclear Power Plant

Wang Chao, Shi Yanming, and Zhang Yanle

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2022.04.0143>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

#### 核电厂事故条件下内部泄漏途径对主控室可居留性剂量影响研究

Effects of Internal Leakage Pathway on Main Control Room Habitable Dose in Accident Condition of Nuclear Power Plants  
核动力工程. 2020, 41(5): 162–167

#### 基于ALOHA的有毒有害气体泄漏对主控室可居留性影响研究

Study on Impact of Leakage of Toxic and Hazardous Gases on Habitability of Main Control Room Based on ALOHA  
核动力工程. 2019, 40(1): 126–130

#### 数字化核电厂主控室操纵员班组行为研究

Study on Behavior of Work Teams in Digital Main Control Room of Nuclear Power Plants  
核动力工程. 2019, 40(4): 123–126

#### 数字化主控室操纵员人因可靠性研究

Study on Human Reliability of Operator in Digital Main Control Room  
核动力工程. 2019, 40(4): 104–107

#### 核电厂数字化主控室操纵员的响应执行可靠性评估模型

An Assessment Model of Operator's Response Implementation Reliability in Digital Main Control Rooms of Nuclear Power Plants  
核动力工程. 2018, 39(5): 95–100

#### 核电厂数字化主控室操纵员界面管理任务特征的研究

Characteristics of Operator Interface Management Tasks in Digital Main Control Room of Nuclear Power Plants  
核动力工程. 2019, 40(4): 91–95



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2022)04-0143-04; DOI:10.13832/j.jnpe.2022.04.0143

# 核电厂主控室可居留性内漏剂量模型的研究

王超, 石艳明, 张延乐

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, 518124

**摘要:** 核电厂主控室无过滤渗漏风(内漏)的放射性影响是可居留性评价的重要部分, 目前针对该部分的剂量模型过于简化, 不符合实际工程设计。本研究结合核电厂实际设计特征, 对内漏源项迁移机理进行研究, 推导放射性活度微分方程, 建立主控室可居留性内漏剂量模型, 选取典型设计基准失水事故(LOCA)和发生堆熔的大破口失水事故(LB-LOCA)开展模型应用, 并与目前常用的简化模型进行对比。结果表明, 采用简化模型在 LB-LOCA 工况下的剂量结果小于采用本研究模型的结果, 简化模型无法包络所有事故情景。经分析, 本研究建立的内漏剂量模型更符合实际场景, 适用于主控室可居留区域的内漏影响评价, 并可用于内漏试验结果的验证以及工程项目设计。

**关键词:** 主控室; 可居留性剂量; 内漏

**中图分类号:** TL72 **文献标志码:** A

## Study on the Habitable Dose Model of Internal Leakage in Main Control Room of Nuclear Power Plant

Wang Chao, Shi Yanming, Zhang Yanle

State Key Laboratory of Nuclear Power Safety Monitoring Technology and Equipment, China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518124, China

**Abstract:** The radioactive impact of unfiltered air leakage (internal leakage) in the main control room of a nuclear power plant is an important part of habitability evaluation. At present, the dose model for this part is too simplified and does not accord with the actual engineering design. Combined with the actual design characteristics of a nuclear power plant, this study studies the migration mechanism of internal leakage source terms, deduces the differential equation of radioactivity, establishes the habitable internal leakage dose model of the main control room, selects typical design basis loss of coolant accident (LOCA) and large break loss of coolant accident (LB-LOCA) with reactor melting to carry out the application of the model, and compares it with the commonly used simplified model at present. The results show that the dose result of the simplified model under LB-LOCA condition is smaller than that of this model, and the simplified model can not cover all accident scenarios. After analysis, the internal leakage dose model established in this study is more in line with the actual scenario, suitable for the impact evaluation of internal leakage in the habitable area of the main control room, and can be used for the verification of internal leakage test results and engineering project design.

**Key words:** Main control room, Habitable dose, Internal leakage

## 0 引言

主控室可居留区域是核电厂事故工况下实现事故缓解的重要场所, 需要对其可居留性进行论

证和评价, 以确保为工作人员提供足够的辐射防护。HAD 002/01—2019《核动力厂营运单位的应急准备和应急响应》<sup>[1]</sup>指出, 当考虑涉及放射

收稿日期: 2021-06-04; 修回日期: 2021-08-08

作者简介: 王超(1990—), 男, 工程师, 硕士研究生, 现主要从事核电厂应急设计工作, E-mail: wsherryc@163.com

性物质释放的事故情景时,应根据工作人员可能受照射剂量的大小确定是否满足可居留性准则。

随着国内各个核电项目陆续开展主控室可居留性无过滤渗漏风(内漏)试验,发现内漏的放射性影响对主控室可居留性的评价不容忽视。但是目前针对内漏剂量模型开展的研究较少,常用做法是假设内漏直接从外界环境进入主控室可居留区域,并基于 RG1.195<sup>[2]</sup> 中的外环境向隔室迁移的模型<sup>[3]</sup> (后文称“简化模型”)开展后果评估,不符合实际情形,并且根据工程设计特点,主控室可居留区域与外界环境边界处的孔洞、间隙较少且封堵措施完善,基本不存在来自外界环境的直接渗漏,实际的渗漏主要来自安全厂房内部即内漏,如可居留区域边界开关门引起的漏风等,根据 NNSA-HAJ-0001-2017《核动力厂场内应急设施设计准则》<sup>[4]</sup>,对开关门引起的内漏量可按 17 m<sup>3</sup>/h 考虑。事实上,主控室可居留区域的内漏远不止开关门这一途径,实际的内漏量应大于 17 m<sup>3</sup>/h。

目前,文献[5]针对核电厂事故条件下内漏途径对主控室可居留性剂量影响开展了相关研究,分析了放射性物质由反应堆厂房的贯穿件泄漏至主控室可居留区域所产生的影响,但实际上,反应堆厂房和安全厂房之间的贯穿件主要位于控制区范围,反应堆厂房的源项主要漏入安全厂房的控制区内,并通过控制区通风系统(DWL)处理后排入环境中。安全厂房各楼层之间的开放空间主要为上下楼梯,且楼梯开放空间小,泄漏至控制区的源项若要进入主控室区域,不仅需要克服控制区和非控制区间的压差,还需向上穿越多层空间,因此该迁移途径理论上可以忽略。

本研究通过结合核电厂主控室可居留区域的实际设计特征开展内漏剂量模型的研究,该模型充分考虑内漏源项的实际迁移路径,对实际事故情景下内漏的放射性影响可以较好地模拟。此外,本研究选取典型事故开展模型的应用,并与简化模型进行对比,以进一步验证内漏剂量模型的合理性。

## 1 内漏剂量模型研究

### 1.1 内漏源项的迁移路径

主控室可居留区域位于安全厂房中上部的非控制区,该区域的通风由单独设置的主控室空调系统(DCL)提供,该区域以外的非控制区通风

由非控制区空调系统(DVL)提供。由于DVL的设计并不考虑可居留性,其对外环境的放射性物质没有过滤作用,且发生事故时该通风系统不关闭,尤其是大规模释放的严重事故,外部环境放射性污染非常严重。因此,对于可居留区临近区域内的放射性源项,主要为外界环境经DVL进入的放射性物质。

综上分析,主控室可居留区域内漏源项的实际迁移路径为:外部环境受污染空气经DVL进入主控室可居留区临近区域,再由临近区域通过直接浸没外照射以及通过主控室开关门、贯穿件孔洞等方式漏入可居留区域这2种方式产生放射性影响。具体路径如图1所示。

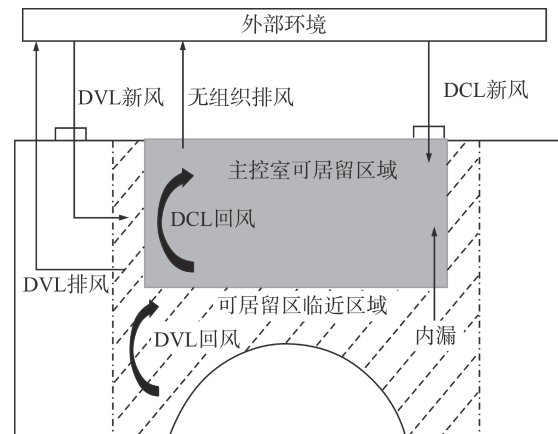


图1 主控室可居留区域内漏源项迁移路径模型

Fig.1 Migration Path Model of Internal Leakage Source Term in the Habitable Area of the Main Control Room

### 1.2 内漏源项的放射性活度模型

根据1.1节对内漏源项迁移路径的分析,假设可居留区临近区域的源项均匀分布,并保守忽略各房间之间的隔挡作用,据此建立内漏源项的放射性活度微分方程。

为简化描述,将可居留区临近区域称为隔室k,主控室可居留区域称为隔室r。对于隔室k的放射性源项,其活度的动态平衡方程为:

$$\frac{da_{k,t}}{dt} = Q_{in} - \sum_{j=1}^m \lambda_{k,j} a_{k,t} \quad (1)$$

式中,  $a_{k,t}$  为隔室k在t时刻的活度, Bq; t为时间, h;  $Q_{in}$  为外部环境向隔室k的漏入源项, Bq, 其计算式见式(2);  $\lambda_{k,j}$  为隔室k在第j次迁移的去除因子, h<sup>-1</sup>, 其计算式见式(3); m为迁

移次数, 本模型  $m=1$ 。

$$Q_{in} = QL_{x,k}F_{i,k}\left(\frac{\chi}{Q}\right) \quad (2)$$

式中,  $Q$  为外界环境源项,  $Bq$ ;  $L_{x,k}$  为隔室  $k$  的新风量,  $m^3/h$ ;  $F_{i,k}$  为隔室  $k$  的 DVL 对核素  $i$  的过滤因子;  $(\chi/Q)$  为  $t$  时刻下的外界环境的大气弥散因子,  $s/m^3$ 。

$$\lambda_{k,i} = \lambda_i + \frac{L_d + L_{p,k}}{V_k} + \frac{L_{h,k}(1 - F_{i,k})}{V_k} \quad (3)$$

式中,  $\lambda_i$  为核素  $i$  的衰变常数,  $h^{-1}$ ;  $L_d$  为隔室  $k$  漏入隔室  $r$  的风量,  $m^3/h$ ;  $L_{p,k}$  为隔室  $k$  的排风量,  $m^3/h$ ;  $L_{h,k}$  为隔室  $k$  的回风量,  $m^3/h$ ;  $V_k$  为隔室  $k$  的自由容积,  $m^3$ 。由于本模型迁移次数为 1, 且对于具体核素, 隔室  $k$  的去除因子  $\lambda_{k,i}$  为常量, 为便于表述和区分, 对于某具体核素, 令  $\lambda_{k,i} = C_k$ , 其中  $C_k$  为常数。

对于隔室  $r$ , 其活度动态平衡方程为:

$$\frac{da_{r,i}}{dt} = \lambda_d a_{k,r} - \sum_{j=1}^N \lambda_{r,j} a_{r,i} \quad (4)$$

式中,  $a_{r,i}$  为隔室  $r$  在  $t$  时刻的活度,  $Bq$ ;  $\lambda_d$  为隔室  $k$  向隔室  $r$  的漏入因子,  $h^{-1}$ , 其计算式见式 (5);  $\lambda_{r,j}$  为隔室  $r$  在第  $j$  次迁移的去除因子,  $h^{-1}$ , 其计算式见式 (6)。

$$\lambda_d = \frac{L_d}{V_k} \quad (5)$$

$$\lambda_{r,j} = \lambda_i + \frac{L_{p,r}}{V_r} + \frac{L_{h,r}(1 - F_{i,r})}{V_r} \quad (6)$$

式中,  $L_d$  是隔室  $k$  向隔室  $r$  的漏风量,  $m^3/h$ ;  $V_r$  为隔室  $r$  的自由容积,  $m^3$ ;  $L_{p,r}$  为隔室  $r$  的排风量,  $m^3/h$ ;  $L_{h,r}$  为隔室  $r$  的回风量,  $m^3/h$ ;  $F_{i,r}$  为隔室  $r$  的 DCL 对核素  $i$  的过滤因子。由于本模型迁移次数为 1, 且对于具体某个核素, 隔室  $r$  的去除因子  $\lambda_{r,i}$  为常量, 为便于微分方程求解和表述, 对于某具体核素, 令  $\lambda_{r,i} = C_r$ , 其中  $C_r$  为常数。

将微分方程 (1) 和方程 (2) 联立求解, 可以得到  $T_1$  时刻到  $T_2$  时刻 (时间间隔  $\Delta T$ ) 内隔室  $r$  的积分活度计算式如下:

$$\int_{T_1}^{T_2} a_{r,i} dt = \frac{a_{r,i,T_1}}{C_r} (1 - e^{-C_r \Delta T}) - \frac{\lambda_d \left( \alpha_{k,T_1} - \frac{Q_{in}}{C_k} \right)}{C_r (C_r - C_k)} (1 - e^{-C_r \Delta T}) - \frac{\lambda_d Q_{in}}{C_k C_r^2} (1 - e^{-C_r \Delta T}) + \frac{\lambda_d \left( \alpha_{k,T_1} - \frac{Q_{in}}{C_k} \right)}{(C_r - C_k) C_k} (1 - e^{-C_k \Delta T}) + \frac{\lambda_d Q_{in}}{C_k C_r} \Delta T \quad (7)$$

式中,  $a_{r,T_1}$  为隔室  $r$  在  $T_1$  时刻的活度,  $Bq$ , 当  $T_1=0$ ,  $\alpha_{r,T_1}=0$ ;  $\alpha_{k,T_1}$  为隔室  $k$  在  $T_1$  时刻的活度,  $Bq$ , 当  $T_1=0$ ,  $\alpha_{k,T_1}=0$ 。

### 1.3 剂量模型

根据积分活度可求解得到各途径下的内漏剂量结果, 其中, 室内空气浸没外照射的剂量模型见式 (8), 室内空气吸入内照射剂量模型见式 (9), 室外空气 (隔室  $k$ ) 浸没外照射剂量模型见式 (10)。

$$D_{AW} = \frac{1}{EV_r} \sum_{i=1}^N D_F(i) \sum_{r=1}^T I_{A,\Delta r} S_P(t) \quad (8)$$

式中,  $D_{AW}$  为  $t$  时刻内室内烟云浸没外照射剂量,  $Sv$ ;  $E$  为半无限烟云到有限烟云的修正因子,  $E=352/V_r^{0.338}$ ;  $S_P(t)$  为居留份额;  $D_F(i)$  为核素  $i$  的外照射有效剂量转换因子,  $Sv \cdot m^3 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$ ;  $V_r$  为控制室的自由容积,  $m^3$ ;  $I_{A,\Delta r}$  为  $\Delta t$  内室内积分活度,  $Bq \cdot h$ ;  $N$  为核素个数;  $T$  为事故时长,  $h$ 。

$$D_{AE} = \frac{1}{V_r} \sum_{i=1}^N D_{FE}(i) \sum_{r=1}^T I_{A,\Delta r} S_P(t) B_V(t) \quad (9)$$

式中,  $D_{AE}$  为  $t$  时刻内吸入内照射剂量,  $Sv$ ;  $B_V(t)$  为呼吸率,  $m^3 \cdot h^{-1}$ ;  $D_{FE}(i)$  为核素  $i$  吸入内照射有效剂量转换因子,  $Sv \cdot Bq^{-1}$ 。

$$D_{AO} = D_{AW,k} G(t) \quad (10)$$

式中,  $D_{AO}$  为  $t$  时刻内的来自室外直接的浸没外照射剂量,  $Sv$ ;  $D_{AW,k}$  为  $t$  时刻内安全厂房 (隔室  $k$ ) 内烟羽浸没外照射剂量,  $Sv$ ;  $G(t)$  为  $t$  时刻内安全厂房内墙体的屏蔽系数。

根据式 (8)~式 (10), 可以得出最终内漏的有效剂量, 如下:

$$D = D_{AW} + D_{AE} + D_{AO} \quad (11)$$

式中,  $D$  为  $t$  时刻内的有效剂量,  $Sv$ 。

## 2 实例计算与对比分析

本研究选取典型设计基准失水事故 (LOCA) 和发生堆熔的大破口失水事故 (LB-LOCA) 作为研究对象, 分别采用本研究开发的内漏剂量模型和简化模型对主控室可居留区域人员的有效剂量进行计算。

计算输入参数根据工程设计特征进行选取, 渗透量分别取 17、50、100、150 和 200  $m^3/h$ , 计算放射性剂量后果。根据该结果分别绘制 LOCA 和 LB-LOCA 下有效剂量随渗透量的变化曲线, 如图 2 和图 3 所示。



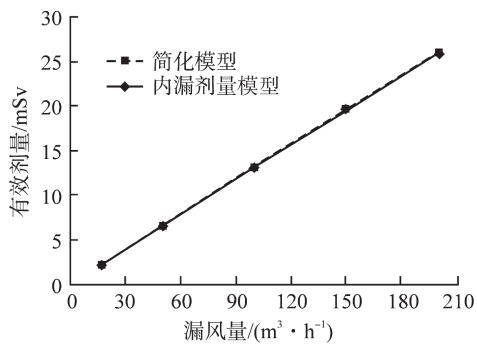


图2 LOCA下2种模型计算结果

Fig. 2 Calculation Results of Two Models under LOCA

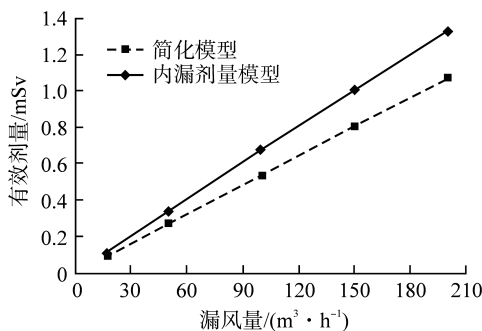


图3 LB-LOCA下2种模型计算结果

Fig. 3 Calculation Results of Two Models for LB-LOCA

根据上述计算结果,对于LOCA工况,2种模型的剂量结果基本一致,简化模型计算的结果略大于本研究开发的内漏剂量模型,而对于LB-LOCA工况,研究开发的内漏剂量模型的计算结果大于简化模型。

经分析,导致2种模型的剂量结果产生差异的原因有2个:①简化模型假设放射性物质直接漏入可居留区域内,而本研究开发的内漏剂量模型是间接漏入,故对于不同时间段源项导致的剂量结果,简化模型大于内漏剂量模型;②由于外部环境对放射性物质具有充分的稀释作用,外部环境的放射性物质不会产生累积效应,而放射性物质经DVL进入可居留区临近区域后,部分源项会积聚在该区域内,对可居留区域产生累积的影响,基于该原因,内漏剂量模型的结果会高于简化模型的结果。

综上,2种内漏模型的结果取决于上述2个因素的主导关系,当可居留区临近区域源项的累

积效应为主导因素时,如本研究分析的LB-LOCA工况,简化模型的计算结果将小于内漏剂量模型的结果。故简化模型假设内漏直接由外环境漏入可居留区域是一种保守做法的观点并不成立,简化模型并不能包络所有事故工况的放射性后果,对于部分事故工况,其分析结果会小于实际结果。而内漏剂量模型基于实际源项的迁移路径进行开发,对各种事故工况都具有普适性,更加适用于主控室可居留区内漏剂量分析,后续可用于内漏试验结果的验证。

### 3 结束语

本研究结合核电厂主控室的工程设计特点,对内漏源项的迁移路径进行了分析,建立了放射性活度微分方程,形成一套符合工程实际的主控室可居留性内漏剂量模型。通过对典型事故工况的计算分析,目前常用的简化模型并不能包络所有事故情景,而研究建立的内漏剂量模型更符合实际场景,更加适用于主控室可居留区域的内漏剂量影响评价。此外,内漏剂量模型还可与简化模型相结合,从而形成完整的主控室可居留性剂量评价体系,以为后续项目主控室的居留性论证提供更精细化的方法。

#### 参考文献:

- [1] 国家核安全局. 核动力厂营运单位的应急准备和应急响应: HAD 002/01—2019[S]. 北京: 国家核安全局, 2019: 15-16.
- [2] US. NRC. Methods and assumptions for evaluating radiological consequences of design basis accidents at light-water nuclear power reactors: RG 1.195[S]. Washington DC: NRC, 2003: 7-11.
- [3] 杨东, 唐邵华, 王建华. 核电厂事故条件下主控室可居留性剂量评价方法[J]. 核动力工程, 2012, 33(2): 123-126.
- [4] 国家核安全局. 核动力厂场内应急设施设计准则: NNSA-HAJ-0001-2017[S]. 北京: 国家核安全局, 2017: 6.
- [5] 王琪, 王凯, 王建华. 核电厂事故条件下内部泄漏途径对主控室可居留性剂量影响研究[J]. 核动力工程, 2020, 41(5): 162-167.

(责任编辑: 杨灵芳)