

# 镅铍中子源使用过程的辐射影响分析

赵鑫鑫 (佛山市土壤与固体废物污染防治技术服务中心, 广东 佛山 528000)

强 婧 (中国核动力研究设计院, 四川 成都 610213)

**摘要:** 以某反应堆使用的镅铍中子源为例, 介绍中子源使用过程辐射影响的计算模式。计算结果表明, 镅铍中子源在贮存、倒源及事故工况下对工作人员造成的有效剂量均满足相关标准要求, 在此基础上提出防护措施。

**关键词:** 中子源; 辐射; 影响分析

中子源在地质勘探、辐射育种、活化分析、湿度测量和科学研究等领域得到广泛的应用, 也是刻度中子测量仪表不可缺少的放射源。中子源包括同位素中子源、加速器中子源和反应堆中子源。镅铍中子源属于放射性中子源, 利用放射性核素衰变时放出一定能量的射线, 去轰击某些靶物质, 产生核反应而放出中子。镅铍中子源基于 ( $\alpha, n$ ) 反应, 即以铍为靶核, 放射性同位素镅发射出的  $\alpha$  粒子与铍靶核作用产生中子。反应堆中常用镅铍中子源作为启堆中子源。

镅铍中子源的使用和贮存主要对工作人员造成辐射影响, 其对人体的照射途径为中子和  $\gamma$  射线产生的外照射。本文以某反应堆使用的镅铍中子源为例, 计算中子源使用过程产生的辐射影响。

## 1 中子源系统

某反应堆使用  $3\text{Ci}$  的镅铍中子源作为启堆中子源, 用于在新堆芯装载完成后, 做首次临界试验时向堆芯内引入中子, 消除启堆盲区, 每次使用时间约  $15\sim 25\text{min}$ , 年使用时间不超过  $10\text{h}$ 。中子源由源芯和源包壳两部分组成, 源芯在包壳内安装牢固不松动, 源芯由氧化镅和金属铍组成。中子源驱动装置为机电控制的机械传输设备, 用于将中子源从源坑送入堆芯, 以及将中子源从堆芯送回源坑。工作人员操作中子源时, 在主控室进行遥控操作。中子源贮存地点为堆厅内的地坑。中子源坑深约  $410\text{cm}$ , 直径大于  $15\text{cm}$ , 周围为土壤包裹, 泥土层表面浇灌有约  $10\text{cm}$  厚的水泥层。

## 2 中子源辐射影响分析

反应堆运行时, 工作人员不会进入堆厅。反应堆未运行时, 燃料元件操作人员在堆厅进行燃料元件的搬运操作, 巡检人员进入堆厅进行巡视, 维修人员在堆厅进行维护保养操作。因此, 重点考虑中子源贮存、倒源及事故工况下的辐射影响。

### 2.1 中子源贮存

中子源贮存过程的辐射影响计算模式采用 MCNP 程序进行建模计算。在中子源坑上方选取 3 个计算点, 分别为源坑口、源坑水泥层表面、源坑上方  $1\text{m}$  处。保守估计, 燃料元件操作人员在堆厅的停留时间约  $160\text{h/a}$ , 巡检人员在堆厅的停留时间约  $40\text{h/a}$ , 维修人员在堆厅的停留时间约  $80\text{h/a}$ 。

根据前述给出的计算条件、计算参数, 计算中子源

贮存对工作人员造成的年有效剂量, 结果见表 1。由计算结果可知, 在本次选取的非常保守的计算条件下, 反应堆未运行时, 中子源对进入堆厅的工作人员造成的年有效剂量最大值为  $1.70\text{mSv}$ , 满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002) 规定的限值 ( $20\text{mSv/a}$ )。

表 1 中子源贮存对工作人员造成的年有效剂量

工作人员	中子剂量率 ( $\text{mSv/h}$ )			工作时间 ( $\text{h/a}$ )	年有效剂量 ( $\text{mSv/a}$ )
	源坑口	源坑水泥层表面	源坑上方 $1\text{m}$ 处		
燃料元件操作人员	$1.06 \times 10^{-2}$	$2.98 \times 10^{-7}$	$6.48 \times 10^{-3}$	160	1.70
巡检人员				40	0.42
维修人员				80	0.85

### 2.2 中子源倒源

在中子源倒源过程中, 工作人员将接触裸源。参与倒源操作的工作人员会受到中子源辐射场的外照射影响。工作人员受到的外照射剂量来自于中子和  $\gamma$  射线的贡献。

#### 2.2.1 计算参数

中子源活度为  $3\text{Ci}$ 。工作人员采取远距离操作, 采取轮流操作的方式控制每个工作人员接触中子源的时间。工作人员距中子源的距离保守取  $1\text{m}$ , 平均每个工作人员操作中子源裸源的时间保守取  $10\text{min}$ 。

根据《辐射防护手册(第三分册)》查得镅铍中子源的中子产额为  $(2.2\sim 2.7) \times 10^6 \text{n}/(\text{s} \cdot \text{Ci})$ , 保守取中子产额为  $2.7 \times 10^6 \text{n}/(\text{s} \cdot \text{Ci})$ , 计算得到本项目使用的中子源的中子发射率为  $3 \times 2.7 \times 10^6 = 8.1 \times 10^6 \text{n/s}$ 。

#### 2.2.2 计算模式

根据《辐射防护手册(第三分册)》, 中子源最大剂量当量率计算公式如下:

$$H = \phi \cdot d_H, \text{ Sv/s}$$

式中的  $\phi$  为中子注量率, 其计算公式如下:

$$\phi = \frac{S}{4\pi r^2}, \text{ n}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$$

式中:  $S$ - 中子发射率, 本项目  $^{241}\text{Am}-\text{Be}$  中子源的中子发射率为  $8.1 \times 10^6 \text{n/s}$ ;  $r$ - 工作人员距中子源的距离, 保守取  $50\text{cm}$ ;  $d_H$ - 换算系数, 根据《辐射防护手册(第三分册)》查得镅铍中子源的  $d_H$  值为  $3.49 \times 10^{-10} \text{Sv}/(\text{n}/\text{cm}^2)$ 。

### 2.2.3 计算结果

根据前述给出的计算条件、计算参数,计算中子源倒源过程中,倒源操作工作人员受到的有效剂量,结果见表2。表中计算得到的是倒源过程中铯中子源中子对倒源操作工作人员外照射剂量的贡献,即中子剂量率。根据《辐射防护手册(第三分册)》,铯中子源的外照射剂量当量,中子和 $\gamma$ 射线的贡献大约各占一半。因此,中子源 $\gamma$ 射线对倒源操作工作人员外照射剂量的贡献约0.014mSv。在本次选取的非常保守的计算条件下,中子源倒源过程中,中子源裸源对倒源操作工作人员造成的有效剂量为0.028mSv,满足20mSv/a限值。

表2 中子源倒源过程中工作人员有效剂量

工作人员	中子发射率 S(n/s)	工作人员距中子源的距离(cm)	中子注量率 $\varphi$ (n/(s·cm <sup>2</sup> ))	换算系数 $d_{H_1}$ (Sv/(n/cm <sup>2</sup> ))	处理时间(min)	有效剂量(mSv)
倒源操作工作人员	$8.1 \times 10^6$	100	64.5	$3.49 \times 10^{-10}$	10	0.014

### 2.3 中子源事故工况

在将中子源从源坑送入堆芯或从堆芯送回源坑时可能会发生卡源事故,使得中子源不能进退。发生卡源事故时,中子源形成裸源;由于中子源有三层不锈钢壳经氩弧焊封装,因此,不会有放射性物质溢出包壳,不会有放射性物质通过气载、液态流出物释放。发生卡源事故后,需要由工作人员进入堆厅对中子源进行处理。因此,参与事故处理的工作人员会受到中子源辐射场的外照射影响。中子源活度为3Ci,工作人员处理中子源裸源的时间保守取5min;其余计算参数和计算模式与2.2中相关参数一致。中子源发生卡源事故时,事故处理工作人员受到的有效剂量计算结果见表3。

表3 中子源卡源事故下工作人员有效剂量

工作人员	中子发射率 S(n/s)	工作人员距中子源的距离(cm)	中子注量率 $\varphi$ (n/(s·cm <sup>2</sup> ))	换算系数 $d_{H_1}$ (Sv/(n/cm <sup>2</sup> ))	处理时间(min)	有效剂量(mSv)
对中子源进行处理的 工作人员	$8.1 \times 10^6$	50	$2.58 \times 10^2$	$3.49 \times 10^{-10}$	5	0.027

据前述,铯中子源的外照射剂量当量,中子和 $\gamma$ 射线的贡献大约各占一半。因此,中子源 $\gamma$ 射线对事故处理工作人员外照射剂量的贡献约0.027mSv。在本次选取的非常保守的计算条件下,中子源发生卡源事故时,中子源裸源对进入堆厅对其进行处理的的工作人员造成的有效剂量为0.054mSv,满足20mSv/a限值。

## 3 防护措施

### 3.1 制定应急预案

首先应制定中子源倒源和卡源等突发事件应急预案,当发生倒源以及卡源事件时,停止所有操作并封锁迷道入口。事故发生后应立即成立了应急处理小组,经应急处理小组进行观察和初步排障降源处理,仍无法排除故障,便停止排障措施,并将情况上报。立即组织专家到达现场,开展现场与环境监测,封闭辐照中心生产

车间。为整合各部门力量,由生态环境部牵头,成立了辐照中心卡源事件前方处置组,下设协调指挥、舆情新闻、技术支持、辐射环境监测、工程实施、后勤保障、医疗保障、消防等8个专业组。制定了地面机器人入室处置的主方案和屋顶打孔挂钩处置等备用方案。

### 3.2 规范防护操作

在中子源倒源和卡源事故处理时,工作人员严格按照操作规程进行操作,配备辐射防护设备加强防护,按要求穿戴中子防护服、 $\gamma$ 防护服,并佩戴个人剂量计、直读式报警剂量计;同时,采取轮流操作的方式控制每个工作人员接触中子源的时间。

### 3.3 加强安全设施检查维护

发生在河南杞县和广东番禺两起卡源事件提醒核辐照相关从业者,平时应加强安全设施的检查维护,保障安全设施功能的发挥。河南杞县的辐照装置在技术上设置了一个简易薄铁皮桶护源罩,辐照货物倒塌时,护源罩能够支撑货物,保障辐照源能安全降回到贮源井内。护源罩是经电焊焊接在辐照源贮源井口的钢板上。由于每次辐照操作都必须将辐照源从井水中提升到井口之上,进行提升操作时,都有井水随源的提升溅落到井口的铁板上,天长日久,护源罩上的焊点逐渐锈蚀,事故发生前已基本丧失了连接力。当辐照货物倒塌时,护源罩随之倒塌,辐照源卡在护源罩内,护源罩成了名副其实的“卡源罩”。因此,对于这样一些与安全相关的设施,必须定期进行检查,发现缺陷,及时维修或更换。广东番禺的辐照装置尽管也设置了护源柱,但护源柱间隔过宽,以至于辐照吊篮的金属门脱落后,金属门穿过护源柱的间隔滑入贮源井口,卡住了井口,使辐照源无法降入贮源井内而造成了卡源事件。因此,应该改进此类辐照装置的设计缺陷,加密此类辐照装置护源柱的密度,或改为间隔较小的护源金属栅栏。

上述措施可以确保辐照装置安全设施安全功能的发挥,从源头杜绝卡源故障发生。

## 4 结论

计算结果表明,某反应堆使用的铯中子源在贮存、倒源及事故工况下对工作人员造成的有效剂量均满足《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》(GB18871-2002)规定的限值。在中子源使用过程中,工作人员应按要求采取辐射防护措施,从而减轻工作人员受到的放射性危害。

### 参考文献:

- [1] 何岱. 中子源库的辐射防护分析[J]. 环境科学导刊, 2018(37):181-183.
- [2] 刘镇洲, 等. Am-Be 中子源辐射场周围剂量当量与吸收剂量的计算[J]. 原子能科学技术, 2009,43(1):11-15.
- [3] 谢菊英, 马慧, 郑贤利等. 中子源的剂量分布与辐射防护[J]. 实验科学与技术, 2012,10(4):1-3.
- [4] 李德平, 潘自强. 辐射防护手册(第三分册)[M]. 北京: 原子能出版社, 1990.