

# 西安脉冲堆中子照相屏蔽体改建设计计算

朱广宁, 全林, 张颖, 杨军, 郝金林, 江新标, 赵柱民

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

**摘要:**文章采用蒙特卡罗程序耦合抽样技巧,对西安脉冲堆中子照相孔道外的屏蔽体进行改建设计计算,确定了中子照相孔道口出射束流参数和多种材料组合的屏蔽参数。实验测试结果表明,理论计算可靠,达到了改建指标。

**关键词:**中子照相;辐射屏蔽;剂量;反照率

**中图分类号:**TL77      **文献标识码:**A      **文章编号:**1000-6931(2006)05-0544-05

## Designing Calculation for Shield Rebuilding of Neutron Radiography at Xi'an Pulsed Reactor

ZHU Guang-ning, QUAN Lin, ZHANG Ying, YANG Jun,  
HAO Jin-lin, JIANG Xin-biao, ZHAO Zhu-min

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** Coupling sampling skill used in Monte-Carlo code MCNP/4B was applied in rebuilding design of the shield of neutron radiography at Xi'an pulsed reactor in order to calculate the radiation field parameter of the experiment bore and the shield thickness of multi-material shield. The tests show that the reliability of calculation results satisfies the rebuilding requirements.

**Key words:** neutron radiography; radiation shield; dose; albedo

西安脉冲堆设有一条中子照相孔道,该孔道可用以进行脉冲堆稳态运行及脉冲运行两种工况下的中子照相实验研究<sup>[1]</sup>。孔道外原有相应的屏蔽体,经过一段时间的使用后,暴露出屏蔽体正门外表面 $\gamma$ 剂量当量率超标、实验操作时安全性差、正门内表面中子散射较严重等缺陷,影响了实验中的辐射安全和中子照相效果。因此,拟对孔道外原中子照相屏蔽体进行改建。

### 1 方案设计

在原屏蔽体基础上对实验通道、中子束捕捉器及前屏进行改建设计。设计中应用多种材料组合屏蔽的复合结构,通过大量的比较计算,确立了屏蔽模型(图1)<sup>[2]</sup>,其结构描述如下。

#### 1) 实验通道

移除原屏蔽体侧门,加装1道厚60 mm含硼聚乙烯板门,在距离原墙北侧650 mm处,建立1道厚250 mm东西走向的重混凝土墙

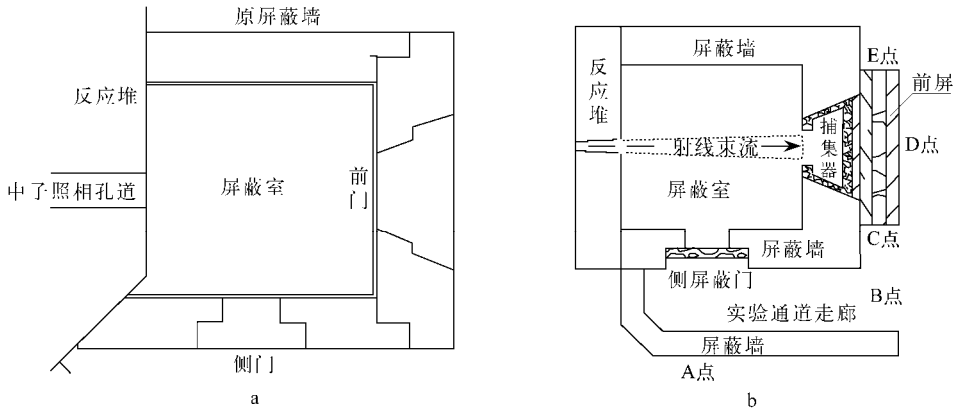


图1 改建前后的中子照相孔道屏蔽体结构布置图

Fig. 1 Plan of primal and rebuilding shield wall

a——改建前;b——改建后

体,形成1条人员通道,通道上覆盖厚150 mm重混凝土走廊顶盖。

### 2) 中子束捕集器

移除原屏蔽体正门,安装中子束捕集器。捕集器采用碳化硼与石蜡按质量比3:7配制成的含硼石蜡材料,空腔正面为一厚100 mm含硼石蜡板,在中子照相孔道轴线位置处开 $\phi 370$  mm通孔,以保证孔道出射中子束全部进入捕集器内腔。后挡板为厚100 mm含硼石蜡板,以屏蔽出射中子。

### 3) 前屏

在捕集器后面加设厚408 mm复合材料屏蔽体,各材料沿水平方向由里向外的排布顺序为钢板、铅块、钢板、含硼聚乙烯板和钢板,其屏蔽的重点部位为孔心(实验孔道)四周500 mm处,各板材厚度分别为5、130、125、80、140 mm。在前屏和原屏蔽室顶盖间加设厚100 mm钢板作为前屏顶盖。

## 2 设计计算输入

为在实现改建目标的同时减少改建费用,改建中尽可能地使用已有屏蔽体,其改建设计计算输入如下:

1) 加强当前中子照相孔道屏蔽体正面屏蔽能力(增加前屏),使屏蔽体正面外表面剂量当量率由目前反应堆满功率(2 MW)运行情况下的0.332 mSv/h降至安全限值0.025 mSv/h

以下,满足相关辐射防护规定<sup>[3,4]</sup>的要求;

2) 更换中子照相孔道屏蔽体的正门,加设中子捕集器,尽可能地减少屏蔽体内表面对孔道出射中子的散射,反照率控制在1%以下;

3) 在原有中子照相孔道屏蔽体北侧屏蔽墙体上开门(侧门),并设置相应的实验通道。

## 3 计算模型及程序

### 3.1 计算模型

本文的计算分两部分:

1) 计算孔道出口处的中子和 $\gamma$ 注量率的能谱分布和角分布;

2) 采用上述中子和 $\gamma$ 注量率的能谱分布和角分布,计算屏蔽室外表面处的中子和 $\gamma$ 剂量值。

计算中采用耦合抽样技巧计算中子照相孔道出口处的中子、 $\gamma$ 光子能谱分布和角分布<sup>[5]</sup>,采用蒙特卡罗方法的分裂与轮盘赌技巧计算屏蔽室外表面处的中子、 $\gamma$ 光子剂量值。

屏蔽室外表面的剂量计算分两种方式:

1) 中子和 $\gamma$ 光子耦合输运计算,得到中子剂量率和中子诱发的 $\gamma$ 光子剂量率;

2)  $\gamma$ 光子输运计算,得到来自孔道出口处的 $\gamma$ 光子剂量率。

### 3.2 计算程序

该屏蔽计算属于粒子的深穿透问题,采用通常的数值方法和程序很难得到较满意的计算

结果。由于使用一些偏倚技巧的蒙特卡罗程序,可较好地处理复杂几何的深穿透和多材料组合的屏蔽问题。

本文采用蒙特卡罗程序 MCNP/4B 进行中子照相孔道屏蔽室改建的理论计算。

### 4 结果与讨论

#### 4.1 中子照相孔道口参数

反应堆中子照相孔道出口处的中子、 $\gamma$  平面源  $\phi(r, E, \mu)$  是空间、能量和方向的函数,由于 MCNP/4B 程序对平面源问题的输运计算,只需考虑  $\mu > 0$  的源项  $\phi^+(r, E, \mu)$ ,为了简化平面源的计算模型,本文设正向平面源  $\phi^+(r, E, \mu)$  为:

$$\phi^+(r, E, \mu) = C\phi^+(r)\phi(r, E)\phi^+(r, \mu)$$

式中: $\phi^+(r)$  为粒子正向注量率的空间分布; $\phi(r, E)$  为与空间有关的粒子注量率的能谱分布; $\phi^+(r, \mu)$  为与空间有关的粒子正向注量率的角分布; $C$  为归一化系数。

为了得到平面源的空间分布、能量分布和角分布,本文采用 MCNP/4B 程序中相应的分段计数卡(FSn)、分段除数卡(SDn)、计数能量卡(En)和计数余弦卡(Cn)对平面源的空间、能量和角度进行网格划分,经过计算后得到的孔道出口处注量率的能谱分布示于图 2。

表 1 列出了中子照相孔道出口处粒子出射方向的中子角分布和  $\gamma$  光子角分布。表中给出的计算值为对应立体角内的中子、 $\gamma$  光子的角流密度  $J(r, \mu) = \mu\phi(r, \mu)$ 。

#### 4.2 屏蔽参数

前屏设计中用含硼聚乙烯板慢化和吸收中子,用铅块、钢板屏蔽源生和伴生  $\gamma$  射线。计算中按照图 1 标示的水平位置所指定的点进行剂量跟踪监测。F 点位于侧门外走廊顶盖处(除 F 点外,各剂量点距离地面的高度均为 1 m)。各点的计算及测量结果列于表 2、3,加捕集器前后正对孔道的屏蔽墙内表面中子反照率列于表 4。

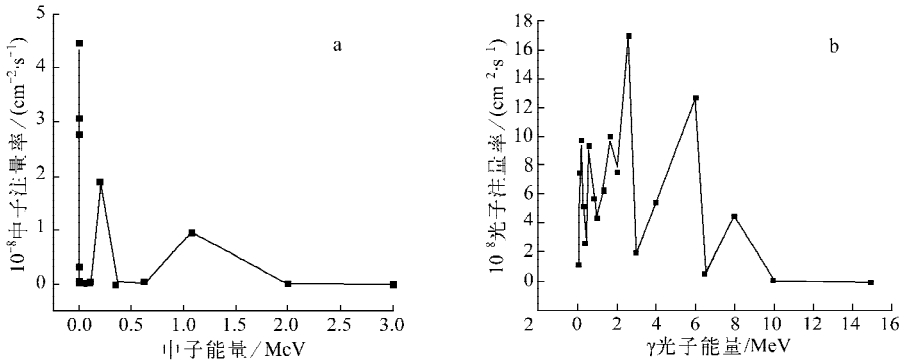


图 2 中子照相孔道出口处的中子(a)、 $\gamma$  光子(b)能谱分布

Fig. 2 Spectra of neutron(a) and photon(b) at exit of neutron-radiography bore

表 1 中子照相孔道出口处的中子、 $\gamma$  光子角分布

Table 1 Angular distribution of neutron and photon at exit of neutron-radiography bore

余弦角	对应立体角内角流密度的百分比		余弦角	对应立体角内角流密度的百分比	
	中子	$\gamma$ 光子		中子	$\gamma$ 光子
-1.0	—	—	0.5	$9.720\ 0 \times 10^{-4}$	$2.000 \times 10^{-3}$
-0.95	—	—	0.7	$1.145\ 00 \times 10^{-3}$	$4.904\ 00 \times 10^{-3}$
-0.8	—	—	0.85	$1.478\ 00 \times 10^{-3}$	$1.037\ 1 \times 10^{-2}$
-0.5	—	—	0.9	0.010 776 3	$1.301\ 1 \times 10^{-2}$
0.0	$2.820\ 00 \times 10^{-4}$	—	0.95	$4.576\ 00 \times 10^{-3}$	$2.042\ 9 \times 10^{-2}$
0.3	$5.170\ 00 \times 10^{-4}$	—	1.0	$9.877\ 78 \times 10^{-1}$	$9.155\ 45 \times 10^{-1}$

注:余弦角为中子出射方向与中子照相孔道轴线(指向孔道出口方向)的夹角余弦;表中横杠表示没有该角度的粒子

表 2 改建后屏蔽体外表面剂量分布理论计算值

Table 2 Calculated dose rate distribution on surface of rebuilding shield wall

$\mu\text{Sv/h}$

监测点	中子剂量当量率	中子伴生 $\gamma$ 剂量当量率	源生 $\gamma$ 剂量当量率	$\gamma$ 总剂量当量率	总剂量当量率
A	0.164 02	0.923 19	0.176 15	1.099 34	1.263 4
B	1.830 27	0.790 46	0.891 246	1.681 706	3.511 98
D	9.801 46	4.750 7	8.189	12.939 7	17.991 5
F	0.391 141	0.825 49	0.122 327	0.947 817	1.338 9

表 3 改建后屏蔽体外表面剂量分布测量值

Table 3 Measured dose rate distribution on surface of rebuilding shield wall

$\mu\text{Sv/h}$

监测点	中子剂量当量率	$\gamma$ 光子剂量当量率	总剂量当量率
A	1.4	0.4	1.8
B	1.7	0.3	2
C	1.2	0.5	1.7
D	10	0.4	10.4
E	5	0.2	5.2

表 4 改建前后反照率比对

Table 4 Comparison of neutron albedo between primal and rebuilding shield wall

监测范围半径 $R^D/\text{cm}$	无捕集器反照率	有捕集器反照率 $\eta/\%$		无、有捕集器反照率 计算值之比
	$\eta$ 计算值/ $\%$	理论计算值	实际测量值	
0.5	18.77	0.861	0.873 9	22
12.5	18.01	0.685	未测	26
85	20.25	0.188	未测	10

注:1) 监测范围半径  $R$  的圆心均为实验孔道轴线与正对屏蔽墙里表面的交点(捕集器内表面喇叭口孔心)

以上结果表明,本文所设计的改建后的中子照相屏蔽体外表面总剂量当量率的理论计算与测量值较为吻合,并均在限值  $0.025 \text{ mSv/h}$  以下,符合设计屏蔽体外表面周围反应堆大厅区域为常规工作区(绿区)的要求,达到了改建目标。

### 4.3 捕集器

设置中子捕集器的作用是为了减少孔道出射中子在屏蔽体内部的散射,提高照相质量。本文建立了中子反照率的蒙特卡罗计算方法,设计了含硼石蜡和聚乙烯材料组合捕获反射中子的喇叭形结构,得到了捕集器内表面的反射中子注量率分布(图 3)和总的反照率,并用改进的激活片法对反照率进行相对测量,其计算和测量结果列于表 4。

从以上理论计算和测量值的比较可见,在

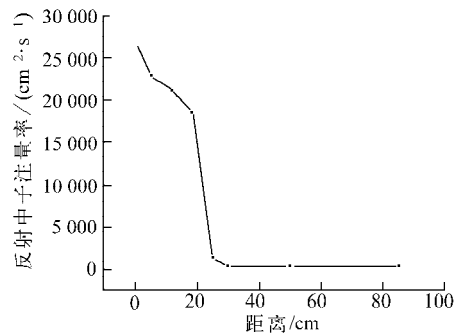


图 3 捕集器内表面反射中子注量率分布

Fig. 3 Fluence rate distribution of opposite irradiation neutron on inner surface of neutron captured apparatus

捕集器内表面喇叭口中心处的反照率计算和实验值基本吻合,说明计算方法正确,结果可信,得到的捕集器表面束流区域内反照率分布合

理。从表 4 的比较结果看,加设捕集器前后(改设捕集器前该区为重混凝土)其内表面位于捕集器内表面喇叭口孔心处反照率下降了 22 倍;整面正屏墙反照率降低了 1 个数量级。这些参数表明,在原有屏蔽体有限空间改设的中子束捕集器,降低了反照率,改善了成像质量。

## 5 结论

本文采用蒙特卡罗计算方法,结合相应的耦合抽样技巧,很好地解决了复杂几何的深穿透和多材料优化组合的屏蔽计算问题,得到了中子照相实验孔道出口处的中子和光子能谱。设计计算了由多种材料组成的屏蔽体和捕集器的性能参数,结果表明,反照率得到明显减弱,解决了外围剂量超标的问题。这些计算结果在实验测量中得到了验证,达到了改建设计计算的目标,为改善中子照相质量提供了条件。

## 参考文献:

[1] 魏大卫,刘以思,金光宇,等. 中子照相[M]. 北京:原子能出版社,1996:18-21.

- [2] 全林,郝金林,江新标,等. 西安脉冲反应堆中子照相实验孔道防护装置建设[J]. 试验与研究, 2003,(26):101-106.  
 QUAN Lin, HAO Jinlin, JIANG Xinbiao, et al. The construction design of experiment protection device of neutron-photograph duct at Xi'an pulsed reactor[J]. Experiment & Research, 2003,(26):101-106(in Chinese).
- [3] ICRP. General principles for the radiation protection of workers[R]. Pergamon: ICRP, 1997.
- [4] 许立涛. 西安脉冲堆辐射屏蔽设计准则[R]. 成都:中国核动力研究设计院,1996.  
 XU Litao. Design code of radiation shielding in Xi'an pulsed reactor[R]. Chengdu: Design Institute of Nuclear Power,1996(in Chinese).
- [5] 江新标,陈达,谢仲生,等. 反应堆孔道屏蔽计算的蒙特卡罗方法[J]. 计算物理,2001,18(3): 285-288.  
 JIANG Xinbiao, CHEN Da, XIE Zhongsheng, et al. MCNP/4B code of the reactor bore shielding [J]. Calculation Physics, 2001,18(3):285-288(in Chinese).

## 硼或浓缩硼-10 在 $UO_2$ 中的用途

【公开日】2006.04.19

【分类号】G21C3/32

【公开号】CN1760991

【申请号】CN200510109634.1

【申请日】2005.09.14

【申请人】西屋电气有限责任公司

【文摘】本发明提供一种核燃料组件,其中含硼化合物用作可燃毒物且分布在该组件的大多数棒内。该组件包括多个燃料棒,每一燃料棒含有多个核燃料芯块,其中,在燃料组件内大于 50% 的燃料棒中至少有 1 个燃料芯块包括金属氧化物、金属碳化物或金属氮化物和含硼化合物的烧结混合物。

摘自中国原子能科学研究院《核科技信息》