

# 14MeV 中子防护体的设计<sup>\*</sup>

贾福全<sup>1</sup> 程道文<sup>2</sup>

(1: 吉林建筑工程学院基础科学部, 长春 130118; 2: 长春工业大学基础科学学院, 长春 130012)

**摘要:** 在用 D-T 中子发生器分析煤质时, 为了设计 14 MeV 中子防护体, 本文先合理简化了实际模型, 然后用 MCNP 程序对其进行模拟, 最后用实验结果修正模拟结果。实验和模拟结果显示, 当聚乙烯厚度超过 300 mm 时, 地面的中子注量率就达到了辐射防护的要求。为了安全起见, 在实际设计中用 500 mm 的聚乙烯防护 14 MeV 中子。

**关键词:** 14MeV 中子; MCNP; 辐射防护; 聚乙烯

中图分类号: O 571.53 文献标志码: A 文章编号: 1009-0185(2012)06-0071-03

## The Design of 14MeV Neutron Shield

JIA Fu-quan<sup>1</sup>, CHENG Dao-wen<sup>2</sup>

(1: Department of Basic Sciences, Jilin Institute of Architecture and Civil Engineering, Changchun, China 130118;

2: School of Basic Sciences, Changchun University of Technology, Changchun, China 130012)

**Abstract:** When using D-T neutron generator analyzes coal properties, in order to design 14MeV neutron shield, this paper firstly simplifies the actual model reasonably, then uses MCNP program to simulate it. At last, it uses experimental result to revise the simulated result. The experimental result and the simulated result show that the neutron fluence rate of ground comes up to the requirement of radiation protection when the thickness of polytene is over 300mm. On the safe side, the polytene which the thickness is 500mm is used to protect 14MeV neutron in the practical design.

**Keywords:** 14MeV neutron; MCNP; radiation protection; polytene

## 0 引言

中子不带电荷, 能够接近人体内的原子核。如果中子的能量高, 它们与这些原子核主要发生五种核反应: 弹性散射、非弹性散射、核裂变、辐射俘获、放出带电粒子的核反应。这五种核反应能分别产生  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  射线, 这三种射线对人体的危害都比较大。D-T 中子发生器产生的中子能量非常高, 约为 14 MeV, 在用它们分析煤质时, 必须防止这些中子照射到人体<sup>[1-2]</sup>。为了研究用 D-T 中子发生器分析煤质时的中子防护问题, 本文首先用 MCNP 程序进行了模拟, 然后用实验结果验证了模拟结果的正确性, 最终设计出了 14 MeV 中子的防护系统。

## 1 14MeV 中子防护理论

D-T 中子发生器产生的 14 MeV 中子进入介质后, 首先与靶核发生弹性散射, 能量降低。假设弹性散射前中子的能量为  $E_1$ , 反射后中子的平均能量( $\bar{E}_2$ )为:

收稿日期: 2012-09-27.

作者简介: 贾福全(1978~), 男, 吉林省德惠市人, 讲师, 博士。

\* 基金项目: 吉林建筑工程学院博士科研启动基金资助项目(861050)。

$$\bar{E}_2 = \frac{1 + \alpha}{2} E_1 \quad \alpha = \left( \frac{A - 1}{A + 1} \right)^2 \quad (1)$$

由(1)式可以看出,靶核的质量数越少,反射中子的平均能量越小。所以,中子防护材料一般都富含氢元素,如水、聚乙烯、石蜡等<sup>[3-5]</sup>。 $^1\text{H}$ 的质量数最少, $\alpha=0$ ,经过一次反射后中子能量就减少一半。平均只要经过4次碰撞,中子能量就小于1 MeV,中子再通过与原子核间的非弹性散射反应继续降低能量。

职业放射性工作人员每年允许辐照的最大剂量当量为0.05 Sv。如果每年的工作时间是2 000 h,则平均每小时的剂量应小于0.025 mSv。表1的中子注量率是相当于每小时0.025 mSv时的中子注量率<sup>[6]</sup>。

表1 不同能量中子对应的注量率(相当于0.025 mSv/h)

中子能量	注量率/[n·(s·cm <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup> ]	中子能量	注量率/[n·(s·cm <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup> ]
0.025 eV	670	0.5 MeV	30
5.0 KeV	570	1 MeV ~ 10 MeV	18
20 KeV	280	20 MeV	10
0.1 MeV	80		

## 2 中子防护的 MCNP 模拟

为了设计比较合理的14 MeV中子防护体,本文先用MCNP程序进行了模拟和设计。

### 2.1 模型建立

实验系统放在用混凝土浇灌的地下室中,与地面的距离为5 m。D-T中子发生器产生中子的区域是一个圆,半径为2 cm,远远小于5 m,所以,它可以看作一个点源。在实际测量中,应该检测地面的中子注量率,为了降低模拟的难度,只测量图1中的球面中子注量率。由图1可知,只要被检测球面的中子注量率达到要求,地面上离中子源最近区域的中子注量率都能达到要求,所以此设计是合理的。

### 2.2 模拟结果

表2是中子产额为 $10^8 \text{ n/s}$ 时上述模型的模拟结果。如果没有聚乙烯的防护,地面的中子注量率为 $127.39 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,远远大于表2中有聚乙烯防护时的中子注量率。

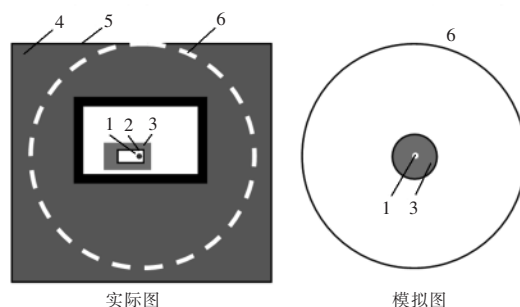
表2 源和地面距离为5m,不同厚度聚乙烯的防护效果

聚乙烯厚度/mm	地面中子注量率/[n·(s·cm <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup> ]	聚乙烯厚度/mm	地面中子注量率/[n·(s·cm <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup> ]
100	28.95	400	5.54
200	19.42	500	2.71
300	10.70	600	1.24

由表2中的数据还可以看出,地面的中子注量率随着聚乙烯厚度的增加而迅速减少。如果聚乙烯的厚度为300 mm,被检测球面上的中子注量率大概为 $10.70 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,即使这些中子的能量都是20 MeV,它也没有超过职业放射性工作人员所允许的最大辐照剂量,所以可以认为聚乙烯的厚度为300 mm时,周围的工作环境是安全的。但是,为了安全起见,聚乙烯的厚度选择为500 mm,此时中子注量率为 $2.71 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,这个值远远小于 $10 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,即使这些中子的能量都是20 MeV,地面也是安全的。

## 3 实验验证中子防护的模拟结果

为了检测MCNP模拟结果的正确性,用 $\text{BF}_3$ 正比计数管测量地面的中子注量率,如表3所示。



1. 中子发生器靶心(球面的球心); 2. 中子发生器;  
3. 聚乙烯; 4. 泥土; 5. 地面; 6. 被检测球面

图1 用MCNP模拟聚乙烯厚度的模型示意图

表 3 聚乙烯防护效果

聚乙烯 厚度/mm	地面中子注量率/[n·(s·cm <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup> ]		绝对偏差/ [n·(s·cm <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup> ]		聚乙烯 厚度/mm	地面中子注量率/[n·(s·cm <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup> ]		绝对偏差/ [n·(s·cm <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup> ]
	BF3 测量结果	模拟结果				BF3 测量结果	模拟结果	
0	120.85	127.39	6.54		400	5.22	5.54	0.32
100	27.43	28.95	1.52		500	2.54	2.71	0.17
200	18.37	19.42	1.05		600	1.16	1.24	0.08
300	10.10	10.70	0.60					

4 讨论

由表 3 的结果可以看出,三氟化硼正比计数管的测量结果明显比模拟结果小.原因是,三氟化硼正比计数管与中子发生器之间有一定厚度的混凝土墙体以及泥土,它们对中子也有慢化作用;而在用 MCNP 模拟时,并没有考虑这些因素,所以才出现这些偏差.但此偏差并不影响中子防护体的设计,当聚乙烯厚度为 500 mm 时,三氟化硼正比计数管的测量结果是 2.54cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,而模拟结果为 2.71cm<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,相差非常小.此外,实际测量结果小于模拟结果,地面应该是更安全,所以此结果是可以接受的.

参 考 文 献

[1] 王月兴,鲁永杰,杨翊方,张建国.单位中子注量照射中国参考人产生的全身平均吸收剂量[J].中国辐射卫生,2006,15(1):3-5.

[2] 唐吉玉.高能射线的屏蔽问题——一种中子辐射屏蔽计算的新方法[J].华南师范大学学报(自然科学版),2000(2):17-19.

[3] 赵新辉,谷德山,任万彬,刘林茂.基于 MCNP 程序模拟的 14MeV 中子准直屏蔽材料的研究[J].东北师大学报(自然科学版),2006(4):59-63.

[4] 陈 渊,郭海萍,安 力,牟云峰,赵秋雯.钚球的中子倍增率与活化反应率[J].原子能科学技术,2003,37(2):128-131.

[5] V. A. Artem. Dependence of the characteristics of a nuclear reactor on the particle size of a nanodispersed moderator[J]. Atomic Energy, 2006, 101(3):675-679.

[6] 刘林茂,刘雨人,景世伟.中子发生器及其应用[J].原子能科学技术,2003,37(2):158-159.