

文章编号: 1007-4627(2017)02-0195-09

(n, xn γ)反应截面测量的实验本底改进研究

王琦^a, 刘洋^b, 王朝辉^a, 侯龙^a, 鲍杰^a, 苏晓斌^a, 李霞^a

(中国原子能科学研究院 a. 核数据重点实验室; b. 反应堆物理研究室, 北京 102413)

摘要: 瞬发 γ 射线法测量(n, xn γ)反应截面实验中, 在线的实验本底对测量结果影响显著, 是影响测量结果的关键因素。为了达到降低在线实验本底一个量级的目标, 通过蒙特卡罗模拟程序给出了屏蔽体和准直器的改进方案, 最终选取的屏蔽方案: 在原有屏蔽体上加厚 30 cm(C₂H₄)n+9 cmPb, 原屏蔽墙加厚 54 cm 重混凝土, 再在屏蔽体和屏蔽墙上共同加厚 2 cm 厚的铅(Pb); 准直孔开孔形状在圆柱形、圆锥形和对称双锥形这三种方案中准直效果和能量单一性方面对称双锥形准直孔最好。在屏蔽体改造完成后, 利用尺寸为 $\phi 5.08$ cm \times 5.08 cm 型液体闪烁体探测器(BC501)测量了改造后距准直孔右方径向距离 70 cm 处透射出来的中子和 γ 射线的相对强度, 在扣除无束流天然本底后, 有束流的中子本底降低了 7.75 倍, γ 本底降低了 38.5 倍, 改造效果达到了测量要求。

关键词: (n, xn γ)反应截面; 屏蔽; 本底; 准直器; 模拟

中图分类号: TL814 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.34.02.195

1 引言

快中子与重金属发生(n, γ)反应截面数据是中子核数据的重要组成部分, 也是核能开发及核技术应用必不可少的基础数据。(n, γ)反应截面数据的实验测量, 必须采取在线测量方式, 实验测量厅中本底中子及中子产生的 γ 射线本底水平是影响测量精度和数据可靠性的主要因素。中国原子能科学研究院已在高压倍加式中子发生器实验室建立了一套Clover型高纯锗探测器阵列系统, 计划用以开展快中子与重金属发生(n, γ)反应截面数据的测量, 但初步测试发现, 在原屏蔽体和屏蔽墙条件下, 测量厅中的中子及 γ 射线本底明显偏高, 在Clover型高纯锗探测器测量的 γ 射线谱中明显观察到了本底干扰峰。因此, 通过理论模拟和实验测试相结合, 对现有屏蔽体和屏蔽墙进行改造, 以降低测量厅中的本底已成为首要任务。

基于以上背景, 本文通过中子和光子输运的MCNP(Monte Carlo N-Particle Transport Code)模拟, 给出屏蔽体和屏蔽墙的优化改进方案, 完成屏蔽体和屏蔽墙的技术改进和相关的实验测试, 为开展快中子与重金属发生(n, γ)反应截面数据的实验测量准备条件。

2 原中子实验厅的屏蔽效果及本底研究

2.1 原中子实验厅几何布置情况

高压倍加器实验厅和测量厅的示意图如图 1 所示, 实验厅与东面测量厅间的屏蔽墙厚度为 2.54 m, 材料为重水泥, 与探测器阵列对应的有效范围为 3 m \times 3 m。为提高中子到样品上的束流强度, 倍加器斜管道深入墙面 1 m, 中子通过屏蔽准直器进入实验测量厅内, 实验测量厅的墙面凹进去 54 cm。以靶位置为起始位置时, 中子穿过屏蔽墙的有效厚度为 1 m, 铁样品挂在离源 220 cm 的位置。以样品为中心周围包围着四个相同类型的Clover探测器, 探测器相互间的夹角为 60°或 120°, 探测器距样品约 50~70 cm, 样品离靶源的距离约为 2 m, 放置于测量大厅, 靶源放于高压倍加器实验厅内, 实验过程中与探测器阵列对应屏蔽墙上的有效范围一致。

高压倍加器大厅与测量厅之间原有屏蔽准直器和屏蔽墙的几何结构分别是: 从中子斜管道靶头开始沿中子束流方向, 屏蔽体分三部分组成, 各部分由长宽为 40 cm \times 40 cm, 厚度为 50 cm 不锈钢、50 cm 聚乙烯和 10 cm 的铅组合而成; 屏蔽墙是由长宽为 300 cm \times 300 cm, 有效厚度为 100 cm 的重混凝土组成, 其厚度与外墙不

收稿日期: 2016-04-14; 修改日期: 2016-05-28

基金项目: 国防预研基金资助项目(41603030103)

作者简介: 王琦(1981-), 男, 山东滨州人, 助理研究员, 硕士, 从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: wangqi@ciae.ac.cn。

平齐，凹进去 54 cm；屏蔽体镶嵌在重混凝土墙内，而在屏蔽体中心开一准直孔起到准直中子束的作用，现有的是单锥形准直孔，孔的直径为 2.4~4 cm。

原屏蔽准直器侧剖面图如图 2 所示，其主要作用是限束和准直束流，原屏蔽准直系统包括屏蔽准直器、屏蔽体以及屏蔽墙，侧剖面图如图 3 所示，原屏蔽准直系统正截面图如图 4 所示。图 4 中 (a)、(b) 和 (c) 3 个区域分别为屏蔽准直器的准直孔(半径为 2 cm)、屏蔽体(边长为 40 cm 正方形除去半径为 2 cm 的圆)和屏蔽墙(边长

为 300 cm 的正方形除去边长为 40 cm 的正方形)。准直孔形状为单锥形，准直孔外屏蔽体分三层，最内层为圆柱形屏蔽体，次外层为 20 cm×20 cm 方形屏蔽体，最外层为 40 cm×40 cm 方形屏蔽体，屏蔽体的作用是对准直器弹散和非弹出射的中子以及 γ 射线进一步屏蔽并使屏蔽准直器能嵌在屏蔽墙中。屏蔽准直器长度为 1.1 m，是由厚度分别为 50 cm 的不锈钢、50 cm 聚乙烯和 10 cm 的铅组合而成，单锥形准直孔入口距 25 cm，入口内径 2.4 cm，出口内径 4 cm。

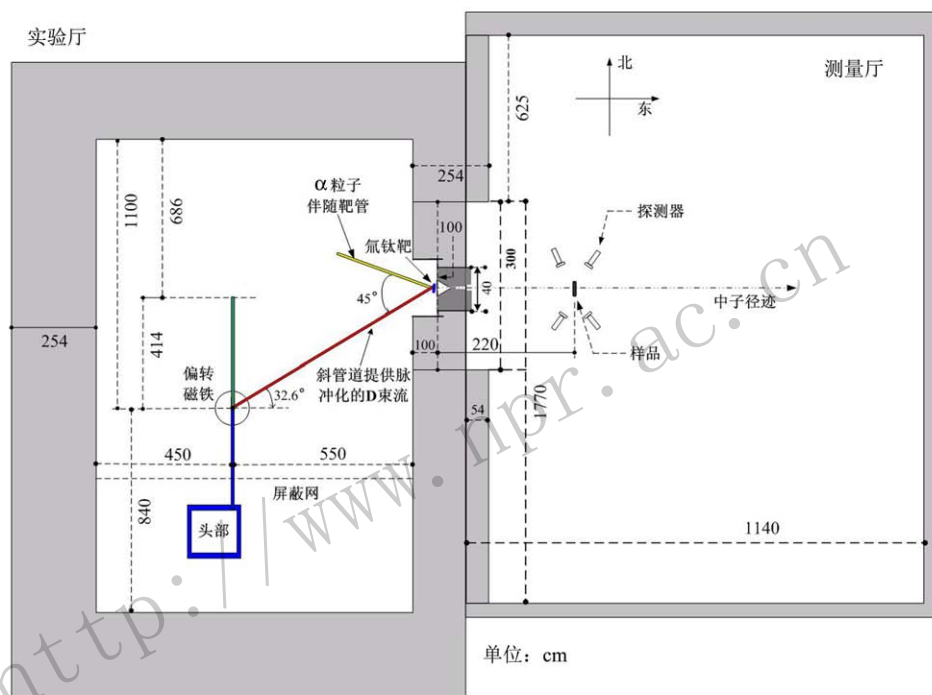


图 1 (在线彩图) 高压倍加速器实验厅示意图

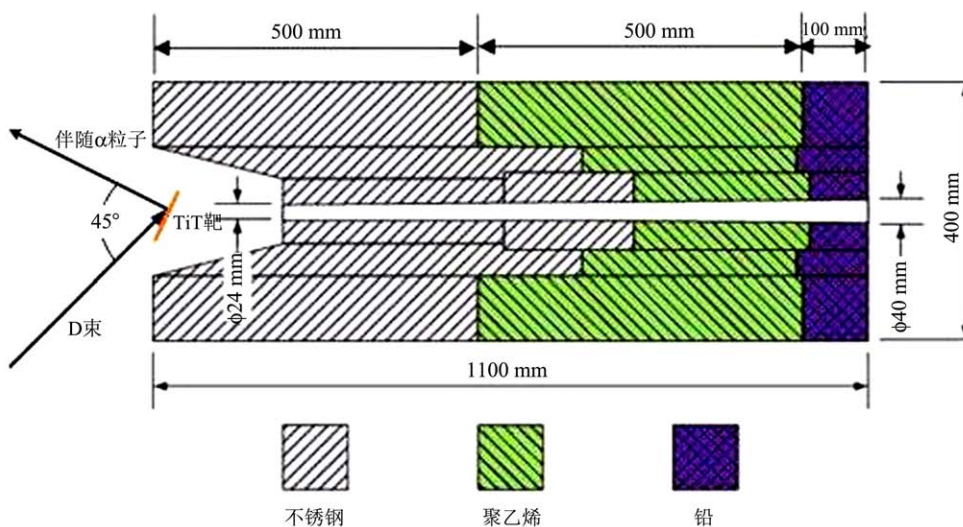


图 2 (在线彩图) 原屏蔽准直器侧剖面图

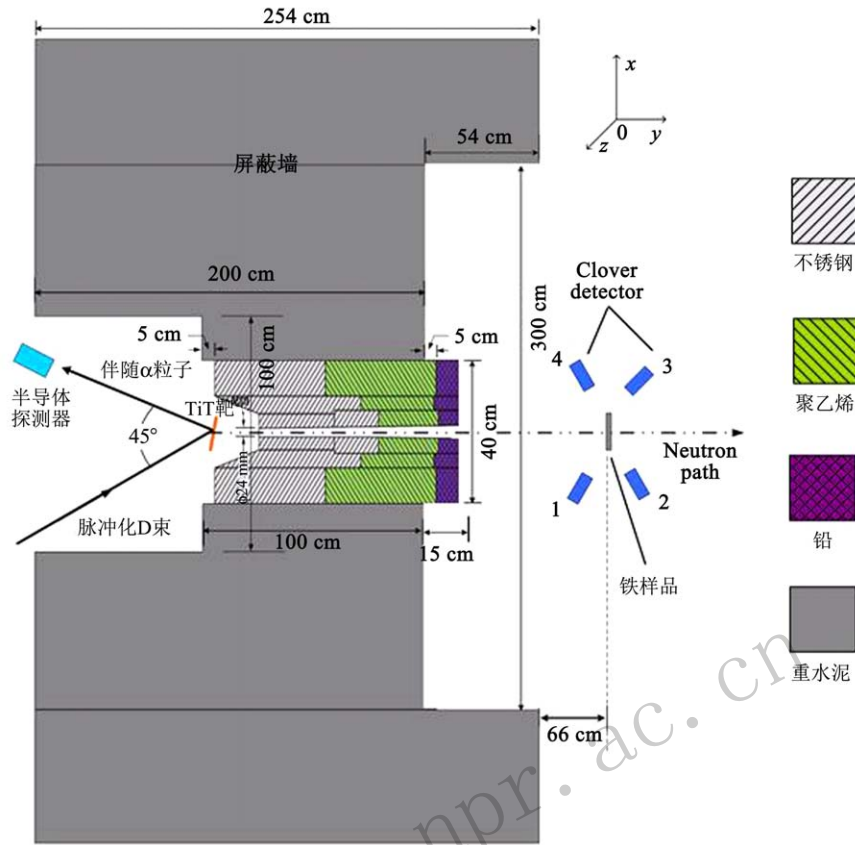


图 3 (在线彩图) 原屏蔽准直系统侧剖图

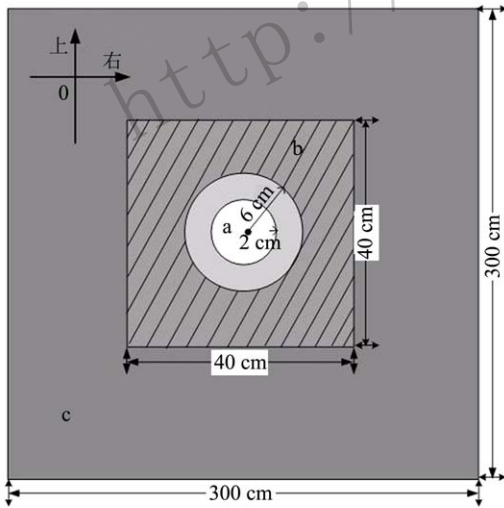


图 4 (在线彩图) 原屏蔽准直系统正截面图

2.2 原实验厅屏蔽系统理论与实验研究

2.2.1 理论研究

为了整体分析原屏蔽系统对中子和伴生 γ 射线的屏蔽效果, 用 MCNP 程序模拟屏蔽系统中中子输运时, 屏蔽准直器几何输入按图 2 所示的尺寸输入, 中子源采用 SDEF 通用源卡, 中子出射方向沿 Y 轴正方向; 模拟时用分段计数卡 FSn, 选取范围为 $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ 、与外墙面平齐且距离中子源为 $d = 1.545\text{ m}$ 处的平面, 该区域平面分成屏蔽体和屏蔽墙两部分, 分别记录了 D-T 中子穿过屏蔽材料后在这两部分处的注量、能谱等各种参数。考虑到既要保证计算精度, 又要节省计算时间, 大部分情况下跟踪中子数为 1×10^7 个, 随着材料厚度的增加, 跟踪中子数可适当增加至 1×10^8 个, 以保证主要数据的统计误差小于 5%。在原屏蔽系统下的模拟输运结果如表 1 所列。

表 1 原屏蔽系统对中子和 γ 射线的屏蔽情况模拟结果

粒子类型	屏蔽体上中子与 γ 射线的透射率		屏蔽墙上中子与 γ 射线的透射率	
	$E < 1\text{ MeV}$	$E \geq 1\text{ MeV}$	$E < 1\text{ MeV}$	$E \geq 1\text{ MeV}$
中子	63.475%	36.525%	82.58%	17.42%
γ 射线	57.87%	42.13%	44.98%	55.02%

分析模拟结果可得出,原屏蔽墙上的高能中子($E_n \geq 1$ MeV)透射率达到17.42%,说明原屏蔽墙的厚度较薄对实验中子本底的增加产生直接影响;原屏蔽墙和屏蔽体上的高能光子透射率在50%左右,说明原屏蔽墙和原屏蔽体对中子的伴生 γ 屏蔽不够。故需要对原屏蔽体和原屏蔽墙进行加厚改进。

2.2.2 实验研究

为详细了解本底情况,在有中子束的情况下,采

用n- γ 分辨技术,利用尺寸为 $\phi 5.08$ cm \times 5.08 cm型液体闪烁体探测器(BC501)分别对实验测量厅屏蔽准直器外表面、屏蔽墙外表面距准直孔一定径向距离处的中子和 γ 射线的相对强度进行了测量,同时,对Clover3和Clover4探测器位置处的中子和 γ 射线的相对强度进行了测量。测量分两种情况来进行:一种是用已加工好的铜棒把准直孔堵住(闭孔),另一种是准直孔未堵住(开孔)。两种情况下测得的结果如表2中所列。

表 2 本底测量结果(测量数据按 α 计数率为1 000 s⁻¹归一)

液闪探测器测量位置	闭孔		开孔	
	n 计数率	γ 计数率	n 计数率	γ 计数率
孔中心	14.8	66.8		
屏蔽准直器下沿	14.1	67.4		
屏蔽体垂直方向距孔中心下方10 cm	14.4	80.3	102.2	127.6
屏蔽体水平方向距孔中心右侧10 cm	20.2	122.5	112.3	159.7
屏蔽墙垂直方向距孔中心下方22.54 cm	81.6	2368.0		
屏蔽墙水平方向距孔中心右侧22.54 cm	151.8	2850.3		
屏蔽墙水平方向距孔中心右侧70 cm	19.2	326.2	17.6	297.8
Clover 3上方	19.2	99.5	26.8	122.4
Clover 4上方	9.9	132.1	12.8	156.2

由表2测量结果可以得出以下结论。

(1) 原屏蔽水泥墙较薄(约1 m),屏蔽墙处中子本底较高,且屏蔽墙没有采取有效的 γ 屏蔽措施,屏蔽墙处 γ 本底的影响十分显著。因此,原屏蔽墙需要加厚以降低中子本底,同时需要增加 γ 屏蔽材料,以降低 γ 本底。

(2) 原屏蔽体有效屏蔽厚度约为1 m,偏薄,中子和 γ 本底偏高。因此,原屏蔽体也需要进行加厚改造。

(3) 实验还发现屏蔽体周围本底明显高于其它位置(见孔下方22.54 cm、孔右方22.54 cm位置数据),经实地勘察发现屏蔽体上方及右方的外侧有3 cm左右的缝隙未堵实,已用同种材料的物质将其堵实。

(4) 屏蔽体里的准直孔周围计数在闭孔和开孔情况下有明显变化,探测器Clover3和Clover4上方的本底在开孔情况下略高于闭孔情况下的数据。

于1 MeV的中子,非弹散射的贡献明显降低,这时就需要依靠含氢材料的弹性散射进一步慢化。最常用的含氢材料是聚乙烯和石蜡,是较理想的中子慢化材料。为有效地吸收热中子,并减少伴生 γ 的产生、使屏蔽层减薄,在屏蔽材料中还可以掺入适量的¹⁰B或⁶Li。

混凝土是另一种中子屏蔽可选材料,普通混凝土密度为2.3 g/cm³,它是多种元素的混合物,它既含有轻元素,也含有较重的元素,以及一定数量的水分,典型的普通混凝土元素成分见表3^[1]中所列。为了提高混凝土中子的慢化屏蔽能力,可将混凝土中铁、钙和硅(Fe, Ca, Si)重材料的比重加大,调制成密度为3.5 g/cm³的重混凝土,混凝土的优点是与中子作用产生的 γ 少。在混凝土中将铁、钙和硅(Fe, Ca, Si)重材料比重加大,调制成密度为3.5 g/cm³的重混凝土。

表 3 混凝土的元素成分 $\times 10^{21}$ 原子 \cdot cm⁻³

元素	碳质混凝土		硅质混凝土	
	含水3.0%	含水5.5%	含水8.0%	含水5.0%
H	4.64	8.50	12.36	7.76
C	20.73	20.20	19.67	-
O	34.395	35.50	36.605	43.29
Mg	1.91	1.86	1.81	1.17
Al	0.62	0.60	0.58	2.35
Si	1.74	1.70	1.66	15.68
Ca	11.60	11.30	11.00	3.55
Fe	0.20	0.19	0.18	0.303

3 中子实验测量厅屏蔽的改进研究

3.1 中子慢化材料的选取及厚度

通过本底测量和模拟结果可以看出墙和准直器的屏蔽效果均需要改善,且中子和 γ 射线屏蔽需同时考虑,候选的屏蔽材料有石蜡、聚乙烯、重水泥、铅、铜、镉、硼等。

透过屏蔽系统散射出来的中子能量主要是小于1 MeV的,非弹散射具有阈能的特点,因此对于能量低

综合考虑聚乙烯、石蜡、重混凝土的屏蔽效果,同时考虑屏蔽墙面积较大,最终选择:屏蔽体上加聚乙烯;屏蔽墙上加石蜡或重水泥。具体选择以下两种组合的方案:(1)屏蔽体[加 $(C_2H_4)_n$]+屏蔽墙[加石蜡];(2)屏蔽体[加 $(C_2H_4)_n$]+屏蔽墙[加重混凝土]。

通过大量的模拟计算分析得出,屏蔽材料组合方式为 30 cm $(C_2H_4)_n$ -屏蔽体+45 cm 石蜡-屏蔽墙和 30 cm $(C_2H_4)_n$ -屏蔽体+45 cm 重混凝土-屏蔽墙两种方案

相比,第一种方案对中子的屏蔽略好于第二种方案。另外,中子在经过屏蔽慢化材料运输过程中会产生伴生伽玛射线,这些伴生 γ 射线对测量的结果也会产生很大的影响,故对 γ 射线也应予以屏蔽,为此采用 MCNP 模拟了上述两种方案下的透射 γ 射线的相对注量,两种方案下透射中子和透射 γ 射线相对通量的数据比较见表 4 所列。

比较结果显示,尽管组合方式为 30 cm $(C_2H_4)_n$ -屏

表 4 设计方案的模拟计算结果*

屏蔽方式	中子透射率		γ 射线透射率	
	屏蔽体 $\times 10^{-8}$	屏蔽墙 $\times 10^{-8}$	屏蔽体 $\times 10^{-8}$	屏蔽墙 $\times 10^{-8}$
原始状态	6.75	1.85	9.03	3.87
屏蔽体上加 30 cm 聚乙烯和屏蔽墙上加 45 cm 石蜡	1.36	1.40	2.40	8.75
屏蔽体上加 30 cm 聚乙烯和屏蔽墙上加 45 cm 重水泥	1.46	1.88	1.22	1.20

* 透射率是指单个向前发射的中子在单位时间、单位屏蔽部位表面面积上产生的计数率。

蔽体+45 cm 石蜡-屏蔽墙方案对中子的屏蔽略好,但其透射 γ 射线相对注量比 30 cm $(C_2H_4)_n$ -屏蔽体+45 cm 重混凝土-屏蔽墙高很多。综合以上因素,同时考虑到稳定性方面重水泥远比石蜡要好,故确定最终方案为 30 cm $(C_2H_4)_n$ -屏蔽体+45 cm 重混凝土-屏蔽墙。

3.2 γ 屏蔽材料的模拟研究

中子在前面几层屏蔽材料运输中产生伴生 γ 射线,故需选择合适的屏蔽材料对这部分 γ 射线进行屏蔽。

选择铅(Pb)或重混凝土作为 γ 射线屏蔽材料,由于屏蔽墙的面积较大,且由前面的模拟计算得知重混

土不仅对中子起到较好的屏蔽慢化效果,而且对伴生 γ 射线的屏蔽效果也相当理想,所以这里屏蔽体上加铅,而屏蔽墙上依然加重混凝土。最终选择伴生 γ 射线的屏蔽材料为屏蔽体上加铅,屏蔽墙上加重混凝土。

采用 MCNP 程序,模拟了在原屏蔽系统上增加 30 cm $(C_2H_4)_n$ -屏蔽体+45 cm 重混凝土-屏蔽墙条件下,在 $d = 1.545$ m 平面处透射透射光子相对注量(单位面积下的注量)随屏蔽材料铅和重水泥厚度增加的变化情况,模拟结果如图 5 所示,其中图 5(a)给出了屏蔽体位置透射光子能谱随铅厚度增加的变化,图 5(b)给出了屏蔽墙位置透射光子能谱随重混凝土厚度增加的变化。

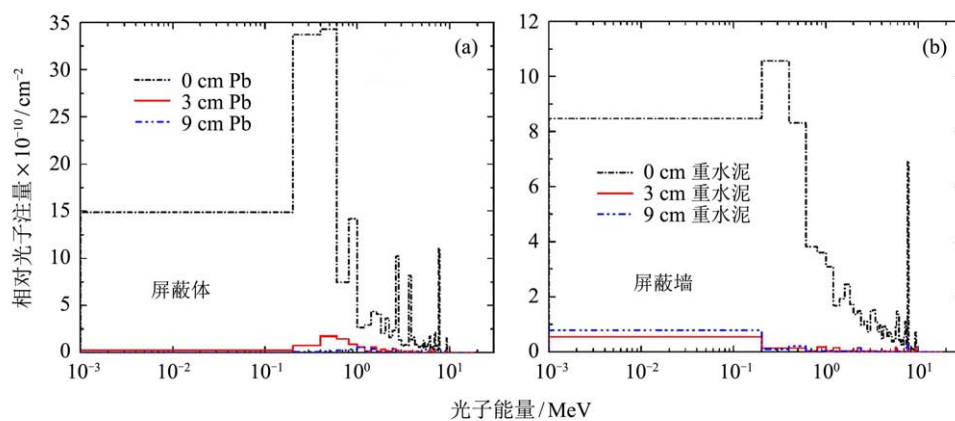


图 5 (在线彩图) 增加铅和重混凝土屏蔽后透射光子相对注量分布

由图 5 中的 (a) 和 (b) 相对注量分布情况可以看出,屏蔽体上选取 9 cm 铅时屏蔽体位置透射的光子计数与未加铅前相比降低了约一个量级,屏蔽墙上选取 9 cm 重混凝土时屏蔽墙位置透射的光子计数与未加重混凝土

前相比也降低了约一个量级,且此时屏蔽体和屏蔽墙上光子能谱已充分软化。

通过模拟结果及讨论,得出对 γ 射线最终的屏蔽方案为屏蔽体上加 9 cm 铅,屏蔽墙上加 9 cm 重混凝土。

3.3 屏蔽墙上最后一层 γ 屏蔽材料的模拟研究

最后经过 MCNP 模拟计算得到在屏蔽墙上选取了 2 cm 厚的铅对 γ 射线作进一步的屏蔽, 屏蔽效果如图 6 所示。

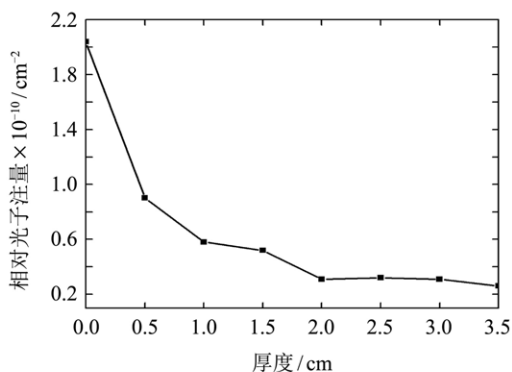


图 6 屏蔽墙上光子相对注量随铅厚度的变化

为了进一步评价对 γ 射线的屏蔽效果, 在原屏蔽系统经过上述多层屏蔽材料加厚后, 对透射光子占总透射光子的份额与未加厚处理时透射光子所占的份额进行了对比, 如表 5 所列。由表 5 的数据对比可知, 对原屏蔽系统加厚处理后, 透射光子各个能区在总透射中子中所占份额与改进前相比有明显降低, 更说明对透射光子的屏蔽已达到了预期的效果。

表 5 屏蔽系统加厚改进前后透射光子占总透射光子的份额(%)

位置	改进前		改进后	
	< 1 MeV	≥ 1 MeV	< 1 MeV	≥ 1 MeV
屏蔽体	57.871	42.129	0.768	0.424
屏蔽墙	44.979	55.021	0.339	0.339

3.4 最终屏蔽方案确定

通过之前对中子和光子分层 MCNP 模拟, 得出最终对原屏蔽系统加厚改进方案: 30 cm(C₂H₄)n+9 cmPb-屏蔽体, 54 cm 重混凝土-屏蔽墙, 再在屏蔽体和屏蔽墙上共同加厚 2 cm 厚的铅 (Pb)。

3.5 准直孔形状的设计改进

3.5.1 准直孔开孔形状选取方案

原准直孔为单锥形, 具体形状如图 7 所示, 中子束经其准直后到达铁样品时能量的单一性不理想, 需要对准直孔的形状进行改造加工, 选取一个束斑大小合适、能量单一性好和不相关能量中子影响小的孔形。

考虑到达铁样品处束斑大小刚好要全包住铁样品 (直径 5 cm) 情况下, 准直孔开孔形状在圆柱形、圆

锥形和对称双锥形这三种方案中进行选取^[2], 圆柱形和对称双锥形准直孔形状类似于图 8 所示的形状。

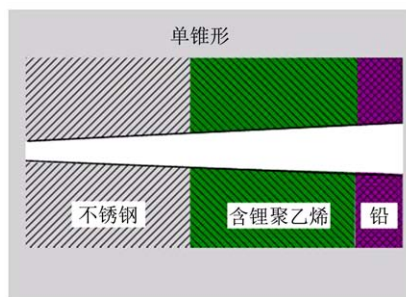


图 7 (在线彩图) 原有屏蔽准直孔的示意图

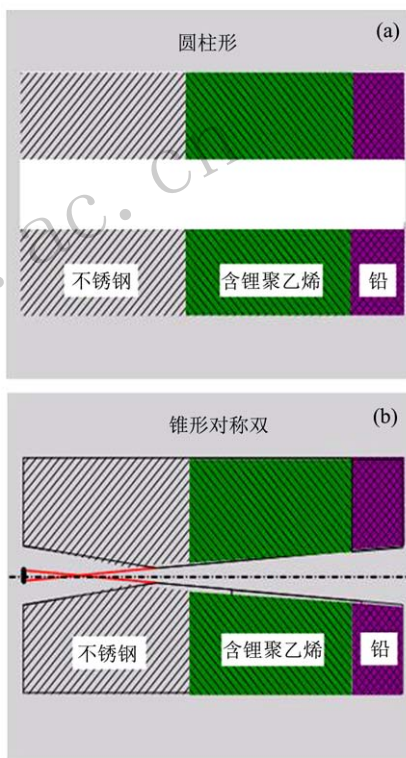


图 8 (在线彩图) 改进的屏蔽准直孔类形式示意图

3.5.2 准直孔开孔方案 MCNP 模拟结果及讨论

准直中子束中子注量径向分布可反映中子束的均匀性及屏蔽体的屏蔽效果, 是中子束重要的特性参数之一。用 MCNP 模拟准直孔开孔形状为圆柱形、圆锥形和对称双锥形这三种方案下的中子运输, 在样品平面上 ($d = 220$ cm) 沿 Z 方向布置了多个点计数器, 记录了不同位置相对于单位源中子的中子注量, 从而得到了中子注量的径向分布, 结果如图 9 所示。

由图 9 可看出, 单锥形准直孔和对称双锥形准直孔在 Z 方向束斑大小最小, 圆柱形准直孔最大, 故准直孔形状应在单锥形或对称双锥形中选取; 对称双锥形准直

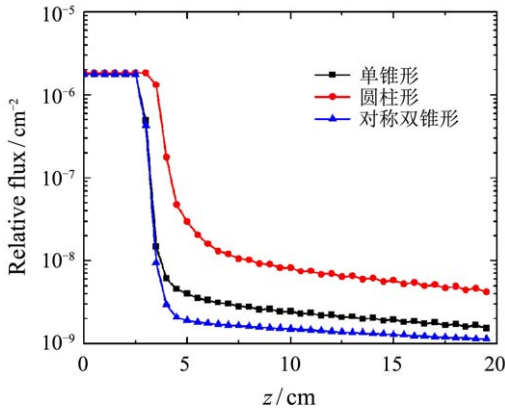


图 9 (在线彩图) $z = 220$ cm平面上不同孔形中子注量沿径向的分布

孔在距中心轴 3.5 cm 后开始计数要明显比单锥形的低,

即对称双锥形准直孔在不相关的计数方面要低于单锥形准直孔。最后, 通过计算得出, 径向距离 $z = 2.5$ cm 时, 对称双锥形准直孔出射的中子各能量区间注量占总中子注量的比重分别是: $E_n (< 1 \text{ MeV}) = 1.553\%$ 、 $E_n (1 \sim 10 \text{ MeV}) = 2.952\%$ 、 $E_n (> 10 \text{ MeV}) = 95.495\%$, 对比单锥形和圆柱形这两种孔形, 中子通过对称双锥形在能量小于 1 MeV 中占的比重最小, 而在能量大于 10 MeV 区间占的比重最大, 准直效果和能量单一性方面对称双锥形准直孔要强于前两者。

3.5.3 准直孔开孔最终确定方案

综合束斑大小、不相关计数和准直效果等因素, 最终准直孔开孔形状选取对称双锥形, 斜率为 0.020 46, 双锥交于 75 cm 处, 改造后的屏蔽准直器侧剖图见图 10。

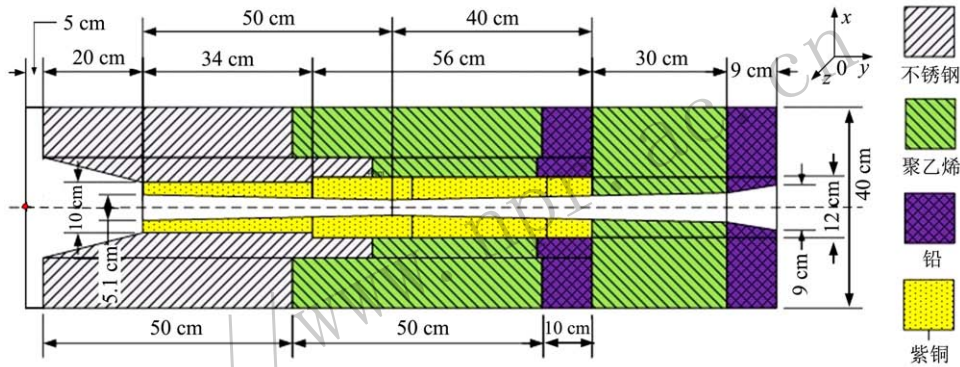


图 10 (在线彩图) 改造后屏蔽准直器的 X-Y 侧剖图

4 屏蔽效果和铁样品测量结果

按照模拟计算的结果, 最终得到了对屏蔽体和屏蔽墙加厚改进的适宜材料厚度: 30 cm(C₂H₄)n+9 cmPb-

屏蔽体, 45 cm 重混凝土+9 cm 重混凝土-屏蔽墙, 最终在屏蔽体和墙上共同加厚 2 cm 的铅; 而准直孔选取了对称双锥形准直孔。改进后的屏蔽准直器和墙的示意图如图 11 所示。

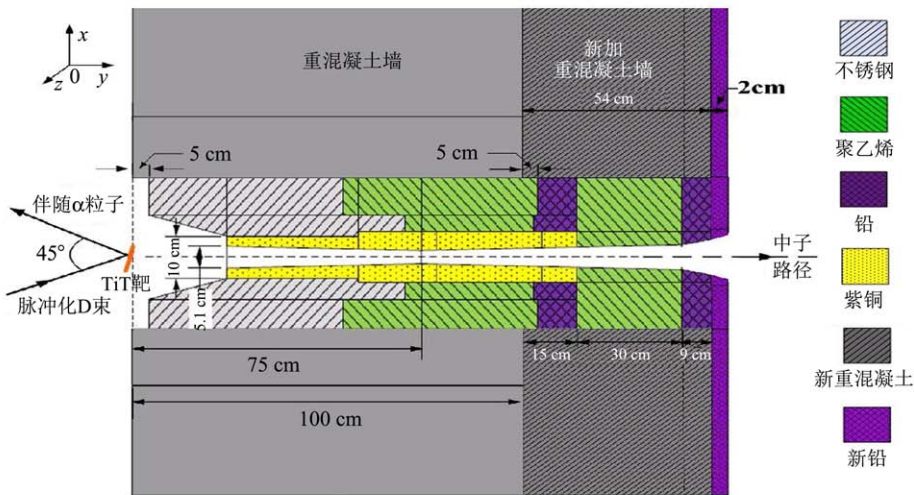


图 11 (在线彩图) 改进后的屏蔽结构示意图

4.1 透射中子和 γ 射线相对强度的测量

在有中子束、放置有铁样品($\Phi 3\text{ cm} \times 3\text{ cm}$)的情况下,采用n- γ 分辨技术,利用 $\phi 5.08\text{ cm} \times 5.08\text{ cm}$ 型液体闪烁体探测器(BC501)测量了改造后距准直孔右方径向距离70 cm处透射出来的中子和 γ 射线的相对强度,后又测量了无中子束情况下的 γ 射线的计数,将改造后测量的结果与改造前的结果进行了对比,详见表6。

表 6 改造前后本底测量对比结果
(测量按 α 计数率为 1000 s^{-1} 来归一)

液闪位置 (孔右方70 cm)	未改造前		改造后	
	n	γ	n	γ
有中子束计数率	17.6	297.8	2.27	28.5
无束流本底	-	20	-	21.3
有中子束产生的本底	17.6	277.8	2.27	7.2

4.2 透射中子和 γ 射线相对强度的测量结论及分析

由表6改造前后本底测量对比结果可以得出:有中子束情况下,改造后测得的中子计数率与未改造前相比降低了约8倍,而测得的光子计数率与未改造前相比降低了约一个量级;在有中子束情况下产生的本底中,改造后测得的中子与未改造前相比降低了约8倍,测得的光子与未改造前相比降低了约38倍,即光子计数也达到了比未改造前降低了一个量级的要求,整体上可以得出改造已达到了预期的效果。

4.3 铁样品的飞行时间谱测量检验

改造完成后,我们再次进行了铁样品实验,并得到飞行时间谱(TOF),将改进前后测得的飞行时间谱用 α 归一后进行比较,如图12所示。从图中可以看出,改造前TOF谱有两个峰,前面为效应峰,后面的峰应为中子束流在屏蔽墙和准直器上散射后的本底效应,其明显对实验测量造成干扰。而在改造完成后,效应峰后的本底峰几乎不可见,屏蔽达到了很好的效果。

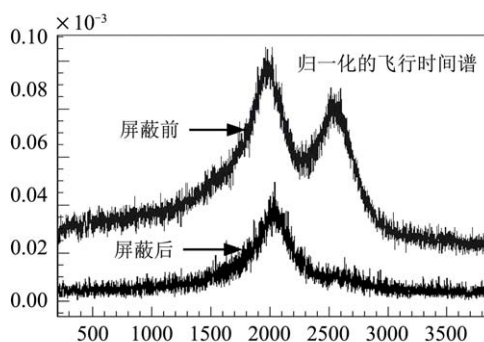


图 12 改进前后飞行时间谱对比

在铁样品实验中,测量了 $^{56}\text{Fe}(n, xn\gamma)$ 的瞬发 γ 射

线产生截面,图13为测量得到的二维谱图,从中可以看出特征 γ 射线的产生与脉冲束流存在强相关,且无束流的时间段内几乎没有本底干扰,说明中子散射本底干扰很小,屏蔽的效果良好。我们通过蒙特卡罗模拟、实验数据分析等进行了各种修正项分析(中子通量衰减及多次散射、 γ 射线自吸收、死时间修正、样品几何修正等),最后得出846.8 keV γ 射线产生截面为623 mb,与美国GEANIE系统测量的结果(669 ± 46) mb基本一致^[3],验证了系统的可靠性。

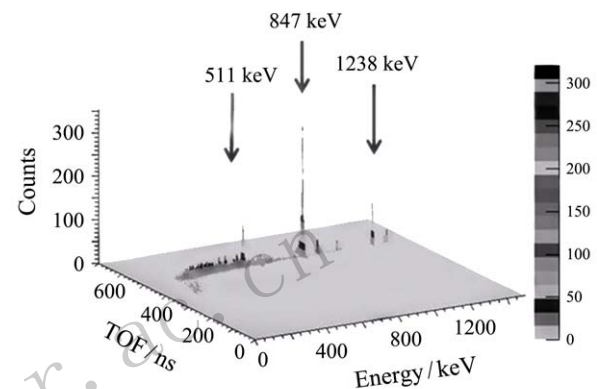


图 13 屏蔽改进后铁样品实验测量二维谱

5 结论

针对高压倍加器的实验测量厅屏蔽现状,通过分层MCNP模拟,得到了对原屏蔽体和原屏蔽墙加厚的适宜屏蔽改进方案:30 cm(C_2H_4)n+9 cmPb-屏蔽体,45 cm重水泥+9 cm重混凝土-屏蔽墙,再在屏蔽体和屏蔽墙上共同加2 cm厚的铅;而准直孔选取了对称双锥形准直孔;准直孔中心处使用紫铜,这对于屏蔽准直中子束流效果更好。随后,通过实验对研制成的新屏蔽体及屏蔽墙进行了实验检验,验证结果显示此屏蔽改进方案已达到了改进后本底计数比改进前降低一个量级的要求,同时也获得了能量单一性好的准直中子束。最后,对实验厅的屏蔽和准直系统进行了改造,使本底至少降低了一个量级。改造完成后通过铁样品的测量验证了系统的可靠性,改造达到了良好的效果。

参考文献:

- [1] FANG Jie. Introduction To Radiation Protection[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1991: 164. (in Chinese)
(方杰. 辐射防护导论[M]. 北京: 原子能出版社, 1991: 164.)
- [2] WANG Qiang. MCNP Simulation And Design Of GTAF Detector Shield System[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007. (in Chinese)

- (王强. GTAF探测器屏蔽体系统的MCNP模拟计算设计[D]. 兰州: 兰州大学, 2007.)
- [3] HUTCHESON A, ANGELL C T, BECKER J A, *et al.* Nucl Instr and Meth B, 2007, **261**: 369.
- [4] LU Xiting, JIANG Dongxing, YE Yanlin. Nuclear Physics[M]. 2nd Ed. Beijing: Atomic Energy Press, 2000: 63. (in Chinese)
- (卢希庭, 江栋兴, 叶沿林. 原子核物理[M]. 第2版. 北京: 原子能出版社. 2000: 63.)
- [5] DING Dazhao, YE Chuntang, ZHAO Zhixiang, *et al.* Neutron Physics—Theory, Method and Application[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2001: VI. (in Chinese)
- (丁大钊, 叶春堂, 赵志祥, 等. 中子物理—原理、方法与应用[M]. 北京: 原子能出版社, 2001: VI.)

Research for Improving the Background of the Experiment of $(n, xn\gamma)$ Cross Section

WANG Qi^{a,1)}, LIU Yang^b, WANG Zhaohui^a, HOU Long^a, Bao Jie^a, SU Xiaobin^a, LI Xia^a

(*a. Key Laboratory of Nuclear Data; b. Reactor physics Laboratory; China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

Abstract: In the experiment of measuring $(n, xn\gamma)$ reaction cross section with prompt γ ray method, the experiment background has a significant influence on the result and is the key factor. In order to achieve the goal of reducing a certain amount of the experiment background, the improvement scheme of shield and collimator was given through Monte Carlo method and the shielding scheme was finally selected: add 30 cm(C₂H₄)n+9 cm Pb on the original shield, 54 cm heavy concrete on the original shield wall and then 2 cm thick lead(Pb) on the shield and shield wall. The collimation effect and energy uniformity of symmetrical double cone collimation hole are the best among cylindrical, conical, and symmetrical double cone. After the completion of the transformation of shield, the relative intensities of the transmitted neutron and γ rays from the 70 cm in right radial of the transformed collimation hole were measured with $\phi 5.08$ cm \times 5.08 cm type liquid scintillator detector(BC501). After deducting the natural background of no beam current, the neutron background of the beam current is reduced by 7.75 times and the γ background is reduced by 38.5 times, which meets the requirement.

Key words: $(n, xn\gamma)$ cross section; shield; background; collimator; simulation

Received date: 14 Apr. 2016; Revised date: 28 May 2016

Foundation item: National Defense Advanced Research Fund Subsidization Project(41603030103)

1) E-mail: wwwq898@163.com.