中国散裂中子源多功能反射谱仪屏蔽设计*

沈飞[1)2)3)] 梁泰然[2)3)4)] 殷雯[2)] 于全芝[2)] 左太森[3)]
姚泽恩[1)] 朱涛[2)] 梁天骄[2)†]

1) (兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000)

2) (中国科学院物理研究所, 北京 100190)

3) (中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

4) (南开大学物理系, 天津 300071)

(2014 年 3 月 14 日收到; 2014 年 4 月 11 日收到修改稿)

本文介绍了利用蒙特卡罗粒子输运程序 MCNPX2.5.0 进行中国散裂中子源多功能反射谱仪屏蔽设计的屏蔽需求、辐射源项、计算方法和设计结果等内容. 在计算中考虑慢化器泄漏源项、中子导管损失源项等不同辐射源项, 使用分步计算和源项角度偏移、源项能量偏移、几何分裂等多种减方差方法, 在保证计算结果精度的同时提高计算速度. 在谱仪束线传输段、第二中子开关、散射室等的屏蔽计算中, 通过比较了不同条件下的所需屏蔽确定最终屏蔽设计, 确保谱仪屏蔽外人员可到达区域的剂量低于安全限值 2.5μSv/h.

关键词: 屏蔽设计, MCNPX, 中国散裂中子源, 多功能反射谱仪

PACS: 28.20.Gd, 28.41.Qb, 61.05.fj **DOI:** 10.7498/aps.63.152801

1 引 言

中国散裂中子源 (CSNS) 是基于加速器加速质子轰击靶站内的钨靶产生中子, 并通过水或氢慢化器慢化中子, 输出不同能段和脉冲宽度的脉冲中子用于多学科研究的大科学装置. CSNS 的质子束流功率为 100 kW, 质子能量 1.6 GeV, 脉冲重复频率 25 Hz, 保留质子束流功率提升至 500 kW 的潜力. CSNS 靶站提供二十条中子束线, 首批建设的中子散射谱仪包括小角谱仪 (SANS)、通用衍射谱仪 (GPPD)、多功能反射谱仪 (MR) 等三台谱仪 [1].

CSNS 多功能反射谱仪 (MR) 是通过分析样品的反射中子研究物质的表面和界面结构. 主要应用领域包括: 各种新兴薄膜材料的结构、磁性低维结构及表面磁性、聚合物 LB 膜及生物膜的结构和界面现象、液体物质及固液界面等. MR 对应的慢化器是 20 K 耦合液氢慢化器 [2], 从靶站第二条中子束线孔道引出. 液氢慢化器提供的中子覆盖从冷中子到几百 MeV 的宽广能区范围, 中子散射实验所利用的主要是冷中子和热中子, 更高能量的中子将增加散射室内的本底. 为此, CSNS 多功能反射谱仪在设计中利用弯导管将慢化器输出的长波中子传输至样品, 同时避免了超热中子以上能区的中子直射到样品位置, 达到降低散射室本底的目的.

中子散射谱仪运行时, 为了保证人员的安全, 需要对谱仪进行屏蔽, 保证在人员允许到达区域的剂量率低于 2.5μ Sv/h. Gallmeier 等以冷中子斩波器谱仪为例介绍了美国散裂中子源的中子散射谱仪屏蔽计算 [3], Harada 等介绍了基于 PHITS 程序的日本散裂中子源的 NOBORU 束线的屏蔽设计 [4], 宋建明等对反应堆冷中子三轴谱仪屏蔽体进行计算并与实测剂量值进行比较 [5], 上述工作对 CSNS 多功能反射谱仪屏蔽设计具有一定的参考意义. 本文利用蒙特卡罗粒子输运程序 MCNPX2.5.0 [6], 对 CSNS 多功能反射谱仪的屏蔽进行

* 国家自然科学基金 (批准号: 91026009, 11174358, 11075203) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: tjliang@aphy.iphy.ac.cn

© 2014 中国物理学会 Chinese Physical Society

了计算、分析和设计. 首先介绍了反射谱仪的屏蔽需求, 之后介绍了用于屏蔽计算的辐射源项, 包括慢化器输出中子、沿导管泄漏中子、第二中子开关处和导管出口处的导管传输的冷、热中子等源项; 之后是加快计算速度的分步计算和方差减小方法等计算方法的介绍; 最后介绍束线传输段屏蔽、第二中子开关屏蔽、散射室屏蔽的计算模型、结果和分析. 本文所有的计算结果归一到500 kW质子束流功率.

2 多功能反射谱仪屏蔽需求

多功能反射谱仪的中子光路如下: 中子导管起始于距耦合液氢慢化器2.25 m处, 整个导管长14.75 m. 弯导管长4 m, 起始位置距离慢化器4.25 m, 曲率半径90 m; 聚焦导管起始位置距离慢化器12.48 m; 第二中子开关距慢化器12.22 m; 样品在距离导管出口2.5 m处. 图1显示了整个谱仪的中子光路.

靶站屏蔽体延伸至距离慢化器中心6 m位置, 反射谱仪自身的屏蔽亦即本文所关注的屏蔽从靶站屏蔽体外围开始. 从距慢化器6 m到17 m属于谱仪的中子束线传输段, 部件主要包括中子导管、中子斩波器、第二中子开关等, 这段谱仪屏蔽体紧邻谱仪部件外围径向延伸, 17 m后是谱仪的中子入射样品发生反射并进行测量的散射室, 散射室所需的屏蔽在散射实验所需空间之外向外扩展.

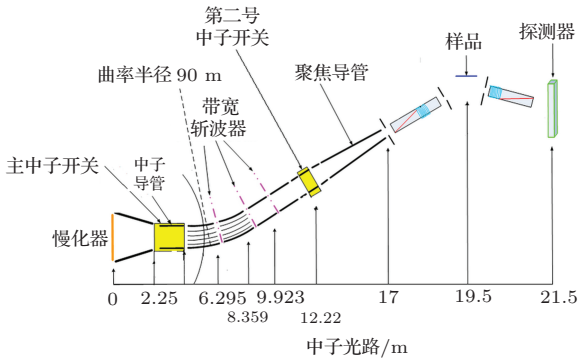

图1 (网刊彩色) CSNS 多功能反射谱仪示意图

3 辐射源项

质子轰击散裂靶产生的中子, 经过慢化器与铍反射体慢化之后, 只有小部分的中子能进入到靶站内面对慢化器的中子孔道. 为提高计算效率, 谱仪屏蔽计算不是从质子打靶开始, 而是从距离慢化器1 m、截面积12 cm × 12 cm的中子孔道入口面开始, 该处相对入口面法线2° 内的慢化器泄漏中子源项通过包含靶站的靶-慢化器-反射体模型[7]的蒙卡输运计算获得. 如图2 所示, 该源项的出射角度又细分为0°—1°,1°—2° 两群, 每个出射角度内的中子能谱包含81个能群.

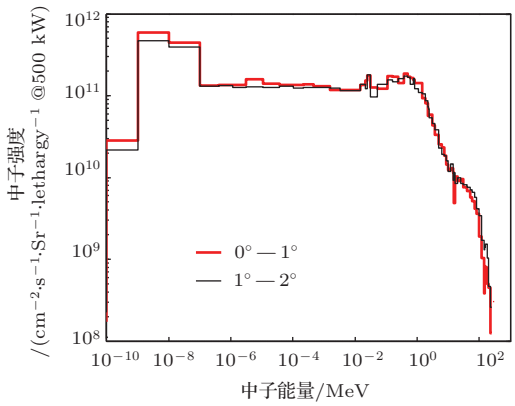

图2 (网刊彩色) 中子孔道入口处的液氢慢化器 (20 K) 泄漏中子源项

多功能反射谱仪的中子导管对冷、热中子有反射作用, 而MCNPX 2.5.0不考虑该种反射. 为保证不低估源项强度, 使用中子光学模拟程序Vitess[8,9]计算导管沿途的中子强度, 得到沿导管不同位置的中子泄漏率和不同位置处的导管内中子通量. 图3显示了三个带宽斩波器处于全开位置时, Vitess计算获得的经导管传输至第二中子开关处和中子导管出口处的冷中子能谱. 图4显示了Vitess计算获得的中子导管沿途的冷、热中子泄漏率, 在反射谱仪束线传输段屏蔽计算中, 这些导管泄露的中子也在源项中考虑.

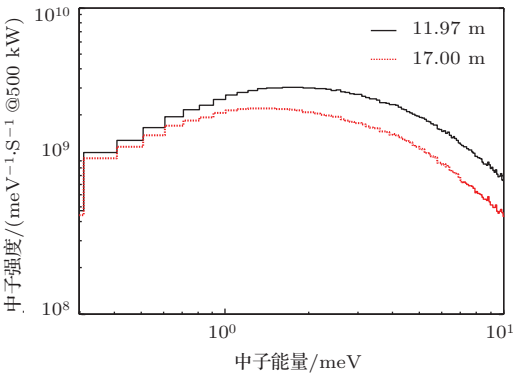

图3 (网刊彩色) 三个带宽斩波器处于全开位置时, MR的中子导管内在第二中子开关处 (11.97 m) 和中子导管出射 (17.00 m) 的冷中子能谱

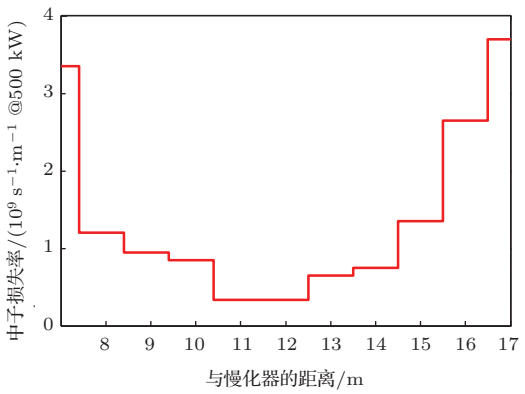

图 4 MR 中子导管内的冷、热中子损失率

散射室屏蔽计算的源项考虑三个带宽斩波器处于全开位置时, 来自于中子导管出射的进入到散射室的冷、热中子. 如图 3 红线所示.

4 计算方法

Monte Carlo 粒子输运程序 MCNPX2.5.0, 是由美国 Los Alamos 实验室开发的通用粒子输运程序, 它包含了多种核反应物理模型和截面数据, 能准确的描述粒子在物质中的多种作用过程. 在整个反射谱仪屏蔽计算中, 对能量在 150 MeV 以上的粒子输运, 使用 Bertini 模型 [10]; 能量在 20 MeV 以上且在 150 MeV 以下的粒子输运, 使用 LA150 数据库; 能量在 20 MeV 以下的粒子输运, 使用 ENDF/B-VI 评价核数据库.

由于反射谱仪的屏蔽计算涉及的空间范围大、几何结构和源项条件复杂, 同时, 屏蔽计算是深穿透输运计算, 在包含全部谱仪屏蔽几何的模型中计算整个谱仪屏蔽, 耗时巨大且难以在全局获得可靠结果. 为了在合理的计算时间内获得良好统计的结果, 我们采用分步计算的方法, 即将谱仪的束线传输段屏蔽和散射室屏蔽根据各自的源项特点分别计算, 以提高计算速度. 此外, 我们还使用以下几种源偏倚抽样 [11] 和几何分裂减方差方法:

1) 源项角度偏移. 对慢化器泄漏中子源项进行角度偏移, 0°—1° 的抽样概率偏移为 0.7, 1°—2° 的偏移为 0.3. 谱仪中子导管孔道尺寸是 60 mm × 40 mm, 通过源项中子出射角度偏移, 增加进入中子导管以及到达谱仪远端的中子的抽样.

2) 源项能量偏移. 对慢化器泄漏中子源项进行能量偏移, 各角度内的 81 个能群抽样均偏移为等概率抽样. 屏蔽体外剂量主要源自于源项中高能中子贡献, 通过能量偏移, 增加高能中子的抽样, 可减小屏蔽体外的剂量计算方差.

3) 几何分裂. 此方法是常用且有效的方差减小方法, 将屏蔽体的几何分层, 当粒子由内层的屏蔽体向外层的屏蔽体输运时, 在几何分层边界处根据设置的几何重要性发生分裂, 同时分裂粒子的权重减小, 从而增加外层屏蔽体中的粒子统计量.

屏蔽计算中需考虑谱仪的不同条件, 比较不同条件下的屏蔽计算结果, 选取最大所需厚度以确保辐射安全. 第二中子开关周边屏蔽的计算需考虑三个带宽斩波器全开, 第二中子开关关闭的条件. 在散射室屏蔽计算中, 需考虑带宽斩波器和散射室内三个狭缝全开时, 中子束流入射到 10 mm 厚的锰样品 (辐射俘获热中子后产生 8 MeV 以上的 γ 射线) 和 10 mm 厚的普通水样品 (具有较大的热中子散射截面) 等条件. 而束流垃圾桶屏蔽计算时则考虑无样品束流直射的条件.

铁与普通混凝土都是常用屏蔽材料. 铁是高能中子的有效屏蔽材料, 但 ^{56}Fe 非弹性散射阈值为 847 keV, 同时, 在 27.7 keV, 73.9 keV 等能区总截面很低, 导致铁屏蔽体外出现中低能中子堆积. 混凝土可有效屏蔽中、低能中子, 采用铁在内、混凝土在外的复合屏蔽结构, 可实现各能段中子的有效屏蔽, 同时较聚乙烯碳化硼、铝基碳化硼 [12] 等屏蔽材料价格低廉. 本文计算使用的低碳钢和普通混凝土等材料的具体成分与密度见表 1 .

表 1 屏蔽材料与样品的成分

材料	密度/(g/cm^3)	成分 (质量百分比)/%
低碳钢	7.84	Fe(98.99), Mn(0.75), C(0.18), P(0.04), S(0.04)
普通混凝土	2.30	O(49.8), Si(31.5), Ca(8.3), Al(4.6), K(1.9), Na(1.7), Fe(1.2), H(0.6), Mg(0.3), S(0.1)
碳化硼	2.52	B(78.3), C (21.7)
空气	0.00129	N(76.5), O(23.5), C(0.01), H(0.00003)
铁砂	2.66	Fe(100)
水	1.0	O(88.9), H(11.1)
锰	7.2	Mn(100)

中子、光子等效剂量分布计算结果使用MCNPX的网格统计卡(mesh tally)记录, 使用的中子、光子通量-剂量转换系数来自国际辐射防护委员会(ICRP)的ICRP-21报告[13].

5 束线传输段屏蔽

图5显示了多次计算后屏蔽材料厚度优化的MR束线传输段屏蔽的几何模型, 该几何模型包含了MR中子束道附近的靶站屏蔽体, 也预留了带宽斩波器与导管的安装空间. 导管与侧面屏蔽体和顶部屏蔽体的间隙均是10 cm, 与底部屏蔽体的是15 cm, 该间隙用铁砂填充. 第二个斩波器前为15 cm厚的低碳钢加混凝土屏蔽结构, 之后采用普通混凝土屏蔽. 设计优化后的束线传输段屏蔽体的具体尺寸见表2.

图6显示了MR束线传输段过束流中心线水平和垂直方向的的总剂量(中子剂量与光子剂量之和)分布计算结果, 图中红线为屏蔽体边界, 计算结果表明屏蔽体外剂量均小于2.5 μSv/h.

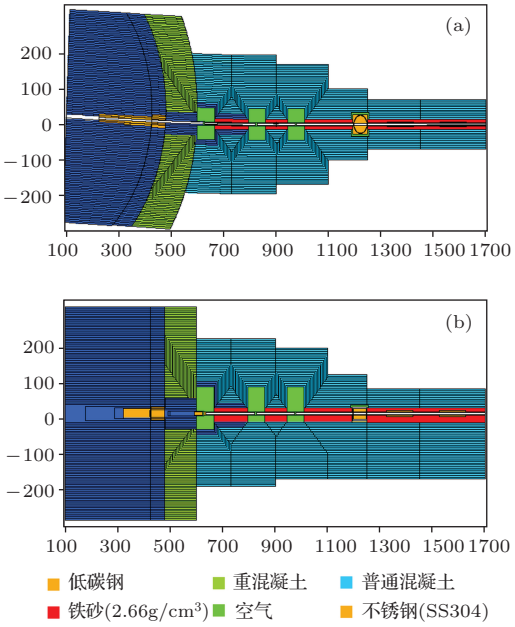

图5 (网刊彩色) MR束线传输段屏蔽过中子束流中心线几何模型的水平切面图(a)与竖直切面图(b)(单位: cm)

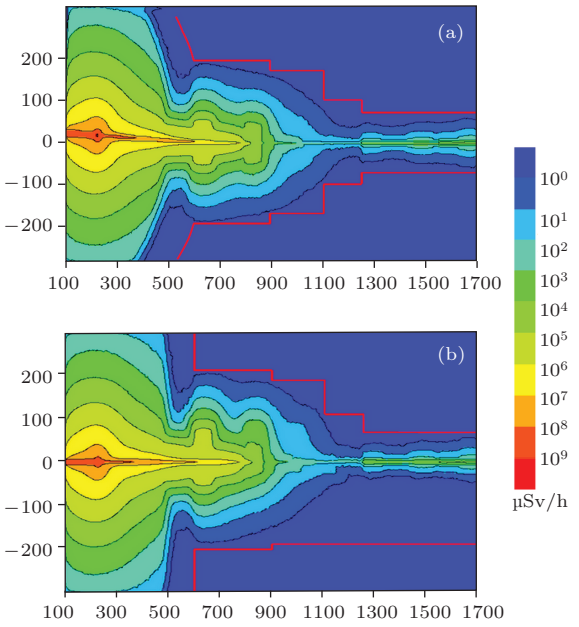

图6 (网刊彩色) 束线传输段过中子束流中心线的水平方向(a)与竖直方向(b)总剂量分布图(红线是屏蔽体外边界线)

表2 束线传输段屏蔽体的尺寸

与慢化器的距离/m	谱仪部件	两侧屏蔽体起止位置/cm		屏蔽体高度起止位置/cm	
		起始位置	截止位置	起始位置	截止位置
6.0—6.65	第一斩波器	45	195	75	210
6.65—7.95	弯导管	15	195	15	210
7.95—8.6	第二斩波器	45	195	75	210
8.60—9.0	直导管	15	195	15	210
9.0—9.45	直导管	15	170	15	185
9.45—10.1	第三斩波器	45	170	75	185
10.1—11.0	直导管	15	170	15	185
11.0—11.9	直导管	15	100	15	110
11.9—12.5	第二中子开关	35	100	25	110
12.5—17.0	聚焦导管	15	70	15	70

注: 屏蔽体的起止位置均为相对中子导管中心线距离

6 第二中子开关屏蔽

为方便运行时散射室内的样品更换, MR 设计中在靶站内的中子开关之外还增加了开启速度更快的第二中子开关. 在靶站内中子开关开启、第二中子开关关闭时, 要求散射室内样品处剂量低于 2.5 μSv/h 以保障此时进入散射室人员安全, 此外, 该种条件下导管传输的中子束全部损失于第二中子开关, 能谱如图 3 黑线所示, 相比第二中子开关开启条件, 辐射源项增强, 对周边屏蔽要求更高. 图 7 显示了计算中采用的第二中子开关及部分周边屏蔽的几何模型. 当处于关闭状态时, 第二中子开关的迎中子束流面是 12 cm × 12 cm、厚度为 2 mm 的碳化硼, 作为低能中子的吸收材料, 其余部分是 SS304 不锈钢, 屏蔽中子俘获释放的伽玛射线.

图 8 显示了第二中子开关关闭时周边的总剂量分布, 该种条件下屏蔽体外的总剂量均小于 2.5 μ Sv/h. 第二中子开关关闭时样品处的总剂量使用点统计卡 (F5) 和通量-剂量转换卡 (DE 和 DF 卡) 计算获得, 为 2.6×10^{-2}μ Sv/h, 小于安全剂量限值, 表明谱仪运行时关闭第二中子开关可保证散射室内人员辐射安全.

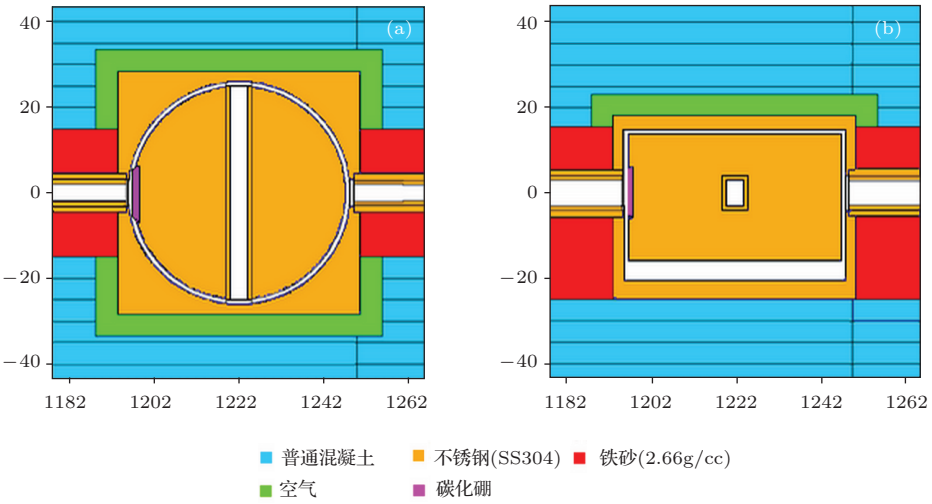

图 7 (网刊彩色) 第二中子开关关闭时, 过中子束流中心线几何模型的水平切面图 (a) 和竖直切面图 (b)(单位: cm)

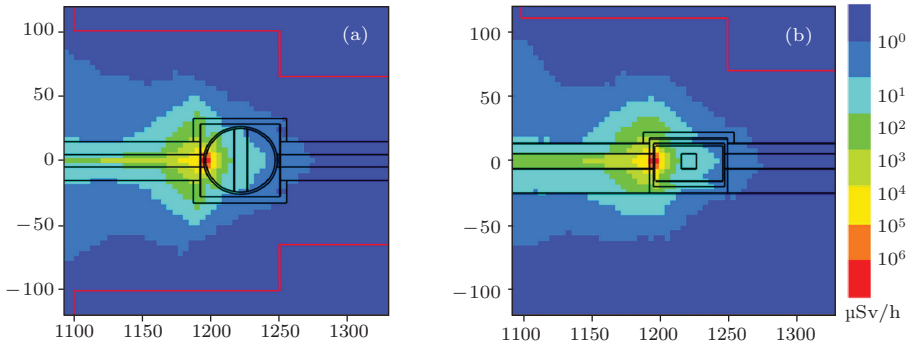

图 8 (网刊彩色) 第二中子开关关闭时, 过中子束流中心线的水平方向 (a) 和竖直方向 (b) 总剂量分布图 (红线是屏蔽体外边界线)

7 散射室屏蔽

散射室的屏蔽设计涉及散射室屏蔽墙、散射室门、束流垃圾桶等参数的确定. 散射室几何模型中包含三个中子狭缝、样品、中子束流丢失管道、束流垃圾桶和散射室门, 其余谱仪部件未包括在内. 狭缝均是 20 mm 厚的碳化硼块, 狭缝全开时的大小是 40 mm × 40 mm. 散射室屏蔽墙材料为普通混凝土, 多次计算优化后的各部分墙体如图 9 所示, 前屏蔽墙 (中子导管出口所在墙体) 厚 95 cm, 后屏蔽墙 (门所在墙体) 厚 90 cm, 天花板厚 95 cm, 侧面屏蔽墙厚度见表 3. 散射室门材料为低碳钢, 优化后的厚度是 22 cm, 其附近的局部放大几何模型见

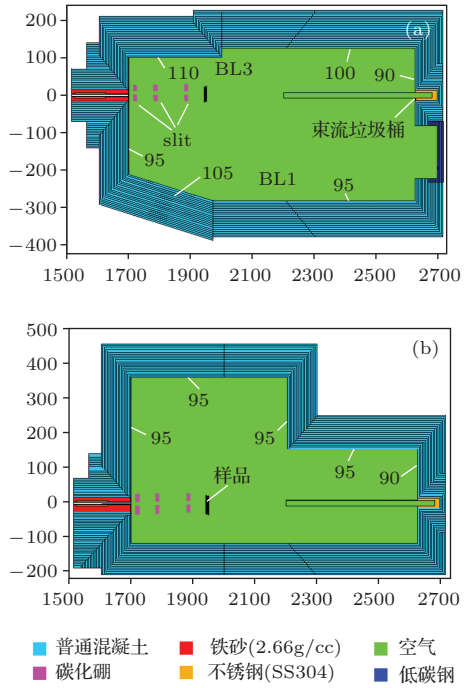

图 9 (网刊彩色) 散射室的过中子束流中心线几何模型的水平切面图 (a) 与竖直切面图 (b)(单位: cm)

表 3 散射室侧面屏蔽墙厚度

BL1 侧, 与慢化器的距离/m	厚度/cm	BL3 侧, 与慢化器的距离/m	厚度/cm
17.0—19.75	105	17.0—19.10	110
19.75—26.25	95	19.10—20.0	125
		20.0—26.25	100

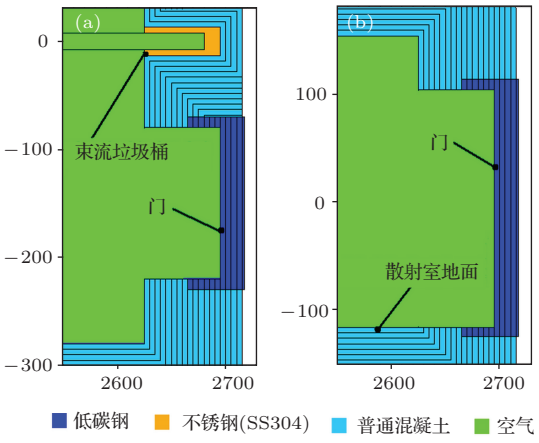

图 10 (网刊彩色) 散射室门附近局部放大的几何模型, 水平切面图 (a) 与竖直切面图 (b)(单位: cm)

图 10. 内、外直径分别为 15 cm 和 26 cm 的 SS304 不锈钢圆柱桶形的束流垃圾桶嵌入散射室屏蔽墙体内, 内衬 2 mm 厚碳化硼, 桶底厚度 15 cm, 深度 55 cm. 束流垃圾桶与起始于样品 2.5 m 后的内衬 2 mm 厚碳化硼的束流丢失管道相连接, 几何模型见图 11.

散射室屏蔽需保障不同运行条件下屏蔽体外剂量低于限值, 我们计算了中子束流入射关闭的狭缝、水样品、锰样品、束流垃圾桶以及中子束在样品反射等恶劣条件下的总剂量分布, 计算结果表明各条件下屏蔽体外剂量均低于 2.5μSv/h. 中子散射实验的样品厚度一般为 mm 量级, 在计算中基于保守考虑采用 10 mm 厚度. 中子束流入射水样品对应样品强散射中子的恶劣条件, 图 12 显示了 10 mm 水在样品位置时的总剂量分布结果, 此时入射中子束基本被水样品散射, 在样品后侧无明显透射中子, 散射室内靠入射中子一侧的剂量较高, 但混凝土屏蔽墙外的剂量均低于限值. 锰中子辐射俘获中子后释放出 8 MeVγ 射线, 代表了样品发生中子辐射俘获、释放强高能伽玛射线的恶劣条件. 图 13 显示了 10 mm 锰在样品位置时的散射室总剂量分布结果, 此时, 部分入射样品中子透射锰样品, 导致散射室内样品后部直射区域剂量高于水样品条件. 同时, 束线传输段一侧的散射室屏蔽墙外侧部分区域 (如距慢化器 1900 cm、侧向距束流中心线 200 cm 处) 总剂量稍高于水样品工况时的总剂量, 水样品条件时, 这些区域总剂量主要源自在屏蔽墙内衰减的中子以及在屏蔽墙内中子辐射俘获产生的伽玛射线, 锰样品条件时, 屏蔽墙内衰减的中子及屏蔽墙内中子辐射俘获产生的 γ 射线在这些区域产生的剂量低于水样品条件, 但样品处的锰辐射俘获释放的 8 MeVγ 射线在这些区域产生的剂量高于水样品释放的 2.445MeVγ 射线的贡献, 导致这些区域总剂量稍高于水样品条件, 但屏蔽墙外仍低于 2.5 μ Sv/h 限值. 图 14 显示了无样品时中子束流直接入射束流垃圾桶时的总剂量分布计算结果, 束流丢失管道与束流垃圾桶对入射散射室的冷、热中子较好地吸收和限制, 散射室屏蔽墙外的总剂量均低于限值. 图 15 对比显示了水样品和锰样品时散射室屏蔽门局部的总剂量分布, 结果表明 22 cm 低碳钢的屏蔽门可实现有效屏蔽.

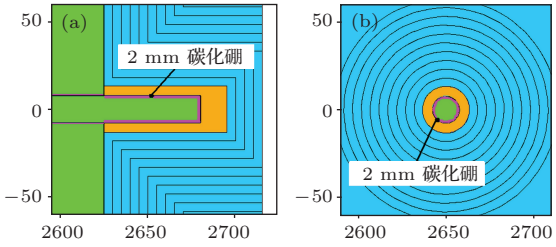

图 11 (网刊彩色) 束流垃圾桶的几何模型, 水平切面图 (a) 与竖直切面面图 (b) (单位: cm)

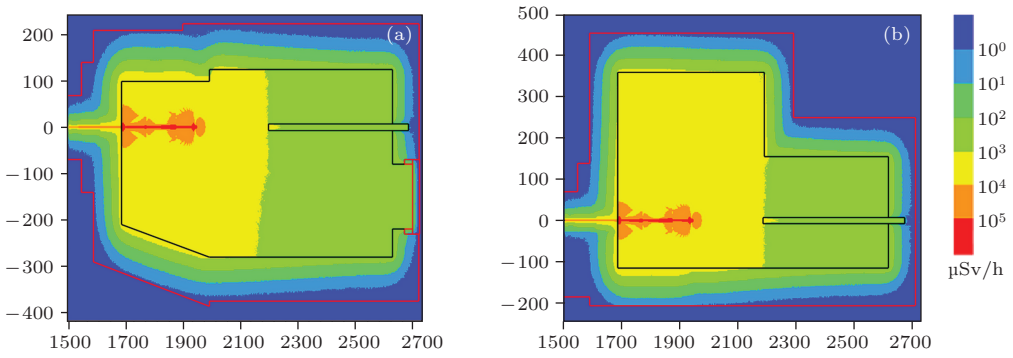

图 12 (网刊彩色) 样品位置是 10 mm 厚的水样品时, 过中子束流中心线的水平方向 (a) 与竖直方向 (b) 总剂量分布图

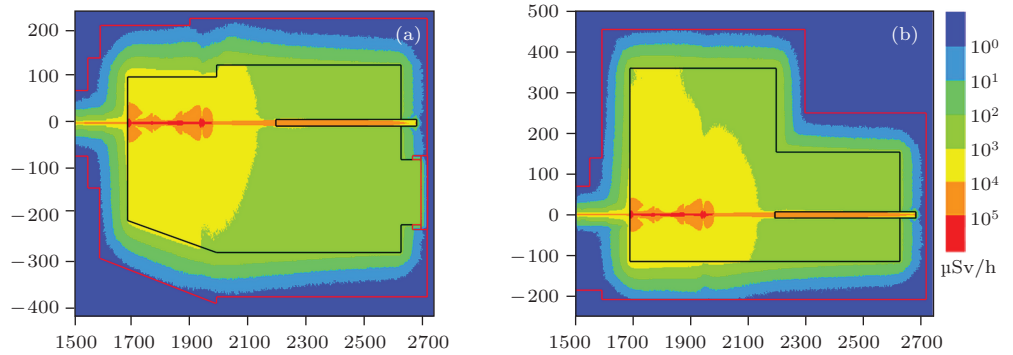

图 13 (网刊彩色) 样品位置是 10 mm 厚的锰样品时, 过中子束流中心线的水平方向 (a) 与竖直方向 (b) 总剂量分布图

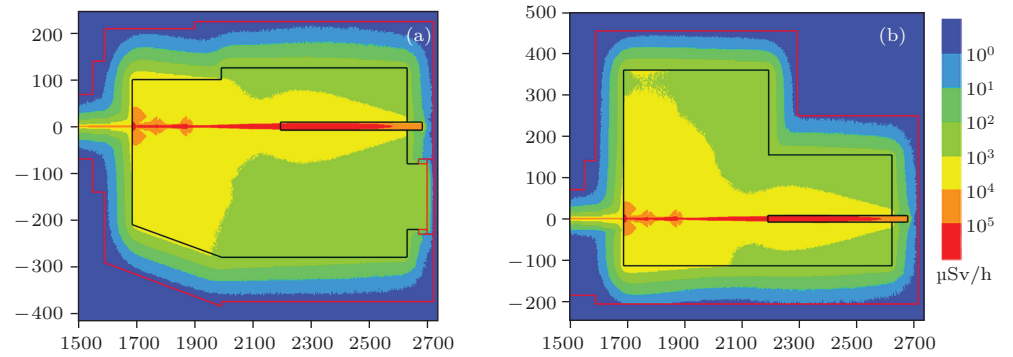

图 14 (网刊彩色) 样品位置无样品时, 过中子束流中心线的水平方向 (a) 与竖直方向 (b) 总剂量分布图

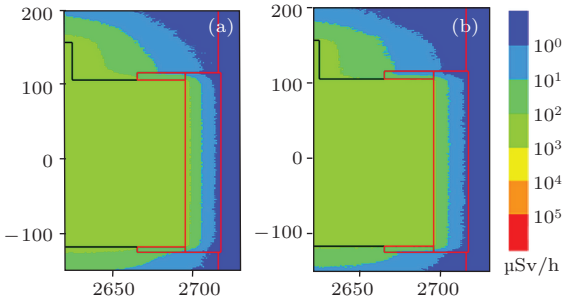

图 15 (网刊彩色) 样品位置是 10 mm 普通水样品 (a) 和 10 mm 锰样品 (b) 时, 过散射室门的竖直中心线的总剂量分布图

8 结 论

中国散裂中子源多功能反射谱仪的屏蔽设计对于保障用户和工作人员的辐射安全具有重要的意义. 本文介绍了在中国散裂中子源多功能反射谱仪的屏蔽设计工作中的屏蔽需求、辐射源项、计算方法和计算结果等内容, 对其他中子散射谱仪屏蔽设计也具有一定的参考意义. 在计算中考虑了不同辐射源项, 使用分步计算和多种减方差方法, 在保证计算结果精度的同时提高计算速度. 在谱仪束线

传输段、第二中子开关、散射室等的屏蔽计算中, 通过比较了不同条件下的所需屏蔽确定最终屏蔽设计, 确保谱仪屏蔽外人员可到达区域的剂量低于安全限值2.5μ Sv/h.

参考文献

[1] Wang F W, Liang T J, Yin W, Yu Q Z, He L H, Tao J Z, Zhu T, Jia X J, Zhang S Y 2013 *Sci. China-Phys. Mech. Astron.* **56** 2410

[2] Yin W, Liang T J Yu Q Z 2011 *Nucl. Instrum. Meth. A* **631** 105

[3] Gallmeier F, Ferguson P, Iverson E, Popova I, Lu W 2006 *Nucl. Instrum. Meth. A* **562** 946

[4] Harada M, Oikawa K, Kasugai Y, Maekawa F 2011 *Prog. Nucl. Sci. Tech.* **1** 94

[5] Song J, Yin Y P Li J, Liu L J, Wang H, Sun G A 2013 *Nucl. Phys. Rev.* **30** 47 (in Chinese) [宋建明, 尹延朋, 李建, 刘丽鹃, 王虹孙光爱 2013 原子核物理评论 **30** 47]

[6] Pelowitz D 2005 *MCNPX*$^{\rm TM}$ *user's manual* version 250 LA-CP-05-0369

[7] Yin W, Yu Q Z, Liang T J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 052501 (in Chinese) [殷雯, 于全芝, 梁天骄 2011 物理学报 **60** 052501]

[8] Zsigmond G, Lieutenant K Mezei F 2002 *Neutron News* **13** 11

[9] Lefmann K Nielsen K 1999 *Neutron News* **10** 20

[10] Bertini H W 1969 *Phys. Rev.* **188** 1711

[11] Deng L, Li S, Mo Z Y, Li G 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 022401 (in Chinese) [邓力, 李树, 莫则尧李刚 2011 物理学报 **60** 022401]

[12] Dai C J, Liu X Q, Liu Z L, Liu B L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 152801 (in Chinese) [戴春娟, 刘希琴, 刘子利刘伯路 2013 物理学报 **62** 152801]

[13] Grande P, O'Riordan M C 1971 *Data for Protection against Ionizing Radiation from External Sources: Supplement to ICRP Publication 15, ICRP-21, International Commission on Radiological Protection* (Pergamon Press)

Shielding design of the multi-purpose reflectometer of China spallation neutron source*

Shen Fei[1)2)3)] Liang Tai-Ran[2)3)4)] Yin Wen[2)] Yu Quan-Zhi[2)] Zuo Tai-Sen[3)]
Yao Ze-En[1)] Zhu Tao[2)] Liang Tian-Jiao[2)†]

1) (*The School of Nuclear and technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*)

2) (*Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

3) (*Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

4) (*Department of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China*)

(Received 14 March 2014; revised manuscript received 11 April 2014)

Abstract

The shielding design employing the Monte Carlo simulation code of MCNPX 2.5.0 for multi-purpose reflectometer of China spallation neutron source (CSNS) is introduced, including the shielding needs, radiation source terms, calculating methods and simulation results, etc. Various radiation source terms such as the moderator leakage source term, and the neutron guide loss source term etc. are taken into account in the simulation, and step-by-step calculation method and variance reduction methods such as source angular biasing, source energy biasing, and geometry splitting, are adopted to improve the computing speed while the precision of the results is guaranteed. In the shielding design of instrument transport beamline, second shutter, and scattering room etc., the final shielding parameters are determined by comparing the shielding need under different operating conditions, to ensure the dose rate below the 2.5 μSv/h limitation in accessible locations outside the shielding.

Keywords: shielding design, MCNPX, CSNS, multi-purpose reflectometer

PACS: 28.20.Gd, 28.41.Qb, 61.05.fj **DOI:** 10.7498/aps.63.152801

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 91026009, 11174358, 11075203).

† Corresponding author. E-mail: tjliang@aphy.iphy.ac.cn