

文章编号: 1007-4627(2013)01-0047-05

冷中子三轴谱仪屏蔽体的蒙特卡罗模拟

宋建明, 尹延朋, 李建, 刘丽鹃, 王虹, 孙光爱

(中国工程物理研究院中子物理学重点实验室和核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 冷中子三轴谱仪(CTAS)的屏蔽体对于保障工作人员安全、降低散射大厅本底及提高信噪比具有重要的意义。采用蒙特卡罗程序MCNP5对谱仪各部分屏蔽体进行了计算,并结合Mcastas程序确定了CTAS入口处的中子源,大大提高了计算效率。经过模拟计算和优化表明:单色器后端使用厚350 mm、密度4.6 g/cm³的重混凝土,衔接屏蔽体使用厚300 mm、密度3.6 g/cm³的重混凝土,生物屏蔽采用厚150 mm、密度3.6 g/cm³的重混凝土可保证屏蔽体外表面的剂量率满足散射大厅的剂量要求。

关键词: 屏蔽; 三轴谱仪; 中子; γ 射线

中图分类号: O571.56 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.30.01.047

1 引言

中子三轴谱仪是最早被发明、应用最广泛的中子散射谱仪之一,它是基于反应堆稳态中子源的非弹性散射谱仪,主要用于研究材料中的各种元激发,在凝聚态物理、材料和高温超导等诸多学科领域中都发挥出了重要的作用^[1-2]。为了保证谱仪能顺利开展实验,以及实验人员的人身安全,需要对谱仪的单色器及谱仪整体进行屏蔽。国外中子散射中心的谱仪均建设有相应的屏蔽体^[3-4],国内也有部分研究人员对热中子照相及散裂源靶站等的屏蔽进行模拟计算研究^[5-6]。基于以上考虑,我们对冷中子三轴谱仪(Cold neutron Triple-Axis Spectrometer,简称CTAS)的屏蔽体进行了初步设计及模拟计算。为确保屏蔽体外辐射剂量不超过国家标准GB18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》中的规定限值且执行尽可能低的原则,要求设计的屏蔽体满足外照射年有效剂量不高于12 mSv,即要求谱仪生物屏蔽外表面的剂量率不高于6 μ Sv/h。

2 屏蔽体结构

CTAS安装于中国工程物理研究院核物理与化学研究所的中子散射大厅,中子导管的特征波长为2 \AA ,

谱仪安装位置距离冷中子源约36 m,其屏蔽体分为主体屏蔽及生物屏蔽两部分。主体屏蔽由单色器后端屏蔽体、前端移动与固定屏蔽体和衔接屏蔽体组成;生物屏蔽体为在谱仪运动区域之外构成的方形围墙。两部份的具体结构如图1和图2所示^[7]。图1中移动屏蔽体内开有中子束流孔道,其截面大小为32 mm(W) \times 204 mm(H),该孔道可通过次级闸门进行打开和关闭。图2中各剂量记录点在模型中的位置坐标见表1。

表1 剂量记录点位置坐标

记录点	坐标/mm
1	(0, 6 100, 0)
2	(0, -900, 0)
3	(2 000, -900, 0)
4	(-2 000, -900, 0)
5	(0, 900, 0)
6	(1 600, 900, 0)
7	(-2 500, 900, 0)
8	(2 500, 900, 0)
9	(4 000, 900, 0)
10	(0, 2 000, 600)
11	(0, 3 000, 600)
12	(0, 5 000, 600)
13	(2 500, 2 000, 600)
14	(-1 600, 2 000, 600)

收稿日期: 2012-07-14 修改日期: 2012-08-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91126001, 11105128); 中国工程物理研究院科学技术发展基金资助项目(2010A0103002)

作者简介: 宋建明(1981-), 男, 四川资中人, 助理研究员, 硕士, 从事中子散射技术及应用研究; E-mail: jianmingsong@163.com

<http://www.npr.ac.cn>

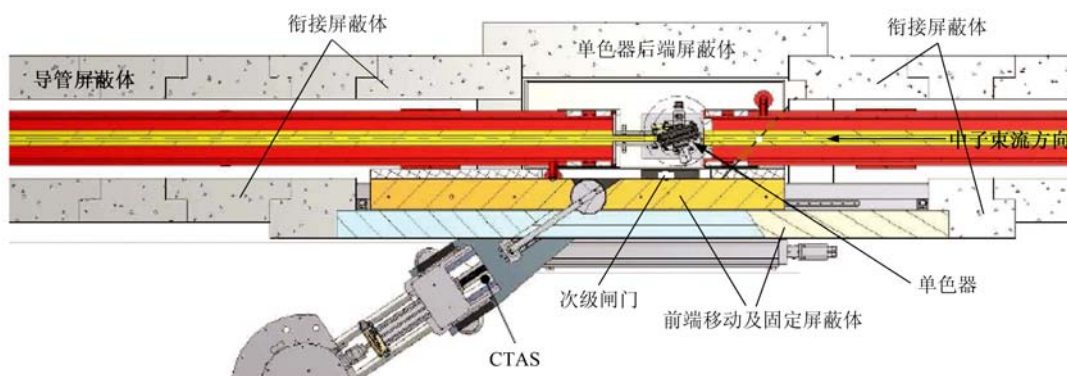


图 1 CTAS主体屏蔽组成及结构示意图

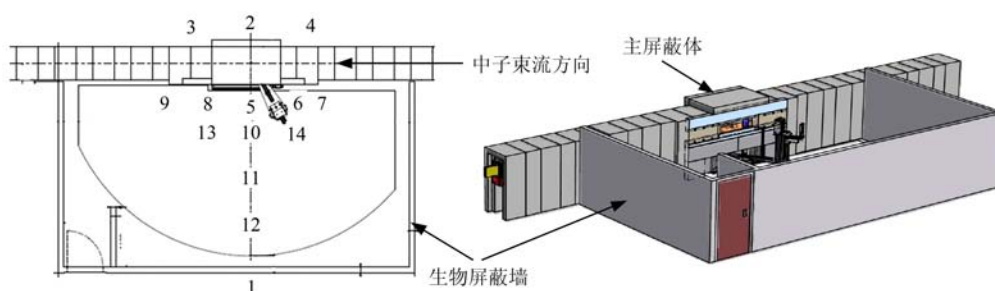


图 2 生物屏蔽墙及剂量记录点位置示意图

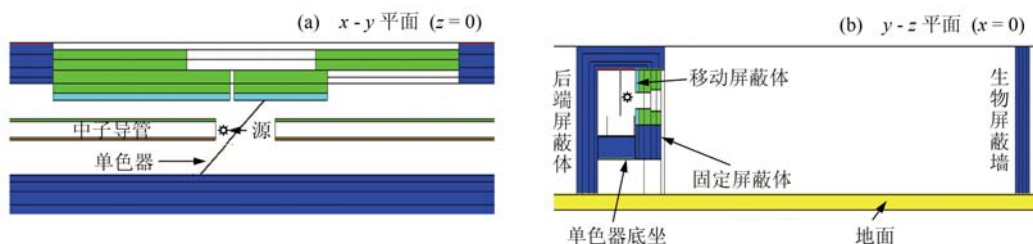


图 3 CTAS屏蔽计算模型图

3 计算模型与方法

屏蔽计算采用蒙特卡罗程序MCNP5，该程序由美国Los Alamos实验室研制，是用于计算复杂三维几何中的粒子运输的大型多功能程序^[8-9]。计算中使用MCNP66c系列的截面库，并利用1977ANSI/ANS转换因子把中子通量转换为辐射剂量率来评估生物效应。在MCNP5程序中对CTAS屏蔽体、中子导管屏蔽体和导管的几何结构进行了真实的描述。单色器位置如图1所示，其中心距离地面高度为1200 mm，以单色器中心为坐标原点，以中子束流方向为x轴正向，水平面内垂直中子束流方向的左侧为y轴正向，垂直地面向上为z轴正向，创建的屏蔽体模型结构如图3所示，剂量点坐标列于表1。

本次模拟计算采用了以下方法和技巧：

(1) 本文所涉及的屏蔽对象是CTAS，谱仪安装在距离冷中子源36 m的中子导管的第一个出口处，而MCNP5程序在模拟中子及 γ 射线穿透物质的过程中只能对其粒子性进行计算，不能对中子在导管中由于波动性引起的全反射现象进行模拟，而且在处理长距离及深穿透问题上效率很低。因此需要先获得导管出口处的中子能谱，才能有效地提高计算效率和准确度，结合专门用于模拟计算中子导管及中子散射谱仪的程序Mcastas，计算获得了传输至导管出口处的中子能谱。

(2) 充分考虑了CTAS的运行特点。实验过程中中子束流可在与导管夹角 $34^\circ\sim 120^\circ$ 范围内扫描，从单色器出射的中子束与生物屏蔽墙的夹角也在此范围内

变动, 对生物屏蔽进行模拟时只计算正对中子束出射方向的剂量(即图 2 中剂量记录点 1 的位置), 其他位置由于中子斜射进入屏蔽墙剂量率更低, 因此节约了计算时间。

(3) 屏蔽采用了重混凝土及钢等材料。为解决屏蔽体内粒子经长距离输运发生多次碰撞造成的深穿透, 模拟计算对屏蔽体进行分层处理, 以减小计算产生的方差和节约计算时间, 分层以不超过中子自由程的 10 倍为准。

(4) 单色器的屏蔽与导管屏蔽形成密封空间, 只计算与中子束同高度的屏蔽体两侧剂量率, 顶部采用相同厚度的屏蔽体能达到同样的效果。

4 源项

众所周知, 辐射源是屏蔽模拟计算和设计的基础, 根据冷中子源的实际能谱, 利用 Mcstas 程序模拟中子在导管中的传输情况^[10], 并结合 MCNP5 得到了 CTAS 导管出口处的中子能谱分布, 如图 4 所示, 其中子注量率为 $3.58 \times 10^8 \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, 束流截面为 $30 \text{ mm (W)} \times 200 \text{ mm (H)}$ 。

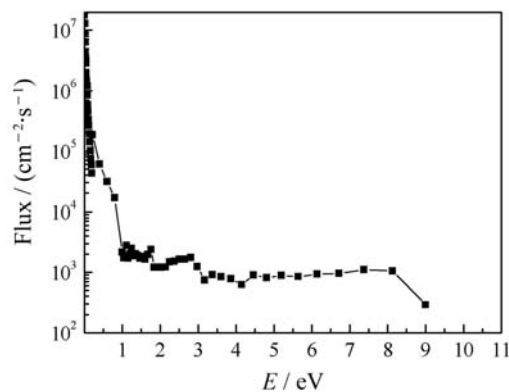


图 4 导管出口处中子能谱

将以上中子源作为面源放置在导管出口处, 根据导管屏蔽体的组成(厚度 300 mm 的重混凝土, 密度为 $3.6 \text{ g}/\text{cm}^3$)及结构计算了屏蔽体外表面的剂量, 并与实际测量值进行了比较。实验测量中分别采用 LB123 型中子剂量当量仪和 BH3103A 型便携式 X- γ 剂量率仪。计算时剂量记录点的位置与实验测量点位置一致, 为图 2 中第 2, 6, 9 三个点, 计算及测量结果列于表 2。从表 2 中可以看出, 第 6 点处计算值高出实测值 $0.57 \mu\text{Sv}/\text{h}$, 分析其原因在于实际测量时中子一直在导管中进行全反射传输, 只有部分不满足全

表 2 导管屏蔽体外表面总剂量计算值与测量值的比较

记录点	计算值/ $(\mu\text{Sv}/\text{h})$	测量值/ $(\mu\text{Sv}/\text{h})$
2	5.63	5.24
6	3.15	2.58
9	3.32	3.15

反射条件的中子才会穿出导管进入屏蔽体; 而计算时为了提高效率, 使用了导管出口处的中子能谱, 且此处取消了一段 500 mm 长的中子导管, 中子在空气中直接飞行进入屏蔽体, 还有单色器及导管等的金属支架, 导致了计算结果普遍比实测值偏大, 但最大不超过 20%。根据辐射防护设计执行合理可行且尽可能低的原则, 我们认为使用该源来进行 CTAS 的屏蔽设计是可行的, 可以解决 MCNP5 在计算深穿透及长距离传输时的低效率及统计误差过大等问题, 大大提高计算效率。

5 模拟计算及优化

5.1 原模型计算结果

CTAS 的屏蔽体初步设计为衔接屏蔽体及单色器后端屏蔽体为 300 mm 厚的普通混凝土加上内部 4 mm 厚的含硼硅胶 ($30\% \text{B}_4\text{C}$), 前方移动屏蔽体为内部为厚 50 mm 的含硼聚乙烯加上厚度为 170 mm 的不锈钢, 次级闸门由 50 mm 的含硼聚乙烯及 30 mm 的铅组成, 生物屏蔽墙为 150 mm 厚的普通混凝土。根据初步设计建立蒙特卡罗模型, 计算了生物屏蔽体及导管屏蔽体外表面的剂量率, 各记录点位置如图 2 及表 1 所示, 计算结果如表 3 所示。可以看出, 生物屏蔽墙及单色

表 3 原屏蔽体各记录点的剂量

记录点	中子剂量 / $(\mu\text{Sv}/\text{h})$	次级 γ 剂量 / $(\mu\text{Sv}/\text{h})$	总剂量 / $(\mu\text{Sv}/\text{h})$
1	8.41×10^0	6.69×10^0	1.51×10^1
2	1.39×10^{-3}	3.30×10^1	3.30×10^1
3	2.04×10^{-4}	1.40×10^1	1.40×10^1
4	6.30×10^{-2}	1.66×10^1	1.67×10^1
5	1.36×10^{-3}	4.89×10^0	4.89×10^0
6	2.82×10^{-3}	6.86×10^{-1}	6.89×10^{-1}
7	5.39×10^{-3}	7.06×10^{-1}	7.11×10^{-1}
8	2.55×10^{-3}	4.37×10^0	4.38×10^0
9	3.14×10^{-3}	2.04×10^{-1}	2.07×10^{-1}

器后端屏蔽体的屏蔽能力不足, 具体分析如下:

第 1 记录点中子剂量与次级 γ 的剂量分别为 8.41 $\mu\text{Sv/h}$ 和 6.69 $\mu\text{Sv/h}$, 表明普通混凝土对中子及次级 γ 射线屏蔽能力均不足。其原因在于生物屏蔽墙正对中子束流的出射方向, 此处的中子注量最高, 根据 CTAS 的运行特点, 可知所有生物屏蔽墙的厚度均不满足要求。

第 2 至 4 点在单色器后端, 各点剂量来源主要是次级 γ 射线产生的, 这是因为单色器位置处取消了一段 500 mm 的中子导管, 中子在空气中自由飞行, 且安装了热解石墨单色器及其它一些金属部件, 中子与此处的各种部件相互作用产生次级 γ 射线, 导致了剂量值升高, 使得单色器后端及与导管连接的屏蔽体都不满足要求。

第 5 至 9 记录点的剂量是在关闭次级闸门的情况下进行计算的, 其最大剂量值出现在次级闸门之后为 4.89 $\mu\text{Sv/h}$ 。根据 CTAS 的运行特点, 其前端有部分屏蔽体是可以移动的, 因此会造成某些区域屏蔽变薄的问题, 如在本文计算的模型中第 8 记录点就正对应屏蔽体最薄弱的一段, 其剂量值为 4.38 $\mu\text{Sv/h}$ 。因此从整体来说单色器前端屏蔽体及次级闸门(图 1 所示)能够满足要求。

5.2 优化设计及讨论

原设计的生物屏蔽墙对中子和次级 γ 射线的屏蔽能力都不足, 因此对其厚度和材料分别进行了优化, 考虑生物屏蔽墙为 300 mm 厚的普通混凝土, 150, 200 和 250 mm 厚的重混凝土(密度为 3.6 g/cm^3) 等 4 种情况, 剂量记录点为图 2 中第 1 点, 总剂量计算结果分别为 6.23, 2.24, 1.34 和 0.81 $\mu\text{Sv/h}$ 。由此可知, 300 mm 厚的普通混凝土组成的生物屏蔽墙仍不能满足设计要求, 而采用 150 mm 厚的重混凝土能够满足设计要求。

对于单色器后端的屏蔽体, 此处剂量率超标主要是由次级 γ 射线产生的, 因此考虑了厚度 350 mm、密度 3.6 g/cm^3 的重混凝土及密度为 4.6 g/cm^3 、350 mm 厚的重混凝土两种情况。计算得到第 2 点的总剂量率值分别为 9.28 和 4.86 $\mu\text{Sv/h}$, 可知使用密度为 4.6 g/cm^3 的重混凝土能满足设计要求。根据表 2 的结果可知, 衔接屏蔽体采用 300 mm 厚、密度为 3.6 g/cm^3 的重混凝土能够满足设计要求。

计算了束流上方距离地面高度为 1 800 mm 位置处的辐射剂量率值, 如图 2 中第 10 至 14 点, 计算结果如表 4 所示。从结果可以看出, 在谱仪运动区域上方 1 800 mm 以上区域的剂量率低于 6 $\mu\text{Sv/h}$, 在此区域内辐射剂量满足限值要求, 因此在谱仪运动区域上方不需要使用屏蔽体。

表 4 高度 1 800 mm 各点的剂量率

记录点	中子剂量率 /($\mu\text{Sv/h}$)	次级 γ 剂量率 /($\mu\text{Sv/h}$)	总剂量率 /($\mu\text{Sv/h}$)
10	4.71	2.98×10^{-1}	5.01
11	3.39	2.71×10^{-1}	3.66
12	2.17	2.30×10^{-1}	2.40
13	2.13	9.89×10^{-1}	3.12
14	1.41	8.90×10^{-1}	2.30

为了从导管中引出中子进行散射实验, 单色器的屏蔽体上开有高度为 204 mm 的中子孔道, 出射中子具有一定的发散度, 在垂直方向会以近似扇面的方式射出, 因此生物屏蔽体必须足够高才能确保其外表面满足限值要求。分别计算了生物屏蔽体高度为 1 700 和 1 900 mm, 其外表面距地面高度为 1 200, 1 500 和 1 800 mm 处的剂量分布情况, 计算结果如表 5 所示。在生物屏蔽高度为 1 700 mm 时, 外表面 1 800 mm 高度位置的剂量为 10.1 $\mu\text{Sv/h}$, 是由中子孔道中直射中子造成的, 而生物屏蔽墙高度为 1 900 mm 时, 外表面各点均满足剂量限值要求。

表 5 不同高度位置的剂量率

屏蔽体高度/mm	测量点/mm	总剂量/($\mu\text{Sv/h}$)
1 700	15 (0, 6 100, 0)	1.26
	16 (0, 6 100, 300)	1.08
	17 (0, 6 100, 600)	10.10
	15 (0, 6 100, 0)	1.28
1 900	16 (0, 6 100, 300)	1.14
	17 (0, 6 100, 600)	1.09

6 结论

采用蒙特卡罗程序 MCNP5 对 CTAS 的屏蔽体进行了模拟计算, 结合 Mcstas 程序确定了屏蔽设计的中子源, 并利用实测剂量率与计算值进行了比较。结果表明, 计算值比实测值高 0.57 $\mu\text{Sv/h}$, 用该中子源作为谱仪的辐射源是可行的, 且可大大提高计算效率。对初步设计的屏蔽体的屏蔽能力进行了评估, 发现单

色器前端的屏蔽体和次级闸门能够满足辐射剂量限值的要求, 而生物屏蔽墙和单色器后端的屏蔽体外表面剂量率最大值达 $33 \mu\text{Sv/h}$, 经过对屏蔽材料和厚度进行重新优化后发现: 单色器后端使用厚 350 mm 、密度 4.6 g/cm^3 的重混凝土, 衔接屏蔽体使用厚 300 mm 、密度 3.6 g/cm^3 的重混凝土, 生物屏蔽采用厚 150 mm 、密度 3.6 g/cm^3 的重混凝土, 高度大于 1900 mm 可保证屏蔽体外表面的剂量率满足低于 $6 \mu\text{Sv/h}$ 的要求, 谱仪运动区域上方高于 1800 mm 的区域也满足散射大厅的辐射限值要求。该工作为进一步开展中子散射谱仪屏蔽设计等相关工作提供了依据。

参考文献 (References):

- [1] SHIRANE G, SHIRO S M, TRANQUADA J M. Neutron scattering with a triple-axis spectrometer [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002: 1-92.
- [2] LI Shiliang, DAI Pengcheng, Physics, 2011, **40**(1): 33(in Chinese). (李世亮, 戴鹏程, 物理, 2011, **40**(1): 33.)
- [3] GALLMEIER F X, FERGUSON P D. Nucl Instru and Meth A, 2006, **562**: 946.
- [4] POSPISIL S, STEKL I, DOLEZAL Z, *et al.* Nucl Instru and Meth A, 1999, **420**: 249.
- [5] HAO Lijie, JIAO Xuesheng, WANG Hongli, *et al.* Atomic Energy Science and Technology, 2010, **44**(Suppl): 48(in Chinese). (郝丽杰, 焦学胜, 王洪立, 等. 原子能科学技术, 2010, **44**(增刊): 48.)
- [6] LI Jiabin, HU Kemin, HU Yating, *et al.* J Shanxi University of Science & Technology, 2010, **28**(1): 133(in Chinese). (李佳昕, 胡克敏, 胡雅婷, 等. 陕西科技大学学报, 2010, **28**(1): 133.)
- [7] TAMÁS G, GÁBOR L, GYÖRGY K. Detailed Engineering Documentation for CNTAS Spectrometer For CJTC, 2010: 10.
- [8] KAHN H. Nucleonics, 1950, **6**: 61.
- [9] THOMAS E B, JOHN T G, AVNEET S, *et al.* MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5 LA-CP-03-0245, Los Alamos National Laboratory, USA, 2003: 23-189.
- [10] SONG Jianming, HUANG Chaoqiang, YANG Jian, *et al.* Nuclear Electronics & Detection Technology, 2008, **28**(6): 1149(in Chinese). (宋建明, 黄朝强, 阳剑, 等. 核电子学与探测技术, 2008, **28**(6): 1149.)

Monte-Carlo Simulation for Shielding of Cold Neutron Triple-axis Spectrometer

SONG Jian-ming¹⁾, YIN Yan-peng, LI Jian, LIU Li-juan, WANG Hong, SUN Guang-ai
(Key Laboratory of Neutron Physics and Institute of Nuclear Physics and Chemistry,
China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: The shielding of Cold neutron Triple-Axis Spectrometer(CTAS) is important for radiation safety of workers, and reduce the background of scattering hall as well as enhancing the ratio of signal-to-noise. In this study, Monte-Carlo simulation was performed to conduct the calculation on the shielding of CTAS. To increase the calculation efficiency, neutron source was obtained by using Mcstas code. The results indicate that, in the case of heavy concrete (density 4.6 g/cm^3) with thickness of 350 mm for the shielding behind the monochromater, and heavy concrete (density 3.6 g/cm^3) with thickness of 300 mm for the other monochromater shielding, as well as the heavy concrete (density 3.6 g/cm^3) with thickness of 150 mm for biological shielding, the dose rate outside shielding may meet the requirement of national standard of China.

Key words: shielding; triple-axis spectrometer; neutron; γ ray

Received date: 14 Jul. 2012; Revised date: 1 Aug. 2012

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(91126001, 11105128), Science and Technology Development Foundation of China Academy of Engineering Physics(2010A0103002)

1) E-mail: jianmingsong@163.com

<http://www.npr.ac.cn>