

中子反射谱仪前端导管优化

黄朝强 李新喜 宋建明 陈波

(中国工程物理研究院 核物理与化学研究所 绵阳 621900)

摘要 基于两种中子反射谱仪设计(A: 前端为 8.0 m 垂直聚焦导管, 入口 200 mm, 出口 40 mm; B: 前端为 1.6+3.4 m 水平偏转垂直聚焦导管, 入口 100 mm, 出口 50 mm), 对其前端偏转/聚焦导管进行了中子束模拟, 结果表明: 1) 在特征波长为 0.4 nm 的冷中子导管末端, 没有必要再次偏转束流以减低本底; 2) 与建议方案相比, 概念设计中的注量下降了 52.8%, 而水平方向发散度增大了 24.1%, 垂直方向发散度减小 60.7%; 3) 聚焦导管长度应不低于 6.0 m, 导管聚焦超镜 m 值在 2.0–2.5 最佳, 两侧超镜 m 值对束流几乎无影响, 使用中子束高度应不低于 150 mm 可达到较好的注量率和发散度。

关键词 导管优化, 中子聚焦, 中子束表征, 蒙特卡洛模拟, 冷中子导管

中图分类号 TL817+.3

中子反射谱仪上, 通常都设计一段导管^[1], 即前端导管, 位于中子反射谱仪最前端束流闸门之后。其作用主要有二: 一是衔接中子源输出束流尺寸与反射谱仪所用束流尺寸, 二是偏转束流以避免快中子及直穿中子。前端中子导管对谱仪性能至关重要, 对样品处中子注量率及束流发散度有重要影响。国内外用 McStas^[2,3]、VITESS^[4,5]和 NGT2002^[6]等软件进行多种散射谱仪和部件设计的模拟计算^[6-10]。本工作根据冷中子源导管 C3 出口束流(30 mm × 200 mm, H × W)和能谱^[11], 用 McStas1.10 中子追迹模拟程序对前端导管设计进行优化, 以给出定量结论。

1 建议参数下前端导管出口中子束参数^[1]

导管由一对平行的竖直超镜和一对出口处间隔小的垂直汇聚型超镜组成, 具有聚焦功能, 可提高出口处中子束流强度。所有超镜均镀有非磁性层状结构材料 NiMo/Ti, 超镜参数分别为 $m=2$ (竖直两侧)和 $m=2.5$ (上下镜面)。导管入口截面为 4 mm (W) × 200 mm (H), 出口截面为 4 mm (W) × 40 mm (H), 导管长 8 m。模式 A。

建议参数条件下, 假定 $m=2.0$ 和 2.5 时截断处反射率分别为 0.9 和 0.8, 根据冷源布局模拟了偏转导管出口处中子能谱(图 1)和中子束发散情况(图 2)。模拟表明, 该布局情况下导管出口处的中子注量率为 $2.18 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 中子束垂直方向发散为 2.39° (FWHM), 水平方向为 0.29° (FWHM)。

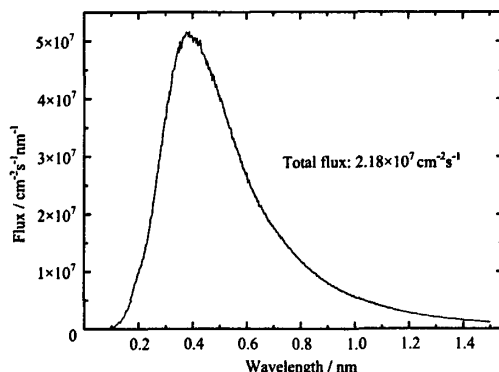


图1 长 8 m、入口高度 200 mm、上下超镜 $m=2.5$ 、两侧超镜 $m=2.0$ 的下垂直聚焦导管出口中子能谱。积分注量率为 $2.18 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig.1 Energy spectrum at exit of a pre-guide (8-m long; entrance height, 200 mm; $m=2.5$ for top and bottom mirror and $m=2.0$ for two-side mirror). Integral flux, $2.18 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

2 概念设计中偏转导管出口中子束参数

偏转导管直接安装在束流闸门后, 长度为 5 m。偏转导管由两部分组成, 第一部分为 1.6 m, 相对于 C3 导管方向偏转 0.0025 rad ; 第二部分长 3.4 m, 相对于第一部分偏转 0.0025 rad 。第一部分仅有一片 $m=2$ 的垂直壁超镜, 与之相对的侧垂直壁为 $m=0.5$ 的涂层。第二部分的两侧垂直壁均为 $m=0.5$ 的涂层材料。两段偏转导管水平壁均为 $m=1$ 的超镜。偏转导管入口截面为 4 mm (W) × 100 mm (H), 出口为 4 mm (W) × 50 mm (H)。模式 B。

建议参数条件下,假定 $m=1.0$ 和 2.0 时截断处反射率分别为 0.95 和 0.90 , 根据冷源布局模拟了偏转导管出口处中子能谱(图 3)和中子束发散情况(图 4)。模拟表明,布局情况下导管出口处的中子注量率为 $1.03 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 垂直方向中子束发散

FWHM 为 0.94° , 水平方向为 0.36° , 且中子发散角不连续。需要注意的是,由于模拟中对 $m < 1$ 的超镜无法描述,采用 $m=1.0$ 的超镜代替之,考虑到设计中的 m 值为 0.5 , 实际中子注量率会低于该模拟值,而水平方向的发散度应略低于 0.36° 。

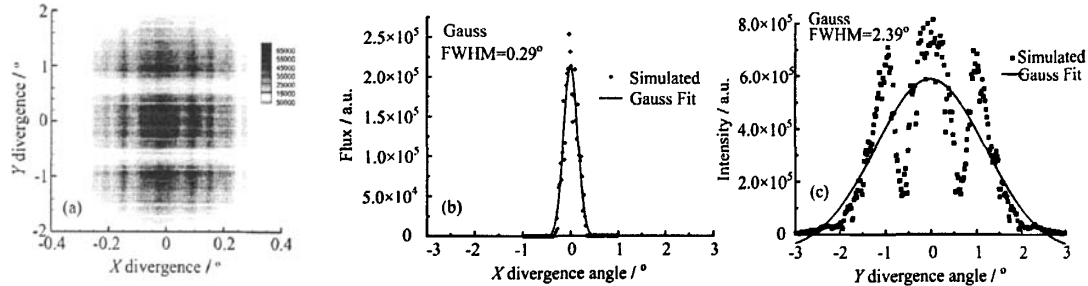


图 2 偏转聚焦导管出口处中子束(a)发散分布情况, (b)水平和(c)垂直方向的发散情况。
单高斯峰拟合后 FWHM 分别为 0.29° 和 2.39°
Fig.2 Beam divergence (a), and horizontal (b) and vertical (c) divergence at exit of the pre-guide.
FWHM of the Gaussian peak is 0.29° for horizontal, and 2.39° for vertical.

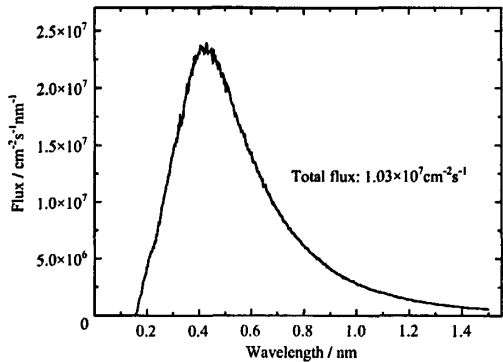


图 3 长度为 $1.6 \text{ m} + 3.4 \text{ m}$ 中子偏转导管(上下超镜 m 均为 1.0 , 第一段内侧超镜 $m=2$, 其余导管超镜均为 1.0 , 设计为 0.5)出口中子能谱。积分注量率为 $1.03 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
Fig.3 Energy spectrum at exit of the pre-guide ($1.6 \text{ m} + 3.4 \text{ m}$ long, $m=1.0$ for top and bottom mirror; $m=2.0$ for the first part introvert mirror and $m=1.0$ for other mirrors, but $m=0.5$ in design). Integral flux, $1.03 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

3 建议参数和概念设计中偏转导管出口中子束参数

从建议方案和概念设计的模拟结果(表 1)可以看出,在出口处中子注量率方面,与建议方案相比,概念设计中的注量下降了 52.8% , 而水平方向发散度增大了 24.1% , 垂直方向发散度减小 60.7% 。对于水平散射几何(样品反射面垂直)的中子反射谱仪,重点是减小水平方向的束流发散和增大样品处中子强度。因此,概念设计与建议方案相比,后者更好。下面不再考虑概念设计方案,而仅考虑对建议方案的优化。

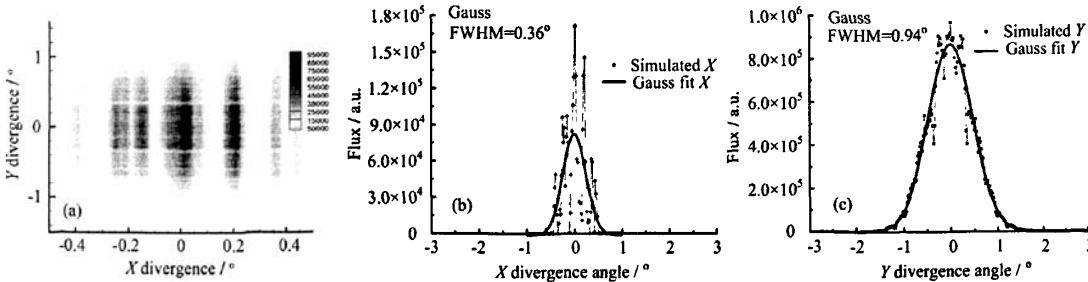


图 4 偏转聚焦导管出口处中子束(a)发散分布情况, (b)水平和(c)垂直方向的发散情况。
单高斯峰拟合后 FWHM 分别为 0.36° 和 0.94°
Fig.4 Beam divergence (a), and horizontal (b) and vertical (c) divergence at exit of pre-guide.
FWHM of the Gaussian peak is 0.36° for horizontal, and 0.94° for vertical.

表 1 建议方案和概念设计下偏转导管出口中子束参数比较
Table 1 Neutron fluence and beam divergence at exit of the pre-guides proposed and in conceptual design.

导管 Pre-guides	中子注量率 Neutron fluence / $\times 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	FWHM	
		水平 Horizontal	垂直 Vertical
建议方案 Proposed (A)	2.18	0.29°	2.39°
概念设计 Conceptual design (B)	1.03	0.36°	0.94°
与 A 方案相比 Comparing B with A	-52.8%	24.1%	-60.7%

4 建议方案下偏转导管优化设计

4.1 长度优化

根据空间等条件因素，总是希望导管长度能够尽可能短。考虑其它参数不变、不同长度下出口中子注量率的变化关系。图 5 展示了导管出口处中子能谱及其注量率变化情况。

模拟表明，仅改变垂直聚焦导管长度，导管出

口处中子注量率从 2 m 时的 $1.17 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 递增到 8 m 时的 $2.18 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，尔后几乎不随长度变化。导管出口处中子束水平方向约 0.25°，不随长度变化；垂直方向中子束发散在 2 m 时，边上两个离散峰已超出 3° 探测区域，整个发散随长度增大而减小，发散分布呈离散状，其离散间隔随着长度增加而减小。仅从注量率考虑，导管的长度不应低于 6 m。

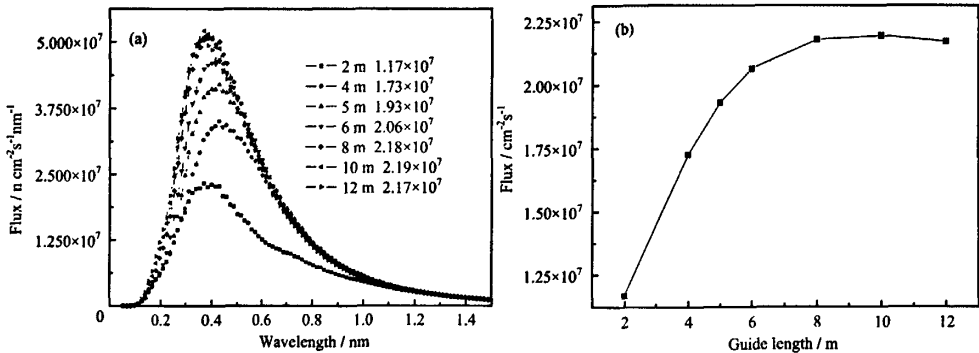


图 5 中子能谱(a)和注量率(b)随导管长度的变化关系
Fig.5 Energy spectrum (a) and flux (b) as a function of the guide length.

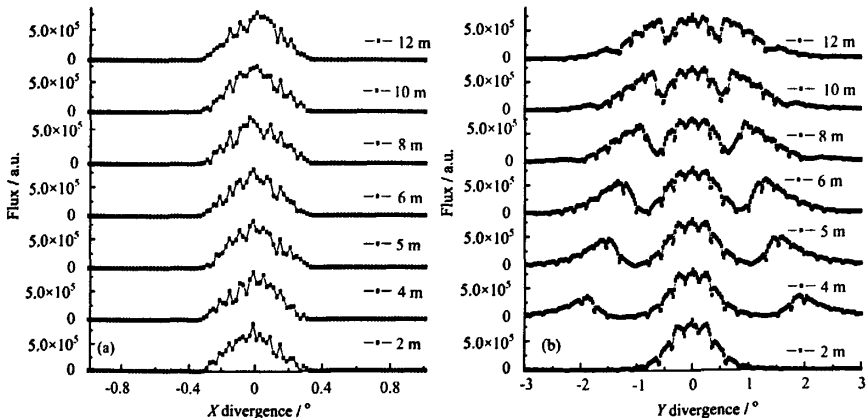


图 6 入口高度 200 mm，不同长度的偏转聚焦导管出口处中子束(a)水平方向和(b)垂直方向的发散情况
Fig.6 Horizontal (a) and vertical (b) beam divergence at exit of pre-guides of different lengths in entrance height of 200 mm.

4.2 入口高度优化

考虑不同入口高度下聚焦导管出口的中子束情况。保持其它参数不变,计算了入口高度分别为 50、100、150 和 200 mm 时导管出口的中子束情况,导管出口处中子能谱见图 7,中子束发散情况见图 8。

由图 7,全部使用 C_3 出口与几乎不聚焦时(使用 1/4 束流高度)相比,中子注量率提高了 106.5%,使用 3/4 束流高度时提高了 97%,即使使用一半也将提高 67.5%。从展示束流发散的图 8 可以看出,中

子束水平发散不变。在垂直方向的发散随使用入口高度呈线性增大(图 7b 中 Gauss FWHM 系列),束流高度全部使用与仅使用 1/4 相比,发散增大了 2.05 倍。可见,减小垂直聚焦导管入口高度,有助于降低垂直方向发散度,但同时也降低了中子注量率。注量率与发散度始终是矛盾的。

从实用角度考虑,在建议方案基础上,导管入口的高度在 150 mm 可获得较好的中子注量率和束流发散度。

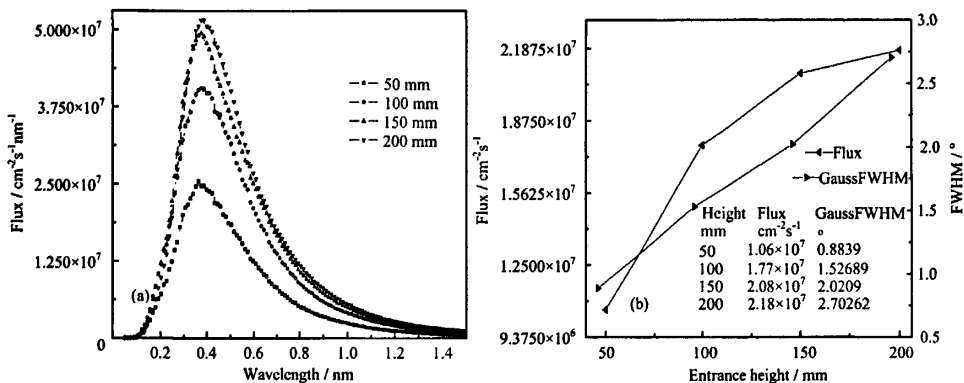


图 7 长 8 m, 入口高度为 50、100、150 和 200 mm 的导管出口中子能谱(a), 及其注量率和中子垂直发散随入口高度的变化关系(b)

Fig.7 Energy spectrum (a), and flux and vertical divergence (b), at exit of 8-m long pre-guides of 50, 100, 150 and 200 mm in entrance heights.

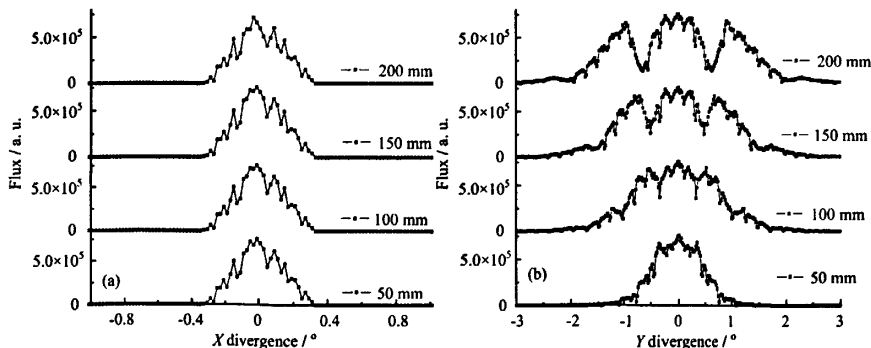


图 8 长 8 m, 入口高度为 50、100、150 和 200 mm 的聚焦导管出口处中子束的水平(a)和垂直(b)发散分布

Fig.8 Horizontal (a) and vertical (b) beam divergence at exit of 8-m long pre-guides of 50, 100, 150 and 200 mm in entrance height.

4.3 超镜涂层优化

涂层问题主要是超镜的 m 因子问题。根据推荐方案中的参数,分别计算了不同 m 值侧面和上下镜面导管出口处的中子注量率(图 9)和发散度情况(图 10)。

由图 9, 竖直壁 m 值(m_v)对导管出口处的中子束影响很小,上下壁镜面 m 值(m_{th})对注量率起主导

作用。中子注量率在 $m_{th}=2.5$ 接近最大,继续增大 m_{th} 值收效甚微。由图 10 可见,水平方向发散不随 m 值变化而变化,而垂直方向发散变化主要随上下镜面 m 值变化而增大。从图 9b 可清楚地看出,能对导管出口处中子注量率有增益的是上下超镜的 m_{th} 值。

计算结果表明,在建议方案中上下镜面的最佳 m 值为 $m_{th}=2.0-2.5$ 。

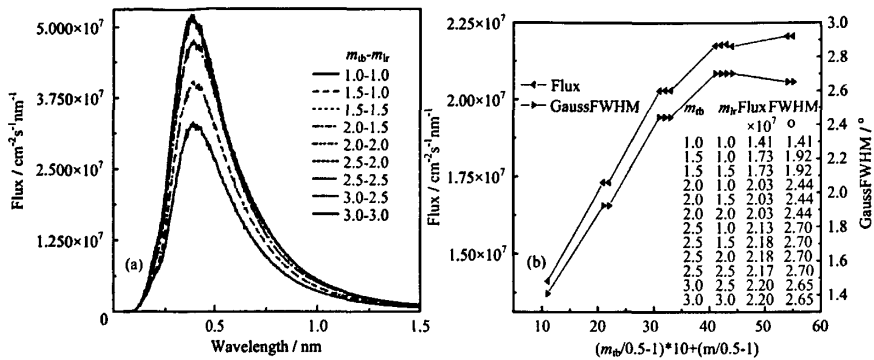


图 9 不同超镜因子 m 下的导管出口中子能谱(a), 以及垂直发散高斯 FWHM 和注量率与 m 值的关系(b).
 m_b 和 m_{lr} 表示上下和左右超镜 m 值
Fig.9 Energy spectrum (a) of pre-guides with different m factor, and their vertical divergence and flux (b).
 m_b stands for top and bottom, and m_{lr} stands for left and right (two sides) super mirrors.

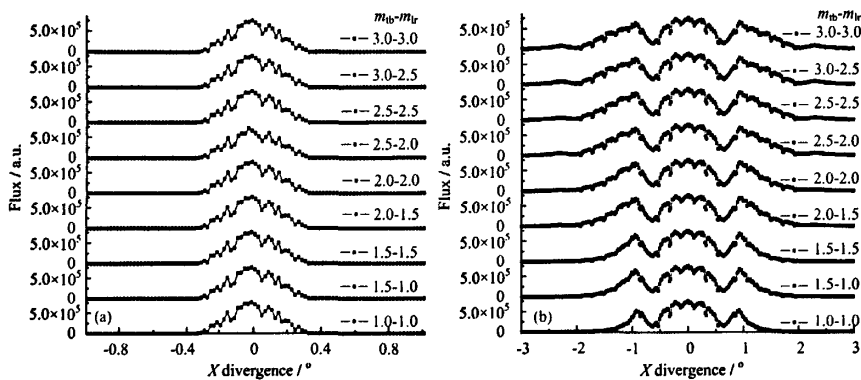


图 10 不同上下超镜因子 m 值下聚焦导管出口处中子束(a)水平和(b)垂直方向发散分布
Fig.10 Horizontal (a) and vertical (b) beam divergence at exit of pre-guides of different m .

5 结语

基于两种中子反射谱仪设计方案, 对其前端偏转/聚焦导管进行了中子束模拟, 结果表明:

1) 建议方案下, 导管末端中子注量率为 $2.18 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 垂直方向发散 FWHM 为 2.39° , 水平方向为 0.29° ;

2) 与建议方案相比, 概念设计中的注量率下降了 52.8%, 而水平方向发散度增大了 24.1%, 垂直方向发散度减小 60.7%;

3) 在特征波长为 0.4 nm 的冷中子导管末端, 由于前端已有偏转导管, 没有必要再次偏转束流以减低本底。

对建议模式进行优化表明: 聚焦导管长度应不低于 6.0 m, 导管聚焦超镜 m 值在 2.0-2.5 最佳, 两侧超镜 m 值对束流几乎无影响, 所用出口束流高度应不低于 150 mm。

参考文献

- 1 Syromyatnikov V G, Pleshanov N K, Pusenkov V M, *et al.* Petersburg Nuclear Physics Institute, Russian Academy of Science, 2005, 1-47
- 2 Lefmann K, Nielsen K. Neutron News, 1999, 10: 20-23
- 3 Willendrup P, Farhi E, Lefmann K, *et al.* User and Programmers Guide to the Neutron Ray-Tracing Package McStas, Version 1.9, Ris ϕ -R-1538(EN), 2006
- 4 Zsigmond G, Lieutenant K, Manoshin S, *et al.* Nucl Instr Meth A, 2004, 529: 218-222
- 5 Zsigmond G, Lieutenant K, Mezei F. Neutron News, 2002, 13: 11-14
- 6 王洪立. 中子导管的设计和优化. 博士学位论文. 北京: 中国原子能科学研究院, 2004
WANG Hongli, (PHD Dissertation) Design and optimization of neutron guide. Beijing: China Institute of Atomic Energy, 2004

- 7 郭立平. 中国先进研究堆中子散射谱仪的模拟和优化研究. 博士学位论文. 北京: 中国原子能科学研究院, 2003
GUO Liping. (PHD Dissertation) Simulation and Optimization on Neutron Scattering Instruments at CARR. Beijing: China Institute of Atomic Energy, 2003
- 8 郭立平, 杨同华, 王洪立, 等. 原子能科学技术, 2003, 37: 361-363
GUO Liping, YANG Tonghua, WANG Hongli, *et al.* At Energy Sci Technol, 2003, 37: 361-363
- 9 王洪立, 张莉, 郭立平, 等. 原子能科学技术, 2004, 38: 93-96
WANG Hongli, ZHANG Li, GUO Liping, *et al.* At Energy Sci Technol, 2004, 38: 93-96
- 10 郭立平, 李际周. 核技术, 2005, 28(4): 232-236
GUO Liping, LI Jizhou. Nucl Tech, 2005, 28(4): 232-236
- 11 黄朝强, 宋建明, 李新喜, 等. 核技术, 2008, 31(12): 905-909
HUANG Chaoqiang, SONG Jianming, LI Xinxi, *et al.* Nucl Tech, 2008, 31(12): 905-909

Optimization of pre-guide of neutron reflectometer

HUANG Chaoqiang LI Xinxi SONG Jianming CHEN Bo

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract In this work, Monte Carlo simulations were done for optimization of pre-guide of neutron reflectometer (NR) in two proposals: A, pre-guide of 8.0 m in length, vertical focusing guide of 200-mm entrance and 40-mm exit height; B, pre-guide of (1.6+3.4) m long, vertical focusing and horizontal deflecting guide of 100-mm entrance and 50-mm exit height. The following results were found: 1) it is not necessary to deflect neutron beam for NR at the exit of cold neutron guide, 2) compared proposal A with B, the flux at pre-guide exit decreases 52.8% and divergence increases 24.1% in horizontal direction and decreases 60.7% in vertical plane, and 3) a optimized pre-guide should not be shorter than 6.0 m, focusing super-mirror factor m in the range between 2.0 and 2.5, and its entrance height no less than 150 mm.

Key words Guide optimization, Neutron focusing, Neutron beam characteristic, Monte Carlo simulation, Cold neutron guide

CLC TL817⁺.3