

## 弯曲中子导管传输效率研究

王洪立, 张莉, 郭立平, 杨同华, 赵志祥

(中国原子能科学研究院 核物理研究所, 北京 102413)

**摘要:**应用蒙特卡罗模拟程序 NGT2002, 从特征波长、镀层反射率、镀层材料、几何调整误差、导管间隙、导管制造几何误差等几个方面研究了弯曲中子导管的传输效率。计算出分别由天然 Ni、超镜组成的弯曲中子导管的传输效率曲线, 讨论了弯导管特征波长的选取方法, 确定了镀层反射率取值、导管水平几何调整误差限度、导管间隙优化值、导管制造宽度几何误差的限度。

**关键词:**蒙特卡罗模拟; 弯曲中子导管; 传输效率

中图分类号: TL817.3; O242.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2004)S0-0093-04

### Study on the Transmission Efficiency of Curved Neutron Guide

WANG Hong-li, ZHANG Li, GUO Li-ping, YANG Tong-hua, ZHAO Zhi-xiang

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-30, Beijing 102413, China)

**Abstract:** Monte-Carlo simulation program NGT2002 is used to study the transmission efficiency of curved neutron guide from character wavelength, film reflectivity, film material, geometry adjustment error, gap between guides and guide fabricate error, we get the transmission efficiency curves of the Ni, supper mirror curved neutron guides, also we have a discuss of how to choose the curved neutron guide's character wavelength. By the simulation results, we determine the proper film reflectivity value, guide horizontal geometry adjustment error range, optimized gap value between guide elements and guide width fabricate geometry error range.

**Key words:** Monte-Carlo simulation; curved neutron guide; transmission efficiency

中子导管系统中子散射工程中扮演着重要角色, 据统计, 目前国际上几乎有 2/3 的中子散射谱仪装置安装在导管上, 而弯曲中子导管参数的选取在中子导管系统的设计中非常重要, 直接影响整个中子导管系统的性能。对中子导管的设计, 早期使用的是解析方法。随着导管系统的复杂化和安装在导管上的中子谱仪对中子束需求的个性化, 传统的解析方法越来

越难以胜任, 而蒙特卡罗模拟技术由于能模拟各种复杂的导管系统, 加之计算机速度的提高, 因而在导管设计中得到广泛应用, 近年来发展尤为迅速, 现已成为导管设计中必不可少的研究方法。为了对中国先进研究堆上的中子导管系统进行设计, 自行开发了对中子导管系统进行模拟的蒙特卡罗模拟软件 NGT2002, 对弯曲中子导管的传输效率进行研究。

收稿日期: 2004-04-15; 修回日期: 2004-05-14

作者简介: 王洪立(1974-), 男, 吉林松原人, 博士研究生, 中子散射专业

### 1 软件和模型

模拟软件 NGT2002 由中国原子能科学研究院核物理研究所中子导管组自行开发,它采用蒙特卡罗方法对中子导管系统的传输效率和中子分布进行模拟计算。冷源及导管整个系统组成示于图 1。冷中子源尺寸为  $\phi 20\text{ cm} \times 20\text{ cm}$ ,工作温度为 20 K,到堆内导管入口的距离为 2 m,堆内和闸门内的导管总长度为 3 374 mm。中子导管单元为 500 mm 长、30 mm 宽、150 mm 高。弯导管的长度为直视长度<sup>[1]</sup>的 1.2 倍。由于本工作研究弯导管的传输效率,因此模拟的系统中不包含弯导管后的直导管部分。



图 1 冷源和冷中子导管系统的示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of the cold source and the neutron guide system  
1 ——冷源;2 ——堆内导管;  
3 ——闸门内导管;4 ——弯导管;5 ——直导管

### 2 模拟结果

#### 2.1 天然 Ni 弯导管的传输效率曲线

对由天然 Ni 组成的弯导管进行模拟计算。计算参数如下:导管壁镀层材料为天然 Ni;导管单元长 500 mm,宽 30 mm,高 150 mm;入射的中子波长为 0.2、0.5、0.8、1.0 nm,弯导管的特征波长从入射中子波长的 0.2 到 2.0 倍变化,弯导管的长度取为相应直视长度的 1.2 倍。弯导管在不同镀层反射率下的传输效率比值及与 HMI 计算结果<sup>[2]</sup>的比较示于图 2。从图 2 中可以看出,对波长比弯导管特征波长长的入射中子,导管壁镀层反射率的变化对其传输效率影响较大。

#### 2.2 超镜弯导管的传输效率曲线

目前,国际上无论新建或升级中子导管系统,均广泛采用超镜作为中子导管的内壁涂层材料。对于  $m = 2$  的超镜,目前国际上可生产的有标称反射率为 88% 和 91% 两种。图 3 中所示为使用 NGT2002 模拟两种导管壁涂层材

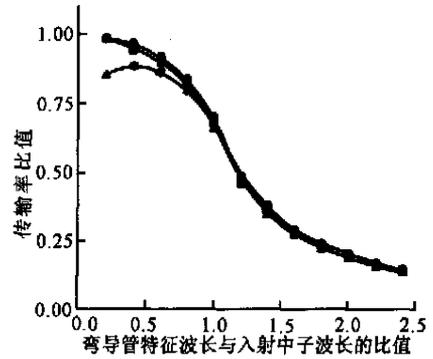


图 2 天然 Ni 组成的弯导管在不同镀层反射率下传输效率比值曲线

Fig. 2 Transmission ratio for curved neutron guide tube formed with natural Ni at different film reflectivity  
● ——反射率为 100% 时,NGT2002 计算结果;  
■ ——反射率为 100% 时,HMI 计算结果;  
▲ ——反射率为 99% 时,NGT2002 计算结果;  
▼ ——反射率为 99% 时,HMI 计算结果

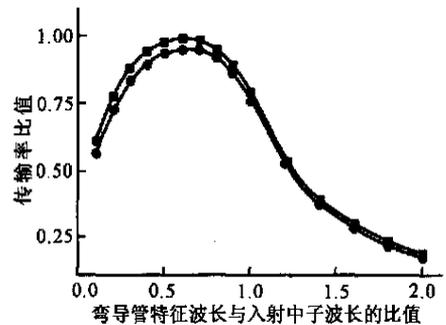


图 3 超镜( $m=2$ )组成的弯导管在不同镀层反射率下的传输效率比值曲线

Fig. 3 Transmission ratio for curved neutron guide tube formed with super mirror in different film reflectivity  
■ ——反射率为 91% 时的计算结果;  
● ——反射率为 88% 时的计算结果

料所得结果。导管壁镀层材料为 Sm ( $m = 2$ ),标称反射率为 88% 和 91%,其余模拟参数与图 2 的相同。当标称反射率一定时,入射中子波长为 0.2 nm 时所得结果最为明显,因此,图 3 中仅示出入射中子波长为 0.2 nm 时所得结果。从图 3 可以看出,当入射中子波长大于弯导管特征波长时,标称反射率为 91% 的超镜弯导管传输效率明显好于标称反射率为 88% 的超镜弯导管,传输效率最大差值大于 5%。

使用天然 Ni 或 <sup>58</sup>Ni 弯导管时,弯导管系统

的特征波长通常采用导管后安装的谱仪所使用中子的最小波长的 0.85。从超镜弯导管的传输效率曲线可以看出,对波长大于导管特征波长的中子,随着中子波长的增加,传输效率先升后降。因此,必须综合考虑弯导管对于长波长中子和短波长中子的传输性能。通常情况下,在中子散射谱仪使用的波长范围内的中子,应保证其在样品处有较高注量,即对这些中子,导管应有较高的传输效率。计算表明:应采用谱仪要使用的最小波长作为弯导管的特征波长,

这样可以保证此谱仪所使用的波长范围内的大部分中子的相对传输效率保持在 75% 以上。

### 2.3 考虑调整尺寸误差时的弯导管传输率

以上的计算均为理想状态下,即不考虑调整误差时的结果。而实际状态下,调整误差不可避免。调整误差分为角度调整误差和几何尺寸调整误差,在此,仅讨论几何尺寸调整误差的影响,由于垂直方向的调整相对来说比较简单,误差较小,因此,只考虑导管在水平面上的左右方向几何尺寸调整误差。

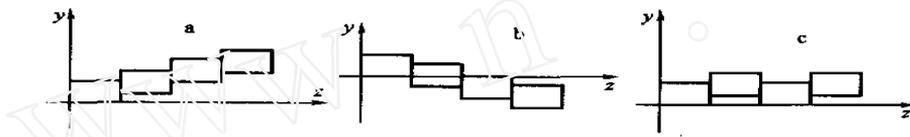


图 4 3 种调整尺寸误差示意图

Fig. 4 Schematic diagram of three kinds of adjustment error

a——调整尺寸误差全部为正;b——调整尺寸误差全部为负;c——相邻导管调整尺寸误差符号相反

模拟计算的参数除标称反射率为 91% 外,其余均与图 3 的相同。导管几何尺寸调整误差从 0.01 到 0.03 mm 变化。使用 NGT2002 对图 4 所示 3 种情况进行了模拟计算。实际操作时,后一节导管的调节以前一节导管坐标为基准。当入射的中子波长为 0.2 nm 时,弯导管的特征波长从 0.04 到 0.4 nm 变化,误差影响结果比较明显,因此,采用波长为 0.2 nm 的入射中子,在以上的 3 种情况下进行模拟,由于所得结果差别很小,因此在图 5 中仅给出了相邻导管调整尺寸误差符号相反、不同的几何安装误差值时,对超镜弯导管进行模拟计算的结果。由图 5 可以看出,几何安装误差为 0.02 mm 时,导管系统的传输效率和几何安装误差为 0.01 mm 时相比下降不明显;几何安装误差对于波长大于导管系统特征波长的中子影响较大,对波长小于导管系统特征波长的中子影响相对较小。

### 2.4 导管单元间隙对于导管传输率的影响

导管实际安装时,为了防止热胀冷缩效应对导管系统造成损害,通常要在导管单元之间留出一定的空隙。若空隙太大,会影响导管的性能;若空隙太小,则增加安装调整的难度。因

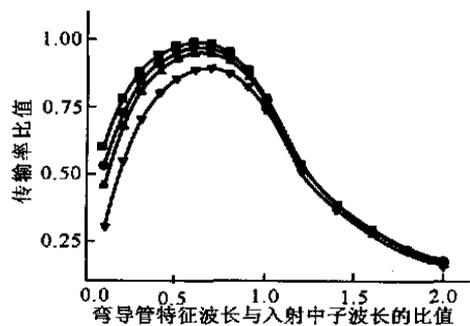


图 5 超镜 ( $m=2$ ) 组成的弯导管在不同几何安装误差下传输率比值曲线

Fig. 5 Transmission ratio for curved neutron guide tube formed with super mirror in different geometry adjustment errors

——无几何安装误差;  
——几何安装误差为 0.01 mm;  
——几何安装误差为 0.02 mm;  
▼——几何安装误差为 0.05 mm

此,使用 NGT2002 对不同导管间隙对导管的传输效率的影响进行了模拟研究。在中国先进研究堆旁准备建造的两条导管中,CNG1 的特征波长为 0.2 nm,CNG2 的特征波长为 0.4 nm。由于导管 CNG1 的特征波长小,弯导管总长度为 21 m,相应的间隙数目多,为 41

个,影响比较明显,因此,对导管 CNGI 在不同导管间隙时的传输效率进行了模拟。

模拟计算的参数为:特征波长为 0.2 nm,导管壁镀层材料为 Sm ( $m = 2$ ),标称反射率为 91%;弯导管总长为 21 m;导管间隙由 0.2 到 1.8 mm 变化。模拟结果示于图 6。从图 6 中可以看出,当导管单元间隙为 1 mm 时,相对于无间隙时的情况,导管传输率下降值为 1% ~ 4%,其影响的规律是对长波长影响大,对短波长影响小。综合考虑对导管传输效率的影响和实际安装的方便,对有真空套的导管系统,导管单元间隙可以选为 1 mm。

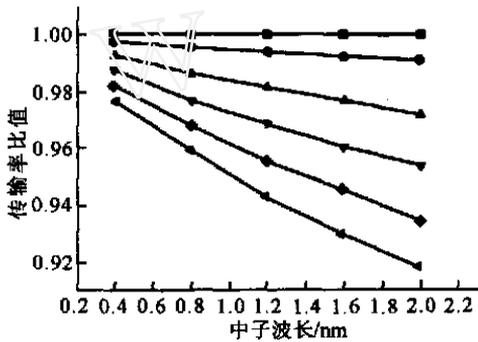


图 6 不同导管单元间隙时传输率比值曲线

Fig. 6 Transmission ratio for curved neutron guide tube at different gaps between guide elements

- 导管单元无间隙;
- 导管单元间隙为 0.2 mm;
- ... 导管单元间隙为 0.6 mm;
- ▼ 导管单元间隙为 1.0 mm;
- - - 导管单元间隙为 1.4 mm;
- ▲ 导管单元间隙为 1.8 mm

### 2.5 导管制造几何尺寸误差对于导管传输率的影响

在制造中,导管总存在着制造几何尺寸误差。导管的制造几何尺寸误差不同,其组成的导管系统的性能也会发生变化。选择合适的制造几何误差,就可以在性能损失不大的前提下,节省相当可观的费用。在此,仅考虑导管单元宽度的制造几何误差。由于导管 CNGI 的

弯导管长度长,以它为对象对导管宽度制造几何尺寸误差对于导管传输率的影响进行了模拟研究。模拟计算的参数为:特征波长为 0.2 nm,导管壁镀层材料为 Sm ( $m = 2$ ),标称反射率为 91%;弯导管总长为 21 m;制造几何宽度尺寸误差从 0.01 到 0.05 mm 变化,相邻导管的制造几何宽度尺寸误差符号相反。模拟结果示于图 7。从图 7 可看出,当导管制造宽度几何误差为 0.02 mm 时,对于各个波长,导管系统的传输效率大于无制造几何宽度尺寸误差时传输效率的 95%,因此,导管制造宽度几何误差小于等于 0.02 mm 是可以接受的。

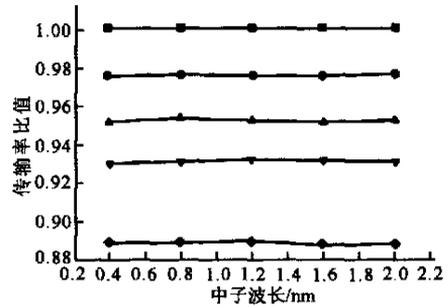


图 7 不同导管制造几何误差时传输率比值曲线

Fig. 7 Transmission ratio of curved neutron guide in different fabricate errors

制造误差: — 0 mm; --- 0.01 mm;  
 ... 0.02 mm; ▼ 0.03 mm; ▲ 0.05 mm

### 3 结论

通过对弯曲中子导管传输效率的模拟研究得知:弯曲中子导管的特征波长应采用其后谱仪要使用的最小波长;超镜镀层标称反射率应大于等于 91%;水平几何调整误差应小于 0.02 mm;导管单元间隔选为 1 mm 比较合适;导管的制造宽度几何误差应小于等于 0.02 mm。

### 参考文献:

[1] Jacrot B. Utilization of Neutron Guide Tubes for Neutron Inelastic Scattering, Instrumentation for Neutron Inelastic Scattering Research [R]. Vienna: IAEA, 1970.

[2] Alefeld B, Christ J, Kukla D, et al. Neutronenleiter [R]. Deutschland: [s. n.], 1965.