



·粒子束及加速器技术·

中国散裂中子源工程材料中子衍射谱仪 尖嘴型中子准直光阑的研制*

王怀宝^{1,2,3}, 周良^{1,3}, 胡春明^{1,3}, 李小虎^{1,3}

(1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 散裂中子源科学中心, 广东 东莞 523803)

摘要: 中国散裂中子源 (CSNS) 工程材料中子衍射谱仪 (EMD) 的样品非常大, 且形状各异, 有些样品甚至是曲面的, 中子准直光阑 (狭缝) 要靠近这些异形构件, 需要设计成尖嘴型。狭缝的主要作用是给样品测试提供所需要的束流尺寸, 并保证束流尺寸精度很高, 束流没有太多杂散中子。工程材料中子衍射谱仪的尖嘴型狭缝为连续型, 开口可以根据实验需求进行变化。狭缝采用双导轨结构, 定位精度高, 重复定位精度优于 10 μm , 绝对定位精度优于 30 μm 。狭缝刀片采用富集碳化硼, 较大程度减小了刀片的厚度, 可以有效降低狭缝悬臂结构的变形量, 保证狭缝有足够长度的尖嘴, 能够接近异形构件, 特别能够深入到长管内部, 提高了工程材料中子衍射谱仪的实验能力。狭缝采取双重安全设计: 导轨互换系统和防撞结构, 可以有效防止狭缝在使用过程中被大件样品撞坏。该狭缝已经应用到中国散裂中子源工程材料中子衍射谱仪的实验测试, 为残余应力测量做出了重要贡献, 它的应用为国内外尖嘴型狭缝的设计提供了非常重要的参考。

关键词: 中国散裂中子源; 中子谱仪; 尖嘴型狭缝; 有限元

中图分类号: TL817.3

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230217

Development of pointed-mouth slit for neutron engineering material diffractometer at China Spallation Neutron Source

Wang Huaibao^{1,2,3}, Zhou Liang^{1,3}, Hu Chunming^{1,3}, Li Xiaohu^{1,3}

(1. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, China)

Abstract: The samples of the China Spallation Neutron Source (CSNS) Engineering Material Diffraction Spectrometer (EMD) are very large and have different shapes. The neutron collimation aperture needs to be designed as a pointed-mouth slit to be close to these abnormal components. The main function of the pointed-mouth slit is to provide the beam size is needed by the sample experiment, and ensure that the beam size has high accuracy. The pointed-mouth slit is continuous, and it can be changed according to the experimental requirements. The blade uses enriched boron carbide, which can reduce the deformation of the slit cantilever structure. The slit has a very long mouth, which can approach the special-shaped components and enter into the long tubes. The deformation problem of the cantilever was simulated and analyzed using finite element software. The slit adopts a dual safety design, which can effectively prevent from being damaged by large samples. This slit has been applied to the CSNS engineering material spectrometer. It has made remarkable contributions to residual stress measurement. The application of this slit provides a very important reference for the design of the pointed-mouth slits.

Key words: China Spallation Neutron Source, neutron spectrometer, pointed slit, finite element analysis

工程材料中子衍射谱仪 (EMD) 位于中国散裂中子源 (CSNS) 第 8 号束线, 它是一台用户谱仪, 由中国散裂中子源和东莞材料基因高等研究院 (CEAM) 共同建设。工程材料中子衍射谱仪基于布拉格衍射原理, 开展材料内部晶

* 收稿日期: 2023-07-12; 修订日期: 2023-10-18

基金项目: 东莞市科学技术开发项目 (441900-201904-0010003001-0004)

联系方式: 王怀宝, wanghb@ihep.ac.cn.

格参数的变化测量与研究,建成后具备应变测量、应力测量、织构测量以及布拉格边透射成像等功能,特别适用于大尺寸工程材料与部件服役过程中微观结构和应力、织构、相和晶粒间应力测试和变化规律研究等^[1-3]。因此工程材料中子衍射谱仪将会广泛应用于不同的工业领域,特别在一些大国重器设备和一些关乎国计民生的重点和核心设备。如飞机上铆接工艺,机翼或其他结构件受力与疲劳,特殊涂层的织构和内部应力等;高铁车轮疲劳,导轨和桥梁结构件受力和疲劳;舰船燃气轮机叶片,航母阻拦索等。工程材料中子衍射谱仪可以在这些工程部件或材料的研发和应用检测上发挥重要作用。

由于工程材料中子衍射谱仪的样品非常大,且形状各异,有些样品甚至是曲面的,需要设计一个能够靠近样品表面的狭缝,和径向准直器共同确定测量体积(gauge volume)大小和位置,如图1所示。其中狭缝的主要作用是通过调节入射束流尺寸来精确确定测量体积的宽度和高度,并保证束流没有太多杂散中子。因此,要求狭缝的开口尺寸能够根据需求进行变化,狭缝刀片需要非常平整、光滑、中子透过率低、平行度高、重复定位精度高。

1 物理背景

中子衍射是无损残余应力测量的重要手段,尤其是大型工程部件,几乎是唯一的手段。实验需要测量样品不同位置的残余应力,根据工程应用经验,通常样品测量体积(IGV)的范围为 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}\times 1\text{ mm}\sim 6\text{ mm}\times 6\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 。测量体积的准确定位非常关键,特别是有较高空间梯度残余应力的测量。在实验时,测量体积是由样品前狭缝和径向准直器来确定的,即采用狭缝的开口尺寸替代测量体积 x 、 y 方向的尺寸,但束流经过狭缝后会发散,导致测量体积(IGV)大于狭缝的开口。为了能较准确获得测量体积,狭缝需要尽可能靠近样品,以减少束流发散带来的影响。

测量体积(IGV) x 方向或 y 方向尺寸的计算公式为^[4]

$$\Delta_{x,y} = S_{x,y} \left[1 + 2.35 \left(\frac{S_z}{S_{x,y}} \tan \alpha_{x,y} \right)^3 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

式中: S_z 为狭缝到测量体积的距离; $\alpha_{x,y}$ 为束流通过狭缝后 x 方向或 y 方向的分散度, $S_{x,y}$ 为狭缝开口 x 方向或 y 方向的尺寸, $\Delta_{x,y}$ 为测量体积(IGV) x 方向或 y 方向的尺寸,如图1所示。

例如,当狭缝开口宽度 S_x 为 1 mm ,发散度为 0.2° 时,狭缝的出口到样品距离 S_z 分别取 10 、 30 、 50 、 70 、 100 mm ,根据式(1)可以得到实际样品上被照亮的宽度(测量体积 x 方向的尺寸) Δ_x 的值,计算结果如表1所示。

由计算结果可以看出,狭缝的出口到样品距离 S_z 越大,实际样品上被照亮的宽度 Δ_x 越大,即发散度的影响越大。因此,实验时需要狭缝出口尽可能靠近样品(在大多数情况下,狭缝出口与样品表面接触),可以认为狭缝开口尺寸近似等于IGV的尺寸,即可以认为 $S_x=\Delta_x$, $S_y=\Delta_y$ 。

工程材料中子衍射谱仪的样品非常大,且形状各异,有些样品甚至是曲面的。例如飞机翅膀、火车轮子和管状样品等,普通狭缝很难靠近这些异形样品的测量位置。狭缝出口要靠近这些异形构件,只能设计成尖嘴型。因此,尖嘴型狭缝成为国内外工程材料谱仪必备的一个部件。

2 总体结构方案选择和设计

目前尖嘴型狭缝主要分为离散型和连续型。离散型指的是狭缝形成的开口尺寸是离散的,是固定的某几个值,一般采用中间开孔的镉片,优点是安装简单,缺点是需要经常更换,且重复定位精度不高。日本散裂中子源(J-parc)的TAKUMI^[5]和美国散裂中子源(SNS)的VULCAN就是采用离散型尖嘴型狭缝^[6-7]。

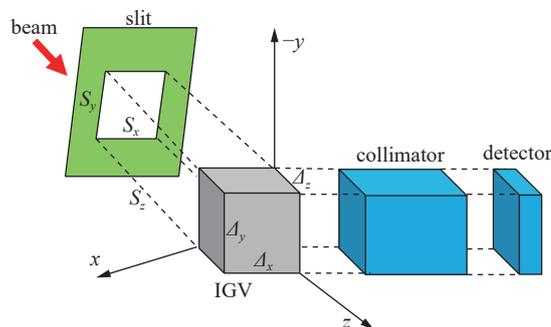


Fig. 1 Schematic diagram of the relationship between slit size and measured volume

图1 狭缝尺寸与测量体积关系示意图

表1 计算结果

Table 1 Calculation results

S_x/mm	$\alpha_{x,y}/(^{\circ})$	S_z/mm	Δ_x/mm
1	0.2	10	1.000 033
1	0.2	30	1.000 899
1	0.2	50	1.004 147
1	0.2	70	1.011 299
1	0.2	100	1.032 262

连续型尖嘴型狭缝采用运动机构, 连续调节上下左右 4 个阻挡块(刀片)的相对位置, 可以获得连续的开口尺寸。优点是狭缝一旦安装就位, 就可以实时调节开口尺寸, 缺点是需要比较复杂的运动机构, 尤其需要有足够强度的悬臂机构。国际上一般采用 6~9 mm 的烧结碳化硼作为尖嘴型狭缝的刀片, 重量比较大, 悬臂比较粗大, 影响狭缝的重复定位精度。英国散裂中子源 (ISIS) 的 ENGIN-X 就是采用连续型尖嘴型狭缝^[4]。

另外, 尖嘴型狭缝使用时需要靠近样品, 在样品前期安装和后期测试过程中, 狭缝极易被样品撞坏, 因此狭缝一般都需要设计安全机构, 美国散裂中子源 (SNS) VULCAN 的尖嘴型狭缝中设计的曲柄摇杆机构, 它的作用就是在狭缝不使用时, 将狭缝移动到安全位置, 保证狭缝不被撞坏, 如图 2 所示。

中国散裂中子源工程材料中子衍射谱仪借鉴了国外同类型谱仪尖嘴型狭缝的经验, 特别是借鉴了 ENGIN-X 准备设计的第二版尖嘴型狭缝的要求。狭缝设计为连续型, 采用直线双导轨结构, 保证狭缝有足够高的重复定位精度。刀片采用富集碳化硼, 进一步降低悬臂的变形量, 保证狭缝有足够长度的尖嘴, 能够接近异形构件, 特别能够深入到长管内部, 中国散裂中子源工程材料中子衍射谱仪的尖嘴型狭缝为同类装置中最长。狭缝拥有双重安全设计: 一是, 导轨互换系统, 可在狭缝不使用时, 将狭缝移动到安全位置, 导轨互换系统的重复定位精度高于国外同类装置中使用的曲柄摇杆机构。二是, 狭缝上方的防撞结构, 可以保证人为误碰时, 狭缝几乎不受影响, 在外部装撞击下, 狭缝不发生永久性损坏。中国散裂中子源尖嘴型狭缝及导轨互换系统如图 3 所示。

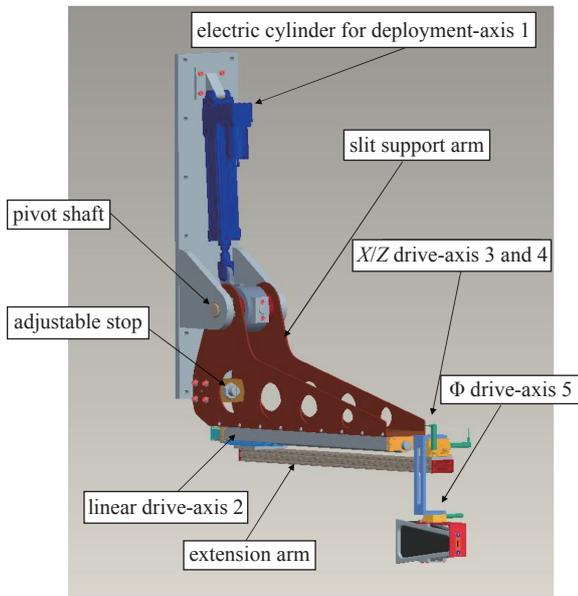


Fig. 2 Schematic diagram of the pointed-mouth slit of SNS-VULCAN

图 2 美国散裂中子源 VULCAN 的尖嘴型狭缝示意图

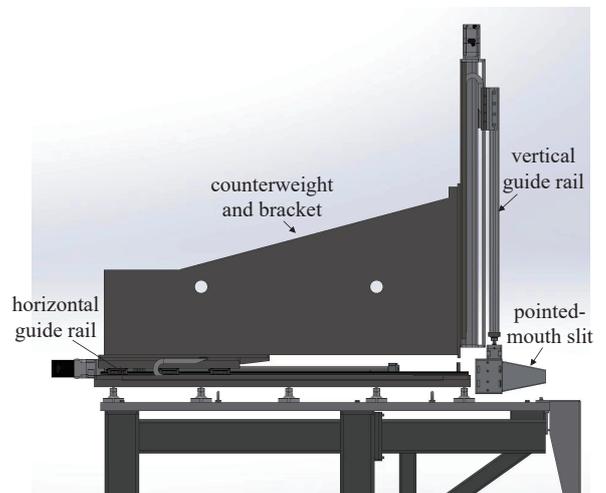


Fig. 3 Schematic diagram of the pointed-mouth slit of CSNS

图 3 中国散裂中子源尖嘴型狭缝示意图

3 关键部件设计与分析

尖嘴型狭缝的悬臂结构有两个问题值得研究, 一是悬臂结构的重复定位精度, 如果采用曲柄滑块机构, 定位精度不够, 设计为丝杆导轨机构可以满足定位精度的要求。二是悬臂结构的变形问题, 一方面需要优化刀片, 采用富集¹⁰B 材料, 减轻刀片重量; 另一方面需要使用有限元软件对悬臂结构变形情况进行仿真分析。

3.1 运动机构的设计

尖嘴型狭缝主要由底板、两个运动双导轨、驱动电机、高精度光栅尺、两组刀片(水平方向两个为一组, 垂直方向两个为一组)及其支架、保护罩等部分组成, 悬臂结构和电机固定在导轨滑块上, 电机丝杠与固定螺纹块啮合, 带动悬臂结构及刀片往复运动, 四个刀片互不影响, 独立运动。尖嘴型狭缝的结构如图 4 所示。

为了提高狭缝的重复定位精度, 狭缝设计有导向系统和反馈系统。导向系统采用直线双导轨^[8], 导轨和滑块的轨道面采用两列哥德式圆弧槽, 45°接触角四点接触的钢球列设计, 四方向等负载结构可以保证滑块稳定性及刚性。反馈系统采用 50 nm 高分辨率的绝对式光栅尺, 可以实时反映出狭缝的开口尺寸, 同时采用高精度的步进电机^[9], 200 的高细分使其开环的分辨率优于 50 nm, 从而能够实现分辨率整体闭环定位精度优于 30 μm。

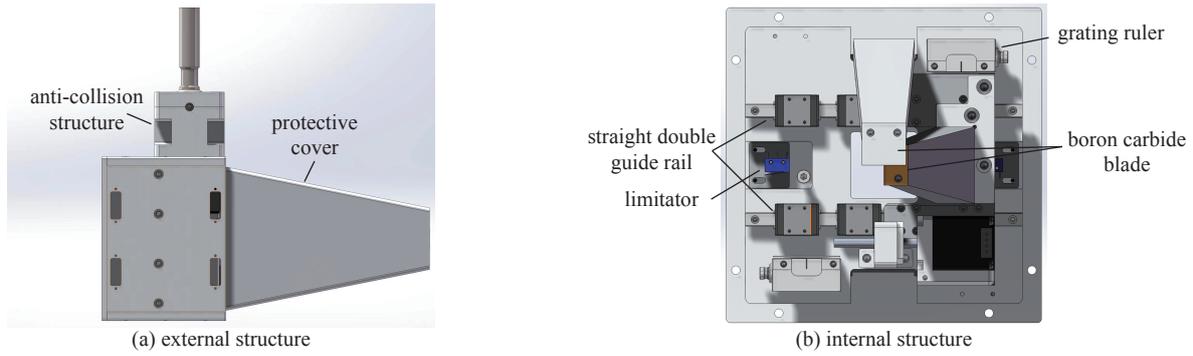


Fig. 4 Schematic diagram of pointed mouth slit structure

图 4 尖嘴型狭缝结构示意图

3.2 狭缝刀片的优化

关于狭缝刀片材料的选择,国际上一般采用三种材料:铝基喷涂¹⁰B和镱层、硼铝合金和烧结碳化硼。铝基喷涂¹⁰B和镱层不平整,刀口处容易产生散射;硼铝合金需要进口,价格昂贵,打磨工艺需要摸索;烧结碳化硼已经国产化^[10-11],平面度可以到0.1 mm,表面粗糙度可以到0.8 μm,刀口处可以倒角,减少厚度带来的散射。因此,中国散裂中子源的尖嘴型狭缝刀片材料选择烧结碳化硼。

对刀片的厚度进行优化主要是为了减轻刀片的自重,降低悬臂的变形量。狭缝刀片采用碳化硼,主要作用是提供所需的束流尺寸,吸收中子。相同厚度的碳化硼,富集¹⁰B碳化硼的中子透过率会更低,本项目采用富集¹⁰B的碳化硼材料,以减轻刀片的厚度。

材料中子透过率的计算^[12],采用基本核物理计算公式,计算方法如下

$$N = \frac{\rho N_A \delta \times 10^{-24}}{M} \quad (2)$$

$$\mu_x = \sigma_{\text{total}} N \quad (3)$$

$$t = e^{-\mu_x} \quad (4)$$

式中: ρ 为密度, N_A 为阿伏伽德罗常数, σ_{total} 为所要计算波长对应的中子散射截面总和, M 为分子量, δ 为材料厚度, N 为材料中核子个数, μ_x 为材料的中子衰减系数, t 为中子透过率。

如果材料是复合物,则计算公式如下

$$N_n = \frac{\rho N_A \delta \eta_n \times 10^{-24}}{M_n} \quad (5)$$

$$\mu_x = \sum_{n=1}^N \sigma_{\text{total}} N_n \quad (6)$$

$$t = e^{-\mu_x} \quad (7)$$

式中: N_n 为第 n 个组分材料系数, η_n 为第 n 个组分所占的质量百分比。

本项目使用的富集碳化硼,其硼质量分数为76.8%,碳质量分数20.72%。碳化硼中,B同位素¹¹B占60%,¹⁰B占40%;C同位素,¹²C占98.93%,¹³C占1.07%,碳化硼密度为2.5 g/cm³。

由于波长越长,同样厚度中子透过率越低,现在按照最短中子波长0.1 nm进行计算,当波长为0.1 nm时,通过查找可知B₁₀中子截面为2 135.44, B₁₁中子截面为4.91, C₁₂中子截面4.81,为C₁₃中子截面为4.247(查找数据见<http://www.nndc.bnl.gov/sigma/>),计算结果见表2。

刀片的透过率要求为不高于10⁻⁴,由表2计算结果可以看出,理想情况下,1 mm厚度的富集¹⁰B碳化硼可满足要求,但实际上烧结的碳化硼分布不均匀,以及考虑碳化硼为脆性材料且为运动部件,碳化硼刀片的厚度选取3 mm。

表 2 不同厚度富集碳化硼中子透过率计算结果

Table 2 Calculation results of neutron transmittance of boron carbide with different thicknesses

thickness/mm	transmittance
1	4.94×10 ⁻⁵
2	2.44×10 ⁻⁹
3	1.20×10 ⁻¹³
4	4.91×10 ⁻¹⁸

3.3 悬臂结构变形分析

理论上, 狭缝越尖越长, 越有利于各种异型样品的实验, 但实际上, 狭缝的刀片支架为悬臂结构, 狭缝越长, 刀片支架的变形量就越大。狭缝的重复定位精度要求为 0.1 mm, 为了保证狭缝的定位精度, 要求刀片支架的变形量不高于 0.05 mm。

在设计时, 参考了 ENGIN-X 准备设计的第二版尖嘴型狭缝的要求, 当狭缝前端与样品(测量体积)的距离不超过 135 mm, 且设置了 1 mm 的水平间隙时。由于水平夹角越小, 悬臂结构越长, 悬臂的变形量就越大。通过分析, 设计狭缝组件(悬臂结构)与入射光束路径水平夹角为 9° , 如图 5 所示。

悬臂结构除了受自身重力之外, 悬臂末端还受到刀片的重力, 利用有限元进行仿真分析^[13-14], 仿真结果如图 6 所示。

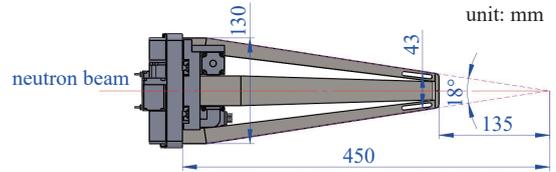


Fig. 5 Schematic diagram for the design of a pointed mouth slit structure

图 5 尖嘴型狭缝结构设计示意图

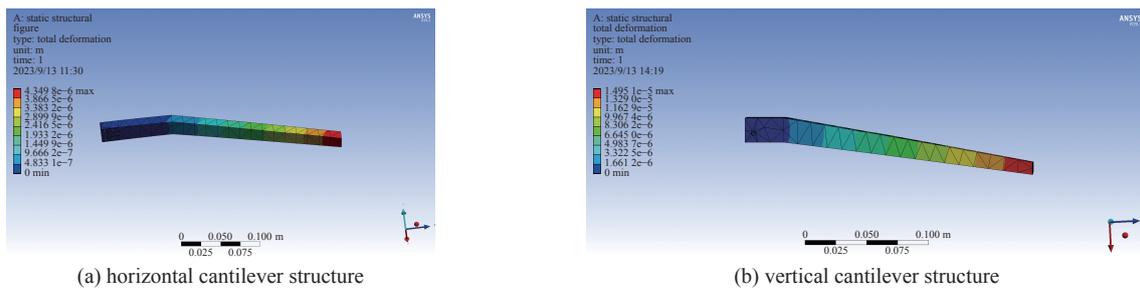


Fig. 6 Analysis results of cantilever structure

图 6 悬臂结构分析结果

根据仿真结果, 水平悬臂结构的最大变形量为 0.004 mm, 垂直悬臂结构的最大变形量为 0.015 mm, 符合精度要求。

3.4 安全设计

工程材料中子衍射谱仪的样品非常大, 狭缝在运动过程中会碰到样品, 为了保证狭缝的安全, 狭缝采取了双重安全设计: 导轨互换系统和防撞结构。导轨互换系统由水平导轨、垂直导轨、两轴支架及配重组成。在狭缝不使用时, 可将狭缝移动到安全位置, 保证狭缝不受损坏。防撞结构由万向球头、夹持结构、螺栓等组成。通过调节螺栓的松紧程度来改变静摩擦力大小, 从而达到防撞效果。此防撞结构可以保证人为误碰, 狭缝几乎不受影响; 在外部撞击下, 狭缝不发生永久性损坏。

4 运动精度测试

4.1 精度要求

在实验测量时, 将实验样品测量体积的尺寸近似等于尖嘴型狭缝的开口尺寸, 所以实验对狭缝开口尺寸的运动精度要求很高, 在狭缝投入使用前需要对狭缝开口的运动精度进行测试, 确保狭缝开口的运动精度符合设计要求。本次测试选用激光干涉仪作为测量工具, 激光干涉仪有非常多的优点, 光路搭建方便, 测量简单快捷可靠, 测量精度非常高而且误差小, 同时激光干涉仪的灵敏度也非常高, 而且有很强的灵活性^[15-16]。

根据物理要求, 尖嘴型狭缝的重复定位精度要优于 10 μm , 绝对定位精度要优于 30 μm 。

4.2 精度测试

尖嘴型狭缝运动精度测试系统由运动平台、电气控制部分、光学平台和激光干涉仪组成。通过把反射镜固定在线性平台上, 分光镜固定在光学平台上, 调整两束反射光, 利用激光干涉仪来计算这两束光的光程差而获取平台运动的实际距离。

测试系统搭建完成后, 按照以下方法进行测量:

狭缝开口由四个独立运动的刀片组成, 这个四个刀片分别为 Y_1 轴(水平方向刀片 1)、 Y_2 轴(水平方向刀片 2)、 Z_1 轴(垂直方向刀片 1)、 Z_2 轴(垂直方向刀片 2)。根据物理需求, Y 轴方向的设计开口最大尺寸为 10 mm, 为了留有足够的余量, Y_1 轴和 Y_2 轴的实际运动行程超过 6 mm, 所以测试时, Y 轴方向的两个刀片行走的目标位置为 0、1.5、3、4.5、6 mm。 Z 轴方向的设计开口最大尺寸为 20 mm, 为了留有足够的余量, Z_1 轴和 Z_2 轴的实际运动行程超过 10 mm, 所以测试时, Z 轴方向的两个刀片行走的目标位置为 0、2、4、6、8、10 mm。

将刀片移动至第一个测量位置,激光干涉仪读数清零。再将刀片从第一个测量位置依次定位到剩余的测量位置,再从最后一个测量位置原路返回到第一个测量位置,在每个位置稳定后,用激光干涉仪软件采集该位置的读数。

测试结果如图7所示,刀片从第一个测量位置依次定位到剩余的测量位置,这是一个 runs,记作 runs 1,再从最后一个测量位置原路返回到第一个测量位置记作 runs 2。根据四轴测试结果,狭缝 Y_1 轴(水平方向刀片1)定位精度为 $5.368\ \mu\text{m}$,重复定位精度为 $1.356\ \mu\text{m}$;狭缝 Y_2 轴(水平方向刀片2)定位精度为 $1.394\ \mu\text{m}$,重复定位精度为 $0.895\ \mu\text{m}$;狭缝 Z_1 轴(垂直方向刀片1)定位精度为 $2.331\ \mu\text{m}$,重复定位精度为 $1.437\ \mu\text{m}$;狭缝 Z_2 轴(垂直方向刀片2)定位精度为 $5.827\ \mu\text{m}$,重复定位精度为 $2.211\ \mu\text{m}$ 。

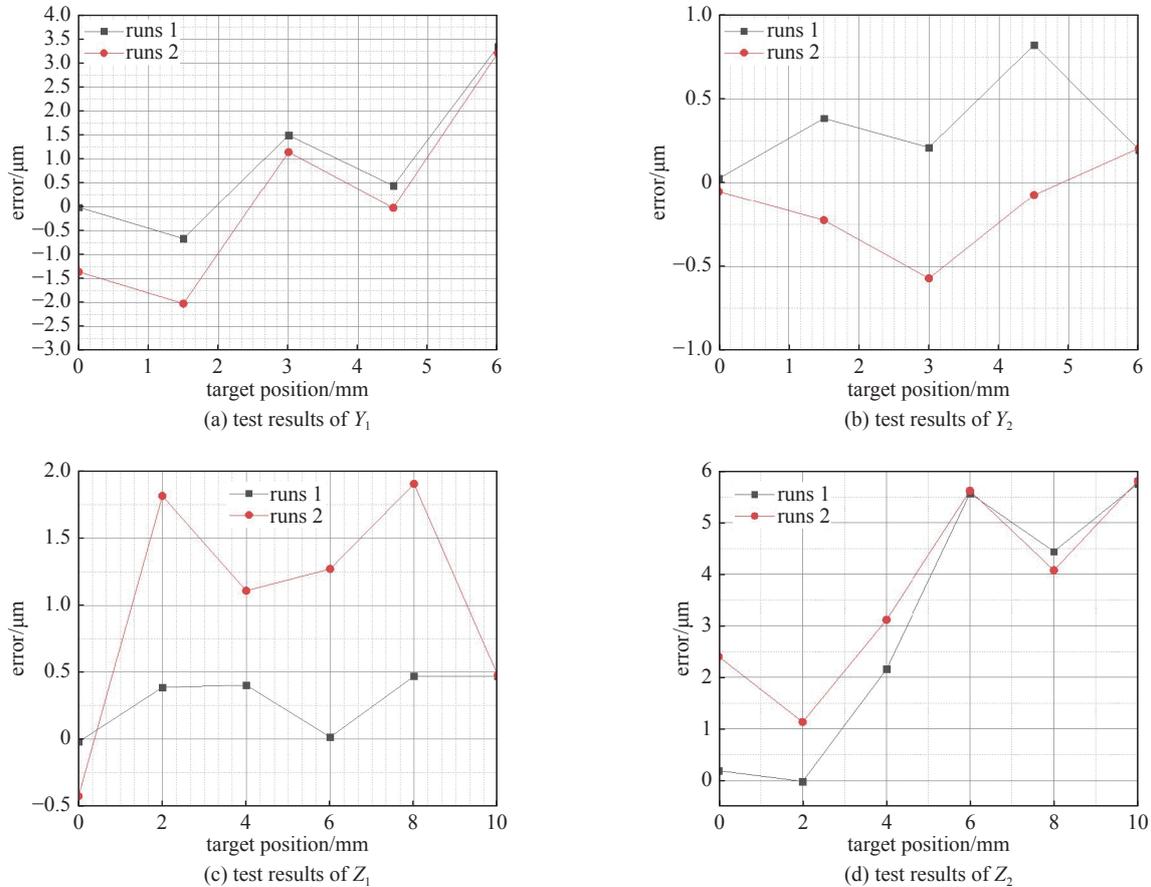


Fig. 7 Four axis test results of pointed-mouth slit

图7 尖嘴型狭缝的四轴测试结果

从测试结果可以看出,四轴的重复定位精度优于 $10\ \mu\text{m}$,绝对定位精度优于 $30\ \mu\text{m}$,符合设计要求。

5 结论

根据尖嘴型狭缝的设计要求,借鉴国外同类谱仪的经验,设计完成了尖嘴型狭缝。在设计中充分考虑了设备的重复定位精度、运行稳定性、安全性等技术难点。采用富集碳化硼替代传统碳化硼,对刀片的厚度进行优化;通过有限元仿真方法,验证了悬臂结构设计的合理性。利用激光干涉仪对设备的重复定位精度进行测试,验证了设备的可靠性。该狭缝已经应用到 CSNS 工程材料中子衍射谱仪,为残余应力测量做出了重要贡献,它的应用为国内外尖嘴型狭缝的设计提供了非常重要的参考。

参考文献:

- [1] 张俊荣,庄建,王平,等.中国散裂中子源中子谱仪简介[J].现代物理知识,2022,34(4):21-24. (Zhang Junrong, Zhuang Jian, Wang Ping, et al. Introduction of China spallation neutron source neutron spectrometer[J]. Modern Physics, 2022, 34(4): 21-24)
- [2] 中国散裂中子源工程[EB/OL]. <http://csns.ihep.cas.cn/>. (China spallation neutron source[EB/OL]. <http://csns.ihep.cas.cn/>.)
- [3] 肖仁峰.中国散裂中子源高压谱仪四刀光阑控制系统设计[D].成都:电子科技大学,2022. (Xiao Renfeng. Design of four-blade slit control system of China Spallation Neutron Source high pressure spectrometer[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022)
- [4] Santisteban J R, Daymond M R, James J A, et al. ENGIN-X: A third-generation neutron strain scanner[J]. Journal of Applied Crystallography, 2006,

39(6): 812-825.

- [5] Aizawa K, Harjo S, Ito T. The engineering materials diffractometer "TAKUMI"[J]. *Hamon*, 2010, 20(1): 62-65.
- [6] Wang X L. Conceptual design of the SNS engineering diffractometer[R]. SNS Report No. IS-1.1. 8.2-6035-RE-A-00, 2000.
- [7] Wang X L, Holden T M, Rennich G Q, et al. VULCAN—The engineering diffractometer at the SNS[J]. *Physica B:Condensed Matter*, 2006, 385/386: 673-675.
- [8] 肖松文, 何泳成, 何振强, 等. 微小角中子散射谱仪探测器移动小车驱动机构设计及精度测试[J]. *核技术*, 2022, 45: 090401. (Xiao Songwen, He Yongcheng, He Zhenqiang, et al. Driving system design and precision test of the VSANS detector trolleys[J]. *Nuclear Techniques*, 2022, 45: 090401)
- [9] 魏娜. 浅析步进电机的选择与使用[J]. *科技与企业*, 2013(2): 298. (Wei Na. Analysis of the selection and use of stepper motors[J]. *Science-Technology Enterprise*, 2013(2): 298)
- [10] 王零森, 方寅初, 吴芳, 等. 碳化硼在吸收材料中的地位及其与核应用有关的基本性能[J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2000, 5(2): 113-120. (Wang Lingsen, Fang Yingchu, Wu Fang, et al. The position of boron carbide in neutron absorbing materials and its properties relation to nuclear applications[J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 2000, 5(2): 113-120)
- [11] 刘桂荣, 裴燕斌. 含 B 中子吸收材料的研究进展[J]. *粉末冶金工业*, 2018, 28(5): 1-5. (Liu Guirong, Pei Yanbin. Research progress of boron-containing neutron absorber materials[J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2018, 28(5): 1-5)
- [12] 卢希庭. 原子核物理[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2001. (Lu Xiting. Nuclear physics[M]. Beijing: China Atomic Energy Press, 2001)
- [13] 黄骏, 马雁云. 医疗加速器治疗床以及旋转臂的受力分析[J]. *机械工程师*, 2011(8): 79-80. (Huang Jun, Ma Yanyun. Force analysis of medical accelerator treatment bed and rotating arm[J]. *Mechanical Engineer*, 2011(8): 79-80)
- [14] 邹易清, 康玲, 屈化民, 等. 中国散裂中子源快循环同步加速器主准直器的设计与研究[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(3): 741-745. (Zou Yiqing, Kang Ling, Qu Huamin, et al. Design and research of primary collimator for CSNS/RCS[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(3): 741-745)
- [15] 王会永, 满忠雷, 孙立, 等. 基于激光干涉仪的机床定位精度测量与分析[J]. *检验检疫学刊*, 2015(2): 36-37,43. (Wang Huiyong, Man Zhonglei, Sun Li, et al. Analysis and measurement for linear positioning accuracy of machine tools based on laser interferometer[J]. *Quality Safety Inspection and Testing*, 2015(2): 36-37,43)
- [16] 吴江杰, 陈伟庆, 辛天飞. 激光干涉仪测量数控机床定位精度的方法研究[J]. *工业控制计算机*, 2017, 30(11): 159-160. (Wu Jiangjie, Chen Weiqing, Xin Tianfei. Research on the method of measuring the positioning accuracy of CNC machine tools using laser interferometer[J]. *Industrial Control Computer*, 2017, 30(11): 159-160)