

CSNS 费米斩波器样机中子狭缝包设计

郭娟^{1,3} 蔡伟亮^{2,3} 耿艳胜^{2,3} 王平^{2,3} 张鸿¹

1(深圳大学 物理与光电工程学院 深圳 518060)

2(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

3(散裂中子源科学中心 东莞 523803)

摘要 费米斩波器是中子非弹性散射谱仪上对中子束流进行单色化的关键设备,其性能影响谱仪的分辨率和计数率。费米斩波器的核心部件是由中子吸收材料和透明材料层叠而成的中子狭缝包,通过狭缝包的高速旋转选出多个单一波长的脉冲中子。中国散裂中子源(China Spallation Neutron Source, CSNS)正在研制费米斩波器样机,基于样机研制要求设计了三种典型的狭缝包,通过使用 McStas 软件,模拟验证了设计方案的可行性。模拟结果表明:1)在 0.02~0.50 nm 的波长范围调整三种狭缝包的转速能够实现 2%~10% 的分辨率,中子衰减率和狭缝包透射率均能满足要求;2)三种狭缝包在 600 Hz 工作频率下的最佳入射波长各为 0.165 nm、0.040 nm、0.023 nm,分别用于不同的工作波长范围;3)在分辨率较好的长波段,狭缝包可降速使用以提高中子通过率。该研究为 CSNS 费米斩波器的样机研制提供了物理参数,为下一步的样机狭缝包性能测试,以及非弹性散射谱仪费米斩波器中子狭缝包的设计提供了参考依据。

关键词 费米斩波器, 中子狭缝包, 单色中子, 分辨率, 中子通过率

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.050201

Design of the neutron slit package for Femi chopper prototype of CSNS

GUO Juan^{1,3} CAI Weiliang^{2,3} GENG Yansheng^{2,3} WANG Ping^{2,3} ZHANG Hong¹

1(College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

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

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

Abstract [Background] Fermi chopper is the key equipment for monochromating the neutron beam in an inelastic neutron scattering spectrometer, and its performance will affect the resolution and counting rate of the spectrometer. The core component of Fermi chopper is neutron slit package, which is composed of neutron absorbing material and transparent material, and selects multiple single wavelength pulsed neutrons by high-speed rotation. [Purpose] The study aims to design suitable slit packages for Fermi chopper prototype of China spallation neutron source (CSNS). [Methods] According to the common experimental conditions of inelastic scattering, the development target of the Fermi chopper prototype was determined, then three typical slit packages were designed, and the feasibility of the design was verified by MCStas software simulation. [Results] The simulation results show that: (1) the three kinds of slits can achieve a resolution of 2%~10% in the wavelength range of 0.02~0.50 nm, and the neutron decay rate and the slit packet transmittance meets the requirements; (2) the optimal incident wavelengths of the three kinds of slit

国家自然科学基金(No.U1832128、No.U1932163、No.12027810)资助

第一作者: 郭娟, 女, 1997年出生, 2018年毕业于深圳大学, 现为硕士研究生, 研究领域为中子斩波器

通信作者: 王平, E-mail: wangping@ihep.ac.cn

收稿日期: 2021-01-27, 修回日期: 2021-03-23

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.U1832128, No.U1932163, No.12027810)

First author: GUO Juan, female, born in 1997, graduated from Shenzhen University in 2018, master student, focusing on neutron chopper

Corresponding author: WANG Ping, E-mail: wangping@ihep.ac.cn

Received date: 2021-01-27, revised date: 2021-03-23

packets at 600 Hz operating frequency are 0.165 nm, 0.040 nm and 0.023 nm respectively, which can be used in different wavelength ranges; (3) in the long wavelength band with better resolution, the slit packet can be used to reduce the velocity and improve the neutron pass rate. [Conclusions] The physical parameters for the prototype development of CSNS Fermi chopper are given by this study, it provides a reference for the slit package performance test of the future prototype, as well as the design of the neutron slit package of the Fermi chopper of the inelastic scattering spectrometer.

Key words Fermi chopper, Slit package, Monochromatic neutron, Resolution, Neutron pass rate

中国散裂中子源(China Spallation Neutron Source, CSNS)是我国建造的第一台脉冲中子源,综合性能位居世界前列,CSNS的建设极大地促进中子散射应用相关的众多学科领域的快速发展^[1]。基于飞行时间技术和中子非弹性散射技术的中子非弹性散射谱仪(简称非弹谱仪)是散裂中子源重要的组成部分,费米斩波器是非弹谱仪用于选择准单色脉冲中子的关键设备,最早由Fermi等^[2]于1947年研制出样机,用以测量硼、钆、镅和金的中子速度相关截面。费米斩波器通过由吸收材料和透明材料层叠而成狭缝包的高速旋转,对中子束流进行斩波,使入射样品的中子为单一已知能量,结合探测器探测到的经样品散射后的中子的飞行时间和散射角,获得样品中原子/分子的动量(三维)、能量和强度信息,进而实现对物质微观结构的研究。

费米斩波器性能影响非弹谱仪能量分辨率和计数率,属于CSNS非弹谱仪工程建设不可缺少的关键设备,但目前仅有国外极少数厂家可以提供,容易受国际环境影响导致无法提供,为确保CSNS非弹谱仪工程建设成功,CSNS在成功研制T0斩波器和带宽斩波器的基础上,启动了费米斩波器样机国产化自主研发项目,一方面可以降低成本,解决受制于人的局面,另一方面可以更好地根据谱仪的需求和特点自主灵活设计,方便运行维护。中子狭缝包是费米斩波器样机的核心组件,本文介绍了费米斩波器以及中子狭缝包的基本原理,根据常见的非弹性散射实验要求设计了三种狭缝包,并通过McStas模拟验证了设计方案的可行性,得到了三种狭缝包的性能结果。

1 原理

费米斩波器是安装在束线后端靠近样品的旋转的圆柱形棒体,有效荷载组件包含一个由高透射材料制成的轻质骨架和中子强吸收材料制成的薄片^[3]层叠而成的狭缝包,每两层吸收片之间的透明材料形成一个很窄的狭缝通道使中子通过,如图1所示。狭缝包的通道层通常为高强度铝合金或单晶硅^[4],吸收材料则是由中子吸收截面大的Gd/B等元素制

备的箔材、涂层或薄膜^[5-8]。层片之间通过挤压或粘接固定,其尺寸略大于束流截面,当通道较短时,两端则增加额外的中子吸收材料防止中子泄漏。

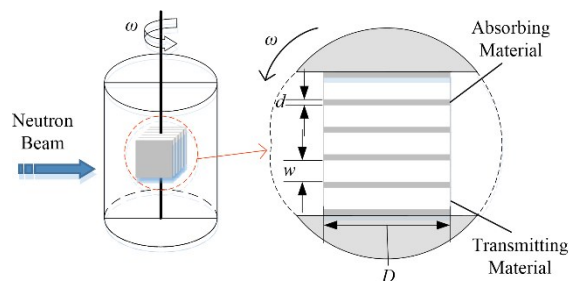


图1 费米斩波器与中子狭缝包示意图
Fig.1 Schematic diagram of the Fermi chopper and neutron slit package

狭缝包嵌入转轴中,由电机带动绕垂直于束流方向高速旋转,相位与慢化器脉冲中子产生的信号同步速度为慢化器脉冲周期整数倍,最高可达600 Hz。当所需的特定波长的中子到达费米斩波器时,通过精准的相位控制使狭缝开口刚好转动到正对束流的位置,高速旋转的狭缝通道会打开一瞬间,仅使在通道中的运动时间小于通道扫过束流截面开口时间的中子通过,其余的中子则被两侧的吸收层阻挡吸收。由于通道很窄,狭缝包所截取的中子可近似看作单色脉冲中子,使谱仪可以进行非弹性散射实验研究,探测中子经样品散射后的能量变化和在空间分布上的变化。

假设波长为 λ_i (速度为 v_i , λ 与 v 的关系为 $\lambda = 395.6/v$)的中子在零时刻从慢化器中飞出,经过距离 L_1 ,在 t_{ch} 时刻到达费米斩波器。在转速 f (角速度 $\omega = 2\pi f$)下,厚度为 w 、长度为 D 的单个通道的转动开放时间为 Δt_{ch} ,所截取的脉冲中子波长范围为 $\lambda_i \sim \lambda_i \pm \Delta\lambda$,其中 $\Delta\lambda$ 表示单脉冲的波长半高宽,狭缝包的分辨率可用 $\Delta\lambda/\lambda_i$ 描述。中子从慢化器到费米斩波器的飞行时间和在狭缝通道中的飞行时间可表示为:

$$t_{ch} = \frac{m}{h} \cdot L_1 \cdot \lambda_i, \Delta t_{ch} = m \cdot L_1 \cdot \Delta\lambda / h \quad (1)$$

式中: m 和 h 分别为中子质量和普朗克常数。 Δt_{ch} 受狭缝通道发散性和费米斩波转速的影响^[9],有:

$$\Delta t_{\text{ch}} = w / (2\pi Df) \quad (2)$$

由非弹谱仪能量分辨率的计算公式可知^[10], 狭缝包对能量分辨率的贡献为:

$$\frac{\Delta E}{E_i} \propto 2 \frac{\Delta t_{\text{ch}}}{t_{\text{ch}}} \left(1 + \frac{L_1 + L_2}{L_3} \right) = 2 \frac{\Delta \lambda}{\lambda_i} \left(1 + \frac{L_1 + L_2}{L_3} \right) \quad (3)$$

其中: 能量分辨率宽度 ΔE 定义为弹性散射光谱中能量宽度的半高宽 (Full Width at Half Maximum, FWHM); L_2 、 L_3 分别代表费米斩波器到样品和样品到探测器的距离。在某一波长下, $\Delta \lambda$ 越小, 中子越接近于单一波长。由于狭缝包具有一定的准直效果, 并非所有 λ_i 的中子都能穿过通道。一部分中子在束流进入通道前会被排列成栅格形式、厚度为 d 的吸收层阻挡, 还有一部分在通道中与两侧的吸收隔片发生碰撞而被吸收, 中子穿过狭缝的概率为 II_0 。

费米斩波器与慢化器、样品和探测器尺寸共同决定着非弹谱仪的能量分辨率和中子通量, 且费米斩波器是其中最为关键的影响因素。狭缝包作为费米斩波器的核心组件, 其性能决定了所选择脉冲中

子的通量和单色性, 是样机研制的关键。因此在设计过程中, 可用分辨率 $\Delta \lambda / \lambda_i$ 和通过率 II_0 来表征狭缝包选取单能中子的优劣程度, $\Delta \lambda / \lambda_i$ 由等式(3)确定, II_0 与中子束流的运动情况有关。

如果不考虑束流流经通道层的损失, 通过率 II_0 可以用中子透射率 A 和传输概率 $P(v)$ ^[11] 两个函数来描述: $II_0 \propto A \times P(v)$ 。其中 A 表示中子未被吸收层隔片阻挡的概率, 只与狭缝包的结构参数有关: $A = w / (w + d)$; $P(v)$ 表示中子的运动轨迹不与通道壁相撞的概率。狭缝可以制成直形, 也可以根据目标波长的中子穿过通道的运动轨迹将通道制成弧形^[12-13], 中子在不同形状的两种通道中具有不同的传输效果。

假设束流完全平行入射, 入射束流宽度等于通道宽度, 所有发散角为零的中子在相同时间内通过狭缝的中心面。由于狭缝包在高速转动, 飞行过程中中子与两侧通道壁的距离会发生变化。如果把狭缝包看作静止状态, 则中子在两种形状通道中的运动轨迹如图2所示的实线抛物线, 图中斜线填充部分表示吸收层, 空白区域表示通道层。

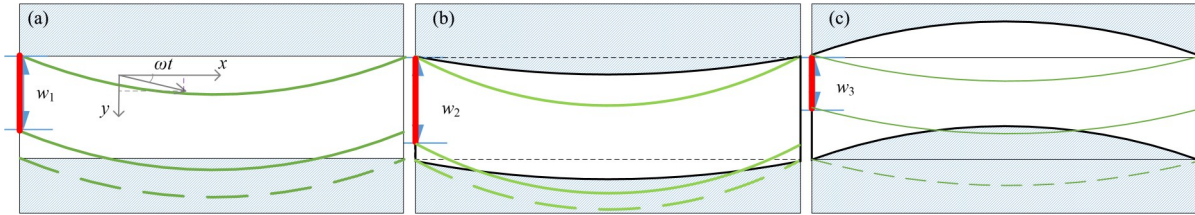


图2 中子在直形狭缝(a)和弧形狭缝(b、c)中的运动轨迹
Fig.2 Neutron trajectories in straight slit (a) and curved slit (b, c)

理想准直束流穿过直形狭缝时, $P(v)_s$ 的幅值与允许中子穿过的区域宽度 $w_1 = \omega D^2 / 4v_i$ 对应 (图2(a)):

$$P(v)_s = \frac{w - (\omega D^2 / 4v_i)}{w} = 1 - \frac{v_m}{v_i} = 1 - \frac{\lambda_i}{\lambda_s} \quad (4)$$

式中: v_m 表示能通过狭缝的最小速度, $v_m = \omega D^2 / 4w$; λ_s 为对应的截止波长。 $P(v)_s$ 与 λ 成线性负相关, 即波长越小, 传输概率越高; λ_s 限制了狭缝包的使用波段, 波长很长的中子在合适的相位下也无法通过斩波器。狭缝通道在一个转动周期内会打开两次, 中子在直形狭缝的正反两个方向上的传输情况相同, 但是对于弯曲的弧形狭缝, 两个开口位置并不等效, 如图2(b)、(c)所示。假设弧形狭缝的通道形状与波长为 λ_0 的中子的运动轨迹相匹配, 对应的曲率半径为:

$$r = v_0 / (4\pi f) = 395.6 / (4\pi f \lambda_0) \quad (5)$$

波长在 λ_0 附近的中子很容易通过正向的匹配

面, 但是反向的非匹配面会限制中子的传输, 当速度为 v 的中子穿过优势面(c1)时, 传输概率和截止波长为:

$$P(v)_{c1} = \frac{w_2}{w} = 1 - \frac{\omega D^2}{4w} \left| \frac{1}{v} - \frac{1}{v_0} \right|, \lambda_{c1} = \frac{395.6w}{\omega R^2} + \lambda_0 \quad (6)$$

对于相反方向的非匹配面(c2)有:

$$P(v)_{c2} = \frac{w_3}{w} = 1 - \frac{\omega D^2}{4w} \left(\frac{1}{v} + \frac{1}{v_0} \right), \lambda_{c2} = \frac{395.6w}{\omega R^2} - \lambda_0 \quad (7)$$

由式(5)可知, 弧形狭缝的最佳入射波长 λ_0 由 r 和 f 决定。在合适的相位下, $\lambda = \lambda_0$ 的中子束流可全部穿过匹配面, $P(v)$ 在 λ_0 处达到最高, 波长与 λ_0 相差越大的中子越难通过。相对于匹配面, 非匹配面的可通过宽度更窄, 截止波长更小, 两个方向的截止波长相差 $2\lambda_0$ 。基于这一特性, 可利用弧形狭缝滤除长波中子的相邻脉冲, 避免相邻的单一波长中子与

样品发生散射作用后在探测器处产生飞行时间重叠,可实现高分辨下全能区多波长入射模式,提高非弹谱仪的计数率。如果采用直形狭缝斩波器,也可以通过与带宽斩波器配合筛选部分脉冲中子,提高脉冲中子利用率。

2 设计和模拟

2.1 设计目标

费米斩波器狭缝包的结构尺寸和安装位置需要与谱仪的特性和使用波长范围相匹配,由此可确定样机狭缝包的设计目标。费米斩波器通常在热中子和超热中子能量范围(1~2 000 meV)内工作,具备高分辨率或低分辨高通量两种工作模式,谱仪能量分辨率 $\Delta E/E_i$ 在 1%~10% 之间^[14]。如果不考虑慢化器、样品与探测器对谱仪能量分辨率的影响,费米斩波器样机狭缝包需要满足如下要求:

1) 中子入射波长为 0.02~0.5 nm,分辨率为 $\Delta\lambda/\lambda_i = 1\% \sim 10\%$ 。常用波长包括: $\lambda_i = 0.165$ nm ($\Delta\lambda/\lambda_i = 2\%$)、0.040 nm ($\Delta\lambda/\lambda_i = 5\%$)、0.023 nm ($\Delta\lambda/\lambda_i = 8\%$);

2) 吸收片对中子的吸收效果要求束流垂直入射时狭缝包对 0.1 nm 的中子实现 8 阶抑制;

3) 由于传输概率具有波长依赖性,因此只考虑中子透射率: $A > 80\%$ 。

2.2 设计方案

狭缝包的各项参数之间相互耦合,由转速以及相位共同决定所截取的脉冲中子的波长、分辨率及通量。特定的狭缝组件在一定的转速下可传输一定数量的中子,而谱仪所需的入射能量(E_i)和能量分辨率(ΔE)的范围要大于单个狭缝包所能提供的范围,所以费米波器系统通常会使用多个狭缝包。针对设计目标中的三个常用波长,可以设计三种理想入射波长与常用波长对应的狭缝包,同时能够尽可能地覆盖入射中子波段范围。为方便说明,将这三种狭缝包命名为: E1(对应 0.165 nm)、E2(对应 0.040 nm)、E3(对应 0.023 nm)。

以 E1 为例,假设狭缝包最高转速为 600 Hz,放置在距离慢化器 12 m 的位置,正对束流截面最大尺寸为 40 mm(W) $\times$ 40 mm(L),考虑单边余量 5 mm,即狭缝包的宽度和高度应为 50 mm(W) $\times$ 50 mm(H)。根据式(1)、(2),为了使 $\lambda = 0.165$ nm 的中子通过 $f = 600$ Hz 的狭缝,分辨率为 $\Delta\lambda/\lambda_i = 2\%$,应有 $\Delta t_{\text{ch}} = 7.59 \mu\text{s}$, $w/D \approx 0.0286$,由式(5)可知,对应的弧形狭缝曲率半径为 $r = 0.32$ m。假设 $D = 50$ mm,则 $w = 1.43$ mm,只有 $d < 0.36$ mm 时,才能实现 $A > 80\%$ 。根

据以上参数可以计算出截止波长为: $\lambda_s = 0.240$ nm、 $\lambda_{c1} = 0.405$ nm、 $\lambda_{c2} = 0.075$ nm、 $\lambda_0 = 0.165$ nm 的入射中子对应的传输概率为: $P(v)_s = 31.22\%$, $P(v)_{c1} = 100\%$, $P(v)_{c2} = 0\%$ 。

在相同条件下,由于弧形狭缝可以改善目标波长中子的传输概率且能覆盖更大的波段,非匹配面截止波长很小,可以有效地滤除相邻脉冲中子,避免出现探测器无法区分两个相邻脉冲引起的非弹性散射信号重叠的情况,为此假定 E1 为弧形狭缝包。

尽管单晶硅具有良好的力学性能和光学性能,但成本较高,且不能用于制备弧形通道,故通道材料选择加工性能优良的 6061 或 7075 铝合金。吸收材料总厚度由费米斩波光谱仪的入射能上限决定,单层吸收片的厚度受到制备工艺的限制,在满足高强度工作条件和中子透过率的要求下,吸收层越薄越好。假设以最小厚度 $d = 0.3$ mm 的铝基碳化硼薄片(30wt.%, ^{10}B 丰度为 99%)作为吸收层,此时有 $A = 82.7\%$ 。狭缝包宽度为 50 mm,共需要 29 层吸收片,总屏蔽厚度 $n \cdot d = 8.7$ mm,由衰减经验公式 $T = e^{-\sigma \cdot N(n \cdot d)}$ (T : 中子衰减率, σ : 微观截面, N : 靶的核密度, n : 吸收层数)计算得出总屏蔽厚度对 0.1 nm 的中子有 $T = 2.9 \times 10^{-27}$,可以满足中子衰减率要求。

E2 和 E3 的理想入射波长分别为 0.040 nm、0.023 nm,直形和弧形的狭缝对于此类波长较短的中子都有很高的通过率。为了将 E2 和 E3 区分开且实现不同的功能,假设 E2 为弧形狭缝,使其能覆盖 E1、E3 之间的重叠区域,并提供较高的传输概率;由于 E3 理想入射波长靠近零点,短波中子不易发生脉冲重叠,取 E3 为直形狭缝,同时减少通道宽度以获取更好的分辨率。在选材方面,天然同位素 ^{155}Gd 、 ^{157}Gd 和 ^{10}B 具有很高的热中子吸收截面,当 $\lambda > 0.052$ nm 时, Gd 对中子的吸收效果远大于 ^{10}B ,但是在 $\lambda < 0.025$ nm 区域出现多个共振峰,吸收中子后会产生 γ 射线,因此 E2 采用真空轧制而成的钆合金箔材(80Gd-20Zr),厚度为 60 μm ^[15],而 E3 通过磁控溅射在铝合金板上制备 ^{10}B 薄膜。三种狭缝包的参数配置,如表 1 所示。

三种狭缝包在 600 Hz 转速下的通过率、分辨率和中子透过率等参数示如表 2 所示,表中还列举了三种狭缝包为直形或弧形狭缝时对应的截止波长,以便于对两种形状的截取波段范围进行对比。

由此可见,三种狭缝包在 600 Hz 转速下,对理想入射波长的分辨率、透射率和中子衰减率都能满足设计目标,最大截止波长为 0.405 nm,如果要选择波长更长的中子,可以通过降低转速来扩展波段带宽。参数配置相同的弧形狭缝与直形狭缝相比,截

表1 狭缝包结构参数
Table 1 The structure parameters of slit packages

编号 Number	通道材料 Transmitting material	吸收材料 Absorbing material	通道宽度 Channel width / mm	通道长度 Channel length / mm	吸收层厚度 Thickness of absorbing layer / mm	曲率半径 Curvature radius / m	层数 Layers number
E1	Al-alloy	B ₄ C-Al based	1.43	50	0.30	0.32	29
E2	Al-alloy	Gd-alloy	0.86	50	0.06	1.30	55
E3	Al-alloy	¹⁰ B-sputtering	0.50	50	0.08	2.25	87

表2 狭缝包在 600 Hz 下的性能参数
Table 2 The performance parameters of slit packages in 600 Hz

编号 Number	波长 Wavelength / nm	转速 Speed / Hz	开口时间 Opening time / μ s	分辨率 Resolution / %	截止波长 Cut-off wavelength λ_s / nm λ_{c1} / nm λ_{c2} / nm			透射率 Pass rate / %	中子衰减 Neutron attenuation / % (for 0.1 nm)
E1	0.165	600	7.59	2.0	0.240	0.405	0.075	82.7	2.9×10^{-27}
E2	0.040	600	4.56	4.9	0.144	0.185	0.104	93.5	2.6×10^{-51}
E3	0.023	600	2.12	5.0	0.084	0.107	0.061	86.2	7.3×10^{-43}

止波长更大,能够选择更多束的中子,且曲率半径越小,两种形状之间的差异越明显。由式(3)~(7)可知,中子穿过通道的传输概率和狭缝包选择单色中

子的分辨率具有波长依赖性,各狭缝包中 $P(\nu)$ 和 $\Delta\lambda/\lambda_i$ 随波长的变化关系如图3(a)与图3(b)所示。

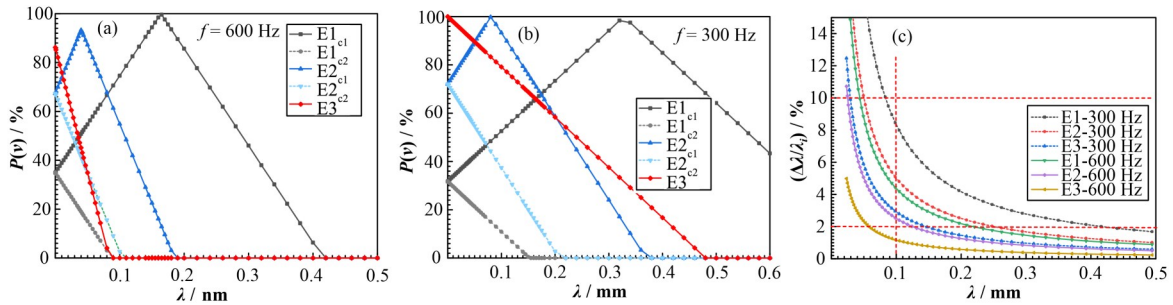


图3 狭缝包的传输概率(a、b)和分辨率(c)的波长依赖性
Fig.3 Wavelength dependent of the transmission probability (a, b) and resolution (c) of the slit packages

直形狭缝的 $P(\nu)$ 随 λ 的增大而减小,而弧形狭缝的 λ_0 受到 r 的限制,所以 $P(\nu)$ 的峰值在 $\lambda = \lambda_0$ 处,最大为 100%。如 r 较小、通道较宽的 E1 在 600 Hz 转速下可以覆盖 0~0.405 nm 范围内的中子, λ_{c1} 远大于 λ_s ,而 λ_{c2} 很小,可以有效地滤除相邻脉冲中子,避免出现脉冲重叠; E3 的有用波段为 0~0.084 nm, $P(\nu)$ 随 λ 的增大而快速减小, E1 和 E3 之间的重叠区域 $P(\nu)$ 较小,使用 $\lambda_0 = 0.040$ nm 的弧形狭缝包 E2 可以为 E1、E3 之间的重叠区域提供额外覆盖(图 3(a))。当转速降低至 300 Hz 后(图 3(b)),狭缝包覆盖的波长范围明显增加。从图 3(c)可见,三种狭缝包在最高转速 600 Hz 下可以将 0.02~0.5 nm 范围内的单色分辨率控制在 2%~10%,甚至更优;转速降低后分辨率变差,波长大于 0.1 nm 的中子可实现小于 10% 的分辨率。相对来说,转速越高、 w/D 越小 Δt_{ch} 越小,分辨率也就越好。三种狭缝包的 D 相等,转速相同的情况下,通道宽度 w 最小的 E3 分辨率最好,

E2、E1 次之。降低 w 可以改善分辨率,但是 $P(\nu)$ 也会随之降低,且 $P(\nu)$ 随波长的变化更为明显。在分辨率的变化比较平缓的长波段,可以通过降低 f 或 D 来提高长波中子的通量,而对分辨率造成的影响比较小。

由于狭缝包所截取的脉冲中子的波长和脉冲间隔取决于其转速和相位, CSNS 的重复频率为 25 Hz, 则单散射周期内 600 Hz 转速的狭缝包在 0.02~0.5 nm 内最多可选择 18 支入射能量,在不同转速下三种狭缝包可能截取到的脉冲中子(从 0.023 nm 开始选择)列于表 3。

2.3 模拟

为验证设计方案,以 CSNS 20#束线为试验平台,通过国际通用的中子散射谱仪模拟计算软件 McStas2.4 对三种狭缝包的性能进行仿真实验。

20#束线主要用于测量退耦合窄化液氢慢化器

表3 狭缝包可能截取的脉冲波长
Table 3 The possible pulse wavelength of slit package

转速 Speed / Hz	脉冲中子波长 Pulse neutron wavelength / nm									
100	0.023	0.188	0.353							
300	0.023	0.078	0.133	0.188	0.243	0.298	0.353	0.408	0.435	0.476
600	0.023	0.050	0.078	0.105	0.133	0.160	0.188	0.215	0.243	0.270
	0.298	0.325	0.353	0.380	0.408	0.435	0.435	0.463	0.490	

(宽侧)的中子性能,光路可分为两个部分,一是距慢化器 8.5 m 以内由铁屏蔽体打孔而成的光路;二是 8.5 m 后的测量室,束线上安装了准直器、T0 斩波器、带宽斩波器 T1 等光学设备,可实现飞行时间的测量。模拟软件 McStas 包含了源、带宽斩波器、准直器等谱仪组件的模拟子程序库,在任意位置插入监视器即可精确地追踪粒子通过各组件的输运过程,探测某一位置的中子分布情况^[16]。按照 20#束线的布局,由 McStas 搭建的 20#束线模型如图 4 所示,费米斩波器放置在距离慢化器 12 m 处。

模拟中调用的 20#束线慢化器数据文件由 CSNS 中子物理组提供,设中子波长范围为 0~0.5 nm,计算追踪粒子数为 1×10^8 个。假设 T0 和 T1 斩波器工作转速均为 25 Hz,截取的波段范围为 0.01~0.462 nm。在费米斩波器前后距离 0.5 m 处各插入一个波长敏感监视器,调整转速和飞行相位使

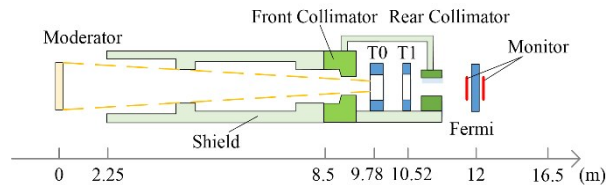


图4 20#束线模型
Fig.4 The model of 20# beamline

狭缝包从 $\lambda_i=0.023$ nm 开始截取束流,中子入射三种狭缝包前(Front)后(Back)的中子波长谱如图 5 所示,分别用虚线和实线表示。图中纵坐标为监视器输出的模拟强度,横坐标为波长,所有纵轴均取对数坐标。图 5(a)~(c)分别表示中子束流穿过转速为 600 Hz 的狭缝包 E1、E2、E3 前后的强度变化。如果仅改变 E1 的某一项参数,如 $f=300$ Hz、 $D=40$ mm、 $r=\infty$,其他固定不变,所得模拟结果如图 5(d)~(f)所示。

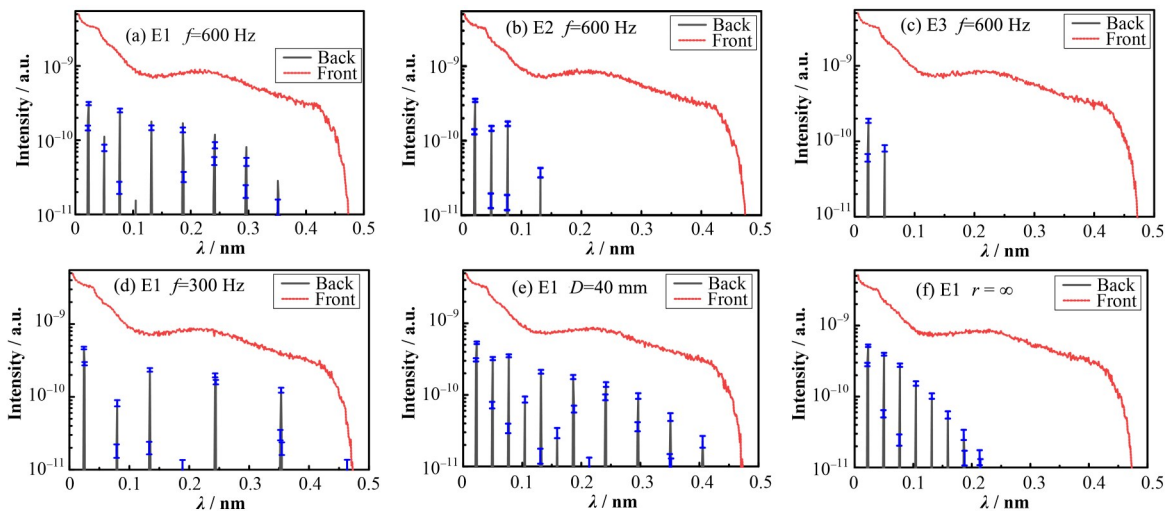


图5 狭缝包 E1 (a)、E2 (b)、E3 (c)在 600 Hz 下及狭缝包 E1 改变转速(d)、通道长度(e)或曲率半径(f)后监视器所探测到的中子波长谱

Fig.5 The neutron wavelength spectrum detected by the monitor when the slitpackage E1 (a), E2 (b), E3 (c) at 600 Hz and after the change of rotating speed (d), channel length (e) or curvature radius (f) of E1

由图 5 可知,束流在经过狭缝包前中子的波长分布是连续变化的,短波中子的通量高,长波中子通量低;在经过狭缝包后,束流被截取为多个单一波长的脉冲,脉冲的数量与波长分布与表 3 中的数据一致(考虑截止波长的限制)。狭缝包选择的脉冲中子

的强度变化与图 3(a)相符:E1 的覆盖范围最广,同时明显改善了 0.165 nm 附近的中子的通过率(图 5(a));E2 的高传输波段在 E1 和 E3 之间,若调整 E2 相位使 0.040 nm 的中子从 E2 的匹配面通过,将会进一步提高出射中子的强度(图 5(b));通道最窄的 E3

出射中子强度较低,但是它可以改善短波中子的分辨率(图5(c)),因为对短波中子来说,高传输也意味着可能会传输一些不需要的中子。理论计算得到的中子强度变化与模拟结果相比趋势大致相同,但是数值相差较大。这是由于解析计算中假设中子束流为理想准直束,完全平行入射,所得结果比较理想。将图5(a)与(d)、(e)、(f)做对比,降低转速后,将拓展狭缝包所覆盖的波长范围,截取的脉冲中子间隔变宽,而波长较长的中子出射强度明显增加;当减小通道长度,在转速不变的条件下可以提高整个波段范围内的中子强度,但是通过非匹配面的中子束也有所增加;若将E1变为直形狭缝,在 $\lambda < 0.2 \text{ nm}$ 范围内将获得更多束的中子,但直形狭缝不适用于易发生散射信号重叠的长波中子。

模拟调用的慢化器数据文件中,在 $0.01 \sim 0.5 \text{ nm}$ 范围内数据点取值间隔为 $0.0006 \sim 0.029 \text{ nm}$,远大于狭缝包单脉冲波长半高宽 $\Delta\lambda$,因此不能计算出狭缝包的分辨率。但根据通过率的理论与模拟值对比结果推断,分辨率的变化趋势应与图3(b)相同,数值可能存在差异。实际运行中,可通过改变转速调节狭缝包分辨率,使其满足实验要求。

3 结语

基于费米斩波器狭缝包的工作原理,设计了三种能够满足CSNS非弹性散射实验条件的狭缝包,McStas模拟结果表明设计方案可行。主要结果如下:

1)在最高转速 600 Hz 下,三种狭缝包在 $0.02 \sim 0.5 \text{ nm}$ 的波长范围内能够实现 $2\% \sim 10\%$ 的分辨率,透射率均大于 80% ,且当束流垂直入射时对 0.1 nm 的中子可实现8阶抑制;

2)E1、E2、E3的理想入射波长分别为 0.165 nm 、 0.040 nm 和 0.023 nm ($f = 600 \text{ Hz}$),与设计目标一致。相同转速下,E1的覆盖波长范围最广,E3可为波长较短的中子提供较好的分辨率,E2则提供E1、E3之间重叠区域的额外覆盖,提高此区域内中子的传输概率;

3)狭缝包的分辨率和通过率具有波长依赖性,但通过率随转速的变化曲线更陡峭,因此在分辨率较好且随波长变化平缓的长波段,可以适当降低转速以提高中子通量。

本研究已确定了三种狭缝包的参数配置,下一步将根据这些参数进行制造,并通过束流实验验证狭缝包的性能,为费米斩波器样机提供适配的狭缝包。

参考文献

- 1 Tang J Y, An Q, Bai J B. *et al.* Back-n white neutron source at CSNS and its applications[J]. Nuclear Science and Techniques, 2021, **32**(1): 11. DOI: 10.1007/s41365-021-00846-6.
- 2 Fermi E, Marshall J, Marshall L. A thermal neutron velocity selector and its application to the measurement of the cross section of boron[J]. Physical Review, 1947, **72**: 193–196. DOI: 10.1103/PhysRev.72.193
- 3 Förster D F, Müller F, Giesen U, *et al.* Lightweight fast rotating Fermi-chopper, proof of principle for a scalable array chopper[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, **908**: 298 – 308. DOI: 10.1016/j.nima.2018.07.051.
- 4 Abernathy D L, Stone M B, Loguillo M J, *et al.* Design and operation of the wide angular-range chopper spectrometer ARCS at the Spallation Neutron Source[J]. The Review of Scientific Instruments, 2012, **83**(1): 015114. DOI: 10.1063/1.3680104.
- 5 Nakamura M, Kajimoto R. General formulae for the optimized design of fermi chopper spectrometer[C]. Proceedings of the 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12), Makuhari, Japan: Journal of the Physical Society of Japan, 2014: 1 – 4. DOI: 10.7566/jpscp.1.014018.
- 6 Elcombe M M, Mole R A, Yu D H. Time dependent fast neutron background: understanding the cause and identifying a solution for the PELICAN cold neutron spectrometer[J]. Physica B: Condensed Matter, 2018, **551**: 347 – 350. DOI: 10.1016/j.physb.2017.11.062.
- 7 Shapiro S M, Zaliznyak I A, Passell L, *et al.* HYSPEC: a crystal time-of-flight hybrid spectrometer for the spallation neutron source with polarization capabilities[J]. Physica B: Condensed Matter, 2006, **385** – **386**: 1107 – 1109. DOI: 10.1016/j.physb.2006.05.380.
- 8 Yokoo T, Ohoyama K, Itoh S, *et al.* Polarized neutron spectrometer for inelastic experiments at J-PARC[J]. EPJ Web of Conferences, 2015, **83**: 03018. DOI: 10.1051/epjconf/20158303018.
- 9 Peters J. Neutron transmission probability through a revolving slit for a continuous source and a divergent neutron beam[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2005, **540**(2 – 3):

- 419 – 429. DOI: 10.1016/j.nima.2004.11.044.
- 10 Itoh S, Ueno K, Yokoo T. Fermi chopper developed at KEK[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2012, **661**(1): 58 – 63. DOI: 10.1016/j.nima.2011.09.048.
 - 11 Nakamura M, Arai M, Kajimoto R, *et al.* Conceptual design of magic chopper used for 4SEASONS at J-PARC [J]. Journal of Neutron Research, 2008, **16**(3 – 4): 87 – 92. DOI: 10.1080/10238160902819510.
 - 12 Peters J, Champion J D M, Zsigmond G, *et al.* Using Fermi choppers to shape the neutron pulse[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2006, **557**(2): 580 – 584. DOI: 10.1016/j.nima.2005.11.111.
 - 13 Nakamura M, Kambara W, Krist T, *et al.* Feasibility demonstration of a new Fermi chopper with supermirror-coated slit package[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2014, **737**: 142 – 147. DOI: 10.1016/j.nima.2013.11.019.
 - 14 Abernathy D L, Stone M B, Loguillo M J, *et al.* Design and operation of the wide angular-range chopper spectrometer ARCS at the Spallation Neutron Source[J]. The Review of Scientific Instruments, 2012, **83**(1): 015114. DOI: 10.1063/1.3680104.
 - 15 李坤. 复合中子准直材料的制备与性能[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2019.
 - LI Kun. Preparation and properties of composite neutron collimating material[D]. Beijing: Beijing General Institute of Nonferrous Metals, 2019.
 - 16 李新喜, 王燕, 黄朝强, 等. 中子斩盘斩束效果的模拟计算[J]. 现代科学仪器, 2009, (2): 65–68.
 - LI Xinxì, WANG Yan, HUANG Chaoqiang, *et al.* Simulation of neutron chop disk[J]. Modern Scientific Instruments, 2009, (2): 65–68.