

文章编号: 1007-4627(2019)02-0204-07

中国散裂中子源小角中子散射谱仪探测器研制

周晓娟^{1,2,3,4}, 周健荣^{1,2,4}, 滕海云^{1,2,4}, 蒋兴奋^{1,2,3,4}, 许虹^{1,2}, 夏远光^{1,2}, 骆宏^{1,2,4}, 肖亮^{1,2,4},
谭莹莹^{1,2}, 朱林^{1,2,3}, 杨桂安^{1,2,4}, 赵豫斌^{1,2,4}, 章红宇^{1,2,4}, 陈元柏^{1,2,4}, 孙志嘉^{1,2,4,†}

(1. 东莞中子科学中心, 广东 东莞 523803;

2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 核探测与核电子学国家重点实验室, 北京 100049)

摘要: 中子小角散射探测器是小角散射(SANS)谱仪的关键设备之一, 探测器要求有足够大的探测面积、较高的探测效率及较好的空间分辨率, 能够在真空腔中稳定地工作并可在腔体内前后移动。综合考虑, SANS探测器采用120只8 mm直径位置灵敏³He管, 组成有效面积1000 mm(X)×1020 mm(Y)的二维探测器阵列。探测器阵列分为10个模块, 每一个模块功能完全独立, 包括12只³He管及其对应的读出电子学和数据获取系统。读出电子学位于探测器背面的回字形密闭腔体内, 由CSNS电子学组自主研发。SANS探测器从设计、选型、样机、调试到安装历时三年, 中子束流实验结果显示探测器探测效率大于50%(@2Å), 空间分辨率好于10 mm(FWHM), 完全达到设计要求, 目前正在中国散裂中子源小角散射谱仪运行使用。

关键词: 中国散裂中子源; 小角散射谱仪; ³He管探测器; 探测效率; 空间分辨

中图分类号: TL816+.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.36.02.204

1 引言

中子散射技术^[1]是研究物质结构和动力学性质的理想探针, 随着其应用范围越来越广, 先进的中子源成为科学家奋力追求的目标。中国散裂中子源(CSNS)作为发展中国家的第一台散裂中子源, 其建成使中国进入世界四大散裂中子源的行列, 为我国在材料、物理、化学、生命科学、纳米等学科领域的研究提供了一个良好的平台^[2-3]。CSNS由一台80 MeV负氢直线加速器、一台1.6 GeV快循环质子同步加速器、两条束流输运线, 一个靶站和3台谱仪及相应的配套设施组成。2017年8月底, CSNS首次打靶成功获得中子束流后, 进入试运行阶段。2017年11月1日, CSNS开始加速器、靶站、谱仪首次联合调试, 三台谱仪均成功地获得在线中子信号。

中子小角散射(SANS)谱仪是CSNS首期建设的三台谱仪之一, 用于探测物质体系在1~100 nm尺度内的微观和介观结构, 主要应用范围包含材料、生物、化学、物理和地质等学科, 可服务于国家能源、环境、生

物和新材料等诸多高科技研发领域^[4]。SANS实验方法为: 脉冲中子束通过中子导管入射到样品上, 经样品散射后被探测器所探测, 通过分析散射图样可得到样品内部结构的信息, 如颗粒形状、大小和密度等结构信息^[5-7]。SANS探测器要求有足够大的探测面积、高的中子探测效率和较好的空间分辨率。为了减少透过样品后的中子在空气中的杂散射, 探测器放置在真空腔中。此外, 为了得到不同的散射角度范围, 探测器需在真空腔内前后移动。根据SANS的应用需求, 确定SANS探测器的主要参数要求如下:

- 有效面积: 1 m×1 m;
- 波长范围: 0.4~12 Å;
- 探测效率: >50%@2.0 Å;
- 空间分辨率: 1 cm×2.54 cm;
- 单管最大计数率: 10 kHz;
- 移动方式: 可移动;
- 工作环境: 低真空, 真空度约10 Pa。

根据设计要求, SANS探测器采用120只8 mm直径、有效长度1000 mm的位置灵敏³He管, 组成有效

收稿日期: 2018-09-19; 修改日期: 2019-02-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(11635012, 11775243); 博士后创新人才支持计划项目(1IBX20170024545), 广东省自然科学基金项目(2017A030313027, 2015A030310006); 中国科学院科研装备研制项目(YZ201512)

作者简介: 周晓娟(1990-), 女, 湖南邵阳人, 在站博士后, 从事核科学与技术研究; E-mail: xjzhou@ihep.ac.cn

† 通信作者: 孙志嘉, E-mail: sunzj@ihep.ac.cn.

面积 1000 mm(X)×1020 mm(Y) 的二维探测器阵列。尽管目前 ³He 气体成本高昂^[8]，但 ³He 管探测器因其优越的性能(热中子探测效率高、位置分辨好、n-γ 鉴别能力强、抗辐射性能好)，仍然是发展 SANS 的理想探测器^[9-11]。另外，相较于大面积高压 ³He-MWPC，³He 管阵列便于安装与维护，可以随时很快地更换其中一路，避免了 MWPC 断一根丝造成整个探测器坏掉的风险，较好地满足中子谱仪长期开放运行，维护方便的要求。

SANS 探测器 ³He 管阵列分为 10 个模块，每一个模块包括 12 只 ³He 管及其对应的读出电子学和数据获取系统，模块间功能完全独立。探测器通过导轨安装到真空散射腔内(真空度~10 Pa)，散射腔侧面中间开口一大法兰，用于日常维护人员和设备出入。

2 ³He 管探测器设计与选型

³He 管探测器的探测原理为：中子与 ³He 反应产生次级带电粒子(见方程(1))，通过探测产生的次级带电粒子 p 和 T 来确定中子的入射位置和入射时间。³He 管对次级带电粒子的探测效率近似 100%，因此 ³He 管的中子探测效率可认为等于 ³He 气体对中子的转换效率。



³He 管为圆柱型管，中子垂直入射时，不同径向位置处的中子转换效率不同，图 1 为管壁厚 0.25 mm、管外直径 8 mm ³He 管的中子转换效率的径向分布，分别对应 1.8、4.12 和 6.11 Å 三种波长中子在 10、15 和 20 atm (1 atm=1.01×10⁵ Pa) ³He 气压下的径向转换效率分布。由图 1 可知，气压越高，波长越长，转换效率曲线顶部越趋于平缓，即两端挨近管壁处的死区越少。对于波长 4.12 Å 中子，气压 10 atm 转换效率 80% 时所对应的有效宽度约 5 mm，气压 20 atm 转换效率 80% 时所对应的有效宽度约 7 mm。

对于单根 ³He 管，探测器的平均效率($\bar{\eta}$)具有直观意义，表征了单位入射进入探测器灵敏体积内中子引起的信号数目，平均探测效率($\bar{\eta}$)可用下列方程计算：

$$\bar{\eta} = \frac{\int_{-r}^r \eta(x) dx}{2r} = \frac{\int_0^r \eta(x) dx}{r} \quad (2)$$

其中： $\eta(x)$ 为径向位置 x 处的中子探测效率； r 为 ³He 管内部半径。

图 2 为根据式(2)得到的平均探测效率与波长的关系曲线，分别对应波长 1~10 Å 和 0.1~100 Å，可以看出，对于 4 Å 以上的长波长中子，15 atm 已经趋于饱和，再增加气压对效率增加贡献很少，但对于短波长中子，增加气压仍然是最直接提高效率的方法。

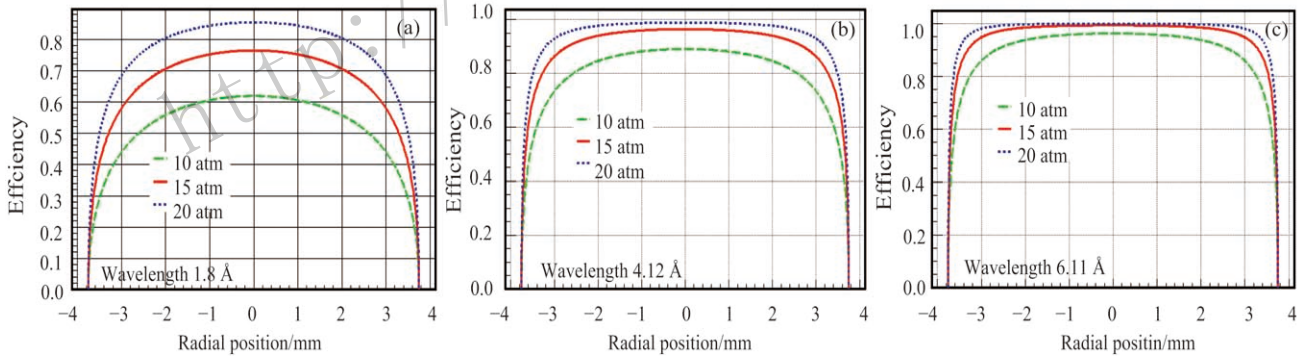


图 1 (在线彩图) 径向效率分布

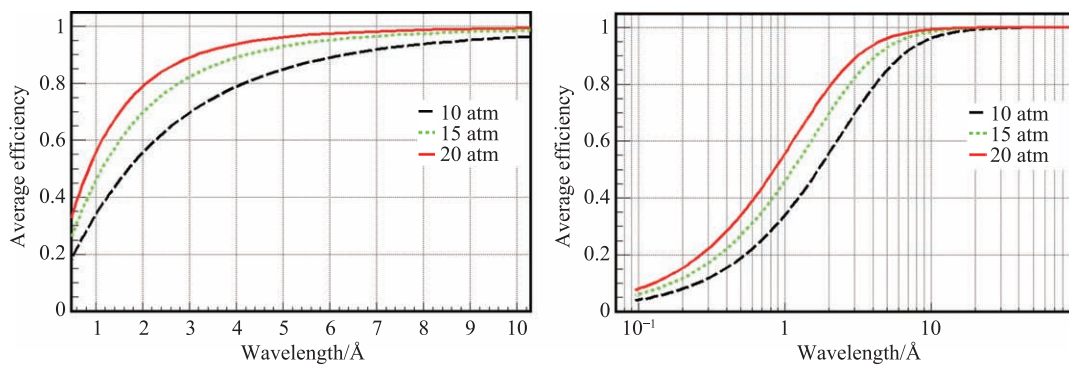


图 2 (在线彩图) 平均效率与波长关系

根据 SANS 的物理要求, 选用美国 LND 公司生产的 8 mm 直径位置灵敏 ^3He 管, 有效长度为 1000 mm, 气压 20 atm, 管壳材料为不锈钢, 壁厚 0.38 mm, 阳极丝为丝径 13 μm 的镍铬合金, 电阻率约为 7.8 k Ω/m 。

3 SANS 谱仪探测器研制

SANS 探测器研制过程中的关键技术难点是: 真空环境下使用、谱仪现场安装空间有限和 ^3He 管安装要求高, 接下来分别介绍。

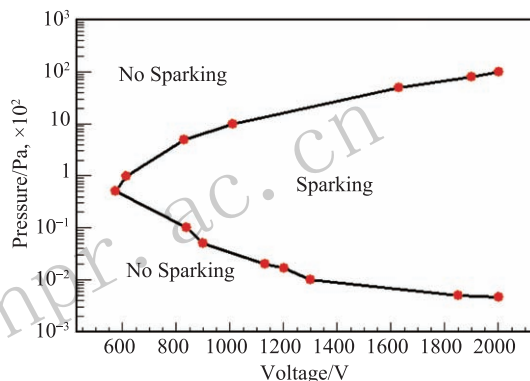
3.1 高压打火实验

SANS ^3He 管探测器安装在真空散射腔中, 真空度约为 10 Pa。若 ^3He 管的高压引出线头直接暴露在真

空中, 可能会造成高压打火, 故在进行探测器机械设计前, 首先进行真空高压打火实验, 为机械设计提供参考。将高压线缆一端与 MHV 高压接头焊接, 另一端直接裸露在真空实验腔体内 (图 3(a)), 逐步增加电压, 测试不同气压下的电流值。考虑正常工作下探测器的输出电流及前放等电子学的工作电流, 认为电流大于 1 μA 即发生打火, 测试结果如图 3(b) 所示。从图中可以看出, 当真空度为 10 Pa 时, 电压大于 800 V 就会出现高压打火现象。 ^3He 管探测器正常工作电压大于 1400 V, 所以 ^3He 管的高压引出线不能直接暴露在真空中, 为此我们专门设计了保护接头焊接在 ^3He 管两端, 使高压引出线直接进入密封腔内, 与真空环境隔绝。



(a) 真空实验腔



(b) 试验测试结果

图 3 (在线彩图) 高压线缆真空打火实验

3.2 SANS 探测器结构设计

SANS 探测器的 ^3He 管通过高精度探测器支架固定, 紧密排列组成二维探测器阵列。探测器支架后设计了一个回字形铝密封腔体, ^3He 管通过保护接头以及铜过渡接头与密封腔体相连, 同时 ^3He 管的高压引出线通过以上接头直接进入密封腔体内。探测器的读出电子学通道数较多, 将读出电子学放置在密封腔体内, 避免了在散射腔体上安装太多的真空过渡件, 从密封腔体内引出的线缆也大大减少。密封腔体与外界大气相通, 解决了真空高压打火与散热问题。探测器通过导轨安装到 SANS 真空散射腔内。为了便于安装和调试, 在探测器支架上设计了 1 个左右调节机构和 4 个可升降的地脚组成高度调节机构, 如图 4 所示。探测器整体外观尺寸 (含调节机构) 为 1300 mm (宽) \times 1420 mm (高) \times 1000 mm (深), 中心距底部高度 820 mm, 总重量 800 kg, 由中国商飞上海飞机制造有限公司制造。

3.3 探测器组装

^3He 管安装前首先进行高压保护接头的焊接。焊接

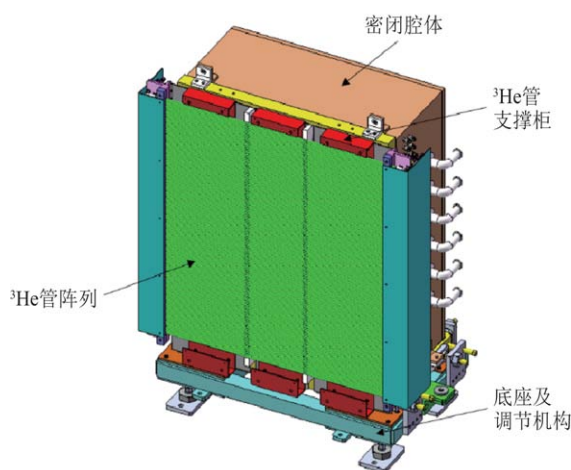


图 4 (在线彩图) 探测器机械设计

采用世伟洛克的管道自动焊机, 焊接过程由电脑控制, 能够精确控制焊接温度小于 50 $^{\circ}\text{C}$ 。此外, 为了提高焊接精度, 专门设计焊接平台, 焊接直线度小于 0.2 mm。不同 ^3He 管的接头焊有不同长度的不锈钢管以使 ^3He 管安装时的间隙较小。焊接完成后, 用氦质谱检漏仪对焊缝进行检漏测试, 漏率测试结果见图 5, 其中 A、

B 端分别代表 ^3He 管两端, 所有单管漏率测试结果好于 $10^{-9} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 。

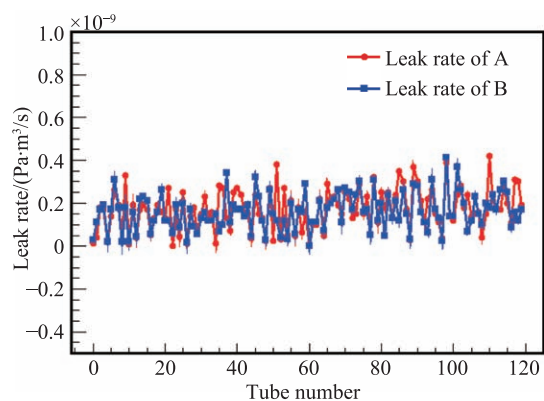


图 5 (在线彩图) 120 根 ^3He 管漏率测试结果

安装时 ^3He 管高压引出线依次穿过保护接头、铜套管后进入电子学密闭腔体。 ^3He 管安装要求高, 安装过

程中容许形变小于 0.3 mm , 同时要求 ^3He 管与卡槽之间贴合度好、相邻 ^3He 管之间间隙均匀, 且受力尽量小。每根 ^3He 管安装完后, 均需检查安装效果, 同时对其进行电阻测试和高压漏电流测试, 确保 ^3He 管无损坏。

为了检测探测器整体的密封性, ^3He 管安装完后, 用氦质谱仪对其进行整体检漏: 用塑料袋将探测器整体罩住, 往塑料袋里面充满氦气, 观察氦质谱仪上漏率的变化, 测试结果显示探测器整体漏率好于 $2.0 \times 10^{-7} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$, 满足设计要求。

^3He 管阵列组装完成之后, 在引出的高压线末端焊接上易于插拔的高压接头, 便于与读出电子学的连接。读出电子学系统安装在密闭腔内专门设计的安装支架上, 探测器组装完成后如图 6 所示。组装完成的探测器通过专门设计的吊装小车进行谱仪现场安装, 安装完成的谱仪照片见图 7 所示。

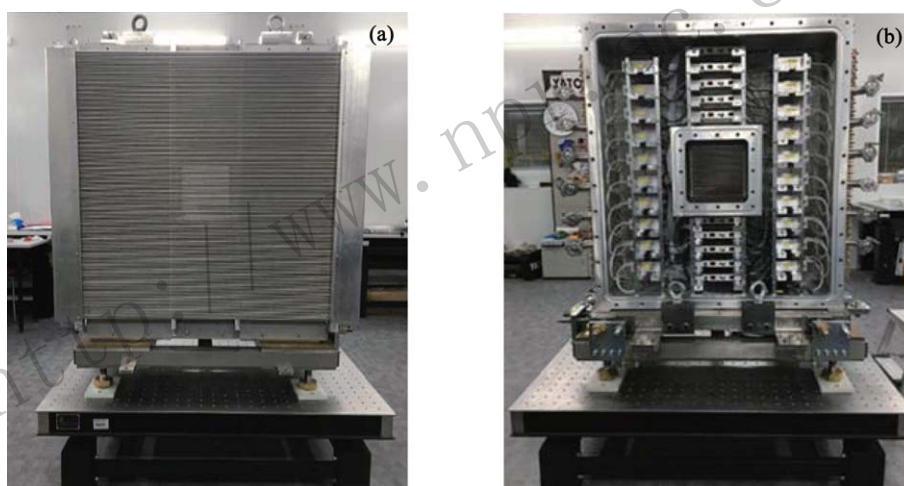


图 6 (在线彩图) 组装完成的 SANS 探测器正面 (a) 及反面 (b)

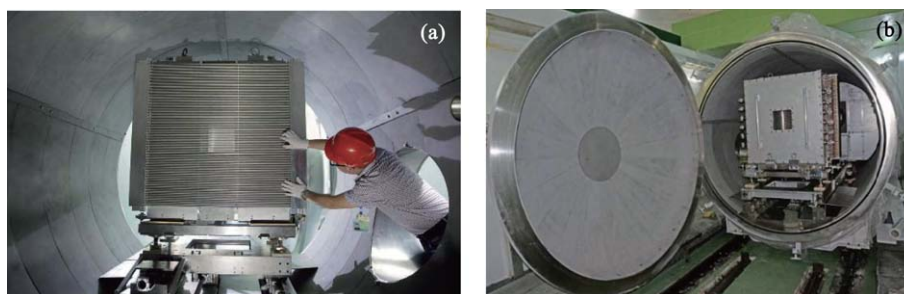


图 7 (在线彩图) 现场安装的探测器正面 (a) 及背面 (b)

3.4 读出电子学系统

SANS ^3He 管探测器读出电子学和数据获取由 CSNS 电子学组自主研发。如图 8 所示, 电子学系统由前置放大器、数据获取电路和 T0 控制板组成, 请

参见文献[12]。中子击中 ^3He 管后产生的脉冲信号被前置放大器获取, 经过模数转换后进入 FPGA 进行信号甄别与初步计算, 然后通过光纤传输至 DAQ 系统进行下一步的解析与传输。T0 控制板主要用于时间信号的测量, 使得 FPGA 数据获取板的时间信息与整个谱仪

的时间同步。电子学的冷却使用经过过滤的干燥压缩空气，在电子学密闭腔体里的进气口和出气口各安装了一个温度传感器和一个压力传感器用于实时监控密闭腔体里的温度和压力。

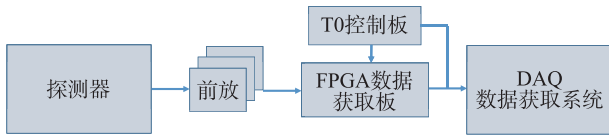


图 8 (在线彩图) SANS 探测器读出电子学框图

4 探测器关键性能指标测试

根据谱仪对探测器的性能指标要求，SANS探测器的主要测试指标包括探测效率和空间分辨率，单独组装了³He管探测器测试模块在CSNS 20号束线上进行了测试。

4.1 探测效率测试

探测器探测效率测试方法如下：通过单色器选取单色中子，分别测量8 mm直径³He管探测器与标准³He管(中心处中子探测效率几乎为100%)中心处的计数，扣除本底并通过低气压束流监测器的计数进行归一，两者的比值即为中子探测效率，测试原理图如图9(a)所示。图9(b)为测试现场照片，测试时在探测器前放置一块开有20 mm×2 mm狭缝的屏蔽板限束，分别测量了2 Å和2.4 Å波长的单色中子，其探测效率分别达到了(81±2)%和(86±2)%，优于设计指标(> 50%)，其中测量值的不确定度±2%来源于中子波长展宽(±0.5%)、狭缝宽度(±0.5%)以及³He管探测器壁厚吸收(±1%)等因素影响。图10为探测效率随波长变化的理论计算曲线(蓝色)和测量值(红色)的对比，结果显示，实际测量值略低于理论值。

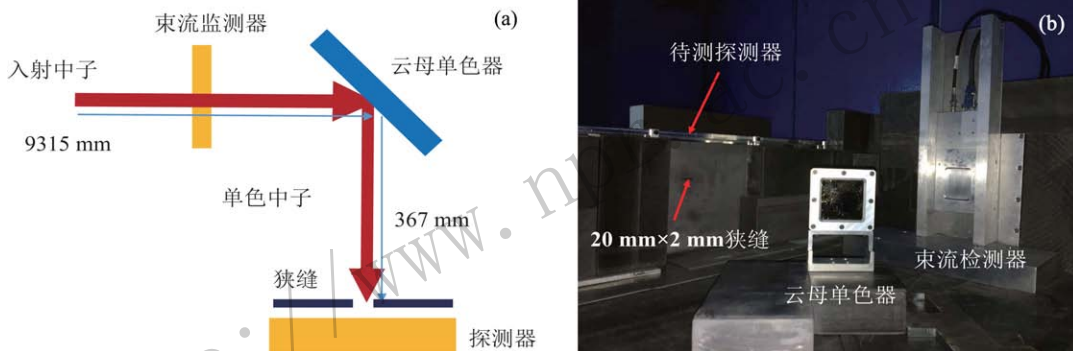


图 9 (在线彩图) 测试原理图 (a) 及现场测试装置照片 (b)

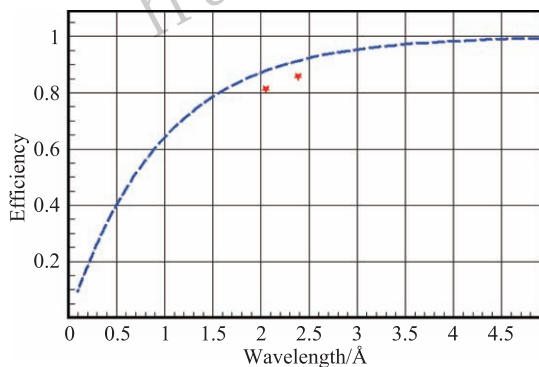


图 10 (在线彩图) 探测效率随波长理论计算曲线(蓝色)与测量值(红色)对比

4.2 探测器空间分辨测试

探测器空间分辨测试方法如下：将探测器入射端面放置在与束流方向垂直的位置，同时在探测器前放置一块2 mm厚镉和7 mm厚硼铝合金板组成的屏蔽板(中心处开有宽1 mm的狭缝)，将狭缝位置对准束流，由电子学与数据获取系统获得中子信号数据，利用ROOT

程序对数据进行处理得到狭缝位置谱，再通过 Gauss 拟合得到³He管沿丝方向的空间分辨率。图11为测试原理图，图12为³He管沿丝方向位置谱，拟合得到位置分辨率为FWHM=Sigma×2.35=(0.90±0.01)cm，误差为统计误差。

垂直于³He管方向的空间分辨由相邻³He管的间距决定，根据³He管探测器测试模块的安装，该方向的位置分辨率为0.80 cm，即探测器空间分辨为(0.90±0.01)cm×0.80 cm，优于设计指标(<1.0 cm×2.54 cm)。

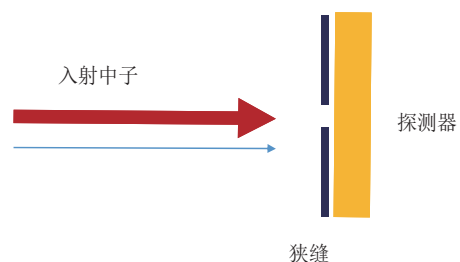


图 11 (在线彩图) 空间分辨率测试原理图

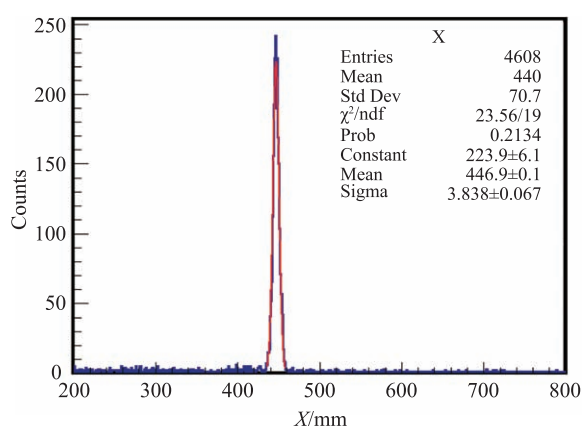


图 12 (在线彩图) ^3He 管沿丝方向的空间分辨率

5 总结与展望

结合小角中子散射谱仪的需求, 自主设计和研制了 CSNS 的 SANS 探测器, 完成了 ^3He 管的选型、探测器的机械设计与安装等工作, 解决了真空环境使用、有限空间安装和高精度的 ^3He 管安装等关键技术难点。此外, 对 SANS 探测器的探测效率、空间分辨进行了测试, 测试结果表明探测效率大于 50%(@2 Å), 空间分辨率好于 10 mm(FWHM), 均达到并优于设计指标, 满足了谱仪的使用要求, 目前探测器运行稳定。

由于探测器工作在真空环境下, 需要探测器有较好的散热能力, 尤其在长期运行下要求有较低且稳定的温度环境, 因此对探测器的散热与降温能力可以进一步优化。

致谢 在 SANS 探测器研制过程中, 感谢中国商飞上海飞机制造有限公司在探测器机械设计、加工方面的支持。

参考文献:

- [1] WANG Fangwei, YAN Qiwei, LIANG Tianjiao, *et al.* *Physics*, 2005, **34**(10): 731.
- [2] CHEN Hesheng. *Modern Physics*, 2016, **28**(1): 3.
- [3] WEI Jie. *Modern Physics*, 2007, **19**(6): 22.
- [4] TAO Juzhou. *Modern Physics*, 2016, **28**(1): 18.
- [5] BLAZEK J, GILBERT E P. *Carbohydrate Polymers*, 2011, **85**(2): 281.
- [6] MELNICHENKO Y B, WIGNALL G D. *Journal of Applied Physics*, 2007, **102**: 021101.
- [7] SPERLING L H. *Abstracts of Papers of the American Chemical Society*, 1988, **196**: 34.
- [8] SHEA D A. Helium-3 Shortage: Supply, Demand, and Options for Congress[C]. Congressional Research Service, Library of Congress, 2010.
- [9] BERRY K D, BAILEY K M, BEAL J, *et al.* *Nucl Instr and Meth A*, 2012, **693**: 179.
- [10] DUXBURY D, HEENAN R, MCPHAIL D, *et al.* *Journal of Instrumentation*, 2014, **9**(12): C12051.
- [11] DUXBURY D, KHALYAVIN D, MANUEL P, *et al.* *Journal of Instrumentation*, 2014, **9**: C12008.
- [12] LUO Hong ZHAO Yubin, XIAO Liang, *et al.* Test and Analysis of SANS Readout Electronics[C]. First Annual Conference of CSNS, Huizhou, 2018.09. (in Chinese)
(骆宏, 赵豫斌, 肖亮, 等. SANS读出电子学的测试分析[C]. 中国散裂中子源首届年会, 惠州, 2018年9月.)

Small Angle Neutron Scattering Spectrometer Detector of China Spallation Neutron Source

ZHOU Xiaojuan^{1,2,3,4}, ZHOU Jianrong^{1,2,4}, TENG Haiyun^{1,2,4}, JIANG Xingfen^{1,2,3,4}, XU Hong^{1,2}, XIA Yuanguang^{1,2}, LUO Hong^{1,2,4}, XIAO Liang^{1,2,4}, TAN Yingying^{1,2}, ZHU Lin^{1,2,3}, YANG Guian^{1,2,4}, ZHAO Yubin^{1,2,4}, ZHANG Hongyu^{1,2,4}, CHEN Yuanbo^{1,2,4}, SUN Zhijia^{1,2,4,†}

(1. Dongguan neutron science center, Dongguan 523803, Guangdong, China;

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

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

4. State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Beijing 100049, China)

Abstract: The detector of SANS is one of the key instruments for Small Angle Neutron Scattering (SANS) Spectrometer. It needs large areas of detection, high efficiencies of detection and high spatial resolutions. It is also required to be able to work stably and move forward and backward in a vacuum tube. Two-dimensional detector array of an effective area of 1 000 mm (X) \times 1 020 mm (Y) is constructed using 120 position-sensitive ^3He tubes of 8 mm in diameter. The SANS detector array is divided into 10 modules, each of which is completely independent and includes 12 ^3He tubes and corresponding readout electronics and data acquisition systems. The readout electronics located in the back of the detector is developed by CSNS independently. It takes 3 years in total since the detector of SANS was designed, selected, tested and installed. The experimental result of neutron beams shows that the detection efficiency of the detector is more than 50% (@2 Å) and the spatial resolution of the detector is below 10 mm (FWHM). The performances fully meets the requirements of designs. The detector is working at the SANS of CSNS now.

Key words: China Spallation Neutron Source; small angle scattering spectrometer; ^3He tube detector; detection efficiency; spatial resolution

Received date: 19 Sep. 2018; **Revised date:** 2 Feb. 2019

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11635012,11775243); Postdoctoral Innovative Talent Support Program(1IBX20170024545); Natural Science Foundation of Guangdong Province (2017A030313027); Scientific Research Equipment Development Project of Chinese Academy of Sciences (YZ201512)

† **Corresponding author:** SUN Zhijia, E-mail: sunzj@ihep.ac.cn.