

用于中国散裂中子源多功能反射谱仪的高气压多丝正比室探测器的研制

温志文 祁辉荣 张余炼 王海云 刘凌 王艳凤 张建 李玉红 孙志嘉

Development of high-pressure multi-wire proportional chamber neutron detector for the China Spallation Neutron Source multipurpose reflectometer

Wen Zhi-Wen Qi Hui-Rong Zhang Yu-Lian Wang Hai-Yun Liu Ling Wang Yan-Feng Zhang Jian Li Yu-Hong Sun Zhi-Jia

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 67, 072901 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20172618

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172618>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于复合结构的气体电子倍增器增益模拟和实验研究](#)

Measurement and simulation of the hybrid structure gaseous detector gain

物理学报.2017, 66(14): 142901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.142901>

[二维多丝室探测器读出方法的优化](#)

Readout method for two-dimensional multi-wire proportional chamber

物理学报.2017, 66(7): 072901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.072901>

[基于阻性阳极读出方法的气体电子倍增器二维成像性能](#)

Study of the two dimensional imaging performance for the gas electron multiplier using the resistive anode readout method

物理学报.2017, 66(7): 072902 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.072902>

[一维丝室气体探测器衍射像差的修正方法研究](#)

Modified method for diffraction aberration of one-dimensional wire chamber

物理学报.2015, 64(8): 082901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.082901>

[高增益型气体电子倍增微网结构探测器的性能研究](#)

Study on the performance of a high-gain gas electron multiplier-MicroMegas chamber

物理学报.2013, 62(12): 122901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.122901>

用于中国散裂中子源多功能反射谱仪的高压多丝正比室探测器的研制*

温志文¹⁾²⁾³⁾ 祁辉荣^{2)3)†} 张余炼¹⁾²⁾³⁾ 王海云²⁾³⁾⁴⁾ 刘凌¹⁾²⁾³⁾
王艳凤²⁾³⁾ 张建²⁾³⁾ 李玉红¹⁾ 孙志嘉²⁾³⁾

1)(兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000)

2)(核探测与核电子学国家重点实验室, 北京 100049)

3)(中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

4)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2017年12月8日收到; 2018年1月19日收到修改稿)

中国散裂中子源需要建设一台多功能反射谱仪中子探测器, 满足在10年运行期间内, 50%(@2 Å)以上的探测效率、好于2 mm的二维位置分辨、200 mm × 200 mm的灵敏面积、3倍的n/γ分辨能力及良好的二维成像性能. 基于此要求, 探测器因此采用基于高压³He气体的多丝正比室, 并以满足反射谱仪的探测效率、位置分辨、长期稳定工作和n/γ分辨能力为目标进行探测器的设计. 本文经过模拟和实验计算得出: 以9 mm厚的铝合金入射窗、铝丝密封的高压腔体和6 bar ³He+2.5 bar C₃H₈的工作气体的设计, 可满足探测器对2 Å中子10年运行期间内54%以上的探测效率要求; 探测器对中子的位置分辨可达到1.4 mm左右; 设计的气体净化系统, 拥有2 L/min的气流速度可有效去除探测器内的负电性杂质气体, 气体循环净化后可提高探测器约27%的气体增益, 保证探测器长期稳定的运行; 通过对²⁵²Cf中子源的能谱测量和成像测量, 得出探测器的n/γ分辨能力在5倍以上和均匀的成像结果. 研制的探测器满足反射谱仪需求, 并已在中国散裂中子源反射谱仪靶站就位联调.

关键词: 多丝正比室, 探测器效率, 位置分辨, n/γ分辨

PACS: 29.40.Cs, 29.40.Gx

DOI: 10.7498/aps.67.20172618

1 引言

中国散裂中子源^[1-4]是国内第一座散裂中子源装置, 提供 $2.5 \times 10^{16}/\text{cm}^2/\text{s}$ 通量的脉冲中子束流, 在广东东莞完成建设, 于2017年11月份打靶束流测试中获得25 Hz, 10 kW的质子束流, 进入了中子谱仪的联调和验收阶段. 目前设计的中子谱仪共建设了三条, 包括小角散射谱仪、高通量粉末衍射仪和多功能反射谱仪. 其中, 中子反射谱仪主要目标为测量薄膜样品的厚度信息、散射长度密度分布、样品表面和界面的粗糙度信息^[5,6]等. 采用中

子反射原理, 测量中子的散射矢量 Q 值和反射率, 分析两者的关系曲线, 得到样品的微观结构信息. 对于镜面中子反射, 其散射矢量 $Q = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \theta$ (λ 为中子的波长, θ 为入射中子与样品平面的夹角), 方向垂直于样品表面. 因此反射谱仪探测器需要测量得到反射中子的强度、能量和位置信息, 来实现反射谱仪的目标. 中国散裂中子源多功能反射谱仪的结构示意图见图1, 其中样品至探测器中心的距离约为2 m, 200 mm × 200 mm的有效探测面积可满足约5.8°范围内的反射中子探测. 中子反射谱仪探测器除了需要探测镜面反射的中子, 还需要测

* 国家自然科学基金(批准号: 11675197, 11775242)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: qjhr@ihep.ac.cn

量漫反射和掠入衍射的中子, 因此反射谱仪探测器需要 2 mm 左右的二维位置分辨来区分镜面反射和漫反射的中子 [7-9]. 探测器的探测效率决定对样品反射率的测量精度, 因此中子反射谱仪要求设计的探测器对 2 Å 中子的探测效率通常要满足 50%

以上. 由于反射谱仪安装的实验地点会存在 γ 射线本底, 因此要求探测器具有较高的 n/γ 的分辨能力. 由于谱仪运行周期的需求, 应用在散裂中子源反射谱仪工程项目中的探测器必须要保持长期的稳定性能.

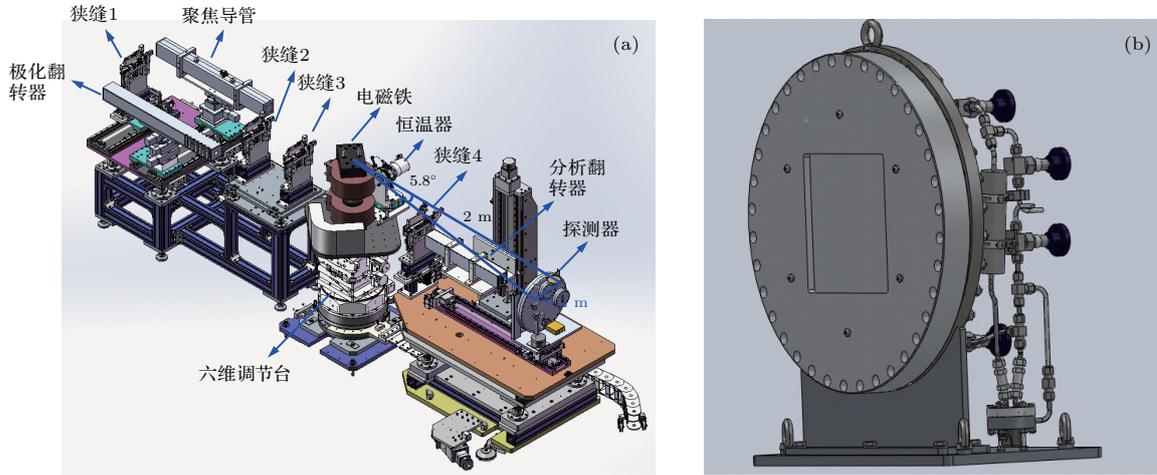


图 1 (a) 多功能反射谱仪的结构示意图; (b) 高气压 MWPCs 探测器结构示意图

Fig. 1. (a) The schematic diagram of the multipurpose reflectometer; (b) the high pressure MWPCs neutron detector.

根据中子反射谱仪的需求, 中国散裂中子源多功能反射谱仪探测器所需参数如表 1 所列. 依据参数要求进行选择和设计, 采用具有较高的探测效率、优越的位置分辨、易于大面积制作和长期稳定工作的高气压 ^3He 气体的多丝正比室 (multi-wire proportional chambers, MWPCs) 探测器 [10,11]. 高气压 MWPCs 探测器如图 1 (b) 所示, 主要包括高气压腔体、气体净化系统、工作气体、内部丝室结构、支撑平台和气路系统等. 本文将根据探测器的探测效率要求, 主要讨论探测器高气压腔体的设计和工作气体 ^3He 气压的选择; 根据探测器的位置分辨要求, 实验测量设计的 MWPCs 探测器内部丝结

构的本征位置分辨和通过模拟计算选择探测器阻止气体的种类和气压; 为了保持探测器的长期稳定工作, 研制一套气体净化系统, 通过对探测器工作气体净化前后的气体增益测量, 判断对影响探测器稳定性能的杂质气体是否有效去除; 根据探测器的 n/γ 的分辨能力要求, 采用 ^{252}Cf 中子源初步测量了探测器的计数坪区, 在坪区电压内的 n/γ 分辨能力和二维成像性能.

2 探测器设计

2.1 探测器效率

中国散裂中子源多功能反射谱仪对中子的探测器效率要求是 10 年内保持 50% (@2 Å) 以上. 基于高气压 ^3He 气体的 MWPCs 探测器对中子的探测效率主要由探测器高气压腔体入射窗对中子的透射率、高气压腔体的气密性、工作气体的厚度和工作气体 ^3He 的气压决定, 以下将分别讨论这四个决定因素的设计.

探测器的漂移电极是以高气压腔体入射窗的内表面为基底安装的, 入射窗在高气压条件下的变形会导致探测器的气体增益和探测器效率不一致

表 1 多功能反射谱仪探测器性能指标

Table 1. The requirements of the 2D position resolution neutron detector.

具体参数	参数要求
有效面积	200 mm × 200 mm
探测效率	50% (@2 Å)
位置分辨	好于 2 mm
稳定工作时间	约 10 年
n/γ 分辨能力	3(n/γ 峰值位比)

性明显. 因此漂移电极的平坦度要求小于探测器阳极到漂移电极间距的百分之一^[12]. 探测器的入射窗材料选用具有较高强度的7075铝合金, 材料成分为: 0.4%Si, 0.5%Fe, 1.2%—2.0%Cu, 0.3%Mn, 2.1%—2.9%Mg, 0.18%—0.28%Cr, 5.1%—6.1%Zn, 0.2%Ti, 88.67%Al. 表2为ANSYS和MCNP模拟

计算不同厚度入射窗在8.5 atm气压条件下的最大变形量和热中子穿过入射窗后散射角小于0.1°的百分比. 根据模拟计算结果, 为了满足入射窗的最大变形量小于0.3 mm以及90%以上的热中子有效透射率, 探测器的入射窗厚度设计为9 mm. 因此小于0.1°的热中子透射率达到90.26%.

表2 不同厚度7075铝合金入射窗在8.5 bar的变形量和对热中子小于0.1°的透射率

Table 2. The deformation and the less than 0.1 degrees of thermal neutrons transmittance for 7075 aluminum alloy at 8.5 bar pressure.

入射窗厚度/mm	7	9	12	14	16
最大变形量/mm	0.42	0.27	0.19	0.17	0.15
热中子透射率(<0.1°)	92.58%	90.26%	87.23%	85.26%	83.38%

工作气体厚度也是决定探测器对 neutron 探测效率的关键因素之一. 增加探测器的工作气体厚度可以提高探测器的探测效率, 但对于电极为平面的MWPCs探测器, 斜入射的中子会引起更大像差, 即中子的入射位置与探测器测量到的位置之差. 为了限制像差的大小, 探测器需要选择一个合理的气体厚度. 可模拟计算出: 在探测器腔体能够承受的气压(8.5 bar)范围内, 15 mm的气体厚度可满足探测器50%以上的探测效率; 且15 mm的气体厚度引起的像差小于探测器的位置分辨. 因此, 探测器的气体厚度为15 mm^[13,14].

以上. 从图2可以看出4 bar ³He 气体可满足56%以上的中子探测效率, 因此设计的高气压腔体的密封性能需满足10年内探测器内工作气体³He的气压为4 bar以上.

探测器的前端是采用对中子透射率大的7075铝合金材料, 后端为了便于焊接密封, 采用不锈钢材料. 铝合金与不锈钢组成的探测器腔体, 高气压条件下保证长期良好的气密性是比较困难的. 之前制作的探测器高气压腔体采用双橡胶O圈进行密封, 实验记录探测器腔体从最初的7.4 bar气压, 经过4年的时间气压降至6.2 bar, 可估算双橡胶O圈密封的腔体10年内气体泄漏量为2.64 bar. 探测器的工作气体除了有³He气体外, 还有限制次级离子射程的阻止气体, 第3部分将介绍该阻止气体为2.5 bar丙烷, 丙烷分子远大于³He分子, 可认为探测器泄露的工作气体都是³He气体. 因此10年后双橡胶O圈密封的高气压MWPCs探测器的³He气压为2.26 bar, 该气压是满足不了对2 Å中子50%以上的探测器效率要求. 目前设计的高气压腔体, 改进为直径1.6 mm的铝丝密封, 密封后的铝丝厚度压缩为0.15 mm左右. 通过高气压腔体的保压实验, 记录腔体温度和气压的变化, 得到8.6 bar ⁴He(99.999%)气体近1个月的保压记录, 如图3(a)所示. 因为⁴He分子和³He分子的大小接近, 可近似得到³He气体的漏气率. 通过测量到腔体的温度和气压的线性关系, 将保压实验记录的气压转换成相同温度下的气压值, 使用指数函数拟合相同温度条件下的相对气压变化, 如图3(b)所示, 得到设计的高气压腔体在8.6 bar初始气压条件下的漏气率,

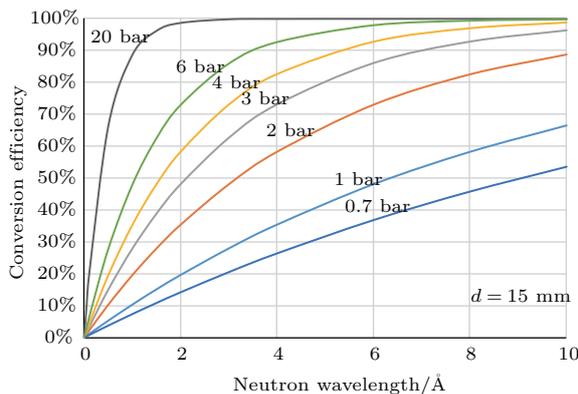


图2 不同气压³He气体对中子的探测效率(气体厚度15 mm)

Fig. 2. The detection efficiency as a function of the pressure of ³He (gas thickness =15 mm).

根据不同波长中子与³He的反应截面, 可计算出不同气压, 15 mm厚的³He气体对中子的探测效率, 如图2所示. 考虑探测器入射窗对中子的吸收和散射, ³He气体对中子的探测效率必须满足56%

见(1)式. 根据(1)和(2)式, 可计算在8.5 bar气压条件下, 设计的高气压腔体10年的气体泄漏量为1.7 bar, 远好于双橡胶O圈的密封性能. 因此, 铝丝密封的高气压腔体和6 bar ^3He +2.5 bar C_3H_8 的设计, 10年内 ^3He 的气压为4.3—6 bar, 考虑探测器入射窗对中子的吸收和散射, 探测器在10年运行时间内的探测效率约为54%—67.5%, 完全满足反射谱仪的探测效率要求. 由于二维多丝室探测

器特有的结构特性, 其在200 mm × 200 mm有效面积内保持了很好的二维同向性. 实验中采用 ^{252}Cf 中子源对探测器16个5 mm × 5 mm的区域(每次测量保持在面积中心位置)进行探测效率的测量, 得到探测器在这16个区域的探测器效率均在67%左右, 与探测器在初始气压条件下的模拟计算结果接近.

$$R = \frac{P_i}{P_0} = e^{(-2.567 \times 10^{-6} \times t - 0.001209)}, \quad (1)$$

$$\Delta P = 8.5 - 8.6 \exp \left[-2.567 \times 10^{-6} \times \left(87600 + \frac{\ln(8.5/8.6) + 0.001209}{-2.567 \times 10^{-6}} \right) - 0.001209 \right] = 1.7 \text{ bar} \quad (2)$$

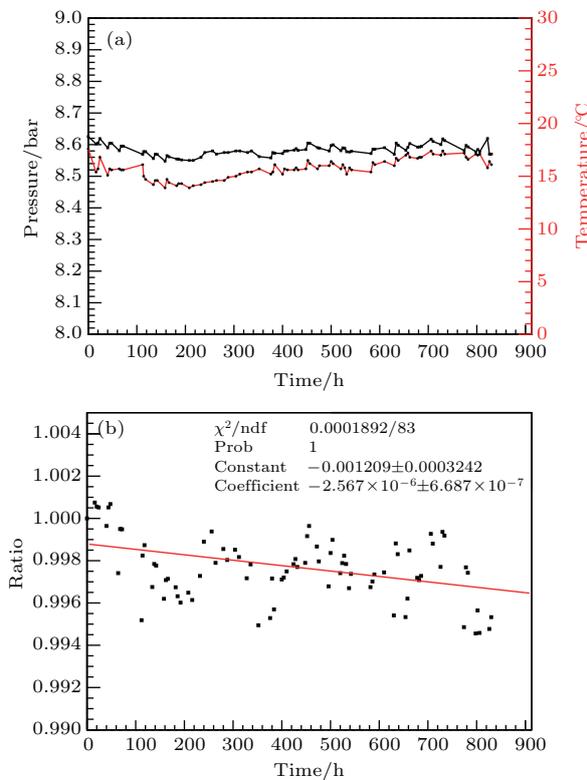


图3 (a) 腔体保压测试记录的绝压和温度的变化; (b) 同一温度条件下相对气压的变化

Fig. 3. (a) The absolute pressure and temperature as a function of the record time; (b) the relative pressure as a function of the record time.

2.2 位置分辨

中子与 ^3He 核反应产生573 keV的质子和191 keV的氚核, 两个次级离子沿相反方向运动, 产生的原初电子重心位置与中子发生核反应的位置并不相等, 两者之差由质子和氚核在探测器内的电离分布决定. 为了限制质子和氚核在探测器内的射程, 探测器的工作气体除了 ^3He 气体外, 还需要

加入对质子和氚核阻止能力强的气体. 所以探测器对中子的位置分辨主要由阻止气体和探测器的本征位置分辨决定. 下面将主要介绍阻止气体的选择和探测器的本征位置分辨测量.

表3 573 keV 质子和191 keV 氚核在1 atm 阻止气体内的射程和电离重心

Table 3. The range and the ionization center of gravity of 573 keV proton and 191 keV triton at 1atm stopping gas.

Stopping gas	Proton range/mm	Triton range/mm	COG of proton-triton pair/mm
C_3H_8	4.23	1.000	1.773
CF_4	4.12	1.620	1.533
C_4H_{10}	3.23	0.774	1.356
C_3F_8	1.85	0.709	0.695
$\text{C}_2\text{H}_4\text{F}_2$	4.14	1.23	1.652
CO_2	6.98	2.190	2.762
Ar	11.6	2.990	4.807
Xe	6.24	1.610	2.552

表3为通过SRIM^[15]模拟计算573 keV的质子和191 keV的氚核在8种阻止气体, 一个气压条件下的射程和电离重心位置(center of gravity, COG). 根据电离重心位置比较, 8种阻止气体的阻止能力依次为 $\text{C}_3\text{F}_8 > \text{C}_4\text{H}_{10} > \text{CF}_4 > \text{C}_2\text{H}_4\text{F}_2 > \text{C}_3\text{H}_8 > \text{Xe} > \text{CO}_2 > \text{Ar}$. C_3F_8 , CF_4 和 $\text{C}_2\text{H}_4\text{F}_2$ 虽然阻止能力较强, 但属于含氟负电性气体, 容易与正离子复合, 所以不考虑这三种阻止气体. 另外 C_4H_{10} 的阻止能力虽然比 C_3H_8 强, 但是 C_4H_{10} 在室温条件下, 2.1 bar即会发生液化^[16,17]. 最终选择阻止能力强且对 γ 射线不敏感的 C_3H_8 作为探测器的阻止气体. 图4(a)为SRIM计算573 keV的质子和191 keV的氚核在1 bar C_3H_8 内的电离分布, 可以看出质子的电离分布存在明显

的布拉格峰, 而氦核由于能量低没有布拉格峰, 质子末端布拉格峰的存在增加了电离重心位置与中子核反应位置的偏差.

SRIM 模拟计算 573 keV 质子和 191 keV 氚核在不同气压丙烷的射程和电离重心位置, 模拟计算结果如图 4 (b) 所示, 可以看出, 对于丙烷阻止气体, 573 keV 质子和 191 keV 氚核的电离重心约等于 0.42 倍质子的射程. 中子核反应产生的质子和氦核的运动方向是各向同性的, 因此质子和氦核电离分布导致的中子探测位置偏差为 0—0.84 倍质子的射程 [13].

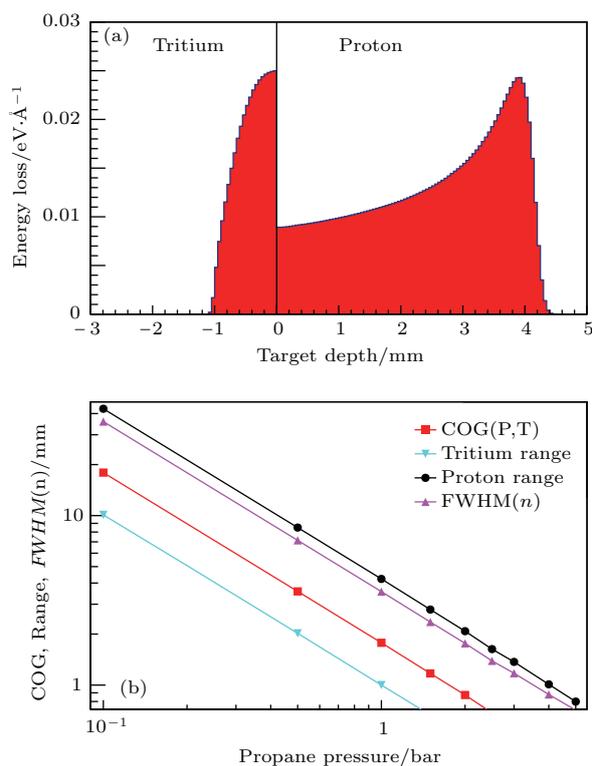


图 4 (a) 573 keV 质子和 191 keV 氚核在 1 atm C₃H₈ 内的电离分布; (b) 次级离子在不同气压丙烷的射程、产生的位置偏差和中子的位置分辨
Fig. 4. (a) The ionization distribution of the 573 keV proton and the 191 keV tritium at 1 atm propane; (b) the range, the COG and the position resolution for neutron as a function of the pressure of propane.

探测器的内部结构设计如图 5 (a) 所示, 详细设计原理可参考文献 [18]. X 射线经过 100 μm 准直狭缝后测量该结构探测器的本征位置分, 得到探测器的本征位置分辨 $FWHM_X$ 为 0.235 mm, 如图 5 (b) 所示. 然后通过 (3) 式和丙烷对质子射程的模拟结果, 可以计算出探测器对中子的位置分辨 $FWHM_n$. 图 4 (b) 可以看到不同气压丙烷对中子的位置分辨计算结果, 得出 1.8 atm 丙烷可达到

2 mm 的位置分辨的要求, 探测器实际选择的丙烷气压为 2.5 atm, 这样探测器对中子的位置分辨可以达到约 1.4 mm, 满足谱仪要求的好于 2 mm 的位置分辨.

$$FWHM_n = \sqrt{(0.84 \times R_p)^2 + (FWHM_X)^2} \quad (3)$$

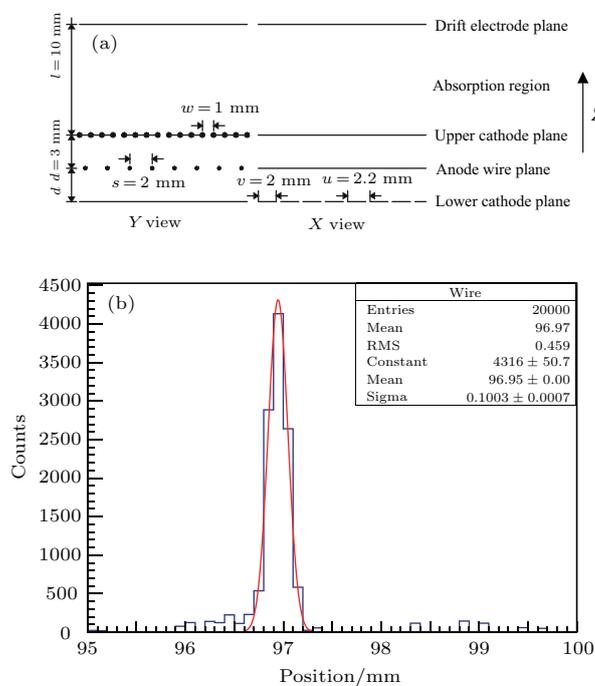


图 5 (a) MWPCs 探测器的内部结构; (b) X 射线测量探测器的本征位置分辨 ($FWHM_X = 0.1 \times 2.35$ mm)
Fig. 5. (a) The structure schematic of the MWPCs detector; (b) the position resolution for X-rays.

2.3 长期稳定工作

多功能反射谱仪探测器需要在密闭条件下长期稳定工作近 10 年之久. 探测器内部结构的组成部件, 如 PCB 板的“Outgassing”效应 [19,20], 将会带来氧气和水蒸气等杂质气体. 氧气和水蒸气因增加气体的吸附系数而降低探测器的气体增益, 其中氧气表现最为明显. 图 6 为 Garfield [21] 模拟不同含量的氧气导致气体增益降低的情况, 可以看出 300 ppm 的氧气在 3500 V 工作电压处降低约 30% 的气体增益. 在探测器的电子雪崩倍增过程中, 将引起有机气体的分解和聚合, 当聚合链足够大时将发生冷凝、扩散并吸附在探测器电极的表面, 由此带来探测器的气体增益不稳定, 漏电流增加 [22,23]. 因此, 为了保证探测器长期的稳定工作, 需要一套气体净化设备, 定期地清除以上杂质气体.

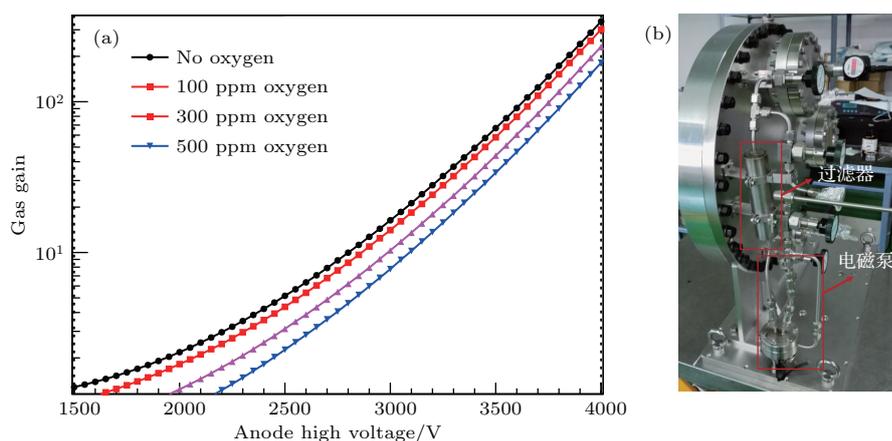


图6 (a) 不同含量的氧气对探测器增益的影响; (b) MWPCs 探测器的过滤器和电磁泵

Fig. 6. (a) The gas gain as a function of the oxygen; (b) the filter and the electromagnetic pump of the MWPCs detector.

设计的气体净化系统主要包括两个部分, 气体过滤器和驱动气体循环的电磁泵, 如图6(b)所示. 气体过滤器结构较为简单, 通过一个不锈钢圆柱形容容器装入吸收氧气、水蒸气和有机物杂质气体的材料. 吸收材料有两种: 一种是用于吸收氧气的“Ridox”材料, 它主要由99%以上的氧化铝和少于1%的铜组成; 另外一种是用于吸收属于极性分子的水蒸气和有机物杂质气体的分子筛, 选用的分子筛孔直径为3 Å, 分子筛通过库仑吸引力吸收直径小于3 Å的极性分子. 探测器工作气体的丙烷也属于极性分子, 在经过净化器会被分子筛吸收和释放, 分子筛的吸收能力与温度成反比关系, 因此在净化系统工作时, 保持环境温度变化不超过 $\pm 5^\circ\text{C}$, 使过滤器对丙烷的吸收和释放达到平衡. “Ridox”和分子筛吸收材料可进行更新, 通过在 200°C 条件下冲入95%Ar+5%H₂可释放吸收材料已吸收的杂质气体. 电磁泵的作用是在高压条件下驱动探测器内部的气体与过滤器之间循环, 结构较为复杂, 主要由一对单向阀、一对法兰、若干节波纹管、纯铁块和电磁铁吸盘等组成. 电磁泵的工作原理是通过电磁铁吸盘驱动纯铁块上下振动, 带动波纹管上下振动, 从而改变波纹管内部的气压, 打开和关闭与波纹管连接的单向阀, 单向阀使探测器的气体单向循环流动, 最后达到探测器的气体净化目的. 电磁泵设计成功的关键在于波纹管振动产生的压差能否打开单向阀. (4)式为计算波纹管振动产生的最大压差公式, 式中 ΔP_{\max} 和 P_0 分别为波纹管振动产生的最大压差和波纹管的初始气压, V_0 和 V_1 分

别为波纹管的初始体积和振动改变的体积. 因为电磁铁吸盘与纯铁块之间隔一个法兰, 所以电磁铁吸盘对纯铁块的吸引力因为较远的距离而有限, 因此应找到纯铁块与波纹管的共振频率, 才能在有限的吸引力下得到最大的波纹管振幅. 通过电磁泵在常压条件下的测试, 得到设计的电磁泵的共振频率为62 Hz, 电源电压为24 V. 测量到波纹管的振幅, 可以计算出在常压和8.5 bar工作气压下, 波纹管振动产生的最大压差分别为0.15 bar和1.1 bar. 采用的单向阀开启压力为0.03—0.21 bar. 通过常压条件下的实验测试, 电磁泵成功驱动气体循环流动, 气体流速达到2 L/min. 探测器的工作气压条件是8.5 bar, 波纹管振动可产生更大的压差, 因此更容易打开单向阀驱动气体循环流动. 探测器的体积约为4 L, 因此大约需要2 min可将探测器气体净化一遍.

$$\Delta P_{\max} = V_0 P_0 / (V_0 + V_1). \quad (4)$$

测量探测器工作气体经过净化前后的气体增益变化, 可验证研制的净化系统的效果. 探测器的坪区电压在3400—3600 V之间, 测量该高压区间的中子能谱, 比较中子能谱峰位的变化, 即可得到探测器相对气体增益的变化情况. 净化探测器工作气体前后, 探测器的相对气体增益变化测量结果如图7所示. 可以看出, 工作气体经过净化后, 探测器的相对气体增益在3500 V高压处, 提高了约27%. 证明研制的气体净化系统可有效地去除杂质气体.

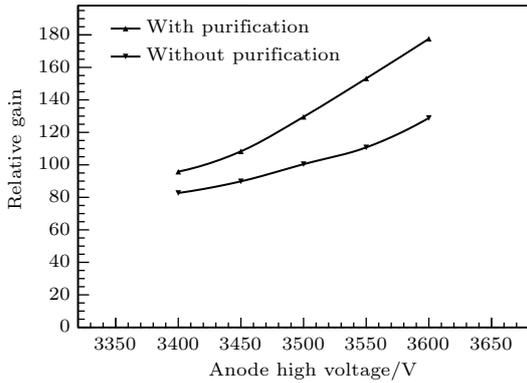


图7 净化系统工作前后探测器相对气体增益的测量结果
Fig. 7. The relative gain as a function of the anode high voltage with and without purification of the working gases.

3 初步性能测试

实验中采用²⁵²Cf中子源, 经过聚乙烯慢化后, 进入探测器. 首先测量探测器的计数坪区确定探测器的工作电压, 固定探测器阴极高压为-1800 V, 阳极高压从2900—3650 V逐渐递增测量探测器的计数率. 当阳极高压为3650 V, 探测器出现信号过大, 超出电子学测量事例的范围. 为了避免打火以

及保护探测器的安全, 没有继续增加阳极高压. 测量结果如图8(a)所示, 探测器的阳极坪区电压为3400—3600 V. 因此选择探测器的坪区电压, 阳极3500 V, 阴极-1800 V, 通过测量单个阴极层的总感应电荷来得到入射粒子的能量信息. 图8(b)为通过下阴极层的总感应电荷测量到的能谱. 为了去除本底信号的干扰, 阴极层的总感应电荷量是通过每个通道的电荷测量值减去该通道的本底值, 当该值大于某个阈值的条件下, 才累加到阴极层的总感应电荷中. 由于测量环境的 γ 本底较多而中子源强度较弱, 图8(b)测量的能谱中 γ 的计数较高, 由于中子和 γ 射线在探测器沉积的能量不一样, 还是可以明显区分出中子的能谱峰, 位于150 fC左右位置, 且中子和 γ 的峰位比值在5以上, 可以得出探测器具有较高的n/ γ 分辨能力. 根据中子核反应后次级离子产生的原初电子数约为30000个, 单个阴极层收集的感应电荷约为原初电子倍增后的总电荷量的1/2. 因此可以计算出150 fC的中子峰位对应探测器的气体增益约为62. 探测器在如此低的气体增益下, 有利于保持长期稳定的工作.

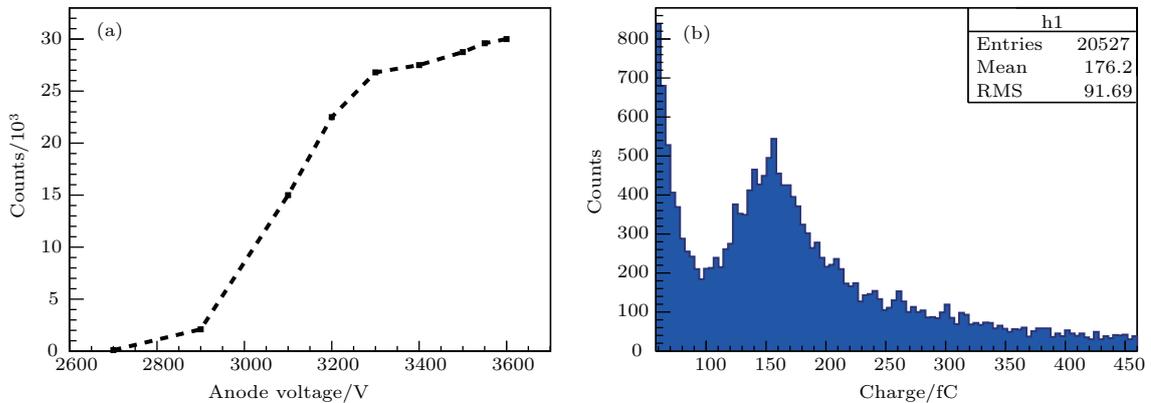


图8 探测器的计数坪曲线(a)和中子能谱测量(b)
Fig. 8. The curve of the high pressure MWPCs neutron detector (a) and neutron spectrum (b).

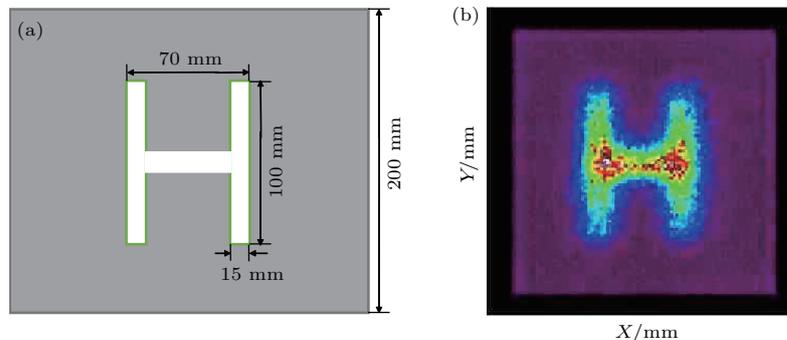


图9 “H”字母的镉板(a)和探测器的二维成像(b)
Fig. 9. A cadmium plate with a hole of the character “H” (a) and the two dimension image (b).

实验中制作一个如图 9(a) 所示的镉板, 镉板的厚度为 4 mm. 镉板放置在探测器的入射窗前进行二维成像测试, 因为测试环境中 γ 本底较高, 而中子源强度较低, 数据分析中根据图 8(b) 能谱的测试结果, 将阴极层总感应电荷量低于 100 fC 的事例剔除, 去除 γ 事例对成像的影响, 最终经过近 10 h 的成像测试结果如图 9(b), 得出均匀响应的“H”字母成像. 因为 ^{252}Cf 中子源经过慢化后, 还存在能量在 0.3—0.5 eV 之上的较多的镉上中子, 镉板对这些中子的吸收截面较低; 且中子经过聚乙烯慢化后相当于一个平面源, 成发散角分布, 难以用镉板狭缝对低强度的 ^{252}Cf 中子源进行准直测量, 所以使用的 ^{252}Cf 较难准确测出探测器对中子的位置分辨.

4 结 论

通过对探测器不同厚度铝合金入射窗的模拟计算, 9 mm 厚的入射窗设计, 可满足在 8.5 bar 气压条件下小于 0.3 mm 的变形量, 同时也可满足 90.26% 的热中子有效透射率; 根据对铝丝密封的探测器高压腔体气密性测量, 10 年减少的气体量为 1.7 bar, 因此 6 bar 的初始 ^3He 气体可满足探测器在运行时间内 54%—67.5% 全面积的探测器效率要求. 通过 X 射线对探测器进行测量, 获得的位置分辨约为 0.235 mm; 中子与 ^3He 核反应生成的次级离子, 在 2.5 bar 丙烷的阻止气体条件下产生的位置偏差约为 1.37 mm; 因此探测器对中子的位置分辨可达到 1.4 mm. 探测器设计的气体净化系统可有效地去除氧气、水蒸气和有机杂质气体等负电性杂质气体, 提高探测器约 27% 的气体增益, 保证探测器长期稳定运行. 使用 ^{252}Cf 中子源对探测器进行初步性能的测试: 由于中子与本底 γ 射线沉积的能量不一样, 中子和本底 γ 射线的峰位比在 5 倍以上, 中子和本底 γ 射线在能谱测量中很容易被区分; 对镉板的成像测量中, 获得探测器对中子源的均匀响应成像. 研制的高气压 ^3He 气体 MWPCs 探测器满足多功能反射谱仪的性能要求, 并已在中国散裂中子源靶站安装就位, 准备联调. 下一步将在在中国散裂中子源束流上实验测量和验证探测器对中子的探测效率和位置分辨.

参考文献

- [1] Zhang L Y, Jing H T, Tang J Y, Li Q, Ruan X C, Ren J, Ning C J, Yu Y J, Tan Z X, Wang P C, He Y C, Wang X Q 2018 *Appl Radiat Isotopes* **132** 212
- [2] Chen J, Kang L, Lu H L, Luo P, Wang F W, He L H 2017 *Physica B* (accepted)
- [3] Shen F, Liang T R, Yin W, Yu Q Z, Zuo T S, Yao Z E, Zhu T, Liang T J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 152801 (in Chinese) [沈飞, 梁泰然, 殷雯, 于全芝, 左太森, 姚泽恩, 朱涛, 梁天骄 2014 物理学报 **63** 152801]
- [4] Yu Q Z, Yin W, Liang T J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 052501 (in Chinese) [于全芝, 殷雯, 梁天骄 2011 物理学报 **60** 052501]
- [5] Huang C Q, Chen B, Li X X, Syromyatnikov V G, Pleshonov N K 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 364 (in Chinese) [黄朝强, 陈波, 李新喜, Syromyatnikov V G, Pleshonov N K 2008 物理学报 **57** 364]
- [6] Li T F, Chen D F, Wang H L, Sun K, Liu Y T 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7993 (in Chinese) [李天富, 陈东风, 王洪立, 孙凯, 刘蕴韬 2009 物理学报 **58** 7993]
- [7] Kampmann R, Marmotti M, Haese-Seiller M, Kudryashov V 2004 *Physica B* **350** e845
- [8] Mattauca S, Ioffe A, Lott D, Menelle A, Ott F, Medic Z 2016 *J. Phys.: Conf. Ser.* **711** 012009
- [9] Avdeev M V, Bodnarchuk V I, Lauter-Pasyuk V V, Lauter H, Aksenov V L, Yaradaikin S P, Ulyanov V A, Trounov V A, Kalinin S I 2010 *J. Phys.: Conf. Ser.* **251** 012060
- [10] Orban J, Cser L, Rosta L, Torok G, Nagy A 2011 *NIMA* **632** 124
- [11] Eijk C W 2002 *NIMA* **477** 383
- [12] Boie J R A, Fischer, Inagaki Y, Merritt F C, Okuno H, Radeka V 1982 *NIM* **200** 533
- [13] Radeka V, Schaknowski N A, Smith G C, Yu B 1998 *NIMA* **419** 642
- [14] Fried J, Harder J A, Mahler G J, Makowiecki D S, Mead J A, Radeka V, Schaknowski N A, Smith G C, Yu B 2002 *NIMA* **478** 415
- [15] S R I M, Ziegler J F, <http://www.srim.org/>[2017-12-8]
- [16] Doumas A, Smith G C 2012 *NIMA* **675** 8
- [17] Desai S S, Desai A M 2006 *NIMA* **557** 607
- [18] Wen Z W, Qi H R, Wang Y F, Sun Z J, Zhang Y L, Wang H Y, Zhang J, Ouyang Q, Chen Y B, Li Y H 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 072901 (in Chinese) [温志文, 祁辉荣, 王艳凤, 孙志嘉, 张余炼, 王海云, 张建, 欧阳群, 陈元柏, 李玉红 2017 物理学报 **66** 072901]
- [19] Abuhoza A, Schmidt H R, Biswas S, Frankenfeld U, Hehner J, Schmidt C J 2013 *NIMA* **718** 400
- [20] Bouclier R, Capeans M, Garabatos C, Sauli F, Silander F 1994 *NIMA* **350** 464
- [21] Garfield, Veenhof R, <http://garfield.web.cern.ch/garfield/> [2017-12-8]
- [22] Niebuhr C 2006 *NIMA* **566** 118
- [23] Kadyk J A 1991 *NIMA* **300** 436

Development of high-pressure multi-wire proportional chamber neutron detector for the China Spallation Neutron Source multipurpose reflectometer*

Wen Zhi-Wen¹⁾²⁾³⁾ Qi Hui-Rong^{2)3)†} Zhang Yu-Lian¹⁾²⁾³⁾ Wang Hai-Yun²⁾³⁾⁴⁾
Liu Ling¹⁾²⁾³⁾ Wang Yan-Feng²⁾³⁾ Zhang Jian²⁾³⁾ Li Yu-Hong¹⁾ Sun Zhi-Jia²⁾³⁾

1) (School of Nuclear Science and Technology, University of Lanzhou, Lanzhou 730000 China)

2) (State Key Laboratory of Particle Detection and Electronics, Beijing 100049, China)

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

4) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 8 December 2017; revised manuscript received 19 January 2018)

Abstract

As a multipurpose reflectometer device, the two-dimensional (2D) position resolution neutron detector with a 200 mm × 200 mm effective area is developed for China Spallation Neutron Source (CSNS) in Dongguang, China. Due to the requirements for the specific parameters of the multipurpose reflectometer, it should be designed to have a more than 50% (@2 Å) detection efficiency, better than 2 mm position resolution and 3 times n/γ resolution ability during the whole operation period of 10 years. The high pressure multi-wire proportional chamber (MWPC) neutron detector filling ³He gas is used as a key detector. Some simulation results and the experimental results show that the optimized thickness of the neutron entrance window should be 9 mm with using the 7075 aluminum alloy, the high pressure chamber should be sealed by the aluminous ring and a gas mixture should be filled with 6 bar ³He+2.5 bar C₃H₈. The assembled detector can achieve a more than 54% (@2 Å) detection efficiency in the normal operation.

With the 100 μm wide collimator slit, the position resolution for X-rays is about 0.235 mm. Therefore, the position resolution for neutron is about 1.4 mm when 2.5 bar propane is used as the stopping gas for proton and triton. In the chamber, the water vapor, the oxygen and the organic impurity gases will reduce the gas gain, cause the detector electrodes to break down and the detector to speed up aging. To solve the outgassing effect of the detector components and keep the stable operation, the recycled device is designed to have the purification function for the working gases. It could purify the working gas at a flow rate of 2 L/min to remove the oxygen, the water vapor and the organic impurity gases. The detector gain increases about 27% with the purification function. Finally, the n/γ resolution and 2D imaging ability of the detector are tested with the ²⁵²Cf neutron source in Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, the peak ratio of neutron to gamma is obtained to be above 5 from the energy spectra and the detector has good 2D imaging ability. The performance of the high-pressure MWPC neutron detector could meet the requirements for the multipurpose reflectometer, and the detector will be mounted in the CSNS in this year.

Keywords: multi-wire proportional chamber, detection efficiency, position resolution, n/γ resolution

PACS: 29.40.Cs, 29.40.Gx

DOI: 10.7498/aps.67.20172618

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11675197, 11775242).

† Corresponding author. E-mail: qihr@ihep.ac.cn