

不同玻璃制成的阻性板探测器性能研究

史镇玮¹ 韩 然² 陈义学¹

1 (华北电力大学 核科学与工程学院 北京 102206)

2 (北京卫星环境工程研究所 北京 100029)

摘要 阻性板探测器(Resistive Plate Counter, RPC)以其高性能、低成本及可大面积制作等特点而被推荐作为在江门的江门中微子实验(Jiangmen Underground Neutrino Observatory, JUNO)反符合探测器的方案之一。普通浮法玻璃制作的RPC在深地实验中存在易碎裂和易受潮腐蚀等问题,影响性能稳定性及寿命。利用不同性质的玻璃制作三块RPC,对这三种玻璃的特性研究发现,其具有很好的强度、耐酸碱腐蚀性以及较高的体电阻率;对三种RPC进行宇宙线探测性能测试并测量其在雪崩模式下的探测效率、单计数率和暗电流,测试结果表明,三种RPC探测效率在90%~95%之间,具有良好的性能,高电阻使RPC需要较高的电压达到效率坪区,也使其适合低本底的实验。

关键词 阻性板探测器, 宇宙线, 反符合探测器, 中微子实验

中图分类号 TL811

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.040402

Study on the performance of resistive plate counter made of different glass

SHI Zhenwei¹ HAN Ran² CHEN Yixue¹

1(School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

2(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100029, China)

Abstract Background: Resistive Plate Counter (RPC), which is of good performance at low cost and is suitable for large area production, has been proposed as the veto detector for Jiangmen Underground Neutrino Observatory (JUNO). However, RPC made of float glass is fragile and susceptible to damp and corrosion in underground experiments. **Purpose:** This study aims to improve the performance of RPC to enhance its stability and lifetime. **Methods:** Three RPCs made of three different chemically strengthened glass are tested with cosmic ray. First of all, the properties of these glass were studied to show its high-strength, corrosion-resistant, high bulk resistivity. Then the variation of detection efficiency, single counting rate and dark current curves of RPCs are verified in avalanche mode. **Results:** The test results show that the chamber's efficiency is between 90% and 95% and the single counting rate is at a relatively low level. **Conclusion:** RPCs made of chemically strengthened glass works well due to the high bulk resistivity. In order to reach plateau operation, higher voltage is required for RPC to suitable working in a very low rate background experiment.

Key words RPC, Cosmic ray, Veto, Neutrino experiment

中微子物理及暗物质的寻找是近几年科学研究的热点,这种低本底高灵敏度的探测实验,需要高

精度的反符合探测器来降低宇宙线本底。江门中微子实验^[1]作为低本底、高精度的实验,除了需要足

国家自然科学基金(No.11405056、No.11390383)资助

第一作者: 史镇玮, 男, 1989 年出生, 2013 年毕业于东华理工大学, 现为硕士研究生, 辐射防护及环境保护专业

通信作者: 韩然, E-mail: hanran@ncepu.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11405056, No.11390383)

First author: SHI Zhenwei, male, born in 1989, graduated from East China University of Technology in 2013, master student, major in radiation protection and environmental protection

Corresponding author: HAN Ran, E-mail: hanran@ncepu.edu.cn

收稿日期: 2016-01-04, 修回日期: 2016-01-27

够的屏蔽层来降低宇宙线本底, 还需要在探测器周围建立能够探测本底的反符合探测器系统, 进一步减少本底。在这种以低本底与高灵敏度为特点探测物理现象实验中, 阻性板探测器(Resistive Plate Counter, RPC)是最佳的反符合探测器之一。

RPC 探测器是由意大利的 Santonico 发明的一种平行板气体探测器^[2], 制作工艺简单, 成本低, 并且具有很好的时间和位置分辨性, 特别适合大面积使用, 已被广泛地应用于高能物理以及核物理实验, 比如加速器实验和宇宙线的探测等。

早期的 RPC 多采用电木板作为高阻板电极材料, 具有较低的体电阻率, 约为 $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$, 计数率高, 但是表面粗糙、噪声大, 需要采取措施对内表面进行处理, 且容易受到环境温度、湿度和气压变化的影响^[3]。玻璃则具有优良的表面光洁度和平整度, 体电阻率分布均匀, 其制作成的 RPC 具有更小的漏电流和噪声, 受环境因素影响小, 探测器内部电场均匀, 工作状态稳定。但体电阻率较高, 普通玻璃的典型值约为 $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$, 适合低计数率的环境下工作, 而且普通玻璃制成的 RPC 又存在电极板易碎和容易被放电过程中产生的氢氟酸(HF)腐蚀^[4]的问题。

因此, 在江门中微子实验中, 提出使用高强度和耐酸碱玻璃制作的 RPC 作为反符合探测器来避

免上述的问题, 从而提高探测器的工作稳定性及寿命。本文利用宇宙线中 μ 子研究了钢化玻璃、大猩猩玻璃、肖特 BF33 玻璃制成的 RPC 在雪崩模式下的性能并给出了相应的测试结果。

1 三种玻璃特性

钢化玻璃是一种预应力玻璃, 在普通玻璃基础上采用物理或化学的方法来对强度加以提升, 在抗风压、冲击性和寒暑性上都有所提高, 不存在自爆问题。实验中所用的钢化玻璃为国产, 且价格便宜。

大猩猩玻璃^[5]是美国康宁公司生产的一种环保型的铝硅钢化玻璃, 常用于手机、平板等电子仪器的屏幕。大猩猩玻璃通过化学强化后, 具有高应力值, 兼具较好的化学稳定性。其次, 卓越的防刮伤性使其表面平整度高。而且, 根据需求可以制备 0.4–2 mm 之间任意厚度的玻璃。

肖特 BF33 玻璃(Borofloat33)^[6]是一种高品质硅硼玻璃, 具有超高的化学稳定性——对水、强酸、强碱以及有机物的腐蚀具有很高的耐受性, 优异的机械强度, 出色的耐热性能。而且该种玻璃的含碱量低, 是一种优良的电绝缘体, 体电阻率高达约 $10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ 。表 1 列出了这三种玻璃的特性。

表 1 三种玻璃特性
Table 1 Properties of different glasses.

玻璃类型 Glass type	电阻率(25 °C) Resistivity / $\Omega \cdot \text{cm}$	标准尺寸 Standard size / cm^2	厚度 Thickness / mm	特性 Attributes
钢化玻璃 Reinforced glass	6.1×10^{14}	$1\,244 \times 1\,092$	0.7	高强度 High strength
大猩猩玻璃 Gorilla glass	8.7×10^{14}	$1\,244 \times 1\,092$	0.7	不易损、耐酸碱腐蚀 Damage resistance, acid and base resistance
BF33 玻璃 BF33 glass	$\sim 10^{15}$	$1\,150 \times 850$	0.7	超高的化学稳定性、优异的机械强度 High chemical durability, excellent mechanical strength

2 探测器结构与实验装置

RPC 是由两层高阻抗的平行电极板组成, 中间通工作气体, 在高压下产生均匀的电场。根据工作电压的大小和气体成分的不同, RPC 的工作模式可分两种: 雪崩模式和流光模式。当带电粒子与气体分子相互作用产生电子离子对, 在电场作用下继而产生电子雪崩倍增过程, 产生雪崩信号, 如果满足某些条件, 还会进一步形成流光信号。RPC 工作在雪崩模式下时, 输出信号较小, 要经过前端电子学

放大; 若工作流光模式下时, 则输出脉冲信号较大, 不需要经过前放。

2.1 探测器设计

本实验采用的玻璃 RPC 的结构如图 1 所示。所采用的玻璃厚度为 0.7 mm, 长宽均为 30 cm, 电极高压通过石墨涂层分布在玻璃外表面。两层玻璃板之间间隔 2 mm, 为保持两极板不变形和电场的均匀性, 在两层玻璃板间加入垫片。由于垫片会造成死区, 所以数量不宜多, 这里共放 4 个, 间距为 10 cm。Mylar 膜覆在石墨上, 膜厚度为 0.125 mm, 可耐

13.5 kV 的击穿电压，起到绝缘作用。RPC 产生的信号由读出条引出，读出条是由许多平行的细长铜条组成，每根铜条的尺寸为 275 mm(长)×30 mm(宽)，他们以均匀的间隙贴在印制电路板上，相邻读出条之间的间隙为 2.5 mm，共有 7 条读出条。每一个读出条可以引出一路信号。

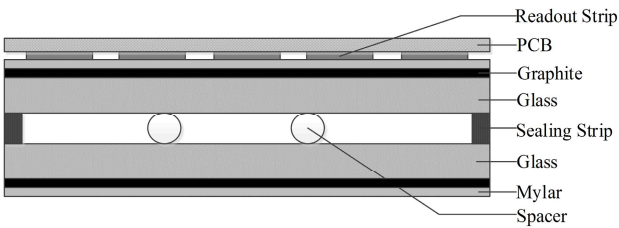


图 1 玻璃 RPC 结构示意图
Fig.1 Schematic view of a glass RPC.

由于 RPC 的雪崩信号很小，外界的干扰很容易掩盖 RPC 的原始信号。因此，测试时在 RPC 外裹一层铝箔并接地，主要作用是电磁屏蔽和排除干扰。

2.2 气体选择

为获得良好的稳定性，RPC 的工作气体需要具有良好的淬灭性能。实验中选用 HFC-134a、CO₂、SF₆ 的混合气体，比例为 94.5%:5%:0.5%，工作在雪崩模式下。CO₂ 为多原子分子，易于吸收气体放大时产生的紫外光。SF₆ 为负电性气体，可以抑制流光信号的产生，使 RPC 工作在雪崩模式下。混合气体中加入少量 SF₆ 可以提高计数率，但也同时提高了 RPC 所需要的工作电压^[7]。氟利昂也为负电性气体，主要作用一是作为低电离能气体，二是吸附电子，控制放电规模。

其次，由于气体最终要排放到大气中，且氟利昂的用量远超过另外两种气体，因此要考虑氟利昂对环境的影响。可供选择的氟利昂气体有四氟乙烯 (HFC-134a) 以及四 氟 丙 烯 (HFC-1234yf 或 HFC-1234ze)，尽管四氟丙烯对环境的影响最小，但是价格昂贵，考虑到成本，通常选择四氟乙烯气体。

2.3 实验装置

图 2 是实验装置以及通过宇宙线测试 RPC 性能的信号读出系统。实验采用双闪烁体探测器 T1 和 T2 上下放置，选择自上而下的宇宙线 μ 子作为 RPC 触发信号。在雪崩模式下，探测器输出信号处于几到十几毫伏，要经过电荷前置放大器进行放大。实验中采用的前置放大器是放大正信号输出负信号，放大倍数约 40 倍。

高压系统为 RPC 提供相同的正负高压和两个闪烁体探测器提供负高压。RPC 的信号经过前置放大器后与闪烁体信号先通过甄别器使脉冲信号成型，再通过符合单元对 RPC 与闪烁体探测器信号之间做符合。而数据采集系统则是采用 Scaler 模块，采集的数据如下：闪烁体探测器的符合作为 RPC 触发信号，RPC 与闪烁体探测器的符合作为 RPC 探测到的信号，单独的 RPC 输出作为噪声。

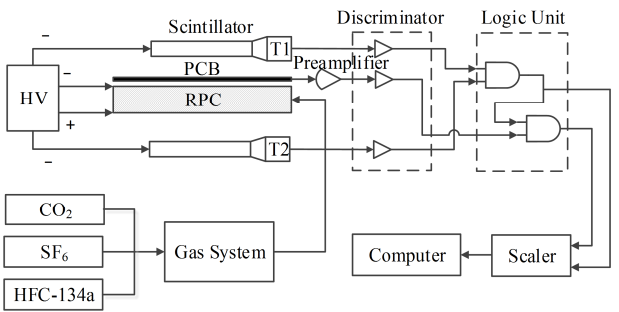


图 2 宇宙线测试装置图
Fig.2 Cosmic ray test setup.

3 宇宙线测试结果

RPC 的性能主要体现在三个方面：探测效率、单计数率以及暗电流。

3.1 探测效率

探测效率是衡量 RPC 性能的主要指标，是指触发事例中被 RPC 记录的比例。RPC 的效率随着电压而增加，当达到一定程度时，效率就不再随着电压的增加而改变，到达了一个坪区。图 3 是钢化及大猩猩玻璃制成的 RPC 的效率曲线，图 4 则是 BF33 的，且都已经过死区校正。

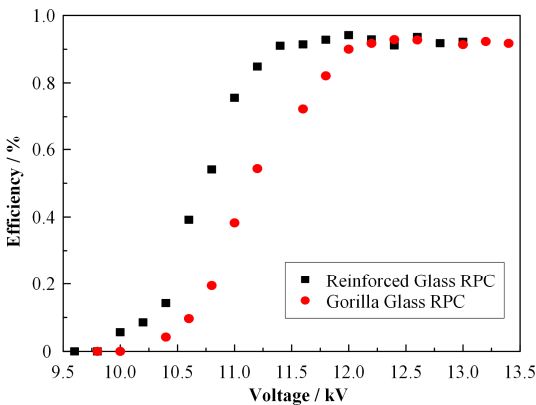


图 3 钢化及大猩猩玻璃 RPC 效率曲线图
Fig.3 Efficiency for RPC made of strength and gorilla glass.

从图 3 中可以看出, 钢化玻璃与大猩猩玻璃的起始电压相差 400 V, 前者在 11.4 kV 到达坪区, 效率为 94%, 而后者在 12 kV 到达坪区, 效率达 92%, 相比前者, 到达坪区的电压要高出 600 V 左右。由于大猩猩玻璃的电阻率要比钢化玻璃的高, RPC 的气室要达到正常工作场强则需要更高的电压, 因此大猩猩玻璃 RPC 的达坪电压要比钢化玻璃 RPC 高。

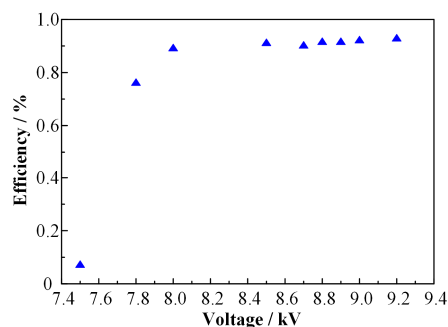


图 4 BF33 玻璃 RPC 效率曲线图
Fig.4 Efficiency for RPC made of BF33 glass.

BF33 的性能是在法国里昂核物理研究所(The Institute of Nuclear physics of Lyon, IPNL)测试所得。该玻璃 RPC 的气体室厚度为 1.2 mm, 气体比例为

R134A:CO₂:SF₆=93%:5%:2%, 同样地工作在雪崩模式下。数据读出所用的前端电子学为 HARDROC^[8], 效率如图 4 所示。从图 4 中看出, 效率达 91%, 相比于前两块 RPC、BF33 的达坪电压较低, 这是因为尽管 BF33 玻璃电阻率高, 但气室厚度的减小导致较低电压下可以得到较高的场强。

高的电极板体电阻率会使 RPC 气室的正常工作场强降低, 导致坪区效率的下降, 因此在探测效率上, 钢化玻璃 RPC 好于大猩猩玻璃和 BF33 玻璃 RPC。

3.2 单计数率

计数率定义为单位时间单位面积上的过阈信号计数, 包括了由宇宙线 μ 子产生的事例信号和 RPC 室本身放电产生的噪声, 其中噪声的贡献占了大部分, 因此计数率可以从侧面反映 RPC 的噪声水平。单计数率越小, 说明探测器性能越好。高的体电阻率使气室场强降低, 同样增加了探测的死时间, 因此高的体电阻率能够得到较低的单计数率。图 5 为 RPC 的单计数率随电压变化曲线图。可以看出, 三种玻璃 RPC 的单计数率均处于较低的水平。

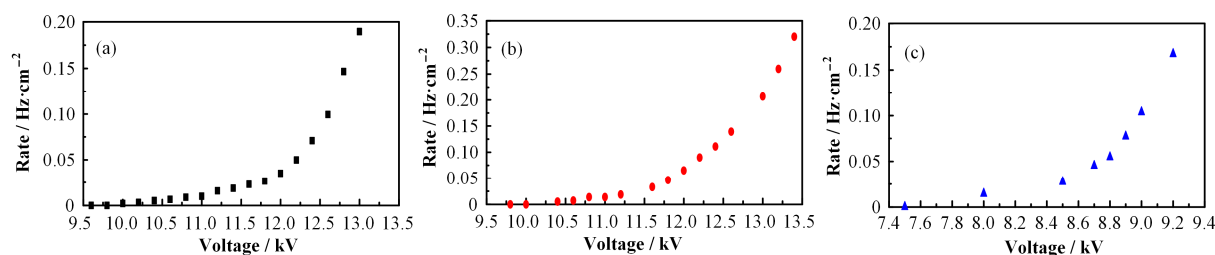


图 5 单计数率随电压变化曲线 (a) 钢化玻璃, (b) 大猩猩玻璃, (c) BF33 玻璃
Fig.5 Single counting rate as a function of high voltage. (a) Reinforced glass, (b) Gorilla glass, (c) BF33 glass

3.3 暗电流

暗电流主要由正负电极之间的放电产生, 图 6 为 RPC 的暗电流随工作电压的变化曲线图。对比单

计数率与暗电流曲线发现, 暗电流是随着单计数率而增加。

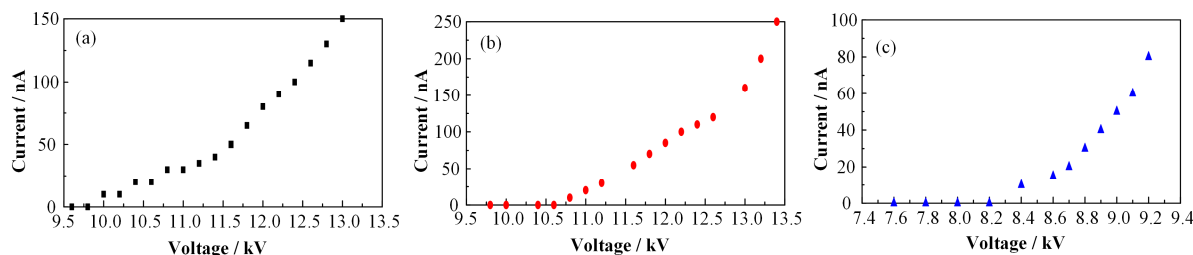


图 6 暗电流随电压变化曲线 (a) 钢化玻璃, (b) 大猩猩玻璃, (c) BF33 玻璃
Fig.6 Dark current as a function of high voltage. (a) Reinforced glass, (b) Gorilla glass, (c) BF33 glass

4 结语

采用化学强化后的玻璃制作 RPC 可以很好解决普通玻璃 RPC 易碎裂和易受腐蚀的问题,尤其是 BF33 玻璃表现得更为突出。通过其制成的玻璃 RPC 性能研究后发现,这三种探测器均具有良好的性能。由于其高电阻的特性,导致效率到达坪区需要较高的电压和造成坪区效率的下降,但是可以得到较低的单计数率和暗电流。这种高电阻玻璃制成的 RPC 特别适用于低本底的环境下工作,如江门中微子实验、锦屏暗物质探测实验等深地实验。

参考文献

- 1 Li Y F. Overview of the Jiangmen Underground Neutrino Observatory (JUNO)[J]. *International Journal of Modern Physics Conference Series*, 2014, **31**: 1460300. DOI: 10.1142/S2010194514603007
- 2 Santonico R, Cardarelli R. Development of resistive plate counters[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 1981, **187**(81): 377–380. DOI: 10.1016/0029-554X(81)90363-3
- 3 Vincenzi M D, Hull G, Mari S M, *et al.* Study of the performance of standard RPC chambers as a function of bakelite temperature[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2003, **508**(S1–2): 94–97. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01284-1
- 4 Datar V M, Jena S, Kalmani S D, *et al.* Development of glass resistive plate chambers for INO experiment[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2009, **602**(3): 744–748. DOI: 10.1016/j.nima.2008.12.129
- 5 Corning gorilla glass provides outstanding performance and durability, with distinct advantages over other materials[EB/OL]. [2015-12-5]. <http://www.Corninggorillaglass.com/en/technology/technology-overview>
- 6 BOROFLOAT-Inspiration through quality[EB/OL]. [2015-12-5]. <http://www.us.schott.com/borofloat/english/production/index.html>
- 7 马经国, 班勇, 刘洪涛, 等. 大面积阻抗板探测器的研制及性能测量[J]. *高能物理与核物理*, 2001, **25**(9): 898–902. DOI: 10.3321/j.issn:0254-3052.2001.09.016
- 8 MA Jingguo, BAN Yong, LIU Hongtao, *et al.* Construction and performance test of a large area RPC module[J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2001, **25**(9): 898–902. DOI: 10.3321/j.issn:0254-3052.2001.09.016
- 8 Callier S, Dulucq F, de La Taille C, *et al.* HARDROC1, readout chip of the digital hadronic calorimeter of ILC[J]. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, 2007, **3**: 1851–1856. DOI: 10.1109/NSSMIC.2007.4436518