

大含量氟利昂气体下的电阻板室特性^{*}

陈珊琦 李澄¹⁾ 阮丽娟 陈宏芳 邵明 杨一

(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026)

摘要 制作一种有效面积为 $490\text{mm} \times 490\text{mm}$ 玻璃电极双层电阻板室的实验模型. 采用大含量氟利昂气体, 用宇宙线测量该探测器的探测效率, 输出电荷, 时间分辨. 测量结果显示: 对最小电离粒子的探测效率可达到 95% 以上, 效率坪达到 2kV, 平均噪声计数率小于 $0.2\text{Hz}/\text{cm}^2$. 当探测器进入饱和和雪崩区, 探测器的时间分辨最小. 文中给出了有关性能模拟和计算结果. 对流光模式下的性能也进行了初步的测试, 获得了有价值的实验数据.

关键词 电阻板室 μ 子触发探测器 氟利昂气体

1 引言

电阻板室 (Resistive Plate Chamber, 简称 RPC) 是一种采用平行电阻板电极的气体探测器. 它对带电粒子不仅具有好的探测效率, 而且结构简单造价低廉, 现已成为高能物理实验中广泛使用的带电粒子计数和触发探测器. 通常 RPC 工作气体采用氩 + 异丁烷 ($\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$) 气体为主, 另加有少量氟利昂气体. 由于在氩气中雪崩放大过程增长很快, 采用这种混合气体的大面积 RPC 一般工作在流光模式, 工作电压较低, 其性能可以满足低计数率下的实验要求, 但是在高计数率 ($> 200\text{Hz}/\text{cm}^2$) 环境下, 大量流光信号将导致的探测效率降低. 由于氟利昂气体具有较高的电子吸附能力, 可以抑制由于电子俘获造成的流光扩展. 近年来在一些大型的实验装置上的 RPC (如日本 KEK Belle 实验组的 KLM 探测器^[1], 美国 BNL 实验室 STAR 飞行时间谱仪上的多气隙电阻室^[2,3]) 都采用含量大含量氟利昂混合气体以抑制流光的扩展, 获得了很好的实验和物理结果.

为配合北京谱仪升级工程 (BES-III), 制作了一种双层结构的电阻板室实验模型. 采用大含量氟利

昂混合气体: $\text{F134a}(\text{CH}_2\text{FCF}_3)$ 90% + $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$ 5% + SF_6 5%, 其中 $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$ 气体用于吸收氩离子退激发过程产生的紫外光, SF_6 气体用进一步抑制流光过程发生. 用宇宙线 μ 子对其运行在雪崩模式性能进行仔细地测量, 并给出了相关的模拟和计算结果, 对其流光模式下的性能也进行了测试. 为研制 μ 子触发探测器及 RPC 提供有用的实验数据.

2 探测器结构和测量系统

实验设计制作的双层电阻板室有效面积为 $490\text{mm} \times 490\text{mm}$, 采用厚度为 2.0mm 的玻璃 (在室温下电阻率为 $10^{12} - 10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$) 作为电极, 玻璃外表面贴上厚度为 $130\mu\text{m}$ 的碳膜 (型号 IVY-T-9149, 空气中实测表面电阻率为 $\sim 2\text{M}\Omega/\text{单位面积}$) (图 1).

室的气隙为 2mm, 采用 4 条矩形 PVC 支撑条 (长 39mm, 宽 1.5mm, 高 2.0mm) 以保证气隙的均匀. 玻璃电极和感应信号读出条之间是厚度为 $250\mu\text{m}$ 的 Mylar 膜绝缘层. 读出条 (x, y 方向) 尺寸为 $25\text{mm} \times 500\text{mm}$, 厚度为 $150\mu\text{m}$ 铜箔, 条间隙为 2mm. 室的最外面是 2mm 厚的铝板作为屏蔽并且增加结

2004-01-15 收稿

^{*} 国家自然科学基金 (10375062) 资助

1) E-mail: licheng@ustc.edu.cn

构的强度.两个 RPC 上下电极的高压并联,当带电粒子穿过探测器时,输出感应信号相加.测量时,取中间读出条为 x 方向,上下读出条为 y 方向.每个室安装完成后首先测量其各自漏电流,在工作气体下,高压达到 15kV 时其漏电流 $\leq 25\text{nA}$ (见图 2).

图 1 双层电阻板室结构示意图

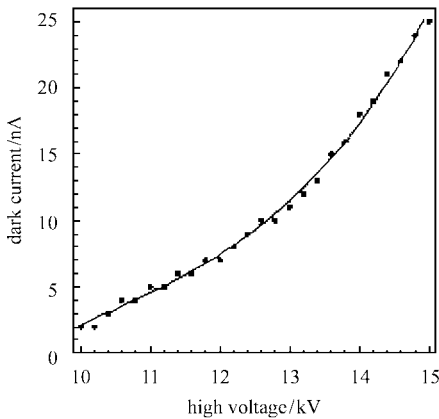


图 2 单个 RPC 漏电流 (nA) 随高压 (kV) 的变化

测量装置见图 3 和图 4. 由 3 个塑料闪烁探测器 (PMT1, PMT2, PMT3) 组成了宇宙线望远镜系统,并提供 ADC 和 TDC 开门信号. RPC 的输出信号经放大、甄别和延迟送到 ADC 和 TDC 并经

图 3 望远镜系统

CAMAC 控制器送到计算机进行数据处理. 实验使用的 ADC 为每道 0.25pC , TDC 灵敏度为每道 50ps . 望远镜系统的时间分辨为 110ps , 有效触发面积 $4\text{cm} \times 4\text{cm}$.

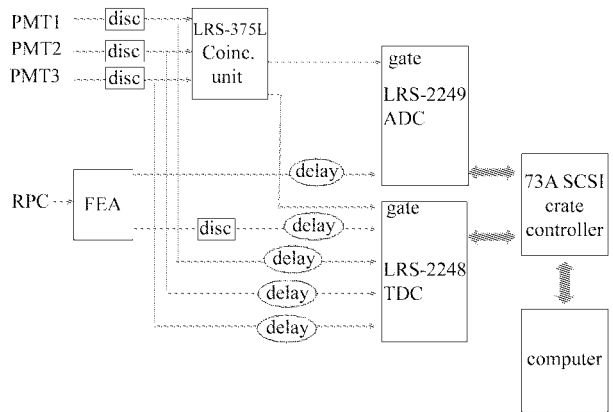


图 4 测试电子学系统

3 测量和模拟结果

实验首先测量了探测器工作在不同电压下的输出电荷的大小(见图 5)探测器的输出电荷开始时是

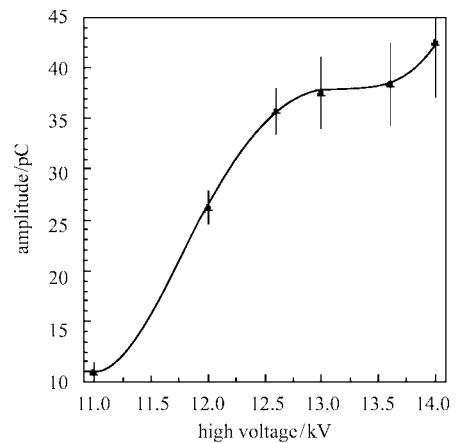


图 5 信号幅度 (pC) 随高压 (kV) 的变化

指数增长的,当工作电压大于 13kV 时,探测器进入在饱和和雪崩区,并伴有少量的流光信号.甄别阈值 $\geq 50\text{mV}$,平均噪声计数率小于 $0.2\text{Hz}/\text{cm}^2$ (见图 6).用宇宙线 μ 子测量的探测效率和时间分辨随高压的变化见图 7.在坪区,探测效率达到 95% 以上,时间分辨小于 750ps .测量的典型脉冲高度分布见图 8,时间分布见图 9.图中的时间分辨值已扣除了望远镜系统的起始时间晃动影响.

按照实验测量探测器结构和工作气体,使用软

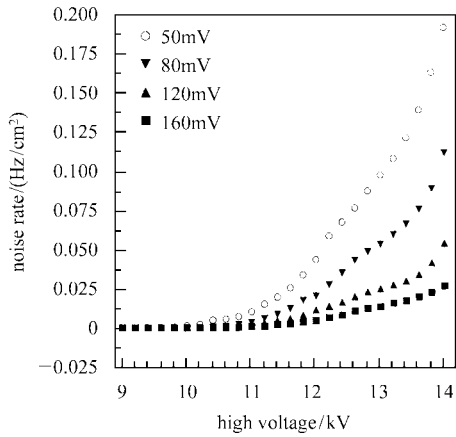


图 6 不同阈值下单个 RPC 的噪声计数率

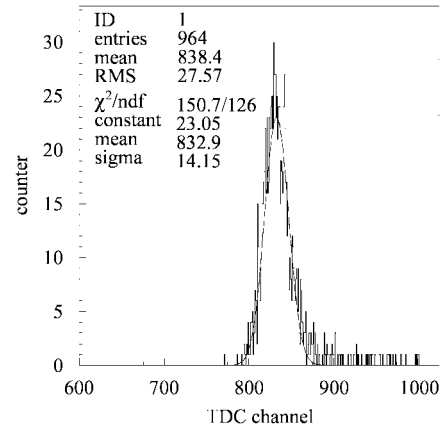


图 9 测量的时间谱(高压:13kV,甄别阈:80mV)

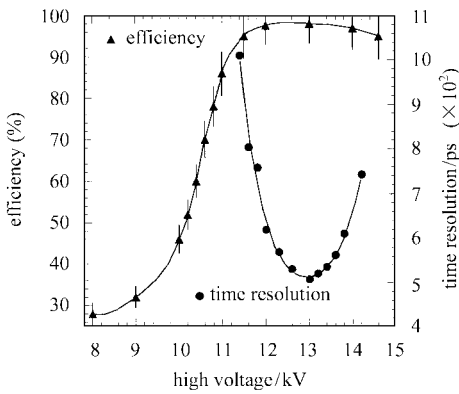


图 7 探测效率和时间分辨随高压变化

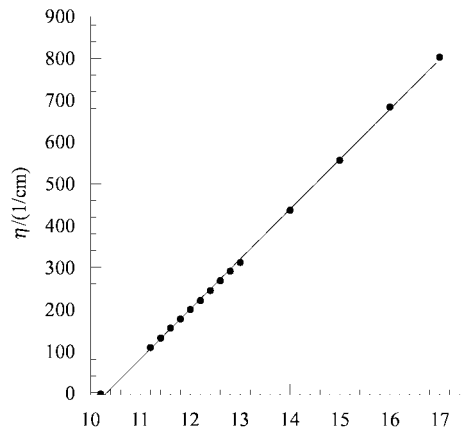


图 10 有效 Townsend 系数 η 随高压的变化

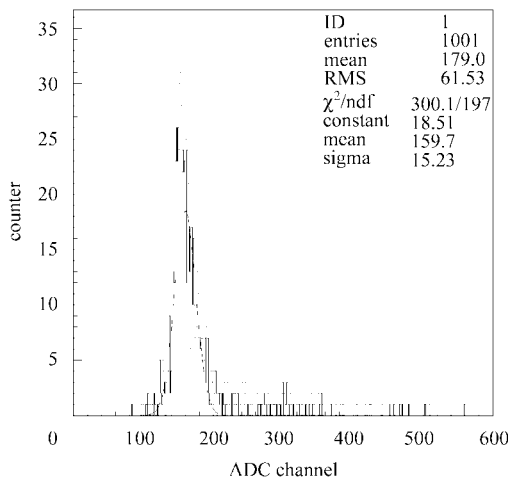


图 8 测量的脉冲高度谱(high voltage = 13kV)

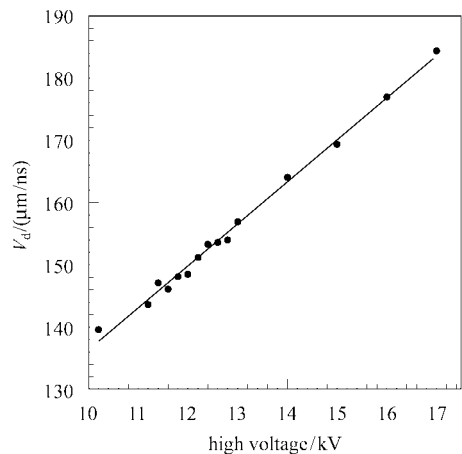


图 11 电子漂移速度 V_d 随高压的变化

件 Magoboltz - 2(CERN, Version 5.1)来模拟 RPC 探测器内部雪崩放大过程,得到不同电压下的 Townsend 系数 α , 吸附系数 β 和电子漂移速度 V_d . 图 10 是有效 Townsend 系数 $\eta = \alpha - \beta$ 随高压的变化, 图 11 是在电子漂移速度随高压的变化. 在计算中考虑了以

下电离雪崩过程的统计涨落⁴⁻⁶:

- 1) 总电离次数 n_{cl} 和第 j 次电离产生的电子数 n_j 服从泊松分布;
- 2) 第 j 次电离的位置 x_j , 服从 Γ 分布;
- 3) 当约化场强 E/P 足够大时, 并且考虑到

Townsend 指数增长的晃动,得到 n 个电子的几率服从 Polya 分布.

根据广义 Ramo 定理,第 j 次电离产生的电荷为 Q_j 的电子团在电场强度为 E 探测器里漂移运动,电子的运动方程可写成 $x = V_d t + x_0$ (x_0 时初始电离位置),收集的感应电荷为

$$q_{ind} = \frac{q_e}{\eta d} \cdot \Delta V_w \cdot \sum_{j=1}^{n_d} n_j [e^{\eta(d-x_j)} - 1],$$

$$j = 1, 2, 3, \dots, n_{cl},$$

相应的电流为

$$i(t) = \Delta V_w \cdot \frac{V_d}{d} \cdot Q_j \cdot e^{\eta(x-x_j)} =$$

$$\Delta V_w \cdot \frac{V_d}{d} \cdot Q_j \cdot e^{\eta \cdot V_d \cdot t},$$

$$\frac{\varepsilon_r d}{s}$$

其中: $\Delta V_w = \frac{s}{n\varepsilon_r d + (n+1)}$, d 是气隙厚度, s 是玻璃厚度, n 是气隙层数.

在上述计算中根据实验数据设定了两个条件: 1)考虑前端放大器的灵敏度和输出回路的时间常数,取信号(电荷)阈值为 100fc;2)考虑到空间电荷效应,当 RPC 内部电场强度变化范围在 50—80kV/cm,取雪崩上限为 2.5×10^7 ,并且不考虑流光过程.计算得到的感应电荷的大小和时间分辨随高压变化见图 12.典型的感应电荷分布见图 13.与实验结果比较,感应电荷的大小和变化趋势基本一致,在工作电压达到 13kV 的时候进入饱和雪崩区;时间分辨在 13kV 以下与实验结果相符合,随着电压的增加由于大幅度流光信号的影响,计算与实验结果不符合.

由于 SF_6 气体对大气臭氧层有较大的破坏作用,不利于长期使用,所以实验进一步测量了不用 SF_6 的混合气体时探测器的工作特性.混合工作气体比

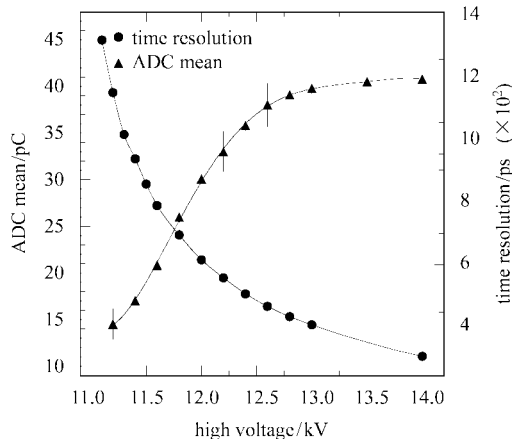


图 12 模拟信号幅度和时间分辨随高压变化

例改为: HFC-134a 95% + iso-C₄H₁₀ 5%. 由于不含 SF_6 的混合气体,流光信号出现时对应的电压较低,典型的脉冲高度谱见图 14.这时探测器工作在以流

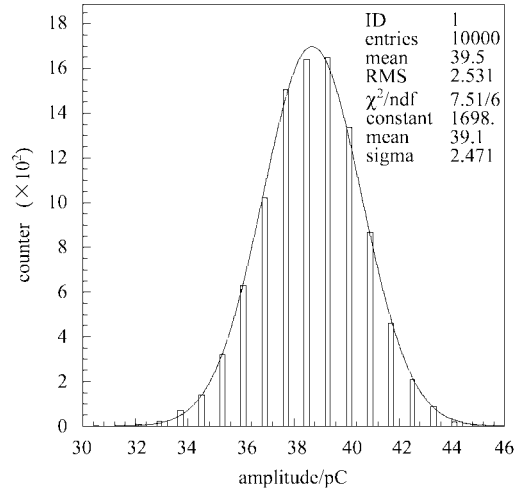


图 13 模拟信号谱 (high voltage = 12.8kV)

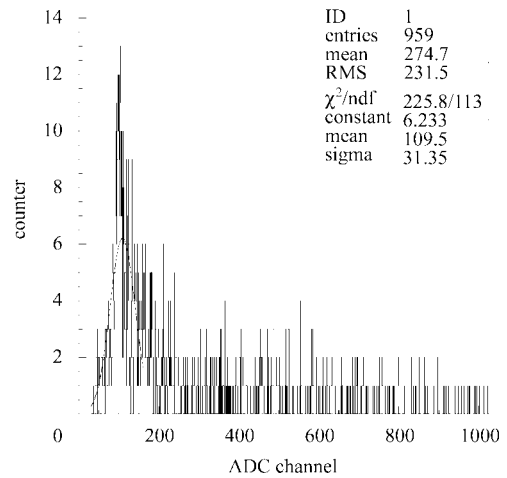
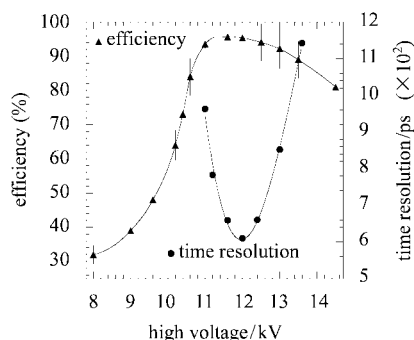


图 14 不含 SF_6 气体的脉冲高度谱 (high voltage = 13.0kV)

光为主的模式下,信号较大.探测效率达到 95% 时,对应的效率坪约为 800V,时间分辨小于 800ps,测量结果见图 15.

4 结论和问题

由于氟利昂气体具有较高的电子吸附能力,可以有效抑制流光扩展,并且原初电离密度较大 (10.13/mm),实验制作的 RPC 对最小电离粒子的探测效率可达到 95% 以上,效率坪长达到 2kV,噪声计数率小于 0.2Hz/cm².显示 RPC 工作在大含量氟利

图 15 不含 SF₆ 气体的探测效率和时间分辨随高压变化

昂工作气体(F134a 90% + iso-C₄H₁₀ 5% + SF₆ 5%)下具有良好的特性. 实验与模拟结果比较, 当工作电压达到 13kV, 气体放大过程进入饱和雪崩区, 探测器的时间分辨最小, 与模拟结果相同; 在雪崩上限为 2.5×10^7 , 感应电荷随高压的变化趋势相近; 在工作电压小于 13kV, 时间分辨随高压变化基本相同.

上述测量是当探测器望远镜位于读出条中间时的结果. 在相同的工作条件下, 实验测量了同一读出条上不同位置的信号幅度变化(见图 16). 距离放大器最远端的信号幅度比近端减小了大约 30%. 因此

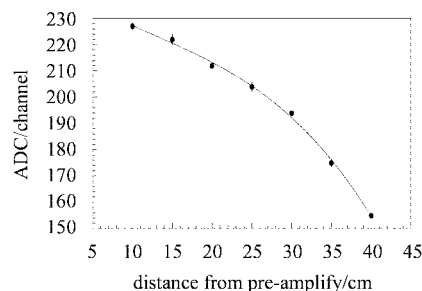


图 16 不同位置的信号幅度(high voltage = 13kV)

有必要在实际应用时采用两端读出, 以消除感应信号在传输过程中衰减的影响. 工作在不含 SF₆ 的混合气体时工作电压相对较低, 探测效率也可达到 95%, 效率坪为 0.8kV, 由于存在较明显流光信号, 其时间分辨增大, 但仍可以满足实验要求. 在坪区电压范围内, 探测器实际工作在正比和流光的共存模式, 有关机制有待进一步研究.

作者感谢中国科学院高能物理研究所 BES-III 合作组对该研究项目的多方面支持.

参考文献 (References)

- 1 Abe K, Azuchi S et al. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2000, **47**(6):1748
- 2 Li Cheng et al. HEP & NP, 2001, **25**(9):933 (in Chinese)
(李澄等. 高能物理与核物理, 2001, **25**(9):933)
- 3 BNL/Star Collaboration, Nucl-ex/0309012(03)
- 4 Abbrescia M et al. Nucl. Instrum. Methods., 1997, **A398**:173
- 5 RUAN Li-Juan et al. HEP & NP, 2003, **27**(8):712 (in Chinese)
(阮丽娟等. 高能物理与核物理, 2003, **27**(8):712)
- 6 Gatti E et al. Nucl. Instrum. Methods., 1982, **193**:651

Performances of Resistive Plate Chamber Filled with Freon-Rich Mixture *

CHEN Shan-Qi LI Cheng¹⁾ RUAN Li-Juan CHEN Hong-Fang SHAO Ming YANG Yi

(Department of Modern Physics, University of Science & Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract A prototype of Resistive Plate Chamber with effective area of 490mm × 490mm was built. The efficiency, output charge and time resolution were measured by cosmic muons when the detector was operated with F134a-rich mixture in avalanche mode. The efficiency is higher than 95% with 2kV long efficiency plateau, the noise counting rate is less than 0.2 Hz/cm² and the time resolution reaches minimum when detector works in saturated avalanche mode. Relevant simulations and calculations were presented in this paper. The performances of RPC working in streamer mode were also tested.

Key words resistive plate chamber, μ trigger detector, F134a gas

Received 15 January 2004

* Supported by National Natural Science Foundation of China (10375062)

1) E-mail: licheng@ustc.edu.cn