

# 用于低动量高精度测量的漂移室氦基混合气体性能的研究

陈 昌 张勤俭 马基茂  
黄秀萍 易 凯 郑树臣

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 报道了用小型均匀场漂移室对不同比例的氦基混合气体 He/CH<sub>4</sub> (80/20, 70/30) 和 He/iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (85/15, 80/20, 70/30) 的电子漂移速度和用正比计数管对上述气体的电子放大系数测量的结果。实验结果同用 Garfield 程序包计算的结果进行了比较,符合得很好。对 He/CH<sub>4</sub> (80/20) 混合气体得到漂移速度  $v_d \approx 2.7 \text{ cm} / \mu\text{s}$ , 其放大系数  $M$  在适当工作电压下能控制在  $10^4$ — $10^5$  之间, 这种混合气体可以作为低动量高精度测量的漂移室工作气体较为理想的候选者。

**关键词** 漂移室 氦基混合气体 漂移速度 放大系数

## 1 引言

漂移室通常用来探测带电粒子的动量和方向。动量测量的精度取决于漂移室的空间定位精度和带电粒子在室内物质(工作气体和工作丝)上的多次库仑散射。当带电粒子的动量  $p \leq 1 \text{ GeV} / c$  时,对采用常规氦基工作气体的漂移室来说,空间分辨率的贡献是次要的,多次散射的贡献才是主要的。

B 粒子工厂<sup>[1,2]</sup>、 $\Phi$  粒子工厂<sup>[3]</sup> 和  $\tau$ -粲粒子工厂<sup>[4]</sup> 均需要能精密测量低动量带电粒子的中心漂移室,因为在这些能区  $e^+e^-$  对撞产生的次级粒子的动量大多数在  $1 \text{ GeV} / c$  以下。因此,为了改进动量分辨率,减小在漂移室内多次散射的影响是最重要的途径,即应采用原子序数  $Z$  尽可能低的工作气体和工作丝。漂移室通常用氦基混合气体,氩气(Ar)的  $Z=18$ , 辐射长度  $X_0=110 \text{ m}$ 。现在需要寻找比氩气更轻和辐射长度更长的工作气体。

氦气(He)是唯一可供选择的低  $Z$  惰性气体,它具有  $Z=2$  和  $X_0=5300 \text{ m}$ 。仅仅氦气一种成分不能稳定工作,必需加入猝灭气体。对漂移室工作气体的选择是由一组参数综合优化的结果,如辐射长度  $X_0$ 、漂移速度  $v_d$ 、放大系数  $M$ 、影响空间分辨率的扩散系数及工作稳定性等等,价格和可获得性也是必需考虑的重要因素。

由于研制测量低动量带电粒子的高精度漂移室的需要,对氨基混合气体性能的研究引起广泛的兴趣<sup>[5-9]</sup>,其中 He / C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> (50 / 50) 混合气在不很高的漂移电场下有饱和漂移速度  $v_d \approx 4\text{cm} / \mu\text{s}$ , 位置分辨率及  $dE / dx$  的分辨率也很好<sup>[8]</sup>, 显示全面优良的性能, 但乙烷 (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) 的价格很高. 相比而言, 甲烷 (CH<sub>4</sub>) 价格较低且较易获得, 因此以甲烷为猝灭成分的氨基混合气体若在主要性能上能满足粒子工厂的要求, 就可考虑选作工作气体. 高纯异丁烷 (iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) 比甲烷价格高, 但比乙烷较易获得, 也有必要进行测量.

本文报道在国内首次进行的氨基混合气体的研究结果, 包括 He / CH<sub>4</sub> (80 / 20, 70 / 30) 和 He / iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (85 / 15, 80 / 20, 70 / 30) 两类气体的电子漂移速度  $v_d$  和放大系数  $M$ . 作为对实验装置的检验, 也测量了 Ar / CO<sub>2</sub> (80 / 20) 混合气体的性能.

## 2 实验装置和方法

### 2.1 测量漂移速度的实验装置和方法

测量电子漂移速度的实验装置如图 1 所示. 图中小型精密均匀场漂移室由均匀场漂移区和高场探测区两部分组成, 中间由接地栅网隔开. 栅网由直径  $11\mu\text{m}$ , 丝距为  $0.5\text{mm}$  的镀金钨丝组成. 在漂移区, 漂移场主要由栅网与阴极平面的电压差提供. 漂移区的四壁贴有一层具有等间隔平行铜条的 Kapton 有机薄膜, 铜条宽  $0.6\text{mm}$ , 条距  $2.5\text{mm}$ . 一个线性电阻分压链连接到每个铜条上, 以形成更均匀的漂移电场. 漂移区长  $35\text{mm}$ , 通过改

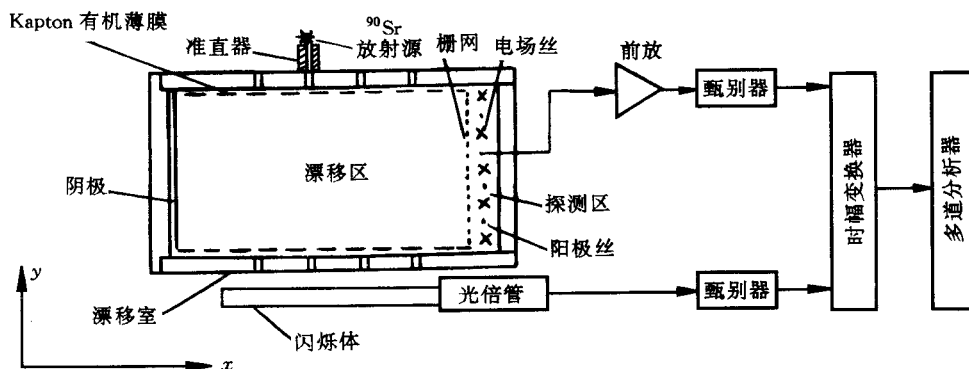


图1 实验装置示意和测量电子学框图

变阴极负高压可以从外部改变漂移电场值.

探测区由栅网和另一接地平面限定, 厚度为  $5\text{mm}$ , 阳极丝和电场丝分别为直径  $11\mu\text{m}$  和  $50\mu\text{m}$  的镀金钨丝, 间距为  $2\text{mm}$ . 阳极丝加正高压, 漂移到阳极丝附近的电离电子, 在强电场下产生雪崩并被收集. 栅网对电子是透明的, 同时起到隔离漂移区和探测区电场相互干扰的作用. 漂移区室壁两边钻有一组精密定位孔 (直径  $0.9\text{mm}$ ), 配合准直器作为放射源 <sup>90</sup>Sr  $\beta$  射线的入射和出射孔.

$\beta$  射线穿过约  $10\mu\text{m}$  厚的 Mylar 膜进入漂移区, 入射粒子在工作气体中产生电离, 通过出射孔到达闪烁计数器, 闪烁计数器信号给出入射粒子的起始时间  $t_0$ . 在漂移区内产生的电离电子在电场作用下漂向阳极. 设阳极位置为  $x_0$ , 到达阳极的时刻为  $t$ , 漂移速度为

$v_d$ , 则粒子入射位置  $x$  可由下式给出:

$$x = x_0 + \int_{t_0}^t v_d dt, \quad (1)$$

通常  $v_d$  为电场的函数. 当漂移电场均匀, 或在电场变化范围内对给定气体有饱和漂移速度, 则  $v_d$  为常数, 就有

$$x = x_0 + v_d(t - t_0). \quad (2)$$

对于放射源不同位置  $i$  和  $j$ , 通过测量电离电子的漂移时间  $t_i$  和  $t_j$ , 可得到

$$v_d = (x_j - x_i) / (t_j - t_i) = \Delta S / \Delta T, \quad (3)$$

这里  $\Delta S = x_j - x_i$  是漂移距离之差,  $\Delta T = t_j - t_i$  为漂移时间之差.

测量的电子学框图如图 1 所示. 入射  $\beta$  粒子穿过上下准直定位孔和漂移区后在闪烁体内产生信号, 此信号经恒比定时甄别器作为时幅转换器 TAC (ORTEC 457) 的起始信号.  $\beta$  粒子在漂移区产生的电离电子经过均匀的漂移电场后到达阳极丝产生雪崩信号, 经前置放大器放大后再经恒比定时甄别器, 作为 TAC 的停止信号. 信号幅度转换谱由多道脉冲分析器 (CANBERRA S-90) 记录.

漂移室采用流气式供气, 气体成分由质量流供气系统控制. 氦气纯度为 99.995%, 甲烷的纯度为 99.99%. 异丁烷的纯度为 85%.

## 2.2 气体放大系数测量装置

气体放大系数的测量分别使用了一个横截面为矩形的黄铜正比管与一个不锈钢圆柱型正比计数管. 矩形正比计数管<sup>[10]</sup>的管壳长为 450mm, 内截面 5mm × 10mm, 管壁厚度 0.3mm. 管的两端用聚碳酸脂绝缘端条封装. 阳极丝为直径 50 $\mu$ m 的镀金钨丝, 定位在矩形截面的中心. 阳极丝的两端固定在被粘接在端条中心的小黄铜块上, 信号由小黄铜块上  $\phi$ 1mm 引出孔中的插针引出. 在 10mm 面的管壁上开一长 4mm 宽 1mm 的小窄缝, 缝长与阳极丝相平行, 用厚度约 10 $\mu$ m 的薄膜复盖作气体密封.

圆柱型正比计数管管壳长 400mm, 内径 23mm, 两端用聚四氟乙烯绝缘定位子封装. 阳极丝直径为 20 $\mu$ m 的镀金钨丝. 在管壁上钻一  $\phi$ 1mm 的小孔, 用厚度约 10 $\mu$ m 的薄膜作气体密封.

两种正比管均采用流气式供气, 串接于漂移室的下游, 气体成分由同一气体系统控制.  $^{55}\text{Fe}$  的 5.9keV X 射线穿过管壁上的薄窗进入正比管. 矩形正比管管壁加负高压. 圆柱型正比管阳极丝加正高压. 阳极丝的信号经电荷灵敏前放、成形放大后输入多道脉冲幅度分析器 (FH451), 测出信号幅度谱. 放大器用精密脉冲发生器 (ORTEC448) 标定.

## 3 实验结果和讨论

### 3.1 电子漂移速度

#### 3.1.1 Ar / CO<sub>2</sub>(80 / 20) 混合气体中的漂移速度

图 2 为 Ar / CO<sub>2</sub>(80 / 20) 混合气体中不同漂移电场强度下电子漂移速度的测量结果.

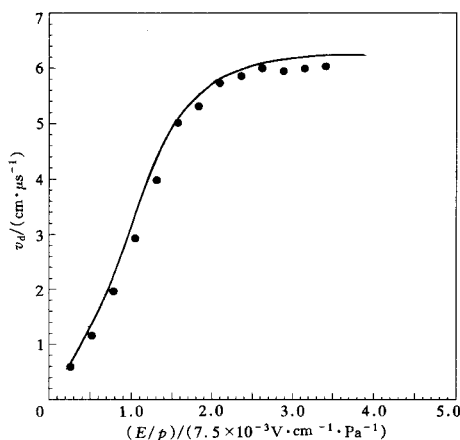


图 2 Ar / CO<sub>2</sub>(80 / 20)混合气体中电子漂移速度  $v_d$  随约化漂移电场  $E/p$  的变化

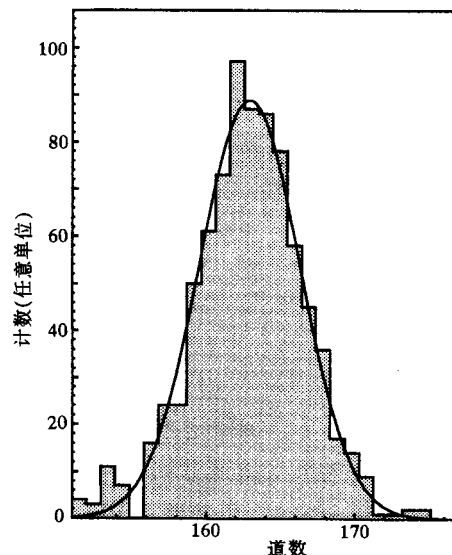


图 3 在 He / CH<sub>4</sub>混合气体中典型的时幅转换谱(3.636ns / 道)

得到此混合气体的饱和漂移速度为  $6.0\text{cm} / \mu\text{s}$ . 与文献 [11] 的结果相符. 图中曲线为用 Garfield<sup>[12]</sup> 模拟程序包计算的结果. 对这一常用 Ar 基混合气体的测量表明, 均匀场漂移室工作正常, 测量系统是可靠的.

### 3.1.2 He / CH<sub>4</sub>不同比例混合气体中的漂移速度

通过测量不同源位置电子的漂移时间幅度转换谱, 并对时幅转换谱作高斯拟合得到谱的峰位, 再由峰位相应的道数得到漂移时间. 对所用的多道脉冲分析器 (CANBERRA S-90) 用时间刻度器 (ORTEC 462) 作了刻度, 图 3 为典型的时幅转换谱, 每道相当  $3.636\text{ns}$ .

图 4 为两种不同比例的 He / CH<sub>4</sub>混合气体中电子漂移速度随约化漂移电场变化的结果. 横坐标为约化漂移电场  $E/p$ , 其中  $E$  单位为  $\text{V} / \text{cm}$ , 气体压力单位为  $\text{Pa}$ , 1 个大气压 =  $101325\text{Pa}$ . 在 1 个大气压当  $E/p = 1$ , 意味着  $E = 760\text{V} / \text{cm}$ . 图中曲线为用 Garfield 程序包计算所得结果. 也给出文献 [9] 报道的结果, 其测量范围较小, 同本工作测量的结果在实验误差范围内相符. 由图 4 得到 He / CH<sub>4</sub>(80 / 20)混合气体中的饱和漂移速度约为  $2.7\text{cm} / \mu\text{s}$ , He / CH<sub>4</sub>(70 / 30)混合气体中的饱和漂移速度约为  $3.4\text{cm} / \mu\text{s}$ . 二者均在较低的约化电场  $E/p \approx 1.3(7.5 \times 10^{-3}\text{V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1})$  达到饱和.

### 3.1.3 He / iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>不同比例混合气体中的漂移速度

异丁烷的纯度不高, 气体成分的控制采用转子流量计. 对流量计进行了刻度. 图 5 为三种不同比例 He / iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>混合气体漂移速度随约化漂移电场  $E/p$  变化的结果, 图中曲线为用 Garfield 程序包计算所得, 也给出文献 [9] 报道的结果, 三者测量范围的上限  $E/p \approx 2.6(7.5 \times 10^{-3}\text{V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1})$  显示了达到饱和的趋势, 比 He / CH<sub>4</sub>混合气体所需电场要高.

### 3.1.4 讨论

(1) 本工作采用对一定源位置差  $\Delta S$  测量相应漂移时间差  $\Delta T$  的相对测量法. 比之直

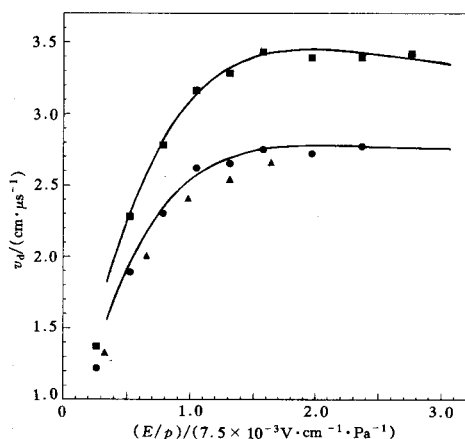


图 4 在 He / CH<sub>4</sub> 混合气体中电子漂移速度随约化漂移电场的变化

■ He / CH<sub>4</sub>(70 / 30); ● He / CH<sub>4</sub>(80 / 20);  
▲ 文献 [9] 报道的结果.

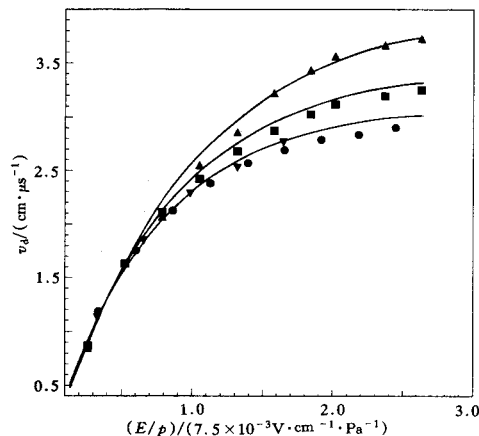


图 5 三种不同比分的 He / iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub> 混合气体中电子漂移速度随约化漂移电场的变化

▲ He / iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>(70 / 30); ■ He / iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>(80 / 20);  
● He / iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>(85 / 15); ▼ 文献 [9] 报道的结果.

接测量漂移距离  $S$  和漂移时间  $T$  的方法, 具有可消除漂移场不均匀性引起的测量误差及一系列系统测量误差的优点.

(2) 由于粒子入射孔有一定的大小(直径 0.9mm), 不同方向入射粒子的漂移距离就有一定的差别, 是测量的主要误差之一. 减小入射孔可以减小误差, 但对一定的源来说, 事例率就会降低. 统计误差是测量的另一主要误差. 孔尺寸效应、实验统计误差及电子学系统测量误差等都反映在时间幅度转换谱上. 在对时间谱作高斯拟合给出峰位的同时也给出了标准偏差. 对图 3 的时幅转换谱拟合得到峰位在 162.9 道,  $\sigma$  为 3.38 道. 实验的测量误差为两个孔时幅转换谱误差的迭加, 由计算得到实验的误差在 5% 左右.

### 3.2 气体放大系数测量结果

#### 3.2.1 Ar / CO<sub>2</sub>(80 / 20) 混合气体中 <sup>55</sup>Fe 的 5.9keV X 射线能谱

在对混合气体测量漂移速度的同时, 用串接于漂移室下游的正比管与多道分析器测量了 <sup>55</sup>Fe 的 5.9keV X 射线能谱. 首先测量 Ar 基混合气体 Ar / CO<sub>2</sub>(80 / 20) 以检验仪器, 如预期那样可清楚看到全能峰和逃逸峰, 这表明电子学测量系统是可靠的.

#### 3.2.2 不同比例的 He / CH<sub>4</sub> 混合气体的放大系数

图 6 为 He / CH<sub>4</sub>(80 / 20) 混合气体中 <sup>55</sup>Fe 5.9keV X 射线能谱, 正比管高压为 -1450V, 信号经前放和主放(8 倍放大)进入多道. 能谱上除显示分辨率差的光电峰外, 未见逃逸峰, 与文献 [13] 报道结果相一致, 是由氦原子的电子壳层结构所决定的. He 原子核外只有两个处于 K 壳层的束缚电子, 当入射 X 射线从 He 原子中击出一个 K 壳层的电子后, 无外层电子来填补这个空位, 因而不会出现部分原子退激释放出特征 X 射线及其逃逸的问题. 自然在 He / CH<sub>4</sub> 混合气体 <sup>55</sup>Fe 5.9keV X 射线的能谱上不会出现逃逸峰.

对不同工作电压, 从能谱上光电峰的峰位得到相应的电荷收集量. 图 7 为测得的不同比例的 He / CH<sub>4</sub> 混合气体中的放大系数随高压的变化曲线. 图中同时给出 Ar / CO<sub>2</sub>

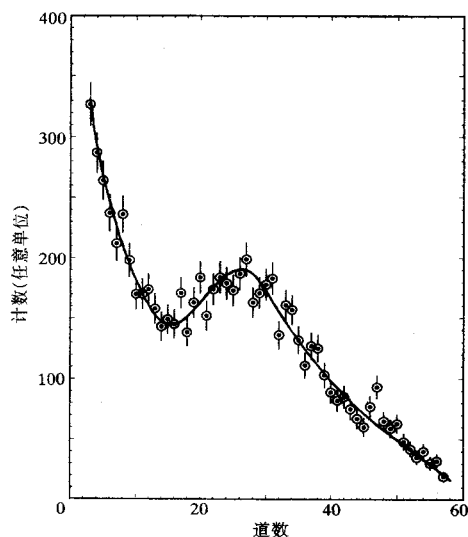


图 6 He / CH<sub>4</sub>(80 / 20)混合气体  
中<sup>55</sup>Fe 5.9keV X 射线能谱  
图中所标误差仅为统计误差。

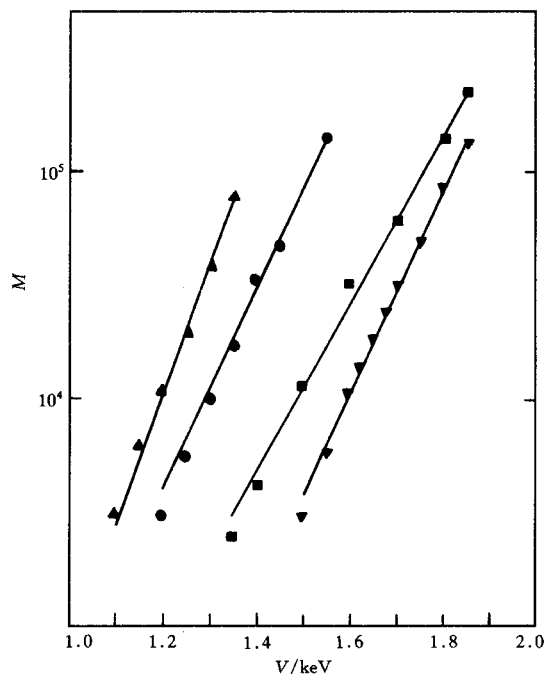


图 7 三种不同比分 He / CH<sub>4</sub>混合气体中  
放大系数  $M$  随高压的变化

▲ He / CH<sub>4</sub>(90 / 10); ● He / CH<sub>4</sub>(80 / 20);  
■ He / CH<sub>4</sub>(70 / 30); ▼ Ar / CO<sub>2</sub>(80 / 20).

(80 / 20)的结果。由图可知,在常用工作电压下氨基混合气体中放大系数同氩基混合气体的放大系数相近。若设  $N_i$  为光子在混合气体中产生的总电子离子对数,  $W$  为产生一个电子离子对所需平均能量,则有  $N_i = 5.9\text{keV} / W$ 。放大系数  $M = Q_{\text{out}} / Q_{\text{in}}$ ,  $Q_{\text{in}} = (N_i \times e)$ ,  $e$  为电子电荷,  $Q_{\text{out}}$  为阳极丝收集的电荷。对混合气体有:

$$W = \sum_i W_i \times P_i$$

其中  $W_i$  为在第  $i$  种成分气体中产生一个电子-离子对所需平均能量;  $P_i$  为第  $i$  种成分气体在该混合气体中所占百分比。这里有  $W_{\text{Ar}} = 26.2\text{eV}$ ,  $W_{\text{CO}_2} = 32.9\text{eV}$ ,  $W_{\text{CH}_4} = 27.3\text{eV}$ ,  $W_{\text{He}} = 41.5\text{eV}$ <sup>[14]</sup>。由此不难从阳极丝收集的电荷  $Q_{\text{out}}$  得到放大系数  $M = Q_{\text{out}} / Q_{\text{in}}$ 。由图可知,把 He / CH<sub>4</sub> 混合气体放大系数控制在  $10^4$ — $10^5$  之间是完全可能的。由图中曲线可以看到,当混合气体中 CH<sub>4</sub> 的比例增大时,达到相同放大系数所需的工作电压相应增高,这也正是所预期的。

### 3.2.3 讨论

(1) 对混合气体的放大系数的测量也使用了圆柱型正比计数管,得到与矩形管一致的结果。

(2) 在 He / CH<sub>4</sub> 混合气体中,其第一 Townsend 系数和总电离数较 Ar / CH<sub>4</sub> 混合气体

为小<sup>[14]</sup>,按照通常气体放大机理,在相同条件下,在 He / CH<sub>4</sub>混合气体中的气体放大系数应较 Ar / CH<sub>4</sub>混合气体为小. 而实际情况则不然. 对此可用 He / CH<sub>4</sub>中的 Penning 效应<sup>[15]</sup>得以理解. CH<sub>4</sub>的电离能为 12.6eV<sup>[16]</sup>. He 则有两个亚稳态在 19.82eV(2<sup>3</sup>S<sub>1</sub>)和 20.62eV(2<sup>1</sup>S<sub>0</sub>). 当初级碰撞使 He 处于亚稳态时,它所释放的光子能量在 CH<sub>4</sub>的电离能之上. 因此,在气体电离过程中还包括下列次级电离过程: He\* + CH<sub>4</sub> → He + CH<sub>4</sub><sup>+</sup> + e<sup>-</sup>, 其中 He\* 为 He 的亚稳态,把激发能再次转变为电离能. 总的效果是电离数增加, 使在 He / CH<sub>4</sub>混合气体中能有可与 Ar 基混合气体相比拟的气体放大系数.

## 4 结论

从漂移速度随漂移电场变化曲线可以看到, He / CH<sub>4</sub>混合气体与 He / iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>混合气体相比较,在测量的漂移场的范围内,后者饱和速度区尚不明显,前者则较后者要好. 其中 He / CH<sub>4</sub>(80 / 20)混合气体在漂移场  $E/p \approx 1.3(7.5 \times 10^{-3} \text{V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1})$  左右进入饱和区,饱和漂移速度 2.70cm /  $\mu\text{s}$ . 达到饱和漂移场所需的工作电压不是很高. 这一混合气体的放大系数  $M$  可与氩基混合气体相比,在通常工作电压下可达  $10^4$ — $10^5$ . 结合其它特性如纵向扩散系数  $\sigma_L$ ( $\sim 70\mu\text{m}$ )<sup>[4]</sup>,洛伦兹角  $\theta_L$ <sup>[14]</sup>,以及价格和可获得性等因素综合考虑, He / CH<sub>4</sub>(80 / 20)混合气体作为探测低动量带电粒子高精度中心漂移室的工作气体是较为满意的候选者.

感谢本所物理一室和电子学室在实验仪器方面给予的帮助及刘泮和同志参加了部分数据的获取.

## 参 考 文 献

- [1] BaBar Coll. Technical Design Report, SLAC-R-95-457, May 1995
- [2] Belle Coll. Technical Design Report, KEK Report 95-2, Apr 1995
- [3] KLOE Coll. The KLOE Centr Drift Chamber, LNF-94 / 028(IR)3, Giugno, 1994
- [4] BTCF Coll. Feasibility Study Report on Beijing Tau-Charm Factor, IHEP-BTCF, Report 03, Oct. 1996
- [5] Zimmermann Z et al. Nucl. Instr. Methods, 1986, A243:86
- [6] Cindro V et al. Nucl. Instr. Methods, 1991, A309:411; Yadigarolu I-A et al. Nucl. Instr. Methods, 1992, A323:322
- [7] Boyarlski A et al. Nucl. Instr. Methods, 1992, A323:267
- [8] Uno S et al. Nucl. Instr. Methods, 1993, A330:55
- [9] Bernadini P et al. Nucl. Instr. Methods, 1995, A355:428
- [10] Arefiev A et al. Nucl. Instr. Methods, 1989, A275:71
- [11] Ma J M et al. MIT Lab. Nucl. Sci. Technical Report No.129, Oct 22, 1982
- [12] Veenhof Q R. Garfield, A Drift Chamber Simulation Program, CERN
- [13] Marechal B, Silva Da Costa M. Nucl. Instr. Methods, 1986, A243:148
- [14] Sharma A, Sauli F. Nucl. Instr. Methods, 1994, A350:470
- [15] Penning F M. Physica, 1934, 1:1028
- [16] Zarubin A V. Nucl. Instr. Methods, 1989, A283:409

## Study of Properties of Helium-Based Gas Mixtures for Use of Low Momentum and High Precision Measurement in Drift Chambers

Chen Chang   Zhang Qinjian   Ma Jimao   Huang Xiuping  
Yi Kai   Zheng Shuchen

*(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)*

**Abstract** Measured drift velocities using an uniform field drift chamber and multiplication factors obtained with proportional tubes in He-based gas mixtures He + CH<sub>4</sub> (80 / 20, 70 / 30) and He + iC<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (85 / 15, 80 / 20, 70 / 30) are reported. The results are in good agreement with calculations by Garfield Code. The saturated drift velocity is  $V_d \approx 2.7 \text{ cm} / \mu\text{s}$  and multiplication factor of  $M \approx 10^4 - 10^5$  at certain working voltage is manageable in He / CH<sub>4</sub> (80 / 20) gas mixture, and it is a good candidate of working gas for use of low momentum and high precision measurement in the drift chambers.

**Key words** drift chamber, He-based gas mixture, drift velocity, multiplication factor