

正比室一些特性的研究

王临洲 李黎力
(中国科学院高能物理研究所)

本文描述了簇射计数器中的正比室模型。研究了正比室所使用的气体 CH_4/Ar 和 CO_2/Ar 的特性。使用 ^{55}FeX 射线源研究了气体放大系数和能量分辨率与气体成份和丝直径的关系。也给出了正比室坪特性与气体成份的关系。

关于 ^{55}FeX 射线谱的两个峰, 提出了与文献[4]不同的解释。

关键词: 簇射计数器 正比室 气体放大系数 能量分辨率 坪特性

一、前言

到目前为止, 国外在正负电子对撞机上工作的簇射计数器所使用的气体探测器大多为正比室。在北京正负电子对撞机上, 正比室仍为簇射计数器所使用的气体探测器的方案之一。本文为其特性的研究。

二、结构

正比室的结构如图1所示, 尺寸为 $1040\text{mm} \times 486\text{mm} \times 15\text{mm}$, 共分为14个小室, 其大小为 $1000\text{mm} \times 30$

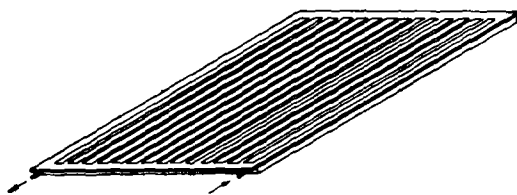


图1 正比室的结构

$\text{mm} \times 8\text{mm}$, 由整块的铝板铣成。为了使用放射源进行测量, 作为室阴极一部分的上盖是由 $15\mu\text{m}$ 厚的镀铝聚酯薄膜做成的。整个室的四周刨以深 1.5mm 、宽 2.5mm 的槽, 压以直径为 2mm 的真空橡皮筋, 以防漏气。绝缘子用聚四氟乙烯制成。在绝缘子的中心有一外径为 0.70mm 、内径为 $100\mu\text{m}$ 的铍铜管。阳极丝穿过铍铜管后, 用钳子夹紧, 不用焊接。

三、丝的张力

阳极丝为镀金钨丝, 采用不同的直径, 以便探讨丝直径对室性能的影响。为了避免静电不稳定性和可能的机械振动, 阳极丝应加上一定的张力。对于两阴极平面接地的单根阳极丝而言, 能够稳定工作的最大长度为^[1]

$$L_{\max} = \frac{4d \ln\left(\frac{d}{r_0}\right)}{V} \sqrt{T} \quad (1)$$

式中, d 是阳极丝至阴极平面的距离 (cm); r_0 是阳极丝的半径 (cm); V 是阳极的电位 (kV); T 是丝的张力 (N); $L_{\max}$ 是张力为 T 时的最大阳极丝长度 (m)。

如果阳极丝的长度 L 一定, 由此式得出的张力则为最小张力 $T_{\min}$ 。例如, $L=1\text{m}$, $d=0.4\text{cm}$, $r_0=15\mu\text{m}=1.5 \times 10^{-5}\text{cm}$, $V=4\text{kV}$, 则 $T_{\min}=0.20\text{N} \approx 20\text{gf}$ 。为可靠起见, 所使用的张力为最小张力的2倍, 即直径为 $30\mu\text{m}$ 时加 40gf 的张力, 而其在弹性变形下可施加的最大张力为 148gf ^[2]。

四、正比室的特性

1. 对于不同的丝直径, 气体放大系数与工作电压的关系

气体放大系数 M 或输出脉冲幅度 A 与工作电压 V 的关系通过不同的丝直径进行了测量, 实验结果如图2所示。使用的气体为 CH_4 、 Ar , 二者的混合比为 $\text{CH}_4/\text{Ar}=50/50$ 。采用气流式供气, 约一个大气压。 ^{55}Fe 作放射源。放电电阻 $R_0=10\text{k}\Omega$, 分布电容 $C_0=250\text{pF}$ 。放大器的放大倍数 $K=256$, 用 4096 道分析脉冲幅度。

可以看出, 随着丝直径的增加, 工作电压增高。气体放大系数或输出脉冲幅度随着工作电压的增高在很大

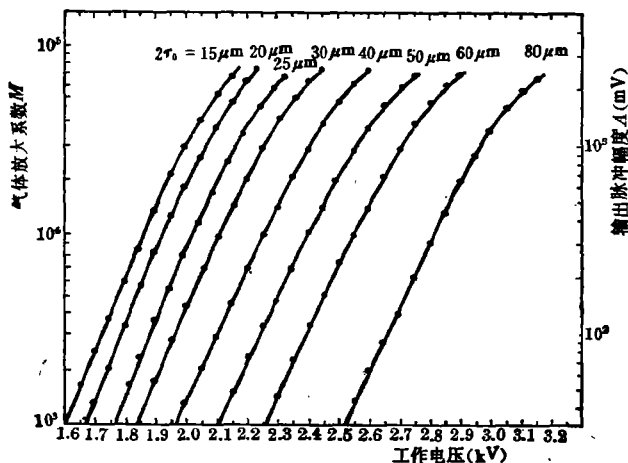


图2 对于不同的丝直径, 气体放大系数或输出脉冲幅度与工作电压的关系

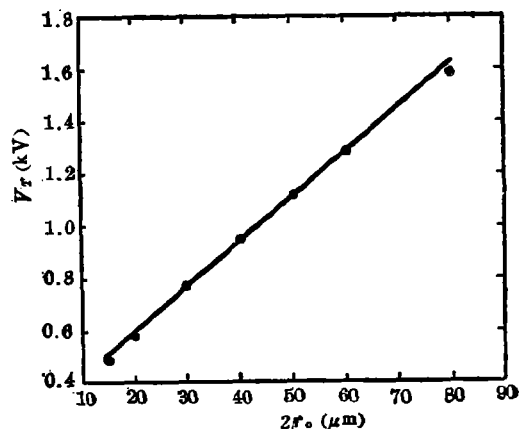


图3 阈电压与丝直径的关系

范围内指数上升。一般认为, $\ln M$ 随 V 改变的直线部分为正比室的工作区。

在正比区内, 气体放大系数 M 与工作电压 V 的关系可以用下式表述^[3,4]

$$M = \exp \left[\sqrt{4KNf \left(\frac{C/l}{2\pi\epsilon_0} \right) r_0 V \left(\sqrt{\frac{V}{V_T}} - 1 \right)} \right] \quad (2)$$

式中, K 为 Korff 系数 (cm^2/kV); N 为单位体积 (cm^{-3}) 内的分子 (或原子) 数; $f=0.165$, 为校正因子; C/l 为单个小室每单位长度上的电容 (pF/m); $\epsilon_0=8.85\text{pF}/\text{m}$, 为气体的介电常数; r_0 为阳极丝的半径 (cm); V_T 为阈电压 (kV)。

所谓阈电压, 就是刚刚开始雪崩放大时的临界电压。或用下式定义

$$\frac{r_c}{r_0} = \frac{V}{V_T} \quad (3)$$

即当临界半径 $r_c=r_0$ 时的工作电压。在本实验的条件下, 阈电压与丝直径的关系见图3。

氙的 Korff 系数^[3] (K) 为 $1.81 \times 10^{-14} \text{cm}^2/\text{kV}$, 甲烷的 K 为 $1.24 \times 10^{-14} \text{cm}^2/\text{kV}$, 对混合气

$$K = \Sigma K_i N_i / \Sigma N_i \quad (4)$$

如, $\text{CH}_4/\text{Ar}=50/50$ 时, $K=1.53 \times 10^{-14} \text{cm}^2/\text{kV}$ 。

用式(2)计算的放大系数与实验结果较好地相一致。例如, 对于 $2r_0=40\mu\text{m}$ 的小室, 其阈电压 $V_T=0.96\text{kV}$, 单位长度的电容 $C/l=13.5\text{pF}/\text{m}$ 。当 $V=2.1\text{kV}$ 时, $M=3.0 \times 10^3$; 当 $V=2.4\text{kV}$ 时, $M=3.0 \times 10^4$ 。与实验结果相吻合。

2. 对于不同的气体成份, 输出脉冲幅度与工作电压的关系

使用 Ar 和 CO_2 为工作气体, 改变 CO_2 的含量, 测量了输出脉冲幅度 A 与工作电压的关系 (图4)。

使用较复杂的混合气体时, 要预言气体的特性常常是困难的, 例如, 只要在 Ar 中混入很小比例 (如 0.1%) 的负电性气体 O_2 , 就会使初级电离电子受到明显的损失。但如果同时再加入少量的 CH_4 或 CO_2 等气体时, 可以把电子的平均能量从纯氙的 10 eV 降低到 1 eV 以下, 从而使漂移速度增加, 明显地减小电子的损失。所以, 为什么不使用纯粹的氙作为正比室的工作气体, 这是重要的原因之一。

实验中所使用的 Ar 的纯度为 99.99%, 其负电性气

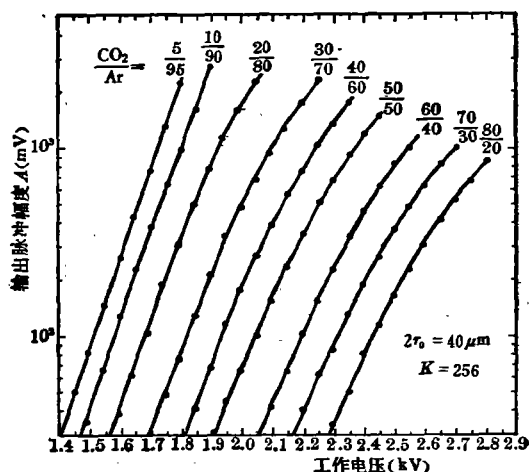


图4 对于不同的气体成份, 输出脉冲幅度与工作电压的关系

体的含量: $O_2 < 15\text{ppm}$, $H_2O < 30\text{mg/cm}$ (北京氧气厂); CH_4 的纯度为 99.9%, 其负电性气体的含量: $O_2 < 60\text{ppm}$, $H_2O < 50\text{ppm}$ (四川 6082 化工厂); CO_2 , 厂家未给出杂质含量 (北京酒精厂)。

从图 4 可以看出, CO_2 的含量较少时, $\ln A$ 与 V 有很好的线性关系。随着 CO_2 含量的增加, 这种线性越来越坏。这是因为 CO_2 是弱负电性气体, 其含量过大时, 不但不能减小电子的损失, 反而会吸附电子, 使输出脉冲幅度减小, 从而破坏脉冲幅度与初始电子的正比性。

3. 能量分辨率

用 ^{55}Fe 的 X 射线对正比室的能量分辨率进行了测量。影响能量分辨率的因素很多, 主要有: 初级电离电子数目的统计性涨落、气体放大系数的统计性涨落、气体成份、阳极丝的不均匀性和放大器的噪声等。

前两个统计性涨落因素对能量分辨率的贡献可用标准偏差表示如下^[5]

$$\sigma = \sqrt{\frac{F + 0.68}{\bar{n}}} \quad (5)$$

式中, F 为 Fano 因子, 对于 $CH_4/\text{Ar} = 10/90$ 的混合气, $F = 0.19$; $\bar{n}$ 为初始离子对的平均数, 对于 ^{55}Fe X 射线谱的全能峰, $\bar{n} = 205$ 。

σ 也可表示为

$$\sigma = KE^{-1/2} \quad (6)$$

式中, E 为入射粒子在正比室中的能量沉积 (keV), 对 ^{55}Fe X 射线的全能峰而言, $E = 5.32\text{keV}$; K 值在 0.146 与 0.178 之间。

也可以用能谱峰值的半高宽 (FWHM) 表示能量分辨率

$$FWHM = 2 \times 1.175\sigma$$

对于 ^{55}Fe X 射线能谱的全能峰, 或用式 (5), 或用式 (6) 计算, 当气体为 $CH_4/\text{Ar} = 10/90$ 时, 正比室可能获得的最佳能量分辨率 (FWHM) 为 15.3%。

图 5 为 $CH_4/\text{Ar} = 10/90$, $2r_0 = 40\mu\text{m}$, $V = 2050\text{V}$ 时 ^{55}Fe X 射线能谱的照片。其能量分辨率 (FWHM) 为 16.5%。

(1) 丝直径对能量分辨率的影响 对于不同的丝直径, 能量分辨率随工作电压而变化 (图 6)。从图 6 可以看出, 随着丝直径的增大, 其最佳能量分辨率变坏。例如: $2r_0 = 25\mu\text{m}$ 时, 最佳分辨率为 16.5%; $2r_0 = 60\mu\text{m}$ 时, 为 18.0%。这是由于丝的不均匀性而引起气体放大系数涨落的结果。在丝的表面, 电离的平均自由程大约为 $1\mu\text{m}$, 而这种大小的不均匀性随着丝直径的增大而越来越严重。

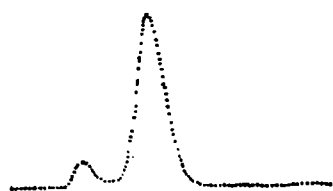


图 5 ^{55}Fe X 射线能谱

$\frac{CH_4}{Ar} = \frac{10}{90}$, $2r_0 = 40\mu\text{m}$,
 $V = 2050\text{V}$

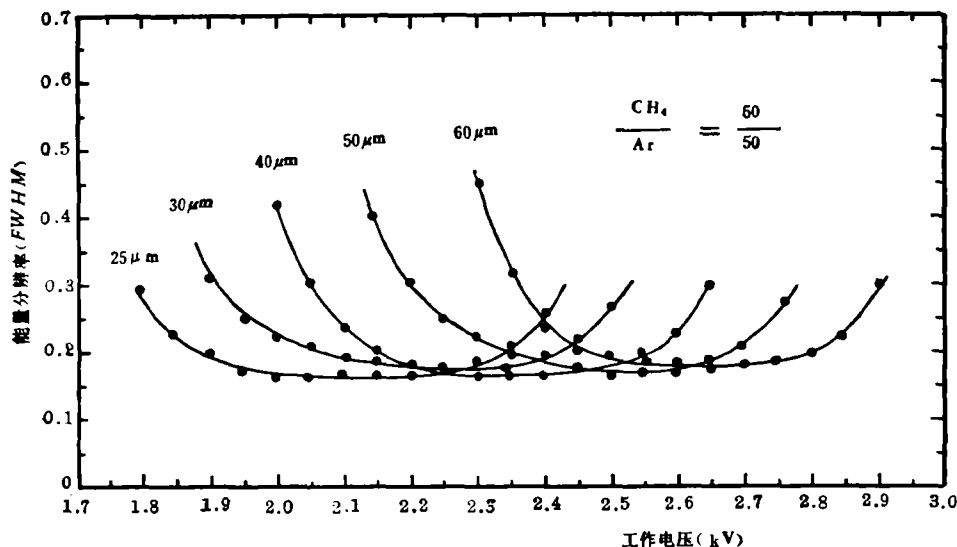


图 6 对于不同的丝直径, 能量分辨率与工作电压的关系

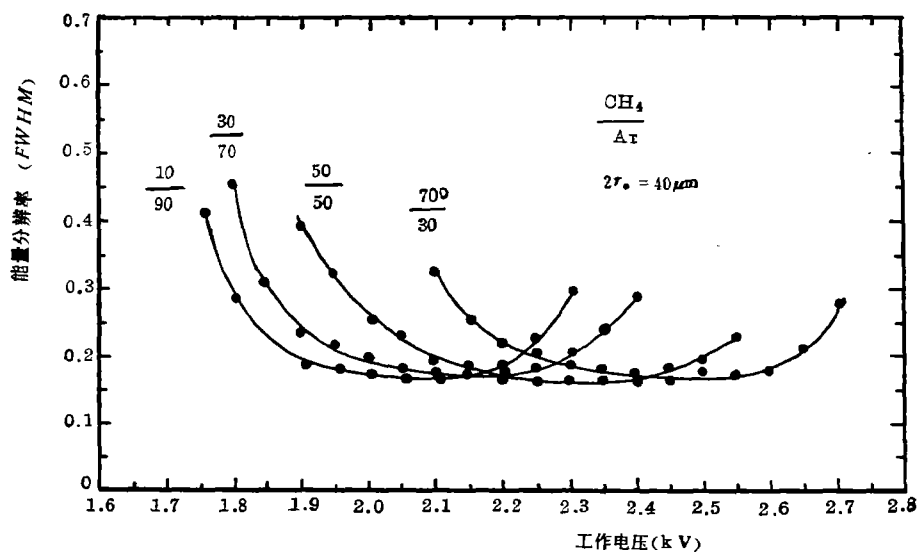


图7 改变 CH_4/Ar 的比值, 能量分辨率与工作电压的关系

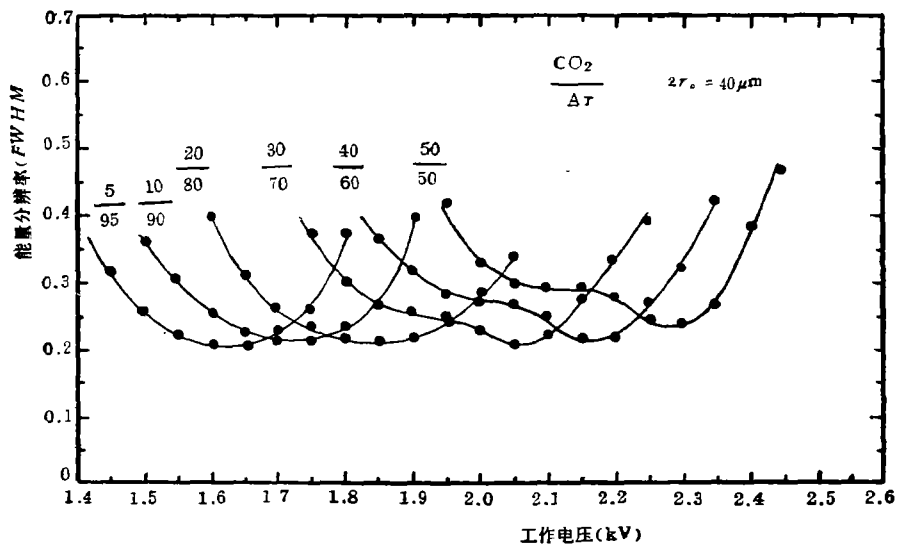


图8 改变 CO_2/Ar 的比值, 能量分辨率与工作电压的关系

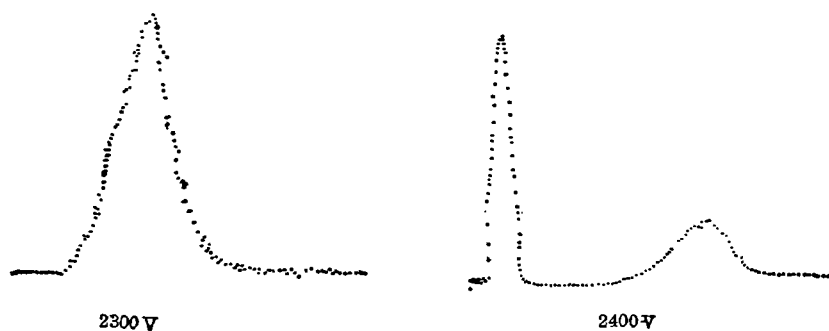


图9 ^{55}FeX 射线谱随工作电压升高的变化
 $\text{CO}_2/\text{Ar}=40/60$, $2r_0=40\mu\text{m}$

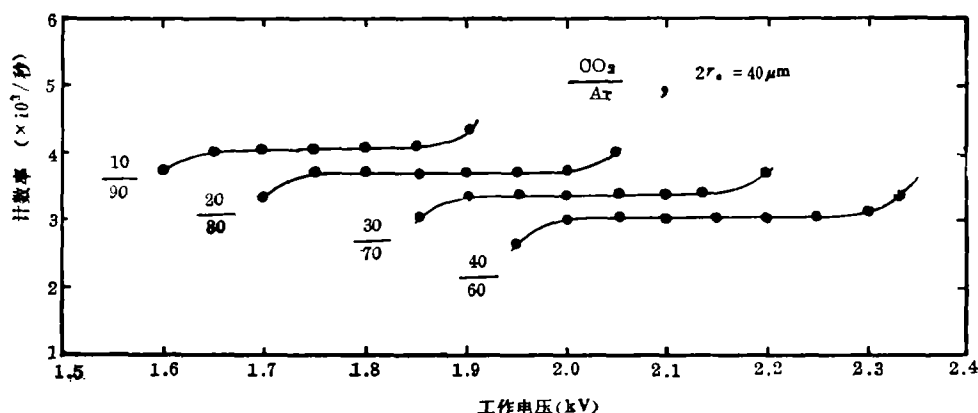


图 10 坪特性曲线

(2) 气体成份对能量分辨率的影响 对于 $\text{Ar}+\text{CH}_4$ 气体, 随着 CH_4 比份的增大, 能量分辨率未观察到明显的变化 (图 7)。对于 $\text{Ar}+\text{CO}_2$ 气体, 其变化非常明显 (图 8), 测得的最佳能量分辨率为 20.5%。随着 CO_2 比份的增多, 分辨率越来越坏。但当 CO_2 比份较大时 (如 $\text{CO}_2/\text{Ar}=40/60$), 随着工作电压的升高, “分辨率”

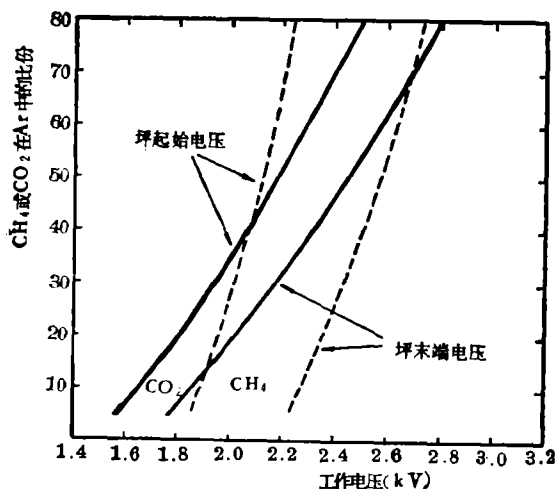


图 11 坪长与气体比份的关系

反而有变好的趋势。不过此时的正比室已工作在有限正比区, 输出的脉冲幅度已与入射粒子在正比室内的能量沉积不成正比。当工作电压升至 2300V 时, 逃逸峰与全能峰合二为一, 当工作电压升至 2400V 时, 能够明显地看出自淬灭流光所产生的大脉冲的峰 (图 9)。

$\text{Ar}+\text{CO}_2$ 是一种较为理想的工作气体, 经济安全, 不会在正比室内产生任何沉积物。

影响能量分辨率的其它因素还有: 工作电压可能的不稳定性、气体温度或压强的变化、窗效应等。

4. 坪特性

正比室具有较好的计数率坪特性, 坪斜率在 2%/100V 左右。由图 10 可以看出, 随着 CO_2 含量的增高, 计数率在下降。这是因为氩气比份的减小, 光电转换效率也随之减小的缘故 (参考图 12)。

坪长与气体种类和比份有关, 实验曲线如图 11 所示。

五、关于 ^{55}Fe X 射线谱两个峰的解释

^{55}Fe X 射线谱有两个峰, 从不同的文献上可以看到, 对于全能峰均标以 5.9keV, 无异议; 而对于逃逸峰则标以不同的能量, 如 2.7keV、2.90keV、2.95keV 和 3.0keV 等。

文献 [4] 的解释为: 逃逸峰的形成是由于当 Ar 捕获一个自由电子而填充 K 层的空位时, 发射一个 3.2keV 的光子, 而此一个光子又逃出计数管的体积之外。因此, 如图 5 所看到的那样, 逃逸峰的位置在 $E_{\text{esc}}=5.9-3.2=2.7\text{keV}$ 。

本文作者认为, 这种解释是不妥当的。因为: 第一, Ar 原子 K 层的空位只能由靠近 K 层的 L 层电子来填充, 不可能由自由电子填充; 第二, 忽略了电子的结合能, 这对于软 X 射线来说, 是不允许的。

正比室对 X 射线的探测要通过 X 射线在气体原子上的光电转换, K 层电子的光电截面 σ 与原子序数 Z 的关系为

$$\sigma \sim Z^5$$

所使用的气体中以 Ar 的原子序数为最大 ($z=18$), 所以光电子主要在 Ar 原子上产生。图 12^[6] 指出了在标准温

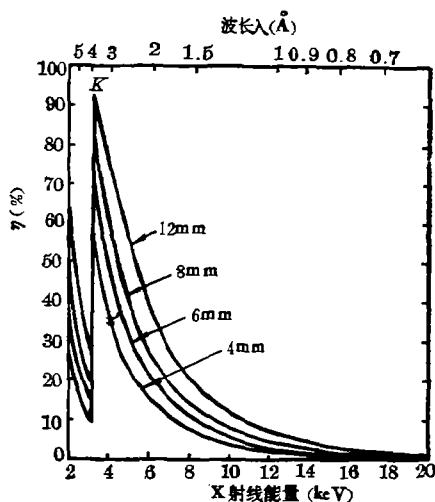


图 12 在标准温度和压强下, 氩的 X 射线光电转换效率与能量和气体层厚度的关系

度和压强下, Ar 的 X 射线光电转换效率 η 随 X 射线能量的变化与氩气层厚度的关系。

^{55}FeX 射线的能量取小数点后三位数字, 为 $E_X = 5.895\text{keV}$ 。Ar 原子 K 层电子的结合能为 $E_K = 3.203\text{keV}$ 。所以产生光电子的能量为

$$E_1 = E_X - E_K = 2.692\text{keV}$$

之后, L 层电子填充 K 层空位。L 层电子的结合能为 $E_L = 0.287\text{keV}$ 。多余的能量或者以 Auger 电子的形式释放, 或者以荧光 X 射线的形式释放而再在 L 层上产生光电子。其能量为

$$E_2 = E_K - 2E_L = 2.629\text{keV}$$

对于 ^{55}FeX 射线源, 在 Ar 中 88% 的转换产生两个电子, 它们的射程小于 $300\mu\text{m}$ (图 13^[7]), 能量全部损失在正比室内, 形成 ^{55}FeX -射线谱的全能峰。其对应的能量为

$$E = E_1 + E_2 = 5.321\text{keV}$$

当荧光 X 射线不产生光电子而逸出正比室体积之外时即形成逃逸峰, 对应的能量为 2.692keV 。两个峰值之比为 1.977, 与实验结果一致。由此可推出, 如果全能峰标以 5.895keV , 则逃逸峰应标以 2.982keV ; 如果全能峰标以 5.9keV , 则逃逸峰应标以 3.0keV 。

文献 [4] 在计算气体放大系数时, 对初始离子对数 n_T 的计算为 $n_T = \frac{5.9}{0.026} = 227$ (26eV 为产生一对离子所需要的能量)。显然, 使用 5.9keV 来计算是不对的, 应该改为 5.32keV 。文献 [4] 的作者们在讨论中也发现 n_T 偏大。很明显, 这里的原因无疑是主要的。

感谢叶铭汉同志和周月华同志的仔细审稿并提出宝贵意见。

参 考 文 献

- [1] D. C. Cheng *et al.*, 1973 International conference on instrumentation for high energy physics, p.269.
- [2] F. Sauli, CERN report 77-09 (1977).
- [3] M. E. Rose and S. A. Korff, *Phys. Rev.*, 59, 850 (1941).
- [4] S. Behrends and A. C. Melissinos, *Nucl. Instr. Meth.*, 188, 521 (1981);
- [5] M. W. Charles and B. A. Cooke, *Nucl. Instr. Meth.*, 61, 31 (1963);
- [6] R. A. Boie *et al.*, *Nucl. Instr. Meth.*, 201, 93 (1982).
- [7] F. Sauli, Proceedings of the wire chamber conference, 1978, p.148;

(1983年5月3日收到)

required to address each pulse into memory, the main disadvantage of this method is the restriction in vibrator frequency. A brief introduction of the Mössbauer spectrometer in pulse height modulation mode is given in this paper. It can be used up to 10~100kHz.

Keywords: modulation mode time mode deadtime

The investigation of some properties of proportional chambers

Wang Linzhou Li Lili

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica*)

A model of the proportional chamber for use in shower counters is described. The properties of CH₄/Ar and CO₂/Ar for use in proportional chamber have been studied. The gas multiplication and energy resolution have been investigated as a function of the gas mixture and wire diameter for ⁵⁵Fe X-rays. And the plateau characteristics of the proportional chambers are reported as a function of the gas mixture.

An explanation of the double peaks in ⁵⁵Fe X-rays spectrum is given, which is different from reference^[4].

Keywords: proportional chambers gas amplification factor energy resolution
plateau characteristic shower counter

The radiation crosslinking of silicone rubber (SR) and the effects of filler, medium and molecular weight on crosslinking

Wang Mingjun Ma Liejun Li Fangyu

(*Shanghai Research Institute of Chemical Industry*)

The radiation induced crosslinking of SR is investigated under the different experimental conditions. The values of various crosslinking parameters have been calculated. By comparing variation of these parameter values the effects of filler, sidegroups, medium and MW on the radiation crosslinking are discussed. The results are as follows.

The rate of gel formation is increased with methyl-vinyl siloxane chain in DMSR and R_g while it is decreased with phenyl-group. SR can be crosslinked at low dose with the fumed silica. This experimental result shows that the fumed silica is a sensitizer. The effects of mediums on crosslinking parameters of SR are CO₂>N₂>air>O₂, but the difference is very small. Therefore the radiation crosslinking of SR in air is practical. In this work, the effect of MW on the G_{cross} value is given by the following equation:

$$G_{\text{cross}} = G_i + A/\bar{M}_w$$

where G_i is the limiting value of G_{cross} at infinity of MW.

Keywords: crosslinking parameter silicone rubber side-group fumed silica
sensitizer molecular weight nitrogen carban dioxide air oxygen