

Kr、Xe 高压气体电离室时间特性研究

谈春明, 邬海峰, 卿上玉, 王立强

(清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要:对充氪、氙气体的高压电离室的时间响应特性进行理论分析和推导, 分别对这 2 种气体及其混合气体电离室在射线入射后的脉冲上升时间进行测量。测量结果与理论计算值吻合。由此验证了此类电离室响应时间可达到 10 ms 以下, 满足成像要求。

关键词:充气电离室; 时间响应; 氪气; 氙气

中图分类号: TL811

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2006)S0-0139-03

Study on Time Response Character for High Pressure Gas Ionization Chamber of Krypton and Xenon

TAN Chun-ming, WU Hai-feng, QING Shang-yu, WANG Li-qiang

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The time response character for Kr and Xe high pressure gas ionization chamber is analyzed and deduced. Compared with the measure data of pulse rising time for three gas-filled ionization chambers, the calculated and experimental results are equal to each other. The rising time less than 10 ms for this kind of ionization chamber can be achieved, so this ionization chamber is able to meet the requirement for imaging detection.

Key words: gas-filled ionization chamber; time response; krypton; xenon

高压充气电离室型阵列探测器应用于集装箱检测已获得了成功^[1]。与加速器 X 射线源相比, ⁶⁰Co 源 γ 成像系统的检测射线强度较低, 以至对电离室气体的探测灵敏度要求更高。在惰性气体中, Kr、Xe 原子序数大, 其能量阻止本领较高。一般充入几十个大气压 Kr 或 Xe 的电离室可有较好的灵敏度和饱和特性。这类电离室的时间特性, 即从射线入射进电离室灵敏体积到输出电流达到最大值的响应时间可由实验测量。由于气体的正离子漂移速度远小于

电子漂移速度, 正离子的漂移对响应时间起决定作用。

1 理论分析与计算

实验用电离室的电极为平行板状, 极间距离 d 为 2 mm, 极间电压在 1 000 V 以下。为求得响应时间, 可采用简化模型^[2]进行推导。气体中离子迁移率可表示为:

$$\mu^+ = \frac{e\lambda_0}{2M\bar{v}} \quad (1)$$

其中: μ^+ 为离子迁移率、 M 为离子质量、 e 为基

本电荷、 λ_0 为单位气压下离子的自由程、 \bar{v} 为乱运动平均速度。

由式(1),通过查获惰性气体 Ar 的正离子迁移率可估算 Kr 和 Xe 的相应值。对惰性气体可作如下假设:

1) 气体原子半径与质量数立方根 $A^{1/3}$ 成正比,由于惰性气体在实验条件下可近似为理想气体,则 λ_0 与 $A^{2/3}$ 成反比;

2) 气体原子平均动能为 $3kT/2$, k 为玻尔兹曼常数, T 为绝对温度,当温度相同时,其动量 $M\bar{v}$ 正比于 $A^{1/2}$ 。

在上述假设条件下,Ar、Kr、Xe 3 种气体的正离子迁移率反比于 $A^{2/3} \cdot A^{1/2}$ 。由此可得:

$$\mu_{X^+} = \mu_{Ar^+} \frac{\sqrt[3]{A_0^2} \sqrt{A_0}}{\sqrt[3]{A_X^2} \sqrt{A_X}} \quad (2)$$

这样,已知 Ar 的离子迁移率 μ_{Ar^+} ,由式(2)可得到 Kr 或 Xe 的相应值 μ_{X^+} 。

另外,有:

$$\mu^+ = \mu^+ \frac{E}{p} \quad (3)$$

$$t_r = \frac{d}{u^+} \quad (4)$$

式中: u^+ 为漂移速度。电场强度 E 、气压 p 相同时,响应时间 t_r 正比于 $A^{7/6}$,有:

$$t_{rX} = t_{r0} \left(\frac{A_X}{A_0} \right)^{7/6} \quad (5)$$

查得 Ar 的正离子迁移率为 $1.37 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$ 。设极间电压为 1 000 V,气压为 48 个标准大气压。已知 d 为 2 mm。算得 u^+ 为 142.7 cm/s, t_r 为 1.40 ms。对于 Ar、Kr、Xe,原子质量数分别为 39.94、83.80、131.30。由此可得出,充 Kr 气时, t_r 约为 3.32 ms;充 Xe 气时, t_r 约为 5.61 ms。

2 实验装置与结果

实验装置如图 1 所示,扇面 8 等分,共 4 组,开启和遮挡交替旋转。 $1.85 \times 10^{11} \text{ Bq}$ ^{241}Am 源的检测射线经准直器和旋转的扇叶后进入电离室的灵敏体积,产生的电流信号由前放放大后输入至示波器。由于扇叶旋转时一开一闭,在示波器上产生交替上升、下降的脉冲信号。扇叶转速可调,最大为 $1\,380 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,开启和关闭时间相等,最小为 5.4 ms,实验调为 20 ms 左右时可观测到合适的脉冲波形。理想情况下,信号上升下降时间相等,且代表电离室中正离子从收集极到负的高压极漂移所花费的时间。分别对充 48 个标准大气压下的 Kr 气、Xe 气及 Kr 和 Xe 的混合气体(分子个数中 Kr 占 80%、Xe 占 20%)测量其时间特性,所得结果列于表 1。

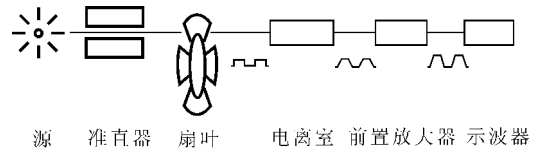


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Simplified diagram of experiment

由表 1 中数据可以看出,当电离室极间电压较大时,响应时间可在 10 ms 以下。Kr 与 Xe 混合气体的响应时间处在两者之间,因为所充氙气比例更大,其结果也靠近充氙气的情况。对 $t_r - 1/V$ 采用拟合公式 $t_r = b \cdot 1\,000/V + a$ 进行拟合,3 种气体条件下的拟合参数分别为:充 Kr 气时, $a=0.87, b=2.60, r=0.998$;充 Xe 气时, $a=0.61, b=4.81, r=0.997$;充混合气体时, $a=0.72, b=2.79, r=0.994$ 。拟合参数 r 为

表 1 3 种气体中的电压与响应时间 t_r 关系

Table 1 Relationship between voltage and rising time t_r for three kinds of gas

序号	Kr		Xe		Kr 与 Xe 的混合气体	
	电压/V	时间/ms	电压/V	时间/ms	电压/V	时间/ms
1	200	14.0	200	25.0	200	15.0
2	400	7.0	400	12.0	400	7.0
3	600	5.0	600	8.0	600	5.0
4	800	4.5	800	7.0	800	4.5
5	1 000	3.5	1 000	6.0	1 000	4.0

相关系数,其数值接近 1 则拟合结果接近于直线。 a 是电压 V 趋向无穷大时对应的响应时间 t_r ,代表扇叶边线扫过射线束的时间,其大小受准直器线宽和扇叶转速的影响。实验中,准直器线宽为 1 cm,扇叶半径为 40 cm,弧长 30 cm,实验条件下脉冲顶宽为 15~30 ms,对时间的影响为 0.5~1.0 ms。此值为拟合结果中截距 a 值的大小。

根据拟合结果,极间电压取 1 000 V 时,Kr、Xe 的相应时间分别为 3.47、5.42 ms。从示波器上读取的时间值误差为 ± 1 ms,拟合后上述结果的误差为 ± 0.5 ms,这一结果与实验前估计值相符合。

3 结论

Ar、Kr、Xe 3 种气体原子结构相似,它们经辐射电离产生的正离子在电场作用下遵循相同的规律。经简单推导,可从 Ar 的气体漂移特性得到 Kr 和 Xe 的相应值。特别的,在较高压

力(50 标准大气压左右)下,这种关系依然存在,其气体中正离子的漂移运动仍然能用文中的近似公式推导。理论和实验表明,采用充 Kr、Xe 或其混合气体的高压气体电离室,其响应时间都不难做到 10 ms 以下。这对于数字辐射成像用阵列探测器已可适用。考虑到 Kr、Xe 电离室探测灵敏度的显著提高,这类电离室的应用前景将十分广阔。

参考文献:

- [1] 安继刚, 邬海峰, 卿上玉. 大型客体 X 或 γ 辐射成像阵列探测器的研制[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1994, 34(3):56-62.
AN Jigang, WU Haifeng, QING Shangyu. Research and construction of X or γ radiography array detector for large objects [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1994, 34(3):56-62(in Chinese).
- [2] 安继刚. 电离辐射探测器[M]. 北京:原子能出版社, 1995:67-69.