

## $\alpha$ 射线致空气电离的实验研究

万俊生, 杨永青, 刘书焕, 赵英, 刘喃喃

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

**摘要:** 利用平行电极板裂变电离室测量技术对  $\alpha$  射线致空气电离进行实验研究, 探讨电极板间距离和放射源测量位置对测量结果的影响。结果表明, 当电极板间距离小于两倍  $\alpha$  粒子飞行距离时, 测量结果随电极板距离的增大而微弱增大, 电离室中放射源的位置对测量结果影响不显著。实验测量的  $\alpha$  射线产生的离子对与理论计算结果相吻合。

**关键词:**  $\alpha$  射线致空气电离; 实验测量;  $^{238}\text{Pu}$

中图分类号: TL811.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2008)S0-0336-04

### Experimental Studies on Atmosphere Ionization Induced by $\alpha$ -rays

WAN Jun-sheng, YANG Yong-qing, LIU Shu-huan, ZHAO Ying, LIU Nan-nan

(Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-16, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** The atmosphere ionization induced by  $\alpha$ -rays was experimentally studied using fission ionization chamber with two plane electrodes. The influences of distance between the two electrodes and the position of radioactive source in the chamber on the experimental results were explored. The results show that the measured ion-pairs increase slightly with the distance between the two electrodes as the distance shorter than the double length of  $\alpha$ -ray flying in the air. The position of radioactive source in the chamber has no remarkable influence on the measurement. The experimental results of ion-pairs induced by  $\alpha$ -rays in the air agree well with that from the theoretical calculation.

**Key words:** atmosphere ionization induced by  $\alpha$ -rays; experimental measurement;  $^{238}\text{Pu}$

随着辐射防护<sup>[1]</sup>、微剂量学<sup>[2]</sup>和放射性同位素等离子体隐身技术<sup>[3]</sup>的发展, 射线与物质相互作用的研究越来越受到人们的重视。 $\alpha$ 射线与空气的作用主要表现在使空气电离, 早在1899年, Rutherford就研究了气体物质吸收射线的能量与气体电离的关系<sup>[4]</sup>。近年来, 射线致空气电离的实验研究较少, 前期只进行了一些蒙特卡罗理论模拟研究<sup>[5-6]</sup>。

$\alpha$ 射线能量损失途径主要有在源底板中的能量沉积、源靶中的自吸收能量损失、在空气中的能量沉积。引起空气电离的主要是 $\alpha$ 射线在空气中的能量沉积, 空气中的能量沉积又分为电离能量沉积和非电离能量沉积(核阻止本领)。本工作将研究 $\alpha$ 射线在空气中的能量沉积引起的空气电离。

### 1 实验装置

在标准大气压下的空气中,  $\alpha$  射线的射程短, 是一种高电离粒子, 它在空气中通过产生电子/离子对来释放能量。理论计算表明, 一般的  $\alpha$  粒子在空气中能够产生  $10^5$  个离子对。据报道, 生成的离子对在空气中复合需要较长的时间<sup>[7]</sup>, 如果能够在电极上接收这些离子对, 即能测量两电极板间的  $\alpha$  粒子产生的离子对。根据上述原理, 所设计的实验装置示于图 1。实验装置主要包括微电流计 (6517A Electrometer, 测量范围为 0.1 pA~999 mA)、高压直流电源 (ORTEC556 电源, 可以提供 0~3 000 V 直流电压, 0~10 mA 电流, 输出电压可调) 和电离室等离子体测量池 (由两块铜板组成, 每块板长 200 mm, 高 150 mm, 厚 1 mm), 测量池可调 (调动两板间距离)。

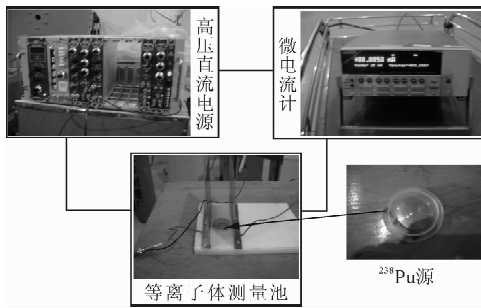


图 1  $\alpha$  射线致空气电离实验装置

Fig. 1 Experimental set-up for studies on atmosphere ionization induced by  $\alpha$ -rays

### 2 结果与讨论

研究用  $\alpha$  源为  $^{238}\text{Pu}$  源 (电镀源, 源强 0.116 MBq, 源直径 20 mm, 有约 1  $\mu\text{m}$  厚的 Au 保护层)。

#### 2.1 平板电极间距离对测量的影响

图 2 显示了电极板间距离和电压对测量电流的影响。由图 2 可见, 电极板间距离一定时, 随着电极板间电压  $V$  的升高, 电流  $I$  增大, 达到一定值后, 趋于稳定。从无  $\alpha$  源时的本底值看 (图 2), 电流增大趋势并非由漏电流所引起的 (本底电流为几 pA, 测量到的电流为几百 pA), 而是收集  $\alpha$  产生的离子对的结果。当离子对均被电极板收集后, 电流变化趋稳。

将电流转化成离子对 (每秒收集的离子对 =

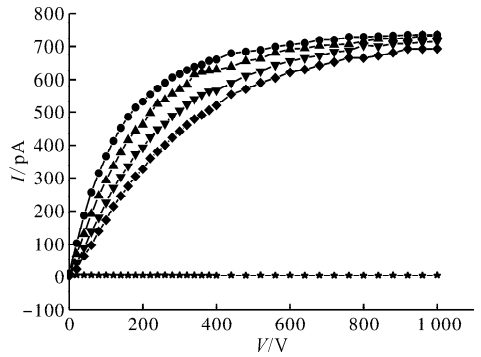


图 2 电极板间距离对电流的影响

Fig. 2 Influence of distance

between two electrodes on measured current

电极板间距离: ★——本底; ●——55 mm; ▲——75 mm; ▼——90 mm; ◆——105 mm

电流 / ( $1.6 \times 10^{-19}$ ))、电压转换成电场强度 (离子对靠电场拉向电极板), 结果示于图 3。由图 3 可见, 电场强度相同, 不管两电极板间的距离和电压差别多大, 收集到的离子对数则变化不大。由此也可判断, 电极板收集到的是  $\alpha$  粒子产生的离子对。

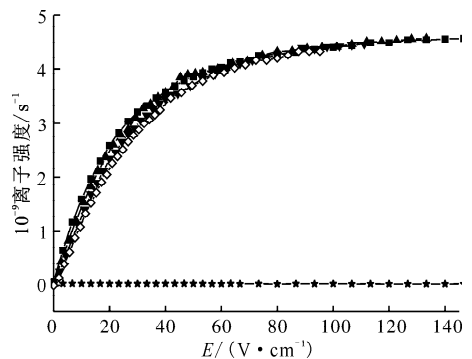


图 3 测量到的离子对与电场强度的关系

Fig. 3 Relationship

between measured ion-pairs and electric field

电极板间距离: ★——本底; ■——55 mm; ▲——75 mm; ▼——90 mm; ◇——105 mm

#### 2.2 $\alpha$ 源在电极板中测量位置的影响

为考察  $\alpha$  源测量位置的影响, 在电极板距离为 6 cm 时获得了  $\alpha$  源测量位置的变化对接收到离子对的影响, 结果示于图 4。由图 4 可见,  $\alpha$  源放置在电离室测量池中心 (距边缘 10 cm)、离边缘 6、2 cm 3 种情况下测得的电流强度相同。这表明, 实验使用的电极板足够大, 产生的离子对向电极板外逃逸的可能性可忽略。

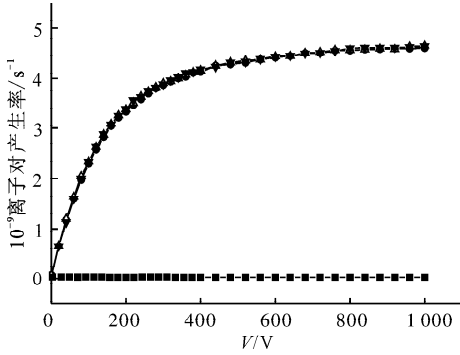


图4 测量位置对离子对接收的影响

Fig. 4 Influence of position of radioactive source in cell on measured ion-pairs

■——电极板间距离 6 cm 下的本底;  
●——位于测量中心,距测量池边缘 10 cm;  
△——距测量池边缘 6 cm;▼——距测量池边缘 2 cm

### 2.3 $\alpha$ 源致空气电离及其离子对的复合

从图 2~4 可见,电场强度达到一定后,测量到的电流虽已趋于平稳,但随着电场强度的增加,电流仍在缓慢升高,这说明,离子对的平均复合时间较长,但有部分离子对的复合时间较短。电场较弱时,离子对被电极收集所需时间较长,电场较强时,离子对收集所需时间较短,故能观测到随着电场强度增加,电流增大的实验现象。射线引起的空气电离及其离子对的复合问题早在 20 世纪二、三十年代就有研究<sup>[4]</sup>,人们发现,对于相同的实验装置,测量到的电流与两电极间的电压有下列关系:

$$\frac{1}{I} = \frac{1}{I_s} + \frac{K}{U} \quad (1)$$

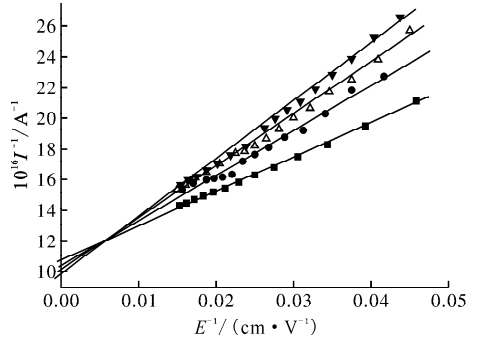
式中: $I$  为测量到的电流; $I_s$  为不发生复合情况下的饱和电流,即所有的离子对都被电极接收到时应产生的电流; $U$  为两电极间的电压; $K$  为常数。

如果把电极间的电压转换成电场  $E$ ,则有:

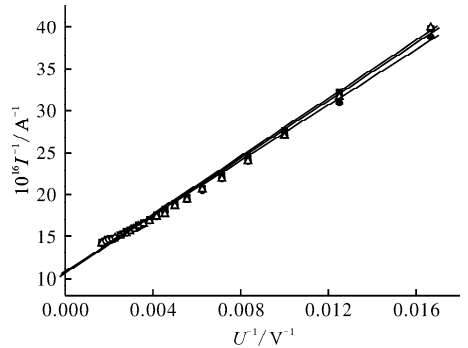
$$\frac{1}{I} = \frac{1}{I_s} + \frac{K}{E} \quad (2)$$

图 5 显示两电极间距离不同时 0.116 MBq  $^{238}\text{Pu}$  源产生的电流倒数  $1/I$  与电场倒数  $1/E$  之间的关系曲线,图 6 所示为电极间距离不变 (6 cm) 而  $^{238}\text{Pu}$  源在电离室中的位置变化时电流倒数  $1/I$  与电压倒数  $1/U$  之间的关系。

从图 5 可见,两电极板间距离的变化对  $1/I$  与  $1/E$  的关系有影响,随着电极板间距离的减

图5 电极间距离对  $1/I$  与  $1/E$  关系的影响Fig. 5 Influence of distance between two electrodes on relationship of  $1/I$  and  $1/E$ 

电极板间距离:■——55 mm;●——75 mm;  
△——90 mm;▼——105 mm

图6  $\alpha$  源位置对  $1/I$  与  $1/U$  关系的影响Fig. 6 Influence of  $\alpha$ -source position in chamber on relationship of  $1/I$  and  $1/U$ 

$\alpha$  源在电离室中的位置:■——位于室中心,距测量池边缘 10 cm;●——距室边缘 6 cm;△——距室边缘 2 cm

小,直线的截距增大,即饱和电流  $I_s$  减小。如果产生的离子对相同, $I_s$  则相同, $I_s$  不随测量条件变化。理论计算表明, $^{238}\text{Pu}$  衰变的  $\alpha$  粒子能够引起离源表面 4 cm 范围内的空气电离,而在图 5 中,两电极板间距离从 5.5 变到 10.5 cm,直径为 2 cm 的源安置在电离室中心,即源边缘到电极之间的距离从 1.75 变到 4.25 cm,对于电极板间距离为 5.5、7.5 和 9 cm 的电离室,部分  $\alpha$  射线的能量没有完全被空气吸收而部分沉积到电极板上,影响了离子对的生产,这部分的  $\alpha$  射线随电极板间距离减小,其能量在空气中的沉积减小,引起的空气电离程度降低,即  $I_s$  减小。

从图 6 可见, $\alpha$  源在电离室中的位置的影响不大,不管  $\alpha$  源是在电离室的中心(离边缘 10 cm)还是在电离室边缘(离边缘 2 cm),图中

的拟合曲线在  $1/U$  坐标上的截距相近。理论计算表明,  $^{238}\text{Pu}$  衰变的  $\alpha$  粒子能够引起离源表面 4 cm 范围内的空气电离,  $\alpha$  源距电离室边缘 2 cm 时, 在电离室边缘外已有不少空气电离, 图 6 显示的结果说明电极板能够收集电离室边缘外附近的离子对。

表 1 列出了 0.116 MBq  $^{238}\text{Pu}$  源致空气电离时测量到的饱和电流及每次  $\alpha$  衰变产生的离子对。由表 1 可见, 测量到每次衰变产生的离子对的最大值为  $5.72 \times 10^4$ 。据文献[4]报道,  $\alpha$  射线致空气电离产生离子对的平均电离能为 36.08 eV,  $^{238}\text{Pu}$   $\alpha$  射线的平均能量为 5.487 MeV, 因此, 如果  $\alpha$  粒子的所有能量都沉积在空气中, 则每个  $\alpha$  粒子在空气中能够产生  $1.5 \times 10^5$  个离子对, 应远高于  $5.72 \times 10^4$ 。

表 1  $^{238}\text{Pu}$  源致空气电离实验结果

Table 1 Experimental results

of atmosphere ionization induced by  $^{238}\text{Pu}$  source

电极间 距离/cm	饱和电流 $I_s/\text{pA}$	$10^{-4}$ 单次 $\alpha$ 衰变 产生的离子对数
5.5	926(1±0.8%)	4.99(1±0.8%)
7.5	971(1±2.7%)	5.23(1±2.7%)
9	990(1±1.9%)	5.33(1±1.9%)
10.5	1 060(1±1.9%)	5.72(1±1.9%)

实际上, 高强度  $^{238}\text{Pu}$  源中有金属衬底和约 1  $\mu\text{m}$  厚的金保护镀层, 其中有约一半的  $\alpha$  粒子的能量沉积在衬底中, 不能用于使空气电离, 金保护层也会沉积另外一半  $\alpha$  粒子的部分能量。理论(Geant4 软件)计算结果<sup>[5]</sup>表明, 每次  $\alpha$  衰变, 1  $\mu\text{m}$  厚的金保护镀层吸收  $\alpha$  粒子能量 (5.487 MeV) 的约 11.5%, 即每次  $\alpha$  衰变后只有 1.97 MeV 的能量沉积在空气中并使空气电离 (图 7), 此数值小于  $\alpha$  能量的一半 (2.74 MeV), 这是由于  $^{238}\text{Pu}$  源的金属衬底、源中自吸收 (源厚度 0.01  $\mu\text{m}$ ) 和 Au 镀层吸收的共同影响的结果。理论计算结果为  $^{238}\text{Pu}$  源每次  $\alpha$  衰变能在空气中产生  $5.47 \times 10^4$  个离子对, 理论计算值接近实验测量值  $5.72 \times 10^4$ , 两者之间的偏差可能是由金镀层厚度的估算偏差所致。

### 3 结论

通过  $\alpha$  射线致空气电离的实验研究, 得到如

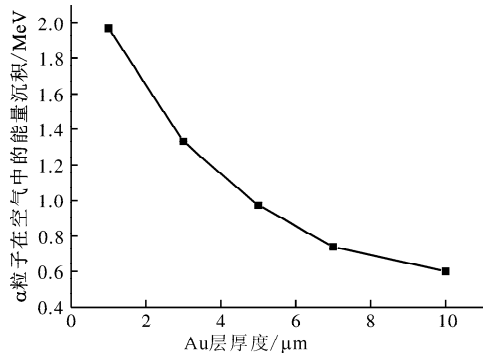


图 7  $^{238}\text{Pu}$  源每次  $\alpha$  衰变后空气中的能量沉积

Fig. 7 Energy deposition in air for  $\alpha$ -particle from  $^{238}\text{Pu}$  source

下结论: 1) 采用平行板电离室能较好地测量  $\alpha$  射线在空气中产生的离子对; 2) 电极板间距离对测量结果有一定的影响, 只有电极板间距离大于两倍  $\alpha$  粒子在气体中的飞行距离时, 测量结果才准确可靠; 3) 电极板间的距离一定时, 放射源在电离室中的位置变化对测量影响不大; 4) 测量结果与理论估算值在合理范围内吻合。

### 参考文献:

- [1] 耿建华, 陈英茂, 陈盛祖.  $\beta$  放射性核素辐射源的吸收剂量点核函数[J]. 核技术, 2003, 26(10): 789-794.  
GENG Jianhua, CHEN Yingmao, CHEN Shengzu. Absorbed dose point kernels of beta ray source[J]. Nucl Tech, 2003, 26(10): 789-794 (in Chinese).
- [2] 张文仲. 电离辐射粒子在人体组织中能量沉积的微剂量学研究[D]. 北京: 中国人民解放军军事医学科学院, 2003.
- [3] 庄钊文, 袁乃昌, 刘少斌, 等. 等离子体隐身技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 50-52.
- [4] ICRU. Average energy required to produce an ion pair, ICRU report 31[R]. [S. l.]: ICRU, 1979.
- [5] 刘喃喃.  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  和  $^{210}\text{Po}$  放射性源致空气电离特性理论模拟[D]. 西安: 西北核技术研究所, 2008.
- [6] 刘喃喃, 刘书焕, 万俊生.  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  源衰变电子在空气介质中能量沉积和空气电离密度分布的 Monte-Carlo 模拟[C]//第六届西北地区计算物理学术会议. 陕西, 汉中: [s. n.], 2008.
- [7] 廖哲, 付军, 冷慧敏. 管道内表面  $\alpha$  活度监测技术及应用[C]//全国核与辐射设施退役学术交流会议论文集. 四川, 绵阳: [s. n.], 2007: 264-267.