

小单元漂移室用放射源模拟老化的实验研究

陈昌^{1;1)} 马媛媛¹ 刘建北^{1,2} 陈元柏¹ 金艳¹ 刘荣光¹ 马晓妍¹
秦中华^{1,2} 唐晓¹ 王岚¹ 伍灵慧^{1,2} 徐美杭¹ 朱启明¹ 朱旻萱¹ 张桂芳¹

1(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 BESⅢ漂移室(DC)模型用 $1.85 \times 10^9 \text{Bq } ^{55}\text{Fe} 5.9\text{keV}$ X射线放射源作加速老化实验研究.测量了阳极丝电流 I 和 $^{55}\text{Fe} 5.9\text{keV}$ X射线全能光电峰位随累积电荷量 Q 的变化,由此得到累积相当 BESⅢ DC 5年全天候运行的电荷量(0.07 C/cm)后,漂移室小单元的阳极电流降为初始值的 87%;老化率为 $R = -0.19\%$ (mC/cm).

关键词 漂移室 老化 阳极丝电流 全能光电峰位

1 引言

新一代北京谱仪(BESⅢ)的漂移室(DC)采用小单元结构并使用氨基混合气体($\text{He}/\text{C}_3\text{H}_8$, 60%/40% 体积比)作工作气体.最内层一根阳极丝(丝长为 80cm)估计最大计数率约为 $70\text{kHz}^{[1]}$.最小电离粒子在 $\text{He}/\text{C}_3\text{H}_8$ (60/40)混合气体中单位长度产生的电子-离子对数为 75i. p./cm .假定单元取样厚度为 1.4cm,则最小电离粒子在一个单元内产生的电子-离子对数为 105.气体放大倍数为 3×10^4 ,假定 BESⅢ DC 连续全天候运行 5年,则最内层一根阳极丝累积总的电荷量为

$$Q_t = [(70 \times 10^3 \times 105 \times 3 \times 10^4 \times 1.6 \times 10^{-19})/80] \times 8.64 \times 10^4 \times 365 \times 5 = 0.07(\text{C/cm})$$

气体探测器探测电离辐射,在累积到一定的电荷量时,其性能,主要是气体的放大倍数会有所下降,即所谓老化效应.严重的甚至产生连续放电而不能工作.放大倍数下降的原因可以是因雪崩放大产生的等离子体在阳极丝表面沉积,使阳极丝直径增加;或在阴极上形成绝缘层.这些均使阳极表面电场减小而降低了放大倍数.

本实验的目的是考察用较强的放射源(例如 $1.85 \times 10^9 \text{Bq } ^{55}\text{Fe} 5.9\text{keV}$ X射线)辐照 $\text{He}/\text{C}_3\text{H}_8$ (60/40)混合气体的 BESⅢ漂移室模型,当阳极丝累积的总电荷量达到或超过 0.07C/cm(即连续全天候运行 5年)后,其性能有何变化.

2 老化效应的参数表示

气体探测器的老化效应通常用老化率 R 表示

$$R = -\frac{1}{Q} \cdot \frac{\Delta G}{G_0} \% / (\text{C/cm})$$

或

$$R = -\frac{1}{Q} \cdot \frac{\Delta G}{G_0} \% / (\text{mC/cm}), \quad (1)$$

其中 G_0 是初始气体放大倍数; ΔG 为气体探测器经长时间辐照后气体放大倍数的下降; Q 为单位长度阳极丝累积收集的电荷量.在丝上的累积电荷量由阳极丝上测量的电流值 $I(t)$ 的时间积分而得.即 $Q = \int I(t) \cdot dt$.

在辐照近似恒定的情况下,阳极丝电流 I 直接成正比地反映气体的放大倍数;此外如用较小放射性强度的 $^{55}\text{Fe} 5.9\text{keV}$ X射线源测量在气体探测器内产

2004-08-10 收稿

1)E-mail: chenc@mail.ihep.ac.cn

生的脉冲高度谱,其全能光电峰位 A 的变化也直接成正比地反映放大倍数的变化.因此老化率也可以表示为

$$R = - \frac{1}{G_0} \cdot \frac{dG}{dQ} = - \frac{1}{I_0} \cdot \frac{dI}{dQ}, \quad (2)$$

或

$$R = - \frac{1}{G_0} \cdot \frac{dG}{dQ} = - \frac{1}{A_0} \cdot \frac{dA}{dQ}. \quad (3)$$

这里 I_0 和 A_0 分别是初始阳极丝电流和初始⁵⁵Fe 5.9keV X 射线的全能光电峰位.

3 实验安排

BESⅢ DC 有两种尺寸的单元,大的单元约为 16.2mm × 16.2mm,小的单元约为 12.0mm × 12.0mm.用作老化实验的模型室选取上述两种单元各一个,为充分利用放射源的辐照,两单元排在一条直线上,大单元在上,小单元在下.为模拟这两个单元等同真实 DC 环境,在此两个单元的场丝外,另外加有补偿丝和保护丝.定位子在端面板上的布局如图 1 所示.丝长 24cm.阳极(灵敏)丝为直径 25 μ m 的

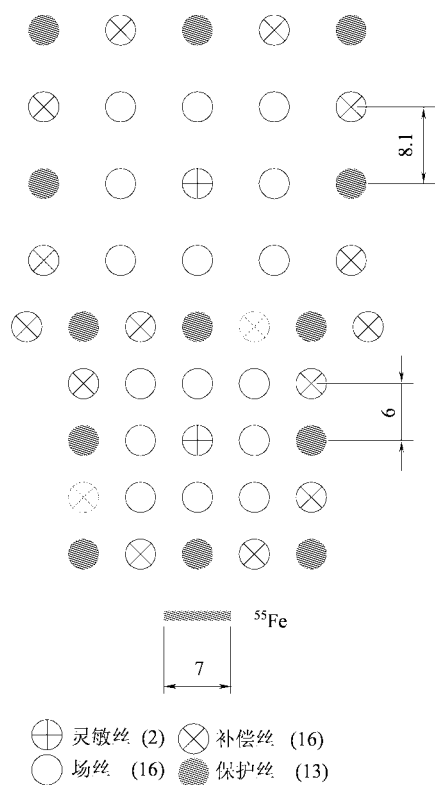


图 1 用于放射源加速老化实验的漂移室模型端面板定位示意图

镀金钨丝,张力 20g.场丝为直径 110 μ m 的镀金铝丝,张力 60g.

为加速老化实验的进程,选用⁵⁵Fe 5.9 keV X 射线辐照,源强为 50mCi (1.85×10^9 Bq).源的活性区面积为 7mm × 150mm.源放在单元的正下方.

在模型室上室壁开有直径 $\phi = 2$ mm 的小孔 5 个,中间的孔位于室体的中点处,孔间距为 50mm.

经 Garfield 程序包模拟计算,大单元阳极丝高压为 +2150V,小单元阳极丝高压为 +2050V,补偿丝高压为 +1300V,保护丝高压为 +250V.在这样的情况下,阳极丝上的线电荷密度将与实际 BESⅢ DC 运行条件下基本一致,也就是与实际所用的气体放大倍数一致.

阳极丝高压由 CAEN N471A 插件提供,该插件可以同时读出阳极丝的电流,分辨率可达 1nA.补偿丝和保护丝电压由 CAEN Mod. SY-127 高压电源系统供给.

在辐照开始前,用弱的⁵⁵Fe 源对漂移单元进行了检测,表明漂移单元确已能正常工作.测量了沿丝方向阳极丝输出信号均匀性良好.

在强源辐照时,N471A 插件同时读出阳极电流.间隔一定时间不破坏气体密封将强源拉出,用 9.25×10^7 Bq 弱的⁵⁵Fe 5.9keV X 射线经由模型室上室壁的小孔,辐照大小单元,阳极丝信号经电荷灵敏前放,ORTEC 672 谱放大器放大后输入 TRUMP-2k 多道卡作脉冲幅度分析.测得辐照各阶段的能谱.

为确定合适的气体流量,测量了阳极丝电流 I 与气体流量的关系.当气体流量较小时,阳极丝电流 I 随流量的增大而增大.当流量达到某一定值以上,阳极丝电流 I 趋于饱和.如再加大流量,阳极丝电流 I 不增反而下降.选取阳极丝电流 I 略高于开始趋于饱和时的气体流量.由此选定气体流量为 1.4 室体积/小时.工作气体为 He/C₃H₈(60/40),He 气纯度为 99.995%,C₃H₈的纯度为 99.95%.气体流量由质量流控制器供气.

室内安放有温度探头和气体压力探头,并能作实时数据记录,存入计算机硬盘.

4 实验结果

4.1 阳极丝电流 I 随辐照时间(即累积电荷量)的变化

图 2 为阳极丝电流 I 随辐照时间的变化曲线.

由图可以看到,阳极丝电流 I 随辐照时间(即累积电荷量)加长而逐渐减小.这表明气体放大倍数逐渐地降低.

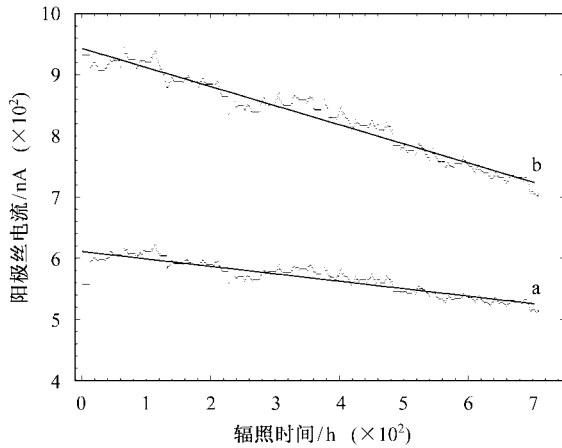


图 2 大、小漂移单元阳极丝电流随辐照时间的变化
a 为大单元;b 为小单元

如用累积电荷量 Q 为横坐标,画阳极丝电流 I 随 Q 的变化曲线(图 3)并作线性拟合,得到

$$\text{大单元: } I^a = - (9.83 \times 10^2) Q(t) + 602, \quad (4)$$

$$\text{小单元: } I^b = - (1.73 \times 10^3) Q(t) + 926, \quad (5)$$

当 $t = 0$, 辐照开始, 有 $Q(t) = 0$. 则分别有: $I^a = 602\text{nA}$ 和 $I^b = 926\text{nA}$. 此即小单元和大单元辐照初始阳极丝电流值. 当累积电荷 $Q = 0.07\text{C/cm}$ 时有大单元阳极丝电流 $I^a = 533\text{nA}$ 和小单元阳极丝电流 $I^b = 805\text{nA}$. 即分别为初始值的 89% 和 87%.

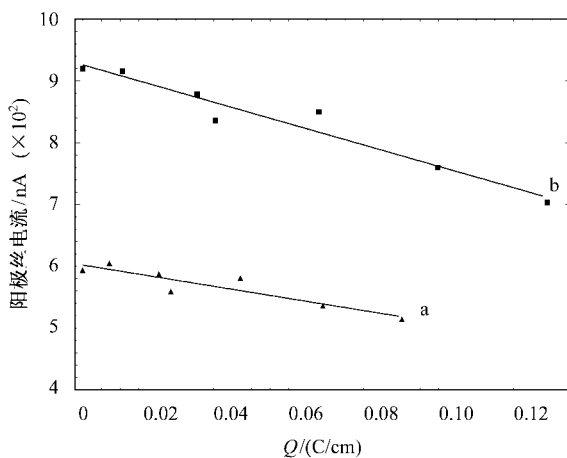


图 3 大、小漂移单元阳极丝电流随累积电荷量的变化
a 为大单元;b 为小单元

由式(2),我们可以得到:

大单元老化率:

$$R^a = \frac{1}{I_0^a} \cdot \frac{dI^a}{dQ(t)} = \frac{1}{I_0^a} \cdot \frac{I_1^a - I_0^a}{1} = -163\%(\text{C/cm}) = -0.16\%(\text{mC/cm}),$$

小单元老化率:

$$R^b = \frac{1}{I_0^b} \cdot \frac{dI^b}{dQ(t)} = \frac{1}{I_0^b} \cdot \frac{I_1^b - I_0^b}{1} = -187\%(\text{C/cm}) = -0.19\%(\text{mC/cm}).$$

4.2 ^{55}Fe 5.9 keV X 射线全能光电峰位随辐照时间(累积电荷量 Q)的变化

在辐照开始,用低强度 $9.25 \times 10^7 \text{ Bq } ^{55}\text{Fe}$ 5.9 keV X 射线源作脉冲幅度谱测量,得到初始 ^{55}Fe 5.9 keV X 射线光电峰位.在辐照过程中,间隔一定时间将辐照源拉出,代以低强度源测量光电峰位.图 4 为大、小单元 ^{55}Fe 5.9 keV X 射线的光电峰位随累积电荷量的变化曲线.由图可见光电峰位随辐照时间加长而逐渐移向能谱低端,显示性能已有退化.对此曲线作线性拟合,得到

$$\text{大单元: } A^a(Q) = - (1.51 \times 10^3) Q(t) + 805,$$

$$\text{小单元: } A^b(Q) = - (3.18 \times 10^3) Q(t) + 765,$$

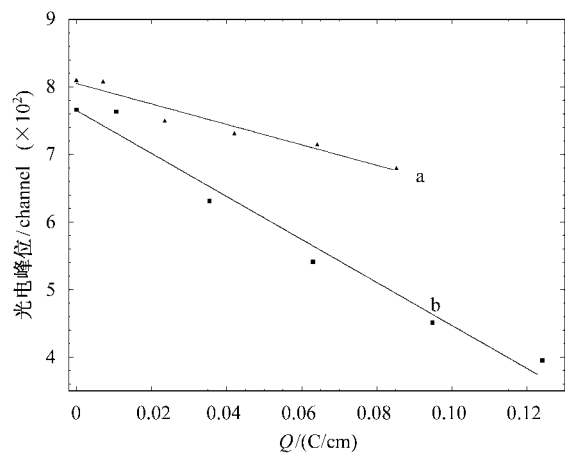


图 4 大、小单元 ^{55}Fe 5.9 keV X 射线的光电峰位随累积电荷量的变化
a 为大单元;b 为小单元

同样当我们考察累积电荷量为 $Q(t) = 0.07(\text{C/}$

cm)时, ^{55}Fe 5.9 keV X 射线光电峰位分别位于:

$$A^a(0.07) = - (1.51 \times 10^3) \times 0.07 + 805 = 699,$$

即为初始峰位的 87% 处.

$$A^b(0.07) = - (3.18 \times 10^3) \times 0.07 + 765 = 542,$$

即为初始峰位的 71% 处.

根据式(3)可以得到,

大单元老化率:

$$R^a = \frac{1}{A_0^a} \cdot \frac{dA^a(Q)}{dQ(t)} = \frac{1}{A_0^a} \cdot \frac{A_1^a - A_0^a}{1} = -188\% (\text{C/cm}) = -0.19\% (\text{mC/cm}),$$

小单元老化率:

$$R^b = \frac{1}{A_0^b} \cdot \frac{dA^b(Q)}{dQ(t)} = \frac{1}{A_0^b} \cdot \frac{A_1^b - A_0^b}{1} = -415\% (\text{C/cm}) = -0.42\% (\text{mC/cm}).$$

4.3 辐照后的灵敏丝用扫描电子显微镜的分析结果

图 5(a)为未经辐照阳极丝表面放大 30000 倍的电子显微摄影照片,照片上可见在丝表面上是不规则的马赛克形状的镀金层.图 5(b)为经辐照累积电荷量 0.124C/cm 后实验中小单元的阳极丝放大 5000 倍的电子显微摄影照片,可以看到,在马赛克背景上有许多沉积物的斑点在上面.在大单元的阳极(灵敏)丝上同样也有沉积物,单位面积上的沉积物点的密度则小得多.照片上除左侧和右侧的一小部分黑边外,显示了整个阳极丝的一侧.图 5(c)为与图 5(a)相同放大倍数经辐照后阳极丝的照片.图 5(c)左上角画有方框的沉积物作了电子束激发的 X 射线光电子能谱成分分析.图 5(d)为上述沉积物的分析结果.分析结果告诉我们,在此沉积物中成分除有 Au 外,还有 C, N₂, O₂, Si 的成分在内.其中 Au 的重量百分比 (Wt%) 为 65.59%, C 为

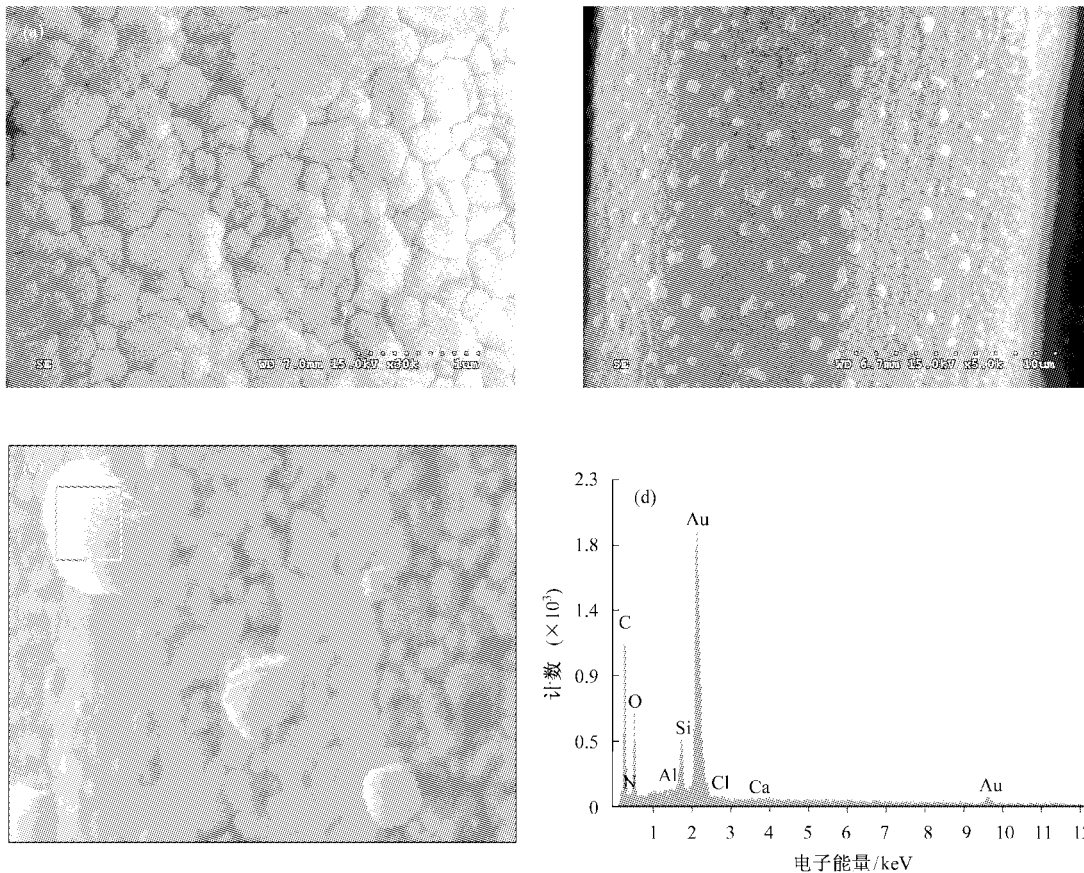


图 5 (a)未经辐照阳极丝表面放大 30000 倍的电子显微摄影照片;(b)经辐照后的阳极丝放大 5000 倍的电子显微摄影照片;
(c)经辐照后阳极丝表面放大 30000 倍的电子显微摄影照片;(d),(c)上画有方框的沉积物成分分析结果

25.14%, N_2 为 1.57%, O_2 为 6.44%, Si 为 1.19%. 而原子数百分比 (*At%*) 则 C 占了大多数 70.12%, O 则为 13.49%, Au 为 11.15%, N 为 3.75%, Si 为 1.42%.

4.4 与其他老化实验结果的比较

表 1 为本实验结果与其他有关探测器老化实验结果的比较, 由此可见我们的结果是在合理的范围之内.

表 1 本实验的结果与其他部分老化实验结果

室的类型	工作气体	累积电荷量 Q (mC/cm)	老化率 R (% (mC/cm))	注
漂移单元	DME	600	0.49	[2], 所用材料未经挑选
漂移单元	DME	1000	0.045	[2], 所用材料经过挑选
BaBar 漂移室	He/ iC_4H_{10} (80/20/0.4H ₂ O)	10.6	0.65	[3]
ZEUS	Ar/Ethane/ CO_2 (83/5/12)	100	< 10	[4]
H1	Ar/Ethane/ H_2O (50/50/0.1)	< 10	观察到老化	[5]
HERA-B	Ar/ CF_4 / CO_2 (65/30/5) + 500ppm 水	600	增益下降 6%—10%	[6]
CDF (RUN2)	Ar/Ethane/Alc. (50/50/1)	1000	< 5×10^{-3}	[7]
BESIII MDC	He/ C_3H_8 (60/40)	124 (小单元) 85 (大单元)	0.19 (阳极电流), 0.42 (全能峰) 0.16 (阳极电流) 0.19 (全能峰)	本实验

5 结论与讨论

1) 观察到随辐照时间的增加漂移室性能有老化, 其表现是阳极丝电流逐渐降低; ^{55}Fe 5.9 keV X 射线光电峰位逐渐移向低端. 当累积电荷量达 0.07 C/cm 时, 小单元的阳极丝电流降为初始值的 87%, 老化率为 $R = -0.19\%$ (mC/cm).

2) 大单元老化比小单元要小. 小单元离辐照源近, 经受比大单元强的辐照, 剂量率高. 由此可见老化率 R , 当其他条件相同的情况下, 用较小的辐照强度, 老化将会慢些. 这与有关文献^[2]报道的情况相一致.

3) 两种方法测得的结果不完全一致, 对大单元而言, 两者测得的老化率较接近, 可相比拟. 对小单元而言差别就较大, 用光电峰位测得的老化比用阳极丝电流测得的要快得多. 要分析它们为何不一致, 则需要更进一步的研究.

4) 实验中所用 C_3H_8 气体纯度为 99.95%, 含有杂质 400ppm 的 O_2 , 1300ppm 的 N_2 , 150ppm 的 C_2H_6 , 20—30ppm 的 H_2O 以及 < 10ppm 的其他碳氢化合物. 因此在图 5(d) 小单元阳极丝表面沉积物成分分析的结果中有 C, N, O 的成分就不奇怪了. Si 的成分的存在是十分值得重视. 经分析 Si 元素来自定位子的粗管与细管黏接用硅胶 (但定位子与端面板黏接用的是两种成分以 1:1 的比分混合的 Epoxy 环氧树脂胶). 另外在气体管道连接处用了 Silicone KE44T 胶作气体密封.

5) 我们的老化实验做了两轮, 第 1 轮 C_3H_8 气体纯度仅为 99.5%. 结果表明, 老化程度要比 C_3H_8 气体纯度为 99.95% 的明显. 如果用更高纯度的 C_3H_8 气体, 可以预期老化会不明显的多, 但此时 C_3H_8 的价格将会很高. 为保证谱仪运行可靠, 在漂移室气体入口和出口同时接入一监测用的正比管, 分别测量它们的放大倍数与漂移室的相比较, 以监测室漂移室的性能老化是必要的.

参考文献 (References)

1 BESIII Colla. The BESIII Detector (Draft). June, 2002, 94
2 Blinov V E et al. Nucl. Instrum. Methods, 2003, **A515**:95—107; Blinov V E. Nucl. Instrum. Methods, 1998, **A419**:676—679

3 Kelsey M H. SLAC-PUB-10224
4 Bailey D. Nucl. Instrum. Methods, 2003, **A515**:37—42
5 Neibulr C. Nucl. Instrum. Methods, 2003, **A515**:43—49
6 Padilla C, Albrecht H. Nucl. Instrum. Methods, 2003, **A515**:155—165
7 Binkley M. Nucl. Instrum. Methods, 2003, **A515**:53—59

Experimental Study of Accelerated Aging of Small Cell Drift Chamber Prototype with Radioactive Source

CHEN Chang^{1,1)} MA Yuan-Yuan¹ LIU Jian-Bei^{1,2} CHEN Yuan-Bo¹ JIN Yan¹
LIU Rong-Guang¹ MA Xiao-Yan¹ QIN Zhong-Hua^{1,2} TANG Xiao¹ WANG Lan¹
WU Ling-Hui^{1,2} XU Mei-Hang¹ ZHU Qi-Ming¹ ZHU Min-Xuan¹ ZHANG Gui-Fang¹

1(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

2(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract An experimental study of accelerated aging of BESIII drift chamber prototype with radioactive source ^{55}Fe 5.9 keV X-ray ($1.85 \times 10^9 \text{Bq}$) was done. The dependence of anode current and full energy photo-electron peak of ^{55}Fe 5.9 keV X-ray on the accumulated Q was measured. When total charge $Q = 0.07 \text{C/cm}$ is accumulated (equivalent to 5 years operation of BESIII DC) the anode current is 87% of primary value and aging ratio $R = -0.19\% (\text{mC/cm})$ for small cell was measured.

Key word drift chamber, aging, anode current, full energy photoelectron peak