

# 250~600 kV X射线空气比释动能 量值复现方法研究

赵 瑞<sup>1</sup>, 吴金杰<sup>1</sup>, 王二彦<sup>1,2</sup>, 文玉琴<sup>1,2</sup>

(1. 中国计量科学研究院, 北京 100029; 2. 成都理工大学, 四川 成都 610059)

**摘要:** 本文依托 250~600 kV X 射线光机, 建立高能量段的重过滤窄谱 X 射线辐射质, 研制石墨空腔电离室, 通过蒙特卡罗模拟和实验测量完成 250~600 kV X 射线空气比释动能量值复现。在 300 kV 辐射质下, 利用自由空气电离室和石墨空腔电离室完成 X 射线空气比释动能量值复现, 相对标准不确定度分别为 0.61% 和 0.45%, 两种方法测量结果相对偏差为 0.09%。利用研制的石墨空腔电离室在 <sup>137</sup>Cs 和 <sup>60</sup>Co  $\gamma$  射线基准辐射场中完成空气比释动能的量值复现, 结果与基准值的相对偏差分别为 0.27% 和 0.39%, 在不确定度范围内等效一致, 验证了石墨空腔电离室测量 250~600 kV X 射线空气比释动能方法的可行性。

**关键词:** X 射线; 石墨空腔电离室; 空气比释动能; 不确定度分析

中图分类号: TL811

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2021)04-0743-08

doi: 10.7538/yzk.2020.youxian.0343

## Research on Method of Reproducing Air-kerma of 250-600 kV X-ray

ZHAO Rui<sup>1</sup>, WU Jinjie<sup>1</sup>, WANG Eryan<sup>1,2</sup>, WEN Yuqin<sup>1,2</sup>

(1. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China;

2. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** On the basis of 250-600 kV X-ray machine, the narrow spectrum series X-ray radiation qualities in the high-energy section were established, and the graphite cavity ionization chamber was developed. The 250-600 kV X-ray air-kerma was measured by Monte Carlo simulation and experiment. Under the condition of 300 kV radiation quality, the relative standard uncertainties are 0.61% and 0.45% by using free air ionization chamber and graphite cavity ionization chamber. The relative deviation between the two methods is 0.09%. The absolute measurement of air-kerma in <sup>137</sup>Cs and <sup>60</sup>Co  $\gamma$ -ray reference radiation field was completed by using the graphite cavity ionization chamber, and the relative deviations between the results and the reference value are 0.27% and 0.39%, which are equivalent within the range of uncertainty. The feasibility of measur-

收稿日期: 2020-05-27; 修回日期: 2020-07-17

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFF0205100)

作者简介: 赵 瑞(1992—), 男, 安徽舒城人, 研究实习员, 硕士, 从事 X 射线计量、辐射探测等研究

ing air-kerma of 250-600 kV X-ray by using graphite cavity ionization chamber was verified.

**Key words:** X-ray; graphite cavity ionization chamber; air-kerma; uncertainty analysis

核技术广泛应用于医学诊断、放射治疗、工业无损检测、核能发电、辐照加工、材料分析和科学研究等领域<sup>[1]</sup>。据统计,美国和日本的国民经济总产值(GDP)中核技术的贡献约占3%~4%,美国核技术产生的年产值约为3 500亿美元,其中非核能部分约占80%。我国核技术产生的年产值约为1 000亿人民币,仅占GDP的0.2%,中国核技术应用有着很大的市场和很好的发展前景<sup>[2]</sup>。在核技术应用过程中,辐射防护和环境监测等问题越来越受到重视,对于该类探测器的性能评价,目前应用最多的是能量处于60~250 kV(48~208 keV)范围的X射线及<sup>137</sup>Cs(662 keV)能量段的 $\gamma$ 射线。对于处在208~662 keV能量范围之间的探测器,目前都无法进行性能评价及准确的量值溯源。为了保证量值统一,确保量值准确可靠,需建立相应的参考辐射装置和测量能力。

国内外已建立的X射线空气比释动能基准中均使用平板自由空气电离室复现空气比释动能<sup>[3]</sup>,主要是因为平板自由空气电离室在中低能段有着较好的测量稳定性。初级电子在空气中的径迹长度随X射线能量的升高而加长,因此随X射线能量的升高电子损失修正因子越大,精准测量X射线空气比释动能所需电离室的体积也越大。德国物理技术研究院(PTB)利用长为120 cm、重约10<sup>3</sup> kg的平板自由空气电离室复现400 kV X射线空气比释动能。X射线能量越高,其穿透能力也越强,故需更厚的铅屏蔽<sup>[4-5]</sup>。因此对400 kV及以上能量的X射线空气比释动能的复现将需要比PTB体积更大、屏蔽层更厚的自由空气电离室,如此大的电离室在制作与保存上均存在困难。而对于高能段的 $\gamma$ 射线,国际上则采用石墨空腔电离室复现空气比释动能<sup>[6-8]</sup>,如<sup>137</sup>Cs、<sup>60</sup>Co  $\gamma$ 射线。石墨空腔电离室对较高能量的射线有较好的能量响应、精度及稳定性。本文将根据X射线能量不同,研究建立250~600 kV X射线参考辐射质,根据空腔电离理论,研制用于测量中、高能段X射线的石墨空腔电离室,实验测量和模

拟相应的修正因子,最终复现X射线空气比释动能。在X射线管电压为300 kV条件下研究利用自由空气电离室复现空气比释动能,将两种电离室复现的结果进行对比,相互验证结果的可靠性及方法的可行性。

## 1 原理与方法

### 1.1 空腔电离理论

空腔电离理论是辐射剂量学中剂量计测量领域应用最为广泛的理论<sup>[9-10]</sup>。通过空腔电离理论,利用空腔中的电离量来测量介质单位质量吸收的辐射能量。Bragg-gray原理基于空腔尺寸小于电子射程的假设:1)空腔的存在不会改变初始光子通量密度在介质中产生的次级电子谱;2)空腔中产生的二次电子可忽略不计;3)在次级电子可进入空腔的范围内,初始光子注量是空间均匀的,意味着次级电子注量是均匀的。则Bragg-gray原理理论表达式为:

$$D_w = \frac{Q}{m} \left( \frac{\bar{W}}{e} \right)_g m \bar{S}_g^w \quad (1)$$

式中: $D_w$ 为吸收剂量; $Q$ 为次级电子产生的电荷量; $m$ 为产生电荷量 $Q$ 的气体质量; $\left( \frac{\bar{W}}{e} \right)_g$ 为气体中形成每对粒子所消耗的平均能量; $m \bar{S}_g^w$ 为介质 $w$ 和 $g$ 的加权平均质量阻止本领的比值。

### 1.2 空气比释动能值复现

运用Bragg-gray理论,利用石墨空腔电离室测量X射线空气比释动能,还需要引入相应的修正因子,最终X射线空气比释动能 $K_{\text{air}}$ 复现的原理<sup>[11]</sup>为:

$$K_{\text{air}} = \frac{\left( \frac{Q}{m_{\text{air}}} \right) \left( \frac{\bar{W}}{e} \right)_{\text{air}} \left( \frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} \right)_{\text{air, wall}} \left( \frac{\bar{S}}{\rho} \right)_{\text{wall, air}}}{1 - \bar{g}_{\text{air}}}$$

$$\prod [k_{\text{an}} k_{\text{rn}} k_{\text{s}} k_{\text{st}} k_{\text{wall}} k_{\text{h}}] \quad (2)$$

式中: $m_{\text{air}}$ 为标准状况(0 °C, 101.325 kPa)下空腔内的空气质量; $\left( \frac{\bar{W}}{e} \right)_{\text{air}}$ 为在干燥空气介质中

每形成 1 个离子对所消耗的平均能量,即电离功; $\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{air,wall}$  为空气和石墨的质能吸收系数之比; $\left(\frac{\bar{S}}{\rho}\right)_{wall,air}$  为电离室石墨室壁与空腔内空气的阻止本领比值; $\bar{g}_{air}$  为带电粒子的能量转化为韧致辐射的份额; $k_{an}$  为射束轴向不均匀修正因子; $k_{m}$  为射束径向不均匀修正因子; $k_{st}$  为杆散射修正因子; $k_s$  为复合损失修正因子; $k_{wall}$  为电离室壁修正因子; $k_h$  为湿度修正因子。

而利用自由空气电离室复现空气比释动能原理的公式为:

$$K_{air} = \frac{Q}{\rho_0 V} \left(\frac{\bar{W}}{e}\right)_{air} \frac{1}{1 - \bar{g}_{air}} \prod k_a k_s k_e k_{sc} k_d k_p k_l k_h \quad (3)$$

式中: $\rho_0$  为温度为 273.15 K、压强为 101.32 kPa 条件下的空气密度; $V$  为测量体积; $k_a$  为空气衰减修正因子; $k_e$  为电子损失修正因子; $k_{sc}$  为散射修正因子; $k_d$  为电场畸变修正因子; $k_p$  为前壁穿透修正因子; $k_l$  为极性修正因子。

## 2 实验装置及实验测量

### 2.1 X 射线辐射装置

X 射线辐射装置包括 X 射线光机系统、支撑平台、屏蔽箱及限束光阑、滤过装置和自由空气电离室及石墨空腔电离室等<sup>[12]</sup>。X 射线光机系统主要组成部分为 X 射线光管、油冷却系统、高压发生器及控制系统等。中高能 X 射线光机型号为 YXLON MG602,光管型号为 MXR-601HP/11,光管的管电压上限达到 600 kV,是一种具有双极性的光管,它主要由双焦斑、阳极钨靶及定向出束口组成,焦点尺寸有 0.5 mm 和 1.5 mm 两种,靶角为 11°。

### 2.2 X 射线参考辐射质

X 射线管出射的 X 射线束是连续分布的,描述 X 射线辐射质最好的方法是研究 X 射线能谱,但通常情况下用半值层(HVL)来表示 X 射线的贯穿能力。当单能窄束 X 射线穿过某一物质时,X 射线空气比释动能率的变化满足指数衰减规律,为:

$$I/I_0 = e^{-\mu d} \quad (4)$$

式中: $I_0$ 、 $I$  分别为 X 射线入射前、后对应的空气比释动能率; $\mu$  为质量衰减系数; $d$  为 X 射线

强度变为  $I$  时入射的深度。

由式(4)可得出入射 X 射线的空气比释动能率被吸收的程度。对于同一种吸收物质来说, $\mu$  是确定的,改变吸收体的厚度,穿过吸收体的 X 射线占初始空气比释动能率的份额不同。当入射 X 射线的空气比释动能率减少到初始值的一半时得到的吸收体的厚度即为半值层 HVL,即:

$$HVL = \ln 2 / \mu \quad (5)$$

半值层测量示意图如图 1 所示,半值层测量时将吸收片放在 X 射线焦斑与电离室近似中间的位置,因此吸收片置于距 X 射线光焦斑 60 cm 处的位置,测量点与光焦斑之间的距离为 120 cm,采用激光定位仪及量杆进行定位和距离的测定,吸收片采用纯度好于 99.9% 的铜片。

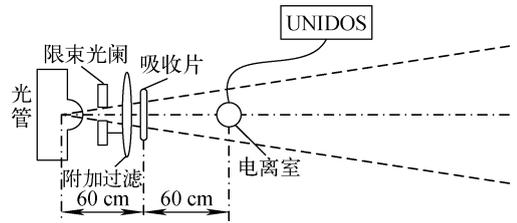


图 1 半值层测量示意图

Fig. 1 Schematic of HVL measurement

ISO 4037-1 中仅给出了管电压为 250 kV 和 300 kV 时对应的附加过滤片的材料及厚度,对于管电压大于 300 kV 所使用的附加过滤厚度的确定方法是通过管电压和平均能量的关系进行曲线拟合,再根据拟合出的公式计算得出 300 kV 以后辐射质的平均能量,然后利用 EGSnrc 模拟程序得到相应的附加过滤厚度。具体方法为首先在 BEAMnrc 程序中加载提前设置好的光机模型,然后将光子运输模型 XTUBE 及 FLATFILT 模块输入(XTUBE 模块为设置光管参数的模块,如靶倾角、靶材料;FLATFILT 模块为设置添加附加过滤材料和厚度的模块),在 FLATFILT 模块中第 3 层设置光机的固有过滤,在 9~12 层设置附加过滤的材料及厚度,最终得到所需的附加过滤厚度,建立的 250~600 kV X 射线窄谱辐射质列于表 1。

表 1 250~600 kV X 射线窄谱辐射质的建立

Table 1 Establishment of 250-600 kV X-ray narrow spectrum radiation quality

管电压/kV	附加过滤/mm				HVL <sub>1st</sub> /mm(Cu)	平均能量/keV
	Pb	Sn	Cu	Al		
250	2.91	2.2	0.50	4.00	5.34	216.04
300	4.92	3.1	0.50	4.00	6.32	264.37
350	7.2	4.4	0.50	4.00	6.93	303.59
400	9.9	6	0.50	4.00	7.57	348.54
450	12.8	7.7	0.50	4.00	8.09	394.35
500	16	9.2	0.50	4.00	8.59	434.64
550	19.3	10.6	0.50	4.00	9.05	483.30
600	23	12.3	0.50	4.00	9.47	530.49

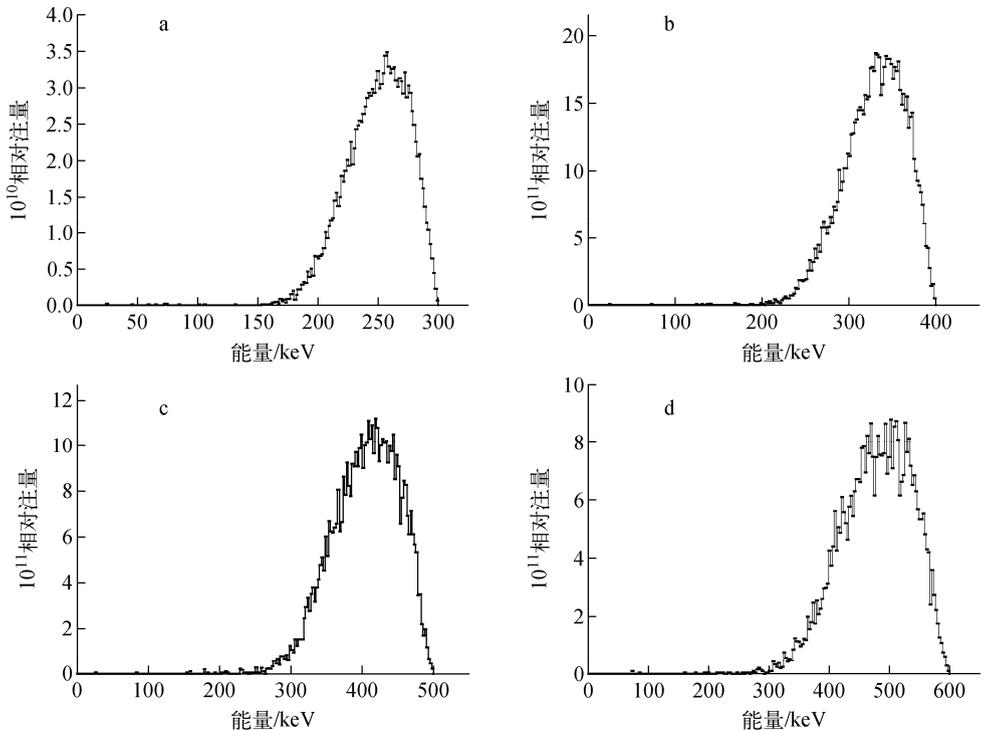
### 2.3 X 射线能谱的模拟

采用蒙特卡罗模拟方法,用 BEAMnrc 程序包进行能谱模拟。根据建立的 250~600 kV X 射线窄谱系列辐射质和 X 射线光管的物理参数,运用 BEAMnrc 模拟 250~600 kV X 射线注量谱。在 BEAMnrc 程序包中设置光机阳极靶为钨,阳极靶的靶角为  $11^\circ$ ,固有过滤为厚度分别为 3 mm 和 2 mm 的铍片组成,限束光

阑采用钨合金材料。本次模拟中参数选取不同电压下的单能电子作为入射粒子,设置粒子数为  $5 \times 10^8$ ,电子的截止能量 ECUT=0.512 MeV,光子的截止能量 PCUT=0.001 MeV,其他数据采用默认值。图 2 为 300~600 kV 模拟能谱。

### 2.4 石墨空腔电离室

石墨空腔电离室采用球形设计,用于测量中高能 X 射线空气比释动能。电离室壁和收



a——300 kV; b——400 kV; c——500 kV; d——600 kV

图 2 300~600 kV 模拟能谱

Fig. 2 Simulation photon spectra of 300-600 kV

集杆部分均采用高纯度石墨材料。收集杆主要包括收集极、绝缘体、保护环及中心导体,收集极同样是由高纯石墨材料构成,保证空腔内经电离产生的离子尽可能多的被收集,对于球形电离室来说,收集极杆顶端形状一般选用的是

平顶圆弧形,收集极杆顶部位于腔室中心点位置<sup>[13]</sup>。具体结构如图3所示,通过测量得到内外半径及壁厚等参数,计算得到其有效体积为 $101.980\text{ cm}^3$ 。电离室饱和电压为 $1\ 000\text{ V}$ ,漏电小于 $5\text{ fA}$ 。

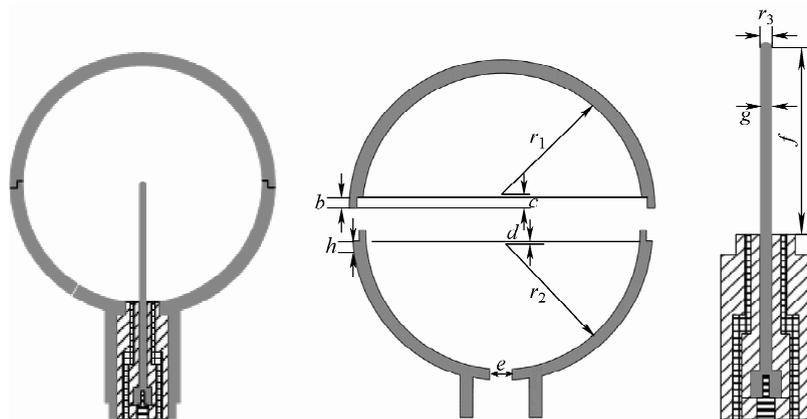


图3 球型石墨空腔电离室

Fig. 3 Spherical graphite cavity ionization chamber

### 3 实验结果及验证

#### 3.1 250~600 kV X射线重过滤窄谱空气比释动能测量结果

根据石墨空腔电离室复现X射线空气比释动能原理,在建立的参考辐射质条件下,通过激光及量杆定位装置将石墨空腔电离室固定在距离X射线焦斑 $1.2\text{ m}$ 处,且电离室有效探测中心与辐射束中心处于同一水平面。将石墨空腔电离室通过微弱电离测量系统连接,利用汤姆逊补偿法进行电离电流的测量。

空气比释动能计算式中空气与石墨的质能吸收系数比值通过蒙特卡罗模拟程序计算得到,模拟中运用EGSnrc模拟程序中的EGSRZnrc程序包,得到空气的比释动能和石墨材料的比释动能,二者之比即为质能吸收系数的比值。电离室石墨壁与空腔内空气的阻止本领的比值也是通过蒙特卡罗模拟程序,分别模拟石墨和空气在相应的能量下的总阻止本领值,二者之比即为空气与石墨阻止本领比。韧致辐射份额常数为消耗于韧致辐射的能量占其初始能量的份额,使用EGSnrc程序进行模拟计算得到。另外,电离功使用国际电离辐射委员会推荐值 $33.97\text{ J/C}$ 。

修正因子的计算主要由实验测量和模拟得到<sup>[14-15]</sup>,其中实验测量得到的修正因子有射束轴向不均匀修正因子 $k_{an}$ 、射束径向不均匀修正因子 $k_m$ 、杆散射修正因子 $k_{st}$ 、复合损失修正因子 $k_s$ ,通过蒙特卡罗模拟得到的修正因子有电离室壁修正因子 $k_{wall}$ 。另外,空气湿度的变化会对空气密度有影响,同时还会对电离功产生影响。国际电离辐射咨询委员会(CCRI)在1977年给出湿度修正因子的推荐值,即在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 和标准大气压下,空气湿度在 $20\%\sim 80\%$ 之间变化时此项修正值为 $0.997\ 0$ 。石墨空腔电离室复现空气比释动能修正因子列于表2。通过石墨空腔电离室复现空气比释动能的结果列于表3。

#### 3.2 实验验证

实验通过3种不同方法验证石墨空腔电离室测量结果:第1种是利用自由空气电离室,完成 $300\text{ kV}$ 辐射质下空气比释动能的量值复现,将其结果与石墨空腔电离室复现的结果比较;第2种是利用石墨空腔电离室在 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 射线辐射场中进行空气比释动能量值复现,得到的结果与标准值进行比较;第3种是利用石墨空腔电离室在 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 射线辐射场中进行空气比

释动能值复现,得到的结果与标准值比较。通过实验测量与蒙特卡罗模拟计算,分别完成

了上述 3 种方法下空气比释动能的量值复现,其结果列于表 4、5。

表 2 石墨空腔电离室复现空气比释动能修正因子

Table 2 Correction factor of air-kerma reproduced with graphite cavity ionization chamber

管电压/ kV	修正因子						
	$k_{\text{wall}}$	$k_{\text{an}}$	$k_{\text{rn}}$	$k_s$	$k_{\text{st}}$	$k_h$	$\prod k_i$
250	1.043 2	0.999 9	1.000 1	0.999 2	0.997 8	0.997	1.037
300	1.045 1	1.000 2	1.000 1	0.999 6	0.996 4	0.997	1.038 1
350	1.040 2	0.999 5	0.999 2	1.000 1	0.999 5	0.997	1.035 3
400	1.040 1	1.000 5	1.000 6	1.000 0	0.997 5	0.997	1.035 5
450	1.040 2	1.000 5	1.000 2	1.000 0	0.999 9	0.997	1.037 7
500	1.040 3	1.000 9	0.999 6	1.000 2	0.998 3	0.997	1.036 1
550	1.040 4	1.000 2	0.999 8	0.999 3	0.999 5	0.997	1.036
600	1.039 8	1.000 2	1.000 7	0.999 3	0.999	0.997	1.035 9

表 3 石墨空腔电离室复现空气比释动能结果

Table 3 Result of air-kerma reproduced with graphite cavity ionization chamber

管电压/ kV	电离电流/ pA	$\left(\frac{\overline{\mu_{\text{en}}}}{\rho}\right)_{\text{air,wall}}$	$\left(\frac{\overline{S}}{\rho}\right)_{\text{wall,air}}$	$\prod k_i$	$1-\overline{g}_{\text{air}}$	空气比释动能率/ ( $\mu\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}$ )
250	14.185	1.006	1.018	1.037 0	0.999 5	3.883
300	14.375	1.003	1.017	1.038 1	0.999 4	3.924
350	14.166	1.001 6	1.017	1.035 3	0.999 3	3.851
400	10.912	1.000 7	1.017	1.035 5	0.999 2	2.965
450	10.324	1.000 1	1.017	1.037 7	0.999 1	2.810
500	12.069	0.999 9	1.016	1.036 1	0.999 0	3.276
550	9.501	0.999 7	1.016	1.036 0	0.998 9	2.578
600	10.057	0.999 7	1.016	1.035 9	0.998 8	2.729

表 4 300 kV 空气比释动能测量结果验证

Table 4 Verification of measurement result of 300 kV air-kerma

电离室类别	电离 电流/pA	$\left(\frac{\overline{\mu_{\text{en}}}}{\rho}\right)_{\text{air,wall}}$	$\left(\frac{\overline{S}}{\rho}\right)_{\text{wall,air}}$	$\prod k_i$	$1-\overline{g}_{\text{air}}$	空气比释动能率/ ( $\mu\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}$ )	相对 偏差/%
						测量值	
自由空气电离室	2.380			0.932 0	0.999 4	6.914	0.09
石墨空腔电离室	25.382	1.003	1.017	1.038 1	0.999 4	6.920	

表 5 石墨空腔电离室在 $^{137}\text{Cs}$ 和 $^{60}\text{Co}$ 辐射场中测量结果验证

Table 5 Verification of air-kerma measurement result of graphite cavity ionization chamber in  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{60}\text{Co}$  radiation fields

辐射场	电离 电流/pA	$\left(\frac{\overline{\mu_{\text{en}}}}{\rho}\right)_{\text{air,wall}}$	$\left(\frac{\overline{S}}{\rho}\right)_{\text{wall,air}}$	$\prod k_i$	$1-\overline{g}_{\text{air}}$	空气比释动能率/ ( $\mu\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}$ )		相对 偏差/%
						测量值	基准值	
$^{137}\text{Cs}$	135.19	0.999 4	1.015 4	1.029 6	0.998 4	36.470	36.35	0.27
$^{60}\text{Co}$	1 909.26	0.998 9	1.010 6	1.020 9	0.996 9	508.797	506.5	0.39

### 3.3 不确定度分析

根据不同方法复现的空气比释动能公式,

由各项分量进行分析,最后合成总的不确定度,结果列于表6。

表6 空气比释动能测量不确定度分析  
Table 6 Uncertainty analysis of air-kerma measurement

不确定度分量	自由空气电离室		石墨空腔电离室	
	A类相对不确定度/%	B类相对不确定度/%	A类相对不确定度/%	B类相对不确定度/%
电离电流	0.08	0.01	0.02	0.01
温度	0.06	0.04	0.06	0.04
气压	0.01	0.01	0.01	0.01
体积		0.04		0.10
$g$		0.12		0.12
电离功		0.35		0.35
空气密度		0.01		0.01
总修正因子	0.45	0.10	0.04	0.09
定位	0.01	0.06	0.01	0.06
碰撞阻止本领比				0.15
质能吸收系数比				0.10
相对标准不确定度/%		0.61		0.45

## 4 结论

本文主要研究250~600 kV X射线空气比释动能的测量方法,建立了250~600 kV范围内8个重过滤窄谱系列辐射质及测量得到相应的半值层。通过EGSnrc模拟得到X射线能谱及平均能量。研制用于250~600 kV X射线空气比释动能测量的石墨空腔电离室,通过实验和模拟得到了相应的物理常数及修正因子,完成了250~600 kV辐射质下空气比释动能的量值复现。在300 kV辐射质下,利用石墨空腔电离室完成空气比释动能能量值复现,空气比释动能测量结果合成相对标准不确定度为0.45%;利用平板自由空气电离室,完成空气比释动能能量值复现,空气比释动能测量结果合成相对标准不确定度为0.61%,两种方法测量结果的相对偏差为0.09%。为了验证数据的准确性,利用该石墨空腔电离室在 $^{137}\text{Cs}$ 和 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 射线辐射场中完成空气比释动能的量值复现,测量结果与基准值的相对偏差分别为0.27%和0.39%,二者在不确定度范围内相吻合。本文验证了石墨空腔电离室在复现中高能X射线空气比释动能的可行性,为石墨空腔电

离室复现X射线空气比释动能探索一套方法,提高了X射线空气比释动能能量值复现水平。

### 参考文献:

- [1] 侯祖洪. 电离辐射防护与安全[M]. 武汉:武汉出版社,2011.
  - [2] 王乃彦. 全国核技术及应用发展战略研讨会论文集[C]. 威海:中国核学会,2003.
  - [3] 吴金杰. 2010中国仪器仪表与测控技术大会论文集[C]. 深圳:中国仪器仪表学会,2010.
  - [4] ANKERHOLD U, ANTON M, BÜERMANN L, et al. PTB progress report[R]. [S. l.]: [s. n.], 2015.
  - [5] BUEERMANN L, HILGERS G. Significant discrepancies in air kerma rates measured with free-air and cavity ionization chambers[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2007, 580(1): 477-480.
  - [6] 郭蒙蒙.  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 射线空气比释动能绝对测量的研究[D]. 成都:成都理工大学,2013.
  - [7] 李德红,王培玮,郭蒙蒙,等.  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 射线空气比释动能基准石墨空腔电离室的研制[J]. 计量学报,2016,37(3):323-327.
- LI Dehong, WANG Peiwei, WU Mengmeng, et

- al. Construction on graphite cavity ionization chamber as air kerma primary standard for  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  rays[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2016, 37(3): 323-327(in Chinese).
- [8] 李景云,郭文,侯金兵,等.  $^{60}\text{Co}$ 和 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 射线参考辐射及测定其空气比释动能(率)的系列空腔电离室[J]. *辐射防护*,1996,16(2):88-97.  
LI Jingyun, GUO Wen, HOU Jinbing, et al.  $^{60}\text{Co}$  and  $^{137}\text{Cs}$  gamma ray reference radiation field and the standard cavity ionization chambers used for air kerma determination[J]. *Radiation Protection*, 1996, 16(2): 88-97(in Chinese).
- [9] 阿蒂克斯 F H,陈常茂. 辐射剂量学[M]. 北京:原子能出版社,1981.
- [10] GRAY L H. An ionization method for the absolute measurement of gamma-ray energy[J]. *Health Physics*, 1936, 38(6): 907-918.
- [11] BURNS D T. A new approach to the determination of air kerma using primary-standard cavity ionization chambers[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2006, 51(4): 929-942.
- [12] 李婷. 250~600 kV X射线石墨空腔电离室的研制[D]. 成都:成都理工大学,2017.
- [13] 李婷,吴金杰,王培玮,等. 自制球形空腔电离室的性能测试[J]. *计量学报*,2016,37(增刊): 86-88.
- LI Ting, WU Jinjie, WANG Peiwei, et al. The characteristics test for the developed spherical graphite ionization chamber[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2016, 37(Suppl.): 86-88(in Chinese).
- [14] 余继利,方方,吴金杰,等. X射线石墨空腔电离室壁修正因子的蒙特卡罗模拟[J]. *计量学报*, 2016,37(增刊):15-19.  
YU Jili, FANG Fang, WU Jinjie, et al. X-rays graphite cavity ionization chamber wall correction factor monte carlo simulation[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2016, 37(Suppl.): 15-19(in Chinese).
- [15] 郝艳梅,黄建微,李德红,等. 球形石墨空腔电离室壁修正因子模拟计算[J]. *计量学报*,2019,40(3):172-175.  
HAO Yanmei, HUANG Jianwei, LI Dehong, et al. Monte-Carlo simulation about wall correction factor for the spherical graphite cavity chamber [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2019, 40(3): 172-175(in Chinese).