

# N-60~N-350 X 射线空气比释动能绝对测量方法研究

王雨润<sup>1,2</sup>, 黑大千<sup>1</sup>, 高飞<sup>2</sup>, 李佳桐<sup>1</sup>, 刘佳瑞<sup>2</sup>

(1. 兰州大学核科学与技术学院, 甘肃兰州 730000;  
2. 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

**摘要:**随着核技术应用的快速发展, 中高能 X 射线的使用需求与日俱增, 同时对窄谱 60~350 kV 空气比释动能率的绝对测量能力和测量范围提出迫切需求。本研究基于实验测量、理论计算和蒙特卡罗模拟等方法, 对中国原子能科学研究院建立的中高能自由空气电离室进行 N-60~N-350 标准辐射质空气比释动能绝对测量时所需的各项修正因子进行了计算及不确定度分析, 实现了对 N 系列 X 射线标准辐射质的空气比释动能的量值复现, 得到 N-60~N-350 辐射质下距离焦斑 1 m 处的空气比释动能率值。之后, 利用 GUM 法进行不确定度评定, 得出量值复现结果的相对标准不确定度为 0.52%, 并通过校准因子比对初步进行了量值复现结果准确性的验证。

**关键词:** X 射线; 空气比释动能; 绝对测量; 自由空气电离室

中图分类号: TL84

文献标志码: A

文章编号: 1000-7512(2025)04-0337-08

doi: [10.7538/tws.2025.youxian.008](https://doi.org/10.7538/tws.2025.youxian.008)

## Research on the Absolute Measurement Methodology of Air Kerma for N-60~N-350 X-Rays

WANG Yurun<sup>1,2</sup>, HEI Daqian<sup>1</sup>, GAO Fei<sup>2</sup>, LI Jiatong<sup>1</sup>, LIU Jiarui<sup>2</sup>

(1. School of Nuclear Science and Technology in Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;  
2. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract:** With the rapid development of nuclear technology applications, the demand for medium-to high-energy X-rays has been increasing substantially, accompanied by urgent requirements for absolute measurement capabilities and measurement ranges of air kerma rates under narrow-spectrum (60-350) kV conditions. This study systematically calculates and analyzes the correction factors and associated uncertainties required for absolute air kerma measurements of N-60~N-350 standard radiation qualities using the medium-energy free-air ionization chamber established at the China Institute of Atomic Energy. The investigation employs a comprehensive methodology integrating experimental measurements, theoretical calculations, and Monte Carlo simulations. Through this research, the reproduction of air kerma values for N-series X-ray standard radiation qualities has been successfully achieved, yielding air kerma rate values at 1 meter from the focal spot under N-60~N-350 radiation qualities. Subsequently, uncertainty evaluation using the GUM method demonstrates that the relative standard uncertainty of the reproduced quantity values reaches 0.52%.

Furthermore, preliminary verification of measurement accuracy has been conducted through calibration factor comparisons, thereby validating the reliability of the reproduced quantity values.

**Key words:** X-ray; air kerma; absolute measurement; free-air ionization chamber

目前,核技术广泛应用于医疗诊断、放射治疗、工业无损检测、核能发电、材料分析和科学的研究等领域,其在各个领域的广泛应用带来了巨大的经济效益和社会效益,同时辐射防护和环境监测也越来越受到人们的重视<sup>[1]</sup>。对于辐射防护探测仪器的性能评估,最常用的是60~250 kV能量范围的X射线。为保证中高能X射线治疗水平(0.01~1 Gy/min)、诊断水平(10 μGy/min~1 Gy/min)及防护水平(1 μGy/h~1 Gy/h)空气比释动能率的准确测量及量值溯源,基于平板型自由空气电离室(FAC),实现了能量范围在中能60~350 kV的X射线空气比释动能率的绝对测量。

对于10~250 kV X射线,国际上采用FAC进行空气比释动能值绝对测量。1957年Wyckoff和Attix详细介绍了平板型FAC的设计<sup>[2]</sup>。平板型FAC通过光阑和收集极长度定义有效测量体积,在高压极和收集极之间的电离区域中,X射线与空气相互作用产生的电离电荷将在电场作用下被极板收集,从而实现空气比释动能的绝对测量。该设计结构简单,测量稳定性好,国际上许多国家计量机构都采用平板型FAC作为中低能X射线空气比释动能的基准,如国际计量局(BIPM)、美国国家标准与技术研究院(NIST)、英国国家物理研究院(NPL)等。随着X射线能量的增加,光子产生的初级电子的径迹长度增加,平板型FAC的结构会使电子损失的修正因子更大<sup>[3]</sup>。为了准确测量空气比释动能,电离室的体积也应较大:德国联邦物理技术院(PTB)的PK400能够达到X射线测量的最高能量上限400 kV,该电离室长120 cm,重10<sup>3</sup> kg<sup>[4]</sup>。中国原子能科学研究院(CIAE)设计的FAC长度91 cm,自带机械升降调节及旋转功能,重约2×10<sup>3</sup> kg,测量能量上限可达350 kV,是我国X射线测量能量上限最高的FAC<sup>[5]</sup>。

本研究确定中能平板型FAC关于N-60~N-350辐射质的各项修正因子,实现用平板型FAC对空气比释动能进行绝对测量,以满足中能X射线空气比释动能率相关计量标准的需

求,并完善FAC的测量参数。本研究成果对X射线空气比释动能量值传递体系的建立具有重要意义。

## 1 标准辐射质及电离电流测量系统

### 1.1 X射线装置及标准辐射质

X射线辐射装置由X光机和X射线过滤系统组成,本研究使用的X射线光机为YXLON公司制造的MG-452型高稳定X射线系统,此X射线光机具有两个高压发生器,每个发生器均可输出225 kV的峰值电压,其工作频率为40 kHz。该光机的输出电压可在20~450 kV的范围内连续调节,且在一定范围内管电压调节和管电流调节相互独立,满足X射线相关的研究需求<sup>[6]</sup>。

本研究使用的X射线标准辐射场是依据2019年修订的ISO4037-1《用于校准剂量仪和剂量率仪及确定其能量响应的X和γ参考辐射第一部分》标准中的参数建立<sup>[7]</sup>。光机的固有过滤为0.122 mm Al,实际附加过滤参数列于表1,附加过滤中使用的过滤片纯度>99.9%,杂质引起的影响可忽略不计。

### 1.2 平板型自由空气电离室

CIAE自主设计了用于60~350 kV X射线的平行板FAC,该FAC结构图示于图1,外观示于图2,依据国防科技工业长度一级计量单位和中国计量科学研究院的测量结果,其主要特性列于表2。FAC由高压电极、收集电极、保护电极、保护环、孔缝和屏蔽外壳组成。对电离区域和电荷收集区域进行了标注。

### 1.3 微电流测量系统

反馈积分电路的放大级采用Keithley 6517B静电计的内部放大电路,6517B静电计电流噪声峰峰值为0.75 fA,可提供5 1/2位(000 000~199 999)的最大分辨率,满足测量的高精度要求。将6517B静电计的内部输入级放大器单独引出连接Keysight公司的16380A型标准空气电容形成实验测量电离电流使用的积分负反馈放大电路,电离电流绝对测量系统中信号回路

表 1 CIAE N 系列标准辐射质参数

Table 1 The parameters of the N-series standard radiation qualities established by CIAE

辐射质	管电压/kV	过滤			第一半层值/mm	第二半层值/mm	同质系数/h	平均能量/keV
		Pb	Sn	Cu				
N-60	60			0.61	0.235Cu	0.263Cu	0.890	48.10
N-80	80			2.01	0.573Cu	0.645Cu	0.888	65.50
N-100	100			5.00	1.078Cu	1.157Cu	0.932	83.30
N-120	120		1.03	5.00	1.723Cu	1.800Cu	0.957	100.5
N-150	150			1.50	2.410Cu	2.514Cu	0.959	117.3
N-200	200	1.020	2.993	1.987	4.049Cu	4.068Cu	0.995	162.5
N-250	250	2.992	1.959		5.199Cu	5.316Cu	0.978	204.9
N-300	300	4.980	2.965		5.962Cu	6.259Cu	0.953	245.8
N-350	350	6.959	4.438		6.996Cu			282.9

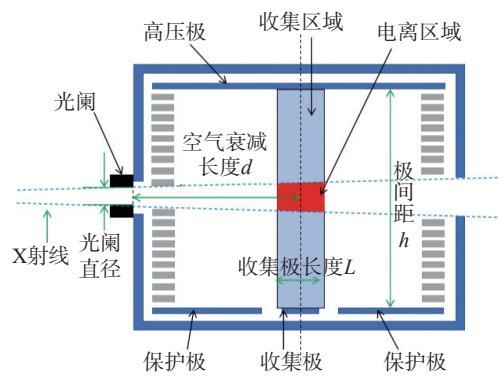


图 1 平板型 FAC 的结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the parallel-plate FAC structure



图 2 中高能平板型 FAC 外观

Fig.2 The external view of the medium-energy and high-energy parallel-plate FAC

均采用低噪声三同轴电缆连接。实验使用 6517B 记录电压值及时间信息, 选择电荷累积时间为 120 s。

表 2 中高能平板型 FAC 主要参数

Table 2 The primary parameters of the medium-energy and high-energy parallel-plate FAC

装置参数	测量值	不确定度/%
光阑直径/mm	20.117	0.012
空气衰减长度/mm	490.797	0.001
收集极长度/mm	149.995	0.002
收集极宽度/mm	480.024	<0.001
极间距/mm	481.523	0.001
空气间隙/mm	4.974	0.08
测量体积/mm <sup>3</sup>	47675.263	0.024

$$I = C \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (1)$$

式中,  $I$  是要测量的电离电流, pA;  $C$  为标准电容, pF;  $\Delta V = (V_2 - V_1)$  是在时间间隔  $\Delta t$  内测量的电压变化量, V。

采用该测量系统(图 3)进行 N-60~N-350 辐射质在 1 m 处产生的电离电流, 进而实现测量点空气比释动能率值的确定。FAC 的各项实验修正因子的测量计算也基于该系统测量确定。

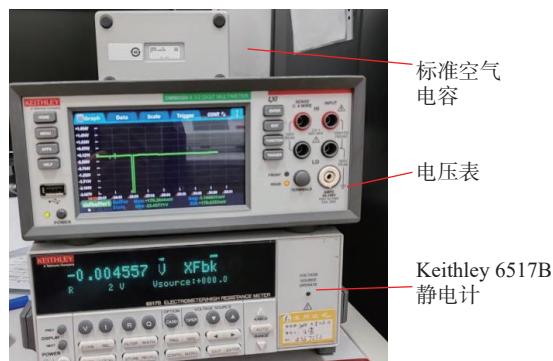


图 3 电离电流测量系统

Fig.3 The ionization current measurement system

## 2 空气比释动能率复现方法

对于测量体积为  $V$  的自由空气电离室, 空气比释动能率由关系式(2)确定:

$$K_{air} = \frac{I}{\rho \cdot \Pi \cdot r_{ap}^2} \cdot \frac{W_{air}}{e} \cdot \frac{1}{1-g} \cdot \prod_i k_i \quad (2)$$

式中,  $\rho$  为参考条件下的空气密度,  $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;  $I$  为测量的电离室电流,  $\text{A}$ ;  $\overline{W}$  为电子在空气中产生一对电子离子对所消耗的平均能量,  $\text{J/C}$ ;  $g$  为通过空气中的辐射过程损失的初始电子能量的分数, 量纲为 1;  $\Pi \cdot r_{ap}^2$  为有效测量体积,  $\text{cm}^3$ ;  $r_{ap}$  为光阑半径,  $\text{cm}$ ;  $\prod_i k_i$  为各项修正因子之积, 量纲为 1。主要包含以下几项修正因子:

$$\prod_i k_i = k_a \cdot k_\rho \cdot k_h \cdot k_s \cdot k_p \cdot k_d \cdot k_{pol} \cdot k_e \cdot k_{dia} \cdot k_{sc} \cdot k_{fl} \cdot k_{ii} \cdot k_w \quad (3)$$

式中,  $k_a$  为空气衰减修正因子,  $k_\rho$  为空气密度修正因子,  $k_h$  为空气湿度修正因子,  $k_s$  为复合损失修正因子,  $k_p$  为室壁穿透修正因子,  $k_d$  为电场畸变修正因子,  $k_{pol}$  为极性修正因子,  $k_e$  为电子损失修正因子,  $k_{dia}$  为光阑效应修正因子,  $k_{ii}k_w$  为初始电离修正和平均电离能修正的乘积。本研究中, 修正因子  $k_s$ 、 $k_p$ 、 $k_d$ 、 $k_{pol}$  为通过实验结果计算得出,  $k_{dia}$  为通过理论计算得出,  $k_e$ 、 $k_a$ 、 $k_{sc} \cdot k_{fl}$  为基于 Geant4 程序开展蒙特卡罗模拟计算得出,  $k_{ii}k_w$  引用了 ICRU 90 Report 相关模拟结果。

## 3 各项修正测量结果及不确定度分析

### 3.1 修正因子及 N 系列辐射质空气比释动能率测量

**3.1.1 基于实验测量确定的修正因子** 在本研究中, 空气湿度修正因子、空气密度修正因子、前壁穿透修正因子、电场畸变修正因子、复合损失修正因子、正负极性修正因子基于实验测量来确定。

空气密度修正因子的计算方法如下:

$$k_\rho = \frac{1013.25 \cdot T}{P \cdot 293.15} \quad (4)$$

式中,  $T$  为测量时的温度,  $\text{K}$ ;  $P$  是测量环境的压力,  $\text{hPa}$ 。

满足实验室相对湿度在 30%~60% 的条件时, 自由空气电离室的湿度修正可确定为 0.9980。

前壁穿透修正的计算公式为:

$$k_p = \frac{I - I_p}{I} \quad (5)$$

式中,  $I$ 、 $I_p$  分别为没有铅塞、有铅塞时测得的扣除漏电后的电离电流,  $\text{pA}$ 。

此次使用的中高能 X 射线 FAC 为平板型, 电离室的共面性为 0.003 mm, 设计有分压用的保护条, 分压效果较好。所以, 电场畸变可以忽略不计, 该项修正因子为 1.0000。

复合损失修正因子使用 Boutillon 描述的方法确定, 复合损失修正因子  $k_s$  可以表示为:

$$k_s = 1 + k_{si} + k_{sv} I_V \quad (6)$$

式中,  $k_{si}$  为初始复合系数, 无量纲;  $k_{sv}$  为体复合系数, 无量纲;  $I_V$  为外加电压  $V$  下测得的未对衰减进行校正、也未对温度和压力进行归一化的电离电流,  $\text{pA}$ 。

对于后续在正压下测量的实验, 正负极性修正因子的计算公式为:

$$k_{pol} = \frac{I^+ + I^-}{2I^+} \quad (7)$$

式中,  $I^+$ 、 $I^-$  分别为在正极性电压、负极性电压下测得的电离电流,  $\text{pA}$ 。

**3.1.2 基于理论计算确定的修正因子** 电离室的光阑为带孔的圆柱, 满足使用 Simons 的唇缘穿透修正理论对光阑边缘穿透的光子进行修正的条件。光阑穿透修正因子的计算公式如下:

$$k_{dia} = \frac{1}{1+f} \quad (8)$$

式中,  $f$  为透射因子, 无量纲。

**3.1.3 基于蒙卡模拟计算确定的修正因子** 基于 Geant4<sup>[8]</sup> 程序开展中高能 FAC 的空气衰减修正因子、散射荧光光子修正因子及电子损失修正因子的蒙特卡罗模拟计算。建立中高能 FAC 模型的内部结构示于图 4。本研究选用 Geant4 的 Livermore 模型开展以上三项修正因子的模拟计算, 该模型能够在 250~1 GeV 范围内模拟光子与物质的相互作用, 尤其是具有很好地模拟低能光子与物质相互作用过程的能力。

基于 ICRU 74 号报告中给出的空气比释动能因子值和模拟获得的光子注量进行电离室电离区域内沉积的空气比释动能的计算。

在测量 N 系列辐射质下的空气衰减修正因子时, 由于辐射质所加的附加过滤片较厚, 平均能量高, 在通过直径为 1 mm 的限束光阑后自由空气电离室在 1 m 处测得的电离电流在 fA 量级, 与漏电处于同一量级, 导致统计涨落对实验

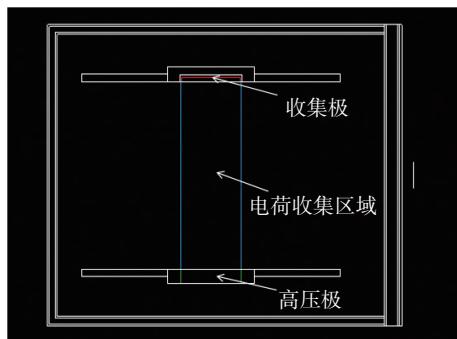


图 4 Geant4 中高能 FAC 建模内部结构

Fig.4 The internal structure of the medium-energy and high-energy FAC modeled in Geant4

结果的影响较大,因此采用蒙特卡罗模拟方法计算空气衰减修正因子。对于空气衰减修正因子的模拟计算,采用抽真空法<sup>[9]</sup>的原理设计模拟程序:添加与电离室空气衰减长度一致的真空柱,比较有无真空柱时电离区域内沉积的空气比释动能,即得到空气衰减系数 $k_a$ :

$$k_a = \frac{E_{vac}}{E_{air}} \quad (9)$$

式中, $E_{vac}$ 为在有真空柱时电离区域内沉积的能量,Gy; $E_{air}$ 为在无真空柱时电离区域内沉积的能量,Gy。

基于NIST数据库中空气的质量衰减系数开展了空气中各个辐射质的质量衰减系数 $(\mu/\rho)_{air}$ 和中高能电离室空气衰减修正因子的计算,将其理论计算值与模拟结果进行对比,其结果列于表3。结果表明,对于空气中各个辐射质的质量衰减系数,最大偏差为-4.34%;对于两台电离室的空气衰减修正因子,最大偏差为-0.0392%。中国计量科学研究院张德亮使用EGSnrc模拟的N-60~N-300的 $(\mu/\rho)_{air}$ 与理论计算值的偏差最大为3.38%<sup>[10]</sup>,与本研究中得到模拟结果的准确性相差很小,且理论计算与模拟计算得到的值偏差较小,认为Geant4对 $k_a$ 的模拟有效。

表 3 理论计算与 Geant4 计算得到的 $(\mu/\rho)_{air}$ 及 $k_a$ 比较Table 3 Comparisons between theoretical calculations and Geant4 simulations of  $(\mu/\rho)_{air}$  and  $k_a$ 

辐射质	理论 $(\mu/\rho)_{air}$	计算 $(\mu/\rho)_{air}$	$(\mu/\rho)_{air}$ 二者偏差/%	理论 $k_a$	计算 $k_a$	$k_a$ 二者偏差/%
N-60	0.2222	0.2209	-0.56	1.0132	1.0132	-0.0074
N-80	0.1833	0.1767	-3.62	1.0109	1.0105	-0.0392
N-100	0.1654	0.1679	1.50	1.0098	1.0100	0.0147
N-120	0.1550	0.1535	-0.96	1.0092	1.0091	-0.0088
N-150	0.1477	0.1441	-2.45	1.0088	1.0086	-0.0214
N-200	0.1324	0.1267	-4.30	1.0079	1.0075	-0.0337
N-250	0.1228	0.1220	-0.69	1.0073	1.0072	-0.0050
N-300	0.1155	0.1105	-4.34	1.0069	1.0066	-0.0297
N-350	0.1099	0.1059	-3.63	1.0065	1.0063	-0.0236

根据已有Burns<sup>[2]</sup>的研究,使用Geant4计算散射荧光光子修正因子可行。其通过对输出信息中光子的ParentID和StepMumber进行限制,分别得到了散射光子、荧光光子及初级光子沉积的空气比释动能。该项修正计算公式如下:

$$k_{sc} \cdot k_{fl} = 1 - \frac{E_{sc} + E_{fl}}{E_{air}} \quad (10)$$

由于本次使用的FAC的收集极和高压极板的厚度足以使低能电子将能量完全沉积其中,故直接使用收集极和高压极板上沉积的电子动能作为电子未消耗在空气中的能量,电子损失修正因子计算公式如下:

$$k_e = 1 + \frac{E_e}{E_{air}} \quad (11)$$

式中, $E_{sc}$ 和 $E_{fl}$ 分别为电离区域内散射光子和荧光光子产生的空气比释动能,pGy; $E_e$ 为电子在高压极和收集极上产生的能量沉积,pGy。

$k_{ii}k_w$ 是2014年ICRU 90 Report新引入的两项修正因子的乘积<sup>[11]</sup>。空气比释动能计算使用的不是测量到的全部正极性/负极性电荷,提出 $k_{ii}$ 用于扣除光子与空气发生初级相互作用产生的电子离子对占电离区域产生的总的电离电荷的份额。低能光子的 $W_{air}$ 值偏离33.97 eV, $k_w$ 对此进行修正。两项修正因子计算公式如式(11)和式(12)所示。该报告中使用PENELOPE程序模拟计算的结果示于图5,根据窄谱辐射质的平均能量进行线性插值,计算确定了这两项修正因子乘积的值。

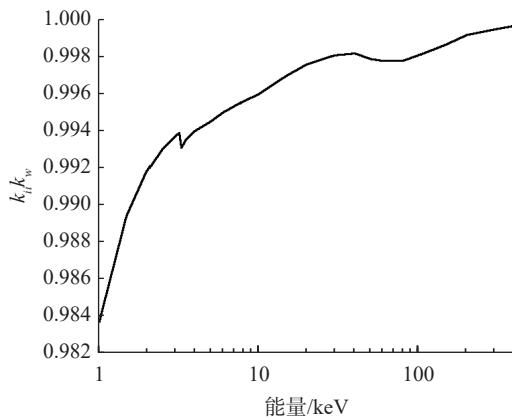


图 5  $k_{ii}k_w$  值随光子能量  $E$  的变化(数据来源于 ICRU 90 report 表 5.7)

Fig.5 The variation of  $k_{ii}k_w$  with photon energy  $E$  (data obtained from table 5.7 of the ICRU 90 report)

$$k_{ii} = \frac{N_{ip}^v}{N_e + N_{ip}^v} \quad (12)$$

$$k_w = \frac{N_{ip}^c}{N_{ip}^v} \quad (13)$$

式中,  $N_{ip}^v$  为使用有效平均电离能的条件下得到

表 4 中高能 FAC 窄谱系列修正因子测量计算结果

Table 4 Measurement and calculation results of correction factors for the narrow-spectrum series in the medium-energy and high-energy FAC

修正因子	辐射质								
	N-60	N-80	N-100	N-120	N-150	N-200	N-250	N-300	N-350
$k_a$	1.0132	1.0105	1.0100	1.0091	1.0086	1.0075	1.0072	1.0066	1.0063
$k_s$	1.0004	1.0003	1.0003	1.0003	1.0004	1.0003	1.0004	1.0004	1.0004
$k_p$	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9999	0.9996	0.9994	0.9993	0.9991
$k_d$	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
$k_{pol}$	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
$k_{dia}$	0.9999	0.9997	0.9999	0.9997	0.9997	0.9991	0.9986	0.9982	0.9973
$k_\rho$	1.0034	1.0034	1.0034	1.0034	1.0034	1.0039	1.0039	1.0039	1.0039
$k_h$	0.9980	0.9980	0.9980	0.9980	0.9980	0.9980	0.9980	0.9980	0.9980
$k_{sc} \cdot k_{fl}$	0.9915	0.9929	0.9939	0.9944	0.9949	0.9955	0.9958	0.9961	0.9963
$k_e$	1.0000	1.0000	1.0001	1.0001	1.0002	1.0004	1.0011	1.0019	1.0045
$k_{ii}k_w$	0.9980	0.9978	0.9978	0.9981	0.9983	0.9988	0.9992	0.9993	0.9994

表 5 中高能 FAC 窄谱系列空气比释动能率复现结果

Table 5 Reproduction results of air kerma rates for the narrow-spectrum series using the medium- and high-energy FAC

参数	辐射质								
	N-60	N-80	N-100	N-120	N-150	N-200	N-250	N-300	N-350
$I/\text{pA}$	28.4817	13.9163	7.385	7.9202	61.0832	22.3885	24.7441	25.1179	29.4652
$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1.293	1.293	1.293	1.293	1.293	1.293	1.293	1.293	1.293
$V/\text{cm}^3$	47.675	47.675	47.675	47.675	47.675	47.675	47.675	47.675	47.675
$W_{air}/e$	33.97	33.97	33.97	33.97	33.97	33.97	33.97	33.97	33.97
$I-g$	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
$\prod k_i$	1.0043	1.0025	1.0033	1.0030	1.0033	1.0031	1.0036	1.0037	1.0052
$K_{air}/\text{mGy}\cdot\text{h}^{-1}$	56.74	27.67	14.70	15.76	121.6	44.55	49.26	50.01	58.76

的电子离子对个数;  $N_e$  为入射光子直接产生的电子个数;  $N_{ip}^c$  为平均电离能为 33.97 eV 这一常数的条件下得到的电子离子对个数。

**3.1.4 中高能 FAC 修正因子测量结果汇总** 综上所述, 得到中高能 FAC 关于窄谱系列标准辐射质的各项修正因子测量计算结果列于表 4。

**3.1.5 中高能 FAC 窄谱系列空气比释动能率复现** 根据表 4 中确定的各辐射质的各项修正因子值, 基于公式(1)计算得到空气比释动能率  $K_{air}$ , 单位为  $\text{mGy}\cdot\text{h}^{-1}$ , 具体结果列于表 5。

为验证量值复现结果的准确性, 将 PTW 32005 电离室放置在距离光机焦点 1 m 处进行了空气比释动能率测量。基于本研究中复现的量值得到校准因子  $k_1$ 。该电离室送至中国计量科学研究院进行检定, 得到 60~250 kV 窄谱标准辐射质的校准因子  $k_2$ , 在该能量范围内的校准因子比对结果列于表 6。

可以看出  $k_1$  与  $k_2$  存在约 -5% 的固定偏差。由于各项修正因子的乘积对测量结果的影响不足 1%, 因此, 推测是电离室所测电离电流比实际偏小约 5%, 后续需排查这一误差的来源。

表 6 校准因子比对结果

Table 6 Comparative results of calibration factor

参数	辐射质						
	N-60	N-80	N-100	N-120	N-150	N-200	N-250
校准因子 $k_1$	0.960	0.957	0.949	0.942	0.940	0.925	0.930
校准因子 $k_2$	1.011	1.009	1.001	0.988	0.981	0.981	0.985
偏差/%	-5.0	-5.2	-5.2	-4.7	-4.2	-5.7	-5.5

### 3.2 空气比释动能率测量不确定度分析

根据我国《JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示》计量技术规范<sup>[12]</sup>中的 GUM 法, 测量不确定度评价方法分为 A 类和 B 类。不确定度的主要来源在公式(14)中显示。

$$u_r(K_{air}) = \sqrt{(u_r(T))^2 + (u_r(P))^2 + (u_r(C))^2 + (u_r(V))^2 + (u_r(t))^2 + (u_r(\prod k_i))^2 + (u_r(\rho))^2 + (u_r(v))^2 + (u_r(W/e))^2 + (u_r(g))^2 + (u_r(d))^2} \quad (14)$$

对测量不确定度进行了评定, 结果列于表 7。

表 7 空气比释动能率测量不确定度分析

Table 7 Uncertainty analysis of air kerma rate measurements

不确定度来源	A类 $u_i/%$	B类 $u_i/%$
$W/e$	—	0.35
$I-g$	—	0.01
$\rho$	—	0.01
$k_a$	—	0.03
$k_s$	0.013	0.051
$k_p$	0.019	0.012
$k_d$	—	0.1
$k_{pol}$	0.008	0.051
$k_{dia}$	—	0.23
$k_\rho$	0.05	0.054
$k_h$	—	0.03
$k_{sc} \cdot k_{fl}$	—	0.01
$k_e$	—	0.04
$k_{ii}k_w$	—	0.11
$I$	0.07	0.012
$T$	0.03	0.05
$P$	0.01	0.02
$V$	—	0.024
参考点	—	0.23
$K_{air}$ 的相对标准不确定度	0.10	0.52
$K_{air}$ 的相对合成标准不确定度	0.52	
$K_{air}$ 的相对扩展标准不确定度( $k=2$ )	1.1	

对空气比释动能测量中所涉及的所有物理量进行了分析和评价。N 系列 X 射线空气比释动能测量的相对合成标准不确定度为 0.52%。

### 4 结论

基于实验测量、理论计算和蒙特卡罗模拟等方法, 对 CIAE 建立的中高能 FAC 进行 N-60~N-350 标准辐射质空气比释动能绝对测量时所需的各项修正因子进行了计算及不确定度分析, 完成了对 60~350 kV 能量范围内、距离光机焦点 1 m 处的 N 系列辐射质的空气比释动能率的绝对测量。并使用 GUM 法, 确定空气比释动能率测量结果的相对扩展不确定度为 1.1% ( $k=2$ )。

### 参考文献:

- [1] Zhao R, Wu J J, Xu Y, et al. Research on the absolute measurement and calibration methods of (250-450) kv X-ray air kerma at nim[J]. *Radiation Protection Dosimetry*, 2020, 192(4): 444-452.
- [2] Burns D T, Büermann L. Free-air ionization chambers[J]. *Metrologia*, 2009, 46(2): S9-S23.
- [3] 滕忠斌.大体积石墨空腔电离室在  $\gamma$  射线空气比释动能绝对测量中的应用[D].抚州:东华理工大学, 2019.
- [4] Büermann, Ludwig. The PTB free-air ionization chambers[R]. Berlin: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2022.
- [5] 中国原子能科学研究院.一种用于空气比释动能绝对测量的电离室:中国, 201811653869.0[P]. 2019-03-08.
- [6] 杭仲斌.(20~450) kV X 射线参考辐射场研建与空气比释动能量值复现技术研究[D]. 抚州:东华理工大学, 2021.
- [7] International Organization for Standardization. Radio logical protection -X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy-Part 1: Radiation characteristics and production methods[S]. [S. l.]: [s. n.], 2019.

- 
- [8] Agostinelli S , Allison J , Amako K , et al. Geant4—a simulation toolkit[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2003, 506(3): 250.
  - [9] 李论, 吴金杰, 葛双, 等. 抽真空法测量自由空气电离室空气衰减修正因子[J]. 核技术, 2015, 38(12): 67-72.  
Li Lun, Wu Jinjie, Ge Shuang, et al. Air attenuation correction factor of free-air ionization chamber by means of vacuum measurement[J]. Nuclear Techniques, 2015, 38(12): 67-72 (in Chinese).
  - [10] 张德亮. 重过滤窄谱 X 射线空气比释动能的测量与研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
  - [11] Menzel H G. Key data for ionizing-radiation dosimetry: measurement standards and applications[J]. Journal of the ICRU, 2014, 14(1): 1-118.
  - [12] 国家质量监督检验检疫总局. 测量不确定度评定与表示: JJF 1059.1—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.