

# 球形石墨空腔电离室壁修正因子的 Monte-Carlo 模拟和实验测量

刘鉴常<sup>1</sup>, 孙吉宁<sup>1</sup>, 杨小元<sup>2</sup>, 郭彬<sup>2</sup>, 叶卫国<sup>1</sup>,  
黄斐增<sup>1</sup>, 杨元第<sup>2</sup>, 胡家成<sup>2</sup>, 樊铁栓<sup>1</sup>

(1. 北京大学 物理学院 重离子物理研究所 重离子物理教育部重点实验室, 北京 100871;  
2. 中国计量科学研究院 电离辐射与医学处, 北京 100013)

**摘要:**采用 Monte-Carlo 模拟和实验测量两种方法对 30 cm<sup>3</sup> 和 10 cm<sup>3</sup> 球形石墨空腔电离室在 <sup>60</sup>Co  $\gamma$  射线下的壁修正因子  $K_{\text{wall}}$  进行研究。实验和模拟计算结果比较表明, 传统的线性外推法确定的壁修正因子比 Monte-Carlo 模拟计算结果约偏低 1.0%。对美国国家标准技术研究所 (NIST) 国家空气比释动能基准组的 30 cm<sup>3</sup> 和 50 cm<sup>3</sup> 球形石墨空腔电离室在 <sup>60</sup>Co  $\gamma$  射线下的相对电离电流和壁修正因子进行了 Monte-Carlo 模拟计算, 计算的相对电离电流值与 NIST 发布的实验测量值在 0.12% 内吻合。

**关键词:**石墨电离室; 空气比释动能; 壁修正因子; Monte-Carlo 模拟

中图分类号: TL818

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2006)06-0723-06

## Monte-Carlo Calculation and Measurement of Wall Correction Factor for Spherical Graphite Ionization Chamber

LIU Jian-chang<sup>1</sup>, SUN Ji-ning<sup>1</sup>, YANG Xiao-yuan<sup>2</sup>, GUO Bin<sup>2</sup>, YE Wei-guo<sup>1</sup>,  
HUANG Fei-zeng<sup>1</sup>, YANG Yuan-di<sup>2</sup>, HU Jia-cheng<sup>2</sup>, FAN Tie-shuan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Heavy Ion Physics of Ministry of Education, Institute of Heavy Ion Physics,  
School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Department of Ionization Radiation & Medicine National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

**Abstract:** The factor  $K_{\text{wall}}$  to correct for photon attenuation and scatter in the wall of the 30 cm<sup>3</sup> and 10 cm<sup>3</sup> spherical chambers at National Institute of Metrology for <sup>60</sup>Co air-kerma measurement is determined by Monte-Carlo calculation and experimental measurement. The calculation using the EGSnrc software system shows that the calculated wall correction factors differ by up to 1.0% from those obtained by linear extrapolations of the measured relative ionization current to zero wall thickness for the measured chambers. The relative ionization current and wall correction factors for the 30 cm<sup>3</sup> and 50 cm<sup>3</sup> spherical graphite chambers at NIST are calculated and compared with the meas-

ured results. The Monte-Carlo code can reproduce the experimental relative ionization current within an accuracy of  $\pm 0.12\%$ . This work confirms that for spherical standard chambers the  $^{60}\text{Co}$  air-kerma reference values should be obtained by a new  $K_{\text{wall}}$  determined by Monte-Carlo calculations.

**Key words:** graphite ionization chamber; air-kerma; wall correction factor; Monte-Carlo calculation

在辐射剂量学领域,比释动能被用来度量间接致电离粒子传递给直接致电离粒子的能量大小,它是描述间接致电离辐射与物质相互作用的重要物理量之一,国际上主要国家基准实验室均建立了空气比释动能基准装置。为了保证国际上的量值统一,每个国家的空气比释动能基准装置皆定期参加国际计量局(BIPM)所组织的 $^{60}\text{Co}$ 或 $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 射线空气比释动能的国际比对。我国在20世纪80年代进行了空气比释动能基准装置的研究工作,并于2001年底参加了BIPM所组织的 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 射线空气比释动能的国际比对<sup>[1]</sup>。在近十几年来的空气比释动能的国际比对活动中,人们发现,在建立 $^{60}\text{Co}$ 空气比释动能基准时,过去用来确定几个重要修正因子的技术在不同程度上存在问题。通过引进壁修正因子 $K_{\text{wall}}$ 修正电离室壁对光子吸收和散射作用引起的 $\gamma$ 射线减弱效应,可提高空气比释动能的测量精度。因此,关于准确确定该修正因子值的问题在近些年来受到国际电离辐射学界的极大关注和持续研究<sup>[2-8]</sup>。

将实验测量的电离室响应线性外推<sup>[9]</sup>是确定 $K_{\text{wall}}$ 的简单有效方法,在国内外不同国家标准实验室中得到广泛应用。但这种线性外推技术一直受到置疑<sup>[8]</sup>。在20世纪80年代中期,Rogers和Bielajew<sup>[7]</sup>首先利用Monte-Carlo方法进行了 $K_{\text{wall}}$ 的模拟计算,计算结果与传统的实验线性外推结论之间存在差别。对于圆柱形或球形电离室,这种差别表现得尤为明显。Bielajew<sup>[4]</sup>使用一简化的模型表明,对于入射在弯曲室壁表面上的光子,选用非线性外推到零壁厚的方法得到了与Monte-Carlo计算接近的结果。最近,Laitano等<sup>[6]</sup>针对 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 射线照射圆柱形电离室情况,利用实验分析方法确定的 $K_{\text{wall}}$ 与Monte-Carlo计算的相符合。但是,除个别国家标准实验室已考虑采用新的 $K_{\text{wall}}$ 修正他们的国家基准外,多数国家基准还未放弃

传统的线性外推技术<sup>[8]</sup>。本工作利用两种不同体积的球形石墨空腔电离室,采用实验log线性外推法和Monte-Carlo模拟方法研究在 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 射线下的 $K_{\text{wall}}$ ,通过比较推荐确定壁修正因子 $K_{\text{wall}}$ 的实用方法。

## 1 实验测量

基准实验室通常依据Bragg-Gray空腔理论<sup>[10]</sup>设计的石墨空腔电离室进行空气比释动能的绝对测量。使用球形空腔电离室进行实验测量较使用圆柱形电离室简单<sup>[11]</sup>。图1示出球形石墨空腔电离室的结构示意图。本文采用标称体积为10和30 cm<sup>3</sup>两种不同体积的球形石墨空腔电离室实验测量 $K_{\text{wall}}$ 。

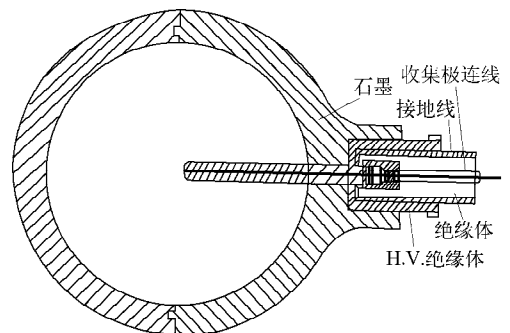


图1 球形石墨空腔电离室结构示意图

Fig. 1 Structure of spherical graphite ionization chamber

实验测量时,电离室与 $^{60}\text{Co}$ 源中心的距离为100 cm,而此处的辐射场为 $\phi 10$  cm,其均匀性好于1%。利用德国PTW公司生产的PTW-UNIDOS剂量仪测量电离电流。在保持其他实验条件不变的条件下,在电离室外依次附加不同厚度全球形石墨套,测量在不同壁厚下电离室的电离电流,得到电离电流随电离室壁厚变化的实验数据。表1列出中国计量科学研究院(National Institute of Metrology, 以下

简称 NIM) 30 cm<sup>3</sup> 球形石墨空腔电离室的相对电离电流测量结果。

表 1 中国计量科学研究院 30 cm<sup>3</sup> 球形电离室不同壁厚下的相对电离电流测量结果

Table 1 Measured relative ionization current vs. wall thickness for 30 cm<sup>3</sup> spherical chamber of NIM

外加球壳厚度/mm	电离室壁厚/mm	相对电离电流 <sup>1)</sup>
0	3.397	1.000 00
2.85	6.247	0.981 7(±0.000 9)
5.03	8.427	0.965 6(±0.001 1)
6.95	10.347	0.954 6(±0.001 7)
8.88	12.277	0.945 9(±0.001 4)
11.02	14.417	0.934 4(±0.000 6)

注:1) 相对电离电流表示在不同的电离室壁厚下的电离电流与在电离室原始壁厚(3.397 mm)下的电离电流的比值

将实验测量的相对电离电流随电离室壁厚的变化关系,用直线外推得到零壁厚处的相对电离电流  $I(0)$ 。假定电离室壁厚为零时的电离电流不受电离室壁影响,利用下式可从实验上得到在壁厚为  $d$  时电离室的壁吸收修正因子  $K_{w,0}(d)$ (修正到零壁厚):

$$K_{w,0}(d) = \frac{I(0)}{I(d)} \quad (1)$$

其中: $I(d)$ 为电离室壁厚为  $d$  时测量的相对电离电流。

电离室电离电流是由室壁某个深度上产生的电子在室内气体中电离产生的,外推到零室壁厚度修正时,往往会产生过修正。在考虑了电子产生平均中心对室壁吸收的影响后,可得到对应光子衰减和散射效应的壁修正因子  $K_{wall}^{[7]}$ :

$$K_{wall}(d) = K_{w,0}(d)K_{cep} \quad (2)$$

其中: $K_{cep}$ 用来修正电子产生平均中心对壁修正因子  $K_{w,0}(d)$  的减小效应,选  $K_{cep} = 0.995^{[12]}$ ,这是由 Wyckolf<sup>[13]</sup>的方法得到的估计值。

## 2 Monte-Carlo 计算

本文采用 EGSnrc 软件包进行电子-光子

耦合输运过程的模拟计算<sup>[14,15]</sup>。在利用 EGSnrc 程序对电离室的  $K_{wall}$  进行模拟计算时,通过编制用户程序,指定相关几何参数,实现对电离室形状和尺寸的具体描述和空腔区域的划分,同时进行放射源的描述,对可能发生的相互作用及每一粒子(包括光子、电子)的历史记录等进行指定。本文计算中所使用的子程序和主要参数的初始化设置如下。

1) CAVSPHnrc 用户程序。利用这一子程序调用主程序,实现对球形空腔电离室中的各种剂量学量值计算。这些剂量学量包括  $K_{at}$ 、 $K_{sc}$ 、 $K_{wall}$  及电离室吸收剂量等。

2) 源取样。在 CAVSPHnrc 子程序中,有平行束和点源两种放射源模型可供选择,需输入源与电离室间的相对位置和张角,并设定放射源辐射场大小。根据实验的实际情况,设定了距离电离室中心为 100 cm 的平行束型放射源,其辐射场半径为 5 cm。认为<sup>60</sup>Co  $\gamma$  射线中几乎 30% 的光子影响来自散射光子<sup>[16]</sup>,本文选用粒子入射能量为能谱输入。

3) 电子输运模拟计算。利用所谓的 PRESTA II 算法,即电子步算法(electron-step algorithm),进行电子输运过程模拟<sup>[15]</sup>,从而在允许的几何条件下,在更大的步长下得到比 EGS4 程序更精确的结果,同时采用简单的散射模式得到精确的边界穿越。在确定了电子输运过程中电离室纵向和径向的相关模式<sup>[15]</sup>后,其它的全部输运参数选用 EGSnrc 程序的缺省值。

4) 记录的粒子数。在 EGSnrc 程序中,用 Histories 来设定计算过程中记录的粒子数, Histories 越大,计算的精确度越高,计算所需的时间越长。平衡两者的关系,设定 Histories 为  $10^8$ ,计算吸收剂量的精度可达 0.08% 以上。

5) AUSGAB 子程序。利用此程序可定义输出量的输出形式。

电离室壁修正因子  $K_{wall}$  可分解为壁衰减修正因子  $K_{at}$  和散射修正因子  $K_{sc}$  两部分,计算公式如下:

$$K_{wall} = K_{at}K_{sc} \quad (3)$$

其中:壁衰减修正因子  $K_{at} = \sum_i r_i^0 e^{d_i} / \sum_i r_i^0$ , 这里,  $r_i^0$  为第  $i$  个初级光子发生作用所产生的

全部电子的能量沉积;  $d_i$  为电离室到第  $i$  个初级光子发生作用点的平均自由程数<sup>[7]</sup>; 散射修正因子  $K_{sc} = \sum_i r_i^0 / R_{tot} = \sum_i r_i^0 / \sum_i (r_i^0 + r_i^1)$ , 式中,  $r_i^1$  为第  $i$  个光子的二级或更高级散射光

子作用产生的电子的能量沉积;  $R_{tot} = \sum_i (r_i^0 + r_i^1)$  为在空腔气体中总的能量沉淀。

4 种球形石墨空腔电离室的基本参数列于表 2。

表 2 4 种球形石墨空腔电离室的基本参数

Table 2 Basic parameters of 4 spherical graphite ionization chambers

实验室	电离室体积/cm <sup>3</sup>	石墨密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	内半径/cm	外半径/cm	壁厚度/cm
NIST	30	1.73	1.928 4	2.303 5	0.375 1
NIST	50	1.73	2.304 8	2.670 0	0.365 2
NIM	30	1.80	1.957 8	2.297 5	0.339 7
NIM	10	1.80	1.340 0	1.649 5	0.309 5

### 3 结果和讨论

本工作利用 EGSnrc 程序计算了 50、30 和 10 cm<sup>3</sup> 球形石墨空腔电离室的相对电离电流随电离室壁厚的变化曲线。将计算结果与 NIST (National Institute for Standards and Technology, USA, 美国国家标准技术研究所) 和 NIM 的相应体积电离室(电离室的基本参数见表 2) 的实验测量结果进行了比较。图 2 示出了 NIST 50 cm<sup>3</sup> 电离室和 NIM 30 cm<sup>3</sup> 电离室的计算与测量数据。Monte-Carlo 计算对 NIM 实验外加球套与电离室外壁之间存在的空气隙厚度进行了仔细考虑。如图可见, Monte-Carlo 计算的曲线能够很好重现实验结果。电离室相对电离电流随电离室壁厚的变化基本上呈现直线变化关系。针对 NIM 30 cm<sup>3</sup> 球形石墨空腔电离室的相对电离电流与壁厚关系的实验数据, 分别用直线线性回归法和 log 线性回归法进行了处理, 其中, log 线性回归法结果如下式表示:

$$y = 3.157 - 162.075 \ln x \quad (4)$$

式中:  $y$  为以 mm 为单位的电离室壁厚;  $x$  为电离室的相对电离电流值。

拟合曲线如图 2 中的实线所示。log 线性回归法对应的决定系数  $R^2 = 0.994 8$ , 而直线线性拟合的决定系数  $R^2 = 0.993 4$ , 可见, log 线性拟合度与直线线性拟合度相近, 两者外推至零壁厚时所得的壁修正因子与 Monte-Carlo 计算结果比较差别约为 1.0%。对 NIM 10 cm<sup>3</sup> 球形石墨空腔电离室也有类似的结果(见表 3

第 3 列中数据)。

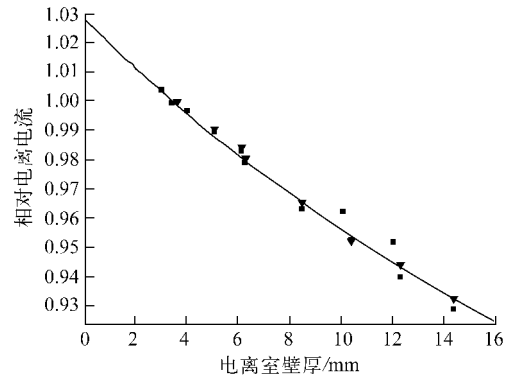


图 2 电离室相对电离电流(与相对剂量对应)随电离室壁厚变化的实验测量与 MC 计算结果比较

Fig. 2 Comparison of calculated and measured relative ionization current of spherical graphite ionization chambers

●——NIST 50 cm<sup>3</sup> 实验数据; ▼——NIM 30 cm<sup>3</sup> 实验数据;  
■——NIST 50 cm<sup>3</sup> MC 计算结果;  
◆——NIM 30 cm<sup>3</sup> MC 计算结果;  
实线——NIM 30 cm<sup>3</sup> 的实验测量数据 log 线性拟合结果

实际上, 在电离室壁厚逐渐趋于零的过程中, 相对电离电流与电离室壁厚的线性关系将不再成立, 线性外推到零壁厚在物理上缺乏充分根据。显然, 无法实验测量壁厚小于原始壁厚处的相对电离电流。本工作利用 Monte-Carlo 模拟把电离室相对电离电流的计算范围下推到小于原始壁厚的 0.5 mm 处, 得到更大壁厚范围所对应的电离室相对电离电流曲线(图 3)。图 3 显示, 在壁厚从 0.5 mm 增大到

2~3 mm的过程中,电离室相对电离电流曲线呈上升趋势,对应最初空气电离量的增长过程;曲线在壁厚为 3 mm 附近后出现下降趋势。从物理上说,最初电离量的增长过程是由于随壁厚增加从室壁中有更多的次级电子产生并进入空腔,直到壁厚增加到等于次级电子最大射程  $R$  时,空腔内电离量增至最大值。当壁厚继续增加时, $\gamma$  射线在一部分外层室壁中打出的次

级电子并不能进入空腔,加之室壁材料对  $\gamma$  射线的吸收效应,空腔内的电离量开始出现下降趋势。相应于电离量最大值处的室壁厚度称为室壁平衡厚度<sup>[17]</sup>。在我们应用的电离室中可观察到,平衡厚度为 2 mm 左右。显然, Monte-Carlo 方法可模拟真实的物理过程,用这样的方法计算石墨空腔电离室测量空气比释动能的壁修正因子是可靠的。

表 3 实验外推与 Monte-Carlo 模拟计算的  $K_{\text{wall}}$  值比较

Table 3 Comparison of calculated  $K_{\text{wall}}$  value with measured  $K_{\text{wall}}$  value by linear and log extrapolations

实验室	电离室体积/cm <sup>3</sup>	$K_{\text{wall}}$			
		实验直线线性外推 <sup>1)</sup>	实验 log 线性外推 <sup>1)</sup>	Rogers MC 计算	本工作 MC 计算
NIST	30	1.016 9(10)		1.027 10(4)	1.026 54(10)
NIST	50	1.017 6(10)		1.027 40(5)	1.027 64(10)
NIM	30	1.013 5(10)	1.014 6 (17)		1.025 12(13)
NIM	10	1.009 3(8)	1.010 4 (8)		1.021 30(11)

注:1) 实验外推  $K_{\text{wall}}$  结果包含了  $K_{\text{cep}}$ , 即  $K_{\text{wall}} = K_{w,0} K_{\text{cep}}$

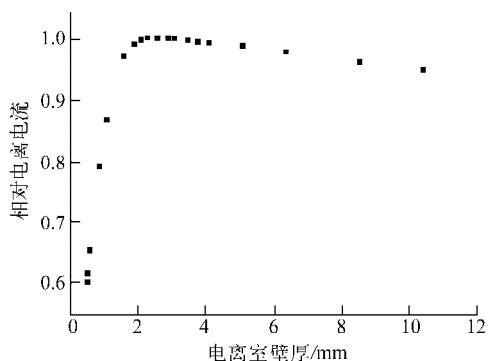


图 3 Monte-Carlo 计算的 NIM 30 cm<sup>3</sup> 球形石墨空腔电离室相对电离电流与壁厚的关系

Fig. 3 Calculated relative ionization current vs. wall thickness for NIM 30 cm<sup>3</sup> standard chamber

值得注意的是,最近有人用一种完全不同于 Monte-Carlo 模拟的实验方法<sup>[6]</sup>,对在 ENEA-INMRI 的柱形标准电离室的壁修正因子进行分析计算,其结果与 Monte-Carlo 方法计算出的壁修正因子值较为一致,误差在 0.25% 范围内,而与传统线性外推方法的结果相差约 1.0%,此结果可从另一方面证明 Monte-Carlo 方法在解决此问题上的有效性。

#### 参考文献:

- [1] 胡家成,杨小元,杨元第. 1999—2001 年度 BIPM 放射性剂量比对与刻度情况简介[J]. 现代计量测试, 2001, 4:5-10.  
HU Jiacheng, YANG Xiaoyuan, YANG Yuandi. 1999-2001 radioactive dosimetry comparison and calibrations at BIPM[J]. Modern Measurement and Test, 2001, 4:5-10(in Chinese).
- [2] ROGERS D W O, BIELAJEW A F, NAHUM A E. Ion chamber response and  $A_{\text{wall}}$  correction factors in a <sup>60</sup>Co beam by Monte-Carlo simulation [J]. Phys Med Biol, 1985, 30:429-443.
- [3] BIELAJEW A F. Correction factors for thick-walled ionization chambers in point-source photon beams[J]. Phys Med Biol, 1990, 35:501-516.
- [4] BIELAJEW A F. On the technique of extrapolation to obtain wall correction factors for ion chambers irradiated by photon beams[J]. Med Phys, 1990, 17:583-587.
- [5] BIELAJEW A F, ROGERS D W O. Implications of new correction factors on primary air kerma standards in <sup>60</sup>Co beams [J]. Phys Med Biol, 1992, 37:1 283-1 291.
- [6] LAITANO R F, TONI M P, PIMPINELLA M, et al. Determination of the  $K_{\text{wall}}$  correction factor

- for a cylindrical ionization chamber to measure air-kerma in  $^{60}\text{Co}$  gamma beams[J]. *Phys Med Biol*, 2002, 47; 2 411-2 431.
- [7] ROGERS D W O, BIELAJEW A F. Wall attenuation and scatter corrections for ion chambers: Measurements versus calculations[J]. *Phys Med Biol*, 1990, 35(8): 1 065-1 078.
- [8] ROGERS D W O, TREURNIET J. Monte-Carlo calculated wall and axial non-uniformity corrections for primary standards of air kerma[R]. [S. l.]: NRCC, 1999.
- [9] SHORTT K R, RASS C K. The canadian  $^{60}\text{Co}$  exposure standard[R]. USA: NRC, 1986.
- [10] GRAY L H. An ionization method for absolute measurement of gamma-ray energy[J]. *Proc Roy Soc*, 1936, A: 151-578.
- [11] 韩奎初. 测量照射量(空气比释动能)的空腔电离室[J]. *核标准计量与质量*, 1995, 1: 33-35.  
HAN Kuichu. Cavity ionization chambers for the exposure measurement[J]. *Nuclear Standard Metrology and Quality*, 1995, 1: 33-35 (in Chinese).
- [12] 李景云, 郭文, 侯金兵, 等.  $^{60}\text{Co}$  和  $^{137}\text{Cs}$   $\gamma$  射线参考辐射场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, 3: 88-97.  
LI Jingyun, GUO Wen, HOU Jinbing, et al.  $^{60}\text{Co}$  and  $^{137}\text{Cs}$  gamma rays reference radiation field and the standard cavity ionization chambers used for air kerma determination[J]. *Radiation Protection*, 1996, 3: 88-97 (in Chinese).
- [13] WYCKOLF M O. Measurement of cobalt-60 and cesium-137 gamma rays with a free-air chamber [J]. *J Res Natl Bur Stand(U. S. )*, 1960, 64c(2): 87.
- [14] 裴鹿成, 张孝泽. 蒙特卡罗方法及其在粒子输运问题中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 16-20.
- [15] KAWRAKOW I, ROGERS D W O. The EGSnrc code system: Monte-Carlo simulation of electron and photon transport[R]. [S. l.]: NRCC, 2003.
- [16] ROGERS D W O, EWART G M, BIELAJEW A F, et al. Calculation of electron contamination in a  $^{60}\text{Co}$  therapy beam[C]// *Proceedings of the IAEA International Symposium on Dosimetry in Radiotherapy*. Vienna: IAEA, 1988: 303-312.
- [17] 李星洪. 辐射防护基础[M]. 北京: 原子能出版社, 1982: 223-227.