



核科学与工程

面向个人剂量计校准的小尺度伽玛参考辐射模拟研究

钱易坤^{1,2}, 冯鹏², 刘易鑫¹, 朱亚地¹, 黄宇晨^{1,2},
张颂^{1,2}, 何鹏², 魏彪², 毛本将¹

(1. 中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川绵阳 621900; 2. 重庆大学光电工程学院, 重庆 400044)

摘要: 针对伽玛射线个人剂量计基于标准伽玛参考辐射进行校准时检定效率低、校准工作复杂和需要远程送检的关键技术问题, 建构了1 Ci ¹³⁷Cs放射源小尺度参考辐射场物理模型, 采用蒙特卡罗方法, 研究了小尺度参考辐射场内的剂量分布、装置结构和待检剂量计变化导致散射射线对剂量场的影响, 获得了待检剂量计形状、数量、类型和装置结构产生的散射伽玛射线对小尺度参考辐射量值定度的影响结果。研究表明, 1 Ci ¹³⁷Cs可以为小尺度参考辐射场检验点提供1.5 mSv/h的伽玛遂行剂量率, 辐照个人剂量计载台直径30 cm束斑上的剂量率相对标准偏差约为0.48%。当载台厚度为20 mm时, 散射射线对小尺度参考辐射检验点处剂量率值的影响率为3.27%, 高于剂量计尺寸(1.62%)和剂量计数量(0.56%)的影响。

关键词: 个人剂量计; 剂量量值定度; 小尺度参考辐射; 蒙特卡罗方法; 遂行校准

中图分类号: TL72

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202133.200280

Personal dosimeter calibration based on minitype reference radiation

Qian Yikun^{1,2}, Feng Peng², Liu Yixin¹, Zhu Yadi¹, Huang Yuchen^{1,2},
Zhang Song^{1,2}, He Peng², Wei Biao², Mao Benjiang¹

(1. China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2. College of Optoelectronics Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Gamma-ray personal dosimeters are important tools for the radiation protection for workers. However, the current calibration method based on standard reference radiation has low verification efficiency, large calibration workload, and requires remote inspection. To solve the above problems, this paper attempts to apply the minitype reference radiation to the calibration of gamma-ray personal dosimeters. The Monte Carlo method is used to simulate the dose distribution in the minitype reference radiation field, the influence of scattering rays which are caused by the device structure and dosimeters in the dose field. The results show that 1 Ci ¹³⁷Cs can provide a dose rate of 1.5 mSv/h for the point of test, and the relative standard deviation of the dose rate at the point of test is about 0.48%. When the thickness of the stage is 20 mm, the influence rate of scattered rays on the dose rate value at the minitype reference radiation inspection point is 3.27%, which is higher than the influence of the size of the dosimeter (1.62%) and the number of dosimeters (0.56%). This paper provides a theoretical basis for in situ calibration to calibrate gamma-ray personal dosimeters.

Key words: personal dosimeter; dose value calibration; minitype reference radiation; Monte Carlo method; in situ calibration

在核辐射工作现场或环境中, 伽玛射线个人剂量计不仅是对工作人员受照辐射剂量进行监测的手段, 也是保障辐射场所工作人员辐射安全常用和必备的辐射防护用品。为了保证伽玛射线个人剂量计测量数据的准确性, ISO-4037^[1-4]系列标准规定需要定期对其进行校准。为了避免散射成分对参考辐射检验点处空气比释动能约定真值(CAK)测定的影响, 实施伽玛射线个人剂量计校准工作的标准参考辐射(SRR)或检定装置空间尺寸较大, 配置屏蔽设施后, 其质量可达数十吨, 难以或无法移动。因此, 现阶段只能将伽玛射线个人剂量计采用远程送检至规定

* 收稿日期: 2020-10-11; 修订日期: 2021-01-19

基金项目: 重庆大学中央高校基本科研业务费资助项目(2018CDGFGD0008); 国家自然科学基金青年基金项目(11805111); 国防科工局研究课题

作者简介: 钱易坤(1992—), 男, 博士研究生, 从事电离辐射计量研究; 626578507@qq.com。

通信作者: 毛本将(1965—), 男, 研究员, 从事电离辐射计量研究; gena@vip.sina.com。

场所对其进行校准,致使检定工作效率低,周期长,影响使用。如若将现有伽玛射线个人剂量计校准的检定装置小型化,移动该类检定装置至伽玛射线个人剂量计使用现场开展检定工作,首要解决的问题便是厘清装置小型化后散射射线的成因和影响程度,准确定度装置检验点处的剂量量值。

近年来,由于生产、生活以及军事方面的需要,国内外逐步开展了辐射防护仪器现场检定技术的研究。国外,Leitner A 等人^[5]总结了美国国家标准技术研究所(NIST)校准 X 射线和伽玛射线监测设备的标准方法。德国技术物理研究院(PTB)、韩国标准和科学研究院(KRIST)、日本国家剂量科学研究所(NMIJ)等标准计量院构建的¹³⁷Cs 伽玛参考辐射实验室先后与国际计量局(BIPM)标准空气比释动能进行了比对^[6-9]。美国 SENTINEL 公司研制了便携式伽玛照射装置,装置的出射口端配置了衰减器,便于提供不同剂量率的参考辐射场。该装置非常轻便小巧,在使用过程中徒手即可送至核设施现场。美国 Hopewell Designs 公司研制了 BX 系列校准装置,可对各种辐射测量仪和个人剂量计进行通用的校准,装置尺寸 180 cm×96 cm×200 cm,质量 3200 kg,能够搭载 10 mCi~1757 mCi ¹³⁷Cs 源。国内,刘易鑫等人^[10-11]基于常用的伽玛射线剂量(率)仪为样本仪器的机器预测方法,构建了边长尺寸分别为 1 m 与 0.5 m 立方体铅屏蔽箱体的小尺度参考辐射(MRR)装置,采用最小二乘支持向量机方法,获得了 MRR 中检验点 CAK 预测模型,成功地对便携式伽玛射线剂量测量仪器实施了校准,测量标准不确定度不超过 4.6%。徐阳等人^[12]采用钢、铅混合材料屏蔽方案,设计完成了边长为 0.6 m 立方体、质量约为 271.9 kg MRR 装置,并对此 MRR 工程设计方案进行了研究。李文杰等人^[13]对 MRR 场内的伽玛散射射线及剂量率分布情况进行了研究,从理论上证明了小尺度参考辐射场空间场内伽玛散射成分的影响在适当的条件下满足 ISO-4037 规定的总影响率小于 5% 的要求。可见, MRR 中的伽玛射线剂量量值可以被准确测定,其能够对伽玛射线剂量测量仪器进行校准。本文在上述 MRR 研究工作的基础上提出了一种面向个人剂量计校准的遂行校准技术,即依托现有的小尺度参考辐射,参照对便携式剂量仪器的校准方法,实施对个人剂量计的校准。即在 MRR 的箱体内部,由¹³⁷Cs 放射源产生的锥形束准直照射到载台搭载的数个待检剂量计上采用“基于样本的机器预测方法”实现对个人剂量计的校准。同面向便携式伽玛剂量(率)仪校准时的 MRR 相比较,此时放置了个人剂量计的 MRR 中的散射射线的成分将更加复杂。如何在复杂的应用场景中准确定度检验点(个人剂量计上的参考点)处的剂量量值是实现将 MRR 应用于个人剂量计校准的关键。本文采用蒙特卡罗方法系统地研究了面向个人剂量计校准的 MRR 场中射线成分、剂量分布、检验点 CAK 的变化规律以及各因素对测量不确定度的影响等问题。

1 技术方法

面向个人剂量计校准的 MRR 与面向便携式伽玛剂量(率)仪校准的 MRR 的物理模型如图 1 所示。两者不同之处在于影响参考辐射场的因素发生了一些变化,即影响辐射场的体积较大的便携式伽玛剂量(率)仪探头换成了数个个人剂量计,以及搭载个人剂量计的圆盘载台。当¹³⁷Cs 放射源产生的伽玛射线辐照个人剂量计时,屏蔽箱体

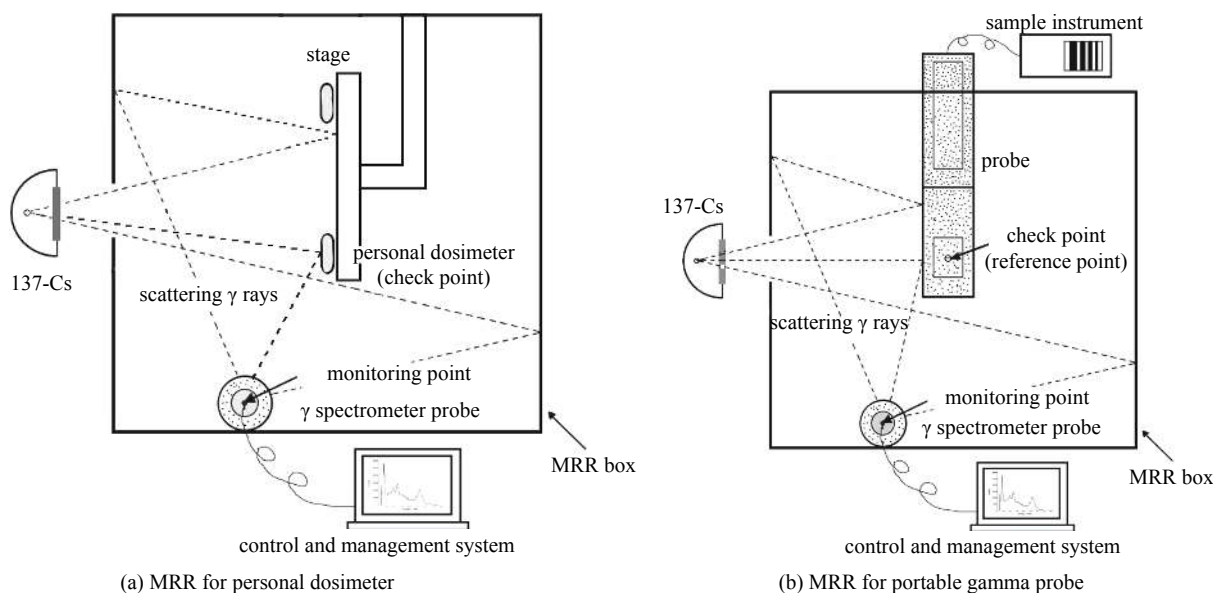


Fig. 1 Physical models of MRR for gamma-ray dose calibration

图 1 伽玛射线剂量校准 MRR 物理模型原理图

内由屏蔽壁、个人剂量计(一般为多个)以及载台必然导致 MRR 中散射伽玛射线成份的增加,也必然会对检验点处的空气比释动能约定真值测量产生不可忽略的干扰;其次,搭载个人剂量计的形状、数量不同,也会导致 MRR 中散射射线成分的变化,影响不可忽略。

为了消除 MRR 中散射射线对个人剂量计参考点处伽玛空气比释动能约定真值测定时的干扰,选用与依托 MRR 校准便携式伽玛剂量(率)仪相同的“基于样本仪器的机器预测方法”,即选用数个常用个人剂量计样本并将其分别放置在 MRR 和 SRR 中,同时监测待检剂量计放置在 MRR 中时 MRR 空间某点的散射伽玛能谱,利用仪器等读数即受照剂量等量值的原理,即可获得待检剂量计在 MRR 中伽玛空气比释动能的约定真值和对应的散射伽玛谱数据集,然后利用机器的学习方法对上述数据集进行回归建模,获得依赖于样本剂量计的在 MRR 载台上某一固定点处的伽玛空气比释动能约定真值机器预测模型。当类似的非样本个人剂量计放置在 MRR 对应点处时,由于机器学习方法的鲁棒性,获得的机器预测模型也能对待检个人剂量计参考点处的伽玛空气比释动能约定真值实施准确预测。

如按照上述物理方案实施校准,由于 MRR 检验点处放置了待检个人剂量计,该位置的伽玛能谱不可能通过直接测量获得。因此,在 MRR 中选择一个不受放射源射线直接照射的位置放置伽玛谱仪探头,用它监测 MRR 中的散射伽玛射线。获得的散射伽玛射线谱同检验点处,也就是放置在载台上待检个人剂量计的参考点处的伽玛射线的成份存在物理上的关联,这样就能通过获得的散射伽玛射线谱表征入射射线、剂量计的几何特征以及外壳材料类型特征,因为他们是 MRR 中产生散射伽玛射线的致因。为表达方便,将 MRR 中将放置伽玛谱仪探头的点(探头上的参考点)命名为散射监测点。

对于伽玛射线个人剂量计的校准,最终目的是获得待检仪器的校准因子 N 。对于个人,剂量计的校准因子

$$N = H_p(d)/M \quad (1)$$

式中: $H_p(d)$ 为人体规定点以下一定深度 d 处软组织的剂量当量,对于弱贯穿辐射,皮肤剂量当量采用深度 0.07 mm,这个深度的个人剂量当量表示为 $H_p(0.07)$;对于强贯穿辐射,通常采用 10 mm 的剂量当量并用类似的方法表示,即 $H_p(10)$; M 为剂量仪的指示值。将空气比释动能到剂量当量的转换系数 h_K 代入到式(1),得到 N 与检验点处空气比释动能约定真值 K_{air} 的关系为

$$N = h_K K_{\text{air}}/M \quad (2)$$

在此项技术中,文献 [11] 中构建的预测模型对 K_{air} 值的获取进行了系统的阐述,即

$$K_{\text{air}} = f(K, S) \quad (3)$$

式中: K 是检验点处空气比释动能的实验值, S 是监测点处散射伽玛射线的能谱。面向个人剂量计校准的 MRR 应用场景中,影响同面向便携式伽玛剂量(率)仪校准的 MRR 相比较变得更为复杂。若将此预测模型应用于面向个人剂量计校准的 MRR,首先要研究场景中影响检验点处的各个因素(剂量计载台,屏蔽箱体,剂量计种类,剂量计数量,剂量计尺寸等)变化与检验点空气比释动能约定真值 K_{air} 以及监测点处散射能谱 S 的关系。

2 MRR 剂量场特征模拟研究

在 MRR 遂行校准技术中,实现待检剂量计测量值准确定度是核心问题,因此,对检验点处的散射射线的了解就显得非常重要。特别是,由于伽马射线个人剂量计基于的探测原理各不相同,因而,剂量计形状、尺寸、灵敏体积和能量响应也是不相同的。本节在确保准确反映各个散射致因的影响规律的前提下,将 MRR 模型简化,开展对检验点处的射线成份和能量的研究。

本文通过 MCNP5 构建面向伽玛射线个人剂量计校准的 MRR 场景, ^{137}Cs 放射源的强度设置为 1 Ci 点源,辐射范围为锥形束。待检个人剂量计的几何中心设置距离载台圆心 10 cm 处,每隔 45° 摆放一个剂量计,定义剂量计的几何中心为 MRR 的检验点,同时该点也是校准时放置待检个人剂量计位置的参考点。研究中,除特别说明外,典型的实验条件为:检验点所处截面的伽玛射线束直径为 30 cm;屏蔽箱尺寸为 60 cm×60 cm×60 cm;放射源距 MRR 几何中心距离为 55 cm;载台半径为 15 cm,厚度为 2 cm,材料为有机玻璃(PMMA);剂量计尺寸为 5 cm×2 cm×5 cm,剂量计外壳材料为塑料。

2.1 MRR 辐射场均匀性研究

当 MRR 校准不同型号和数量的个人剂量计时,检验点处的均匀性必然会随之变化,即, MRR 中照射到待检剂

量计上的射线成分是变化的。为此,首先计算未加载剂量计情况下,沿射线束照射方向上的剂量率分布情况,如图2所示。

在MRR辐射场中,产生的伽玛射线与物质相互作用时,受到各种不同类型相互作用条件的限制,结合MRR辐射场的实际情况,散射射线主要源自康普顿效应与光电效应。根据动量守恒和能量守恒定律,可以推导出入射光子能量,发生康普顿散射的散射光子能量以及散射角度三个变量之间的关系有如下公式

$$hv' = \frac{hv}{1 + (hv/m_0c^2) \times (1 - \cos\varphi)} \quad (4)$$

可见,当入射光子的能量为662 keV时,由于康普顿散射生成的散射光子的能量最小为180 keV。对应的散射角度为180°。由此可以知道在上述的计算结果获得的伽玛能谱中,

位于能量200 keV附近的特征峰的形成是由180°背向康普顿散射所形成。由此推论:计算结果获得的伽玛能谱中能量位于100 keV及更低能量段附近的特征峰的形成是由于伽玛射线与MRR中的散射致因和待检个人剂量计的外壁表面的物质作用以后,产生的次级粒子发生了光电效应后形成。

由图2可见,由于SRR场中并没有MRR箱体、载台等致散射因素,因此,代表SRR场中的剂量率分布曲线严格遵循射线自然衰减的平方反比规律。与之相比,MRR辐射场的尺寸大幅度的缩小,受MRR箱体散射的影响,场中剂量率值的分布曲线整体抬高,因此,在相同距离处MRR场中的剂量率高于SRR。当MRR中射线照射载台后,产生了低能的康普顿散射抬升了载台前表面的剂量率值,因此在56 cm附近的剂量率明显偏离平方反比规律,达到极值;而后,MRR主射线束穿过载台时被部分吸收衰减,其衰减程度远大于MRR箱体导致的散射程度,因此,通过载台后的剂量率大幅下降,使得载台后MRR场中的剂量率低于SRR。实际应用中,通过调整辐射器的射线衰减程度改变检验点的CAK来校准待检剂量计的不同量程。辐射器的衰减倍数覆盖范围为1~1000倍,1 Ci放射源在距离放射源55 cm处射线束中心的剂量率值最大可达1.5 mSv/h,可以满足辐射防护剂量仪器的量值校准需求。

2.2 载台变化对检验点处伽玛射线成分的影响

通常,剂量计的校准应在体模上进行,体模的尺寸和材料应能使剂量计中探测器的测量灵敏区域满足电子平衡的条件^[9]。然而,剂量计的常规校准并不总是在体模上进行,有时可以使用简化方法,并预先证明其有效性,即简化方法给出的结果与标准程序得到的结果相同,或者差异可以可靠的修正。在MRR中,由于其空间尺寸的限制,显然无法使用ISO体模。为此,将体模简化为PMMA板构成的载台,剂量计放置在载台上实施校准。为了确定载台的尺寸,研究计算了不同厚度的载台对检验点处伽玛射线成分和能量沉积的影响情况,如图3所示。

图4、5分别为剂量计尺寸和数量变化对检验点处散射射线能量的影响,为了便于观察低能量波段的散射射线,纵坐标的计数率取以常数e为底数的对数表示。由图3低能段处的波形可见,置入不同厚度的载台,检验点处的伽玛能谱在能量为75 keV、87 keV、200 keV和250 keV附近产生4个散射特征峰。随着载台厚度增加,4个散射特征峰峰值逐渐增高,证明由载台引起的散射对检验点处的剂量率值的影响程度逐渐增大,散射射线占入射射线总能量沉积的比例亦逐渐升高。载台厚度对检验点剂量率值影响情况,如表1所示。可以看出,载台厚度带来的影响不可忽略,随着载台厚度增加,检验点处的剂量率值逐渐增加,剂量率值的增加幅度逐渐减小。当载台厚度为15 mm时,剂量率升高2.70%;当载台厚度为20 mm时,检验点的剂量率升高3.27%。当载台厚度不小于20 mm时,剂量率的增幅减小到0.50%以下,

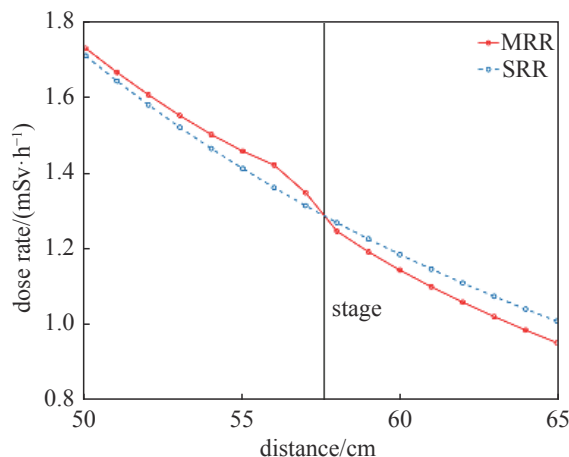


Fig. 2 Distribution of dose rate along the irradiation direction

图2 沿射线束照射方向检验点剂量率分布情况

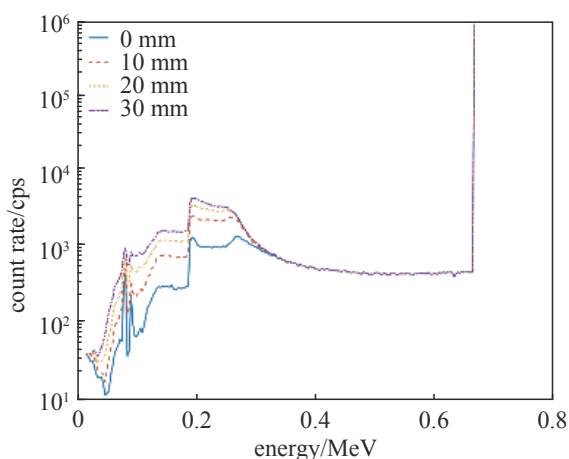


Fig. 3 Gamma energy spectrum with different thickness of stage at the point of test

图3 载台厚度变化对检验点处散射射线能量的影响

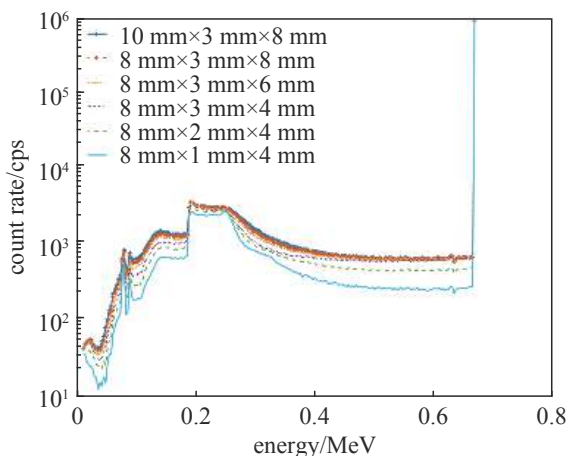


Fig. 4 Gamma spectra at the point of test with the size change of dosimeters

图4 剂量计尺寸变化对检验点处散射射线能量的影响

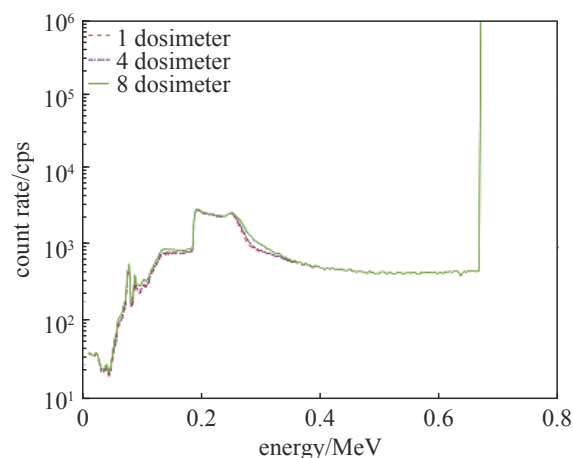


Fig. 5 Gamma spectra at the point of test with the number change of dosimeters

图5 剂量计数量变化对检验点处散射射线能量的影响

表1 载台厚度对检验点剂量率值影响一览表

Table 1 Impact rate of the stage thickness on the dose rate of the point of test

thickness of stage/mm	dose rate at the point of test/(mSv/h)	impact rate/%	error/%
5	1.383	1.14	0.11
10	1.395	2.00	0.11
15	1.404	2.70	0.11
20	1.412	3.27	0.11
25	1.419	3.78	0.11
30	1.424	4.20	0.11
35	1.430	4.57	0.09
40	1.434	4.90	0.09

且逐渐趋于平稳。考虑到装置的整体结构,载台的尺寸应该尽可能减小,载台厚度选为20 mm。

2.3 剂量计尺寸变化对检验点处伽玛射线成分的影响

依据 IEC 61526-2010^[4] 规定,个人剂量计的最大尺寸 15 cm×3 cm×8 cm。由于个人剂量计的外形各异,为提高建模效率,选取不同尺度的长方体简化代替个人剂量计。研究通过改变长度、厚度、宽度三个参数,了解剂量计尺寸变化对检验点处伽玛射线成份的影响情况,如图4所示。可见,随着剂量计体积的增加,检验点处直射谱散射射线逐渐增强。总体上,剂量计尺寸变化对检验点处伽玛能谱的影响主要集中在 300 keV 能量段以下,在能量为 75 keV、87 keV 和 200 keV 附近分别产生散射特征峰。引入不同尺寸剂量计时,检验点处散射射线占入射射线总能量沉积占比与剂量计的体积成正相关。剂量计尺寸对检验点剂量率值影响情况,如表2所示。

表2 剂量计尺寸对检验点剂量率值影响一览表

Table 2 Impact rate of the dosimeter size on the dose rate of the point of test

size of dosimeter/(mm×mm×mm)	dose rate at the point of test/(mSv/h)	impact rate/%	error/%
10×3×8	1.427	1.62	0.03
8×3×8	1.419	1.08	0.04
8×3×6	1.411	0.46	0.04
8×3×4	1.397	-0.47	0.05
8×2×4	1.414	0.70	0.05
8×1×4	1.420	1.11	0.05

值得注意的是,随着剂量计厚度的增加,检验点处的剂量率值逐渐下降,这是由于剂量计厚度的增加对射线有一定的遮挡作用;随着剂量计截面面积的增加,检验点处的剂量率逐渐增加,是由于剂量计之间间隔变小,彼此更容易受到相互散射的影响。

2.4 剂量计数量变化对检验点处伽玛射线成分的影响

为了探究 MRR 单次最大校准数量以及是否满载剂量计对检验点的影响,需要探究剂量计数量变化对检验点处的散射伽玛能谱影响。选择搭载 0、1、2、4、8 个剂量计进行研究,如图 5 所示。

特征峰的位置也主要出现在能量为 75 keV、200 keV、250 keV 附近。当加载剂量计的个数增加时,散射射线的变化并不明显。这说明剂量计数量的增加引起的散射射线对检验点处的剂量率值的影响较小,仅为 0.6%。检验点处散射射线占入射射线总能量沉积占比随加载剂量计数量的增加而升高。剂量计数量对检验点剂量率值影响情况,如表 3 所示。由表 3 可见,增加剂量计个数,检验点处的剂量率的增幅并不明显,当载台搭载最多至 8 个人剂量计时,检验点处剂量率的受到剂量计散射的影响达到 0.56%。这也印证了图 5 得到的结论。

表 3 剂量计数量对检验点剂量率值影响情况一览表

Table 3 Impact rate of the dosimeter number on the dose rate of the point of test

number of dosimeter/mm	dose rate at the point of test/(mSv/h)	impact rate/%	error/%
1	1.400	0.10	0.10
2	1.401	0.15	0.09
4	1.402	0.24	0.10
8	1.407	0.56	0.11

2.5 散射监测点特性

MRR 中伽玛谱仪测得的监测谱,包括源自载台、屏蔽箱内壁、数个剂量计及屏蔽箱中装置结构产生的散射伽玛射线成分,此是 MRR 中产生散射射线的主要因素。因此,监测点处散射伽玛能谱信息可以有效表征 MRR 中引起散射射线的环境因素,进而利用这些信息消除 MRR 中散射射线对检验点处剂量率的影响。

当监测点处的能谱对这些射线进行表征时,代表不同来源的射线在监测谱不同能量段产生特征峰。因此,研究监测点处的散射射线的特征,首先要研究几个特征峰的来源。计算的过程中,分别单独考虑只有某一特定影响因素的情况,如图 6 所示。可见,监测谱主要存在 3 个特征峰:75 keV(特征峰 1)、200 keV(特征峰 2)、240 keV(特征峰 3)。载台、屏蔽箱、剂量计三个致散射因素在 3 个特征峰处有明显的响应。特征峰 1:图中反映该特征峰主要与屏蔽箱体有关。由于能量强度小于 0.1 MeV,因此该峰是由伽玛射线与屏蔽箱体的铅材料作用以后产生的铅的光电效应峰。特征峰 2:图 6 中反映该特征峰主要与屏蔽箱体有关。箱体的后表面到监测点的散射角约为 140°。通过计算得到相应的散射射线的能量为 201.3 keV,与模拟的特征峰位置接近。因此,认为该峰是伽玛射线照射屏蔽箱后表面内壁散射至监测点产生的。特征峰 3:伽玛射线照射载台、个人剂量计,与之发生康普顿散射,散射角约为 110°,计算可得散射伽玛光子能量为 241.7 keV,与峰值能量相近。因此该峰是伽玛射线束与载台、待检个人剂量计表面发生康普顿散射至监测点产生的。

载台、个人剂量计尺寸、个人剂量计数量对监测点的伽玛能谱的影响情况,如图 7 所示。由图 7 可见,载台厚度的变化对监测点的影响最大,而且随着载台厚度的增加,散射成分带来的影响整体上升。实际应用时,MRR 对个人剂量计进行检定过程,载台厚度是确定不变的。但是,在装置的设计过程中,有必要探究载台厚度变化对监测点散射能谱的影响,确保载台的设计科学合理。个人剂量计带来的影响相较于载台散射带来的影响整体偏小,且剂量计尺寸、数量的增加对监测点的影响也逐渐增加,具体表现在特征峰 1、特征峰 2 以及特征峰 3 的峰值随着剂量计尺寸数量的增加而增加,且峰计数率呈显著的似线性关系。在这也说明通过监测点的散射能谱来表征剂量计的尺寸、数量时是准确可行的。

此外,从所得监测点的散射谱情况可见,其得出的结论与计算检验点剂量率值时获得的结论一致。随着这三个影响因素各自情况的变化,对 MRR 的影响也呈现出规律地递增或递减。尤其是,影响 MRR 伽玛射线成分的这

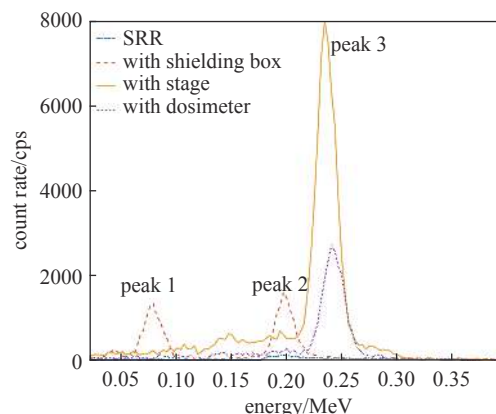


Fig. 6 Spectrum at scattering monitoring point

图 6 不同情况下散射监测点处的散射能谱

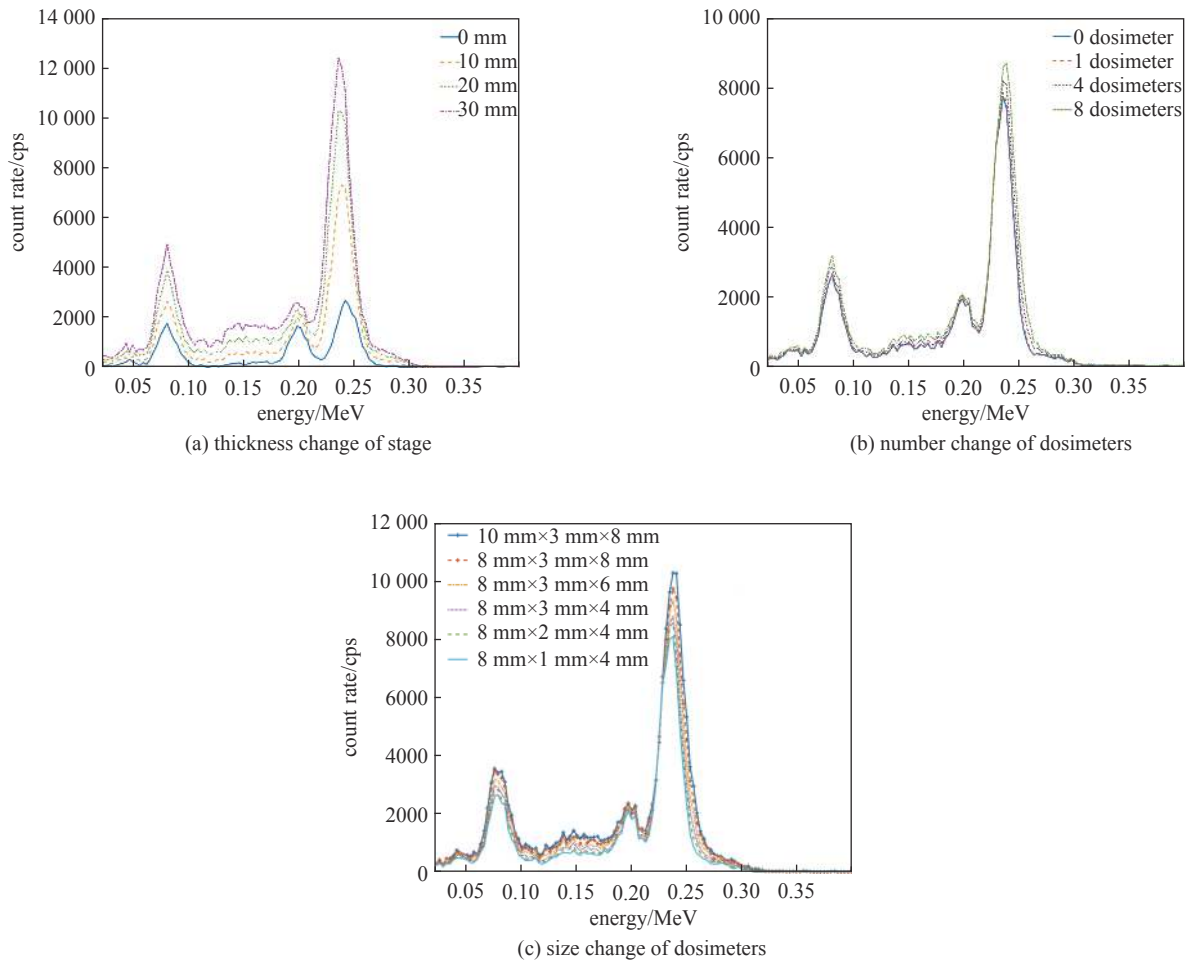


Fig. 7 Scattering spectrum at scattering monitoring point under different conditions

图 7 不同因素变化对监测点的伽玛能谱的影响情况

些因素均在监测点处的伽玛能谱特征峰上有所响应, 这为利用监测点处的伽玛能谱表征影响 MRR 的影响因子提供了物理基础。

2.6 MRR 引起的测量不确定度分析

由上述研究可知, MRR 检验点处的干扰因素主要为 MRR 箱体、载台和待检剂量计引起的散射射线, 同时也是测量 MRR 检验点处空气比释动能的不确定度的主要来源之一。根据得出的研究结果, 选用 MRR 箱体尺寸为 $60\text{ cm} \times 60\text{ cm} \times 60\text{ cm}$, 载台厚度为 20 mm 的典型条件, 对满载最大尺寸剂量计的情况进行不确定度分析。评定时, 将所有不确定度分量都按照平均分布考虑, 统一取包含因子 $\sqrt{3}$, 假设四个分量相互独立。最终得出各个因素引起的不确定度以及合成不确定度数据列于表 4。由表 4 可见, 通过对面向个人剂量计校准的 MRR 典型条件下的不确定度评估, 最终得到检验点处伽玛空气比释动能测定的合成标准不确定度为 3.20% , 优于面向便携式伽玛剂量(率)仪校准的 MRR 的合成标准不确定度 4.60% ^[13], 且可以控制在 ISO 4037-1^[1] 规定的不超过 5% 。虽然, 在实际应用中所面临的情况相对于模拟情况更为复杂, 但这展示了一种可行性, 也就是采用 MRR 的技术路线开展对个人剂量计实施遂行校准, 其测量误差具备满足 IEC61526-2010^[14] 规定的 $-17\% \sim +25\%$ 的相对固有误差等技术指标的可行性。

表 4 不确定度因素分析

Table 4 Analysis of uncertainty factors

uncertainty factor	reference condition	error value/%	uncertainty component/%
MRR box	$60\text{ cm} \times 60\text{ cm} \times 60\text{ cm}$	0.08	0.05
thickness change of stage	20 mm	3.27	1.89
size change of dosimeters	$10\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 8\text{ mm}$	1.62	0.94
number change of dosimeters	8	0.56	0.32
combined standard uncertainty	—	—	3.20

3 结 论

依据建构于 $1\text{ Ci}^{137}\text{Cs}$ 放射源构成的面向个人剂量计校准的 MRR 物理模型, 本文利用蒙特卡罗方法研究了 MRR 辐射场特性, 获得了待检剂量计形状、数量、类型和装置结构产生的散射伽玛射线对 MRR 量值定度的影响结果。研究表明, $1\text{ Ci}^{137}\text{Cs}$ 放射源可以为 MRR 辐射场检验点提供 1.5 mSv/h 的伽玛遂行剂量率, 辐照个人剂量计载台直径 30 cm 束斑上的剂量率相对标准偏差约为 0.48% 。当载台厚度为 20 mm 时, 散射射线对 MRR 检验点处剂量率值的影响率为 3.27% , 高于剂量计尺寸 (1.62%) 和剂量计数量 (0.56%) 的影响。通过分析 MRR 引起的测量不确定度, 最终得出各散射致因的合成标准不确定度为 3.20% 。提取了设置散射监测点对 MRR 辐射场内的特征伽玛能谱, 结果显示: 随着各个因素自身情况的变化, 其对 MRR 的影响也呈现出规律性递增或递减。尤其是, 影响 MRR 伽玛射线成分的载台厚度、剂量计型号以及屏蔽箱体存在, 均在监测点处的伽玛能谱特征峰上有所响应, 这既可为利用监测点处的伽玛能谱借以表征影响 MRR 的因子提供了理论基础, 还可为基于小尺度参考辐射 (MRR) 设计伽玛射线剂量量值可以被准确定度的遂行校准技术提供了一种新的方法技术或途径。

参考文献:

- [1] ISO 4037-1: 1996, 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].
- [2] ISO 4037-2: 1997, X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy—Part 2: Dosimetry for radiation protection over the energy ranges 8 keV to 1.3 MeV and 4 MeV to 9 MeV [S].
- [3] ISO 4037-3: 1999, X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy—Part 3: Calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence[S].
- [4] ISO 4037-4: 2004, X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy—Part 4: Calibration of area and personal dosimeters in low energy X reference radiation fields[S].
- [5] Leitner A, Witzani J, Boutillon M, et al. International comparisons of air kerma standards in ^{137}Cs gamma radiation[J]. *Metrologia*, 1997, 34(2): 169.
- [6] Allisy-Roberts P J, Burns D T, Takata N, et al. Comparison of the standards for air kerma of the NMIJ and the BIPM for ^{137}Cs γ rays[R]. Rapport International Bureau of Weights and Measures, 2004, 12: 1-8.
- [7] Allisy-Roberts P J, Kessler C, Burns D T, et al. Comparison of the standards for air kerma of the LNE-LNHB and the BIPM for ^{137}Cs gamma radiation[J]. *Metrologia*, 2009, 46(1A): P06011.
- [8] Kessler C, Roger P, Allisy-Roberts P J, et al. Comparison of standards for air kerma of the KRISS and the BIPM for ^{137}Cs gamma radiation[J]. *Metrologia*, 2010, 47(1A): P06022.
- [9] Kessler C, Allisy-Roberts P J, Burns D T, et al. Comparison of the standards for air kerma of the ITN (Portugal) and the BIPM for ^{137}Cs γ -rays[J]. *Metrologia*, 2009, 47(1A): P06007.
- [10] Liu Yixin, Wei Biao, Zhuo Renhong, et al. Determination of the conventional true value of gamma-ray air kerma in a minitype reference radiation[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2016, 118: 238-245.
- [11] Liu Yixin, Wei Biao, Xu Yang, et al. Feasibility study on determining the conventional true value of gamma-ray air kerma in a minitype reference radiation[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2017, 28(6): 3-7.
- [12] 徐阳, 魏彪, 毛本将, 等. 基于蒙特卡罗的小尺度参考辐射装置屏蔽研究[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 096004. (Xu Yang, Wei Biao, Mao Benjiang, et al. Shielding research of minitype reference radiation device based on Monte Carlo simulation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 096004)
- [13] Li Wenjie, Liu Yixin, Wei Biao, et al. Monte Carlo simulation investigation on the minitype reference radiation employed for the calibration of gamma ray dose or dose rate meters[J]. *Journal of Radiological Protection*, 2018, 38(1): 407-421.
- [14] IEC 61526: 2010, Radiation protection instrumentation—Measurement of personal dose equivalents $\text{Hp}(10)$ and $\text{Hp}(0.07)$ for X, gamma, neutron and beta radiations—Direct reading personal dose equivalent meters[S].