

高能光子水吸收剂量辐射质转换因子的实验测量

裴雪,王坤,张健,金孙均,王志鹏
中国计量科学研究院,北京 100027

【摘要】目的: 简要介绍中国计量科学院(NIM)水吸收剂量国际比对结果,基于此实验给出9种常见指形电离室的辐射质转换因子。**方法:** 在NIM ^{60}Co γ 基准实验室测量9种型号指形电离室的基于 ^{60}Co γ 辐射场的校准因子,在NIM的高能光子水吸收剂量基准实验室测量这9种型号指形电离室的基于6、10 MV 高能光子辐射场的校准因子,依据这两种校准因子,计算得到这9种指形电离室的辐射质转换因子。并与IAEA TRS 398报告中提供的数据相比较。**结果:** NIM水吸收剂量国家基准实验室已经具备水吸收剂量的量传和溯源能力,在此基础上,所测指形电离室的辐射质转换因子均与398报告符合较好,但普遍偏小,相对偏差不超过0.9%。这是由于NIM ^{60}Co γ 基准实验室给出的校准因子比国际原子能机构给出的值偏大,而高能光子水吸收剂量基准实验室给出的校准因子比国际计量局给出的值偏小所致。**结论:** NIM的水吸收剂量国家基准实验室可以精确给出用户指形电离室的辐射质转换因子。

【关键词】 高能光子;水吸收剂量;国际比对;辐射质转换因子

【中图分类号】 R312

【文献标志码】 A

【文章编号】 1005-202X(2017)12-1196-04

Measurement of beam quality correction factor based on absorbed dose to water in high-energy photon beams

CHANG Xue, WANG Kun, ZHANG Jian, JIN Sunjun, WANG Zhipeng
National Institute of Metrology, Beijing 100027, China

Abstract: Objective To briefly introduce the results of the international comparison of absorbed dose to water at National Institute of Metrology (NIM), and based on the results, to provide the beam quality correction factors for 9 common types of cylindrical ionization chambers. **Methods** In the ^{60}Co γ primary standard dosimetry laboratory at NIM, the calibration factors of 9 types of cylindrical ionization chambers at the reference quality ^{60}Co γ were measured. In the high-energy photon beams primary standard dosimetry laboratory at NIM, the calibration factors of the corresponding cylindrical ionization chambers at the reference quality 6, 10 MV photon were also measured. Based on the obtained calibration factors, we calculated the beam quality correction factors of cylindrical ionization chambers which were then compared with the data given in IAEA TRS-398 protocol. **Results** The primary standard dosimetry laboratory of absorbed dose to water at NIM had the ability for the transmission and traceability of absorbed dose to water. Based on this result, the experiment values of the beam quality correction factors for tested cylindrical ionization chambers had a good agreement with the values given in IAEA TRS-398 protocol, with a relative deviation less than 0.9%. Generally, the measured beam quality correction factors were slightly smaller than the values in IAEA TRS-398 protocol, because the calibration factors in ^{60}Co γ primary standard dosimetry laboratory at NIM are larger than the values given by International Atomic Energy Agency (IAEA) and the calibration factors in high-energy photon beams primary standard dosimetry laboratory at NIM are smaller than the values given by the International Bureau of Weights and Measures. **Conclusion** The primary standard dosimetry laboratory of absorbed dose to water at NIM could accurately measure the beam quality correction factors of users' cylindrical ionization chambers.

Keywords: high-energy photon beam; absorbed dose to water; international comparison; beam quality correction factor

前言

【收稿日期】 2017-09-22

【基金项目】 国家重点研发计划(2016YFF0200804);医用加速器光子吸收剂量溯源技术与标准装置研究项目(201510001)

【作者简介】 裴雪,副研究员, E-mail: changxue@nim.ac.cn

20世纪60年代至今,医用电子直线加速器逐渐得到广泛运用。目前而言,加速器高能光子放射治疗剂量量值仍然溯源到 ^{60}Co γ 辐射场: ^{60}Co γ 的照射量、空气比释动能和水吸收剂量。长久以来,我国一直使用国际原子能机构(the International Atomic Energy Agency, IAEA)于1987年发布的IAEA TRS

277报告中的水吸收剂量计算方法^[1],通过⁶⁰Co γ 空气比释动能(照射量)转换到水吸收剂量,期间引入的各项修正因子会导致不确定度变大。1999年美国医学物理学家学会(the American Association of Physicists in Medicine, AAPM)发布的AAPM TG-51^[2]和2000年IAEA发布的IAEA TRS 398报告^[3],都建立了直接的水吸收剂量量传方法。我国也需要从现行的基于⁶⁰Co γ 辐射场空气比释动能的量值传递,过渡到基于⁶⁰Co γ 辐射场水吸收剂量以及高能光子水吸收剂量的量传体系。

中国计量科学研究院(National Institute of Metrology, NIM)于2010年参加了亚太计量合作组织(The Asia Pacific Metrology Programme, APMP)的⁶⁰Co γ 水吸收剂量的比对^[4](APMP. RI(I)-K4,简称APMP-K4比对),并取得国际等效,实现了⁶⁰Co γ 水吸收剂量的量传能力。并于2015年完成与IAEA的⁶⁰Co γ 水吸收剂量的双边比对,比对结果达到了比对误差的要求^[5]。此外,NIM于2016年参加了国际计量局(the Bureau International des Poids et Mesures, BIPM)的高能光子水吸收剂量比对(BIPM. RI(I)-K6,简称BIPM-K6)^[6-7],在取得正式等效后将具备高能光子水吸收剂量量值复现和传递能力。为我国放射治疗体系从基于空气比释动能(照射量)的量值传递过渡到基于水吸收剂量的量值传递做好了准备工作。

在基于水吸收剂量的量值传递中,电离室的辐射质转换因子 k_{Q_0,Q_0} ,是非常关键的量值^[8-10], k_{Q_0,Q_0} 的不确定度是电离法测量水吸收剂量最大的不确定度来源。 k_{Q_0,Q_0} 和用以标定电离室的辐射质 Q_0 、电离室实际测量的辐射质 Q 以及电离室的类型有关。本文首先简单回顾NIM和IAEA的⁶⁰Co γ 水吸收剂量的双边比对结果,以及NIM和BIPM的高能光子水吸收剂量K6比对结果。而后给出9种型号指形电离室,基于⁶⁰Co γ 辐射场水吸收剂量的校准因子和6、10 MV高能光子场水吸收剂量校准因子的辐射质转换因子 $k_{6\text{ MV},^{60}\text{Co}}$, $k_{10\text{ MV},^{60}\text{Co}}$ 。

1 NIM水吸收剂量国际比对

1.1 NIM-IAEA ⁶⁰Co γ 水吸收剂量双边比对

IAEA是重要的次级标准实验室,其标准量可溯源到BIPM。2015年NIM与IAEA的⁶⁰Co γ 水吸收剂量双边比对在NIM的⁶⁰Co γ 基准实验室展开。采用间接比对方法,即用NIM的TW30013-2369传递标准电离室,测量⁶⁰Co γ 辐射场中基准复现位置的水吸收剂量 $D_{\text{w},^{60}\text{Co}}$ 。再将该值传递到IAEA邮寄过来的比对电离室

FC65-G-2869上,得到该电离室的校准因子:

$$N_{\text{D,w},^{60}\text{Co}} = \frac{D_{\text{w},^{60}\text{Co}}}{M_{^{60}\text{Co}} k_{\text{TP}} k_{\text{pol}} k_{\text{s}}} \quad (1)$$

其中, $M_{^{60}\text{Co}}$ 为静电计读数, k_{TP} 是空气密度修正因子, k_{pol} 是极化效应修正因子, k_{s} 是离子符合修正因子。这些修正因子可以根据IAEA TRS 398报告进行计算。

NIM-IAEA ⁶⁰Co γ 水吸收剂量双边比对数据的相对不确定度扩展因子取 $k=2$ 。实验结果的不确定度分析,考虑到水吸收剂量基准值、传递电离室的长期稳定性、电离电荷收集、空气密度效应等因素。对于同一个电离室FC65-G-2869,NIM给出的⁶⁰Co γ 水吸收剂量的校准因子 $N_{\text{D,w},^{60}\text{Co}} = 48.27 \pm 0.52$,IAEA给出的溯源到BIPM的对应值为 $N_{\text{D,w},^{60}\text{Co}} = 48.20 \pm 0.48$,两者有0.1%的偏差。这个结果在IAEA建议的合理比对误差范围($\pm 1.5\%$)内^[11]。

1.2 NIM-BIPM 高能光子水吸收剂量双边比对

2016年NIM-BIPM高能光子水吸收剂量双边比对采用直接比对。BIPM携带石墨量热计及所有参与量值复现的仪器设备,到NIM高能光子水吸收剂量基准实验室,现场复现6、10 MV高能光子水吸收剂量,并与NIM的电离室测量结果相比对。

BIPM用石墨量热计在参考辐射质中通过测量温升,测量到石墨吸收剂量。再用BIPM自己的石墨平板电离室将石墨吸收剂量转换成水吸收剂量:

$$D_{\text{w}} = D_{\text{c}} \frac{Q_{\text{w}}}{Q_{\text{c}}} C_{\text{w,c}} k_{\text{m}} \quad (2)$$

其中, D_{c} 是量热芯的石墨吸收剂量, Q_{c} 是石墨平板电离室替代量热芯置于石墨包壳中测得的电离电荷, Q_{w} 是电离室置于水中同一测点测得的电离电荷, $C_{\text{w,c}}$ 是剂量转换因子,该因子通过蒙特卡洛模拟计算得到, k_{m} 是测量得到的水模中辐射质不均匀性。

NIM将自己的传递电离室置于BIPM同一测点,根据 $D_{\text{w}} = N_{\text{D,w}} Q_{\text{w}}$,分别得到6、10 MV高能光子场中的两个校准因子 $N_{\text{D,w},6\text{ MV}}$ 、 $N_{\text{D,w},10\text{ MV}}$ 。再将这两个校准因子,和通过NIM自己研制的水量热计测量并传递到同一电离室上的校准因子相比较。

比对完成后,由BIPM完成比对报告A稿,双方修改完成后形成比对报告B稿,然后报送CCRI(Consultative Committee for Ionizing Radiation)进行审议。目前B稿正在CCRI审阅中。在取得正式等效后,NIM将具备高能光子水吸收剂量量值复现和传递能力。

2 高能光子水吸收剂量辐射质转换因子的实验

研究

目前各国计量院普遍提供基于 ^{60}Co γ 水吸收剂量的校准服务。在我国用户在 NIM ^{60}Co γ 水吸收剂量基准实验室取得用户电离室的校准因子,之后在 IAEA TRS 398 报告中查表插值得到用户辐射质的辐射质校准因子。NIM 即将具备 6、10 MV 高能光子水吸收剂量的量传能力,继而能够通过实验为用户测量用户电离室的辐射质校准因子。目前我们已经测量了 9 种指形电离室的辐射质转换因子。

2.1 材料与方法

在 NIM ^{60}Co γ 水吸收剂量基准实验室,通过自己研制的石墨空腔电离室复现参考点的 ^{60}Co γ 水吸收剂量,利用传递标准电离室对待测电离室进行校准,得到 ^{60}Co γ 辐射质的校准因子 $N_{D,W,^{60}\text{Co}}$ 。在 NIM 高能光子水吸收剂量基准实验室,通过自己研制的水量热计复现参考点的 6、10 MV 高能光子水吸收剂量,利用传递标准电离室对待测电离室进行校准,得到 6、10 MV 高能光子辐射质的校准因子 $N_{D,W,6\text{MV}}$ 、 $N_{D,W,10\text{MV}}$ 。

根据 IAEA TRS 398 报告中辐射质转换因子的定

义,得到:

$$k_{6\text{MV},^{60}\text{Co}} = \frac{N_{D,W,6\text{MV}}}{N_{D,W,^{60}\text{Co}}}, k_{10\text{MV},^{60}\text{Co}} = \frac{N_{D,W,10\text{MV}}}{N_{D,W,^{60}\text{Co}}} \quad (3)$$

标称 6、10 MV 的两种高能光子的组织体模比 TPR_{10}^{20} 分别为 0.687 0 和 0.740 1。

被测量的电离室为常见的 8 种指形电离室: PTW-30013、PTW-30012、PTW-30011、PTW-30010、PTW-31015、PTW-31016、Scdx-Wellhöfer FC65-G、NE2571,以及一种自主研发的指形电离室 ICO-6A-2019。需要说明的是,同种型号不同出厂编号的电离室,在同样的 TPR_{10}^{20} 下,辐射质转换因子略有不同,所以实验实际上测量并给出了上述 9 种型号,不同出厂编号的 15 个指形电离室的辐射质转换因子。

2.2 结果与讨论

表 1 所示为实验测量结果。把电离室 Scdx-Wellhöfer FC65-G 简写成 FC65-G。表中所示 IAEA TRS 398 报告的值,是根据 NIM 辐射质组织体模比插值得到的。

可以看出,同一型号不同出厂编号的电离室的辐射质修正因子会有千分之几的差别,而在 398 报告中,同一型号电离室相同 TPR_{10}^{20} 时的辐射质修正因子是相同的。此外 NIM 所测所有指形电离室的辐射质

表 1 NIM 6、10 MV 高能光子辐射质中不同指形电离室辐射质转换因子的测量值

Tab.1 Measured beam quality correction factor in 6, 10 MV photon beams at NIM and values given in IAEA TRS-398 protocol for various cylindrical ionization chambers

| Ionization chamber type | $k_{6\text{MV},^{60}\text{Co}}$ (NIM) | $k_{6\text{MV},^{60}\text{Co}}$ (398) | Relative difference ^{6MV} /% | $k_{10\text{MV},^{60}\text{Co}}$ (NIM) | $k_{10\text{MV},^{60}\text{Co}}$ (398) | Relative difference ^{10MV} /% |
|-------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|--|--|
| PTW-30010-2369 | 0.984 4 | 0.989 3 | 0.499 | 0.973 6 | 0.981 0 | 0.785 |
| PTW-30010-2588 | 0.985 0 | 0.989 3 | 0.432 | 0.974 4 | 0.981 0 | 0.669 |
| PTW-30011-0010 | 0.989 1 | 0.991 3 | 0.218 | 0.978 1 | 0.984 0 | 0.603 |
| PTW-30012-0163 | 0.987 7 | 0.993 3 | 0.567 | 0.978 3 | 0.986 0 | 0.779 |
| PTW-30012-0298 | 0.986 2 | 0.993 3 | 0.716 | 0.977 0 | 0.986 0 | 0.909 |
| PTW-30013-4678 | 0.986 3 | 0.989 3 | 0.300 | 0.976 5 | 0.980 0 | 0.365 |
| PTW-30013-6842 | 0.986 5 | 0.989 3 | 0.378 | 0.975 7 | 0.980 0 | 0.436 |
| PTW-30013-9086 | 0.989 1 | 0.989 3 | 0.300 | 0.976 5 | 0.980 0 | 0.524 |
| PTW-30013-9165 | 0.983 9 | 0.989 3 | 0.544 | 0.974 5 | 0.980 0 | 0.564 |
| FC65-G-1736 | 0.986 4 | 0.994 0 | 0.763 | 0.979 4 | 0.985 0 | 0.565 |
| FC65-G-3208 | 0.991 7 | 0.994 0 | 0.222 | 0.984 9 | 0.985 0 | 0.008 |
| NE2571-3534 | 0.990 4 | 0.992 3 | 0.187 | 0.982 9 | 0.986 0 | 0.314 |
| PTW-31015-0166 | 0.987 7 | - | - | 0.979 6 | - | - |
| PTW-31016-0763 | 0.993 4 | - | - | 0.984 4 | - | - |
| ICO-6A-2019 | 0.988 0 | - | - | 0.979 6 | - | - |

NIM: National Institute of Metrology; Relative difference^{6MV} is the ratio of $k_{6\text{MV},^{60}\text{Co}}$ (398) to $k_{6\text{MV},^{60}\text{Co}}$ (NIM), and relative difference^{10MV} is the ratio of $k_{10\text{MV},^{60}\text{Co}}$ (398) to $k_{10\text{MV},^{60}\text{Co}}$ (NIM).

修正因子普遍比398报告中的值偏小,相对偏差在0.3%~0.9%。这是因为NIM ^{60}Co γ 基准实验室给出的校准因子比IAEA给出的值偏大,而高能光子水吸收剂量基准实验室给出的校准因子比BIPM给出的值偏小所致。给出了PTW-31015、PTW-31016这两种电离室的辐射质转换因子,而在398报告中未给出其数据。也测量了NIM自主研发一种指形电离室ICO-6A-2019的辐射质转换因子。这些数值日后可以和其它国家基准实验室的相应数据相比较。

3 结论

本文通过简单回顾NIM水吸收剂量的国际比对,展示了NIM水吸收剂量国家基准实验室已经具备了水吸收剂量的量传和溯源能力。在此基础上,实验测量了8类14个和1个自主研发的指形电离室的辐射质转换因子。实验结果和国际比对结果倾向于 $k_{6\text{MV},^{60}\text{Co}}$ 和 $k_{10\text{MV},^{60}\text{Co}}$ 普遍比398报告给出的数值偏小。同一型号不同出厂编号的电离室的辐射质转换因子之间有不大于0.2%的差别。用户可以在NIM水吸收剂量国家基准实验室测量得到电离室的校准因子,和在标称6、10 MV下的辐射质转换因子,再通过实际测量用户辐射质的组织体模比,插值得到用户电离室的辐射质转换因子。

【参考文献】

- [1] IAEA. Absorbed dose determination in high energy electron and photon beams[R]. IAEA Technical Report Series No.277, 1987.
- [2] ALMOND P R, BIGGS P J, COURSEY B M, et al. AAPM's TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon and electron beams [J]. Med Phys, 1996, 26(9): 1847-1870.
- [3] IAEA. Absorbed dose determination in high energy electron and photon beams[R]. IAEA Technical Report Series No.398, 2000.
- [4] 王坤,李涛,杨小元. ^{60}Co γ 水吸收剂量的量值复现和国际比对验证[J]. 中国医学物理学杂志, 2013, 30(6): 4476-4479.
WANG K, LI T, YANG X Y. Reproduction and international comparison of absorbed dose to water in ^{60}Co γ radiation [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2013, 30(6): 4476-4479.
- [5] 金孙均,王志鹏,王坤,等. ^{60}Co γ 辐射的空气比释动能及水吸收剂量的NIM-IAEA双边比对[J]. 计量学报, 2016, 37(4): 441-443.
JIN S J, WANG Z P, WANG K, et al. The NIM-IAEA bilateral comparison on the air kerma and absorbed dose to water of ^{60}Co γ radiation [J]. Acta Metrologica Sinica, 2016, 37(4): 441-443.
- [6] 王坤,金孙均,范耀东,等. 医用加速器水吸收剂量国际比对及进展[J]. 计量学报, 2016, 37(4): 112-114.
WANG K, JIN S J, FAN Y D, et al. International comparison and progress of absorbed dose to water in accelerator photon beams [J]. Acta Metrologica Sinica, 2016, 37(4): 112-114.
- [7] 王坤,金孙均,裴雪,等. 医用加速器水吸收剂量测量研究及国际比对[J]. 计量技术, 2015(5): 56-59.
WANG K, JIN S J, CHANG X, et al. International comparison and measurement research of absorbed dose to water in accelerator photon beams, measurement technique [J]. Measurement Technique, 2015(5): 56-59.
- [8] MCEWEN M R. Measurement of ionization chamber absorbed dose k(Q) factors in megavoltage photon beams [J]. Med Phys, 2015, 37(5): 2179-2193.
- [9] PALMANS H, MONDELAERS W, THIENS H. Absorbed dose beam quality correction factors kappa Q for the NE2571 chamber in a 5 MV and a 10 MV photon beam [J]. Phys Med Biol, 1999, 44(3): 647-663.
- [10] SEUNTJENS J P, ROSS C K, SHORTT K R, et al. Absorbed-dose beam quality conversion factors for cylindrical chambers in high energy photon beams [J]. Med Phys, 2000, 27(12): 2763-2779.
- [11] IAEA. IAEA/WHO network of secondary standard dosimetry laboratories comparison of therapy-level ionization chamber calibration coefficients [R]. CMP-CPR/2014/01, 2014.

(编辑:薛泽玲)