

电离法校准低能质子剂量技术

陈义珍, 林敏, 陈克胜, 徐利军, 夏文, 崔莹, 肖振红

(中国原子能科学研究院 放射性计量测试部, 北京 102413)

摘要: 本工作建立 1 套电离室绝对剂量测量系统, 对自制石墨电离室性能进行研究, 实验结果表明自制电离室系统满足标准电离室的要求。设计了 1 套基于同向测量的透射电离室, 用于在线监测束流变化, 为剂量测量的准确性提供了依据, 解决了替代法校准时束流波动对测量结果造成较大不确定度的问题。对已建立的电离室测量低能质子吸收剂量绝对测量系统进行不确定度评估, 合成标准不确定度约 4%。最后, 以自行研制的质子剂量测量系统(电离室系统、透射电离室系统)在 HI-13 串列加速器上开展了对丙氨酸剂量计校准技术的研究, 获得了不同能量质子辐照下的 RE 值。

关键词: 电离室; 吸收剂量; 质子; 校准

中图分类号: R144.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2012)02-0145-06

Calibration Method of Absorbed Dose for Low Energy Proton Using Ionization Method

CHEN Yi-zhen, LIN Min, CHEN Ke-sheng, XU Li-jun, XIA Wen,
CUI Ying, XIAO Zhen-hong

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-20, Beijing 102413, China)

Abstract: A set of dosimetry system with graphite ionization chamber for low energy proton beams was set up. The characteristics of self-developed graphite ionization chamber were studied. The results show that the self-developed graphite ionization chamber meets the requirement of standard ionization chamber. Transmission ionization chamber was designed and used to monitor the change of proton beams online, which increased the accuracy of results when calibrating the other dosimetry systems. Absorbed dose of low energy proton was measured by using self-developed dosimetry system with ionization chamber, and the composed standard uncertainty is 4%. The calibration method of alanine dosimeter was researched in the HI-13 Tandem Accelerator, and the RE specific values were obtained for the different proton energy.

Key words: ionization chamber; absorbed dose; proton; calibration

随着人类太空活动的发展, 空间电离辐射
及其防护技术受到了空前关注, 成为现代科学

技术的一个重要发展方向。质子吸收剂量的准
确测定, 对开发空间为人类服务具有重要意义。

由于电离室探测器具有测量精度高、性能稳定可靠、重复性好和适用范围广等特点,使电离室剂量计成为非常普遍的一种测量手段^[1],而被广泛地应用于放射治疗、个人防护和环境监测等领域的剂量测量。

本工作拟建立低能质子吸收剂量的测量及校准技术的方法,为今后高能质子吸收剂量的准确测量和校准奠定技术基础,以满足我国空间电离辐射和质子抗辐射加固研究中对质子吸收剂量的校准要求。

1 电离室测量吸收剂量原理

电离室置于质子辐射场中时,电离室中的气体因接受质子的吸收剂量 D_{gp} 而产生电荷 Q_{gp} ,则:

$$D_{gp} = Q_{gp}(\omega_{gp}/e)/m_g \quad (1)$$

其中: ω_{gp} 为在气体中因质子辐照产生1个离子对所需的平均能量,在空气介质中,文献[2]推荐 $\omega_{gp}/e = 34.23 \text{ J/C}$; m_g 为电离室中气体的质量。

最简单的获得气体质量的方法是利用另一种辐射得到电离室的校准因子,该校准因子由理论参数和为确定气体质量而依赖于电离室几何形状和材料的影响因子组成,则有:

$$m_g = (\omega_c/e)/N_{Dg} \quad (2)$$

其中: ω_c/e 为 ^{60}Co γ 射线在电离室气体中产生1个离子对所需的平均能量; N_{Dg} 为 ^{60}Co γ 射线校准时电离室中气体的吸收剂量传递因子, Gy/C 。

N_{Dg} 可表示为:

$$N_{Dg} = N_k(1-g)A_{\text{wall}}A_{\text{ion}}/[S_{\text{wall,g}}(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{air,wall}}K_{\text{hum}}] \quad (3)$$

式中: N_k 为 ^{60}Co γ 射线的空气比释动能校准因子; g 为以韧致辐射形式损失的次级电子能量的份额, $g=0.003$; $S_{\text{wall,g}}$ 为次级电子对壁材料和气体的质量碰撞阻止本领的比值; $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{air,wall}}$ 为 ^{60}Co γ 射线对空气和壁材料的质量能量吸收系数比值; A_{wall} 为壁上和平衡帽中吸收和散射的修正因子; A_{ion} 为校准过程中离子复合的修正; K_{hum} 为对环境空气和干燥空气的响应差别的修正。

如何获得电离室中气体质量 m_g 是问题的关键,这需考虑壁材料上和平衡帽中吸收和散

射的影响、校准过程中离子复合的影响及环境空气和干燥空气响应差别的影响并加以修正。在获得质子吸收剂量的过程中,还涉及使用一些重要的参数,可参考文献[3-5],获得 S/ρ 、 w/e 等,取 $w_c/e = 33.97 \text{ J/C}$ 。

2 标准电离室测量系统的建立

2.1 电离室测量装置的研制

1) 电离室的设计与加工

电离室除要满足空腔电离理论关于空腔大小和室壁厚度等基本要求外,还要选择适当的材料和结构,使得电离室具有好的测量重复性、尽可能小的泄漏电流及好的长期稳定性^[6-7],使其主要技术性能达到或优于国际电工委员会(IEC)标准^[8]所规定的指标要求。

本工作设计了以石墨为主要材料的平板电离室,其主要由平衡帽、电极、工作气体和绝缘体4部分组成^[9],图1所示为石墨平板电离室结构图。电离室灵敏体积为 0.628 cm^3 ,电离室空腔与外界相通,空腔介质为空气。平衡帽由厚 4.45 mm PMMA 材料组成,内壁附有螺纹,通过螺纹与基座旋紧固定在一起。自制石墨电离室各项基本参数为:材料,有机玻璃平衡帽、聚苯乙烯绝缘体、石墨电极;入射窗厚度, 0.5 mm ;极间距, 2 mm ;收集电极直径, 20 mm ;保护环宽度, 0.2 mm 。

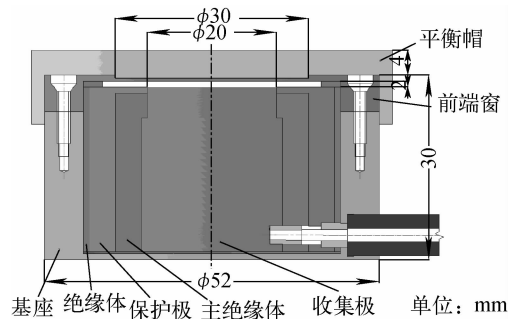


图1 石墨电离室结构图

Fig.1 Structure of graphite ionization chamber

2) ^{60}Co γ 射线参考辐射场中电离室性能研究

在国防科技工业电离辐射一级计量站治疗水平 ^{60}Co γ 射线参考辐射场中对石墨电离室进行性能研究和空气比释动能校准。辐射场中各

参考条件为:电离室型号,自制石墨平板电离室;静电计,Unidos E 剂量仪;平衡帽材料,PMMA;电离室参考点位置,入射窗内表面中心;源室距(SSD),100 cm;照射野,10 cm × 10 cm;相对湿度,30%~80%。

将被校石墨电离室放置在⁶⁰Co γ 射线参考辐射场中,使电离室的轴心与射线束轴心重合,电离室入射窗内表面中心与⁶⁰Co γ 射线源中心距离为 1.0 m,与参考标准电离室测量辐射场中该点空气比释动能率的距离相同。

在⁶⁰Co γ 射线参考辐射场中对自制石墨电离室的计量学性能实验结果为:重复性,0.031%;示值非线性,0.18%;漏电流,≤±8 × 10⁻¹³ A;长期稳定性,0.49%/a;极化效应,0.1%。图 2 所示为电离室伏安特性曲线,由图 2 可看出,电压为 100 V 时,电离室收集效率达 99%以上,电离室进入饱和区,饱和工作区间为 100~400 V。

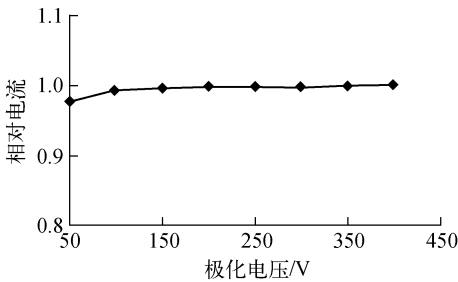


图 2 石墨电离室伏安特性曲线

Fig. 2 V-I curve of graphite ionization chamber

实验结果表明,自制石墨电离室各项性能均满足 IEC 关于标准电离室要求。

3) 电离室空气比释动能校准及影响因素研究

空气比释动能校准因子 N_k 为:

$$N_k = \frac{K_{\text{air}}}{M_{\text{pp}}} \quad (4)$$

式中: K_{air} 为在⁶⁰Co γ 射线参考辐射场中的参考点上,⁶⁰Co γ 射线的基准(或标准)装置测量的空气比释动能率的标准值,Gy · min⁻¹; M_{pp} 为平板电离室剂量计经温度和压力修正后的读数,C · min⁻¹。

经多次测量,得到石墨电离室系统在⁶⁰Co γ 射线参考辐射场中的空气比释动能校准因子

$N_k = 4.56 \times 10^7$ Gy/C。

实验过程中,电离室复合效应、极化效应(K_{pol})、参考辐射场环境温湿度及气压变化等均会对测量结果带来不确定度,因此,实验中需对这些影响因素进行测量和计算,对结果进行修正。另外,校准电离室时,电离室室壁及平衡帽对⁶⁰Co γ 射线的吸收和散射也会给结果带来一定不确定度,需对这种效应进行修正^[10]。由于 Monte Carlo 方法可较真实地模拟粒子在物质中的作用过程,可解决经验计算方法及实验方法中的若干难题,因此,本工作采用 MCNP 程序进行电子-光子耦合运输过程的模拟计算。通过引进壁修正因子 A_{wall} 修正电离室壁对光子吸收和散射作用引起的 γ 射线减弱效应,提高空气比释动能的测量精度。

根据电离室吸收剂量校准因子 N_{Dg} 计算式(3),对各影响量逐一进行测量与修正,结果为: A_{ion} , 1.000 6; $S_{\text{wall,g}}$, 1.002 0; $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{air,wall}}$, 0.999 0; A_{wall} , 1.004 8; K_{hum} , 0.997 5; K_{pol} , 0.999 0。综合各修正项,其修正值为 1.006 0。由此可计算得到标准条件下,平板电离室灵敏体积内空气质量。

2.2 质子辐照测量

质子辐照实验在中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器上进行。本工作设计了 1 套基于同向测量的透射电离室,将其置于标准电离室前对质子束流进行在线监测,使其能完全反映质子辐照标准电离室时的束流变化情况,同时也为替代法校准其他剂量体系时的束流监测提供了依据。

1) 石墨电离室测量系统的质子辐照性能

图 3 所示为 HI-13 串列加速器上质子辐照实验布置图,利用透射电离室作为在线束流监测系统,对石墨电离室的质子辐照性能进行研究。

(1) 饱和特性研究

在 15 MeV 质子能量下,测量电离电流随工作电压的变化,石墨电离室电离电流均对透射电离室读数归一,结果如图 4 所示。

根据 $1/V-1/I$ 曲线外推,计算得到极化电压为 200 V 时,电离室收集效率达 99%以上,即电离室在 200 V 下进入饱和区。

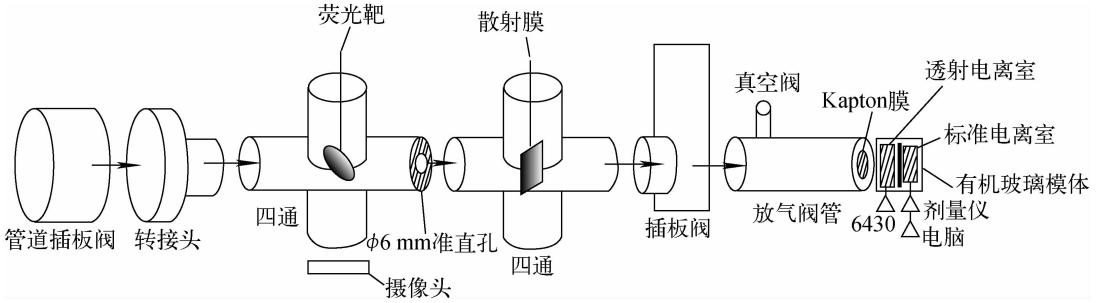


图3 HI-13 串联加速器上质子辐照实验布置图

Fig. 3 Diagram of experiment for proton beam in HI-13

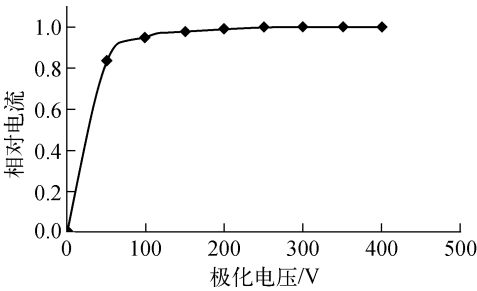


图4 石墨电离室系统饱和特性曲线

Fig. 4 Saturation curve of system for graphite ionization chamber

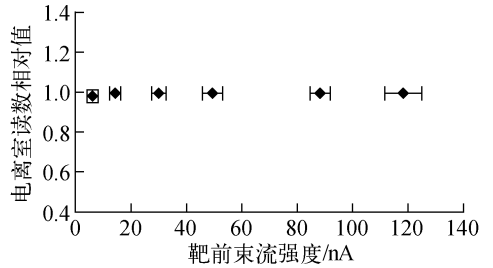


图5 质子剂量响应线性

Fig. 5 Linearity of proton dose response

(2) 剂量响应测量

为考察电离室校准系统的质子剂量响应线性,在质子辐照下,通过改变质子的束流强度,考察电离室校准系统的输出与束流强度的对应关系。在 15 MeV 质子能量下,在 1~120 nA 范围内调节质子束流强度,利用电离室系统进行测量,对在线束流监测系统读数进行归一以修正辐照过程中因束流强度变化带来的影响。图 5 所示为电离室校准系统的质子剂量响应线性图。由图 5 可见,尽管束流强度改变 2 个量级,图中各点读数基本在 1 附近,其变化不超过 ±1%,7 个束流强度下所得结果的单次测量相对标准偏差为 0.34%,说明该电离室系统的剂

量响应线性良好。

(3) 其它计量学性能测量

辐照前后漏电流测量结果(均值)分别为 0.045×10^{-13} 、 0.055×10^{-13} A,重复性测量结果列于表 1。

上述石墨电离室质子辐照性能研究结果表明,该石墨电离室可满足测量质子剂量的标准电离室的要求。

2) 质子剂量测量不确定度评估

根据式(1),质子吸收剂量测量的不确定度主要来源于 3 部分:质子辐照中电离室测量 Q_{gp} 产生的不确定度、 ω_{gp}/e 的引用带来的不确定度和电离室灵敏体积空气质量 m_g 带来的不确定度(表 2)。

表 1 重复性测量结果

Table 1 Results of repeatability

质子能量/ MeV	束流/ nA	石墨电离室相对读数						相对标准 偏差/%
		1	2	3	4	5	6	
15	15	0.170	0.168	0.169	0.169	0.170	0.170	0.42
20	45	0.151	0.153	0.151	0.152	0.152	0.152	0.46
25	80	0.192	0.192	0.193	0.192	0.192	0.193	0.20

表 2 质子吸收剂量测量不确定度

Table 2 Composed standard uncertainty of proton dose

不确定度来源	不确定度分量	不确定度/%	
		A类	B类
m_g	校准因子 K_{air}	0.99	
	石墨电离室测量不确定度	1.7	
	修正项不确定度(壁效应、离子复合等)	2.0	
	w_c/e 的引用	0.50	
Q_{RP}	测量重复性	0.46	
	透射电离室稳定性	0.58	
	漏电影响	0.58	
	温度修正	0.20	
	气压修正	1.14	
	离子复合影响	1.41	
	质子辐照条件影响	2.0	
	w_{gp}/e	w_{gp}/e 的引用	0.50
		(3.92)	

注:括号内为合成标准不确定度

3 丙氨酸剂量计的质子剂量响应校准方法和 RE 研究

为验证电离室质子剂量标准装置的可靠性,基于丙氨酸剂量计具有体积小、有适当的灵敏度、剂量响应线性好、生物组织等效性好、电子自旋共振谱仪(ESR)波谱法测量为非破坏性等优点,本工作采用电离室测量系统以替代法校准丙氨酸剂量计的质子剂量响应。为监测质子束流变化以保证替代法校准时质子剂量的可靠性,采用透射电离室进行在线束流监测。

首先记录石墨电离室校准所在位置处的剂量率,然后将丙氨酸剂量计辐照模体代替石墨电离室,在模体中心孔内放丙氨酸剂量片,使剂量计表面与石墨电离室表面原位置重合,丙氨

酸受照剂量由剂量率、辐照时间及丙氨酸与空气的碰撞阻止本领比等计算获得。丙氨酸辐照时的束流变化带来的影响则根据石墨电离室和丙氨酸剂量计辐照时在线束流监测系统的读数进行修正。

实验在中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器上进行,分别在质子能量为 15 MeV、25 MeV下校准了丙氨酸剂量计对质子辐照的吸收剂量。所得电离法校准丙氨酸剂量计的质子剂量响应校准曲线和在⁶⁰Co γ射线参考辐射场中校准得到的剂量响应校准曲线示于图 6。由图 6 可见,不同能量质子辐照所得丙氨酸剂量计的剂量响应校准曲线和⁶⁰Co γ射线辐照所得的剂量响应校准曲线基本重合,且其剂量响应线性相关系数均可达 0.999,说明其质子剂量响应线性良好。

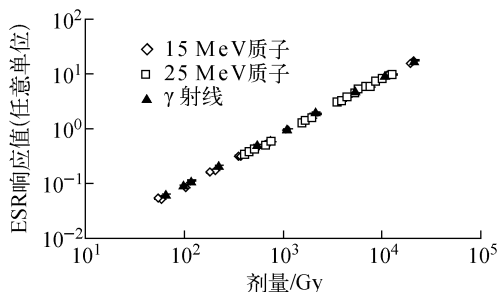


图 6 质子和⁶⁰Co γ射线的剂量响应
Fig. 6 Dose response of proton and ⁶⁰Co γ ray

将同样剂量下不同能量质子辐照的剂量响应值和⁶⁰Co γ射线辐照下的剂量响应值相比可得到丙氨酸剂量计的 RE 值。本工作研究结果和国际上报道的利用电离法校准的丙氨酸剂量计的 RE 值分别列于表 3 和 4。由表 3、4 可见,本工作中经电离法校准得到的丙氨酸剂量计的 RE 值约为 0.9,这与国际上报道的相应能量下的 RE 值结果基本一致^[11-13]。

表 3 药片状丙氨酸剂量计的 RE 值

Table 3 RE value of alanine dosimeter

质子能量/MeV	$(S/\rho)/(MeV \cdot cm^2 \cdot mg^{-1})$	LET/(keV · μm^{-1})	RE 值
14.8	0.038 6	4.44	$0.939 \pm 0.035 (n=20)$
24.8	0.023 6	2.71	$0.887 \pm 0.048 (n=23)$

表 4 国际上报道的电离法校准丙氨酸剂量计的 RE 值

Table 4 RE value of alanine dosimeter reported in reference

研究者	质子能量/MeV	RE 值
Bartolotta 等 ^[11]	13.7	0.908
Bartolotta 等 ^[11]	23.6	0.955
Cuttone 等 ^[12]	40	1.017
Cuttone 等 ^[12]	60	0.990
Onori 等 ^[13]	45	0.97
Onori 等 ^[13]	60	0.97

4 结论

1) 建立了 1 套电离室测量低能质子吸收剂量的绝对测量系统,合成标准不确定度小于 4%。

2) 针对质子辐照过程中加速器束流波动的问题,通过模拟计算和实验验证,自行研制了用于在线束流监测的薄窗型透射电离室,有效解决了替代法校准时束流波动对测量结果造成的较大不确定度。

3) 利用已建立的质子剂量测量系统在加速器上开展了对丙氨酸剂量计校准技术的研究,获得了不同能量质子辐照下的 RE 值。该方法的建立为热释光等其它固体剂量计的校准提供了一定的技术参考,有利于促进我国空间电离辐射的进一步研究和发展。

参考文献:

- [1] Absorbed dose determination in photon and electron beams, IAEA Technical Reports Series No. 277[R]. Vienna: IAEA, 1997.
- [2] Beam production, beam delivery and measurement of absorbed dose international commission on radiation units and measurement, ICRU Report Series No. 59 [R]. Bethesda: ICRU, 1998.
- [3] Absorbed dose determination in external beams radiotherapy, an international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water, IAEA Technical Reports Series No. 398 [R]. Vienna: IAEA, 2000.
- [4] Average energy required to produce an ion pair, ICRU Report Series No. 31 [R]. Bethesda: ICRU, 1979.
- [5] Stopping powers for protons and alpha particles, ICRU Report Series No. 49 [R]. Bethesda: ICRU, 1993.
- [6] ATTIX F H. Radiation dosimetry [M]. New York: New York Pergamon Press, 1966.
- [7] 阿蒂克斯 F H, 罗奇 W C. 辐射剂量学 [M]. 施学明, 陈常茂, 于耀明, 等译. 北京: 原子能出版社, 1981.
- [8] Medical electrical equipment: Dosimeters with ionization chambers as used in radiotherapy, CEI/ IEC Series No. 60731 [R]. Geneva: IEC, 1994.
- [9] KEMP L A W. Second standard ionization chamber design [J]. Phys Med Biol, 1970, 15: 557-558.
- [10] ANDREO P, LINDBORG L, MEDIN J. On the calibration of plane-parallel ion chambers using ⁶⁰Co beams [J]. Med Phys, 1991, 18: 326.
- [11] BAROLOTTA A, BARONE T L, BRAI M, et al. Response characteristics of thermoluminescence and alanine-based dosimeters to 16 and 25 MeV proton beams [J]. Radiat Prot Dosi, 1999, 85: 353-356.
- [12] CUTTONE G, RAFFELE L, BARONE T L, et al. First dosimetry intercomparison results for the CATANA project [J]. Phys Medica, 1999, 15: 121-130.
- [13] ONORI S, ANGELIS C, EGGER E, et al. Alanine dosimetry of proton therapy beams [J]. Med Phys, 1997, 24: 447-453.