

液体化学剂量计测定电子束吸收剂量

林敏 叶宏生 林京文 陈云东 张桂芹
肖振红 李华芝

(中国原子能科学研究院放射性计量测试部, 北京, 102413)

用重铬酸钾(银)和硫酸高铈-硫酸铈剂量计对电子束(能量 1-15 MeV)的水中吸收剂量进行了测量, 其剂量响应线性良好, 准确度高, 测量的扩展不确定度为 4.8% ($K=2$)。针对电子束吸收剂量测量的特点, 特别设计加工了硬币型聚苯乙烯制容器。根据深度剂量分布曲线, 计算了吸收剂中某一深度处的吸收剂量, 并通过射程法的计算, 对电子束最可几能量进行了估计。

关键词 液体化学剂量计 硬币型剂量计 电子束吸收剂量 辐射加工

中图分类号 TL 818.5

近年来, 电子束在辐射加工和科研上的应用已得到迅速发展。据不完全统计, 1993年我国的电子加速器已增至 40 多座, 而且还呈继续增长趋势。随着电子束辐射加工业的迅猛发展, 迫切需要建立一套适用于电子束吸收剂量测量的高水平计量标准化体系, 以便统一电子束辐照吸收剂量的量值^[1]。

在液体化学剂量计中, 重铬酸钾(银)剂量计和硫酸高铈-硫酸铈剂量计具有量程适宜、稳定性好、辐照温度响应小、准确高度^[2,3]、对小于 $1 \text{ M Gy} \cdot \text{s}^{-1}$ 的电子束无明显的剂量率响应等优点, 因此适合作辐射加工用电子束吸收剂量测定的标准剂量计^[4]。为了考查这 2 种剂量计对电子束的剂量学性能, 专门设计并加工了适合于电子束测定的剂量计容器和配套的可拼接的固体模体。本文的目的是研究用于电子束吸收剂量测量的液体化学剂量计。

1 实验原理

1.1 吸收剂量的测定

2 种剂量计都是基于当溶液吸收辐射能量后, 在紫外光区特定波长下其一定范围内的吸光度的变化值与吸收剂量成正比^[3,4]。吸收剂量由下式表示

$$D(K) = \frac{\Delta A}{G_n \cdot l \cdot G \cdot \rho} = K(K) \cdot \Delta A$$

林敏: 女, 28岁, 电离辐射化学计量专业, 助理研究员

收稿日期: 1998-04-07 收到修改稿日期: 1998-05-19

$$D(\text{Ce}) = \frac{\Delta A \cdot f}{G_m \cdot l \cdot G \cdot \rho} = K(\text{Ce}) \cdot \Delta A \cdot f \quad (1)$$

其中: G_m 为剂量计标准溶液的线性摩尔吸收系数, $\text{m}^2 \cdot \text{mol}^{-1}$; l 为石英杯中溶液的光程长度, m ; G 为辐射化学产额(即每吸收 1 J 能量所产生的某物质的摩尔数), $\text{mol} \cdot \text{J}^{-1}$; ρ 为剂量计溶液的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; K 为剂量转换因子, Gy; f 为硫酸高铈-硫酸铈剂量计溶液的稀释倍数, $f = 50$ 。

1.2 模体中有效点处的吸收剂量

将液体化学剂量计置于模体中,测得的是灵敏体积内的平均吸收剂量 \bar{D}_i 。由于灵敏体积小,所得 \bar{D}_i 即为灵敏体积中心点处的吸收剂量。经温度等因素校准后,利用 \bar{D}_i 可计算出任一介质中的吸收剂量

$$\bar{D}_m = \bar{D}_i \cdot S_{m,i} \cdot P_{m,i} \quad (2)$$

其中: \bar{D}_i 为探测器灵敏材料所吸收的平均剂量, Gy; $S_{m,i}$ 为电子在 m 介质和灵敏材料中碰撞阻止本领之比; $P_{m,i}$ 为探测器在 m 介质中引起电子注量变化的扰动校准系数,用公式表示为

$$P_{m,i} = 1 + \frac{T_m \cdot t}{4} \left\{ S_{m,i} - \frac{T_i}{T_m} - 0.43 \frac{t}{r} \left(1 - \frac{T_i}{T_m} \right) \left[\frac{\sqrt{3} \bar{\theta}(z)^2 + 1}{2} \sqrt{3 \bar{\theta}(z)^2} \right] \right\} \quad (3)$$

其中: T_m 、 T_i 分别为 m 介质和灵敏材料的散射本领, $\text{rad}^2 \cdot \text{cm}^{-1}$; t 为灵敏层(剂量计溶液)的厚度, m ; r 为探测器的半径, m ; $\bar{\theta}(z)^2$ 为电子束在灵敏材料中深度为 z 处的平均散射角的平方

$$\bar{\theta}(z)^2 = \frac{T}{\rho} \left[1 - \frac{(s/\rho)_{\text{tot}} \cdot \rho z}{E_0 + m c^2} \right]^{-1} \cdot \rho z \quad (4)$$

若在模体中定义一个有效点 p , 则假设 p 点与探测器中心点的距离为 d_{eff} 。由于硬币型剂量计厚度为 4 mm, 其内的深度剂量分布接近线性, 则有:

$$d_{\text{eff}} = (1 - S_{m,i}) \cdot \frac{t}{2} \quad (5)$$

$$D_m(p) = \bar{D}_i \cdot S_{m,i} \cdot P_{m,i} \cdot d_{\text{eff}} \quad (6)$$

其中: $D_m(p)$ 为模体中 p 点处的吸收剂量, Gy。

另外, 根据测得的固体模体内的深度剂量分布曲线, 还可通过外推得到模体表面的吸收剂量或模体内任意深度处的吸收剂量^[5]。

2 实验方法

2.1 剂量计的制备

重铬酸钾(银)和硫酸高铈-硫酸铈剂量计溶液分别按技术规范^[6,7]配制。

采用 2 种剂量计容器, 一种为 2 mL 市售医用中性玻璃安瓿瓶, 另一种为可批量生产的自制的 4 mL 硬币型聚苯乙烯容器。剂量计容器经过一定处理后, 将已配好的剂量计溶液小心注入剂量计容器中, 封好后备用。

2.2 校准

剂量计的校准工作在中国原子能科学研究院辐照中心的钴源上进行, 钴源活度为 2.7 PBq。用自制的 Fricke 剂量计进行校准, 所得剂量转换因子^[3,4,8]分别为: $K(\text{K}) = 5.7 \times 10^4$ Gy; $K(\text{Ce}) = 724.8$ Gy。

2.3 辐照

辐照工作分别在中国原子能科学研究院电物理与激光技术研究所的 12 M eV 电子直线加速器、RSA-1 型 2 M eV 电子直线加速器和北京师范大学的 DF-5 型电子直线加速器上进行。加速器参数列于表 1。

表 1 加速器运行参数

Table 1 Parameters of the electron beam accelerators

加速器名称	最大能量/M eV	束流/ μ A	辐照方式	车速/ $m \cdot min^{-1}$
12 M eV 电子直线辐照加速器	12	0.1	动态辐照	1.4
RSA-1 型电子直线加速器	2	10	静态辐照	
DF-5 型电子直线加速器	4	0.1	静态辐照	

3 结果与讨论

3.1 辐照场剂量分布

由于各电子直线加速器辐照场的剂量分布不一致, 采用的辐照方式也不同, 故应事先对各加速器参考面上的剂量分布进行测量, 其目的在于提供液体化学剂量计所处辐照位置的相对剂量大小, 并确定样品放置方式。

分别用自制的 FJL-01 型 CTA 薄膜剂量计和进口的 FW T-60 薄膜剂量计测量了各加速器参考面上的横向及纵向剂量分布^[9]。结果表明: (1) 对 12 M eV 电子直线加速器, 其横向(垂直于小车传送方向)剂量分布呈马鞍形, 位于参考面中心轴附近的剂量响应曲线相对平坦, 同时由于采用的是动态辐照, 其纵向(平行于小车传送方向)剂量分布均匀, 故均将液体化学剂量计沿纵向放置于参考面中心轴附近测量电子束吸收剂量; (2) 对 RSA-1 型电子直线加速器, 测得其横向(平行于钛窗方向)剂量分布在 20-70 cm 处相对均匀, 而由于采用静态辐照, 其纵向(垂直于钛窗方向)剂量分布呈馒头峰形状, 即中心轴附近剂量相对均匀, 故将液体化学剂量计沿横向放置于参考面中心轴处一定范围内测量电子束吸收剂量。

3.2 深度剂量分布和电子束最可几能量的估计

采用自制的劈形和井形聚苯乙烯模体以及 FJL-01 型 CTA 薄膜剂量计, 测定了电子束在模体中不同深度处的剂量分布^[7]。将被测膜裁成 100 mm 的长度, 其吸光度值用 Cay-3E 型紫外-可见分光光度计连续读出, 经相应的数据处理后即得深度剂量分布曲线(图 1)。

根据所得深度剂量分布曲线, 利用射程法计算了所用电子束的最可几能量^[5], 计算结果列于表 2。

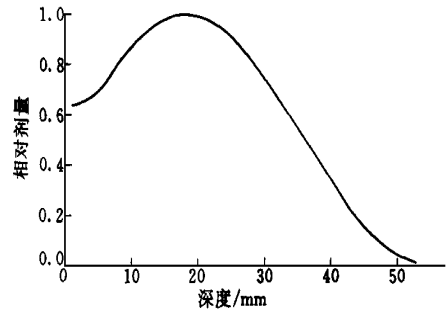


图 1 典型的深度剂量分布曲线

Fig. 1 Typical dose-depth distribution curve

表 2 电子束最可几能量的计算值

Table 2 Calculated results of the most probable energy of the used electron beams

表观值 $E_1/M eV$	计算值 $E_2/M eV$	E_1/E_2	表观值 $E_1/M eV$	计算值 $E_2/M eV$	E_1/E_2
1.04	0.94	1.11	1.83	1.74	1.05
1.21	1.07	1.13	4.00	3.79	1.06
1.40	1.29	1.09	12.00	12.40	0.97
1.61	1.49	1.08			

根据所得的深度剂量分布曲线, 还可以计算出硬币型剂量计中任一液层深度处的吸收剂量值, 以便进行各种剂量计之间的比对。

3.3 剂量响应

1) 用柱型及硬币型重铬酸钾(银)和硫酸高铈-硫酸铈剂量计对 12 MeV 电子束的吸收剂量进行了测试, 测量结果示于图 2。由图可见, 上述剂量计均有极好的线性关系, 线性相关系数好于 0.9999, 线性相对标准偏差均小于 $\pm 1\%$ 。

2) 采用硬币型重铬酸钾(银)剂量计对 2 MeV 电子束的吸收剂量进行了测试。由于采用静态辐照, 辐照场剂量分布不均匀, 且现场无稳定的束流监测器, 故用硬币型剂量计测量的同时还需用薄膜剂量计对每一个照射位置的束流进行监测, 以便对实测剂量作相应的修正。测量结果列于表 3。

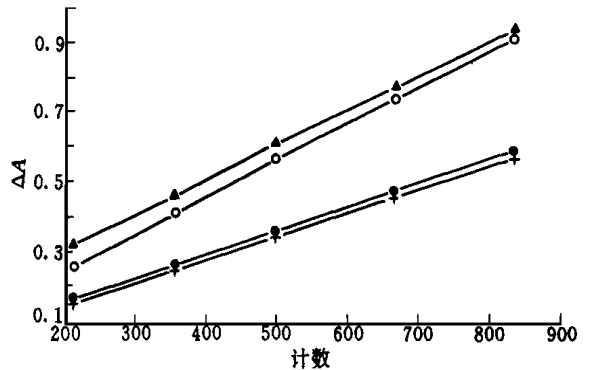


图 2 重铬酸钾(银)和硫酸高铈-硫酸铈剂量计测量 12 MeV 电子束的剂量响应曲线

Fig 2 Dose-response curves of the potassium (silver) dichromate and ceric-cerous sulphate dosimeters for 12 MeV electron beams

—○—Ce(硬币型); —△—Ce(柱型);
—□—K(柱型); + —K(硬币型)

表 3 2 MeV 电子束吸收剂量的测量结果($\bar{A}_0 = 1.1056$)

Table 3 Results of the absorbed doses for 2 MeV electron beams

辐照位置	计数	D	温度修正系数	剂量修正系数	修正后的剂量	每个脉冲相当的剂量
		/kGy	K_T	K_D	D_1/kGy	D/kGy
1#	37	39.97	0.979	1.05	41.09	1.11
	31	36.83	0.981	0.97	35.05	1.13
	26	31.33	0.983	0.95	29.26	1.13
	21	23.08	0.988	1.03	23.49	1.12
2#	37	39.19	0.979	1.09	41.82	1.13
	31	37.41	0.981	0.95	34.86	1.12
	26	31.74	0.983	0.95	29.64	1.14
	21	23.90	0.988	1.05	24.79	1.18

3.4 重复性

在 12 MeV 电子直线加速器上分别对柱型硫酸高铈-硫酸铈剂量计和硬币型重铬酸钾(银)剂量计的重复性进行了测试(10 次), 将各剂量计均辐照 423 个计数。铈剂量计($\bar{A}_0 =$

1.3363) 的测量值为 $(16.70 \pm 0.07) \text{ kGy}$, 钾剂量计 ($\bar{A}_0 = 1.2063$) 的测量值为 $(16.55 \pm 0.02) \text{ kGy}$ 。2 种剂量计结果相差 0.1%。

3.5 比对

采用 2 种方式与中国工程物理研究院设计的水量热计进行了比对。1 种是采用中国工程物理研究院设计的与水量热计具有相同尺寸的水模体, 分别将重铬酸钾(银)和硫酸高铈-硫酸铈剂量计溶液充满模体进行辐照, 测量结果列于表 4; 另 1 种方式是直接将硬币型重铬酸钾(银)和硫酸高铈-硫酸铈剂量计放置在泡沫塑料的凹槽中辐照, 测量结果列于表 5。

表 4 重铬酸钾(银)及硫酸高铈-硫酸铈剂量计溶液与水量热计的比对结果

Table 4 Comparative results of the potassium (silver) dichromate and ceric-cerous sulphate dosimeter solution with water calorimeter

电子束能量/ MeV	剂量计类型	剂量 D/kGy	计数	每个脉冲的剂量 D/Gy	平均值 \bar{D}/Gy	有效点处剂量均值 ¹⁾ $\bar{D}_{8.5\text{c}}/\text{Gy}$	量热计有效点剂量均值 $\bar{D}_{8.5\text{cs}}/\text{Gy}$	$\frac{\bar{D}_{8.5\text{c}} - \bar{D}_{8.5\text{cs}}}{\bar{D}_{8.5\text{cs}}}/\%$
12	K	13.018	250	52.07	51.85	52.92	52.41	1.0
		26.174	507	51.63				
	Ce	12.818	250	51.27	51.93	53.01	1.1	
6	K	12.833	244	52.59	146.7	153.7	151.5	1.5
		29.28	200	146.4				
	29.43	200	147.1	144.5	151.4	-0.07		
	Ce	29.03	200				145.1	
28.97	200	143.9						

注: 1) $\bar{D}_{8.5\text{c}}$ 定义为当束流积分器计数为 1、距吸收体表面 $0.85 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 深度处的圆截面中心位于辐照平面原点时, 原点处的水吸收剂量

表 5 硬币型硫酸高铈-硫酸铈和重铬酸钾(银)剂量计与水量热计的比对结果

Table 5 Comparative results of the ceric-cerous sulphate and potassium (silver) dichromate dosimeters with water calorimeter

剂量计类型	剂量 D/kGy	计数	每个脉冲的剂量 D/Gy	平均值 \bar{D}/Gy	有效点处剂量均值 $\bar{D}_{8.5\text{c}}/\text{Gy}$	量热计有效点剂量均值 $\bar{D}_{8.5\text{cs}}/\text{Gy}$	$\frac{\bar{D}_{8.5\text{c}} - \bar{D}_{8.5\text{cs}}}{\bar{D}_{8.5\text{cs}}}/\%$
Ce (1 mm 窗)	22.038	427	51.61	51.84	54.77	52.41	4.5
	22.088	427	51.73				
	22.284	427	52.19				
Ce (0.5 mm 窗)	23.190	427	54.30	53.42			
	22.846	427	53.50				
	22.400	427	52.47				
K (1 mm 窗)	49.031	400	122.6	114.7	144.8	151.5	-4.4
	36.242	300	120.8				
	12.657	100	126.6				
	42.935	400	107.3				
	31.909	300	106.4				
	10.458	100	104.6				

比对结果表明: 重铬酸钾(银)和硫酸高铈-硫酸铈剂量计测定电子束吸收剂量是可靠的, 无明显的剂量率响应。

3.6 不确定度分析

液体化学剂量计测量电子束吸收剂量, 其不确定度主要来源于剂量计的组成、稳定性和校准等因素, 经计算得到其扩展不确定度为 4.8 % ($K=2$)。液体化学剂量计测定电子束吸收剂量的不确定度列于表 6。

表 6 液体化学剂量计测定电子束吸收剂量的不确定度分析

Table 6 Uncertainties of the liquid chemical dosimeters for electron beams

类别	不确定度来源	估计值/%
A 类	剂量响应线性	1.0
	剂量计组成	1.0
	仪器测量重复性	0.5
B 类	校准	1.0
	辐照温度	0.5
	剂量计溶液稳定性	1.0
	其它	0.5
合成不确定度		2.4
扩展不确定度($K=2$)		4.8

4 结论

1) 利用重铬酸钾(银)和硫酸高铈-硫酸铈剂量计可测量电子束吸收剂量, 其剂量响应线性好, 准确度高, 可作为电子束吸收剂量测量的标准剂量计, 其扩展不确定度为 4.8 % ($K=2$)。

2) 通过与水量热计进行的比对, 说明重铬酸钾(银)和硫酸高铈-硫酸铈剂量计的剂量率响应不明显, 故在 ^{60}Co γ 射线场中经 Fricke 剂量计校准得到的剂量转换因子可直接用于计算电子束在水中的吸收剂量。

3) 根据薄膜剂量计测定的深度剂量分布曲线, 可给出模体表面或吸收介质中任一深度处的吸收剂量; 还可通过射程法的计算, 给出电子束最可几能量的估计值。

4) 对于高能电子束, 无论玻璃制柱型和聚苯乙烯制硬币型剂量计均可用于测量其吸收剂量; 对于中、低能电子束, 可采用硬币型聚苯乙烯制剂量计进行测量。

感谢中国原子能科学研究院电物理与激光技术研究所加速器及钴源辐照中心、北京师范大学和中国工程物理研究院给予的大力支持与协作。

参 考 文 献

- Li Chenghua, Zhang Yanli, Pang Ruicao, et al Progress on Standardization of Electron Beam Dosimetry. Radiat Phys Chem, 1993, 42: 82
- 张桂芹, 陈云东, 叶宏生, 等 硫酸高铈-硫酸铈剂量计: CN IC-00854, IAE-0131. 北京: 中国核科技报告, 1994

- 3 叶宏生, 陈云东, 张桂芹, 等. 重铬酸钾(银)剂量计. 原子能科学技术, 1994, 28(3): 138
- 4 M D Laughlin WL, Boyd AW, Chadwick KH, et al Dosimetry for Radiation Processing London: Taylor & Francis, 1989
- 5 International Commission on Radiation Units and Measurements Radiation Dosimetry: Electron Beams With Energies Between 1 and 50 MeV: ICRU Report 35, 1984
- 6 JJG 1018-90 使用重铬酸钾(银)剂量计测量 γ 射线水吸收剂量标准方法 1990 14
- 7 JJG 1017-90 使用硫酸铈-亚铈剂量计测量 γ 射线水吸收剂量标准方法 1990 16
- 8 陈云东, 龙红放, 张桂芹, 等. 硫酸亚铁剂量计. 原子能科学技术, 1993, 27(2): 138
- 9 JJG 772-92 电子束辐射源(辐射加工用). 1992 11

DOSE MEASUREMENTS WITH LIQUID CHEMICAL DOSIMETERS FOR ELECTRON BEAMS

Lin Min Ye Hongsheng Lin Jingwen Chen Yundong
Zhang Guiqin Xiao Zhenhong Li Huazhi

(China Institute of Atomic Energy, Beijing, 102413)

ABSTRACT

The liquid chemical dosimeter systems including potassium (silver) dichromate and ceric-cerous sulfate dosimeters are used to measure the absorbed dose for industrial 1- 15 MeV electron beams. The uncertainties are about 4.8 % ($K = 2$). In order to meet the requirements of measuring the absorbed dose for electron beams, a kind of coin-shape dosimeter container is especially designed. The E_p (most probable energy) of the electron beams were calculated by ways of range measurement using the depth-dose distribution curves. The liquid chemical dosimeters are also compared with the water calorimeters made by the China Institute of Engineering Physics from 5- 40 kGy for 4- 12 MeV electron beams. The agreements are better than 5 % at 95 % confidence level.

Key words Liquid chemical dosimeters Coin-shape dosimeters Absorbed dose for electron beams Radiation processing