

用外推电离室绝对测定电子束吸收剂量

李忠英 张海黔

(西南核物理与化学研究所)

本文叙述了用外推电离室法绝对测定电子吸收剂量的原理和技术,给出用此法测定的J-2.5MV静电加速器电子束在几种材料中的吸收剂量及深度剂量的分布、实际射程和剂量场分布。其中模体材料吸收剂量结果总不确定度好于1.7%,和国际上同类测量所给的总不确定度在同一范围。

关键词: 外推电离室 电子束吸收剂量 深度剂量分布 实际射程

一、引 言

近年来,电子束辐射加工技术在国内迅速发展。准确测定电子束吸收剂量,已成为迫切需要解决的问题。吸收剂量的大小和电子束的能量、束流及其分布以及受照材料等因素有关^[1]。一般说来,对不同加速器,即使具有相同的加速器能量 E_a ,在到达受照物体表面时电子束能量 E_0 也是不同的。因而受照材料中的吸收剂量特性往往差别很大,靠控制束流和加速器能量来估计吸收剂量是十分粗略和不可靠的,远远不能满足辐射加工和日常剂量监测的要求。为了给控制电子辐射加工工艺的质量提供技术保证,并为现场监测仪器提供精确的定度标准,我们建立了电子束吸收剂量绝对测量装置——外推电离室。用此装置测定了J-2.5MV静电加速器电子束的吸收剂量。

二、简单原理^[1]

为了测量介质 m 中被研究点 p 处的吸收剂量 D_m ,我们用探测器取代包围该点的小块介质,通常探测器由对辐射敏感的材料 i 和包围它的壁 w 组成(见图1)。当探测器足够小,以至探测器位置的电子注量和存在于 p 点处的未受扰动时介质中的电子注量相同时, D_m 的计算可根据 Bragg-Gray 关系

$$D_m = D_i S_{m,i} \quad (1)$$

式中, D_i 是探测器中辐射敏感材料的吸收剂量, $S_{m,i}$ 是材料 m 和 i 的电子质量碰撞阻止本领比。在实际剂量测定中,探测器不可能足够小,在引入有效测量点 P_{eff} 的概念和电子注量扰动修正因子 $P_{m,i}$ 后,式(1)改写为

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

式中, $\bar{D}_i$ 是材料 i 中的平均吸收剂量, $S_{m,i}$ 是存在于 P_{eff} 点处介质中电子谱未受干扰时材料 m 和 i 的质量碰撞阻止本领比。假定探测器位置次级电子谱完全平衡, $S_{m,i}$ 可以简化为很简单的近似^[2]

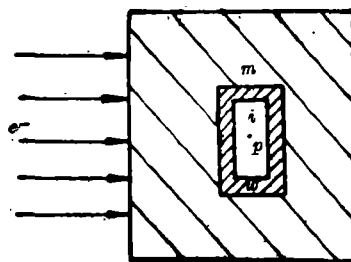


图1 用于吸收剂量测量的探测器示意图
Fig. 1 Schematic representation of a detector for absorbed dose measurements

$$S_{m,i} = [S(\bar{E}_z)/\rho]_{col,m} / [S(\bar{E}_z)/\rho]_{col,i} \quad (3)$$

吸收体深度 Z 处的平均能量 $\bar{E}_z$ 和实际射程 R , 之间存在线性关系^[3]

$$\bar{E}_z = E(1 - Z/R_p) \quad (4)$$

用外推电离室测定吸收剂量时, 材料 i 变成气体 g , 式(2)表示为

$$D_m(P_{eff}) = \bar{D}_g \cdot S_{m,g} \cdot P_{m,g} = (Q_g/\rho_g V_g) \cdot S_{m,g} \cdot P_{m,g} \cdot \bar{W}/e \quad (5)$$

式中, Q_g 是充有密度为 ρ_g 的气体体积 V_g 中所产生的电离电荷; $\bar{W}$ 是该气体中形成一对离子所消耗的平均能量, 对空气为 33.85eV^[4]。

由实验测定电离室收集电荷 Q'_g , 可计算得到 Q_g , 其表达式为

$$Q_g = C_{sc} \cdot C_{sat} \cdot C_{hum} Q'_g \quad (6)$$

式中, C_{sc} 是反散射修正因子; C_{sat} 是收集电流不饱和引入的修正因子; C_{hum} 是空气湿度修正因子。

三、实验设备和方法

1. 辐射场

实验在 J-2.5MV 静电加速器上进行。辐照几何布置参见图 2。实验时加速器高压 2.01 MV, 电子束扫描频率 300Hz, 扫描线圈距窗高度 H 为 110cm。束窗为 200 μ m 厚的铝, 扫描方向 x 轴方向窗长约为 60cm, 宽为 4cm。辐照平面(x, y 平面)距窗约 6cm。电子束经过铝窗和 6cm 空气的衰减到达辐照平面(电离室表面)的能量 $E_0=1.92$ MeV。辐照板可以 1mm/s 的速度沿 y 轴方向来回作匀速运动或静止不动。加速器束流标称值由置于窗口正下方固定位置的铝板收集电流读数给出。吸收剂量测量时, 加速器输出束流 5.8 μ A, 外推电离室置于 x 轴上离窗口中心 8.8cm 处, 测得的结果是辐照板带动电离室穿过电子束一次被测点的累

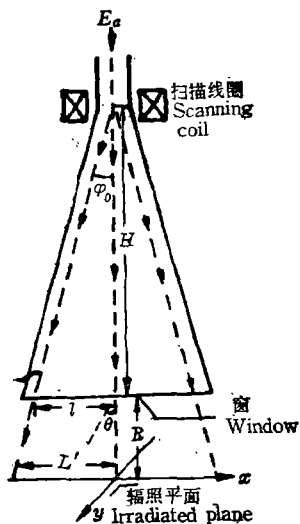


图 2 J-2.5MV 静电加速器辐照

几何布置示意图

Fig. 2 The geometrical arrangement of irradiation with J-2.5MV Van de Graaff accelerator

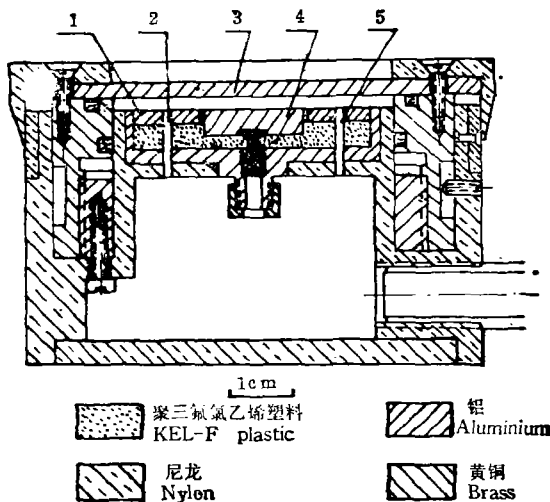


图 3 平板外推电离室结构示意图

1. 保护电极 2. 出气孔 3. 高压极 4. 收集极 5. 进气孔

Fig. 3 The constructional schematic diagram of extrapolation chamber

1. Guard electrode 2. Gas outlet 3. High voltage electrode 4. Collecting electrode 5. Gas inlet

积吸收剂量。

2. 外推电离室

外推电离室由放射医学研究所的 IRM81EXT-A1 铝平板外推电离室根据电子束吸收剂量测量的要求改制而成。图 3 为结构示意图。电离室空腔与大气相通, 收集极和高压极为铝材料, 高压极为直径 68mm 的厚度可变铝片。两极间的螺纹配合可改变极间距离。收集极直径 15mm, 厚 5mm, 与保护环间的绝缘间隙为 0.1mm。测量时收集高压为 $\pm 1000\text{V}$, 极间距离为 1mm, 此时电离室有效收集体积 $V_0 = 0.1791\text{cm}^3$ 。另一电离室置于 X 轴适当位置用于监督加速器输出束流的变化。

3. 主要修正因子的确定方法

(1) 收集体积的修正 有效收集体积由电场分布决定。收集极偏离地电位和边缘电场畸变会使收集体积增大或减小, 给测量结果带来误差。对此, 分别引入收集极偏离地电位修正因子 C_{pot} 和电场不均匀性修正因子 C_{field} 。实验采用了汤姆逊补偿法测量电荷, 电离室收集极始终保持地电位, 从而使 $C_{pot} = 1$ 加正负高压时电场畸变导致收集体积变化的大小相等, 作用相反。因此 C_{field} 可由加正负高压时的收集电荷 Q'_g^+ 、 Q'_g^- 计算得到

$$C_{field} = (Q'_g^+ + Q'_g^-) / 2Q'_g \quad (7)$$

式(7)对通常用正高压测量收集电荷的情况适用。

(2) 电子注量扰动修正因子 $P_{m,g}$ 改变外推电离室的极间距离, 测出空腔体积 V_0 和单位体积电离电荷 J_0 的关系曲线, 外推得出 V_0 为零时的单位体积电离电荷 $(J_0)_0$, $P_{m,g}$ 即可由下式计算得出

$$P_{m,g} = (J_0)_0 / J_0 \quad (8)$$

实验结果表明, 极间距离 2mm 以下时, 用空腔取代介质引起的电子注量扰动可以忽略不计, 此时 $P_{m,g} = 1$ 。

(3) 反散射修正因子 C_{sc} 如果探测器和吸收体材料不同, 由于探测器的引入, 被测点电子反散射发生变化, 必须引入修正。外推电离室电极材料为铝, 我们选择相同的吸收体材料, 电离室引入被测点电子反散射情况不变, 因此 $C_{sc} = 1$, 避免了此项修正。

(4) 不饱和修正因子 C_{sat} 由于电离室收集高压不足而产生的复合损失, 通常用不饱和修正因子 C_{sat} 修正。常压下占优势的复合是一般复合。发生在单个电子径迹中的初始复合是不重要的, 一般不予考虑。对本实验中扫描频率为 300Hz 的电子束, 测量 C_{sat} 时首先需要确定的是扫描束是“脉冲”的还是“稳态”的。若扫描一次电子在电离室内的持续时间比离子平均渡越时间长得多, 辐射是“稳态”的, 反之则是“脉冲”的^[5]。计算结果表明, 使用 $\pm 1000\text{V}$ 收集高压时, 扫描一次辐射束在电离室收集体积内持续时间比离子平均渡越时间长得多。由此断定, 电子束是“稳态”的, 其收集电流 I 和收集高压 V 满足以下关系^[6]

$$1/I = 1/I_s + 1/V^2 \quad (9)$$

式中, I_s 为饱和收集电流。

测出不同收集高压时的收集电流, 用(9)式作直线拟合, 最后得出 $\pm 1000\text{V}$ 时 C_{sat} 的十三次实验结果平均值为 1.00117 ± 0.00032 。

(5) 湿度修正因子 C_{hum} 对空腔电离室, 主要考虑干燥空气和潮湿空气碰撞阻止本领比 S 和 $\bar{W}$ 值差别引入的修正, 计算公式为

$$C_{hum} = I_a / I_h = (\bar{W}_h / \bar{W}_a) \cdot S_a / S_h \quad (10)$$

式中， a 和 h 分别代表干燥空气和相对湿度为 h 的空气。利用文献[4，7]的数据和曲线可由式(10)计算出 C_{hum} 的值。

四、结 果

1. 铝中吸收剂量及其深度剂量分布和实际射程

辐照平面 x 轴上一点的铝中吸收剂量深度分布的四次实验结果平均值标绘的吸收剂量随深度变化曲线示于图 4。表面吸收剂量由深度小于 0.0803g/cm^2 的测量结果拟合的直线外推得到。最后得出深度剂量最大值出现在 $Z=0.3442\text{g/cm}^2$ 处。

在 $E_e=2.01\text{MeV}$ 、输出束流 $5.8\mu\text{A}$ 的条件下，置于距窗 6cm 的辐照平面 x 轴坐标 8.8cm 处的外推电离室穿过电子束一次，归一于加速器束流 $1\mu\text{A}$ 时，铝中最大深度吸收剂量实验结果为 496.7Gy (见表 1)。图 4 曲线线性部分外推线与韧致辐射本底延长线交点在横轴上的投影得出 $E_0=1.92\text{MeV}$ 电子束在铝中实际射程 $R_p=1.050\text{g/cm}^2$ 。由图 4 可见，韧致辐射本底可忽略不计。

2. 扫描方向剂量场分布测量结果

辐照平面内扫描方向剂量场分布的三次实验结果平均值标绘的扫描方向剂量分布曲线见图 5。由于扫描是对称的，分布曲线应对原点对称。由图 5 可见，扫描方向 $|x|\leq 24.5\text{cm}$ 时，在 $\pm 5\%$ 以内可认为是均匀剂量场。

3. 由实验结果换算得到几种物质的最大深度剂量及实际射程

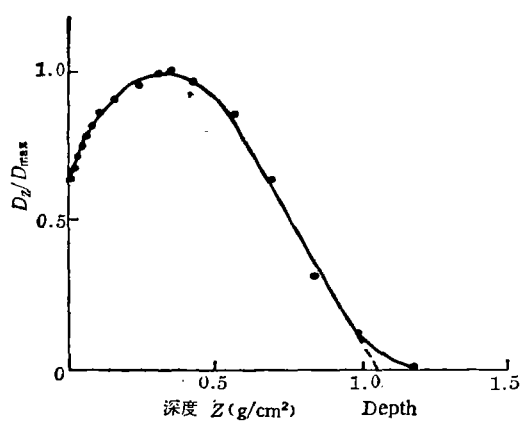


图 4 铝中吸收剂量随深度变化曲线
Fig.4 Relative depth absocbed dose curve in alu-
minium for eletrons with initial energy 1.92MeV

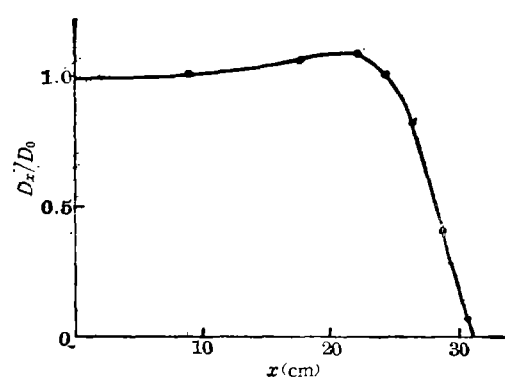


图 5 扫描方向吸收剂量分布曲线
Fig. 5 Relative absorbed dose
curve along the scanner axis

表 1 几种材料中最大深度吸收剂量测量和计算结果

Table 1 The experimental results of the maximum depth absorbed dose in several materials

材 料 Materials	铝 Aluminium	碳 Carbon	聚乙烯 Polyethy- lene	水 Water	聚苯乙烯 Polysty- rene	有机玻璃 Lucite	蒽 Anthra- cene	肌肉 Muscle
最大吸收剂量深度(g/cm²) Maximum absorbed dose depth	0.3442	0.3109	0.2724	0.2774	0.2848	0.2890	0.2955	0.2773
最大深度吸收剂量D _{max} (Gy) Maximum depth absorbed dose D _{max}	496.7	544.4	648.3	622.8	603.7	602.0	592.8	616.0

表 2 $E_0=1.92\text{MeV}$ 电子束的实际射程 R_p
Table 2 The practical range for 1.92MeV electron beam

材料 Materials	铝 Aluminium	碳 Carbon	水 Water	聚乙烯 Polyethylene	聚苯乙烯 Polystyrene	有机玻璃 Lucite	萘 Anthracene	肌肉 Muscle
$R_p(\text{g/cm}^2)$	1.050	0.947	0.845	0.830	0.868	0.881	0.901	0.845

在次级电子平衡条件下,对于材料 i 和 m 中 $\bar{E}_x$ 相同的点所对应的深度,可利用 Bragg-Gray 关系式(1)由 D_i 计算出 D_m 。用此方法由铝中吸收剂量结果换算得到了相同条件下碳、水、聚乙烯、聚苯乙烯、有机玻璃、萘和肌肉等七种物质的最大深度吸收剂量,并用计算得到的深度剂量分布曲线推出了这些材料中的实际射程。结果分别列于表 1 和表 2。

表 1 中,铝为实验值,铝中该深度处空气吸收剂量实验结果为 561.8Gy ;表中所列数据是归一于加速器束流 $1\mu\text{A}$ 时,辐照板带动被测点穿过电子束一次时材料中累积最大深度吸收剂量。

4. 总不确定度估计

受照介质 m 的吸收剂量 D_m 测量结果的不确定度估计如下:收集极有效面积 $a=0.1$;极间距离 $d=0.2$;收集极偏离地电位修正因子 $C_{pot}=0.01$;电场不均匀修正因子 $C_{field}=0.01$;补偿电容 $C_0=0.1$;补偿电压 $V_0=0.03$;不饱和修正因子 $C_{sat}=0.09$;湿度修正因子 $C_{hum}=0.01$;空气中产生一对离子需要的平均能量 $\bar{W}=0.5$;阻止本领比 $S_{m,q}=1.5$;扰动修正因子 $P_{m,q}=0.40$ 。各项不确定度以均方根合成得到 D_m 总不确定度为 1.7% ,置信概率 99% 。

五、讨 论

1. $E_0=1.92\text{MeV}$ 的电子束能量较低,在物质中射程短。由于周围散射的影响,很容易给测量结果引入大的误差。为提高测量精度,本工作在外推电离室结构和实验设计等方面作了仔细的考虑。

(1) 电离室结构 对 J-2.5MV 静电加速器束窗和空气散射计算结果表明,电子束到达吸收体表面时平均散射角^[8]约为 18° ,如靠近收集体积有吸收散射物质,定会引入大的误差。收集极周围是与之共面的宽阔的保护环。高压极直径相对于电子射程和小的中央收集极可认为足够大,从而避免了电离室本身的散射和吸收修正。选择 1mm 的极间距离避免了空腔存在对电子谱的扰动以及由此引入的修正和误差。另外,选择铝作为厚 5mm 的收集极和吸收体的材料,给 1.92MeV 电子束提供了无限厚反散射层,避免了应用反散射修正引入的误差。实验中把改变高压极厚度看作将外推电离室置于吸收体中不同深度,避免了电子束发散和电离室在吸收体中位置不重复引入的修正和误差。

(2) 实验设计 实验设计成电离室运动穿过电子束,避免了电离室长时间受辐照发热给计算空腔中空气质量引入的误差,也不必考虑有效测量点 P_{eff} 偏离 x 轴引入的误差,模拟了实际辐照的条件,而且对探测器空间分辨率没有高的要求。实验中采用补偿法测量电荷,避免了收集极偏离地电位而引入的收集体积修正。绝对测量吸收剂量时,使用等于最大剂量深度的高压极厚度,足够厚的电极能避免静电引力引起电极变形使收集体积发生变化。而且,该深度处深度剂量分布曲线处于极大值,梯度最小,对吸收剂量测量引入误差最小。

2. 外推电离室测定 D_m 的总不确定度来源于收集体积电荷测量、阻止本领比和扰动修正。其中占优势的是阻止本领比(约 1.5%)。本工作给出 D_m 总不确定度与国际同类测量所

给总不确定度在同一范围^[1]。要进一步提高外推电离室测定吸收剂量的不确定度, 关键是降低物理参量引入的不确定度, 另外还要注意减小探测器对电子谱的扰动。

3. 本工作所给结果和用化学法定度的薄膜剂量计^[9]测量结果符合很好。两种方法得到的聚乙烯中吸收剂量结果及其偏差列于表3。由表3可见, 最大深度剂量 $D_{\max}$ 在1.4%以内符合, 实际射程 R_p 测量结果完全一致。实验得到的扫描方向剂量场分布曲线和文献[8]所给结果符合很好。

表3 与薄膜剂量计测量结果比较

Table 3 A comparison with the experimental results obtained with a film dosimeter

方法 Method	本工作 This work	薄膜剂量计 Film dosimeter	相对偏差(%) Relative deviation
$D_{\max}(\text{Gy})$	648.3	639.2	1.4
$R_p(\text{g/cm}^2)$	0.830	0.830	0

4. 本工作给出了J-2.5MV静电加速器和相同辐射质的电子束在各种材料中准确的吸收剂量数据。为不同辐射质的电子束吸收剂量测量提供了精确的定度标准。测量时只要使用经本工作测定的J-2.5MV静电加速器参考剂量场定度的现场剂量计直接进行监测, 即可获得结果, 不再需要进行复杂的绝对测量。

本所204室提供了实验条件, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] ICRU Report, 35, 1984.
- [2] D. Harder, Symposium on high-energy electrons-Montreux, 1964, p.40.
- [3] D. Harder, *ibid*, p.260.
- [4] ICRU Report, 31, 1979.
- [5] ICRU Report, 34, 1982.
- [6] J. R. Greening, *Phys. Med. Biol.*, 9 (1964), 143
- [7] ICRU Report, 37, 1984.
- [8] R. Janka, *et al.*, *Radiat. Phys. Chem.*, 18 (1981), 927
- [9] 张子鸾等, 科学实验与技术, 6(1988), 40.

Absolute determination of electron absorbed dose by an extrapolation chamber

Li Zhongying Zhang Haiqian

(Southwest Institute of Nuclear Physics and Chemistry)

Abstract

This paper describes the principle and technology of absolute determination of electron absorbed dose by an extrapolation chamber. The absorbed dose, its distributions in depth and along scanning direction and practical ranges in several materials for electron beams of the J-2.5 MV Van de Graaff accelerator, were measured. The estimated uncertainty of the absorbed dose in medium m was 1.7%, falling in the range reported by similar works of the world.

Keywords: Extrapolation chamber Absorbed dose of electron beam
Dose distribution in depth Practical range

(1988年9月27日收到)