

用化学方法测量 J-2.5 M V 质子静电加速器电子的吸收剂量

张子骞

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 成都, 610003)

用硫酸亚铁剂量计和辐射变色薄膜剂量计相结合的化学方法, 测定了水和聚乙烯材料中电子的吸收剂量、深度剂量分布和实际射程。测量结果和外推电离室的测量结果进行了比较, 水和聚乙烯中电子最大吸收剂量的测量值在 2 % 范围内一致。本方法测量水的吸收剂量总不确定度为 2.1 %, 测量聚乙烯和其它物质的吸收剂量总不确定度为 6.5 %, 置信概率为 95%。

关键词 电子束吸收剂量 化学剂量测量法 硫酸亚铁剂量计 辐射变色薄膜剂量计

中图法分类号 R 144. 1

近年来, 我国高能电子辐射加工发展迅速, 特别是热缩制品的生产正在进入大规模工业生产的新时期。加工过程中产品质量的控制, 具有重大的经济意义。辐射加工中的产品质量控制, 实质上就是对产品吸收剂量的控制。因此, 加工过程中对电子束吸收剂量的测量显得十分重要。

用于电子吸收剂量测量的方法很多, 有电离法、量热法、化学法和固体法。比较起来, 化学法较为简单。现在广泛使用的硫酸亚铁剂量计, 对不同品质的电离辐射的响应, 已经做了很多工作, 有了比较详尽的了解。它对高能电子的 G 值, 也已作了精确测定, 可以用它来准确测量电子的吸收剂量^[1]。

本工作使用硫酸亚铁剂量计和辐射变色薄膜剂量计相结合的方法, 直接测量被测物质中吸收剂量的分布。

1 方法原理

1.1 电子剂量测定原理

为了测量介质 m 中感兴趣的 P 点处的吸收剂量 D_m , 就需要探测器取代包围该点的小块介质。探测器通常由对辐射敏感的材料 i 构成, 多数场合还由包围敏感材料的壁、容器或外壳组成。探测器的尺寸应该足够小, 以给出测量所要求的空间分辨率, 使其对剂量场影响减少到最低限度。原则上, 探测器的尺寸应选择测量所要求的灵敏度和精度范围内。探测器尺寸足

张子骞: 男, 58 岁, 辐射防护与环境监测专业, 副研究员

收稿日期: 1997-01-16 收到修改稿日期: 1997-04-21

够小,以致探测器位置处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, Bragg-Gray 关系

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

方可用于计算介质 m 中 P 点的吸收剂量 D_m 。

式(1)中: D_i 为探测器中辐射敏感材料的吸收剂量; $S_{m,i}$ 为材料 m 和 i 中的电子质量碰撞阻止本领比。

实际上, 探测器制作得再小总是有一定尺度的。因此, 引入有效测量点 P_{eff} 的概念和电子注量扰动修正因子 $P_{m,i}$, 则式(1)可写为

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

式中: \bar{D}_i 是辐射敏感的材料中的平均吸收剂量; $S_{m,i}$ 是存在于 P_{eff} 点处电子谱未受扰动时介质材料 m 和 i 中的质量碰撞阻止本领比。

假定探测器位置处次级电子谱完全进入平衡状态, $S_{m,i}$ 便近似简化^[2,3]为

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

吸收体深度 z 处的平均能量 \bar{E}_z 可由表面能量 E_0 精确求得, 即

$$\bar{E}_z = (1 - z/R_T) E_0 \quad (4)$$

式中: R_T 为电子在吸收体材料中的实际射程。

计算中使用 ICRU 第 37 号报告^[4]推荐的阻止本领。

2.2 化学方法

1) 硫酸亚铁剂量计

化学方法系指使用硫酸亚铁剂量计测量水的平均吸收剂量。

标准的硫酸亚铁溶液组成为: $1 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 硫酸亚铁或硫酸亚铁铵; $1 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 氯化钠; $4 \times 10^{-1} \text{ mol/L}$ 硫酸。硫酸亚铁溶液在射线的作用下, 如果满足某些条件^[5], 辐照后二价铁离子氧化成三价铁离子的量直接和吸收剂量成正比。用分光光度计测量产生的三价铁离子的量, 根据下式, 可以测出硫酸亚铁溶液的平均吸收剂量 D_i , 即

$$D_i = \frac{\Delta A_t}{\rho l \epsilon_{m,t} G_t} \quad (5)$$

这里: D_i 为剂量计溶液的平均吸收剂量; ΔA_t 为分光光度测量期间温度 t 时辐射引起的光吸收的增量; ρ 为剂量计溶液的密度; l 为比色池光程的长度; $\epsilon_{m,t}$ 为温度 t 时铁离子线性摩尔吸收系数; G_t 为在剂量 D_i 和辐射温度 t 下铁离子的辐射化学产额。习惯上, 辐射温度和测量温度均选为 25 。

2) 深度剂量分布和电子的实际射程

硫酸亚铁剂量计只能给出电子在水中的平均吸收剂量, 而辐射变色薄膜剂量计可以方便地测出物质的相对深度剂量分布, 并由此推导出电子的实际射程。同时用以上 2 种剂量计测量, 可以求得介质中深度剂量分布的绝对值。测出穿过吸收体中不同深度 z 的电子数 N, 将测得值作为 z 的函数作图, 电子的实际射程则定义为此 N-z 曲线的直线下降部分的外推线和 X 射线所产生的本底外推线相交点处的深度(图 1)。实际测量中用深度剂量曲线代替^[6]。假定被测介质水的韧致辐射和反散射的差别可以忽略, 那么在 2 种介质中全吸收电子能量应该相等, 由此可得到如下方程:

$$\int_0^{z_m} D_m(z) dz = \bar{D} z_i \quad (6)$$

式中: $D_m(z)$ 为介质中深度 z 处的吸收剂量; z_m, z_i 分别为介质和水的深度。为保证电子能量全部被吸收, 该厚度应略大于电子的实际射程。根据方程 (6), 可由测得的硫酸亚铁溶液的平均吸收剂量 \bar{D}_i 和薄膜剂量计测得的待测介质中相对深度剂量分布求得该介质中不同深度吸收剂量的绝对值。

实验中选择聚乙烯为被测物质。

由于电子束随着吸收体中深度增大而发散, 在进行深度剂量分布测量时, 对深测器测量结果 J_g 必须作如下修正, 即

$$J_g = J_g \left(\frac{S-z}{S} \right)^2 \quad (7)$$

式中: S 为吸收体表面至扫描线圈的距离。

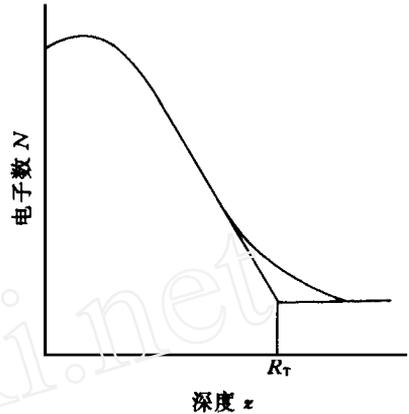


图 1 电子的实际射程 R_T 示意图
Fig 1 Real range of electrons R_T

3 电子照射与剂量测量

3.1 J-2.5 MV 质子静电加速器的有关参数

J-2.5 MV 静电加速器加速电子的有关运行参数如下:

加速电压 $2.01(1 \pm 11\%)$ MV; 扫描频率 300 Hz; 扫描线圈至扫描窗距离 $H = 110$ mm; 窗厚度 (铝) $200 \mu\text{m}$; 扫描窗面积 $600 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$; 照射板运行速度 0.1 cm/s 。照射的几何布置示于图 2。照射板沿照射平面 y 方向反复运动。

3.2 硫酸亚铁剂量计的照射

将配制好的硫酸亚铁溶液装于规格为 $\phi 25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ 的玻璃称量瓶中, 置于照射平面中 x 轴上距坐标原点 8.8 cm 处。液面距电子出射窗 6 cm 。从加速器射出能量为 2.01 MeV 的电子束经铝窗和空气到达吸收体表面时能量为 1.92 MeV 。保持液面深度 1 cm , 这一深度足以使电子能量全部被吸收。照射时加速器标称束流 $1 \mu\text{A}$, 照射板运动使样品穿过电子束 1 次即完成 1 次照射。

3.3 聚乙烯薄片和薄膜剂量计的照射

照射用聚乙烯薄片厚 0.2 mm 、长 9 cm 、宽 6 cm , 密度为 0.9475 g/cm^3 , 共计 50 片。每 2 片聚乙烯之间, 放置 1 片长 2 cm 、宽 1 cm 、厚度 0.05 mm 的辐射变色薄膜, 型号为 67-20, 美国远西公司生产。放好之后, 用中空的铝框夹紧, 其总厚度为 1.1 cm , 大于电子在聚乙烯中的全吸收厚度。

照射的几何条件与硫酸亚铁剂量计照射时相同。为了提高照射剂量, 适当地提高电子束流, 以适应薄膜剂量计的测量范围。

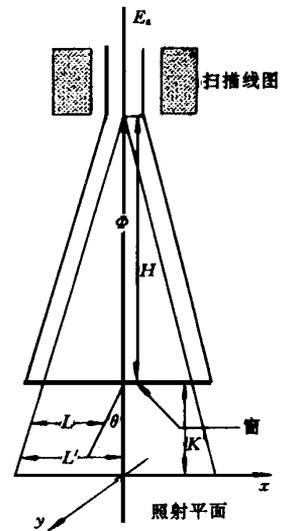


图 2 J-2.5 MV 静电加速器照射几何布置图

Fig 2 Geomertic arrangement of electron radiation

3.4 加速器电子束流的监测

为消除加速器输出束流波动, 将外推电离室或法拉第筒放置在 x 轴上适当位置, 通过测量收集电荷来监视电子束流的变化。

3.5 剂量计读数的测量

辐照后的硫酸亚铁溶液和辐射变色薄膜用分光光度计测量它们的光密度变化。

测量三价铁离子浓度时, 波长为 303 nm, 比色池长 1 cm, G_{25} 取 25 时的值, 采用 ICRU 第 35 号报告^[1]的推荐值 $352 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{Gy}^{-1}$ 。对任意温度, 可用下式修正

$$G_{m, G_t} = G_{m, 25} G_{25} [1 + K_1(25 - t)] \times [1 + K_2(25 - t)] \quad (8)$$

温度系数 K_1 近似等于 0.007 ; $K_2 = 0.0015$ ^[7]。

薄膜剂量计测量时波长为 600 nm。测量全部在英国 Pye Unicam 公司生产的 PU 8800/03 分光光度计上进行。

4 测量结果

4.1 水的平均吸收剂量

电子束流为 $1 \mu\text{A}$, 照射板以 1 mm/s 的速度运动, 置于辐照平面内 x 轴坐标中心 8.8 cm 处的被测硫酸亚铁溶液样品穿过电子束 1 次, 测量得到的 45 个样品光密度平均值为 0.992, 相应水溶液的平均吸收剂量 $D_i = 382.4 \text{ Gy}$ 。

4.2 聚乙烯材料中的相对深度剂量分布

图 3 示出用薄膜剂量计测量得到的聚乙烯材料中的相对深度剂量 (D_z/D_{\max}) 分布曲线。 D_z 和 D_{\max} 分别表示深度 z 处的吸收剂量和最大深度吸收剂量, D_z/D_{\max} 为 5 次实验结果的平均值。从图 3 可见, D_{\max} 位于质量厚度为 0.3093 g/cm^2 处, 由曲线线性下降部分外推得出的 1.92 MeV 电子在聚乙烯材料中的实际射程为 0.830 g/cm^2 。

4.3 水和聚乙烯的最大深度吸收剂量

对材料 i 和 m 中能谱相同的点所对应的深度, 利用空腔理论表达式 (1), 可由 D_i 计算出 D_m 。由于实验中满足次级电子平衡条件, 能谱相同的要求可简化为平均能量 \bar{E}_z 相同。利用式 (4) 计算得到聚乙烯和水中 \bar{E}_z 相同的各组对应深度, 就可

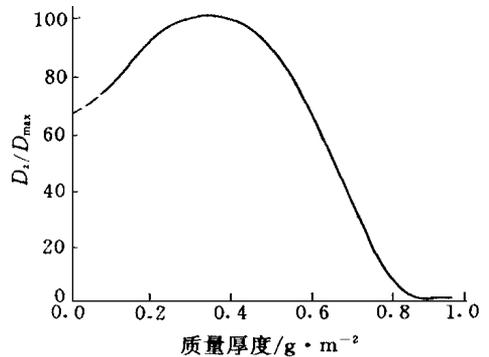


图 3 聚乙烯电子的相对剂量分布
Fig 3 Relative dose distribution along the depth of the polyethylene

表 1 水和聚乙烯中的最大剂量深度和最大深度剂量

Table 1 Depth of maximum dose and dose at maximum depth in water and polyethylene

物质	最大剂量深度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$	最大深度剂量/Gy
水	0.3148	609.5
聚乙烯	0.3093	639.2

利用式 (1) 由聚乙烯中的吸收剂量推算出水中的吸收剂量。聚乙烯中的吸收剂量利用式 (6) 由

硫酸亚铁溶液的平均剂量推出。用此方法得出的水和聚乙烯中的最大剂量深度和最大深度剂量在表 1 中列出。

4.4 总不确定度估计

电子在材料中吸收剂量测定的各项误差来源列于表 3。其中,对结果总不确定度贡献最大的是加速器束流的随机性。电子在材料中吸收剂量测量结果的总不确定度为 6.5%,置信概率为 95%。

5 讨论

1) 和外推电离室测量结果的比较 化学方法和外推电离室法^[8]测得的水和聚乙烯材料中最大深度剂量结果列于表 3。

表 2 化学方法测量电子吸收剂量的不确定度

Table 2 Uncertainty of chemical method	
误差来源	不确定度/%
硫酸亚铁测量水中的吸收剂量	2.1
加速器束流的随机不确定度	4.6
壁效应修正	2.5
阻止本领比	1.5
薄膜剂量剂光密度测量	2.1
水的实际射程	2.0
方和根合成总不确定度	6.5

表 3 化学法和外推电离室测量结果的比较

Table 3 Chemical method results compared with ionization chamber

物质	最大深度剂量/Gy		相对偏差/%
	化学法	外推电离室法	
水	609.5	622.8	- 2.1
聚乙烯	639.2	648.3	- 1.4

从表 3 可看出,2 种方法测得的水和聚乙烯中的最大深度剂量在 2% 范围内很好一致。

2) 壁效应修正 从样品辐射示意图(图 4)可见,铝窗和空气的散射使电子以一定的平均散射角 θ 入射到样品上。由于容器壁有一定厚度和高度,必须对壁效应作出修正。修正量的大小和散射角 θ 及容器的几何形状和壁厚有关。若以 E 表示散射角为 θ 时溶液吸收的能量,垂直入射时溶液吸收能量的表达式则为:

$$E = E + \Delta E_1 + \Delta E_2 - \Delta E_3 \quad (9)$$

式中: ΔE_1 为对溶液之上器壁中电子能量损失的修正; ΔE_2 为对电子部分量离开溶液的修正; ΔE_3 为对不该进入溶液的那一部分电子能量的修正。利用经验公式^[9]计算出本实验中平均散射角为 18° 。利用壁的成分和几何参数计算得到壁效应的修正因子为 1.416。

本工作得到李中英和彭晓刚同志及本所 204 室加速器组的大力协助,作者表示衷心感谢。

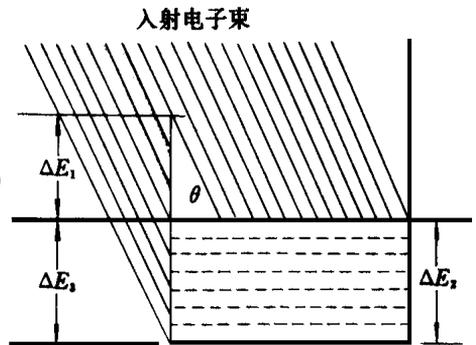


图 4 硫酸亚铁样品照射示意图

Fig. 4 Schematic diagram of electron radiation for ferrous sulphate sample

参 考 文 献

- 1 ICRU. Radiation Dosimetry: Electron Beams With Energies Between 1 and 50 MeV: ICRU Report 35 Vienna: International Commission on Radiation Unit and Measurement, 1984
- 2 Herder D. Berchnung der Energiesosis aus Ionisationsmessungen bei Sekundärelektronen-Gleichgewicht Symposium on High-Energy Electron Springer-verlag, Berlin 1965 40
- 3 Harder D. Energiespektren Schneller Elektronen in Verschiedene Tiefen. Symposium on High-electrons Springer-verlag, Berlin 1965 260
- 4 ICRU. Stopping Powers for Electrons and Positron: Vienna: International Commission on Radiation Unit and Measurement, 1984
- 5 ICRU. Radiation Dosimetry: X-rays and Gamma Rays With Maximum Photon Energies Between 0.6 and 50 MeV: ICRU Report 14 Vienna: International Commission on Radiation Unit and Measurement, 1969
- 6 ICRU. Linear Energy Transfer: ICRU Report 16 Vienna: International Commission on Radiation Unit and Measurement, 1970
- 7 Pettersson C. Hettinger G. Dosimetry of High Energy Electron Radiation Based on the Ferrous Sulfate Dosimeter Acta Radiol, 1967, 6: 160
- 8 李中英, 张海黔 用外推电离室测定电子束吸收剂量 中国工程物理研究院核物理与化学研究所资料 1989
- 9 Tanaka R, Sunaga H, Yotsumoto K, et al Dose Evaluation in Electron Beam Processing Radiat Phys Chem, 1981, 10(5—6): 927.

MEASUREMENT OF ELECTRON ABSORBED DOSE FOR J-2.5 MV PROTON ACCELERATOR USING CHEMICAL METHOD

Zhang Ziqian

*(Institute of Nuclear Physics and Chemistry,
China Academy of Engineering Physics, Chengdu, 610003)*

ABSTRACT

The ferrous sulphate dosimeter combined with the radiochromic film dosimeter, the electron absorbed dose is measured as well as its depth dose distribution and the actual range in water and polyethylene. The maximum absorbed doses measured in water and polyethylene are compared with those obtained with extrapolation ionization chamber, and the results of the two methods are agreed within 2%. The total uncertainty of absorbed dose in water, polyethylene and other materials are 2.1% and 6.5%, respectively. The confident level is not less than 95%.

Key words Absorbed dose of electron beam Chemical dosimetry Ferrous sulphate dosimeter Radiochromic film dosimeter