

^{60}Co 单板源剂量场分布经验计算公式的建立

曾凡松 伍晓利 李晓燕 俞祥忠 安友 李宗军 孙国芳 杨桂霞 李磊

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所 绵阳 621900)

摘要 为使工业 ^{60}Co 单板源更好地为核电、航天等部门使用的材料、电子元器件抗辐射性能研究提供辐照技术服务, 对本辐射场进行了以 10 cm 为单位、理想空间中剂量场分布的理论计算和实际分布的实验测量, 获得散射吸收因子为 0.86, 据此建立了经验计算公式, 给出了测量数据的不确定度, 对实验结果进行了讨论。

关键词 ^{60}Co 单板源, 剂量场, 吸收剂量率, 经验计算公式

中图分类号 O571, O4.34, N37

随着我国经济社会的进步和发展, 新材料开发、航天与核电站用材料和器件抗辐射实验考核的需求, 拓展了工业 ^{60}Co 放射源的应用, 对工业 ^{60}Co 单板源辐射场剂量分布提出了更高的要求。一方面要求准确知晓辐射场空间任意点的吸收剂量率, 从而获得其它相关物理量如注量率、照射量等^[1]; 另一方面需要对源棒位置进行调整, 以获得特定的(一般是均匀区域比较大的)等剂量面用于大尺度样品的辐照。

由于辐照室内空间环境较为复杂, 难以通过简单的理论计算来获得剂量率实际的空间分布, 但可以通过将理论计算值与实际测量值进行比较, 得到两者之间差异的常数或函数, 从而获得剂量场空间分布的经验计算公式。本课题通过计算获得理想空间(即没有任何散射、吸收的空间)中等剂量面上点的空间坐标, 并据此在对应点上布放重铬酸银剂量计进行实际剂量测量, 然后对理论计算数据与实测数据进行比较分析, 确定所选等剂量面的散射吸收系数(常数或函数), 最终确定与本辐射场实际剂量场基本相符且普适的经验公式, 为开展研究工作和辐照实验提供理论指导。

1 理想空间中工业 ^{60}Co 单板源剂量场分布的理论计算

1.1 坐标系的建立

以源板的中心为原点建立空间坐标系, 定义: 通过原点沿源板水平方向为 x 轴, 向右为正; 通过原点沿源板铅直方向为 y 轴, 向上为正; 通过原点垂直于源板方向为 z 轴。源板上特定的某根源中心的坐标为 (x_i, y_i) , 空间某点 P 的坐标为 (x, y, z) 。

1.2 基本公式

根据定义, 在空间某处有 γ 射线点源时, 待测点 P 处的吸收剂量率公式为^[2,3]:

$$D(p) = k \times \varphi \times E \times (\mu_{\text{en}}/\rho) \quad (1)$$

式中, $D(p)$ 为吸收剂量率, $\text{Gy} \cdot \text{s}^{-1}$; k 为单位换算系数, 1.6×10^{-10} ; φ 为 γ 射线光子注量率, $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; E 为 γ 射线光子能量, 对 ^{60}Co 源取平均能量 1.25 MeV; μ_{en}/ρ 为物质质量能量吸收系数, cm^2/g 。

1.3 线源注量率的计算

源的长度为 L , 源上端的坐标: $(x_i, y_i + L/2)$; 中心 M 的坐标: (x_i, y_i) ; 下端的坐标: $(x_i, y_i - L/2)$, 见图 1。

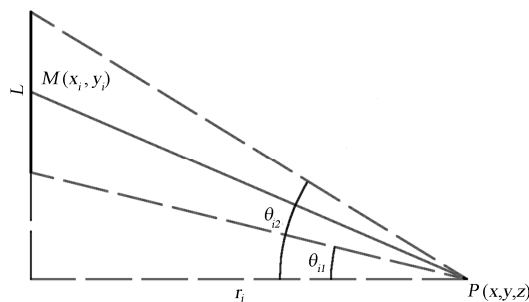


Fig.1 Schematic diagram of linear source and space point

如源活度为均匀分布, 且待测点到源的距离远大于源的直径, 则第 i 根源在 P 点产生的注量率为:

$$\varphi_i = A_i \times (\theta_{i2} - \theta_{i1}) / (4 \times \pi \times r_i \times L) \quad (2)$$

式中, A_i 为线源的全长活度, Bq; $r_{i2} = (x - x_i)^2 + (z - z_i)^2$ 为待测量点 P 到线源的垂直距离, cm; L 为线源的活性区长度, cm; $\theta_{i2} = \arctan [(y_i - y + L/2) / r_i]$ 为从

第一作者: 曾凡松, 男, 1958 年 11 月出生, 1982 年在南京大学获理学学士学位(原子核物理专业), 核辐射工艺专业, 高级工程师

Email: skyhappier@163.com

收稿日期: 初稿 2011-10-26, 修回 2012-01-10

待测积累点 P 与线源垂线算起到线源上端 ($x_i, y_i+L/2$) 的张角 (顺时针为正), 弧度 (rad); $\theta_{i2}=\arctan[(y_i-y-L/2)/r_i]$ 为从待测点 P 与线源垂线到线源下端 ($x_i, y_i-L/2$) 所张角的 (顺时针为正), 弧度 (rad)。

1.4 理想空间的计算公式

假设板源处于无限空间, 源架、护源罩及其它设施对 γ 射线不屏蔽、不吸收, 每根源发出的 γ 射线在空间某点 P 的作用互不相干, 则该点的吸收剂量率应是各源在该点吸收剂量率的线性叠加。设第 i 根源对 P 点吸收剂量率的贡献为 $D_i(p)$, 利用公式 (1), 则有:

$$D(p)=\sum D_i(p) \quad (3)$$

$$D_i(p)=k \times \varphi \times E \times (\mu_{\text{en}}/\rho) \times A_i \times (\theta_{i2}-\theta_{i1}) / (4 \times \pi \times r_i \times L) \quad (4)$$

式中, μ_{en}/ρ —取水的能量吸收系数为 $0.0296 \text{ cm}^2/\text{g}$; 所以:

$$D(p)=8.5865 \times 60 \times \sum [A_i \times (\theta_{i2}-\theta_{i1}) / r_i] \quad (5)$$

式中, $A_i=A_{i0} \times \exp[-d \times 0.693 / (5.27 \times 365)]$, d 为自该源活度测量日至当前活度计算日所经历的天数。

1.5 编制计算程序

应用 Qbasic 语言对理想空间单板源吸收剂量

率计算公式 (5) 进行简易计算程序编制。

2 实验设计和准备

2.1 基本思想

由于散射和吸收因素的存在, 钴源空间剂量场任意点的剂量率应为:

$$D_{\text{calculated}}=F \cdot D_{\text{ideal space}} \quad (6)$$

式中, $D_{\text{calculated}}$ 为考虑散射和吸收后的计算值; F 为散射、吸收系数 (常数或函数); $D_{\text{ideal space}}$ 为理想空间计算值。实际测量的 D_{measured} 在误差范围内与 $D_{\text{calculated}}$ 一致, 即

$$D_{\text{measured}}=F \cdot D_{\text{ideal space}} \quad (7)$$

式中, D_{measured} 为实验测量值。从而

$$F=D_{\text{measured}}/D_{\text{ideal space}} \quad (8)$$

通过计算得到 $D_{\text{ideal space}}$, 通过实验测量得到 D_{measured} , 由 (8) 式即可获得 F 。

2.2 理论计算

利用理想空间单板源吸收剂量率简易计算程序进行计算, 计算 $x=0, y=0$ 时 $z=30, 35-105, 115 \text{ cm}$ 时的剂量率值。计算结果见表 1。

Table 1 The calculated results of dose rate of 10 points in the z axis

Z axis intercept/cm	30	35	45	55	65	75	85	95	105	115
Dose rate/Gy·min ⁻¹	80.0	73.6	62.8	54.0	46.7	40.6	35.4	31.3	27.3	24.2

将 x, y 轴从坐标原点开始以 10 cm 单位建立测量网络, x 轴从 -12 到 12 , y 轴从 -8 到 9 , 将所构成的 450 个交叉点的 x, y 值及目标曲面的剂量率值输入计算程序, 算出对应的 z 值。其它等剂量面的 z 值用同样方法确定, 共计算了 4400 个 z 值。由于数

据量庞大, 限于篇幅, 这里仅给出 $y=0$ 和 $x=0$ 两个面上等剂量线的图示比较 (见图 2 和图 3)。为方便叙述, 定义 $z=30, 35-105, 115 \text{ cm}$ 所对应的等剂量面分别为第一、第二—第九、第十等剂量面。

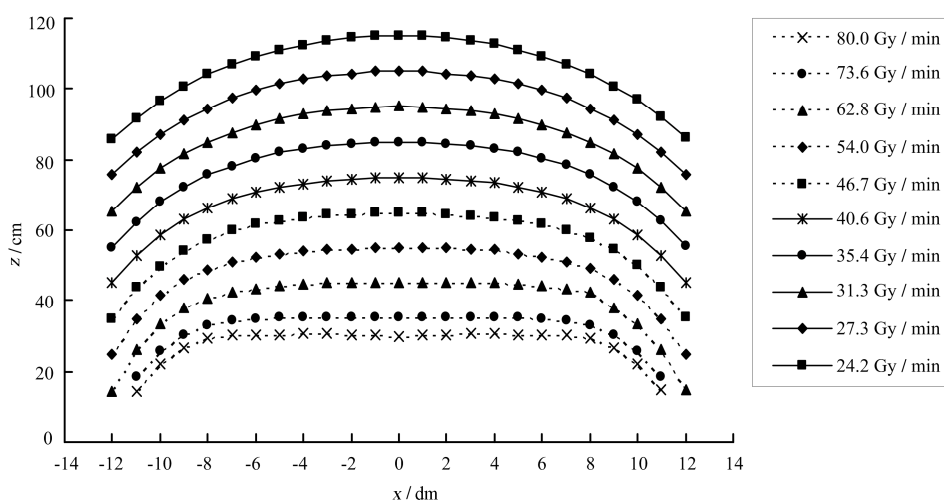


Fig.2 Schematic diagram of calculated iso-dosecurve in the middle horizontal plane ($y=0$)

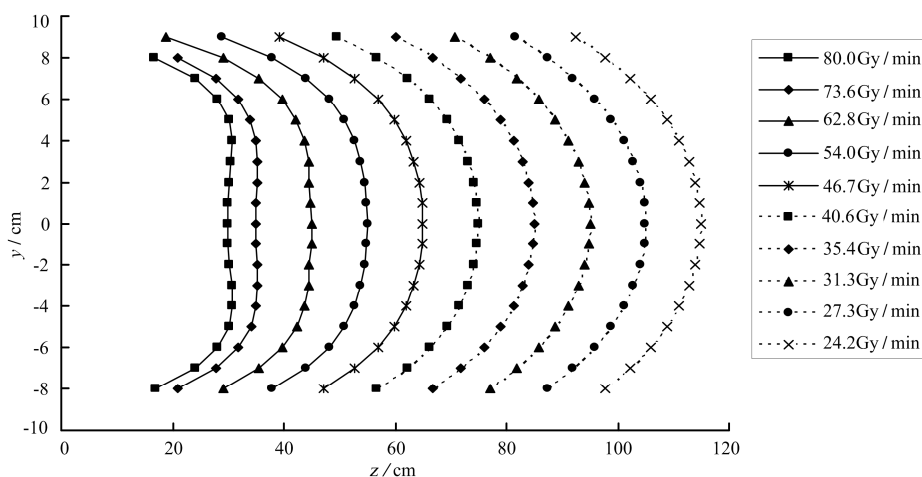


Fig.3 Schematic diagram of calculated iso-dosecurve in the middle vertical plane ($x=0$)

2.3 剂量计排布

对计算出的 4400 个 z 值数据进行了仔细分析, 决定在避免剂量计相互影响和尽可能减少实验测量时间的前提下, 将实验测量分为前后半区、上半半区即四个区域进行。

2.4 实验工装设计制作

为尽量减小散射的影响, 所有工装均采用低 z 材料制作。

2.4.1 支撑框架 框架用木料制作, 所有梁、柱与剂量计的最小距离在 20 cm 以上。考虑到稳定性问题, 框架的高度定为 220 cm, 宽度为 320 cm, 进深为 150 cm, 下半区框架高度为 120 cm。制作了 8 块长 320 cm、宽 60 cm、厚 2 cm 的定位板, 按计算的数据及确定的实验顺序打孔。

2.4.2 吊线和接头 制作了线长 60 cm、70—130 cm、140 cm 的快速橡皮接头各 30 只, 使用不同颜色的线来区别不同的长度, 并在橡皮头上作标记, 以避免排布失误。

2.4.3 固定栓 准备了市售锥棍 1000 根。

2.5 剂量计制作

按国家标准^[4]完成 14000 只重铬酸银剂量计的制作 (计划实验用 13500 只, 本底测量 200 只, 备用 300 只)。

2.6 实验布置

(a) 将组装完毕的支撑框架置于平台上。(b) 根据剂量场中心位置和带剂量计后吊线的稳定长度,

在吊线上分别标记 $y=0$ 、1—8、9 的位置以及 $y=-1$ 、-2—-7、-8 的位置, 每个 y 值使用 25 个带线橡皮接头, 共计 250 只。(c) 将目标定位板置于支撑框架之上, 注意对中并使其基准线与源架的距离满足要求。(d) 按确定的顺序将相应的带线橡皮接头穿入相应的孔位并用锥棍固定。(e) 将已编号的剂量计插入对应的橡皮接头。在实际操作时, 由课题负责人作最后检查, 确保布置准确无误。

3 剂量计辐照

按确定的顺序和辐照时间进行升降源操作:

(a) 辐照完毕, 将取下的剂量计对应装入编好号的格子中。

(b) 重复 2.6(e)、3(a)步骤两次。

(c) 更换定位板, 重复 2.6(c)、(d)、(e)、3(a)、3(b)步骤。

(d) 重复 3(c)步骤直至完成所有目标点剂量计的辐照。

4 数据读取、处理和分析

4.1 数据读取

在紫外光分光光度仪上读出已辐照完毕的剂量计的吸光度, 再根据公式将吸光度转换为吸收剂量数据。

4.2 数据处理

本轮实验共获得 12752 个有效数据。按标准方法对全部数据进行分析 and 处理, 结果如表 2 所表示。

Table 2 The results of data processing

Isodose surface number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$D_{\text{ideal space}}/\text{Gy}\cdot\text{min}^{-1}$	80.0	73.6	62.8	54.0	46.7	40.6	35.4	31.3	27.3	24.2
$D_{\text{measured}}/\text{Gy}\cdot\text{min}^{-1}$	68.5	62.8	53.3	45.7	39.6	34.8	30.5	26.8	23.8	21.1
$D_{\text{measured}}/D_{\text{ideal space}}$	0.86	0.85	0.85	0.85	0.85	0.86	0.86	0.86	0.87	0.87
Standard deviation/%	7.5	6.1	6.0	4.3	4.3	3.0	2.5	2.3	2.2	2.2
Combined uncertainty/%	9.0	7.9	7.8	6.6	6.6	5.8	5.6	5.5	5.5	5.5

4.3 数据分析

由2表可见,在钴源现有环境条件下,所选10个等剂量面的平均散射和吸收系数 F 为常数0.86,亦即在考虑了散射和吸收后 ^{60}Co 单板源空间任意点的吸收剂量率的经验计算公式应为:

$$\begin{aligned}
 D_{\text{calculated}} &= F \cdot D_{\text{ideal space}} \\
 &= 0.86 D_{\text{ideal space}} \\
 &= 0.86 \times 8.5865 \times 60 \times \Sigma [A_i \times (\theta_{i2} - \theta_{i1}) / r_i] \\
 &= 4.4306 \times 10^2 \Sigma [A_i \times (\theta_{i2} - \theta_{i1}) / r_i] (\text{Gy/min}) \quad (9)
 \end{aligned}$$

5 结论

(a) 从计算和测量结果看,在选定的10个等剂量面中,平直区域最大的是第二等剂量面,达到160 cm×100 cm。对于吸收剂量均匀性要求较高的大尺寸样品,这是比较理想的位置。

(b) 越靠近源板,剂量测量结果的标准偏差越大,可能是由剂量计的定位精度、散射以及吸收引起的。距离越近,离关注点较远的源棒被屏蔽的可能性越大、源架和护源罩所产生的散射影响越大;距离越近,定位精度引起的偏差越大,因为定位精度是定值(在本课题中此值为1 cm);特别是越靠近源板,等剂量面边沿区域的曲率半径越小,定位精度的影响更为突出。

(c) 从计算和测量结果看,随着与源板距离的增加,等剂量面平直区域逐步缩小,到第十等剂量面时已无明显平直区域,板源剂量率分布向点源剂量率分布过渡,符合当距离趋于无穷大时,板源趋于点源的物理规律。由此可见,当辐照对象均匀性要求较高、面积较大时,宜选择 $z=35\text{ cm}$ 和 $z=45\text{ cm}$

之间的位置(即第2或第3等剂量面之间)。

(d) 分别选择 $y=0$ (x - z 平面)和 $x=0$ (y - z 平面)的数据与之前所做的实验测量数据进行比较,结果表明两者之间一致性很好,说明实验设计从理论到实践均是合理的、自洽的。

(e) 由经验公式计算出吸收剂量率后, γ 光子注量率、照射量、比释动能等辐射场表征量均可由相关公式方便得出,可根据实验需求作相应选择。

参考文献

- GB/T 15447-2008 X, γ 射线和电子束辐照不同材料吸收剂量的换算方法. 1-18
GB/T 15547-2005 Conversion method of absorbed doses in different materials irradiated by X, γ -rays and electron beams. 1-18
- 复旦大学、清华大学、北京大学. 原子核物理实验方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1982: 63-68
Fudan University, Tsinghua University, PeKIng University. The experimental methods of nuclear physics [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1982: 63-68
- 李星洪. 辐射防护基础[M]. 北京: 原子能出版社, 1982: 134-136
LI Xinghong. The protection of radiation protection [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1982: 134-136
- JJF 1028-1991 使用重铬酸银剂量计测量 γ 射线水吸收剂量标准方法. 1-14
JJF 1028-1991 Standard method to measure γ -rays absorbed doses of water by silver dichromate dosimeter. 1-14

The construction of empirical formula to calculate the dose field distribution of the single-plate ^{60}Co source

ZENG Fansong WU Xiaoli LI Xiaoyan YU Xiangzhong
AN You LI Zongjun SUN Guofang YANG Guixia LI Lei

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

ABSTRACT In order to supply a better irradiation service for materials and electronic devices used in the field of astronavigation and nuclear power plant, the distribution of dose rate was theoretically calculated based on the ideal space model meanwhile the distribution of dose rate was measured with interval of 10 cm. It was found that the scattering absorption factor was determined to be 0.86 compared with calculated results. With the use of the experimental equation established in this paper the uncertainty of measurement was supplied and relative results were discussed.

KEYWORDS ^{60}Co single-plate source, Dose field, Absorbed dose rate, Empirical formula

CLC O571, O4.34, N37