

# 上海辐射中心钴源装置启用剂量测量

吴智力 蔡 栋 侯海林

朱锦心 陈茂庆 朱莲娣

谢雷东 杨学武 陈新薇

(中国科学院上海原子核研究所)

**摘要** 用硫酸亚铁水溶液化学剂量计测量上海辐射中心钴源装置启用剂量。研究动态辐照条件下空载集装箱和输液器、马铃薯等二种产品集装箱的剂量分布,并给出分布图。测得空载集装箱及上述两种产品集装箱的剂量均匀度依次为  $1.27 \pm 0.04$ 、 $1.32 \pm 0.04$ 、 $1.71 \pm 0.06$ ,并发现可用产品在箱体中堆积密度  $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$  粗略地估计该值:  $\bar{U}_i = 1.39 \times 10^{-4} \rho + 1.26$ 。确定传输链速度( $v, \text{m}/\text{min}$ )与辐照产品接受的剂量  $\bar{D}_{\text{min}}(\text{Gy})$  之间的函数关系:  $\bar{D}_{\text{min}} = A + m1/v$ ,找到  $m$  值( $\text{Gy} \cdot \text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )与  $\rho$  大致关系的经验表达式:  $m = 1875 e^{-9.55 \times 10^{-4} \rho}$ 。测量辐照场 1/8 空间剂量率分布,并给出其二维分布图。

**关键词** 硫酸亚铁剂量计; 剂量分布; 剂量均匀度。

## 引 言

上海辐射中心一期工程组装钴源  $\sim 6 \times 10^{15} \text{Bq}$ 。为了给装置的运行提供可靠的剂量学方面的数据和必要的参数,我们用硫酸亚铁水溶液化学剂量计测量启用剂量,并在过程中着重研究辐照产品堆积密度效应。这种剂量测量和过程中相应的研究工作,对于辐照产品的质量控制是必不可少的<sup>[1,2]</sup>。

## 方法和仪器

### 1. 剂量计

硫酸亚铁水溶液化学剂量计。(1)水和试剂:用于配制剂量计溶液的水均经过多次重蒸馏,而且未一级蒸馏装置是用石英亚沸提纯器。硫酸亚铁铵为分析纯试剂。氯化钠和硫酸为优级纯试剂。(2)分析仪器:使用国产“730”型和岛津 UV210 A 型分光光度计。1 cm 石英吸收池。(3)分析方法:辐照前后的剂量计溶液均在波长 303 nm(或 304 nm)处测量吸光度<sup>[3~5]</sup>。(4)剂量计的几何尺寸:  $\phi 1.25 \times 4.5 \text{ cm}$ ,有效容积为 5 ml。(5)准确度:估计剂量计总不确定度为  $\pm 2\%$  左右。

### 2. 剂量计布置

除另外说明外,用于描绘动态辐照条件下空载箱或辐照产品箱剂量分布的剂量计,其布置如图 1 所示。每一产品箱布放 27 支剂量计;一只集装箱(三只产品箱)布放 81 支剂量计。确定剂量均匀度及传输链速度与  $\bar{D}_{\text{min}}$  关系,是在空载或产品集装箱  $D_{\text{min}}$  和  $D_{\text{max}}$  各自所在的一个位置上布放剂量计。辐照场空间剂量率分布测量均按照需要作剂量计布点。

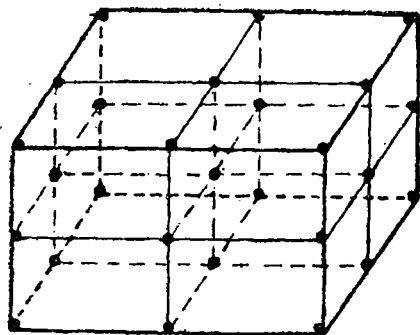


图 1 动态辐照条件下产品箱中剂量计布点图

Fig. 1 Product box showing positions of dosimeters for movement irradiation

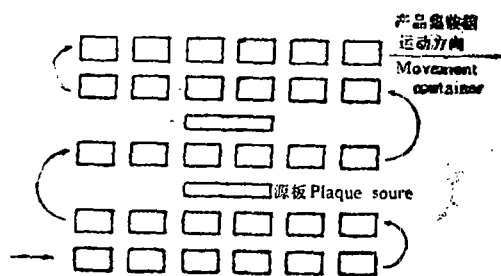


图 2 集装箱—辐射源相对几何位置俯视图

Fig. 2 Relative positions of containers—radiation source

### 3. 产品箱和辐射源的几何尺寸及它们之间相对的几何位置

产品箱  $56 \times 36 \times 31$  cm; 集装箱架为  $65 \times 42 \times 120$  cm(有效高度 110 cm)。

辐射源为双栅板形。其间距 70 cm, 宽和高各自为 110 和 120 cm。

动态条件下可采用五通道密集辐照。每条通道有效长度 400 cm。外测通道二列集装箱空隙均为 23 cm; 集装箱和源板之间空隙为 17 cm。每条通道可密集六只集装箱。图 2 表示动态辐照条件下产品集装箱—辐射源相对几何位置。

### 4. 屏蔽(集装)箱的位置

在每次(动态)运转过程中, 用于剂量测量的第一只集装箱的前面和末一只集装箱的后面均放有足够数量的屏蔽集装箱。

## 结果与讨论

### 1. 传输链速度和(空载)集装箱架定位重现性

将剂量计固定在四只空载集装箱架一定位置上, 以 8 m/min 的速度传输(每次传输换一次剂量计), 得到 95% 置信概率下的不确定度(不包括剂量计本身的不确定度)为  $\pm 2.9\%$ 。由此可知, 传输链速度和产品集装箱架的定位均有较好的重现性。

### 2. 动态条件下的测试结果

(1) 空载集装箱及辐照产品集装箱的剂量分布: 测得空载集装箱和输液器、马铃薯等二种辐照产品集装箱的剂量分布表明: a. 三者的剂量分布均匀性都是中箱最好, 上箱次之, 下箱较差; b. 随着堆积密度增大, 剂量分布均匀性下降(见图 3, 4)。

(2)  $D_{max}$  和  $D_{min}$  的位置: 对单只产品箱而言, 空载和输液器箱的  $D_{max}$  均在前平面和后平面的中点位置上; 而马铃薯箱的却在后平面二条垂直于底平面的棱的中点位置上。空载箱和输液器箱的  $D_{min}$  均在左右平面离底棱(中箱和下箱)或顶棱(上箱)2 cm 的中点位置上; 而马铃薯的是在底平面(下箱)或顶平面(上箱和中箱)的中心位置上。对整个集装箱来说, 无论是空载的, 还是装输液器、马铃薯等辐照产品,  $D_{max}$  和  $D_{min}$  均在下箱上述位置上。但是, 由于马铃薯箱堆积密度统计涨落以及产品箱定位随机变动, 使得它二个位置的  $D_{max}$  值不相等, 而且大小互为易动(几率均等)。所以, 在测量剂量均匀度时, 必须在该二位置上都布放剂量计, 否则将会引进 4% 的测量误差。

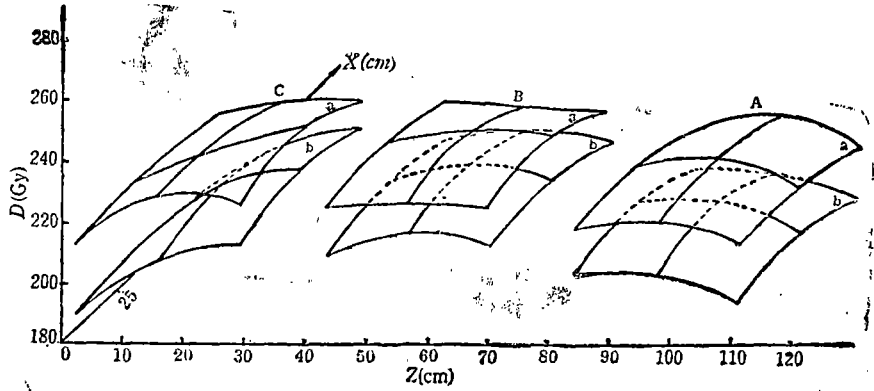


图 3 空载集装箱剂量分布图  
A—上箱, B—中箱, C—下箱, a—前平面, b—中平面。  
Fig. 3 Dose distribution in air for container

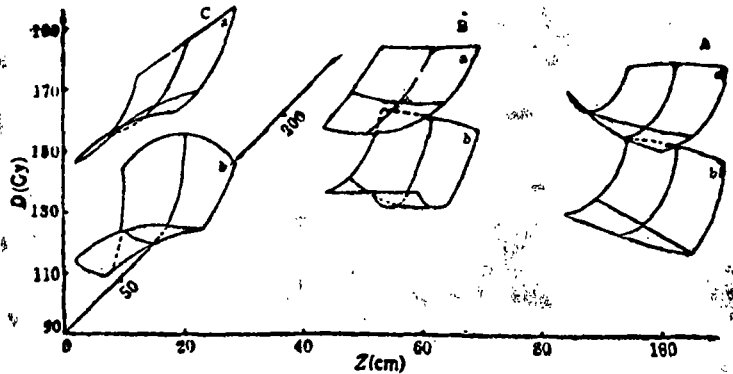


图 4 马铃薯产品集装箱剂量分布图  
Fig. 4 Dose distribution in potatoes for container  
A—上箱, B—中箱, C—下箱, a—后平面, b—中平面

表 1 空载集装箱和辐照产品集装箱的剂量均匀度  
Table 1. Values of dose uniformity ratio

| 产品箱中的介质<br>Media in<br>product box | 种类<br>Kind      | 尺 寸<br>Size(cm) | 密集辐照的<br>通道数<br>Number of<br>passage | 产品堆积密<br>度 (kg/m³)<br>Product bulk<br>density (kg/m³) | 剂量均匀度<br>Dose uniformity ratio |                  | n*   |
|------------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------|------|
|                                    |                 |                 |                                      |                                                       | 单箱均匀度<br>Single<br>container   | 极限均匀度**<br>Limit |      |
| 空气<br>Air                          | 纸箱<br>paper box | 56×36×31        | 5                                    | 1.29                                                  | 1.27±0.04                      | 1.37             | 4×10 |
| 输液器Transfusion<br>pouches          | 纸箱<br>paper box | 56×36×31        | 5                                    | 107                                                   | 1.32±0.04                      | 1.49             | 3×10 |
| 马铃薯<br>Potatoes                    | 木箱<br>wood box  | 55×36×31        | 5                                    | 700                                                   | 1.71±0.06                      | 2.16             | 4×10 |

\* n 表示用于剂量测量的集装箱数目(4×10 系指采用 4 种传输速度, 在每种速度下有 10 只用于剂量测量的集装箱)。

\*\* 极限均匀度  $U_L = \frac{\bar{D}_{max} + K_{max} S_{max}}{\bar{D}_{min} - K_{min} S_{min}}$  式中  $\bar{D}_{max}$  和  $\bar{D}_{min}$  分别是在一定传输速度下测得的各集装箱中最大剂量( $D_{max}$ )和最小剂量( $D_{min}$ )的平均值。 $S_{max}$  和  $S_{min}$  为各自对应的标准偏差。它们取决于产品的特性和剂量计的准确度。 $K_{max}$  和  $K_{min}$  系为它们的容限因子。

(3) 剂量均匀度: 由测量数据算得动态辐照条件下空载集装箱和输液器、马铃薯等二种辐照产品集装箱在 95% 置信概率下的剂量均匀度列于表 1。若绘制  $\bar{U}_i$  的归一化频率分布图, 能直观地反映该值的测量误差。

剂量均匀度不但受辐射源排列均匀性和产品箱几何尺寸的影响, 也强烈地依赖于产品的种类和性质。在特定的条件下, 由实验结果导出的如下函数式能粗略地描述这种关系:

$$\bar{U}_i = 6.39 \times 10^{-4} \rho + 1.26 \quad (1) \quad \bar{U}_l = 1.13 \times 10^{-3} \rho + 1.37 \quad (2)$$

式中  $\bar{U}_i$  和  $\bar{U}_l$  分别表示辐照产品(单只)集装箱剂量均匀度和极限均匀度的平均值;  $\rho$  是相应产品的堆积密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )。

利用上述的函数式可以估计在我们指定的辐照条件下, 不同堆积密度 ( $1.29 \sim 700 \text{ kg}/\text{m}^3$  之间) 的各类辐照产品剂量均匀度。例如, 堆积密度为  $570 \text{ kg}/\text{m}^3$  的洋葱,  $\bar{U}_i$  估计值等于 1.62, 而实验值为 1.56, 二者极差 4%。

(4)  $\bar{D}_{\min}$  与传输链速度的关系: 用回归分析方法算得的空载集装箱和输液器、马铃薯等产品集装箱的  $\bar{D}_{\min}$  与传输链速度  $V$  的函数关系 ( $\bar{D}_{\min} = A + m 1/V$ ) 列于表 2。图 5 给出空载集装箱的  $\bar{D}_{\min} \sim 1/V$  关系曲线。在特定的实验条件下, 该类曲线的斜率  $m$  值与辐照产品堆积密度  $\rho$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) 相关。由第一次组装的启用剂量测量的数据导出的函数式能大致地描述这种关系:

$$m = 1045 e^{-0.55 \times 10^{-4} \rho} (\text{Gy} \cdot \text{m} \cdot \text{min}^{-1}) \quad (3)$$

从(3)式和两次安装的源活度比得出本次测量的  $m$  值与  $\rho$  的关系应该是:

$$m = 1875 e^{-0.55 \times 10^{-4} \rho} (\text{Gy} \cdot \text{m} \cdot \text{min}^{-1}) \quad (4)$$

(4)式的计算值与表 2 的实测值在  $\pm 2\%$  以内符合。

利用  $m$  与  $\rho$  的关系式可以估计在特定的辐照条件下已知堆积密度  $\rho$  和  $\bar{D}_{\min}$  值的辐照产品所需辐照时间。

(5) 屏蔽箱的作用: 在  $5.5 \text{ m}/\text{min}$  传输速度下辐照马铃薯产品, 测得在无屏蔽箱条件下的  $\bar{D}_{\min}$  值比有屏蔽条件下增大 10~15%。

(6) 集装箱在不同数目的通道上密集辐照所给予的剂量差别比较: 测量结果表明, 在空载情况下, 集装箱

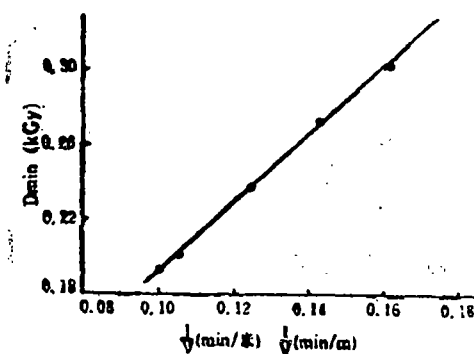


图 5 空载集装箱的  $\bar{D}_{\min} - 1/V$  关系

Fig. 5. Relationship between reciprocal of conveyor speed ( $1/V$ ) and dose values of  $\bar{D}_{\min}$  for air

表 2  $\bar{D}_{\min}$  与  $1/V$  的关系

Table 2 Relationship between reciprocal of conveyor speed ( $1/V$ ) and dose values of  $\bar{D}_{\min}$

| 产品箱中的介质<br>Media in product box | $\bar{D}_{\min} = A + m \frac{1}{V} (\text{Gy})$ | 线性相关系数<br>Correlation coefficient | 密集辐照的通道数<br>Number of passage |
|---------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| 空气<br>Air                       | $\bar{D}_{\min} = 8 + 1835 \frac{1}{V}$          | 0.9998                            | 5                             |
| 输液器<br>Transfusion pouches      | $\bar{D}_{\min} = 6 + 1726 \frac{1}{V}$          | 0.9989                            | 5                             |
| 马铃薯<br>Potatoes                 | $\bar{D}_{\min} = 7 + 952 \frac{1}{V}$           | 0.9996                            | 5                             |

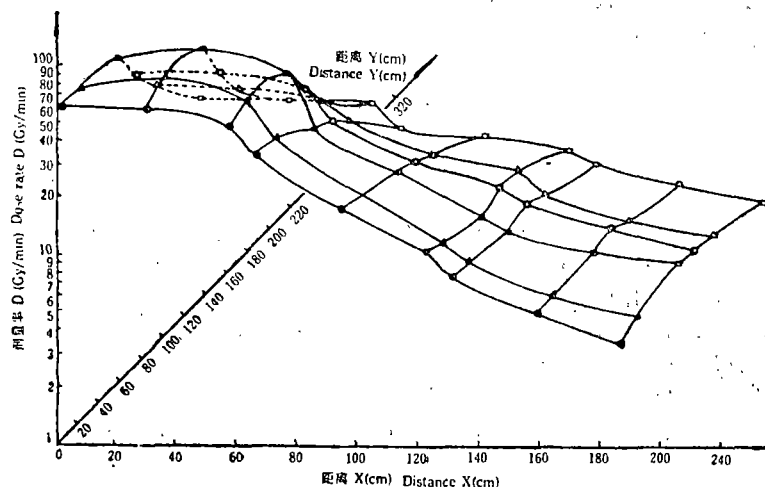


图6 辐照场 1/8 空间剂量率分布图( $z=7.5\text{ cm}$ )

Fig. 6 Two dimensional map of dose rate distribuion in irradiation filed of 1/8 ( $z=7.5\text{ cm}$ )

在外测四个通道上密集而在中间通道上仅以 4 米间距通过的辐照方式比集装箱在五个通道上密集的辐照方式所能给予的剂量小 34%。

### 3. 辐照场空间剂量率分布

图 6 给出辐照场 1/8 空间( $z$  为  $7.5\text{ cm}$ )剂量率二维分布图; 在  $z$  分别为 32 和  $60\text{ cm}$  的平面上测得的分布图, 与该图的形状相似。图 7 是测得的辐照场离板源中点分别为  $x=4.5$  和  $159\text{ cm}$ ,  $y=0$  和  $-70\text{ cm}$  的高度方向剂量率归一化曲线图。它们给静态辐照条件下选

择合适的剂量率和辐照方位提供了有用的参考数据。从这些图中可以看出辐射场三方向剂量率分布均匀性基本情况。

### 4. 测量值的精密度

在辐照场固定(参考点)位置上, 多次重复辐照硫酸亚铁剂量计, 测得该点剂量率的标准偏差在 1% 以内。同样, 在辐照场二板源中心 ( $29, 0, 32.5\text{ cm}$ ) 位置上以不同时间辐照硫酸亚铁剂量计, 用回归分析算得该点剂量率为:

$$D = 64.0 t + 29.8 (\text{Gy}) \quad (5)$$

在 95% 置信概率下, 剂量率测量值置信界限为  $64.0 \pm 2.2 (\text{Gy/min})$ 。

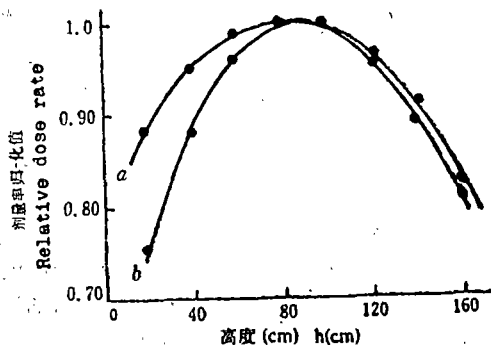


图7 空间剂量率分布随高度变化归一化曲线

Fig. 7 Dose rate distribution along perpendicular axis

a:  $x=45, y=700$ ; b:  $x=159, y=0$ 。

## 小 结

启用剂量测量结果表明, 本辐照装置可达到如下指标: (1) 动态辐照条件下, 辐照堆积密度为  $700\text{ kg/m}^3$  (和  $107\text{ kg/m}^3$ ) 的马铃薯 (和输液器), 其单 (集装) 箱剂量均匀度和极限均匀度分别为  $1.71 \pm 0.06$  和  $2.16$  ( $1.32 \pm 0.04$  和  $1.49$ )。 (2) 动态辐照条件下, 使用五个通道密集辐照, 对堆积密度为  $700\text{ kg/m}^3$  (和  $107\text{ kg/m}^3$ ) 的马铃薯 (和输液器) 而言, 若每分钟输出一只集装箱, 在  $D_{\min}$  位置上能给予  $256\text{ Gy}$  (和  $447\text{ Gy}$ ) 的剂量。如果每一集装箱可装载  $75\text{ kg}$  (和  $22\text{ kg}$ ) 马铃薯 (输液器), 那么根据所接受的  $D_{\min}$  值 (例如马铃薯为  $0.1\text{ kGy}$ ), 则可算得它们各自的产量 (马铃薯为  $11.5\text{ T/h}$ ) 和源利用率 (对马铃薯而言等于 19%)。 (3) 测得辐照场空间剂量率最大值等于  $67\text{ Gy/min}$ 。

启用剂量测量不但为装置的运行提供了可靠的剂量学方面的数据和有关参数。而且过程中还着重研究了辐照产品堆积密度效应, 发现堆积密度与辐照产品剂量均匀度及  $\overline{D}_{\min}-1/V$  关系曲线

斜率( $m$ 值)之间有一种粗略的函数关系( $\bar{U}_i = 6.39 \times 10^{-4} \rho + 1.26$ ;  $m = 1875 e^{-9.55 \times 10^{-4} \rho}$ )。它们对于搞好辐照产品质量控制具有重要的实际意义。

感谢刘文学副所长给予本研究工作的的大力支持。

### 参 考 文 献

- [1] K. H. Chadwick, D. A. Ehlermann and W. L. McLaughlin, Manual of Food Irradiation Dosimetry Tech. Rep. Ser., No 178 IAEA, Vienna (1977).
- [2] 吴智力, 中国科学院辐射技术研究与开发工作讨论会论文选编, p 105(1985).
- [3] 吴智力, 谢雷东, 林维真, 李乃宁, 陈新薇, 辐射研究与辐射工艺学报, 3 2(1985).
- [4] 吴智力, 陈新薇, 核技术, 1, 60(1984).
- [5] 吴智力, 原子能农业应用, 2, 60 (1980).

(稿件收到日期: 1986 年 10 月 3 日)

## DOSIMETRY FOR COMMISSIONING OF COBAL SOURCE EQUIPMENT IN SHANGHAI IRRADIATION CENTRE

Wu Zhili    Zai Dong    Hou Hailing    Zhu Jinxing  
Chen Maoqing    Zhu Liandi    Xie Leidong    Yang  
Xuewu    Chen Xinwei    Liu Wenxue

(Institute of Nuclear Research, Academia Sinica, P. O. Box 8204, Shanghai, China)

**ABSTRACT** This paper studies the dosimetry for commissioning of a cobalt source equipment in Shanghai Irradiation Centre using the aqueous ferrous sulphate dosimetry. In the condition of the movement irradiation the dose distribution in the container, at which three boxes of the irradiation product are consolidated, was described, and two-dimensional map of dose distribution was given. The dose uniformity ratio measured for the containers equals  $1.27 \pm 0.04$  in the air,  $1.32 \pm 0.04$  in the transfusion pouches,  $1.71 \pm 0.06$  in the potatoes, respectively, and it has been discovered that these values can be estimated roughly by the bulk density of product in the boxes,  $\rho$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ):

$$\bar{U}_i = 6.39 \times 10^{-4} \rho + 1.26$$

The calibration function of equipment, i. e. the relationship between the reciprocal of the conveyor speed and the dose values of  $\bar{D}_{\min}$ ,  $\bar{D}_{\min} = A + m1/v$ , was determined, and it has been found that the values of  $m$  can be represented as follows,

$$m = 1875 e^{-9.55 \times 10^{-4} \rho}$$

where  $\rho$  denotes bulk density of product in the boxes ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ). The dose rate in the irradiation field of  $1/8$  was measured, and two-dimensional map of dose rate distribution are shown.

**KEY WORDS** Ferrous sulphate dosimeter; Dose distribution; Dose uniformity ratio.