

β 参考辐射的研制

万兆勇 蔡善钰 李延波 尹 卫

冯嘉敏 孙玉华 李永强

(中国原子能科学研究院, 北京)

摘 要

研制了 β 参考辐射系统, 它是由 740 MBq 的 ^{147}Pm β 源、74 MBq 和 740 MBq 的 $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ β 源、整平过滤器、源夹、源架、源测距杆、快门、控制器和 β 剂量仪校准架组成。带有整平过滤器的 740 MBq ^{147}Pm β 源和 74 MBq $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ β 参考辐射和不带整平过滤器的 740 MBq $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ β 参考辐射, 分别在 20 cm、30 cm 和 30 cm 距离处, 剩余最大能量分别为 0.14 MeV、1.98 MeV 和 2.18 MeV, 组织吸收剂量率 $\dot{D}$ (0.07) 分别为 1.547 mGy/h (1996 年 5 月 20 日)、5.037 mGy/h (1996 年 5 月 10 日) 和 93.57 mGy/h (1996 年 5 月 15 日), 总不确定度分别为 3.0%、1.7% 和 1.7%。第一种和第 2 种 β 参考辐射, 在垂直于 β 射线束轴平面内, 直径为 18 cm 的面积范围内, 剂量率的变化分别在 $\pm 6\%$ 和 $\pm 3\%$ 以内。

Development of Beta Reference Radiations (In Chinese)

WAN Zhaoyong CAI Shanyu LI Yanbo YIN Wei
FENG Jiamin SUN Yuhua LI Yongqiang
(China Institute of Atomic Energy, Beijing)

ABSTRACT

A system of beta reference radiation has been developed, that is composed of 740 MBq ^{147}Pm beta source, 74 MBq and 740 MBq $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ β sources, compensation filters, a source handling tool, a source jig, spacing bars, a shutter, a control unit and a beta dose meter calibration stand. For 740 MBq ^{147}Pm and 74 MBq $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ beta reference radiations with compensation filters and 740 MBq $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ beta reference radiation without compensation filter, at 20 cm, 30 cm and 30 cm distance separately; the residual energy of maximum is 0.14 MeV, 1.98 MeV and 2.18 MeV separately; the absorbed dose to tissue $\dot{D}$ (0.07) is 1.547 mGy/h (1996-05-20), 5.037 mGy/h (1996-05-10) and 93.57 mGy/h (1996-05-15) separately; the total uncertainty is 3.0%, 1.7% and 1.7% separately. For the first and the second beta reference radiation, the dose rate variability in the area of 18 cm diameter in the plane perpendicular to the beta-ray beam axis is within $\pm 6\%$ and $\pm 3\%$ separately.

核工业中核燃料的加工、核爆炸后的现场、核反应堆事故、核电站核岛的检修、医用敷贴器和前列腺治疗仪的使用等,人员都会受到 β 辐射的照射,这就需要用 β 剂量仪表进行现场监测。 β 射线剂量(率)仪在测量前,必须首先校准,而校准就需要用 β 参考辐射。国际标准 ISO 6980 [1] 规定了用于校准 β 剂量(率)仪并测定其能量响应的 β 参考辐射。国家标准 GB 12164—90 [2] 也规定了类似的标准。基本上按照 ISO 6980 研制了 ^{147}Pm 和 $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ β 参考辐射。

1 β 参考辐射的组成

β 参考辐射由 β 源、源夹、源架、源容器、测距杆、整平过滤器、 β 剂量(率)仪校准架、气压计、温度计、湿度计、快门和控制器等组成。

研制了 740 MBq 的 ^{147}Pm 、74 MBq 的 $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ 和 740 MBq 的 $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ 三种 β 源。它们的活性区直径为 9.5 mm。 ^{147}Pm 源用 0.2 mm 银片作底片,3~4 μm 的金作窗,0.5 μm 的钯(Pd)作保护层。 ^{147}Pm 源的制造采用粉末冶金工艺。工艺流程包括: Pm_2O_3 的制备,活性坯的压制与烧结,活性块的合模、辊轧与剪切,源片的合模、辊轧与剪切,源片去污与镀钯,源托装配与滚封。

$^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ 源采用 0.5 mm 银托,20 μm 的金作窗,2~3 μm 的钯作保护层。制造工艺流程包括: ^{90}Sr 稳定化合物的制备,活性坯的模压与烧结,活性块的合模、辊轧与剪切,源片的合模、辊轧与剪切,钯保护层的覆盖,源托装配与滚封。其中 74 MBq 活度的 ^{90}Sr 源,由于活度较小,要将源片再次合模退火和辊轧,才能得到符合要求的产品。

^{147}Pm 和 $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ β 源,产品的质量控制包括活度测量,均匀性检查,表面污染擦拭,泄漏检查和几何尺寸检验等,均按国际标准 ISO—2919 进行(国家标准为 GB 4075—83)。

源夹用于从铅罐中取出 β 源,并放置在源架上的固定位置处,通过螺丝拧紧固定,源中心距地面 1.55 m 左右。通过丝杠调节源到剂量仪表的距离,用测距杆调整 ^{147}Pm 源到剂量仪表窗的距离为 20 cm, $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ 源到剂量仪表窗的距离为 30 cm。

^{147}Pm 和 $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ 源的整平过滤器的结构如表 1 所示。

表 1 整平过滤器的结构

核素	源到探测器 距离/cm	源到过滤器 距离/cm	过滤器的材料和尺寸
^{147}Pm	20	10	圆环 材料:聚乙烯对苯二甲酸酯; 尺寸:外半径 $R=5$ cm, 内半径 $r=0.975$ cm, 厚:约为 14 mg/cm ²
$^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$	30	10	三同心圆片 材料:聚乙烯对苯二甲酸酯; 半径尺寸分别为:2 cm, 3 cm, 5 cm; 厚:约为 25 mg/cm ²

快门由 6 mm 厚的铝和 1 mm 厚的铅制成,LY45 永磁式直流力矩电动机带动,由 24 V 直流电源、特殊的线路、继电器和计时器构成控制器,能记下快门开启到快门关闭所经过的时间。

用 3 号 $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ 源,测控制器 60 s 和 120 s 收集的电离电荷分别为 0.98014 和 1.96020

(任意单位),由此可计算出快门动作时间 $\Delta t = 1 \times (0.98014 \times 2 - 1.96020) \times 120 / (1.96020 \times 2 - 0.98014 \times 2) = 0.0049 \text{ s}$, 因计时器最小计时单位为 0.01 s , 因此快门动作时间的影响可以忽略。

β 剂量仪校准架可以使待刻度仪表左右和上下移动, 满足校准时的需要。源到 β 剂量仪的距离改变, 是通过移动源架而实现的, 这可以避免移动仪器架可能带来的仪表读数不稳和不安全的缺点。

2 参考辐射的特性

2.1 剩余最大能量

剩余最大能量 (E_{rm}) 按下面公式计算:

$$E_{rm} = \{ [(9.1 R_{rm} + 1)^2 - 1] / 22.4 \}^{1/2}$$

式中 R_{rm} 是剩余最大射程, 以 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 为单位, E_{rm} 以 MeV 为单位。 R_{rm} 是用 PTW23392 型外推电离室作为探测器测量。外推电离室入射窗位于刻度距离处 (^{147}Pm β 源, 为 20 cm , $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ β 源, 为 30 cm), 入射窗而向源。对于 ^{147}Pm 源, 将不同质量厚度的聚乙烯薄膜放在入射窗前; 对于 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ 源, 用不同质量厚度的有机玻璃板放在入射窗前。外推电离室的厚度 (2.60 mg/cm^2) 在测量 ^{147}Pm 源时, 也计算在内。对于有整平过滤器的参考辐射, 应放置整平过滤器; 对于无整平过滤器的参考辐射, 应取下整平过滤器。

对于 β 参考辐射, 测出的外推电离室的电离电流在半对数坐标纸上用半对数纵坐标表示, 相应的吸收体厚度用横坐标表示, 画出相应的关系曲线图。曲线中直线部分与具有较低水平的剩余光于本底曲线的交点的横坐标, 表示剩余最大射程。

图 1, 2, 3 和 4 分别表示有整平过滤器的 3 号 ^{147}Pm 和 1 号 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ 及有和无整平过滤器的 3 号 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ 在相应的刻度距离处的电离电流的对数与吸收体的厚度的关系曲线。相应的剩余最大射程分别为 22.7 mg/cm^2 , 0.925 g/cm^2 , 0.935 g/cm^2 和 1.038 g/cm^2 , 对应的剩余最大能量分别为 0.14 MeV , 1.98 MeV , 2.00 MeV 和 2.18 MeV 。

3 号 ^{147}Pm β 参考辐射的剩余最大能量 E_{rm} 大于 ISO 6980 规定的下限值 0.13 MeV 而小于 ^{147}Pm 的最大能量 E_{max} (0.225 MeV), 这说明 3 号 ^{147}Pm β 参考辐射的剩余最大能量符合 ISO 6980 的要求。

有整平过滤器的 1 号 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ 与有和无整平过滤器的 3 号 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ 的剩余最大能量都大于 ISO 6980 的规定的下限值 1.80 MeV , 并都小于 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ β 粒子的最大能量 E_{max} (2.274 MeV)。这说明这些参考辐射的剩余最大能量符合 ISO 6980 的要求。

2.2 β 污染

在图 1, 2, 3 和 4 中, 测量 ^{147}Pm 和 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ β 参考辐射剩余最大射程 R_{rm} 的吸收曲线中都具有直线部分, 且计算的 E_{rm} 都大于 ISO 6980 规定的下限值而小于各自的最大能量 E_{max} 。根据 ISO 6980 的规定, 这里所研制的 ^{147}Pm 和 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ β 参考辐射的 β 谱纯度满足作为参考源的要求。

2.3 光子污染

光子污染是由参考核素本身发射的光子, 以及在源包壳内产生的韧致辐射和特征 X 射线所致。 ^{147}Pm 和 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ 参考源的包壳材料为银, 窗材料为金, 保护层材料为钽, 参考辐

射中光子成分对校准结果的影响取决于校准的探测器对光子的灵敏度,即取决于探测器的类型,用PTW 23392型外推电离室,分别测量在足够厚的聚乙烯膜和有机玻璃吸收体时把 β 辐射全部吸收,而很少减弱光子, ^{147}Pm 和 $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ β 参考辐射的电离电流,与电离室窗总厚为 7 mg/cm^2 时的电离电流相比较。 ^{147}Pm β 参考辐射为2.4%, $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ β 参考辐射为0.1%。这两个数值都小于ISO 6980的规定值5%。这说明这两种核素的 β 参考辐射的光子污染符合国际标准ISO 6980的要求。

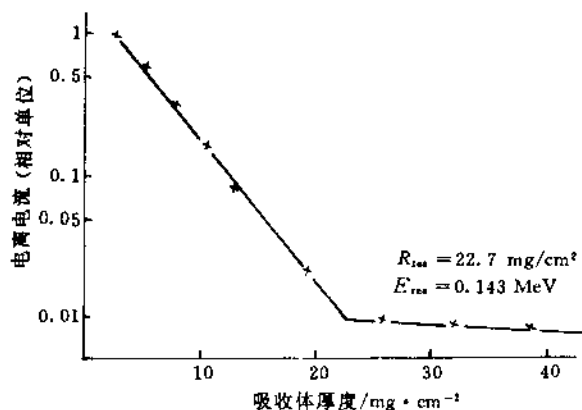


图1 3号 ^{147}Pm β 参考辐射的电离电流与吸收体厚度的关系

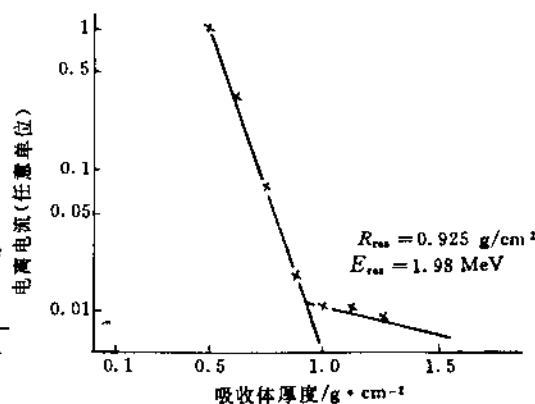


图2 1号 $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ β 参考辐射的电离电流与吸收体厚度的关系

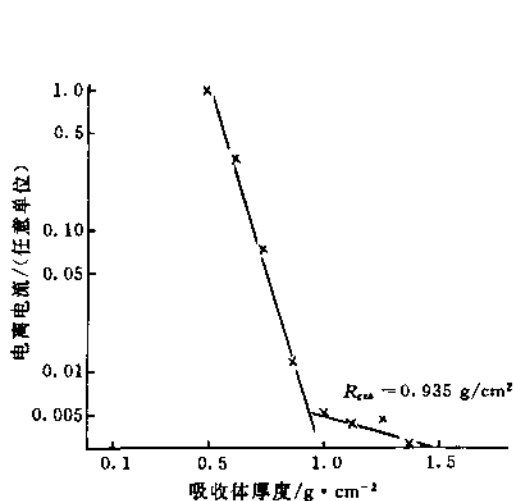


图3 有整平过滤器的3号 $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ β 参考辐射的电离电流与吸收体厚度的关系

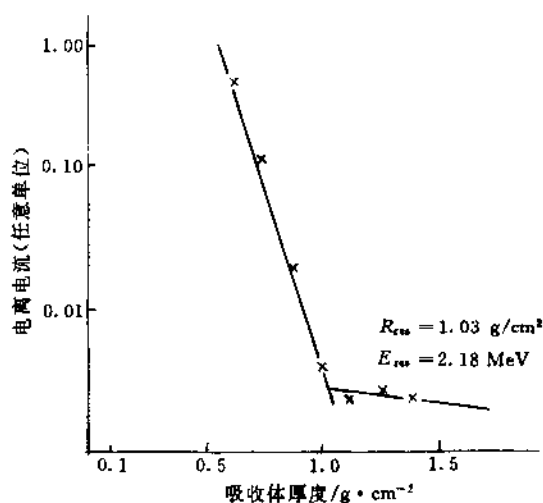


图4 无整平过滤器的3号 $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ β 参考辐射的电离电流与吸收体厚度的关系

2.4 辐射场剂量率的均匀性

用收集极直径为10 mm,深度为9.5 mm的薄窗电离室测量辐射场的剂量率的均匀性。

在垂直于射线束轴的平面内，竖直方向移动和水平方向移动电离室，测出电离电流，以束中心轴处的电离电流归一表示。图 5 表示有整平过滤器的 3 号 ^{147}Pm β 参考辐射在 20 cm 距离处的剂量率的均匀性情况。在垂直射线束轴线平面内，水平方向和竖直方向上， ± 9 cm 范围内剂量率的变化在 $\pm 6\%$ 以内，均匀性在 $(94\sim 103)\%$ 范围内，好于 ISO 6980 规定的 $\pm 10\%$ 。图 6 表示有整平过滤器的 1 号 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ β 参考辐射在 30 cm 距离处的剂量率的变化情况。在垂直射线束轴的平面内，水平方向和竖直方向上， ± 9 cm 范围内，剂量率的变化在 $(99.5\sim 102)\%$ 范围内，即剂量率的变化在 $\pm 2\%$ 以内，好于 ISO 6980 规定的 $\pm 5\%$ 的变化。图 7 给出有整平过滤器的 3 号 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ β 参考辐射在 30 cm 处的剂量率的变化在 $\pm 3\%$ 以内。图 8 给出无整平过滤器的 3 号 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ β 参考辐射在 30 cm 处的剂量率变化情况。

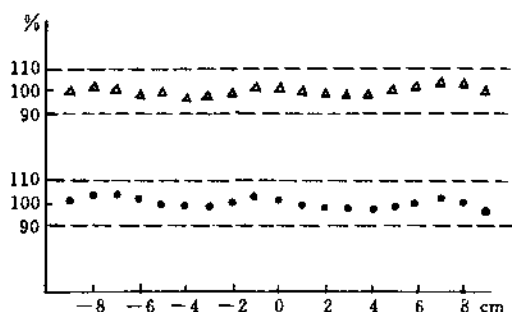


图 5 3 号 ^{147}Pm β 参考辐射在 20 cm 距离处的剂量率的均匀性
● 水平方向 Δ 竖直方向

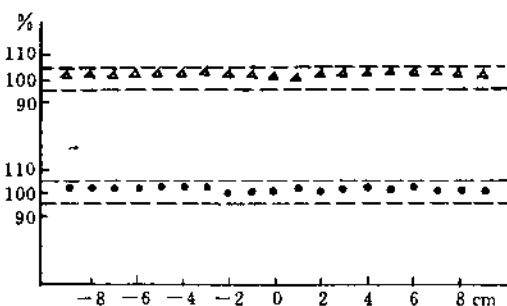


图 6 有整平过滤器的 1 号 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ β 参考辐射在 30 cm 刻度距离处剂量率的均匀性
● 水平方向 Δ 竖直方向

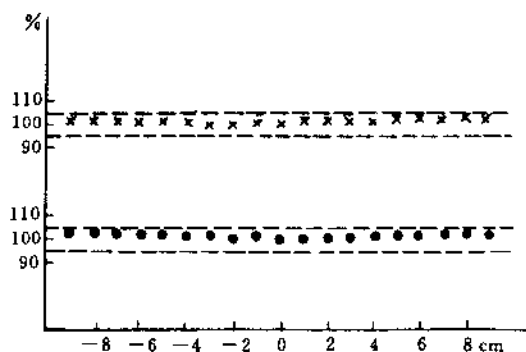


图 7 有整平过滤器的 3 号 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ β 参考辐射在 30 cm 距离处的剂量率的均匀性
● 水平方向 $\times$ 竖直方向

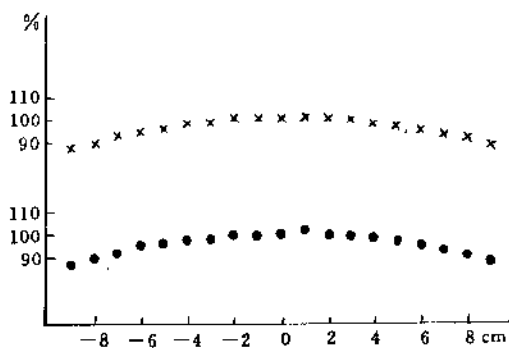


图 8 无整平过滤器的 3 号 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ β 参考辐射在 30 cm 刻度距离处剂量率的均匀性
● 水平方向 $\times$ 竖直方向

在刻度圆形入射窗剂量率仪表时,可以近似计算出整个圆面积内平均的剂量率。用外推电离室可以给出位于中心、半径为 0.5 cm 范围内的剂量率 $\dot{D}_0$ 。在半径分别为 1, 2, 3, 4, ..., 8 和 9 cm 处,可求出水平方向和竖直方向四个点的剂量率的平均值 $\dot{D}_1$ 。在内半径为 0.5 cm、外半径为 1.5 cm 的圆环内,剂量率的平均值可以认为是 $\dot{D}_1$, 半径为 1.5 cm 圆内剂量率, $\dot{D}_{1.5} = \frac{\dot{D}_0 \times \pi \times 0.5^2 + \dot{D}_1 [\pi (1.5^2 - 0.5^2)]}{\pi \times 1.5^2}$ 以此类推,可以求出半径分别为 2.5, 3.5, 4.5, 5.5, 6.5, 7.5, 8.5 和 9.5 cm 圆内的平均剂量率。可用中心点剂量率归一。表 2 给出 3 号 ^{147}Pm 源在 20 cm 刻度距离处和 1 号 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ 源在 30 cm 刻度距离处的不同半径圆内的剂量率归一值。

表 2 3 号 ^{147}Pm 源和 1 号 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ 源在不同半径圆内剂量率的归一值

半径/cm	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5
3 号 ^{147}Pm	1.0000	0.9996	0.9880	0.9813	0.9767	0.9808	0.9860	0.9940	0.9985	0.9958
1 号 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$	1.0000	1.0018	1.0029	1.0060	1.0088	1.0105	1.0110	1.0109	1.0108	1.0107

在校准仪表时,用不同半径圆的剂量率归一值乘中心处的剂量率,除以仪表的读数值,就可以得到校准因子,由此可见,利用剂量率归一值可以减小校准因子的不确定度。

2.5 剂量率

0.07 mm 皮下组织的剂量率 $\dot{D}$ (0.07), 采用 PTW 23392 型外推电离室 β 吸收剂量绝对测量装置测量。

有整平过滤器的 3 号 ^{147}Pm 在 20 cm 刻度距离处的 $\dot{D}$ (0.07) 为 1.547 mGy/h (1996 年 5 月 20 日), 总不确定度为 3.0%。

有整平过滤器的 1 号 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ 源在 30 cm 刻度距离处的 $\dot{D}$ (0.07) 为 5.037 mGy/h (1996 年 5 月 10 日), 总不确定度为 1.7%。在 50 cm 和 90 cm 刻度距离处的 $\dot{D}$ (0.07) 分别为 1.862 mGy/h 和 0.574 mGy/h (1996 年 1 月 29 日)。无整平过滤器的 3 号 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ 源在 30 cm 刻度距离处的 $\dot{D}$ (0.07) 为 93.57 mGy/h (1996 年 5 月 14 日), 总不确定度为 1.7%。在 11 cm, 20 cm, 50 cm 和 90 cm 刻度距离处的 $\dot{D}$ (0.07) 分别为 710.1, 215.3, 32.03 和 8.93 mGy/h (1996 年 1 月 26 日)。

有整平过滤器的 3 号 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ 源在 30 cm 刻度距离处的 $\dot{D}$ (0.07) 为 56.29 mGy/h (1996 年 5 月 15 日), 总不确定度为 1.7%。

3 结论

3 号 ^{147}Pm β 参考辐射的剩余最大能量 E_{max} 符合 ISO 6980 的要求, 在 20 cm 刻度距离处直径为 18 cm 面积范围内剂量率的变化在 $\pm 6\%$ 以内, 剂量率对于防护仪表是合适的。

1 号 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ β 参考辐射的剩余最大能量 E_{max} 符合 ISO 6980 的要求, 在 30 cm 刻度距离处, 在直径为 18 cm 面积范围内的剂量率变化在 $\pm 3\%$ 以内, 剂量率对于防护仪表是合适的, 如果拉长距离, 剂量率可以减小。采用 3 号 $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ (740 MBq) β 参考源, 不加整平过滤器, 可以增加剂量率, 减小距离, 还可以进一步增加剂量率, 使校准的量程覆盖范围增大。

参 考 文 献

- 1 ISO. Reference Beta Radiations for Calibrating Dosimeters and Doseratemeters and for Determining Their Response as a Function of Beta Radiation Energy. ISO 6980, 1984
- 2 陈慧莉, 张延生. 用于校准 Beta 剂量 (率) 仪及确定其能量响应的 Beta 参考辐射. GB 12164—90, 1990
- 3 万兆勇, 李延波. β 吸收剂量绝对测量装置, 中国原子能科学研究院资料