

γ 探测器无源效率刻度软件

一、产品介绍

γ 探测器无源效率刻度软件 Gammacalib V3.0 是用于半导体 γ 射线探测器无源效率刻度的专利产品。软件几何和材料建模能力强大，计算精度高，速度快，界面简单，使用方便。其核心算法的正确性经过了 200 多块不同形状和能量体源的实验测量结果检验。

二、Gammacalib V3.0 的性能

- 采用功能强大的 CAD 软件建模，实现对任意形状的体源的三维可视化快速建模；
- 放射源到探测器的距离可以为 0 到无穷远；
- 积分控制精度可以人为调节，软件默认值为 3%；
- 200 块体源实验结果的相对误差，在 45keV 到 80 keV 一般不大于 10%，80keV 到 7MeV 不大于 5%；
- 效率刻度曲线计算时间：对于形状对称的体源（如环境样品源），计算时间小于 20 秒。对于形状非对称的体源，计算时间一般少于 10 分钟；
- 中、英文界面。

三、无源效率刻度的基本原理

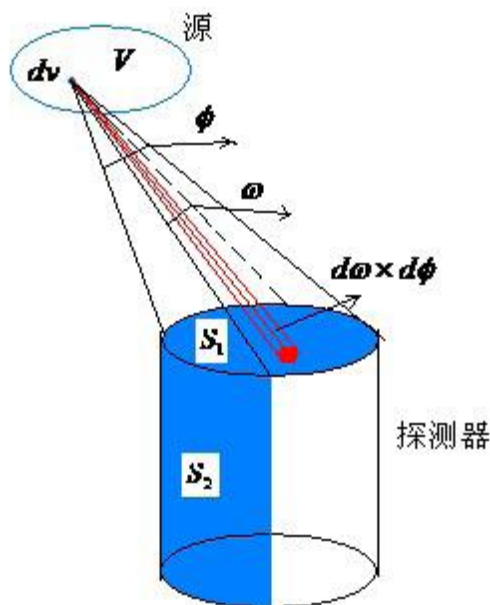


图 1 探测器无源效率刻度方法示意图

V 为任意体源, dv 为源 V 的一个微元, S_1 为探测器端面相对于 dv 所张区域, S_2 为探测器侧面相对于 dv 所张区域。假设源 dv 的能量为 E 的粒子的发射率为 $\tau \times dv$, τ 为 V 中单位体积内向 4π 方向发射的能量为 E 的粒子的发射率。令 $\cos(\omega) \times \varphi$ 为探测器端面对 dv 所张立体角, $\sin(\omega)d\omega \times d\varphi$ 为 $\cos(\omega) \times \varphi$ 的小量。设在 $\sin(\omega)d\omega \times d\varphi$ 立体角内从 dv 发射出的粒子, 未经能量损失到达探测器上表面, 在探测器内的全能峰探测效率为 $f_{eff}(E, \omega, \varphi)$; 设在 $\sin(\omega)d\omega \times d\varphi$ 立体角内从 dv 发射出的粒子穿透屏蔽层 (包括源的自吸收层), 且没有发生能量损失的穿透率为 $f_{att}(E, \omega, \varphi)$ 。则源 V 发射出的能量为 E 的粒子在探测器端面的探测效率为:

$$\varepsilon_{eff, S_1}(E) = \int_{V, \omega \times \varphi} \frac{1}{4\pi V} f_{att}(E, \omega, \varphi) \times f_{eff}(E, \omega, \varphi) \times \sin(\omega) d\omega \times d\varphi \times dv \quad (1)$$

同理，设 $\cos(\omega') \times \varphi'$ 为探测器侧面对 dv 所张立体角， $\sin(\omega') d\omega' \times d\varphi'$ 为 $\cos(\omega') \times \varphi'$ 的无穷小量。则源 V 发射出的能量为 E 的粒子在探测器侧面的探测效率为：

$$\varepsilon_{eff,S_2}(E) = \int_{V, \omega' \times \varphi'} \frac{1}{4\pi V} f_{att}(E, \omega' \times \varphi') \times f_{eff}(E, \omega' \times \varphi') \times \sin(\omega') d\omega' \times d\varphi' \times dv \quad (2)$$

探测器对源 V 的能量为 E 的粒子的探测效率为：

$$\varepsilon_{eff}(E) = \varepsilon_{eff,S_1}(E) + \varepsilon_{eff,S_2}(E) \quad (3)$$

从公式 (1) - (3) 可以看出，为了获得任意体源 V 发射出的能量为 E 的光子探测效率 $\varepsilon_{eff}(E)$ ，需要完成如下工作：

1. 确定探测器和体源的几何模型和材料模型；
2. 计算体积 V 中任意点 dv 向探测器发射的任意方向的能量为 E 的粒子的直穿穿透率 $f_{att}(E, \omega, \varphi)$ ，即计算每条射线在到达探测器以前的路径上经过的材料长度和宏观截面；
3. 计算体积 V 中任意点 dv 向探测器发射的任意方向的能量为 E 的粒子在探测器内的探测效率 $f_{eff}(E, \omega, \varphi)$ ，即进行探测器表征；
4. 计算公式 (1) 和 (2) 所示的积分。

从而推出，要进一步实现对任意体源的无源效率刻度计算，则需要完成如下工作：

1. 建立探测器的几何模型和材料模型；
2. 表征探测器，即建立空间中任意点发射出的射线的探测效率的角分布；
3. 实现体源的计算机快速三维建模；

4. 实现公式 (1) 和 (2) 的快速积分。

四、相对于实验刻度的优点

- 无需使用放射源进行效率刻度, 无需管理和处置放射源, 无需放射源许可证;
- 避免污染实验室, 节省经费;
- 精度高, 快速省时, 可以在短时间内得到可靠的结果;
- 强大的几何建模能力, 适用于任意几何形状;
- 除适用于常规样品外, 还适于刻度非常规或难处理的样品, 如: 水泥、钢铁、气体、土壤、空气、过滤器、树脂等, 适于任意材料、任意密度、任意外形尺寸大小的样品;
- 适用于任意基底材料和屏蔽材料;
- 适用于任意准直器和屏蔽;
- 节省样品制备时间, 由软件根据样品情况精确建模、刻度, 不用花大量时间制备样品;
- 可进行大尺度样品测量, 避免采样过程可能导致的样品不具有代表性的问题;
- 快速测量, 可节省采样、包装、运输、制备样品、实验室测量的时间和费用;
- 避免由于采样而可能面临的事故风险, 如对高温、高压、高腐蚀性、高放射性物体的采样, 登高爬梯, 等等;
- 避免对难以采样的对象进行采样, 如深层水泥、钢材、土壤、容器内的放射性物品垃圾、管道、地面等等。

五、Gammacalib V3.0 的典型界面

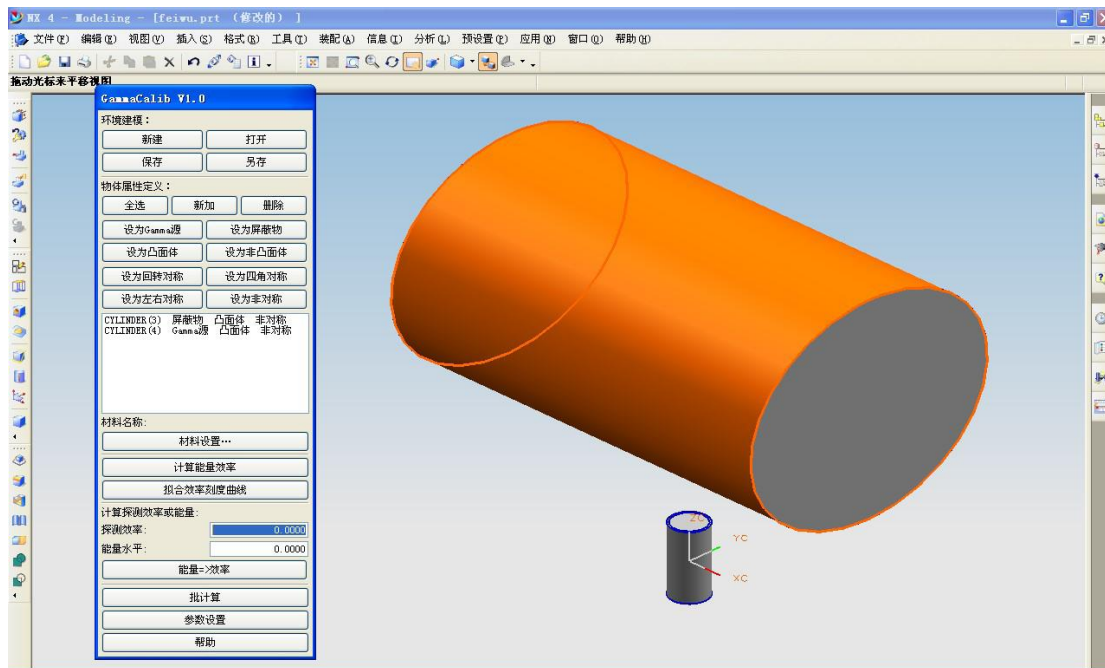


图 2 带准直器测量放射性废物桶示意图

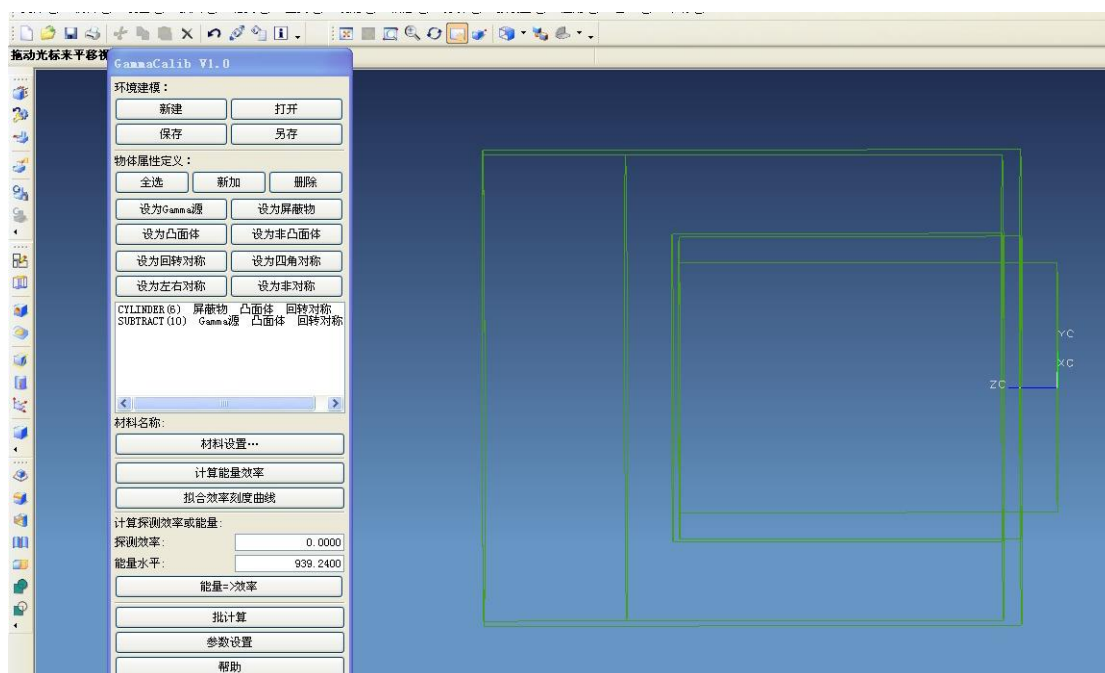


图 3 测量马林杯内放射性物质示意图

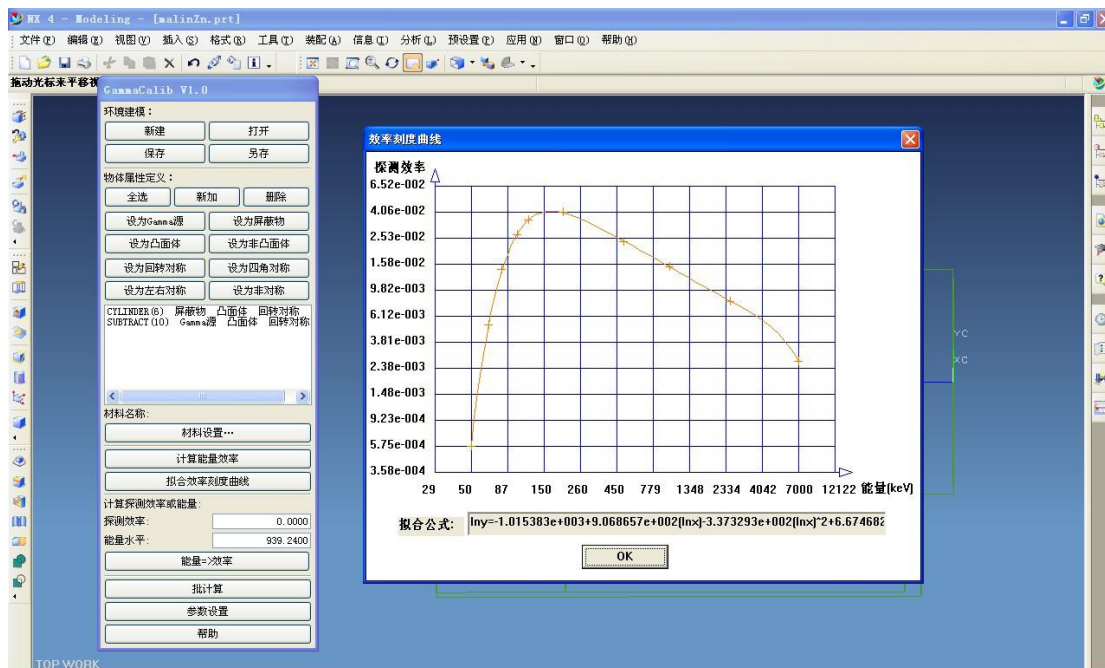


图 4 典型的无源效率刻度曲线

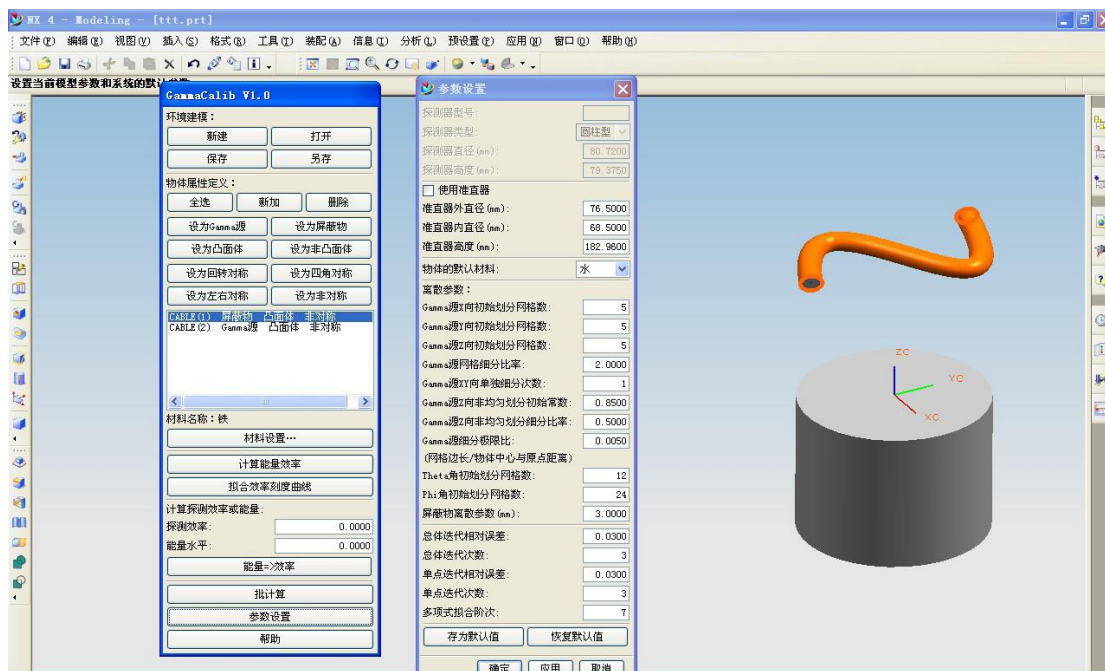


图 5 典型的参数界面

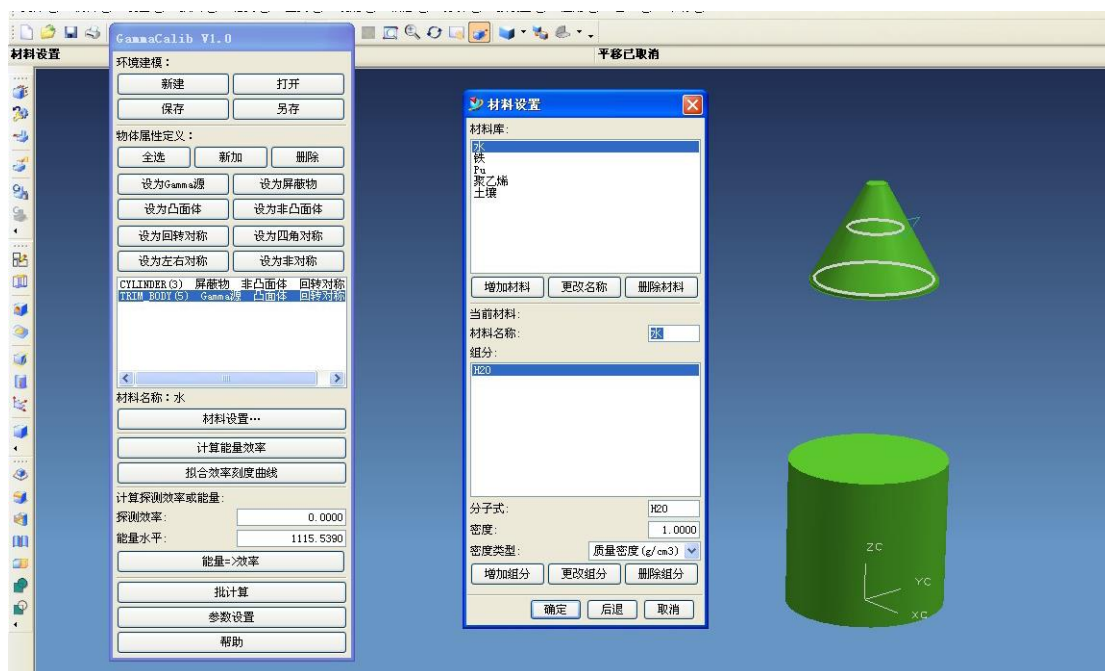


图 6 材料定义界面

六、Gammacalib 软件计算准确性的验证

采用六种规格样品：马林杯（容积 1L）、圆柱体（ $\Phi 50 \times 50 \text{mm}$ ）、立方体（ $40 \times 40 \times 40 \text{mm}$ ）、球体 $\Phi 50 \text{mm}$ 、锥体（底面 $\Phi 50 \text{mm}$ ，高 50mm ）和平面滤纸，如图 7 所示。对于体源，每个测量位置的样品量不同，实际样品规格达到 200 块以上。



图 7 实验采用的样品源规格图

测量位置（如图 8）选择放射源在探测器轴向 45° 方向和水平方向 3 个方向上测量，轴向和水平方向到探测器表面中心的距离分别为 0cm, 10cm, 25cm, 40cm， 45° 方向到探测器的距离分别为 0cm, 10×10 cm, 20×20 cm。

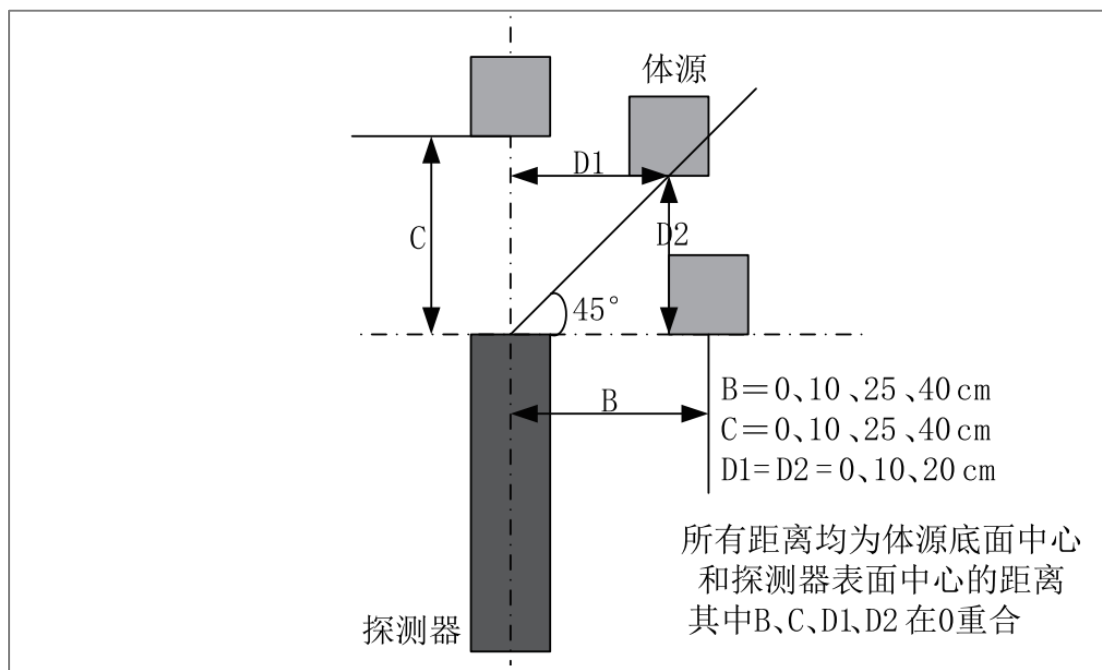


图 8 样品源与探测器相对位置示意图

样品源的能量范围从 59.54keV 到 3253.4keV，共 18 条谱线，样品源的比活度在国家放射性二级计量站的 γ 射线谱仪活度标准装置上测量。软件计算结果与实验测量结果的比较表明，在 80keV 以下，对于各种样品源，相对误差不大于 10%，在 80keV 以上，相对误差小于 5%。

七、Gammacalib 软件订制过程中的探测器表征

每个探测器在订制 Gammacalib 软件过程中都需要进行表征，表征工作在国家放射性计量一级站进行，图 9 为表征过程中的测量位置图。

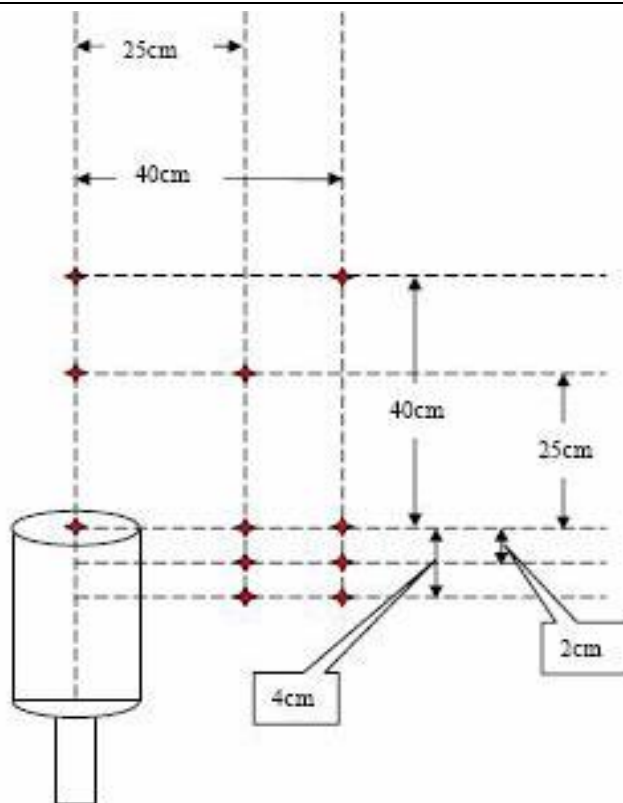


图 9 探测器表征测量位置

表征采用的放射源均可溯源，表 1 为一探测器表征结果。

表 1 某探测器表征结果

| 位 置 | 结 果 | ^{241}Am 59.54keV | ^{137}Cs 661.66keV | ^{60}Co 1173keV | ^{60}Co 1332keV |
|-----------------|-----------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| (0.0, 0.165) | 实验结果 | 0.3401 | 0.07555 | 0.04587 | 0.04109 |
| | 不确定度 (%,K=1) | 0.79 | 0.91 | 0.97 | 0.97 |
| | 计算结果 | 0.3563 | 0.7568 | 0.04696 | 0.04224 |
| | 相对误差(%) | 0.28 | 0.75 | 2.4 | 2.8 |
| (0.0, | 实验结果 | 0.008721 | 0.002441 | 0.001586 | 0.001442 |

| | | | | | |
|------------------|-----------------|----------|-----------|-----------|-----------|
| 15.0) | 不确定度 (%,K=1) | 0.82 | 0.87 | 0.78 | 0.77 |
| | 计算结果 | 0.8692 | 0.002349 | 0.001552 | 0.004014 |
| | 相对误差(%) | 0.3 | 3.7 | 2.2 | 2.8 |
| (0.0, 25.0) | 实验结果 | 0.003412 | 0.001010 | 0.000662 | 0.000604 |
| | 不确定度 (%,K=1) | 0.82 | 0.86 | 0.77 | 0.76 |
| | 计算结果 | 0.3403 | 0.0009581 | 0.0006358 | 0.000581 |
| | 相对误差(%) | 0.3 | 5.1 | 4.0 | 3.8 |
| (15.0, 15.0) | 实验结果 | 0.005658 | 0.001536 | 0.000988 | 0.000898 |
| | 不确定度 (%,K=1) | 0.82 | 0.86 | 0.77 | 0.76 |
| | 计算结果 | 0.005681 | 0.001524 | 0.000994 | 0.000902 |
| | 相对误差(%) | 0.4 | 0.8 | 0.5 | 0.5 |
| (25.0, 25.0) | 实验结果 | 0.002274 | 0.0006174 | 0.0003933 | 0.0003586 |
| | 不确定度 %,K=1 | 0.82 | 0.87 | 0.77 | 0.77 |
| | 计算结果 | 0.002309 | 0.0006202 | 0.0004004 | 0.0003626 |
| | 相对误差(%) | 1.5 | 0.5 | 1.8 | 1.1 |
| (4.30, -1.50) | 实验结果 | 0.1419 | 0.04361 | 0.02766 | 0.02500 |
| | 不确定度 (%,K=1) | 0.79 | 0.89 | 0.89 | 0.89 |

| | | | | | |
|------------------|------------------|----------|----------|----------|-----------|
| | 计算结果 | 0.1464 | 0.4196 | 0.02721 | 0.02433 |
| | 相对误差(%) | 3.2 | 3.8 | 1.6 | 2.7 |
| (15.0, -1.50) | 实验结果 | 0.01383 | 0.003975 | 0.002525 | 0.002286 |
| | 不确定度 (%, K=1) | 0.82 | 0.85 | 0.76 | 0.76 |
| | 计算结果 | 0.1461 | 0.004095 | 0.002623 | 0.002381 |
| | 相对误差(%) | 5.7 | 3.0 | 3.9 | 4.2 |
| (25.0, -1.50) | 实验结果 | 0.005007 | 0.001462 | 0.000938 | 0.000847 |
| | 不确定度 (%, K=1) | 0.83 | 0.87 | 0.78 | 0.78 |
| | 计算结果 | 0.005228 | 0.001505 | 0.000971 | 0.000873 |
| | 相对误差(%) | 4.4 | 3.5 | 3.6 | 3.1 |
| (4.30, -2.50) | 实验结果 | 0.1714 | 0.05197 | 0.03249 | 0.02932 |
| | 不确定度 (%, K=1) | 0.79 | 0.88 | 0.89 | 0.89 |
| | 计算结果 | 0.1761 | 0.050223 | 0.03208 | 0.02868 |
| | 相对误差(%) | 2.7 | 3.4 | 0.85 | 2.2 |
| (15.0, -2.50) | 实验结果 | 0.01432 | 0.004073 | 0.002593 | 0.002345 |
| | 不确定度 (%,K=1) | 0.82 | 0.85 | 0.76 | 0.76 |
| | 计算结果 | 0.01506 | 0.004200 | 0.002695 | 0.0024409 |
| | 相对误差(%) | 5.2 | 3.1 | 3.9 | 4.1 |



中智核安

ZHONG ZHI HE AN

北京中智核安科技有限公司

——放射性能谱分析专家

| | | | | | |
|------------------|-----------------|----------|----------|----------|-----------|
| (25.0, -2.50) | 实验结果 | 0.005057 | 0.001473 | 0.000946 | 0.000859 |
| | 不确定度 (%,K=1) | 0.83 | 0.87 | 0.77 | 0.77 |
| | 计算结果 | 0.005270 | 0.001524 | 0.000983 | 0.0008872 |
| | 相对误差(%) | 4.4 | 3.4 | 3.9 | 3.3 |