

液闪 TDCR 方法测量放射性⁹⁰Sr 活度

田业辉, 朱保吉, 夏文, 徐利军
(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: ⁹⁰Sr 是一种纯 β 衰变核素, 但由于其衰变子体 ⁹⁰Y 半衰期仅为 64 h, 会对 ⁹⁰Sr 活度准确值带来影响, 鉴于其本身的性质, ⁹⁰Sr 的分析方法比较复杂, 本研究采用液闪三双两双符合计数法(TDCR)对 ⁹⁰Sr 放射性活度进行测量, 在 ⁹⁰Sr-⁹⁰Y 子母体平衡状态下, 测量 ⁹⁰Sr 和 ⁹⁰Y 的总计数, TDCR 总效率计算按照两种核素效率加和计算, TDCR 效率的计算先采用 BataShape 程序计算 ⁹⁰Sr 和 ⁹⁰Y 能谱, 利用编写的效率计算程序基于自由参数模型计算 β 粒子在闪烁液中的计数效率, 得到 ⁹⁰Sr/⁹⁰Y 的效率曲线, 结合实验测量的 TDCR 值与效率曲线, 实现 ⁹⁰Sr 活度的绝对测量, 相对标准不确定度为 0.36%, 为环境监测和核安全领域提供了一种可靠的工具。

关键词: 三双两双符合计数法; 锶-90; 放射性活度; 环境监测; 核安全

中图分类号: TL84 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7512(2025)03-0284-08

doi: [10.7538/tws.2024.youxian.104](https://doi.org/10.7538/tws.2024.youxian.104)

Activity Measurement of ⁹⁰Sr using the Liquid Scintillation TDCR Method

TIAN Yehui, ZHU Baoji, XIA Wen, XU Lijun
(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: ⁹⁰Sr is a pure β decay nuclide, but because its decay progeny ⁹⁰Y half-life is only 64 hours, it will have an impact on the accurate determination of ⁹⁰Sr activity, given its own nature, the analysis method of ⁹⁰Sr is relatively complex, the liquid scintillation triple-to-double coincidence ratio method (TDCR) is used to measure the ⁹⁰Sr radioactivity activity, in the state of equilibrium of the ⁹⁰Sr-⁹⁰Y daughter. The total counts of ⁹⁰Sr and ⁹⁰Y were measured, and the calculation of the total TDCR efficiency will be calculated according to the sum of the two nuclide efficiencies. The calculation of the TDCR efficiency was first performed by using the BataShape program to calculate the ⁹⁰Sr and ⁹⁰Y energy spectra, and the efficiency of counting β -particles in the scintillating liquid based on the free-parameter model by using the efficiency calculation program written and obtaining the efficiency curves of ⁹⁰Sr/⁹⁰Y, combined with the experimental results of the TDCR values and efficiency curves are combined to achieve the absolute measurement of ⁹⁰Sr activity with a relative standard uncertainty of 0.36%, which provides a reliable tool for environmental monitoring and nuclear safety fields.

Key words: triple-Double coincidence counting method; strontium-90; radioactivity; environmental monitoring; nuclear safety

锶-90(⁹⁰Sr)是一种长寿命放射性核素,半衰期为28.8 a,发射最大能量为545.9 keV的高能β射线,衰变为钇-90(⁹⁰Y),后者半衰期为64.00 h,具有更高的最大β能量2278.7 keV^[1]。⁹⁰Sr在军事、科研、发光仪表制造、医学等领域发挥着重要作用,同时也是制备核电池和β辐射源等的重要核素。此外作为核裂变产物,⁹⁰Sr在核事故^[2]处理中备受关注,是环境放射性测量的关键核素^[3]。由于其与钙的化学性质相似,⁹⁰Sr在体内的生物效应可参考钙,沉积在骨骼中,长期累积可能导致骨髓造血组织和骨骼组织损伤,诱发再生障碍性贫血、骨组织肉瘤和白血病等^[4],⁹⁰Sr对人体组织构成严重危害^[5]。因此,准确测量环境中⁹⁰Sr的活度对于评估放射性污染、制定环境保护政策以及进行辐射防护具有重要意义。

⁹⁰Sr放射性活度测量通常采用液体闪烁计数法(LSC),操作简便,但对样品的化学预处理要求较高,且易受淬灭效应的影响。液闪三双两双符合比法(TDCR)技术^[6]结合了LSC的高灵敏度和时间分辨技术的优势,能够减少背景噪声和淬灭效应的影响,从而提高测量的准确性。TDCR方法以其一致性好、稳定性高以及受环境干扰因素少而受到青睐^[7]。自20世纪90年代,美国NIST^[8]、德国PTB^[9]、中国计量科学研究院^[10]、法国LNHB实验室^[11]等十余家国内外实验室建立了TDCR测量装置,并应用于放射性核素活度测量。本工作利用国防科技工业电离辐射一级计量站TDCR液闪测量装置,自主开发效率计算程序,开展⁹⁰Sr液闪TDCR测量方法研究。

1 TDCR方法原理

液闪三双两双符合比法(TDCR)作为一种绝对测量方法,在放射性活度的测量中占据着重要地位。液体闪烁计数器以其对低能β放射性核素的高灵敏度、高度自动化和广泛的应用范围而著称。然而,由于电离淬灭的影响,其探测效率并不理想,且探测效率的理论计算面临挑战。为了解决这些问题,国际上发展了一种名为自由参数模型的理论模型^[12],以计算液体闪烁的效率。

在TDCR方法中,探测器装置配备了三个

独立的光电倍增管,分别输出信号。每一路的探测效率计算依赖于物理模型和数学模型,通过对参数的合理选择来进行。对于β衰变核素,计数器的探测效率可以通过在整个衰变能量范围内来计算,如式(1)所示。

$$\varepsilon = \int_0^{E_{\max}} S(E) p(E, \lambda) dE \quad (1)$$

式中: ε 表示探测效率; E_{\max} 表示最大电子能量; $S(E)$ 为归一化的β能谱分布; λ 表示自由参数,指每产生一个能打到光电倍增管第一打拿极的光电子所需要的有效电子能量; p 表示闪烁光子的计数概率。对于给定的电子能量,只需知道待测放射性核素液闪源的自由参数^[12],其探测效率可以通过计算得到。在相同的实验条件下,即闪烁液体系相同,液闪计数器相同,自由参数仅与淬灭水平相关,与待测核素种类并无关系。

当三个光电倍增管互为120°对称分布时,得到三个任意两双符合信号:AB、AC、BC符合信号,以及三双逻辑相加信号ABC符合信号^[13]。三个两双符合逻辑相加的探测效率 ε_D :

$$\begin{aligned} \varepsilon_D = & 3 \int_0^{E_{\max}} S(E) \left(1 - e^{-\frac{EQ(E)}{3\lambda}}\right)^2 dE - \\ & 2 \int_0^{E_{\max}} S(E) \left(1 - e^{-\frac{EQ(E)}{3\lambda}}\right)^3 dE \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $Q(E)$ 表示电离淬灭函数,用于计算电子能量 E 与荧光光子能量的转化关系。

三双符合逻辑相加的探测效率 ε_T :

$$\varepsilon_T = \int_0^{E_{\max}} S(E) \left(1 - e^{-\frac{EQ(E)}{3\lambda}}\right)^3 dE \quad (3)$$

将计算所得 ε_T 与 ε_D 之比定义为TDCR理论值(TDCR_{th})。实验时,将获得三双符合计数率与两双符合逻辑相加计数率之比定义为TDCR实验值(TDCR_{exp})。实验测量过程中计数高达10⁶,可以看作大量随机事件,TDCR实验值应与TDCR理论值相等。两双计数用 N_D 表示,三双计数用 N_T 表示,即存在等式:

$$TDCR_{\text{exp}} = TDCR_{\text{th}} = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_D} = \frac{N_T}{N_D} \quad (4)$$

在经验值范围内选取一个电离淬灭参数(kB)值,得到此测量条件下的自由参数值(λ),计算得到探测效率。对同一液闪源,不同效率点的活度应相同,因此通过改变液闪源的探测

效率验证 k_B 值选取是否合适。结合近 20 年国内外实验经验, 如美国 NIST、德国 PTB 等, 最合适的选取范围为 0.008~0.014 cm/MeV(^3H)针对 ^{90}Sr 并没有明确的选取范围, 本研究选取范围为 0.007~0.015 cm/MeV^[14]。

2 实验方法

β^+ 衰变在液闪中探测效率很高, 无限接近于 1^[15], 应用编写 TDCR 效率计算程序对经过标准装置测量的 ^3H 和 ^{14}C 进行测量, 采用两种液闪方法 TDCR 法和 CIEMAT-NIST(C/N)方法测量标准源溶液活度以验证该方法的准确性。液闪 C/N 方法也是一种利用液体闪烁计数器进行放射性核素活度测量的方法, 基于自由参数模型原理依据放射性核素衰变产生的 β 射线与闪烁液分子相互作用产生荧光效应完成活度测量。作为一种效率示踪方法, 在纯 β 、 β - γ 、EC 及 EC- γ 衰变核素活度测量以及同分异构体和复杂衰变核素^[16] 中被广泛应用。液闪 C/N 方法利用示踪核素得到自由参数和淬灭因子间的函数关系, 用两种液闪方法对 ^3H 和 ^{14}C 两种核素进行活度测量, 其中 TDCR 方法的效率计算借助程序进行, TDCR 方法测量 ^3H 结果为: 686.39 Bq/mg, C/N 方法测量结果为 686.39 Bq/mg, 相对偏差为 0.08%; TDCR 方法测量 ^{14}C 结果为: 20.84 Bq/mg, C/N 方法测量结果为 20.73 Bq/mg, 相对偏差为 0.53%, 所得结果较为一致, 可实现 ^{90}Sr 活度准确测量。

用 TDCR 方法测量 ^{90}Sr 的活度, 实验过程包括测量装置的准备, 样品制备、实验测量等部分。

2.1 测量装置

实验测量装置为芬兰商用 Hidex 300 SL Automatic TDCR 液体闪烁计数器, 配备了铅屏蔽室、低本底 PMT 探测器和主动反符合屏蔽

探测器以进一步降低本底。为保证样品计数有足够的统计性, 单个 ^{90}Sr 液闪样品的测量时间为 10 min, 本底样品的测量时间为 30 min。实验测量仅采集脉冲信号, 并储存为列表模式文件中。测量系统的信号处理采用 TDCR 软件程序, 信号处理参数设置如下: 1) 符合分辨时间设置为 40 ns; 2) 考虑到余后脉冲可能导致假计数, 施加的扩展死时间需要足够长以抑制余后脉冲的触发, 死时间设置为 50 μs 。

2.2 ^{90}Sr 液闪样品制备

实验过程中用到的液体闪烁液为 Ultima GoldTM LLT 型闪烁液, Perkin Elmer 公司提供; 1 mol/L 的 SrCl_2 溶液稳定剂, 由国药集团提供。 ^{90}Sr 母液当日比活度约为 400 Bq/g, 由 0.1 mol/L 的稀盐酸溶液和放射性 ^{90}Sr 溶液组成, 为确保放射性核素的纯度, 使用 HPGe 探测器优先进行核纯鉴定, 扣除本底后未见特征峰, γ 杂质小于 0.1%。

从该溶液中分取, 稀释, 制成母液, 并制备液闪源进行放射性核素活度的绝对测量研究。测量样品是含放射性核素 ^{90}Sr 的溶液和淬灭溶剂溶质所组成的闪烁体系。准备 5 个 20 mL 液闪计数器专用低钾硼玻璃瓶, 制备成 4 个液闪源样品和 1 个空白样品。1 号样品为空白样品, 由 15 mL 闪烁液和 1 mL 水制成, 作为本底计数进行测量, 2~5 号样品中加入等量同种闪烁液和 0.6 mL 蒸馏水, 4、5 号样品中分别加入 0.3 mL、0.6 mL 硝基甲烷淬灭剂, 用塑料小壶向样品瓶中转移一定量待测 $^{90}\text{SrCl}_2$ 溶液。将放射性核素溶液和液体闪烁体均匀混合, 得到液体闪烁源, 样品的制备如图 1 所示。样品组成列于表 1。

2.3 效率计算

^{90}Sr 存在级联核素 ^{90}Y 。 ^{90}Sr 是一种 β 辐射

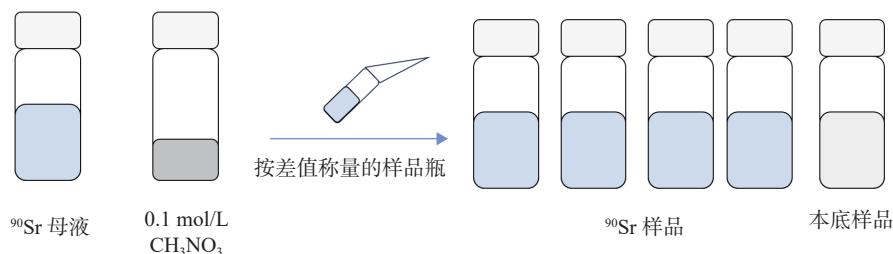


图 1 ^{90}Sr 样品制备示意图

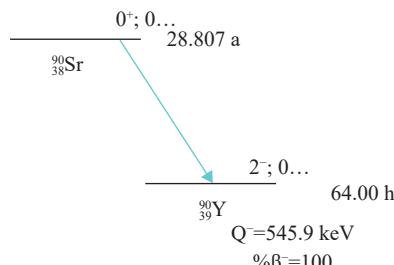
Fig.1 Schematic diagram of the sample preparation process of ^{90}Sr

表 1 ⁹⁰Sr 样品源组成Table 1 Sample source composition of ⁹⁰Sr

编号	液闪瓶类型	质量/g	闪烁液种类	闪烁液体积/mL	硝基甲烷/mL	水/mL
1	玻璃瓶	0	UG TM -LLT	15	0	1
2	玻璃瓶	0.47995	UG TM -LLT	15	0	0.6
3	玻璃瓶	0.60565	UG TM -LLT	15	0	0.6
4	玻璃瓶	0.40657	UG TM -LLT	15	0.3	0.6
5	玻璃瓶	0.43664	UG TM -LLT	15	0.6	0.6

体, 半衰期为 28.8 a, 衰变时发射 β 射线, 最大能量为 545.9 keV。研究中将 β 跃迁的跃迁概率假定为 100%, 另外两个 β - γ 跃迁较弱可以忽略。⁹⁰Sr 衰变子体⁹⁰Y 的半衰期为 64.00 h, 能够发射能量为 2278.7 keV 的 β 粒子, 在组织中的最大射程为 11 mm。由于⁹⁰Y 的半衰期较短, 可以通过⁹⁰Sr 的衰变形成, 达到放射性平衡。因此在测量⁹⁰Sr 放射性活度时需要将两者共同考虑。⁹⁰Sr 衰变纲图示于图 2。

由于⁹⁰Sr 衰变的特殊性, 在对其进行效率计算时, 需要考虑级联核素⁹⁰Y 的影响, TDCR 值为(⁹⁰Sr 的 T 值+⁹⁰Y 的 T 值)/(⁹⁰Sr 的 D 值+⁹⁰Y 的

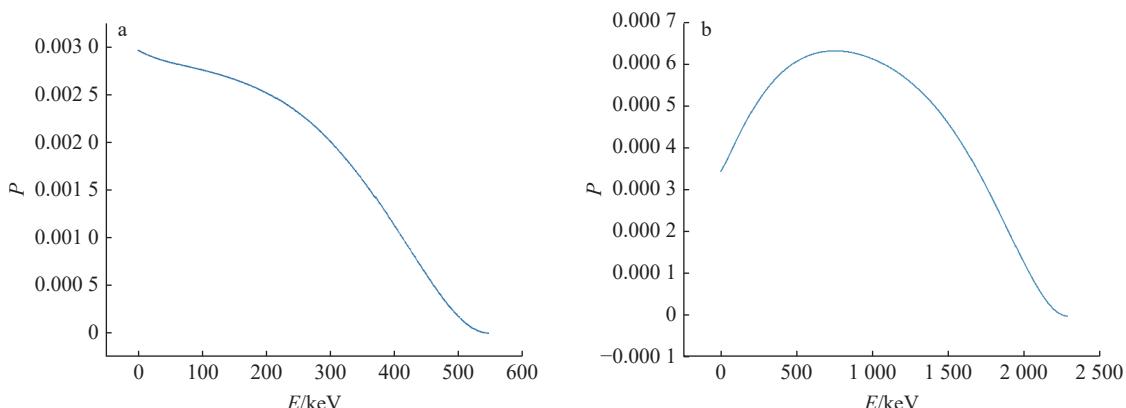
图 2 ⁹⁰Sr 衰变纲图Fig.2 Decay scheme of ⁹⁰Sr

D 值), 将实验测定的 TDCR 值进行对比, 液闪计数效率即为对应 TDCR 值下的效率值。按照式(5)进行计算。

$$\text{TDCR} = \frac{T_{\text{exp}}}{D_{\text{exp}}} = \frac{\varepsilon_{T(\text{Sr})} + \varepsilon_{T(\text{Y})}}{\varepsilon_{D(\text{Sr})} + \varepsilon_{D(\text{Y})}} \quad (5)$$

为了尽可能准确模拟粒子衰变在闪烁液体系中的物理过程得到探测效率, 编写一套用于计算效率的程序实现放射性⁹⁰Sr 活度的测量。使用新版本的 BetaShape 程序计算相应能谱, β 能谱 $N(E)$ 需要准确计算 β 粒子在闪烁液中的相互作用过程, 考虑费米理论分布和形状因子函数。模拟所得能谱如图 3 所示, 能谱经过归一化处理后, 分成 1024 个能级 ($P_{1024}=1$, $E_{1024}=E_{\beta, \max}$), 计算每一个能级的概率, 在 0~1 之间选取一个随机数 N_r 来对应电子的能量区间, 选取另一个随机数来确定电子的能量, 假设能量区间均匀分布。闪烁液发出的光子数与入射粒子能量的转换关系用 Birks 电离猝灭函数 $Q(E)$ 计算如式(6)所示:

$$Q(E) = \frac{1}{E} \int_0^E \frac{dE}{1 + kB \left(\frac{dE}{dX} \right)} \quad (6)$$

a—⁹⁰Sr 能谱; b—⁹⁰Y 能谱图 3 ⁹⁰Sr 和 ⁹⁰Y 的能谱图Fig.3 Spectrogram of ⁹⁰Sr and ⁹⁰Y

式中: kB 为电离淬灭参数, 只与闪烁液分子组成有关; dE/dX 为闪烁液分子的电子组织本领, 依据 Bethe-Bloch 公式计算得到, 若能量低于 1 keV 则依照 $\frac{dE}{dx} = \frac{dE}{dx}|_{1\text{keV}} \cdot E^{-1.1}$ 计算。

针对 β 粒子探测效率的计算: 三双符合计数效率用式(7)计算:

$$\varepsilon_D(\lambda) = \frac{\sum_{i=1}^N \left\{ 3 \left(1 - \exp \left[- \frac{\sum_{l=1}^{M_i} E_{il} Q(E_{il})}{3\lambda} \right] \right)^2 - 2 \left(1 - \exp \left[- \frac{\sum_{l=1}^{M_i} E_{il} Q(E_{il})}{3\lambda} \right] \right)^3 \right\}}{N} \quad (7)$$

依据待计算核素数据, 计算出能量分布, 即归一化的能谱 $S(E)$, 结合能谱和电离淬灭函数 $Q(E)$ 计算计数效率 ε 。

应用程序计算的流程如图 4 所示。

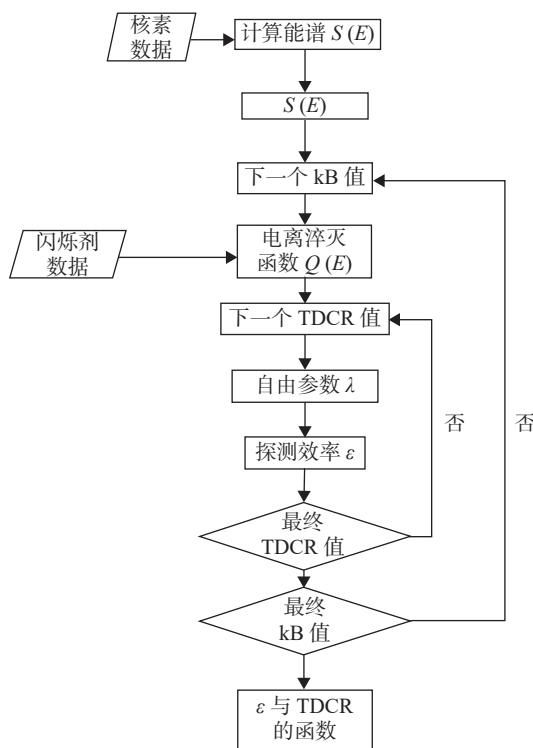


图 4 效率计算程序示意图

Fig.4 Schematic diagram of the efficiency calculation program

2.4 实验测量

将配制好的液闪源按顺序放在液闪计数器中, 设置符合时间为 40 ns, 测量时间 10 min。为了提高实验结果的准确性, 对 4 个放射性样品分别进行三次独立测量, 对 1 个空白本底样品进行连续 30 min 的测量, 测量 6 次以确保结果

$$\varepsilon_T(\lambda) = \frac{\sum_{i=1}^N \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{\sum_{l=1}^{M_i} E_{il} Q(E_{il})}{3\lambda} \right] \right\}^3}{N} \quad (7)$$

式中: E_{il} 为某一能量区间。

两双符合计数效率用式(8)计算:

$$\varepsilon_D(\lambda) = \frac{\sum_{i=1}^N \left\{ 3 \left(1 - \exp \left[- \frac{\sum_{l=1}^{M_i} E_{il} Q(E_{il})}{3\lambda} \right] \right)^2 - 2 \left(1 - \exp \left[- \frac{\sum_{l=1}^{M_i} E_{il} Q(E_{il})}{3\lambda} \right] \right)^3 \right\}}{N} \quad (8)$$

的可靠性, 避免本底计数对测量结果的影响。

3 结果与讨论

3.1 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 效率计算曲线

$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 在 UGTM-LLT 闪烁液中的效率计算曲线如图 5 所示, 该曲线表示探测效率与 TDCR 值对应关系, 包含任意两双逻辑相加探测效率和三双逻辑相加探测效率。

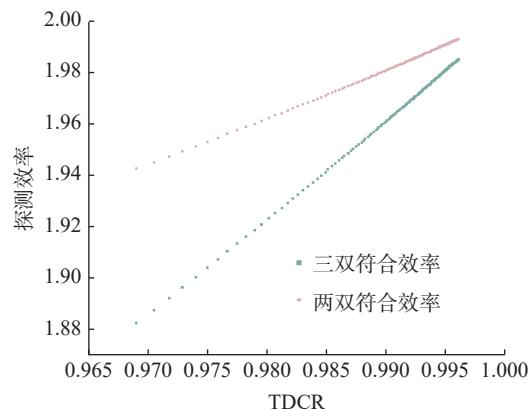


图 5 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 在 UGTM-LLT 闪烁液中的效率曲线

Fig.5 Efficiency curves of $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ in UGTM-LLT scintillation fluid

3.2 ^{90}Sr 活度测量结果

待测核素的活度值按照式(9)进行计算,

$$A = \frac{N}{\varepsilon} \quad (9)$$

式中: A 为放射性核素溶液活度, N 为两双符合计数率, ε 为以实验值为依据, 按照 TDCR 效率计算求取的值。

比活度按照式(10)进行计算,

$$A_m = \frac{A}{m} \quad (10)$$

根据实验计算扣除本底后的两双符合净计数率 N_D 和三双符合净计数率 N_T , 并计算实验 TDCR 值, 在图 5 中查找计数效率。

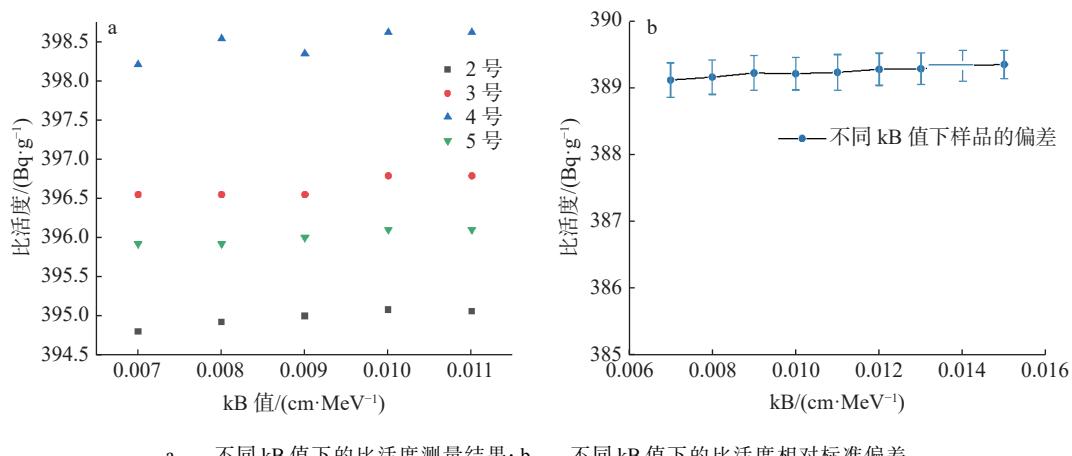
依据式 8-0 可以计算出⁹⁰Sr 液闪源样品的比活度, 结果列于表 2, 表中计数率为扣除本底后的两双符合净计数率, 效率取值对应 3.1 节中效率曲线的两双符合探测效率, 由表 2 可知, 待

测核素溶液比活度的平均值为 396.64 Bq/g, 相对标准偏差为 0.33%, 一致性较好。

同时在文献参考范围内选取不同的 kB 值进行相应的效率计算, 得到的样品比活度值如图 6 所示。图 6a 中横坐标表示 kB 值, 变化范围为 0.007~0.011 cm/MeV, 纵坐标表示样品比活度。图 6b 列出不同 kB 值下样品源的标准偏差。

表 2 ⁹⁰Sr 溶液比活度测量结果Table 2 The measurement results of specific activity of the ⁹⁰Sr solution

序号	质量/g	净计数率	净TDCR	效率/%	比活度/(Bq·g ⁻¹)
1	0	184	0.6467	/	/
2	0.47995	22302	0.9899	196.03%	395.07
3	0.60565	28230	0.9902	196.13%	396.09
4	0.40657	18799	0.9852	194.22%	396.78
5	0.43664	20084	0.9802	192.32%	398.61
平均值					396.64
相对标准偏差					0.33%

Fig.6 The measurement results of specific activity at different kB values of the ⁹⁰Sr/⁹⁰Y solution

3.3 不确定度评估

测量结果的不确定度来源于实验测量和理论计算, 实验测量不确定度来源于计数统计、本底、死时间、称重、半衰期修正, 理论计算部分归结为效率计算(含计算参数 kB), 各不确定度分量列于表 3。

计数统计带来的标准不确定度 u_N 为 $u_N = \sqrt{N}$; 相对标准不确定度为 $u_{rel}(N) = \frac{u_N}{N} = \sqrt{N}/N = \frac{1}{\sqrt{N}}$, 实验测量样品的总计数范围为: 1002366-1698720, 以最小计数来计算, 样品相对标准不确定度为 0.10%。

本底修正带来的不确定度按照 B 类评定方法进行评估, 标准不确定度为: $u_b = \sqrt{\frac{N_b}{t_b^2}} = \sqrt{\frac{n_b}{t_b}}$, 相对标准不确定度为: $u_{rel}(b) = \frac{u_b}{n} = \frac{\sqrt{N_b/t_b^2}}{N/t_b}$, N 为样品计数, n 为样品计数率, t_b 为样品测量时间, 根据计算得到 0.01%。

死时间带来的不确定度是按照仪器给出的死时间值与活时间计算, 计算值为 0.01%。

称重带来的不确定度追溯到十万分之一天平, 计算值为 0.10%。

半衰期修正带来的不确定度为: $u_{rel}(T_{1/2}) =$

表3 液闪 TDCR 方法测量⁹⁰Sr 溶液比活度的不确定度分量Table 3 The uncertainty components for specific activity of the ⁹⁰Sr solution measured by TDCR method

不确定度分量	相对值/%	注解
计数统计	0.10	计数涨落引起的不确定度
本底	0.01	本底扣除引起的不确定度
死时间	0.01	设置不同死时间, 比活度的改变
效率计算(kB值和TDCR值)	0.33	计算模型和核数据引入的不确定度
称重	0.10	天平校准引起的不确定度
半衰期修正	0.10	⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y半衰期引起的不确定度
合成标准不确定度	0.36	

$$\frac{\ln(2) \times t}{T_{1/2}^2} \times \Delta T_{1/2}, \text{计算值为 } 0.10\%.$$

由效率计算所带来的不确定度来源可以归结为 kB, 样品重复测量三次, 以三个 kB 值 0.009、0.010、0.011 cm/MeV 下的 4 个样品测量结果进行评估, 测量结果平均值标准不确定度按贝塞尔公式: $u_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$ 计算, 计算值为 0.33%。

以上各不确定度分量相互独立, 以 $u_{(xi)} = \sqrt{\sum_{k=1}^m u_k^2(x_i)}$ 合成, 计算值为 0.36%。

4 结论

本研究针对⁹⁰Sr 放射性活度绝对测量需求, 计算了⁹⁰Sr 和⁹⁰Y 的能谱, 以自由参数模型为基础编写了一个计算程序, 计算了放射性⁹⁰Sr 在闪烁液中的效率曲线: ⁹⁰Y 的存在会干扰⁹⁰Sr 的探测效率计算, 在⁹⁰Sr-⁹⁰Y 平衡状态下, 液闪探测效率是根据两种核素的探测效率按照比例相加得到的, 探测效率计算过程中考虑⁹⁰Sr 和⁹⁰Y 的能谱对于效率计算的影响, 以⁹⁰Y 探测效率乘以平衡因子: $\frac{T_{1/2}(\text{⁹⁰Sr})}{T_{1/2}(\text{⁹⁰Sr}) - T_{1/2}(\text{⁹⁰Y})} = 1.000\ 25$ 与⁹⁰Sr 的探测效率加和作为⁹⁰Sr/⁹⁰Y 在闪烁液中的探测效率, 半衰期的取值均参考国际值, 在放射性核素活度计算时可以使用该效率曲线; 对制备的 4 个放射性⁹⁰Sr 样品进行了测量, 结果为 (396.64 ± 1.43) Bq/g, 合成标准不确定度为 0.36%。计算了不同 kB 值下对应的效率值, kB 值描述了闪烁体溶液中电离辐射的线性能量转移, 取值对于低能 β 发射体活度测量有影响, 本工作计算了在不同 Birks 参数 kB 值下的样品比活度, 在 0.007~0.011 cm/MeV 范围内适当选取 kB 值对活度值(比活度值)的计算影响并不大, 最大偏差为 0.05%。

参考文献:

- [1] Bé M, Chisté V, Dulieu C, et al. Table of Radionuclides[J]. Monographie BIPM-5, 2006, 5(3): 87-92.
- [2] Westcott M A, Coldwell D M, Liu D M, et al. The development, commercialization, and clinical context of yttrium-90 radiolabeled resin and glass microspheres[J]. *Advances in Radiation Oncology*, 2016, 1(4): 351-364.
- [3] Haase G, Tait D, Wiechen A. Ergebnisse der ringanalyse 95/96 zur bestimmung von Gamma-Radionukliden, Sr-90, Pu-238 und Pu-239 in Bodenproben[J]. 1996, 48(3): 209-239.
- [4] 朱寿彭. 放射毒理学[M]. 北京: 原子能出版社, 1983.
- [5] Brun S, Bessac S, Uridat D, et al. Rapid method for the determination of radiostrontrium in milk[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2002, 253(2): 191-197.
- [6] Broda R, Cassette P, Kossert K. Radionuclide metrology using liquid scintillation counting[J]. *Metrologia*, 2007, 44(4): S36-S52.
- [7] Broda R. A review of the triple-to-double coincidence ratio (TDCR) method for standardizing radionuclides[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2003, 58(5): 585-594.
- [8] Zimmerman B E, Collé R, Cessna J T. Construction and implementation of the NIST triple-to-double coincidence ratio (TDCR) spectrometer[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2004, 60(2-4): 433-438.
- [9] Cassette P, Vatin R. Experimental evaluation of TDCR models for the 3 PM liquid scintillation counter[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1992, 312(1-2): 95-99.
- [10] 吴永乐, 梁珺成, 刘浩然, 等. 液闪 TDCR 活度测量装置的研制[J]. 计量学报, 2014, 35(1): 83-86.
Wu Yongle, Liang Juncheng, Liu Haoran, et al. Construction and implementation of a liquid scintillation TDCR system[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2014, 35(1): 83-86 (in Chinese).

- [11] Bouchard J, Cassette P. MAC3: An electronic module for the processing of pulses delivered by a three photomultiplier liquid scintillation counting system[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2000, 52(3): 669-672.
- [12] Carles GA, Kossert K. Monte Carlo simulation of Auger-electron spectra[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2008, 67(1): 192-196.
- [13] Broda R, Cassette P, Kossert K . Radionuclide Metrology using Liquid Scintillation Counting[J]. *Metrologia*, 2007, 44(4): S36.
- [14] Kossert K, Mougeot X. Improved activity standardization of ⁹⁰Sr/⁹⁰Y by means of liquid scintillation counting[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2021, 168: 109478.
- [15] 刘皓然, 柳加成, 梁珺成, 等. 液闪 TDCR 方法测量 ¹⁸F 核素活度[J]. *计量学报*, 2011(B12): 26-29.
- Liu Haoran, Liu Jiacheng, Liang Juncheng, et al. Activity measurement of ¹⁸F with TDCR-LS methods[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2011(B12): 26-29 (in Chinese).
- [16] da Silva M A L, Poledna R, Iwahara A, et al. Standardization and decay data determinations of ¹²⁵I, ⁵⁴Mn and ²⁰³Hg[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2006, 64(10-11): 1440-1445.