

氚化水放射性活度的绝对测量

吴永乐^{1,2}, 刘浩然^{2,3}, 柳加成^{1,3}, 梁珺成³, 杨元第³, 袁大庆^{2,*}

1. 环境保护部 核与辐射安全中心, 北京 100082;

2. 中国原子能科学研究院 核物理研究所, 北京 102413; 3. 中国计量科学研究院, 北京 100013

摘要:液体闪烁计数器具具有无自吸收、制源简单、操作简便等特点, 测量氚化水具有一定优势。利用液闪 CIEMAT/NIST 方法和三双符合比(TDCR)方法校准氚化水的比活度, 旨在为氚化水标准物质的研制提供定值手段。以⁵⁴Mn 作为示踪核素应用 CIEMAT/NIST 方法标准化氚化水比活度, 合成标准不确定度为 0.80%。液闪 TDCR 方法应用装配有 3 个光电倍增管的计数器, 根据测量的符合信息直接计算得到探测效率, 绝对测量氚化水比活度, 合成标准不确定度为 0.66%。应用这两种方法测量了同一组氚化水淬灭系列源, 测量结果 E_n 数检验满意。

关键词:氚化水; 液闪测量; TDCR 方法; CIEMAT/NIST 方法

中图分类号:TL81 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9950(2016)01-0032-06

doi:10.7538/hhx.2016.38.01.0032

Absolute Measurement of Activity of Tritiated Water

WU Yong-le^{1,2}, LIU Hao-ran^{2,3}, LIU Jia-cheng^{1,3}, LIANG Jun-cheng³,
YANG Yuan-di³, YUAN Da-qing^{2,*}

1. Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Beijing 100082, China; 2. China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275(50), Beijing 102413, China;
3. National Institute of Metrology, Beijing 100013, China

Abstract: Liquid scintillation (LS) counting has advantages in no self-absorption, simple sample preparation, and relatively easy application to many radionuclides, especially for ³H which emits low energy β rays. The aim of this work is to calibrate the specific activity of the standard reference material of tritiated water to be developed, and the CIEMAT/NIST and TDCR methods were studied. The CIEMAT/NIST method with ⁵⁴Mn efficiency tracing was applied to standardize tritiated water on a Packard Tri-carb 3100TR spectrometer, and the combined standard uncertainty was 0.80%. The triple to double coincidence ratio (TDCR) efficiency calculation method requires a special LS-counter equipped with 3 photomultiplier tubes (PMTs) in coincidence, and could determine the specific activity through the information of coincidence counts. The tritiated water was also absolutely measured by the TDCR

收稿日期: 2015-10-10; 修订日期: 2015-11-29

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(11405071)

作者简介: 吴永乐(1984—), 男, 山东临沂人, 博士, 工程师, 辐射防护及环境保护专业

* 通信联系人: 袁大庆(1969—), 男, 重庆人, 博士, 研究员, 从事放射性计量研究, E-mail: yuandaq@ciae.ac.cn

method, and the combined standard uncertainty is 0.66%. The results determined by the two methods are consistent with each other within E_n criterion.

Key words: tritiated water; liquid scintillation counting; TDCR method; CIEMAT/NIST method

氟为低能纯 β 衰变核素, β 粒子能量低($E_{\max} = 18.6 \text{ keV}$),准确标定其活度是放射性计量领域公认的难题之一^[1]。氟放射性活度测量的关键是排除自吸收效应并提高探测效率,目前所用的测量仪器主要有活度量热计、内充气正比计数器和液体闪烁计数器等。由于活度量热计灵敏度低,0.912 GBq 的氟化水才能达到 $1 \mu\text{W}$ 的功率,主要用于高活度(10 GBq 量级以上)氟化水源测量^[2]。用内充气正比计数器测量氟化水活度,会遇到将氟化水转化成氟气的问题,转化效率和 ^3H 气体被测量系统吸附都会给这种方法带来较大的误差,而且操作比较复杂,国际上只有几家国家计量实验室掌握这种技术,还经常碰到结果分歧的麻烦^[3-4]。液闪计数器具有 4π 立体角、无自吸收、制源简单、操作简便等优点,已广泛应用于氟化水活度的测量。但由于电离淬灭等原因,也存在探测效率相对偏低(最大约为 60%)和探测效率理论计算复杂等问题,绝对测量比较困难。近年来,国际上提出了一种液闪效率计算理论模型,即自由参数模型^[5],可以通过实验测量的数据和效率计算理论模型直接得到待测液闪源的放射性活度。基于自由参数模型,发展了液闪 CIEMAT/NIST(C/N)方法和三双符合比(TDCR)方法。国际计量局(BIPM)已将这两种方法作为参考方法组织了多次国际比对^[4,6]。其中,液闪 C/N 方法使用的是商用双管液闪仪,利用示踪核素和理论计算确定待测样品的活度值,属于相对测量方法。但由于示踪核素 ^{54}Mn 可以用 $4\pi(\text{X}, \text{e})-\gamma$ 方法绝对测量,从而不依赖氟化水标准物质标定氟化水活度浓度,测量结果溯源至绝对测量。液闪 TDCR 方法需要使用装配 3 个光电倍增管的液闪计数器,同时采集 1 组三重符合计数和 3 组两重符合计数,测量数据提供了具有足够的符合信息,可直接计算被测样品的探测效率从而确定活度值,是一种绝对测量方法。由于这种基于效率计算的液闪 TDCR 计数器技术复杂,目前国际上仅有十余家国家计量实验室在自行设计和研制该仪器^[7-9]。

本工作拟通过对氟化水测量方法分析,利用液闪 C/N 方法和 TDCR 方法校准氟化水的活度

浓度,可为氟化水标准物质的研制提供定值手段。

1 基本原理

1.1 自由参数模型

放射性核素在闪烁液中衰变,假设衰变产生能量为 E 的单能电子。电子的能量一部分激发闪烁液发光而转变为光子的能量,一部分由于淬灭原因而损失,使得最终转换成有效荧光的能量与电子的初始能量是非线性的。电离淬灭函数 Q 用于计算电子能量(E)转化为荧光光子能量的系数,Birk 电离淬灭函数计算如式(1)。

$$Q = \frac{1}{E} \int_0^E \frac{dE}{1 + k_B(dE/dX)} \quad (1)$$

式中: k_B 为 Birk 因子,是仅与所用的闪烁液有关的常数; dE/dX 为闪烁液的电子阻止本领,可用 Bethe-Bloch 公式计算^[5]。

为简便计算探测效率,引入了自由参数 λ 这一物理量。 λ 是指每产生一个能打到光电倍增管(PMT)第一打拿极的光电子所需要的有效电子能量(keV)^[10],如式(2)所示。

$$\lambda = \frac{EQ}{\bar{m}} \quad (2)$$

式中: $\bar{m}$ 为光电倍增管第一打拿极探测到的平均光电子数,是由液闪源发射荧光光子将 PMT 光阴极打出光电子经加速到第一打拿极而产生的。

一般来说,PMT 第一打拿极只要采集到光电子,液闪计数器就探测到一次核衰变事件。PMT 采集的光电子数目服从泊松分布 $P(m)$ ^[5],则计数器的探测效率 ϵ 计算如式(3)。

$$\epsilon = 1 - P(0) = 1 - \exp\left(-\frac{EQ}{\lambda}\right) \quad (3)$$

由式(3)可知,只要得到待测液闪源的自由参数,便可计算出其探测效率。在采用同种闪烁液体系、同一台液闪计数器情况下,自由参数仅与淬灭水平有关,与测量何种核素无关。液闪 C/N 方法是利用示踪核素获得自由参数与淬灭水平的关系曲线,而液闪 TDCR 方法是利用装配有 3 个 PMTs 的液闪计数器,一次测量便可以获取足够的符合计数信息,通过最优化方法直接解出自由参数。

1.2 液闪 CIEMAT/NIST 方法

液闪 C/N 方法是一种效率示踪方法,广泛应用于纯 β 、 β - γ 、轨道电子俘获(electron capture, EC)和 EC- γ 衰变核素活度测量^[11]。液闪 C/N 方法使用装配有两个水平对称放置光电倍增管的计数器,两管符合探测效率计算如式(4)。

$$\epsilon = \left(1 - \exp\left(-\frac{EQ}{2\lambda}\right)\right)^2 \tag{4}$$

式(4)计算的为单能电子的探测效率。若核素衰变出 β 粒子,则通过费米理论计算出归一化的 β 能谱分布 $S(E)$,再通过积分得到探测效率(式(5))。

$$\epsilon = \int_0^{E_{\max}} S(E) \left(1 - \exp\left(-\frac{EQ}{2\lambda}\right)\right)^2 dE \tag{5}$$

若核素衰变出 X、 γ 粒子,则需要计算沉积在闪烁液中的能量,即 X、 γ 射线与闪烁液发生光电效应、康普顿效应和电子对效应等相互作用而产生电子的能量。因此,理论上,C/N 方法适用于全部放射性核素的活度测量。

液闪 C/N 方法一般以低能纯 β 核素氚来示踪其它放射性核素,而本次试验选择⁵⁴Mn 作为示踪核素测量氟化水尚属首次。选择⁵⁴Mn 为示踪核素一方面因为⁵⁴Mn 为 EC- γ 衰变核素,可以用 $4\pi(X, e)\text{-}\gamma$ 符合绝对测量其活度,不确定度一般可以控制在 0.6% 以内;另一方面,EC 衰变产生的电子和 X 射线能量都较低,使得⁵⁴Mn 活度不确定度传递收敛,被测核素不确定度将会被进一步降低。通过示踪核素样品来确定自由参数与淬灭水平的函数曲线后,在使用同一台液闪计数器和同一闪烁液体系情况下,理论上可以适用于所有其它放射性核素的活度测量。

1.3 液闪 TDCR 方法

液闪 TDCR 方法是一种绝对测量方法,根据待测样品的计数率可直接得到活度值,不依赖标准物质。由于基于效率计算的液闪 TDCR 方法对仪器有特殊要求,需实验室自行研制。新建立的液闪 TDCR 活度测量装置示于图 1,装配有 3 个 PMTs(A、B、C),可同时测量 3 个 PMTs 的逻辑相加(S)、两重符合逻辑相加(D)、三重符合(T)、两重符合(AB、BC、CA)的计数 N_S 、 N_D 、 N_T 、 N_{AB} 、 N_{BC} 、 N_{CA} 。MAC3 符合单元利用活时间钟技术记录样品的测量活时间 t 。

一般 3 个 PMTs 的探测效率各不相同,设自由参数分别为 λ_A 、 λ_B 、 λ_C ,则三重符合、两重符合效率分别为 ϵ_T 和 ϵ_{XY} ($XY = AB、BC$ 或 CA) (式(6)、(7))。

$$\epsilon_T = \int_0^{E_{\max}} S(E) (1 - e^{-EQ/3\lambda_A}) (1 - e^{-EQ/3\lambda_B}) \cdot (1 - e^{-EQ/3\lambda_C}) dE \tag{6}$$

$$\epsilon_{XY} = \int_0^{E_{\max}} S(E) (1 - e^{-EQ/3\lambda_X}) \cdot (1 - e^{-EQ/3\lambda_Y}) dE \tag{7}$$

利用下山单纯形最优化算法求出目标函数(式(8))达到最小值,便可以得到 λ_A 、 λ_B 、 λ_C ,从而计算出探测效率。

$$\Delta = \left(\frac{\epsilon_T}{\epsilon_{AB}} - \frac{N_T}{N_{AB}}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon_T}{\epsilon_{BC}} - \frac{N_T}{N_{BC}}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon_T}{\epsilon_{CA}} - \frac{N_T}{N_{CA}}\right)^2 \tag{8}$$

目前,液闪 TDCR 方法在纯 β 衰变核素(如³H、⁹⁹Tc 等)绝对测量中取得很好的实践^[12-13]。人们也正在研究推广至复杂衰变纲图核素,如 EC、 β - γ 等核素^[14-15]。

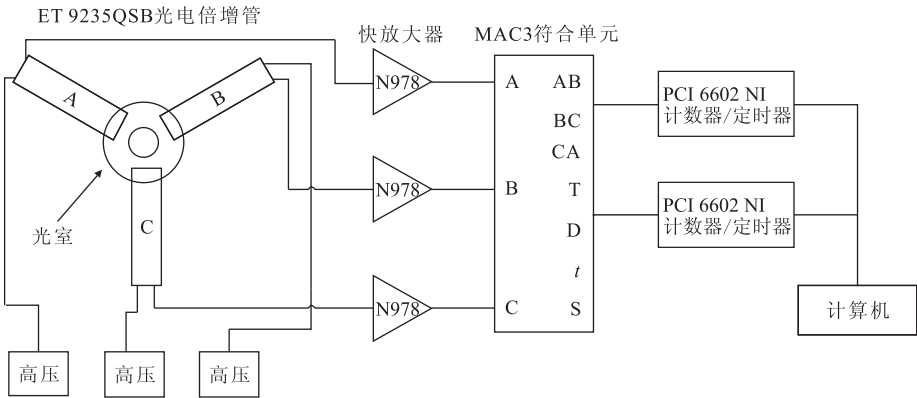


图 1 液闪 TDCR 计数装置框图
Fig. 1 Schematic diagram of TDCR liquid scintillation counting system

2 实验部分

2.1 试剂和仪器

^{54}Mn 标准物质(证书编号为 76485/1), $a=(3.476\pm0.026)$ MBq/g,法国 CERCA LEA;液体闪烁液,UltimaGoldTM AB 型,Perkin Elmer 公司;EDTA-2Na 稳定剂,0.025 mol/L,分析纯,国药集团。

Tri-carb 3100TR 型液闪谱仪,Perkin Elmer 公司,对无淬灭 ^3H 源(正十六烷)的探测效率为 66%,配备了 ^{133}Ba 外标准源,用于测量样品的淬灭指示水平 tSIE。新研制的液闪 TDCR 活度测量装置^[9]示于图 1,对无淬灭 ^3H 源(正十六烷)的探测效率为 72.6%。

2.2 实验方法

2.2.1 液闪源的制备 先用取样器取 15 mL 等量的 AB 型闪烁液加入两组 20 mL 低钾玻璃瓶,然后分别加入不同质量的氟化水或 ^{54}Mn 溶液,再加入 1 mL 0.025 mol/L 的 EDTA-2Na 稳定剂和 $\omega(\text{Mn}^{2+})=10\text{ }\mu\text{g/g}$ 混合溶液(对于 ^3H 源,加等量无氟化水)。为制备不同淬灭水平的液闪源,分别加入不等量的 10%(体积比) CH_3NO_2 (溶剂为乙醇)淬灭剂(0~270 μL)。由于 ^{54}Mn 源为强酸溶液,淬灭水平一般比较高,为使其淬灭水平与 ^3H 液闪源在相同的范围内,加入淬灭剂的量要少。共制备了 12 个 ^{54}Mn 液闪源、8 个氟化水液闪源和 1 个空白样品,振荡均匀后进行避光 48 h。

2.2.2 液闪 CIEMAT/NIST 方法测量 在液闪谱仪上,先后测量 ^{54}Mn 、 ^3H 液闪源的计数率和淬灭指示参数 tSIE,每次测量 20 min(计数大于 10^5),重复测量 10 次。由于 ^{54}Mn 液闪源的活度值已知,因此可由实验测量的计数率得到其探测效率,结果列入表 1。由表 1 可知, ^{54}Mn 探测效率为 29.98%~42.18%,对应的 tSIE 在 320~500 范围内。 ^{54}Mn 为 EC- γ 衰变核素,电子俘获后子核电子会重排,会发射俄歇电子、Coster-Kronig 电子、X 射线,电子俘获的同时瞬发 γ 射线。生成的电子可以直接进行效率计算;而 X 射线、 γ 射线会与闪烁液的分子发生光电效应、康普顿效应等相互作用产生电子,生成的电子就可以计算出探测效率。其中,俄歇电子、Coster-Kronig 电子和光电子均为单能电子,可以直接计算其效率;而康普顿电子则需要通过蒙卡模拟其能量理论分布,然后计算其探测效率。理论计算时,应用

$\text{KL}_1\text{L}_2\text{L}_3\text{M}$ 子核电子重排模型,并考虑低能光子修正^[15],得到 ^{54}Mn 探测效率随自由参数 λ 变化的函数。实验测量和理论计算含有同一参数: ^{54}Mn 探测效率,用其为传递参数,便可以得到自由参数 λ 与淬灭指示参数 tSIE 关系,结果列入表 1。虽然淬灭指示参数 tSIE 和自由参数 λ 的关系由示踪核素 ^{54}Mn 得到,但通过定义可知这两个参数均与被测核素本身无关。因此,淬灭指示参数 tSIE 和自由参数 λ 的关系曲线能够应用于任何放射性核素,但这仅仅适用于使用同一台液闪计数器和同样液闪体系。将淬灭水平对应的自由参数代入 ^3H 探测效率计算公式(5)便可获得氟的探测效率曲线,结果示于图 2。在液闪谱仪上测量的氟化水样

表 1 实验测量 ^{54}Mn 探测效率和计算结果

Table 1 Measured and calculated detection efficiency of ^{54}Mn					
源号	源质量/mg	tSIE	A/Bq	$\epsilon(^{54}\text{Mn})$	λ
M0	28.96	494.5	6 041	0.421 8	1.515
M1	14.47	472.4	3 019	0.406 6	1.575
M2	13.25	449.1	2 764	0.393 3	1.631
M3	15.77	433.5	3 290	0.382 4	1.679
M4	15.40	414.2	3 213	0.366 3	1.755
M5	16.06	401.2	3 350	0.358 6	1.793
M6	14.73	383.7	3 073	0.348 2	1.847
M7	14.36	364.6	2 996	0.332 0	1.937
M8	12.81	356.9	2 672	0.327 2	1.965
M9	15.53	349.1	3 240	0.322 0	1.997
M10	15.56	332.6	3 246	0.308 6	2.084
M11	14.62	321.6	3 050	0.299 8	2.145

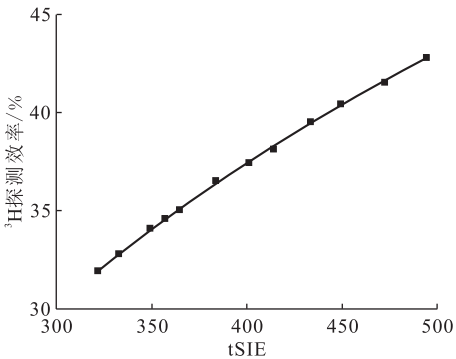


图 2 ^3H 探测效率淬灭校正曲线

Fig. 2 Quench correction curve of ^3H detection efficiency versus quench indicating parameter (tSIE)

品淬灭指示参数为 370~494,处于示踪核素样品淬灭水平之内,将各样品的淬灭水平内插到氚探测效率曲线上,便可计算出各样品的探测效率。

2.2.3 液闪 TDCR 方法测量 在新研制的TDCR 活度测量装置上,重新测量了氚化水液闪源,每次测量时间为 30 min,重复测量 6 次。根据测量的符合信息,不仅可以直接测量样品的探测效率,也可以得到闪烁液的 k_B 值。在研制液闪 TDCR 活度测量装置时,测量得到 UltimaGold™ AB 型闪烁液的 $k_B=0.012\text{ cm/MeV}^{[9]}$ 。

3 结果与讨论

3.1 液闪 CIEMAT/NIST 测量结果

C/N 方法测量氚化水样品的比活度结果列入表 2。由表 2 可知, $\bar{a}=74.79\text{ kBq/g}$,相对标准偏差小于 0.2%($n=9$),表明 C/N 方法测量氚化水比活度的一致性较好。液闪 C/N 方法测量氚化水的不确定度评估列入表 3。由表 3 可知,测量结果的合成标准不确定度为 0.80%,主要为示踪核素的比活度不确定度引入,为 0.72%。 ^{54}Mn 不确定度传递给 ^3H 的结果示于图 3。由图 3 可知, ^3H 的不确定度随着 ^3H 探测效率的增加不断减少,表 3 中所给的不确定评估结果是取氚化水的探测效率最小时计算得到的,此时示踪核素 ^{54}Mn 不确定度传递对氚化水的影响最大,不确定度评估是保守的。

表 2 液闪 C/N 方法和 TDCR 方法测量氚化水比活度结果
Table 2 Specific activity of a tritiated water solution measured by the C/N and TDCR methods

源号	源质量/ mg	tSIE	$a/(\text{kBq}\cdot\text{g}^{-1})$		相对偏差
			C/N 法	TDCR 法	
H0	90.59	493.2	74.73	75.52	-1.05%
H1	79.17	474.2	74.91	75.35	-0.58%
H2	82.76	454.8	74.86	75.40	-0.71%
H3	103.5	438.7	74.91	75.50	-0.79%
H4	73.45	424.0	74.87	75.35	-0.63%
H5	71.79	413.3	74.88	75.28	-0.53%
H6	88.78	393.2	74.54	75.25	-0.95%
H7	62.77	383.1	74.75	75.29	-0.71%
H8	55.96	372.6	74.67	75.35	-0.91%
			74.79 ¹⁾	75.37 ¹⁾	-0.77% ¹⁾
			0.17% ²⁾	0.12% ²⁾	

注:1) 平均值
2) 相对标准偏差

表 3 液闪 C/N 方法和 TDCR 方法的不确定度评估
Table 3 Uncertainty evaluation of the specific activity of a tritiated water solution measured by the C/N and TDCR methods

分量	不确定度/%	
	C/N 法	TDCR 法
计数统计	0.11	0.10
称重	0.05	0.05
死时间	0.10	0.06
本底	0.02	0.03
半衰期修正	<0.001	<0.001
淬灭指示参数 (tSIE)	<0.001	
效率计算 (^{54}Mn 衰变参数和模型)	0.31	
示踪核素 (^{54}Mn)	0.72	
效率计算 (k_B 值和 TDCR 值)		0.65
合成标准不确定度	0.80	0.66

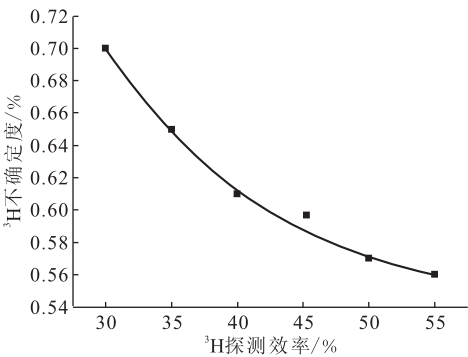


图 3 ^{54}Mn 的比活度不确定度为 0.75% 时 ^3H 不确定度随探测效率的变化

Fig. 3 Uncertainty component for ^3H caused by ^{54}Mn specific activity uncertainty (0.75%) as a function of the counting efficiency

3.2 液闪 TDCR 测量结果

液闪 TDCR 方法测量氚化水样品的比活度结果列入表 2。由表 2 可知,比活度平均值为 75.37 kBq/g,相对标准偏差为 0.12%($n=9$),一致性好。TDCR 方法的不确定度评估结果列入表 3。由表 3 可知,测量结果的合成标准不确定度为 0.66%,其中,效率计算分量对不确定度的贡献最高,达到了 0.65%。这是由效率计算输入参数的不确定度引起的,其中关键参数为闪烁液的 k_B 。由于 k_B 值对低能纯 β 核素的探测效率影响显著。按照保守估计,假设 k_B 值在 0.011~0.013 cm/

MeV 均匀分布计算得到不确定度为 0.65%。

3.3 讨论

液闪 C/N 方法和 TDCR 方法都是基于自由参数效率计算模型而发展起来的。液闪 C/N 方法使用的是普通商用双管液闪仪,配备一套⁵⁴Mn 淬灭系列标准源,原则上可以测量出其它所有核素活度。以⁵⁴Mn 作为示踪核素测量其它核素,不确定度传递一般都是收敛,测量氟化水的不确定度仅为 0.80%,测量其它核素要低于此水平,精确度比较高。基于效率计算的液闪 TDCR 方法需要实验室自行研制三管液闪装置,技术相对复杂,但测量不确定度要更低,精确度更高,一般在国家计量实验室作为纯 β 核素活度测量基准。用这两种方法测量的同一批氟化水样品,液闪 TDCR 方法测量结果比 C/N 方法测量结果要高 0.77%,处于不确定度范围内, E_n 值检验满意。利用液闪测量放射性溶液时,一般制备多个淬灭水平相同的源取均值即可。现测量一组淬灭水平不同的液闪源不是为了进行效率外推,而是为验证液闪 C/N 方法和 TDCR 方法各自的自洽性,即虽然液闪源的淬灭程度不同但测量出的溶液比活度应为同一值。液闪 C/N 方法和 TDCR 方法各自测量结果一致性好,自洽性得到了验证。这两种方法测量准确度和精确度高,测量结果自洽并且互为验证,可用于氟化水活度浓度的绝对测量。

4 结 论

液闪测量技术具有无自吸收、制源简单、一致性好等特点,测量低能纯 β 核素³H 比活度具有很好的优势。采用液闪 CIEMAT/NIST 方法和 TDCR 方法测量了同一组氟化水淬灭系列源,测量结果 E_n 数检验满意,互为验证。这两种方法的测量精度高,不确定度均小于 1%,可为国内氟化水标准物质研制提供定值手段,满足国内对氟化水标准物质的迫切需求。

参考文献:

- [1] Karam L R. Application of the CIPM MRA to radionuclide metrology[J]. Metrologia, 2007, 44: 1-6.
- [2] Collé R. Classical radionuclidic calorimetry[J]. Metrologia, 2007, 44: 118-126.
- [3] Makepeace J. Intercomparison of measurement of tritiated water by internalproportional gas counting[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res, Sect A, 1996, 369: 458-462.
- [4] Makepeace J. International comparison of measurements of the specific activity of tritiated water[J]. Appl Radiat Isot, 1998, 49: 1411-1416.
- [5] Broda R, Cassette P. Radionuclide metrology using liquid scintillation counting[J]. Metrologia, 2007, 44: 36-52.
- [6] Ratel G. Analysis of the results of the international comparison of activity measurements of a solution of ⁵⁵Fe[J]. Appl Radiat Isot, 2008, 66: 729-732.
- [7] Cassette P, Vatin R. Experimental evaluation of TDCR models for the 3 PM liquid scintillation counter[J]. Nucl Instrum Methods A, 1992, 312: 95-99.
- [8] Zimmerman B E, Collé R, Cessna J T. Construction and implementation of the NIST triple-to-double coincidence ratio(TDCR) spectrometer[J]. Appl Radiat Isot, 2004, 60: 433-438.
- [9] 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.
- [10] Grau Carles P, Grau Malonda A. Free parameter, figure of merit and ionization quench in liquid scintillation counting[J]. Appl Radiat Isot, 2001, 54: 447-454.
- [11] Günther E. What can we expect from the CIEMAT/NIST method[J]. Appl Radiat Isot, 2002, 56: 357-360.
- [12] Wu Y L, Liu H R, Liang J C, et al. Standardization of tritiated water by the CIEMAT/NIST and TDCR methods[J]. Sci China Tech Sci, 2015, 58(3): 559-564.
- [13] Cruz P, Silva C J D, Moreira D S, et al. Primary activity standardization of ⁹⁹Tc by three different absolute methods[J]. Appl Radiat Isot, 2014, 87: 175-178.
- [14] Grau Carles A, Günther E, Grau Malonda A. The photoionization-reduced energy in LSC[J]. Appl Radiat Isot, 2006, 64: 43-54.
- [15] Kossert K, Cassette Ph, Grau Carles A. Extension of the TDCR model to compute counting efficiencies for radionuclides with complex decay schemes[J]. Appl Radiat Isot, 2014, 87: 242-248.