

闪烁液及淬灭校正方法对液闪测量 ^{55}Fe 的影响

马莉娜^{1,2}, 戴雄新^{1,2,*}, 张 辉^{1,2}, 马 彦^{1,2}, 宋丽娟^{1,2}

1. 中国辐射防护研究院, 山西 太原 030006;
2. 核药研发转化与精准防护山西省重点实验室, 山西 太原 030006

摘要: 为了优化液体闪烁计数器(LSC)测量 ^{55}Fe 的条件, 测试了三种商用闪烁液和两种淬灭校正方法对 LSC 测量 ^{55}Fe 的影响。配制与放化处理后基质相同的 ^{55}Fe 样品进行测量, 三种闪烁液中, Ultima Gold AB 样品装载量最大; 在不同混溶比条件下, Ultima Gold LLT 探测效率最高、最低检测限最小, 混溶比为 1 : 4 时, Ultima Gold LLT 的探测效率最大为 49.1%, 同时最低检测限最小为 0.12 Bq; 若样品采用与淬灭标准源不同的闪烁液, 对结果的准确度会造成一定的影响, 在实验条件下活度测量值与标称值最大平均相对偏差绝对值为 3.55%。对比 tSIE 法和 TDCR 法两种淬灭校正方法, TDCR 法能够消除由于颜色和化学淬灭同时存在对 ^{55}Fe 液闪测量结果所造成的影响, 是测量 ^{55}Fe 准确性更高的方法。通过加标样品验证, 颜色及化学淬灭校正曲线得到的测量值与预期值的相对偏差分别为 -0.35%~0.40%、-0.91%~-0.16%。

关键词: LSC; ^{55}Fe ; 闪烁液; 淬灭; 效率校正

中图分类号: O658.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9950(2024)01-0068-07
doi: 10.7538/hhx.2023.YX.2023021

Effect of Scintillation Cocktail and Quenching Calibration Method on Measurement of ^{55}Fe by LSC

MA Li-na^{1,2}, DAI Xiong-xin^{1,2,*}, ZHANG Hui^{1,2}, MA Yan^{1,2}, SONG Li-juan^{1,2}

1. China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China;
2. Shanxi Provincial Key Laboratory for Translational Nuclear Medicine and
Precision Protection, Taiyuan 030006, China

Abstract: In order to optimize the measurement conditions of ^{55}Fe by liquid scintillation counting, the effect of three kinds of commercial scintillation cocktail and two efficiency correction methods on LSC measurements of ^{55}Fe was tested. Configuration of ^{55}Fe samples with the same matrix as after radiochemical treatment for measurement, Ultima Gold AB has the highest sample loading among the three kinds of scintillation cocktail; the counting efficiency of Ultima Gold LLT is the highest and the MDA is the lowest under different miscibility ratios, and the maximum detection efficiency of Ultima Gold LLT is 49.1% when the miscibility ratio is 1 : 4, while the MDA is 0.12 Bq. If the sample uses scintillation cocktail different from the quenched standard source, it will have an impact on the accuracy of the results, with an absolute value of maximum average relative deviation is 3.55%

between the measured and expected values under experimental conditions. Comparing the two quenching calibration methods of tSIE and TDCR, the TDCR method can eliminate the influence caused by the simultaneous presence of color and chemical quenching on the ^{55}Fe LSC measurement results, and is a more accurate method for measuring ^{55}Fe . The relative deviations between the measured and expected values obtained from the color and chemical quenching calibration curves are -0.35% to 0.40% and -0.91% to -0.16% , respectively, as verified by the spiked samples.

Key words: LSC; ^{55}Fe ; scintillation cocktail; quench; efficiency calibration

^{55}Fe 是核设施运行过程中产生的中子活化产物,常常存在于核废物中。 ^{55}Fe 为极低能电子俘获放射性核素,发射 $0.6\sim 6.5\text{ keV}$ 的 X 射线和俄歇电子衰变为稳定 ^{55}Mn ,可用低能 γ 和 X 射线探测器测量,但探测效率一般都低于 1% 。液体闪烁计数器(LSC)探测效率高,是 ^{55}Fe 的最佳测量手段^[1-5],但是由于 ^{55}Fe 的极低能辐射特性致使闪烁液及淬灭校正方法的选择对 ^{55}Fe 的测量结果有显著的影响。

LSC 测量时, ^{55}Fe 样品与闪烁液混合后辐射能量转变为可见光光子,光子通过光电倍增管转化为电子流从而被测量。 ^{55}Fe 经过前处理和放化处理,一般为酸性基质^[1-6],不同的闪烁液对酸性基质的样品装载量、将样品中 ^{55}Fe 辐射能转变为光子的效率以及最小本底计数不同^[7],会造成探测效率及最低检测限的差异。针对 ^{55}Fe 样品选择适当的闪烁液可以优化 LSC 的计数性能。此外,淬灭是 ^{55}Fe 液闪测量时降低探测效率的主要原因,淬灭主要来源于颜色淬灭和化学淬灭两个方面^[8-9]。液闪测量 ^{55}Fe 时,由于其低能辐射特性需要与其他放射性干扰核素完全分离^[1-4],分离纯化后的 ^{55}Fe 样品中含有的盐酸、磷酸、稳定铁等化学成分可能会吸收 ^{55}Fe 衰变能,从而引起化学淬灭; ^{55}Fe 在纯化过程中需要加入毫克级稳定铁作为 ^{55}Fe 的载体及分离流程的回收率示踪剂,稳定铁的颜色较深,用脱色剂脱色后仍然会有残留的颜色吸收 ^{55}Fe 辐射能转变的光子,从而引起颜色淬灭^[10]。对不同淬灭水平的 ^{55}Fe 样品需要采用适当的方法进行校正,保证测量结果的准确性。液体闪烁计数的淬灭校正方法主要有内标法、道比法、外标法及三管两管符合比(TDCR)法等^[8]。内标法需要在样品中加入与待测核素一样且活度大于待测核素活度 100 倍的放射性核素,加入过程有可能改变样品的淬灭水平且操作步骤较为繁琐。道比法不适合低计数率或者高淬灭的样品。

外标法是较常用的一种淬灭校正方法,采用该方法的 LSC 需内置 γ 射线源,测量时样品在有外 γ 照射源的情况下进行计数, γ 射线与小瓶中液闪混合液相互作用产生康普顿电子能谱,用于计算淬灭指示参数,从而得到样品探测效率,再在无外照射源的情况下进行计数,根据探测效率可计算样品活度。根据所采用的外标康普顿谱的不同特性,外标法又可分为外标转换谱指数(tSIE)、外标脉冲(ESP)、H 数等。TDCR 法是一种无需依赖外部标准源的淬灭校准技术,通过一次测量可以同时得到样品的 TDCR 值和计数,TDCR 值与探测效率有相关性^[11],从而同时得到探测效率,操作较为简单。通过不同的淬灭校正方法测量一系列 ^{55}Fe 淬灭标准源可得到相应的淬灭校正曲线。由于化学、颜色淬灭机理不同,得到的化学淬灭曲线和颜色淬灭曲线可能会有明显不同,样品测量时采用不恰当的淬灭校正方法会导致结果的准确性下降。

本工作拟对实验室常用的 3 种环保商用闪烁液从最大装载量、探测效率以及最低检测限三种性能进行测试,比较 3 种商用闪烁液的性能;采用 tSIE 法及 TDCR 法两种淬灭校正方法建立 ^{55}Fe 的化学淬灭校正曲线及颜色淬灭校正曲线,比较不同淬灭校正方法下淬灭校正曲线的准确性。为准确测量 ^{55}Fe 提供可参考的商用闪烁液及可靠的淬灭校正方法。

1 实验部分

1.1 试剂和仪器

^{55}Fe 标准溶液,美国国家标准技术研究所(NIST);Ultima Gold LLT 闪烁液、Ultima Gold AB 闪烁液、Optiphase Hisafe 3 闪烁液,美国 Perkin Elmer;橙黄色食用色素,上海展艺食品有限公司;浓 HCl、六水合氯化铁均为市售分析纯。

Hidex 300 SL 液体闪烁计数器,芬兰 Hidex

Oy 公司; Tri-Carb 3180TR/SL 液体闪烁计数器, 美国 Perkin Elmer; Milli-Q Reference 超纯水机系统, 美国默克公司; XS-205 分析天平, 精度为 0.1 mg, 美国梅特勒公司。

1.2 样品的制备

依据现有标准^[6]及文献[1—4]中的⁵⁵Fe分离纯化流程,⁵⁵Fe样品液闪测量源的主要成分有: 盐酸、稳定铁、磷酸、水、闪烁液。按文献[1—3]中各组分的含量配制⁵⁵Fe待测样品: 在 20 mL 的液闪瓶中加入 5 mg Fe³⁺ (FeCl₃ · 6H₂O)、2.5 mL 0.1 mol/L HCl、0.6 mL 14.7 mol/L H₃PO₄、已知活度的⁵⁵Fe标准溶液, 轻轻摇晃混合均匀, 制成总体积为 3.5 mL 的⁵⁵Fe待测样品。空白样品各组分与待测样品相同, 但不加入⁵⁵Fe。

1.3 淬灭标准源的制备

颜色淬灭标准源: 在一组 20 mL 塑料液闪瓶中, 分别加入活度已知并相近的⁵⁵Fe标准溶液、体积由小到大的橙黄色食用色素、再加入 0.1 mol/L HCl 调节标准源的总体积为 3.5 mL, 加入 Ultima Gold LLT 闪烁液 14 mL, 轻轻摇晃混合均匀, 制成一系列活度相近淬灭水平不同的⁵⁵Fe颜色淬灭标准源。

化学淬灭标准源: 在一组 20 mL 塑料液闪瓶中, 分别加入活度已知并相近的⁵⁵Fe标准溶液、体积由小到大的硝基甲烷, 再加入 0.1 mol/L HCl 调节标准源的总体积为 3.5 mL, 加入 Ultima Gold LLT 闪烁液 14 mL, 轻轻摇晃混合均匀, 制成一系列化学淬灭标准源。

1.4 tSIE 法和 TDCR 法制备淬灭校正曲线

1.4.1 tSIE 法 颜色淬灭标准源及化学淬灭标准源在暗处放置 20 h 后, 采用 Tri-Carb 3180TR/SL 液闪计数器在 0~6.5 keV 测量计数, 每个标准源测量 1 h, 得到淬灭指示参数及计数, 按式(1)计算探测效率, 绘制淬灭校正曲线。

$$\epsilon = \frac{D_i - D_0}{tA_0} \quad (1)$$

式中: ϵ , 探测效率; D_i , Tri-Carb 3180TR/SL 测量的样品计数或 Hidex 300 SL 测量的样品双管符合计数; D_0 , Tri-Carb 3180TR/SL 测量的空白样品计数或 Hidex 300 SL 测量的空白样品双管符合计数; t , 样品测量时间, s; A_0 , 加入样品中⁵⁵Fe活度, Bq。

1.4.2 TDCR 法 颜色淬灭标准源及化学淬灭标准源在暗处放置 20 h 后, 采用 Hidex 300 SL

液闪计数器在 20~250 道测量计数, 每个标准源测量 1 h, 根据式(2)及式(1)计算标准源 TDCR 值和探测效率, 绘制淬灭校正曲线。

$$\text{TDCR} = \frac{T_i - T_0}{D_i - D_0} \quad (2)$$

式中: T_i , 样品三管符合计数; T_0 , 空白样品三管符合计数。

2 结果与讨论

2.1 不同闪烁液的样品装载量

25 °C 下, 在⁵⁵Fe待测样品中逐步加入少量 Ultima Gold LLT 闪烁液, 充分摇晃后若样品与闪烁液分层, 则继续加入少量闪烁液, 重复操作直至样品与闪烁液混合摇匀后呈均匀澄清状态, 放置 1 h 后无分层现象, 记录样品所需最少闪烁液体积($V_{\text{闪烁液, 最小}}$)。按照同样的方法测试样品所需 Ultima Gold AB、Optiphase Hisafe 3 闪烁液的最小体积。并按式(3)计算闪烁液的样品装载量。

$$\text{样品装载量} = \frac{V_{\text{样品}}}{V_{\text{样品}} + V_{\text{闪烁液}}} \quad (3)$$

式中: $V_{\text{样品}}$, ⁵⁵Fe样品体积; $V_{\text{闪烁液}}$, 加入的闪烁液体积。不同闪烁液的最大样品装载量列入表 1。由表 1 可知: 三种闪烁液中 Ultima Gold AB 样品装载量最大为 50%, Ultima Gold LLT 与 Optiphase Hisafe 3 的样品装载量基本相同, 为 33%。Ultima Gold AB 对基质为酸性的⁵⁵Fe样品装载量更大。

表 1 不同闪烁液的最大样品装载量

Table 1 Maximum sample loading for different scintillation cocktail

闪烁液	$V_{\text{样品}} / \text{mL}$	$V_{\text{闪烁液, 最小}} / \text{mL}$	最大样品装载量/%
Ultima Gold LLT	3.5	7.1	33
Ultima Gold AB	3.5	3.5	50
Optiphase Hisafe 3	3.5	7.0	33

2.2 样品与闪烁液不同混溶比下的效率和最低检测限

按照 1.2 节方法制备一组 4 个⁵⁵Fe待测样品和 4 个空白样品, 在 4 个⁵⁵Fe待测样品小瓶中加入 Ultima Gold LLT 闪烁液 7.0、10.5、14.0、17.5 mL, 同时在 4 个空白样品溶液中加入与⁵⁵Fe待测样品小瓶中等体积的 Ultima Gold LLT 闪

烁液,制备成样品和闪烁液体积比($V_{\text{样品}}:V_{\text{闪烁液}}$)为1:2、1:3、1:4、1:5混合液,摇匀后在暗处放置20 h,液闪测量,每个样品测量1 h,根据式(1)计算样品与 Ultima Gold LLT 闪烁液不同混溶比时的⁵⁵Fe探测效率,按式(4)计算不同混溶比时的⁵⁵Fe最低检测限(MDA)。按照上述方法,制备并测量与 Ultima Gold AB 闪烁液、Optiphase Hisafe 3 闪烁液不同混溶比时的样

品,计算⁵⁵Fe探测效率及最低检测限,测量结果列入表2。

$$MDA = \frac{k^2 + 2k\sqrt{2B}}{\epsilon R t f} \tag{4}$$

式中: k ,包含因子,取值1.645(置信度为95%); B ,空白样品的二重符合计数; R ,样品中稳定铁回收率,取100%; t ,样品测量时间,s; f ,用于液闪测量的样品份额。

表2 不同混溶比下⁵⁵Fe样品在三种闪烁液中的探测效率和最低检测限
Table 2 Detection efficiency and MDA of ⁵⁵Fe samples
in three scintillation cocktail at different miscibility ratios

$V_{\text{样品}}:V_{\text{闪烁液}}$	Ultima Gold LLT		Ultima Gold AB		Optiphase Hisafe 3	
	$\epsilon/\%$	MDA/Bq	$\epsilon/\%$	MDA/Bq	$\epsilon/\%$	MDA/Bq
1:2	38.7	0.16	38.3	0.18	33.0	0.18
1:3	47.0	0.13	47.0	0.14	41.0	0.15
1:4	49.1	0.12	48.7	0.13	43.2	0.14
1:5	47.0	0.14	46.3	0.14	42.3	0.15

由表2可知:样品与闪烁液形成的不同比例混合液中,三种闪烁液纵向对比,探测效率和最低检测限的变化趋势一致,样品与闪烁液的混溶比为1:4时,三种闪烁液和样品形成的混合溶液均能获得最高的探测效率和最小的检测限,探测效率最高的混溶比1:4与最低的混溶比1:2之间三种闪烁液的探测效率均可高出约10%。样品与闪烁液混溶比从1:2到1:4时,淬灭水平逐渐降低,是探测效率逐渐增高的主要原因。而样品与闪烁液混溶比从1:4到1:5时,探测效率下降的主要原因来自于光电倍增管表面相对量子效率分布特征(大致规律是从光阴极中心向周围逐渐降低),该原因通常导致探测效率最高点出现在液闪瓶标称体积一半附近^[12],因此,样品与闪烁液形成的混合液体积过大时,会导致探测效率的降低。三种闪烁液横向对比,Ultima Gold LLT在不同的混溶比下,均能获得最高探测效率和最低检测限,样品与闪烁液的混溶比为1:4时,测量⁵⁵Fe样品的探测效率达到最大值49.1%,最低检测限最小值为0.12 Bq。Ultima Gold LLT比Ultima Gold AB的探测效率高0%~0.54%、最低检测限小0~0.02 Bq;Ultima Gold LLT比Optiphase Hisafe 3的探测效率高4.6%~6.0%、最低检测限小0.01~

0.02 Bq。

2.3 不同闪烁液测量⁵⁵Fe样品的准确性

按照1.2节方法制备3组⁵⁵Fe待测样品,每组3个平行样,分别加入Ultima Gold LLT、Ultima Gold AB、Optiphase Hisafe 3闪烁液各14 mL,同时制备三种闪烁液的空白样品,样品放置20 h后,每个样品用Hidex 300 SL测量1 h,测量结果列入表3。

由表3可看出,在选择三种闪烁液中,与标准淬灭源相同的Ultima Gold LLT活度预期值与测量值的平均相对偏差绝对值最小为0.22%,Ultima Gold AB与Optiphase Hisafe 3的平均相对偏差绝对值较大,分别为2.92%、2.03%,因此使用标准曲线时应注意标准淬灭源的闪烁液,若样品闪烁液与标准淬灭源闪烁液不同时,应考虑结果的不准确度。由于⁵⁵Fe半衰期短,一般无商用标准淬灭源,需由实验室自行制备,制备淬灭校正曲线比较繁琐,本实验室采用测量⁵⁵Fe效率较高的Ultima Gold LLT闪烁液制备淬灭校正曲线,制备一次标准曲线一般使用较长时间,在此期间实验室使用的闪烁液可能会发生更换,样品闪烁液与标准淬灭源闪烁液不同可能对测量结果造成影响。

表 3 ⁵⁵Fe样品在三种闪烁液中的测量结果
Table 3 Measurement results of ⁵⁵Fe samples in three scintillation cocktail

编号	活度预期值/Bq	活度测量值/Bq	相对偏差/%	平均相对偏差/%
Ultima Gold LLT-1	49.03	48.78	−0.51	−0.22
Ultima Gold LLT-2	49.74	49.29	−0.91	
Ultima Gold LLT-3	49.59	49.96	0.75	
Ultima Gold AB-1	49.79	48.84	−1.90	−2.92
Ultima Gold AB-2	49.79	48.02	−3.55	
Ultima Gold AB-3	49.79	48.14	−3.31	
Optiphase Hisafe 3-1	49.94	49.10	−1.69	−2.03
Optiphase Hisafe 3-2	49.84	48.93	−1.81	
Optiphase Hisafe 3-3	50.19	48.88	−2.60	

注：每个样品用 Hidex 300 SL 测量 1 h

2.4 淬灭校正方法对测量结果的影响

在三个⁵⁵Fe待测样品中分别加入 18.13 ~ 35.80 Bq 的⁵⁵Fe标准溶液，再分别加入 Ultima Gold LLT 闪烁液 14 mL 制成加标样品，编号为 S1—S3，放置 20 h 后，三个加标样品分别采用

Tri-Carb 3180TR/SL 以 tSIE 法测量 1 h，再用 Hidex 300 SL 以 TDCR 法测量 1 h。用 tSIE 法及 TDCR 法所得的颜色和化学淬灭校正曲线示于图 1。根据图 1 计算加标样品的活度，测量结果列入表 4、5。

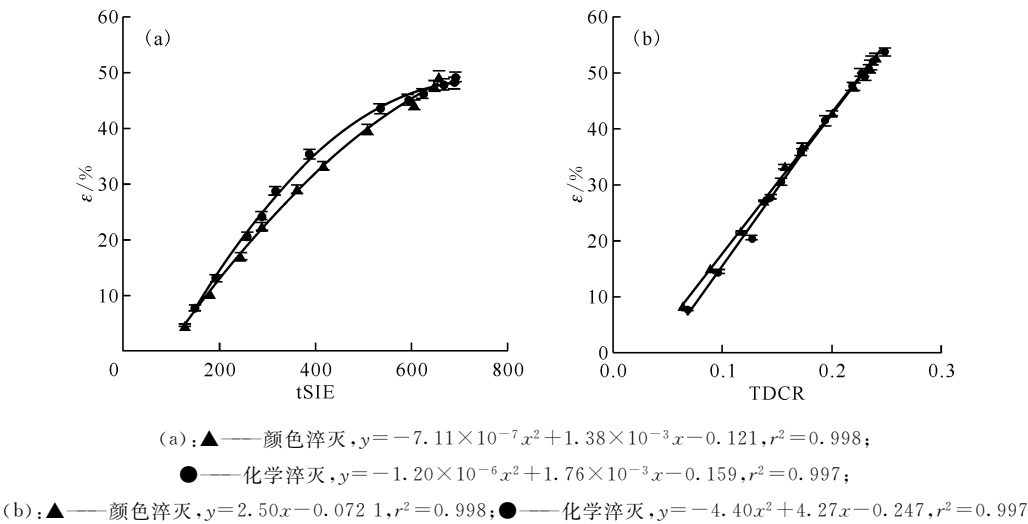


图 1 tSIE(a)和 TDCR(b)淬灭校正方法测量的颜色和化学淬灭校正曲线

Fig. 1 Colour and chemical quenching correction curves measured by tSIE(a) and TDCR(b) quenching correction methods

表 4 ⁵⁵Fe加标样品采用 tSIE 法淬灭校正后的测量结果
Table 4 Measurement results of ⁵⁵Fe spiked samples corrected for quenching by tSIE method

编号	活度预期值/Bq	颜色淬灭校正曲线		化学淬灭校正曲线	
		活度测量值/Bq	相对偏差/%	活度测量值/Bq	相对偏差/%
S1	18.13	18.78	3.61	18.18	0.30
S2	26.88	25.97	−3.37	25.53	−5.01
S3	35.80	33.12	−7.50	32.93	−8.02

表 5 ⁵⁵Fe加标样品采用 TDCR 法淬灭校正后的测量结果
Table 5 Measurement results of ⁵⁵Fe spiked samples corrected for quenching by TDCR method

编号	活度预期值/Bq	颜色淬灭校正曲线		化学淬灭校正曲线	
		活度测量值/Bq	相对偏差/%	活度测量值/Bq	相对偏差/%
S1	18.14	18.21	0.40	18.11	-0.16
S2	26.89	26.79	-0.35	26.65	-0.91
S3	35.82	35.91	0.29	35.71	-0.31

由表 4、5 可知:采用 tSIE 法确定的颜色淬灭效率校正曲线得到活度测量值与预期值的相对偏差在-7.50%~3.61%,化学淬灭效率校正曲线得到的活度测量值与预期值的相对偏差在-8.02%~0.30%;采用 TDCR 法确定的颜色淬灭效率校正曲线得到活度测量值与预期值的相对偏差在-0.35%~0.40%,化学淬灭效率校正曲线所得活度测量值与预期值的相对偏差在-0.91%~-0.16%。从加标样品的测量结果可以看出,根据 TDCR 法确定的颜色和化学淬灭校正曲线计算得到的结果一致性更好,准确性也更高。

根据实验室测量经验,不同基质的⁵⁵Fe样品经过放化分离后探测效率一般在25%~45%,如果样品由于颜色等因素导致探测效率过低时,需要将样品稀释,降低淬灭因素的影响,再进行测量。由图 1 可以看出,探测效率在25%~45%的范围内,基于 tSIE 确定的颜色和化学淬灭校正曲线差异较大,而基于 TDCR 法确定的颜色和化学淬灭校正曲线在不确定度范围内一致性较好。化学淬灭和颜色淬灭产生的机制不同:化学淬灭是由于样品中的化学成分在闪烁过程中吸收⁵⁵Fe的衰变能,从而在一定程度上阻碍了衰变能被闪烁液中的化学荧光分子吸收,降低了衰变能转化成光子的效率;颜色淬灭是由于样品的颜色吸收了衰变能转换的光子,降低了进入光电倍增管的光子数量^[6-7]。tSIE 法的淬灭指示参数不依赖于样品计数率,只依赖于外标 γ 射线源在闪烁液中产生的康普顿电子所引起的计数^[6],康普顿电子在产生闪烁效应的过程中,由于颜色淬灭和化学淬灭的机制不同,导致用来创立淬灭指示参数的康普顿电子的脉冲谱不同,进而引起两种淬灭校正曲线差异较大。TDCR 法是一种无需依赖外部标准源的淬灭校准技术^[8],用于效率校正的 TDCR 值

是样品的三管两管实际计数比值,不受淬灭剂种类的影响,因此,TDCR 淬灭校正方法对同时有明显颜色和化学淬灭的⁵⁵Fe样品的效率校正更为准确。

3 结 论

为了优化液闪测量⁵⁵Fe的性能,对三种商用闪烁液的性能以及不同的淬灭校正方法进行了研究。得出以下结论:

(1) 对比了 Ultima Gold AB、Optiphase Hisafe 3、Ultima Gold LLT 三种商用闪烁液,其中 Ultima Gold AB 的样品装载量最大;在不同混溶比条件下 Ultima Gold LLT 探测效率最高、最低检测限最小,混溶比为 1:4 时,Ultima Gold LLT 的探测效率达到最大 49.1%,同时最低检测限最小为 0.12 Bq;

(2) 若样品采用与淬灭标准源不同的闪烁液,对结果的准确度会造成一定的影响,在实验条件下活度测量值与预期值最大相对偏差绝对值为 3.55%;

(3) 用 LLT 闪烁液配制了⁵⁵Fe系列颜色、化学淬灭标准源,采用 tSIE 法、TDCR 法制备了颜色、化学淬灭校正曲线,通过验证,用 tSIE 法进行效率校正,颜色及化学淬灭校正曲线得到的活度测量值与预期值的相对偏差为-7.50%~3.61%、-8.02%~0.3%;用 TDCR 法进行效率校正,颜色及化学淬灭校正曲线得到的活度测量值与预期值的相对偏差为-0.35%~0.40%、-0.91%~-0.16%。

TDCR 法能够最大限度地减少由于颜色和化学淬灭同时存在对⁵⁵Fe液闪测量所造成的影响,是测量⁵⁵Fe准确性更高的方法。

参考文献:

[1] 马莉娜,宋丽娟,杨永刚,等. 尿素¹⁴C胶囊中⁵⁵Fe分

- 析方法研究[J]. 原子能科学技术, 2021, 55(7): 1253-1259.
- [2] Song L J, Ma L N, Dai X X. Method for sequential determination of ^{55}Fe and ^{63}Ni in leaching solution from cement solidification[J]. Radioanal Nucl Chem, 2019, 319: 1227-1234.
- [3] Guérin N, Dai X X. Determination of ^{55}Fe in urine by liquid scintillation counting[J]. Radioanal Nucl Chem, 2015, 304: 1059-1069.
- [4] 马莉娜, 宋丽娟, 戴雄新. PAX-2 阴离子交换树脂分离测量水泥固化体浸出液中的 ^{55}Fe [J]. 核化学与放射化学, 2021, 43(1): 81-86.
- [5] 方春鸣, 姜冬, 马元晨. 核电厂液态流出物中 ^{55}Fe 和 ^{63}Ni 的联合分析[J]. 核化学与放射化学, 2023, 45(4): 341-344.
- [6] ISO 22515:2021(E) water quality iron-55-test method using liquid scintillation counting[S]. Switzerland: ISO copyright office, 2021.
- [7] Verrezen F, Loots H, Hurtgen C. A performance comparison of nine selected liquid scintillation cocktails[J]. Appl Radiat Isot, 2008, 66: 1038-1042.
- [8] L'Annunziata, Michael F. 放射性分析手册[M]. 第二版. 翻译组译. 北京: 原子能出版社, 2006: 249-265.
- [9] Stojkovic I, Tenjovic B, Nikolov J. Radionuclide, scintillation cocktail and chemical/color quench influence on discriminator setting in gross alpha/beta measurements by LSC[J]. J Environ Radioactiv, 2015, 144: 41-46.
- [10] Villa M, Manjon G, Garcia-Leon M. Study of colour quenching effects in the calibration of liquid scintillation counters: the case of ^{210}Pb [J]. Nucl Instr Meth A, 2003, 496: 413-424.
- [11] Wanke C, Kossert K. Investigations on TDCR measurements with the HIDEX 300 SL using a free parameter model[J]. Appl Radiat Isot, 2012, 70: 2176-2183.
- [12] 冯孝贵, 何千舸, 王建晨, 等. 液闪分析中闪烁体积对各种核素测定的影响[J]. 核化学与放射化学, 2017, 39(1): 72-82.