文章编号:0253-9950(2009)02-0084-06

用磷屏放射自显影法测量 α 核素的放射性活度

冯孝贵,梁俊福,章英杰,王建晨,陈 靖

清华大学核能与新能源技术研究院,北京 102201

摘要:介绍了应用磷屏放射自显影法测量 α核素放射性活度的实验方法,研究分析了样品与磷屏之间距离(即立体角)、曝光时间及样品放射性活度等因素对磷屏影像光强度的影响。结果表明,经过立体角修正后得到的磷屏 影像光强度与测量几何条件无关;在磷屏未饱和的前提下,磷屏影像光强度与磷屏受到的辐射成正比。另外,对 曝光环境、扫描次数、磷屏本底、γ或X射线的影响、源的状况等几个在实验过程中需要注意的问题进行了讨论, 并给出了相应的建议。

关键词:磷屏;放射自显影;α核素;立体角

中图分类号:R144 文献标志码:A

Detection of Alpha Radioactivity Using Autoradiography With Phosphor Screen

FENG Xiao-gui, LIANG Jun-fu, ZHANG Ying-jie, WANG Jian-chen, CHEN Jing

Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 102201, China

Abstract: The experimental method for detecting alpha radioactivity using autoradiography with phosphor screen was introduced in this paper. The influences of some parameters, such as the distance between the sample and the phosphor screen (or referred to solid angle), the exposure time and the radioactivity in the sample, on the light intensity of the phosphor screen image were studied. It is shown that the light intensity after solid angle revision does not vary significantly from one geometry to another. The intensity is proportional to the exposure time and the amount of activity in the sample before the phosphor screen is saturated. In addition, several experimental issues should be paid attention to be discussed, including the exposure condition, the number of scans, the background of the phosphor screen, the influence of the gamma or X-ray and the status of the sample.

Key words: phosphor screen; autoradiography; alpha radioactivity; solid angle

放射自显影法是利用放射性核素发出的射线 使照相材料感光的性质来检出待测样品中的放射 性。作为这一测量方法的载体,核乳胶在传统上 被大量采用^[1-2]。由于该方法操作比较复杂,测量 线性范围较窄,曝光时间较长,因此在使用过程中 存在诸多不便。 近些年来,一项新的技术——磷屏技术正日 益频繁地被应用于放射自显影领域^[3-12]。该技术 的基本原理如下:磷屏是由细小的 BaFBr: Eu²⁺ 晶体构成的感光屏,当含放射性核素的样品靠近 磷屏时,来自样品的辐射能激发 Eu²⁺上的电子, 使 Eu²⁺氧化为 Eu³⁺, BaFBr 被还原为BaFBr⁻。 这样磷屏上就保留了来自于核辐射的信息。当用 一定波长的激光束对磷屏进行扫描时,BaFBr⁻吸 收能量释放电子,将 Eu³⁺还原为 Eu²⁺,当 Eu²⁺ 变为基态时,释放出光子,这些光子经过光电倍增 管转变为电信号,计算机接收电信号后处理成磷 屏影像,可以对影像进行进一步分析和定量。由 于磷屏的 BaFBr: Eu²⁺ 晶体对核辐射比核乳胶更 灵敏,可以大大缩短曝光时间,而且该方法具有更 宽的线性范围(可以达到 5 个数量级^[4]),也不需 要暗室,特别是磷屏可以反复使用,减少了废弃 物,因此,磷屏技术作为核乳胶放射自显影替代技 术已被广泛接受。

在关于磷屏技术的文献中,报道最多的是将 磷屏技术应用于核医学,进行 β 或 γ 放射自显影, 涉及的核素主要有³ H, ¹⁴ C, ³² P, ³³ P, ³⁵ S 和¹²⁵ I 等^[3-8];而将磷屏技术应用于 α 放射自显影的文献 很少^[9-12],特别是关于用磷屏技术进行 α 放射自 显影的具体实验方法尚未见报道。

用磷屏技术进行 α 放射自显影与进行 β 或 γ 放射自显影的主要区别在于曝光。对 β 或 γ 射 线,由于它们很容易穿透塑料薄膜,因此可以先将 待测样品用塑料薄膜密封,然后将密封好的样品 与磷屏紧密贴压在一起置于专用曝光盒内曝光, 这样既可以避免放射性样品污染磷屏,也不妨碍 β 或 γ 射线的测量。而对 α 射线,由于其在各种 介质中的射程比 β 或 γ 射线要短很多 (m^{241} Am 发出的 α 射线在空气中射程约为 4 cm),很难找 到合适的介质,既能使放射性样品和磷屏隔离不 污染磷屏、又不明显阻挡 α 粒子通过。 尽管文献 [9]报道过用 2 µm 的聚碳酸酯薄膜隔离样品和 磷屏,但在国内市场很难买到。考虑到 α 测量常 在真空环境下进行,因此本工作拟采用在真空室 内曝光的方法来取代前述的在曝光盒内曝光,介 绍用磷屏技术测量 α 放射性活度,以供相关研究 人员参考。

1 实验部分

1.1 实验材料

α混合标准源,电沉积法制作,总放射性活度 为1523 Bq,其中²³⁷ Np 为9.0 Bq,²³⁹ Pu 为812 Bq,²⁴¹ Am 为702 Bq;有效尺寸为 ø10 mm。

1.2 实验仪器和装置

磷屏仪, Cyclone ® Plus Storage Phosphor System,美国 PE 公司,磷屏, MP 型小屏(Multi Purpose Phosphor Screens),125 mm×192 mm, 美国 PE 公司。

真空室系统,北京神州东升科技有限公司生 产,主要包括 \$\overline{\phi280 mm} \times 150 mm 不锈钢真空室 和 TRP12 型优成牌真空泵,约1 min 可从常压抽 至 100 Pa,再经约1 min 抽至 10 Pa, 320 min 可 达 0.2 Pa。

曝光支架,支架上端面用于固定磷屏(感光面 朝下),其下为放置样品的抽屉式隔层,共分为11 层,相邻2层之间距离为10.0mm,载有样品的 样品支撑板可以插入任一抽屉式隔层内,最上面 的抽屉隔层与磷屏感光面之间距离为11.0mm。

1.3 实验方法

测量过程按如下步骤进行:

(1) 用清屏器清除磷屏上原有影像;

(2) 将磷屏固定在曝光支架上端面;

(3)将待测样品固定在样品支撑板合适位 置,然后将样品支撑板插入到曝光支架的选定隔 层中;

(4)将载有磷屏和待测样品的曝光支架放入 真空室中,关闭真空室和放气阀,开启真空泵后打 开隔断阀开始抽真空;

(5)当真空室内压强达到 100 Pa时开始计时,达到预定的曝光时间后,关闭隔断阀及真空泵 停止抽真空并终止计时;

(6)打开放气阀,当真空室恢复到常压时打 开真空室,取出曝光支架,卸下磷屏;

(7)将上述已曝光的磷屏紧贴在磷屏仪扫描 滚筒上并锁好卡紧装置,然后一起放入扫描仪中;

(8) 在计算机上打开磷屏仪配套软件 OptiQuant,设置好扫描参数后进行扫描;

(9)利用 OptiQuant 软件分析影像数据,计 算影像兴趣区的光强度。

1.4 磷屏影像定量方法

在磷屏仪上获取样品的磷屏影像后,选择合适的兴趣区,利用 OptiQuant 软件可以直接得到 兴趣区的光强度 *I*,光强度单位用 Digital Light Units 即 DLU 表示。

由于光强度 I 大小与测量几何条件即立体角 有关,因此常常需要进行立体角修正。将实验得 到的光强度 I 除以相应的立体角修正系数 f 后即 可得到 4π 测量条件下的光强度 I',以下简称 4π 光强度。

2 结果和讨论

影响磷屏影像光强度的因素主要有样品和磷 屏之间的距离、曝光时间、样品放射性活度等,下 面依次进行讨论。

2.1 样品和磷屏之间的距离

研究样品和磷屏之间的距离对磷屏影像光强 度的影响,即研究源对靶所张立体角对磷屏影像 光强度的影响。从理论上讲,实验得到的光强度 修正后得到的 4π 光强度是与曝光时靶和源的距 离没有关系的物理量,因此可以用于相同核素、不 同活度的放射性样品之间的比较。为了得到 4π 光强度,需要做 2 个方面的工作:(1) 计算实验条 件下的立体角修正系数;(2)测定源和靶在相应 条件下的磷屏影像光强度。

因为本工作采用的样品为电沉积标准 α 源 (源直径为 10 mm),在真空环境中测量,可以假 定源无自吸收及外吸收,放射性密度均匀分布,射 程足够长。在上述条件下,如果再在磷屏上选取 与源同轴的兴趣区作为靶,就可利用文献[13]的 "圆形平面辐射源对同轴圆形平面靶的立体角修 正系数"进行插值,从而得到不同实验条件下的立 体角修正系数 f,列于表 1。由表 1 可看出,立体 角修正系数随着源与靶之间距离 h 的增加而减 小,随着靶半径 r 的增加而变大。

表1 不同 h 所对应的立体角修正系数

r/mm –	f					
	30.0 mm	50.0 mm	70.0 mm	90.0 mm	110.0 mm	
11.0	0.029 619	0.011 468	0.006 088	0.003 690	0.002 470	
15.0	0.050 124	0.020 856	0.011 025	0.006 747	0.004 610	
20.0	0.079 917	0.034 845	0.018 952	0.011 793	0.008 200	
25.0	0.111 546	0.051 344	0.029 169	0.018 165	0.012 410	
30.0	0.140 324	0.069 803	0.040 628	0.025 329	0.017 635	
35.0	0.168 530	0.088 629	0.051 756	0.033 829	0.023 575	
40.0	0.193 979	0.106 498	0.064 522	0.043 594	0.030 357	
45.0	0.216 823	0.126 575	0.078 283	0.051 985	0.037 202	
50.0	0.236 781	0.142 773	0.092 256	0.062 248	0.045 397	

源至靶的距离 h 为 50.0,70.0,90.0, 110.0 mm,曝光时间均为 40 min 的磷屏影像示 于图 1(仅举一例),图 1 中的 1—9 号同心圆是所 选取的半径依次增加的兴趣区(各兴趣区半径大 小同表 1),最下面标有"1-b"的矩形框是选定的 用于计算本底的区域。4 种 h 下在 9 个兴趣区的 光强度值列于表 2。表 3 则是相应的经过立体角 修正后得到的 4π 光强度。从表 2 可以看出,磷屏 影像光强度与表 1 中立体角修正系数呈现相同的 变化趋势,即随着源靶距离 h 的增加而变小,随着 靶半径 r 的增加而变大;而表 3 所示 4π 光强度则 稳定在总体平均值 6.584×10^8 DLU 附近,每个 兴趣区的 4π 光强度变化幅度小于±4.6%。这一 点与前面提到的理论预测" 4π 光强度与曝光时靶 和源的距离没有关系"一致。



图 1 磷屏影像兴趣区和本底区位置 Fig. 1 Regions-of-interest and background zone in phosphor screen image 1-9----兴趣区(Regions-of-interest), 1-b---本底区(Background zone)

从以上分析可看出,用磷屏技术测量均匀、薄 源、圆形样品的放射性活度时,任意选取1个与源 同轴的圆形兴趣区进行计算即可。

表 2 立体角修正前不同 h 下各兴趣区光强度

Table 2 Light intensities of different h for regions-of-interest before solid angle revision

#/mm	$10^{-7}I$ / DLU				
77111111	50.0 mm	70.0 mm	90.0 mm	110.0 mm	
11.0	0.776	0.413	0.243	0.165	
15.0	1.394	0.752	0.447	0.302	
20.0	2.354	1.305	0.774	0.527	
25.0	3.466	1.973	1.183	0.810	
30.0	4.641	2.721	1.659	1.146	
35.0	5.821	3.526	2.189	1.528	
40.0	6.975	4.357	2.758	1.950	
45.0	8.064	5.203	3.354	2.401	
50.0	9.068	6.040	3.972	2.880	

表 3 立体角修正后得到不同 h 下的 4π 光强度

Table 3 4π light intensities of different h for

regions-of-interest after solid angle revision

#/mm	$10^{-8}I'$ / DLU				
r/mm	50.0 mm	70.0 mm	90.0 mm	110.0 mm	
11.0	6.770	6.787	6.591	6.670	
15.0	6.685	6.819	6.620	6.559	
20.0	6.757	6.885	6.567	6.432	
25.0	6.751	6.764	6.515	6.526	
30.0	6.649	6.697	6.551	6.499	
35.0	6.568	6.813	6.472	6.482	
40.0	6.550	6.752	6.327	6.423	
45.0	6.371	6.646	6.451	6.454	
50.0	6.351	6.547	6.381	6.344	
	(6.584)				

注(Note):括号中数值为平均值(The datum in parentheses is the average)

2.2 曝光时间

因为本实验采用的样品半衰期非常长,因此 可认为是活度恒定的辐射源。这样从理论上讲, 磷屏影像光强度应该与曝光时间成正比。为此, 在维持源与靶的距离 *h*=50.0 mm 的前提下,将 曝光时间依次设置为 20,40,80,160,320 min 进行验证性实验。对磷屏影像的分析方法和数据 处理过程与前面介绍相同,对每一个磷屏影像仍 然选取如图 1 所示的 9 个兴趣区,然后以 9 个兴 趣区的 4π 光强度的平均值作为对应于一定曝光 时间的 4π 光强度,最后以曝光时间 t 为横坐标、 以 4π 光强度,最后以曝光时间 t 为横坐标、 以 4π 光强度 I'为纵坐标作图,结果示于图 2。从 图 2 可以看出,随着曝光时间增加, 4π 光强度呈 线性增加趋势。将图 2 中的直线向下延长可以求 得直线与横轴的交点坐标为(-8.70,0),并非交 于坐标原点。这是因为实验中记录曝光时间的起 点选在真空室内压强降低为 100 Pa 的时刻,而终 点则是关闭真空泵的时刻。在起点前和终点后的 时间(简称辅助时间)内,不可避免会有一定量射 线射到磷屏上,从而增加磷屏影像光强度。图 2 中直线与横轴交点的横坐标的绝对值 8.70 min 就是本实验的表观辅助时间。



on the 4π light intensity I'

由于辅助时间过长不利于样品的分析,因此 本工作采用以下 2 种措施来降低辅助时间对测量 结果的影响:(1) 尽量使每次实验所用的辅助时 间保持恒定并显著短于曝光时间;(2) 设置源与 靶之间的距离 h 大于 α 粒子在空气中的射程(本 研究中 $h = 50.0 \text{ mm}, \alpha$ 粒子在空气中射程约 4 cm),以便使 α 粒子在常压辅助时间内对测量结 果的影响可以忽略。

2.3 样品放射性活度

样品放射性活度对磷屏影像光强度的影响与 曝光时间对磷屏影像光强度的影响类似:对于前 者,在相同的曝光时间内,随着样品放射性活度增 加,磷屏所接受的来自于样品的射线会成正比例 增加;对于后者,当样品的放射性活度一定时,随 着曝光时间的增加,射到磷屏上的射线也会成正 比例增加。总之这两者的结果相同,即都会使磷 屏接受的射线成正比增加。由于前面曝光时间对 磷屏影像光强度的影响实验已经验证了"在磷屏 未饱和的前提下,磷屏影像光强度与磷屏接受的 射线成正比"这一结论,因此本工作省略了关于样 品放射性活度影响的实验。

鉴于上述分析,在测量样品放射性活度时,可 以将样品与一个同核素的标准源同时固定在样品 支撑板上的不同位置,并在样品和标准源之间增 加一块尽可能高的垂直挡板来使两者之间的相互 干扰可以忽略,然后同时在真空室曝光,这样通过 与标准源的比较即可计算出样品的放射性活度。

2.4 关于实验技术的问题和讨论

2.4.1 真空室曝光与曝光盒曝光的比较 真空 室曝光与曝光盒曝光有2点不同:(1)真空室曝 光主要用于样品和磷屏不能紧密贴在一起并且空 气对测量结果影响很大的情形;而曝光盒曝光的 样品和磷屏必须紧密贴在一起;(2)由于样品与 磷屏的距离越远,磷屏影像与样品表面放射性活 度分布的对应关系越模糊,因此曝光盒曝光的影 像可以做到准确的定位,而真空室曝光的影像随 着源靶距离的增加定位功能越来越弱。

2.4.2 扫描次数对磷屏影像光强度的影响 磷 屏仪说明书指出,磷屏经过扫描后,磷屏影像光强 度会下降,但说明书中没有说明下降的幅度有多 大。本工作对源靶距离 h=50.00 mm、曝光时间 为 320 min 的磷屏连续进行了 7 次扫描,然后以 第一次扫描得到的光强度为基准,计算各次扫描 的相对光强度 I_r,结果列于表 4。从表 4 可以看 出:(1)不同兴趣区在每次扫描后光强度降低幅 度基本相同;(2)光强度降低速度随着扫描次数 的增加而递减,第一次扫描后光强度降低幅度最 大,光强度损失超过 70%。因此一旦扫描过程意 外中止,应当从清屏开始重新进行实验。

2.4.3 磷屏的本底、清屏与避光 磷屏的本底主 要来自于清屏不彻底残留的影像和宇宙射线。清 屏的方法就是将磷屏感光面贴在清屏器面板上足 够时间(清屏器的作用是提供滤掉紫外线的均匀 白光)。说明书推荐的时间是 30~60 s,但同时指 出确定清屏时间需要考虑核素的性质、上次曝光 时间、是否经过扫描、清屏器提供的白光强度等因 素。实际操作时,清屏时间可以根据清屏后试扫 描结果确定。总之清屏时间越长,清屏越彻底。 本工作采用的清屏时间为 10~30 min,对曝光 40 min的磷屏,本底值在 57~246 DLU/mm²。 对于宇宙射线,由于曝光时间越长,因宇宙射线产 生的本底值越高,因此,如果样品放射性活度很低,曝光过程需要在铅室屏蔽下进行。因为白光、 尤其是荧光灯的光能够清除磷屏上的影像,因此, 尽管磷屏实验不需要在暗室内进行,但在磷屏开 始曝光到扫描结束的时间内,要尽量关闭不必要 的灯,特别是要关闭荧光灯。在此过程中,要始终 避免光线直射磷屏感光面。

表 4 扫描次数对各兴趣区相对光强度 I_r 的影响 Table 4 Effect of the number of scans on the relative light intensities for regions-of-interest

#/mm	$I_{\rm r}$ / $\%$						
// 111111 -	1	2	3	4	5	6	7
10	100.0	28.8	13.8	8.7	6.4	5.1	4.2
20	100.0	28.8	13.8	8.8	6.4	5.1	4.2
30	100.0	28.8	13.9	8.8	6.5	5.1	4.2
40	100.0	28.8	13.9	8.8	6.5	5.1	4.3
50	100.0	28.8	13.9	8.8	6.5	5.1	4.3

2.4.4 已曝光磷屏扫描前搁置时间的影响 正常情况下,磷屏曝光结束后马上开始扫描,但为了 解搁置时间对实验结果的影响,本工作进行了如 下预实验:源靶距离 h = 30.0 mm,曝光时间 40 min,曝光结束后将磷屏贴在滚筒上,然后放置 在磷屏仪内搁置 17 h 再扫描。实验结果表明,搁 置 17 h 后,磷屏影像光强度降低到了期望值的 65%左右。因此对已曝光磷屏要及时进行扫描, 不能搁置过长时间,否则应从清屏开始重新进行 实验。

2.4.5 γ或 X 射线的影响 α核素在发出 α 射 线时大都同时发出 γ或 X 射线, m^{241} Am 在发出 α 射线时发出能量为 59.54 keV 的 γ 射线, 239 Pu 在发出 α 射线时同时发出能量为 13.6 keV 的 X 射线, 而目前从磷屏影像还无法分辨 α, γ或 X 射 线, 因此本实验测得的磷屏影像光强度是 α, γ 和 X 射线共同作用的结果。对本工作采用的混合标 准源, 实验结果表明, γ 和 X 射线在磷屏影像上的 贡献比例为 1.03%。另外, γ 和 X 射线对本底的 贡献与 α 射线不同, 不管是在常压状态还是在真 空状态, γ 和 X 射线都会对本底产生贡献。

2.4.6 源的厚薄、均匀性和形状 虽然本工作采 用的是圆形、均匀、理想薄源,但从原则上讲,获取 磷屏影像的实验方法对不同性质的源是相同的, 所不同的是对磷屏影像的数据处理方法。对于有 一定厚度的源,从 2.4.5 节的结果看,γ和 X 射线 在磷屏影像上的贡献比例很小,一般情况下,可以 近似认为实验测得的磷屏影像光强度是源表层 α 射线作用的结果。对非均匀、非圆形源,本工作所 采用的立体角修正系数的计算方法已不再适用, 这时可采用文献[14-15]中的方法进行数值积分。 不过对于分布及形状一定的源之间的相对比较, 仍然可以采用本工作的计算方法,只要实验过程 中保持源靶距离一定,并选取形状、大小相同的兴 趣区进行计算即可。

2.5 磷屏放射自显影法的应用前景

磷屏放射自显影法与传统的核乳胶法的应用 目的和应用范围基本相同,由于前者具有操作简 单、定量容易、测量线性范围宽、曝光时间短、不需 要暗室以及磷屏可以反复使用等优点,从而具有 优越的定位定量性能,因此在核医学领域已被广 泛作为后者的替代技术。在核化学与放射化学领 域,对于以前核乳胶法应用的场合,磷屏放射自显 影法基本都能适用。另外,在越来越受到重视的 处置化学研究中(处置化学主要研究高放废物中 关键核素在地质环境中的化学行为),不可避免会 涉及到固体地质样品的分析,而有时由于样品尺 寸过大并且不宜被转变为液体形式,从而不能用 常规 α 谱仪和液闪仪测量,这时磷屏放射自显影 法就是一个不错的选择。当然,由于目前从磷屏 影像还无法分辨辐射的种类和能量,因此现在仅 能应用于单核素的测量。尽管如此,仍不难预测, 磷屏放射自显影法将会作为传统核乳胶法的替代 技术越来越多地被应用在各种研究中。

3 结 论

(1)用磷屏技术测量放射性的过程依次分为4步:清屏、曝光、扫描、影像分析。

(2) 对均匀、薄源、圆形样品,任意选取一个 与源同轴的圆形兴趣区进行计算即可。

(3)样品的磷屏影像 4_π 光强度与曝光时间 及样品放射性活度成正比。

(4) 磷屏曝光结束后不宜搁置过久,应尽快 扫描,并且扫描过程要一次完成,不能中途中止。

(5) 磷屏放射自显影法将会作为传统核乳胶 法的替代技术越来越多地被应用在各种研究中。

参考文献:

- [1] C. 克勒尔著. 朱永嘯, 焦荣洲, 徐景明, 等, 译. 放射
 化学基础[M]. 北京: 原子能出版社, 1993: 102.
- [2] 庄慧娥,刘詠莲,郑继师,等.用自射线照相技术研 究放射性核素在岩石和矿物上的吸附[J].核化学与

放射化学,1995,17(2):117-121.

- [3] 赵冬梅,刘占平. Cyclone-磷感屏成像系统[J]. 现代 仪器, 2001, 1: 28-29.
- [4] Kanekal S, Sahai A, Jones R F, et al. Storage-Phosphor Autoradiography: A Rapid and Highly Sensitive Method for Spatial Imaging and Quantitation of Radioisotopes [J]. J Pharmacol Toxicol Methods, 1995, 33: 171-178.
- [5] Walker C, Walton C E, Fraser J M, et al. Dissection Autoradiography: A Screening Technique Using Storage Phosphor Autoradiography to Detect the Biodistribution of Radiolabelled Compounds[J].
 J Pharmacol Toxicol Methods, 2001, 45: 241-246.
- [6] Ito T, Suzuki T, Lim D K, et al. A Novel Quantitative Receptor Autoradiography and in Situ Hybridization Histochemistry Technique Using Storage Phosphor Screen Imaging[J]. J Neurosci Methods, 1995, 59: 265-271.
- [7] 刘美玲,石心泉,周万灏,等.人骨髓基质细胞向成 骨细胞分化过程中差异表达基因的筛选[J].生理学 报,2006,58(4):370-376.
- [8] 袁守军,汤仲明,刘秀文,等.储存磷光质屏放射自显影在测定兔血浆中¹²⁵ I-重组人尿激酶原浓度的应用[J].解放军药学学报,2001,17(1):19-21.
- [9] Zeissler C J. Comparison of Semiconductor Pixel Array, Phosphor Plate, and Track-Etch Detectors for Alpha Autoradiography [J]. Nucl Instrum Methods Phys Res A, 1997, 392: 249-253.
- [10] Cole J M, Nienstedt J, Spataro G, et al. Phosphor Imaging as a Tool for in Situ Mapping of ppm Levels of Uranium and Thorium in Rocks and Minerals [J]. Chem Geol, 2003, 193: 127-136.
- [11] Johansson L, Altzitzoglou T, Sibbens G, et al. Standardisation of ²³⁸Pu Using Four Methods of Measurement[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res A, 2003, 505: 699-706.
- [12] Kienzler B, Römer J, Schild D, et al. Sorption of Actinides Onto Granite and Altered Material From Aspo HRL[C]. Mat Res Soc Symp Proc, 2004, 807: 665-670.
- [13] 蒋和兴. 辐射测量中的立体角修正[J]. 原子能科学 技术,1987,21(3): 285-290.
- [14] Sibbens G, Pommé S, Johansson L, et al. Tailoring Solid Angle Calculations to the Actual Radioactivity Distribution of Planar Sources [J]. Nucl Instrum Methods Phys Res A, 2003, 505: 277-281.
- [15] Pommé S, Johansson L, Sibbens G, et al. An Algorithm for the Solid Angle Calculation Applied in Alpha-Particle Counting[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res A, 2003, 505: 286-289.