

文章编号:0253-9950(2010)05-0293-06

磷屏的线性、饱和、衰减特性

宋来武,冯孝贵

清华大学 核能与新能源技术研究院,北京 102201

摘要:对²⁴¹Am、¹⁴C 和¹³⁷Cs 3 种核素在 PE 公司 3 种磷屏上的放射自显影性能进行了研究,并提出了一种估算曝光时间上限值的方法。从曝光时间角度研究了磷屏对 α 、 β 、 γ 射线的线性特性和饱和特性,结果表明磷屏上无饱和点出现时,3 种磷屏都具有良好的线性特性。研究了 α 、 β 、 γ 射线在磷屏上所成影像光强度随时间的衰减性能,表明磷屏的衰减现象是普遍存在的,开始阶段衰减较快,此后衰减速度逐渐变慢。在用磷屏进行放射自显影研究时,一般在曝光后应立即扫描。

关键词:磷屏;放射自显影;线性特性;饱和;衰减

中图分类号:TL816.2 **文献标志码:**A

Linearity, Saturation and Fading Characteristics of Phosphor Screens

SONG Lai-wu, FENG Xiao-gui

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

Abstract: The autoradiography behaviors of three kinds of radionuclides ²⁴¹Am, ¹⁴C and ¹³⁷Cs on three types of phosphor screens (PerkinElmer Co.) have been studied. A method has been provided to estimate the upper limit of exposure time with the aim at avoiding the saturation of screen. All the three types of screens show good linearity to alpha, beta or gamma radiations before saturation. It is common that the stored signals of phosphor screens fade with time after irradiation, with higher speed at first and lower speed afterwards. It is recommended that the screen be scanned immediately after irradiation.

Key words: phosphor screen; autoradiography; linear characteristic; saturation; fading

磷屏放射自显影是近年来新兴的一种放射自显影方法。与传统的核乳胶放射自显影技术相比,它具有线性范围宽、灵敏度高、操作方便、数据重现性好等优点,因此在核物理及核医学等领域的应用越来越广泛。

关于磷屏放射自显影的机理,即射线诱导的光激励发光(photo stimulated luminescence,简称 PSL)机理,目前存在着几种有争议的模式^[1-2]。

尽管如此,对于磷屏放射自显影的基本过程还是有比较一致的意见^[1-4],即:磷屏是一种由均匀涂覆的细小的磷光质(大多采用 BaFBr:Eu²⁺ 晶体)构成的感光屏,当含有放射性核素的样品靠近磷屏时,来自于样品的射线使磷屏上的磷光质晶体产生各种缺陷(即所谓的色心),这些色心保留着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,磷屏上将会产生激发态的

收稿日期:2009-03-20;修订日期:2009-07-09

作者简介:宋来武(1986—),男,山东济南人,硕士研究生,化学工程专业

* 通讯联系人:冯孝贵, fengxiaogui@tsinghua.edu.cn

Eu^{2+*} , 当激发态的 Eu^{2+*} 退激到基态的 Eu^{2+} 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, 然后可以对影像进行进一步分析和定量。

本工作的目的不是为了研究复杂的机理问题, 而是从应用角度出发, 研究磷屏的一些基本特性, 即磷屏的线性特性、饱和特性和衰减特性, 以便为磷屏放射自显影技术的推广应用提供参考。

1 实验

1.1 实验材料

为了研究用磷屏技术测量 α 、 β 、 γ 射线的区别, 实验中采用了 3 种放射源 ^{241}Am 、 ^{14}C 和 ^{137}Cs , 其中 ^{241}Am 既是 α 放射源 (5.443、5.486 MeV) 又是 γ 放射源 (59.5 keV), ^{14}C 是 β 放射源 (156 keV), ^{137}Cs 是 γ 放射源 (661.6 keV)。

^{241}Am 源, 电沉积法制作, 活度为 2.69×10^4 Bq, 有效尺寸为 $\phi 10$ mm。 ^{14}C 源, 活度为 1.75×10^3 Bq, 位于 $\phi 10$ mm \times 5 mm 敞口玻璃皿内 (原为液闪分析时制作淬灭曲线用 ^{14}C 标准, 呈干枯状)。 ^{137}Cs 源, 活度为 8.83×10^4 Bq, 尺寸为 $\phi 30$ mm。

1.2 实验仪器及装置

磷屏技术实验装置的标准配置包括磷屏仪、磷屏、曝光盒和清屏器, 利用该标准配置可以进行 γ 和高能 β 射线的测量, 但不能进行 α 和低能 β 射线的测量。为进行 α 和低能 β 射线的测量, 本研究室设计加工了真空室系统和曝光支架。曝光盒和清屏器较简单, 下面对其它部分进行说明。

磷屏仪: Cyclone® Plus Storage Phosphor System, 美国 PE 公司。

磷屏: 有 3 种, 即 MP 型 (multipurpose phosphor screens)、ST 型 (super sensitive phosphor screens) 和 MS 型 (multisensitive phosphor screens) 小屏, 125 mm \times 192 mm, 美国 PE 公司。MP 型屏是通用型多功能磷屏, 具有特殊防潮表面, 经久耐用。ST 型屏是超敏感屏, 对低活度样品更为有效。MS 屏是新产品, 据称兼有 MP 屏的耐用性、ST 屏的高敏感性及更高的分辨率。

真空室系统: 北京神州东升科技有限公司生产, 主要包括 $\phi 280$ mm \times 150 mm 不锈钢真空室和 TRP12 型优成牌真空泵。一般 1 min 左右可以从常压抽到 100 Pa, 再经过 1 min 左右抽到 10 Pa, 320 min 可以达到 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, 相邻两层之间距离为 10.0 mm, 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 11.0 mm。

1.3 实验方法

磷屏放射自显影的过程主要包括清屏、曝光、扫描和影像分析。对于具有不同几何特点的各种 α 、 β 、 γ 放射源, 清屏、扫描和影像分析这三步基本上都是相同的, 不同的只在于曝光过程。根据磷屏与样品是否紧贴在一起, 可以分为 2 种曝光方式: 对于穿透能力较强的放射源, 先将源置于塑料样品袋中, 然后将样品袋与磷屏紧贴在一起放在曝光盒内进行曝光; 对于穿透能力较弱的放射源, 源与磷屏之间不能有塑料膜等存在, 必须裸露着曝光 (必要时还需要抽真空), 这时需要采用曝光支架和真空室。

1.3.1 α 射线的测量方法 对 α 射线的测量要在曝光支架中进行, 同时需要抽真空。具体操作步骤如下^[5]: (1) 将待测样品固定在样品支撑板合适位置; (2) 用清屏器清除磷屏上原有影像; (3) 将磷屏固定在曝光支架上端面, 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时, 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, 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 (如果研究衰减特性, 还需要静置一定时间); (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。

1.3.2 β 射线的测量方法 实验中所用的 β 源是 ^{14}C , 能量较低 (156 keV), 所以选择在曝光支架上进行曝光, 实验方法与上述 α 射线的测量方法基本相同, 不同之处仅在于此时不需要抽真空。

1.3.3 γ 射线的测量方法 由于 γ 射线的穿透力很强, 因此选择在曝光盒内曝光。曝光过程如下: (1) 将清屏后的磷屏置于曝光盒中; (2) 将待测样品放置在样品袋中, 为了防止 α 射线的干扰 (因为 ^{241}Am 兼有 α 和 γ 射线), 使样品与磷屏之间间隔 4 层塑料膜 (总计质量厚度为 16 mg/cm^2);

(3) 将装有待测样品的样品袋直接放在磷屏上,关闭曝光盒并开始计时;(4) 达到预定的曝光时间时,取下样品袋,终止曝光。

2 结果与讨论

2.1 磷屏的线性特性

磷屏放射自显影用于定量分析的基础是磷屏影像光强度与照射到磷屏上的射线量成正比。在影响磷屏影像光强度的因素中,显而易见的因素主要有样品放射性活度、曝光时间、测量几何条件(主要指样品与磷屏间的距离)等。在上述因素中,在不考虑磷屏影像衰减的前提下(参见后文的“磷屏的衰减特性”一节),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^[5]。由于改变曝光时间的实验更简单,因此本文选择从曝光时间角度来研究磷屏放射自显影的线性特性。

理论上讲,当实验操作时间相对于放射源的半衰期而言非常短时,可以忽略衰变对源活度的影响,这样,在磷屏未饱和之前,磷屏影像光强度与曝光时间应该呈正比。图1是²⁴¹Am的 γ 射线(59.5 keV)在MP屏上曝光50 min后扫描所得磷屏影像,其外围实线圆为分析兴趣区(与放射源同轴,半径为30 mm),右下虚线圆为本底区。图2是²⁴¹Am的 γ 射线在3种磷屏上形成的影像光强度随曝光时间变化的实验结果,图中纵坐标是校正为 4π 立体角后的数据(样品和源在曝光盒内曝光时,近似按 2π 立体角计算;在真空室内曝光时,校正方法见文献5)。结果表明,实验条件下MP、MS和ST 3种磷屏对²⁴¹Am的 γ 射线都表现出良好线性关系。由于图2中的3条直线针对的是同一个放射源,因此由3条直线的斜率可以

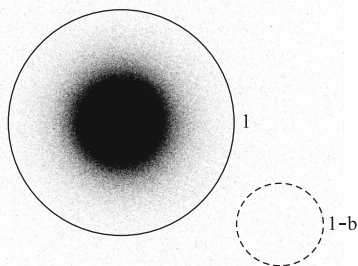


图1 磷屏影像及兴趣区的选取

Fig. 1 Region-of-interest and background zone in phosphor screen image

1——兴趣区(Region-of-interest), 1-b——本底区(Background zone)

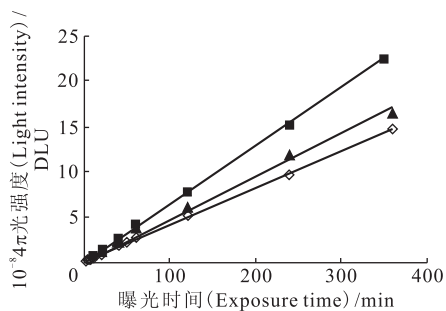


图2 γ 射线在3种磷屏上的影像光强度与曝光时间关系

Fig. 2 Image light intensity vs. exposure time for γ -ray of ²⁴¹Am on three types of screens

◇——MP(斜率(Slope) 4.09×10^6),
 ▲——MS(斜率(Slope) 4.77×10^6),
 ■——ST(斜率(Slope) 6.43×10^6)

看出,对²⁴¹Am的 γ 射线而言,3种磷屏的灵敏度顺序依次为MP<MS<ST。

另外,实验研究了²⁴¹Am的 α 射线(5.443、5.486 MeV)和¹⁴C的 β 射线(156 keV)在MP屏上所成影像光强度随曝光时间变化的情况(图3),实验结果同样表明磷屏具有良好的线性特性。根据图2(MP屏)、图3中各条直线的斜率以及²⁴¹Am源和¹⁴C源的放射性活度,可计算出MP屏对这几种射线的灵敏度(DLU, min·Bq)依次为:²⁴¹Am的 α 射线(9 000)>¹⁴C的 β 射线(206)>²⁴¹Am的 γ 射线(152)。这与 α 、 β 、 γ 三种射线在同一种介质中的比电离顺序一致。

上述结果表明,磷屏放射自显影是一种相对测量方法,磷屏影像光强度不仅会随着样品放射性活度、曝光方式及时间、测量几何条件而变化,而且还会随着磷屏种类、射线种类甚至射线的能量而变化。因此,如果需要测量未知样品的活度,就应该在相同的条件下测量已知活度的标准样品,从而经过相对比较得出未知样品的活度。

2.2 磷屏的饱和特性

上节研究结果表明磷屏具有良好的线性特性,但线性范围不可能是无限的,其上限受磷屏的饱和特性控制。关于磷屏的饱和特性,文献中少有报道。我们在实验过程中发现,正常情况下以不同灰度等级分布的、呈灰色的磷屏影像,在某些实验条件下(如曝光时间较长、源活度较高等),某些区域会出现异常的红色(图4)。

图4是²⁴¹Am的 γ 射线和MP屏在曝光盒中曝光17 h后的磷屏影像。实验选择的扫描分辨

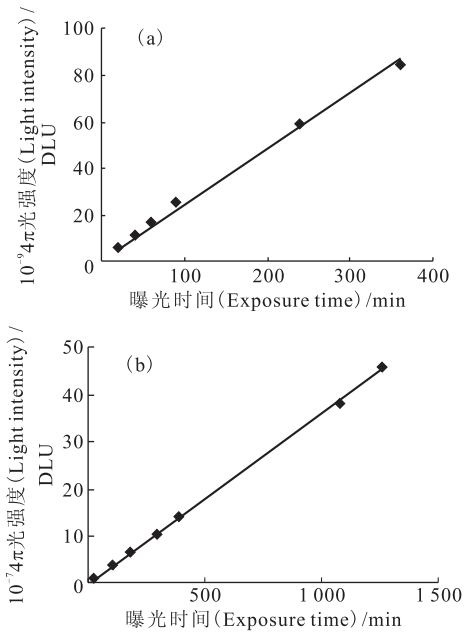


图 3 α (a)和 β (b)射线在MP屏上的影像光强度与曝光时间关系

Fig. 3 Image light intensity vs. exposure time for α -ray of ^{241}Am (a) and β -ray of ^{14}C (b) on MP screen
斜率(Slope): (a)—— 2.42×10^8 , (b)—— 3.60×10^5

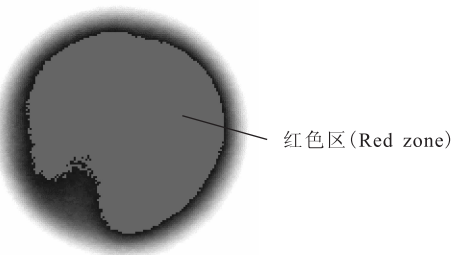


图 4 磷屏的饱和

Fig. 4 Saturation of phosphor screen

率为 300 dpi, 因此每个像素点的大小约为 $85 \mu\text{m} \times 85 \mu\text{m}$ 。经过 OptiQuant 软件分析可知, 显示为红色的所有像素点的影像光强度均为一固定值 100 428 DLU。由于仪器指标给出的线性范围是 5 个数量级 (1~100 000), 因此可以推测影像光强度为 100 428 DLU 的红色像素点即为磷屏上的饱和点。根据这一分析结果, 针对某种特定的放射源和某一种确定的磷屏, 我们提出了一种估算曝光时间上限值的方法, 该方法可以用来控制磷屏不被饱和。

所谓控制磷屏不被饱和, 就是使磷屏上受到射线照射最多的像素点(定义为点 P_{max})的影像光强度小于 100 428 DLU。一般来讲, 当样品放射性活度足够高或者曝光时间足够长时, 统计涨落

的误差很小, 点 P_{max} 的强度是一定的, 这样, 通过点 P_{max} 的影像光强度与曝光时间的关系, 就可以确定曝光时间的上限值。按照这一思路, 对图 2 的实验结果重新进行分析, 得到结果示于图 5。

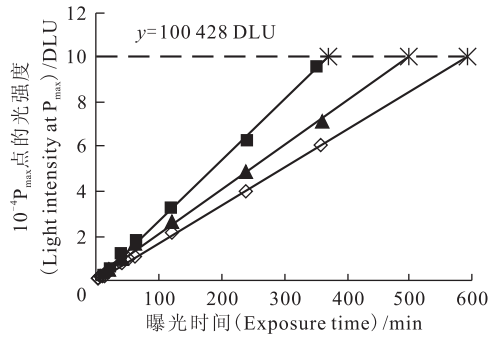


图 5 曝光时间上限值的估算

Fig. 5 Estimation of the upper limit of exposure time
◇——MP(斜率(Slope)170), ▲——MS(斜率(Slope)202),
■——ST(斜率(Slope)272)

从图 5 可以看出, 点 P_{max} 的影像光强度与曝光时间也呈现良好的线性关系, 这样, 3 条直线与水平线 $y=100\ 428$ DLU 的交点的横坐标就是曝光时间的上限值。针对本研究中采用的 ^{241}Am 源的 γ 射线, 在 MP、MS 和 ST 三种磷屏上曝光时间的上限值依次为 592、496 和 370 min。为了验证该估算方法的正确性, 选用 ST 屏和 ^{241}Am 源的 γ 射线, 在曝光盒内曝光 390 min, 结果正如所料, 在影像中心区出现了面积较小的红色的饱和区域。

另外, 对比图 5 和图 2 可以看出, 两者的变化趋势完全相同, 只是直线的斜率有变化。图 2 中 MP、MS 和 ST 屏对应的 3 条直线的斜率依次为 4.09×10^6 、 4.77×10^6 和 6.43×10^6 , 而图 5 中 3 条直线的斜率依次为 170、202 和 272。针对这 3 种磷屏, 分别计算了它们在图 2 与图 5 中的斜率比, 依次为 2.41×10^4 、 2.36×10^4 和 2.36×10^4 , 这一结果表明, 当磷屏未饱和时, 各兴趣区内磷屏影像光强度以相同速度随着曝光时间成正比变化。这从另一个角度阐释了磷屏的线性特性。

采用相同的方法, 可以得到 ^{241}Am 源的 α 射线(与图 3(a)对应)和 ^{14}C 的 β 射线(与图 3(b)对应)在 MP 屏上曝光时间上限值分别为 27.7 h 和 1 571 h。

需要提出的一点是, 由于 P_{max} 只有一个像素点, 而一般兴趣区含有成千上万个像素点(当扫描分辨率为 300 dpi 时, 每 1 mm^2 兴趣区约含有 140 个像素点), 因此前者影像光强度的统计涨落误差

比后者大得多。当磷屏受到射线的照射不够强时,图5所示方法会带来很大误差。如果这样,就需要延长曝光时间,或者换一个放射性活度更高而几何条件相同的源。

2.3 磷屏的衰减特性

在应用磷屏进行放射自显影时,有一个必须引起足够重视的现象。据报道^[6-8],磷屏经过曝光产生各种色心后,即使不进行光激励,其影像光强度也会自发衰减。磷屏的衰减特性与实验温度、磷屏的性质以及射线的性质都有关系。在实验室条件下,环境温度(22~25℃)可以近似认为是不变的,因此本工作主要从磷屏和射线的性质2个方面进行研究。

2.3.1 不同性质磷屏的影响 采用²⁴¹Am源的 γ 射线在MP、MS及ST3种磷屏上分别曝光(曝光时间为10min),曝光后在黑暗环境中静置一定时间再进行扫描。以曝光后立即进行扫描得到的磷屏影像光强度为1,分别计算静置不同时间后磷屏影像的相对光强度,结果示于图6。图6中没有包括如下静置更长时间的实验结果:²⁴¹Am源的 γ 射线在ST屏上曝光后,在黑暗环境中静置5320min,磷屏影像相对光强度降低为0.787。从图6可以看出,在3种磷屏上的影像光强度的衰减趋势基本相同,在初始阶段磷屏上的信号衰减较快,此后衰减逐渐变慢。对ST屏,当静置时间由990min延长到5320min时,相对光强度值由0.795降低为0.787,表明长时间后磷屏影像光强度几乎趋于恒定。从图6还可以看出,MP和MS两种磷屏的衰减曲线非常相近,两者的衰减程度也基本相同。与MP和MS屏相比,ST屏的衰减程度更低。当静置6h后,MP和MS屏上的信号衰减约为27%时,ST屏上的信号衰减约为20%。3种磷屏在衰减特性上的差异是由磷屏的材料性质(包括组成和结构)决定的。磷屏一般分为3层^[2,7-8]:可弯曲的塑料板支撑层(厚度约为180~250 μm)、混合均匀的磷光质层(含有粘结剂等添加剂,厚度约为100~300 μm)和透明的保护层(厚度约为5~10 μm)。不同类型的磷屏除了各层的厚度可能不同外,最重要的差别在于磷光质层的组成、颗粒大小以及磷光质的制备工艺等。磷屏在材料上的这些差异不可避免地会带来其在性能上的差异,包括在衰减特性上的差异。据报道^[6],磷屏在曝光过程中产生的各种色心有能量高低之分,能量较低的色心所存储的信息称为浅陷阱信号,能量

较高的色心所存储的信息称为深陷阱信号,浅陷阱信号比深陷阱信号更容易因电子/空穴对的复合而丢失掉,因此深陷阱的PSL发光更稳定。据此可以推测,实验所用的3种磷屏中,ST屏曝光后所产生的深陷阱信号较多,因此经过长时间的放置后剩余信号的强度要比MP和MS屏高。

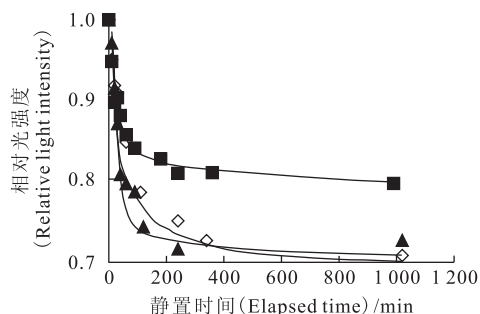


图6 不同磷屏上影像光强度的衰减

Fig. 6 Fading of images of γ -ray of ²⁴¹Am on three types of screens
◇—MP, ▲—MS, ■—ST

2.3.2 不同射线种类的影响 首先,选用同一张MS屏分别对²⁴¹Am源的 α 射线、¹⁴C源的 β 和²⁴¹Am源的 γ 射线进行衰减实验(曝光时间分别为10、30、10min),结果示于图7。由图7可以看出,不同种类的射线在MS屏上的衰减趋势基本相似,都包括开始阶段的快衰减和此后的慢衰减,但3种射线从快衰减过渡到慢衰减的转变速度有区别, γ 射线的信号转变得较快, α 和 β 射线的信号转变得较慢。这种现象一方面可能与3种射线的能量差别有关系,另一方面还可能与3种射线与物质相互作用的机制有关: α 和 β 射线都是带

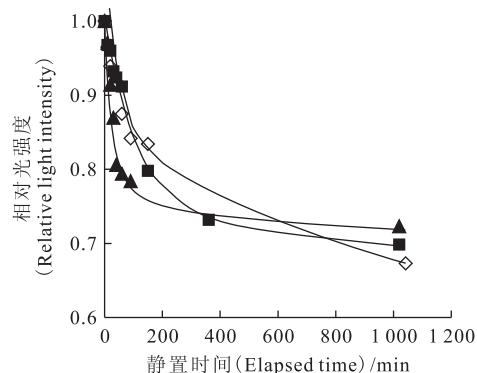


图7 α 、 β 、 γ 射线在MS屏上影像光强度的衰减

Fig. 7 Fading of images of α , β and γ -rays on MS screen
◇— α , ²⁴¹Am; ■— β , ¹⁴C; ▲— γ , ²⁴¹Am

电粒子流,它们与物质相互作用时都可引起直接电离;而 γ 射线是不带电的电磁波,它只能通过光电效应、康普顿效应和电子对效应等产生的电子引起物质电离(次级电离)。上述差异可能使它们在磷屏上产生的色心数量以及色心的能量分布都有区别,从而导致它们在衰减特性上的区别。其次,对 2 种不同能量的 γ 射线(分别来自于 ^{241}Am 及 ^{137}Cs)在同一张 MS 屏上信号的衰减情况进行了对比研究,结果示于图 8(曝光时间分别为 10 min 和 30 min)。从图 8 可以看出, ^{241}Am 的 γ 射线在 MS 屏上影像光强度的衰减速度明显快于 ^{137}Cs 的 γ 射线。这种差别应该归因于这两种 γ 射线具有不同的能量: ^{137}Cs 的 γ 射线能量约为 661.6 keV,而 ^{241}Am 的 γ 射线能量只有 59.5 keV,前者能量较大,在磷屏上产生的深陷阱信号较多;后者能量较低,在磷屏上产生的浅陷阱信号较多。通过上面对磷屏衰减特性的研究与讨论可以看出:磷屏的衰减现象是普遍存在的,但其行为非常复杂。尽管文献中有关于衰减校正的报道^[7-9],但在实际使用过程中进行衰减校正并不方便。这是因为:(1) 衰减校正公式比较复杂,并且不同磷屏仪的衰减校正公式是不同的;(2) 为了进行衰减校正,在磷屏曝光后进行静置的时间内,必须保持周围环境条件的一致性,如温度、环境光线等,这样,就需要额外增加恒温的避光装置。因此,在用磷屏进行放射自显影研究时,除非研究磷屏的衰减特性,一般在曝光后应该立即扫描。

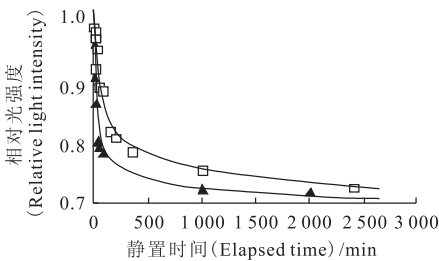


图 8 不同能量的 γ 射线在 MS 屏上影像光强度的衰减

Fig. 8 Fading of images of γ -rays with different energy on MS screen

▲—— $^{241}\text{Am}(\gamma)$, □—— ^{137}Cs

3 结 论

通过对 ^{241}Am 、 ^{14}C 和 ^{137}Cs 3种核素在 PE 公

司 3 种磷屏上的放射自显影性能进行研究,得到如下结论:(1) 磷屏上无饱和点出现时,磷屏具有良好的线性特性;(2) 通过点 P_{max} (磷屏上受到射线照射最多的像素点)的影像光强度与曝光时间的关系可以估算曝光时间上限值;(3) 磷屏的衰减现象是普遍存在的,开始阶段衰减较快,此后衰减速度逐渐变慢。在用磷屏进行放射自显影研究时,一般在曝光后应立即扫描。

参考文献:

- [1] 陈伟,宋家庆,苏勉曾. X 射线影像存储与再现用发光材料 MFX:Eu²⁺ 的研究现状及应用前景[J]. 功能材料,1994,25(3):197-205.
- [2] Lakshman A R. Radiation Induced Defects and Photo-stimulated Luminescence Process in BaFBrEu²⁺ [J]. Phys Status Solidi A: Appl Res, 1996, 153(1): 3-27.
- [3] 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.
- [4] Reinprecht I, Windisch M, Fahnestock M. Deterioration of Storage Phosphor Screens With Use [J]. J Label Compound Radiopharm, 2002, 45(4): 339-345.
- [5] 冯孝贵,梁俊福,章英杰,等. 用磷屏放射自显影法测量 α 核素的放射性活度[J]. 核化学与放射化学, 2009,31(2):84-89.
- [6] Templer R H. Measurements on Some Characteristics of BaFBr:Eu²⁺, Relevant to Its Use as a Storage Phosphor for X-Ray Diffraction Imaging [J]. Nucl Instrum Meth Phys Res A, 1991, 300(2): 357-366.
- [7] Ohuchi H, Yamadera A, Nakamura T. Functional Equation for the Fading Correction of Imaging Plates [J]. Nucl Instrum Meth Phys Res A, 2000, 450: 343-352.
- [8] Ohuchi H, Yamadera A. Dependence of Fading Patterns of Photo-Stimulated Luminescence From Imaging Plates on Radiation, Energy, and Image Reader [J]. Nucl Instrum Meth Phys Res A, 2002, 490: 573-582.
- [9] Ohuchi H, Yamadera A. Development of a Functional Equation to Correct Fading in Imaging Plates [J]. Radiation Measurements, 2002, 35: 135-142.