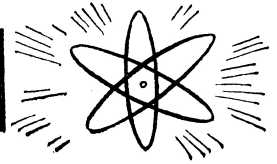


中子照相



原子能研究所 刘从贵

一、什么叫中子照相

中子照相是射线照相的一种。和x射线、 γ 射线照相类似,也是利用射线穿透物体时,能显示出物体内部结构的特点,对物体进行穿透照相。不同的是,中子的胶片感光效率非常低,必须借助于各种类型的转换屏,转换屏物质在入射中子的辐照下,发生核反应,放出 α 、 β 、或 γ 射线。这些射线射到胶片上,使胶片感光形成潜在的物体像,再经过显影、定影后,就得到中子照相的底版。

中子按能量可分为冷中子(<0.01 电子伏),热中子($0.01-0.3$ 电子伏),超热中子($0.3-10^3$ 电子伏),中能中子(10^3-10^5 电子伏),快中子(10^5 电子伏— 20 兆电子伏)等。原则上都可以用于中子照相。但是,目前技术上比较成熟、实际应用较多的是热中子照相。其它能量的中子照相还处于研究阶段,因此这里主要介绍热中子照相。

大家知道,中子入射到物质层时,由于原子核对中

子的散射和吸收,只有一部分中子能穿过物质层,穿过物质层的中子的多少不但与层的厚度有关,而且随物质的不同而变化。图1给出了各元素的x射线和中子的质量吸收系数随原子序数的变化^[2]。在图2中,一

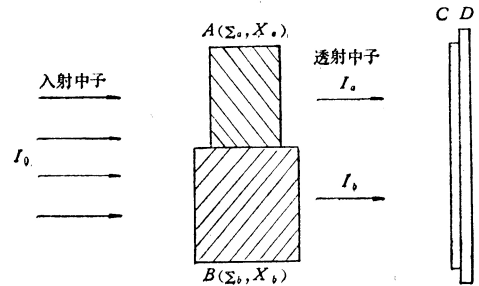


图2 中子对由A·B物质构成的物体穿透照相

注:一种物质的吸收系数被它的密度除,叫做质量吸收系数。

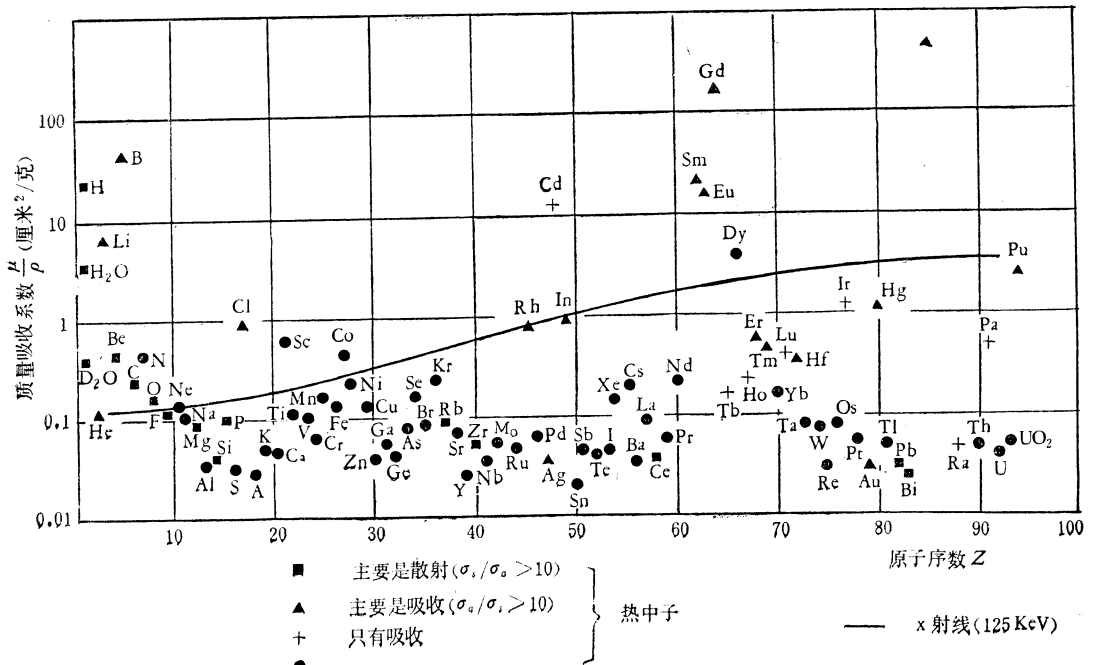


图1 元素的x射线和中子的质量吸收系数随原子序数的变化

束经过准直的空间均匀分布的热中子束,射向由A和B两种物质组成的物体。由于A、B物质对中子的吸收系数或厚度的不同,中子穿过物质后,变为空间非均匀分布的中子束。如果入射束强度为 I_0 ,那么穿过物质层后的强度分别变为 $I_a = I_0 e^{-\epsilon_a x_a}$ 和 $I_b = I_0 e^{-\epsilon_b x_b}$ 。强度为 I_a 和 I_b 的中子束入射到转换屏物质C上,与原子核发生核反应,发射出 α 、 β 或 γ 射线,这些二次发射的射线再入射到胶片D上,使胶片感光成像。成像的反差用 $C_0 = \frac{D_a - D_b}{D_a} = 1 - e^{-(\epsilon_b x_b - \epsilon_a x_a)}$ 表示。如

果被照相物体厚度相等($x_a = x_b = x$),而成份不同($\epsilon_a \neq \epsilon_b$),则 $C_0 = 1 - e^{-(\epsilon_b - \epsilon_a)x}$ 。所得到的像就反映物体内部成份的空间变化。如果物体厚度不等($x_a \neq x_b$),而成份相同($\epsilon_a = \epsilon_b = \epsilon$),则 $C_0 = 1 - e^{-(x_b - x_a)\epsilon}$,所得到的像就反映物体厚度的变化。所以中子照相能够显示出物体内部成份的空间变化及厚度变化。

对物体进行中子照相,希望物体成份,厚度的微小变化能显示出来,并希望速度快。中子照相能分辨的最小间距,叫做分辨率,它与准直器所限制的中子束角度分散和所用的像探测器有关,一般在25—100微米

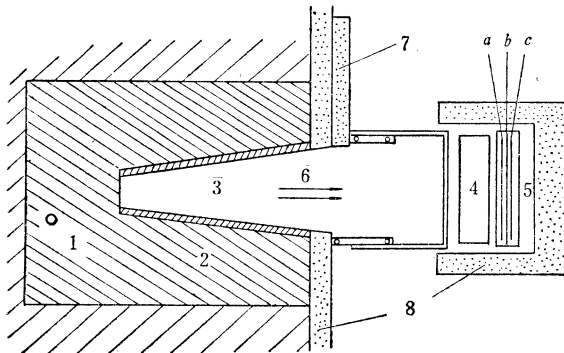


图3 热中子照相系统示意图

1 中子源 2 慢化体 3 准直器 4 被照相的物体 5 像探测器 (a、b、c 分别表示前转换屏、X光胶片、后转换屏) 6 中子束 7 束流控制门 8 屏蔽防护体

之间。当用铝箔转换屏配合细颗粒X胶片时,能获得好于25微米的分辨率。在中子通量一定时,不同的像探测器,其照相速度可以相差上千倍。

二、中子照相装置

热中子照相装置主要由中子源、慢化体、准直器、像探测器等组成。

中子源:是提供中子的装置。它以核反应或核裂变的方式产生中子。用于中子照相的有加速器中子源、同位素中子源以及反应堆中子源。图3是用加速器或同位素中子源进行中子照相的示意图。热中子照相,希望源的中子平均能量低,容易慢化,强度高,经过慢化准直之后仍获得 10^5 中子/厘米²·秒以上的中子通量。用反应堆和 Cf^{252} 同位素中子源比较合适。从反应堆

热柱引出的中子是慢化后的热中子,使用时,只要加上合适的准直器就很容易获得 10^6 中子/厘米²·秒或更高的中子通量。 Cf^{252} 半衰期不算太短(2.65年),中子平均能量为2.345兆电子伏,特别是中子产额非常高(2.32×10^{12} 中子/克·秒)。除反应堆外,其它中子源发射的都是快中子。要获得热中子就必须将它们慢化。

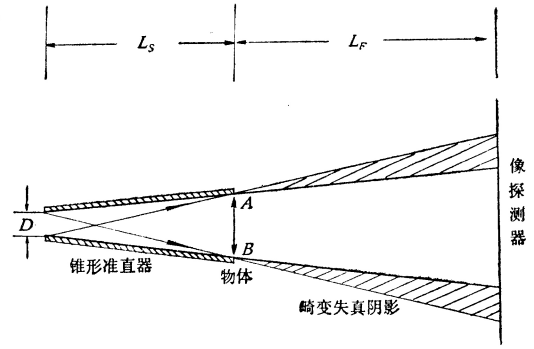


图4 准直器(D/Ls)对分辨率的影响示意图

慢化体:慢化体的作用是使中子与慢化体物质原子核连续碰撞不断损失能量而降低速度,直到变成热中子。典型的慢化物质是含轻元素的材料如水、重水、石蜡、聚乙烯以及石墨和铍等。

准直器:准直器是用来限制中子的飞行方向和角度发散,使中子沿着一定方向射向被照相物体的。为了对物体进行照相,中子束必须具有一定大小的复盖面积,因此准直器的D/Ls比值不能做得太小。但是图4告诉我们,准直后的中子穿过物体AB之后,在探测器处所成的像会发生畸变失真。准直器的D/Ls大时像畸变失真严重,使分辨率变坏。所以在实际应用中,要根据热中子通量的大小,照相物体检查的具体要求来确定D/Ls的比值。

像探测器:是用来记录透过物体并反映其内部结构的中子的,常用的有:某些种类物质做成的转换屏配合X光胶片或者配合固体径迹探测器;中子闪烁体配合像增强管、光导摄像管电视系统等。比较成熟的是转换屏配合X光胶片,后两种还处在研究阶段。

此外,还需要加上屏蔽体,中子束控制门,有时为降低 γ 射线本底,还要加吸收 γ 射线的过滤器等。

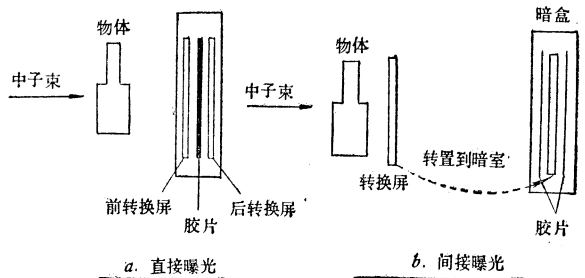


图5 中子照相的直接和间接曝光示意图

三、获得像的方法

使用不同的像探测器时,获得像的方法是不同的。

x 光胶片法:分为直接和间接曝光法。直接曝光是将 x 光胶片连同转换屏一起放在暗盒中置于中子束上辐照。x 光胶片记录在辐照过程中转换屏发出的 α 、 β 或 γ 射线,而形成潜在的物体像。直接曝光用锂、硼、镉和钆做转换屏。有些在中子轰击下生成短寿命放射性核的物质,也可以做为转换屏,如银、铟等。这些转换屏中,钆是最好的,因为它的热中子截面大 (Gd^{157} 的热中子截面 254000 靶),所以照相速度快。同时钆在中子轰击下,放射出 70 千电子伏的转换电子,这种次级辐射能量低,射程短,所以分辨率高。当用 12.5—25 微米厚的钆箔作转换屏时,分辨率可好于 25 微米。

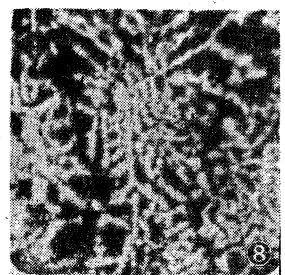
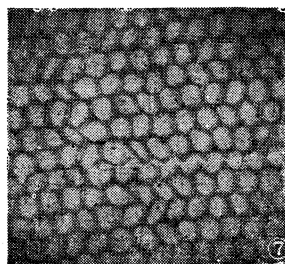
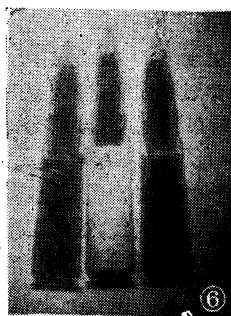
当被照相物体具有放射性,或者中子束混有较强的 γ 射线时,用直接曝光法就得不到合格的照片,可以使用间接曝光法。间接曝光是先将转换屏放在中子束上辐照,中子与转换屏物质原子核发生核反应,生成具有一定半衰期的放射性核。再将具有放射性的转换屏,置于暗室中的 x 光胶片上,由屏上放射性衰变产生的辐射,使胶片感光成像。间接曝光所用的转换屏有铟、镉、金、铯等,所用厚度在 25—250 微米之间。间接曝光最大的好处是避免了本底 γ 射线和被照相物体本身(当被照相物体有放射性时)放射性的干扰。但是,照相速度较直接曝光要慢得多了。

固体径迹蚀刻法:用某些固体如云母、玻璃、塑料等代替 x 光胶片。当转换屏在热中子辐照下发出的 α 或重带电粒子入射到这些固体时,沿着粒子径迹会形成辐射损伤,在化学蚀刻剂中受损伤部分首先被溶解,显示出粒子的径迹。它对 x 光和 γ 射线不灵敏,而且不受间接曝光法中存在的那种活化饱和的限制,可以无限制地积累中子像。这种方法适合于在低通量中子束上对放射性物体进行照相。转换屏发出的 α 粒子在固体径迹探测器中射程很短,可以获得较好的分辨率。但是所得到的像反差低,看上去象通过毛玻璃的图像。

电视系统显像法:这种方法用中子闪烁体配合像增强管、光导摄像电视系统来显示物体的像。中子打在像增强管的输入靶上,发生中子- α -光子-电子反应过程,把中子像转变为电子像。这些电子再被 15—30 千伏高压加速,打在像增强管的末端的荧光屏上,产生增强的像。用光导摄像管把像显示出来。在中子通量大于 10^5 中子/厘米²·秒时,用这种办法可以观察动态的像。对于高反差照相物体,可以跟随的运动速度为 5 米/分,分辨率为 0.5 毫米,对铀、钢等金属能区别 4% 的厚度变化。

四、中子照相的应用

首先看看图 1,我们会发现,各元素的 x 射线质量吸收系数随原子序数的增加而平滑上升。轻元素的 x 射线的吸收最小(如氢),重元素的 x 射线吸收则较



大(如铅、铀),而中子的质量吸收系数随原子序数的变化是杂乱的。对元素氢、锂、硼还有镉和一些稀土元素,质量吸收系数特别大,对重元素铅、铀反而小。相邻元素之间和某些元素不同同位素之间也有很大差别。利用中子同物质相互作用的这些特点,中子照相可作为 x 射线照相的辅助手段,检查某些 x 射线照相不能检查的物体。

中子照相成功地用来检查核反应堆元件。通过照相检查燃料元件芯体中的裂缝、空隙、缺边角,芯体组装后的位置、尺寸等等。并可对铀²³⁸和铀²³⁵进行照相鉴别,区分燃料元件同位素的浓度差别。特别是利用间接曝光法,可以对辐照过的具有很强放

射性的燃料元件,通过照相观察其形变、破裂等,这对研究和改进燃料元件的生产很有意义。

中子照相应用较多的另一个方面是对含氢、锂、硼等中子质量吸收大的物体进行无损检查。例如对于重金属包壳的含氢物体,像铅或不锈钢包壳,内装含氢炸药的子弹等小型爆炸装置,通过中子照相可以观察炸药密度是否均匀,有无空隙,见图 6。快速动态照相还可以观察子弹发射时炸药的燃烧过程等。对于用含氢的橡皮、塑料等材料与金属组合构成的物体,中子照相比 x 射线照相能够更清楚地了解它们的内部结构,图 7 是环氧树脂金属蜂窝结构的照片。图 8 是硼钢中硼的分布的照片。

此外,中子照相还可用于生物学和医学。如:对植物、动物、昆虫进行中子照相观察,研究其组织情况;用中子照相,有可能观察出骨骼中肿瘤的部位和大小,但是由于中子剂量和生物组织对中子的散射,这种方法还不能临床应用。

总的看来,中子照相不如 x 射线照相技术那样成熟,设备简单、操作方便、应用面广,但是也有它独特之处。随着对中子照相的进一步研究和技术的发展,应用范围将不断扩大。我所这方面的工作刚刚开始,图 6—8 就是利用我所反应堆中子源得到的中子照相。