

缓发中子测铀技术及其应用

周春梅

在加拿大、美国、英国、芬兰和以色列等发达国家，人们在实验反应堆上可以看到这样一种专用测铀装置：采用空气动力把样品由实验室测量大厅传送到反应堆内，经过一定时间的中子辐照，再用空气动力把被辐照后的样品传送到实验室测量大厅的中子探测器内，然后测量样品放出的缓发中子计数。这是很引人注目的缓发中子测铀装置，目的是分析样品中铀的含量。它是六十年代开始有的，在七十年代得到了相当广泛的发展，并逐渐被改制成自动化的铀分析装置。加拿大原子能有限公司安装在渥太华 SLOWPOKE-2 核反应堆上的缓发中子测铀分析装置，1978 年一年内就分析了十万个样品，这引起人们对缓发中子测铀技术的极大重视，并认为它是有发展前途的。

一、什么叫缓发中子测铀

天然铀主要有铀-238（丰度为 99.276%）和铀-235（丰度为 0.7196%）两种同位素（核素）。就中子引起裂变来说，铀-235 是无裂变阈核素，热中子（低能量中子）引起裂变的截面最大（582 靶），当中子能量增加时，裂变截面变小；铀-238 是有裂变阈的核素，要 1 兆电子伏上能量的中子才能引起裂变（14 兆电子伏中子的裂变截面为 1.14 靶）。从图 1 可看到，铀核受中子照射发生裂变时，一般都分裂成为质量相差不多的两块裂变产物核（常称为裂变碎块）和 2—3 个瞬发中子。裂变产物核（又称为母体核）通常含有过多的中子和处于较高的激发状态。然后，母体核又以放出 β^- 射线

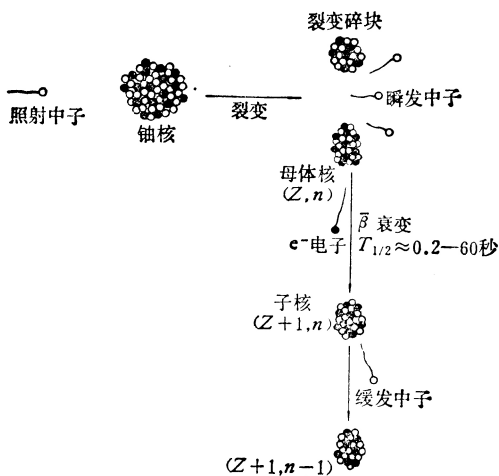


图 1 铀核裂变发射缓发中子的基本原理

（即放出电子）的方式，蜕变为另一个新核（子核），衰变的半衰期基本上在 0.2—60 秒范围内。 β^- 衰变后，有一小部分的子核仍处于相当高的激发状态，它们要在发射中子以后，才退回非激发状态。从铀核发生裂变到子核发射中子，是延缓了相当长的时间的，所以称之为缓发中子。显然，测量缓发中子计数就能直接确定样品内的铀核的数目或每克样品中的含铀量。

二、缓发中子测铀装置有什么特点

测铀分析装置主要包括中子源、中子探测器、样品的传送和有关的电子学线路四个部分。样品的传送和有关的电子学线路是通用型的。中子探测器多采用通用的浓缩硼-10 的三氟化硼正比计数器（或用氩-3 正比计数器）做成包围住样品的几何形状，探测缓发中子的效率大于 10%。其中关键的和主要的设备是中子源。可供缓发中子测铀用的中子源有三种：1) 反应堆中子源，是目前应用得较多的和主要的，能提供通量为 10^{13} — 10^{15} 中子/(厘米)²·秒的热中子和超热中子，可分析到 $1/10^7$ （相当于每克样品中有 0.1 微克铀）的含铀量。2) 14 兆电子伏中子源，是在高压倍加器，或中子产生器，或在中子管内，由被加速的氖离子来打在氡靶上产生中子，能提供 10^8 — 10^{12} 中子/秒的总中子产额，可分析到 $1/10^4$ （相当于每克样品中有 0.1 毫克铀）的含铀量，其分析灵敏度比反应堆中子源低，主要是因为 14 兆电子伏的中子通量较低，而且 14 兆电子伏的中子与氧-17 发生反应可生成氮-17，经 β^- 衰变后也能放出缓发中子。3) 同位素中子源，主要是利用镅-252 自发裂变时产生中子，能提供大于 10^8 中子/秒的源强，也有可能分析到 $1/10^4$ 的含铀量（相当于每克样品中含有 0.1 毫克铀）。

不同中子源的分析灵敏度有相当大的差别。反应堆中子源，灵敏度高，准确度好，精度高和效率高。而其它两种中子源的分析灵敏度低。此外，上述三种中子源共同具有着操作方便、非破坏性，对样品的适应性强和直接测铀等优良特性。但是，在测铀时要注意一点，如果样品中含有钍-232，则用 14 兆电子伏中子进行缓发中子测铀时，铀-238 和钍-232 是不能被区分的；如果样品中含有钷-239，则用热中子的缓发中子测铀时，铀-233、铀-235 和钷-239 也是不能被区分的。实际应用中，如需区分铀和钍，或者区分铀和钷，原则上可用不同能量的中子作缓发中子测量分析。

三、缓发中子测铀技术有什么用途

(一) 环境保护监测 随着原子能工业的发展,由于各种原因会造成环境的放射污染。主要的有,铀矿流失,铀矿粉末扩散,铀冶炼厂尾渣和尾水,金属铀和铀的扩散等,这些都直接影响着空气,水源和农作物以及这些工厂附近居民的环境。为此,需经常进行取样分析,以便监视环境被污染的程度。显然,用反应堆中子源进行缓发中子测铀分析是最合适的。

(二) 铀矿资源普查 缓发中子测铀的一系列优良特性很适合于大量地分析矿样,以满足普查的需要。

(三) 铀矿品位测定 可用中子产生器或中子管产生的 14 兆电子伏能量的中子作中子源,在铀矿场设置一个固定点,进行缓发中子分析测量;或把缓发中子

测铀装置安装在专用汽车上进行流动分析测量。此外,也可以用实验室的高压倍加器产生的 14 兆电子伏中子进行缓发中子测铀分析。对后者我们曾经作过试验,用 10^{10} 中子/秒产额的中子,

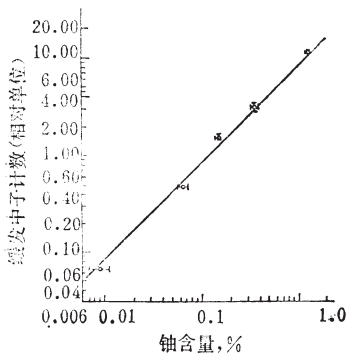


图2 缓发中子计数随样品含铀量的变化

可以分析出来 0.02% (相当于每个样品中有 0.2 毫克铀)的含铀量,如图2所示。若中子产额提高 10 倍,对实际应用当会有更大的意义。

(四) 测铀井 把开关式中子管,缓发中子探测器以及有关的电子学线路组装成小型的缓发中子测铀探管(如图3所示),可用来确定铀矿体的品位、深度、厚度和储量。方法是把这种测铀探管下到钻井孔的铀矿层,打开中子管中子源,照射一定时间(如 400 毫秒)后,关闭中子管中子源,等候 3 毫秒左右,再打开缓发

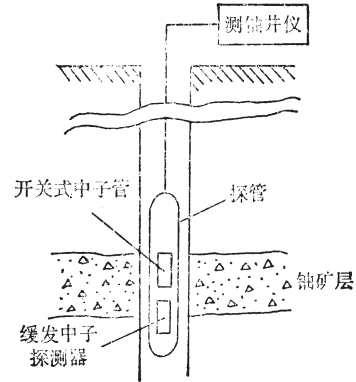


图3 缓发中子测铀井原理图

中子探测器的计数门,测量缓发中子计数(如测量 400 毫秒)。根据缓发中子计数,考虑中子源的产额等,就可以判断这个矿层中铀的含量,这种缓发中子测铀井法不必取出岩芯,从而可大大地提高钻井速度和工作效率,是一种有发展前途的新技术。