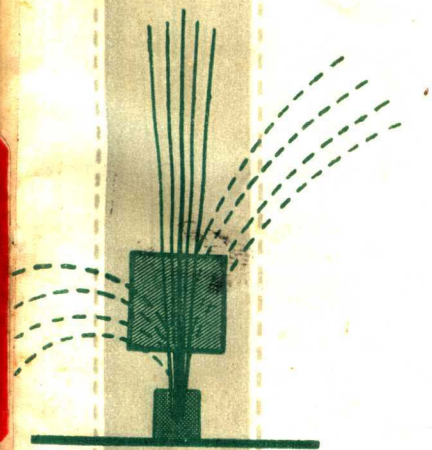


放射性同位素 在水泥工业中的应用

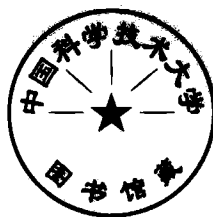
薛君珩 編著



建筑工程出版社

放射性同位素 在水泥工业中的应用

薛君环 编著



建筑工程出版社出版

• 1959 •

放射性同位素在水泥工业中的应用

薛君玓 編著

*

1959年10月第1版 1959年10月第1次印刷 1,550册

787×1092 $\frac{1}{32}$ • 52千字 • 印張 $\frac{23}{16}$ • 定价(10) 0.28元

建筑工程出版社印刷厂印刷 • 新华书店发行 • 書号: 1676

建筑工程出版社出版(北京市西郊百万庄)

(北京市書刊出版业营业許可証出字第052号)

一、前 言

随着核子物理学的迅速发展，放射性同位素的应用也日益广泛，目前已应用在动力、生物学、工业和农业等方面。近年来，国外的科学工作者、特别是苏联的科学工作者已开始应用放射性同位素来从事水泥的物理化学研究以及水泥生产中的质量控制和检验。

我国原子反应堆也已建成，并已开始生产放射性同位素，这对我国和平利用放射性同位素创造了有利的条件。为了进一步发展我国的水泥工业和提高在水泥方面的科学研究水平，我们水泥工业工作者应该迅速掌握和利用放射性同位素。

本书简要的介绍放射性同位素应用的基本知识、以及目前放射性同位素在水泥生产和水泥科学研究中的应用情况。

由于水平所限，书中难免有不妥甚至错误之处，请读者指正。

目 录

一、前 言	
二、放射性同位素的基本知識.....	(1)
三、放射性同位素在水泥生产中的应用.....	(13)
四、放射性同位素在水泥的物理化学 研究中的应用.....	(27)
五、放射性同位素在檢查建筑制品 質量上的应用.....	(40)
六、有关放射性同位素的安全防护問題.....	(49)
附 表.....	(58)
参考文献.....	(64)

二、放射性同位素的基本知識

1. 原子构造、周期律、同位素

世界上任何單純物質都是由很多同样的分子所构成，分子則由更小的粒子——原子——所組成，如果某物質只是由一种原子所組成，則我們就称这类物質为化学元素。后来，人們发现原子是由更小的微粒原子核和圍繞在它周圍的电子所构成，而原子核則由質子和中子所組成。

原子核中的質子数决定了原子核外的电子数，因而亦就决定了元素的化学性質。苏联化学家門捷列夫按元素化学性質所排列的周期表中，元素的次序（即原子序）正好就是按質子多少的次序进行排列的，因此，元素原子核中的質子数也就是元素的原子序。

有些原子，它們原子核中的質子数目相同而中子数目却不相同。这样，由这两种不同的原子核和相同的外层电子所构成的元素在化学性質上完全相同，在周期表上也占有相同的位置，但是它們的質量不同，象这种質子数相同而中子数不同的原子所构成的元素，我們称它們为同位素。

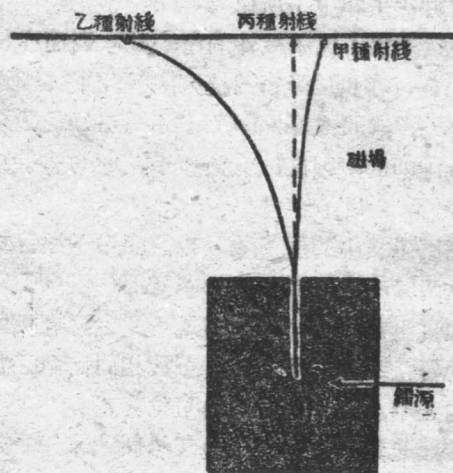
研究証明，大多数元素都是由若干种天然同位素以一定的比例混合而成，如空气中的氧就由質量数为16、17和18的三种同位素所組成（見表1）。

天然氧中同位素的百分組成及其原子核組成 表 1

同 位 素	占 然 氧 中 的 百 分 数 (%)	原 子 核 的 組 成	
		質 子 数	中 子 数
O ¹⁶	99.7580	8	8
O ¹⁷	0.0373	8	9
O ¹⁸	0.2039	8	10

II. 放射現象、放射性同位素

1896年法国物理学家貝克勒尔发现鐳的化合物能放出肉眼所看不見的射綫，并能使包着黑紙的軟片感光，由此就



发现了放射現象。將鐳的射綫引入磁場，則分为三种独立的射綫(图 1)，这三种射綫分別称为甲种(α)，乙种(β)和丙种(γ)射綫。

甲种射綫(α —射綫)：甲种射綫是带正电的高速的粒子流。这些粒子称为甲种粒子，它們是氦的原子

图 1 从鐳源中放出的三种射綫
核，由二个質子和二个中子所构成，带两个正电荷，質量数

是4，可写成 2He^4 。它們以 約二万公里的速率从原子核中放射出来。对某种放射甲种射线的放射性元素来说，甲种粒子有几个特定的能量，一般在几百万电子伏特左右（百万电子伏特的定义见本节IV-1）。

乙种射线（ β —射线）：乙种射线是带负电的高速粒子流。这种粒子就是电子，电子带一个负电荷，质量约为氢原子的 $1/1840$ 。它們的速率比甲种粒子要高，每秒约为20多万公里。对某种放射乙种射线的放射性元素来说，放出的乙种射线的能量，一个能谱，也即放出的射线是在某一最大值以下的各种能量的电子。一般放射性同位素放射的乙种射线最大能量在零点几个百万电子伏特左右。

丙种射线（ γ —射线）：丙种射线是一种光子流。光子是不带电的，其速率在真空中为每秒30万公里（亦即光速）。它与可见光、紫外光的区别只是光子能量的不同，一般可见光子的能量只有几个电子伏特，而放射性同位素丙种射线的能量约在零点几到几个百万电子伏特左右。对某种放射丙种射线的放射性元素来说，与甲种粒子相似，放出的光子具有一个或几个特定的能量。

为什么会有放射现象？要回答这个问题，就要联系到前面所讲的原子核构造。前面讲过原子核是由质子和中子所构成，但是它們之間应该有一定的比例，这种具有一定比例的元素是稳定的。但是也有超出这个比例的，这些元素的原子核就不稳定了，会放出各种射线，凡是原子序数在84以上的原子核，以及中子或质子过多的原子核都不稳定。

这种不稳定也可以人为的来造成，我们用甲种粒子、质子、氦核、中子及丙种射线去轰击各种元素，几乎都可以得到具有不稳定的原子核的元素。这些与稳定元素的质子数是

相同的，在周期表上也占有同一位置，然而中子数却不同，而且能够不断放出放射线的元素，我们称它为放射性同位素。

特别应当指出，放射性同位素在化学性质上完全与稳定的同位素一样，所不同的只是它不断的放射出各种射线而已，这一特性就被我们用来作为示踪原子和其他的用途。

II. 射线与物质的作用

放射性同位素之所以能被我们利用，主要就是它的射线能够与物质起作用。总的来说，射线的粒子在物质中运动时，便和物质的原子或电子发生相互作用，将动能交给物质，最后使物质电离，而射线的能量或数目则逐渐丧失。

对甲种和乙种粒子来说，这种能量的转移使粒子运动速度逐渐变小，最后甲种粒子与物质中的二个电子结合成氦原子；乙种粒子与某个正离子结合成中性原子。带电粒子在物质中所走的路程就是粒子的射程。

对丙种射线来说，光子的速度是不变的，但是由于光子通过物质时，与物质发生了散射、光电效应和康普顿效应（一般放射性同位素的丙种射线与物质主要是起这一些作用），使光子数目逐渐减少。

一定能量的窄束丙种射线的减弱是按照指数规律进行的，至于这个规律在实际应用中常常可以遇到，它可以用下面的方程式来表示：

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

式中： e ——自然对数的底，数值为2.718；

x ——被射线通过物质的厚度，

〔克/公分²〕或〔公分〕；

μ ——吸收系数, [公分²/克] 或 [公分⁻¹];

I_0 ——丙种射线的起始强度, [脉冲/分] (也可以用其他放射性强度单位);

I ——丙种射线在通过厚度为 x 的某物质后的强度, 单位和 I_0 一致。

物质吸收丙种射线的能力愈大, 则吸收系数 μ 之值也愈大。由 (1) 式可以看出, 射线只有在无穷厚的物质中才有可能完全被吸收, 表示物质吸收丙种射线的能力。常用丙种射线的能量被减弱一半所需的厚度, 即半吸收厚度半吸收厚度与吸收系数的关系可由式 (1) 导出:

$$\text{以 } I = \frac{I_0}{2} \text{ 代入式 (1);}$$

$$\text{则得: } x_{\frac{1}{2}} = \frac{0.693}{\mu} \quad (2)$$

式中: $x_{\frac{1}{2}}$ ——半吸收厚度。[克/公分²] 或 [公分]。

甲、乙、丙种射线比较起来, 由于甲种射线的速度小, 电量小, 所以使物质电离的本领大, 但能量的损失也最快, 穿透能力也最小, 在空气中的射程只有几公分; 乙种射线次之, 约为几公尺; 丙种射线是不带电的光子, 穿透能力最大, 一般当通过几百公尺的空气层后还没有显著的减弱。

另外, 射线的穿透能力和它本身的能量及被穿过物质的密度有密切的关系。能量大 (指一般放射性同位素所具有的丙种射线能量) 物质密度小, 穿透能力就大; 反之, 穿透能力就小。下面的几个表是说明甲、乙、丙种粒子的能量、物质密度和穿透能力的关系。

甲种粒子在物質中的射程〔公分〕

表 2

物 質 \ 能量(百万电子伏特)	0.5	2.0	5.0	10.0
空 气	0.33	1.7	3.5	10.6
鋁	0.00018	0.0006	0.0019	0.0055
鉛	0.00011	0.0004	0.0012	0.0032

乙种粒子在物質中的射程〔公分〕¹

表 3

物 質 \ 能量(百万电子伏特)	0.05	0.51	5.1	51
空 气	3.9	1.55	2.200	15.000
水	0.0047	0.18	2.6	19
鋁	0.0025	0.085	1.15	7.8
鉛	0.001	0.031	0.33	1.25

使丙种射綫的能量減弱一半所需的物質厚度〔公分〕

表 4

物 質 \ 能量 (百万电子伏特)	空 气	水	鋁 或 混凝土	鉄	鉛
0.2		5.1	2.1	0.66	0.138
0.5	6.300	7.8	3.0	1.11	0.42
1.0	9.200	10.2	4.5	1.56	0.9
1.5		12.0	5.1	1.74	1.2
2.0	14.700	14.4	5.7	2.10	1.35
2.5		16.5	6.9	2.22	1.47
3.0		18.3	7.8	2.31	1.47
4.0		21.0	8.4	2.55	1.47
5.0		23.1	9.9	2.88	1.47

注：混凝土密度是2.7。

IV. 常用的几个名詞

1. 粒子能量 通常能量的單位是用卡、千瓦小时或尔格等来表示的，但是現在我們要說的是一个原子、电子或光子所具有的能量，因而必須用更小的單位来表示。在化学反应中这种微观的能量常用电子伏特为單位，一个电子伏特就是一个电子經過一伏特电势差时所获得的动能，它相当于 1.60×10^{-12} 〔尔格〕、 3.83×10^{-2} 〔卡〕或 4.45×10^{-26} 〔千瓦小时〕。原子核反应的能級要比化学反应高得多，所以用百万电子伏特为單位。1〔百万电子伏特〕（即兆电子伏特）等于 10^6 〔电子伏特〕。

2. 半衰期 放射性元素的原子核放出射綫以后，它本身就蜕变为别的原子核，元素的原子核蜕变为原来原子核数的一半所須要的时间就是放射性元素的半衰期。如镭的半衰期为1590〔年〕，那末一克镭过了1590〔年〕后就剩了半克镭，再过1590〔年〕就只剩下四分之一克镭了。

各种放射性元素的半衰期是不同的，長的可达几百亿年，而短的只有几万分之一秒。

3. 放射性的单位：

居里、毫居里、微居里 在放射性平衡状态下的一克镭每秒钟約有 3.7×10^{10} 个镭原子核蜕变，为了紀念镭的发现者瑪利亞和皮尔居里，就命名任何一种放射性元素在每秒钟內发生 3.7×10^{10} 次蜕变时，它的放射性就是1〔居里〕。在实际应用中，常用它的导出單位，即：

$$1 \text{〔毫居里〕} = 10^{-3} \text{〔居里〕}；$$

$$1 \text{〔微居里〕} = 10^{-6} \text{〔居里〕}。$$

盧瑟福 为了便于計算，規定了另一种放射性單位，即

任何一种放射性元素在每秒钟内发生 10^8 次蜕变时，它的放射性就是 1〔盧瑟福〕，但是这个单位没有被广泛的采用。

克当量镭、毫克当量镭 一般对两种射线来说，最好采用克当量镭或毫克当量镭为单位（也有用居里为单位的），因为在一个原子发生衰变时，往往不是放出一个两种光子，而是放出好几个两种光子，这样用居里为单位就容易引起误会。至于一个克当量镭是指具有与一克镭相当的电离作用的放射性物质，故看出克当量镭不但反映了两种射线的数量，同时也反映了射线的能量。目前苏联已广泛采用这个单位。

$$1 \text{〔毫克当量镭〕} = 10^{-3} \text{〔克当量镭〕}$$

在使用放射性同位素时，常常用到放射性比度，亦即单位体积或重量内所具有的放射性。它们分别以〔毫居里/公分³〕或〔毫居里/克〕等来表示。

以上所述是放射性的绝对单位，在实际测量过程中，往往并不测定放射性同位素的绝对放射性，而是测定它的相对放射性。相对放射性往往以单位时间内由计数管接收到的脉冲数表示（次脉冲/分），或直接由电离室产生的电流大小来表示。

4. 本底 在自然界中存在着宇宙射线，宇宙射线同样能使物质发生电离，因而测量放射性同位素的射线时，总是夹杂着宇宙射线所产生的脉冲，这个由宇宙射线所产生的脉冲率就称为本底。随着地点和时间的不同，本底的大小也就不同，在作较精确的测量时，应减去本底的脉冲率。有时为了减轻本底的干扰，放射性的测量就在铅室中进行。

V. 放射性同位素的选择

在利用放射性同位素进行工作时，首先碰到的问题是放射性同位素的选择问题。选择放射性元素时要考虑的因素很

多，这里，只能根据目前水泥生产和研究中已应用的一般情况进行粗略的分析，选择放射性同位素时，大致应考虑以下几个因素：

1. 放射性同位素的物理和化学性质 在选择放射性同位素时，要考虑采用何种元素的放射性同位素以及它的物理状态和性质，如气态、液态或固态、比重、熔点或沸点等。另外还须考虑采用该种放射性元素的何种化学状态。

如在研究水泥矿物 $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 水化时，就必须采用钙的放射性同位素，同时又要视具体情况决定使用固体的氧化钙，或溶液中的钙离子；在研究水泥制品受硫酸盐侵蚀的过程时，就应采用硫的放射性同位素，同时必须用在液体中含有放射性硫的硫酸根，而不能用元素硫；在研究旋窑物料运动的均匀性时，作为透射用的钴放射源则宜用固体状态的金属钴条，这样就不怕窑体辐射的高温，使用也方便。以上只是举些例子来说明，其他将在叙述具体应用时再行介绍。

2. 射线的种类 前面已经说过，放射性同位素放出的射线有甲、乙、丙三种，但是对某种放射性同位素来说可能只具有其中的一种或二种。这三种射线的性质是不同的，因而在选择时要根据所需射线的种类来选择具有某种射线的同位素。如在进行水泥水化的研究时，作为示踪原子的同位素应具有乙种射线比较恰当；而在要求射线通过较厚的物质时，就应当使用具有丙种射线的放射性同位素。

3. 射线粒子的能量 射线的穿透能力与射线粒子的能量有很大关系，因而在选择同位素时也必须考虑到射线粒子的能量是否适当。如在进行料浆密度测定时，我们希望丙种射线粒子的能量小些；而在测定立窑装料高度时我们却希望丙种射线粒子的能量大些。

4. 半衰期 为了各种不同目的，在做某些試驗时，我們希望同位素的半衰期短些；相反在某些情況下，我們希望半衰期長些。如在測定旋塞內物料运动的速度时，希望用半衰期短的放射性同位素，以減少危險；而在进行透射試驗时，希望用半衰期長些的同位素，以免因衰变而必須校正試驗数据和更換放射源等的麻煩。

5. 放射性強度 在确定了放射性同位素以及其物理、化学形态以后，最后要确定用多少放射性同位素和放射性比度。所选用放射性强度对試驗的进行和測定的准确性有很大的影响。至于采用放射性同位素的量視需要而定。对于作为定性要求的測量來說，只要使所測得射綫强度較本底大数倍至十数倍即可。如測定旋塞內物料运动的均匀程度时，射源的选择就是根据这一原則来进行計算的；对于作为定量要求的測量來說，放射性强度的选择，則需視其对精确度的要求而定。

由于放射性同位素的射綫具有統計漲落的性質，則由于放射性同位素本身漲落所引起的标准誤差（不計因仪器而帶來的誤差）为：

$$\Delta = \pm \frac{\sqrt{N}}{N} \times 100\% \quad (3)$$

式中： Δ ——标准誤差；

N ——測量所得的总脉冲数。

如欲使測量的标准誤差約为 $\pm 1\%$ ，則应測脉冲数的計算如下：

由 (3) 式可得：

$$N = \frac{1}{\Delta^2} \quad (4)$$

將 $\pm \frac{1}{100}$ 代入:

$$N = \frac{1}{\left(\pm \frac{1}{100}\right)^2} = 10000 \text{ [次]}$$

即應測的總脈衝數為 10000 [次]，若計數管所接受的脈衝率是每分 5000 [次]，則測量 2 [分] 就夠了；反之若放射源很弱，計數管接受的脈衝率只有 200 [次/分]，則就需要測量 50 [分]。因此，選擇適當的放射性強度，能使在一定的測量時間內獲得具有一定精確度的結果。

上例已說明用太弱的放射性強度時，要達到一定的精確度，需要化費很長的時間，另外在計數率低時因本底的波動也可能引起較大的誤差。但是決不是說可以用過強的放射性強度，因為過大的計數率也會使儀器的測量誤差增大，另外用過大的射源有時還會增加安全防護上的麻煩。對一般的 64 進位計數器來說，測量時的脈衝率以每分鐘數 4 次為宜。

所用放射性同位素的比度也視需要而定。對於用作透射的點源，以較高的放射性比度比較適宜；而作為一般示踪原子用的放射性同位素鈣、硫等，就沒有必要用很大的放射性比度。

在實際選擇同位素時，除了考慮上述五個因素之外，還要考慮所選擇的同位素在供應上是否有困難，在價格上是否經濟等因素。

VI. 射線的測量

探測甲、乙、丙種射線的儀器種類很多，主要是基於射線通過物質時，能夠使物質電離的特性。在水泥工業中常用

的有以下几种仪器。

1. 盖瑟计数管 盖瑟计数管是探测射线最常用的工具之一。图2为计数管的构造和连接线路的示意图，中间一根很

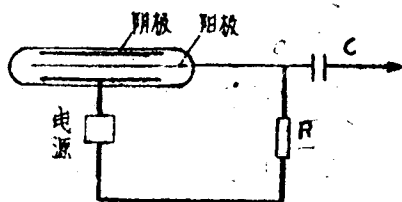


图2 盖瑟计数管的构造和连接
线路示意图

细的导线是阳极，在阳极周围的是阴极，整个计数管是密封的，中间装入适当的气体。在使用时，两极之间加以适当的电压（由数百伏至数千伏，视计数管不同而

异），当有放射性粒子打入，使气体电离时，两极之间就会放电。在放电时，a点的电压降低，这个负脉冲通过电容C送入电子设备，再由电子设备放大和记录下来。可应用不同构造的盖瑟计数管来探测各种不同的射线，以及探测固体、液体或气体的放射性。目前我国已经生产各种不同类型的盖瑟计数管。

2. 闪烁计数管 盖瑟计数管在探测射线时，它的效率是比较低的；而用闪烁计数管来探测射线时效率就高得多了。闪烁计数管主要是由一个晶体和一个光电倍增管组成。当射线打在晶体上时，晶体就产生荧光，这些荧光通过光电倍增管放大后，就以负脉冲输出，然后由电子设备进行放大并记录下来。

3. 照相底片 射线可以使照相底片感光，所以就常用照相底片来探测射线的存在。B. H. 容克在研究水泥石的耐硫酸盐性能时，曾采用自射线照相的方法来探测块在硫酸盐溶液中的浸蚀深度。