

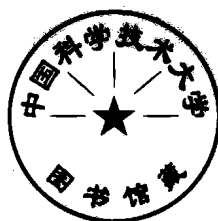
董鎮泰編著

放射性同位素 在地基勘察試驗中的应用

中国工业出版社

放射性同位素 在地基勘察試驗中的应用

董鎮泰 編著



中国工业出版社

放射性同位素的利用，是現代一門先进的技术，在許多工业部門得到了广泛的应用。近几年来，这一新技术在地基勘察試驗中也开始了試驗研究，并取得了一定的成績。本书就是作者研究运用放射性同位素測定土的密度与含水量的成果。内容包括：土对 γ 射綫的吸收作用、 γ 射綫对土的散射作用、土对中子射綫的慢化作用的原理及其应用，試驗数据的整理，安全防护等。

本书可供土力学与地基基础专业的研究、勘察、設計人員及土建院校师生参考。

放 射 性 同 位 素
在地基勘察試驗中的应用
董 鎮 泰 編 著

*
建筑工程部編輯部編輯（北京西郊百万庄）

中国工业出版社出版（北京修門外大街10号）

北京市书刊出版业营业許可証出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*
开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ ·印张 $37\frac{3}{8}$ ·字数80,000

1964年10月北京第一版·1964年10月北京第一次印刷

印数0001—2,060·定价（科七）0.60元

*
統一书号：15165·3215（建工-392）

序

原子能的和平利用，是近代一門先进的科学。由于放射性同位素在单位時間內的蛻变是放射性原子存在量的函数，所以放射性同位素的蛻变，不受任何化学和物理条件作用的影响。它跟物质作用时，具有独特的穿透性能和电离性能。因此在过去的五十年中，放射性同位素逐漸地被应用在許多方面；尤其是在最近十几年，应用的范围更为广泛。随着放射性同位素量測技术的不断提高，仪器设备的不断改进，放射性同位素在量測工作中已具有很高的灵敏性。因此，从放射性同位素的应用对于科学技术部門的各种貢獻來說，它可以和显微鏡对于生物学以及望远鏡对于天文学的貢獻相提并論。

同时放射性同位素在建筑事业上也开始得到了广泛的应用。如在水泥工业方面，用以进行热工、化学、物理檢驗等；在鋼筋混凝土方面，用以探測均匀度、鋼筋部位、厚度、强度和腐蝕性等。此外玻璃陶瓷、耐火材料、金屬探伤和磨損以及木材利用等方面，都不同程度地采用了放射性同位素进行研究工作。当然，在地基勘察試驗方面，同样沒有例外，也采用了这一先进技术。本书就是根据作者近几年来在勘察試驗技术中利用放射性同位素进行研究的成果汇总編写而成的。希这本小册子能有助于地基勘察、土力学研究等工作的发展，为多快好省地建設社会主义起到一定的作用。

协同作者一起进行試驗研究工作的有李登敏同志。同时，

建筑科学研究院黃强先生、張祖文同志和中国科学院原子核研究所張家驊先生，在百忙中对本书提出了許多宝贵意見，作者在这里向他們致以衷心的謝意。

由于笔者水平所限，书中不足或錯誤之处在所难免。希望有关专家和讀者提出宝贵意見，以助改正。

作 者

1962.10.1

目 录

序

第一章 概 論	1
第二章 土对 γ 射綫的吸收作用	6
§ 1 基本原理	6
§ 2 探測器設計要点	13
§ 3 量測工作中几种影响因素	16
§ 4 γ 射线吸收作用的应用	27
1. 质量吸收系数 μ' 值的确定	27
2. 砂类土密实状态的确定	34
3. 放射叉在填方工程质量检查中的应用	35
4. 应用 γ 射线吸收作用測定土中含水量变化	41
第三章 γ 射綫对土的散射作用	46
§ 1 基本原理	46
§ 2 探測器設計要点	48
§ 3 量測工作中几种影响因素	51
§ 4 γ 射线散射作用的应用	56
1. 应用 γ 射线散射作用研究黄土地基在荷載作用下的压密 范围	56
2. 应用 γ 射线散射作用測定土中含水量变化	67
第四章 土对 中子射綫的慢化作用	72
§ 1 基本原理	73
§ 2 探測器設計要点及試驗方法	77
§ 3 室内及室外校准曲线的制定	80
第五章 量測結果的数据整理	84

第六章	量测技术中的安全防护	91
参考书目		98
附录一	放射性同位素野外测定操作步骤	100
附录二	量测工作中所采用的计数管及电子量测仪器 (定标器)	102
附录三	放射强度比值换算自然对数表	108
附录四	64进位器换算表	118

第一章 概 論

放射性同位素在地基勘察試驗方面的研究与应用仅有十几年的历史。最先，英国罗查斯大学貝尔納及貝尔登两位教授于1950年对用射綫的吸收作用測定土的密度进行了研究。1952年美国学者D.J. 貝尔車 (Belcher)、R.C. 赫納 (Herner)、T.R. 庫肯德尔 (Cuykendall)、H.S. 塞克 (Sack)、D. A. 雷恩 (Lane)、B.B. 杜尔琴斯基 (Torchinsky) 和 J.W. T. 斯平克斯 (Spinks) 等学者先后提出利用放射綫的散射作用測定土的密度和湿度⁽⁴⁾。1954年以后，苏联学者 K.B. 尤利耶夫 (Юрьев)、П.Н. 柯多奇戈夫 (Кодочигов) 进行了同样的工作，1956年苏联学者 A.И. 达尼林 (Данилин) 利用丙种射綫进行了土的水分測定。此后，日本学者近藤紀、波兰学者 J.A. 詹尼克 (Janik)、捷克斯洛伐克学者 J. 斯柯匹克 (Skopek) 等先后采用鐳-铍中子源及鈷放射源进行了土的含水量和密度測定。1961年苏联学者 Д.Е. 波立申 (Польшин) 和我国施仲衡同志共同提出了在模型試驗中(平面模型)应用 γ 射綫研究土的密度变化的情况⁽¹⁴⁾。从这个試驗的結果中可以判明，在不同附加荷載时，土的平面相对体积的壓縮变化，在性质上符合地基的变化。从而放射性同位素給土力学的量测技术提供了很重要的启示。此外，1960年在萊比錫召开的建筑工程中应用放射性同位素的国际會議上，德意志民主共和国学者什欽在报告中提出了所創制的各种适用于野外和室內条件下測定土的密度和含水量的仪器。这些仪器均系根据

直射 γ 射綫和反射 γ 射綫經過土时的吸收强度，来測定土的密度和含水量的。

随着我国社会主义建設事业的发展，如何进一步提高勘察試驗技术是当前的重要課題之一。因为在建筑設計之前，必須要求准确迅速地进行地质勘察，正确地得出土的物理力学性质指标，才能为設計提供正确的資料。在勘察工作中，土的密度与含水量是两个主要指标，而利用放射性同位素就能直接在天然埋藏条件下，来測定土的密度和含水量。这对土力学的理論研究和土构筑物施工质量的检查都具有重大的实际意义。

众所周知，自然界的各种物质都是由很多分子构成，而分子又是由原子組成。如果某物质系由一种原子組成的話，我們就称这类物质为化学元素。到現在为止，已經发现的元素有 100 多种。人們知道，原子本身包括原子核和圍繞其周围旋轉的电子而組成。而原子核又是由中子 (n) 和质子 (p) 所构成。所謂同位素，就是指质子数目相同，而中子数目不同的原子，由这种原子所构成的元素在 Д.И. 門捷列也夫的周期表中占有同一位置。同位素分两种：一种是穩定同位素；另一种是不穩定同位素，即放射性同位素。放射性同位素具有不稳定的核子，当核子发生放射性蛻变时，核子內部的多余能量就以各种射綫的方式放射出来。一般常見的射綫源有三种。第一种是甲种射綫，即 α 射綫，它是由电荷为 2，质量为 4 的氦核所組成，具有很高的电离性能，但穿透力特小，甚至在几厘米的空气层中或几微米的固体层中就能被完全吸收。故在应用上价值不大。第二种是乙种射綫，即 β 射綫，是由电子构成的电子流。它是由于核中的一个中子变成质子或由一个质子变成中子的自生轉變的結果。这种射

綫在物质中的射程是較大的。第三种是丙种射綫，即 γ 射綫，是一种短波电磁輻射，以光速传播。这种射綫不带电荷，不受电场和磁场的影响而发生偏折，其电离性能很小，所以与物质作用时穿透能力特强。

在我們的应用技术上利用上述三种射綫时，主要根据这些射綫的三个主要作用：第一种是輻射效应的作用。某些材料經過輻射后，它原来固有性能就会有所改变。例如建筑用的塑料材料，使用輻射方法可使其高分子的聚合和催化作用有很大提高。螢光材料經過輻射之后，会发出螢光。如将鋇90与螢光物质混合后，涂在透明的塑料板背面或夹在中間，利用这种塑料板作天花板和墙板时，室內可以全部发光。第二种是对射綫的吸收作用。輻射可以穿透物质，但其一部分也同时被物质吸收，因而輻射有所减弱或被物质所反射，这就构成金属材料探伤和量測材料厚度、稠度、密度等方面的技术原理。本书主要是利用这个作用来研究土对射綫的吸收或散射程度上的反映。第三种是放射性同位素的示踪作用。这就是利用微量的放射性元素（这种元素必須与待测物质的組成元素的化学性质一样）掺在待测的物质中，当物质受外力作用而改变內在变化时，該微量放射性元素的射綫就可以帮助我們識辨物质的內在变化。这种射綫就成为特殊的标记，这种原子称之为示踪原子。利用这种作用，可以解决很多其他方法所不能解决的問題。例如測定地下水的流速、流量；水泥砂浆或水玻璃加固地基土的扩散范围；以及分析挟砂的移动（用磨碎的放射性玻璃砂）等等。

放射性的量測技术，除第一种作用外，第二种和第三种作用主要决定于放射綫与物体作用后在計数管内产生的气体电离的能力。現今常用以測定 γ 和 β 射綫用的盖革計数管有下

列几种主要类型：（1）AC型；（2）CTC型；（3）MC型；（4）BC型。以上各种类型计数管的具体尺寸以及性能参数见附录二。

除以上各种类型盖革计数管外，还有闪烁计数器。这种计数器对于带电粒子的探测效率几乎是100%；对于不带电的 γ 射线的探测效率也能达20~30%。这比上面列举的各种类型的盖革计数管的效能要大的多（其它类型的盖革计数管对 γ 射线的探测效率仅及1%左右），也就是它的灵敏度很高。不过在装置上要比其它类型的计数管复杂得多。

本书所要介绍的有三种类型探测器，即双管吸收密度探测器，单管散射密度探测器及中子慢化湿度探测器。其原理、设计及其应用等将分别在第二、三、四章内详细介绍。第一、二类探测器所采用的放射源，主要为钴-60 γ 射线源。第三类探测器所采用的放射源为钚钍中子射线源。量测记录仪器，采用国产“64”进位定标器、“100”进位定标器或B-2型定标器均可。三种探测器均有其优缺点。双管吸收密度探测器，量测精度较高，但由于双管在深层土中不易控制绝对平行，故适宜于在浅土层中应用。单管散射密度探测器，在现场测定时不受打管技术条件的限制，故可用于较深土层。中子慢化湿度探测器，对深浅层土均可采用，但由于中子射线对人身危害性较大，故一般性勘察试验工作仍可采用常用的土工试验方法进行。但对于连续性的研究含水量与压力关系、含水量与密度关系、含水量与时间关系等工作时，采用这一方法是有价值的。

一般来说，放射性同位素在勘察试验技术应用中具有以下的优点：

一、在不取土、不破坏土结构的条件下，用放射性同位

素能直接反映出上层天然埋藏的物理性质。尤其是对于特殊性的地基土（如松砂、淤泥质土以及非抗水性岩石等）或需要深层取样时，用一般钻探取土方法使土样很容易受到扰动，甚而不能取出原状土样，而采用同位素方法则可避免这些缺点。

二、同位素方法可适用于在外荷作用下，量测地基土的物理力学性质的連續变化；在固定荷載作用下，地基土的物理性质与时间的变化規律，以及地下水分轉移变化等量测工作。这对土力学量测技术工作来说，具有其独特的优点。

三、由于这种方法不需经过钻探取样而直接测得结果，故既经济又迅速。

第二章 土对 γ 射线的吸收作用

§1 基本原理

放射性同位素吸收作用的量测方法，主要是利用 γ 射线与物体作用时，所具有的穿透特性。 γ 射线在土中的吸收，是与土层吸收厚度有关的，假设 γ 射线在未穿透土层前的射线强度以 I_0 表示（冲次/分），而穿透厚度为 d （厘米）的土层后，其射线强度以 I 表示。则此关系可按式表示（见图2-1）。

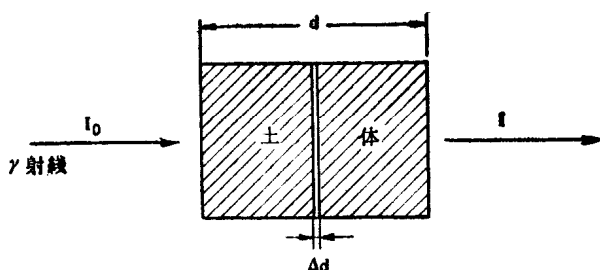


图 2-1 土体吸收 γ 射线示意图

$$\frac{I_0 - I}{I_0} = f(d),$$

或者按另一种方式：

$$I_0 - I = -\Delta I = f(d)I_0.$$

ΔI 前的负号表示当增加吸收层的厚度时， γ 射线的强

度降低。假若射綫被土吸收极其微弱，因而穿过的 γ 射綫的强度变化也很小，則所吸收的能量与吸收物质的质量成正比，或者与土的吸收厚度成正比。也就是：

$$\Delta I = -\mu I_0 d. \quad (1)$$

此处 μ 为常数，它表示 γ 射綫在某种土中行进一厘米时該 γ 射綫被土所吸收的量。然而 γ 射綫的强度随着土层吸收厚度的增大而不断减低。也就是說公式(1)仅仅对无限薄的土层才是正确的。为了决定在一定厚度土层中因吸收而降低的放射性能，可根据吸收土层厚度进行积分。

对无限薄土层(Δd)上的射綫强度的变化可用下列方程式表示：

$$\Delta I = -I_0 \mu \Delta d,$$

或
$$\frac{\Delta I}{I_0} = -\mu \Delta d.$$

按此式进行积分：

$$-\int \frac{\Delta I}{I_0} = \int \mu \Delta d = \mu \int \Delta d.$$

当 d 由 $0 \rightarrow d$ 时，强度由 $I_0 \rightarrow I$ ，将此积分上下限代入上式，即得：

$$-\int_{I_0}^I \frac{\Delta I}{I_0} = \mu \int_0^d \Delta d,$$

于是
$$\ln \frac{I}{I_0} = -\mu d,$$

或最后写出为
$$I = I_0 e^{-\mu d}. \quad (2)$$

由公式(2)即說明土对 γ 射綫的吸收减弱是近似地符合于指数規律的。

同样由公式(2)可以說明常数 μ 值系 γ 射綫穿过土层

厚度一厘米时的强度减弱量的自然对数 ($\mu = \ln \frac{I_0}{I}$)，故称为 γ 射线的线性吸收系数 (厘米⁻¹)。如果采用所谓半吸收层厚度 $d_{\frac{1}{2}}$ 表示土对 γ 射线所产生的吸收能力，意思就是 γ 射线强度减弱一半时的土层厚度，以 $I = \frac{1}{2} I_0$ 代入公式 (2) 中，并从两边取对数，则得：

$$d_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0.69}{\mu}。$$

一般用 $d_{\frac{1}{2}}$ 来表征 γ 射线对物质的穿透能力 (此处 μ 为土的线性吸收系数，则 $d_{\frac{1}{2}}$ 为 γ 射线对土的穿透能力)。如此就更易理解 γ 射线在土中的吸收减弱这一概念。

根据原子物理学⁽⁶⁾实验得知， γ 射线通过物质时，可以产生三种不同的吸收效应：光电吸收效应 (τ)、康普敦吸收效应 (σ)、电子偶吸收效应 (κ)。这三种吸收效应综合地反映出线性吸收系数 (μ)。

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa \quad (3)$$

光电吸收效应 (τ)：系指 γ 光子整个被物质中的原子吸收，于是从原子内放出一个电子，亦称光电子。因此，当辐射能量愈低，吸收物质的原子序数 (z) 愈大时，则光电效应所引起的 γ 射线的衰减就愈显著。由此得出 τ' 与物质中原子的 z 和 A (原子质量数) 关系为：

$$\tau = \tau_{\text{Pb}} \cdot \frac{\rho}{11.3} \cdot \frac{207.2}{A} \cdot \left(\frac{z}{82} \right)^4 \approx f_1(E) \frac{z^4}{A} \quad (4)$$

这里, σ_{Pb} 为铅的光电效应线性吸收系数, 它是 γ 射线能量的函数。

康普敦吸收效应 (σ): 指 γ 光子[●] 和物质中的原子的轨道电子相撞时, 即可打出一个具有能量的电子, 即康普敦电子 (或称反冲电子), 和损失能量的散射 γ 射线。这种散射的 γ 射线经过多次散射后, 最后通过光电吸收效应就结束自己的生命。所以康普敦吸收效应中的能量损失, 包括有传递给被康普敦电子的能量损失和 γ 射线的散射能量损失。 γ 射线放射源的能量在 1 Mev 附近时, 该效应与作用的介质起主要作用。 σ 与物质中原子的 z 和 A 关系为:

$$\sigma = \sigma_{\text{Pb}} \cdot \frac{\rho}{11.3} \cdot \frac{207.2}{A} \cdot \left(\frac{z}{82} \right) \approx f_2(E) \cdot \frac{z}{A} \quad (5)$$

这里 σ_{Pb} 为铅的康普敦效应线性吸收系数, 它是 γ 射线能量的函数。

电子偶吸收效应 (κ): 当 γ 辐射的能量超过生成电子偶的静止能量而穿过物质时 (一对电子的静止能量为 1.02 Mev), 即产生此效应。这种概率随能量的增大而增大。 κ 与物质中原子的 z 和 A 关系为:

$$\kappa = \kappa_{\text{Pb}} \cdot \frac{\rho}{11.3} \cdot \frac{207.2}{A} \cdot \left(\frac{z}{82} \right)^2 \approx f_3(E) \cdot \frac{z^2}{A} \quad (6)$$

这里, κ_{Pb} 为铅的电子偶效应线性吸收系数, 它是 γ 射线能量的函数。

由此得出:

● γ 光子系指单个的 γ 辐射, 集合许多 γ 光子而成的 γ 光子束则称为 γ 射线。

$$\mu = f_1(E) \frac{z^4}{A} + f_2(E) \frac{z}{A} + f_3(E) \frac{z^2}{A} \quad (7)$$

由以上(4)、(5)、(6)式看出,可以由一种已知的吸收体的各吸收系数求出另一种吸收体的各相应吸收系数。所以,通常以铅的吸收系数作为标准,现繪出铅的吸收系数和 γ 射线能量的关系图(见图2-2a)。

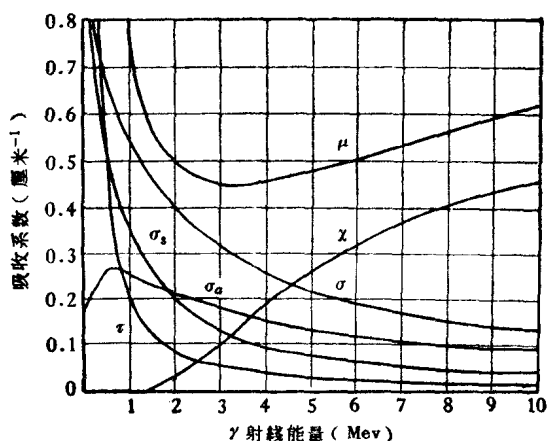


图 2-2a γ 射线在铅中的线性吸收系数与其能量间的关系

τ —光电吸收系数; σ_a —康普敦吸收系数; σ_s —康普敦散射系数;

$\sigma = \sigma_a + \sigma_s$; λ —电子偶吸收系数; μ —总线性吸收系数

放射性同位素测定土的密度所采用的放射源主要为钴-60 γ 射线源,其平均能量为1.25MeV。这种能量对产生光电吸收效应是很弱的,其 τ 值可以略计。对产生电子偶吸收效应,仅处于临界开始的能量,即 λ 值刚刚开始增加,但其增量与 σ 值比较可以小到略计。同时,还可以由土的组成元素来说明,土的组成元素不外氧($z=8$)、矽($z=14$)、