



刘雨人 编著

同位素测沙



SHUILI KEJI CHENGGUO CONGSHU

《水利科技成果》丛书

同位素测沙

刘雨人

編著

水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 简 介

本书着重阐述同位素测量河水含沙量技术的理论基础、仪器设备和现场应用情况,其具体内容包括核物理、核电子学、核辐射探测技术基础,以及同位素测沙仪的应用与误差分析,同时对国内研制的几种测沙仪的性能作了分析比较。

本书可供从事泥沙测验的水利技术人员阅读,也可供从事放射性测量和放射性同位素应用等有关科技人员参考。

《水利科技成果》丛书

同位素测沙

刘雨人 编著

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

北京市京东印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 5.375印张 115千字

1992年4月第一版 1992年4月北京第一次印刷

印数001—890册

ISBN 7-120-01557-5/TV·565

定价4.20元

序

水是人类生存和社会生产必不可少的物质资源。水利工作的基本任务是除水害、兴水利，开发、利用和保护水资源，为工农业生产和人们的物质、文化生活创造必要的条件。普及水利科学技术知识，让更多的人了解和掌握水利科学技术，也是两个文明建设的内容之一。为此，针对水利战线职工和社会上不同文化程度读者的需要，分层次地编写出版水利科普读物是十分必要的。

为了帮助水利科技人员的知识更新，掌握一些现代科技知识，并使水利科技成果更广泛地得到推广应用，尽快地形成生产力；为了使广大农村水利工作人员，掌握一些实用的水利基础知识，并应用于生产实际；为了总结和宣传我国水利建设的伟大成就和悠久历史，介绍水利在四化建设和人民生活等方面的重要作用，激发广大人民群众和青少年热爱祖国江河、关心水利事业，我们组织编写了七套水利科普丛书，包括：《现代科技》丛书、《水利科技成果》丛书、《水利水电施工》丛书、《小水电技术》丛书、《农村水利技术》丛书、《中国水利史》小丛书、《水与人类》丛书。这些科普丛书将由水利电力出版社陆续出版。

编写和审定这些丛书时，力求做到以思想性和科学性为前提，同时注意通俗性、适用性和趣味性。由于我们工作经验不足，书中可能存在某些不妥和错误之处，敬请广大读者给予批评指正。

中国水利学会科普工作委员会

一九八四年七月

水利科普丛书编审委员会名单

主任委员: 史梦熊

副主任委员: 董其林

委 员:	丁联臻	王万治	史梦熊	田 园
	李文治	邰凤山	杨启声	张宏全
	张林祥	沈坤卿	陈祖安	陈春槐
	汪景琦	郑连第	郭之章	赵珂经
	茆 智	陶芳轩	谈国良	徐曾衍
	蒋元驹	曹述互	曹松润	董其林
	颜振元	(以姓氏笔划为序)		

前 言

本书系《水利科技成果》丛书之一。鉴于读者多为水文、水利部门的工人和科技人员，他们对核技术知识可能了解不多，故在介绍同位素测沙仪之前增加了有关核物理、核电子学和探测技术等基础知识。但由于篇幅所限，只作些简单介绍，如读者感兴趣可参考该专业的有关教科书和专著。不仅如此，就是同位素测沙仪部分也未能详细介绍各种型号的仪器，如读者需要电路图和结构图等资料，可向有关单位索取。本书着重方法介绍，无疑这对仪器的使用者来说是有益的。

本书由中国原子能科学研究院的梁生柱同志审校，编者在此表示致谢！

由于编者水平所限，书中缺点和错误在所难免，恳请读者指正。

编著者

目 录

序

前言

第一章 绪论	1
第二章 同位素测沙的核物理基础	5
第一节 同位素.....	5
第二节 放射性衰变律.....	6
第三节 放射性衰变的种类.....	7
第四节 射线和物质的相互作用.....	8
第三章 测量含沙量或浓度用的几种核探测器	19
第一节 气体电离探测器.....	19
第二节 闪烁探测器.....	34
第三节 半导体探测器.....	42
第四节 测量含沙量的探测器性能比较.....	44
第四章 同位素测沙仪的核电子学基础	46
第一节 引言.....	46
第二节 信号的处理与要求.....	46
第三节 前置放大器.....	47
第四节 主放大器.....	57
第五节 脉冲幅度甄别器.....	61
第六节 定标器.....	64
第五章 同位素测沙仪	68
第一节 FH422型 γ - γ 含沙量计	68
第二节 FT-1型闪烁式低含沙量计	81
第三节 双闪烁探测器式测沙仪.....	90

第四节	NKY-84型 γ 射线测沙仪	97
第五节	ATX5-1型X射线正比管含沙量计	101
第六章	同位素测沙仪的误差分析	121
第一节	同位素测沙仪误差来源及影响误差因素	121
第二节	放射性统计涨落误差	122
第三节	其它误差	135
第七章	几种同位素测沙仪性能的比较	141
第一节	引言	141
第二节	同位素测沙仪的主要技术指标	141
第三节	几种同位素测沙仪主要技术性能比较	147
第八章	同位素测沙仪的其它应用	148
第一节	用于压力-密度法测量浑水水深	148
第二节	用于测量悬移质断面输沙率	149
第三节	用于测定固体粉末的粒度或泥沙颗粒分析	153
第四节	用于测量煤浆浓度	156
第五节	用于测量高速水流掺气量	157
附录		158
参考文献		161

第一章 绪 论

同位素测沙即利用放射性同位素衰变时发射出的射线（即所谓核辐射）与浑水介质相互作用如吸收或散射的原理，对含沙量进行测量。河水含沙量相当于工业过程中两相流的物料（固相）浓度，因此它不仅是泥沙输移中的重要参量，也是水力输送中的重要参量。

同位素测沙是近年来国内外水文工作者所重视的课题，也是核技术在水文中应用比较有前途的技术。它与微型计算机相结合形成了当代的水文测验中的一项高技术。这类高技术在当今的世界技术革命浪潮中起主力军的作用。

早在60年代我国就开始研究同位素测沙。最初利用 γ 射线源，如： ^{137}Cs 和 ^{60}Co 等。近几年来采用低能X(γ)射线源，如 ^{241}Am 、 ^{109}Cd 和 ^{238}Pu 等。随着微型计算机的发展，使核辐射含沙量计进入了智能化和自动化阶段。现在已可不用一个点一个点的单独测量含沙量，而是与其它传感器相配合进行多参量的综合测量。目前同位素测沙仪已发展成悬移质输沙率测量系统。60年代以来黄河水利委员会水利科学研究所与中国原子能科学院、上海原子核研究所、北京核仪器厂和营口电子仪器厂等单位协作共研制出FH422型 γ - γ 含沙量计、FT-1型闪烁式低含沙量计、ATX5-1型X射线正比管含沙量计和HDD-1型核辐射悬移质输沙率测量系统，还有清华大学与长江流域规划办公室合作研制的双闪烁探测器的同位素低含沙量仪，南京水利科学研究院研制的 γ 射线高含沙量仪和同位素低含沙量仪，以及许多型号的管道上用的泥浆浓度计

和过机含沙量计等。

总之，我国利用核辐射研究含沙量的测量工作比国外投入的力量大，取得的成果也比较多。我国代表曾参加几次国际学术会议交流，并作过比较。可以认为我国的同位素测沙技术居世界领先地位。

国际上，同位素测沙的研究工作也是自60年代开始的，当时形成一股热潮。美国、苏联、法国和印度等国都先后开展了这项研究工作，并发表了许多论文。比较有代表性的是1970年国际原子能机构（IAEA）公布的T.Florkowski设计的散射式含沙量计，以及匈牙利水资源开发研究所的L.Rakaczi在1975年发表的吸收式含沙量计。但是，L.Rakaczi曾经认为核子悬移质含沙量计仍在实验阶段，目前尚不能期望变成日常使用的仪器，但是它们的应用是最有前途的。在 $0.5 \sim 1.0 \text{ kg/m}^3$ 时，其误差为 $\pm 20\%$ 。1986年6月印度同位素水文学专家S.M.Rao，在国际原子能机构和联合国科教文组织于雅加达举办的亚太区水文学研讨会上，介绍了他们在1978年发表的利用 ^{109}Cd 、 ^{241}Am 和 ^{133}Ba 同位素的仪器测量最小可测含沙量 $\left(MDC = \frac{\sigma(K)}{-(\mu_s - \mu_w)\gamma t} \right)$ 分别为270、600和900ppm。1987年6月澳大利亚同位素水文学专家J.F.Eassey，在国际原子能机构亚太区（RCA）同位素水文学北京专题讨论会上，介绍了G.S.Tazioli和A.Caillot在1980年发表的 ^{241}Am 含沙量计只用于测量大于 $1 \sim 2 \text{ g/L}$ 的浑水。然而我们在1986年和1987年两次国际原子能机构举办的同位素水文学专题讨论会上介绍的 ^{238}Pu 含沙量计，测量低含沙量的误差为： $\pm 0.03 \text{ kg/m}^3$ 。在浑水含沙量达到 1000 kg/m^3 时仍能适用，测量误差不超过 $\pm 1\%$ 。因此，我国的含沙量计处在世

界领先地位的评价是客观的。正如1987年5月英国出版的《水能与坝工》刊物上^⑤介绍了我国黄河水利委员会水科所新研制的X射线正比管含沙量计的性能,并认为“比世界上已有的仪表,测量精度高,测量范围大”。

同位素测沙较其它测沙方法具有以下优点。

- (1) 不必取样,可以原位(或在线)测量;
- (2) 不受泥沙的粒度、颜色的影响;
- (3) 可以在恶劣环境下测量;
- (4) 测量体积大,代表性好;
- (5) 反应速度快,测量时间短。

取样称重法,虽然天平称重可靠性好,但取样代表性差,也比较麻烦。尤其我国常用横式采样器,当遇到含沙量脉动变化时,数据离散度大,并且很难取到临近河底的含沙量水样。近年来,虽然改进了这种采样器,如临底采样器和抽水取样器等已经应用,并且克服了含沙量脉动变化的影响(如采用积分式取样器)。但是,仍没有摆脱取样称重的繁重劳动。

光电测沙仪已在国内外研制成功,并投入应用多年,但它用于测量较大含沙量(如大于 10kg/m^3)时有困难。在河道上应用泥沙粒度变化和泥沙颜色变化时,都会产生很大的误差。

电导法测沙仪虽然可以测量高含沙量,但受水温的影响和水中可溶盐类浓度的变化影响很大,校正的方法比电导法本身还要复杂。

近年来,有人尝试用微波测沙、激光测沙和超声测沙

● Water Power & Dam Construction, May(1987).

等，但由于影响因素较多，目前尚没有成熟的仪器出现。

电子振动式测沙仪虽然已有商品出售，但用于水文测站的场合不多，尤其对低含沙量的测量灵敏度很差。在测量临近河底含沙量时也常常遇到困难。

笔者认为同位素测沙比其它方法优越，尤其低能X射线同位素测沙仪，对辐射的安全防护比较容易。因为它的穿透力很弱，用几毫米的铅板就可以把射线全部屏蔽掉（吸收掉）。平时放到十几厘米的水体中，也可把射线大部吸收。这种测沙仪，运输、保管和使用十分安全，射线很少照射到人体上。由于放射源是密封到探头中，只是使用通过外壳透射出来的低能X（ γ ）射线，故对水体不产生任何污染。放射源不直接与水接触。就象日光灯的汞封装在玻璃管内，在使用日光灯管的房间，不会受到灯管内金属汞的污染一样，十分安全。

现在我们的任务是：一方面掌握同位素测沙新技术；另一方面要对核恐怖思想进行宣传和解释工作。

近年来同位素火灾报警仪已大批量推广，如广泛应用于宾馆的卧室。这种仪器也采用了和同位素测沙仪中一样的 ^{241}Am 放射源，无疑，采用比 ^{241}Am 的 γ 射线能量还低的 ^{238}Pu X射线源的含沙量计，更容易防护和推广。

第二章 同位素测沙的核物理基础

第一节 同 位 素

大家知道，地球上的所有物质都是由90多种不同的元素组成的。最轻的元素是氢，其次是氦、锂、铍……最重的元素是铀。化学家按原子核所带的正电荷数排列成元素周期表。每个元素都在表中排列有一个序数。即原子序数 Z 。但是后来发现在同一个序数中，确有几种化学性质相同但原子质量数不同的元素（称为同位素）。即所带正电荷数虽然相等，但原子量不等。这些元素中，有通过人工的核反应产生的，也有天然的；有放射性的，也有稳定性的。

原子核反应产生很多的稳定性的同位素，也有不是稳定性的，而是放射性的同位素。它们将自发地衰变成其它同位素。在这种变化过程中，核将放射 α 射线（即氦核），或 β 射线（即电子），或 γ 射线（一种高能量的电磁波），或 β^+ 射线（即正电子），或者在核外俘获一个绕行电子。

放射性同位素分为人工的和天然的。自从1934年约里奥·居里夫妇发现第一个人造放射性同位素以来，到目前为止，已被发现的人工放射性的同位素达到一千多种。人们根据需要又分为同位素示踪剂或放射源等。放射源又根据衰变的方式分为 α 源、 β 源或 γ 源。每种放射性同位素都有它的特征。如半衰期、能量、活度、化学状态、包装形式等等。

半衰期：放射性原子数因衰变而减少到原来的一半时所需的时间。用符号 $T_{1/2}$ 表示。

能量：是指发射出的粒子或射线的动能，单位用电子伏（eV），千电子伏（keV），百万电子伏（MeV）表示。

活度：是指每秒钟核衰变的次数。 $1\text{Ci}(\text{居里}) = 3.7 \times 10^{10}\text{Bq}$, $1\text{Bq} = 2.7 \times 10^{-11}\text{Ci}(\text{居里})$, $1\text{MBq} = 10^6\text{Bq}$, $1\text{GBq} = 10^9\text{Bq}$, $1\text{TBq} = 10^{12}\text{Bq}$ 。

表示放射性同位素的符号为原子的化学符号衍化而来的。一般将原子质量数写在左上角。

如： ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{241}Am

测量含沙量常用的同位素，见表2-1。

表 2-1 测沙用的常用同位素表

同 位 素 种 类	符 号	半 衰 期 $T_{1/2}$	$\gamma(X)$ 射 线 能 量
钴-60	^{60}Co	5.26年	1.33250、1.17324MeV
铯-137	^{137}Cs	30.00年	0.66166MeV
钡-133	^{133}Ba	7.20年	81.00keV
铥-170	^{170}Tm	130天	84.00keV
镅-241	^{241}Am	432.2年	59.54、26.35keV
镉-109	^{109}Cd	462天	22.16keV
钚-238	^{238}Pu	87.75年	13.5、17.5、20.7keV
铁-55	^{55}Fe	2.91年	5、9keV

第二节 放 射 性 衰 变 律

前节已提到，放射性同位素的核将自发地发生衰变放出某一种粒子或射线。核衰变的速度不能以外加因素所改变（如温度、压力的改变）。核衰变的速度是放射性同位素的特性。衰变后的核有的是稳定的，有的是不稳定而继续衰变的。通常未衰变前的核称为母体，衰变后的核称为子体。子

体若继续衰变，则有第二代子体以至于更多代的子体。放射性同位素的衰变遵循以下规律：

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2-1)$$

式中， N_0 为在时间 $t=0$ 时的衰变数； N 为在时间 t 时的衰变数； λ 为衰变常数； t 为时间。

当衰变到原来的半数时所需的时间为半衰期 $T_{1/2}$ ，为：

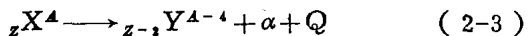
$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (2-2)$$

第三节 放射性衰变的种类

放射性同位素的核衰变的种类很多。如 α 衰变， β 衰变， β^+ 衰变或电子俘获， γ 衰变等。其中主要的是 α 、 β 、 γ 三种衰变，下面分别介绍。

一、 α 衰变

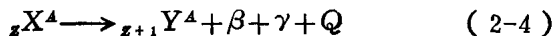
α 衰变放出带正电的氦核(2He^4)，容易被几厘米的空气吸收，并且产生很强的电离。凡是 α 衰变的放射性同位素，在衰变之后，它的原子质量数 A 降低4个单位，原子序数 Z 降低2个单位。若用 X 代表母体， Y 代表子体，则 α 衰变可用下式表示：



Q 表示衰变能。

二、 β 衰变

β 衰变放射近于光速运动的电子。它的穿透力大于 α 粒子，但它产生较弱的电离。 β 衰变可用下式表示：



三、 γ 衰变

γ 衰变为电磁辐射，在空气中穿透较大的范围，但是它可以被几厘米厚的铅板吸收。 γ 射线的波长比较短（波长从 $10^{-8} \sim 10^{-11} \text{cm}$ ）^①，它的性质和X射线十分相似。现在应用几兆至几万兆电子伏的电子加速器来产生的X射线，其波长比能量较大的同位素 γ 射线还短得多。X射线与 γ 射线在低能部分的波长范围重叠。因此，不能认为 γ 射线波长短，X射线波长长。

第四节 射线和物质的相互作用

上节介绍的三种衰变分别产生 α 、 β 和 γ 射线。 α 、 β 射线即是放射性同位素放射出的带电粒子，而 γ 射线却是一种不带电的电磁波。

带电粒子与物质的相互作用产生电离、激发、散射和吸收等效应。而 γ 射线与物质相互作用主要是：①光电效应；②康普敦-吴有训效应；③电子对的生成。前两种的效应只有在光子的能量较小时才是主要的；后一种的效应则必须在光子的能量大于1兆电子伏后才开始显著。各种效应还随着物质的原子序数 Z 的不同而改变， Z 低的效应小， Z 高的效应大。但是上面所谈的三种效应是彼此独立的。总的吸收截面 σ 可以分为这三种效应相应的三部分，即

$$\sigma = \sigma_{\text{光电}} + \sigma_{\text{康普敦}} + \sigma_{\text{电子对}} \quad (2-5)$$

图2-1表示在一般情况下对 γ 射线的吸收随能量改变的关系

① 能量与波长的关系式：
$$E = \frac{12400}{\lambda}$$

式中 E 为能量(eV)； λ 为波长($\text{\AA}$)， $1\text{\AA} = 10^{-8} \text{cm}$ 。 $10^{-8} \sim 10^{-11} \text{cm}$ 对应于12.4 keV $\sim$ 12.4 MeV。

系。图2-2表示 γ 射线在原子序数较大的铅中的吸收截面随能量的变化。

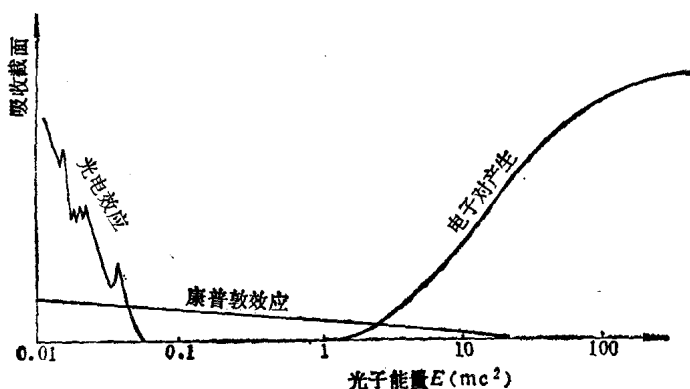


图 2-1 在一般情况下 γ 射线吸收截面与能量的关系

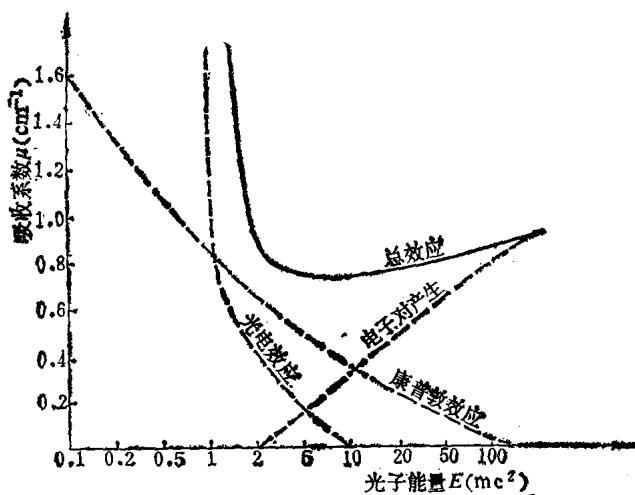


图 2-2 γ 射线在铅中的吸收系数与能量的关系