

氡测量

Radon Measurement

及

and

实用数据

Practical Data

吴慧山 梁树红 等编著

原子能出版社

氡测量及实用数据

RADON MEASUREMENT AND PRACTICAL DATA

吴慧山 梁树红 王海洋 编著
刘文芹 邓建华

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

氦测量及实用数据 / 吴慧山编著.

—北京:原子能出版社,2001.9

ISBN 7-5022-2431-9

I. 氦… II. 吴… III. 射气测量 IV. P631.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 060224 号

内 容 简 介

本书从氦测量的实用角度出发,首先扼要地叙述氦的发现、发展、若干理论、方法技术,以及若干应用领域和可能造成的危害等问题,目的是使读者对氦测量有个总体了解,并期望能从中得到有益的启迪;然后着重介绍氦在实际应用中,经常遇到的一些概念、术语、单位和问题,以使读者能较正确地理解和较正确地应用,并能看到氦应用的发展方向和相关问题;第三,用较大的篇幅介绍氦测量的若干实用数据和量值,以利读者在从事氦的有关研究工作时查找和参考;最后,扼要地介绍与氦测量有密切关系的核地球物理学和核地球物理勘查(核物探),以扩大读者视野。

本书可供地学、环境科学和医学等专业从事氦的科研和生产的人员参考,也可供大专院校有关专业的师生参考。

原子能出版社出版 发行

责任编辑:张 辉

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码:100037

北京朝阳科普印刷厂印刷 新华书店经销

开本:850×1168mm 1/32 印张:6.375 字数:164 千字

2001 年 11 月北京第 1 版 2001 年 11 月北京第 1 次印刷

印数:1—500

定价:15.00 元

前 言

核能的发展与广泛应用,是 20 世纪世界科学技术发展的重要支柱,而“两弹一星”的实践,则是我国综合国力提高的一个重要标志。氡测量(实用氡学)是核技术应用中的一种重要方法技术,但从氡被发现至今,在这 110 年里其发展缓慢,一直到 20 世纪七八十年代,由于人们认识了氡在环保等领域中的重要作用,从而使之得到了前所未有的突破性发展。

随着科学技术向纵深方向的发展,人们对氡气的认识也在不断深化,应用领域不断扩大,然而,目前有关氡的理论和方法技术,以及应用的全面报道并不太多,即使在国外也是如此,只局限于某一特定领域的介绍,所以在一定程度上也影响了应用氡这项技术的进一步发展。为此,我们曾出版了一本《氡测量方法与应用》的科技书(原子能出版社,1995 年 8 月),在该书中较扼要、但又较全面和系统地介绍了有关氡的基本知识、基础理论、方法技术和多种用途。随着室内装修成为当前社会的一大热点,但由于人们对氡的认识又比较陌生和防护意识不够,以致在一些室内发生了氡、甲醛和苯等有害气体对人的侵害,有的甚至致病致癌而死亡时,对其产生惊恐。为了使人们正确对待这一事实,增强对氡等的正确认识,并能采取自我保护的措施,我们又特地出版了一本名为《室内装修要警惕氡、甲醛、苯的危害》的科普书(原子能出版社,2000 年 9 月)。

为着使氡测量在 21 世纪得到更广泛更深入的发展,特别是在应用上的需要,我们编写这本《氡测量及实用数据》,它较全面地介

绍氡测量有关知识,并立足于实用,列出大量数据,因而可能会得到广大读者的关注。

本书分五个部分:绪论,扼要介绍氡的发现、发展,及其在国民经济多种领域的应用和对人类可能造成的危害,并借此提醒人们警惕;第一章,氡测量的若干基本问题,介绍了氡的发现与氡测量的发展、氡的若干理论和方法技术,以及氡测量中若干普遍关注的问题(多源控制问题,迁移问题,来源问题等);第二章,与氡测量有关的若干概念与术语,介绍电离辐射计量基础,计量与测量,测量的若干术语,以及其他相关的概念;第三章,与氡测量有关的若干测量单位和量值,介绍量和单位量值;第四章,与氡测量有关的若干实用数据,介绍放射性核素含量,水中氡浓度, α 粒子射程和总电离量,氡的光谱,钋-210含量,氡的射气系数与扩散系数,空气中氡浓度和其他有关数据;第五章,氡与核地球物理学和核地球物理勘查,介绍其概念,与其他学科的关系,分类、内容和方法,以及现状与发展。

本书的编撰得到张彪研究员及其他同志的帮助和支持,特此表示感谢。

编著者

2001年2月于北京

目 录

前言

绪论..... (1)

第一章 氡测量的若干基本问题..... (5)

第一节 氡的发现和氡测量的发展..... (6)

一、氡的发现 (6)

二、氡测量的发展 (7)

第二节 氡的若干理论 (11)

一、氡的基本性质..... (11)

二、射气作用..... (13)

三、射气作用的参数..... (16)

四、氡的迁移理论..... (17)

第三节 氡测量的方法技术 (28)

一、地(壤)中氡测量..... (29)

二、空气中氡测量..... (30)

三、水中氡测量..... (30)

四、若干氡测量系统与仪器..... (31)

第四节 氡测量的若干应用领域与氡的危害 (35)

一、应用概论..... (35)

二、氡气在研究地质过程中的应用..... (36)

三、氡测量的其他应用..... (57)

四、氡射气应用的若干展望..... (60)

五、氡的危害..... (61)

第五节 氡的若干普遍关注问题	(65)
一、氡的危害应引起特别关注	(65)
二、氡与放射性不是一个概念	(68)
三、氡的迁移问题	(68)
四、氡的多元控制问题	(69)
五、氡的来源问题	(69)
第二章 与氡有关的若干概念和术语	(71)
第一节 电离辐射计量基础	(71)
第二节 计量与测量	(75)
第三节 测量的若干概念	(77)
第四节 其他的有关概念	(80)
第三章 与氡测量有关的若干单位和量值	(86)
第一节 量	(86)
第二节 单位量值	(90)
第四章 与氡测量有关的若干实用数据	(95)
第一节 放射性核素含量	(95)
第二节 水中氡浓度	(111)
第三节 α 粒子射程和总电离量	(114)
第四节 氡的光谱	(116)
第五节 钋-210 含量	(117)
第六节 氡的射气系数与扩散系数	(122)
第七节 空气中氡浓度	(134)
第八节 其他有关数据	(157)
第五章 氡与核地球物理学和核地球物理勘查	(177)
第一节 核地球物理学与核地球物理勘查的概念	(177)
第二节 核地球物理学与核地球物理勘查的形成及其 与相关学科的关系	(178)
第三节 核地球物理学与核物探的分类、研究内容和	

方法技术·····	(181)
第四节 核地球物理的现状与发展·····	(183)
第五节 核地球物理的应用·····	(187)
主要参考文献·····	(190)

绪 论

氡是周期表中 6 种惰性气体中最重的一种,在自然界中,在当前,尚未发现其化学上的组合物(化合物)。氡是 1900 年被德国的 F·多恩(Dorn)发现的,但作为同位素,氡则是不止一次地被发现的。这个时间大致是在 1900 年至 1904 年。氡在自然界中有三种同位素($^{218}_{86}\text{Rn}$ 虽是由铀系的 $^{218}_{85}\text{At}$ 衰变而来,但因半衰期只有 0.03s,不能算为独立的核素(<0.9s 的),因而在讨论氡时往往不予考虑),即氡-222,是由铀系的 $^{226}_{88}\text{Ra}$ 衰变而来的,半衰期 3.825d, F·多恩发现的正是这种氡,称为氡射气;氡-220,是由钍系的 $^{224}_{90}\text{Th}$ (ThX)衰变而来的,半衰期 55.6s,是由 E. 卢瑟福和 R.B. 欧文斯发现的,称钍射气;氡-219 是由锕铀系的 $^{223}_{88}\text{Ra}$ (AcX)衰变而来的,半衰期 3.96s,是由 F.O. 吉塞尔发现的,称为锕射气。

放射性射气(气体),通过铀裂变而产生的有 $^{85m}_{36}\text{Kr}$ (氪气)和 $^{133m}_{54}\text{Xe}$ (氙气),虽然它们的半衰期也比较长,相应为:4.48h 和 2.191d,但它们属于人工生成的放射性气体,不在我们讨论之列。

氡被发现后引起了普遍的重视,其中特别是医学领域,医学家用它来治疗恶性肿瘤,用于氡浴以治疗某些关节病和末梢神经系统的疾患。在地学领域,1904 年在加拿大开始出现收集和探测土壤和河水中氡气的装置和方法。就在这个时期以后,不少国家的学者对有关氡迁移的相关问题进行大量的研究,但大多只停留在扩散的理论上,其中尤为突出的是俄罗斯和德国学者。例如 Г. H. 安东诺夫于 1913 年出版了有关“铀分裂产物”的书,Л. C. 科罗

勃拉特一切尔文斯基于 1918 年前后第一次进行了对某些镭盐加热时,所产生射气的影响的研究,等等。1922 年前苏联学者 A. И. 基里柯夫在中亚细亚应用氦法普查第四纪覆盖下的铀矿体,稍后又发展了实用的钍射气测量。然而,氦法发展很缓慢,也很不平衡。过去在西方国家里,特别是在美国和加拿大,氦法基本上没有得到实际的应用,而前苏联和东欧一些国家里应用稍多。我国氦法的应用开始于 50 年代中期。总的说来,本世纪 60 年代以前的一段漫长的时间里,氦法只限于较小面积的普查找矿。空中和地下工程中应用氦气测量虽然已有某些理论研究,但最终很少取得实际有效的应用效果。

随着氦局部性的推广应用,氦迁移的问题也开始引起人们的注意。

20 世纪 60 年代以前的半个世纪,由于氦法应用的不广泛和局限性,氦迁移理论也带有局限性。大概在 20 世纪 20 年代开始,前苏联的一些学者,如 B. И. 巴兰诺夫, A. Г. 格拉玛柯夫, Л. Н. 鲍加雅夫列恩斯基, A. И. 基里柯夫,以及欧美的一些学者,如 G. 格魏石、P. 留特魏格、K. 法扬斯和 M. 居里等利用气体理论都在不同程度上认为,扩散是氦迁移的主要动力。一直到 50 年代前后, A. Г. 格拉玛柯夫等人针对不同的找矿对象建立起一整套的氦迁移的扩散加对流的理论公式。这一套理论至今尚在不同程度上被引用。

20 世纪 70 年代特别是中期以来,随着氦法应用的推广,领域的拓宽,地下氦迁移的扩散加对流理论开始受到挑战和怀疑,已难于解释,例如,氦为何可用于地震的中近期预报,用于寻找深部铀矿等问题。因而就出现了一系列的氦迁移理论、观点和假设,但它们当中大多属于定性的。例如,抽吸作用,水的广义作用,伴生气体的压力作用,泵吸作用,地热作用,地震应力引起的毛细压力变化的作用,大气压力的纵深效应,风速、风向和旋流等作用,地下流

体流动作用,构造带作用,以及速度传播论,载体运移论,纳米微粒论和第二氧源论等等。

而由吴慧山等提出的氧迁移的接力传递作用也是在这个时期提出来的,但当时只是一种雏形观点。经过 20 多年来在解释找深部铀矿、油气田和地下热水,以及地震预报和地质研究的实践考验和完善发展,我们认为,氧迁移的接力传递作用是存在的,并能较好地符合实际地解释诸如上述提出的更广泛的问题,因而对氧法的拓宽和有效应用,产生了积极的影响。

氧的射气作用,即是含有母元素的固体析出氧的过程,取决于温度、湿度和固体结构,并在很大范围内变化,因此,特别是在工业和科学研究中用射气方法研究固体物质的潜力很大。氧可以帮助研究各种材料的状态和缺陷,例如,氧指示器可以用来控制防毒面具的密封性。在钢和玻璃这些原材料生产中,有时可用氧来追踪工艺流程的进程。

至于氧可有效地用于找铀矿,以及其他有关的金属矿和非金属矿,用于预报中近期地震,环境监测,现代地球动力学运动的研究,以及冷、热水资源的勘查和工程地质勘察等方面,在几十年前就已开展应用。

当然,氧亦是对人类可以造成极大危险的一种气体,名副其实地可称之为“隐形杀手”,这是因为氧是一种无色无味的极毒致癌物质,受害期间往往是从几年到三四十年。但过去人们一般只认为,铀矿山中产生的氧,才能对人类造成威胁。30 多年前,人们开始注意了非铀矿山氧的积累和危害。近 10 多年来,人们又敏锐地发现,人类正常生活条件下,亦存在着氧,并亦对人类造成危害,这种危害,往往涉及亿万人。已有报道,引发慢性(15~40 年)肺癌的一个重要途径是室内氧。

据对文献资料(1996 年)的初步调查,近 10 多年来,国内外发表的论文(或著作)每年达千件以上,其中包含着各种有用的数据

和值得探讨的问题,内容极其丰富。我们这本书起初的意图,是想从中抽出最有用的数据和问题,然后编撰成册,以供参考,这当然是很有用的。然而由于种种主、客观原因而无法完全达到上述目的。这本书主要是根据有限的资料并仅就上述内容和我们多年的研究成果进行编撰。为着使不同程度的氡学同行对氡的概貌有个较系统的了解,我们还编进去部分的有关概念、术语,测量单位等。上述这些内容期望能对氡学在各个领域的发展有所启迪。

氡学系指研究物质中氡的存在与量值,以及相关的理论和应用的一门学科,它偏重于总体氡的发展,偏重于理论研究,而实用氡学则更偏重于应用,所以也常称之为氡测量。通俗地说,氡学是研究氡的理论,测量的方法技术,以及应用的一门学科,它的理论基础是物理学(原子核物理学和气体物理学)、化学(放射化学)和地质学,它的应用领域广泛,如地学、环境学和医学等。我们预计,氡在 21 世纪将作为环境科学中的一种重要因素来进行研究;它或许将作为 20 世纪开始的,21 世纪还在继续发展的第三代污染(室内环境污染)的“首祸”来加予考虑和研究,而且也可能作为“有益”物质来加予利用。

总之,氡,只要你真正认识它,并懂得自我防护,它的危害是可以降到最低限度的,甚至还可以被人类所利用。但如果你不认识它(因为它无色、无味,看不见、摸不着),甚至以为没有感觉就可置之不理,那么,你可能因此付出代价(患病,致癌)。我们在发表的文章和出版的著作中,常提到氡是“隐形杀手”,是室内环境污染的“首祸”,主要目的是提醒人们警惕,这绝非“言过其实”、“危言耸听”,而是实实在在的。据统计,世界上患肺癌而死亡的人数中,约有 20% 是由于氡诱发的,而且氡是仅次于吸烟的第二大致癌根源。

第一章 氡测量的若干基本问题

氡学的发展同 19 世纪末原子核物理学的发展是密不可分的,同时与气体物理学的发展也是息息相关的。因此氡学的发展就更具有复杂性,甚至经常使科学工作者陷入到一种难以琢磨的境地,所以氡技术的发展较其他核技术发展相对缓慢些。例如,氡学中的若干概念和问题,是既具有核的性质,又具有气体的特征。从氡学的发展历史和过程,我们明显可以发现,有些人只从核的角度去研究氡,而忽略了氡的气体性质,或者只从气体的角度去研究氡,而忽略了其核的性质,因而往往产生一些不可思议的矛盾,甚至是笑话,使学科发展缓慢。例如,有人提出氡本身可以迁移成千上万公里?这只能从气体的角度理解,而氡的半衰期极短($T=3.825\text{d}$)却被忽略了。近些年来发展的纳米技术虽然可以解释氡的长距离迁移性,但其立足点,如果仅从氡的角度,也是行不通的,同样是因为氡的半衰期极短,等等。

在这一章中我们主要从三个方面来介绍氡及其相关学科中的一些最基本的概念,而一些专业性极强的学术问题,这里则不深入讨论。叙述的顺序,首先是氡的发现和氡测量的发展以及氡的危害,其次是介绍若干理论、概念和术语,最后介绍若干普遍关注的问题:氡的多元控制问题,氡的迁移问题,氡的危害和氡的来源等。

第一节 氡的发现和氡测量的发展

一、氡的发现

氡是何时发现的,说法不一,但大多数文献认为是德国人 F. 多恩(F. Dorn)于 1900 年发现的,而有的则认为(这可能是较为确切的),氡是不止一次地被发现的,而且每次的新发现都不推翻前者的发现,而是进行了补充。不同研究者独立地,几乎是同时(1900~1904 年)找到了同一元素(86 号)的不同同位素。所有这些成就都是居里夫妇在放射性方面工作的继续。F. 多恩在镭制品中发现镭射线,即氡-222;稍后,E. 卢瑟福,F. 索迪和 W. 拉姆齐等确认这是一种惰性气体,其中,E. 卢瑟福称这种气体为射气(Emanation),而 W. 拉姆齐和 R. 戈瑞把这种射气称为 Nicon。最后,于 1910 年由 W. 拉姆齐和 R. 戈瑞测定了氡的原子量,并确定了氡在周期表中的位置,从而在氡的性质研究方面迈出了关键的一步。

从上可进一步确知,F. 多恩发现的氡-222 是 86 号元素寿命最长的同位素($T=3.825\text{d}$),是由 Ra-226 进行 α 衰变时形成的,其质量数为 222。E. 卢瑟福和 R. 欧文斯发现的钍射气(Tn)是由钍衰变产生的,其质量数为 220,半衰期为 54.5s 。F. O. 吉塞尔发现的锕射气(An),质量数为 219,半衰期为 3.92s 。(注:20 世纪中发现的第四个氡的同位素,氡-218,由于其半衰期太短, $T=0.03\text{s}$,不能被列为单独的核素,所以在一般的文献中经常见不到对它的报道。)

从放射性“移位法则”的观点看,指出射气位于周期表的零族内,比指出射气来源于镭、钍和锕有更为普遍且重要的意义。第 86 号元素在很长的一段时间内均被称为“射气”,一直到 1923 年

的一个国际会议上,才采用“氡”这个术语。从当前的观点看,射气概念更广泛些,氡只是其中的一种,例如,通过铀裂变而产生的 ^{85}Kr (氪)和 ^{133}Xe (氙),同样属于射气,但它们不是氡气。所以 1923 年将氡的同位素的名称由射气改为氡气是有科学预见的。顺便说一下,当前还有不少将射气同氡气等同起来看是不确切的;另外,也应说明一下,通常称之为氡的,一般是指寿命最长的氡-222。这在我们写文章或阅读文章时,是应该予以注意的。

二、氡测量的发展

有文献报道,1904 年,在加拿大开始出现在野外现场收集和探测土壤以及河水中氡气的装置和方法。之后的 20 年,关于氡应用的报道几乎没有,一直到 20 世纪 20 年代氡才比较正式地用于寻找铀矿等。第一批包括氡法在内的野外找矿的放射性方法出现在前苏联和德国的领土内,而在美国,这些方法用于找矿中,大约晚 7~8 年。

1922 年前苏联学者 A. П. 基里柯夫,在中亚细亚应用氡法普查第四纪覆盖下的铀矿体。稍后又发展了实用的钍射气测量。

值得指出的是,从总体而言,氡的应用及其方法技术的发展是比较缓慢的,也很不平衡。这可能同氡既是气体又具有放射性的双重性的研究难度较大是相联系的,而且同应用面较窄也有关系。从 20 世纪 20 年代到 70 年代前后,可以说,在西方国家里,特别是在美国和加拿大,氡法基本上没有得到实际的应用,而在苏联和东欧一些国家里应用稍多。我国氡法的应用开始于 50 年代中期。总的说来,氡法在世界上的应用,在 60 年代以前只是在较小的面积普查找矿,或进行辅助填图。在空中和地下工程中,以及其他环境的应用,虽然已有某些理论研究,但可能是由于对氡的认识较陌生和影响因素较多,而最终没有得到实际的应用效果。虽然在二战后到 60 年代由于能源的问题,一些国家开展了不少的氡法找矿,但面积终究较小。

氡被发现后的五六十年里,发表的文章及著作也较少。有关氡的专有著作和文章就更少了。1918年柯罗佛拉特—切尔文斯基发表关于氡从固体的析出问题。1923年的刘德维可,1925年的格米石和1935年的居里夫人等以“放射性”为题撰写了著作,在其中也不同程度地涉及到氡的理论和方法;1934年,基里柯夫等撰写了《放射性地球物理方法在地质工作中的应用》这本教科书。1930年到50年代,B. И. 巴兰诺夫,A. Г. 格拉马柯夫等人发表了不少的包括氡在内的领域广泛的放射性方法的理论和技术。在20~30年代里西方的H. 盖格(1920年),格米林(1928年),柯格尔(1914年)和G. 赫维斯(1938年)等发表了不少件的涉及到氡的放射性方法与实验室里工作的论文。

上述的著作(含论文)对氡的发展起到了促进的作用。

还应指出的是,原苏联的Г. Ф. 诺维柯夫等人,在50年代后的30年里,发表了不少文章,特别是对培养原苏联和中国的放射性专业人才起到了不少的作用。

70年代后,是氡法发展的黄金时期,不少的新技术、新方法就在这个时候用于实践。这同核燃料需求的迫切和出露地表或近地表的矿越来越少有关系。在这个时期找深部和富大铀矿的工作,已提到议事日程上,氡法作为一种找深部和富大铀矿的方法已引起了一些国家的重视。在美国、加拿大、中国、印度、阿根廷、巴基斯坦、芬兰和英国等国家用氡法已经找到了一些铀矿和解决了一些地质问题。

在这时期发展起来的方法技术很多,可以说是氡历史发展最多的一个时期,例如, α 径迹蚀刻法,热释光法, α 仪法,氡及其子体的 α 聚集器法中的天然 α 卡法、带电 α 卡法, α 管法, α 膜法和“RaA”法(钋-218法),液体闪烁法,钋-210法和活性炭法等。

在这个时期,氡的研究已从较大规模的找铀矿走出,投入到环境保护行列中。众所周知,以前人们认识到氡只是从其在铀矿勘

查工作过程中对人们产生危害,事实上氡在人们正常的活动环境中同样也会产生极大的危害,而危害的量,面也广。非铀矿山中氡的危害也是严重的。

氡及其子体在铀矿山中对人体的危害,早已为人们所熟知。关于捷克亚希莫夫矿山和德国斯尼伯格矿山矿工患肺癌的第1份报告是1546年提出来的,比放射性的发展还早300多年,当时称这种病为斯尼伯格矿山病。直至1924年才知道氡是这种病的发病原因,并于1951年被正式肯定下来。

氡致肺癌花了400年才弄清楚(注:氡致肺癌的机理,当前尚在深化研究中)。可见,对这种“摸不着,看不到”的无色,无味的氡的危害,是很难广泛地为人们所认识的,因而人们称它为“隐形杀手”或“无形杀手”,是一点也不过分的。

70年代以来,人们更进一步地认识到除了铀矿山中氡的危害外,在非铀矿山,甚至人类正常生活环境中,如居民住宅,普通建筑,特别是地下设施等,氡也同样地会对人类造成危害,只不过是致害的时间较长(潜伏期),以致不被人们所发现和重视。

1982年,联合国原子辐射效应科学委员会(UNSCEAR)指出,环境氡所致的内照射剂量约占全部天然辐射源所致有效剂量的一半。

1987年,国际辐射防护委员会(ICRP)对“室内氡可以诱发肺癌”作了专门论述。

世界卫生组织国际癌症研究中心以动物实验,证实了氡是当前认识到的19种最重要的致癌物质之一,并得到了流行病学研究结果的支持。

1989年,国际原子能机构曾向全球各成员国政府建议开展“人类环境氡调查”的研究工作。近年来有资料证明,正常生活环境中氡致肺癌,一般需15年到40年左右。在实际生产中,有些人到了中老年后患了肺癌,但找不到原因,估计超氡水平的长期照