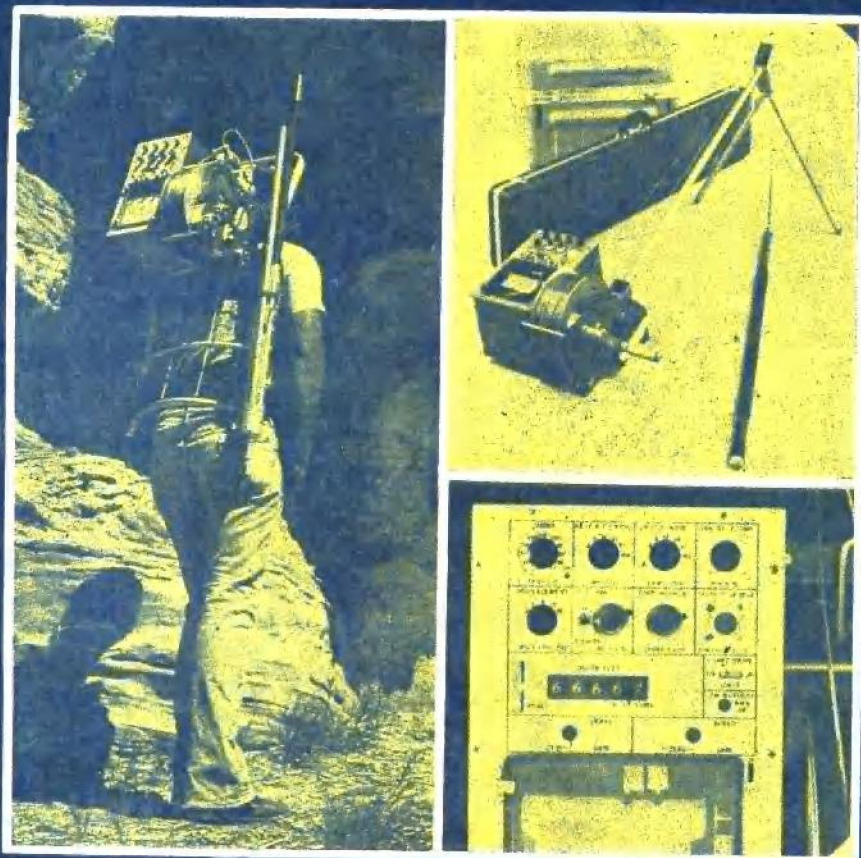


放射性测量新技术

第二集



地质出版社

放射性测量新技术

第二集

(气体普查方法)

吴慧山 周镭庭 等编
李瑾明 于铭强

地质出版社

内 容 提 要

本书较系统地介绍了当前放射性物、化探中几乎所有的氡法(经典射气法、径迹蚀刻法、热释光法、活性炭法、 α 仪法、针-210法、 α 卡法),以及一些与找铀矿有关的气体普查方法(氡法、汞法和其它方法)。内容包括氡的基本性质、测量方法、应用条件、资料解释和若干具体实例。全书共分十一章,大部分材料取自近年来国际上在这些方面的新成就。

本书可供从事铀矿普查勘探工作的生产单位、科研机关和地质院校的物探、化探和地质工作者和师生参考。本书对核技术找水,地震预报和其它应用,都有一定参考价值。

放射性测量新技术

第 二 集

吴慧山 周德庭 等编
李瑞明 于铭强

地质矿产部书刊编辑室编辑

责任编辑:张怀素 王文孝

地质出版社出版

(北京西四)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店北京发行所发行·全国新华书店经售

开本: $850 \times 1168^{1/32}$; 印张: $8^{3/4}$; 字数: 217,000

1984年1月北京第一版·1984年1月北京第一次印刷

印数: 1-3,600册 定价: 1.55元

统一书号: 15038·新962

前 言

铀、钍、汞和石油等矿产在赋存空间的周围可以产生放射性气体或非放射性气体，如氡射气、氮气、汞蒸气、甲烷和二氧化碳等，并形成相应的分散晕。这些气体所分布的范围往往为矿产本身所占空间的数倍甚至数百倍，因此人们可以通过测量这些气体分布的偏高场或高场来发现与其密切相关的矿产。这是几十年前人们早已了解到的。在这个基础上建立起来的各种找矿方法，可以统称为矿产的气体测量方法或称气体普查方法，或简称为气体法。

由于气体迁移速度快，迁移距离大，因而气体找矿方法已被公认为是寻找深部矿产的一种有效方法。到目前为止，这类方法问世的已有几十种。在这一集里，我们将着重地介绍放射性气体及其子体的找铀矿方法，非放射性气体普查方法也将给予适当地介绍，但不作为重点。

本书主要反映美国、加拿大以及苏联等国家近几年来利用气体（指放射性气体）及其子体来寻找矿产，特别是铀矿的某些新进展、新方法和新仪器，以及与之有关的其它一些问题。为了便于使用这些材料，我们还介绍了气体普查方法的某些概念和理论基础，根据我们自己的认识，将这些普查方法进行了大致的分类，介绍了发展的现状，并在此基础上较为详细地从找矿原理、工作方法和仪器等方面介绍十来种新方法或老方法的新进展。这些方法是：氡的常规（瞬时）测量方法、 α 仪测量、钍-210 测量、 α 卡测量、氮气测量和汞蒸气测量、 α 径迹法和热释光法等。我们的意图是：让读者既能看到国外几年来的新技术和新方法的发展概貌，又能在实际工作中运用某些切实可行的新技术，使之为我国的建设服务。

最后，我们还介绍了这些方法在其它一些领域中的有成效的应用实例，如地震预报、寻找非放射性矿产、地质填图 and 环境保护等等。

气体普查方法的现有材料相当丰富，但本书只能是有重点地给予介绍。需要在某些方面进行深入了解和钻研的读者，可参阅列出的一些有关文献资料。

目 录

前 言

第一章 氡的若干性质及其找矿方法	1
一、放射性气体普查方法的分类和发展现状	1
二、氡及其找矿方法的性质和概念	4
(一) 氡的性质	4
(二) 与氡的找矿方法有关的若干概念	7
(三) 氡射气找矿的若干主要公式	8
(四) 氡射气的迁移机制问题	9
(五) 镭在氡法找矿中的作用	11
三、天然放射性的 α 射线及其有关性质	12
第二章 氡的常规(瞬时)测量方法的改进	15
一、氡的常规测量方法	16
(一) 应用条件	16
(二) 工作比例尺	16
(三) 仪器的标定	17
二、常规(瞬时)氡法的新进展	18
(一) 对氡射气迁移机制的某些新认识	18
(二) 氡在几种介质中的射气作用	20
(三) 矿与非矿异常的区分和射气的半定量测定	23
(四) 扩大矿区的几种方法	30
(五) 固体氡源标定法	33
三、资料整理和结果解释	36
(一) 利用长期观察结果	36
(二) 采用移动平均值法滑动数据	44
(三) 用数据统计分析法	47

(四) 异常解释的若干模式·····	50
四、氡射气仪的进展·····	57
(一) RD-200型射气仪和RDU-200型脱气系统·····	57
(二) RM-1003型射气仪·····	61
(三) RE-279型射气仪·····	65
(四) 美国新研制的两种射气仪·····	69
第三章 α 径迹蚀刻法的发展·····	70
一、概况·····	70
二、工作方法和技术·····	72
(一) 方法的应用前提·····	72
(二) 工作前的准备·····	72
(三) 径迹探孔(坑)的布置和测点的定位·····	74
(四) 照射时间和探测器的取回与处理·····	76
(五) 径迹找矿的主要工具·····	79
三、 α 径迹蚀刻找矿的某些新进展·····	79
(一) 探测装置埋设方法的改进·····	79
(二) 露头地区的径迹蚀刻测量·····	79
(三) 雪层径迹蚀刻测量·····	79
(四) 湖底和沼泽地的径迹测量·····	80
(五) 沙漠地区的径迹蚀刻测量·····	80
(六) 钻孔径迹蚀刻测量·····	81
(七) 水中径迹蚀刻测量·····	82
(八) 河流底沉积物和粉末样品的径迹蚀刻测量·····	82
(九) 新型的固体径迹探测器(第二代)·····	82
(十) 不受湿度影响的氡探测器·····	83
(十一) 特殊环境下的径迹测量方法·····	84
(十二) 径迹探测系统的改进·····	86
四、数据处理和测量结果的推断解释·····	86
(一) 本底和异常·····	87
(二) 矿化赋存深度和覆盖层渗透性·····	87

(三) 潜水面对径迹蚀刻测量的影响·····	89
(四) 钍射气的影响和排除·····	89
(五) 径迹蚀刻法的定量测量和归一化测量·····	93
(六) 径迹蚀刻法与其它方法的联合应用和解释·····	95
五、径迹蚀刻测量的展望·····	96
(一) 寻找地热资源·····	97
(二) 预报地震·····	97
(三) 寻找非放射性矿种·····	98
(四) 在安全防护和地质工作中的若干应用·····	99
(五) 裂变径迹法的应用·····	99
第四章 热释光找矿方法 ·····	103
一、 α 热释光法·····	103
(一) α 热释光法的一般原理·····	103
(二) Alpha-2 型探杯·····	106
(三) Alpha-2型探杯的野外试验结果·····	107
(四) α 热释光测量的野外工作方法·····	109
二、 γ 热释光法·····	111
三、天然热释光法·····	112
四、热释光剂量计的材料·····	113
五、热释光测量仪器·····	115
第五章 活性炭吸附测量方法 ·····	119
一、活性炭的主要特性及其吸附机制问题·····	120
二、瑞典用的活性炭法及仪器·····	121
三、用装有活性炭的气体防毒面具过滤器测量氡(美国)	
·····	123
(一) 工作方法·····	124
(二) 影响过滤器使用性能的因素·····	126
四、装有活性炭的气体捕集器方法·····	128
五、南非的活性炭测量系统·····	133
(一) 研究成果及改进·····	135

(二) 测量仪器	138
(三) 工作方法	139
(四) 比较研究的实例	144
(五) 铀矿勘探中应用活性炭法的注意事项	151
(六) 活性炭法的其它用途	152
第六章 硅半导体 α 仪测量	154
一、硅半导体 α 仪找矿方法的基本原理和工作方法	154
二、方法的干扰因素	157
三、方法试验	159
四、 α 仪及其数据处理系统	165
(一) 400型 α 仪(alpha-Meter-400)	165
(二) MERAC-II型和MERAC-IV型 α 仪	168
(三) α 仪的数据处理系统	169
第七章 钋-210找铀矿方法	171
一、钋同位素在自然界中的分布	172
(一) 钋同位素的来源	172
(二) 钋同位素的分布	172
(三) 钋-210在自然界的分布	174
二、钋同位素的性质	177
(一) 钋同位素的核物理性质	177
(二) 钋同位素的化学性质	177
三、地表和钻孔中钋-210 测量方法	179
(一) 地表钋-210测量法	179
(二) 钻孔钋-210测量法	183
第八章 α 卡聚集器法	189
一、方法研究	189
二、野外试验结果	192
三、与其它方法的比较	197
四、野外工作方法	198
五、钍射气影响的消除	200

六、室内样品测量和异常解释	202
(一) 土壤样品的室内 α 卡测量	202
(二) 室内 α 卡测量结果的解释	203
七、 α 卡法的测量仪器	205
第九章 氦气测量	208
一、氦法找矿的理论基础	208
(一) 氦的成因	208
(二) 氦在地壳中的分布	210
二、氦的取样方法和分析技术	212
(一) 野外土壤气取样	212
(二) 地下水取样	214
(三) 土壤取样	217
(四) 脱气	218
(五) 样品分析	219
三、氦法铀矿普查实例	221
(一) 美国的土壤气测氦实例	221
(二) 加拿大的水中测氦实例	223
(三) 美国的氦法踏勘测量实例	223
第十章 汞蒸气法及其它找铀矿方法	227
一、汞蒸气找铀矿方法	227
(一) 基本原理	227
(二) 汞的基本特性	229
(三) 汞、氦及有关元素的原生分散	229
(四) 在铀矿床中试验的基本数据和看法	232
(五) 汞蒸气分析仪器	233
(六) 应用实例	235
二、其它气体找铀矿方法	239
第十一章 氦及其子体测量方法的若干应用	242
一、寻找放射性矿床	242
(一) 美国	243

(二) 澳大利亚	245
(三) 英国	245
(四) 加拿大及其它国家	246
二、普查非放射性矿床和进行辅助地质填图	248
三、普查石油和天然气	252
四、地震预报	253
(一) 美国纽约州的兰山湖地区	254
(二) 苏联塔什干地震的前后	254
(三) 日本稻取地区的地震断层	254
(四) 用径迹蚀刻法研究美国圣安德列斯断层的地震活动	255

第一章 氡的若干性质及其找矿方法

一、放射性气体普查方法的分类和发展现状

气体测量涉及的理论、测量仪器和方法相当广泛而又复杂,因而本书仅介绍与找铀矿有关的一些问题。为了叙述的方便和了解这些方法之间的相互联系,我们将找铀矿的主要的气体测量方法按物理性质分成两大类,即放射性气体普查方法和非放射性气体普查方法。其中放射性测量方法又可分为微分(瞬时)测量方法和积分(累积)测量方法。按测量的对象又可分成四组(见表1-1)。

必须指出,严格说来气体测量方法应划为地球化学方法范畴,因而又有另一种分类法,这里从略。

绝大部分直接的放射性找铀矿方法,主要是建立在氡及其子体性质的基础上的。因而熟悉和进一步深入研究氡及其子体的性质、它们之间的关系以及同氡以前的母元素,特别是起始元素的联系等问题,对完善和发展放射性测量方法,特别是较合理地解释放射性异常、缩短找矿周期和提高找矿效率,都具有重要的现实意义。这是因为,在铀系中,氡及其子体的 α 、 β 和 γ 相对强度比重较大,其中: α 占57.1%, β 占59%, γ 占98%。所以大多数天然放射性找矿方法的基本原理均建立在氡及其子体性质之上(在实际工作中还有其它的分类)。例如,从空中到地面直至地下工程中所有的伽玛测量均是测量和研究 ^{214}Pb 和 ^{214}Bi 的 γ 强度变化和活动规律性以及它们与地下可能存在的铀矿体(矿化)的关系,并以此来达到铀矿的普查、勘探和开采的目的;又如,存在有五十年之久的抽取土壤气进行瞬时测量氡的找铀矿方法即是直接测量氡的,等等。

表 1-1 几种主要的气体测量方法的分类

测量的主要对象 测量方法 类别		射气 (主要是氡-222)	氡的短寿命子体	氡的长寿命子体	氡后的稳定同位素
放射性气体及其子体的测量方法	微分 (瞬时) 测量	氡的常规 (瞬时) 测量方法, 其中主要包括金箔静电计法、静电计电离室法和硫化锌闪烁室法等	活性炭(抽气)·吸附法*, α 卡法* 以及大部分的地面、井下、水下、地下工程和空中的放射性测量方法	铅-210法** 钋-210法**	铅同位素法**
	积分测量	α 径迹蚀刻法 α 仪法 热释光法			
非放射性气体的测量方法	氡气测量法 (氡气主要来自铀钍系列衰变出的 α 粒子。这些粒子当其能量耗尽时, 捕获了两个电子而形成氡) 汞蒸气测量法 甲烷测量法, 二氧化碳测量法及氧气测量法等				

• 也能用于积分 (累积) 测量
• 本身为氡后衰变的累积产物

近十年来,有不少人在大量而系统地从事对氡的短寿命子体和长寿命子体衰变的 α 射线的研究,并以此达到找铀矿的目的且取得了成效。

在自然界中,铀系总是与钍系共生的,但铀的量很少,仅占0.7%,其中 α 射线亦只占4.6%,因此在放射性的找矿中一般可以不予考虑。钍在找铀矿过程中一般影响也不大,只有当钍与铀伴生的含量超过 $n \times 10^{-5}$ 时才另作考虑。

我们将介绍的十来种方法(结合表1-1)概括起来有如下几类:

1. 氡的瞬时测量方法或微分测量法,有时也称为氡的常规测量,它包括过去使用的金箔静电计法和静电计电离室法,以及近十年来使用的硫化锌闪烁室法和活性炭抽气吸附测量法。

2. 氡的累积测量方法或积分测量法,它包括径迹蚀刻法、热释光法以及 α 仪法和非抽气的活性炭法等。径迹蚀刻法和 α 仪法主要是通过测量氡及其子体衰变的 α 粒子来达到找铀矿的目的。非抽气活性炭法主要是通过高效率地吸附氡,然后测量氡子体衰变的 α 、 β 或者 γ 射线的强度来达到找铀矿的目的。在实际工作中,以测量氡子体的 β 和 γ 射线的强度为最多。

3. 累积的氡子体测量方法,主要是测量氡经过长期衰变而累积起来的子体(如 ^{210}Pb)和稳定同位素(如 ^{206}Pb)等。后者自五十年代就开始应用,可能由于仪器等原因,至今未能广泛推广,前者是七十年代发展起来的。

4. 非放射性气体法,主要指的是氮法和汞蒸气法。这两种方法以及上述的不少方法,从原理上说均可划为地球化学方法。有的将氮法也划为放射性测量方法。

5. 其它方法中有铅同位素法、氧气法、二氧化碳法和甲烷法等。前者应为地球化学方法,铅同位素与氡又有联系,是氡的稳定衰变子体,所以也是氡子体法,后三种方法应属气体地球化学方法。

铀系列的氡(^{222}Rn)子体中,短寿命子体有8个,即 ^{218}Rn ,

^{218}At 、 ^{218}Po 、 ^{214}Po 、 ^{214}Bi 、 ^{214}Pb 、 ^{210}Tl 和 ^{206}Tl 。其中 ^{218}Rn 、 ^{218}At 和 ^{206}Tl 在自然界中存在甚少,对一般的找铀矿不起作用。 ^{214}Bi 、 ^{214}Pb 和 ^{210}Tl 是主要的 γ 辐射体,特别是前两个核素占铀系总 γ 强度辐射的98%,这里不作讨论。余下的 ^{218}Po 和 ^{214}Po 是氡的短寿命子体中主要的 α 放射体(占32%),它们是下面我们要介绍的所谓的 α 卡法找矿原理的主要依据。

氡后的长寿命子体只有3个,即 ^{210}Po 、 ^{210}Bi 和 ^{210}Pb (在铀系列中和钍系列中不存在长寿命子体)。核素 ^{210}Pb 半衰期22.3年,是很弱(0.4%)的 β 放射体,在实际工作中应用尚不多。 ^{210}Bi 半衰期5天,是重要的 β 放射体,在实际工作中可以被考虑来作为测量的对象。用来作为找矿的测量对象的主要是 ^{210}Po ,它是重要的 α 放射体(12.4%)。下面我们所要介绍的氡的长寿命子体找矿方法主要是指 ^{210}Po 方法。

找铀矿的气体普查方法已有数十年历史。放射性气体的找铀矿方法仍然是当前较为有效的方法。七十年代以来,氡及其子体的找铀矿普查方法进入了一个新的发展阶段。正如表1-1所列,新出现的或者发展较快的有十来种方法,应用普遍,地质效果明显,颇受找矿人员的欢迎。例如,在加拿大,氡法的发展,特别是用于有效的找矿生产中,仅仅有十几年历史,但是相应的仪器已有了相当大的发展,与此相类似的有美国、英国和澳大利亚。对氡的迁移机制的认识有了一些发展,提出了一些氡的迁移机制的新设想,如抽吸作用、热对流作用、搬运作用等等。苏联和东欧一些国家,氡法发展较早,有五十年的历史,一直是找矿中必不可少的一种方法,在基础理论方面的研究也较早。

二、氡及其找矿方法的性质和概念

为叙述的方便并能及时地用于生产,我们在这一节里简要地介绍有关氡及其找矿方法的若干性质和概念,

(一) 氡的性质^[2、3、4]

氡有三个同位素，即 ^{222}Rn (Rn)、 ^{219}Rn (An) 和 ^{220}Rn (Tn)。它们分别为天然铀系、钍系和釷系的成员，属周期表零族惰性元素，呈气体状态。一个时期以来，在文献中^[1]还报导有第四个氡的同位素 ^{218}Rn 的存在。但由于丰度很小($<10^{-4}\%$)，半衰期也很短(0.03秒)，在找矿实际工作中几乎不起任何作用，因而在文献资料上往往不予引用。

1. 氡同位素的辐射性质 (表1-2)

表 1-2 氡同位素的辐射性质

同位素	半衰期, T	衰变常数, 秒 ⁻¹	射 线		
			类型	能量, MeV	在空气中的射程, 厘米
^{222}Rn (Rn)	3.825天	2.097×10^{-6}	α	5.481	4.04
^{220}Rn (Tn)	54.5秒	1.272×10^{-2}	α	6.287	4.99
^{219}Rn (An)	3.92秒	0.1768	α	6.423 (7.5%) 6.527 (0.1%) 6.551 (11.5%) 6.817 (81.0%)	5.56

2. 氡的物理常数

临界温度	+ 104.4°C;
临界压力	6323千牛/米 ²
气态时的密度	9.729×10^{-3} 克/厘米 ³ ;
液态时的密度	5.7克/厘米 ³ ;
沸腾温度	- 65°C;
固化温度	- 71°C;
在空气中的扩散系数	0.105厘米 ² /秒;
一居里氡的体积	0.66毫米 ³

3. 射气的溶解性

放射性气体能以不同的速度溶解于不同的液体中，其中尤为显著者是溶解于各种油脂和煤油中。根据格林定律，液体中的射气浓度 ($\text{Rn}_{\text{液}}/V_{\text{液}}$) 和气体的射气浓度 ($\text{Rn}_{\text{气}}/V_{\text{气}}$) 成正比，即：

$$\frac{R_{n液}}{V_{液}} = \omega \frac{R_{n气}}{V_{气}} \quad (1-1)$$

式中 ω ——射气的溶解系数；

$V_{液}$ 和 $V_{气}$ ——相应为液体和气体的体积；

$R_{n液}$ 和 $R_{n气}$ ——相应为液体和气体中射气浓度。

氦在水中的溶解系数同温度的关系更为密切，有下式：

$$\omega = 0.1057 + 0.405 \times e^{-0.0502t} \quad (1-2)$$

式中 t ——温度 $^{\circ}\text{C}$ 。

根据式 (1-2) 计算出的氦在水中的溶解系数 ω 同温度 t 的关系列于表1-3。

表 1-3 溶解系数同温度的关系

$t, ^{\circ}\text{C}$	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
ω	0.510	0.420	0.351	0.254	0.195	0.159	0.138	0.125	0.117	0.112	0.110	0.108

必须说明，随着水中盐浓度的增加，溶解系数（有时亦称分布系数）逐步降低。

氦在有机液体中的溶解系数列于表1-4。

表 1-4 有机液体中的溶解系数

液 体	ω
橄榄油和其它类似的油	28
凡士林油，煤油	10

4. 固体物质对射气的吸附

所有固体均在不同程度上吸附射气，尤以煤、橡胶、蜡、石蜡最为突出，其中吸附能力最强的是活性炭，因为它有大体积的微孔隙，所以其总表面积也最大。有人^[2]指出，用2.5克活性炭能全部吸附 $n \times 10^{-9} - n \times 10^{-10}$ 居里氦。在岩石中粘土是很好的氦的吸附剂。金属是很弱的氦的吸附剂，玻璃更弱。低温时氦易