

α 测氦法在地震流体监测中的可行性研究*

吴建平¹, 周健斌¹, 丁卫撑¹, 苏辉², 张振勋², 李朝明³, 郑国庆⁴

(1. 成都理工大学 核技术与自动化工程学院 四川省地学核技术重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 四川省地震局 西昌地震中心站, 四川 西昌 615000; 3. 中国地震局 滇西地震预报实验场, 云南 大理 671000; 4. 云南省澜沧县地震局, 云南 澜沧 665600)

摘要: KJD-2000R α 谱仪是采用半导体探测器、利用核谱测量技术与嵌入式技术研制的新型测氦仪, 是一种简便快速的测量氦气及氦子体的仪器。该仪器利用静电收集氦衰变子体进行测量, 体积小, 灵敏度高, 操作方便, 还可进行连续测氦与瞬时测氦以及 α 谱的测量。将该仪器用于地震流体监测, 并总结出了测量在理论认识 and 实际应用中存在的问题, 讨论了氦监测的原理和实践经验, 以有助于促进氦测量方法的发展。

关键词: 测氦; α 谱仪; 自动监测; 地震前兆

中图分类号: P315.62

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2011)04-0470-06

0 引言

氦是地壳中放射性铀、镭和钍的蜕变产物, 是一种惰性气体。地壳中含有放射性元素的岩石总是不断地向四周扩散氦气, 使得空气和地下水介质中含有不同浓度的氦气。强烈地震前, 地应力增强, 氦气不仅运移速度增强, 浓度也会发生异常变化。如果地下含水层在地应力作用下发生形变, 就会加速地下水的运动, 增强氦气的运移和扩散作用, 引起氦气浓度的增加, 所以测定地下水中氦气的浓度异常变化可作为一种地震前兆的观测方法, 这是采用地球化学方法预报地震的重要方法之一。

放射性气体氦能溶解于水或有机质, 在地下水的作下, 氦气可以被带到较远的地方。它在地质环境中除了可以气态方式迁移外, 还以溶解态伴随地下水和土壤水迁移, 具有很强的迁移能力。但它的化学性质稳定, 作为一种示踪元素被广泛应用, 如活断层及隐伏断层的确定、油气的探寻、深层地下水形成温度的示踪、地缝的探测、地震监测等等。

地震灾害是人类面临的一种巨大的威胁, 地震前兆观测的可靠性和及时性至关重要。随着社

会的进步和科技的发展, 地震工作者对地震前兆观测的实时性、准确性提出了更高的要求。目前我国地震台网的流体监测内容主要包括水位、水温、水氦、水质、气体(氦、汞)等, 而水中氦射气的异常可以反映地下含水层随地应力变化的情况, 是否有规律可循尚未见报道, 但观测氦气的变化和异常可作为地震预测的参考参数之一已是不争的事实。当前我国地震台网已将测量井水中的氦含量变化作为地震前兆的一个重要测项。

1 α 测氦预测地震的理论依据

氦是放射性同位素衰变时放出的 α 射线, 放射性气体测量主要就是通过测量这些射线进行的。位于铀系中的氦(^{222}Rn)是一种放射性惰性气体, 由镭经过一系列衰变产生。氦在自然界中有三种放射性同位素(^{219}Rn 、 ^{220}Rn 、 ^{222}Rn), 其中 ^{222}Rn 半衰期较长($T=3.825\text{ d}$), ^{220}Rn 半衰期较短($T=55.65\text{ s}$), ^{219}Rn 半衰期 Z 最短($T=3.96\text{ s}$)。不同核素半衰期有明显区别, 这也是定性测量的根据。氦的同位素按下述定律由镭同位素积累:

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_1}{\lambda_2 - \lambda_1} [\exp(-\lambda_1 t) - \exp(-\lambda_2 t)]. \quad (1)$$

式中， N_2 为子体的原子数目； N_1 为母体的初始原子数目； λ_1 、 λ_2 为相应母体和子体物质的衰变常数； t 是第二种物质（子体）的积累时间。

考虑氡的所有同位素 $\lambda_1 \leq \lambda_2$ ，式（1）可化简为更简单的形式：

$$N_2 = \frac{\lambda_1 N_1}{\lambda_2} [1 - \exp(-\lambda_2 t)]. \tag{2}$$

由镭（Ra）形成的氡含量（单位：Bq）可由下式计算：

$$C_{Rn} = C_{Ra} [1 - \exp(-\lambda_{Rn} t)]. \tag{3}$$

地下水中的氡是以溶解氡和游离自由氡形式存在的。当温度和压力条件发生变化时氡射气的动态平衡状态将被破坏，氡的含量就发生变化。根据格林定律，液体中的放射性浓度（ $Rn_{液}/V_{液}$ ）和气体的放射性浓度（ $Rn_{气}/V_{气}$ ）成正比，即：

$$\frac{Rn_{液}}{V_{液}} = \omega \frac{Rn_{气}}{V_{气}}. \tag{4}$$

式中， ω 为射气的溶解系数； $V_{液}$ 、 $V_{气}$ 分别为液体和气体的体积； $Rn_{液}$ 、 $Rn_{气}$ 分别为液体和气体中氡的浓度。

氡及其子体和母体多为 α 辐射体，它们放出的 α 粒子减速后成为⁴He，它能与氡及其子体和母体形成复合团簇。氡很轻，当其复合团簇浮力大于重力时，团簇便会自行上升，成为氡及其子体向上运移的内因。氡射气的迁移机制是 α 方法测量结果解释的重要依据之一，地层中的 Ra（²²⁶Ra、²²⁴Ra、²²³Ra）不断衰变产生射气，部分可以从地层中析出。自由氡形成后就将进行迁移：由于扩散作用射气会从浓度高的区域向浓度低的区域迁移；对流作用使射气从气压高的地方向气压低的地方移动；地热梯度使地下氡运动气体向冷的地方移动；氡能溶解在水中，地下水对氡起到迁移和搬运作用；氡是一种微量气态元素，由于伴生气体的压力作用，地壳岩石应力、应变发生变化时，氡射气可以在其它浓度较大的土壤气体（如氧、氮、二氧化碳等）扩散压力推动下向地表快速迁移。

氡从水体、土壤、岩石等析出到空气中。氡

在地下水中以自由氡、溶解氡、逸出氡的形式存在，溶解于地下水的氡称溶解氡，自地下水分离出来的氡称逸出氡。当地下水向浅部运移时压力会减小，溶解于水中的氡也会从地下水中逸出，形成逸出氡。地下水是氡迁移的载体，氡射气随着地下水运移而迁移。

2 测氦方法讨论

测量氡的仪器和方法有很多种，测氡仪如：硫化锌（银）闪烁室探测器，固体核径迹探测器（SSNTD 等）。测氡方法有：静电计法、活性炭吸附法、径迹蚀刻法、热释电法、α-聚集器法、半导体探测器能谱测量法，目前稳定性较好的有气体电离室等。我国地震台网地下流体氡的观测现主要采用模拟和数字两种方式，数字仪、模拟仪的探测器性能基本相同，探测器均为硫化锌（银）闪烁室，性能指标变化不大。这种仪器探测效率较高、灵敏度好，但是仪器能量分辨能力较差，测量成本较高。其中模拟测氡仪器操作方法繁琐，测量时间长，产出数据量少，数据处理还需根据取样时间进行人工计算，测量的及时性不强，对操作人员的要求较高，易出现人为误差。数字式测氡仪内部嵌入微处理器，测量结果以数字形式输出，数字仪是对模拟仪器的采样方式进行了改进，取气装置为一密闭容器，仪器自动定时抽气采样测量。

2.1 测氡仪现状

目前，我国地震台网后端的数据处理和传输已实现数字化和网络化，数据实时性非常好，但仪器前端传感器的灵敏度和稳定性有待提高。笔者对四川省地震局西昌地震中心站水化观测井（川 32 井）进行了水氡观测测量实验，对现有氡测量系统提出如下意见：

（1）模拟与数字两个测量系统是采用相同单位进行（Bq/L）描述的，但对同一个水样的氡含量测量结果相差却很大。FD-125 模拟测氡仪器测量结果在 23 ~ 25（Bq/L）范围内，SD-3A 自动测氡仪给出的测量含量结果却是 80 ~ 110 Bq/L。尽管测量方法不同，但两者在物理量上应该有相同或接近的含量值（表 1）。我国目前没有对水氡的刻度标准，另外，不同温度、压力、密度、材

质等都会影响氡析出率，即使换算出浓度也有很大不确定度。在地震监测中重要的是监测到异常变化，因此可采用相对测量方法。

(2) SD-3A 数字式测氡仪通过主机控制，脱气装置是利用水流落差溅起的水花在密闭容器中产生逸出氡积累，系统每小时抽取一次。仪器测量单位是 Bq/L，而实际现场井水流量约为 100 mL/s,按实际水流量为 360 L/h，测量单位是否标准？测量系统的采样装置是动态的，井水中的氡析出多少是一个动态变化过程，是完全析出，

还是部分析出？每个时刻水样的氡析出情况都不相同，所以上述问题都需要加以考虑。

(3) SD-3A 脱气装置是一个密闭的容器，流动井水产生的逸出氡不断在内部积累，容器中不断有新的母体和子体衰变，仪器定时脱气析出的逸出氡产生的放射性衰变将无法达到动态平衡。容器结构使大量逸出氡不断累积很快达到饱和，造成高的本底，在响应低异常时测量结果会被本底高浓度值湮灭，若要对氡异常进行及时快速准确的预报，这一装置就需要改进。

表 1 西昌地震中心站井水氡测量数据
Tab. 1 Data of water radon in the well at Xichang Center Station

日期	FD-125 测氡含量	SD-3A 数字测氡仪测氡含量/(Bq/L)，每小时取样
2010-3-19	24.2 (Bq/L)	85.5; 87.0; 88.8; 90.9; 91.1; 92.2; 96.3; 96.1; 97.8; 93.7; 95.1; 98.6; 95.2; 95.4; 99.2; 96.8; 98.3; 99.3; 95.8; 94.7; 95.2; 93.1; 96.3; 97.6
2010-3-20	24.1 (Bq/L)	94.4; 95.9; 94.2; 96.4; 95.8; 94.4; 97.9; 95.0; 94.2; 97.7; 96.2; 97.2; 96.6; 97.8; 98.3; 97.7; 97.9; 96.7; 95.9; 93.6; 95.2; 92.4; 95.2
2010-3-21	23.7 (Bq/L)	81.2; 76.1; 78.3; 81.0; 86.6; 91.5; 93.4; 92.2; 95.2; 96.0; 95.3; 94.1; 94.8; 94.2; 94.3; 96.7; 96.6; 95.2; 88.2; 83.7; 85.5; 87.7; 84.7
2010-3-22	24.3 (Bq/L)	85.1; 88.4; 89.1; 90.0; 88.7; 89.0; 89.3; 89.1; 90.4; 82.3; 81.4; 75.4; 72.6; 79.3; 81.5; 85.2; 85.2; 85.8; 88.0; 87.8; 85.7; 86.0; 84.6; 85.8
2010-3-23	24.9 (Bq/L)	85.6; 86.8; 85.6; 87.5; 85.4; 85.7; 86.0; 89.1; 90.3; 90.6; 90.9; 89.4; 88.7; 88.3; 88.7; 88.6; 84.4; 86.4; 83.5; 86.5; 86.6; 87.0; 85.0; 88.2

2.2 KJD-2000R 测氡仪

KJD-2000R 测氡仪采用 α 测氡方法，仪器为离子注入式金硅面垒型 PIN 半导体 α 粒子探测器，探测器结构原理如图 1 所示。该方法优点是灵敏度高、分辨率好，可通过检测每个 α 粒子的能量鉴别出各个核素释放出的 α 粒子，能清晰显示单一的能量通道计数值，即 α 能谱测定法。仪器经中国测试研究院辐射防护与公共安全检测室进行标定。

- 仪器的主要技术指标如下：
- 测量范围 4 ~ 400 000 Bq/m³；灵敏度 2.5 count（计数）· min⁻¹/（Bq/L）；
- 本底小于 10 count（计数）· s⁻¹；校验：正常情况年漂移小于 2%；
- 工作环境：极限温度：0℃ ~ 50℃；相对湿度：5% ~ 99% 的无凝结水；

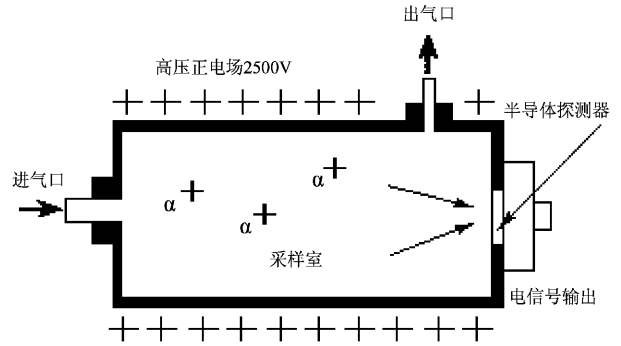


图 1 射气采样室结构原理示意图
Fig. 1 Structure of radon sampling chamber

- 气泵流量：1 L/min；测量时间：空气 3 600 s；
- 土壤 300 s；标定：标准氡室；
- 数据存储：1000 个氡浓度测量谱数据；接口
- 标准：有线串行接口 RS-233；
- 电源：DC（直流）— 12V/7Ah（可充电电

池); 电池: 7Ah 可连续使用 10 h。

KJD-2000R α 测氡仪为便携式智能仪器, 可自动计算读取壤氡或水氡浓度值。水氡测量时需取井水样, 由仪器自带的真空泵将水中的溶解氡脱离出来析出逸出氡。仪器气体循环回路将逸出氡的 α 粒子送入探测器, 通过测量某个能量 α 衰变子体的计数值测定氡气的浓度。实测氡能谱曲线如图 2 所示。

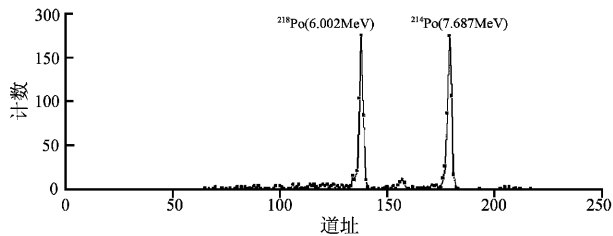


图 2 实测氡能谱图

Fig. 2 Alpha particle spectroscopy

根据放射性衰变规律可知: ^{222}Rn 衰变后形成带正电的 ^{218}Po , 在内部电场作用下粘附在探测器上, 当 ^{218}Po 衰变时, 放出的 α 粒子有 50% 的可能进入探测器, 形成与 α 粒子能量成正比的电信号。 ^{222}Rn 直接释放出 5.481 Mev 的 α 粒子将不出现在能谱图上, 因为 ^{222}Rn 是惰性的, 不会被吸附在探测器表面, 当其衰变为 ^{218}Po 时带正电, 才会被吸附到探测器表面。 ^{222}Rn 子体中 α 辐射体主要为: ^{218}Po (5.998 MeV), ^{214}Bi (5.268、5.448、5.512 MeV), ^{214}Po (7.687 MeV); ^{210}Po (5.305 MeV), 其中 ^{218}Po 的峰 (5.998 MeV, 半衰期 3.05 min) 与 ^{214}Po (7.687 MeV, 半衰期很短), 但母体 ^{214}Pb (半衰期为 26.8 min) 的能量谱峰较明显。仪器开始测量几分钟后, 可看到 5.998 MeV 能量位置开始计数, 这是 ^{222}Rn 衰变成 ^{218}Po 而产生的。最初 5 min 计数值增加速度较快, 10 min 后 ^{218}Po 达到平衡。实际测量计数时间选用 300 s, 因为 10 min 后 ^{222}Rn 的衰变及其子体 ^{218}Po 达到稳定值, 然后取第三次数据作实测值。此时看到 7.687 MeV 道址附近出现计数, 刚开始时只有少数但在其后的 1 ~ 2 h 中会越来越多。经过 3 h 或更长时间后, 子体达到动态平衡。谱线上将出现第二个明显的特征峰, 计数率也基本保持稳定。现场测量记录 ^{218}Po 的谱峰面积总的计数率, 自动计算氡的浓度, 测量速度

快、效率高。

3 α 测氡仪器实验对比分析

为对比验证测氡仪器的性能, 笔者在云南省地震局大力支持下, 于 2011 年 2 月至 5 月分别在云南省地震局下关水化站和澜沧县地震局观测站各架设一台 KJD-2000R 测氡仪, 现场进行水氡观测。图 3、图 4 分别为下关水化站温泉和澜沧县勐朗温泉测量结果, 对比 KJD-2000R 与台站已有的 FD-125、FD-105K 测氡仪测量的氡浓度数据, 得到以下结果:

- (1) 不同测量系统的氡浓度值差别较大;
- (2) 数据的变化主要是放射性统计涨落规律, 无地震异常变化;
- (3) 氡浓度变化趋势基本相同, 仪器稳定性差异小。

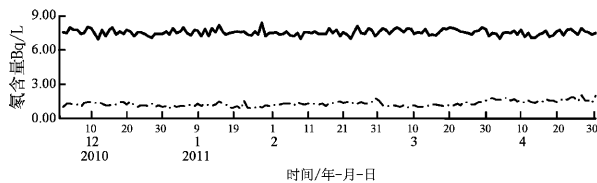


图 3 下关水化站温泉水氡对比观测日值图

Fig. 3 Chart of water radon in the hot spring at Xiaguan spot

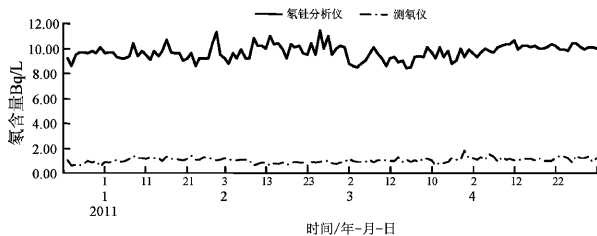


图 4 澜沧县勐朗温泉水氡对比观测日值图

Fig. 4 Chart of water radon in the hot spring at Lancang spot

笔者认为: 仪器标定标准和计算方法不同, 测量结果也就不同, 仪器存在系统差别; 不同仪器的探测器性能不同, FD-125 为闪烁探测器, 探测窗口大, 探测效率高, FD-105K 为气体探测器, 灵敏度高, 并且以所有参加衰变的粒子和衰变时间做换算因子, 因而获得大计数值; α 测氡仪

半导体探测器能量分辨率好,可分辨出不同核素的谱线,测量时检测 ^{222}Rn 衰变为 ^{218}Po 核素产生的粒子数目,氡浓度严格按照单位样品核素的衰变数计算,但没有计算误差和人为误差,定量分析精度高。测量装置本底为空气的本底,本底计数非常小,但探测器窗口较小,因此计数率低。2011年3月份的两次地震(3月10日云南盈江发生5.8级地震,震中距离澜沧230 km,距离下关255 km;3月24日缅甸发生7.2级地震,震中距离澜沧196 km)因震中距观测点较远,观测值数据变化较小,无法确定为异常值。

如何对水氡异常进行监测还有待于进一步探讨,如:一天只测量一次数据,这种数据是否具有代表性?井氡异常是否具备时间短暂性?放射性测量的统计涨落误差;总量测量反映最近4小时内的氡信息,而 α 能谱测量反映半小时内的氡信息等等。

4 结论与改进方案

KJD-2000R 测氡仪为微机嵌入式智能仪器,仪器轻便、稳定、可靠,操作简单,使用方便,测量时间短,无需计算可直接读取浓度值。金硅面垒型半导体探测器探测分辨率高、稳定性好,探测方法是利用氡子体的3 min α 衰减,没有其他放射源或钍子体猝发 α 衰减的干扰。硅检测器具有对震动和噪音不敏感、背景读数低的优点,可应用于各种恶劣现场监测的环境工作。实验证明, α 测氡仪用于地震台站的井水监测可替代模拟测氡仪器,可以进一步提高观测效率,如增加探测器灵敏面积,增加气体收集腔体积,增加氡气子体收集的高压电场等。若要替代数字式测氡仪器,则需要对集气装置进行完善。笔者提出的脱气装置的具体改进方案如图5所示。对脱气装置可进行自动化设计,安装进水阀和出水阀,由液位传感器检测脱气瓶水位,系统在每完成一次测量后自

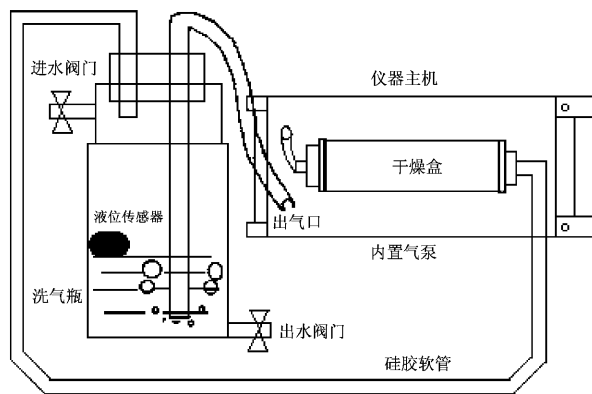


图5 测氡仪脱气装置的具体改进方案示意图

Fig. 5 Design of automatic gas gathering equipment

动打开出水阀门,当传感器检测到最低液位时关闭出水阀门,同时打开进水阀门,液位传感器检测到液体达到指定液位后自动关闭进水阀门,定时器定时开启测量系统。系统控制阀门完成液体、气体的进入和排放,从而较好地解决脱气装置的本底累积问题。关键是防潮措施需要进一步改进,因为数字仪器是连续观测,潮湿可能是影响观测效果的重要原因。

参考文献:

- 成都地质学院三系. 1978. 放射性勘探方法[M]. 北京:原子能出版社.
- 丁卫撑,王义,李元景,等. 2010. 基于扩散累积原理的一种空气测氡仪研制[J]. 核电子学与探测技术,30(3):422-425.
- 贾文懿,方方,周蓉生,等. 1999. 氡及其子体向上运移的内因与团簇现象[J]. 成都理工大学学报,26(2):171-175.
- 马志飞,刘洪福,张新军. 2008. 地气测量和射气测量的探测机理对比研究[J]. 华北地震科学,26(2):53-56.
- 王喜元,吕磊,朱立. 2006. 中国土壤氡概况[M]. 北京:科学出版社.
- 周建斌,任家富,童运福. 2005. 一种新型测氡仪- α 谱仪的研制. 核电子学与探测技术[J]. 核电子学与探测技术,25(6):701-703.
- 周蓉生,И. А. 瓦冈诺夫. 1994. 核方法原理及应用[M]. 北京:地质出版社.

Feasibility Study of α Radon Measurement Technique in the Seismic Underground Fluid

WU Jian-ping¹, ZHOU Jian-bin¹, DING Wei-cheng¹, SU Hui²,
ZHANG Zhen-xun², LI Chao-ming³, ZHENG Guo-qing⁴

- (1. *Geology Nuclear Technology Key Laboratory of Sichuan Province, College of Applied Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 650059, Sichuan, China*)
(2. *Xichang Seismic Center, Earthquake Administration of Sichuan Province, Xichang 615000, Sichuan, China*)
(3. *The Western Yunnan Earthquake Prediction Area, CEA, Dali 671000, Yunnan, China*)
(4. *Earthquake Administration of Lancang County, Lancang 665600, Yunnan, China*)

Abstract

A new alpha spectrometer, model KJD-2000R with the semiconductor, was manufactured with the technology of the nuclear spectrum acquisition system and embedded system. The spectrometer works based on the electrostatic-collection method. It has high sensitivity, small volume and easy to operate. The spectrometer can measure radon and radon daughters in a simple and fast way. It can be applied to the continuous measurement, instantaneous measurement, α -spectrum measurement and the underground fluid monitoring.

Key words: radon measurement; alpha spectrometer; automatic monitoring; earthquake precursor