

水压致裂过程中氦气的反应

李 彤 起

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

本文介绍了在福建南靖汤坑ZK10钻孔进行的水压致裂实验中氦气的反应。氦气随压力的增加而变化,如ZK12钻孔水氦变化幅度分别为15%、13.5%、7.5%;1°测点土壤气氦含量变幅为219%和186%;4°测点土壤气氦变幅为-110%和-197%。

前 言

1985年11月25日~12月20日在福建省南靖县汤坑进行了水压致裂水文地球化学效应实验观测。以距被压裂钻孔(ZK10)10米处的ZK12钻孔(孔深628.9米,水温71.5℃,连续昼夜抽水)为观测孔,安装JZD-1型自动测氦仪等仪器,连续观测压裂过程中地下水 中氦含量(简称水氦)的变化。另外,在被压裂钻孔(ZK10)周围布设八个测点,用FD-3017RaA测氦仪观测土壤气氦的效应。本文介绍了实验过程中水氦及土壤气氦的反应。

一、实验区地质构造及水文地质条件概述

实验区设在福建省南靖县汤坑村,位于闽南山区一个出现地热异常的小盆地内,盆地面积约5平方公里。盆地周边分布有上侏罗系兜岭群火山岩系,盆地内厚约10—16米的第四系冲洪积砂粘土、砂、砾卵石层直接覆盖在燕山期花岗闪长岩上。花岗闪长岩侵入于兜岭群火山岩系中(图1)。实验区内分布有四条断裂(图1),其中走向N76°W的张性兼压扭性断裂(F₁)控制区内热水出露。断裂带宽200—300米,由西往东逐渐变宽,倾向北东,倾角65°

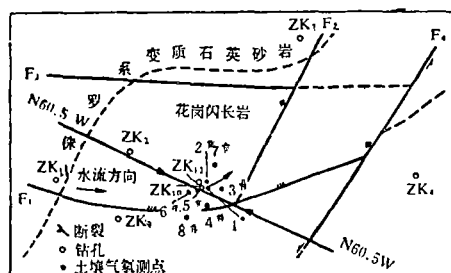


图1 实验场区地质构造及测点位置图
Fig.1 Geological map and location of observation point of hydrogeological effect of hydrofracturing of experimental area at Tangkeng in Fujian province

—72°。区域性NNE向大断裂(F_1)与其呈反接复合,该断裂对热水出露也有重要影响。另外,区内还分布有NE向张扭性断裂(F_2)和NWW向压扭性断裂(F_3)。

实验区地下热水在多处出露,在热水异常范围内(深度不大于100米,水温在40℃以上),钻孔内最高水温为78℃,最高水头为0.16大气压,热水呈脉状由西向东流,至ZK10孔附近转向东北,水位西部高东部低,在自然条件下补给第四系孔隙水^[1]。其热源可能来自燕山期花岗闪长岩深部的残余热及放射性元素蜕变而放出来的热能。

二、水压致裂过程中氦气的反应

水压致裂由国家地震局地壳应力研究所负责。加压孔为ZK10钻孔,在孔内选择三段分别进行加压实验,用分步加压法,每次加压 $34.5 \times 10^5 \text{ Pa}$,并稳定0.5至1小时,累加至岩石破裂,压力稳定不住为止。

第一段孔径 $d = 91$ 毫米,在90.57—91.57米处加压,当压力增至 $138.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时,孔壁岩石中产生垂直破裂;第二段孔径 $d = 91$ 毫米,在75.24—76.24米处加压,当压力增至 $153.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时,孔壁岩石中产生垂直破裂,压裂方向为 $N60.5^\circ W$,与区域构造应力场最大水平主应力方向 $N60.5^\circ W$ 相一致;第三段孔径 $d = 110$ 毫米,在60.22—60.92米处加压,由于本段岩石破碎,当压力增至 $34.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 后,压力不再上升,便改为先用封隔器给孔壁施压,然后给封隔段大泵量注水。将两个封隔器增压至 $130.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 之后,将封隔器压力减至 $75.9 \times 10^5 \text{ Pa}$,然后给封隔段加压,此时压力约为 $34.5 \times 10^5 \text{ Pa}$,直至将约1086升压裂液注完为止。

1. 在压力作用下, ZK12孔水氦的变化

(1) 第一次压裂时(1985年12月8日10时至14时30分)水氦连续自动测量结果(图2)。

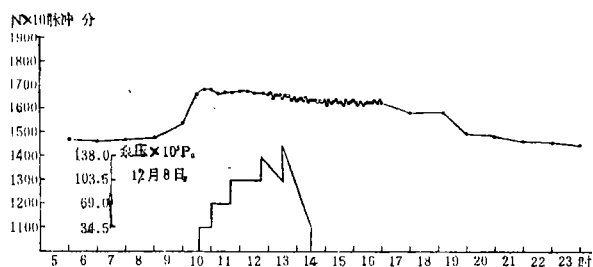


图2 第一次压裂ZK12孔水氦效应连续自动观测曲线

Fig.2 Observational curve of continuous and automatic of water-radon effect in first fracture at ZK12 well

从图2可见,ZK12孔水氦背景值为14500脉冲/分,在10时38分当加压到 $34.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时,水氦值突升到16590脉冲/分;11时加压到 $69.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时,氦值为16780脉冲/分;11时39分加压到 $103.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时,氦值为16690脉冲/分;12时30分加压到 $137.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时,氦值为16620脉冲/分。在12时45分岩石被压裂,此时氦值为16640脉冲/分。继续加压至13时32分,压力达到 $171.5 \times 10^5 \text{ Pa}$,氦值为16630脉冲/分。氦值保持最高值(16700脉冲/分)达10个小时左右,最大异常变化幅度为15%,至8日20时恢复到加压前的水平。

第一次压裂过程中水氦含量变化的特点是,自加压后,ZK12孔的水氦值即开始突升,直至岩石裂开一直处于高值状态,卸压后氦值恢复。

(2) 第二次压裂时(1985年12月11日9时至14时)水氦连续自动测量结果(图3)



图3 第二次压裂ZK12孔水氡效应连续自动观测曲线

Fig. 3 Observational curve of continuous and automatic of water-radon effect in second fracture at ZK12 well

从图3可看出,第二次压裂前ZK12孔水氡值在16300脉冲/分左右波动,是比较稳定的。11日8时水氡测值为16770脉冲/分,9时测值为16840脉冲/分。下封隔器和钻杆后,水氡值略有升高,测值为17020脉冲/分。当9时30分加压到 $34.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时,氡值为17070脉冲/分,以后氡值持续升高,至12时30分加压到 $137.5 \times 10^5 \text{ Pa}$,氡值为18400脉冲/分。在12时36分岩石被压裂。12时48分加压到 $151.1 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时,氡值为18370脉冲/分。12时53分压力降至 $27.2 \times 10^5 \text{ Pa}$ 后又重新加压到 $123.6 \times 10^5 \text{ Pa}$,此时氡值为18400脉冲/分。13时压力降至 $91.3 \times 10^5 \text{ Pa}$,13时35分卸压,压力降为零,氡值为18380脉冲/分。14时起钻,此时氡值为18490脉冲/分;15时3分提起封隔器,氡值为18380脉冲/分。

第二次压裂水氡含量变化特点是,从开始下封隔器和钻杆后,氡值即开始升高,随着压力的增加,氡值逐渐升高。加压到 $69.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时,氡值突升,加压到 $103.5 \times 10^5 \text{ Pa}$,氡值再次突升。最大异常变化幅度为13.5%,高值达8小时。卸压后氡值未恢复到压前的水平,而是建立一个新的动态平衡。

(3)第三次压裂时(1985年12月15日9时至13时30分)水氡连续自动测量结果(图4)

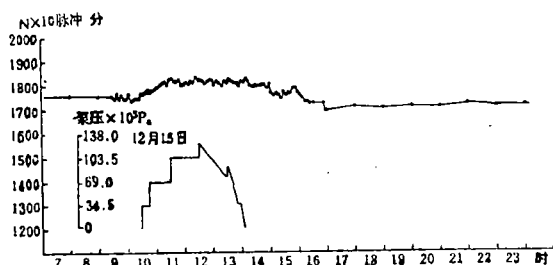


图4 第三次压裂ZK12孔水氡效应连续自动观测曲线

Fig. 4 Observational curve of continuous and automatic of water-radon effect in third fracture at ZK12 well

从图4可看出,第三次压裂过程中水氡含量变化特点与第二次大体相同。压裂前水氡值稳定在17500脉冲/分左右,当10时30分加压到 $34.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时,氡值为17670脉冲/分。以后随压力的增加,氡值升高。至12时19分加压到 $130.5 \times 10^5 \text{ Pa}$,氡值为18150脉冲/分。在13时33分开始注水,此时压力为 $34.5 \times 10^5 \text{ Pa}$,氡值为18070脉冲/分。给封隔段大泵量注水,氡值略有降低,其值为17920脉冲/分。然而,到14时氡值又升至18140脉冲/分,15时降至17800脉冲/分,16时降至17670脉冲/分。卸压后8小时即恢复到压前的氡值水平。

值得指出的是,第三次压裂实验是在水氡刚刚建立起的动态平衡基础上进行的,所以背景值较高,在压力作用下,水氡最大变化幅度为7.5%。

在压裂过程中,用不同类型仪器对ZK12孔水氡进行观测,如兰州地震研究所用JZD—1型自动测氡仪,福建省地震局用FD—125型测氡仪观测,国家地震局地质研究所用FD—3017

Ra A测氡仪观测。三种测氡仪的观测结果一致。从而说明观测到的ZK12孔水氡含量的变化是可信的（图 5）。

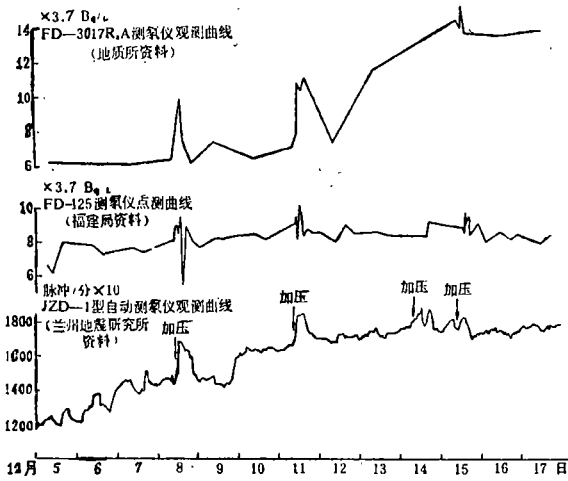


图 5 水压致裂过程中ZK12孔水氡变化特征曲线

Fig.5 Characteristic curve of variations in water-radon under hydrofracturing experiments at the ZK12 well

2.土壤气氡观测方法及结果

根据实验区条件，围绕被压裂孔（ZK10）布设了八个测点（图 1），安装上自行设计的土氡取样器。在水压致裂实验全过程中，用FD-3017Ra A测氡仪直接抽真空到1.5升吸气样测定，所得结果见图 6、7，各测点的情况见表 1。

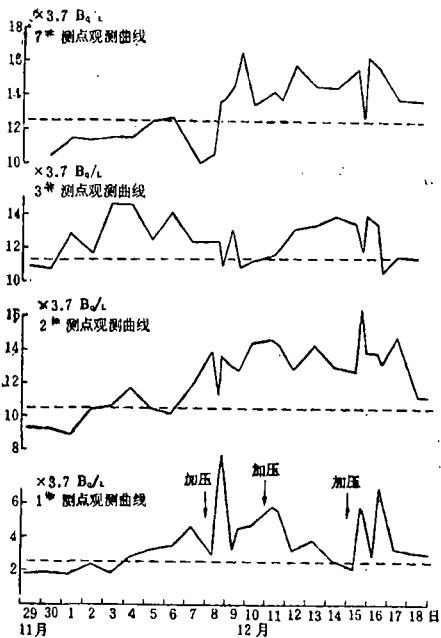


图 6 水压致裂过程中土壤气氡含量变化特征曲线

Fig.6 Characteristic curve of variations in soil-radon under hydrofracturing experiments

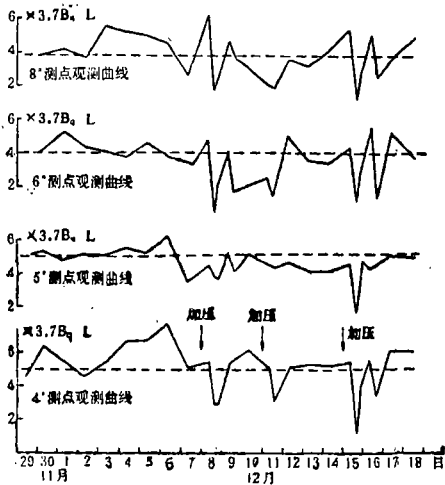


图 7 水压致裂过程中土壤气氡含量变化特征曲线

Fig.7 Characteristic curve of variations in soil-radon under hydrofracturing experiments

土壤气氮测点分布情况 表1

测点号	距压裂点距离(米)	深度(埋深)(米)
1	14	1.15
2	15	1.13
8	38	0.92
4	55	0.93
5	8	0.92
6	23	0.75
7	50	0.85
8	65	0.75

在压裂过程中1°测点的土壤气氮含量明显增加。第一次压裂前7时55分测土壤气氮值为 $10.32B_q/L$ ，在加压结束后，于当天14时50分测土壤气氮值为 $28.08B_q/L$ ，19时28分测值达 $32.92B_q/L$ 。土壤气氮含量在压裂前后变化明显，变化幅度达219%。第二次压裂前土壤气氮背景值为 $20.96B_q/L$ 。12时36分岩石被压裂，于次日晨测土壤气氮值为 $13.16B_q/L$ ，下降幅度为69%。这可能是由于在压裂实验过程中，下了一天小雨，土壤气体密度增加，透气性差，气体运移缓慢所致。第三次压裂前8时10分测土壤气氮背景值为 $7.70B_q/L$ ，13时9分岩石被压裂，13时55分加大泵量注水，于16时20分测土壤气氮值为 $21.05B_q/L$ ，20时55分测值为 $19.52B_q/L$ 。实验过程中氮值变化明显，最大变化幅度为186%。2°、3°和7°测点在压裂前后土壤气氮含量变化形态与1°测点相似。

4°测点土壤气氮含量变化属降低型。第一次压裂前土壤气氮背景值为 $19.09B_q/L$ ，压裂后于15时20分测土壤气氮值为 $11.03B_q/L$ ，20时5分测值为 $10.84B_q/L$ 。压后第二天8时30分测值为 $19.59B_q/L$ ，恢复到压前水平。在压裂过程中土壤气氮值变化明显，下降幅度为-110%。第二次压裂前测土壤气氮背景值为 $18.73B_q/L$ ，压裂后于15时35分测值为 $11.74B_q/L$ ，降低42%，这可能因天下小雨，使土壤密度增加，气体运移速度减小，故变化幅度小。第三次压裂前测土壤气氮背景值为 $20.0B_q/L$ ，压裂后15时40分测值为 $6.8B_q/L$ ，20时20分测值为 $14.69B_q/L$ ，下降幅度达-197%。第二天测值为 $10.64B_q/L$ ，恢复正常。5°、6°和8°测点土壤气氮含量在压裂前后变化形态与4°测点相似。

三、水压致裂过程中氮气变化原因的讨论

在水压致裂实验过程中，压裂孔及其周围岩层经历了弹性应力积累过程（持续不断加压过程）和岩石弹性应力的释放过程（减压直至卸压过程），从而引起含水层液体中层压力的波动，促使岩石吸附的氮溶解于水中。或者是由于岩体应力增强段加速了氮射气的扩散过程，而引起地下水中氮含量升高。

其次，由于压裂孔（ZK10）及其周围岩层的弹性应力积累与松弛过程引起弹性振动和超声振动，致使水氮含量增高。岩石变形过程中发生的弹性振动，使“岩石—水”体系内吸附氮与溶解氮的平衡移向溶解氮一方，从而引起地下水中氮浓度的升高。而在超声作用下，使被吸附氮增加了扩散，因而水氮含量增加。人工爆破观测结果和地下核爆破观测结果也表明，水氮和其它化学组分含量在爆破后有明显的变化。

从上述实验可知，水氮异常是地壳浅层应力（应变）作用的结果。在地震孕育过程中，在构造应力作用下，使含水层岩石变形甚至破坏，从而引起水氮值的变化。

通过观测资料分析研究发现，在地质构造断裂带内，分布在 F_3 断层北盘和 F_2 断层西盘的土壤气氮测点，也就是分布在地下水迳流方向（顺流方向）上的测点，在压力作用下，土

壤气氡含量升高, 而分布在 F_3 断层南盘的测点, 则土壤气氡含量降低。这些测点都在 F_2 、 F_3 断层交汇部位附近, 说明土壤气氡效应与地质构造和水文地质条件密切相关。汤坑热水呈脉状水由西向东流, 至ZK10孔附近转向北东, 热水受 $N76^\circ W$, 倾向北东, 倾角 $65-72^\circ$ 的张性兼压扭性断裂的控制。在应力(应变)积累过程中, 使地下水的流速在垂直方向或水平方向发生一些变化, 使位于断裂带附近测点的孔隙压缩、膨胀和弹性变形, 引起间隙水压升降。由于岩土透水性的变化, 及土壤排气速率发生变化, 使地壳上部土壤气氡含量发生异常变化。

四、结 语

水压致裂实验结果表明, 尽管力源较小但在与被压裂钻孔有水力联系的热矿泉水中, 观测到了氡含量的变化, 说明氡含量的变化是一种较为可靠的地震前兆。在实验中, 用FD-3017Ra A测氡仪观测到了土壤气氡含量的变化, 说明在野外采用定点(将自行设计的取样器, 即硬塑料集气管埋设在构造断裂部位)定时的测量方法, 可以观测到震前土壤气氡含量的变化。实验表明, 水压致裂的水文地球化学效应是客观存在的, 但获得的信息尚有待深入进行实验研究。

参 考 文 献

- [1]福建省水文工程地质队, 对福建汤坑热矿水动态变化规律的初步认识, 水文地质工程地质, No. 4, 1985.

THE EFFECT OF RADON IN THE PROCESS OF HYDROFRACTURING EXPERIMENTS

Li Tongqi

(*Seismological Institute of Lanzhou, State
Seismological Bureau*)

Abstract

In this paper, the effect of radon in hydrofracturing experiments at the experimental area of the Tangkeng village ZK10 well, Nanning county, Fujian province is introduced. Water-radon and soil-radon changes with the increase of pressure. For example, the variable amplitudes of water-radon are 15%, 13.5% and 7.5% in the ZK12 well with the different pressure; variable amplitudes of soil-radon as +219% and +186%, -110% and -197% in the 1st and 4th observation point respectively.