

# 力学加载时岩石中析出的挥发份可能是震前水文地球化学异常源 (大规模模拟试验结果)

G.M.Varshal, G.A.Sobolev, V.L.Barsukov, A.V.Koltsov,  
B.I.Kostin, T.F.Kudlova, Yu.I.Stakheyev, S.p.Tretyakova

## 摘 要

地震预报中最重要的理论和实践问题之一是前兆水文地球化学异常形成的物质来源。力学加载过程中岩石析出的挥发份是这种来源之一。用50000吨压力机进行了大规模模拟试验,结果揭示了大块玄武岩和花岗岩样在受到循环增加的单轴压力直至破裂时(对玄武岩和花岗岩分别为75和180兆帕),水、氧、汞和氮有规律地析出。发现前兆性岩石破裂伴随岩石中挥发份的析出。这些组份的前兆特性与它们的化学性质及其在岩石中存在形式有关。力学加载时水的排出随载荷增加而逐渐增加。氮在裂隙形成的早期阶段析出。将排气资料和体积应变及声发射资料对比表明,大部分氮在雪崩型破裂作用阶段和震源形成的动力阶段析出,而汞主要在样品临破裂前的动力阶段排出。

## 引 言

最近几年已证明了水文地球化学方法用于短期地震预报是最有希望的方法(Barsukov等,1979、1981,Sultakhodzhaev和Zigan,1980,蔡祖煌和石慧馨,1980)。通常,地下水化学成分异常持续时间短(一至三天)出现在震前一至十天(BarSukov等、1981)。水文地球化学前兆中最重要的信息是水的气态水组份,包括氮(Barsukov,1979、1981,Yanitsky,1979)、氧(Hauksson,1981;Rikitake 1979;Marlanov等、1971;蔡祖煌和石慧馨,1980)以及汞蒸汽。特别是Yu.I.Stakheyev和A.N.Sultankhodzhayev在Saltanabad和Nazarbek两处的1980—1981年期间一系列地震中观测到了前兆性汞异常。

对于用水文地球化学方法进行地震预报的理论和实践来说,最重要的问题是形成前兆异常的物质来源。地球化学异常的形成受控于不断增加的构造应力引起的岩石裂隙。此时地下水成份的短期变化可能主要由于:(a)从原先分离开的含水层来的水的混合,

(b) 深部流体流入量的增加和(c) 从围岩中挤压出的孔隙液体、气体、蒸汽对含水层的补给。最后一种作用的意义在研究力学加载时岩石样品中挥发份析出的模拟试验中可以得到了解。

苏联发现氦异常以后(Mavlyanov等, 1971), Scholz等(1973)利用膨胀—扩散模型, 就这个问题进行了一些理论方面的研究, 以解释前兆效应。假定膨胀阶段构造应力增长(这时岩石体积非弹性增长)异致破裂快速增长(数量和尺度两方面), 因而挥发份通过较大的区域逸出。用水文地球化学方法预报地震的关键是确定哪个阶段挥发份析出最强烈。

以前进行的模拟试验结果主要证明了力学加载下岩石排气这一事实(Giardini等, 1976, Holub和Brady, 1981, Honda等, 1982; 罗光伟等, 1981, Mizutani等, 1977)。所有这些试验都是用小块岩石样品在真空室内进行。力学加载时岩石中气体成组逸出(Mizutani, 1977), 象氢、氮、甲烷(Giardini, 1976; Holub和Brady, 1981; 罗光伟等, 1981)以及氦、氩(Honda等, 1982)。而与地震预报有关的最有益的一项工作是Honda(1982)等人做的, 他们对力学加载直至破裂时岩石中存留的 $^4\text{He}$ 和 $^{40}\text{Ar}$ 的数量进行了一些质谱测定。并对影响岩石排出气体的几个关键因素进行了讨论, 其中包括岩石类型、粒度、原始孔隙率、加载条件及环境湿度。认为有两种作用在岩石排气中起主导作用, 即微破裂时晶格中稀有气体原子逸出和岩石系统中原子的迁移。以氮和氩为例, 在后一种过程中, 个别稀有气体迁移能力的差异是如此重要以致于在相同试验中氩的析出总不如氮那样活跃。因此有必要找出排气能力和膨胀之间的定量关系。

为了探讨力学加载下岩石挥发份析出所遵循的规律, 我们于1981年在高压物理研究所用50000吨压力机进行了大规模试验。我们研究了大块玄武岩样(约900公斤)和花岗岩样(约770公斤)在单轴压力周期性加压直至破裂时的前兆性破裂, 压力分别为75和180兆帕。对玄武岩周期加压五次, 花岗岩加压二次。在加载时对下列参数进行了研究: 应变场、超声弹性波传播速度和振幅、声发射时空分布(这一阶段得到美国科罗拉多大学环境科学联合研究所内美国同行的可贵帮助)、自感电及电阻率(大规模地震模拟, 1982; Semerchan等, 1981)。

除了物理场变化之外, 还首次通过试验研究了力学加载时岩石中析出的挥发份的化学组成。挥发份析出作用被认为在形成水文地球化学震兆时起决定性的作用。

模拟试验中研究组份的选择取决于许多要素。其中最重要的是样品的准确化学成份, 确保每一组份的最低检测极限的现代化检测方法应用的可能性及来自地震前兆现场观测的对其预报特征的统计评价。在苏联各个地震区进行的多年观测表明, 地下水和土壤气组分中对短期预报很有效的是氮、氧、汞以及碳酸和甲烷(Barsvkov等, 1979; Mavlyanov等, 1971, Sultankhodzhayev和Zigan, 1980; Yanitsky, 1979)。

应用水文地球化学方法预报地震的历史可追到地下水中氦含量异常的检测。在苏联、日本、美国和中国发表过很多氦前兆方面的著作(Hauksson, 1981; Rikitake, 1979; Sultankhodzhayev和Zigan, 1980; 蔡祖煌和石慧馨, 1980)。汞、氮、氧在地壳岩石中的含量相当低, 但在各种火成岩中的含量足以能用现代的、高灵敏度的方法检测到。在各种火成岩中, 汞和氮的平均含量为 $8-9 \times 10^{-6}\%$ 和 $10^{-5}-10^{-7}$ 立方厘米

／克( Finkelshtein, 1979; Volikevich, 1970; Yanitsky, 1979 )。

上述分析促使我们进行大规模的模拟试验, 以定量地检测力学加载时由玄武岩和花岗岩中释放出的汞、水蒸汽、氦、氮和二氧化碳。把氧附加到这一组气体中, 因为可用它估价密封的取样系统通过样品孔隙和大气相通的程度。

## 实 验

### 样品描述

玄武岩样采自格鲁吉亚, 花岗岩样采自Yantsevsky矿床。样品削成长方体(柱状, 边长分别为: 玄武岩样高91.5厘米, 底为58×57.5厘米, 花岗岩样高70厘米, 底边为70×60厘米。玄武岩样为细粒深灰色并含有少量多孔橄榄石包体。全岩孔隙率估计为6%。样品有长达5—10厘米的裂纹。

玄武岩(橄榄石粒玄岩)矿物组份为: 斜长石60%; 橄榄石20%, 单斜辉石类10%, 其余(大约10%)为普通辉石、透辉石、钛铁矿和磁铁矿。花岗岩特征是: 石英45%, 微斜长石45%, 黑云母和白云母共计5—7%, 酸性斜长石达1.5%。

玄武岩样品化学全分析结果列入表1。

表1、玄武岩样品化学全分析结果

成份	含量%	成份	含量%
SiO <sub>2</sub>	49.59	Na <sub>2</sub> O	3.58
TiO <sub>2</sub>	1.46	K <sub>2</sub> O	0.72
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.52	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0.09
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.19	CO <sub>2</sub>	0.18
FeO	5.63	H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0.14
MnO	0.16	C原始	0.04
MgO	7.66	总 计	99.50
CaO	9.65		

### 检测挥发份的装置及方法

挥发份取样系统周期性地工作: 从样品表面放出的挥发份靠扩散进入吸收器, 用载气(高纯氮气)冲洗, 再把研究的组份送入到遥控的检测装置。该系统(图1)由安装在样品表面上的一组吸收器(4), 氮气压入装置(1、2、3)及一组检测器、存储器组成。后者包括集聚汞的黄金吸附管(5), 用α经迹记录氦的电介质薄膜检测管(6), 水冷凝管(7), 三个串联的U型管(8、9、10)用作质谱分析用的气体样品的取样。该系统分两步操作: 每次加载前用氮气流清洗系统和闭路循环的取样测试。首先,

从储气瓶(1)输出的氮气流通过四通阀(2)和微型压缩机(3)进入安装在样品表面上的吸收容器(4),由此,混合气体通过一组汞吸附(5)、氩记录(6)、水冷凝(7)装置,然后再通过U型管(8、9、10),经四通阀排入大气。样品加载时,转动四通阀,系统变为闭路循环操作。这时,氮储气瓶被关闭,但仍有一份氮气在系统中循环。将挥发份从吸收器(4)输送到检测和存储装置(5—10)中。汞(5)、氩(6和7)装置用存储方式操作,每一次加载循环时从载气中萃取出样品中析出的挥发份。色谱分析取样用U型管进行。在这里气体组份仅反映每次加载循环完成时的瞬时浓度。系统中气体消耗量用流量计(11)测量,在清洗阶段用调节器加以控制,在循环阶段用微型压缩机加以控制。

从样品表面析出的挥发份,其吸收装置由三个串联的黄铜园筒组成。每个筒高2.2厘米,内直径8厘米,壁厚1厘米。借助于螺杆和螺齿槽把园筒固定在样品的一个面上。园筒和样品表面接触处用真空橡胶垫密封。吸收装置和检测、存储装置用两根橡皮软管相连,每一根直径为0.5厘米、长7.5米。检测器和存贮器用直径3毫米的橡皮软管相接。

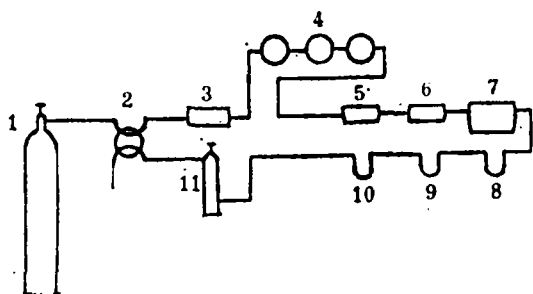


图1、研究岩石加载时挥发份析出的系统示意图

1、高纯氮贮气瓶 2、四通阀 3、微压缩机 4、安装在样品表面上的吸收器 5、集聚汞的黄金吸附管 6、 $\alpha$ 径迹测氩的电介质薄膜检测管, 7、冷凝管(恒温器中), 8-10色谱分析用的气体取样U型管 11、流量计

清洗时系统中载气消耗率约400毫升/分,这足以使系统中气相在10—15分钟内更换十次。闭路循环时,流速降低到240—300毫升/分,以确保析出的挥发组份从吸收筒有效地输送到检测器,在相应检测器中顺利完成从气相中萃取汞和水蒸汽,在氩装置中确保气相和硝基胶片接触。

单轴压力下从岩石试件中析出的汞先吸附在黄金吸附剂上,再用无色散原子荧光光度计检测。吸附剂是用镍铬丝做的螺旋线,直径0.2毫米。将它放在一个石英管里面,管的内外直径分别为3毫米和6毫米。黄金丝缠绕在镍铬螺旋线上,当含汞的气体以小于1升/分的速度通过吸附剂时,至少有95%的汞被吸附。吸附剂在有机玻璃做的密封盒子中存贮和输送。随后,当吸附剂通过电流加热时,汞被释放,用原子荧光法定量检测,检测极限为 $10^{-11}$ 克。汞校正曲线直至 $10^{-7}$ 克均为线性,相对标准偏差 $S_r=0.04$ 。

气体中氩和它的 $\alpha$ 放射性子体浓度用电介质检测器(即硝基纤维胶片LR115—11, Kodak),通过胶片上 $\alpha$ 径迹计数即可测定。这种检测器用下列方法设计,可使它灵敏区大,容易装卸;硝基胶片插到两个锥形玻璃管中,每个管内径1.5厘米,内部周边长

5.5厘米，另一矩形胶片（1×4.5厘米）顺吸收容器筒轴线插入。两个管子用辅助套筒（弹性聚合物管）紧密联接。每一加载循环终了，割断套管，取下胶片。硝基胶片从管子中取出放在20%的苛性钠水溶液中显影70分钟，然后用蒸馏水冲洗，在空气中晾干，在显微镜下读取每平方厘米 $\alpha$ 粒子径迹数。

气流中冷凝出的水蒸汽用重量法测定。为此要用直径1厘米，长16.5厘米的小玻璃管。这些管顺气流前进方向有两个球形凸起，底部变为各长4.5厘米的手指状。在进行循环和从大压机向实验室运送时，这些手指状部件分别浸没在容积50毫升，装有-17℃冷混合剂的圆筒中，圆筒又依次放在塑料泡沫恒温器中。每一加载循环终了把带冷凝水的管子称重，然后在110℃烘干1.5—2小时，冷却后再称重，其两次重量差即是每一加载循环中释放的水。重量法精度在 $5 \times 10^{-5}$ 克以内。

一次循环达到加载极限时从气流中取气样用色谱法测定二氧化碳和氧及氮（用附加的INGM—1扩散磁流分析器）。为此每一U型管的进出软管都要夹紧，再将装置从工作系统中取出。为进行色谱研究，用微型注射器从U形管中取一单位份量（0.1毫升）的气体。气体混合物用PorapakQ填充柱在LKHM—8MD气相色谱上分析，用氮作载气。

为检测氮，从U形管中取出气体，小心地送入完全充满水的250毫升的倒放着的瓶子中。瓶子随后用橡皮塞塞紧，送到化学实验室。在实验室使用INGEM—1仪器由平衡液相检测氮含量，对一给定的U形管用标准水溶氮对氮的含量进行校正。仪器的零读数相当于大气中氮平均含量，即在平衡水溶液中氮为 $5 \times 10^{-4}$ 体积%或 $5 \times 10^{-5}$ 毫升/升。

挥发份含量每一循环中检测一次。最后一次加载循环完成后约15—20分钟，拆开软管把进口部分从该系统上拆下，用上述方法测定各组份含量。

每一样品加载试验之前先做空白试验：系统用氮清洗约2.5小时，然后在无负载的、闭路循环条件下检测载气流中各组份的含量。

## 结果和讨论

玄武岩样和花岗岩样在每一加载循环完成后的气体样分析表明，在LKHM—8MD色谱仪可检测的浓度范围内未检出二氧化碳（检测极限0.01体积%）。

气流中氧含量很典型，每一样品中都很稳定（表2）。氧浓度和直至破裂的力学加载几乎没有关系。在玄武岩中浓度为10.8至13.6体积%，在花岗岩中为4.2至4.9体积%。由加载得到的氧的数据和空白试验得到的数据实际上没有差异。氧的检测结果可能在某种程度上反映了玄武岩样和花岗岩样孔隙度的差异。由氧含量判断，在任何情况下大气都可能因扩散而通过样品孔隙使循环氮稀释，对玄武岩约稀释 $\frac{1}{2}$ ，对花岗岩约稀释 $\frac{1}{4}$ 。

从整体上看，这些资料和检测氮浓度时所得结果一致（表2）。对比高纯氮气和空白试验气流，结果显示出它们的氮浓度接近大气中平均值（氮是高扩散性气体，很快地穿过样品孔隙进到吸气系统）。由气流中抽取的瞬时气体试样，可以清楚地追踪到氮含量随加载而增长25—50%。

表2 玄武岩和花岗岩样连续加载时载气氮中氦和氧的浓度

实验类型	最大压力(兆帕)	样品中氮含量		样品中氧含量 (体积%)
		平衡水相中 ( $\times 10^{-5}$ 毫升/升)	气相中 ( $\times 10^{-4}$ 体积%)	
玄武岩				
高纯氦N <sub>2</sub>	0	缺	缺	缺
空白	0	5.64	5.64	11.9
1	7.0	5.0	5.0	10.8
2	24.0	6.0	6.0	13.0
3	42.0	7.0	7.0	13.1
4	63.0	6.0	6.0	12.8
5	78.0	7.4	7.4	13.6
花岗岩	0			
空白	0	5.0	5.0	4.9
1	120.0	6.4	6.4	5.0
2	180.0	6.6	6.6	4.2

更有价值的结果是在储气状态检测挥发份水、汞、氦得到的(图2和3,表3和4)。图2展示了加载曲线(曲线1)以及玄武岩样品中水、氦、汞析出程度与加载的依赖关系。

水·水可以以各种形式存在于岩石中:吸附水、毛细水及矿物包裹的液态水,象具有各种结合能的氢氧化物结晶水以及参予矿物晶体结构的大的羟基化合物(OH)<sup>-</sup>。热处理时水在70°至1100°范围可单独析出。如图2和表3所示:力学加载时的样品中,水析出量随加载增加而均匀增加(要记住水在岩石中的形式是多种多样的)。最后一次加载循环中水析出量减少可能是由于取样位置上可力学分离的水的消耗所致。如果玄武岩的化学成份已知,很容易估算出加载时析出的水量。我们的试验样品体积为0.305米<sup>3</sup>,表面积为2.79米<sup>2</sup>。三个吸气容器用于把挥发份和样品表面(150厘米<sup>2</sup>)分开。很容易算出整个试验期间玄武岩样全表面产生4.3克水(包括空白试验在内的全部加载循环的水数据总结于表3)。考虑了玄武岩样品重量和它的化学组份(表1)以后,可很有把握地断言,加载直至破裂时玄武岩释放了玄武岩其总含水量的0.2%。

汞 汞的试验特征很不相同。它的加载曲线包括两个峰值(图2,曲线4),第一个峰值发生在破裂加载的10%时,第二个(较高些)发生于岩石破裂前一刹那。让我们更详细地考察一下汞析出过程,样品体应变及声发射之间的关系。

由表3可以看出,第一次加载循环时,当应变在弹性区时,已有13%的汞析出。这可归因于汞蒸汽从样品的开口孔隙和裂纹中排出。在地壳中各种构造破损处可积聚汞。有些汞可来自深部流体(Jernelov等,1975)。

尽管声发射资料(发射次数和新出现的裂纹数成正比)和膨胀性增长已证实在第三

表 3. 单轴压力循环增加直至破裂时玄武岩样中水、汞、氡的析出量

试验类型	最大压力 (兆帕)	体膨胀性 (%)	声发射 Nc	给定的—次加载循环析出的组份					
				H <sub>2</sub> O		Hg		Rn	
				毫克	析出量 %	10 <sup>-9</sup> 克	析出量	α径迹 / 厘米 <sup>2</sup>	析出量 (%)
空白	0	0.0	0.0	1.35	—	0.48	—	8 × 10 <sup>2</sup>	—
1	7.0	0.0	0.0	1.58	0.99	1.90	13.00	1.2 × 10 <sup>3</sup>	1.15
2	24.0	-0.008	100.0	3.45	9.06	0.61	1.19	1.0 × 10 <sup>3</sup>	0.58
3	42.0	-0.018	140.0	6.85	23.72	0.49	0.09	9.5 × 10 <sup>3</sup>	25.07
4	63.0	+0.016	3400.0	11.40	43.35	0.51	0.27	9.0 × 10 <sup>3</sup>	23.63
5	78.0	+0.120	2950.0	6.85	22.86	9.80	85.42	1.8 × 10 <sup>4</sup>	49.57

• 体应变由岩石力学和物理研究所 (吉尔吉斯科学院) 的 V. A. Mansurov, B. Menzhikov 和 K. Teiegin 做的试验版得到的纵向和侧向总应变资料计算而来。

• • Nc. 一次循环中发射次数。超声发射由苏联地球物理研究所 B. G. Salov 和美国科罗拉多大学的环境科学联合研究所的 N. Brodsky 和 P. Swensson 测定。

次循环终了时雪崩型破裂开始并在第四次循环中进一步发展, 以后三次循环中 (第二到第四次) 试样中汞释放量仍接近背景值。大部分汞 (85%) 在第五次循环中析出, 这是由于样品裂开前雪崩型裂纹的作用, 大裂纹 (长达数厘米) 增加的缘故。大部分汞在接近加载破裂时释放起由于汞在岩石中的存在形式。据有关报导 (Saukov 等, 1972) 自然汞只局限于火成岩结晶作用的高温阶段晶质矿物结构的微小缺陷处。而且汞化合物容易受热分解为自然汞, 和大多数挥发份一样, 可以在断层, 孔隙和裂隙处聚集。

这样, 从岩石中析出汞的过程和闭合孔隙及裂隙的开裂、矿物结晶格架的破坏以及和汞化合物演变为自然汞等有关。可以估算试验中玄武岩析出的汞量。汞在玄武岩中的克拉克值为  $8 \times 10^{-6} \%$ 。整个加载阶段吸气容器从 150 厘米<sup>2</sup> 面积上抽取  $1.09 \times 10^{-6}$  克的汞, 这样从 2.79 米<sup>2</sup> 的玄武岩表面释出了约  $2 \times 10^{-6}$  克的汞, 或相当于岩样中汞总量的  $2.8 \times 10^{-3} \%$ 。

晶质结构中含有的氡有两种状态占优势。一种是矿物结构中的

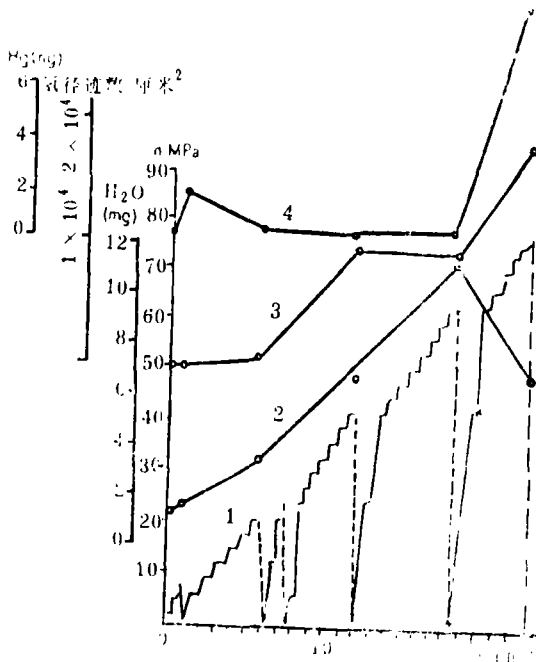


图 2、(1) 玄武岩加载曲线, (2) (3) (4) 水、汞和氡的析出与加载的依赖关系, (2) - (4) 数据点用直线连接。

氧。由于各种原因，氧由结晶格架交汇处迁出时，它有可能在断层、孔隙和裂隙处及晶格结构缺陷处集聚。固体中气体混合物的这种非均匀分布情况在研究金属中的氢（Geld等，1979）和核燃料裂变产生的隋性气体时（Carrol，1965）已很好地研究过。

氮在矿物中至少呈三种形式已得到确证：在晶格结构中；紧密型结构缺陷中和张开小孔及裂隙中的气态氮中（Gerling，1957）。

$^{40}\text{K}$ 放射性产物 $^{40}\text{Ar}$ 可进入到晶格中，其中一部分通过扩散作用可在矿物结构的缺陷处形成微量气态积累（Pushkarev等，1982）。

因而，可期望会出现比加载时岩石中隋性气体发散期间更大的值。事实上，玄武岩加载时，在第一次循环中仅少量氮（曲线3），约相对值的1%在弹性应变阶段散发出来，这可能是样品孔隙或裂口关闭所致。在膨胀区，氮散发明显增加（第三至第四循环）。在第五循环中达到峰值，相对值为50%，正好在雪崩型裂口相互作用产生相当长的槽形裂口断裂之前（图2，表3，曲线3）。

玄武岩样试验中挥发份析出量的总结果得到花岗岩样试验结果的佐证（表4、图3）。在后一种试验中收集了在各个循环中氧、氮、水的释放总量及氧的数据。

要注意在花岗岩载荷试验中，第一次加载循环就达到120兆帕（即破裂加载的66%）。声发射资料反映了这一载荷下雪崩型裂隙的活动过程（表4）。这一过程伴随强烈的氮散发（表4、图3，曲线3）。随着载荷增加，水从花岗岩样中连续析出（图3，曲线2）。

单轴压力下，在膨胀区观测到玄武岩和花岗岩大块岩样的氮散发急剧增加，这表明氮是岩石中微破裂作用的很好的指示剂。Holub和Brady（1981）在小块花岗岩样中同样观测到了氮散发和声发射之间的高正相关性。

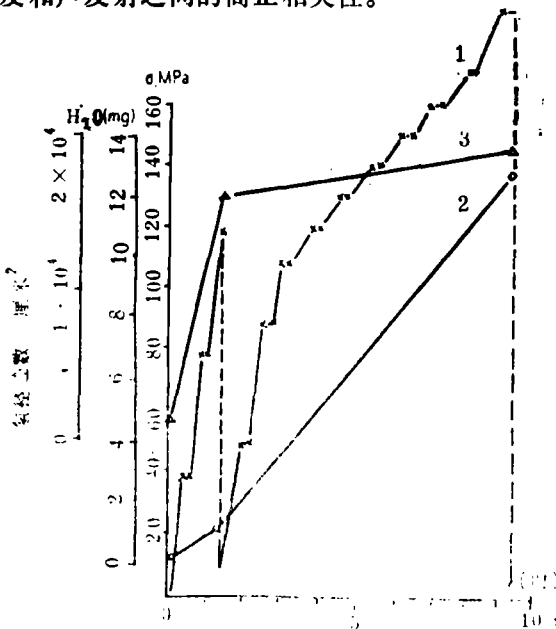


图3 (1) 花岗岩加载曲线  
(2) (3) 水和氮析出量与载荷的依赖关系  
(2)和(3) 曲线数据点用直线起接



表 4 单轴压力循环增加直至破裂时花岗岩样中水和氧的析出量

试验类型	最大压力 (兆帕)	声发射 *Nc	加载循环中析出的组份	
			H <sub>2</sub> O (毫克)	氧 α 径迹数 / 厘米 <sup>2</sup>
空白	0	0	0	$1.8 \times 10^4$
1	120.0	2540	1.15	$16.0 \times 10^4$
2	180.0	22000	12.85	$19.0 \times 10^4$

\* Nc一次循环中声发射数

概括上述试验结果得到如下结论:

### 结 论

岩样在力学加载时挥发份析出增加一至二个数量级。如汞和氧这些成份的析出在某种程度上可能是脉动型的, 突升峰值发生在破裂前的一刹那。对加载岩石中挥发份析出量的估计表明这种机制可能对水文地球化学震兆形成起重要作用。前兆期间随构造应力变化而相应增长的各组份浓度可以用高灵敏度的现代化仪器通过监测地下水和土壤气体而被可靠地检测出来。

前兆性岩石破裂伴随着挥发份的析出。这些组份的前兆特征和它们的化学性质及在

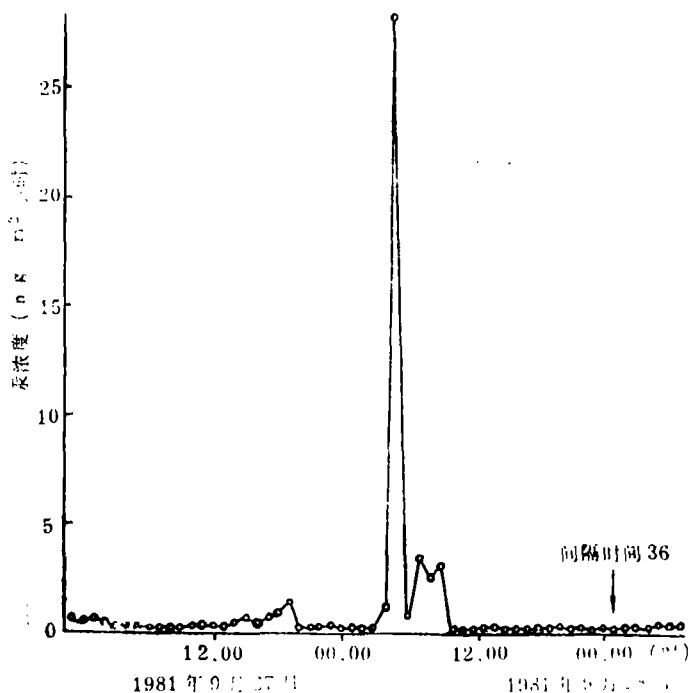


图 4 1981年9月28日杜尚别地震前土壤气体中汞含量变化曲线

(下转第92页)

而不是任何地区构造应变的明显增长。如果由这样的一个地震所产生的断层延伸到了地表，那就可能有高压流体的喷发。

原题: Fluid ascent through the solid lithosphere and its relation

(河北省地震局 胡长和 陈绍绪 胡新亮 译; 许智 校; 王六桥 审)

---

(上接第71页)

岩石中存在形式有关。氦在破裂过程的早期阶段散发，而氡和氩主要在雪崩式裂纹相互作用（以及在震源形成的动力阶段）时散发。汞主要在动力阶段析出。因此，汞可以为短临地震预报最有效的前兆特征。Yu. I. Stakheyev做过这种预报，他在杜尚别东南15—20公里的Sultanabad地区1981年9月29日发生的3级地震之前，在深一米的土壤气中记录到汞的两次脉动增加：在震前约29小时汞增加了4倍，而震前19小时汞值增加了约90倍（图4）。

最后，本试验证明了用实验室模拟试验估计形成水文地球化学震兆的主要物质来源是可行的和有益的。

原题: Separation of volatile Components from Rocks under Mechanical loading at the Source of Hydrogeochemical Anomalies Preceding Earthquake

(河北省地震局 曹宗普 邓雪仁译; 周清良校; 俞福源审)