

文章编号: 0253-3782(2004)S0-0162-07

综 述

国外钻孔应变观测的发展现状^{*}

邱 泽 华^{1, 2)} 石 耀 霖²⁾

1) 中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所

2) 中国北京 100039 中国科学院研究生院

摘要 简要论述了钻孔应变观测在人类对地壳运动的研究中扮演的越来越重要的角色。这种观测已经被美国、日本、秘鲁、澳大利亚、南非、冰岛、意大利等国家用于对板块运动、地震、火山、水库、油田等众多方面的观测研究。指出这种观测日益成熟，迅速向多分量和综合探头发展。介绍了根据这种观测结果，地震应变阶、慢地震、地震前兆以及火山喷发预测等方面的研究取得的重要进展。

关键词 地壳形变 钻孔应变观测 钻孔应变仪

中图分类号: P315.72⁺⁷

文献标识码: A

引言

在区域应力场作用下地壳会发生变形，钻孔应变观测是研究地壳变形和地应力场变化的一种重要手段。我国 1966 年邢台地震后就开始利用压磁元件开展钻孔应力的观测工作。邱泽华和张宝红(2002)曾对中国钻孔应变(应力)观测的现状作了介绍。在国际上，1968 年 9 月，美国卡奈基研究所的 Sacks 和德克萨斯大学的 Evertson 研制出世界上第一台钻孔(体)应变仪(Sacks, Evertson, 1971)。30 多年来，钻孔应变仪先后在中国、日本和澳大利亚被研制出来，并得到迅速发展和日益完善。在美国“板块边缘观测”(PBO)计划中，钻孔应变仪将与 GPS 一起，被大量布设在圣安德烈斯断层附近和阿拉斯加南部地区。这标志着对地壳运动和形变的观测进入了一个新的发展阶段，钻孔应变观测将与 GPS 和 InSAR 一起，作为主角走上历史舞台^①。

目前，直接观测地壳应变的仪器主要有两种：一种为测量基线长度变化，例如伸缩仪、激光应变仪；另一种就是测量钻孔变形的钻孔应变仪。与测量基线长度变化的应变仪相比，钻孔应变仪有受地表影响小、受地形限制少、精度高、频带宽、造价低、安装方便、维护简单等诸多优点。

理论上，用 GPS 方法可测量出位移，也可以解算出应变。但是，钻孔应变仪可以对从以秒为频度的地震波到一个月内的地壳形变进行更高精度(10^{-11})的观测，可比 GPS 高

* 国家自然科学基金(40374011)和地震科学联合基金(1040037)及大城市活断层课题共同资助。

① 详见 <http://www.earthscope.org/pbo/instrumentation/instrumentation.htm>

2003-07-24 收到初稿，2003-11-20 收到修改稿并决定采用。

1~3个量级。特别是钻孔应变仪能将地震和火山活动当时及其前后的地壳形变,以分钟甚至接近测震的采样时间连续记录下来,这是GPS无法比拟的。GPS能与钻孔应变观测互相配合,因为在不同时段、不同应变速率上互相补充,所以正成为国际上对地壳运动和形变进行监测的主流趋势(图1)。

本文旨在对国外钻孔应变观测的现状作比较细致的论述。

1 钻孔应变观测的应用

钻孔应变观测的基础是钻孔应变仪

器。在世界范围内,比较知名的能生产钻孔应变仪的国家和专家及主要产品和安装地如表1所列。

表1 能生产钻孔应变仪的国家和专家及其主要产品和安装地

国家	机构	专家	主要产品	安装地
美国	华盛顿卡内基研究院	Sacks, Evertson	Sacks-Evertson 体应变仪	美国、日本、秘鲁、中国、南非、冰岛、意大利
澳大利亚	昆士兰先进技术中心	Gladwin	Gladwin 张量应变仪	美国、澳大利亚
日本	防灾科学技术研究所 东浓地震科学研究所 名古屋大学环境学研究所 东京大学地震研究所	坂田正治 石井纮 山内常生 松本滋夫	Sacks-Evertson-Sakada 三分量应变仪 (三家联合)石井应变仪、 地壳活动综合观测装置	日本 日本、南非

Sacks-Evertson 钻孔体应变仪的发展,在过去很多年内占据了主导地位。其主要安装情况如表2所列。

表2 Sacks-Evertson 钻孔体应变仪的主要安装情况

安装地点	数目	深度/m	年份	用途
美国卡奈基研究所	1	50	1968	试验
日本松代	3	50	1971	监测地震
日本东海-南关东地区	31	50~300	1976~1981	监测地震
南非约翰内斯堡 ERPM 金矿	3	3 100 m(金矿巷道内)	1977	监测采矿地震
冰岛 Hekla 火山	7	?	1979	监测火山活动
美国加州地区	18	200	1984~?	监测地震
中国北京	9	350	1987	监测地震
美国夏威夷 Mauna Loa 和 Kilauea 火山	4	100	?	监测火山活动
意大利 Vesuvius 火山	1	200	1998	监测火山活动
日本海沟	3(包括试验 1)	海底以下 1 000	1999~	监测板块俯冲

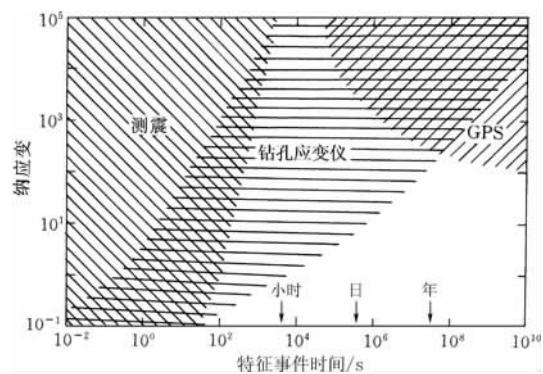


图1 测震、GPS与钻孔应变观测能力的比较^①

^① 详见 <http://www.earthscope.org/pbo/instrumentation/instrumentation.html>

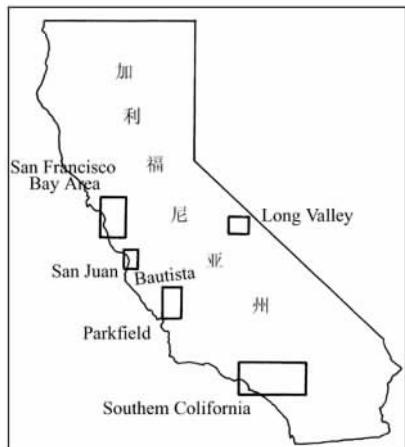


图 2 美国加利福尼亚地区的 5 个钻孔应变观测网^②(图中矩形区域)

在南非用于监测矿山地震。

2 钻孔应变观测仪器的发展现状

历史最长的液压式 Sacks-Evertson 体应变仪尽管是盲向的，但是因其良好的稳定性而仍然被广泛使用。另外，经过坂田正治的努力，同样工作原理的多分量应变仪也已经研制出来(Sakata, 1981)。例如，在大洋钻探计划(ODP)中，在日本海沟安装了 Sacks-Evertson-坂田三分量应变仪^③。采用电容传感器的 Gladwin 张量应变仪没有太大改变(Gladwin, 1984)。因为这种仪器能观测多个水平应变分量，所以也得到相当广泛的关注。特别值得重视的是，石井纮与山内常生和松本滋夫合作研制的钻孔应变仪(石井纮, 2001)。他们研制的仪器在很多方面都有独到之处：首先，他们采用的独特设计，利用杠杆原理，可以把应力变化造成的探头的直径变化放大 40 倍；其次，与其它仪器不同，他们采用的是磁传感器。这种传感器体积小，可以让探头小到直径只有 4 cm，而长度只有 50 cm；第三，他们的仪器不仅可以有多个水平分量和垂直分量，还可以有倾斜分量，可以测量三维应变张量变化；最后，只观测应变的相对变化是不够的，为此，他们设计了一种无线、智能化的应变探头，用于井下深部的套芯绝对应力测量。现已经完成了 800 m 深的测量，正在准备进行 1 200 m 深的试验。

目前，在一个钻孔中只安装应变仪的情况已经不多了，取而代之的是“综合探头”，即在一个钻孔中安装多种观测仪器。最普遍的是钻孔应变仪、井下倾斜仪和井下测震装置共用一孔。多的(例如石井-山内-松本“地壳活动综合观测装置”)可以包括 6 个应变分量，2 个倾斜分量，温度，3 个加速度分量，3 个速度分量和用于定位的 4 个磁分量(图 3)。实际上综合探头又有两种：一种是分别组装各种仪器的探头，然后再设法依次下井；另一种是事先根据研究目的将所有各种传感器组装在一个探头中，然后一次下井。同时，还可以在地

Gladwin 的张量应变仪的研制，实际上是在中国的 RZB-1 型分量应变仪之后。从 1984~1996 年在美国的加利福尼亚和内华达地区共安装了 8 套，深度为 100~200 m。此外，还在澳大利亚用于水库地区的采矿安全研究。

图 2 给出了钻孔应变仪(包括 Sacks-Evertson 体应变仪和 Gladwin 张量应变仪)在美国加利福尼亚州地区的分布^①。日本防灾科学技术研究所的坂田主要是研制日本版的 Sacks-Evertson 钻孔体应变仪，后来又开发了三分量应变仪，已经少量安装了数套。东浓地震科学研究所的石井与名古屋大学环境学研究所的山内和东京大学地震研究所的松本合作，自行研制了一系列钻孔应变仪，共安装了 45 套，深度为 150~800 m，用于研究地壳运动，并

^① 详见 <http://quake.usgs.gov/research/deformation/monitoring/index.html>

^② 详见 http://www.odp.tamu.edu/publications/186_IR/chap_03/c3_3.htm

面配备 GPS 装置。

3 观测和研究结果

3.1 地震应变阶

早在 Sacks-Evertson 体应变仪刚投入使用不久, 就观测到同震应变阶。为确定这种应变阶不是仪器自身的缺陷造成的, 在日本的松代安装了 3 套 Sacks-Evertson 体应变仪进行对比观测, 发现地震应变阶被震中距基本相同的仪器同时记录到, 并且大小也大体相当。研制者还用爆炸源进行了野外观测实验。对于不同的炸药量, 发现观测应变阶与理论值相符, 并且即使加速度很大, 仪器也能正常工作 (Sacks *et al*, 1971)。后来在南非 ERPM 金矿中安装的 3 套仪器给出了更好的结果: 大量(159 个)微震统计数据进一步证实了应变阶观测记录是可靠的 (McGarr *et al*, 1982)。

3.2 慢地震

当一个“普通”地震发生时, 会瞬间出现一个应变阶, 而慢地震造成的应变变化要延续一个比较长的时间, 例如数小时或几天。Sacks-Evertson 体应变仪观测到的最著名的慢地震的例子, 是在 1978 年日本伊豆-大岛 7 级地震后观测到的(图 4)(Sacks *et al*, 1978)。这个例子的可靠性在于: 有 3 个台站记录到互相配合的变化曲线。以后, 在美国的圣安德烈斯断层附近, 一套 Sacks-Evertson 体应变仪和一套 Gladwin 张量应变仪还同时记录到另一个著名的慢地震事件 (Linde *et al*, 1996)。

3.3 地震前兆

地震前兆变化是人们最关心的话题。1995 年 10 月在伊豆半岛东部安装的一套“地壳活动综合观测装置”记录到 1996, 1997 和 1998 年发生的 3 次地震(群)活动。石井纮不仅观测到慢地震, 还注意到在主震之前应变的微小异常变化 (Ishii *et al*, 2002; 石井纮, 1999)。石井纮将观测到的最大主应变变化以一定的比例绘制在方位坐标图中, 并将逐日的记录错开, 可以看到观测值有规律地变化; 在主震发生之前, 观测变化将偏离日常规律, 变化幅度明显增大(图 5)。从 1996~1998 年, 石井纮接连 3 次观测到类似变化, 并同时记录到配套的倾斜变化。因为同时有高密度的测震台网, 所以人们能看到主震之前应变的微小异常变化与小震活动密切相关。根据这种观测, 最大

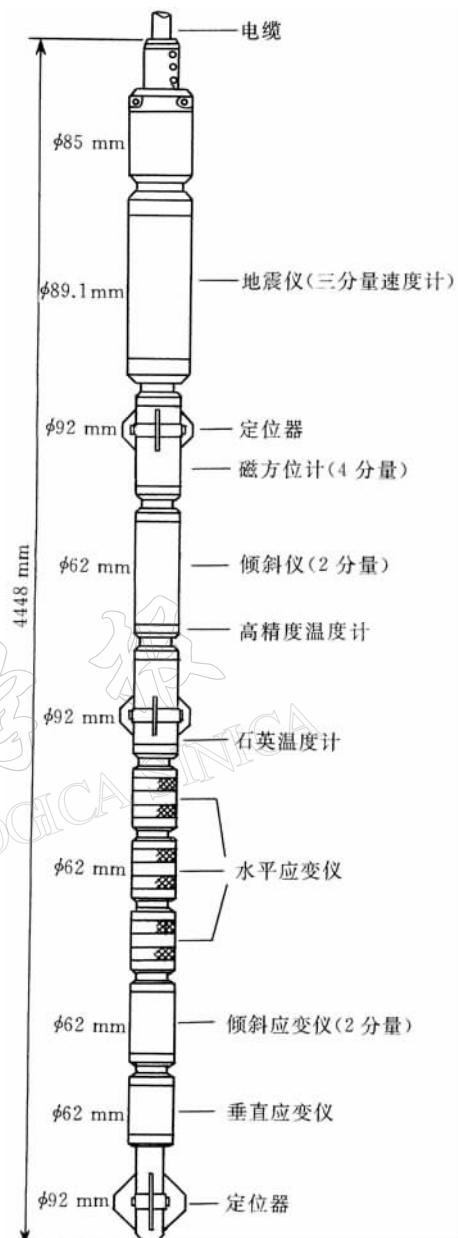


图 3 石井-山内-松本“地壳活动综合观测装置”(引自 Ishii *et al*, 2002)

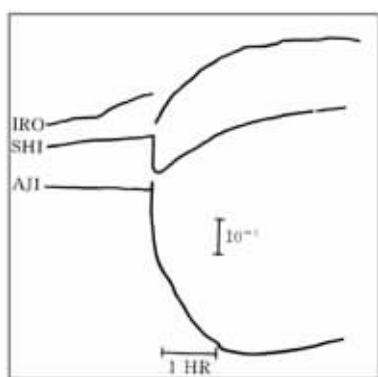


图 4 3 台 Sacks-Evertson 体应变仪在 1978 年 1 月 14 日日本伊豆-大岛 7 级地震后同时记录到的慢地震应变变化

(引自 Sacks *et al*, 1978)

主应变变化将逐渐与最大构造主应力方向趋于一致, 这也许是观测点在震中区附近的缘故.

3.4 火山喷发

对冰岛的 Hekla 火山, 夏威夷的 Mauna Loa 和 Kilauea 火山, 以及意大利维苏威火山的研究, 都使用了 Sacks-Evertson 体应变仪. 其中对冰岛 Hekla 火山的观测布设了 7 套仪器, 是最多的, 并且已经记录到多次火山喷发的应变变化 (Stefansson *et al*, 1981). 研究人员根据钻孔应变观测, 并结合其它观测, 对 2000 年 2 月 26 日的火山喷发作了准确的预报.

4 美国的发展计划

在美国, 在已经酝酿多年, 刚刚得到批准的

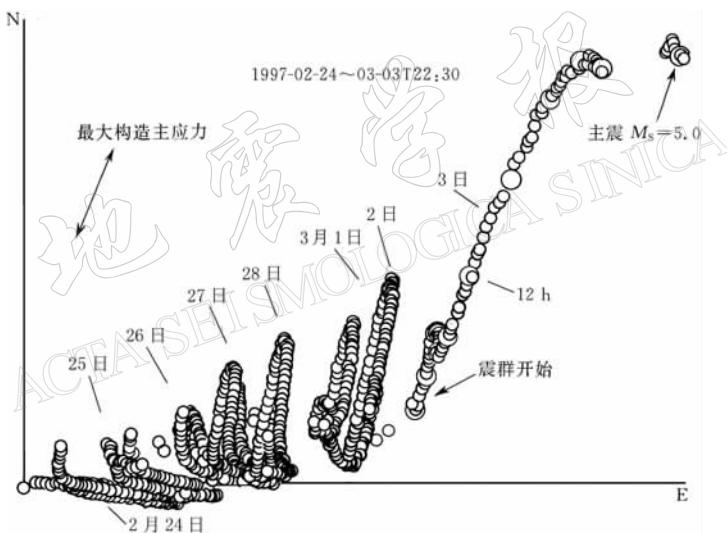


图 5 在伊豆半岛东部观测到的主震之前的应变异常变化(引自 Ishii *et al*, 2002)

“板块边缘观测”(PBO)计划中, 钻孔应变仪和 GPS 一起, 将被大量布设在美国圣安德烈斯断层附近和阿拉斯加南部地区. 目前的方案是: 钻孔应变仪再增加 175 套, 加上目前的 25 套, 达到 200 套, 主要是观测板块边界的断层活动和火山活动. 作为第一步, 计划先安装 50 套应变仪, 其中 Sacks-Evertson 体应变仪和 Gladwin 张量应变仪基本上各占一半, 再少量安装几套 Sacks-Evertson-Sakada 三分量应变仪, 以进行对比观测.

5 结语

钻孔应变观测尚存在一些问题没有彻底解决, 如原地标定问题、零漂问题、防雷击问题. 但是在国际上, 钻孔应变观测发展到今天, 已经成为一种主流的地壳应变观测方法. 回顾国际钻孔应变观测的历程, 这种手段所以有今天, 主要是因为它的一系列令人信服的

观测研究结果。可以将这些成果归结于两方面的因素:一方面是仪器的性能;另一方面是观测研究方法和结果。

仪器的优良性能保证了长期、稳定地产出高精度、高质量的数据,而正确的观测研究方法是取得科学成果的依据。这里面一个十分关键的要点是,科学的观测需要重复性。这种重复性一方面是时间上的,另一方面是空间上的。时间上的重复性需要正确地选择观测场所,以及仪器具有良好的稳定性;而空间上的重复性则需要观测点与观测点不要离得太远,以使它们的观测资料之间具有可比性,可以就一些构造或非构造事件(例如地震、慢地震、气压和降水等引起的变化)进行对比。

在本文的写作过程中,笔者与苏恺之、欧阳祖熙和池顺良三位研究员进行了有益的讨论,在此表示感谢。

参 考 文 献

- 邱泽华,张宝红. 2002. 我国钻孔应力-应变地震前兆监测台网的现状[J]. 国际地震动态, (6): 5~9
- 石井纮. 2001. 新钻孔地壳活动综合观测装置的开发和观测[J]. 东浓地震科学研究所报告, (6): 5~10
- 石井纮. 1999. 关于伊豆半岛群发地震的观测前兆变动以及临震预报[J]. 东京大学地震研究所汇报, (23): 10~13
- Gladwin M T. 1984. High precision multi-component borehole deformation monitoring[J]. *Rev Sci Instru*, **55**: 2 011~2 016
- Ishii H, Yamauchi T, Matsumoto S, et al. 2002. Development of multi-component borehole instrument for earthquake prediction study: some observed examples of precursory and co-seismic phenomena relating to earthquake swarms and application of the instrument for rock mechanics[A]. In: Ogasawara H, Ando M, Yanagiani T eds. *Seismic Process Monitoring*[C]. Rotterdam: Balkema, 365~377
- Linde A T, Gladwin M T, Johnston M J S, et al. 1996. A slow earthquake sequence near San Juan Bautista, California in December 1992[J]. *Nature*, **383**: 65~69
- McGarr A, Sacks I S, Linde A T, et al. 1982. Coseismic and other short-term strain changes recorded with Sacks-Evertson strainmeters in a deep mine, South Africa[J]. *Geophys J R astr Soc*, **70**: 717~740
- Sacks I S, Suyehiro S, Linde A T, et al. 1978. Slow earthquake and stress distribution[J]. *Nature*, **275**: 5 681, 599~602
- Sacks I S, Suyehiro S, Evertson D W, et al. 1971. Sacks-Evertson strainmeter, its installation in Japan and some preliminary results concerning strain steps[J]. *Pap Met Geophys*, **22**: 195~207
- Sacks I S, Evertson D W. 1971. Sensitive borehole strain-rate meter[J]. *Carnegie Inst, Washington Yearb*, **68**: 448~453
- Sakata S. 1981. On the concept of some newly-invented borehole three-component strainmeters (in Japanese with English abstract) [J]. *Rep Nat Res Center Disaster Pre*, **25**: 95~126
- Stefansson R, Sacks I S, Linde A T. 1980~1981. The Hekla Eruption of 1980—the mechanism of a ridge volcano[R]. *Annual Report of the Director*. Department of Terrestrial Magnetism, Carnegie Inst, 511~514

DEVELOPMENTS OF BOREHOLE STRAIN OBSERVATION OUTSIDE CHINA

Qiu Zehua¹⁾ Shi Yaolin²⁾

1) Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

2) Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract: Borehole strain observation is playing an increasingly important role in the study on the crustal movements. It has been used by many countries such as China, USA, Japan, Peru, Australia, South Africa, Iceland and Italy, in research fields of plate tectonics, earthquake, volcanic eruption, dam safety, oil field subsidence, mining collapse and so on. Borehole strainmeter has been improved rapidly and tends to get more and more components included in one probe. Based on observations by this kind of instruments, studies on seismic strain step, slow earthquake, earthquake precursor and volcanic eruption forecasting have made remarkable achievements. In the coming years, borehole strain observation is going to become one major geodetic means, together with GPS and InSAR.

Key words: crustal deformation; borehole strain observation; borehole strainmeter