

引用格式: 孙尧, 彭华, 姜景捷, 等, 2023. TY 系列高精度体应变仪研制及映震能力分析与应用 [J]. 地质力学学报, 29 (3): 324-338.  
DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.20232903](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.20232903)

Citation: SUN Y, PENG H, JIANG J J, et al., 2023. Development of TY-series high-precision volumetric strain gauge: Analysis and application of its seismic reflection capability [J]. Journal of Geomechanics, 29 (3): 324-338. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.20232903](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.20232903)

## TY 系列高精度体应变仪研制及映震能力分析与应用

孙尧<sup>1,2,3</sup>, 彭华<sup>1,2,3</sup>, 姜景捷<sup>1,2,3</sup>, 马秀敏<sup>1,2,3,4</sup>, 郝飞<sup>1,2,5</sup>, 张斌<sup>1,2,3</sup>  
SUN Yao<sup>1,2,3</sup>, PENG Hua<sup>1,2,3</sup>, JIANG Jingjie<sup>1,2,3</sup>, MA Xiumin<sup>1,2,3,4</sup>, HAO Fei<sup>1,2,5</sup>, ZHANG Bin<sup>1,2,3</sup>

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
2. 自然资源部北京地壳应力应变野外科学观测研究站, 北京 100081;
3. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室, 北京 100081;
4. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083;
5. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 湖北武汉 430074

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*
2. *Observation and Research Station of Crustal Stress and Strain in Beijing, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;*
3. *Key Laboratory of In-situ Stress Measurement and Monitoring, China Geological Survey, Beijing 100081, China;*
4. *School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;*
5. *Institute of Geological Survey, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China*

### Development of TY-series high-precision volumetric strain gauge: Analysis and application of its seismic reflection capability

**Abstract:** The article reviews the development of the volumetric borehole strain gauge. In response to the current problems of insufficient stability and bandwidth and low calibration accuracy of the volumetric strain gauge, a TY-2B-type small volumetric borehole strain gauge was developed with innovative improvements in the hydraulic sensor, control circuit, and calibration method. The improved hydraulic sensor improves the accuracy and reduces the instrument's volume; the improved control circuit increases the sampling rate, bandwidth, and the instrument's stability; the innovative piezoelectric ceramic calibration technology raises the reliability of the monitoring data. The test results show that the improved TY-2B volumetric strain gauge has a low power consumption of less than 3 W, good long-term stability, high sensitivity with a resolution of  $10^{-11}$   $\epsilon$ , and suitable high-frequency and low-frequency. It has a sampling rate of 100 Hz and can acquire complete seismic strain waveforms with precise and stable solid tide waveforms. It is small and light, with a reduced outer diameter of  $\Phi 89$  mm for  $\Phi 100$  mm drilling, a length of 1300 mm, and a weight of 45 kg for easy transport and installation. After 15 years of laboratory and field station testing, it obtained good monitoring data and demonstrated its highly sensitive seismic reflection capability. The observed response of the volumetric strain station in the northern section of Longmen Mountain to the 2010 Yushu earthquake and the 2023 Turkey earthquake shows that the TY-series high-precision volumetric strain gauge is not only a static strain gauge but also a broad-frequency strain seismograph with dynamic-static calibration capability. It has a unique advantage over pendulum seismometers in that it can observe both the long-term slow deformation and accumulation of deformation in the earth's crust and the transient subtle features of crustal

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20230249, DD20230014, DD2019290, DD20221644); 中国地质科学院地质力学研究所基本科研业务费项目 (DZLXJK202106)

This research is financially supported by the China Geological Survey Projects (Grants DD20230249, DD20230014, DD2019290, DD20221644) and the Basic Research Funds of the Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences (Grant DZLXS202106).

第一作者: 孙尧 (1983—), 男, 博士, 助理研究员, 从事地震学、地应力测量和监测等方面研究。E-mail: [980483939@qq.com](mailto:980483939@qq.com)

通讯作者: 彭华 (1964—), 男, 博士, 研究员, 从事地应力、地应力测量和监测、地学仪器设备研制、岩石力学等方面研究。

E-mail: [1391161856@qq.com](mailto:1391161856@qq.com)

收稿日期: 2023-02-28; 修回日期: 2023-05-19; 责任编辑: 吴芳

rupture and deformation. The long-term trends of the monitoring curves obtained from the Qingchuan–Hanzhong volumetric strain stations since the Wenchuan earthquake and the Guangzhou station since 2021 are consistent with the regional geological characteristics reflected by the seismic and tectonic geological data, indicating that the TY-2B volumetric strain gauge can meet the needs of geological scientific research and geological hazard observation.

**Keywords:** broad-frequency strain seismograph; seismic reflection capability; borehole volumetric strain gauge; crustal deformation; earthquake

**摘要:** 文章综述了钻孔体应变仪的发展历程, 针对体应变仪目前存在的稳定性和带宽不足、标定精度低等问题, 创新与改进液压传感器、控制电路、标定方法等技术, 研制出TY-2B型钻孔体积应变仪。改进的液压传感器提高了仪器精度, 缩小了仪器体积; 改善了控制电路, 提高了仪器采样率、带宽及稳定性; 创新的压电陶瓷标定技术提高了监测数据可靠性。测试结果表明改进型的TY-2B型体应变仪功耗低, 小于3 W; 长期稳定性好; 灵敏度高, 分辨率达到 $10^{-11}\epsilon$ ; 高频特性和低频特性好, 采样率10~100 Hz, 可采集完整地震应变波波波形, 固体潮波形清晰稳定; 体积小重量轻, 外径缩小至 $\Phi 89$  mm, 适用于 $\Phi 100$  mm 钻孔, 长度1300 mm, 重量45 kg, 运输和安装方便。经室内检验、野外台站15年的测试, 获取了良好的监测数据, 体现了高灵敏的映震能力, 龙门山北段体应变台站对2010年玉树地震及2023年土耳其地震的观测响应表明TY系列高精度体应变仪不仅是静态应变仪, 还是宽频应变地震仪, 具有动-静态标定能力, 且相对于摆式地震仪有着极宽响应频带的独特优势, 既可以观测地壳长期缓慢变形及其积累的特征, 还可观测地壳破裂变形的瞬态细微特征。汶川地震以来青川—汉中地区体应变台站及2021年以来广州台站获取的监测曲线长期变化趋势与地震、构造地质等资料所反映的区域地质特征相符, 表明TY-2B型体应变仪可在地球动力学研究、地质灾害预测预警等领域推广使用。

**关键词:** 宽频应变地震仪; 映震能力; 钻孔体应变仪; 地壳变形; 地震

**中图分类号:** P315.72+7; P716+8      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1006-6616 (2023) 03-0324-15

**DOI:** 10.12090/j.issn.1006-6616.20232903

## 0 引言

地应力是存在于地壳中的基本作用力, 地壳表层和内部发生的各种构造现象及其伴生的各种地质灾害都与地壳应力作用密切相关。对地壳应力及其相关地球物理现象的观测与研究已成为揭示板块驱动机制、块体相互作用、断裂活动、地震发生过程等内生地质作用的关键因素。地应力监测是探索内动力地质灾害预测预报的有效方法和途径。Sacks et al.(1978)认为, 对内动力地质灾害(如地震)的成因有了充分的了解, 并有足够灵敏和稳定的应变仪, 就能够探测和诊断出地震前应力场的变化, 实现预测或预报的可能。

应变仪是研究地壳内部动力学过程及内生地质灾害监测的主要工具(Sacks et al., 1978; Linde et al., 1996; Roeloffs, 2006; 张凌空和牛安福, 2008; 邱泽华等, 2012; Takanami et al., 2013; Bonaccorso et al., 2016; 邱泽华, 2017; Barbour and Crowell, 2017; 全建军等, 2021; 孙艺玫等, 2021; 娄家墅和田家勇, 2022)。由于应变近似以距离的三次方衰减, 因此应变和应变率感测仪器需要很高灵敏度, 达到 $10^{-9} \sim 10^{-11}\epsilon$

( $\epsilon$ 为单位应变), 通常要用长基线应变仪测量, 如基线长度数百米至数千米的激光干涉应变仪, 要减少环境温度对测量结果的影响, 需要埋设在地下或安装在地下隧道中、占用的场地较大, 这限制了长基线应变仪的应用。而短基线的钻孔应变仪安装在数十至数百米的钻孔中, 温度长期稳定、地层吸收了电磁干扰和地表噪声干扰, 安静的观测环境提高了信噪比, 测量灵敏度可达 $10^{-10} \sim 10^{-11}\epsilon$ 。短基线钻孔应变仪达到了与长基线应变仪一样的灵敏度, 而且尺寸小、占地少容易安装, 近年来, 短基线钻孔应变仪得到了广泛的应用(苏恺之, 2003b)。

体积式应变仪(简称体应变仪)是最早投入应用的应变仪类型之一, 至今有50年的历史(Allen, 1972), 目前体应变仪在全球现役的应变仪数量中仍然占有一定的比例。20世纪80年代, 该仪器在中国、日本和美国这3个国家中也不约而同地成为应力应变观测的主导型仪器, 主要因为其技术原因, 即体应变仪的力学原理相对较为简捷, 对岩石及胶结水泥状态的依赖性相对较低, 易于取得较为可靠的观测资料。因此, 日本在发展陆地及海下深钻井观测工作中仍以体应变仪为主要设备(苏恺之, 2003b)。早期的钻孔应变仪是液位式的, 测量

原理类似热膨胀温度计,测量机构为波纹管 and 位移传感器,采用杠杆机械放大装置,需要较大的感应舱,仪器整体长度 6~8 m, 不锈钢外壳和芯柱,在实验室一体化组装后不能拆卸,体积和重量大,不利于运输;但其结构简单,工作稳定可靠,在美国和日本至今仍然是地壳应变测量的主要仪器(Gladwin, 1984; Furuya and Fukudome, 1986; Furuya et al., 1991)。80年代,中国在引进国外仪器的基础上研制了液压式体应变仪并加以改进,采用液压传感器,并采取增加芯柱、减少硅油体积、提高整体液压刚度方法,使小体积感应舱也能获得较高的应变-电压输出,进一步推进了体应变观测的轻便化。

迄今为止体应变仪在小型化和提高灵敏度方面有着较大的进展,但仍存在一定的不足,例如应变仪稳定性和带宽尚需进一步提升,标定技术需要进一步改进,尤其是热标定装置,其原理不可靠且精度较低。目前迫切需要研制一种稳定性高、频带宽、标定精度高、适宜国内地质钻探常用的小口径钻孔的高灵敏度小型化体应变仪,应用于地震观测、断裂活动监测等地球科学领域,以满足地球动力学研究、地震预测、断层及岩土工程稳定性研究的需要。文章针对体应变仪存在的稳定性和带宽不足、标定精度低等问题,介绍了中国地质科学院地质力学研究所(以下简称地质力学所)在研制 TY-2B 型小型钻孔体积应变仪的过程中,通过创新改进液压传感器、控制电路、标定方法,缩小仪器体积、提高仪器精度、采样率、带宽、稳定性及监测数据的可靠性;并在龙门山断裂带北段、粤港澳大湾区等关键构造带、重要经济区投入测试及应用,进行深部断裂活动引起的应力应变信号监测,以期更好为灾害预测预警及地球动力学研究等地球科学领域提供服务。

## 1 钻孔体应变仪的国内外现状

Benioff(1935)根据液体膨胀测量温度的启示提出了体应变仪的原理(图 1a)。应变仪由充满液体(硅油、煤油、水)的感应腔(容器)、可伸缩波纹管和位移传感器构成,感应腔体积变化时液体可自由进入波纹管,波纹管上连接的位移传感器可直接测出下部感应腔的体积变化,波纹管将体积变化转化为线位移,如果感应腔足够大且波纹管截面积足够小,理论上将达到很高的灵敏度。Benioff的试验装置感应腔体积为 30 L,测试其灵敏度在 0.1 Hz 采样

率下达到  $10^{-12}\epsilon$ ,这在当时已达到很高的水平。同时这种应变仪也是一种很好的线性应变地震仪,可以用来观测地震(Benioff et al., 1961)。

Sacks 和 Evertson(Sacks et al., 1971; Evertson, 1977)在 Benioff 体积应变仪的基础上进行了改进,研制成功了钻孔应变仪,并安装在 DTM-CIW(美国华盛顿特区卡耐基研究所地磁部)。应变仪呈圆柱状,由上下两个空腔构成。上部空腔保留有空气层,形成一个相对稳定不变的压力基准;上下腔体间采用一根长 25 mm,直径为  $\Phi 0.1$  mm 的针管沟通,使上下腔体缓慢实现压力平衡,相当于一个高通液压滤波器。当感应腔感受地层介质体积的变化,高频应变信号在压力传感器上产生压力信号输出,这种体应变仪尤其对地震波高频段应变较敏感。这种应变仪测量的是相对变化,不能测量低频应变信号,又称滤波型应变仪,实际上是应变地震仪,无法感知应变积累(图 1b)。而真正实用的应变仪是卡内基研究所和德州大学奥斯丁分校联合开发的一种新型的液位式体应变仪,又称 Sacks-Evertson 体应变仪,具有较高灵敏度和较宽的频率响应(图 1c)。

液位式体应变仪是一个充满硅油液体的不锈钢筒型容器,在感受到地层岩石传递来的体积应变时,钢筒体积发生微小变化,在压力基本不变的情况下,液体自由进出波纹管,使其产生与筒内体应变同步变化,连接在波纹管顶端的位移传感器来测量体积变化,通过测量位移来达到钻孔体应变的高精度测定。为了提高灵敏度,早期的应变仪体积较大,感受筒直径为  $\Phi 108$  mm,长度超过 6 m,在波纹管后方增加了机械放大装置,驱动差动变压器位移传感器,同时增设高灵敏弯曲压电陶瓷片进行微小位移测量。探头安装在岩石钻孔中,钻孔直径为  $\Phi 150$  mm,探头与钻孔间采用膨胀水泥灌注固封。液位体应变探头采用井上仪器驱动和数据采集,井下无需复杂的电子线路(仅设置防雷压敏电阻),工作可靠,寿命长,长期稳定,灵敏度高,但仪器体积和重量较大,不便运输和安装。中国地震局地壳应力所 1981 年引进数套美国 Sacks-Evertson 液位式体应变仪用于地震前兆研究。

液压式体应变仪是中国地震局地壳应力所独创的一种应变仪,从 20 世纪 70 年代开始研制体应变仪,经过多年的努力,研制成功了 TJ 系列应变仪(苏恺之, 1982, 1993, 2003a),并广泛应用在地震预测和预报的前兆观测之中。与液位式不同,液压式体应变仪在感受到地层岩石传递来的体积应变时,

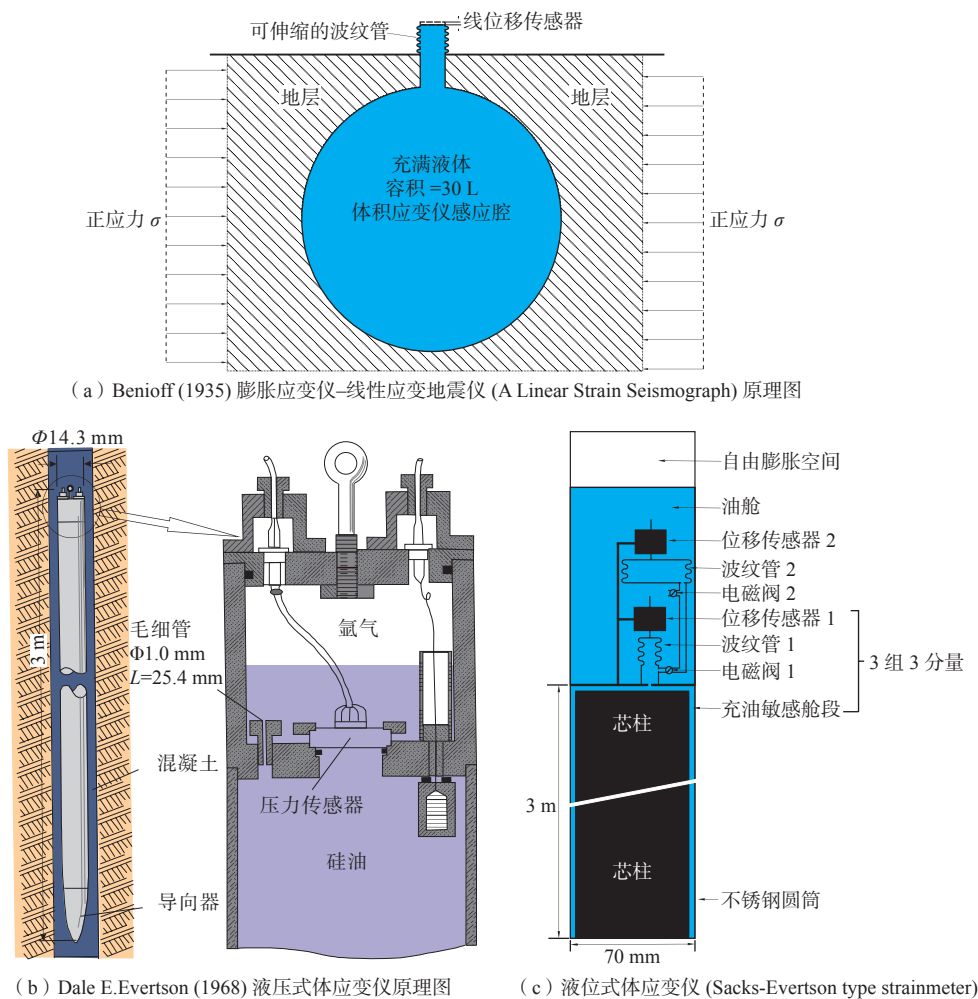


图 1 不同类型体积式钻孔应变仪原理图  
Fig. 1 Schematic diagram of volumetric borehole strain gauges

感受筒体积也随之变化,筒内封闭的液体不能自由膨胀,由于液体具有不可压缩性,使得筒内密闭空间液体压力与岩层体应变同步变化,通过压力传感器测量压力变化来达到钻孔体应变的高精度测定。液压式应变仪在设计时需尽量提高其液压系统的刚度,采用高刚度压力传感器,并在筒内设置芯柱,以进一步提高刚度。由于设置芯柱大大提高了感受筒的刚度,提高了体应变灵敏度,同时也减小了仪器体积。

在李四光先生的引领及指导下(李四光, 1976),地质力学所从 20 世纪 60 年代以来,开展了大量的地应力测量研究工作(廖椿庭和施兆贤, 1983; 李方全, 1985; 廖椿庭等, 1985; 丰成君等, 2022; 孟文等, 2022),先后研制了的压磁应力计(廖椿庭和施兆贤, 1983; 廖椿庭等, 1985)、空心包体应变计(王连捷等, 1991; 白金朋等, 2013),水压致裂地应力测量系统(彭华等, 2006b, 2009, 2011b),主要应

用于矿山、地下工程等绝对应力测量。为开展构造变形动力学、地壳稳定性研究,地质力学所研制了 TY 系列体应变仪(彭华等, 2006a, 2008, 2011a),应变测量灵敏度达到了  $10^{-9} \sim 10^{-11} \epsilon$ 。TY 系列体应变仪是应力-应变相对变化观测仪器,主要用于地壳变形、断层活动、火山、矿山采动变形及地质灾害监测。

TY 系列体应变仪包括早期的 TY-1 型,后期的 TY-2A 型和 TY-2B 型及目前在研制中的三分量体应变仪 TY-3 型。1988 年研制的 TY-1 型钻孔体应变仪为液位式(图 2a),应变仪为圆柱状,直径为  $\Phi 114$  mm,总长度 5 m,其中感应腔(舱段)硅油 36 L,有效工作长度 4 m,内设置 2 个带差动变压器测微计的铍铜波纹管和一个微型电磁阀,该装置安放在恒温实验室中,是一个原理性实验装置。应变仪外壳采用  $\Phi 114$  mm 厚壁地质套管,进行了各种工作介质如纯水、无水乙醇、煤油、机油、变压器油等适宜性研

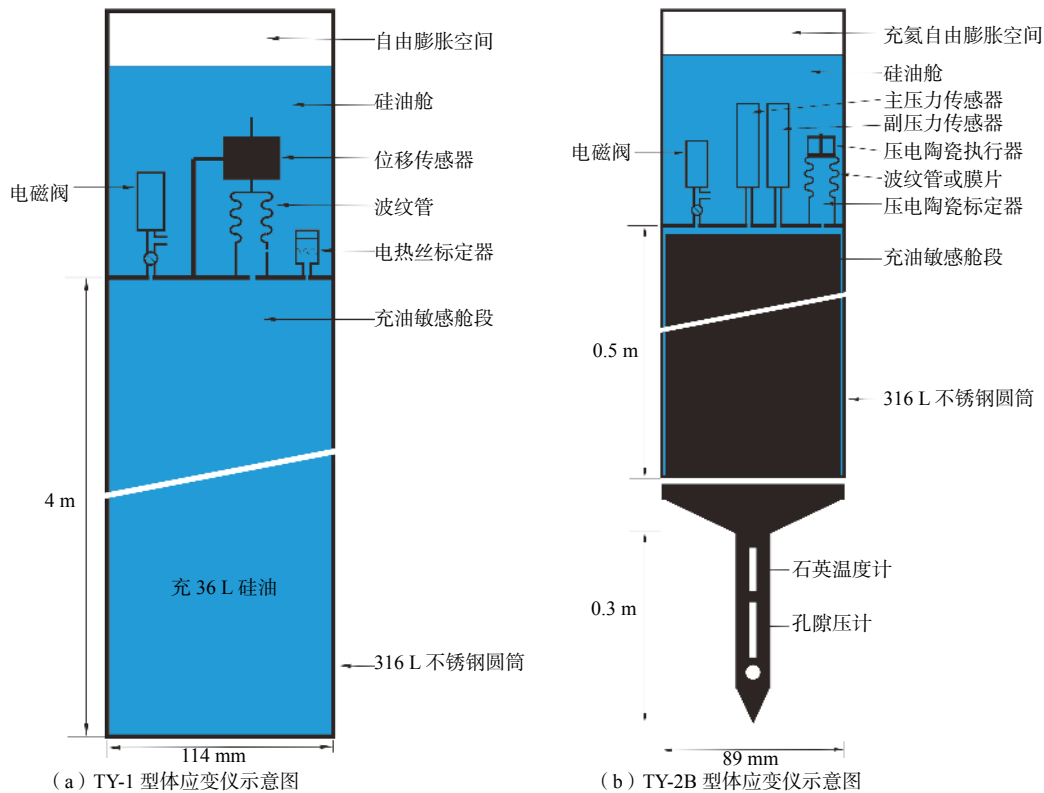


图 2 地质力学所自主研发的液位式 TY-1 型体应变仪及液压式 TY-2B 型体应变仪示意图

Fig. 2 Schematic diagram of liquid-level-type TY-1 volumetric strain gauge and hydraulic-type TY-2B volumetric strain gauge developed by the Institute of Geomechanics, CAGS

究,同时也进行了波纹管、测微计、电磁阀测试和模数转换、通信试验,积累了大量实验数据。由于实验装置体积大,无法竖立,致使部分元件(例如电磁阀)不能正常工作,也因该装置对室内空气流动、人员活动扰动、环境温度极其敏感,但受限于当时敏感腔焊接、抽真空、充填硅油等工艺,致使其灵敏度和稳定性达不到设计指标。

1998年地质力学所在TY-1型基础上研制了TY-2A型应变仪, TY-2A型为液压式钻孔体应变仪,和传统的液位式钻孔体应变仪相比在原理和结构上有所不同,增加了芯柱,测量元件为压力传感器,标定机构为电阻热标定,仪器长度2.1 m,感受腔长度1 m,重量70 kg,体积较之前有所减小,便于运输和安装,两个压力传感器经过INA125仪表放大器放大到 $\pm 5$  V的模拟信号,通过屏蔽电缆传输到地表,用16位A/D转换成数字信号,并在地质力学所院内建立了TY-2A型体应变仪实验站,对其耐候性、长期稳定性、电源和数据测控自动化进行了5年的测试。2005-2006年,采用TY-2A型体应变仪分别在东昆仑断裂带、五道梁断裂带、班公-怒江断裂带和桑雄-亚东断裂带的西大滩、五道梁、安

多、羊八井等地投入断层活动性观测,初步建立了青藏铁路沿线地应力监测网,通过监测断裂活动引起的地应力变化,分析其稳定性,以保障铁路的安全。

2007年在中国地质调查局的地质调查项目支持下,地质力学所研制了新型体应变仪,进一步缩小了体积,探头长度1.3 m,重量45 kg。同时进行了探头数字化改造,采用48VDC供电,井下功耗 $< 3$  W,标定机构为压电陶瓷驱动微量泵,在探头内增加单片机控制和A/D转换,可自动转换量程,并通过RS485总线将信号传输到井口服务器。数字化改造减小了噪声,提高了地层应变分辨率,定型为TY-2B型(图2b)。得益于井下环境避开地表噪音和机械震动,以及隔绝外界电磁干扰和保持长期稳定的温湿度工作条件,大大提高了体应变仪的技术指标。TY-2B型体应变仪是数字化应变仪,采样率10~100 Hz,由于采用井下单片机控制及24位AD转换提高了分辨率,使得该仪器不仅可以监测地应力静态特征,也是一台很好的应变地震仪。

体应变仪受大气压、地层孔隙压力及地层温度影响较大(檜皮久義等,1983;上垣内修,1987;周龙寿等,2008;彭华等,2008,2011a;张凌空等,2011;木

村一洋等, 2015; 张凌空和牛安福, 2019), 为了综合分析这些因素对仪器的影响, TY-2B 型体应变仪底部增加了孔隙压计和石英谐振温度计, 通过体应变与地表大气压、地层孔隙压及地层温度变化同步观测和综合分析, 可消除大气压、地下水、地温变化对仪器的影响, 提高了数据的可靠性, TY-2B 型仪器的研制成功, 推动了中国钻孔应变构造变形和地质灾害观测手段的进步, 为近年来开展深孔应变观测及井下综合观测准备了一定的技术条件。

TY-2 系列体应变仪针对体积大、电路和仪器分置、分钟采样、热标定不精确、缺乏辅助参数等技术问题进行了改进和创新, 将采集、传输和控制电路置于井下探头内, 实现体应变仪数字化; 高速采样, 使得该仪器具备宽频应变地震仪的功能; 采用压电陶瓷驱动波纹管技术研制成功精密纳米体积标定泵, 实现体应变仪刚度、应变精确标定; 将影响体应变测量的温度和孔隙压测量探头集成到探头底部, 实现体应变、孔隙压和井温的同步测量, 便于数据分析。

## 2 TY-2B 型体应变仪特点与仪器标定

### 2.1 体应变理论

任意的力在任意方向上作用于地质体, 围绕地质体内部一点  $O$ , 设  $O$  点坐标为  $(x, y, z)$ , 取一体积单元, 三轴向应力作用 (邱泽华, 2017) 如图 3a 所示。

体积单元每个面上有一个法向正应力和两个剪应力,  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  为三轴方向正应力,  $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  为剪应力,  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  为  $x, y, z$  轴向应变。各向同性材料

符号规定: ①正应力: 拉应力为正, 压应力为负; ②剪应力: 对单元体内任一点取矩, 若产生的矩为顺时针, 则  $\tau$  为正, 反之为负; ③线应变: 以伸长为正, 缩短为负; ④切应变: 使直角减者为正, 增大者为负; ⑤应力分量符号下脚标分别表示应力作用面的法线方向和应力的作用方向。

地质体同时受各轴向之外力作用时, 体积必发生变形, 若外力为张力则体积必增加, 反之则缩小。所以此地质体单位体积  $V$  变形后体积为  $V'$ , 所产生的体积变形量  $\Delta V = V' - V$ , 称为体积应变, 以  $\varepsilon_v$  表示, 即

$$\varepsilon_v = \frac{V' - V}{V} = \frac{\Delta V}{V} \quad (1)$$

分析三轴向应力所生的体积变形, 可假设每一边长均为 1 单位长度的微小立方体, 如图 3b 所示。当此立方体承受三个轴向应力后, 各轴向应变如式 (2) 所示, 求得  $x, y, z$  轴向总应变  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  为:

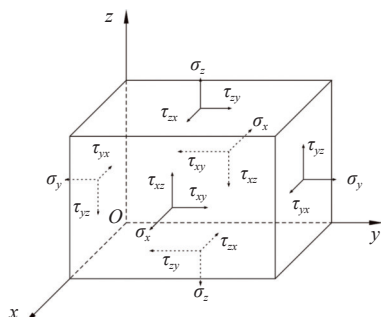
$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E} - \frac{\mu(\sigma_y + \sigma_z)}{E}; \\ \varepsilon_y &= \frac{\sigma_y}{E} - \frac{\mu(\sigma_x + \sigma_z)}{E}; \\ \varepsilon_z &= \frac{\sigma_z}{E} - \frac{\mu(\sigma_x + \sigma_y)}{E} \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $E$ —弹性模量;  $\mu$ —泊松比。

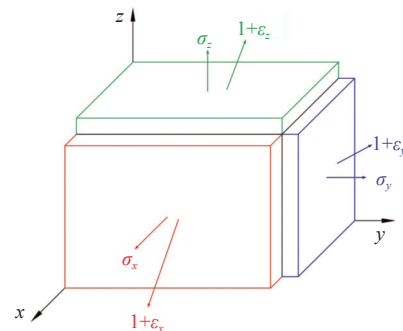
即立方体变形后每边长分别为  $1 + \varepsilon_x, 1 + \varepsilon_y, 1 + \varepsilon_z$ , 体积应变为:

$$\varepsilon_v = \frac{V' - V}{V} = \frac{(1 + \varepsilon_x)(1 + \varepsilon_y)(1 + \varepsilon_z) - 1}{1} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z + \varepsilon_x \varepsilon_y + \varepsilon_y \varepsilon_z + \varepsilon_x \varepsilon_z + \varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \quad (3)$$

因为  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$  数值极小, 其乘积为高阶小量可以忽略, 上式可简化为:



(a) 立方体上的三轴应力张量



(b) 正应力与应变的关系

$\sigma$ —正应力;  $\tau$ —剪应力;  $\varepsilon$ —轴向应变

图 3 体积单元三轴向应力作用

Fig. 3 Triaxial stress action of volumetric elements

$\sigma$ —positive stress;  $\tau$ —normal stress;  $\varepsilon$ —axial strain

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad (4)$$

故地质体材料的体应变为三轴应变的总和。

将式(1)代入式(4),可得三轴向应力的体积应变为:

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V} = \frac{1-2\mu}{E}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (5)$$

设各向同等的压力与其引起的体积变化率之比为材料的体积模量  $K_m$ , 则:

$$K_m = \frac{E}{3(1-2\mu)} \quad (6)$$

## 2.2 TY-2B型液压型体应变传感器的结构设计

液压型体应变仪由感受筒、芯柱、压力传感器、电磁阀、控制电路及电源构成。感受筒是充满硅油的密闭结构,硅油的体积压缩模量小,为了提高体应变仪的灵敏度,在硅油中增加体积压缩模量较大的钢芯柱,不锈钢感受筒在地层应力作用下,产生的体积变化,使得液压传感器所感受的液压变化  $\Delta P$  为

$$\Delta P = K_C \frac{\Delta V}{V} \quad (7)$$

式中,  $\Delta V/V$ —不锈钢感受筒的内容积  $V_1$  的相对变化量;  $K_C$ —体应变仪感受筒视体积压缩模量,是体应变变化产生内部硅油压力变化的转换系数,该参数由体应变感受筒内部芯柱体积压缩模量、硅油体积压缩模量及压力传感器特性决定(苏恺之, 2003a),  $K_C$  的具体表达式为

$$K_C = \frac{V}{\frac{V_m}{K_m} + \frac{V_H}{K_H} + \frac{N}{G_s}} \quad (8)$$

式中,  $V_m$ —内芯柱的外体积;  $K_m$ —内芯柱的等效体积压缩模量;  $V_H$ —硅油的体积;  $K_H$ —硅油的体积压缩模量 ( $1.1 \times 10^3$  MPa);  $G_s$ —传感器受压变形时体积消耗相应的刚度,单位 MPa/cm<sup>3</sup>。  $V=V_m+V_H$ ,  $K_m$  由式(9)计算:

$$K_m = \frac{E(n_0^2 - 1)}{n_0^2(3 - 6\mu + 2\mu^2) + 2(1 - \mu^2)} \quad (9)$$

式中,  $E$ —内芯柱材料(不锈钢)的弹性模量,  $2.1 \times 10^5$  MPa;  $\mu$ —内芯柱材料(不锈钢)的泊松比, 0.30;  $n_0$ —内芯柱的外径、内径之比。

由式(9)可知,芯柱的体积压缩模量远大于硅油,增加芯柱,可提高了探头视体积压缩模量  $K_C$ ,在钢筒容积一定时,芯柱越大,硅油越少,则视压缩模

量越大,如图4所示。 $K_C$  主要由钢芯柱体积与硅油体积比例决定,与钢筒长度、厚度无关。

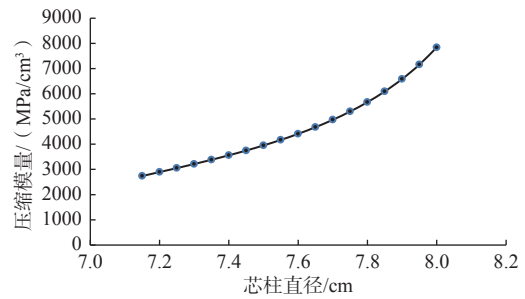


图4 内径  $\Phi 8.1$  cm 的钢筒设置不同芯柱直径与体积压缩模量关系

Fig. 4 Relationship between different core diameters and volumetric compression modulus for cylinder setup with an inner diameter of  $\Phi 8.1$  cm

考虑到体应变仪感受筒在水压力和钻孔地应力引起的变形,以及机械加的难度,芯柱与钢筒间隙在 0.15~0.3 mm。间隙取值取决于安装条件,安装深度 < 200 m,水压变形小,其间隙可取 0.15 mm;安装深度大于 200 m,要考虑水压变形,间隙可取 0.3 mm。

体应变仪感受筒采用外径  $\Phi 89$  mm/内径  $\Phi 81$  mm 的不锈钢筒,长度 1 m 和 0.5 m,芯柱采用外径  $\Phi 7.75$  mm/内径  $\Phi 6.5$  mm 的不锈钢管,压力传感器采用扩散硅型。则体应变仪感受筒内体积为  $V=2576.5$  cm<sup>3</sup>,芯柱体积  $V_m=2358.65$  cm<sup>3</sup>,芯柱体积压缩模量  $K_m=18364.39$  MPa/cm<sup>3</sup>,其内硅油体积  $V_H=217.8$  cm<sup>3</sup>,结构系数  $C=V/V_H=11.7$ ,计算其视体积压缩模量  $K_C=5296.2$  MPa/cm<sup>3</sup>。

## 2.3 TY-2B 应变仪力学-电学设计

体应变仪感受筒结构确定后,其应变-压力转换关系就能明确,即体应变仪感受筒产生体积变形  $\varepsilon_v$  时,硅油产生压力变化  $\Delta P$ 。并可通过压力传感器测量。TY-2B 型体应变仪有 2 个扩散硅压力传感器,量程 500 hPa 和 1000 hPa,满量程输出 150 mV。压力传感器 ADS1210 内部放大器将信号放大,以满足 AD 转换需求。应变仪的体应变-电转换关系如图 5 所示。

在应变仪的体应变-电转换关系图中(图 5),设计体应变仪测量极限分辨率为  $2 \times 10^{-11} \varepsilon$ ,量程为  $2 \times 10^{-11} \sim 1 \times 10^{-5} \varepsilon$ 。体应变仪感受筒体积应变为  $2 \times 10^{-11} \varepsilon$ 、 $1 \times 10^{-9} \varepsilon$ 、 $1 \times 10^{-5} \varepsilon$  时,硅油压力为 0.001 hPa、0.05 hPa、500 hPa,压力传感器输出为 0.3  $\mu$ V、15  $\mu$ V、150 mV,将信号放大器设置放大 32 倍时,仪器输出为 9.6

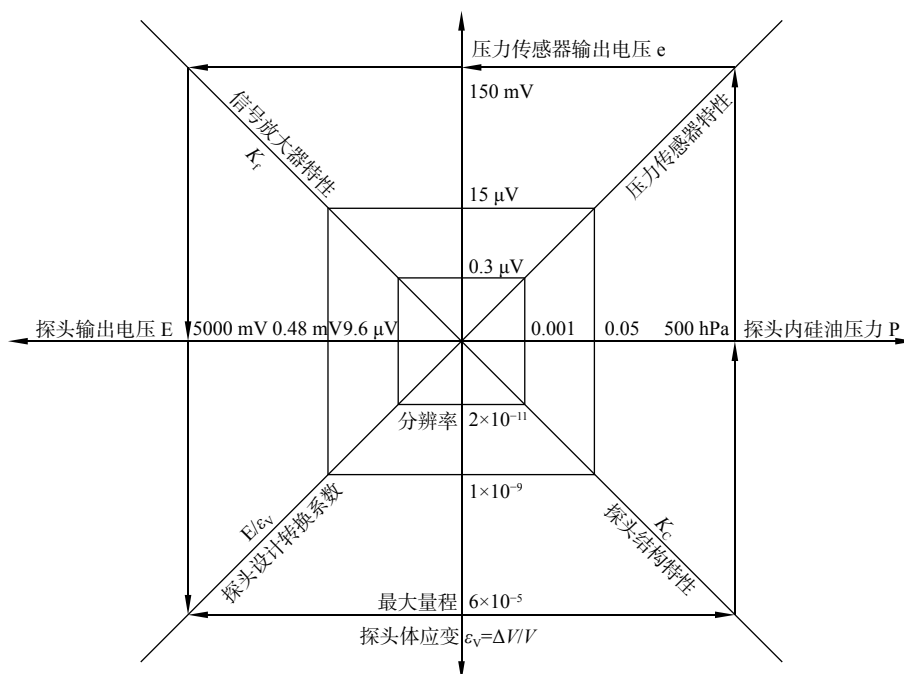


图 5 应变仪的体应变-电转换关系图.

Fig. 5 Volume strain-electric conversion diagram for a strain gauge

μV、0.48 mV、4800 mV, 满足 ADS1210 对信号的要求。

控制电路在感知压力超过±500 hPa 时(负压在传感器允许范围), 启动电磁阀连通压力传感器上工作腔和下敏感腔体, 使得上下腔体压力平衡。在不启动电磁阀的条件下, 一次量程极限为  $1 \times 10^{-5} \epsilon_0$ 。

将 24 位 AD 转换器、信号控制器、ADS1210 单片机作为核心元件, 封装在扩散硅压力传感器上, 从而减少了外界的噪声干扰。采集速率为 20~100 次/s, 采用 RS485 总线传输到地表, 再通过串口服务器进入互联网最终传送到数据中心服务器。

TY-2B 型应变仪摒弃了片面追求稳定而低速采样(分钟值)的传统, 采用了高速采样(20~100 Hz), 采集应变地震波, 不仅保持了应变仪静态应变特点, 还具备了宽频应变地震仪的功能, 既可以观测地壳长期缓慢变形和变形积累的特征, 还可观测地壳破裂变形的瞬态细微特征, 拓展了该类型应变仪的使用范围。

为消除大气压和地下水干扰, 在体应变仪感受筒底部集成了孔底孔隙压计、石英温度计。为了便于资料对比, 孔底孔隙压计采用体应变仪同型扩散硅压力传感器。

#### 2.4 新的标定方法

通过标定能修正系统长期运行所产生的各种误差, 同时也能检验应变仪的工作可靠性。

此次研制了大动态范围的极微量压电陶瓷定量泵(图 6)。该泵采用压电陶瓷驱动波纹管, 产生精确微量体积的标定液体, 注入到体应变仪感受筒内, 进行直接标定。叠层压电陶瓷可产生 45 μm 位移, 使波纹管直接产生  $1 \times 10^{-12} \sim 1 \times 10^{-5} \epsilon_0$ , 满足全量程标定需求; 采用交流驱动时, 产生脉动应变, 可进行体应变仪频率特征测试。压电陶瓷定量泵用于实验室和现场仪器标定幅度, 以检测仪器性能。

##### (1) 实验室标定

实验室标定主要是通过压电陶瓷驱动的定量泵向感受筒内注入定量硅油, 仪器产生预定的体积变化, 通过仪器体应变变化、压力变化与传感器输出数字分析, 可进行: ①仪器渗漏检查; ②电磁阀性能检查; ③  $K_c$  视压缩模量(无地层约束)测试; ④仪器满量程、灵敏度、体应变格值标定; ⑤频谱特性和带宽测试; ⑥线性度测试; ⑦仪器温度稳定性分析。

##### (2) 现场标定

可以进行以上①~⑥项测试, 了解仪器工作状态和可靠性, 分析其渗漏和  $K_c$  变化。

通过创新标定技术方法, 提高了监测数据的可靠性。

#### 2.5 TY-2B 型高精度数字体应变仪结构及技术指标

TY-2B 型体应变仪整体采用 Φ89 mm 直径 316 不锈钢管焊接而成, 总长 1300 mm。内部由工作舱段、压力平衡舱段和仪器舱段组成, 其中, 工作舱



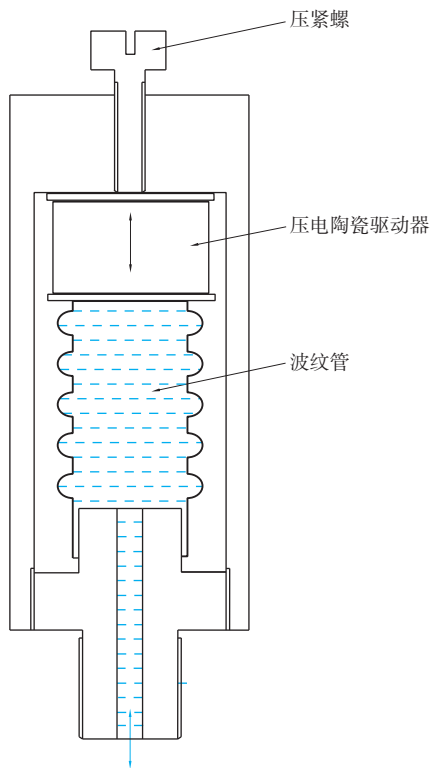
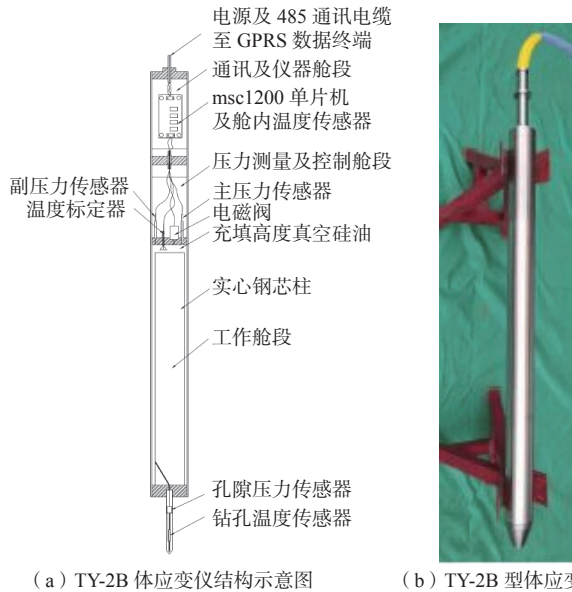


图6 压电陶瓷驱动定量泵

Fig. 6 Piezoelectric ceramic quantitative pump



(a) TY-2B 体应变仪结构示意图

(b) TY-2B 型体应变仪

图7 TY-2B 型体应变仪结构示意图及实物

Fig. 7 Structural diagram and profile display of TY-2B volumetric strain gauge

段长 500 mm, 工作体积 2576.5 cm<sup>3</sup>, 装 2 支量程分别为 0.1 MPa 和 0.05 MPa 的高精度压力传感器; 压力平衡舱段长度 400 mm, 封闭 350 ml、1 个大气压氩气, 由压电陶瓷(TY-2A型为热电阻温度)标定装置、电

磁阀及电缆穿线密封器组成; 仪器舱段长 400 mm, 内置 MSC1210 单片机、通信及控制电路, 在中心站的遥控下负责数据采集和传输, 压力传感器由 1.5 mA 恒流源供电, 产生  $\pm 200$  mV 压力信号, 再由 MSC1210 单片机 24 位 4 通道高精度 AD 转换器转换成数字信号, 通过光隔离 RS485 总线传输到地面(图 7a)。为防止压力超过传感器量程, 损坏压力传感器, 增加了压力监控电路, 当体应变仪感受筒内压力超过一定数值时, 自动打开电磁阀平衡工作舱段压力, 使传感器归零。整个体应变仪系统精度为  $10^{-11}\epsilon$ , 能观测到清晰的固体潮信息。MSC1200 单片机内置精度 0.2 °C 的温度传感器, 用来测量探头内温度变化。工作舱的下部设有孔隙压和温度传感器, 用它们来测量岩石的孔隙压力和温度。TY-2B 型体应变仪实物如图 7b 所示, 主要技术指标如表 1 所示。

表 1 TY-2B 型体应变仪技术指标

Table 1 Technical index of TY-2B volumetric strain gauge

项目名称	技术指标
系统供电电压	12~48 V/DC
系统功耗	井下功耗 < 3 W
AD位数	24位数据井下采集
系统采样速率	20~100Hz
数据传输模式	RS485传输
系统观测灵敏度	$\approx 1 \times 10^{-11}\epsilon$
系统观测动态范围	$\geq 1 \times 10^5\epsilon$

### 3 TY-2B 型体应变仪映震能力及其在活动断裂监测中的应用

#### 3.1 体应变监测站构成及监测数据质量分析

汶川地震后, 为了了解龙门山北段平武-青川断裂活动状态及对汉中地区地壳稳定性的影响, 2008 年 6—7 月在平武-青川断裂中段大安一代家坝布置 2 个地应力监测台站, 监测断裂带两侧地应力变化及其流体变动情况。地应力监测台站由井下设备和地表仪器组成(图 8), 井下设备包括井底 TY-2B 体应变仪、孔隙计、石英温度计, 观测岩石应力变化和岩石流体孔隙压和温度变化; 地表仪器涉及水位计、水温计、地震计和通讯供电系统构成, 以获得微地震事件, 监测地下水位和水温变化。台站井下电源采用太阳能和其它设备采用市电双电源。

大安台位于陕西省汉中宁强县大安镇, 地理坐

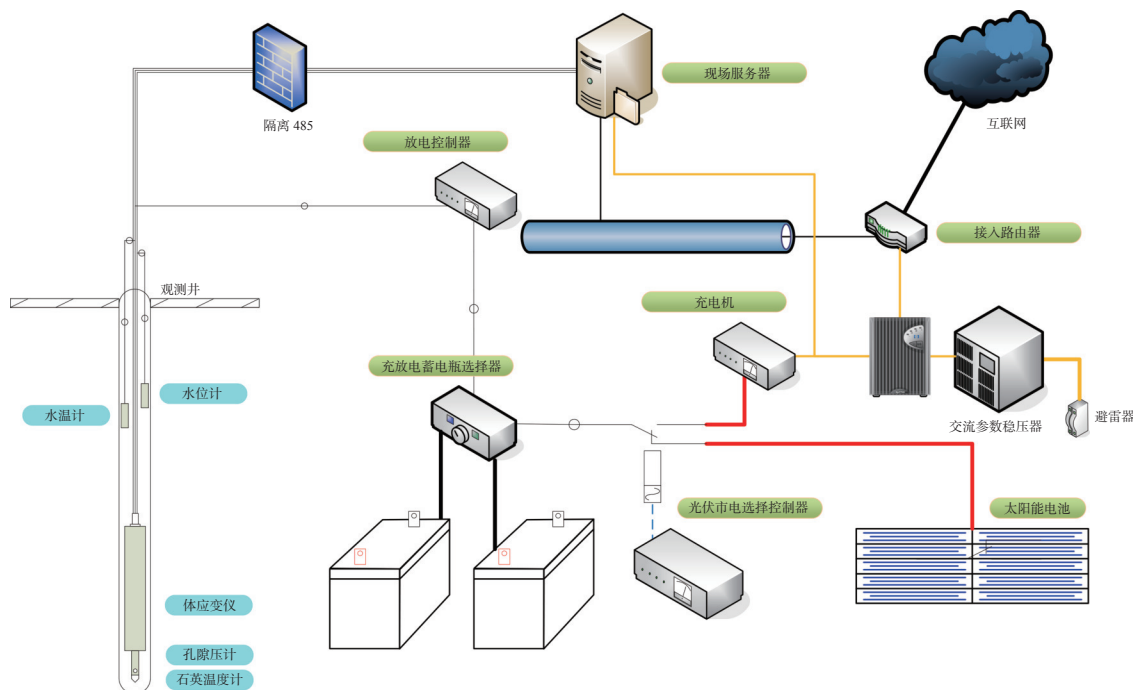


图 8 体应变仪监测网络拓扑图

Fig. 8 Monitoring network topology of volumetric strain gauge

标为东经 106.30°、北纬 33.05°，海拔高程 688.92 m。台站位于平武-青川断裂南 1250 m，台基岩性为半风化粗粒花岗岩，浅粉红色，呈粗砂状，钻探向下 10 m 左右进入完整岩石。开口孔径为  $\Phi 150$  mm，终孔孔径为  $\Phi 130$  mm，孔深 100.3 m，套管深度 20 m，水深 2.3 m，体应变仪安装深度为 95m。安装日期：2008 年 6 月 3 日。

代家坝台位于宁强县代家坝镇，地理坐标为东经 106.13°、北纬 33.05°，海拔高程 595.97 m。台站位于平武-青川断裂北 5003 m，台基岩性为中晚元古中厚层变质片岩，灰黑色，坚硬状态，层状结构，节理发育，开口孔径为  $\Phi 150$  mm，终孔孔径为  $\Phi 130$  mm，孔深 31.5 m，套管深度 10 m，水深 0.5 m，体应变仪安装深度为 30m。安装日期：2008 年 7 月 1 日。

台站仪器安装接近 15 年，电源和电池每 3~4 年更换一次，TY-2B 型体应变仪至今仍然在正常工作。选取 2010 年 4 月份和 2011 年 4 月份(图 9a、9b)大安台全月体应变曲线，对比观测数据表明：固体潮幅值长期稳定，固体潮最大日变幅差为  $5 \times 10^{-8} \epsilon$ ，应变仪工作正常，数据较为可靠。

根据上述应变观测资料，反映出正常稳定的固体潮信息，其全日波、半日波和 1/3 日波清晰可见；台站长期体应变特征亦可从固体潮曲线中读取，反映出观测区应力场大小的长期变化。汶川地震以

来，位于平武-青川断裂东南盘的大安台应变固体潮曲线处于长期稳定的下降趋势，由 2010 年 4 月平均日降率为  $6 \times 10^{-9} \epsilon/d$  到一年后的 2011 年 4 月平均日降率为  $1 \times 10^{-9} \epsilon/d$  (图 9a、9b)。位于平武-青川断裂西北盘的代家坝台应变固体潮处于长期稳定的上升趋势，2010 年 4 月平均上升率为  $13 \times 10^{-9} \epsilon/d$  (图 9c)，到一年后趋于稳定。反映汶川地震后青川-汉中地区区域应力场在持续稳定调整直至相对均衡，2011 年后逐渐稳定，区域应力场的变化趋势与区内地震活动在此时间区间内的频度变化相符。

2010 年 4 月 14 日，青海省玉树藏族自治州发生 6 次地震，最高震级 7.1 级，发生在 07 时 49 分 40 秒，地震震中位于玉树市区附近。09 时 25 分 17.8 秒，青海省玉树市再次发生 6.3 级地震，震源深度 30 km。大安台接收到了清晰的应变地震波(图 9d—9f)，同一台站收到地震波 P 波初至均为负向起跳(拉张)，到时分别是 07 时 54 分 47.88 秒和 09 时 30 分 29.16 秒；与中国地震台网目录(data.earthquake.cn)公布的发震时刻比较，P 波走时分别是 5 分 7.88 秒和 5 分 12.08 秒；第二次地震的 P 波走时增加 4.2 秒，从大安台(图 9e)来看，表明第二次地震震中相对第一次地震震中距离大安台站更远。两次地震的地震波最大振幅分别为  $377.2 \times 10^{-9} \epsilon$  和  $62.2 \times 10^{-9} \epsilon$ 。体应变地震波波形震相清晰，反映体应变仪灵敏度

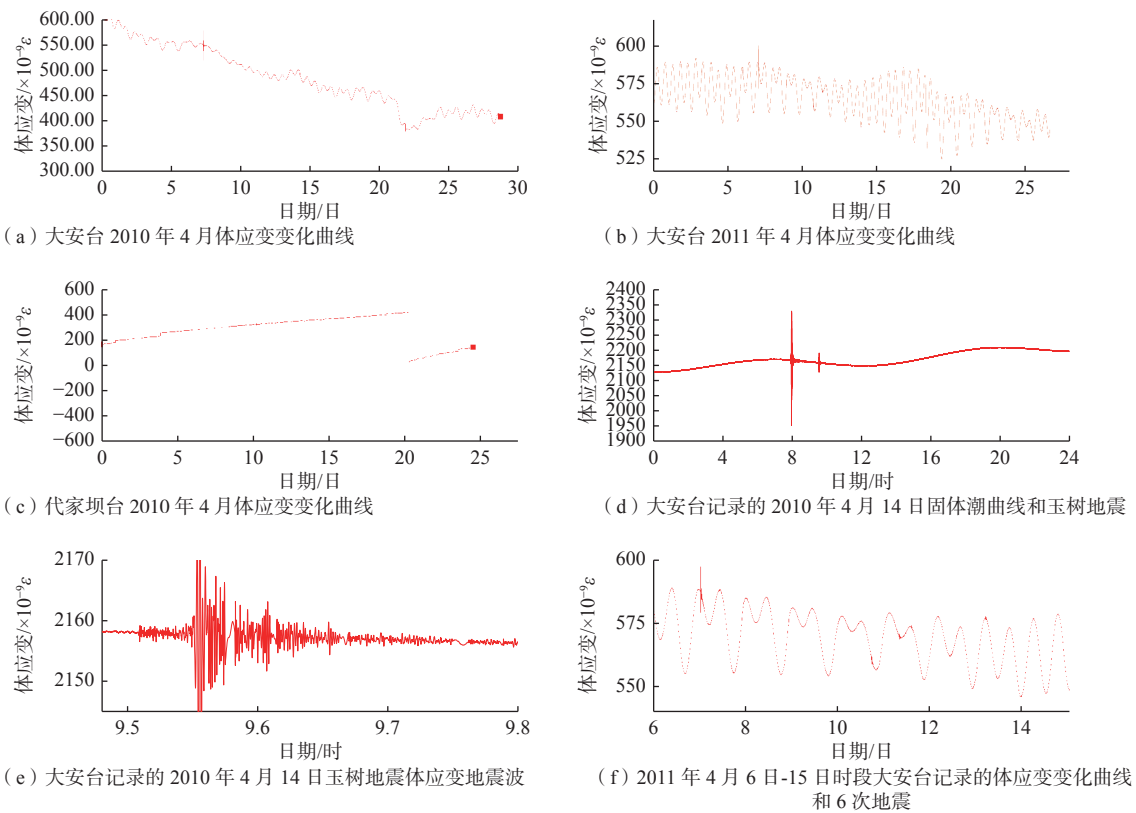


图 9 汶川地震及玉树地震前后体应变变化曲线

Fig. 9 Volumetric strain curves recorded before and after the Wenchuan earthquake and Yushu earthquake

高、频带宽,既是静态应变仪,也是宽频应变地震仪。

### 3.2 TY-2B 型体应变仪对土耳其地震的映震能力

2023 年 2 月 6 日在土耳其中南部卡赫拉曼马拉什省发生两次大规模地震。第一次 7.8 级(矩震级)地震发生在当地时间凌晨 4 时 17 分(北京时间 9 时 17 分;东经 37.03°,北纬 37.17°),第二次 7.5 级地震发生在 13 时 24 分(北京时间 18 时 24 分;东经 37.20°,北纬 38.02°),位于 7.8 级地震北北东方向约 100 km。地震发生在安纳托利亚高原和伊朗高原的过渡地带,位于东安纳托利亚左旋走滑断裂带上。地震发生后,地应力台网下属的多个体应变监测站点均对两次远震有清晰响应,甘肃山丹、广州沙湾 2 个台站记录的完整的应变地震波波形(图 10a、10b),可以清晰的识别 S 波及面波信号,并可大致识别 Pn 波到时(图 10c)。以广州沙湾台站为例,两次地震引起的应变仪周围岩石最大与最小体应变差值分别为  $150 \times 10^{-9} \epsilon$  和  $101 \times 10^{-9} \epsilon$ ,相差 1.48 倍。对比湖北省某地震台站使用摆式地震仪记录的三分量地震波形(图 10d,起始时间为格林尼治时间 15 时 40 分),可以看到体应变仪除了记录到波形相近的地震信号外,还记录到清晰的固体潮信息,其周期约 12 小时,幅值约为  $60 \times 10^{-9} \sim 80 \times 10^{-9} \epsilon$ 。可见相比

记录观测点位移的传统摆式地震仪,体应变仪响应频带更宽,不仅可以记录高频的弹性波波形,还可以获取断层蠕滑或慢地震等摆式地震仪无法获取的长周期信号,能有力支撑深地科学研究。

TY-2B 型体应变仪系统观测灵敏度  $\geq 1 \times 10^{-11} \epsilon$ (表 1),即可清晰分辨  $10^{-10} \epsilon$  量级振幅的应变地震波。利用土耳其 7.8 级地震产生的应变地震波对沙湾台站体应变仪的映震能力进行检测,7.8 级地震应变地震波产生最大体应变为  $150 \times 10^{-9} \epsilon$ ,根据震中距与地震能量计算经验公式  $E = 10^{4.8} \times 10^{1.5M}$  推算, TY-2B 型体应变仪理论上可分辨出 100km 范围 1.0 级地震产生的应变地震波。

### 3.3 体应变仪台网在粤港澳大湾区活动断裂监测中的应用

2019 年至 2020 年期间,依托中国地质调查局二级项目粤港澳大湾区活动断裂调查与地壳稳定性评价(DD2019290),在广州市南沙区万顷沙镇、广州市番禺区沙湾镇、广州市白云区嘉禾建设了 3 个体应变监测站,监测目标分别是白坭-沙湾断裂、狮子洋断裂、广州-从化断裂。2021 年以来台站数据产出趋于稳定,3 个台站在 2022 年 1 月记录的包含

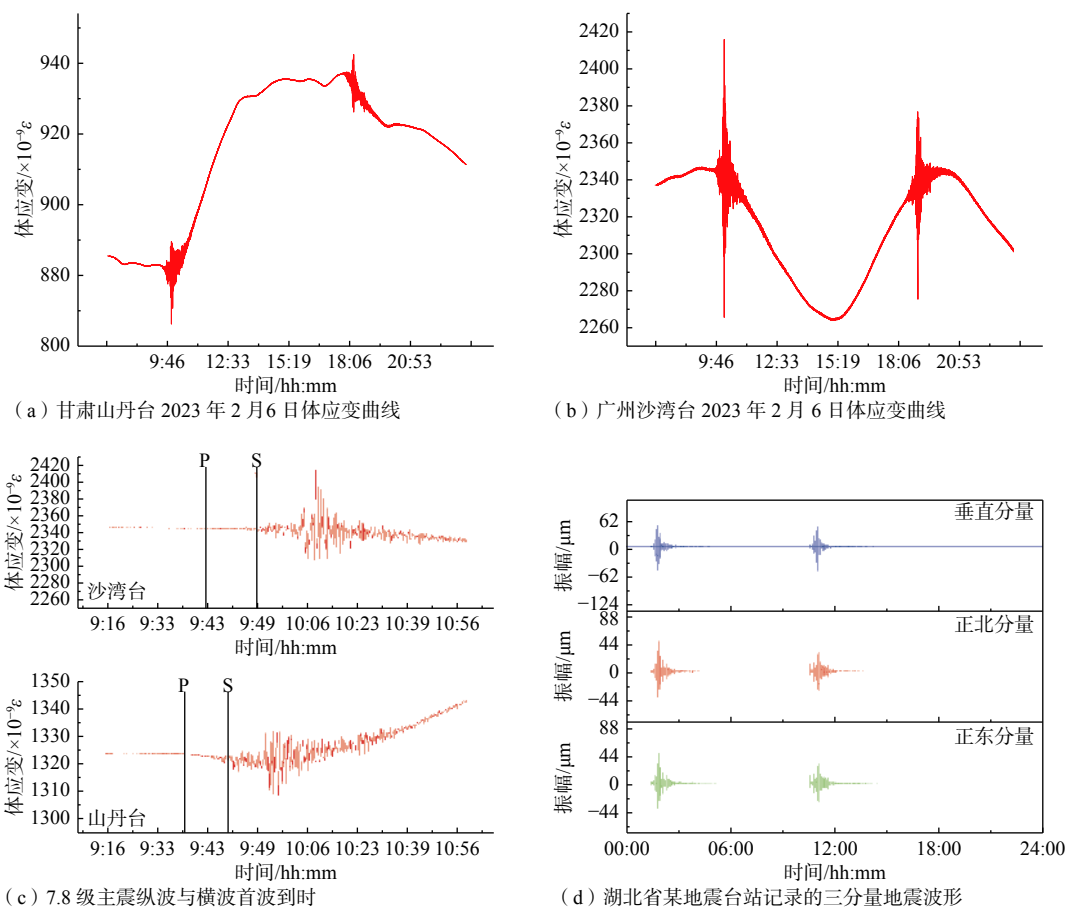


图 10 2023 年 2 月 6 日土耳其地震体应变响应及其与摆式地震计响应对比

Fig. 10 Volumetric strain response of the February 6, 2023 Turkish earthquake and its comparison with pendulum seismometer response

固体潮信息的体应变变化曲线(图 11a—11c), 可以看出在白坭-沙湾断裂、狮子洋断裂、广州-从化断裂的持续活动影响下, 3 个监测点岩石圈介质体应变变化。即万顷沙台站体应变长期变化为正, 显示了压缩应力状态; 沙湾及嘉禾台站体应变长期变化为负, 显示了拉张应力状态。体应变监测曲线与断裂产状及活动特征(表 2)在弹性半空间中模拟的观测点处岩石圈介质体应变变化趋势(图 11d)大体一致。

#### 4 讨论与展望

虽然观测结果证实了 TY-2B 型体应变仪在探测构造应力场变化、断层活动、地震波及同震应变阶跃的高分辨率、稳定性、频带宽度及数据可靠性, 但仍有待改进或进一步研究的地方。例如仪器系统的电缆连结可靠性(防腐、防水)需要进一步提升; 电源模块防雷保护是影响寿命的主要因素, 需要不断创新。目前, 探头耐压密封的问题已经通过

激光焊接的技术解决, 但仍需进一步研究测试长寿命的耐水压电缆和可靠的水下接头以达到增加探头安装深度及提高仪器使用年限的目标。

在应变仪探头结构方面, 从体应变仪对应变地震波的响应可以看出, 仪器对钻孔径向应变, 即剪切型应变地震波(S波)响应较好, 而对于压缩型应变地震波(P波)响应偏弱, 特别是类似土耳其地震这样震中距数千千米, 震源深度数十千米的远震。原因是钻孔应变观测一般为垂直钻孔, Pn波沿莫霍面传播后近乎垂直入射至接收仪器, 岩石介质震荡变形方向与钻孔轴向夹角极小。为解决此问题, 计划在现有体应变观测技术基础上, 研制开发三分量体应变仪, 提高设备对竖直方向应变的响应能力。此外使用应变仪获取的应变张量求解地震震源机制解是可行的(邱泽华, 2020), 研发三分量体应变仪亦可全面获取各个方向上的应变张量, 为地震学研究提供新的数据源。

在进一步小型化方面, 正在研制的体应变仪直径为  $\Phi 60$  mm, 适应孔径为  $\Phi 90$  mm 钻孔, 已在 1200

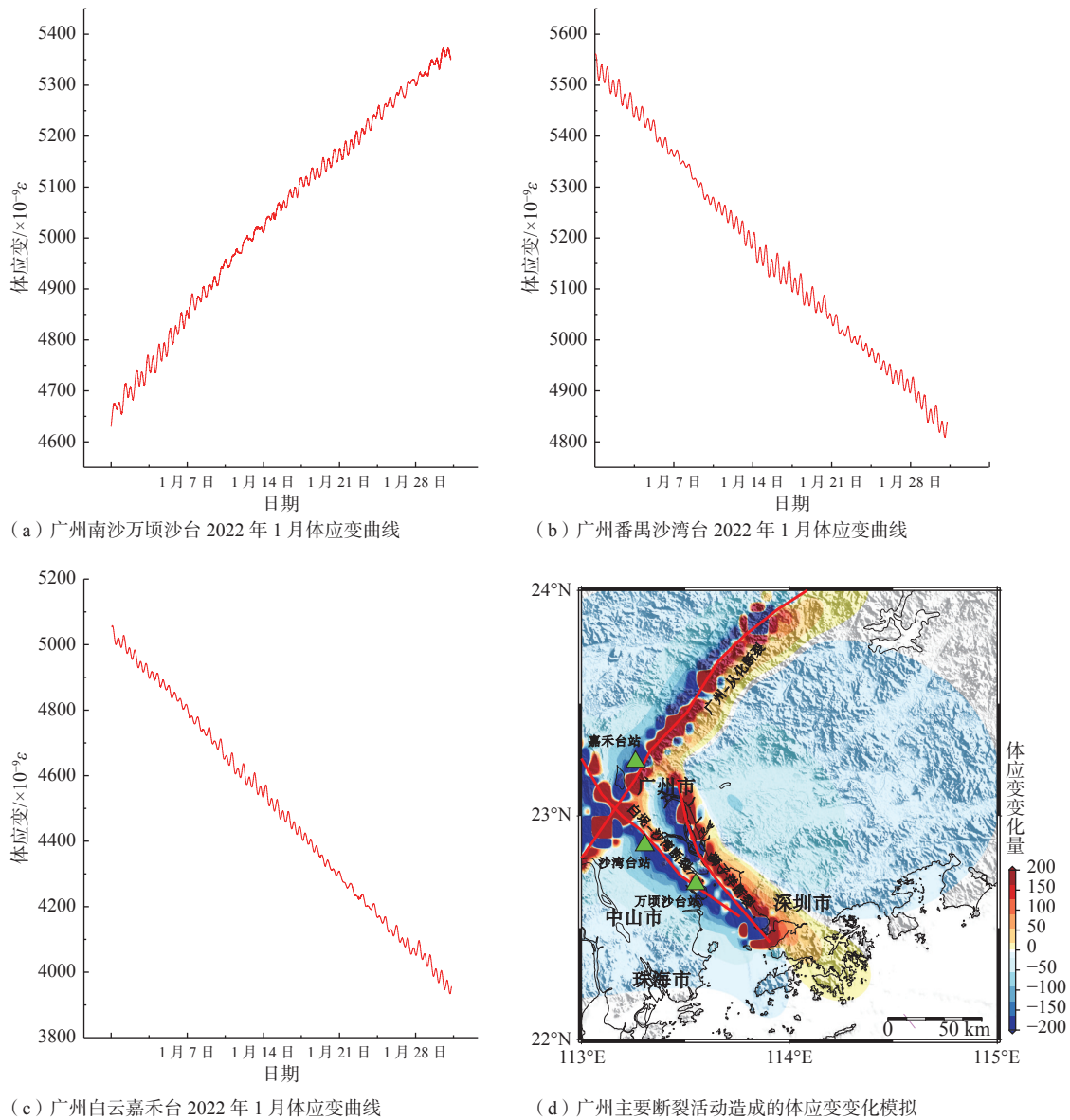


图 11 广州主要断裂活动造成的体应变变化模拟与实测曲线的对比

Fig. 11 Comparison between measured curves and simulated volumetric strain changes caused by major fault activities in Guangzhou

表 2 广州主要断裂产状及活动特征

Table 2 Occurrence and activity characteristics of main faults in Guangzhou

断裂名称	断裂走向/(°)	断裂倾向	倾角/(°)	断裂长度/km	活动特征
白坭-沙湾断裂	320~330	SW/NE	>50	125	正断
狮子洋断裂	310~330	NE/SW	70~85	50	正断
广州-从化断裂带	40	NW/SE	40~60	65	正断兼走滑

m 深煤矿、金属矿山中开展了稳定性测试。此外下一步研究方向要加强仪器的性能检测,做好相应的记录,对漂移进行详细分析,以积累数据,提高识别异常变化的可靠性。同时还要加强现有地应力实时监测数据分析,研究监测数据与断裂活动、地质灾害成灾机理等之间关系,挖掘地应力监测数据的应用潜力,为灾害预测提供依据。

## 5 结论

通过对液压传感器、控制电路、标定方法上的创新改进, TY-2B 型体应变仪提高了稳定性、频带宽度及数据可靠性,并在龙门山北段、珠江口等地区的监测台站投入了应用,获取了良好的监测数

据,体现了高灵敏的映震能力,监测曲线较好的反映了区域构造活动特征。

(1)研制的TY-2B型体应变仪功耗低,小于3W;长期稳定性好;灵敏度高,体应变分辨率达到 $10^{-11}\epsilon$ ;高频特性和低频特性好,采样速率 $10\sim 100$ Hz,可采集完整地震应变波波;固体潮波形清晰稳定;创新的压电陶瓷标定技术提高了监测数据可靠性。此外,体应变仪外径缩小至 $\Phi 89$ mm,适用于直径为 $\Phi 100$ mm钻孔,长度1300mm,重量45kg,体积小重量轻,运输和安装方便,进一步实现了小型化。

(2)陕西大安、甘肃山丹和广州沙湾等体应变监测台站分别对2010年玉树地震及2023年土耳其地震的观测响应表明TY系列高精度体应变仪不仅是静态应变仪,还是宽频应变地震仪,具有动-静态标定能力,且相对于摆式地震仪有着极宽响应频带的独特优势,既可以观测地壳长期缓慢变形和变形积累的特征,还可观测地壳破裂变形的瞬态细微特征。

(3)汶川地震以来青川—汉中地区体应变台站及2021年以来广州台站获取的监测曲线长期变化趋势与地震、构造地质等资料所反映的区域地质特征相符,表明TY-2B型体应变仪可以满足地球动力学研究、地质灾害预测预警观测需求。

## References

- ALLEN R V, 1972. A borehole tiltmeter for measurements at tidal sensitivity [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 62(3): 815-821.
- BAI J P, PENG H, MA X M, et al., 2013. Hollow inclusion strain gauge geostress measuring instrument in deep borehole and its application example [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 32(5): 902-908. (in Chinese with English abstract)
- BARBOUR A J, CROWELL B W, 2017. Dynamic strains for earthquake source characterization [J]. *Seismological Research Letters*, 88(2A): 354-370.
- BENIOFF H, 1935. A linear strain seismograph [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 25(4): 283-309.
- BENIOFF H, PRESS F, SMITH S, 1961. Excitation of the free oscillations of the earth by earthquakes [J]. *Journal of Geophysical Research*, 66(2): 605-619.
- BONACCORSO A, LINDE A, CURRENTI G, et al., 2016. The borehole dilatometer network of Mount Etna: A powerful tool to detect and infer volcano dynamics [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 121(6): 4655-4669.
- EVERTSON D W, 1977. Borehole strainmeters for seismology [R]. Austin: Applied Research Lab.
- FENG C J, LI B, LI H, et al., 2022. Estimation of in-situ stress field surrounding the Namcha Barwa region and discussion on the tectonic stability [J]. *Journal of Geomechanics*, 28(6): 919-937. (in Chinese with English abstract)
- FURUYA I, FUKUDOME A, 1986. Characteristics of borehole volume strainmeter and its application to seismology [J]. *Journal of Physics of the Earth*, 34(3): 257-296.
- FURUYA I, YAMASATO H, SEINO M, 1991. Rayleigh waves recorded by the volumetric strainmeters at the time of a rather small volcanic eruption [J]. *Papers in Meteorology and Geophysics*, 42(3): 93-103.
- GLADWIN M T, 1984. High-precision multicomponent borehole deformation monitoring [J]. *Review of Scientific Instruments*, 55(12): 2011-2016.
- HIKAWA H, SATO K, NIHEI S, et al., 1983. Correction due to atmospheric pressure changes of data of borehole volume strainmeter [J]. *Quarterly Journal of Seismology*, 47: 91-111. (in Japanese)
- KAMIGAICHI O, 1987. Physical considerations on the correction methods of volumetric strain and tilt data for the effects of atmospheric pressure change [J]. *Quarterly Journal of Seismology*, 50: 41-49. (in Japanese)
- KIMURA K, TSUYUKI T, SUGANUMA I, et al., 2015. Rainfall correction of volumetric strainmeter data by tank models [J]. *Quarterly Journal of Seismology*, 78: 93-158. (in Japanese)
- LEE J S, 1976. *Geomechanical method* [M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- LI F Q, 1985. In-situ stress measurement [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 4(1): 95-111. (in Chinese)
- LIAO C T, SHI Z X, 1983. In-situ stress measurements and their application to engineering design in the Jinchuan mine [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2(1): 103-112. (in Chinese with English abstract)
- LIAO C T, CUI M D, REN X F, et al., 1985. In-situ Stress Measurements and Tectonic Stress Field in the Jinchuan Mine Area [M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)
- LINDE A T, GLADWIN M T, JOHNSTON M J S, et al., 1996. A slow earthquake sequence on the San Andreas fault [J]. *Nature*, 383(6595): 65-68.
- LOU J S, TIAN J Y, 2022. Review on seismic strain-wave observation based on high-resolution borehole strainmeters [J]. *Progress in Geophysics*, 37(1): 51-58. (in Chinese with English abstract)
- MENG W, TIAN T, SUN D S, et al., 2022. Research on stress state in deep shale reservoirs based on in-situ stress measurement and rheological model [J]. *Journal of Geomechanics*, 28(4): 537-549. (in Chinese with English abstract)
- PENG H, CUI W, MA X M, et al., 2006a. Hydrofracturing in-situ stress measurements of the water diversion area in the first stage of the South-North Water Diversion Project (western line) [J]. *Journal of Geomechanics*, 12(2): 182-190. (in Chinese with English abstract)
- PENG H, WU Z H, MA X M, 2006b. Unmanned in-situ stress monitoring stations along the Qinghai-Tibet railway [J]. *Journal of Geomechanics*, 12(1): 96-104. (in Chinese with English abstract)
- PENG H, MA X M, JIANG J J, 2008. Analysis of the volume strain data from the Shandan in-situ stress monitoring station [J]. *Journal of Geomechanics*, 14(2): 97-108. (in Chinese with English abstract)
- PENG H, MA X M, JIANG J J, 2009. Stability and stress measurement near the Qingchuan fault in the northern Longmen mountains [J]. *Journal of Geomechanics*, 15(2): 114-130. (in Chinese with English abstract)
- PENG H, MA X M, JIANG J J, et al., 2011a. Strain characteristics of WFS stress stations and its co-seismic effects analysis: A case study upon  $M_w 9.0$  earthquake in Japan [J]. *Journal of Geomechanics*, 17(1): 1-14. (in Chinese with English abstract)
- PENG H, MA X M, JIANG J J, et al., 2011b. Research on stress field and hydraulic fracturing in-situ stress measurement of 1000 m deep hole in Zhaolou coal mine [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 30(8): 1638-1645. (in Chinese with English abstract)
- QIU Z H, TANG L, ZHANG B H, et al., 2012. Extracting anomaly of the Wenchuan earthquake from the dilatometer recording at NSH by means of wavelet-overrun rate analysis [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(2): 538-546. (in Chinese with English abstract)

- QIU Z H, 2017. The observations of borehole strainmeters: theory and applications[M]. Beijing: Seismological Press: 1-407. (in Chinese)
- QIU Z H, TANG L, ZHAO S X, et al., 2020. Fundamental principle to determine seismic source moment tensor using strain seismographs[J]. Chinese Journal of Geophysics, 63(2): 551-561. (in Chinese with English abstract)
- QUAN J J, LAI J S, CHEN S H, et al., 2021. Analysis of observation quality and earthquake reflecting ability of borehole body strain meter at Xiaotao seismic station[J]. South China Journal of Seismology, 41(1): 26-33. (in Chinese with English abstract)
- ROELOFFS E A, 2006. Evidence for aseismic deformation rate changes prior to earthquakes[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34: 591-627.
- SACKS I S, SUYEHIRO S, EVERTSON D W, 1971. Sacks-Evertson strainmeter, its installation in Japan and some preliminary results concerning strain steps[J]. *Proceedings of the Japan Academy*, 47(9): 707-712.
- SACKS I S, LINDE A T, SUYEHIRO S, et al., 1978. Slow earthquakes and stress redistribution[J]. *Nature*, 275(5681): 599-602.
- SU K Z, 1982. The working principle of liquid level volume strain gauge[J]. *Seismological Research*(4): 57-62. (in Chinese with English abstract)
- SU K Z, LIU R M, PEI Y Z, 1993. Volume strain meters in China[J]. *Inland Earthquake*, 7(2): 151-157. (in Chinese with English abstract)
- SU K Z, LI X H, ZHANG J, et al., 2003a. Manufacture of TJ-2 volume strain meter[J]. *Bulletin of the Institute of Crustal Dynamics*(4): 113-121. (in Chinese)
- SU K Z, LI H L, ZHANG J, et al., 2003b. New progress in borehole strain observation[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- SUN Y M, ZHA N, REN X, et al., 2021. A review of application research on the borehole body strain gauge in earthquake precursory observation[J]. *Seismological Research of Northeast China*, 37(4): 69-74. (in Chinese with English abstract)
- TAKANAMI T, LINDE A T, SACKS I S, et al., 2013. Modeling of the post-seismic slip of the 2003 Tokachi-Oki earthquake  $M 8$  off Hokkaido: Constraints from volumetric strain[J]. *Earth, Planets and Space*, 65(7): 731-738.
- WANG L J, PAN L Z, LIAO C T, et al., 1991. Geostress measurements and their application to engineering[M]. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)
- ZHANG L K, NIU A F, 2008. Borehole volume strainmeter coseismic change observation result in China[J]. *Recent Developments in World Seismology*(11): 120. (in Chinese)
- ZHANG L K, WANG G C, NIU A F, 2011. Analysis on several factors of periodic air pressure wave affecting crustal strain field[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 33(3): 351-361. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG L K, NIU A F, 2019. Theoretical solution of periodic pressure wave effect on crustal rock strain measurement[J]. *Progress in Geophysics*, 34(4): 1366-1370. (in Chinese with English abstract)
- ZHOU L S, QIU Z H, TANG L, 2008. The response of crustal strain field to short-period atmospheric pressure variation[J]. *Progress in Geophysics*, 23(6): 1717-1726. (in Chinese with English abstract)
- 附中文参考文献**
- 白金朋, 彭华, 马秀敏, 等, 2013. 深孔空心包体法地应力测量仪及其应用实例[J]. *岩石力学与工程学报*, 32(5): 902-908.
- 丰成君, 李滨, 李惠, 等, 2022. 南迦巴瓦地区地应力场估算与构造稳定性探讨[J]. *地质力学学报*, 28(6): 919-937.
- 檜皮久義, 佐藤馨, 二瓶信一, 等, 1983. 埋込式体積歪言十の気圧補正[J]. *験震時報*, 47: 91-111.
- 李方全, 1985. 地应力测量[J]. *岩石力学与工程学报*, 4(1): 95-111.
- 李四光, 1976. 地质力学方法[M]. 北京: 科学出版社.
- 廖椿庭, 施兆贤, 1983. 金川矿区原岩应力实测及在矿山设计中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2(1): 103-112.
- 廖椿庭, 崔鸣铎, 任希飞, 等, 1985. 金川矿区应力测量与构造应力场[M]. 北京: 地质出版社.
- 娄家墅, 田家勇, 2022. 基于高分辨率钻孔应变仪的地震应变波观测研究进展[J]. *地球物理学进展*, 37(1): 51-58.
- 孟文, 田涛, 孙东生, 等, 2022. 基于原位地应力测试及流变模型的深部泥页岩储层地应力状态研究[J]. *地质力学学报*, 28(4): 537-549.
- 木村一洋, 露木貴裕, 菅沼一成, 等, 2015. タンクモデルによる体積ひずみ計データの降水補正について[J]. *験震時報*, 78: 93-158.
- 彭华, 崔巍, 马秀敏, 等, 2006a. 南水北调西线第一期工程调水区水压致裂地应力测量及其工程意义[J]. *地质力学学报*, 12(2): 182-190.
- 彭华, 吴珍玟, 马秀敏, 2006b. 青藏铁路无人值守地应力综合监测站[J]. *地质力学学报*, 12(1): 96-104.
- 彭华, 马秀敏, 姜景捷, 2008. 山丹地应力监测站体应变仪的地震效应[J]. *地质力学学报*, 14(2): 97-108.
- 彭华, 马秀敏, 姜景捷, 2009. 龙门山北端青川断层附近应力测量与断层稳定性[J]. *地质力学学报*, 15(2): 114-130.
- 彭华, 马秀敏, 姜景捷, 等, 2011a. WFS地应力台应变特征及其同震效应分析: 以日本  $M_w 9.0$  级特大地震为例[J]. *地质力学学报*, 17(1): 1-14.
- 彭华, 马秀敏, 姜景捷, 等, 2011b. 赵楼煤矿 1000 m 深孔水压致裂地应力测量及其应力场研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 30(8): 1638-1645.
- 邱泽华, 唐磊, 张宝红, 等, 2012. 用小波-超限率分析提取宁陕台湾川地震体应变异常[J]. *地球物理学报*, 55(2): 538-546.
- 邱泽华, 2017. 钻孔应变观测理论和应用[M]. 北京: 地震出版社: 1-407.
- 邱泽华, 唐磊, 赵树贤, 等, 2020. 用应变地震观测求解震源矩张量的基本原理[J]. *地球物理学报*, 63(2): 551-561.
- 全建军, 赖见深, 陈珊桦, 等, 2021. 小陶地震台钻孔体应变仪观测质量与映震能力分析[J]. *华南地震*, 41(1): 26-33.
- 上垣内修, 1987. 体積歪, 傾斜データに対する気圧の影響の補正に関する物理的考察[J]. *験震時報*, 50: 41-49.
- 苏恺之, 1982. 液位型体积式应变仪的工作原理[J]. *地震科学研究*(4): 57-62.
- 苏恺之, 刘瑞民, 裴玉珍, 1993. 中国的三种体积式应变仪[J]. *内陆地震*, 7(2): 151-157.
- 苏恺之, 李秀环, 张钧, 等, 2003a. TJ-2 型体应变仪的研制[J]. *地壳构造与地壳应力文集*, (15): 113-121.
- 苏恺之, 李海亮, 张钧, 等, 2003b. 钻孔地应变观测新进展[M]. 北京: 地震出版社.
- 孙艺玫, 查楠, 任雪, 等, 2021. 钻孔体应变仪在地震前兆观测中的理论和应用研究综述[J]. *防灾减灾学报*, 37(4): 69-74.
- 王连捷, 潘立宙, 廖椿庭, 等, 1991. 地应力测量及其在工程中的应用[M]. 北京: 地质出版社.
- 张凌空, 牛安福, 2008. 中国钻孔体应变仪同震变化观测结果[J]. *国际地震动态*(11): 120.
- 张凌空, 王广才, 牛安福, 2011. 周期气压波对地壳应变场观测影响的若干因素分析[J]. *地震学报*, 33(3): 351-361.
- 张凌空, 牛安福, 2019. 周期气压波对地壳岩石应变测量影响的理论解[J]. *地球物理学进展*, 34(4): 1366-1370.
- 周龙寿, 邱泽华, 唐磊, 2008. 地壳应变场对气压短周期变化的响应[J]. *地球物理学进展*, 23(6): 1717-1726.