

引用格式：蔡美峰，2023. 深井地壳活动综合观测技术略谈 [J]. 地质力学学报，29（3）：301-312. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.20232901](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.20232901)

Citation: CAI M F, 2023. A brief talk on comprehensive crustal activity observation technology of deep-holes [J]. Journal of Geomechanics, 29（3）：301-312. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.20232901](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.20232901)

深井地壳活动综合观测技术略谈

蔡美峰

CAI Meifeng

北京科技大学土木与资源工程学院，北京 100083

School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

A brief talk on comprehensive crustal activity observation technology of deep-holes

Abstract: Under the action of the Earth's inner dynamics, the lithosphere shapes different types of the Earth's surface, and the crustal stress state and its dynamic change law are captured by the comprehensive observation technology of drilling crustal activity. It is an important way for human beings to understand the internal dynamic process of the Earth and study the mechanism of inner dynamic geological hazards. The contribution of developed countries such as Japan, the USA, and the IODP International Cooperative Research Program to the development of integrated borehole crustal observation technology is summarized in this paper. The paper also systematically reviews the development history and present situation of borehole strain observation technology and borehole strain observation instrument in China. Especially since the 13th Five-Year, under the background of the national strategy of deep-sea exploration, the China Geological Survey Bureau (CGS), the China Earthquake Administration, and other systems have successively carried out research and development of the integrated geophysics observation system in wells, and have been put into use in integrated land and sea observation stations. The Institute of Geomechanics has successfully developed an integrated geophysics observation system for crustal activity using the key techniques of system integration. The system has a variety of strain, tilt, seismic, geomagnetic, geothermal, pore pressure, other sensors, and 16 components capable of observing crustal deformation, stress, strain, tilt, earthquake, and their induced geodynamic changes in the lithosphere, such as geotemperature, hydrology, geoelectricity, geomagnetism, etc. It has been put into use in Shandan (installed depth 253 m) and Pingwu (WFSD-4, 1600 m) observatories in Gansu and Sichuan provinces and has achieved initial results. It is a milestone for our comprehensive crustal activity observation technology to break through the 3000-meter-deep well in the future. It can provide vital information for geodynamics research, safe exploitation of deep mineral and geothermal resources, and prediction of internal dynamic geological hazards. At the same time, based on the national strategy of deep-sea exploration in the 14th Five-year, the future development direction of integrated observation system of deep-well crustal activity is pointed out.

Keywords: deep wells; crustal activity integrated observation system; system integration technology; deep-crust & deep-sea exploration; in-situ stress; internal dynamic geological hazards

摘要：岩石圈在地球内动力作用下，塑造出不同类型的地球表面形态，而通过钻孔地壳活动综合观测技术捕捉地壳应力状态及其动态变化规律，是人类认识地球内动力过程、研究内动力地质灾害机理的重要途径。文章总结了日本、美国等发达国家以及 IODP 国际合作研究计划在发展钻孔地壳活动综合观测技术方面的贡献，并对中国钻孔应变观测技术及其观测仪器发展历程、研发现状进行了系统性的总结，尤其是“十三五”以来，在深地深海探测国家战略的大背景下，中国地质调查局、中国地震局等单位相继完成井中综合地球物理观测系统研发工作，并在陆域综合观测站中完成野外验证。其中，中国地质科学院

基金项目：中国地质调查局地质调查项目（DD20230249，DD20230014）；中国工程院重点咨询项目（2019-XZ-16）

This research is financially supported by the China Geological Survey Project (Grant DD20230249, DD20230014) and the Key Consultation Project of the Chinese Academy of Engineering (Grant 2019-XZ-16).

第一作者：蔡美峰（1943—），男，博士，教授，中国工程院院士，研究方向为地应力、岩石力学与采矿工程。

E-mail: caimeifeng@ustb.edu.cn

收稿日期：2023-04-10；修回日期：2023-05-10；责任编辑：吴芳

地质力学研究所利用系统集成关键技术成功研制的地壳活动综合地球物理观测系统,拥有应变、倾斜、地震、地磁、地温、孔隙压等多种传感器和15个分量,具备观测地壳变形、应力、应变、倾斜、地震及其诱导的地温、水文、地电、地磁等岩石圈地球动力相对变化的能力,已在甘肃山丹(安装深度253 m)、四川平武(WFSD-4, 1600 m)观测站投入使用,取得了一定的成效,对中国未来突破3000 m深井地壳活动综合观测技术具有指导意义,可为地球动力学研究、深部矿产和地热资源安全开采、内动力地质灾害预测提供重要地应力动态变化信息。同时,以“十四五”深地深海探测国家战略为契机,提出了深井地壳活动综合观测系统的未来发展方向和构想。

关键词: 深井; 地壳活动综合观测系统; 系统集成技术; 深地深海探测; 地应力; 内动力地质灾害

中图分类号: P631; TH762; P315.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2023) 03-0301-12

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.20232901

0 引言

地壳内部发生的各种构造现象(包括断裂、地震、火山)及其伴生的各种地质灾害、深部矿产与地热资源开采围岩稳定性等均与地应力作用密切相关(谢富仁等, 1999; 蔡美峰等, 2013, 2021, 2022; 蔡美峰, 2020; 王成虎等, 2020; 张浩等, 2020; 丰成君等, 2022),故地应力是导致地壳岩石变形、断裂、褶皱乃至地震发生的最直接动力,而探索地应力状态及其作用规律是人类认识地球内部动力过程和研究内动力地质灾害机理的重要途径(孙东生等, 2020; 孟文等, 2022)。

岩石圈在地球内部压力作用下,塑造了地球表面不同类型的地球形态。由于岩石圈及其表面形态与现代地球物理学、地球动力学有着密切的关系,因此,在现代地球科学中,岩石圈是研究最多、最详细、最彻底的固体地球部分,而地壳是其重要组成部分(马杏垣, 1987)。通过钻孔长期观测地壳岩石变形、应力积累、流体作用、温热、电磁等物理学现象,积累地壳变形及其产生的各种地球物理数据,可准确分析地壳应变场的积累、固体潮汐、应变阶、慢地震等信息;通过研究它们的幅度和速率等动态变化特征,可认识地壳构造变形能量积累与释放的过程,捕捉地壳应力状态及其变化特征来研究地壳运动、地球深部活动规律,探索其与构造活动方式、地震的关系。因此,揭示板块、块体运动及内动力地质灾害的孕育发生机制与过程,是目前国际上地球动力学研究的热点和重点(刘文浩等, 2019)。

深井地壳活动综合观测系统通常由多种井中观测传感测量单元、地表数据采集单元和辅助观测单元组成。其中,井中观测传感测量单元具有良好的高频特性与高灵敏度(Sacks and Everson, 1971;

Sacks et al., 1971; Sakata, 1981; Gladwin, 1984; Gladwin and Hart, 1985; Hart et al., 1996; Kinoshita et al., 2018a),安装于深钻孔的完整基岩中,因地壳深部地温、地下水位均不受地表气温、降水的影响,且远离地表的喧嚣,可大大削弱地表裂隙、气候环境、人类活动干扰等不利因素带来的不确定性与不稳定性,能降低降雨、雷电等气象因素的干扰,也能明显降低地表岩石风化与地形的影响(苏恺之, 2003; 苏恺之等, 2003a, 2005; 李海亮等, 2004; 欧阳祖熙等, 2009)。因此,深井地壳活动综合观测技术能够实现同一深孔内开展岩体受力变形多参数综合观测,便于比较、检验数据质量,还可排除气压、地形、地壳横向不均匀性及地下水等环境因素的影响,在获取低噪声信号、综合探测多源信息汇集等方面,具有地表观测台站无法比拟的巨大优势,有利于获得高精度、高质量和长期连续的观测数据。

综上,深井地壳活动综合观测技术是深地观测的重要手段和获得高质量地壳应力场动态变化数据的主要途径,能够弥补测震和GPS观测的不足。攻克深井地壳活动综合观测系统集成关键技术,能够加快推动深地深海综合观测仪器装备研发进程,获取低噪声环境下的深部应力场、流体、温度、电磁场等动态变化特征及岩石微破裂产生的微震信号,将为地壳运动研究、深部矿产和地热资源开采工程致灾机理、地震活动趋势分析提供可靠的研究资料,有助于提高地震等内动力地质灾害的预测能力,对认识地球动力学特征及其相互作用过程、发展地质力学理论具有一定的实践意义。

1 国内外研究概况

1.1 国外发展概况

20世纪90年代以来,随着地球系统科学研究不断深入开展以及解决人类所面临的环境、资源、

灾害等科学问题的需要,实施了多个大陆、大洋科学钻探工程,并建成深井科学观测站,开展深井地壳变形连续观测,使得深井地壳活动综合观测技术得到飞速发展。国际地质学界非常重视地壳应力应变观测网建设,以日本、美国为代表的发达国家迅速转向研发深井综合观测仪器,这标志着深井地壳变形及应力动态观测技术进入新的发展时期。

2000 年,美国华盛顿卡耐基研究所在灾害频发的西部板块边界带实施了板块边缘观测计划(PBO),计划建立一个由钻孔应变仪(200套)、激光应变仪(5套)和全球定位系统接收器(975套)构成应力应变立体观测网络,开展应变、倾斜、地震、地温等井中综合观测,研究地球动力学过程与灾害效应。截至 21 世纪初,实际建成 85 个钻孔应变台站,并在同一钻孔实现地震、孔隙压和倾斜综合观测(欧阳祖熙等, 2009)。同一时期,美国地质调查局和斯坦福大学的科学家们以主要活动断裂为探测目标,启动了“圣安德烈斯深部探测计划(SAFOD)”,组织实施美国 Parkfield 地震实验场地球深部钻孔观测计划(观测井深 3.86 km; 图 1),建成以深钻孔综合观测仪为主要观测单元的圣安德烈斯断裂深井地壳活动综合观测站(图 2),并与地表观测相结合,长期观测震前一震时一震后的岩石性质和地应力

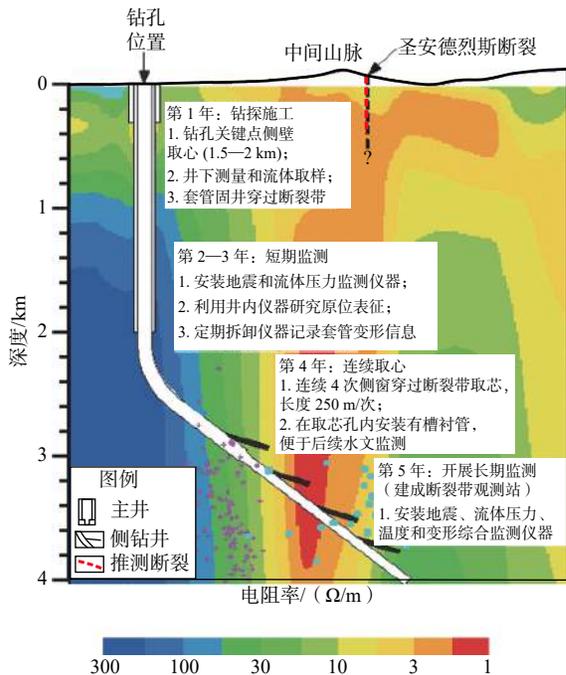


图 1 美国 Parkfield 地震实验场深部钻孔计划(据 Zoback et al., 1998 修改)

Fig. 1 Deep drilling plan of Parkfield Seismic Test Site in the United States (revised from Zoback et al., 1998)

状态的变化,以期获得活动断裂区域的应力响应特征和变化规律(Hickman et al., 2004; Unsworth and Bedrosian, 2004)。

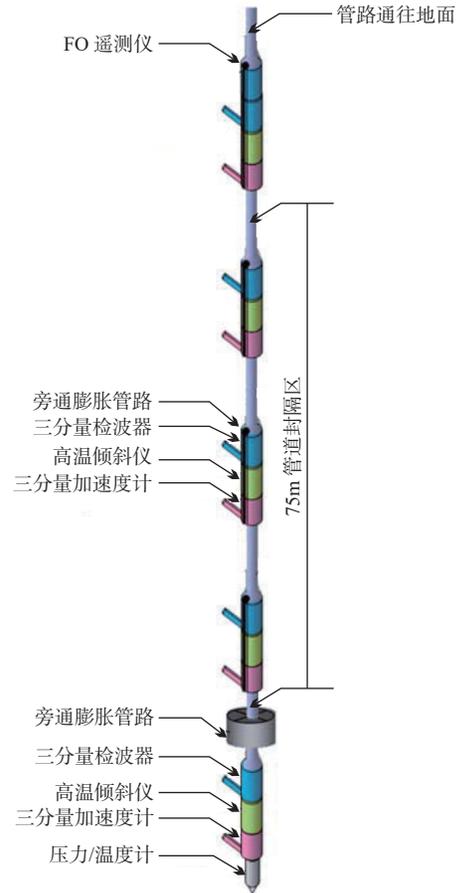
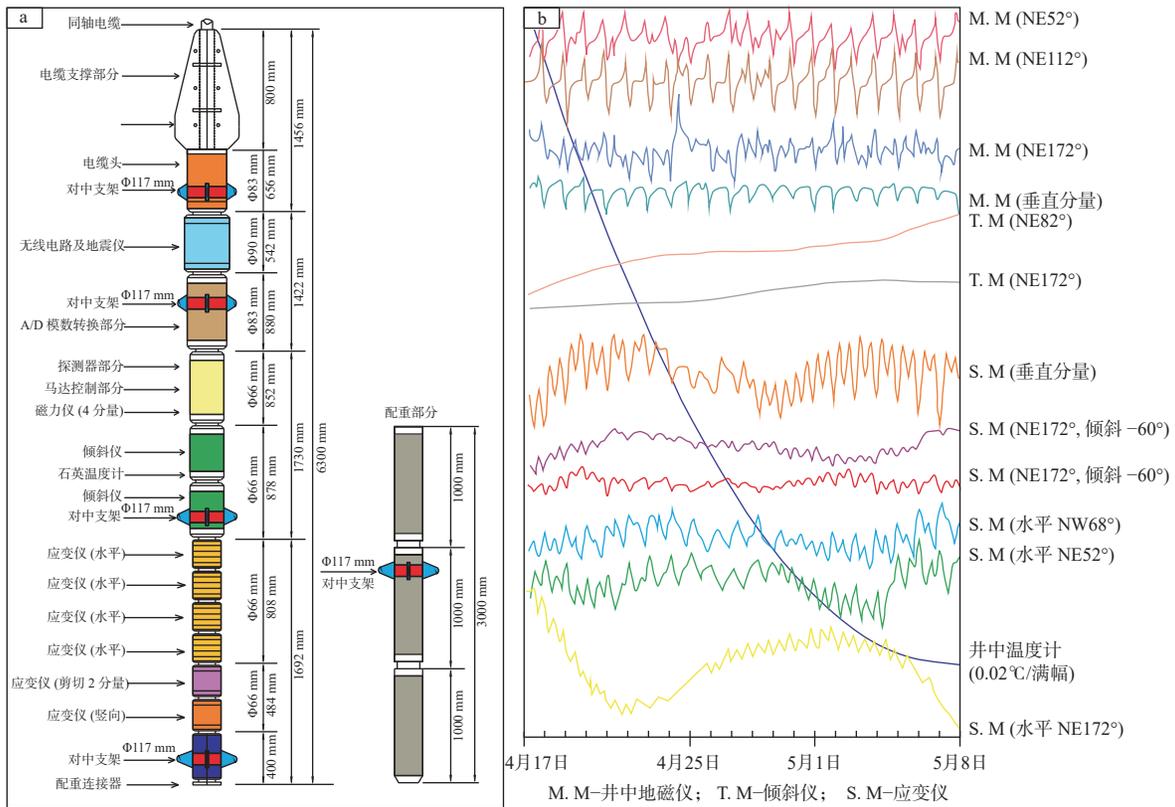


图 2 Parkfield 深井综合观测仪(据彭华等, 2011 修改)

Fig. 2 Parkfield deep-well comprehensive observation instrument (revised from Peng et al., 2011)

日本是世界上最早开展深井观测的国家之一。东浓地震科学研究所、名古屋大学环境研究所和东京大学地震研究所联合研发地壳活动综合观测系统(Ishii, 2001; Ishii et al., 2001; 2002)。该系统可在一个钻孔实现应变、倾斜、地震、地磁、水位、井温等多参量一体化观测(图 3)。2000 年以来,日本实施了东京都地区、伊豆半岛地震群、神冈矿山活断层等多个观测网建设项目,其中 1000~3800 m 深井观测站就有 22 个(Wallace et al., 2016)。随着综合大洋钻探计划(International Ocean Discovery Program, IODP, 2003—2013)的实施,IODP 研究领域的技术手段从钻探扩大到海底深部观测网和井下试验,开启了海底观测的新时代,世界上众多深井综合观测方向的科学家转向深海洋壳活动综合观测领域。



a—地壳综合观测装置及配重；b—采用该装置获得各参量观测曲线

图3 日本深井地壳综合观测装置及其监测曲线 (据苏恺之等, 2003a; 徐纪人和赵志新, 2006 修改)

Fig. 3 Japan deep-well integrated crustal observation device and its monitoring curves

(a) Integrated crustal observation device and counterweight; (b) The observation curve of each parameter is obtained by using this device (revised from Su et al., 2003a; Xu and Zhao et al., 2006).

国际大洋发现计划 (IODP, 2013—2023), 是地球科学领域迄今历时最久 (成立于 1968 年, 历经 3 次更名)、规模最大 (涉及美国、日本、欧洲、中国等 26 个国家)、影响最深的国际合作研究计划, 实现了地球科学史上一次又一次的重大突破, 提出了“揭示地球表层与地球内部的连接、研究导致灾害的海底过程”等近期科学目标 (叶建良等, 2019)。为了研究海底运动、地壳变形和人文地质过程等多种海洋现象机理, IODP 第 332 次远征 C0002G 孔、第 365 次远征 C0010A 孔和第 380 次远征 C0006 孔均安装了钻孔长期监测系统 (LTBM)。其中, 第 380 次远征钻孔长期监测系统 (LTBM) 由压力计、应变仪、加速计、地震仪、倾斜仪和热敏电阻串组成 (图 4), 对海底断层活动及洋壳动力过程开展长期观测 (Kopf et al., 2017; Saffer et al., 2017; Kinoshita et al., 2018a, 2018b)

随着科学技术不断发展, 地球动力学与地震机理的认知程度也不断加深, 世界上越来越多的国家

深度参与 IODP 计划, 使得深井地壳活动综合观测技术得到充分发展, 其特点可归纳为钻孔深 (耐温耐压)、分量多 (观测资料丰富)、分辨率高和频带宽 (地质变化信息量大) 等, 系统集成已成为其关键技术之一。

1.2 国内概况

20 世纪 60 年代中期, 局限于当时科技和工业制造水平, 中国大陆钻孔应力应变监测仪器研制相对滞后。随着国家地震预报的迫切需求, 中国地质科学院、中国地震局等相关单位先后引进钢弦应力计、体应变仪等多款地应力监测仪器, 通过技术改进与创新, 形成了具有中国特色的体应变仪、压容式应变仪、压磁应力仪和井中地壳活动综合观测系统等观测仪器装备体系。

1962 年 3 月 19 日, 广东新丰江水库大坝附近发生 $M 6.1$ 级地震 (水库诱发地震), 坝体出现长达 82 m 贯穿性裂缝。李四光先生通过该现象认识到地应力的动态变化是诱发地震的“根本性的问题”,

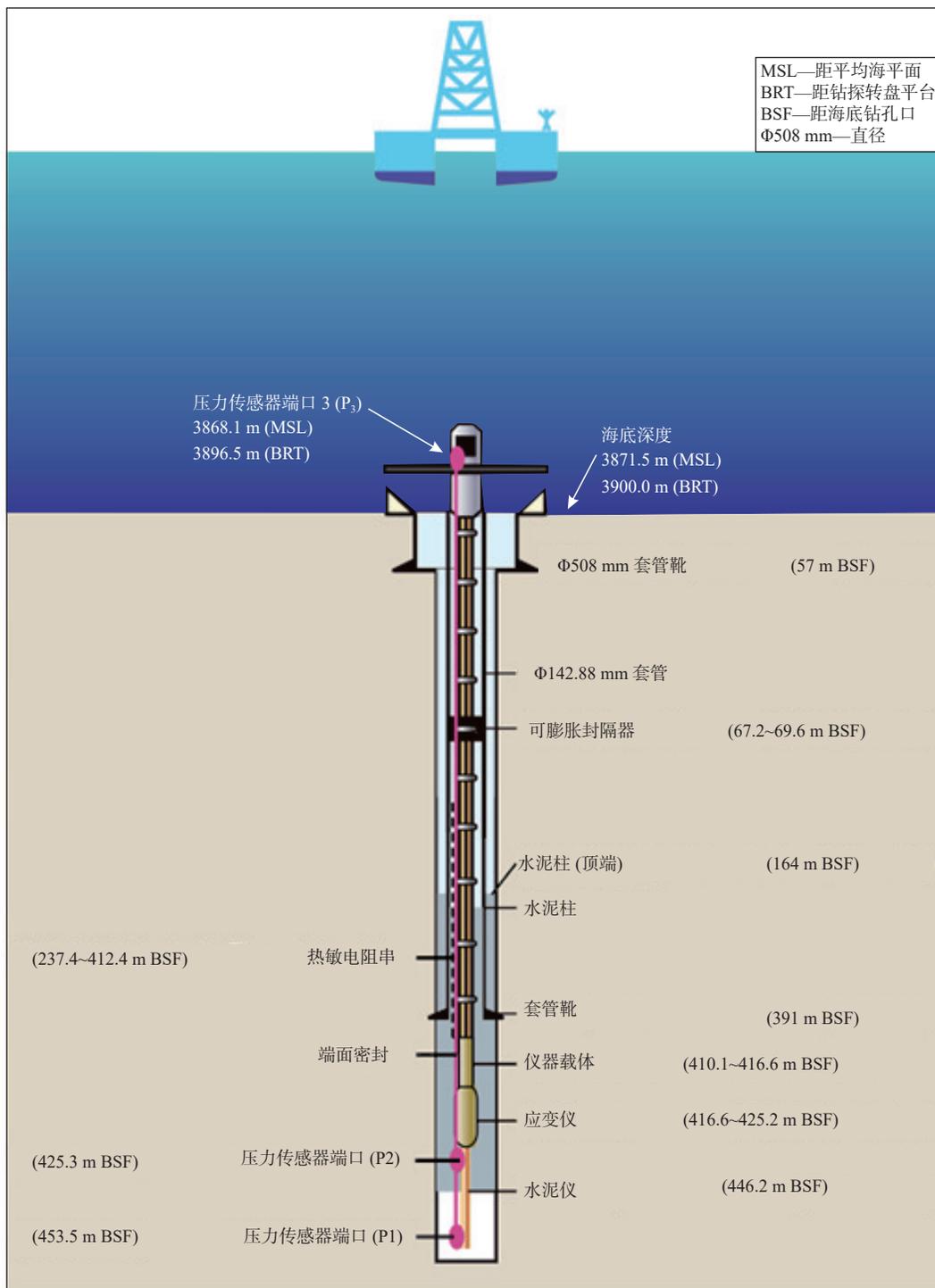


图 4 IODP 钻孔长期监测系统 (C0006G 孔; 据 Kinoshita et al., 2018a 修改)

Fig. 4 Hole C0006G long-time borehole monitoring system (LTBMS) of IODP (revised from Kinoshita et al., 2018a)

可用地应力来表征地震的诱发机制。1966 年邢台地震以来, 基于电感法应力观测仪器, 建成了中国第一个钻孔地应力观测站——河北尧山观测站。随后, 发展地应力测量理论(潘立宙, 1980, 1986; 陈鑫连等, 1989), 地应力测量与监测仪器研发达到新的高潮。1976 年唐山地震后, 中国地震地质学家总

结出地震的前兆异常应变幅值小于 $10^{-7}\epsilon$, 确定出能捕捉的有效地震前兆信息, 提出了应力应变固体潮 $(1\sim 6)\times 10^{-8}\epsilon$ 观测是未来高精度钻孔应力应变观测必须达到或超越的基本目标(欧阳祖熙, 1977; 苏恺之等, 1977)。随后一批具有国际水平的高精度钻孔应变仪相继成功研发(池顺良, 1982; 王启民等,

1982; 欧阳祖熙, 1986; 苏恺之, 1985, 2003, 2020; 王启民和童月华, 1987; 欧阳祖熙和张宗润, 1988; 苏恺之等, 2002, 2003b, 2005; 李海亮等, 2004; 欧阳祖熙等, 2004), 开展了大量的实地标定工作(骆鸣津等, 1989; 邱泽华等, 2005a, 2005b), 并在钻孔应力应变地震前兆监测台网建设和地震预测研究中投入使用(李茂玮, 1987; 蒋靖祥等, 2000, 2003, 2004, 2012; 邱泽华和张宝红, 2002; 邱泽华等, 2004, 2010, 2015; 骆鸣津和唐九安, 2016)。

2008年汶川地震时期, 国内部分观测站的钻孔应变监测仪捕捉到地震前后应变特征, 众多学者深入研究了地震前兆应变变化特征(欧阳祖熙等, 2009; 邱泽华等, 2009, 2010)。同时, 开展了大量的钻孔应变相关标定工作, 使中国钻孔应变得到长足发展(邱泽华等, 2012; 欧阳祖熙, 2013), 而深井地壳活动综合观测也随之拉开序幕。中国地质科学院地质力学研究所(简称“地质力学所”)研制的地壳活动综合观测系统能够实现一个钻孔中地壳应力应变、倾斜、地震、井温和孔隙压等多种地壳受力变形信息的综合观测, 已在甘肃山丹(安装深度 253 m)、云南普洱(安装深度 460 m)、四川平武(WFSD-4, 孔深 1600 m)等 20 余个陆海域的深井地壳活动综合观测站建设中得到应用, 具有良好的应用效果。

中国在 21 世纪初加入 IODP(综合大洋钻探计划, 2003—2013; 国际大洋发现计划, 2013—2023), 并在“十三五”期间(2014—2018)于南海海域组织实施了 4 个 IODP 航次(叶建良等, 2019)。2019 年, 中国地震局开启了中国地震科学实验场建设新时代, 标志着我国地震观测从地表转向地下探测(吴忠良等, 2021a, 2021b, 2021c)。其主要任务是围绕川滇菱形地块建成数百米至千米井下地震观测台阵, 以人工智能应用、光纤地震为主体, 开展深井综合观测, 获取地下结构和介质观测数据, 将深井地震综合观测系统推向地震科学前沿阵地。

2 深井地壳活动综合观测系统(CODB)关键技术

2.1 CODB 关键技术

深井地壳活动综合观测(Comprehensive Observation of Crustal Activity in Deep Borehole, CODB)是认知地球深部内动力作用和内生地质灾害过程的利器。地质力学所研制的地壳活动综合

观测系统, 可观测地壳变形、应力、应变、倾斜、地震及其诱导的地温、水文、地电、地磁等岩石圈的地球动力过程相对变化, 为地球动力学研究、地质灾害预测(尤其是断层活动、地震及火山活动动态监测)提供各种动态变化信息。

随着耐高温、耐高压、耐腐蚀、长距离通讯、井下全息数字化等材料和技术的发展, 深井地壳活动综合观测系统研发成为现实, 其关键技术主要包括总体系统强度、数字式多测项传感器集成、系统井中数据总线布设、高温高压环境系统密封结构、压制和减弱井中探头内部各种传感器间的相互电磁干扰、深井水泥耦合固结安装、井中标定等技术。

2.2 CODB 系统构成

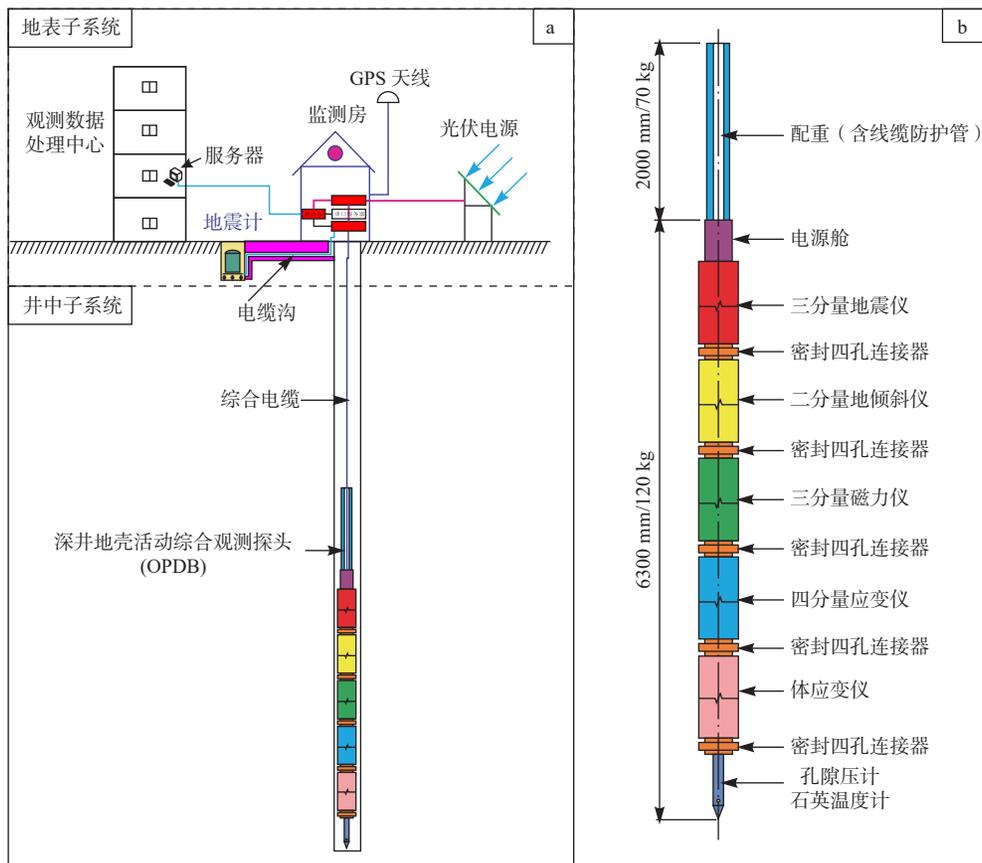
CODB 系统主要由地面与井中 2 个子系统构成。其中, 地面子系统由地表观测设施(观测数据处理中心、监测房、GPS、光伏电源等)和辅助观测仪器(地震计、串口服务器等)组成; 井中子系统由综合电缆和深井地壳活动综合观测探头(Observation Probe of Deep Borehole, OPDB)组成(图 5a)。而 OPDB 是 CODB 系统的重要组成部分, 由配重段、电源舱、地震仪舱、地倾斜仪舱、磁力仪舱、应变仪舱、体应变仪舱(可选)和孔隙压计/温度计测量段, 共 6 个仓段构成。除配重段外, 该探头集成了三分量地震、二分量地倾斜、三分量磁力、四分量应变(可增加竖向应变)、体应变(或三分量体应变)、孔隙压和温度 15 个分量, 是一种地壳变形、应力、应变、倾斜、地震、地磁、地温、孔隙压等多测项综合性岩石圈的地球动力学观测仪器(图 5b)。

2.3 系统集成技术

系统集成技术是深井地壳活动综合观测系统(CODB)的关键技术(彭华等, 2011a, 2011b)。通过系统集成技术将水平应变、垂直应变、体应变、倾斜、地温、地震、地磁等多种观测和辅助观测组件组合于一体, 具有功耗低、耐温高、精度高、防雷击特性强、备份单元延长系统使用寿命等优点, 具备现场井中标定、井下程序控制等功能。因此, 该技术是一项低功耗、抗干扰、增耐温、强密封的综合性技术。

3 深井地壳活动综合观测系统(CODB)应用示例

地质力学所在自然资源部北京地壳应力应变野外科学观测研究站的支持下, 上述系统集成技术



a—COBD 系统; b— OPBD 结构

图5 深井地壳活动综合观测系统(据彭华等, 2011a 修改)

Fig. 5 Comprehensive observation system for deep borehole crustal activity (revised from Peng et al., 2011a)

(a) COBD system; (b) OPBD structure

得到了快速发展,已研制出深井地壳活动综合观测系统,并在全国范围内关键构造区带推广示范与应用。截至2022年,地质力学所拥有台站130余个,主要分布于青藏高原及周缘、南北地震带、郯庐断裂带、滨海断裂带和首都圈,而深井地壳活动综合观测系统(CODB)投入20余个台站,取得了良好的效果。下面以山丹台站和WFSD-4深井地壳活动观测为例(彭华等, 2011, 2011b),对其可靠性和稳定性进行简述。

3.1 山丹地壳活动综合观测(253 m)

2008年12月7日,甘肃山丹地应力监测站在钻孔253 m部位使用了深井地壳形变综合观测系统(CODB)。该系统由四分量水平应变测量单元、备份四分量水平应变测量单元、钻孔倾斜测量单元和精密地温测量单元组成,并匹配水位、气压与井温等辅助观测单元。通过连续运行6个月(2008年12月—2009年6月)获得的钻孔水平应变与倾斜观测数据(2009年6月)显示,2种观测仪器记录的固

体潮汐信号清晰可辨,且连续性较好(图6),表明该系统主要测量单元分辨率高、工作比较稳定,初步具备投入使用的条件。

3.2 WFSD-4 深井地壳活动综合观测(1600 m)

2014年2月28日,地质力学所在汶川地震断裂带科学钻探第4口井(WFSD-4井)1600 m位置安装了深井地壳活动综合观测系统(CODB)。分量式钻孔应变仪具有很高的潮汐分辨能力,是该系统重要的组成部分。通过分析2018年11月份14天的四分量应变观测原始记录曲线(通道1—4)显示,背景噪声低、固体潮汐信号清晰(图7),表明该系统具有长期稳定性,初步具备深井地壳活动长期综合观测的能力。

系统集成技术是一项降功耗、抗干扰、增耐温、强密封的综合性技术,是地壳活动综合观测系统的核心技术。除应力应变、倾斜等各种观测传感器自身的精度和质量外,检验其系统集成技术的可靠性,仍然要以监测仪器能否观测到固体潮为准

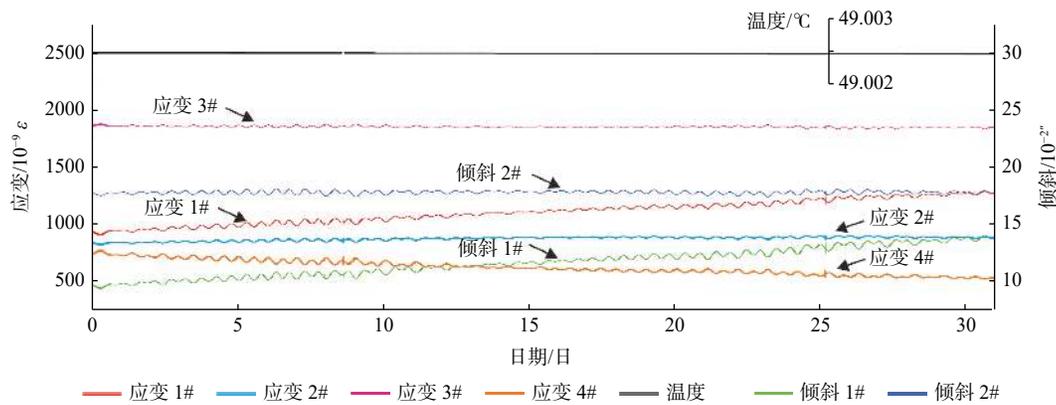


图 6 深井地壳活动综合观测系统主要测量单元记录曲线

Fig. 6 Recording curves of the main measuring units of the deep-well crustal activity comprehensive observation system

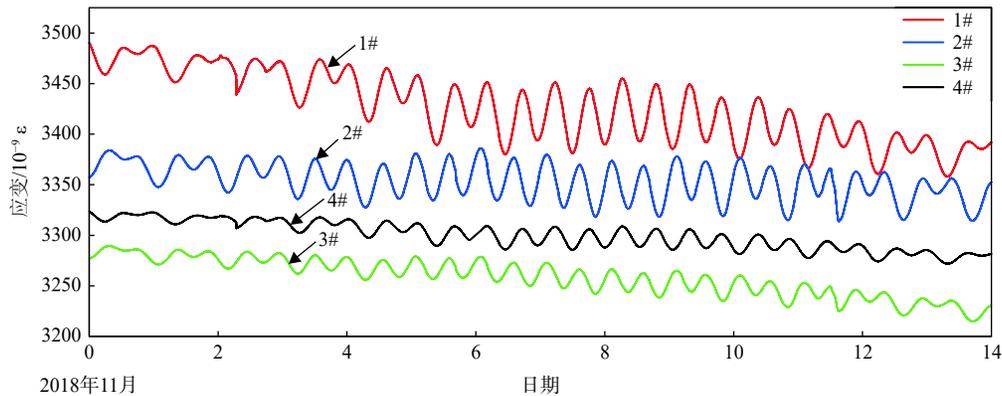


图 7 CODB 系统四分量式钻孔应变仪 (通道 1—4) 原始记录曲线

Fig. 7 Original recording curves of 4-component borehole strain gauge in CODB system (1-4 tunnel)

绳。文章通过深浅井观测数据曲线分析表明,该系统具有精度高、稳定性强等优点,是一款井中多测项综合地应力长期观测仪器,为中国深井地壳活动综合观测系统发展提供了良好的研发条件。

4 结语

深井地壳活动综合观测系统有别于美国、日本等国家的现有技术方案,在数字式多测项传感器集成与应用、高温高压环境结构密封、压制和减弱探头内部电磁干扰等关键技术上取得重大突破,实现了多种观测单元集成,并完成浅孔测试(山丹台站 253 m)和深孔验证(WFSD-4 井 1600 m)等工作,取得一定成效,可用于深部地球动力学观测,为未来突破 3000 m 的深井地壳活动综合观测技术奠定了工作基础。

随着“十四五”深地深海探测、深埋重大工程、防灾减灾等国家战略的提出,深地高温、高压环境下(3000 m 以上),可拓展使用电学和光纤等长期观测技术。此外,关于深井地壳活动综合观测的

目标,除活动构造、地震、火山外,还应加强地球关键构造带(板块边界、地块边界)、深部矿山能源资源、国家重大工程全生命周期等领域的地壳活动综合观测。同时,探索深海高盐、高水压、高温环境下(3000 m 以浅)的洋壳活动、海底灾害监测系统,是深海探测装备发展的必然趋势。21 世纪以来,随着中国经济能力和科技实力的逐步加强,国内众多科学家和工程技术界专家参与了国际大洋发现计划(IODP)这一世界性巨大科学研究计划,为地球科学和人类发展,贡献着中国的力量。同时,由中国地质调查局发起的中国大洋钻探船近期封顶,下海试水、深海服役已逐步提上日程,对中国深海海底观测网建设具有重要推动作用。因此,开展 3000 m 洋壳活动综合观测技术准备和深井观测仪器研发工作已成为中国未来深海探测的首要任务之一。

References

- CAI M F, JI D, GUO Q F, 2013. Study of rockburst prediction based on in-situ stress measurement and theory of energy accumulation caused by

- mining disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 32(10): 1973-1980. (in Chinese with English abstract)
- CAI M F, 2020. Key theories and technologies for surrounding rock stability and ground control in deep mining[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2(3): 033037. (in Chinese with English abstract)
- CAI M F, DUO J, CHEN X S, et al., 2021. Development strategy for co-mining of the deep mineral and geothermal resources[J]. Chinese Strategic Study of CAE, 23(6): 43-51. (in Chinese with English abstract)
- CAI M F, MA M H, PAN J L, et al., 2022. Co-mining of mineral and geothermal resources: a state-of-the-art review and future perspectives[J]. Chinese Journal of Engineering, 44(10): 1669-1681. (in Chinese with English abstract)
- CHEN X L, ZHANG Y L, CAI W X, 1989. Continuous crustal movement observation technique[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- CHI S L, 1977. Continuous self-recording pressure volume geostress meter[C]//Selected papers of national geostress conference (II). 369-373. (in Chinese)
- CHI S Y, 1982. Preliminary experimental result of a capacitance-type borehole earth strain meter[J]. Acta Seismologica Sinica, 4(1): 98-103. (in Chinese with English abstract)
- 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)
- G T 163, MGMR, 1971. Summary of steel string gauge survey[J]. Earthquake Front, 3. (in Chinese)
- GLADWIN M T, 1984. High-precision multicomponent borehole deformation monitoring[J]. Review of Scientific Instruments, 55(12): 2011-2016.
- GLADWIN M T, HART R, 1985. Design parameters for borehole strain instrumentation[J]. Pure and Applied Geophysics, 123(1): 59-80.
- HART R H G, GLADWIN M T, GWYTHYER R L, et al., 1996. Tidal calibration of borehole strain meters: removing the effects of small-scale inhomogeneity[J]. Journal of Geophysical Research:Solid Earth, 101(B11): 25553-25571.
- HICKMAN S, ZOBACK M, ELLSWORTH W, 2004. Introduction to special section: preparing for the San Andreas fault observatory at depth[J]. Geophysical Research Letters, 31(12): L12S01.
- ISHII H, 2001. Development of new multi-component borehole instrument[J]. Report of Tono Research Institute of Earthquake Science, 6: 5-10. (in Japanese)
- 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[M]//ANDO M. Seismogenic process monitoring. London: Routledge: 365-377.
- JIANG J X, YIN G H, HASIGAOWA, 2000. Recordings in bore-hole strain-meter before earthquake and earthquake prediction[J]. Journal of Seismological Research, 23(4): 410-417. (in Chinese with English abstract)
- JIANG J X, WANG Z H, LI C, et al., 2003. Borehole strain anomaly and strong earthquake activity in Xinjiang[J]. Inland Earthquake, 17(2): 126-133. (in Chinese with English abstract)
- JIANG J X, YIN G H, WANG Z H, et al., 2004. Statistical character of steping change anomaly of component-type borehole strain and its application to earthquake prediction in Xinjiang[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 23(23): 4072-4078. (in Chinese with English abstract)
- JIANG J X, YIN G H, WU G D, 2012. Study of Xinjiang relative stress field based on continuous borehole stress and strain data[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 31(1): 154-163. (in Chinese with English abstract)
- KINOSHITA M, BECKER K, TOCZKO S, et al., 2018a. Expedition 380 methods[C]//Proceedings of the international ocean discovery program. College Station: International Ocean Discovery Program.
- KINOSHITA M, BECKER K, TOCZKO S, et al., 2018b. Site C0006[C]//Proceedings of the international ocean discovery program. College Station: International Ocean Discovery Program.
- KOKO ISHII, 2001. Development and observation of a new borehole integrated observation device for crustal activity[J]. Dongnon Institute of Earthquake Science(6): 5-10. (in Chinese)
- KOPF A, SAFFER D, TOCZKO S, 2017. Expedition 365 summary[C]//Proceedings of the international ocean discovery program. College Station: International Ocean Discovery Program.
- LI H L, MA H J, ZHANG J, et al., 2004. The design of FZY-1 type multi-component borehole strain meter[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 25(1): 69-77. (in Chinese with English abstract)
- LI M W, 1987. The soil layer stress precursors of the Wuqia earthquake (Ms=7.4)[J]. Inland Earthquake, 1(1): 77-83. (in Chinese with English abstract)
- LIU W H, ZHENG J W, ZHAO J D, et al., 2019. Management mechanism and enlightenment of ocean drilling programs[J]. World Sci-Tech R & D, 41(1): 77-87. (in Chinese with English abstract)
- LUO M J, GU M L, LI A Y, et al., 1989. Borehole strain-stress calibration in the same place by use of tidal generation force[J]. Crustal Deformation and Earthquake, 9(4): 51-62. (in Chinese with English abstract)
- LUO M J, TANG J A, 2016. Calculation of subsurface strain and stress using four-component borehole strain observations[J]. China Earthquake Engineering Journal, 38(S1): 8-15. (in Chinese with English abstract)
- Ma X Y, 1987. Summary of the lithospheric dynamics in China[J]. Acta Geologica Sinica(2): 113-125.
- 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)
- OUYANG Z X, 1977. RDB-1 capacitive ground strain gauge[C]//Selected papers of national geostress conference (II). Beijing: Seismological Press: 337-348. (in Chinese)
- OUYANG Z X, 1983. A high precision capacitance borehole strain measurement system[C]//Selected papers of the second national conference on geostress. Beijing. (in Chinese)
- OUYANG Z X, 1986. High-precision component borehole strain gauge developed[J]. Earthquake(2): 61. (in Chinese)

- OUYANG Z X, ZHANG Z R, 1988. Studies of method for coupling strain-meter and borehole wall[C]//Tectonic and crustal stress collection (2). Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- OUYANG Z X, ZHANG Z R, SHU G L, 2004. Review and outlook for West China borehole strainmeter networks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 23(23): 4058-4062. (in Chinese with English abstract)
- OUYANG Z X, ZHANG J, CHEN Z, et al., 2009. New progress in multi-component observation of crustal deformation in deep boreholes[J]. Recent Developments in World Seismology(11): 1-13. (in Chinese with English abstract)
- OUYANG Z X, 2013. Research on in-situ calibration technique of RZB borehole strainmeters[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 33(1): 153-156. (in Chinese with English abstract)
- PAN L Z, 1980. Directional measurement of ground stress and ground strain [J]. Journal of Mechanics and practice, 20-33. (in Chinese)
- PAN L Z, 1986. Borehole deformation method for in-situ stress measurement of multi-contact preloaded elements [J]. 29(5): 468-481. (in Chinese with English abstract)
- PENG H, MA X M, JIANG J J, et al., 2011a. Research and demonstration report on combined stress-strain multi-parameter automatic monitoring technology of borehole[R]. Beijing: Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences. (in Chinese)
- PENG H, MA X M, JIANG J J, et al., 2011b. Development report of integrated geophysical monitoring system for middle-deep Wells[R]. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences. (in Chinese)
- QIU Z H, ZHANG B H, 2002. Current Situation of the seismological networks for borehole stress-strain precursor surveillance in China[J]. Recent Developments In World Seismology(6): 5-9. (in Chinese with English abstract)
- QIU Z H, XIE F R, SU K Z, et al., 2004. New era of borehole strain observation[J]. Recent Developments in World Seismology(1): 7-14. (in Chinese with English abstract)
- QIU Z H, SHI Y L, OUYANG Z X, 2005a. Absolute calibration of 4-component borehole strainmeters[J]. Earthquake, 25(3): 27-34. (in Chinese with English abstract)
- QIU Z H, SHI Y L, OUYANG Z X, 2005b. Relative in-situ calibration of 4-component borehole strain observation[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 25(1): 118-122. (in Chinese with English abstract)
- QIU Z H, ZHOU L S, CHI S L, 2009. Study on precursory strain changes of Wenchuan earthquake with ORA method[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 29(4): 1-4, 9. (in Chinese with English abstract)
- QIU Z H, ZHANG B H, CHI S L, et al., 2011. Abnormal strain changes observed at Guza before the Wenchuan earthquake[J]. Science China Earth Sciences, 54(2): 233-240.
- QIU Z H, TANG L, LU F L, et al., 2012. Technique of strain observation in soil with self-checking function[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 32(6): 152-155, 159. (in Chinese with English abstract)
- QIU Z H, YANG G, TANG L, et al., 2015. Abnormal strain changes prior to the M7.0 Lushan earthquake observed by a borehole strainmeter at Guzan[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 35(1): 158-161, 166. (in Chinese with English abstract)
- SACKS I S, EVERTSON D W, 1971. Sensitive borehole strain-rate meter[J]. Carnegie Inst, Washington Yearb, 68: 448-453.
- 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]. Papers in Meteorology and Geophysics, 22(3-4): 195-208.
- SAFFER D, KOPF A, TOCZKO S, et al., 2017. Expedition 365 methods[C]//Proceedings of the international ocean discovery program. College Station: International Ocean Discovery Program.
- SAKATA S, 1981. On the concepts of some newly-invented borehole three-component strainmeters[J]. Report of the National Research Center for Disaster Prevention, 25: 95-126. (in Japanese with English abstract)
- SU K Z, LI G R, ZHANG T, et al., 1977. Minor volume borehole strainmeter[J]. Inland Earthquake, 11(4): 316-322. (in Chinese with English abstract)
- SU K Z, 1985. Present state of relative field stress observation and its prospects[J]. Earthquake Research in China, 1(4): 42-47. (in Chinese with English abstract)
- SU K Z, LI X H, ZHANG J, et al., 2002. Manufacture of TJ-2 volume strain meter[J]. Proceedings of Crustal Tectonics and Crustal Stress(15): 113-121. (in Chinese with English abstract)
- SU K Z, 2003. Status and developments of borehole strain observations in China[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 24(1): 65-69. (in Chinese with English abstract)
- SU K Z, LI H L, ZHANG J, et al., 2003a. New progress in in-situ strain observation of borehole[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- SU K Z, MA H J, LI H L, et al., 2003b. Designs of built-up strainmeter[J]. Journal of Seismological Research, 26(2): 164-171. (in Chinese with English abstract)
- SU K Z, ZHANG J, LI X H, et al., 2005. The effect of borehole environment at borehole deformation observation[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 26(6): 46-55. (in Chinese with English abstract)
- SU K Z, 2020. Forty years of four-component borehole strain gauge in China[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 41(2): 172-180. (in Chinese with English abstract)
- SUN D S, CHEN Q C, ZHANG Y Q, 2020. Analysis on the application prospect of ASR in-situ stress measurement method in underground mine[J]. Journal of Geomechanics, 26(1): 33-38. (in Chinese with English abstract)
- TADASHI S S, 1985. Continuous observation of crustal movement[J]. Journal of the Society of Geodesy, 31(1): 34-45. (in Chinese)
- UNSWORTH M, BEDROSIAN P A, 2004. Electrical resistivity structure at the SAFOD site from magnetotelluric exploration[J]. Geophysical Research Letters, 31(12): L12S05.
- WALLACE L M, ARAKI E, SAFFE D, et al., 2016. Near-field observations of an offshore M_w 6.0 earthquake from an integrated seafloor and subsurface monitoring network at the Nankai Trough, southwest Japan[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 121(11): 8338-8351.
- WANG C H, GAO G Y, WANG H, et al., 2020. Integrated determination of principal stress and tensile strength of rock based on the laboratory and field hydraulic fracturing tests[J]. Journal of Geomechanics, 26(2): 167-

174. (in Chinese with English abstract)
- WANG Q M, FENG X S, MA H J, et al., 1982. A borehole strain gauge has been developed by Henan seismological bureau to record earth's solid tide[J]. *Progress in Earthquake Sciences*(1): 32. (in Chinese)
- WANG Q M, TONG Y H, 1987. High precision borehole strain measurement in our country[J]. *North China Earthquake Sciences*, 5(S1): 321-327. (in Chinese)
- WU Z L, WANG L, CHE S, et al., 2021a. China seismic experimental site (CSES): planning and test[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 52(3): 348-352. (in Chinese with English abstract)
- WU Z L, WANG L, LI L, et al., 2021b. China seismic experimental site (CSES): earthquake forecast and system design[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 52(6): 679-683. (in Chinese with English abstract)
- WU Z L, DING Z F, ZHANG X D, et al., 2021c. China seismic experimental site: retrospective and prospective[J]. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 52(2): 234-238. (in Chinese with English abstract)
- XIE F R, CHEN Q C, 1999. Observations and researches of crustal stress[J]. *Recent Developments in World Seismology*(2): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- XU J R, ZHAO Z X, 2006. Advances and prospects for long term geophysical observation in deep borehole[J]. *Earth Science -Journal of China University of Geosciences*, 31(4): 557-563. (in Chinese with English abstract)
- YE J L, ZHANG W, XIE W W, 2019. Preliminary thoughts on implementation of the ocean drilling project in China[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 46(2): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG H, SHI G, WU H, et al., 2020. In-situ stress measurement in the shallow basement of the Shanghai area and its structural geological significance[J]. *Journal of Geomechanics*, 26(4): 583-594. (in Chinese with English abstract)
- ZOBACK M D, HICKMAN S H, ELLSWORTH W L, 1998. Scientific drilling into the San Andreas fault at Parkfield, CA: project overview and operational plan[R]. Stanford: Stanford University.
- ### 附中文参考文献
- 蔡美峰, 冀东, 郭奇峰, 2013. 基于地应力现场实测与开采扰动能量积聚理论的岩爆预测研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 32(10): 1973-1980.
- 蔡美峰, 2020. 深部开采围岩稳定性与岩层控制关键理论和技术[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2(3): 033037.
- 蔡美峰, 多吉, 陈湘生, 等, 2021. 深部矿产和地热资源共采战略研究[J]. *中国工程科学*, 23(6): 43-51.
- 蔡美峰, 马明辉, 潘继良, 等, 2022. 矿产与地热资源共采模式研究现状及展望[J]. *工程科学学报*, 44(10): 1669-1681.
- 陈鑫连, 张奕麟, 蔡惟鑫, 1989. 地壳变动连续观测技术[M]. 北京: 地震出版社.
- 池顺良, 1982. 压容式钻孔应变仪的初步试验结果[J]. *地震学报*, 4(1): 98-103.
- 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.
- 蒋靖祥, 尹光华, 哈斯高娃, 2000. 钻孔应变仪在震前的记录及地震预测[J]. *地震研究*, 23(4): 410-417.
- 蒋靖祥, 王在华, 李川, 等, 2003. 新疆钻孔应变异常与强震活动[J]. *内陆地震*, 17(2): 126-133.
- 蒋靖祥, 尹光华, 王在华, 等, 2004. 新疆分量式钻孔应变阶变异常的统计特征及其在地震预测中的应用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 23(23): 4072-4078.
- 蒋靖祥, 尹光华, 吴国栋, 2012. 基于钻孔应力、应变连续实测资料研究新疆相对应力场[J]. *岩石力学与工程学报*, 31(1): 154-163.
- 李海亮, 马鸿钧, 张钧, 等, 2004. FZY-1型多分量式钻孔应变仪的设计[J]. *地震地磁观测与研究*, 25(1): 69-77.
- 李茂玮, 1987. 乌恰7.4级地震的土层应力前兆[J]. *内陆地震*, 1(1): 77-83.
- 刘文浩, 郑军卫, 赵纪东, 等, 2019. 大洋钻探计划管理机制及启示[J]. *世界科技研究与发展*, 41(1): 77-87.
- 骆鸣津, 顾梦林, 李安印, 等, 1989. 用引潮力进行钻孔的应变-应力的原地标定[J]. *地壳形变与地震*, 9(4): 51-62.
- 骆鸣津, 唐九安, 2016. 四分量钻孔应变观测值计算地层应变与应力[J]. *地震工程学报*, 38(S1): 8-15.
- 马杏垣, 1987. 中国岩石圈动力学概要[J]. *地质学报*, (2): 113-125.
- 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.
- 欧阳祖熙, 1977. RDB-1型电容式地应变计[C]//全国地应力专业会议论文集选编(下). 北京: 地震出版社: 337-348.
- 欧阳祖熙, 1986. 高精度分量式钻孔应变仪研制成功[J]. *地震*(2): 61.
- 欧阳祖熙, 张宗润, 1988. 钻孔应变仪与井壁耦合方法的研究[C]//地壳构造与地壳应力文集(2). 北京: 地震出版社.
- 欧阳祖熙, 张宗润, 舒桂林, 2004. 中国西部钻孔应变仪台网工作回顾与前瞻[J]. *岩石力学与工程学报*, 23(23): 4058-4062.
- 欧阳祖熙, 张钧, 陈征, 等, 2009. 地壳形变深井综合观测技术的新进展[J]. *国际地震动态*(11): 1-13.
- 欧阳祖熙, 2013. RZB型钻孔应变仪原位标定技术研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 33(1): 153-156.
- 潘立宙, 1980. 地应力与地应变的定向测量[J]. *力学与实践*, 20-33.
- 潘立宙, 1986. 多触点预压式元件的钻孔变形法地应力测量[J]. 29(5): 468-481.
- 彭华, 马秀敏, 姜景捷, 等, 2011a. 钻孔组合式应力-应变多参数自动监测技术与示范成果报告[R]. 北京: 中国地质科学院地质力学研究所.
- 彭华, 马秀敏, 姜景捷, 等, 2011b. 中深井综合地球物理监测系统研制报告[R]. 中国地质科学院地质力学研究所.
- 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.
- 邱泽华, 谢富仁, 苏恺之, 等, 2004. 发展钻孔应变观测的战略构想[J]. *国际地震动态*(1): 7-14.
- 邱泽华, 石耀霖, 欧阳祖熙, 2005a. 四分量钻孔应变观测的实地绝对标定[J]. *地震*, 25(3): 27-34.
- 邱泽华, 石耀霖, 欧阳祖熙, 2005b. 四分量钻孔应变观测的实地相对标定[J]. *大地测量与地球动力学*, 25(1): 118-122.
- 邱泽华, 周龙寿, 池顺良, 2009. 用超限率分析法研究汶川地震的前兆应变变化[J]. *大地测量与地球动力学*, 29(4): 1-4-9.
- 邱泽华, 张宝红, 池顺良, 等, 2010. 汶川地震前姑咱台观测的异常应

- 变化[J]. 中国科学:地球科学, 40(8): 1031-1039.
- 邱泽华, 唐磊, 卢法林, 等, 2012. 一种可以自检的土层应变观测技术[J]. 大地测量与地球动力学, 32(6): 152-155, 159.
- 邱泽华, 杨光, 唐磊, 等, 2015. 芦山M7.0地震前姑咱台钻孔应变观测异常[J]. 大地测量与地球动力学, 35(1): 158-161, 166.
- 石井紘, 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.
- 苏恺之, 李桂荣, 张涛, 等, 1977. 小型化体积式钻孔应变仪[J]. 内陆地震, 11(4): 316-322.
- 苏恺之, 1985. 地应力相对观测的现状及发展方向[J]. 中国地震, 1(4): 42-47.
- 苏恺之, 李秀环, 张钧, 等, 2002. 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, 2003. 我国钻孔应变观测的回顾与展望[J]. 地震地磁观测与研究, 24(1): 65-69.
- 苏恺之, 李海亮, 张钧, 等, 2003a. 钻孔地应变观测新进展[M]. 北京: 地震出版社.
- 苏恺之, 马鸿钧, 李海亮, 等, 2003b. 组合式应变观测仪的设计[J]. 地震研究, 26(2): 164-171.
- 苏恺之, 张钧, 李秀环, 等, 2005. 钻孔环境在钻孔地形变观测中的作用[J]. 地震地磁观测与研究, 26(6): 46-55.
- 苏恺之, 2020. 中国四分量钻孔应变仪风雨历程四十年[J]. 地震地磁观测与研究, 41(2): 172-180.
- 孙东生, 陈群策, 张延庆, 2020. ASR法在井下矿山地应力测试中的应用前景分析[J]. 地质力学学报, 26(1): 33-38.
- 王成虎, 高桂云, 王洪, 等, 2020. 利用室内和现场水压致裂试验联合确定地应力与岩石抗拉强度[J]. 地质力学学报, 26(2): 167-174.
- 王启民, 冯先水, 马鸿钧, 等, 1982. 河南省地震局研制出记录到地球固体潮的钻孔应变仪[J]. 国际地震动态(1): 32.
- 王启民, 董月华, 1987. 我国的高精度钻孔应变测量[J]. 华北地震科学, 5(S1): 321-327.
- 吴忠良, 王龙, 车时, 等, 2021a. 中国地震科学实验场: 认识与实践[J]. 地球与行星物理理论评, 52(3): 348-352.
- 吴忠良, 王龙, 李丽, 等, 2021b. 中国地震科学实验场: 地震预测与系统设计[J]. 地球与行星物理理论评, 52(6): 679-683.
- 吴忠良, 丁志峰, 张晓东, 等, 2021c. 中国地震科学实验场: 历史与未来[J]. 地球与行星物理理论评, 52(2): 234-238.
- 谢富仁, 陈群策, 1999. 地壳应力观测与研究[J]. 国际地震动态(2): 1-7.
- 徐纪人, 赵志新, 2006. 深井地球物理长期观测的最新进展及其前景[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 31(4): 557-563.
- 叶建良, 张伟, 谢文卫, 2019. 我国实施大洋钻探工程的初步设想[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 46(2): 1-8.
- 张浩, 施刚, 巫虹, 等, 2020. 上海地区浅部地应力测量及其构造地质意义分析[J]. 地质力学学报, 26(4): 583-594.

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯



作者简介:

蔡美峰, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 岩石力学与采矿工程专家, 自然资源部北京地壳应力应变野外科学观测研究站学术委员会主任。长期从事地应力测量与科学采矿方向研究, 首次开发出我国具有自主知识产权的地应力测量技术, 提出了以地应力为基础的采矿设计优化的技术体系、安全高效开采技术和矿山动力灾害预测与防控技术, 撰写了我国第一部系统介绍地应力测量的专著《地应力测量原理和技术》, 是我国矿山地应力测量的主要开拓者之一。获国家科技进步二等奖4项、三等奖1项, 国家技术发明三等奖1项和国家级教学成果二等奖1项。2008—2010年先后被评为国家级教学名师、全国模范教师和全国优秀科技工作者。曾担任国务院学位委员会矿业工程学科评议组召集人、国际岩石力学学会教育委员会主席、中国岩石力学与工程学会副理事长、中国金属学会常务理事兼采矿分会理事长等职务, 积极总结我国矿山地质科技成就和经验, 提出多项建设性意见或建议, 为我国深部矿山地质科技事业发展做出了重大贡献。

