

地应力测量与监测技术实验研究

——SinoProbe-06 项目介绍

陈群策¹⁾, 李 宏²⁾, 廖椿庭¹⁾, 吴满路¹⁾, 崔效锋²⁾, 杨树新²⁾

1) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2) 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085

摘 要: 固体地壳的应力状态是地壳的最重要的性质之一。地壳表面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的作用密切相关。地应力测量与监测不仅为深入认识地震的孕育和发生机制, 进而为强震预测提供重要的科学依据, 而且也是地球动力学基础研究的重要组成部分, 此外, 还将为国家重大工程建设, 如深埋隧道、水电工程、深部能源开采、核废料处置场地的选址等深部地下工程的勘测设计提供重要的技术支撑。

地应力测量与监测技术实验研究是国家科技专项“深部探测技术试验研究”所属的第六项目。该项目的主要任务是, 围绕专项的总体科学目标, 开展系统的地应力测量与监测及其实验对比研究, 通过室内实验和野外现场实际测试, 对现有各种主要的地应力测试技术的适用性和可靠性进行总体评价和研究, 进而针对存在的问题开展研究和相关测试系统的创新性研发, 从整体上提升现有主要地应力测试方法的技术水平; 在北京地区建立深孔地应力综合观测试验站; 在青藏高原东南缘开展地应力测量与监测, 构建地应力监测网络, 进而将其打造成具有国际影响力的地球动力学野外试验基地。

关键词: 地应力测量与监测; 地震预测; 地球动力学; 青藏高原东南缘

中图分类号: P542.5; P548 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2011.s1.07

An Experimental Study of the Technique for In-Situ Stress Measurement and Monitoring: An Introduction to the Project SinoProbe-06

CHEN Qun-ce¹⁾, LI Hong²⁾, LIAO Chun-ting¹⁾, WU Man-lu¹⁾, CUI Xiao-feng²⁾, YANG Shu-xin²⁾

1) Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geosciences, Beijing 100081;

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

Abstract: In-situ stress state is one of the most important characteristics of the earth's crust. Various tectonic phenomena occurring at the surface and in the interior of the earth as well as the subsequent geo-hazards are immediately related to the actions of the crust stress. In-situ stress measurement and monitoring can provide important scientific inference for the understanding of the mechanism of the pregnancy and occurrence of the earthquake, and also serve as the important foundation for the prediction of strong earthquakes. In addition, in-situ stress measurement and monitoring will provide technique support for national key projects, such as deep buried tunnel, hydropower project, deep resources exploration, and nuclear waste disposal.

Experimental studies of the technique of in-situ stress measurement and monitoring is the 6th item of the national project “Deep Exploration Technology and Experimentation”. The main tasks are to carry out in-situ stress

本文由国家专项“深部探测技术与实验研究”(编号: SinoProbe-06)资助。

收稿日期: 2010-07-16; 改回日期: 2010-12-25。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 陈群策, 男, 1963 年生。研究员。长期从事地应力测试技术方法研究。通讯地址: 100081, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: chenqunce@sina.com。

measurement and monitoring and comparative study and, through laboratory test and in-situ test, to give the evaluation regarding the adaptability and reliability of the main methods of in-situ stress measurements. On such a basis, the researchers will carry out relevant study and exploration of new instruments and systems for in-situ stress measurement and monitoring, promote the technique of in-situ stress measurement, and establish deep borehole comprehensive observing station in Beijing area. In east and south boundaries of Qinghai-Tibet Plateau, in-situ stress measurement will be conducted systemically, and stress monitoring network of this area will be established so as to gradually turn this area into a field test platform for dynamics study.

Key words: in situ stress measurement and monitoring; prediction of earthquake; dynamics; east and south boundaries of Qinghai-Tibet plateau

世界各国近百年地球科学观测实践表明,要想揭开大陆地壳演化奥秘,更加有效地寻找资源、保护环境、减轻灾害,必须进行深部探测。很多发达国家自 20 世纪 70 年代以来,陆续启动了深部探测和超深钻探测计划,通过“揭开”地表覆盖层,把视线延伸到地壳深部,获得了重大成果。

我国是世界上构造活动性最剧烈的大陆之一,地质灾害频发,地球内部热动力和板块间作用力直接控制了火山喷发、地震、岩爆和群发性滑坡泥石流等重大灾害。进一步了解地球内部精细结构和地块活动规律,地壳应力集中和释放的机理是地质灾害预警预报的基础。大地震的孕育和发生是在一个大区域内地应力长期积累、集中、加强的过程和在地应力集中区最终导致应变能突然释放的结果(李四光, 1977)。在构造应力积累、集中、加强的过程中必然伴随有地壳应力的分布变化及转移(王仁等, 1980; 石耀霖, 2001)。在大范围内监测地壳应力场及其变化,进而寻找和确定当前地应力的集中区,在地应力集中区内进一步寻找地应力的加强部位,研究地壳应力状态及变化趋势,即可能判定未来大地震的震中区。2001 年 11 月 14 日昆仑山 Ms8.1 特大地震前后地应力变化被我国地质学家捕获,证实昆仑山大地震前地表应力高度集中和积累,最大主应力达到 12 MPa,地震后下降到 3~4 MPa,昆仑山特大地震释放应力 2/3(Liao et al., 2003)。这是世界上首次监测到特大地震前后原位地应力变化,证明了李四光先生提出的利用地应力变化预报地震的技术路线是正确的、有效的。然而,欲从根本上解决地震预测预报问题,现有的地壳应力观测研究的方法水平是不够的。这首先是由于目前缺乏系统的原地应力观测。现有的原地应力测量大部分是服务于工程设计的,这些离散的观测数据所能反映的区域应力场的信息往往是很有限的,因而严重制约了针对地震预测进行的高质量的地壳应力环境的研究。其次,已有的 GPS 观测网以及数字地震台网虽然对于地壳运动学的深入研究以及了解区域应力的方向

具有重要的作用,然而, GPS 的观测数据只给出点间位移情况,尚不能真实地反映应变情况特别是应变强度;由震源机制解只能得到区域应力场方向,同样不能得到研究区域的应变特征。因此,在中国大陆范围内,选择关键的构造地域,科学地布设观测网点,利用先进的地应力测量与监测技术,获得其应力分布状态和区域应力场的动态变化,将为我我国地震预报打下坚实的物理基础。

随着浅部资源的日益枯竭,矿产资源采掘向超深矿山进军,地热资源开发、核废料的地下深埋、深埋隧道等的深度越来越大,随之而来的是地应力的增大,深部岩体结构和构造更加复杂。近年来我国大型矿山煤瓦斯突出、岩爆、巷道变形破坏、突水等问题越来越严重,深部矿区地质灾害的频发,促使人们更加关注深部高应力状态下岩体力学性状和岩石破坏机理、灾害预测和防范措施的研究。人们开采地下资源的工程活动同样使相对稳定的原岩应力状态受到扰动,一旦达到岩石的破裂临界值,就会引发各种矿难。如何既能有效地将矿产资源开采出来,又能制约诱发应力集中的因素,减少和防治灾害的发生,是人们长期不懈努力追求的目标。以我国著名的大型铜镍矿床金川矿为例,在其基建和开采过程中,巷道发生严重变形和破坏,影响了正常的安全生产。为解决此问题,在矿区开展了原地应力测量和研究工作。根据实地应力测量查清了矿区地应力大小、方向的分布规律,据此选用了合理的巷道断面形状,采取了科学的支护方案,从而成功避免了巷道的进一步变形(王连捷等, 1991)。因此,为了减少地质灾害的发生及确保工程的安全,开展地应力测量和监测研究是非常必要的,不仅具有重要的理论意义,也将为深部矿产资源开发和重大工程建设提供技术支撑,具有重要的现实意义。

从地球动力学基础研究的角度来看,地球动力学是地球科学与力学相结合的跨学科研究分支,它从地球整体运动,地球内部和表面的构造运动探讨其动力演化过程,进而寻求它们的驱动机制。它的

核心内容是从力学分析的角度探讨地球各圈层的发展演化特征。七十年代初板块学说的建立和兴起,以及以 GPS 为主的大地测距技术的日臻完善,世界及中国大陆地壳运动观测网络的建立,全球数字化台网的建立,深海钻探计划,大陆断面计划等多学科的联合研究已经取得了很大的成功。但是,与之相比,在确定作用于板块上的力以及板块内部的力学响应的动力学研究方面并没有如此成功。问题的多解性使得模拟上述作用过程的尝试难以取得可信的结果,即:包含不同作用力和流变学特性的多种假设都可以获得模拟结果和观察到的变形之间同等好的拟合。因此,地球动力学研究迫切需要有大量的地壳应力场的实测资料为基础,才可能从运动学的研究步入科学的动力学的研究阶段。

开展地应力测量与监测技术试验研究,获得关键构造部位的真实应力状态,即应力的方向和大小,为活动断裂的动力学研究,为地壳应力场的反演提供可靠的应力边界条件的约束,从而使得地球动力学的研究向前迈进一步。区域应力应变场的连续观测又为驱动力随时间的变化以及地壳介质的动态响应提供了观测基础,是板内地壳动力学的重要内容。另一方面,中国大陆位于欧亚板块的东南部,是欧亚陆壳板块的重要组成部分。中国大陆东部受西太平洋大洋型板块俯冲、消减的影响,造成一系列与弧后扩张有关的陆缘海伸展和断陷盆地。西部和西南部受印度板块与青藏块体陆壳碰撞后的构造效应,形成不同地质构造时期的推覆构造带,现代地壳运动形式多样,产生的地壳应力场复杂多变,是全球地球动力学研究中具有特殊重要地位的区域。但迄今为止,与上述这些带根本性的地学问题有关的直接观测证据极为缺乏,在中国大陆关键构造地域开展地应力测量与监测和构造应力场综合研究,充分利用多种手段的动态观测资料获得区域的地壳应力变化图,将为现今地壳运动及其动力学研究向精确定量、动态实时等方向的发展提供重要的基础观测数据。

为了解决我国日益严重的资源、环境和灾害问题,推动我国跻身深部探测技术领域国际前缘,国家启动了科技专项《深部探测技术与实验研究(SinoProbe)》,作为《地壳探测工程》实施前的培育性研究计划(董树文等, 2009, 2011)。专项下设“地应力测量与监测技术实验研究”项目(SinaProbe-06)。项目的目标任务是:开展系统的地应力测量与监测及其实验对比研究,通过室内实验和野外现场实际测试,对现有各种主要的地应力测试技术的适用性

和可靠性进行总体评价和研究,针对存在的问题开展研究和相关测试系统的创新性研发,从整体上提升现有主要测试方法的技术水平;为启动中国“地壳探测工程”提供应力应变监测关键技术准备和高层次人才储备,为在全国范围开展地壳深部探测、解决国家资源环境重大问题提供科技支撑。本文在对国内外相关领域的发展现状进行概要的介绍后,重点介绍项目的目标任务、研究内容和具体的技术思路。

1 国内外现状与发展趋势

人类进入 21 世纪,地壳探测技术已由平台台网观测向大规模的立体监测网发展;由单一方法向综合观测发展;由地表向井下观测发展;由陆地向海洋扩展。国际地震学和地球内部物理学研究的基本目标之一是提高有关地震和地球内部物理性质的认识。深井观测是实现这一长期目标的重要一步。

近年来国际地球科学界对深井观测技术十分重视。20 世纪末,钻井式地壳应力场动态变化观测技术进入新的发展时期,以日、美等国迅速转向研制深井综合观测系统为标志。美国从 90 年代中期以来加强了地震预测研究。1996 年由总统科技顾问签署了“减轻地震灾害的国家战略”,强调利用先进的科学技术理解地震的发生过程,推进地震预测预报方法的研究与实验,并于世纪之交提出了迄今最为宏大的 Earthscope(地球透镜)研究计划。其中 PBO(板块边界观测)计划包括建立一个主要由 GPS 接收机(975 套)和钻孔应变仪(200 套)构成的地壳变形观测网,在对地震与火山喷发之前和临近时的现象的观测中将发挥主要作用。Sacks 等积极开发三腔液压体积式应变仪,并于 2001 年开始的 Mini PBO 计划中建成 5 个 200 米深的综合观测台站,可观测钻孔应变、钻孔倾斜、孔隙压、地震与 GPS(李海亮等, 2010)。

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共同开发了“地壳活动综合观测装置”,该系统在一口井实现水平应变、垂直应变、钻孔倾斜、应变地震波、微震观测、地磁、水位、井温等多种观测项目(李海亮等, 2010),已在东京都地区与伊豆半岛等地安装了近 40 套仪器。

我国的地应力测试技术与研究,始于 20 世纪 60 年代。在李四光教授的积极倡导和支持下,中国地质科学院地质力学研究所和中国地震局地壳应力研究所等相关单位合作,成功研制了应力解除法地应力测试系统。在其后的几十年间,我国的地应力

测试技术及应用研究得到了迅速的发展,相继开发和研制了压磁应力解除法、空芯包体应力解除法、水压致裂法、钻孔崩落法、岩石声发射等地应力测试仪器和设备;在相对应力测量方面,先后发展和完善了分量应力、分量应变和体积应变监测系统。同时还开展了利用钻孔崩落、断层滑动拟合、震源机制解等探测地应力状态的新方法研究(陈群策等, 1998; 李宏等, 2007; 王连捷等, 1991; 许忠淮等, 1983)。这些地应力测试技术和方法在国家重大工程建设和地球动力学基础研究以及地震预测预报等领域得到了广泛应用,取得了大量的研究成果(李方全等, 1986a, b; 李方全等, 1982; 吴满路等, 2005; 谢富仁等, 2004; 张伯崇等, 1996; 郭啟良等, 2006; 高合明等, 2000)。

目前,在地应力测量与监测技术领域,国际上越来越倾向于实施高密度的钻孔应力监测。相关领域的科学家逐渐认识到,由于地壳结构的高度复杂性和非均质性,孤立的测点所获得的数据在空间的代表性十分有限,只有加大监测密度,形成监测网络,才有可能比较准确地把握和认识某一构造单元地质构造活动的动力成因和内在机制。

与世界上发达国家相比,我国在地应力测量与监测技术领域存在一定的差距,主要表现为以下三个方面:

1)测量与观测深度不够:目前,国际上最深的地应力测量深度已达到 5100 m,是美国学者 Haimson B C 等人利用水压致裂测试技术开展的深部地应力测量(Haimson, 1978),此外,在德国的 KTB 深钻中的地应力测量以及美国圣安德烈斯断层研究计划中,应力测量深度一般也达到或超过了 2~3 km(Zoback et al., 1992; Brudy et al., 1997; Zoback et al., 1997; Hickman et al., 2004)。而在我国,公开报道的最大测量深度限于千米左右,绝大部分仅为数百米之内。测量深度的不足使得测量数据在空间上的代表性受到严重制约;在原地应力测量技术领域,水压致裂方法被认为是最为有效的测试技术。但对于深孔测量来说,压裂段的水体体积与钻杆内的体积不可比拟,通过地面传感器测量的压裂段压力的变化受到钻杆弹性变形的影响不容忽视;此外,传统的水压致裂测试方法一般利用双回路系统,亦即,除利用钻杆作为过水通道外,还需下入高压胶管,对封隔器单独加压,这样,不仅增加了现场测试的劳动强度,而且,也给试验带来了很大的风险。基于以上原因,有必要对现有水压致裂原地应力测试技术进行技术改造与升级,这也是该技

术领域的国际发展趋势;

2)缺乏系统的地应力观测计划:在西方发达国家,都先后开展了一系列具有明确科学目标的地应力观测计划,如世界应力图计划(Zoback, 1992)、PBO(板块边界观测)计划(张宝红, 2004)、日本的首都圈计划以及德国的 KTB 深钻计划中的地应力测量、加拿大的 URL(地下研究实验室)(Iwata, 2002)等。在我国,虽然目前已积累了数千条的地应力测量数据,但其绝大部分是为服务于工程的勘察设计而开展的,数据零散,缺乏统一布局,数据质量参差不齐,对于地球动力学基础研究以及探究关键科学问题的作用非常有限,限制和制约了该领域内创新性的认识和发现;

3)地应力观测缺乏规范和统一的技术标准。国际岩石力学测试专业委员会早在 1987 年就发布了“确定岩石应力的建议方法”,对其建议的水压致裂、套芯解除、扁千斤顶等四种测量方法给出了比较全面和详细的技术要求;在 2003 年,结合应力测量方法的最新进展,又发布了新的技术规范(Haimson et al., 2003)。在此需要提及的是,在这些权威的地应力测量方法技术规范的编写和起草过程中,没有我国相关领域科学家的参与,另外,截至目前,我国还没有全国性的技术规范和统一标准。这些都表明我国在这方面与国际上存在较大的差距,这也在很大程度上限制了我们在该领域的技术进步。

此外,对于应力应变连续监测技术,单就监测探头的分辨灵敏度而言,已达到 10⁻¹⁰ 应变量级,可以监测到地球的固体潮变化(欧阳祖熙等, 2001)。但是在该技术领域仍存在几个突出的问题:①探头和孔壁的耦合问题;②仪器漂移及长期稳定性问题;③不同仪器监测数据可比性较差等等问题;④在井下综合观测方面,多测项的系统集成问题、深井传感器的抗高温、高压、抗干扰技术问题,以及数据采集与传输技术问题。这些问题在一定程度上困扰了测试技术的发展,也直接影响了它们在地球动力学等相关领域的应用研究水平。

随着地球动力学研究的不断深入,构造应力分析方法取得了很大发展,由少量单一应力数据简单定性分析构造应力场特征,发展为利用大量多种应力数据深入分析构造应力场细结构。例如,利用深孔地应力测试数据分析地壳浅部应力随深度的变化规律;利用 GPS 和大地形变观测资料反演构造应力场及其变化特征;利用地震活动资料或地震波记录对地壳深部构造应力及其变化进行推断等。由于计算

机技术的飞速发展,使得人们能够借助计算机技术对地壳应力状态进行深入合理地反演分析。其中,利用大量观测数据反演拟合地壳平均构造应力张量方法(也称滑动方向拟合法)的提出,避免了由单个数据刻画地壳应力的偏差和受应力场调整变化带来的不确定性。

滑动方向拟合法的基本思想最初始于 Bott M H P 的断层滑动机制分析(Bott, 1959)。后来 Carey E 等根据 Bott 的原则提出由断层滑动矢量反演构造应力张量的设想和计算方法(Carey et al., 1974)。此后,许多学者对该方法不断予以改进,并作了进一步的研究分析,使之逐步完善(Carey, 1976; Armijo et al., 1978)。20 世纪 80 年代以来,国内外学者将此方法应用于断层解析、构造应力场和震源机制解资料的分析研究,并取得重要成果(Ellsworth, 1982; Gephart et al., 1984; Zoback, 1983; Mercier et al., 1987; 许忠淮等, 1983; Angelier, 1979; 谢富仁等, 2004; Plenefisch et al., 1997)。该方法是根据一组含有断层运动特征的断层观测数据来反演这些断层所在区域的构造应力状态。其实质是用计算出的断面上剪应力方向去拟合断面上的滑动方向,所以也叫滑动方向拟合法。由于该方法计算分辨能力强,包含信息量丰富而具有广阔的发展前景,目前该方法成为研究构造应力场最有效的手段之一。然而,滑动方向拟合法还只能给出构造应力的三个主方向和主应力相对大小,不能得到三个主应力的量值。

从能量的角度来说,地震中的弹性能释放与震源区应力状态直接相关,如果对一个强震序列,包括前震、主震和余震进行整体分析,则可能帮助人们了解地壳构造应力状态以及应力积累变化的过程。Gross 在这方面做了有益的探索,提出了利用小震数据和强震震源参数反演区域构造应力状态及其演化过程的方法(Gross et al., 1997),实现了对区域构造应力状态和累积速率量化分析。虽然这些研究工作尚处于尝试阶段,还有许多问题有待进一步探讨,但这些研究为比较完整了解地壳深部构造应力状态提供了新途径。

2 目标与研究内容

2.1 项目总体目标

开展系统的地应力测量与监测及其实验对比研究,通过室内实验和野外现场实际测试,对现有各种主要的地应力测试技术的适用性和可靠性进行总体评价和研究,进而针对存在的问题开展研究和相关测试系统的创新性研发,从整体上提升现有主要

测试方法的技术水平;在北京地区建立深孔地应力综合观测试验站;将青藏高原东南缘这一典型构造地域作为本项目的综合观测实验平台,有计划地开展地应力测量与监测,吸引国内外的有关科学家来此开展科学研究,进而将其打造成具有国际影响力的地球动力学野外试验基地。为中国地壳探测计划提供应力应变监测关键技术准备和高层次人才储备,完善地壳探测计划内容和部署方案,推动申报国家重大科学专项的进程,为在全国范围开展地壳深部探测、解决国家资源环境重大问题提供科技支撑。

2.2 主要任务和研究内容

(1)原地应力测量技术:①开展水压致裂和应力解除原地应力测量,对两种测量方法的可靠性进行对比分析。②研制和发展水压致裂和应力解除深孔应力测量系统。

(2)应力应变连续监测系统的对比试验研究:对压磁、压容以及体积式应力应变连续监测系统的分辨率、可靠性以及长期稳定性进行实验对比分析。

(3)深井综合观测技术研究:开展系统的室内和野外现场实验以及测试系统的研发和升级。研制和开发适用于深孔的应力应变监测探头,研发在深井实现水平应力应变、钻孔倾斜、水温、孔隙压力等多种测项自由组合观测的深井综合观测系统。

(4)建立北京地区综合观测试验站和青藏高原东南缘地应力综合监测网络:首先,在北京地区选择理想的实验场地,布设 4 个 150 左右的钻孔,开展地应力测量与监测技术对比实验研究,另外在 1 个深孔中布设深井综合观测系统,对水平应力应变、钻孔倾斜、水温、孔隙压力等多种物理量实施动态监测;在青藏高原东南缘不同构造部位合理布设 16 个测点,通过原地应力测量以及应力应变连续监测,建立青藏高原东南缘地应力综合监测网络,实现对该地区地应力空间分布及其动态变化的监测。

(5)原地应力测量数据自动计算分析软件系统研制。主要包括水压致裂和应力解除两种技术方法。

(6)建立地壳探测工程地应力专题数据库:以地理信息系统为基础平台,建立开放性并具国际标准的地应力专题数据库。

(7)开展利用地震观测资料推断地壳深部应力状态的方法研究以及利用断层滑动资料反演构造应力张量方法研究。

(8)参照国际标准,开展应力应变测量(监测)技术标准化研究,形成应力应变测量(监测)技术标准指南。

(9)综合研究:建立有限元计算的地质模型。利

用现场实测资料,综合其它多种资料,如地质构造、岩性参数、GPS 观测资料等等,采用大型有限元计算程序对研究区域现今应力场进行反演研究,获得其现今地应力分布及其变化图像,并开展活动断裂与现今地应力耦合关系研究。在此基础上,开展系列专题研究,如地质灾害内动力条件致灾机理分析、地震孕育、迁移及其发震的机理研究等。

2.3 关键科技问题

本项目主要涉及 8 个关键科技问题,具体如下:

①地壳应力的非均匀性问题,亦即地壳应力分布状态的复杂性问题。需重点研究地形、岩性以及地质构造对现今地应力赋存状态的影响作用;

②对于深孔水压致裂测试技术,重点研制耐高压封隔器、印模器,耐高压推拉开关,深井数据采集和存储系统、定向系统;

③在应力应变连续监测技术中,采用新技术、新材料,考虑高灵敏度与量程的关系,改善监测系统长期稳定性问题,解决各类型传感器综合集成问题;

④在深井综合观测技术中,解决小型化、适合井下使用的传感器技术、多测项的系统集成及数据采集和传输技术、抗深井高温高压技术和深孔安装技术;

⑤深孔应力解除技术,重点改进探头结构及性能,提高其灵敏度和长期稳定性,研制压磁解除深孔安装技术、深孔解除技术及深孔定向技术;

⑥研制标定装置,对微小应力、微小位移、微小倾斜进行精确测定,实现对应力测量系统、钻孔应变测量系统、钻孔倾斜仪等的灵敏度系数、稳定性等进行标定;

⑦利用震源机制解资料、断层滑动资料、跨断层监测资料等,发展和完善一套求解构造应力张量的方法和相应的计算分析软件;

⑧对于本研究项目中的数值模拟研究,其关键科技问题在于活动断裂与应力场耦合机制的计算模拟分析。在本项研究中,将强化原地应力测试结果的约束作用,采用接触分析模型模拟主要活动断裂的滑动摩擦机制,揭示断裂活动与应力场之间的相互作用关系。

2.4 技术难点

①深孔水压致裂原地应力测试系统,重点研制耐高压封隔器,井下数据采集和存储、定向系统;深孔应力解除系统(压磁法应力测量系统)的研制中重点解决探头结构及性能(解决量程、灵敏度和稳定性的问题),深孔安装技术、深孔解除技术(包括施工工

艺、数据采集和存储);

②应力应变监测系统研发,重点解决探头灵敏度、可靠性、测试系统长期稳定性技术问题;

③井下综合观测技术,实现一井多用,将多个传感器组合在一起组成井下综合观测系统,由于测项信号多,需解决相互干扰、数据采集、存储、传输等有关难题,解决多参数采集系统的兼容及传输和深孔安装技术;

④井下观测系统需要抗井下高压等恶劣环境,应重点解决设备的密封抗压性能以及设备的安装工艺等,即传感器与钻孔的耦合技术。井下观测系统(体积应变探头和压容探头)采用水泥固结于岩石孔中的耦合方式,针对不同的孔深和岩性如何调整水泥参数是本课题的技术难点之一。

2.5 创新性

本项目的创新性集中体现在以下 6 个方面:

①采用新技术、新材料,解决应力应变连续监测系统长期稳定性问题;

②通过现场比测实验研究,分析研究应力/应力观测技术的稳定性和可靠性问题;

③井下综合观测技术,通过解决小型化井下传感器技术、多测项的系统集成及数据采集和传输技术、耐深井高温高压技术和深孔安装技术,实现一井多用综合监测;

④通过改进压磁测量元件测量精度及稳定性,加之解决深孔安装、定向、解除技术以及井下数据自动采集技术,实现深孔应力解除测量;

⑤通过研制标定装置,对微小应力、微小位移、微小倾斜进行精确测定,实现对应力测量系统、钻孔应变测量系统、钻孔倾斜仪等的灵敏度系数、稳定性等进行标定;

⑥建立关键构造地域-青藏高原东南缘地壳应力监测网络,实施系统的地应力测量与监测,逐步使之成为具有国际影响力的野外观测和试验平台。

3 研究方案

3.1 总体技术路线

本项目的实施,将通过跨部门组织精干技术力量,开展地应力测量与监测技术研发、形成具有国际先进水平的应力应变测量与监测技术方法体系,为组织实施中国地壳探测计划做好关键技术准备、高层次人才储备和相关基地建设。首先,开展地应力测量与监测的对比实验研究,包括水压致裂和应力解除技术,以及压磁、压容和体积式应力应变连续监测技术的对比实验研究。对不同测试技术方法

的可靠性、稳定性以及适用性进行科学的分析和评估;在此基础上,针对现有测试技术存在的不足和问题,开展技术攻关和仪器设备的研发。研制深孔水压致裂测试系统和深孔应力解除测试系统,研制原地应力测量数据计算分析软件,研制和集成深井综合观测系统,开展利用地震观测资料推断地壳深部应力状态的方法研究以及利用断层滑动资料反演构造应力张量方法研究,并建立地应力专题数据库。同时,在北京地区建设深孔观测综合试验台站,在青藏高原东南缘建立地应力监测网络。开展综合研究,利用有限元数值模拟技术,反演研究目标区现今地应力场的空间分布及其动态变化特征;并针对地质灾害的预测预警等相关科学问题,从内动力角度,揭示其成因机制,为国土资源规划以及地质灾害应急决策提供科学依据。

3.2 课题设置与任务分解

根据项目的研究内容和总体技术路线,项目设置 4 个研究课题,分别如下:

课题一: 原地应力测试技术方法试验研究

目标任务: 开展原地应力测量方法试验研究,以压磁应力解除和水压致裂两种技术方法为主要对象,通过系统的室内实验及现场测试研究,发展并完善深孔地应力测量技术方法,提交深孔压磁应力解除测试系统以及水压致裂测试系统;开展水压致裂法、压磁法野外对比测量研究,系统评价测量方法的可靠性及适用性。以现有大量的实际观测资料为基础,并参照已有的相关技术标准和资料,对应力解除法、水压致裂法进行标准化研究,制定原地应力测量的规范程序 and 数据处理标准方法,对各种原地应力测量方法的可靠性和适用范围分别做出评价,为制定应力测量的技术规范提供奠定基础。

研究内容: (1)深孔压磁应力测量元件的结构研究。对压磁测量元件的结构、电磁性能进行系统改进,提高防水性能,简化安装工艺,使其与钻孔岩壁的耦合状态良好,提高压磁测量元件的灵敏度和稳定性;(2)压磁应力测量元件深孔安装预加力技术及定向技术研究。对现有压磁加力系统进行技术改

造,使元件安装于孔中的预加力过程由机械加力方式改变为电动可控方式,提高测量元件安装可靠性。研制先进的深孔定向系统,提高定向精度,使元件定向和加力过程同时进行,计算机直接读取定向数据(图 1);(3)压磁井下数据采集仪研制。研制压磁井下数据采集仪,对应力测量过程中测量数据实现井下实时采集并存储,结束地表采集的繁杂工艺,大大提高测量效率;(4)研制深孔水压致裂测量系统。研制耐高压封隔器、印模器及井下开关系统,研制耐高压井下压力传感器,研制耐高压井下数据采集仪,形成一套具有现今先进水平的深孔水压致裂测量系统;(5)开展水压致裂法、压磁法野外对比测量研究。在野外测量钻孔中同时开展水压致裂法、压磁法对比测量,系统评价测量方法的可靠性以及误差来源,为制定原地应力测量技术规范提供依据。

技术路线: 本项研究采用室内研制、调试和现场试验相结合的技术路线。首先进行深孔压磁测量系统、水压致裂系统设计,然后开展室内试验,性能达到设计要求后,进行野外现场试验,在此基础上进一步改进和完善。对改进完善后的水压致裂测量系统、压磁应力测量系统进行野外对比测量,通过对地应力测量过程中的测量原理、测量方法、仪器设备、测量条件、测量步骤、数据采集、计算分析、测量结果合格标准及复验规则等方面进行研究,结合项目其它课题开展的地应力测试,开展地应力测量技术标准化研究。

课题二: 深孔地应力监测仪器研制与观测技术方法试验研究

目标任务: 以地壳应力应变观测技术中的关键技术问题为重点,开展系统的室内和野外现场实验以及测试系统的研发和升级。研制和开发适用于深孔的应力应变监测探头,研发在深井实现水平应变、钻孔倾斜、水温、孔隙压力等多种测项自由组合观测的深井综合观测系统。以现有大量的实际观测资料为基础,对应力应变监测技术进行标准化研究,制定相应的规范程序 and 数据处理标准方法。

研究内容: (1)建立应力应变观测长期实验研究



图 1 改造后压磁应力测量系统初样样机
Fig. 1 New system for piezomagnetic stress measurements
左-定向单元; 中-加力安装单元; 右-测量单元
Left-orientation unit; middle-loading unit; right-measuring unit

基地,开展应力应变连续监测仪器的对比试验研究,对压磁、压容以及体积式应力应变连续监测仪器的分辨率、可靠性以及长期稳定性进行实验对比分析;(2)深井综合观测系统是实现在一孔中同时开展水平应变、钻孔倾斜、孔隙压力、水温等多种项目观测。井下综合观测将多个传感器组合在一起,测项信号多且复杂,研究井下不同测项的探头数字化技术,由探头直接输出数字信号,实现测量数据由井下到地面的数字传输。研究多手段传感器必须的技术指标、组装和协调方案,避免相互影响,实现深孔综合观测系统多手段的技术集成。具体包括:①钻孔分量应变数字化探头研制;②钻孔倾斜数字化探头研制;③井下温度数字化探头研制;④孔隙压力数字化探头研制;⑤深井地应力综合探头集成技术研究。

技术路线:(1)应力应变连续监测技术的现场试验对比。采用主孔-观测孔的方式,在主孔中利用水压致裂技术对钻孔孔壁施加一定的压力,使其周边一定范围内的岩体产生应力应变变化。在主孔附近的观测孔分别布设压磁式、压容式和体积式监测仪器。对仪器的灵敏度、可靠性和稳定性等进行综合分析和评估;(2)深井综合观测技术研究。研制小型化的、适合井下使用传感器技术,研究多手段传感器必须的技术指标、组装和协调方案,避免相互影响,实现深孔综合观测系统多手段的技术集成。采用深井数据采集技术,实现观测数据在探头内数字化,通过数字传输方式将观测数据从深井传送到地面,以便降低传输电缆的成本和安装工艺要求,保证观测数据质量。深井传感器的抗高温、高压、抗干扰技术等项研究。为保证测量装置放到数百米深井中能够长期、可靠地工作,需要研究深井传感器的抗高温、高压技术,对深井综合观测系统在现场安装后可能的干扰因素进行分析研究。采用室内高压水压试验对深井仪器进行防渗水、防高压(1000米水柱压力)性能试验,检测其可靠性。采用室内恒温槽试验对深井仪器进行防高温性能试验。通过现场中试试验,对深井综合观测系统进行观测研究,对干扰因素进行分析研究,提出解决方案;(3)应力/应变监测技术标准化研究。通过对地应力监测的测量原理、测量方法、仪器设备、测量条件、测量步骤、数据采集、计算分析、测量结果合格标准及复验规则等方面进行研究,开展地应力/应变监测技术标准化研究。

课题三:重要地区地应力测量与监测及构造应力场综合研究

目标任务:在中国大陆范围内,选择北京地区

和青藏高原东南缘作为本课题的主要研究区域,利用先进、成熟和可靠的地应力测量与监测技术,开展系统的地应力测量与监测工作。建立北京地区深孔地应力综合观测试验站,获得该区域千米深度范围内现今地应力的分布规律,并实现对其动态变化的实时监测,提高首都地区地质灾害的监测预警水平;在青藏高原东南缘这一典型构造地域,开展系统的地应力测量与监测,获得该区域主要构造单元地应力的分布规律,并实现对其动态变化的实时监测。吸引国内外的有关科学家来此开展科学研究,逐步将其打造成具有国际影响力的地球动力学野外试验基地。

研究内容:(1)北京地区现今地应力状态测量及监测研究。在北京地区布设1个千米左右的深钻孔,开展原地应力测量,获得该地区深部应力状态,并取得应力随深度变化规律。在北京地区2个深孔中布设深井综合观测系统实施动态监测;(2)青藏高原东南缘地区现今地应力状态测量及监测研究。在青藏高原东南缘地区合理布设16个钻孔,开展原地应力测量,获得该地区现今应力状态及其分布规律,以及应力随深度变化规律。在青藏高原东南缘地区16个钻孔中安装应力或应变监测系统,并与其他科研项目实施的地应力监测点一起,联合构建青藏高原东南缘地应力综合监测网络(监测点布局见图2);

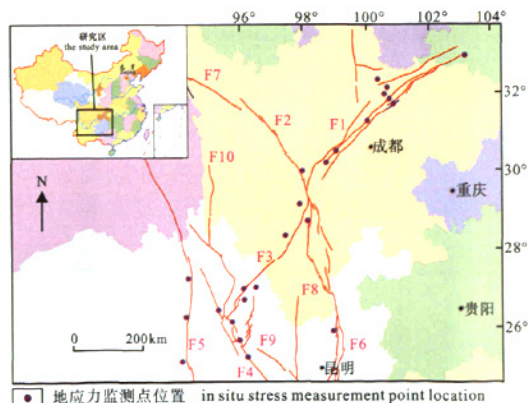


图2 青藏高原东南缘地应力监测点布局

Fig. 2 Illustration of the geo-stress observation points in southeast boundary of Qinghai-Tibet plateau

F1-龙门山断裂带; F2-鲜水河断裂带; F3-丽江-小金河断裂带;
F4-红河断裂带; F5-怒江断裂带;
F6-小江断裂带; F7-甘孜-玉树-风火山断裂带; F8-磨盘山-绿叶江
断裂; F9-南华-楚雄-建水断裂带; F10-金沙江断裂
F1-Longmenshan faults; F2-Xianshuihe faults;
F3-Lijiang-xiaojinhe faults; F4-Red River faults; F5-Nujiang faults;
F6-Xiaojiang faults; F7-Ganzi-Yushu-Fenghuoshan faults;
F8-Mopanshan-lveyjiang faults; F9-Nanhua-Chuxiong-Jianshui
faults; F10-Jinshajiang faults

(3)地应力测量与监测系统工程研究。主要开展重要区带现场应力测量与监测的试验研究工作,包括北京试验区和青藏高原东南缘试验区。地应力测量与监测系统工程研究,进行课题的日常管理,并组织各课题的立项、检查、中期评估等,协调课题之间的合作研究,开展区域构造应力场研究。开展国际合作,调研国际研究进展和探测成果,引进国际先进技术和人才。在综合研究基础上编写应力应变测量与监测技术指南,完善技术规范,为今后开展地壳探测工程提供技术支撑。把各课题的研究成果进行综合分析研究,综合集成课题研究成果,在各课题成果报告基础上编写项目成果报告并验收。

技术路线:(1)对青藏高原东南缘和北京地区开展地质调查,综合考虑地质构造、地形地貌、地层岩性等条件,选择并确定地应力测量与监测实验场区位置,并进一步确定测试钻孔位置;(2)根据实验要求,提出钻探技术方案和技术要求。择优选择钻探承担单位,按照课题设计和进度安排,完成实验钻孔的造孔工作;(3)对所有测试钻孔,首先开展钻孔超声波成像测试,获得钻孔孔壁结构图像资料,为应力测量与监测位置选择提供依据;(4)对每一个测试钻孔,首先安排水压致裂原地应力测量(对比试验钻孔还要安排压磁法应力解除地应力测量),每个钻孔的测量段一般不少于10段,对具有明显破裂压力的测段开展印模定向测试,以获得地应力方向的充分的基础资料;(5)对每一个测试钻孔,在典型层段,提取岩芯,开展岩石力学实验,获取岩石的弹模、泊松比、黏聚力和内摩擦角等力学参数,为有限元数值模拟综合分析提供必要的基础数据;(6)在完成原地应力测量的基础上,对测试数据进行计算分析,获得地应力随孔深的分布规律。在此基础上,选定合适的深度位置,安装应力/应变监测探头,开展地应力连续监测;(7)采用规范和统一的技术标准,对各个监测点的监测数据实施连续采集(采集频率不低于1次/分钟),利用GPRS/CDMA/北斗通讯卫星数据传输技术,实现应力应变监测的远程无线遥控和数据传输;(8)在获取大量现场实测数据基础上,结合现场地质调查和岩石力学试验,以及GPS测量结果和其它资料(如震源机制解),借助有限元数据模拟技术,开展构造应力场综合分析研究,分析重要区带现今应力状态变化规律,综合研究内生地质灾害形成机理。

课题四:构造应力分析方法研究与应力探测数据集成

目标任务:发展利用地震数据和资料推断地壳

深部构造应力方向和应力量值的估算方法;建立一套基于断层滑动方向拟合法利用断层滑动数据、跨断层定点形变观测资料以及岩石力学参数确定构造应力张量的计算方法;研制地应力测量数据分析计算软件;建立地壳探测工程地应力专题数据库。

研究内容:(1)优化利用震源机制解反演构造(偏)应力张量的算法,以地震活动和强震震源参数为基础数据,在研究确定地壳深部最佳应力状态模型的基础上,建立利用地震数据推断地壳深部构造应力方向和应力量值的估算方法,为获取地壳应力状态参数提供新手段。以滑动方向拟合法为基础,结合断层滑动数据、跨断层定点观测资料,建立一套确定构造应力张量的反演计算方法;(2)在青藏高原东南缘和北京地区,开展活动构造形迹的详细调查,并运用本课题建立的构造应力张量计算方法,对这些地区的断层滑动数据、地震数据和跨断层定点形变观测资料等进行分析处理,反演构造应力张量,对计算方法进行检验分析;(3)针对水压致裂、应力解除两种原地应力测试技术,参照目前国际上相关的数据计算和处理方法,编制计算分析软件。形成原地应力测量自动计算分析软件系统;(4)以地理信息系统为技术支持平台,建立规范的、开放式的、数据内容详实的地应力专题数据库。

技术路线:

(1)地应力专题数据库建设

依据本项目产出的数据产品的特点,参照国内外同类或相近数据库的设计经验,设计制定“地壳探测工程地应力专题数据库”的数据模型,包括入库数据格式、技术标准等;选择地理信息系统(GIS)作为技术支持平台,在该平台上完成数据库构架总体设计,建立“地壳探测工程地应力专题数据库”管理查询系统;并依据数据库的数据模型设计,构建相应各类数据表;及时对本项目获取的各类应力数据,包括各类基础数据、地应力监测网络获取的各种地应力数据、构造应力张量反演结果和区域构造应力场研究结果等,进行校核、归档、整理入库。完成“地壳探测工程地应力专题数据库”的构建工作。

地应力专题数据库建设的关键点是,对国内外同类数据库进行认真研究,在数据库总体构架以及管理系统的设计上,要充分考虑专题数据库的通用性。

(2)利用地震观测资料推断地壳深部应力状态的方法研究

在利用震源机制解反演构造应力张量时,遇到

一个主要问题是—般不能从震源机制解的两个节面中判定哪个是实际断层面。目前,常用的主要算法有 2 种,一是将震源机制解的两个节面都作为可能的地震断层面,采用滑动方向拟合法进行试算,二是利用网格搜索确定最佳应力模型的计算方法。2 种算法除了计算比较费时外,还都受到震源机制解数据的制约,当震源机制解数据较为离散时,使得矛盾震源机制解数据较多,因而使反演结果的可靠性受到影响。本课题在借鉴 2 种算法各自优点的基础上,优化利用震源机制解反演构造(偏)应力张量的算法,缩短计算时间,提高反演结果的可靠性。

依据强震序列中经过精确定位的地震三维分布图像和强震震源参数,利用震源处应力变化与地震活动性空间变化的相关性,采用力学计算和统计的方法,寻找区域构造应力状态模型,推断构造应力场三个主应力的量值,以此为基础,结合由震源机制解反演构造(偏)应力张量的算法,建立利用天然地震数据和震源机制解资料推断地壳深部构造应力方向和应力量值的估算方法,确定区域构造应力状态参数。

(3)利用断层观测资料反演构造应力张量方法研究

研究拓展滑动方向拟合法的适用性,使其可以利用跨断层定点形变观测等资料对构造应力张量进行反演。其中关键点是—对观测资料的处理,较准确地推断断层滑动矢量。首先建立一套对跨断层定点形变观测资料进行分析处理的方法,去除噪声等干扰因素的影响。在此基础上,建立断层水平扭动量、断层垂直位移量以及断层滑动矢量的计算公式,获取滑动方向拟合法所需的输入参数,实现对构造应力张量的反演。选择适当的计算机编程语言,在通用的技术平台上,形成滑动方向拟合法算法软件包。

(4)构造应力张量计算方法的检验

为检验构造应力张量计算方法的准确性与可靠性,依据项目建立的北京地区综合观测试验站和青藏高原东南缘地应力综合监测网络的总体布局,在北京地区和青藏高原东南缘,选择典型活动断裂,开展活动构造形迹的详细调查,系统测量活动断裂滑动擦痕数据,并对 2 个目标工作区的地震数据和跨断层定点形变观测资料进行分析处理,利用本课题建立的构造应力分析方法进行构造应力张量反演,获取研究区构造应力状态参数。与已有的研究结果进行对比研究,对构造应力张量计算方法进行检验分析。

(5)研制原地应力测量数据分析软件

针对水压致裂、应力解除两种原地应力测试技术,参照目前国际上相关的数据计算和处理方法,编制计算分析软件,形成原地应力测量自动计算分析软件系统。

4 预期成果及效益分析

4.1 预期成果

通过“地应力测量与监测技术实验研究”项目的实施,将全面提升我国地应力观测技术的测量与综合研究水平,在测量深度、测量精度以及测试仪器的稳定性、可靠性、规范性等方面,形成先进的测量与监测系统及其数据处理和分析系统;通过关键构造地域开展的系统的地应力测量与监测,结合综合分析和研究,获得其地应力的空间分布规律和时空变化特征,有望获得创新性认识和重要科学发现,为开展全国性的地壳探测计划提供人才和技术储备。

主要预期成果具体如下:

1)建立青藏高原东南缘地应力监测网络,将其打造成具有一定国际影响力的野外试验平台;建设北京地区地应力深孔综合观测实验站,为首都安全提供进一步的保障。

2)提交地应力测量实验研究报告;编写地应力测量技术标准、测试规范研究报告;编写及提交青藏高原东南缘、北京地区现今地应力状态与构造活动特征研究报告。

3)完成水压致裂、压磁应力测量、应力应变综合观测系统样机,在完成地应力深部探测技术研发与试验的同时,对取得的技术实验成果申报国家专利。

4)提交地应力对比测量实验观测数据,包括原始数据、处理数据、解释成果数据;地应力对比测量数据无障碍向科学界和公众开放共享。

5)地应力深部实验探测的成果论著:预计地应力深部探测技术试验研究会—对国家重要经济地带的重大工程建设、地质灾害发生背景与预测等方面取得重大发现成果。这些成果以论著形式向国内外报道。

6)建立地应力专题数据库,构建数据网络共享平台。

7)专著与论文:出版 1 部专著,在国内外核心期刊公开发表 35 篇学术论文,其中包括 10 篇 SCI/EI 检索论文。

8)提交项目成果报告 1 份和科普报告 1 份。

9)形成一支专业结构合理、年龄层次优化、理论联系实际、国际化的地应力深部探测研究国内一流队伍,参与国际合作与竞争。

4.2 效益分析

1)通过对地应力深部探测技术试验研究及对比测量研究,建立有效可行的深孔地应力测量技术组合(包括深孔水压致裂测量技术、深孔压磁应力解除测量技术及应力应变综合观测技术),为深部地壳应力探测提供技术准备,推动我国地壳深部地应力探测技术发展。

2)地应力深部探测技术试验研究将会在青藏高原东南缘等地区大陆动力学研究、构造应力场研究、活动构造研究、地质灾害发生背景与预测等方面取得重大发现成果。

3)地应力深部探测实验技术成果将及时推广转化到实验剖面探测之中,部分探测技术能够产生显著效益。如深孔应力测量技术、应力应变监测技术对区域地壳稳定性、地下工程稳定性及灾害监测预警研究具有良好应用前景。

致谢: 地应力测量与监测技术实验研究属于深部探测专项(SinoProbe)中的第六项目,是目前我国在该技术领域开展的规模最大的基础性研究项目。在项目的立项论证过程中,始终得到了国土资源部和中国地质科学院有关部门和领导的大力支持。另外,作为项目的主要承担单位,中国地质科学院地质力学研究所和中国地震局地壳应力研究所的领导和科技处、财务处等职能部门都对本项目给予了鼎力支持。对此,我们表示由衷的感谢。同时,我们还要特别感谢众多老一辈科学家对本项目的关怀和呵护,他们在本项目论证过程中提出了许多宝贵的建议,为项目设计和实施提供了重要的参考依据。

参考文献:

- 陈群策, 安美建, 李方全. 1998. 水压致裂法三维地应力测量的理论探讨[J]. 地质力学学报, 4(1): 37-44.
- 董树文, 李廷栋, SinoProbe 团队. 2011. 深部探测技术与实验研究(SinoProbe)[J]. 地球学报, 32(S1): 3-23.
- 董树文, 李廷栋. 2009. SinoProbe——中国深部探测实验[J]. 地质学报, 83(7): 895-909.
- 高合明, 刘建东, 沈露禾. 2000. 深部地应力测试技术及其在钻井工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 19(增): 1124-1127.
- 郭啟良, 伍法权, 钱卫平, 张彦山. 2006. 乌鞘岭长大深埋隧道围岩稳定性与地应力关系的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 25(11): 2194-2199.
- 李方全, 刘光勋. 1986a. 地应力测量, 地壳上部应力状态与地震[J]. 中国地震, 2(1): 50-55.
- 李方全, 刘光勋. 1986b. 我国现今地应力状态及有关问题[J].

地震学报, 8(2): 156-171.

- 李方全, 孙世宗, 李立球. 1982. 华北及郯庐断裂带地应力测量[J]. 岩石力学与工程学报, 1(1): 73-86.
- 李海亮, 李宏. 2010. 钻孔应变观测现状与展望[J]. 地质学报, 84(6): 895-900.
- 李宏, 马元春, 王福江. 2007. 压磁套芯三维原地应力测量研究[J]. 岩土力学, 28(2): 253-257.
- 李四光. 1977. 论地震[M]. 北京: 地质出版社.
- 欧阳祖熙, 张宗润, 舒桂林. 2001. 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, 30(1): 1-6.
- 石耀霖. 2001. 关于应力触发和应力影概念在地震预报中应用的一些思考[J]. 地震, 21(3): 1-7.
- 王连捷, 潘立宙, 廖椿庭, 丁原辰, 区明益. 1991. 地应力测量及其在工程中的应用[M]. 北京: 地质出版社.
- 王仁, 何国琦, 殷有泉, 蔡永恩. 1980. 华北地区地震迁移规律的数学模拟[J]. 地震学报, 2(1): 32-42.
- 吴满路, 张春山, 廖椿庭, 马寅生, 区明益. 2005. 青藏高原腹地现今地应力测量与应力状态研究[J]. 地球物理学报, 48(2): 327-332.
- 谢富仁, 崔效锋, 赵建涛, 陈群策, 李宏. 2004. 中国大陆及邻区现代构造应力场分区[J]. 地球物理学报, 47(4): 654-662.
- 许忠淮, 阎明, 赵仲和. 1983. 由多个小地震推断的华北地区构造应力场的方向[J]. 地震学报, 5(3): 268-279.
- 张宝红. 2004. 美国的板块边界观测(PBO)计划[J]. 大地测量与地球动力学, 24(3): 105-108.
- 张伯崇. 1996. 孔隙压力、断层滑动准则和水库蓄水的影响[C]//苏恺之, 李方全, 张伯崇, 王建军, 尹建民, 周维垣, 刘瑞民. 长江三峡坝区地壳应力与孔隙水压力综合研究. 北京: 地震出版社: 166-198.

References:

- ANGELIER J. 1979. Determination of the mean principal direction of stresses for a given fault population[J]. Tectonophysics, 56(3-4): 17-26.
- ARMJO R, CISTERNAS A. 1978. Un problème inverse en micro-tectonique cassante[J]. C. R. Acad. Sci. Paris, D287: 595-598.
- BOTT M H P. 1959. The mechanism of oblique slip faulting[J]. Geological Magazine, 96(2): 9-11.
- BRUDY M, ZOBACK M D, FUCHS K, RUMMEL F, BAUMGARTER J. 1997. Estimation of the complete stress tensor to 8 km depth in the KTB scientific drilling holes: Implications for crustal strength[J]. J. Geophys. Res., 102(B8): 18453-18475.
- CAREY E. 1976. Analyse numérique d'un modèle mécanique élémentaire appliqué à partir des stries de glissement[J]. Thèse de 3ème cycle. Tectonique Générale, Univ, Paris-Sud: 138.
- CAREY E, BRUNIER B. 1974. Analyse théorique et numérique d'un modèle mécanique élémentaire appliqué à l'étude d'une population de failles[J]. C. R. Acad. Sci. Paris, D279: 891-894.
- CHEN Qun-ce, AN Mei-jian, LI Fang-quan. 1998. Theoretical discussion on 3-D hydraulic fracturing in situ stress measurement[J]. Journal of Geomechanics, 4(1): 37-44(in Chinese with English abstract).
- DONG Shu-wen, LI Ting-dong, SinoProbe Group. 2011. Deep Exploration Technology and Experimentation (SinoProbe)[J]. Acta Geoscientia Sinica, 32(S1): 3-23.
- DONG Shu-wen, LI Ting-dong. 2009. SinoProbe: the exploration

- of the deep interior beneath the Chinese continent[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(7): 895-909(in Chinese with English abstract).
- ELLSWORTH W L. 1982. A general theory for determining the state of stress in the earth from fault slip measurements[J]. *Terra Cognita*, 2: 170-171.
- GAO He-ming, LIU Jian-dong, SHEN Lu-he. 2000. Measuring methods of deep formation geostress and its application to borehole stability analysis[J]. *Chinese journal of rock mechanics and engineering*, 19(SI): 1124-1127(in Chinese with English abstract).
- GEPHART J W, FORSYTH D W. 1984. An Improved method for Determining the Regional Stress Tensor Using Earthquake Focal Mechanism Data: Application to the San Fernando Earthquake Sequence[J]. *J. Geophys. Res.*, 89(B11): 9305-9320.
- GROSS S J, KISSLINGER C. 1997. Estimating tectonic stress rate and state with Landers aftershocks[J]. *J. Geophys. Res.*, 102: 7603-7612.
- GUO Qi-liang, WU Fa-quan, QIAN Wei-ping, ZHANG Yan-shan. 2006. Study on relationship between deformation of surrounding rock and in situ stress in Wushaoling deep buried tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25(11): 2194-2199(in Chinese with English abstract).
- HAIMSON B C. 1978. The hydrofracturing stress measuring method and recent field results[J]. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, 15(4): 167-178.
- HAIMSON B C, CORNET F H. 2003. ISRM Suggested Methods for rock stress estimation—Part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF)[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 40(7-8): 1011-1020.
- HICKMAN S, ZOBACK M D. 2004. Stress orientations and magnitudes in the SAFOD pilot hole[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L14S12.
- IWATA T. 2002. Tidal stress/strain and acoustic emission activity at the Underground Research Laboratory, Canada[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29(7): 1126-1129.
- LI Fang-quan, LIU Guang-xun. 1986a. In situ stress measurements, stress state of the upper crust and earthquake[J]. *China Earthquake*, 2(1): 50-55(in Chinese).
- Li Fang-quan, LIU Guang-xun. 1986b. The present state of stress in China and related problems[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 8(2): 156-171(in Chinese).
- LI Fang-quan, SUN Shi-zong, LI Li-qiu. 1982. In-situ stress measurements in North China and Tancheng-Lujiang fault zone[J]. *Chinese journal of rock mechanics and engineering*, 1(1): 73-86(in Chinese).
- LI Hai-liang, LI Hong. 2010. Developments of borehole strain observations in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(6): 895-900(in Chinese with English abstract).
- LI Hong, MA Yuan-chun, WANG Fu-jiang. 2007. Study on 3-D in-situ stress measurement by piezomagnetic overcoring method[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 28(2): 253-257(in Chinese with English abstract).
- LI Si-guang. 1977. Discussion on earthquake[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- LIAO Chun-ting, ZHANG Chun-shan, WU Man-lu, MA Yin-sheng, OU Ming-yi. 2003. Stress change near the Kunlun fault before and after the Ms 8.1 Kunlun earthquake[J]. *Geophysical Research Letters*, 30(20): 20-27.
- MERCIER J L, ARMijo R, TAPPONNIER P. 1987. Change from late Tertiary compression to Quaternary extension in southern Tibet during the India-Asia collision[J]. *Tectonics*, 6: 275-304.
- OUYANG Zu-xi, ZHANG Zong-run, SHU Gui-lin. 2001. Review and outlook based on west China borehole strainmeter networks[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 30(1): 1-6(in Chinese with English abstract).
- PLENEFISH T, BONJER K P. 1997. The stress field in the Rhine Graben area inferred from earthquake focal mechanisms and estimation of frictional parameters[J]. *Tectonophysics*, 275: 71-97.
- SHI Yao-lin. 2001. Stress triggers and stress shadows: How to apply these concepts to earthquake prediction[J]. *Earthquake*, 21(3): 1-7(in Chinese with English abstract).
- WANG Lian-jie, PAN Li-zhou, LIAO Chun-ting, DING Yuan-chen, OU Ming-yi. 1991. Crustal stress measurements and their application in engineering[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- WANG Ren, HE Guo-qi, YIN You-quan, CAI Yong-en. 1980. A mathematical stimulation for the pattern of seismic transferrence in north China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2(1): 32-42(in Chinese with English abstract).
- WU Man-lu, ZHANG Chun-shan, LIAO Chun-ting, MA Yin-sheng, OU Ming-yi. 2005. The recent state of stress in the central Qinghai-Tibet Plateau according to in-situ stress measurements[J]. *Chinese journal of geophysics*, 48(2): 327-332(in Chinese with English abstract).
- XIE Fu-ren, CUI Xiao-feng, ZHAO Jian-tao, CHEN Qun-ce, LI Hong. 2004. Regional Division of the Recent Tectonic Stress Field in China and Adjacent Areas[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 47(4): 654-663(in Chinese with English abstract).
- XU Zhong-huai, YAN Ming, ZHAO Zhong-he. 1983. Evaluation of the direction of tectonic stress in North China from recorded data of a large number of small earthquakes[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 5(3): 268-279(in Chinese).
- ZHANG Bao-hong. 2004. Plate boundary observation (PBO) project of USA[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 24(3): 105-108(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Bo-chong. 1996. Pore pressure, fault slip criterion and influence of reservoir impounding[C]//SU Kai-zhi, LI Fang-quan, ZHANG Bo-chong, WANG Jian-jun, YIN Jian-min, ZHOU Wei-yuan, LIU Rui-min. Integrated research on the stress field and pore pressure at the Three Gorges site. Beijing: Earthquake Press(in Chinese with English abstract).
- ZOBACK M D, HARJES H. 1997. Injection-induced earthquakes and crustal stress at 9 km depth at the KTB deep drilling site, Germany[J]. *J. Geophys. Res.*, 102(B8): 18477-18491.
- ZOBACK M D, HEALY J H. 1992. In situ stress measurements to 3.5 km depth in the Cajon Pass scientific research borehole: Implications for the mechanics of crustal faulting[J]. *J. Geophys. Res.*, 97(B4): 5039-5057.
- ZOBACK M L. 1992. First and second order patterns of stress in the lithosphere: the World Stress Map Project[J]. *J. Geophysics. Res.*, 97(B8): 11703-11728.