

丁莉莎, 谢剑波, 黄晖, 等. 国外断层深部钻探进展分析[J]. 华南地震, 2021, 41(4): 38–46. [DING Lisha, XIE Jianbo, HUANG Hui, et al. Analysis on the Progress of Deep Fault Drilling Abroad[J]. South China journal of seismology, 2021, 41(4): 38–46]

## 国外断层深部钻探进展分析

丁莉莎, 谢剑波, 黄晖, 吴华灯, 廖一帆, 叶世山,  
卢子晋, 劳谦, 吕仲杭, 陈建涛

(广东省地震局, 广州 510070)

**摘要:** 国际科学钻探计划成立以来, 已经在许多国家和领域取得了重要成果。通过回顾深井钻探项目的发展历史, 概述近几年对俯冲带内的板块边界断层进行钻探的日本南海海槽孕震带实验、日本海沟快速钻探项目及美国圣安德列斯断层深部长期观测的板块结构、钻井资料分析的成果, 并梳理工地热系统钻井项目及南非矿山活动断裂带钻探项目对诱发地震的相关研究。旨在为断层深部钻探研究提供思路和参考。

**关键词:** 科学钻探; 日本南海海槽孕震带实验; 日本海沟快速钻井项目; 圣安德列斯断层深部长期观测; 南非金矿深部地震钻探

中图分类号: P634

文献标示符: A

文章编号: 1001-8662(2021)04-0038-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.04.05

## Analysis on the Progress of Deep Fault Drilling Abroad

DING Lisha, XIE Jianbo, HUANG Hui, WU Huadeng, LIAO Yifan,  
YE Shishan, LU Zijin, LAO Qian, LYU Zhonghang, CHEN Jiantao

(Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China)

**Abstract:** Since the establishment of the International Scientific Drilling Program, important results have been achieved in many countries and fields. Through reviewing the development history of deep drilling projects, the paper summarizes the results of the Seismogenic Belt Experiments of Nankai Trough for drilling plate boundary faults in the subduction zone, the rapid drilling project of the Japan Trench, and the long-term observations of the plate structure and drilling data analysis of the San Andreas fault in the United States in recent years, and combines the related research on induced earthquakes of the engineering geothermal system drilling project and the South African mine active fault zone drilling project. It aims to provide ideas and references for deep fault drilling research.

**Keyword:** Scientific drilling; Seismogenic Belt Experiment of Nankai Trough in Japan; Japan Trench Fast Drilling Project (JFAST); San Andreas Fault Observatory at Depth (SAFOD); Drilling into Seismogenic Zone of  $M_{2.0} - 5.5$  earthquakes in South African gold mines (DSEIS)

收稿日期: 2020-02-03

基金项目: 国家重点研发计划重大科学仪器设备开发专项—井下甚宽频带地震仪的研制与应用开发(2016YFF0103400); 广东省科技协同创新重点项目—综合地震监测业务智能化管理平台研发与应用(2021B1111610008)联合资助。

作者简介: 丁莉莎(1989-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事地震观测技术研究。

E-mail: dlisa2011@126.com

## 0 引言

新兴科学深井钻探领域顺应地球深部探测科学研究的需要,为地学研究提供真实的地下资料和地球物理解释,进而为评估深部矿产资源及减灾防灾提供科技支撑,但是由于坚硬的地壳和地球内部高温高压使得该领域成为世界上最艰难的科学大工程之一,视为项目承担国家的经济、科技、工业及人才实力的综合。我国从2001年实施的中国第一口大陆科学钻探(5158 m)开始,相继开展了青海湖环境科学钻探、松辽盆地白垩纪科学钻探、柴达木盐湖环境资源钻探、中国大陆科钻资源集成计划等,逐渐由科钻弱国走向科钻强国的历程也与世界各国各具特色的科学深井钻探发展息息相关,都秉承以科学研究为目的,均对钻井技术及地质环境因素进行反复研究和论证。

回顾世界深井钻探项目的历史,第一个科学钻探计划始于20世纪中叶大洋科学钻探——“莫霍钻探计划”(Mohole Project);1957年美国在墨西哥西岸瓜达卢佩海湾实施5口钻井,实现了人类第一次从洋底用钻探方法获取玄武岩样品。在此之后,美国科学基金会等机构于1966年资助实施深海钻探计划(DSDP),后逐渐发展成多国参与的国际性计划,该项目在世界各大洋完成钻孔1092口,取得岩心超过9500m;验证了大陆漂移和海底扩张学说。1985年,大洋钻探计划(ODP)开始运作,1998年,我国正式加入ODP,成为ODP历史上第一个“参与成员”。2003年,综合大洋钻探计划(IODP)在DSDP和ODP基础上建立,定位为地球、海洋和生命的综合研究;我国于2004年加入综合大洋钻探计划(IODP)。

大陆钻探计划始于20世纪70年代,与大洋钻探相比较晚,1970年前苏联地质部在科拉半岛实施科学钻探,其中SG-3井最为著名,孔深12 261 m;1987年至1994年德国于Windischeschenbach镇进行了KTB钻探项目;1996年2月,德国、美国和中国作为第一批成员,发起了国际大陆科学钻探计划(ICDP)。目前,ICDP已经实施了湖泊、陨石撞击和生物灭绝事件、研究火山和地热、断层带等几十个科学钻探项目,而我国已成功申请到“大别—苏鲁”大陆超深钻、中国环境科学钻探青海湖工程、科钻一井和二井工程、汶川地震断裂科学钻探等多项ICDP项目,在大陆科学钻探领域方面取得令人瞩目的成绩<sup>[1-3]</sup>。

科学钻探不仅直接采取岩石圈地壳岩心进行测试研究,还利用钻孔深井设置仪器,在无地面干扰环境下进行长期观测,可以得到来自地球内部的客观真实信息,进而研究地球深部构造与岩石圈运动,通过深入岩石圈的深井地震、地球物理观测仪器长期直接观测,可以揭示大陆地壳深部的物质组成与结构构造,探索地下深部应力、地球物理状态与变化,监测地震活动,揭示地震发生规律,观察研究全球性环境变化与变迁等多学科研究,其观测研究成果将为解决人类社会所面临的环境、资源、灾害问题开拓崭新的途径。

## 1 断层深部钻探最新国际进展

2013年ICDP科学会议提议,未来十年ICDP将重点放在断层钻探主题上,研究方向为地震如何成核和传播?为什么他们会停止?是什么控制了地震的频率和大小?断层渗透率和流体压力在地震中如何变化?在地震周期中应力是如何变化的<sup>[4]</sup>?事实上,世界各地已开展了多个断裂带钻探项目(如野岛、圣安第斯断层、车笼埔断层、汶川、阿尔卑斯断层、柯林斯湾、南海海槽、日本海沟、哥斯达黎加)<sup>[4]</sup>。

汶川地震断裂科学钻探工程计划(WFSD)是世界上最早回应大地震的科学钻探,旨在对汶川大地震和复发微地震的源区——龙门山“北川—映秀”断裂及龙门山前缘安县—灌县断层旁侧先后实施4口科学群钻(1200~3000 m)。截止到2016年,作为我国预期实现井中地震监测和提高预报能力的第二大深孔长期地震观测站对汶川地震机制及龙门山隆升机制等研究取得了显著的成果<sup>[3]</sup>。

针对国内外各种科学深井钻探技术对比分析并结合我国实际使得我国断层钻探项目方兴未艾,焕发勃勃生机;因此本文对日本、美国及南非的断层深部钻探项目的近期相关成果进行了简要梳理。

### 1.1 日本南海海槽孕震带实验

国际大洋科学钻探(IODP)的日本南海海槽孕震带实验 Nankai Trough Seismogenic Zone Experiment(NanTroSEIZE)于2007年9月至2008年2月于chikyu开始第一阶段的钻探研究,如图1所示,该项目首次尝试对俯冲带内的板块边界断层或大型逆冲断层的孕震部分进行钻孔、取样和仪器检测;可以通过活动断层的内部进行孕震过程监测和新断裂带取样,这对理解地震力学是非常重要的;

经过长达十年的一系列国家和国际研讨会, 研究者们一致认为日本南海海槽是尝试钻探和监测发震板块界面的理想场所<sup>[5]</sup>。

NanTroSEIZE 科学计划的根本目标是钻进、取

样, 然后对巨型逆冲系统的抗震和发震区的断层进行仪器安装; 涉及在 Kii 半岛附近从板块界面的浅部起裂到发生地震滑移和闭锁深部的几个活动版块系统。

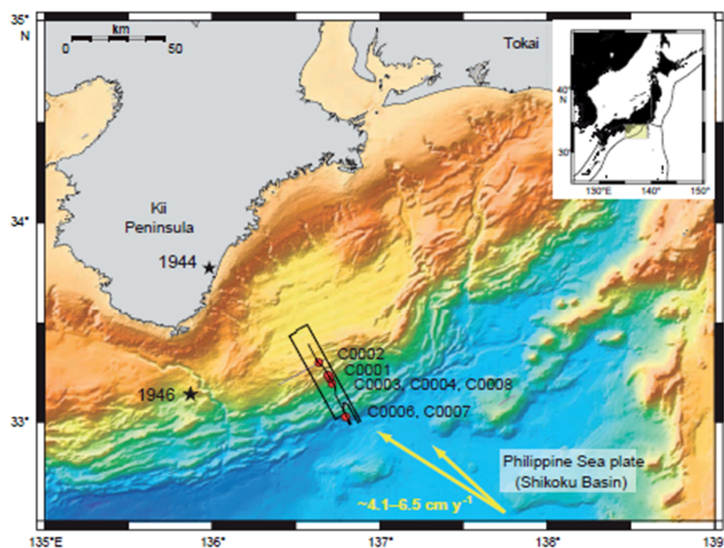


图1 NanTroSEIZE 第一期钻探地点, 星号为大震震中<sup>[5]</sup>

Fig.1 Location of sites drilled during the three expeditions of NanTroSEIZE Stage 1

基于该项目 Huffman 等<sup>[6]</sup>提出了一种同时约束远场水平应力 ( $S_{\text{hmin}}$  和  $S_{\text{hmax}}$ ) 和原位岩石无限压强 (UCS) 的方法, 该方法使用了两个相隔 70 m 远的接近 Nankai 俯冲带的上增生楔的钻孔地球物理测井数据; 从受到相同的构造应力场的影响, 但受不同环隙压力的钻井中采集了相同的沉积物, 因此提供了精确估算地应力大小和岩石强度的独特机会。定义了一个正常的走滑应力状态, 从海底下 900 米到 1386 米, 与地震和岩心数据观测一致。分析还表明, UCS 的原位值通常略低于根据已发表的 UCS 与纵波速度之间的经验关系所假定的值。

分析沉积物质的物性对于了解浅增生楔的结构和板块边界断层的滑动行为具有重要意义, Yabe<sup>[7]</sup> 基于 NanTroSEIZE 项目研究开发一种同时利用电阻率测井数据和岩心样品测量结果中物理性质 (孔隙度、电阻率和热导率) 之间的相关性来估算现场孔隙度和热结构的方法; 新方法应用到 C0002 现场, 从电阻率测井值得到的原位孔隙度值与从密度测井数据得到的原位孔隙度值吻合得很好, 岩心和完整岩屑样品测量的孔隙度也显示出良好的一致性。

日本南海海槽孕震带项目的原位应力研究指出日本南海海槽孕震带处于正断层—走滑断层状态, 并指出 P 波速度估算岩石强震的经验关系会略高估泥岩中的 UCS; 从而导致高估由破裂宽度确定的远

场应力。项目针对大型俯冲带内断层或巨型推覆体的测井、取样研究为后续断层钻探项目进行原位监测、板块结构、测井分析等提供重要参考, 对认识地震力学具有重要意义。

## 1.2 日本海沟快速钻井项目

2011 年日本东北地区近海大地震发生 1 年后 2012 年 4 月 JFAST (日本海沟快速钻井项目) 启动, 该项目由两个综合海洋钻探计划 (IODP) (探险 343 和 343T) 组成, 利用随钻测井 (LWD) 定位东北地震期间破裂的断层; 通过采集岩心样本, 描述沿断层动态摩擦滑动和愈合过程的组成、结构和基本机制; 通过在断层上放置一个温度测量观测台来估算断裂带内部和周围的摩擦热和应力; 项目成功钻至海底以下 850.5 m (总深度 (TD) = 低于海平面 7740 m) 和取心井钻到 844.5 mbsf (TD = 7734 mbsl) 获得横跨两个主要断层 21 组岩心; 且 343T 于 2012 年 7 月 19 日成功安装了一个温度观测站<sup>[8]</sup> (见图 2)。

Chester 等<sup>[9]</sup>的文章中总结了研究者们发现海沟向陆地一侧的地形发生了巨大变化, 地震期间水平向东南方向移动约 50 m, 向上移动约 10 m。此外, 在海沟下部壁面存在较大的海底滑坡陡坡, 并伴有明显的海底正、负高程变化; 2011 年地震的同震位移如果没有延伸到海沟轴线本身, 就一直延伸到



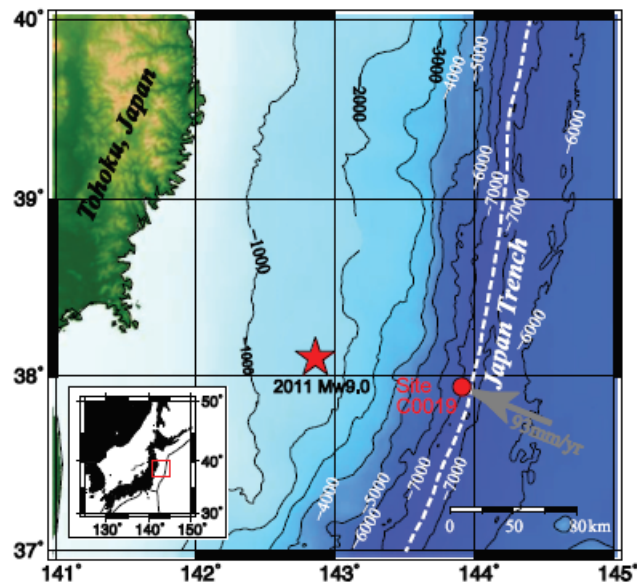


图2 JFAST钻孔C0019位置,红星为2011年大地震震中

Fig.2 Location of Expedition 343/343T Site C0019(red circle)

滑坡陡坡。Ujii研究指出项目的岩芯样本揭示了出现板块边界断层的几米厚的远洋粘土层<sup>[10]</sup>。

Lin等<sup>[11]</sup>通过项目获得的四个完整岩芯样品的热特性解释了在2011年大地震期间破裂的板块边界断层附近探测到的温度异常以及日本海沟快速钻探项目温度观测站观测到的其他热过程。热导率的测量结果与瞬态线源法和分棒法独立测量的结果一致,无论是热导率还是热扩散率,都没有显著的各向异性。

Nakamura等<sup>[12]</sup>通过地震调查得到地震图像和速度模型,将叠前深度偏移(PSDM)分析应用于多道地震反射数据,以生成精确的深度地震剖面,并沿JFAST的一条线建立P波速度模型。地震剖面在区域尺度上反映了俯冲带。钻井场地所在的前棱镜对应着一个典型的地震透明(或混沌)区域,该区域有几个向陆地倾斜的半连续反射。钻探现场附近的PSDM速度模型与海底地震仪(OBS)数据计算的P波速度模型相似,与岩心实验测得的P波速度一致。从OBS数据中得到的钻井现场周围上盘沉积物中 $V_p/V_s$ 值明显大于从岩心样本测量中得到的值。

Koge等<sup>[13]</sup>发现了一种新的断层形成模式,即前缘逆冲断层(滑脱的最前缘部分)周期性地分割成小块,这些小块再连接起来形成一个大而连续的断层;在这个过程中,断层也会上下震荡,即使断层只发生了很小的位移,在相对较短的时间内就会形成一个厚的剪切带;并认为在日本海沟观测到的厚变形带可能就是由这种断层震荡形成的。断层活动

性能量通常是由剪切带的厚度导出的断层位移来估计的,应用厚度-位移定律而不考虑震荡的影响可能会导致高估;所形成的剪切带结构与混杂岩类似,构造混杂岩的成因可以用这种机制来解释。

JFAST(日本海沟快速钻井项目)不仅通过“343”和“343T”钻孔观测到2011年Tohoku-Oki地震和海啸浅源断裂的结构,获取到板块-边界断裂的摩擦性质、结构和组成对大俯冲地震的力学性质有影响;钻井和岩芯样品观测得到单一大板块边界断层容纳了Tohoku-Oki地震破裂的巨大滑移,定义有限厚度(小于5 m)中上层粘土的局部变形为浅层地震断层的特征,从而建议作为海啸地震的区域性重要控制因素。

### 1.3 日本超越脆性项目

基于地热研究的钻井项目也为深部地震机制的研究提供了科学支撑,日本于2012年获ICDP资助的超越脆性项目(JBBP)涵盖地质学、地球化学、地球物理、水岩相互作用、岩石力学、地震学、钻井技术、测井技术、油藏工程和环境科学等多学科科学领域,本研究之前,于1994—1995年在Kakkonda地热田进行了WD-1A地热井的初步深部钻探,该井钻至3729 m,穿过了上部热液系统并进入高温花岗岩体,温度梯度达32℃/100 m,井底温度高达100℃,并且在380℃的井温剖面上出现拐点,表明脆-韧性边界在此过渡下没有渗透流体;但由于安全原因,钻井作业最终被停止,因此

本项目最终目标是证明工程地热系统在韧性带发电的可行性,保持100%的注入水的采收率,并避免灾难性的诱发地震;该项目于2013年在日本东北大学工程学院举行研讨会,2019年完成主孔钻探。Honshu北部Tohoku地区地球物理调查数据已经确定了中新世和更年轻的火山口下的速度和电导率异常,表明浅岩浆房的存在将提供一个广泛的热源。已有研究对该地区隆起的年轻花岗斑岩体系进行评价,发现岩体在超临界和亚临界条件下发生多期天然热液压裂,形成不同类型的细脉(石英脉、热液角砾岩脉、玻璃脉)。对日本其他年轻的隆起和挖出的岩体的研究支持这一观点,即在3~5 km深处可以发现400℃~500℃的超临界条件与新岩浆侵入有关<sup>[14]</sup>。

全球正针对临界地热系统的相关研究包括冰岛深钻项目(IDDP),Krafla岩浆试验台项目(KMT),日本脆弱的项目(JBBP)之外,还有意大利的DESCRAMBLE项目(钻井深度、超临界欧洲大陆的环境),新西兰Taupo火山带的HADES,墨西哥的GEMex联合EU-Mexico项目,以及美国纽贝里深井钻探项目<sup>[14]</sup>,研究在脆韧转换区(BDT)开发工程地热系统(EGS)的可行性并将直接为广泛的地球科学学科作出贡献。从岩心分析和钻孔试验中得到能够有效地提高对岩浆脱水/脱气、全球地壳水文地质及热液对流或传导带形成的过程等现象的理解及深部地震的机制科学理解,而用于识别BDT的新勘探技术也将有助于确定诸如火山和地壳发震带等现象和结构特征<sup>[15]</sup>。

#### 1.4 美国圣安德列斯断层深部长期观测研究

美国从1992年底起在世界著名的圣安德列斯断层进行的深部长期观测研究项目(San Andress Fault Observatory at Depth,简称为SAFOD),是一个以深井地震、地球物理观测为主的重大科学项目,如图3所示<sup>[16]</sup>。其主要内容是在板块边界地震活动区域的深孔钻井内直接观测深部地球物理状态与变化。SAFOD项目选址在沿太平洋与北美两大板块边界的圣安德列斯断层,大地震重复发生区与无震蠕变区之间的交接地区实施,主孔采取从地面到2 200 m深为垂直钻井,随后向地震震源区50°转向打钻成为倾斜钻井,最终钻井深入到圣安德列斯断层地震震源区内进行长期观测。长期观测内容包括地震(宽频地震仪和加速度仪)、流体压力、温度、应变、倾斜等多种项目<sup>[16]</sup>,如图4

所示<sup>[17-18]</sup>。2018年10月在斯坦福大学召开相关的研讨会讨论包括:①综合SAFOD科学的关键科学成果;②审查形成SAFOD项目早期预测的数据/技术及其正确性;③制定计划,将SAFOD数据应用于蠕变断层地震危害和地震成核物理学<sup>[19]</sup>。

项目首先完善了地质模型,在SAFOD开始钻探之前,进行了大量的地质和地球物理现场调查,得出了地质和构造截面;特别推断相对完整的花岗质基底存在于太平洋板块侧与北美板块相邻的变质沉积岩的深部交叉处。钻主孔后,对地质模型作了一些修改,位于西南侧的与圣安德烈亚斯断层相邻的沉积盆地比预测的深度大得多。这些较深的盆地充填型矿床主要由盐渍化花岗岩风化形成的长石砂岩和砾岩组成。根据K. McDougall(USGS)的化石鉴定,主孔位于晚白垩纪的大峡谷群沉积岩中<sup>[18]</sup>。

SAFOD三期岩心的岩石物理性质的实验室测量进一步阐明了圣安德烈亚斯断裂带的性质。岩心样品的孔隙率在破裂区岩石中为1%~9%,在活跃变形区岩屑中为6%~15%<sup>[20-21]</sup>。这些孔隙度值与钻孔孔隙度测井记录的孔隙度范围一致,但由于围岩中存在大尺度裂缝,实验室孔隙度往往低于相应深度的测井值。岩屑的实验室电阻率约为10 Ω·m,比周围损伤区岩心样品的测量值低1~2个数量级<sup>[21]</sup>;电阻率的这种下降是由于在样品中观察到的孔隙率增加所致,对样品进行超声波P和S波速度测量时,平均速度分别为3.1 km/s和1.5 km/s<sup>[22]</sup>。

SAFOD项目也推动了地震应力变化的认识,2004年10月,SAFOD井的套管外安装了几个不同深度的光纤应变传感器,第一次钻探深度为864 m,在2007年的一次钻井作业中失败。第二处深度为782 m,至今仍在监测中,光纤应变仪由单模光纤组成,当安装面在光纤传感器所跨越的范围内发生应变,被拉伸的弹性纤维的长度会发生相应的变化;由于光纤可以在很长一段距离内得到长间隔的平均应变可以减少局部效应对测量的干扰;因此光纤非常适合测量地球应力<sup>[23]</sup>。Blum等在SAFOD通过垂直光纤干涉应变仪观测远震及区域震中与理论位错模型一致的同震应变,对于远震事件,第一次通过比较近距离地震仪垂直向加速度与垂直应变的比值研究钻孔内区域瑞利波速<sup>[24]</sup>。此外,SAFOD设备记录到破裂情况复杂的小地震( $M=-3$ ),井下仪器显示,重复地震是在没有可观



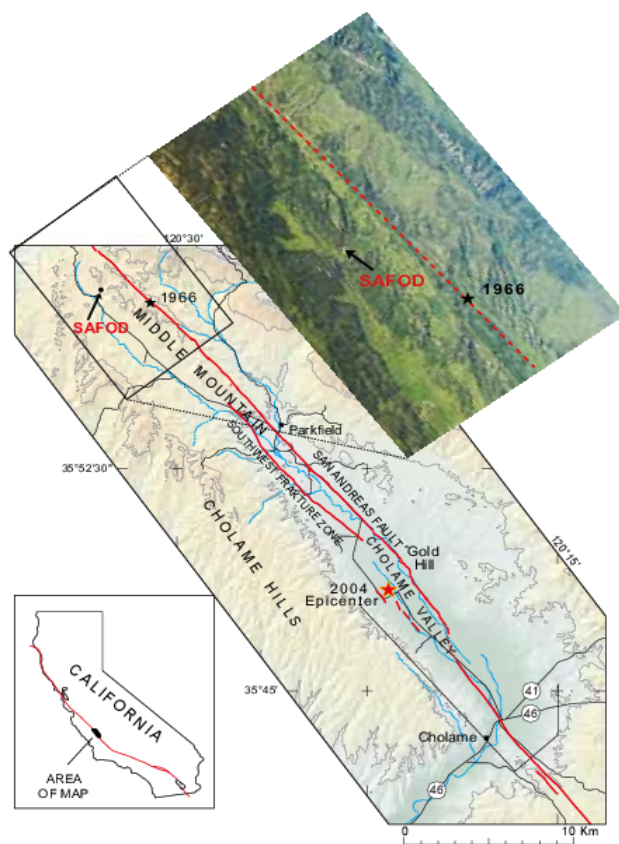


图3 SAFOD 钻井现场和1966年帕克菲尔德地震震中<sup>[16]</sup>

Fig.3 SAFOD drilling site and the epicenter of the Parkfield earthquake in 1966<sup>[16]</sup>

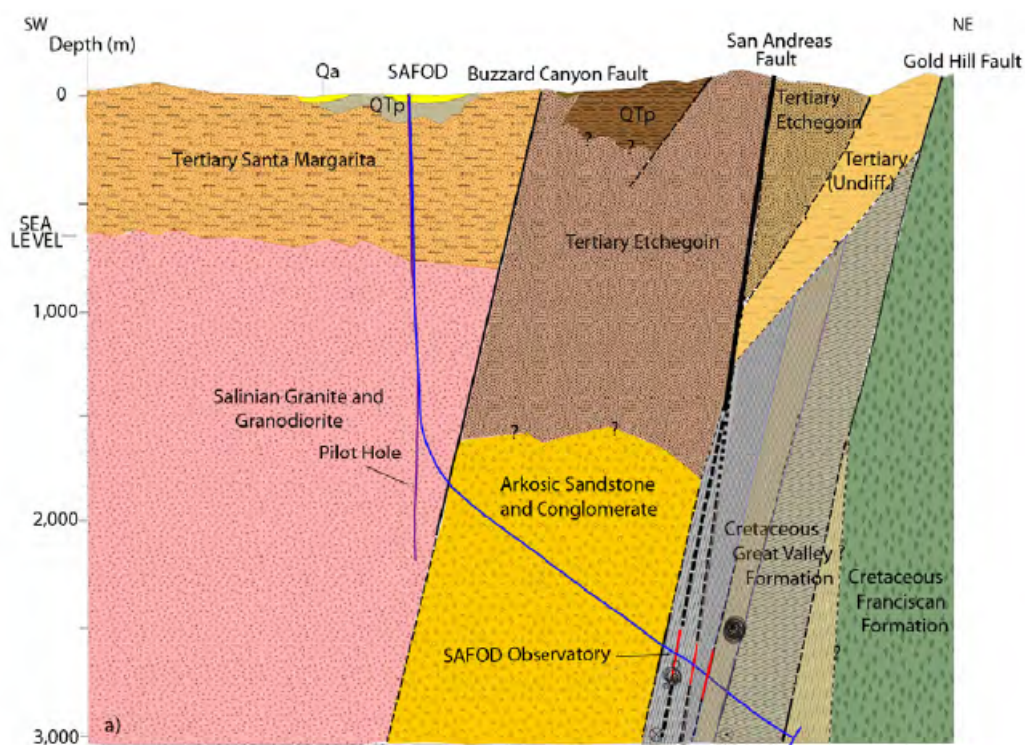


图4 SAFOD 钻井孔示意图<sup>[18]</sup>

Fig.4 Schematic diagram of drilling hole in SAFOD<sup>[18]</sup>

测到的地震转变情况下突然发生的,即在破裂开始的一毫秒内释放了大部分累积应力。Abercrombie 研究发现了2004年帕克菲尔德地震后应力下降明显减少,然后逐渐恢复;2015年使用HRSN和SAFOD卫星孔数据来研究小地震分析的分辨率极限,地面和浅层钻孔数据相对较差的分辨率为没有深层钻孔数据的研究提供了有用的约束<sup>[25-26]</sup>。

Peter Malin 认为是地震波是沿圣安德烈断层蜿蜒,位于SAFOD主孔距断层10 m处的地震仪证实了断层附近断层导波 $F_L$ 和折射波 $F_R$ 的发生( $F_g$ 相是Love波,现在标记为 $F_L$ ,随着 $F_g$ 在不同位置开始被识别,断层上记录的瑞利波 $F_R$ 也被识别出来),并揭示了3种类型的 $F_g$ ,这些信号显示了一个至少6 km深的狭窄的断层核心<sup>[27]</sup>。

此外,SAFOD先导孔和主孔为连续的井间主动震源观测发震深度的速度变化提供了前所未有的机会;钮凤林等<sup>[28]</sup>总结了SAFOD三次井间实验结果;2005—2006年间两次实验,通过在导孔和主孔内大约1 km深度的18个压电源和一个三分量加速度计以每秒发射4次宽度为1 ms的脉冲,并以48000 Hz的采样率记录200 ms长的数据发现平均S波速度变化0.03%,与气压呈良好的负相关关系,对应的应力敏感性为 $2.0 \times 10^{-7} \text{Pa}^{-1}$ ,也观察到延迟时间测量中两个大漂移;在2010年的实验中,采用了2005—2006年的实验配置同时还增加了一个附在源上的水下检波器,以监测源波形的重复性。证实了横波和尾波的到时变化约为0.04%,大致与气压的波动一致。研究者相关性归因于地震波速的应力敏感性,估计应力敏感性为 $2.0 \times 10^{-7} \text{Pa}^{-1}$ 。研究结果证实了在发震深度存在大量裂缝或孔隙空间的假设,从而利用井间有源地震监测地下应力场。

通过对圣安德烈亚斯和圣哈辛托断层不同部分的大地测量研究,证实了在加利福尼亚的太平洋—北美板块运动中有相当一部分是永久分布的断层外变形,例如,Lindsey等人及Materna等人认为,断层损伤带的弹性模量明显低于宿主岩石,甚至比断层带导波推断和高分辨率层析研究的还要低。表明相当大一部分断层外变形可能发生在地震间的破坏区,这种断层外塑性变形会显著影响断层上的剪应力载荷和分布,并可能影响地震活动性<sup>[29-30]</sup>。

## 1.5 南非金矿深部地震钻探(DSEIS)

在南非Orkney深部金矿,每年都会发生几次2级以上的采矿诱发地震。迄今为止记录到的最大地震是2014年8月5日在南非奥克尼附近发生的5.5级地震,其活动断层距离最近的矿场只有几百米(3.0 km深)。为了探讨矿山活动断裂带钻探和监测等科学目标和技术可行性,ICDP于2016年资助了南非深部金矿地震活动综合研究—南非金矿深部地震钻井项目(DSEIS):通过在几个南非深金矿钻井,希望得到采矿诱发地震成核及断层滑动过程、深部应力场状态。整个项目涉及4个目标断层:①2014年Orkney M5.5地震孕震区;②Cooke 4号井(原Ezulwini矿,位于约翰内斯堡以西约40 km处),目标为矿区M2~M2.8地震的破裂带;③2014年M2.8地震孕震区;④Savuka矿井;大部分钻井作业在2017年10月完成<sup>[31]</sup>。

Mngadi等利用地下填图、岩石学、岩石力学和高分辨率微地震分析等综合研究了解南非Cooke 4号井矿柱中的不同岩土工程区域,井下矿柱主要由石英岩、含砾石英岩、泥质石英岩和砾岩组成且具有多个不连续点,这些不连续点从小尺度到宏观尺度不等。微地震资料进一步揭示了断裂拐点发生在软地层中;针对不同的岩土区域开发裂缝模型与之前针对类似地下环境开发的模型一致,这对未来的采矿、支护、生产和安全具有重大意义<sup>[32]</sup>。

Carsten等发现了采矿诱发地震和2014年8月发生的5.5级奥克尼地震引发的余震并存的独特现象,第一次将先进的基于波形和概率分析(包括破裂传播成像和方向性分析),以及在有限扰动岩石体积中地震震级的尺度研究应用于南非深部金矿的地震活动观测中,结果表明,M5.5主震的单边破裂几乎从北向南传播,距离约为5 km。反演的地震能量图像和反演的震源时间函数揭示了这次地震高度复杂的破裂过程,余震群位于主震中心的一侧,并向南排列,这证实了所获得的破裂传播图像和方向性。余震和诱发地震的震级统计明显受到有限大小的扰动岩石体积的影响,这抑制了更大震级事件的发生,但两种类型的地震活动对事件等待时间的统计结果存在差异<sup>[33-34]</sup>。

与以往许多地震区的钻探调查局限于一两个钻孔相比,DSEIS项目钻探相对密集的井网从而提供更好空间复盖,此外,从金矿深部钻探比从地表钻探更经济有效地到达发震深度。



## 2 结语

在地震活动地区钻探到震源区进行直接观测期望在地震研究中能发挥更大作用,断层深井钻探首先选择已知及相对简单的断层及地质构造,更易获取地震学资料;理想状态下,钻探应尽量接近或达到地震成核的深度,并锁定在摩擦、增温和地震相互作用等科学问题;并且尽量获取结晶岩石,利于对孕震断层进行深入研究。

如同日本南海海槽孕震带实验不仅属于首次尝试对俯冲带内的板块边界断层或大型逆冲断层的孕震部分进行钻,并通过新断裂带取样了解浅增生楔的结构和板块边界断层的滑动;JFAST(日本海沟快速钻井项目)钻孔观测到2011年Tohoku-Oki地震和海啸浅源断裂的结构,提升对大俯冲地震的力学性质的了解;超越脆性项目亦通过研究在脆韧转换区(BDT)开发工程地热系统(EGS)可行性的同时对热能开采时储层与BDT间裂隙诱发地震的危险性;关井、断流等储层应力状态改变诱发地震事件相关性进行深入研究。

当前大陆科学钻探与国际大洋科学钻探已在全球形成宏伟的计划,作为了解地球内部世界的窗户,我国著名构造地质学家许志琴院士等指出断层科学钻探研究地震发生机制针对断层摩擦生热量和热异常、断裂带的流体作用、流体渗透作用和断裂带的愈合、微型地震的破裂过程、断裂带的矿化、余震层析成像及地下岩石在地震来临前发生的物理变化等地球物理研究取得显著成绩<sup>[35]</sup>;并在2016年纪念中国大陆科学钻探实施15周年、国际大陆科学钻探委员会成立20周年时撰文回顾我国在科学深井钻探项目上获得的显著发展,并进行了展望。事实上,在地震科学钻探研究中,取心、测井、监测依然是科学钻探的主要直接目的,原状岩心获取、深井钻探技术、监测仪器研发亦是开展该研究的难点,是对当前钻探技术和工业技术综合实力的集成,通过钻探项目也可以培养地学研究、项目管理等人才,促进多学科交叉和融合。与此同时,通过保持对国际上相关项目的了解,结合实际可指导地区项目的发展,明确我们可以做什么,我们将要做什么。

## 参考文献

[1] 张金昌,谢文卫. 科学超深井钻探技术国内外现状[J]. 地质学报,2010,84(6):887-894.

- [2] 苏德辰,杨经绥. 国际大陆科学钻探(ICDP)进展[J]. 地质学报,2010,84(6):873-886.
- [3] 许志琴,杨文采,杨经绥,等. 纪念中国大陆科学钻探实施15周年、国际大陆科学钻探委员会成立20周年[J]. 地质学报,2016,90(9):2109-2122.
- [4] Ogasawara H., Yabe Y., Ito T., et al. Drilling into seismogenic zones of  $M2.0-M5.5$  earthquakes in deep South African gold mines (DSeis)[C]. Makuhari, Chiba, Japan: Japan Geoscience Union, 2015.
- [5] Tobin, H., Kinoshita, M., Ashi, J., et al. NanTroSEIZE stage 1 expeditions 314, 315, and 316: first drilling program of the Nankai Trough seismogenic zone experiment[R]. Report location unknown: reporting agency unknown, 2009, Doi: 10.2204/iodp.sd.8.01.2009
- [6] Huffman, K. A., Saffer D. M., Dugan, B. In situ stress magnitude and rock strength in the Nankai accretionary complex: a novel approach using paired constraints from downhole data in two wells[J]. Earth Planets Space, 2016 (68):123.
- [7] Yabe, S., Fukuchi, R., Hamada, Y., et al. Simultaneous estimation of in situ porosity and thermal structure from core sample measurements and resistivity log data at Nankai accretionary prism[J]. Earth Planets Space, 2019(71):116.
- [8] Eguchi N, Toczko S, Maeda L, et al. The Japan Trench Fast Drilling Project (IODP Exp. 343&343T JFAST): making scientific drilling history in the Japan Trench[C]. Place of publication unknown: American Geophysical Union, 2012.
- [9] Chester, F.M., Mori J.J., Toczko, S., et al. Integrated Ocean Drilling Program Expedition 343/343T Preliminary Report, Japan Trench Fast Drilling Project (JFAST). In: Integrated Ocean Drilling Project Preliminary Report[R]. Report location unknown: Integrated Ocean Drilling Program Management International, Inc., for the Integrated Ocean Drilling Program, 2012.
- [10] Ujiie E K, Tanaka H, Saito T, et al. Low coseismic shear stress on the Tohoku-Oki Megathrust determined from laboratory experiments[J]. Science, 2013, 342 (6163): 1211-1214.
- [11] Lin W, Fulton P M, Harris R N, et al. Thermal conductivities, thermal diffusivities, and volumetric heat capacities of core samples obtained from the Japan Trench Fast Drilling Project (JFAST) [J]. Earth, Planets and Space, 2014, DOI: 10.1080/18811248.1991.9731462
- [12] Nakamura Y, Kodaira S, Cook B J, et al. Seismic imaging and velocity structure around the JFAST drill site in the Japan Trench: low  $V_p$ , high  $V_p/V_s$  in the transparent frontal prism[J]. Earth Planets & Space, 2014, 66(1):121.
- [13] Koge, H., Yamada, Y., Ohde, A., et al. Dynamic formation process of thick deformation zone on the shallow plate



- boundary fault of the Japan Trench: insight from analog experiments of half-graben subduction[J]. *Prog Earth Planet Sci*, 2018(5):69.
- [14] Reinsch T, Dobson P, Asanuma H, et al. Utilizing supercritical geothermal systems: a review of past ventures and ongoing research activities[J]. *Geothermal Energy*, 2017, 5(1):16.
- [15] H. Muraoka, H. Asanuma, N. Tsuchiya, et al. The Japan Beyond-Brittle Project[J]. *Scientific Drilling*, 2014, 17(17):51-59.
- [16] Rymer M J, Iii J C T, Treiman J A, et al. Surface fault slip associated with the 2004 Parkfield, California, earthquake[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2006, 96(4B):11-27.
- [17] 徐纪人, 赵志新. 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*, 2006, 31(4):557-563.
- [18] Mark, Zoback, Stephen, et al. Scientific drilling into the San Andreas fault zone—an overview of SAFOD's first five years[J]. *Scientific Drilling*, 2011, doi: 10.2204 / iodp.sd.11.02.2011
- [19] Carpenter, B. M., Ellsworth, B., Thurber, C.. SAFOD: reviewing past prediction, key result, and future directions[C]. California:Stanford University, 2018:1
- [20] Janssen, C., Wirth, R., Reinicke, A., et al. Nanoscale porosity in SAFOD core samples (San Andreas Fault) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011 (301): 179-189, doi: 10.1016/j.epsl.2010.10.040.
- [21] Morrow, C., Lockner, D. A., Hickman, S.. Low resistivity and permeability in actively deforming shear zones on the San Andreas Fault at SAFOD[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015 (120): 8758-8773, doi: 10.1002/2015JB012214.
- [22] Jeppson, T. N., Tobin, H. J.. San Andreas fault zone velocity structure at SAFOD at core, log, and seismic scales[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015(120): 4983-4997, doi: 10.1002/2015JB012043.
- [23] Zumberge, M., Blum, J.. The SAFOD optical fiber strainmeter. AGU fall meeting abstracts[C]. Place of publication unknown: American Geophysical Union, 2010.
- [24] Blum J, Igel H, Zumberge M. Observations of rayleigh-wave phase velocity and coseismic deformation using an optical fiber, interferometric vertical strainmeter at the SAFOD borehole, California[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2010, 100(5A): 1879-1891.
- [25] Abercrombie, R. E.. Investigating uncertainties in empirical Green's function analysis earthquake source parameters[J]. *J. Geophys. Res.*, 2015, , 120(6): 4263-4277. doi: 10.1002/2015JB011984.
- [26] Abercrombie, R. E.. Stress drops of repeating earthquakes on the San Andreas fault at Parkfield[J]. *Geophys. Res. Lett.*, , 2014(41):8784-8791, doi: 10.1002/2014GL062079.
- [27] Malin, P.. Fault-zone guided waves and their implications, SAFOD: Reviewing past prediction, key result, and future directions[C]. Place of publication unknown: American Geophysical Union, 2018:32-33.
- [28] Niu, F., Daley, T., Taira, T.. Continuous cross-well travelling measurements at SAFOD, SAFOD: Reviewing past prediction, key result, and future directions[C]. California:Stanford University, 2018:32-33.
- [29] Lindsey E O, Sahakian V J, Fialko Y, et al. Interseismic Strain Localization in the San Jacinto Fault Zone[J]. *Pure & Applied Geophysics*, 2014, 171(11):2937-2954.
- [30] Materna K, Bürgmann, Roland. Contrasts in compliant fault zone properties inferred from geodetic measurements in the San Francisco Bay area[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2016, DOI: 10.1002/2016JB013243
- [31] Ogasawara, H., Durrheim R. J., Yabe Y., et al. Drilling into seismogenic zones of *M*2.0-*M*5.5 earthquakes from deep South African gold mines (DSeis): establishment of research sites[C]. Cape Town, South Africa:SAIMM AfriRock 2017 ISRM International Symposium, 2017.
- [32] Sbmak L, Rj dak L, M.S.D. Manzi a k l, et al. Integration of underground mapping, petrology, and high-resolution microseismicity analysis to characterise weak geotechnical zones in deep South African gold mines[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019(114):79-91.
- [33] Dinske C., Kummerow, J., SERGE, A., et al. Rupture imaging and directivity of the 214 *M*5.5 earthquake below a gold mine in Orkney, South Africa, IODP/ICDP Kolloquium [R]. Germany:Universität zu Köln, 2019:33.
- [34] Dinske C, Folesky J, Kummerow J, et al. Statistics of the seismic sequence and rupture directivity of the *M*5.5 Earthquake in Orkney, South Africa [Preprint]. 2020, doi: 10.5194/se-2020-58.
- [35] 赵帅. 科学钻探与地震关系研究与展望[C]//建筑科技与管理组委会. 2018年2月建筑科技与管理学术交流会议论文集. 北京:建筑科技与管理组委会.