引用格式：孙东生，李阿伟，杨跃辉，等，2025. 深部应力测量技术研发进展与展望[J]. 地质力学学报，31（6）：1111−1126. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025089

Citation: SUN D S，LI A W，YANG Y H，et al.，2025. Research progress and prospects of deep stress measurement technology[J]. Journal of Geomechanics，31（6）：1111−1126. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025089

深部应力测量技术研发进展与展望

孙东生[1,2]，李阿伟[1,2]，杨跃辉[1,2]，吴邦宸[1,2]，张　浩[1,2]，孙炜烽[1,2]，李　冉[1,2]
SUN Dongsheng[1,2]，LI Awei[1,2]，YANG Yuehui[1,2]，WU Bangchen[1,2]，ZHANG Hao[1,2]，SUN Weifeng[1,2]，LI Ran[1,2]

1. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081；
2. 自然资源部地应力工程技术创新中心，北京 100081
1. *Institute of Geomechanics*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*;
2. *Technology Innovation Center for In-situ Stress*, *Ministry of Natural Resources*, *Beijing* 100081, *China*

Research progress and prospects of deep stress measurement technology

Abstract: ［**Objective**］With the implementation of the national strategy of seeking resources, safety, and space from deep Earth, the frequency and intensity of various engineering disasters caused by in-situ stress have also significantly increased. At the same time, in engineering fields such as underground gas storage and water diversion tunnels, using the minimum principal stress criterion to determine the upper limit operating pressure can to some extent improve the storage capacity of underground space or reduce tunnel support costs. Overall, the importance of in-situ stress in the process of advancing towards the deep Earth is becoming increasingly prominent. However, there are still bottlenecks in the demand oriented deep stress measurement technology, such as insufficient detection capability and low reliability of measurement results, which restrict the application of in-situ stress data in solving scientific problems such as tectonic activity, deep resource development, and space utilization. ［**Methods**］On the basis of a brief review of the current development status of in-situ stress measurement technology, this article focuses on the progress and achievements of the team in theoretical research, technical development, and application practice of in-situ stress measurement in recent years. ［**Results**］It points out the challenges faced by deep in-situ stress measurement in terms of theoretical methods and technical aspects, and proposes a research route and direction for deep borehole stress detection in conjunction with the current national science and technology major project "Key Technologies and Experiments for Deep Stress Detection". ［**Conclusion**］The goal is to develop high, precise, and advanced in-situ stress measurement technology and equipment, construct an in-situ stress observation technology system covering the depth space of the hypocenter source. ［**Significance**］Deep borehole in-situ stress detection technology holds significant potential for applications in geodynamics research, deep resource exploration, and disaster prediction and prevention.

Keywords: deep earth science; deep resource development; deep in-situ stress; multi-parameter collaborative measurement; 5 km in-situ detection

摘　要：随着“向地球深部要资源、要安全、要空间”国家战略的实施，地应力引发的各类工程灾害在频率和强度上均显著增加，与此同时，在地下储气库和引水隧洞等工程领域，利用最小主应力准则确定上限运行压力，一定程度上可提高地下空间的储存能力或降低隧洞支护成本。总体而言，地应力在向地球

基金项目：深地国家科技重大专项（2024ZD1000701）；国家自然科学基金面上项目（42174122）
This research is financially supported by the Deep Earth Probe and Mineral Resources Exploration−National Science and Technology Major Project (Grant No. 2024ZD1000701), and the General Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42174122).

第一作者：孙东生（1980—），男，博士，正高级工程师，主要从事地应力测量技术研发及应用研究工作。Email：dongshengsun@cags.ac.cn
通信作者：杨跃辉（1995—），男，博士，助理研究员，主要从事地应力测量技术研发及应用研究工作。Email：yangyuehui@mail.cgs.gov.cn

收稿日期：2025−07−19；**修回日期：**2025−11−25；**录用日期：**2025−12−11；**网络出版日期：**2025−12−11；**责任编辑：**王婧

深部进军进程中的重要性愈发突显。然而面向需求，深部应力测量技术尚存在探测能力不足和测量结果可靠性偏低等瓶颈问题，制约了地应力数据在解决构造活动、深部资源开发与地下空间利用等领域中的应用。文章在简要回顾地应力测量技术发展现状的基础上，重点介绍了团队近年来在地应力测量的理论研究、技术研发和应用实践等方面取得的进展与成效，指出了深部地应力测量在理论方法和技术层面面临的挑战，并结合正在承担的深地国家科技重大专项“深部应力探测关键技术与实验”项目，提出了深井应力探测的研究路线和攻关方向——研发高、精、尖的地应力测量技术与装备，构建覆盖震源深度空间的地应力观测技术体系。预期深井原位应力探测技术在地球动力学基础研究、深部资源勘查和灾害预测及防控等领域具有广阔的应用前景。

关键词：深地科学；深部资源开发；深地应力；多参数协同测量；5 km 原位探测

中图分类号：P31; P55 **文献标识码**：A **文章编号**：1006−6616(2025)06−1111−16

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025089

0 引言

地应力是深地科学基础研究和深部资源开发利用等领域的关键基础数据。在深地科学研究方面，探测地壳深部应力环境，不仅可为认识地震孕育的物理过程和强震预测提供科学依据，同时对理解多圈层耦合作用、解析地壳强度和脆韧性转换深度等地质过程具有重要的科学价值（Martin and Chandler, 1993; Zoback et al., 1993; Townend and Zoback, 2000; Dong et al., 2023）。在深部资源开发利用方面，随着工程向深部延伸，各类工程灾害发生的频率和强度显著增加，主要体现在由高地应力主导的“三高一扰动”环境引发的岩爆、软岩大变形和板裂破坏等工程地质灾害问题十分突出（Fairhurst, 2017; Ranjith et al., 2017; 李夕兵和宫凤强，2021; 谢和平等，2023; 何满潮等，2024）。与此同时，在地下储气库建设、二氧化碳地质封存以及水电工程建设等领域，还需利用岩体内的最小主应力，提高地质体内的储存能力或降低隧洞支护成本（张春生，2009; 程智余等，2023; 胡彩云等，2024）。

随着“向地球深部进军”国家战略的实施，深地科学研究、能源资源开发和地下空间利用等领域均加快了深地探索的步伐。江苏东海大陆科学钻探（CCSD, 5158 m）、松科 2 井（7018 m）、德国 KTB 超深钻（9101 m）以及塔科 1 井（垂深 10910 m）等一系列深井科学钻的实施，为获取更大深度的地应力数据提供了难得的机遇（Brudy et al., 1997; 王连捷等，2006; Zang and Stephansson, 2010; Wang et al., 2020）。除此之外，通过深部采矿和深埋工程建设，人类进入地球内部的深度记录也在不断刷新，如中国最深的孙村煤矿开采深度已超过 1500 m，瑞士 Gotthard 铁路隧道最大埋深达到 2350 m，锦屏 2 级水电站引水隧洞的最大埋深达到了 2525 m，川藏铁路局部垂直埋深超过 2600 m，南非姆波尼格金矿开采深度超过 4350 m（谢和平等，2015; 郑宗溪和孙其清，2017）。总体来看，深井科学钻探、深部矿山开采与深埋工程建设对地应力数据存在明确需求，同时也为推动地应力测量技术进步，深化对地壳深部应力环境的认知提供了难得的机遇。

1 地应力测量技术概述

20 世纪 30 年代以来，为满足工程建设、资源开发和地震预测等领域的需求，大量岩石力学和地球物理领域的研究人员参与了地应力测量技术的研发工作，推动了地应力测量技术的发展。

1.1 地应力测量技术

世界上最早的地应力测量始于 20 世纪 30 年代，R.S. Lieurace 采用表面应力解除法（探测深度为厘米量级），获取了美国胡佛大坝坝肩岩体内的压应力数据。20 年后，N. Hast 在斯堪的纳维亚半岛进行了大规模钻孔应力解除法应力测量（探测深度为米量级），得到地壳浅部以水平构造应力为主导的规律性认识，成为地应力技术发展史上的里程碑事件，推动了应力解除法的快速发展。然而，受限于技术原理和操作可行性，应力解除法的应用深度一般仅适用百米以浅，很难在较深钻孔中实施。20 世纪 70 年代，借鉴石油工业的水力压裂增产技术，美国学者 Fairhast 和 Haimson 等在理论模型和实验研究基础上，构建了适用于深孔，且具有操作简单、大尺度测量和无需岩石力学参数参与计算等优点的水压致裂地应力测量技术（Fairhurst, 1964; Haimson

and Fairhurst, 1967)，实现了从几十米至数千米深度地应力探测能力的提升，极大推动了地应力技术进步，为其在地震机理研究和深部资源开发利用等领域的推广应用奠定了基础(Haimson, 1972; Zoback et al., 1980; Klee and Rummel, 1993; 陈群策等, 2019)。

1.2　水压致裂原位地应力测量技术

Hubbert and Willis(1957)提出了钻井液压裂所产生的裂缝与岩体中所赋存的应力状态密切相关，开启了水压致裂地应力测量的理论研究。1967 年，Haimson and Fairhurst(1967)系统分析了水压致裂地应力测量技术的主要影响因素，奠定了经典水压致裂测试技术的理论基础，并成功获取了美国 Illinois 州 99 m 和 Ohio 州 808 m 深度的地应力数据(Haimson and Fairhurst, 1969)。随后，利用美国科罗拉多州 Rangely 油田一口新钻井的底部裸孔段，实施了深度 1910 m 的水压致裂法地应力测量，并基于地应力量值和方向，结合断层类型、滑动方向及经典的摩尔−库伦准则，准确预测了断层滑动所需的孔隙压力，清晰阐释了注水诱发地震的力学机制，自此奠定了水压致裂法在深部地应力测试领域的优势地位(Raleigh et al., 1972; Raleigh et al., 1976)。

随着水压致裂地应力测量技术在深度上的不断突破，使直接探测地壳深部应力成为可能，其中最具代表性的成果包括：1978 年，美国密西根盆地的超深孔测量，成功获取了 3 个套管射孔段(1230 m、2805 m 和 3600 m)的最小主应力量值，但在实施底部裸孔段(5105 m 和 5320 m)测量时，受测试系统(特别是封隔器)耐压指标限制，未能获取稳定克拉通 5 km 深部地应力数据(Haimson, 1978)；1990 年，在德国 KTB 科学钻的先导孔共实施了 14 次测试，获取了 7 个测段的有效地应力实测曲线，其中采用钢缆式水压致裂地应力测试系统成功实施了 1270 m 和 2010 m 的测量；后因井下遇阻事故，改用钻杆连接的刚性测试系统成功实施了 805 m、2851 m、2928.5 m、2961.5 m 和 3011 m 的测量，而在 1250～1850 m 深度范围内的 7 个测段，由于封隔器耐压指标限制，未能获取有效的实测曲线(Baumgärtner et al., 1990)；1992 年，在圣安德列斯断裂附近的 Cajon Pass 科学钻中，成功实施了 2661 m 和 3486 m 裸孔段水压致裂法地应力测量(Zoback and Healy, 1992)；同年，在 KTB 科学钻主孔，利用固井后的孔底裸眼段(深度 6013.5～6031.0 m，直径 311 mm)，首次取得了地下 6 km 的最小主应力数据(Zoback et al., 1993)；1997 年，在 KTB 超深钻主孔孔底裸眼段获得了超过 9 km 的实测数据，这也是迄今为止国际上公开报道的地应力测试的最深纪录(Zoback and Harjes, 1997)。20 世纪 80 年代初，在河北易县首次开展了 90 m 深度的水压致裂法地应力测试(李方全等, 1986)；经过多年的技术迭代与现场实践，2011 年首次在北京密云实施了 1 km深孔的地应力测试(秦向辉等, 2014)；2019 年在湖南雪峰山先导孔首次实施了超过 2 km 的原位应力测试(陈群策等, 2019)。需要说明的是，套管井射孔段或固井后的孔底压裂测试，只能获取最小主应力，无法用于估算最大水平主应力。目前，利用跨接式封隔器的裸孔段地应力测量最大深度为 3011 m(Baumgärtner et al., 1990)；其他超过 3 km 的深井地应力测试多是在套管井射孔段或采用单封隔器封住孔底开展的，由于受固井质量、套管射孔和孔底应力集中等因素影响，一般仅能获得最小主应力(Zoback, 2007)，无法用于估算水平最大主应力。由此可见，尽管理论上水压致裂地应力测量技术不存在深度限制，但受钻孔条件和设备耐温压指标等因素制约，深度超过 3 km 的原位全应力张量测量成果在世界范围屈指可数。

1.3　其他间接地应力估算技术

基于钻孔岩芯的差应变法(DSA)、声发射法(AE)和非弹性应变恢复法(ASR)，基于测井获取的孔壁破坏信息或岩石弹性参数，以及基于地震波形数据的震源机制解等，作为水压致裂原位地应力测量技术的重要补充，可用于估算深部地应力的大小和方向(Amadei and Stephansson, 1997; 王成虎, 2014)。与原位直接测量相比，间接方法一般只能给出地应力量值的相对大小、主应力方向或区域应力场特征。如基于钻孔岩芯的 ASR 地应力测试方法，虽然具有相对完备的理论基础，并能保持岩芯近原位状态，但在将测量得到的非弹性恢复应变换算成应力时，需要引入岩石的非弹性应变恢复柔量，将不可避免地给地应力量值带来一定误差。此外，深部岩芯的定向尚存在技术上的挑战(Lin et al., 2006; 王连捷等, 2012; Sun et al., 2014)。基于成像测井获取的孔壁崩落或钻井诱导缝估算地应力大小时，需要依赖岩石力学参数，其估算结果通常只能给出区间范围(王连捷等, 2006; Zoback, 2007; Sun et al., 2017)。基于地震波初动极性等方法可反演分析得到震源附近的应力场方向及应力量值相对大小，但受波形数据质量、反演方法及数据集差异等因素

影响，同一地震得出的震源机制解分析结果存在一定差异（Zoback, 2007）。由于间接方法估算得到的地应力量值和方向常表现出不确定性，因此在实践中常将间接方法与水压致裂法相结合，利用原位实测得到的地应力数据作为锚点，标定间接方法估算得到的地应力大小，进而实现地应力数据质量和数量的提升。

随着地球科学技术的发展以及对深部资源需求的增加，亟需建立与之相适应的地球深部探测技术体系。在此背景下，发展深部地应力测量技术，特别是井中原位地应力测量理论与装备，成为地球科学和岩石力学等领域共同关注的关键科学技术问题（谢和平等, 2023; 何满潮等, 2024）。

2 深部地应力测量技术新进展

发展深部地应力测量技术是提升深地探测能力的重要课题。作为目前最有效的深部地应力测量技术，下面将从理论方法、技术研发和应用研究3个方面，重点介绍水压致裂法和非弹性应变恢复法的最新进展。

2.1 地应力测量理论方法研究

（1）水压致裂法中的最小水平主应力

根据水压致裂地应力测量理论，基于实测压力-时间曲线分析得到闭合压力，即可确定水平最小主应力（Hubbert and Willis, 1957）。经过半个多世纪的发展，岩石力学领域的专家提出了数十种闭合压力分析方法，其中以国际岩石力学学会测试方法委员会推荐的拐点法、dP/dT法和dT/dP法应用最为广泛（Haimson and Cornet, 2003）。然而，这些依赖压降曲线绘制切线或最优拟合的方法，分析结果易受数据时间窗口选取的影响，且无法识别出具有明确物理意义的压裂缝闭合过程，给压裂缝的闭合压力分析以及水平最小主应力测量结果带来一定不确定性。近年来，研究人员在系统梳理压裂缝闭合压力分析方法基础上，提出了基于总系统刚度（TSS）演化特征的闭合压力分析模型（图1; Yang et al., 2025; 杨跃辉等, 2025）。该模型将水压致裂地应力测量过程中的压裂缝闭合过程分为3个阶段：关泵至裂缝尖端闭合、裂缝尖端闭合至完全闭合，以及压裂缝完全闭合至泄压。相关研究成果得到了国际同行的认可，与油气领域广泛应用的G函数分析方法相比，TSS理论模型具有假设条件少、物理意义明确和分析结果更稳健等优势，预期该方法可在水压致裂地应力测量、油气田小压测试和诊断性流体注入测试（DFIT）等领域的压裂缝闭合压力分析中具有广阔的应用前景。

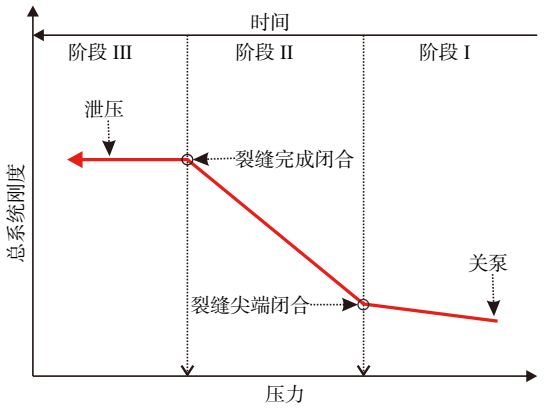


图1 基于总系统刚度（TSS）演化特征的压裂缝闭合过程分析模型

Fig. 1 Analysis model of hydraulic fracture closure process based on total system stiffness (TSS) evolution characteristics

（2）水压致裂法中的最大水平主应力

基于Bredehoeft et al.（1976）提出的理论模型，最大水平主应力S_H由最小水平主应力S_h（即闭合压力）、重张压力P_r和孔隙压力P_p计算得出，因此除了前述闭合压力外，孔隙压力和重张压力也是影响水压致裂地应力测量结果可靠性的关键参数。

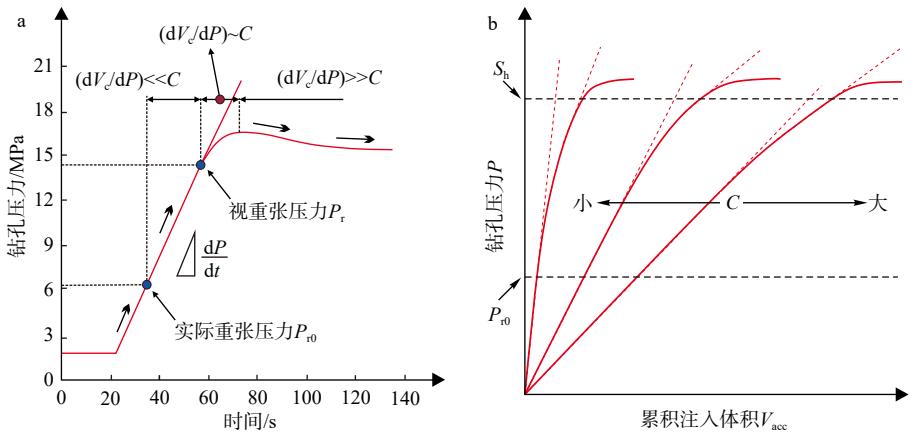
$$S_H = 3S_h - P_r - P_p \tag{1}$$

公式（1）中孔隙压力P_p的取值与重张前裂缝是否存在一定开度有关。国际上多位学者提出，在压裂缝重张前，钻孔内的压裂流体已进入裂缝，因此不能用原始地层的孔隙压力计算水平最大主应力（Pine et al., 1983; Hardy and Asgian, 1989; Rutqvist et al., 2000; Ito and Yokoyama, 2021）。因为如果裂缝重张之前压力流体已经进入裂缝，则会向裂缝表面施加额外的压力。在此背景下，日本东北大学Ito教授通过数值和物理模拟实验，提出水压致裂地应力测量过程中，重张前裂缝内流体压力与钻孔内流体压力相同，即公式（1）中的P_p=P_r，并推动日本岩土学会于2017年颁布的水压致裂地应力测量规范中（JGS, 2017），修正了最大水平主应力计算公式，即：

$$S_H = 3S_h - 2P_r \tag{2}$$

公式（2）表明除最小水平主应力外，重张压力P_r是确定水平最大主应力的关键参数。目前，水压致裂法通常使用钻杆作为过水通道。对于深孔测

量而言，压裂缝重张过程中的水体压缩量远大于进入裂缝的水体体积，导致利用压力−时间曲线无法获取准确的重张压力，如图 2 所示。C 为系统柔度，定义为单位压力变化引起整个系统体积的变化量；V_c 为裂缝张开引起的水体体积变化；$\mathrm{d}V_c/\mathrm{d}P$ 代表单位压力下裂缝张开对应的体积变化。对于深孔测量即系统柔度较大时，压力升至视重张压力之前，升压曲线斜率无明显变化，只有当裂缝扩展达到一定规模后，也就是 $\mathrm{d}V_c/\mathrm{d}P$ 接近于 C 时，压力曲线才会出现明显拐点，而此时对应的压力（视重张压力 P_r）已远高于实际重张压力 P_{r0}（图 2a）；随着系统柔度 C 增加，利用压力−累积注入体积 V_{acc} 曲线方法确定的重张压力值增大，只有系统柔度足够小或消除系统柔度的影响时，才能获取相对可靠的重张压力值（图 2b）。



C—系统柔度；V_c—裂缝张开引起的水体体积变化；$\mathrm{d}V_c/\mathrm{d}P$—单位压力下裂缝张开对应的体积变化；$S_h$—最小水平主应力

（a）重张过程中的系统柔度随时间变化；（b）系统柔度与重张压力关系曲线

图 2　系统柔度对重张压力影响示意图（杨跃辉等，2024）

Fig. 2　Schematic diagram of the effect of system compliance on reopening pressure (Yang et al., 2024)

(a) The system compliance changes over time during the reopening process; (b) Schematic diagram of the relationship between system compliance and reopening pressure

C—system compliance; V_c—water volume change induced by fracture opening; $\mathrm{d}V_c/\mathrm{d}P$—volume change per unit pressure change due to fracture opening

深孔测量中系统柔度对重张压力的影响不容忽视已基本达成共识（王成虎等，2012），据此提出的最大水平主应力修正公式（杨跃辉等，2024），一定程度上推动了重张压力和最大水平主应力相关研究取得阶段进展，但从根源上消除系统柔度对重张压力的影响尚未得到有效解决。

（3）ASR 地应力测量方法研究

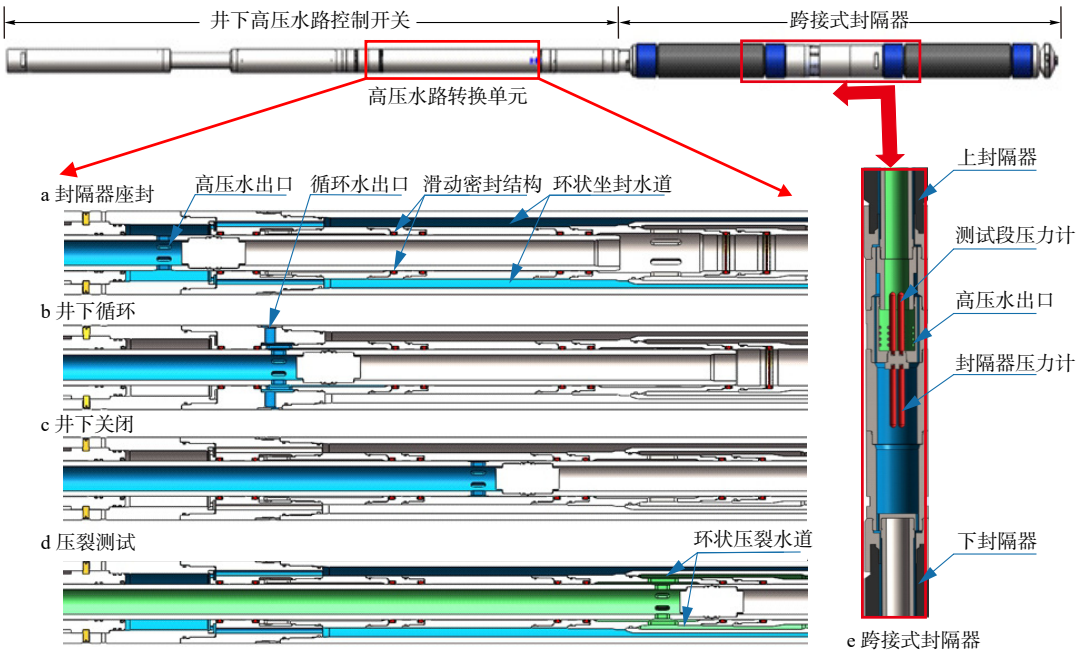
非弹性应变恢复法（Anelastic Strain Recovery method，简称 ASR 法）是近年发展起来的一种具有相对完备理论基础、基于定向岩芯的三维地应力测试方法。ASR 法要求在钻井现场建立实验室，测量期间保持岩芯近原位状态，故可视为一种近原位的地应力测试方法。基于粘弹性理论模型是 ASR 法的技术优势，对于深部高温高压环境具有很好的适用性，因此在超深科学钻和干热岩储层地应力测量中得到了广泛应用（许家鼎等，2024）。为进一步验证 ASR 法的有效性，研究人员对 ASR 地应力测量进行了系统的验证性试验。首先，开展了 ASR 法与水压致裂法地应力测量对比研究，结果表明在相同深度范围内（1260～1267 m），2 种方法得到的最小水平主应力的标准差为 1.71 MPa，一定程度上验证了 ASR 法的有效性（孙东生等，2020a）。其次，对取自冀东地区干热岩钻孔相连的 2 个花岗岩岩芯样品（长度～20 cm，中深分别为 3620.9 m 和 3621.1 m），开展了 ASR 法地应力测量结果的可重复性验证。结果显示，2 个相邻样品的主应力平均差系数介于 0.05%～6.29%，验证了 ASR地应力测量方法的可重复性（上官拴通等，2021）。此外，开展了 ASR 法与成像测井估算结果的对比研究，首次将 ASR 法成功应用于塔里木盆地～7 km 深部地应力测量，并通过

与钻井诱导缝估算的地应力量值范围进行了对比，验证了 ASR 法获取深部（～7 km）地应力数据的有效性（孙东生等，2018）。

2.2 钻孔原位地应力测量技术研发

随着超千米矿山和深埋地下工程建设的增多，受井下高压水路控制开关可靠性和跨接式封隔器耐压指标等限制，原有适用于浅孔的水压致裂原位地应力测量技术已无法满足需求。针对制约深孔原位水压致裂地应力测量技术的瓶颈，在“十三五”国家油气科技重大专项资助下，通过创新性研发，显著提升了井下工具的可靠性和耐温压指标，实现了中国钻孔原位地应力测试能力从 1000 m 至 3000 m 的提升。

自主研发的新一代深孔水压致裂地应力测试系统的井下工具部分结构如图 3 所示，主要包括井下高压水路控制开关和跨接式封隔器 2 个部分。其中高压水路控制开关的核心部分为高压水路转换单元，根据其内部高压水出口位置不同，分别对应图 3 中封隔器座封（图 3a）、井下循环（图 3b）、井下关闭（图 3c）和压裂测试（图 3d）4 个水路，且全部采用管与管之间的环状空间作为过水通道，显著提升了测试系统过流能力，保证在 100 L/min 流量下系统摩阻基本为零。高压水路采用了不同位置的冗余结构设计，即每个水路对应 20 cm 的行程范围，保证了地面对孔内水路转换开关位置的可靠控制。跨接式封隔器包括上、下封隔器和封隔器之间的测试段，内部结构如图 3e 所示。水压致裂地应力测试过程中，井下高压水路控制开关和封隔器内部的过流空间用蓝色表示，注入地层进行水压致裂地应力测试的过流空间用绿色表示，由于封隔器先膨胀坐封，测试段内升压过程中，封隔器通过变形调整，始终保持其内部压力高于测试段压力（蓝色压力高于绿色压力），并通过安装在结构内部的存储式压力计分别监测，以保证封隔器的密封效果和测试数据可靠性。



a—封隔器坐封水路；b—井下循环水路；c—井下关闭水路；d—压裂测试水路；e—跨接式封隔器

图 3 新一代深孔水压致裂地应力测试井下工具（蓝色为座封水路过流空间，绿色为测试水路过流空间）

Fig. 3 New generation downhole tool for deep in-situ stress measurement of hydraulic fracturing method (Blue denotes the packer-setting flow path; green denotes the testing flow path.)

(a) Straddle packers inflation waterflow; (b) Circulation waterflow; (c) Shut in waterflow; (d) Test interval injection waterflow; (e) Bridge plug

上述新一代深孔水压致裂地应力测试系统于 2019 年 3 月在湖南麻阳雪峰山先导孔进行了系统测试，通过同步监测井中封隔器压力和测试段压力，实测得到 170～2021 m 深度范围内 16 个测段的有效数据，所获得的地壳 2 km 深部的现今地应力特征，对扬子克拉通内部构造形成与演化研究，以及邻区深部资源开发具有重要的参考价值（陈群策等，2019）。2019 年以来，该技术已成功应用于

291 个不同深度钻孔的现场地应力测试，其中超过 1000 m 的钻孔 42 个，最大测量深度为河北宁晋盐穴储气库的 2950 m 裸孔段地应力测量（Zhao et al., 2022）。从研发前后水压致裂地应力测试系统井下设备的主要参数（表 1）中可以看出，新一代井下工具适用钻孔直径范围更广；通过高压水路转化单元的创新性设计，实现了水路转换过程中的冗余设计，提升了地面对井下高压水路的可靠控制；通过改变过水通道结构，大幅提升了系统的无阻流量；同时井下设备的耐温压指标也得到显著提升。

表 1　研发前后井下设备参数对比

Table 1　Comparison of downhole equipment parameters before and after development

设备类型	适用孔径	推拉行程	过水通道	无阻流量	耐差压力	耐温
传统井下工具	75～130 mm	5～10 cm	小孔	20 L/min	35 MPa	80 ℃
新一代井下工具	60～230 mm	30～50 cm	环状空间	100 L/min	50 MPa	120 ℃

2.3　深部地应力测量技术应用

目前，关于“深部应力”的深度界定尚无统一标准，且不同领域对地应力测试深度的需求也存在差异。在油气领域，深度超过 4500 m 被视为深井（全国石油钻井工程标准化委员会，2012）；在矿业、水电和土木等领域，往往以 1000 m 作为深部的界限，2000～3000 m以深尚处于探索阶段（谢和平等，2023）。下面从地应力测量技术发展现状和深地工程科学发展趋势的角度，简要介绍地应力测量技术在深埋重大工程、深部资源开发、地下储气库建设及深地科学研究中的应用案例，以供地球动力学和岩土工程领域相关专业技术人员参考。

（1）高原铁路深孔地应力测量

高地应力是诱发深埋工程强烈岩爆和软岩大变形的主要地质安全风险因素之一，被称为深埋工程安全施工的“拦路虎”。中国西部高原铁路普遍面临大埋深、高地应力的风险，为准确评价深埋铁路工程的高地应力地质安全风险，设计单位实施了用于地应力测量的铁路勘察史上第一深孔，终孔孔深 2118 m。利用前述自主研发的新一代深孔水压致裂地应力测试系统，成功获取了该孔地应力大小和方向随深度变化规律，最大测量深度为 2032 m（图 4）。测试结果表明，测点附近 2 km 埋深处的最小水平主应力约为 34 MPa，最大水平主应力约为 53 MPa，轨面深度上不存在预期超过 70 MPa 的极高地应力，相关成果为该深埋工程的规划设计提供了重要依据（张小林等，2024）。

（2）深埋矿集区勘查阶段地应力测量

据统计，超过 1000 m 的矿井总量中国居世界首位，且随着浅部资源逐渐枯竭，深矿井占比将进一步增加（谢和平等，2021）。根据矿山隐蔽致灾因素

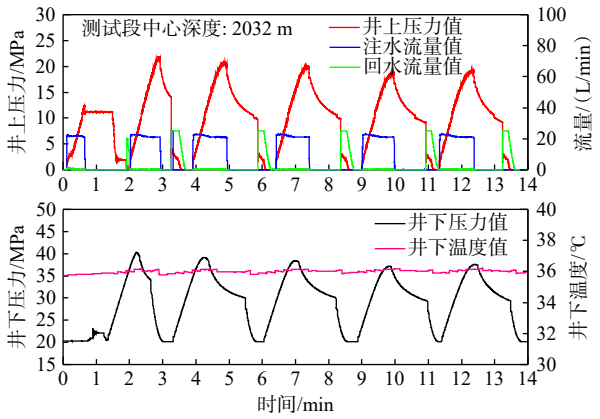
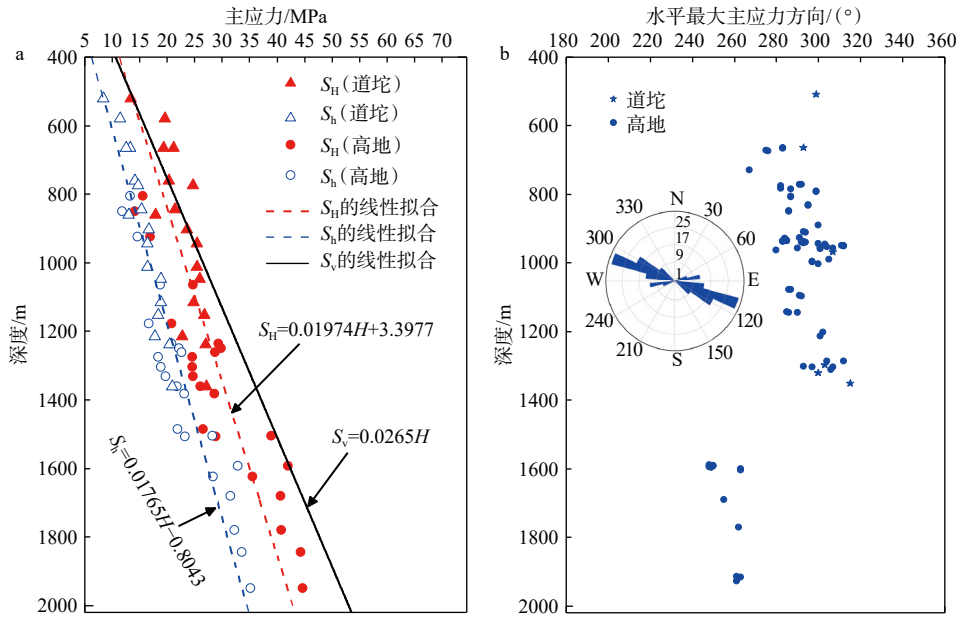


图 4　埋深 2032 m 水压致裂法实测曲线

Fig. 4　The measured curves of 2032 m depth by hydraulic fracturing method

普查规范，当设计采掘工程埋深超过 800 m 时，需开展原位地应力测试；若开采深度超过 1000 m，则需开展岩爆倾向性评价（国家矿山安全监察局，2024）。因此，埋深超过千米的矿集区在勘查阶段，对地应力测量存在明确需求。2020 年以来，为支撑矿山工程设计和岩爆倾向性评价，团队在贵州省松桃县的高地和道坨猛矿集区，开展了 5 个超千米深孔共计 39 个测段的地应力测量，最大测量深度 1950 m。测量结果显示，松桃锰矿集区 521～1950 m 深度范围内，最小水平主应力为 8～35 MPa，最大水平主应力为 13～44 MPa。测量深度范围内，水平主应力随深度基本呈线性变化，主应力关系总体为 $S_v>S_H>S_h$，属于正断型应力结构（图 5a）。此外，利用超声波成像测井方法，获取了 94 个测段的压裂缝和孔壁崩落方位信息，进而确定矿集区最大水平主应力优势方向为北西西向（290°±5°；图 5b）。综合分析表明，虽然矿体埋深较大，但矿区构造应力作用不强，最大水平主应力优势方向与区域应力场基本一致，矿山建



a—主应力量值随深度变化；b—最大水平主应力方向随深度变化

图 5 贵州省松桃锰矿集区实测主应力量值和方向随深度变化规律

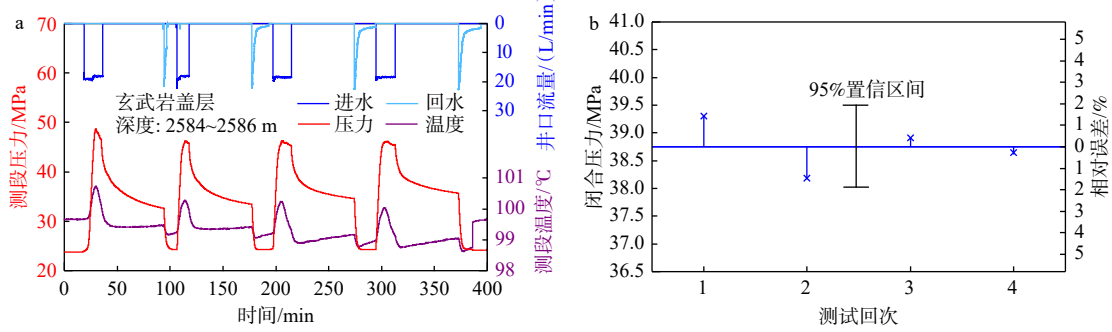
Fig. 5 The variation law of measured principal stress values and directions with depth in Songtao manganese ore area, Guizhou Province

(a) The magnitude of principal stress varies with depth; (b) The direction of maximum horizontal principal stress varies with depth

设中发生强烈岩爆的风险较低。

(3)地下储气库盖层最小主应力测试

盖层地应力是评价地下储气库上限运行压力以及判断盖层是否发生拉张或剪切破坏的关键参数。根据储气库建设相关规范，一般取盖层最小主应力的 80% 作为储气库的上限运行压力(郑雅丽等，2020)。而对于枯竭油气藏型地下储气库，由于盖层地应力数据的缺失，常将原始地层孔隙压力作为储气库上限运行压力，一定程度上制约了储气库的提压运行。为提升储气库的储气能力和经济效益，冀东油田南堡 X 号地下储气库，在套管井的射孔段(段长 2 m)，采用水压致裂地应力测量技术，实施了盖层多个层段的原位地应力实测。玄武岩盖层实测压力−流量−温度与时间曲线如图 6a 所示，测试过程中注入流量约 20 L/min，每个回次注入时间约 15 min，每个回次停泵后的压降等待时间不少于 1 h，4 个回次累计注入体积约 1.25 m^3。应用前述压裂缝闭合压力分析方法评价得到各回次压裂缝均已完全闭合，且不同回次拾取的最小主应力重复误差<5%(图 6b)。根据多个测段盖层实测得到的最小主应力，结合盖层发生剪切破坏和断层失稳对应的极限承压能力，综合确定了储气库的上限运行压



a—压力−流量−温度与时间曲线；b—4 个回次闭合压力的相对误差

图 6 地下储气库玄武岩盖层水压致裂法地应力实测曲线

Fig. 6 The measurement curves of hydraulic fracturing method for basalt cover layer of underground gas storage

(a) Pressure, flow rate, and temperature vs. time curve; (b) Relative error of closing pressure for four cycles

力。评价结果显示，南堡 X 号地下储气库根据矿场实测最小主应力的 80%为上限运行压力，可达 27.2 MPa，较原始地层压力 22.5 MPa 提升 4.70 MPa。由此，对应的有效库容从 15.46×10^8 m^3 增加到 18.14×10^8 m^3，库容量增长约 17.3%，预期可显著提升地下储气库的经济效益（胡彩云等，2024）。

（4）松科二井沉积盖层与基底过渡带地应力测量

作为国际大陆科学钻探计划项目的最深钻井，松科二井（SK-2）完钻井深达 7018 m，为认知松辽盆地深部应力环境提供了难得的机遇。由于井底温度超过 200 ℃，水压致裂地应力测量技术难以实施，故采用基于粘弹性理论模型的 ASR 法，首次通过实测获取了松辽盆地 7 km 深部地应力数据（图 7），结果表明，火石岭组沉积盖层（6296～6335 m）为正断层的应力结构（$\sigma_v>\sigma_H>\sigma_h$），变质岩基底（6646～6846 m）为走滑兼逆冲断层的应力结构（$\sigma_H>\sigma_v>\sigma_h$），即盆地沉积盖层处于拉张应力环境，盆地基底地壳处于挤压剪切应力环境，二者存在显著差异。相关研究成果与反映区域应力场特征的震源机制解结果吻合较好（Wang et al., 2020；王斌等，2024）。

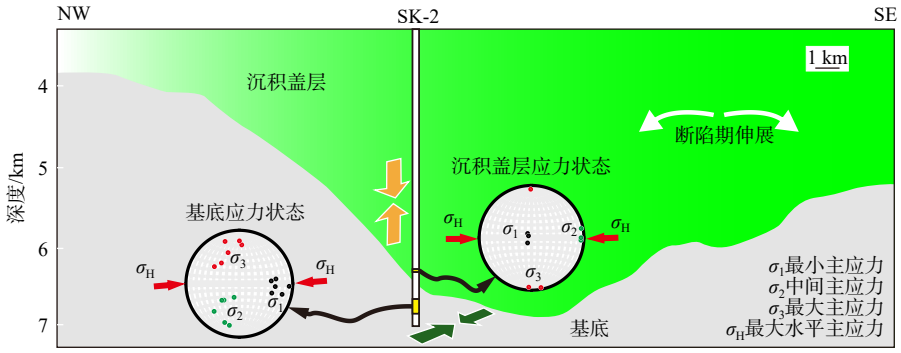


图 7　松辽盆地沉积盖层和基底实测三维地应力状态（Wang et al., 2020；王斌等，2024）

Fig. 7　Three dimensional in-situ stress state of sedimentary cover and basement measured in Songliao Basin (Wang et al., 2020; 2024)

除了水压致裂钻孔原位和 ASR 法近原位地应力测量技术外，基于成像测井获取的孔壁崩落（BO）或钻井诱导张裂缝（DITF）信息，可相对准确地反映主应力方向，结合压裂缝的闭合压力也可较好估算最大水平主应力的量值范围。特别当孔底应力和温度较高时（井深>5 km），由于应力集中和热应力叠加影响，孔壁将变得不规则甚至出现较大范围的坍塌，如德国 KTB 科学钻主孔，从约 5 km 深度开始扩径，在 7 km 深度时井径已从 311 mm 扩大至 1000 mm（Schetelig et al., 1993）。因此，对于深度超过 5 km 的钻孔，经典的水压致裂地应力测量技术将很难实施。

3　深部地应力测量技术面临的挑战

3.1　深部地应力测量理论亟待完善

水压致裂法和 ASR 法作为目前最有效的深部地应力测量技术，随着测试深度和井底温度−压力的增加，相关理论模型的有效性面临挑战。下面主要围绕水压致裂法的最大水平主应力计算模型、岩石非弹性力学特征及岩石非弹性应变恢复柔量确定方法等展开讨论。

（1）最大水平主应力计算模型

在假设岩体满足均质、各向同性和线弹性材料前提下，水压致裂地应力测量中的最大水平主应力的可靠性，取决于重张压力的准确性（公式（2））。而重张压力的误差又主要受测试系统柔度（与深度有关）的影响，因此从理论或技术上消除系统柔度的影响，完善重张压力理论模型是保证深孔水平最大主应力计算结果可靠性的关键（Ito et al., 1999）。在理论层面，可通过物理实验和数值模拟，认识水压致裂地应力测量过程中，压裂缝重张过程的物理机制，从而进一步完善最大水平主应力计算模型（杨跃辉等，2024）。在技术层面，可通过井中多参数协同观测消除系统柔度的影响，如压裂缝开始重张的临界压力点，可能与进入地层的流量或流体体积存在一定的成生联系。目前的地面流量记录无法反映井底微小的流量变化，研发井中高频高精度流量传感器，有望为确定压裂缝重张压力、提升最大水平主应力计算结果的可靠性提供科学依据。

（2）岩石的非线性力学特征

深部岩体如出现明显的非线性力学特征，对地应力测量结果的影响不容忽视。国内外钻孔地应

力测量结果表明，除异常高温地区和膏盐层外，地壳3 km以浅的岩体总体符合线弹性理论假设（Haimson, 1978; Zoback and Healy, 1992; Klee and Rummel, 1993; Zoback et al., 1993; Brudy et al., 1997; Sun et al, 2017）。德国KTB科学钻变质基性岩和片麻岩的单轴压缩实验结果显示，5 km以浅的岩芯总体符合线弹性特征，而8079 m深度的片麻岩的单轴压缩试验结果表现出明显的塑性（Röckel and Natau, 1995）。同时，KTB科学钻主孔从5 km开始扩径严重，可能与井壁岩石在高温高压环境下发生塑性变形、导致强度降低有关（Schetelig et al., 1993）。深部岩体如不符合线弹性理论假设，经典水压致裂地应力测量中的最大水平主应力计算公式，以及基于线弹性理论的孔壁破坏理论模型等将不再适用，这会导致目前广泛应用的水压致裂、孔壁崩落和钻井诱导张裂缝等地应力测量或分析方法部分失效或结果可靠性降低（Sone and Zoback, 2014; 孙东生等, 2020b; 孟文等, 2022）。因此，从理论和实验上认知岩石发生明显非线性力学特征的环境条件与影响因素，以及探索适用于大深度的地应力测量方法具有重要的科学和应用价值。在此需要说明的是，岩体是否表现出明显的非线性力学特征，不仅与所处的温压环境有关，还受岩性、矿物成分和孔隙流体等多种因素影响。不同岩石出现非线性力学特征的深度或温压条件可能存在明显差异。目前，主要是通过室内高温高压实验确定岩石出现非线性力学特征的温压条件，但由于尺寸效应，室内实验取得的认知与深部原位条件岩石的力学特征可能存在较大差异，因此发展井中原位岩石力学试验技术，将是未来发展方向。

（3）岩石非弹性应变恢复柔量

基于黏弹性理论模型的ASR法具有成本低、效率高、保持岩芯近原位状态和无测量深度限制等特点，在深部地应力测量领域表现出了明显的技术优势（Lin et al., 2006; Cui et al., 2014）。根据ASR地应力测量理论模型（公式（3）），在假设岩石为均质、各向同性及线性黏弹性材料的前提下，主应变方向即为主应力方向，测量期间保持孔隙压力和温度不变，可通过测量不少于6个独立方向非弹性恢复应变及岩石的非弹性应变恢复柔量，确定应力量值。

$$\varepsilon_{\mathrm{a}}(t)=\frac{1}{3}[(3l^2-1)\sigma_x+(3m^2-1)\sigma_y+(3n^2-1)\sigma_z+6lm\tau_{xy}+6mn\tau_{yz}+6nl\tau_{zx}]\times Jas(t)+(\sigma_{\mathrm{m}}-P_{\mathrm{p}})Jav(t)+\alpha_{\mathrm{T}}\Delta T(t) \tag{3}$$

式中，l、m、n—应变轴的方向余弦；σ_x、σ_y、σ_z、τ_{xy}、τ_{yz}、τ_{zx}—应力张量分量；σ_{m}—平均正应力；P_{p}—孔隙压力；α_{T}—线性热膨胀系数；$\Delta T(t)$—测量期间温度变化；$Jas(t)$—剪切变形模式的非弹性应变恢复柔量；$Jav(t)$—体积变形模式的非弹性应变恢复柔量。非弹性恢复应变可通过仪器现场测得，因此非弹性应变恢复柔量是影响ASR法地应力测量结果可靠性的关键参数。受样品尺寸、实验条件和松弛时间等因素限制，目前通过室内实验确定的非弹性应变恢复柔量数据有限且存在一定离散性。构建基于原位环境的岩石非弹性应变恢复柔量确定方法，对提升ASR法地应力测量结果可靠性具有重要意义（Matsuki, 2008）。

除了已有的水压致裂和ASR地应力技术，亟需从基础理论入手，探索应力与其它地球物理量之间的内在联系，发展适用于深部的地应力测量新方法。如美国威斯康星大学麦迪逊分校Hiroki Sone教授课题组，正在探索一种井中人工加热的方法，通过热应力诱发孔壁破坏，进而用于分析地应力的量值和方向。

3.2 深部地应力测量关键技术亟需攻关

现有地应力测量技术在应用于地壳中深部时面临诸多挑战，亟需在现有研究基础上进行技术攻关，形成满足地下10 km乃至更大深度的深部地应力测量技术体系。

（1）3～5 km地应力测量技术

目前，国际上真正的裸孔段水压致裂原位地应力测量的最大深度约3 km（德国KTB先导孔，3011 m; Baumgärtner et al., 1990）。超过3 km原位地应力测量的技术瓶颈是跨接式裸孔封隔器的耐压能力。当前，国内外大膨胀比裸眼封隔器的最大耐差压力约为50 MPa，而满足不同地区5 km深度的水压致裂法原位地应力测量，跨接式封隔器的耐差压力要达到80 MPa以上。为此，德国KTB科学钻曾计划在主孔的4～6 km深度使用铝制金属封隔器，以提升封隔器的耐压指标，但受井底环境复杂和封隔器回收困难等因素限制，未能成功实施（Rummel and Zoback, 1993）。同时，相关研究成果表明，5 km以浅硬岩基本符合线弹性力学特性（Schetelig et al., 1993），因此，为满足油气和地热等不同领域深至5 km的原位地应力测量需求，基于经典的水压致裂地应力测量技术，需要重点攻关耐高温高压跨接式裸孔封隔器以及相应的井下传感器，以实现5 km的原位应力

测量。

（2）5～10 km 或更大深度的地应力测量技术

垂深超过 5 km 时，基于线弹性理论的传统地应力测量方法可能不再适用。目前，深度超过 5 km 的地应力测量成果以德国 KTB 科学钻最具代表性。该钻孔主要是利用固井后的射孔段或固井后底部裸孔段，使用小变形套管封隔器进行密封，实施水压致裂法地应力测量，用于确定最小（水平）主应力（Zoback et al., 1993; Zoback and Harjes, 1997）。同时，结合成像测井获取的孔壁崩落或钻井诱导张裂缝信息，以及岩石力学参数，估算得到水平最大主应力的量值范围（Brudy et al., 1997）。除此之外，利用 ASR 法结合黏滞剩磁岩芯定向，得到了塔里木和松辽盆地 7 km 深度地应力信息（Sun et al., 2017; Wang et al., 2020）。需要指出的是，目前基于孔壁破坏估算水平最大主应力的方法，仍依赖线弹性理论模型，未考虑岩石非线性力学特性的影响（Trzeciak and Sone, 2024）。虽然基于黏弹性理论模型的 ASR 法，可用于出现非线性力学特征岩石的地应力测量，但在岩芯定向与非弹性应力恢复柔量确定等方面，也会给测量结果带来一定误差。因此，适用于 10 km 或更大深度的地应力测量技术亟需攻关，以满足下阶段万米科学钻地应力测量需求。

4　深地应力探测科技攻关

统计结果显示，大陆内部地震的震源深度多集中在 2～10 km（林士扬等, 2019）。然而，深度超过 2 km 的原位地应力实测数据非常有限。由于探测能力不足导致发震断层附近应力场多为定性或半定量研究，严重制约了对断层失稳过程的定量刻画，以及对地震孕育和发生机制的清晰认知。随着国家深地科技重大专项“深部应力探测关键技术与实验”项目的实施，旨在通过开展深井应力探测关键技术与装备的科技攻关，构建深至 10 km 的地应力探测技术方法。在获取深部应力实测数据基础上，结合更大深度的震源机制解，形成基本覆盖震源深度空间的地应力观测技术体系，为中国深地科学基础研究、深部资源高效开发和地下空间安全利用等领域提供关键技术支撑。

深孔原位多参数协同地应力观测的技术路线如图 8 所示，即在传统地面压力观测基础上，通过创新性研发，在跨接式封隔器之间的测试段集成压力（图 8a）、流量（图 8b）、温度（图 8c）和超声实时成像（图 8d）传感器，并显著提升井下设备的耐温压指标，结合井中多点地震计，建立深井原位“微型实验室”，真正意义上实现 5 km深度原位环境下对压裂缝破裂、扩展和闭合过程中物理力学行为的多参数协同观测，预期可显著提升深部应力测量结果的可靠性。

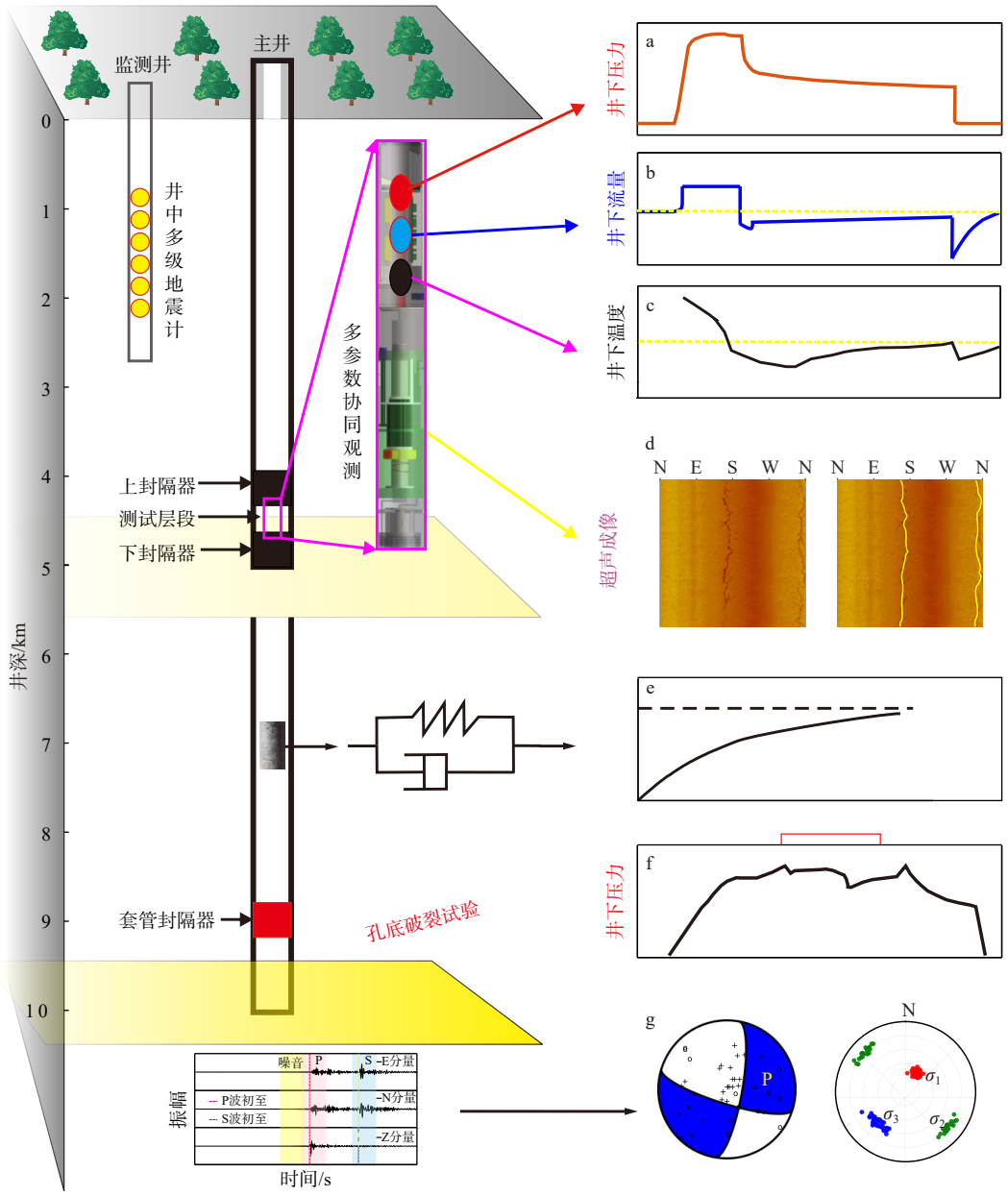
受井中高温高压和井下复杂环境限制，传统水压致裂地应力测量技术应用于深度超过 5 km 的深度时，线弹性理论模型可能不再适用，因此对于超过 5km 的地壳深部，需要考虑岩体的粘弹性效应（图 8e），可采用基于粘弹性理论模型的非弹性应变恢复法，结合井底裸眼段破裂试验（或固井后射孔段水压致裂法测试）获取的最小主应力（图 8f），以及成像测井获取的孔壁破坏等信息，综合确定深至 10 km 的地应力状态。对于钻孔无法抵达的更大深度（>10 km），依靠震源机制解获取平均主应力方向和相对应力大小（图 8g）。

除深井应力探测外，项目还将构建川西局域高密度地应力监测网，编制新一代全国尺度三维应力场图，开展跨断层监测和注水诱发断层失稳实验等研究，以及地应力测量和监测技术在超深科学钻、重点矿集区、深埋重大工程和能源资源基地的应用研究。通过揭示地壳应力分布规律与空间非均匀性特征，更好地服务于深地科学、深部资源高效开发和地下空间安全利用等领域的地应力需求。

5　结束语

地应力是深地科学基础研究和深部资源开发利用等领域的关键基础数据，深地应力探测技术的持续创新是准确获取深部应力数据的技术保障。随着人类工程活动的深度的不断增加，对深部应力探测技术提出了更高要求，迫切需要研发高、精、尖的地应力测量技术与装备，从应力场的角度破解深地科学及深部资源开发利用中的科学难题。

（1）深地应力测量理论模型研究。在基于总系统刚度演化特征的闭合压力分析方法研究的基础上，结合原位实验和数值模拟，揭示压裂缝重张过程的物理机理，从理论上完善水平最大主应力计算模型。对于深部高温高压环境下的岩体，在认知岩石非线性力学特征与变形机理的基础上，完善基于粘弹性理论模型的地应力分析方法。



a—井下压力时间曲线；b—井下流量时间曲线；c—井下温度时间曲线；d—压力缝井壁图像；e—岩芯滞弹性应变恢复曲线；f—井底破裂试验曲线；g—基于地震波的应力场反演

图 8 深部应力探测技术路线示意图

Fig. 8 Schematic diagram of deep stress detection

(a) Downhole pressure vs. time curve; (b) Downhole flowrate vs. time curve; (c) Downhole temperature vs. time curve; (d) Image logging of test interval; (e) Anelastic strain recovery curve of rock core; (f) Bottom hole fracturing test curve; (g) Stress inversion based on seismic waves

(2)深井应力探测关键技术研发。以“十三五”期间自主研发的3 km深孔原位地应力测试技术为基础，通过研发井下高压水路转换开关、耐高温高压裸眼跨接式封隔器、井下存储式压力−流量−温度传感器和压裂缝超声成像同步探测装置，形成满足5 km温压条件多参数协同的原位地应力探测技术与装备，实现对原位环境下井壁岩体破裂、扩展和闭合过程物理力学行为的多参数协同观测。

(3)构建覆盖震源深度的地应力探测技术体系。0～5 km深度以基于线弹性理论模型的井中原位应力测量技术为主，通过井中“微型实验室”多参数协同观测，获取5 km以浅的全应力张量；5～10 km深度以基于黏弹性理论模型的非弹性应变恢复法，结合井底裸眼段破裂试验(或固井后射孔段压裂缝

闭合压力)获取的最小主应力,以及成像测井获取的孔壁破坏等信息,综合确定深至 10 km 的地应力分布规律。对于钻孔无法触及的更大深度(>10 km),利用震源机制解获取平均主应力方向和相对应力大小,最终实现覆盖震源深度空间的地应力探测。

致谢:谨以此文祝贺《地质力学学报》创刊 30 周年。“深部应力探测关键技术与实验研究”项目(2024ZD1000700)目前正处于理论研究与技术攻关阶段,感谢项目团队支持和咨询专家的指导。

References

AMADEI B, STEPHANSSON O, 1997. Rock stress and its measurement[M]. Dordrecht: Springer: 1-505.

BAUMGÄRTNER J, RUMMEL F, ZOBACK M D, 1990. Hydraulic fracturing in situ stress measurements to 3 km depth in the KTB pilot hole VB: a summary of a preliminary data evaluation[M]//BRAM K, DRAXLER J K, KESSELS W, et al. KTB report 90-6a: grundlagenforschung und bohrlochgeophysik (bericht 10); Langzeitmeß- und testprogramm in der KTB-Oberpfalz VB. Hannover: Projektleitung Kontinentales Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland im Niedersächsischen Landesamt für Bodenforschung: 353-399.

BREDEHOEFT J D, WOLFF R G, KEYS W S, et al., 1976. Hydraulic fracturing to determine the regional in situ stress field, Piceance Basin, Colorado[J]. Geological Society of America Bulletin, 87(2): 250-258.

BRUDY M, ZOBACK M D, FUCHS K, et al., 1997. Estimation of the complete stress tensor to 8 km depth in the KTB scientific drill holes: implications for crustal strength[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 102(B8): 18453-18475.

CHEN Q C, SUN D S, CUI J J, et al., 2019. Hydraulic fracturing stress measurements in Xuefengshan deep borehole and its significance[J]. Journal of Geomechanics, 25(5): 853-865. (in Chinese with English abstract)

CHENG Z Y, LIU R, ZHANG J F, et al., 2023. Study on SeepageMechanism Characteristics of A Single Fracture Based on Fracture DeformationUnder Different Confining Pressures[J]. Geoscience, 37 (4): 972-976.DOI:10.19657/j.geoscience.1000-8527.2023.059. (in Chinese with English abstract)

CUI J W, LIN W R, WANG L J, et al. , 2014. Determination of three-dimensional in situ stresses by anelastic strain recovery in Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project Hole-1 (WFSD-1)[J]. Tectonophysics, 619-620: 123-132.

DONG S W, LI J H, GAO R, et al., 2023. Intraplate lithospheric extension revealed by seismic reflection profiling of South China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 609: 118100.

FAIRHURST C, 1964. Measurement of in situ rock stresses with particular references to hydraulic fracturing[J]. Rock Mechanics and Engineering Geology, 2: 129-147.

FAIRHURST C, 2017. Some challenges of deep mining[J]. Engineering, 3(4): 527-537.

HAIMSON B C, FAIRHURST C, 1967. Initiation and extension of hydraulic fractures in rocks[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 7(3): 310-318.

HAIMSON B C, FAIRHURST C, 1969. In-situ stress determination at great depth by means of hydraulic fracturing[C]//The 11th U. S. symposium on rock mechanics (USRMS). Berkeley: OnePetro: ARMA-69-0559.

HAIMSON B C, 1972. Earthquake related stresses at Rangely, Colorado[C]//The 14th U. S. symposium on rock mechanics (USRMS). University Park: OnePetro: ARMA-72-0689.

HAIMSON B C, 1978. Crustal stress in the Michigan basin[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 83(B12): 5857-5863.

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 and Mining Sciences, 40(7-8): 1011-1020.

HARDY M P, ASGIAN M I, 1989. Fracture reopening during hydraulic fracturing stress determinations[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 26(6): 489-497.

HE M C, WU Y Y, GAO Y B, et al., 2024. Research progress of rock mechanics in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 49(1): 75-99. (in Chinese with English abstract)

HU C Y, LI C, YANG Z B, et al., 2024. Quantitative evaluation of maximum operating pressure and storage capacity for gas-top sandstone reservoir-type gas storage[J]. Journal of Geomechanics, 30(3): 419-426. (in Chinese with English abstract)

HUBBERT M K, WILLIS D G, 1957. Mechanics of hydraulic fracturing[J]. Transactions of the AIME, 210(1): 153-168.

ITO T, EVANS K, KAWAI K, et al., 1999. Hydraulic fracture reopening pressure and the estimation of maximum horizontal stress[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 36(6): 811-826.

ITO T, YOKOYAMA T, 2021. Effect of system compliance on pressure-time curve at reopening and new standard in Japan[C]//Proceedings of the 55th U. S. rock mechanics/geomechanics symposium. Houston: OnePetro: ARMA-2021-2069.

Japanese Geotechnical Society (JGS), 2017. Method for initial stress measurement by hydraulic fracturing technique: JGS3761-2017[S]. Osaka: Japanese Geotechnical Society.

KLEE G, RUMMEL F, 1993. Hydrofrac stress data for the European HDR research project test site Soultz-Sous-Forets[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 30(7): 973-976.

LI F Q, ZHAI Q S, BI S X, et al., 1986. In-situ stress measurement by hydraulic fracturing and preliminary results[J]. ACTA Seismologica Sinica, 8(4): 431-438. (in Chinese with English abstract)

LI X B, GONG F Q, 2021. Research progress and prospect of deep mining rock mechanics based on coupled static-dynamic loading testing[J]. Journal of China Coal Society, 46(3): 846-866. (in Chinese with English abstract)

LIN S Y, JI J Q, SU J, 2019. Statistical analysis of global earthquake focal depth and distribution of seismic layer[J]. Chinese Journal of Geology,

54(4): 1167-1184. (in Chinese with English abstract)

LIN W R, KWAŚNIEWSKI M, IMAMURA T, et al., 2006. Determination of three-dimensional in situ stresses from anelastic strain recovery measurement of cores at great depth[J]. Tectonophysics, 426(1-2): 221-238.

MARTIN C D, CHANDLER N A, 1993. Stress heterogeneity and geological structures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 30(7): 993-999.

MATSUKI K, 2008. Anelastic strain recovery compliance of rocks and its application to in situ stress measurement[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 45(6): 952-965.

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)

National Mine Safety Administration, 2024. Specification for general survey of hidden disaster-causing factors in mines Part 3: metal & nonmetal mines and tailings ponds: KA/T 22.3-2024[S]. (in Chinese)

National Technical Committee on Petroleum Drilling Engineering of Standardization Administration of China, 2012. Terms of petroleum and natural gas drilling engineering: GB/T 28911–2012. Beijing: Standards Press of China.

PINE R J, LEDINGHAM P, MERRIFIELD C M, 1983. *In situ* stress measurement in the Carnmenellis granite: II. Hydrofracture tests at Rosemanowes Quarry to depths of 2000 m[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 20(2): 63-72.

QIN X H, ZHANG P, FENG C J, et al., 2014. In-situ stress measurements and slip stability of major faults in Beijing region, China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 57(7): 2165-2180. (in Chinese with English abstract)

Raleigh C B, Healy J H, Bredehoeft J D, 1972. Faulting and crustal stress at Rangely, Colorado[J]. Flow and fracture of rocks, 16: 275-284

RALEIGH C B, HEALY J H, BREDEHOEFT J D, 1976. An experiment in earthquake control at Rangely, Colorado[J]. Science, 191(4233): 1230-1237.

RANJITH P G, ZHAO J, JU M H, et al., 2017. Opportunities and challenges in deep mining: a brief review[J]. Engineering, 3(4): 546-551.

RÖCKEL T, NATAU O, 1995. Rock mechanics[M]//EMMERMANN R, ALTHAUS E, GIESE P, et al. KTB report 95-2: KTB Hauptbohrung; Results of geoscientific investigation in the KTB field laboratory; Final report: 0 - 9101 m. Stuttgart: Schweitzerbart: E1-E9.

RUMMEL F, ZOBACK M D, 1993. Hydrofrac stress profile in the KTB boreholes VB and HB[M]//EMMERMANN R, LAUTERJUNG J, UMSONST T. KTB report 93-2: contributions to the 6. Annual KTB-colloquium, geoscientific results; Giessen 1. -2. April 1993. Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ: 191-194.

RUTQVIST J, TSANG C F, STEPHANSSON O, 2000. Uncertainty in the maximum principal stress estimated from hydraulic fracturing measurements due to the presence of the induced fracture[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 37(1-2): 107-120.

SCHETELIG K, AZZAM R, KLÄSENER R, 1993. Borehole break-outs and their relation to mechanical and physical properties of KTB core samples[M]//EMMERMANN R, LAUTERJUNG J, UMSONST T. KTB report 93-2: contributions to the 6. Annual KTB-colloquium, geoscientific results; Giessen 1. -2. April 1993. Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ: 183-186.

SHANGGUAN S T, SUN D S, ZHANG G B, et al., 2021. In-situ stress measurement and fault stability analysis within a depth of 3～4 km in the Tangshan area[J]. Acta Geologica Sinica, 95(12): 3915-3925. (in Chinese with English abstract)

SONE H, ZOBACK M D, 2014. Viscous relaxation model for predicting least principal stress magnitudes in sedimentary rocks[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 124: 416-431.

SUN D S, LIN W R, CUI J W, et al., 2014. Three-dimensional *in situ* stress determination by anelastic strain recovery and its application at the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Hole-1 (WFSD-1)[J]. Science China Earth Sciences, 57(6): 1212-1220.

SUN D S, SONE H, LIN W R, et al., 2017. Stress state measured at ～7 km depth in the Tarim Basin, NW China[J]. Scientific Reports, 7(1): 4503.

SUN D S, LV H T, WANG L J, et al., 2018. Determination of the in-situ stress state at 7 km depth under Tarim Basin by ASR and DITH methods[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 37(2): 383-391. (in Chinese with English abstract)

SUN D S, CHEN Q C, ZHANG Y Q, 2020a. 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)

SUN D S, PANG F, LI A W, et al., 2020b. In-situ stress profile prediction based on the rheological model: a case study of Well AY-1 in the Qianbei area of Guizhou province[J]. Natural Gas Industry, 40(3): 58-64. (in Chinese with English abstract)

TOWNEND J, ZOBACK M D, 2000. How faulting keeps the crust strong[J]. Geology, 28(5): 399-402.

TRZECIAK M, SONE H, 2024. Polyaxial failure criteria for in situ stress analysis using borehole breakouts: review of existing methods and development of an empirical alternative[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 182: 105864.

WANG B, SUN D S, CHEN Q C, et al., 2020. Stress-state differences between sedimentary cover and basement of the Songliao Basin, NE China: in-situ stress measurements at 6-7 km depth of an ICDP Scientific Drilling borehole (SK-II)[J]. Tectonophysics, 777: 228337.

WANG B, SUN D S, LI A W, et al., 2024. In situ stress state of deep basement in the Songliao Basin: evidence from in situ stress measurement in SK-2 borehole[J]. Earth Science Frontiers, 31(2): 377-390. (in Chinese with English abstract)

WANG C H, SONG C K, XING B R, 2012. Compliance of drilling-rod system for hydro-fracturing in situ stress measurement and its effect on measurements at great depth[J]. Geoscience, 26(4): 808-816. (in Chinese with English abstract)

WANG C H, 2014. Brief review and outlook of main estimate and measure-

ment methods for in-situ stresses in rock mass[J]. Geological Review, 60(5): 971-996. (in Chinese with English abstract)

WANG L J, CUI J W, ZHANG X W, et al., 2006. In-situ stress state in the main borehole of the Chinese continental scientific drilling[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 31(4): 505-512. (in Chinese with English abstract)

WANG L J, SUN D S, LIN W R, et al., 2012. Anelastic strain recovery method to determine in-situ stress and application example[J]. Chinese Journal of Geophysics, 55(5): 1674-1681. (in Chinese with English abstract)

XIE H P, GAO F, JU Y, 2015. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 34(11): 2161-2178. (in Chinese with English abstract)

XIE H P, LI C B, GAO M Z, et al., 2021. Conceptualization and preliminary research on deep in situ rock mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 40(2): 217-232. (in Chinese with English abstract)

XIE H P, ZHANG R, ZHANG Z T, et al., 2023. Reflections and explorations on deep earth science and deep earth engineering technology[J]. Journal of China Coal Society, 48(11): 3959-3978. (in Chinese with English abstract)

XU J D, ZHANG C Y, LI A W, et al., 2024. In-situ stress measurements in hot dry rock, Qinghai Gonghe Basin and simulation analysis of reservoir fracture modification. Earth Science Frontiers, 31(6): 130-144. (in Chinese with English abstract)

YANG Y H, SUN D S, QIN X H, et al., 2024. Error analysis and discussion of determining the maximum horizontal principal stress by hydraulic fracturing based on the compliance analysis of testing system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 43(S1): 3385-3396. (in Chinese with English abstract)

YANG Y H, SUN D S, MA X D, et al., 2025. A total system stiffness approach for determining shut-in pressure in hydraulic fracturing stress measurements[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 192: 106160.

YANG Y H, SUN D S, QIN X H, et al. , 2025. Determination of hydraulic fracture closure pressure based on total system stiffness method and case study[J]. Journal of Geomechanics, 28(4): this issue. (in Chinese with English abstract)

ZANG A, STEPHANSSON O, 2010. Stress field of the earth's crust[M]. Dordrecht: Springer.

ZHANG C S, 2009. Design criteria for concrete-lining high pressure hydropower tunnel and high pressure permeability test on rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 28(7): 1305-1311. (in Chinese with English abstract)

ZHANG X L, YING L, ZHAO D A, 2024. Application of in-situ stress measurement technology of ultra deep survey borehole ASR method[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 54(1): 198-207. (in Chinese with English abstract)

ZHAO K, LIU Y X, LI Y P, et al, 2022. Feasibility analysis of salt cavern gas storage in extremely deep formation: a case study in China[J]. Journal of Energy Storage, 47: 103649.

ZHENG Y L, SUN J C, QIU X S, et al., 2020. Connotation and evaluation technology of geological integrity of reservoir-type gas storage [J]. Gas industry, 40 (5): 94-101.(in Chinese with English abstract)

ZHENG Z X, SUN Q Q, 2017. Tunnel engineering of Sichuan-Tibet railway[J]. Tunnel Construction, 37(8): 1049-1054. (in Chinese)

ZOBACK M D, TSUKAHARA H, HICKMAN S, 1980. Stress measurements at depth in the vicinity of the San Andreas fault: implications for the magnitude of shear stress at depth[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 85(B11): 6157-6173.

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]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 97(B4): 5039-5057.

ZOBACK M D, APEL R, BAUMGÄRTNER J, et al., 1993. Upper-crustal strength inferred from stress measurements to 6 km depth in the KTB borehole[J]. Nature, 365(6447): 633-635.

ZOBACK M D, HARJES H P, 1997. Injection-induced earthquakes and crustal stress at 9 km depth at the KTB deep drilling site, Germany[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 102(B8): 18477-18491.

ZOBACK M D, 2007. Reservoir geomechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press: 167-223.

附中文参考文献

陈群策，孙东生，崔建军，等，2019. 雪峰山深孔水压致裂地应力测量及其意义[J]. 地质力学学报，25(5)：853-865.

程智余，刘瑞，张金锋，等，2023. 围压变化作用下基于水力开度变化的单裂隙渗流特性研究[J]. 现代地质，37(4)：972-976. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.2023.059

国家矿山安全监察局，2024. 矿山隐蔽致灾因素普查规范 第3部分：金属非金属矿山及尾矿库：KA/T 22.3-2024[S].

何满潮，武毅艺，高玉兵，等，2024. 深部采矿岩石力学进展[J]. 煤炭学报，49(1)：75-99.

胡彩云，李聪，杨智斌，等，2024. 气顶砂岩油藏型储气库运行上限压力和库容量定量评价研究[J]. 地质力学学报，30(3)：419-426.

李方全，翟青山，毕尚煦，等，1986. 水压致裂法原地应力测量及初步结果[J]. 地震学报，8(4)：431-438.

李夕兵，宫凤强，2021. 基于动静组合加载力学试验的深部开采岩石力学研究进展与展望[J]. 煤炭学报，46(3)：846-866.

林士扬，季建清，苏君，2019. 全球地震震源深度统计分析与地震层分布[J]. 地质科学，54(4)：1167-1184.

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.

秦向辉，张鹏，丰成君，等，2014. 北京地区地应力测量与主要断裂稳定性分析[J]. 地球物理学报，57(7)：2165-2180.

全国石油钻井工程标准化委员会，2012. 石油天然气钻井工程术语：GB/T 28911—2012[S]. 北京：中国标准化出版社.

上官拴通，孙东生，张国斌，等，2021. 唐山地区3～4 km深部地应力测量及断层稳定性分析[J]. 地质学报，95(12)：3915-3925.

孙东生，吕海涛，王连捷，等，2018. ASR 和 DITF 法综合确定塔里木盆地 7km 深部地应力状态[J]. 岩石力学与工程学报，37(2)：383-391.

孙东生，陈群策，张延庆，2020a. 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.

孙东生，庞飞，李阿伟，等，2020b. 基于流变模型的地应力剖面预测：以贵州黔北地区安页 1 井为例[J]. 天然气工业，40(3)：58-64.

王斌，孙东生，李阿伟，等，2024. 松辽盆地深部基底地应力状态：来自松科 2 井地应力实测数据的证据[J]. 地学前缘，31(2)：377-390.

王成虎，宋成科，邢博瑞，2012. 水压致裂应力测量系统柔性分析及其对深孔测量的影响[J]. 现代地质，26(4)：808-816.

王成虎，2014. 地应力主要测试和估算方法回顾与展望[J]. 地质论评，60(5)：971-996.

王连捷，崔军文，张晓卫，等，2006. 中国大陆科学钻主孔现今地应力状态[J]. 地球科学：中国地质大学学报，31(4)：505-512.

王连捷，孙东生，林为人，等，2012. 地应力测量的非弹性应变恢复法及应用实例[J]. 地球物理学报，55(5)：1674-1681.

谢和平，高峰，鞠杨，2015. 深部岩体力学研究与探索[J]. 岩石力学与工程学报，34(11)：2161-2178.

谢和平，李存宝，高明忠，等，2021. 深部原位岩石力学构想与初步探索[J]. 岩石力学与工程学报，40(2)：217-232.

谢和平，张茹，张泽天，等，2023. 深地科学与深地工程技术探索与思考[J]. 煤炭学报，48(11)：3959-3978.

许家鼎，张重远，张浩，等，2024. 青海共和盆地干热岩地应力测量及其储层压裂改造意义分析[J]. 地学前缘，31(6): 130-144.

杨跃辉，孙东生，秦向辉，等，2024. 基于测试系统柔度分析的水压致裂法确定最大水平主应力误差分析与讨论[J]. 岩石力学与工程学报，43(S1)：3385-3396.

杨跃辉，孙东生，吴邦宸，等，2025. 总系统刚度法在水力裂缝闭合压力测定中的应用[J]. 地质力学学报. DOI：10. 12090 / j. issn. 1006-6616. 2025099

张春生，2009. 混凝土衬砌高压水道的设计准则与岩体高压渗透试验[J]. 岩石力学与工程学报，28(7)：1305-1311.

张小林，应黎，赵冬安，2024. 超深勘察钻孔 ASR 法地应力测试技术应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版)，54(1)：198-207.

郑雅丽，孙军昌，邱小松，等，2020. 油气藏型储气库地质体完整性内涵与评价技术[J]. 天然气工业，40(5): 94-101.

郑宗溪，孙其清，2017. 川藏铁路隧道工程[J]. 隧道建设，37(8)：1049-1054.