引用格式：王成虎，李尉，2025. 近 10 年（2014—2025 年）地应力测试与估算方法的主要进展及展望[J]. 地质力学学报，31（6）：1188−1209. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025080

Citation: WANG C H，LI W，2025. Major advances and prospects in in-situ stress measurement and estimation methods over the past 10 years (2014–2025）[J]. Journal of Geomechanics，31（6）：1188−1209. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025080

近 10 年（2014—2025 年）地应力测试与估算方法的主要进展及展望

王成虎，李　尉
WANG Chenghu，LI Wei

应急管理部国家自然灾害防治研究院，北京 100085
National Institute of Natural Hazards, *Ministry of Emergency Management*, *Beijing* 100085, *China*

Major advances and prospects in in-situ stress measurement and estimation methods over the past 10 years (2014–2025）

Abstract: ［**Objective**］The characteristics of the in-situ stress field are fundamental to major strategic underground engineering projects, deep earth resource and energy development, and geohazard prevention and control. Over the past decade, significant progress and breakthroughs have been made in in-situ stress measurement and estimation methods. ［**Method**］This article systematically reviews the main advances in in-situ stress measurement and estimation methods from 2014 to 2025. These advances can be categorized into four technical fields: core-based methods, borehole-based methods, geophysics-based methods, and emerging data-driven estimation methods. ［**Results**］Core-based testing methods have improved the accuracy of in-situ stress magnitude measurements through theoretical refinements and enhanced the precision of stress direction determination through equipment upgrades, addressing the previous inability to measure in-situ stress in low-strength rocks. Borehole-based testing methods have been further developed and now use sensors with high temperature and pressure resistance, as well as corrosion resistance, enabling deep borehole imaging, direction identification, and in-situ stress measurement. Accurate analytical solutions for in-situ stress magnitudes have been obtained through corrections. Geophysics-based methods have enabled the inversion of the in-situ stress field using focal mechanism solutions of minor earthquakes (magnitude 0.5–1.0), providing extensive rock mass stress information. Acoustic, imaging, and dipmeter logging technologies have also evolved to utilize non-contact, high-precision, and high-sensitivity equipment, making them more suitable for deep boreholes and oilfield development. Advancements in big data and artificial intelligence have given rise to data-driven testing methods that can be divided into three categories based on prediction approaches: machine learning, intelligent neural network prediction, and intelligent back-analysis. These methods have advanced in-situ stress measurement from discrete "point measurements" to full-field "field reconstruction." ［**Conclusion**］Compared to traditional methods, current in-situ stress testing is moving toward "deepening, intelligentization, and systematization." ［**Significance**］Future research should focus on the dual drivers of intelligent prediction models and intelligent testing equipment to address the challenges of complex deep geological environments.

Keywords: in-situ stress; testing methods; advances; data-driven; stress models

摘　要：地应力场特征是重大战略地下工程建设、深地资源能源开发及地质灾害防控的关键基础参数。近 10 年地应力测试与估算方法具有诸多进展和突破。文章系统梳理了 2014—2025 年地应力测试与估算方

基金项目：国家自然科学基金青年基金项目（42404111）
This research is financially supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42404111).
第一作者：王成虎（1978—），男，研究员，主要从事地应力与地质力学、断层力学等研究工作。Email：huchengwang@163.com
收稿日期：2025−07−04；**修回日期：**2025−10−20；**录用日期：**2025−10−27；**网络出版日期：**2025−12−03；**责任编辑：**范二平

法的主要进展，按照技术领域可分为 4 大类：基于岩芯的方法、基于钻孔的方法、基于地球物理的方法以及基于数据驱动的估算新方法。基于岩芯的测试方法通过改进理论提高地应力量值的准确率，通过设备精度提升优化地应力方向的确定精度，弥补了低强度岩石地应力无法测量的缺陷。基于钻孔的测试方法实现了传感设备材料耐高温、高压、抗腐蚀性能，可完成深孔成像、方向识别和地应力测量，通过修正得到地应力量值的准确解析解。基于地球物理的方法实现了（0.5～1.0 级）微小震震源机制解对地应力场的反演，获取了大量岩体应力信息；声波、成像和地层倾角测井技术的设备也发展为无接触式、高精度、高灵敏度化，更加适用于深孔和油田开发领域。随着大数据人工智能发展，新兴的数据驱动测试方法按照模型预测方式分为机器学习、智能神经网络预测和智能反分析 3 种方法，将地应力从离散“点测量”推进至全域“场重构”。通过对比传统方法，当前地应力测试正朝着“深部化、智能化、系统化”方向发展，未来研究需以智能预测模型与智能化测试装备双驱动，应对深部复杂地质环境的挑战。

关键词：地应力；测试方法；研究进展；数据驱动；应力模型

中图分类号：P31; P553　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1006-6616(2025)06-1188-22

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025080

0　引 言

地应力作为表征岩体内部天然受力状态的物理量，其精确测量是交通工程、水利水电工程、碳封存工程以及深部资源能源开发领域的关键问题。当前中国正在建设的 CZ 线铁路、YX 电站工程、万米深部油气田井优化设计、核废料地质处置库选址、二氧化碳地质封存等国家工程，以及对活动断裂带地震孕育机制的深入探索，无不依赖于对地应力张量及其时空分布规律的认识。王成虎(2014)按照数据来源将过去近 50 年来原位地应力测试和估算方法主要分为了 5 大类——基于岩芯的方法、基于钻孔的方法、地质学方法、地球物理方法(地震学方法)以及基于地下空间的方法，并总结了 26 种地应力测试方法。这一分类得到了国内众多学者的认可。

近 10 年，全球范围内地质工程与地球物理探测技术迅猛发展，新材料、新技术、新型元器件、人工智能与大数据分析技术的深度融入，为地应力测试领域带来了前所未有的创新活力和驱动力。同时随着中国战略资源开发建设不断向深部、极端条件地区推进，在面临岩石各向异性、非均质、非线性等难题时，地应力参数的获取和确定难度也在加大。从传统的基于岩芯、钻孔、地质学、地球物理和地下空间的方法到基于数据驱动的地应力测量新方法，以及传感器微型化、智能化、原位长期监测系统的突破，地应力测试方法在理论基础、技术手段、大数据驱动的应力场反演方法与应用模式等方面均取得了长足进步，从而更好地服务于中国未来重大工程的地应力参数确定与分析。基于地质构造分析(如地倾斜调查、地层滑动反演、新构造运动节理测绘及火山口排列调查)的传统地质学方法和依托矿井、隧道等地下空间进行的原位实测技术(如扁千斤顶法、表面解除法等)，无论是其原理还是技术设备近 10 年来取得的进展相对有限(Zang et al., 2013)。这些方法虽在地应力测试中具有一定的应用价值，但在理论基础、测试精度或设备更新方面并没有实质进展。相比之下，基于岩芯、基于钻孔以及地球物理方法的地应力测试研究进展十分显著，同时基于数据驱动的新方法得到蓬勃发展，为地应力场综合评估方法提供多种可靠选择。

文章旨在系统梳理近 10 年间(2014—2025 年)地应力主要测试方法的关键性进展，从基于岩芯、基于钻孔、地球物理方法和基于数据驱动的地应力测量新方法 4 个大类分析每种方法技术的创新、应用环境的拓展以及其存在的局限性；并在此基础上，结合当前科技发展趋势与工程实践需求，对未来地应力测试技术的发展方向与潜在突破点进行前瞻性展望，以期进一步提升地应力测试技术水平，更好地服务于国家重大工程建设，并为地球科学发展提供参考。

1　基于岩芯的方法

基于岩芯的地应力测量主要方法包括非弹性应变恢复(ASR)法、差分应变曲线分析(DSCA)法、变形速率分析(DRA)法和声发射(AE)法(Amadei

and Stephansson, 1997)。这些技术成本较低,可在实验室环境下使用从现场采集的岩芯样品进行测量。研究结果表明,通过基于岩芯的技术得出的应力方向与通过现场钻孔测量确定的应力方向不一致(Zang et al., 2013),这种差异可以归因于精确测量小应变的挑战、微尺度测量的局限性以及其中一些技术固有的二维(2D)特性。当前基于岩芯的测量方法主要创新体现在以下几种方法:岩芯直径变形分析法、线性三轴变形速率分析法、重定向声发射法和饼状岩芯估算法。

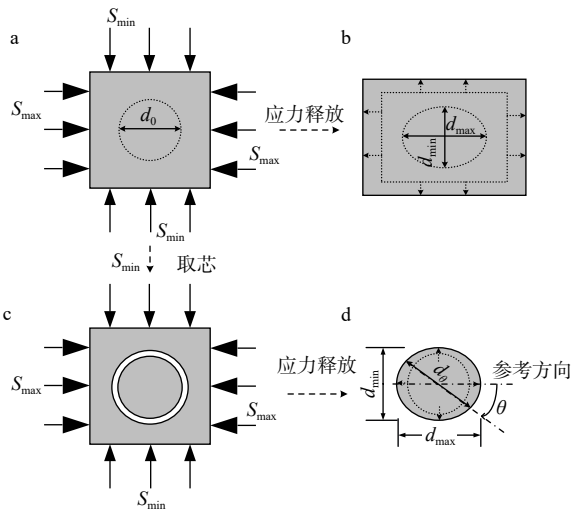
1.1 非弹性应变恢复法

ASR法是一种基于定向岩芯的地应力测量技术,通过测量从地下钻取出的岩芯在解除原位地应力后,其非弹性(黏弹性)应变恢复行为来推算原位地应力状态的方法。Gao et al.(2014)对不同岩性岩石进行ASR室内试验,发现ASR柔度与切向杨氏模量近似呈幂律关系,有助于初步估算ASR柔度。Sun et al.(2014)在2008年5·12汶川M_S 8.0地震后采用ASR方法对四川省汶川地震断裂带科学钻孔1173 m的岩芯主应力大小进行确定,并对非弹性应变恢复柔度进行校准,结果与龙门山断裂带应力状态一致。Sun et al.(2017)利用ASR方法和钻孔崩落法分析了中国西北部塔里木盆地深度达7km的地应力状态,弥补了水压致裂法无法进行超深原位测试的空缺。王斌等(2024)将ASR法成功应用于松科2井地应力测量,获得了松科2井钻遇基底(6646~6846 m)的应力大小和方向信息。

总体上,ASR适合深孔、破碎及高温等复杂地质条件下的地应力测量,但岩芯样品的非均质性、各向异性及存放条件(孔隙压力释放、干燥等)是测试准确性的重大挑战(Lin et al., 2024)。

1.2 岩芯直径变形分析

考虑到传统基于岩芯的方法存在的问题和局限性,Funato and ITO(2017)提出了一种称为岩芯直径变形分析(DCDA)的新方法。DCDA方法考虑岩石分别受到最大应力(S_{max})和最小应力(S_{min})且S_{max}>S_{min}。在岩石表面虚拟画一个直径为d_0的虚线圆,如图1a所示。随后,假设去除S_{max}和S_{min},岩石会产生膨胀,如图1b所示。岩石在S_{max}方向上的膨胀量大于S_{min}方向的膨胀量,同时虚线所包围的圆形区域膨胀为椭圆形,该区域最大直径和最小直径分别表示为d_{max}和d_{min}。岩芯柱在切削刃处的横截面(图1c),该横截面是由旋转钻头切出的,因此该横截面应为完美的圆形。然而,远离切削刃的岩芯柱的横截面会随着地应力S_{max}和S_{min}的释放而产生膨胀,且岩芯柱的变形在钻进过程中持续发生。因此,岩芯样品的横截面形状应发生改变,d_{max}和d_{min}如图1d所示。



S_{max}—水平最大主应力;S_{min}—水平最小主应力;d_0—变形前钻孔直径;d_{max}—钻孔变形后长轴直径;d_{min}—钻孔变形后短轴直径;d_θ—参考方向直径;θ—参考方向角度

a—取芯前直径;b—取芯后钻孔直径;c—取芯过程;d—取芯后岩芯直径

图1 钻孔应力释放引起岩芯膨胀示意图

Fig. 1 Schematic diagram of core expansion caused by drilling stress release

(a) Diameter before coring; (b) Diameter after coring (borehole); (c) Coring process; (d) Diameter after coring (core)

S_{max}–Maximum horizontal principal stress; S_{min}–Minimum horizontal principal stress; d_0–initial diameter of the borehole before deformation; d_{max}–long-axis diameter of the borehole after deformation; d_{min}–short-axis diameter of the borehole after deformation; d_θ–diameter in the reference direction; θ–angle of the reference direction

DCDA理论模型表明,差应力(S_{max}–S_{min})与岩芯最大直径和最小直径之差(Δd=d_{max}–d_{min})成正比,且S_{max}的方向与d_{max}的方向一致。这意味着可以根据d_{max}和d_{min}的测量值之差(Δd)估算出差应力(S_{max}–S_{min}),且在岩芯已经定向的情况下,可以根据d_{max}的方向估算出S_{max}的方向。

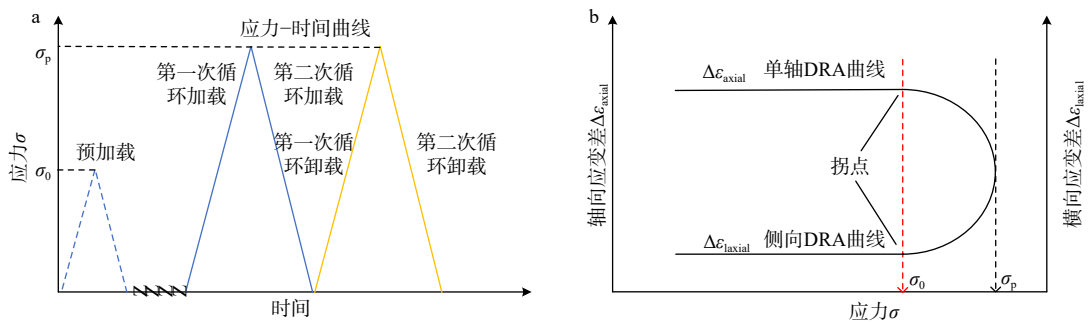
Ziegler and Valley(2021)利用DCDA法估算出岩芯最大和最小水平应力方向以及水平差应力大小,随后将DCDA法结果与钻孔崩落法和应力诱发的岩芯圆盘状破裂(CDF)法数据进行比较,最后发

现利用 DCDA 方法估算得到的地应力量值最为精确。Meng et al.(2025)采用 DCDA 法测量了新疆北天山埋深 500 m 处的二长花岗岩地应力，结果表明利用 DCDA 法获得的岩芯地应力大小与水压致裂结果高度一致。Dargahizarandi et al.(2025)将 DCDA 方法与超声波测绘相结合对岩芯进行周向扫描，从而确定主应力的方位角和倾角，并根据澳大利亚杜加尔德河矿的现场数据进行了验证，建立了基于岩芯 DCDA 的新型三维应力状态估算方法。Li et al.(2023)基于 DCDA 提出了一种简单分析的理论模型，用于确定采矿前沿的双轴应力状态，分析模型可作为一种简单实用的工具在现场快速估算自由采矿面(如巷道面或采场底板)附近的地应力。此外，利用 DCDA 方法时，由于岩芯脱离原位应力场后，理论上仅产生纳米—微米级弹性变形，但钻头切削振动、岩芯管摩擦等扰动会诱发微裂隙。这些微裂隙宽度(0.1μm 至几微米)的累积效应会显著干扰直径变形测量值，导致基于线弹性理论的计算偏差。杨跃辉等(2019)将 DCDA 法应用于松科 2 井 6645～6846 m 深部地应力测试，发现应力释放后的岩芯直径曲线均为正弦波型，呈 π 周期变化，且椭圆长轴和短轴近于正交，测试结果可反映原位地应力信息。许家鼎等(2024)将 DCDA 作为可靠的测试方法之一对青海共和盆地干热岩地应力数据进行测试。

DCDA 方法的有效性已通过室内试验成功验证。与传统的基于岩芯的方法相比，DCDA 方法较为简便，虽然 DCDA 不能直接估算每个地应力分量的大小，但可以将其与其他应力信息相结合来得到。例如，如果在岩芯深度附近进行水压致裂试验，则可以将 S_{max} 的大小估算为 DCDA 的差应力(S_{max}–S_{min})与水力压裂试验的 S_{min} 之和，通过使用从不同方向钻孔获得的 3 个岩芯来估算 3 个主要地应力的大小和方向。

1.3　线性三轴变形速率分析法

变形速率分析(DRA)法是基于测量岩石单轴压缩中 2 个连续加载循环所获得的非弹性应变差进而获得地应力量值的方法。预应力(σ_0)是岩石试样在现场(地应力)或在实验室中人工施加的最大先前应力；σ_p 是 DRA 试验 2 个加载–卸载循环中施加的峰值轴向应力，如图 2a 所示。2 个连续加载-卸载循环的应力-应变曲线如图 2b 所示，并标记了 DRA 试验中第 1 个加载循环与第 2 个加载循环之间的轴向应变差($\Delta\varepsilon_{axial}$)和横向应变差($\Delta\varepsilon_{lateral}$)，DRA 图可定义为轴向或横向应变差与轴向应力的关系曲线，如图 2b 所示，图中最大梯度变化处称为拐点。Yamamoto et al.(1990)通过试验证明，DRA 图中拐点处的应力对应于历史最大主应力(σ_0)。传统 DRA 在非破坏性单轴压缩加载模式下进行，如果试样在加载过程中发生破坏，则 DRA 试验失败。事实上，由于地应力在试验前难以准确估计，因此传统 DRA 试验中施加的 σ_p 至少为岩石试样轴向地应力的 2 倍，即 $\sigma_p \geqslant 2\sigma_0$，目的是找到 DRA 图中的拐点。但如果存在岩芯深度较浅或开采过程中岩芯受损等问题，岩芯的单轴抗压强度较低，会导致传统单轴 DRA 试验失败。



σ_p—峰值轴向应力；σ_0—历史最大主应力；$\Delta\varepsilon_{axial}$—轴向应变差；$\Delta\varepsilon_{lateral}$—横向应变差

a—应力–时间曲线；b—应力–应变曲线

图 2　变形速率分析法示意图

Fig. 2　Schematic diagram for deformation rate analysis

(a) Stress–time curve; (b) Stress–strain curve

σ_p–Peak axial stress; σ_0–Historical maximum principal stress; $\Delta\varepsilon_{axial}$–Axial strain difference; $\Delta\varepsilon_{lateral}$–Lateral strain difference

Fraser et al.(2021)认为三轴 DRA 可以用来准确估算岩石在地下空间所承受的三轴应力状态，并在研究中关注了预加载过程中围压对 DRA 试验的影响。Wang et al.(2024)系统研究了三轴 DRA 围压对地应力测量结果的可靠性，对于软弱岩芯在加载过程中出现的起裂破坏问题，建立了线性三轴变形速率分析(LDRA)，并根据三轴 DRA 图得到拐点与围压关系：

$$\sigma = \sigma^0 + \kappa\sigma_3 \tag{1}$$

$$\sigma^0 = \frac{C}{\sin\alpha\cos\alpha(1-\tan\alpha\tan\varphi)} \tag{2}$$

$$\kappa = \frac{\tan(\alpha+\varphi)}{\tan\alpha} \tag{3}$$

式中，σ^0—单轴 DRA 的预应力的截距；φ—内摩擦角；α—岩石产生的裂纹倾角；κ—梯度，受 φ 和 α 控制；C—岩石内聚力；σ—岩石应力。

在岩芯单轴抗压强度较低的情况下，即传统单轴 DRA 法会产生起裂破坏而无法测量地应力时，LDRA 法可以通过在不同围压下进行三轴 DRA 试验，通过公式(1)—(3)建立围压、裂纹倾角、岩石内摩擦角和内聚力的关系，并使用线性回归重建预应力来实现对低强度岩芯地应力的准确估算。

Ban et al.(2024)基于 LDRA 法通过对致密花岗岩进行循环加载试验，对比横向和纵向应变的 DRA 曲线，分析不同方向精度的差异，并建立离散元数值模型计算，验证试验结果；岩石记忆特性与裂纹闭合、开裂、扩展等演化过程相关，揭示了裂纹演化控制下 LDRA 法的微观机理，推动了 LDRA 法地应力测试的理论发展和现场应用。LDRA 法弥补了传统 DRA 法无法测量浅部软弱岩石及裂隙缺陷较多的低强度岩石地应力的缺点。

1.4 重定向声发射

声发射(AE)是一种由超声波至声波频率组成的弹性波，由岩石快速破裂和摩擦发射产生(Zhuang and Zang, 2021; Anikiev et al., 2023)。由于用于地应力测量的定向岩芯仅能从少数关键地质钻孔或深部巷道侧壁取样中获得，进而限制了声发射法的广泛应用(Bai et al., 2018; Qin, 2019)。

近 10 年来，岩芯定向技术取得了一定进展，其主要解决了地应力测量中方向判定的难题，实现了“应力值+应力方向”的同步获取。Li et al.(2022)提出一种基于无定向岩芯的测量新方法并设计了一套无定向岩芯地面重定向装置，通过分析钻具在钻进力作用下的受力状态，确定钻进轨迹与岩芯表面特征之间的空间耦合关系，建立了无定向岩芯地面重定向的原理，研制了恢复无定向岩芯原始空间方位的方法与装置，详细提出了重定向岩芯声发射(RCAE)方法。

该方法的主要测量流程如图 3 所示，包括适用性分析、野外操作、岩芯重定向、试件准备、声发射测试和应力计算。基于 RCAE 方法，Li et al.(2022)和 Ma et al.(2020, 2022a)随后分别对三山岛金矿、新城金矿和湘西金矿超深地质钻孔(>1000 m)进行了未定向岩芯的重定向及地应力测量，对比基于传统声发射的方法，RCAE 法测量精度较高。

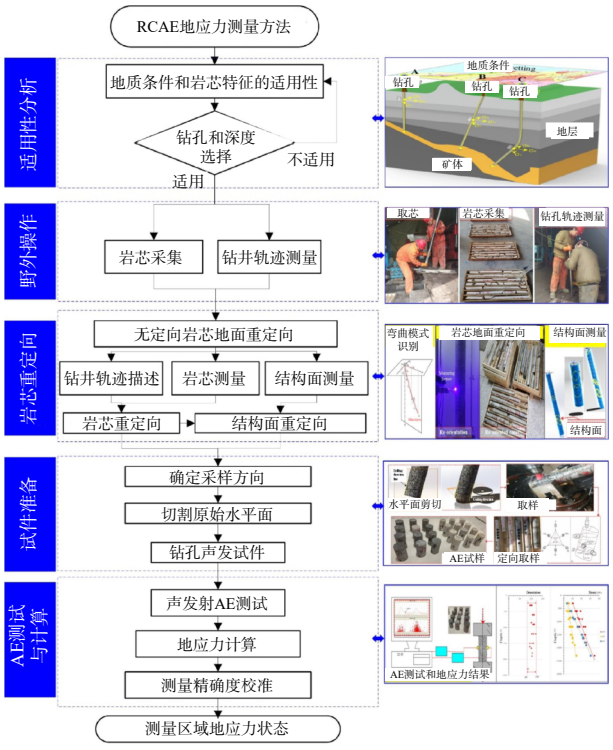


图 3 RCAE 法测量步骤（Ma et al.，2020，2022a）

Fig. 3 Measurement procedure of the RCAE method (Ma et al., 2020, 2022a)

总体上，RCAE 法可以突破无深层地下通道时测量空间受限、测量深度大的难题，且在测量过程中，未定向岩芯可在地面快速重新定向，拓展了普通地质钻孔在深层地应力测量的应用，对于三维地应力测量具有较好的适用性。

1.5 饼状岩芯估算法

“岩芯饼状效应”最早在 1958 年的金刚石钻探中发现。通过饼状岩芯结构估算地应力准确程度

过低，只能作为高地应力的一般性指标。王成虎（2014）认为，由于难以准确确定地应力方向以及获取必要的岩石性质，根据岩芯饼状结构特征获取的地应力信息的可靠性并不及预期。通过岩芯饼状结构估算地应力是一项挑战。

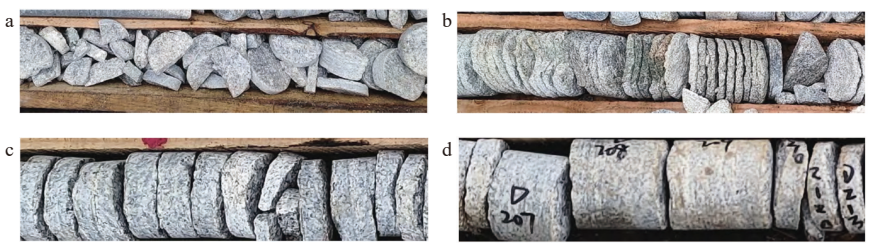
Bahrani et al.（2015）使用连续和非连续计算程序研究了钻孔过程中的应力路径以及钻孔引起的岩芯损伤，并指出利用三维离散元法（PFC3D）模拟钻孔过程将有助于对岩芯饼状效应的理解。Wu et al.（2018）利用 PFC3D 软件建立了离散元模型，通过数值模拟解释了关于饼状岩芯裂缝的 4 个问题：①钻孔取芯过程中裂缝产生的时间；②裂缝产生的位置；③地应力状态（正断层、逆断层、走滑断层）与裂缝间的关系；④饼状裂缝厚度与应力大小的关系。Li and Mitri（2023）应用自主开发的测试系统验证了实验室环境内岩芯饼化所需的应力条件，并分析了岩芯破裂特征、断面形貌与原位应力之间的关系。Tang et al.（2023）在伺服控制钻井试验平台上进行了完整花岗岩岩芯钻进试验，通过岩芯饼状形貌和表面分形维数特征确定饼化岩芯的破坏模式。

闫绍坤等（2024）根据岩芯端口的破坏特征及侧面形态将饼化岩芯为分 4 类（图 4）：破碎状岩饼、薄饼状岩饼、厚饼状岩饼和短柱状岩饼；并考虑岩芯饼化破坏方式、岩饼的几何特征和物理性质以及应力状态，构建了地应力估算公式：

$$\sigma_y=\left[\sigma_t-k_z\left(\frac{L_s}{R}\right)\sigma_z-k_x\left(\frac{L_s}{R}\right)\left(3\cdot\Delta\sigma\cdot\frac{\sigma_c^2}{\sigma_t^2}\right)\right]\Big/\left[k_y\left(\frac{L_s}{R}\right)+k_x\left(\frac{L_s}{R}\right)\right]$$

$$\sigma_x=\sigma_y+3\cdot\Delta\sigma\cdot\frac{\sigma_c^2}{\sigma_t^2} \tag{4}$$

式中，σ_y—钻取前所处部位受到的最小水平主应力；σ_x—水平最大主应力；σ_t—岩石抗拉强度；σ_c—岩石单轴抗压强度；L_s/R—岩饼的计算厚度；R—岩饼半径；$k_x(L_s/R)$、$k_y(L_s/R)$、$k_z(L_s/R)$—与 L_s/R 有关的常数；$\Delta\sigma$—单元面形变前后的应力差；σ_z—垂向主应力。



a—破碎状岩饼；b—薄饼状岩饼；c—厚饼状岩饼；d—短柱状岩饼

图 4　饼化的岩芯分类（闫绍坤等，2024）

Fig. 4　Classification of core discing (Yan et al., 2024)

(a) Fragmented rock disk; (b) Thin rock disk; (c) Thick rock disk; (d) Short cylindrical rock disk

该方法将岩饼破坏形式、几何特征和岩性与原位地应力建立了定量关系，可以作为水压致裂法原位地应力测量的补充完善方法。与既有其他饼状岩芯地应力估算公式对比（Lim et al., 2010），该式考虑因素全面、测量精度易于满足、可以更好地揭示地应力变化规律。但该式以岩芯饼化为拉伸破坏为前提，对于剪切破坏特征较为明显的岩饼并不适用，并且构建地应力估算公式时三向主应力与抗拉强度的关系准则中的系数也由统计得出，岩芯饼化的破坏形式与三主应力的关系还需进一步研究。

总体上，DCDA 法和饼状岩芯估算法更侧重工程快速评估，前者属于定量分析，后者属于定性辅助手段。DRA 在一定条件下提供精度较高的地应力量值；RAE 提供了无损定向测量的新方法。在工程应用中需根据研究目标和现场情况选择相互补充的方法，例如结合 DRA 实验验证 DCDA 结果，或利用 RAE 对地应力方向进行补充。

2　基于钻孔的方法

在地应力测量中，基于钻孔的测量与估算属于一大类方法。王成虎（2014）总结了基于钻孔的测量与估算方法主要有 8 大类：微型水压致裂法、套筒压裂法、原生裂隙水压致裂法、套芯解除、钻孔崩落、孔壁诱发张裂缝、钻孔变形和钻孔渗漏实验。目前，主要改进优化的方法主要有 6 大类：新型水

压致裂技术、修正原生裂隙水压致裂法、改进套芯应力解除法、改进钻孔崩落法、改进钻孔变形法和不规则形状钻孔估算法。

2.1 水压致裂技术

目前，随着千米级深部钻孔地应力测量的发展，现有水压致裂技术面临着地下水位较低、清洁试验用水不足，钻孔穿越深部地层存在大量节理导致稳定性不足，由推拉阀控制的传统单管加压系统或由外置式高压软管与钻杆组成的双管加压系统存在水压密闭性不足，管路渗漏导致压力不足，取芯钻杆系统耐高压性能差等挑战。众多学者对传统水压致裂现场设备不断改进优化，逐步形成了一类新型水压致裂技术。

近10年，在水压致裂法方面较为瞩目的是中国地质科学院地质力学研究所于2019年在雪峰山2000 m科钻先导孔中利用新型深孔水压致裂地应力测量系统在孔深170～2021 m成功开展了深孔原位地应力测量（陈群策等，2019），测量系统在准确性、抗高温高压、抗差应力、密闭性、稳定性及便捷性等方面具有较大突破，在测量区域和测量深度上也是国内原位地应力测量的重大突破，为后续国内外深孔水压致裂法地应力测量提供理论依据和实践先例（李彬等，2022；孟文等，2022；柳禄湧等，2023；张斌等，2023；王润妍等，2025）。

此外在设备技术方面也有不少进展，DFIT（Diagnostic Fracture Injection Test，诊断性压裂注入测试）是一种通过小规模流体注入分析地层应力及裂缝闭合行为的现场测试技术（Liu and Ehlig-Economides，2018）。DIFT仅需注入少量水即可完成地应力测量，能够适用于页岩、致密砂岩等难以形成稳定裂纹的低渗透岩石，同时降低设备成本和作业时间。邬爱清等（2018）针对深部复杂地质条件下传统单管和高压软管与钻杆组成的双管加压系统存在的设备风险问题，以绳索取芯钻杆条件的岩体地应力测试为研究对象，提出了一种新型绳索取芯钻杆内置式双管水压致裂地应力测量方法，并实际应用于云南省滇中引水工程勘察，避免了传统水压致裂法不能直接应用绳索取芯钻杆的问题，更加适用于深孔条件。常方强（2024）在使用新型双管水压致裂测试装置中发现加压管路钻杆密闭性差导致压力下降、封隔段和压裂段无法同时控制导致压裂期间无法控制压力的问题，采用C型接头的双层钢丝高压胶管代替钻杆，研发地面控制系统同时控制封隔段和压裂段加压、泄压，避免封隔段压力衰减的问题，对新型双管水压致裂进一步优化。

王成虎和王仁涛等（2017）基于岩石力学厚壁筒原理研发了多直径岩芯液压致裂岩石抗拉强度快速试验机，利用室内实验弥补了钻杆式水压致裂原位地应力测试系统柔性过大的影响。同时，利用室内和现场水压致裂联合试验（王成虎等，2020），以空心岩柱液压致裂试验获得的岩石抗拉强度取代重张压力计算最大水平主应力来降低钻杆式测试系统柔性的负面影响。杨跃辉等（2024）针对最大水平主应力测量结果误差较大是水压致裂地应力测量方法中存在的突出问题，以测试系统柔度为主要影响因素，较为细致和深入地进行了水压致裂地应力测量的误差分析。王成虎和刘一民等(2018)研发了一种小口径（包括31 mm、42 mm 2种口径）水压致裂地应力测量系统，降低了设备的整体重量和制造成本，相较于传统水压致裂设备能够在同一钻孔内提供更多的数据，降低了观测成本，填补了国内外小直径测量系统的空白。

在水压致裂曲线数据分析方面，近10年中国地质科学院地质力学研究所有较大突破进展，丰成君等（2012）提出的梯级压力测试法（Cyclic Step Pressure Test）为瞬时闭合压力的测定提供了一种高可靠性方法。该方法首先将测段岩层压裂，随后设定初始压力，并按预设压力间隔进行周期性加压/降压测试。在每个压力阶段维持压力恒定，精确记录其稳定流量，最终绘制压力−流量（p-Q）关系曲线。该方法有效排除了人为干扰因素，能可靠获取瞬时闭合压力值，但主要侧重于压力衰减速率及其简单变换，尚未建立有效的物理模型来定量表征裂纹闭合过程。Yang et al.（2025）建立了一个基于总系统刚度（TSS）确定裂缝闭合压力的新方法。该法分解压力衰减速率并估算流体泄漏量，从而将压力衰减曲线转换为总系统刚度曲线，能够清晰地解释裂缝闭合开始和结束的过程。同时该方法确定的闭合压力对时间窗口选择的敏感性降低，可以实时监测裂缝闭合阶段的状态，未来有望在水压致裂法地应力测量数据分析中得到广泛应用。

2.2 修正原生裂隙水压致裂法

为了解决测试岩体抗拉强度的确定问题、破裂压力和诱发裂缝对应问题以及诱发裂缝与最小水平主应力不垂直问题，Cornet and Valette（1984）提出了利用原生裂隙的注水测试来确定原位地应力的

方法，并命名为原生裂隙水压致裂法（HTPF）（王成虎，2014）。该方法在测试过程中存在测试过程过长、测试所需合格原生裂隙数量过大、现场难以满足测试条件的问题，同时应力梯度会造成影响，选定的岩石结构面要保证平面且闭合。

针对水压致裂法存在的关键技术瓶颈，王成虎和邢博瑞（2017）提出了修正原生裂隙水压致裂原位地应力测量方法（M-HTPF）法。修正方法通过进一步假定原位地应力场分布规律来实现地应力张量的求解。基于摩尔库伦理论，通过建立结构面上广泛存在的法向应力和剪切应力关系优化方程组求解条件；利用最小二乘法和计算机程序试错搜索原生裂隙面摩擦系数的办法反演原位地应力张量，同时为了保证计算机程序反演收敛，至少需要 5 条原生裂隙。高桂云等（2024）基于 M-HTPF 法优化了原生裂隙面剪应力假定，并结合常规水压致裂法的钻孔截面应力状态，建立了观测值方程组；利用蒙特卡罗算法，实现了倾斜钻孔中三维应力张量反演。该方法大大降低了对原生裂隙数目的要求，反演得到的数据离散性更小、稳定性更高，并成功应用于天津蓟州某抽水蓄能电站倾斜钻孔的三维地应力测量中。

2.3　套芯应力解除法

套芯应力解除法是基于钻孔的地应力测量法中目前应用最广的方法之一，近些年众多学者针对套芯应力解除法从技术手段到测试设备都做了很多优化，这些改进大致针对这 5 方面：空心包体应变计法、CSIRO（澳大利亚联邦科学与工业研究组织）应变计法、压磁应力解除法、光纤光栅传感应变计法、基于钻孔（孔径、孔壁、孔底）的变形计法。

常规空心包体应变计法在深部高地热钻孔中，地层温度变化大会引起较大测量误差，且无法满足在深部复杂地质环境下长期监测的需求。李远等（2017）提出了基于双温度补偿的瞬接续采型空心包体地应力测试方法，研发了前端数字化型空心包体应变计，采用前端数字化设计，克服了常规探头测量中长导线引起的传输信号衰减、干扰钻进等问题，双温度补偿算法可以克服高温对数据采集的影响，得到的应力解除曲线真实全面反映出深部钻孔钻进过程中岩芯缺陷、构造扰动、温度变化。此外，受套孔技术水平和钻孔地质影响，岩芯套孔时还会存在不同程度的偏心，对弹性模量率定产生严重影响（邵兆刚等，2003），由此产生较大的测量误差。吴培楠等（2024）提出了基于内、外压加载方式下的偏心岩芯弹性模量率定系数，并结合空心包体修正系数对含空心包体偏心岩芯的弹性模量率定计算进行近似修正法，由此可以准确获得套孔偏心岩芯弹性模量和测点地应力。

近些年随着地应力测量钻孔深度的增加，岩体非线性行为不断突出，传统 CSIRO 应变计法测量数据具有较大误差。李远和刘子斌等（2018）将瞬时采集、断电续采数字化技术引入 CSIRO 应变计，实现在扰动应力长期监测中的应用（Li et al., 2019）。在地应力计算中，乔兰等（2019）研发了一个高压双轴试验仪器来模拟深部岩体的应力水平，提出了一种非线性弹性模型应用于 CSIRO 应变计测量计算中，该模型将岩石非线性行为考虑在内，比传统的线性模型具有更高的拟合度。张亦海等（2019）进一步通过双曲线函数拟合出岩石的体积模量和剪切模量与岩石三向受力状态下平均应力函数的参量，并将其应用到 CSIRO 地应力测量方法中高围压率定公式计算中，为深部地应力测量提供了非线性计算方法。

压磁应力解除法是广义套芯应力解除法的一种，是基于磁致伸缩原理设计的。吴满路和张重远（2016）对压磁应力解除法进行全面改进，研制了新型压磁应力解除测量系统，将新型压磁测量探头、电动加力装置、电子罗盘定向装置安装组成压磁应力解除测量系统，通过高频率浅激化、比较测量加上智能信号处理技术提升测量精度，成功在北京温泉钻孔对新型压磁应力解除测量系统进行了试验测试，将钻孔测量深度大幅提升至数百米。在此基础上，李邵军等（2021）研发了可以自动测量及采集数据的数字集成系统，使改进压磁应力解除测量系统实现数据实时连续存储在闪存内，消除了信号传输中衰减的影响，接入计算机即可处理数据，简化了压磁应力解除系统的测量流程。

近年来，一些学者基于光纤光栅传感技术研发了地应力测量应变计。Liang et al.（2022）提出了一种三维应力地应力传感器的设计原理，推导了光纤光栅测量应变与三维应力传感器三维应力之间的数值关系；进而研发了一种基于光纤光栅传感技术的三维地应力传感器，用于测量三维地应力，可以有效克服深部钻孔高地温带来的温度影响。李邵军和郑民总（2024）在深埋硬岩隧洞复杂地质环境背景下，研制基于光纤光栅的三维扰动应力测试系统。该系统主要包括光纤光栅空心包体传感元件、

钻孔多点分布式测试装置、光纤光栅解调仪和信号传输系统，并依托锦屏深部实验室测试了原位地应力。光栅光纤传感技术还能够为深埋硬岩地质条件下地应力测量进行提供长期连续监测。

孔底应变计的原理是套孔解除岩芯应力后小钻孔底部的孔径会发生变化，通过在钻孔底部锥形钻孔壁上布置一系列应变片记录这一应变变化量，并结合岩石力学理论和数值模拟反演得到钻孔周边三维应力状态。由于测量操作复杂困难，相较于孔径和孔壁在国内使用率较少，为了提高普适性，赵善坤等（2021）自主研发了直径为 47 mm 的小孔径圆锥式孔底应变计，并研制了配套的圆锥形钻头，简化了操作程序，提升了测试精度，还可以与光栅光纤传感技术结合起来。王超等（2022）针对应力解除法在垂直深孔地应力测试中的难题，基于孔径变形感知、显微成像和方位识别等工作原理，提出一种适用于垂直深孔的应力解除法地应力测试技术，能够实现高地温、高水压垂直深孔中多方向孔径变形的准确测量。赵顺利等（2023）针对裂隙发育地区的弹性参数变异特点，推导了孔径变形法三维地应力计算模型，并提出 3 条裂隙发育区的孔径变形法测试数据筛选原则。该原则一定程度上可以剔除离散的地应力数据，可作为孔径变形的补充法。

总体上，空心包体应变计与 CSIRO 应变计精度较高；压磁应力解除法测量流程简便，实现快速响应；光纤光栅法能够克服高温等复杂地质条件并实现长期分布式监测；钻孔应变计操作复杂困难但普适性强，可以成为经济实用的替代方法。

2.4 钻孔崩落法

钻孔崩落是指由于钻孔引起的应力集中而导致孔壁伸长。对于垂直钻孔，崩落方向平行于最小水平主应力（σ_h）方向。

目前，基于钻孔崩落法测量地应力常用的模型为应力多边形理论。利用由覆盖层估算的垂直应力、钻孔引起的拉伸破坏以及相邻断层的摩擦系数来估算水平主应力大小，但应力多边形法只能得出水平主应力的可能范围，无法获得准确的应力值。由此，Song and Chang（2017）提出了一种概率方法，将单轴抗压强度和内摩擦角的统计分布应用于应力多边形，每 30 m 深度一次，该概率模型可以得出确定的应力大小。Lin et al.（2020）提出了一种基于机器学习的克里金模型从钻孔崩落数据中估计空间分布的新方法，克里金法常用于解决地应力空间问题。由于崩落几何形态具有应力依赖性，由此分析了崩落几何形态、水平主应力和岩石强度的空间相关性并预测水平最大主应力的大小。在成像设备层面，Wang et al.（2022）利用多种阵元组合进行钻孔崩落轮廓扫描，通过分析钻孔崩落法计算原理和多阵列阵元超声扫描求解算法的推导，研制了一种多阵列超声扫描装置，可获取任意深度的钻孔崩落形态数据。除获得崩落观测数据外，还需要运用失效准则预测崩落时的应力值。在失效准则方面，Trzeciak and Sone（2024）提出了一个简单的经验准则，定义为最大主应力与中间主应力的空间二阶多项式。该准则的参数可以使用多轴强度数据测量，也可以基于多轴数据进行估算，可以直接将中间主应力影响加入钻孔崩落应力分析中，明确控制与中间主应力相关的强化量，以及评估应力估算不确定性。Trzeciak et al.（2022）还提出了一种新型热致钻孔崩落法，用于测量未发生崩落区域的最大水平主应力。该方法通过加热孔壁产生应力诱发崩落进一步发展，诱发热应力可以通过测量钻孔壁周围的温度来计算。该方法利用破裂起始点温度作为判断依据具有显著优势——无需测量破裂带宽度，而该宽度值源于复杂的非线性岩石破裂过程。

对于钻孔崩落的成像，成像测井具有分辨率高以及定向的特征，可以通过拾取井壁崩落、钻井诱导缝等特征实现地应力方向评价（Lai et al., 2018; 赖锦等, 2021）。Mafakheri et al.（2022）通过声电成像测井测试了深度在 1600～2240 m 之间的详细井眼崩落和钻井诱导拉伸破裂（DITF）数据，确定了最大、最小水平主应力方向，进一步突破了测井深度。Baouche et al.（2023）通过声学成像测井识别了钻井诱发的拉伸裂缝和压缩破坏，即崩落（BO），通过相对地应力大小确定了应力状态。光学成像测井在近些年也取得了一定改进。将摄像头等光学传感设备安装在钻头或钻杆上，随着钻进持续记录孔壁周围的图像，以实时获取井下岩芯或钻孔壁面的图像信息，实现了深孔高温（200 ℃）高压环境下彩色成像，在岩石裂缝识别与探测中具有明显应用效果，同时可以判断岩石裂缝渗透性（陈念等, 2021; 向英, 2024; 张云骥等, 2025）。此外，地层倾角可以由岩石层面的走向确定（Maliva et al., 2009），还可以通过测井中的电阻率曲线确定（Moreau and Joubert, 2016）。使用 Geoframe 或 Techlog等软件，将盲正弦曲线拟合到展开的钻孔图像上相同电阻率的地层，可以确定构

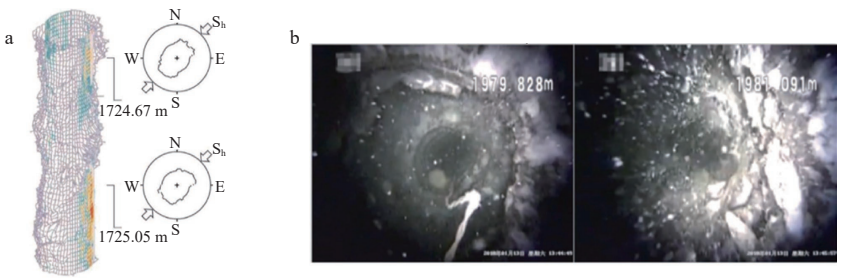
造和构造特征的真实倾角(方位角和倾角)。然后，可以通过分析钻孔图像的地层倾角模式进行地层倾角分析，进而判断井壁崩落方位，从而获得地应力方向(Brekke et al., 2017)。目前，随钻技术在地层倾角测井中较为常见，段友祥等(2018)利用随钻自然伽马测井数据识别地层倾角，较好地实现了地层倾角的自动识别。但地层倾角测井技术分辨率受到测井间距限制，易受钻井液侵蚀或工具偏心干扰，因此仅可作为弥补点式测量(如水压致裂)不足的补充方法。

2.5　钻孔变形法

近年来，随着地应力测量的深度不断增加，遇到高温高压等复杂地质环境，钻孔变形分析法属于非破坏性、测量方法，在变形量的观测技术上有不少突破。李邵军等(2021)设计出基于孔径变形法原理的无线地应力测量变形计，实现了孔外应变仪、孔下无线探头一体化的装置研发。变形计的测量元件安装在变形计内部，不与钻孔岩壁直接接触，实现对钻孔变形的稳定测量。Han et al.(2021)提出了一种新的间接钻孔变形测量技术，该技术基于四臂卡尺捕获的钻孔弹性变形来估算最小和最大水平地应力，并基于钻孔的周长/几何形状相对于其初始周长的变化而进行。Roshan et al.(2023)基于声学电视观测器(ATV)数据捕捉的钻孔变形来估算地应力。Han et al.(2023a)针对高温、高压复杂地质条件，提出了一种基于断面钻孔直径变形的地应力测量新方法，以钻孔变形后的椭圆形状为出发点，研制了一种多接触式微光学成像量规(BDD 计)。该量规采用光学成像测量方式，避免了深孔环境温度的影响。随后，Wang et al.(2023)为简化钻孔直径变形分析与地应力计算过程，研制了钻孔直径变形测量装置，解决了深垂直孔测量中高温高压影响大、数据传输困难、设备安装不便等问题，实现了多向直径变形测量。在钻孔变形理论研究方面，马天寿等(2024a)针对深层油气井钻探工程地应力测量，基于非均匀水平地应力条件下钻孔变形与地应力状态关系，推导了利用钻孔变形反演水平地应力的模型。该模型适用于深井钻探工况，为深层油气井水平地应力原位测量与反演提供新理论。

2.6　不规则形状钻孔变形估算法

目前，大多数地应力测量测试技术仍针对浅孔进行，孔径不规则性不显著。然而，如果深孔中存在明显的椭圆形、不规则现象，这些特征将直接影响孔壁的应力应变分布(图 5)。近年来，钻孔几何不规则性对钻孔技术的影响开始受到广泛关注(Zang et al., 2013)。Han et al.(2023b)通过解析法证明了二维地应力作用下的钻孔截面形状为椭圆形，并建立了钻孔截面形状各几何参数与主应力大小的关系。王川婴等(2019)建立了应力与变形后圆孔几何参数的关系，实现基于钻孔椭圆参数的应力解算，并提出钻孔椭圆参数的测量方法和测量技术。Qin et al.(2023)基于弹性力学复变函数法，提出了一种考虑不规则钻孔形状的地应力释放校正方法，引入保角映射函数将不规则形状投影到单位圆上，并采用柯西积分法求解孔壁应变与远场地应力分量之间的关系。将钻孔的不规则形式用粗糙度、冲蚀、键槽和崩落来描述，如图 6 所示，红色虚线代表完美圆形的钻孔形态，蓝色实线代表圆形钻孔变形后的形式，并阐述每种形式对地应力计算误差的影响。但该方法仅适用于特定主应力分量平行于钻孔轴线的平面应变状态。对于深钻孔或水平孔中开展相关的地应力计算，应将该方法进一步扩展到

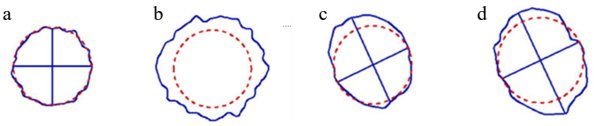


a—德国 KTB 钻孔孔壁形态；b—不规则钻孔形态

图 5　使用各种成像设备拍摄的深孔不规则特征图像

Fig. 5　Images of the irregular features of a deep borehole, acquired with various imaging equipment

(a) German KTB borehole wall morphology; (b) Irregular borehole morphology



红色虚线代表完美圆形的钻孔形态，蓝色实线代表圆形钻孔变形后的形式

a—粗糙；b—冲蚀；c—键槽；d—崩落

图 6 深钻孔中 4 种典型的不规则钻孔

Fig. 6 Four typical irregular cross sections of a deep borehole

(a) Roughness; (b) Washout; (c)Key seat; (d) Breakout

The red dashed line represents the perfectly circular borehole shape, while the blue solid line represents the deformed shape of the circular borehole.

广义平面应变问题。

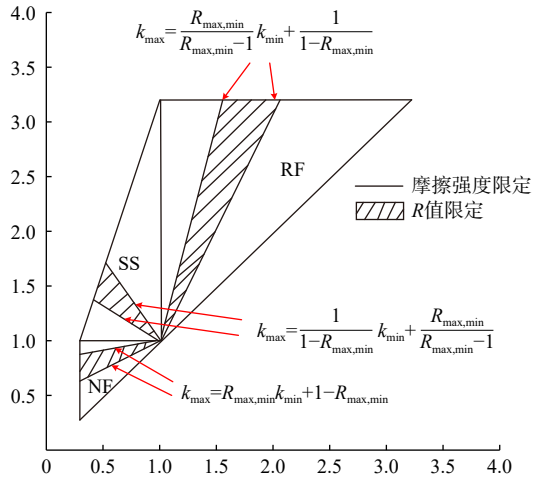
目前，基于钻孔的测量方法，水压致裂法适合深孔测量，具有普适性和先进性，HTPF 法巧妙利用原生裂隙简化测量步骤。改进套芯应力解除法适用于浅孔或关键位置地应力测量，但成本与操作要求较高。钻孔变形观测方法（崩落法、变形法）相对简便、可连续测量、成本较低且能提供应力方向信息。不规则钻孔变形估算法的提出增强了对实际工程中常见的不规则钻孔的应力修正。在实际工程中，往往需要多种方法相互结合、验证以获得更精确的结果。

3 基于地球物理的方法

目前基于地球物理测量地应力的主流方法主要为采用震源机制解反演地应力场。同时，在地球物理探测技术上面，近年来基于地球物理声波测井技术具有较多创新。

震源机制表示地震发生时的力学过程，因此震源机制解资料很自然地被用于研究构造应力场，且能推断深部地壳应力状态。近年来，随着地震监测台网的加密与震源机制反演技术的迭代，利用小震（尤其是 0.5～1.0 级微小地震）数据反演地应力场已成为地应力研究的重要突破。这一进展不仅拓展了数据源的规模与时空变化率，更显著提升了应力场反演的可靠性。Wang and Wang（2020）通过基于微小震震源机制解与应力多边形的联合预测方法对研究区深部侧压力系数与地应力量值成功进行了预测，如图 7 所示。

罗钧等（2015）通过 CAP（Cut And Paste）方法波形拟合求解震源机制解，提高了机制解的精度，反



NF—正断层；SS—走滑断层；RF—逆断层；k_{max} 和 k_{min}—最大水平侧压力系数、最小水平侧压力系数；$R_{max,\ min}$—最大、最小差应力比

图 7 微小震震源机制解联合应力多边形反演地应力场

Fig. 7 Inversion of the in-situ stress field from focal mechanism solutions of micro-earthquakes combined with stress polygons

NF–normal fault; SS–strike-slip fault; RF–reverse fault; k_{max} and k_{min}–maximum and minimum horizontal pressure coefficients; $R_{max,\ min}$–maximum and minimum differential stress ratios

演了香格里拉中强地震序列。Vavryčuk（2014）利用迭代技术对震源机制解进行改善，能确定准确的应力形因子并为应力场和断层方向提供了更为可靠的估计。Yang et al.（2018）基于西藏东部 2176 条震源机制，通过阻尼线性反演技术得到了西藏东部上地壳高分辨率的应力场。Tian et al.（2019）利用 287 个永久性和临时性区域台站记录的宽带波形，得到了 2008 年 1—5 月在云南发生的 627 次 $M\geqslant 3.0$ 地震的震源机制解，并采用阻尼反演方法，获得该地区应力场的区域变化，能够快速准确地计算最大主应力方向。

微小震数据在地应力场中的反演标志着“以量补弱”范式的成功——大量密集的数据统计分析，精确全面反演出地应力场的时空变化过程，推动地应力研究进入“全时域、高灵敏”新阶段。

在地球物理探测方面，随着深部地应力测量的发展，深部反射波测井技术有了很大的优化提升，确保了钻孔成像的质量。岳文正和田斌（2022）采用深探测反射波测井方法，利用 Shearlet 变换去除阵列声波测井数据中的滑行波，从而准确提取高分辨率反射波；结合井周层析速度成像获取径向速度剖面分布，进而优化偏移算法以改善深部井周反射界

面成像效果。远探测声波测井测量的是纵波反射波或模式转换波，对反射波进行提取及反射波偏移成像，可以得到井旁裂缝或地质构造的图像（刘航等，2023）。此外，随着随钻声波测井技术在近年来的蓬勃发展，随钻测井与电缆测井成为获取井下岩石物性数据的关键途径（喻著成等，2023）。作为随钻测井的核心技术之一，随钻声波测井可在钻井作业过程中实时监测异常地层压力、分析流体特性，有效缩短作业周期并降低成本（吴晓光等，2016）。当前主流仪器主要有斯伦贝谢的 Multipole Sonic-While-Drilling Service、哈里伯顿的 Crossed Dipole Azimuthal Sonic 等，其均能在钻进时连续稳定地获取纵、横波等声学数据，更好地为钻孔崩落分析、孔壁诱发张裂缝等地应力方向的确定提供技术支撑。

4　基于数据驱动的地应力预测新方法

随着人工智能的不断发展，基于数据驱动的地应力预测新方法应运而生，这也代表了地应力测试未来的重要发展方向。这类方法的核心思想是充分利用既有数据（包括钻孔参数、测井曲线、震源机制解、岩石物理力学参数等），并结合先进的人工智能方法（图 8）。人工智能方法基本原理主要有输入数据、智能预处理、协同特征工作、预测模型、输出数据 5 个步骤。众多学者在预测模型部分不断探索优化，当前主要方法有机器学习模型（ML）、神经网络预测方法（NNP）和智能反分析法（Intelligent Anti-Analysis）3 大类，基于此来构建反演原位地应力场并对地应力状态进行预测。

此外，近 10 年来地应力数据库和模型研究方面也取得了很大进展。2014 年公共应力模型（CSM）的提出、2016 年最新版世界应力图（Koptev et al.，2013）和 2018 年中国大陆地壳应力环境基础数据库（谢富仁等，2007）、中国及邻区现代构造应力场图均为地应力预测新方法提供有力数据支撑。

4.1　机器学习模型

基于机器学习的地应力预测方法是近年来地应力测试与人工智能交叉领域的重要突破，其通过数据驱动模型克服了传统方法在深部复杂地层中的局限性，显著提升了预测的精度和效率。

针对钻孔崩落的应力多边形法只能得出水平主应力大小的可能范围而无法获得准确应力值的问题，Lin et al.（2020）提出了一种基于机器学习的克里金模型从钻孔崩落数据中估计空间分布的新方法，采用局部正交交叉验证（LOOCV）方法，验证了克里金模型的预测精度，并发现实验数据的平均克里金预测误差较高，更高精度的预测值则需要更丰富广泛的数据库。Ibrahim et al.（2021）通过 3 种不同的机器学习技术，包括随机森林（RF）、函数网络（FN）和自适应神经模糊推理系统（ANFIS），利用测井数据预测最大水平主应力（σ_H）和最小水平主应力（σ_h）。在预测 σ_H 上，3 种模型预测结果相似；在预测 σ_h 上，ANFIS 优于其他 2 个模型。Lin et al.（2022）从机器学习的角度出发，通过模型对比验证对 σ_h 进行预测，发现人工神经网络（ANN）模型对现场数据的估算结果最为准确。该方法有潜力成为一种替代的地应力估算方法。Xiang et al.（2025）基于 ANN 针对钻孔崩落法进一步开发了一种反向传播神经网络（BPNN）模型，可以根据钻孔崩落形态估算 σ_H 和 σ_h 的大小，并利用澳大利亚 2 个矿区的现场数据对

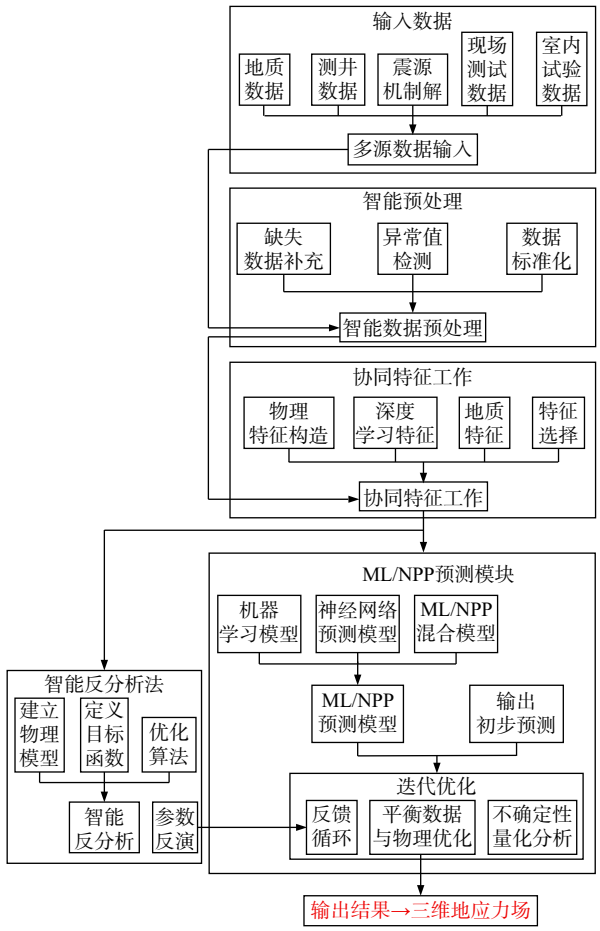


图 8　基于数据驱动的人工智能方法（ML/NNP/Intelligent Anti-Analysis）工作原理图

Fig. 8　Working principle flow chart of the data-driven artificial intelligence method (ML/NNP/Intelligent Anti-Analysis)

模型进行了验证。冯鹏等(2022)针对煤层地应力测量预测,采用支持向量机回归方法建立煤层最小水平主应力预测模型,并成功应用于对鄂尔多斯盆地韩城区块H3井组煤层地应力的估算。机器学习模型逐渐将地应力从测不到、估不准转变为可估算、可预测。但由于既有深部数据缺乏导致基于现有数据训练模型仍存在误差,且难以将钻孔、岩芯等实验级(厘米级)数据与地震勘测级(千米级)数据建立有效映射关系。

4.2 神经网络预测模型

近年来,随着神经网络预测(NNP)在地球科学领域的广泛应用,学者们越来越多地探索其在地应力预测问题中的应用。然而,专门针对地应力的神经网络预测研究仍处于起步阶段。

Han and Yin(2018)基于钻孔变形数据,应用人工神经网络(ANN)构建了形变与地应力间的映射模型。马天寿等(2022)、Ma et al.(2022b)以测井解释获得的单井地应力剖面为特征,设计了一种融合卷积神经网络(CNN)、双向长短期记忆网络(BiLSTM)和注意力机制的混合神经网络模型,成功实现了页岩水平井地应力的高精度预测。Garavand and Hadavimoghaddam(2023)首先通过有限元模拟生成不同地应力条件下的井壁崩落形态数据集,继而训练梯度提升决策树(XGBoost)、轻量级梯度提升机(LightGBM)、分类提升算法(CatBoost)和自适应提升算法(AdaBoost)4种模型,最终应用于地应力的反演预测。张文东等(2018)构建了多个子预测模型,通过随机抽样训练各子模型,并利用优化算法进行线性集成,以子模型投票的优胜结果作为最终的地应力预测值。刘泉声等(2020)运用支持向量回归(SVR)算法优化应力边界条件参数,确定最优边界后,再施加于有限元模型以间接推演地应力场。袁多等(2021)依据层速度、地应力及叠后地震信息间的定量关联,结合BP神经网络与模拟退火算法,建立了适用于不同油田工况的地应力三维预测方法。Fang et al.(2022)提出了基于井壁变形的地应力预测模型,选取对横波时差敏感的测井参数,如纵波时差、密度、自然伽马辐射等,利用ANN进行训练,预测了横波时差。马天寿等(2022)同样基于测井数据,利用双向长短期记忆神经网络(BiLSTM)模型预测了单井水平地应力。

国内外学者基于神经网络预测模型开展了一定的地应力预测和研究工作,为数据驱动的地应力预测开辟了新的发展方向。但目前的应用主要适用于一维单井地应力剖面的预测和二维模型的开发,对三维方法的探索有限。三维地震数据的利用潜力在很大程度上仍未得到充分开发。此外,地应力的复杂性及其受多种地质因素的影响,使得从多源数据中提取相关特征以及将实际岩石储层信息整合到地应力建模中面临巨大挑战。解决这些挑战对于推进机器学习在三维地应力预测中的应用至关重要。马天寿等(2024b)建立了一种基于物理约束的分布式神经网络三维地应力预测模型,将测井数据和三维地质模型的三维空间坐标输入3个并行的全连接神经网络,引入地应力物理约束条件,提出了数据和物理双约束的条件,进而通过三维空间坐标实现三维地应力场的预测。Lyu et al.(2024)提出了一种基于胶囊网络-双向长短期记忆网络(CapsNet-BiLSTM)混合模型的三维地应力预测方法,综合考虑地质特征、地震属性等多种因素,并融合了CapsNet的空间关系建模能力和BiLSTM的时间建模能力,更好地刻画了岩石储层的各向异性特征和时间序列信息,实现了三维地应力更准确的预测。总体上,神经网络预测模型为三维地应力的预测开辟了新的研究方向。

4.3 智能反分析法

反分析法本身是基于地下空间的地应力预测方法,通过地下空间开挖后围岩变形过程求得岩体弹性模量或变形模量估算地应力状态。近年来,多元线性回归、机器学习方法和优化算法逐渐被引入到地应力场反演分析中(Zhang et al., 2016; 王庆武等, 2018)。这些方法基于实测应力和位移,用于优化数值模型的边界条件,确保模拟结果与真实情况更加接近。除此以外,地应力场的特征也可以通过地质历史、地质构造、地形地貌、岩石类型、节理裂隙等因素推断出来(Jo et al., 2019; Pham et al., 2020);同时,也可将重力和构造运动的影响考虑进去(Yan et al., 2016)。

然而,既有的反分析法在估算地应力场时,缺乏对上述信息的综合利用,可能会影响预测的精度,反分析法的发展逐渐趋于数据化、智能化和综合化。(Pu et al., 2021)采用多输出决策树回归器(DTR)来建模初始地应力场与其影响因子之间的关系,该模型可以基于有限个样本数据对原位地应力场进行简单的反分析,为神经网络等先进的智能化方法提供前处理结果。Pei et al.(2023)提出一种考虑应力加权因子(SWF)的地应力场反演新方法,通过宏观分析区域地质构造、地形特征以及勘探平洞

围岩破坏现象，结合赤平投影分析，获取代表性数据。Zhao and Feng(2023)基于多源信息估算地应力状态(包括地质历史、地质构造、地形、岩石类型、节理和实测应力)，将多元线性回归和粒子群优化(PSO)方法与极限学习机(ELM)方法相结合，引入智能反分析，识别隧道沿线地应力的方向和大小，是当前考虑参数较为全面的先进智能反分析法。

4.4　地应力数据模型

公共应力模型是一套用来描述区域岩石圈的应力应变张量的模型，主要为其他公共模型提供更好的应力场约束。公共应力模型(CSM)由美国南加州地震中心(SCEC)在 2012 年 2 月 1 日—2017 年 1 月 31 日期间倡导提出，包括公共应力模型和应力加载模型。但 SCEC 的公共应力模型在很大程度上依赖研究人员的个性化研究，到目前为止依然没有像世界应力图(World Stress Map, WSM)那样提出模型构建的基本原则和规范流程方法。

近 10 年来，2018 版的世界应力图为较主流的世界地应力数据支撑，该图反映了全球岩石圈应力场的总体和分区特征(Heidbach et al., 2018)。目前世界应力图从 2017 年已经开启了第 4 阶段的编图计划，除了对应力方向数据进行进一步精细化研究外，还考虑利用测点和不完整的应力量值数据来构建三维地质力学数值模型，进而展示应力场的三维空间连续分布特征(Rajabi et al., 2017)。这也是世界应力图计划为了更好地展示地应力张量数据而做的重要努力。

国内主流的地应力数据支撑来源于中国大陆地壳应力环境基础数据库(简称应力数据库)、中国及邻区现代构造应力场图(Hu et al., 2017)。两者的建立为中国及其邻区板块运动等地球动力学研究提供了基础约束，其应力数据划分标准也为后续应力数据库和应力图编制制定了世界公认的规范和流程。同时，正如世界应力图的数据质量分级标准是世界应力图计划的基石和支柱一样，如果要对应力量值数据进行建模和标准化分析，就需要建立相应的规范，目前通行的做法是利用大量的数据开展标准差计算来评估数据的不确定性(Morawietz et al., 2020)。

未来，一个规范普适的区域构造应力模型必须融合多尺度的数据、考虑应力场随时间演化的特征、呈现地应力张量的三维特征，以适应地球物理场模拟向四维模型发展的需求，更好地为地应力预测提供数据支撑。

5　讨论与展望

5.1　讨论

上述内容为近 10 年(2014—2025 年)地应力测试方法的主要进展回顾，不同的方法具有不同的进展之处和优劣点，具体分析见表 1。基于岩芯、钻孔和地球物理的方法主要是在既有的测试方法基础上进行技术的创新，无论从设备的简化还是计算准则的修正上，均可以帮助人们提高地应力测试的准确性。基于数据驱动的新方法是近些年来新兴起的研究方法，可以基于既有的地应力数据库通过人工智能模型训练对未来地应力场时空变化进行预测。但人工智能模型依赖大量高质量标注数据训练，而地应力原位测试成本高昂，且受地质复杂性影响，目前面临实测数据稀疏且分布不均、地应力多源数据融合困难、岩石非均质性与尺度效应造成较大误差、极端环境的可靠性存疑等问题。所以未来更需要依靠机理与数据结合双驱动，才能实现地应力测试从“经验拟合”到“智能推演”的范式跃迁，为深地开发与灾害防控提供可靠支撑。

当前，随着中国 CZ 铁路、YX 水电站、核废料地质处置库选址等大型深部地下工程建设的深入开展，深部地应力测试及特征的研究需求越来越迫切，同时遇到的高地应力、强水热活动及强构造活动等极端复杂地质情况越来越多。因此，仅依靠单一的某种测试方法难以得到准确的地应力信息，需通过多种测试方法组合创新、多测试设备集成研发实现可靠测试。首先，将钻探设备与测试传感技术结合，准确测量地应力数据；同时，构建深孔地应力动态监测系统，通过应力、应变、温度等传感技术，实时记录强构造活动区地应力动态演化过程；其次，强化多物理场耦合分析与智能反分析，基于高温、高压及流体作用下规律揭示水热活动对地应力的影响机制，并利用人工智能方法和数值模拟实现各向异性岩体的应力场建模，最终形成“钻测协同−动态监测−多场智能反演”的综合方法体系，显著提升极端地质条件下超深孔地应力测试的数据可靠性，为深部工程安全与地质灾害防控提供核心支撑。

5.2　展望

当前，随着人工智能的不断发展，地应力测试技术也正经历智能化、动态化、高精度化的飞速突

表 1　2014—2025 年地应力测试方法主要创新

Table 1　Major innovations in in-situ stress testing methods over the past decade (2014–2025)

方法类别	方法名称	应力信息	适用范围	近19年进展	优点	缺点	适用行业或工程建议
基于岩芯的方法	非弹性应变恢复(ASR)法	应力大小、方向	破碎、深孔、软岩地层	钻孔现场ASR法地应力测试系统、ASR柔度修正	对于深孔经济有效	应力与ASR柔度关系尚存缺陷；取芯后须尽快测试	深部采矿、软岩大变形工程、干热岩等
	岩芯直径变形分析（DCDA）	应力大小、方向	深孔、硬脆性岩石	高分辨率数字图像相关(DIC)技术应用	非破坏性、成本低	仅获相对应力，依赖岩芯完整性	矿业、土木(隧道、洞室、大坝)、能源(油气、地热)和核废料处置
	线性三轴变形速率分析法	三维应力张量	深孔、硬脆性岩石	弥补了无法测量低强度岩石缺点	非破坏性、成本低	仅获相对应力，依赖岩芯完整性和时间性	深部采矿(软岩/高应力)、深埋隧道(挤压围岩)、盐岩相关工程(油气钻井、储气库)、高温地热储层
	重定向声发射(RAE)	应力大小、方向	广泛	将重定向技术融合进声发射	准确量化方向	设备依赖性	深地工程(>1000m)(采矿、储气库、水电站)和区域地质灾害防控
	饼状岩芯估算法	应力大小、方向	高应力地区、硬岩	公式量化	快速估算垂向应力	仍具有一定误差性	高地应力深部采矿、隧道及地下洞室工程补充方法
基于钻孔的方法	水压致技术	应力大小、方向	广泛、深孔	提升钻杆系统耐高压、密闭性	设备简便、操作简单	最大主应力量值误差大	较成熟、广泛，与地球物理测井、数值模拟组成系统
	修正原生裂隙水压致裂(HTPF)法	三维应力张量	有限的条件	实现三位应力张量反演	设备简便、操作简单	依赖天然裂隙产状精度	裂隙较为发育的岩体工程
	空心包体应变计	应力大小、方向	广泛、完整岩石	获得套孔偏心岩芯弹性模量	浅部快速勘探、完整岩体、高精度短期测试	安装工艺复杂	浅部矿山、水利水电岩体工程
	澳大利亚联邦科学与工业研究组织CSIRO应变计	应力大小、方向	广泛、完整岩石	引入瞬时采集、断电续采数字化技术	深部工程(>500m)、高裂隙岩体、长期监测	点测量、适用性有限	浅部矿山、水利水电隧道等裂隙较为发育的岩体工程
	改进套芯应力解除	应力大小、方向	广泛	智能信号处理，实现深孔测量	设备简便、操作简单	适用性有限	矿山隧道、油气钻井、地质灾害监测
	压磁应力解除	应力大小、方向	广泛	光导纤维为载体，通过在光导纤维内部刻入光栅，测量和传输传递信号	设备简便、操作简单、耐高温高压、抗腐蚀	安装工艺复杂	核废料处置等高地温地下工程
	光栅光纤传感技术	应力大小、方向	广泛	实现变形感知、显微成像和方位识别	设备简便、操作简单	仅点测量、代表性有限	水利水电、隧道工程复核等
	钻孔壁/径/底变形测量法	应力大小、方向	浅孔	改进失效准则、拓展至热致裂	直观可视化	仅获方向信息，不适用于软岩	川藏铁路隧道工程等高地应力破碎带地区
	改进钻孔崩落法	应力大小、方向	深孔、软岩	实现无接触探测	利用深孔获得信息	计算依赖本构关系准确性	软岩大变形工程
	改进钻孔变形法	应力大小、方向	深孔、软岩	引入复变函数得到精确解析解	解决复杂几何边界问题，应力量值结果更加精确	计算模型依赖本构关系准确性	对基于钻孔方法测试的修正补充方法，结果更加精确
	不规则钻孔变形估算法	应力大小、方向	广泛				
基于地球物理的方法	微震震源机制解	应力方向、三向应力比值	构造应力场分析	实现0.5～1.0级微小震地应力反演	获得大体量的岩体应力信息	空间分辨率较低	基于震源信息对不同尺度区域应力场进行反演，适用范围广泛
	声波测井技术	应力诱导各向异性	油田开发	提升精度、准确率	获得大体量的岩体应力信息	需岩石物理模型标定	主要对于油田开发超深钻井进行测试
基于数据驱动的新方法	机器学习模型（ML）	区域应力场分布	区域应力场预测分析	人工智能方法预测	高效处理大数据	依赖训练数据质量	基于既有地应力数据通过人工智能方法对不同尺度、不同时空地应力场动态变化规律进行预测，属于较为先进、低成本的方法，适用范围较为广泛
	智能神经网络预测（ANN）	高分辨率应力场分布	区域应力场预测分析	人工智能方法预测	非线性关系捕捉能力强	黑箱模型、工程应用风险	
	智能反分析法	复杂地质体应力场	区域应力场预测分析	将智能方法综合应用	解决多解性问题	计算资源消耗大	
	数据支撑–公共应力模型	区域尺度应力场	区域应力场预测分析	实现应力场约束	开放共享，覆盖密度大	局部细节不足	为区域构造应力场的构建预测提供数据支撑
	数据支撑–世界和中国应力图	中国、世界尺度应力场	区域应力场预测分析	实现大尺度应力场数据统一表达	提供全面大尺度数据	更新周期长（5～10年）	为中国乃至世界的应力场构建预测提供数据支撑

破，例如前沿的随钻机器人技术、微纳高性能传感技术、极端环境适应技术。在传统水压致裂法易受钻孔变形和应力释放影响导致测量受限的问题上，随钻机器人通过集成微型传感器（如 MEMS, Micro-Electro-Mechanical Systems 微机电系统加速度计、声波探头）和实时控制系统，实现钻进过程中地应力参数的动态采集，克服了传统水压致裂法测不到、测不准的难题。随钻测量系统（MWD）结合钻机冲击模型与 Hertz 接触理论，将钻进参数（转速、扭矩、振动）与岩石弹性模量关联，实现地应力大小和方向的实时反演，误差控制在 3.81 MPa 以内（Zhao et al., 2024），突破传统静态测量受钻孔扰动与应力释放的局限。随钻机器人则进一步与增强型地热系统（EGS）结合，通过应力数据优化储层压裂路径，减少 20% 井壁失稳风险，并降低 30% 无效钻进量（鲁伟, 2024）。同时，原位地应力测量作为深部地质工程与资源勘探的核心基础工作，准确获取对工程安全、资源评价及地质灾害防控至关重要。然而，未来也面临着严峻挑战：首先，地应力场成因极其复杂，是地球内部构造运动、岩体自重、地质构造、热力作用及历史演化等多因素长期耦合作用的结果，实现综合性精确反演分布规律具有难度；其次，现有测量方法（如水压致裂法、应力解除法）普遍基于特定假设（如岩石均质、各向同性、线弹性），这些假设在深部复杂地质条件下往往难以满足，导致测量结果存在系统偏差；最后，技术本身存在显著局限性，尤其在极端深部环境下（高温、高压、高地应力、强扰动），现有设备的耐候性、测试精度和可靠性面临严峻考验，难以获取真实有效的原位数据。

为有效应对深部地应力测试（尤其是数千米以深）日益增长的工程需求和科学挑战，亟需在以下 3 个关键方向实现重点突破。

（1）设备智能化与耐候性升级。为解决现有设备在深部极端环境（如>150 ℃ 高温、>50 MPa 高压）下的失效问题，例如在 CZ 铁路这类穿越极端复杂地质构造区（高地应力、强活动断裂、高地温）的世纪工程中，迫切需要发展适用于深埋超长隧道高地应力环境的原位、动态、三维地应力精细测试技术与装备，以精准评估岩爆、大变形灾害风险，并为支护设计提供关键参数。对于增强型地热系统（EGS）等深部地热能高效开发的干热岩，则要求测试方法能精确刻画高温、高压（>150 ℃、>50 MPa）储层裂隙网络的三维应力场及其在压裂过程中的动态演化规律。因此，一方面需要大力研发新一代耐超高温高压的测试系统，另一方面着力提升应力解除法设备的抗干扰能力，重点克服深部高地温对传感器的影响，以及高地应力环境下岩体破裂对解除过程和数据采集的干扰。实现设备向小型化、集成化、智能化、自动化方向转型，集成先进的传感技术（如光纤光栅、MEMS）、嵌入式控制系统和边缘计算能力，实现数据实时采集、处理与初步分析，提升现场作业效率和可靠性。另外，针对软岩工程地应力测试，传统的硬岩测试方法可能失效或精度大幅降低，更需要基于黏弹性或流变特性等岩石非线性力学特征建立系统软岩地应力测试技术，进而整体提升智能化设备的应用范畴。

（2）深部地应力分析理论与方法创新。深部岩体处于“高地应力、高地温、高渗透压”以及强烈“工程扰动”（“三高一扰动”）的极端环境中，其力学行为（如非线性变形、流变、脆−延性转化、损伤演化）高度复杂且难以直接观测，呈现显著的“黑箱化”特征。当前，鞠杨等（2022）利用 3D 打印实现地应力场透明解析，定量解释了断层周边应力场的分布与演化，使地应力场实现可视化研究；葛修润和侯明勋（2011）研发了地应力测井机器人，可以实现应力解除点位选择及作业，并成功应用于四川锦屏 II 级水电站工程。但在理论方面需要突破传统线弹性模型的局限，建立适用于深部高地应力环境的非线性、多场耦合（应力场−温度场−渗流场）解译模型。这些模型需能表征岩石在高应力水平下的复杂本构关系、时间效应和损伤破裂过程。理论创新需紧密结合深部高能赋存岩石（如深部硬岩、干热岩）的特殊的力学机制研究。

（3）地应力动态监测。由于深部地下工程（如深埋隧道、矿山、储库）开挖或资源开采会剧烈扰动原始地应力场，诱发应力重分布，是导致岩爆、大变形、突水突泥等重大灾害的核心诱因。目前缺乏能够长期、稳定、实时监测开挖扰动应力（尤其是次生应力和应力集中）及其时空演化规律的有效手段，需研发专用于深部环境的岩体扰动应力实时监测装备与网络系统。这就要求传感器具有极高的长期稳定性、抗恶劣环境（粉尘、潮湿、电磁干扰）能力和空间分辨力。通过构建密集、可靠的实时监测网络，实现对地下工程开挖后围岩应力场变化（大小、方向、集中区迁移）的精准捕捉与连续追踪，揭示其时空演化规律。

6 结 论

(1)近10年来传统的地应力测试中,基于岩芯的测试方法主要进展体现在非弹性应变恢复法、岩芯直径变形分析、线性三轴变形速率分析法、重定向声发射和饼状岩芯估算法这5种方法上;总体上通过改进理论提高了地应力量值计算的准确率,通过提升技术设备水平提高了地应力方向确定的精度,同时弥补了基于岩芯的方法无法测量低强度岩石地应力的缺点。基于钻孔的测试方法在技术手段、材料更新和设备简化上取得了较大进展,钻探和传感设备材料耐高温、高压、抗腐蚀,实现深孔成像、方向识别和地应力测量,同时测量步骤过程更加简便;在理论方面,对不规则钻孔几何变形进行解析修正,可以得到地应力量值的精确解析解。基于地球物理的方法实现了(0.5~1.0级)微小震震源机制解对地应力场的反演,可以获得大量岩体应力信息,声波、成像和地层倾角测井技术的设备也发展为无接触式、高精度、高灵敏度化,更加适用于深孔和油田开发领域。

(2)基于数据驱动的方法是近年来随着大数据人工智能发展新兴的地应力测试方法。该方法核心思想是充分利用既有数据结合人工智能方法,通过预测模型构建反演原位地应力场并对地应力时空状态变化进行预测。当前主要方法有机器学习模型(ML)、神经网络预测方法(NNP)和智能反分析法3大类,ML可实现区域地应力场分布反演,NNP可实现高分辨率应力场分布反演,智能反分析法可实现复杂地质体应力场预测。在数据支撑方面,公共应力模型、中国和世界应力图可以为智能模型预测提供全面大尺度的地应力数据。

(3)当前,智能随钻监测和人工智能大数据模型正展现出明确的工程前景。在高寒高海拔极端环境、CZ线铁路工程、滇中引水、油气开发及矿山冲击地压预警等工程中,分别以实时动态反馈、物理机制耦合和大尺度扰动监测的核心优势,准确分析地应力状态,从而成为降低深部工程风险的关键利器。未来,地应力测试在方法理论层面,更需要构建机理-数据双驱动模型,全面准确对研究区地应力状态时空变化规律进行模拟预测;在技术融合层面,面对复杂地质条件和极端环境地应力测量更需要对微纳智能化测量设备不断优化迭代。以“深部化、智能化、系统化”为标志的发展,将地应力测试研究从离散“点测量”推进至全域“场重构”,为深地探测提供准确有力的支撑。

References

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

ANIKIEV D, BIRNIE C, WAHEED U B, et al., 2023. Machine learning in microseismic monitoring[J]. Earth-Science Reviews, 239: 104371.

BAHRANI N, VALLEY B, KAISER P K, 2015. Numerical simulation of drilling-induced core damage and its influence on mechanical properties of rocks under unconfined condition[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 80: 40-50.

BAI X, ZHANG D M, WANG H, et al., 2018. A novel *in situ* stress measurement method based on acoustic emission Kaiser effect: a theoretical and experimental study[J]. Royal Society Open Science, 5(10): 181263.

BAN Y X, XIE Q, TANG J H, et al., 2024. Influence of stress level on the determination of in situ stress by DRA method[J]. Buildings, 14(12): 3828.

BAOUCHE R, SEN S, RADWAN A E, et al., 2023. In situ stress determination based on acoustic image logs and borehole measurements in the in-Adaoui and Bourarhat hydrocarbon fields, eastern Algeria[J]. Energies, 16(10): 4079.

BREKKE H, MACEACHERN J A, ROENITZ T, et al., 2017. The use of microresistivity image logs for facies interpretations: an example in point-bar deposits of the McMurray formation, Alberta, Canada[J]. AAPG Bulletin, 101(5): 655-682.

CHANG F Q, LIANG X Y, HUANG Z Y, et al., 2024. New type of double pipe hydraulic fracturing method in-situ stress testing device and its application[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 45(6): 706-711. (in Chinese with English abstract)

CHEN N, WANG C H, CHEN P Z, et al., 2021. Re-analyzing the in-situ stress field in the right bank of the Baihetan hydroelectric power plant using the borehole breakout data[J]. Journal of Geomechanics, 27(3): 430-440. (in Chinese with English abstract)

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)

CORNET F H, VALETTE B, 1984. In situ stress determination from hydraulic injection test data[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 89(B13): 11527-11537.

DARGAHIZARANDI A, MASOUMI H, HASHEMI A, et al., 2025. Determination of 3D stress state using a novel integrated diametrical core deformation and ultrasonic analysis[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 58(4): 4377-4401.

DUAN Y X, YAN Y N, SUN Q F, et al., 2018. Automated detection of dip angle based on LWD azimuthal gamma-ray logging[J]. Well Logging Technology, 42(5): 514-520. (in Chinese with English abstract)

FANG X X, FENG H, WANG Y H, et al., 2022. Prediction method and distribution characteristics of *in situ* stress based on borehole deformation—a case study of coal measure stratum in Shizhuang block, Qinshui Basin[J]. Frontiers in Earth Science, 10: 961311.

FENG C J, CHEN Q C, WU M L, et al., 2012. Analysis of hydraulic fracturing stress measurement data—discussion of methods frequently used to

determine instantaneous shut-in pressure[J]. Rock and Soil Mechanics, 33(7): 2149-2159. (in Chinese with English abstract)

FENG P, LI S, TANG D Z, et al., 2022. Application of support vector machine in prediction of coal seam stress[J]. Geoscience, 36(5): 1333-1340. (in Chinese with English abstract)

FRASER D, GHOLAMI R, SARMADIVALEH M, 2021. Deformation rate analysis: how to determine in-situ stresses in unconventional gas reservoirs[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 146: 104892.

FUNATO A, ITO T, 2017. A new method of diametrical core deformation analysis for in-situ stress measurements[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 91: 112-118.

GAO G Y, WANG C H, LIU J K, et al., 2024. Determination of the three-dimensional in situ stress tensor in inclined boreholes and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 43(S2): 3700-3709. (in Chinese with English abstract)

GAO L, LIN W R, SUN D S, et al., 2014. Experimental anelastic strain recovery compliance of three typical rocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 47(6): 1987-1995.

GARAVAND A, HADAVIMOGHADDAM F, 2023. In situ stress assessment based on plastic behavior of borehole breakouts and machine learning[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 47(2): 241-260.

GE X R, HOU M X, 2011. A new 3D in-situ rock stress measuring method: borehole wall stress relief method (BWSRM) and development of geostress measuring instrument based on BWSRM and its primary applications to engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 30(11): 2161-2180. (in Chinese with English abstract)

HAN H X, YIN S D, 2018. Determination of in-situ stress and geomechanical properties from borehole deformation[J]. Energies, 11(1): 131.

HAN H X, YIN S D, CHEN Z H, et al., 2021. Estimate of in-situ stress and geomechanical parameters for Duvernay Formation based on borehole deformation data[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 196: 107994.

HAN Z Q, LI M H, WANG C, et al., 2023a. Application and discussion of the borehole radial deformation method in deep borehole geostress measurement[J]. Frontiers in Earth Science, 11: 1102276.

HAN Z Q, WANG C, WANG C Y, et al., 2023b. Determination of geo-stress in deep strata incorporating borehole diametral deformation measurement and overcoring[J]. Measurement, 218: 113217.

HEIDBACH O, RAJABI M, CUI X F, et al., 2018. The World Stress Map database release 2016: crustal stress pattern across scales[J]. Tectonophysics, 744: 484-498.

HU X P, ZANG A, HEIDBACH O, et al., 2017. Crustal stress pattern in China and its adjacent areas[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 149: 20-28.

IBRAHIM A F, GOWIDA A, ALI A, et al., 2021. Machine learning application to predict in-situ stresses from logging data[J]. Scientific Reports, 11(1): 23445.

JO Y, CHANG C D, JI S H, et al., 2019. In situ stress states at KURT, an underground research laboratory in South Korea for the study of high-level radioactive waste disposal[J]. Engineering Geology, 259: 105198.

JU Y, REN Z Y, ZHENG J T, et al., 2022. Transparentized solutions and interpretation for the effects of discontinuous structures and multiphysics on rock failure[J]. Journal of China Coal Society, 47(1): 210-232. (in Chinese with English abstract)

KOPTEV A I, ERSHOV A V, MALOVICHKO E A, 2013. The stress state of the earth's lithosphere: results of statistical processing of the world stress-map data[J]. Moscow University Geology Bulletin, 68(1): 17-25.

LAI J, WANG G W, WANG S, et al., 2018. A review on the applications of image logs in structural analysis and sedimentary characterization[J]. Marine and Petroleum Geology, 95: 139-166.

LAI J, BAO M, LIU S C, et al., 2021. Prediction of high quality deep and ultra-deep dolostones reservoirs in Tarim Basin by well logs[J]. Journal of Palaeogeography, 23(6): 1225-1242. (in Chinese with English abstract)

LI B, ZHANG W, WEN R, 2022. Study on the hydraulic fracturing in-situ stress measurement in super-long highway tunnels in southern Shaanxi: engineering geological significance[J]. Journal of Geomechanics, 28(2): 191-202. (in Chinese with English abstract)

LI F, GAO M Z, YE S Q, et al., 2023. Formation mechanism of core discing during drilling under deep in-situ stress environment: numerical simulation and laboratory testing[J]. Journal of Central South University, 30(10): 3303-3321.

LI S J, ZHENG M Z, 2024. Development and engineering application of three-dimensional disturbed stress measurement system for deep hard rock engineering based on fiber bragg grating[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 43(2): 261-274. (in Chinese with English abstract)

LI S J, ZHENG M Z, QU D J, et al., 2021. Development and testing analysis of in-situ stress measurement technology based on borehole deformation method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 40(S1): 2841-2850. (in Chinese with English abstract)

LI X B, CHEN J Z, MA C D, et al., 2022. A novel in-situ stress measurement method incorporating non-oriented core ground re-orientation and acoustic emission: a case study of a deep borehole[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 152: 105079.

LI Y, WANG Z, QIAO L, et al., 2017. Development of CSIRO cell with the compromised application of instantaneous data-logging, no-power data-connection and twin temperature compensation techniques[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 36(6): 1479-1487. (in Chinese with English abstract)

LI Y, LIU Z B, QIAO L, et al., 2018. Stress monitoring techniques based on the twin temperature compensation method of digital CSIRO[J]. Advanced Engineering Sciences, 50(5): 18-26. (in Chinese with English abstract)

LI Y, FU S S, QIAO L, et al., 2019. Development of twin temperature compensation and high-level biaxial pressurization calibration techniques for CSIRO in-situ stress measurement in depth[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 52(4): 1115-1131.

LI Y Z, MITRI H S, 2023. Methodology for the estimation of mining face stresses using rock core diametrical deformation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 161: 105300.

LIANG M F, FANG X Q, SONG Y, et al., 2022. Research on three-dimensional stress monitoring method of surrounding rock based on FBG sensing technology[J]. Sensors, 22(7): 2624.

LIM S S, MARTIN C D, 2010. Core disking and its relationship with stress magnitude for Lac du Bonnet granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 47(2): 254-264.

LIN H, KANG W H, OH J, et al., 2020. Estimation of in-situ maximum horizontal principal stress magnitudes from borehole breakout data using ma-

chine learning[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 126: 104199.

LIN H S, KUMAR SINGH S, XIANG Z Z, et al., 2022. An investigation of machine learning techniques to estimate minimum horizontal stress magnitude from borehole breakout[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 32(5): 1021-1029.

LIN W, SAKAI Y, KAMIYA N, et al. , 2024. A review of the anelastic strain recovery (ASR) technique for in-situ stress measurements: a suggested test protocol and further challenges[C]//58th U. S. rock mechanics/geomechanics symposium. Golden: ARMA: ARMA-2024-0161.

LIU G Q, EHLIG-ECONOMIDES C, 2018. Practical considerations for diagnostic fracture injection test (DFIT) analysis[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 171: 1133-1140.

LIU H, WU Y Y, HE H J, et al., 2023. Application of new processing technology of array acoustic logging in carbonate reservoir evaluation[J]. Progress in Geophysics, 38(1): 220-228. (in Chinese with English abstract)

LIU L Y, LI K Z, WANG N W, et al., 2023. In-situ stress characteristics and rockburst tendency of surrounding rocks in the Shuiwangzhuang gold deposit, Zhaoyuan, Shandong province[J]. Journal of Geomechanics, 29(3): 417-429. (in Chinese with English abstract)

LIU Q S, WANG D, ZHU Y G, et al., 2020. Application of support vector regression algorithm in inversion of geostress field[J]. Rock and Soil Mechanics, 41(S1): 319-328. (in Chinese with English abstract)

LU W, 2024. Research on application and development trend of intelligent technology in mining engineering[J]. China Mining Magazine, 33(S1): 199-202. (in Chinese with English abstract)

LUO J, ZHAO C P, ZHOU L Q, 2015. Focal mechanisms and stress field of the Shangri-La Deqen, Yunnan Province—Derong, Sichuan Province M_S5.9 earthquake sequence in August, 2013[J]. Chinese Journal of Geophysics, 58(2): 424-435. (in Chinese with English abstract)

LYU F, LIU J P, CHEN L, et al., 2024. 3D in-situ stress prediction for shale reservoirs based on the CapsNet-BiLSTM hybrid model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 183: 105937.

MA C D, LI X B, CHEN J Z, et al., 2020. Geological core ground reorientation technology application on in situ stress measurement of an over-kilometer-deep shaft[J]. Advances in Civil Engineering, 2020(1): 8830593.

MA C D, TAN G S, LI X B, et al., 2022a. Core orientation technology based on drilling trajectory projection and its application in in situ stress measurement of the deepest shaft in China[J]. Minerals, 12(5): 521.

MA T S, XIANG G F, SHI Y F, et al., 2022b. Horizontal in situ stresses prediction using a CNN-BiLSTM-attention hybrid neural network[J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 8(5): 152.

MA T S, XIANG G F, SHI Y F, et al., 2022. Horizontal in-situ stress prediction method based on the bidirectional long short-term memory neural network[J]. Petroleum Science Bulletin, 7(4): 487-504. (in Chinese with English abstract)

MA T S, CHEN J, LIU Y, et al. , 2024a. Inversion method of deep horizontal in-situ stress based on borehole deformation[J/OL]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 1-11. https://link.cnki.net/urlid/51.1718.TE.20240710.0853.006. (in Chinese with English abstract)

MA T S, XIANG G F, GUI J C, et al., 2024b. Physics-constrained distributed neural network model for 3D in-situ stress prediction[J]. Chinese Journal of Geophysics, 67(8): 3211-3228. (in Chinese with English abstract)

MAFAKHERI BASHMAGH N, LIN W R, MURATA S, et al., 2022. Magnitudes and orientations of present-day in-situ stresses in the Kurdistan region of Iraq: insights into combined strike-slip and reverse faulting stress regimes[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 239: 105398.

MALIVA R G, CLAYTON E A, MISSIMER T M, 2009. Application of advanced borehole geophysical logging to managed aquifer recharge investigations[J]. Hydrogeology Journal, 17(6): 1547-1556.

MENG Q S, SHANG Y J, CHI J J, et al., 2025. Evaluation of the diametrical core deformation analysis (DCDA) and fracture surface morphology for in-situ stress estimation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 58(7): 7363-7376.

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)

MORAWIETZ S, HEIDBACH O, REITER K, et al., 2020. An open-access stress magnitude database for Germany and adjacent regions[J]. Geothermal Energy, 8(1): 25.

MOREAU J, JOUBERT J B, 2016. Glacial sedimentology interpretation from borehole image log: example from the Late Ordovician deposits, Murzuq Basin (Libya)[J]. Interpretation, 4(2): B1-B16.

PEI Q T, WU C, DING X L, et al., 2023. A weight factor-based backward method for estimating ground stress distribution from the point measurements[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 82(9): 365.

PHAM C, CHANG C D, JANG Y, et al., 2020. Effect of faults and rock physical properties on in situ stress within highly heterogeneous carbonate reservoirs[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 185: 106601.

PU Y Y, APEL D B, PRUSEK S, et al., 2021. Back-analysis for initial ground stress field at a diamond mine using machine learning approaches[J]. Natural Hazards, 105(1): 191-203.

QIAO L, ZHANG Y H, LI Y, et al., 2019. A non-linear elastic model and high-level biaxial loading and unloading test for CSIRO in-situ stress measurement in deep granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 38(1): 40-48. (in Chinese with English abstract)

QIN B H, 2019. Application of rock Kaiser effect in deep in-situ stress test[C]//2018 international conference on civil, architecture and disaster prevention. America. IOP: 012119.

QIN Y Q, TANG H, WU Z J, et al., 2023. The stress relief correction method considering irregular borehole shapes[J]. Computers and Geotechnics, 159: 105417.

RAJABI M, HEIDBACH O, TINGAY M, et al., 2017. Prediction of the present-day stress field in the Australian continental crust using 3D geomechanical–numerical models[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 64(4): 435-454.

ROSHAN H, LI D Q, CANBULAT I, et al., 2023. Borehole deformation based in situ stress estimation using televiewer data[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 15(9): 2475-2481.

SHAO Z G, MENG X G, FENG X Y, et al., 2003. Hole deviation -a problem not to be ignore in overcoring crustal stress measurement[J]. Geology and Exploration, 39(5): 91-94. (in Chinese with English abstract)

SONG I, CHANG C D, 2017. In situ stress conditions at IODP Site C0002 reflecting the tectonic evolution of the sedimentary system near the seaward edge of the Kumano basin, offshore from SW Japan[J]. Journal of

Geophysical Research: Solid Earth, 122(5): 4033-4052.

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.

TANG H, LIANG D C, WU Z J, et al., 2023. Preliminary study on the phenomenon and mechanism of granite core discing in laboratory drilling test[J]. Applied Sciences, 13(1): 291.

TIAN J H, LUO Y, ZHAO L, 2019. Regional stress field in Yunnan revealed by the focal mechanisms of moderate and small earthquakes[J]. Earth and Planetary Physics, 3(3): 243-252.

TRZECIAK M, SONE H, VOEGELI S, et al., 2022. Laboratory evaluation of the thermal breakout method for maximum horizontal stress measurement[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 55(1): 51-69.

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.

VAVRYČUK V, 2014. Iterative joint inversion for stress and fault orientations from focal mechanisms[J]. Geophysical Journal International, 199(1): 69-77.

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, WANG P, 2020. Theoretical and practical progress on the new constraint method of deep rock stresses based on a modified stress polygon and focal mechanism solution[C]//54th U. S. rock mechanics/geomechanics symposium. America. ARMA: ARMA-2020-1268.

WANG C, WANG Y T, HAN Z Q, et al., 2022. In-situ stress measurement technology for vertical hole based on stress relief method and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 43(5): 1412-1421. (in Chinese with English abstract)

WANG C, HAN Z Q, WANG Y T, et al., 2023. Rapid in-situ stress measurement in vertical borehole based on borehole diametrical deformation analysis[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 56(11): 8289-8303.

WANG C H, 2014. Brief review and outlook of main estimate and measurement methods for in-situ stresses in rock mass[J]. Geological Review, 60(5): 971-995. (in Chinese with English abstract)

WANG C H, WANG R T, WANG C Q, 2017. Development of multiple-diameter core hydraulic fracturing machine to test tensile strength of rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 36(S1): 3321-3331. (in Chinese with English abstract)

WANG C H, XING B R, 2017. A new theory and application progress of the modified hydraulic test on pre-existing fracture to determine in-situ stresses[J]. Rock and Soil Mechanics, 38(5): 1289-1297. (in Chinese with English abstract)

WANG C H, LIU Y M, HUANG L Y, et al. , 2018-12-21. Double-loop mounting rod for minimal diameter rock mass hydrofracturing test: CN, 201810905692.2[P]. (in Chinese with English abstract)

WANG C H, GAO G Y, WANG H, et al., 2020. Integrated determination of principal stress and tensile strength of rock based on the laboratory and field hydraulic fracturing tests[J]. Journal of Geomechanics, 26(2): 167-174. (in Chinese with English abstract)

WANG C Y, WANG Y T, HAN Z Q, et al., 2019. An in-situ stress measurement method based on borehole shape analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 40(S1): 549-556. (in Chinese with English abstract)

WANG H Y, DYSKIN A, PASTERNAK E, et al., 2024. Triaxial deformation rate analysis (DRA)[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 57(3): 1939-1962.

WANG J C, WANG C Y, HUANG J F, et al., 2022. *In situ* stress measurement method of deep borehole based on multi-array ultrasonic scanning technology[J]. Frontiers in Earth Science, 10: 933286.

WANG Q W, JU N P, DU L L, et al., 2018. Three dimensional inverse analysis of geostress field in the Sangri-Jiacha section of Lasa-Linzhi railway[J]. Rock and Soil Mechanics, 39(4): 1450-1462. (in Chinese with English abstract)

WANG R Y, WAN Y K, GUAN Z X, et al., 2025. Static stress triggering of Morocco *M* 6.9 earthquake on 9 September 2023[J]. Journal of Geomechanics, 31(2): 223-234. (in Chinese with English abstract)

WU A Q, HAN X Y, YIN J M, et al., 2018. A new hydraulic fracturing method for rock stress measurement based on double pressure tubes internally installed in the wire-line core drilling pipes and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 37(5): 1126-1133. (in Chinese with English abstract)

WU M L, ZHANG C Y, 2016. New-type piezomagnetic overcoring measurement system and its test analysis[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 35(S1): 3119-3126. (in Chinese with English abstract)

WU P N, ZHANG Q, LI Y P, et al., 2024. An analytical elastic modulus solution for an eccentric hollow rock core in in-situ stress measurement with stress relief method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 43(12): 2956-2967. (in Chinese with English abstract)

WU S C, WU H Y, KEMENY J, 2018. Three-dimensional discrete element method simulation of core disking[J]. Acta Geophysica, 66(3): 267-282.

WU X G, JI F L, LI D C, 2016. Application status and research progress of dipole acoustic well logging[J]. Progress in Geophysics, 31(1): 380-389. (in Chinese with English abstract)

XIANG Y, 2024. Application of downhole television imaging technology in reservoir engineering investigation[J]. Ground Water, 46(4): 184-185. (in Chinese)

XIANG Z Z, KANG W H, JI Y L, et al., 2025. Estimation of *in-situ* horizontal stresses based on multiscale borehole breakout data via machine learning: model development, validation and application[J]. Geophysical Journal International, 242(1): ggaf144.

XIE F R, CHEN Q C, CUI X F, et al., 2007. Fundamental database of crustal stress environment in continental China[J]. Progress in Geophysics, 22(1): 131-136. (in Chinese with English abstract)

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

YAMAMOTO K, KUWAHARA Y, KATO N, et al., 1990. Deformation rate analysis: a new method for in situ stress estimation from inelastic deformation of rock samples under uni-axial compression[J]. Tohoku Geophysical Journal, 33(2): 127-147.

YAN S K, WANG C H, GAO G Y, et al., 2024. Exploration and application

of in-situ stress estimation method based on core disking phenomenon of boreholes[J]. Journal of Geomechanics, 30(6): 865-877. (in Chinese with English abstract)

YAN Y F, SHAO B, XU J G, et al., 2016. Finite element optimised back analysis of in situ stress field and stability analysis of shaft wall in the underground gas storage[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016: 4052483.

YANG Y H, LIANG C T, FANG L H, et al., 2018. A comprehensive analysis on the stress field and seismic anisotropy in eastern Tibet[J]. Tectonics, 37(6): 1648-1657.

YANG Y H, SUN D S, ZHENG X H, et al., 2019. A method of diametrical core deformation analysis and its application on stress investigation in SK2 Well[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 50(12): 3106-3113. (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.

YU Z C, XU Q C, QIU R Y, et al., 2023. Status and prospect of borehole panoramic imaging while drilling based on acoustic wave[J]. Drilling & Production Technology, 46(3): 171-175. (in Chinese with English abstract)

YUAN D, WU C, LU Y H, et al., 2021. Three-dimensional prediction of in-situ stress in oil and gas field based on intelligence algorithms[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 43(2): 84-92. (in Chinese with English abstract)

YUE W Z, TIAN B, 2022. High-resolution reflection acoustic logging imaging method for deep reservoir around a well[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 61(6): 1077-1089. (in Chinese with English abstract)

ZANG A, STEPHANSSON O, TIAN J, et al. , 2013. Arno ZANG, ove STEPHANSSON, translated by Jiayong tian, Chenghu wang into Chinese (2013), stress field of the earth's crust, seismological press. Beijing, China.

ZHANG B, SUN Y, MA X M, et al., 2023. Analysis of in-situ stress field characteristics and tectonic stability in the Motuo key area of the eastern Himalayan syntaxis[J]. Journal of Geomechanics, 29(3): 388-401. (in Chinese with English abstract)

ZHANG S R, HU A K, WANG C, 2016. Three-dimensional inversion analysis of an *in situ* stress field based on a two-stage optimization algorithm[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 17(10): 782-802.

ZHANG Y H, QIAO L, LI Y, 2019. In-situ stress measurement technique based on non-linear elastic CSIRO and its application[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 51(8): 136-142. (in Chinese with English abstract)

ZHAO R J, YAO R B, ZHANG T, et al., 2024. Estimation of tunnel in-situ stress magnitude and direction using measurement while drilling data and acoustic wave information[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 152: 105905.

ZHAO S K, GAO G Y, WANG C H, et al., 2021. Experimental study on the stress relief method of small-diameter compact conical-ended borehole overcoring technique[J]. Journal of China Coal Society, 46(S1): 74-83. (in Chinese with English abstract)

ZHAO S L, DENG W J, GUO C, et al., 2023. Practice of in-situ stress measurement technique with aperture deformation method under elastic parameter variation[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 40(12): 154-161. (in Chinese with English abstract)

ZHAO Y, FENG S J, 2023. Integrated analysis of *in situ* stress for tunneling underneath a municipal solid waste landfill[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 82(11): 424.

ZHANG Y J, LI Q, CAI Y D, et al., 2025. Evaluation of Coal Macrolithotypes Based on Machine Learning Logging Inversion: A Case Study of the No. 8 Coal Seam in the Benxi Formation, Jiaxian Block, Ordos Basin[J]. Geoscience, 39(5): 1427-1436. (in Chinese with English abstract)

ZHUANG L, ZANG A, 2021. Laboratory hydraulic fracturing experiments on crystalline rock for geothermal purposes[J]. Earth-Science Reviews, 216: 103580.

ZIEGLER M, VALLEY B, 2021. Evaluation of the diametrical core deformation and discing analyses for in-situ stress estimation and application to the 4.9 km deep rock core from the Basel geothermal borehole, Switzerland[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 54(12): 6511-6532.

附中文参考文献

常方强, 梁潇洋, 黄梓焰, 等, 2024. 新型双管水压致裂法地应力测试装置及其应用[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 45(6): 706-711.

陈念, 王成虎, 陈平志, 等, 2021. 利用钻孔崩落数据再认识白鹤滩右岸地应力场特征[J]. 地质力学学报, 27(3): 430-440.

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.

段友祥, 闫亚男, 孙歧峰, 等, 2018. 基于随钻方位伽马测井的地层倾角自动识别[J]. 测井技术, 42(5): 514-520.

丰成君, 陈群策, 吴满路, 等, 2012. 水压致裂应力测量数据分析: 对瞬时关闭压力 ps 的常用判读方法讨论[J]. 岩土力学, 33(7): 2149-2159.

冯鹏, 李松, 汤达祯, 等, 2022. 支持向量机在煤层地应力预测中的应用[J]. 现代地质, 36(5): 1333-1340.

高桂云, 王成虎, 刘冀昆, 等, 2024. 倾斜钻孔三维地应力张量反演方法及其应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 43(S2): 3700-3709.

葛修润, 侯明勋, 2011. 三维地应力 BWSRM 测量新方法及其测井机器人在重大工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 30(11): 2161-2180.

鞠杨, 任张瑜, 郑江韬, 等, 2022. 岩石灾变非连续结构与多物理场效应的透明解析与透明推演[J]. 煤炭学报, 47(1): 210-232.

赖锦, 包萌, 刘士琛, 等, 2021. 塔里木盆地深层、超深层白云岩优质储集层测井预测[J]. 古地理学报, 23(6): 1225-1242.

李彬, 张文, 文冉, 2022. 陕南特长公路隧道水压致裂法地应力测量结果及工程地质意义分析[J]. 地质力学学报, 28(2): 191-202.

李邵军，郑民总，瞿定军，等，2021. 基于钻孔变形法的无线地应力测量系统及测试分析[J]. 岩石力学与工程学报，40(S1)：2841-2850.

李邵军，郑民总，2024. 基于光纤光栅的深部硬岩隧洞三维扰动应力测试系统研制及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报，43(2)：261-274.

李远，王卓，乔兰，等，2017. 基于双温度补偿的瞬接续采型空心包体地应力测试技术研究[J]. 岩石力学与工程学报，36(6)：1479-1487.

李远，刘子斌，乔兰，等，2018. 基于数字化 CSIRO 双温补偿方法的岩体扰动应力长期监测系统的研发与应用[J]. 工程科学与技术，50(5)：18-26.

刘航，吴煜宇，贺洪举，等，2023. 阵列声波测井处理新技术在碳酸盐岩储层评价方面的应用[J]. 地球物理学进展，38(1)：220-228.

柳禄湧，李凯舟，王能伟，等，2023. 山东招远水旺庄金矿深部地应力特征及其岩爆倾向性分析[J]. 地质力学学报，29(3)：417-429.

刘泉声，王栋，朱元广，等，2020. 支持向量回归算法在地应力场反演中的应用[J]. 岩土力学，41(S1)：319-328.

鲁伟，2024. 采矿工程中的智能化技术应用与发展趋势研究[J]. 中国矿业，33(S1)：199-202.

罗钧，赵翠萍，周连庆，2015. 2013 年 8 月香格里拉德钦—得荣 M_S5.9 地震序列震源机制与应力场特征[J]. 地球物理学报，58(2)：424-435.

马天寿，向国富，石榆帆，等，2022. 基于双向长短期记忆神经网络的水平地应力预测方法[J]. 石油科学通报，7(4)：487-504.

马天寿，陈杰，刘阳，等，2024a. 基于钻孔变形的深层水平地应力反演方法[J/OL]. 西南石油大学学报(自然科学版)，1-11. https://link.cnki.net/urlid/51.1718.TE.20240710.0853.006.

马天寿，向国富，桂俊川，等，2024b. 基于物理约束的分布式神经网络三维地应力预测模型[J]. 地球物理学报，67(8)：3211-3228.

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.

乔兰，张亦海，李远，等，2019. 深部花岗岩 CSIRO 地应力测量中高压双轴加卸载试验及非线弹性分析模型[J]. 岩石力学与工程学报，38(1)：40-48.

邵兆刚，孟宪刚，冯向阳，等，2003. 钻孔偏心—套芯法地应力测量中的一个不可忽视的问题[J]. 地质与勘探，39(5)：91-94.

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.

王超，王益腾，韩增强，等，2022. 垂直孔应力解除法地应力测试技术及工程应用[J]. 岩土力学，43(5)：1412-1421.

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)：971-995.

王成虎，王仁涛，王春权，2017. 多直径岩芯液压致裂岩石抗拉强度快速试验机研发[J]. 岩石力学与工程学报，36(S1)：3321-3331.

王成虎，邢博瑞，2017. 原生裂隙水压致裂原地应力测量的理论与实践新进展[J]. 岩土力学，38(5)：1289-1297.

王成虎，刘一民，黄禄渊，等，2018-12-21. 极小直径岩体水压致裂测试双回路安装杆：中国，201810905692.2[P].

王成虎，高桂云，王洪，等，2020. 利用室内和现场水压致裂试验联合确定地应力与岩石抗拉强度[J]. 地质力学学报，26(2)：167-174.

王川婴，王益腾，韩增强，等，2019. 基于钻孔形态分析的地应力测量方法研究[J]. 岩土力学，40(S1)：549-556.

王庆武，巨能攀，杜玲丽，等，2018. 拉林铁路桑日至加查段三维地应力场反演分析[J]. 岩土力学，39(4)：1450-1462.

王润妍，万永魁，关兆萱，等，2025. 2023 年 9 月 9 日摩洛哥 M 6.9 地震静态应力触发研究[J]. 地质力学学报，31(2)：223-234.

邬爱清，韩晓玉，尹健民，等，2018. 一种新型绳索取芯钻杆内置式双管水压致裂地应力测试方法及其应用[J]. 岩石力学与工程学报，37(5)：1126-1133.

吴满路，张重远，2016. 新型压磁应力解除测量系统及其测试分析[J]. 岩石力学与工程学报，35(S1)：3119-3126.

吴培楠，张强，李亚鹏，等，2024. 应力解除法地应力测量中偏心岩芯弹性模量率定解析[J]. 岩石力学与工程学报，43(12)：2956-2967.

吴晓光，季凤玲，李德才，2016. 偶极声波测井技术应用现状及研究进展[J]. 地球物理学进展，31(1)：380-389.

向英，2024. 井下电视成像技术在水库工程勘察中的应用[J]. 地下水，46(4)：184-185.

谢富仁，陈群策，崔效锋，等，2007. 中国大陆地壳应力环境基础数据库[J]. 地球物理学进展，22(1)：131-136.

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.

闫绍坤，王成虎，高桂云，等，2024. 基于钻孔岩芯饼化现象的地应力估算方法探究及应用[J]. 地质力学学报，30(6)：865-877.

杨跃辉，孙东生，郑秀华，等，2019. 岩芯直径变形分析法及其在松科 2 井深部地应力调查中的应用[J]. 中南大学学报(自然科学版)，50(12)：3106-3113.

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.

喻著成，许期聪，邱儒义，等，2023. 随钻声波井下全景成像技术现状及展望[J]. 钻采工艺，46(3)：171-175.

袁多，吴超，卢运虎，等，2021. 基于智能算法的油气田地应力三维预测[J]. 西南石油大学学报(自然科学版)，43(2)：84-92.

岳文正，田斌，2022. 高分辨率井周储层深探测反射声波测井成像方法[J]. 石油物探，61(6)：1077-1089.

张斌，孙尧，马秀敏，等，2023. 东构造结墨脱关键区域地应力场特征及其构造稳定性分析[J]. 地质力学学报，29(3)：388-401.

张文东，吕扇扇，张兴森，等，2018. 融合多模型深层地应力预测方法[J]. 计算机与数字工程，2018(4)：717-720, 738.

张云骥，李倩，蔡益栋，等，2025. 基于机器学习测井反演的宏观煤岩类型评价——以鄂尔多斯盆地佳县区块本溪组 8 号煤为例[J]. 现代地质，39(5)：1427-1436.

张亦海，乔兰，李远，2019. 基于非线弹性 CSIRO 地应力测量技术及应用[J]. 哈尔滨工业大学学报，51(8)：136-142.

赵善坤，高桂云，王成虎，等，2021. 小孔径圆锥式孔底套芯应力解除法及试验研究[J]. 煤炭学报，46(S1)：74-83.

赵顺利，邓伟杰，郭冲，等，2023. 弹性参数变异下孔径变形法地应力测试实践[J]. 长江科学院院报，40(12)：154-161.