第 31 卷第 6 期
2025 年 12 月

地 质 力 学 学 报
JOURNAL OF GEOMECHANICS

Vol. 31 No. 6
Dec. 2025

**引用格式：**马晓冬，2025.“一孔之见”：钻孔中的应力观测如何表征地壳应力状态？[J]. 地质力学学报，31（6）：1146−1158. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025153

**Citation:** MA X D，2025. How do borehole observations characterize crustal stress?[J]. Journal of Geomechanics，31（6）：1146−1158. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025153

# “一孔之见”——钻孔中的应力观测如何表征地壳应力状态？

马晓冬
MA Xiaodong

中国科学技术大学地球和空间科学学院，安徽 合肥 230026
*School of Earth and Space Sciences*, *University of Science and Technology of China*, *Hefei* 230026, *Anhui*, *China*

## How do borehole observations characterize crustal stress?

**Abstract:** ［**Objective**］Knowing the in-situ stress state is of great importance for understanding a wide range of geomechanical processes in the Earth’s crust, and for addressing many practical problems in the subsurface. The in-situ stress characterization in boreholes through the classic hydraulic fracturing test and borehole failure observation has provided fundamental knowledge of the stress state in the brittle upper crust. ［**Methods**］Compiling borehole observations and other stress indicators over much larger scales reveals coherent and consistent stress orientations and relative stress magnitudes over appreciable depths and between boreholes at the regional scale. Stress magnitudes determined using the hydraulic fracturing method and borehole failure observation are consistent with the classic Anderson and Coulomb faulting theories, as well as with the empirical Byerlee’s law. This is useful for constraining the in-situ stress state and quantifying fault stability. The general state of frictional equilibrium in the upper crust is present, although stress variations at local scales due to discontinuities, lithology contrasts, rock mass anisotropy and other factors are practically ubiquitous. ［**Results**］To date, the hydraulic fracturing method and borehole failure observations—and their evolved variants—remain extremely useful. However, given the challenges ahead in subsurface exploration and engineering, it is imperative that we fundamentally revolutionize how we collect, interpret, and share the stress data with innovative developments in crustal stress characterization. ［**Significance**］In this paper, we also present several ongoing projects that attempt to innovate stress observations at various scales. These attempts build upon the foundation laid by hydraulic fracturing tests and borehole failure observations. At the scale of individual boreholes, deep learning is being employed to automatically identify borehole stress indicators, such as fractures and breakouts, in image logs to increase the efficiency and robustness of stress interpretation. Processed image logs with various characteristics can further improve the applicability of deep learning models. At the scale of borehole arrays in subsurface engineering, the use of multiple boreholes and complementary approaches (hydraulic fracturing tests and borehole failure observations) enables stress characterization at finer spatial scales, which prompts the understanding of stress distribution and engineering practicality. At the scale of ultra-deep boreholes, the identification and classification of uncommon stress indicators, such as natural fractures, are utilized to invert the in-situ stress and crustal rock mass strength. The inversion confirms the frictional equilibrium hypothesis and offers an alternative approach for stress characterization. ［**Conclusion**］These attempts underscore the importance of moving beyond the paradigm of borehole stress characterization and the interconnectedness between classic theories and novel developments.

**Keywords:** in-situ stress; hydraulic fracturing; borehole failures; natural fractures; frictional equilibrium

---

**基金项目：**深地国家科技重大专项（2024ZD1000705）

This research is financially supported by Deep Earth Probe and Mineral Resources Exploration-National Science and Technology Major Project (Grant No. 2024ZD1000705)

**第一作者：**马晓冬（1986—），男，博士，教授，主要从事地质力学、地壳应力、深地工程等领域研究。Email：maxiaodong@ustc.edu.cn

**收稿日期：**2025−10−16；**修回日期：**2025−11−04；**录用日期：**2025−11−17；**网络出版日期：**2025−11−28；**责任编辑：**吴芳

**摘　要：**了解原位应力状态对于认识和理解地壳中各类地质力学过程、解决地下工程中的诸多实际问题具有重要意义。钻孔原位应力表征主要通过经典的水压致裂测试与钻孔孔壁破坏观测两种手段实现，为揭示脆性上地壳的应力状态提供了核心技术支撑。将上述两种方法主导的钻孔观测结果与其他表征更大尺度应力信息的成果进行整合后，区域尺度上不同钻孔间及较大深度范围内的应力方向一致性与相对应力大小的规律性均得以呈现。通过水压致裂法与钻孔破坏观测获取的应力大小，与经典的 Anderson-Coulomb 理论及经验性的 Byerlee 定律相符，这种一致性对约束原位应力状态、量化断层稳定性有着重要的作用。尽管受不连续面、岩性差异及其他因素影响，局部尺度的应力变化几乎普遍存在，但上地壳整体仍可以被认为处于摩擦平衡状态。一直以来，水压致裂法、钻孔破坏观测及其近期的衍生方法仍具有极强的应用性。然而，随着深地探测和地下工程的不断推进，对应力原位观测的需求不断增长，依托地壳应力表征技术的创新发展，从根本上革新应力数据的采集、解释与共享方式，已成为亟待推进的关键任务。文章旨在从多尺度创新地应力观测方法，表述突破传统钻孔地应力表征范式的重要性，并印证经典理论与创新发展之间的内在联系。

**关键词：**地应力；水压致裂；钻孔破坏；天然裂缝；摩擦平衡

**中图分类号：**P315.72+7; P553　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006-6616(2025)06-1146-13

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025153

## 0　引言

"一孔之见"(孔：小洞；见：见识)原指通过狭小孔洞观察事物，通常比喻狭隘片面的见解，在这里借用来形象地描述地质力学领域在钻孔中开展地应力观测的核心困境：即观测手段的局限性、观测结果的有限性和观测认识的片面性。钻孔中开展地应力观测，耗时耗力，其必要性体现在何处？"一孔之见"的观测反映的是局部还是远场的应力状态？其对于认识和理解(脆性上部)地壳的应力赋存状态有怎样的推动作用？以下会对这些问题进行一些讨论。需要强调的是，文章的定位不是关于本领域的研究综述，也不是前沿论评，只是尝试通过简述几部分相关的工作，强调他们之间的连接性，并穿插分享一些对于地壳应力赋存机制的思考，旨在抛砖引玉，促进领域内的交流和讨论。

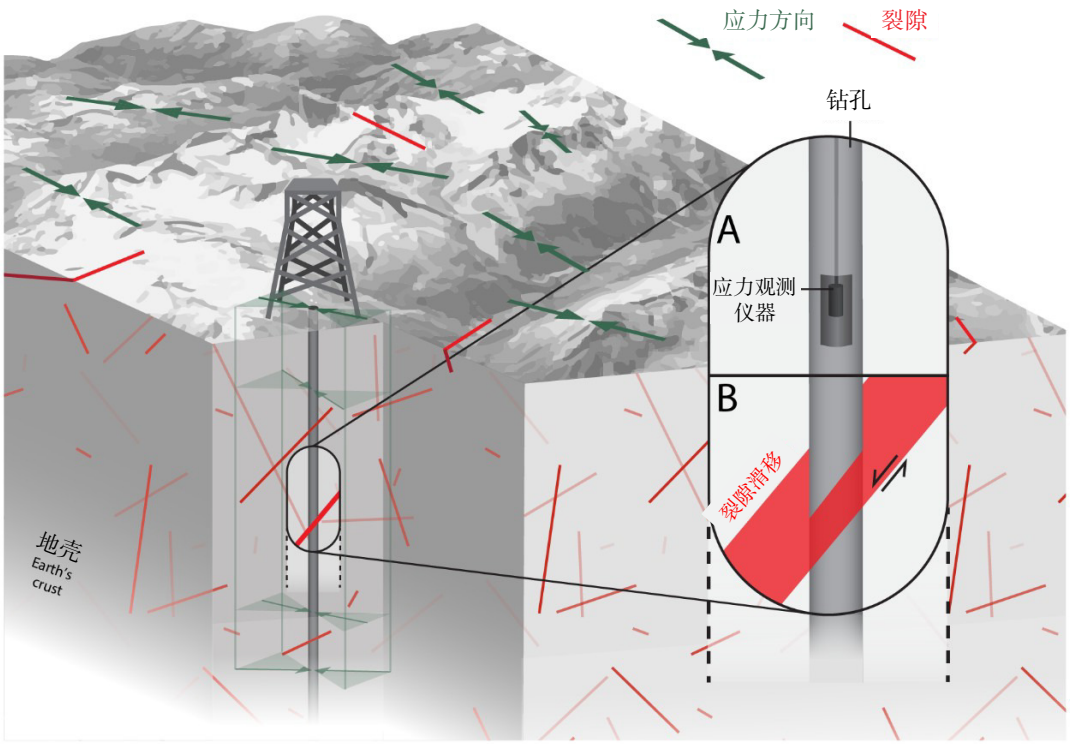
文章中的"一孔之见"特指通过钻孔实现的地应力观测行为。"孔"可以为各类钻孔(boreholes；不同直径、孔深、轨迹)，"见"可以为各种方法开展的观测(observations)。钻孔中的应力观测方法有多种，文章主要涉及钻孔中的主动测量方法与被动观测方法这两类，及其在技术迭代融合中不断发展所衍生出的系列变化形式。

钻孔的优势在于能够主动、定向地接近目标深度并开展应力测量。钻孔能够以更近的距离、更高的解析度对原位的应力状态进行测量。两个不常被强调的优势在于钻孔的连续性和组合性。钻孔的连续性指的是钻孔从地表到目标深度，能提供宝贵的连续应力信息，形成应力剖面。不同深度钻孔的这种连续性使得学者们能够获取不同空间尺度的应力信息和特征(Day-Lewis et al., 2010)。钻孔的组合性指的是空间位置相近或相关的多个钻孔能够提供额外的应力约束，特别是在钻孔方向各异的组合情况下。钻孔的这些特点能够赋予"一孔之见"应力观测更多的可能性与潜在的协同效应(下文第 4 节详述)。

文章首先简要梳理了两类常用钻孔应力观测手段的优势和发展现状，然后将钻孔应力观测与当前对地壳应力基础认识进行连接，强调其在地质力学领域的重要作用，最后讨论传统钻孔应力观测方法的局限性和存在问题，介绍钻孔应力观测一些新的见解和尝试，文章的分析和讨论可为推动领域内观测手段、基础理论和分析方法的协同发展提供参考和借鉴。

## 1　钻孔中的应力观测和表征

水压致裂测试(hydraulic fracturing tests, HF)与孔壁破坏特征观测(borehole failure observations；图 1)这两类方法原理简单且相互关联，实施可靠，为地壳应力场的认识起到了基础性的作用(Amadei and Stephansson, 1997；Hudson et al., 2003；Schmitt et al., 2012)，并促进了一系列重点区域的地震危险性分




地壳应力不均质性(深绿色箭头表示应力方向);地壳岩体结构面如裂隙、断层等(红线)

图 1 钻孔中应力观测示意图

Fig. 1 Illustrations of in-situ stress observations in boreholes

The crustal stress heterogeneity is illustrated by the orientations of the green arrows, and crustal rock mass discontinuities such as fractures and faults are illustrated by the red lines.

析(刘卓岩等, 2017; 陈群策等, 2019; 李兵等, 2022; 张重远等, 2022)。

水压致裂技术起源于20世纪40年代石油工业的储层增产需求。其核心原理是通过高压注液在储层中制造人工裂缝,从而提升油气采收率。尽管能够切实促进增产,但该方法的原理在初期一直不清晰。其科学基础则是在50年代末至60年代由Hubbert and Willis(1957)奠定,并由Haimson and Fairhurst(1967)应用至地应力测量。他们开创性地揭示了水力压裂形成的裂缝方位与地应力方向之间的内在联系,并建立了泵送压力值与地应力大小之间的理论关系。这里不再赘述水压致裂测试的基本原理,其具体实施方法为在钻孔的裸眼段内通过封隔器(packers)密封一钻孔段,然后向其中注入高压液体;当液体压力升高到一定值时,钻孔壁岩体将发生张性破裂(Haimson and Cornet, 2003)。水力裂缝的起裂、拓展主要与钻孔的近、远场应力状态相关。水力裂缝的起裂主要取决于近钻孔的应力集中(Kirsch, 1898),而裂缝的拓展远离应力集中区(影响约为2~3倍钻孔半径范围),由远场应力状态决定。

传统的水压致裂法(HF)基于一个重要的先决条件,即封隔的岩体是完整无裂隙的。在实际中,地壳岩体普遍被各种天然裂隙、节理和断层所切割(图1)。这些结构面的存在会造成封隔失效,段内的液体漏失,也会影响生成的水力裂缝形态,从而影响测试的顺利开展和分析解释。这个因素限制了水压致裂可以实施的钻孔段数量和自由度。能否从“避开”转而“利用”天然裂隙? Cornet and Valette(1984)的研究奠定了原生裂隙水压致裂法(Hydraulic Test on Pre-existing Fractures, HTPF)的早期理论和实践基础(Haimson and Cornet, 2003)。研究指出,通过对钻孔中多条不同产状的天然裂隙进行水力测试,可以建立方程组求解出完整的6个独立应力张量分量,从而确定三维空间中的主应力大小和方向。一条闭合的天然裂隙,要使其张开,施加于其上的法向压力必须足以克服裂隙面上的正应力。然而在实际开展中,HTPF方法有诸多不便,比如在钻孔中有效封隔单个裂隙、准确拾取裂隙张开

压力值等。同时，HTPF 方法的基本假设，即不同产状的裂隙受控于相对均质的应力场这一点也值得商榷。裂隙的存在会对原位应力场产生扰动，这将在下一章节进行说明。

近年来，同样为"利用裂隙"的裂隙原位特性阶梯注入法（SIMFIP, Step-rate Injection Method for Fracture In-Situ Properties）方法也受到关注（Guglielmi et al., 2014, 2015）。该方法在钻孔中封隔单个天然裂隙或断层，注水诱发其滑动，通过特定探头实现对结构面错动位移和流体压力的同步测量，进而反演出原位应力张量。目前，SIMFIP 方法的成功应用案例多集中于单一裂隙或断层、低渗透性岩体的科研场景（如地下实验室的断层力学研究）。但该方法实施成本较高、周期较长，在复杂工程现场、快速应力评估场景中并不实用，限制了其规模化应用，适用性受限。

当前的 HF、HTPF、SIMFIP 等方法的开展都得益于成像测井手段的发展。成像测井不仅能够识别天然裂隙，还促进了对钻孔崩落（borehole breakouts）和钻孔诱导缝（drilling-induced fractures）等钻孔孔壁破坏特征（borehole failures）或地应力指示物（stress indicators）的观测（Bell and Gough, 1979; Plumb and Hickman, 1985; Zoback et al., 1985; Barton and Zoback, 1994）。钻孔成像测井将地应力观测从过去依赖于数据点稀少、昂贵且操作复杂的"主动"测试（如水压致裂），扩展到了可以进行连续、快速且成本较低的"被动"观测，极大地丰富了对原位应力状态的认知深度和广度。与 HF 等只能在特定深度获得测试离散点的方法不同，钻孔成像测井可以提供沿整个钻孔段的连续应力信息。这使得学者们能够观察应力方向随深度、岩性、结构面（如断层带附近）的变化，实现从"点"到"线"的跨越。在一个钻孔中，如果同时观测到崩落和诱导缝，其方位通常会相差 90°，这为水平主应力方向的确定提供了强有力的交叉验证。

结合崩落和诱导缝发育特征，可判断应力环境（stress regime，即走滑、正断或逆断型）。钻孔崩落和诱导缝的出现便于确定应力方向和相对应力大小，而且其存在和几何形态（如崩落宽度和深度）也为约束绝对应力大小提供了宝贵信息。钻孔崩落的宽度与主应力之间的相对大小、岩石的抗压强度密切相关。特别是在倾斜钻孔中，崩落和诱导缝的发育更取决于应力方向和三向主应力的相对大小。这一特性使得倾斜钻孔中的应力指示物观测结合钻孔井斜和方位角，能够提供更有效的应力约束。在很多情况下，钻孔崩落和诱导缝在不同轨迹的钻孔中，或者在定向钻孔中的不同轨迹段的出现或者缺失，能够大大丰富应力信息并表征应力场的空间变化。崩落和诱导缝的分析经常与水压致裂测试结合使用。水压致裂测试可以精确测量特定深度段的应力绝对大小，而连续出现的或者缺失的崩落或诱导缝的观测则可以将有限测试点的结果外推到整个钻孔段。这种"点—线"结合的综合方法能极大提高应力分析的效率和可靠性。

## 2　钻孔中表征的总体地壳应力特征

那么"一孔之见"的有限观测，是如何表征地壳应力状态的呢？ Hubbert and Willis（1957）的论述基于 Kirsch（1898）解析解并联系了钻孔的近场和远场应力。水力裂缝的起裂、崩落和诱导缝的产生都与钻孔近场的应力集中相关。几倍孔径外，应力集中逐渐消失，水力裂缝的拓展可以反映远场应力的状态。以常规的小孔径中的水压致裂测量为例，水力裂缝的拓展半径大约为数米至数十米的量级。钻孔应力观测能够表征的应力信息应当仅限于此。但不能忽视的是，一般在 100 ～1000 m 或>1000 m 长度量级的钻孔中，应力观测的结果总体趋于一致。在不同钻孔深度、不同构造区域、不同岩体性质中开展的大量观测表明，钻孔附近应力集中的近场应力与远场应力存在紧密相关性和总体一致性（Zoback et al., 2003）。获得的认识主要有以下几点：

①钻孔的不同深度段间和相邻钻孔之间存在总体一致的应力方向与（相对）应力大小；

②钻孔尺度观测得出的应力方向与相对大小与区域尺度内其他独立应力信息总体一致；

③钻孔观测得出的应力值与 Anderson-Coulomb 理论所预测的应力值较为一致。

区域远场和钻孔近场应力的总体一致性，可以在编撰的区域尺度应力场图中体现（Zoback, 1992; Xie et al., 2004; 孔维林等, 2021; 丰成君等, 2022; 高桂云等, 2025）。传统应力场图中的应力方向数据可能来自不同钻孔观测方法、不同深度，也包含其他来源的数据（如应力解除法、震源机制应力反演、活断层错动等）。有学者近期绘制了"新一代"的应力场图 (Lundstern and Zoback, 2020)，增加了估

算的相对应力大小(应力环境)。从区域应力场图汇总的信息而来,总体一致的应力方向和大小的认识对于理解区域应力赋存状态和构造活动至关重要。

钻孔中直接的水压致裂测试和基于钻孔破坏观测的应力估算,提供了应力的绝对值。基于Hubbert and Willis(1957)论述的Anderson-Coulomb理论,能够计算断层的应力赋存状态。假设简单的静水压力梯度(hydrostatic),沿用Byerlee(1978)定律($\mu\approx 0.6$),一些活化断层明显处于摩擦滑动的临界状态(如Rangeley Oilfield、Denver Arsenal的注水诱发的地震现象;Healy et al., 1968; Raleigh et al., 1976)。同样地,基于水压致裂独立测试或估算的主应力大小,也往往与利用Anderson-Coulomb理论和Byerlee定律预测的临界应力状态(即critically-stressed)较为一致(Morris et al., 1996; Lisle and Srivastava, 2004; Zoback, 2010; 王成虎等, 2014; Ma et al., 2020)。尽管仍然存在争议和很多反例(Bjørlykke, 2001; Cornet et al., 2007; Mattila and Follin, 2019),但地壳应力总体处于摩擦平衡状态(frictional equilibrium)的认识(Townend and Zoback, 2000; Zoback and Townend, 2001),极大地推动了应力观测与断层稳定性的分析(Brace and Kohlstedt, 1980)。除去钻孔观测的证据以外,地壳应力总体处于摩擦平衡的特征也可以从其他的独立观测现象中得到支撑。例如,天然地震或人工诱发地震(断层滑移)被观测到可能发生在脆性上地壳中的任何区域、任何深度;缓慢的构造应力加载和人工扰动造成的微小应力变化,表征了当前应力场临近摩擦极限状态的事实;近年来,大规模工业活动相关的诱发地震,如页岩气开采、废水回注、二氧化碳埋存、水库蓄水等(Ellsworth, 2013; Elsworth et al., 2016; 雷兴林等, 2020; 张捷等, 2021)可以被看作为大尺度的区域性实验(10～100 km量级),已经很有效地佐证了上部脆性地壳总体处于摩擦平衡状态的假说。

然而,摩擦平衡的假设毕竟来源于现象性的观测总结,往往作为应力观测的一个约束,其实并没有严格的理论依据。狭义的摩擦平衡概念,只描述当前地壳应力场的极限状态,并不能反映应力的空间分布,亦不能解释地壳应力的时效演化,也不能反映地壳岩体的应力-应变关系。基于摩擦平衡的约束关系,将地壳简化为断层主控的裂隙岩体,应该能够通过模拟手段有效反映应力场空间分布和时效演化(Zhang and Ma, 2021)。

众多现场观测揭示,特定区域的应力状态似乎并不符合摩擦平衡的约束。比如美国的圣安德烈斯断层(San Andreas Fault, SAF)。通过钻孔崩落、水压致裂以及震源机制等多种手段,研究发现加州地区的最大主应力方向几乎垂直于(约70°～90°)SAF的走向。这样的应力方向很难在断层面上产生足够大的剪应力来克服摩擦力,从应力分析的角度来看并不利于断层的活动(mechanically unfavorable)。这也从另一角度说明,要使断层在这种不利的应力方向下发生错动(地震),其本身的强度(摩擦系数$\mu$)必须非常低,远低于Byerlee的室内实验观测的经验取值。SAF的深部钻探-观测项目(San Andreas Fault Observatory at Depth, SAFOD)与相关研究表明,SAF并非处于1个由高摩擦系数($\mu\approx 0.6$～1.0)控制的摩擦极限平衡状态。相反,其是1个低应力、低强度的“软弱”断层系统(Lockner et al., 2011)。这种“软弱”特性很可能是由断层带内部超高的孔隙流体压力或富含低摩擦系数的矿物共同导致(Chester et al., 1993; 王克林, 2021)。这一认知彻底改变了大众对大型走滑断层力学行为和地震物理过程的理解。

SAF断层面上赋存的低应力状态,与远场的高应力存在明显差异。SAF附近的Cajon Pass等钻孔中的水压致裂测试和钻孔破坏观测表明,远场(距离断层面≥2 km; Shamir and Zoback, 1992)的应力状态符合($\mu = 0.6$～1.0)的极限平衡状态。SAF区域众多震源机制反演的水平最大主应力方向($S_{\mathrm{Hmax}}$)从远场到近场存在连续、较大角度的旋转(Hardebeck and Hauksson, 2001; Provost and Houston, 2001)。这表明断层的近、远场应力状态存在显著差异,并且两者之间需要某种机制进行协调。以瑞士Grimsel地下实验室为例,10 m尺度的钻孔内水压致裂地应力测量结果表明,$S_{\mathrm{Hmax}}$存在显著旋转(Krietsch et al., 2019)。与上述尺度相仿的日本某地下实验室,沿一穿越断层的钻孔开展的空心包体法测量清晰地表明了地应力方向和大小的连续变化(Obara and Sugawara, 2003)。瑞士Bedretto地下实验室中,多个钻孔同时观察到穿越～100m厚度断层带导致的应力持续偏转与应力在断层带中单个cm级厚度小断层/天然裂缝附近的频繁剧烈波动(Zhang et al., 2023a)。这些不同尺度的观测结果表明,地壳处于摩擦极限的总体应力状态与局部的应力变化并不冲突(McGarr et al., 1982; Chang and Jo, 2015; Schoenball and Davatzes, 2017)。

除去断层、裂隙等结构面对应力场的影响，岩体性质的变化对应力的影响也不容忽视。一些岩体，特别是深部的盐岩、高黏土含量的泥岩或处于高温环境下的岩石，具有显著的流变性或蠕变性，即在长期恒定应力作用下会缓慢地持续变形。时效变形的黏塑性质也会造成应力松弛：随着时间的推移，岩体可以通过蠕变来释放和调整其内部的应力（Sone and Zoback, 2014; Cornet, 2017; Ma and Zoback, 2020; Trzeciak et al., 2020; 孟文等, 2022; Ma et al., 2022b）。这会导致流变性强的岩层内部的最大和最小主应力差值通常较小，应力状态趋向于静水压力状态，造成与上覆地层或下伏地层之间的应力反差。

由于断层、裂隙因素导致的空间应力变化，表面看似相悖，但恰恰能够支撑摩擦平衡的假说。岩性（如流变性、各向异性等）变化导致的应力变化，是在地壳应力总体摩擦平衡状态下的局部调整，并不冲突。进一步探索地壳应力场的赋存机制，需要大量的应力观测数据作为支撑，也需要在理论的进一步发展下利用模拟手段开展研究。当前的一些观测结果和理论分析支撑尺度不一、但机制相似的应力变化假说（Bonnet et al., 2001; Day-Lewis et al., 2010）。在未来的上地壳应力赋存机制的研究中，可以适当考虑设计系统性的观测来证实这一假说。

## 3　当前钻孔应力观测方法的局限性

水压致裂方法本身理论经典、方法简单，基础理论一直改动不大。水压致裂受限于其测试的现实条件和成本，只能对钻孔内有限的深度段开展测试，取得相对有限的离散数据。所以其目的应主要为标定最小主应力绝对值并确定三向主应力的相对大小，从而确定应力环境。文章单纯从测试结果用于应力场有效解读方面提出问题，不涉及测试系统的可靠度问题，也不分析从压力曲线拾取最小主应力值（$S_3$）的技术问题 (Barree et al., 2015)。当前常用的（垂直钻孔中）水压致裂测试分析流程为先确定最小主应力值，然后计算垂直应力，进而确定三向主应力的相对大小（以确定应力环境）。这里以常见的一种测试场景举例：当垂直应力与测试估算的最小主应力值接近时，结果往往难以解读。这种场景为最小主应力呈水平向，量值却与垂直应力接近？亦或是最小主应力确呈垂向，水力裂缝为水平状拓展？或者为更复杂的情况，在封隔段内，水力裂缝起裂时为垂直产状，即平行于钻孔轴向，远离钻孔拓展后逐渐转向为水平产状？此类场景在地壳浅层的测试中较常见，应力环境由地形主控逐渐向构造主控过渡，涉及垂直应力相对水平应力值的较大变化。这对水压致裂测试提出了更高的要求，如测试系统的流程优化（高效开展测试；Desroches and Kurkjian, 1999）、精确程度（确定压力大小）和水力裂缝的成像需求（确定裂缝产状）等。

水压致裂测试近年来的发展主要集中于仪器和流程的改进和集成，通过对井下控制、传感系统的优化，能够实现对测试段内的压力、流量和温度实现精确测量；综合超声波、声发射等手段，对水力裂缝的起裂、拓展开展实时成像和定位，能够进一步提升测试的潜力和应力场分析的有效性。在理论分析方面，不同学者在这些方面不断提出新的见解，如对测试系统的柔度解读、集成温度-流量-压力的停泵分析、裂缝的拓展和与天然裂缝的相互作用等（McClure et al., 2022; Xing et al., 2022; Yang et al., 2025）。测试技术与测试理论的协同发展，能够进一步优化水压致裂测试方法，更准确地标定最小主应力并确定应力环境。

钻孔破坏特征的被动观测主要涉及崩落和诱导缝等地应力指示物的观测。文章不涉及不同成像测井技术在不同场景的适用性问题，也不分析成像质量、去噪等技术问题。当前常规的流程为人工或程序先识别应力指示物，确定应力方向并建立应力量值约束条件，结合经验或测量的岩石强度进一步估算原位应力量值范围。实际钻孔成像中，可能存在较多的非应力指示物（如天然裂缝、钻孔键槽、测井伪影等），造成了人工或程序解读的难度。一些非典型应力指示物，比如局部激活的天然裂隙、天然裂隙附近萌生的花瓣状裂缝和崩落等，往往蕴含较多的应力信息，但难以直接解读（Davatzes and Hickman, 2010）。倾斜钻孔（或者倾斜应力场景中的垂直钻孔）中孔壁破坏特征分析要更加复杂 (Peška and Zoback, 1995)。相比垂直钻孔，倾斜钻孔中的崩落和诱导缝的解释需要更复杂的数学模型和计算程序，对钻孔成像测井的质量和钻孔轨迹测量的精度要求也更高。孔壁上的压应力集中区和拉应力集中区的位置不再像垂直钻孔中那样简单地位于孔周的固定方位，而是会随着钻孔的倾角、

方位角以及完整的应力状态而发生复杂的旋转和变化。这种应力状态下，钻孔诱导缝一般呈雁列状发育。诱导缝的形态（角宽度和倾角）的精细分析，能够从一定程度上约束应力场。但倾斜钻孔中的诱导缝也容易与部分闭合的天然裂缝或其他结构面混淆（Zoback, 2010），值得注意。从理论上来讲，倾斜钻孔中的崩落形态也应呈雁列状发育，但不常见。崩落与诱导缝不同，自身的宽度和应力集中影响范围，限制了雁列状的发育。野外中偶尔发现的类似雁列状的窄崩落序列，也须结合其环境应力场和岩性精细分析进行证实

崩落和诱导缝沿钻孔的空间变化，如方位角的旋转、（崩落）宽度的变化、消失和重现等，为应力场的空间变化提供了直接的证据。崩落和诱导缝在不同空间尺度上的变化，能够反映不同的应力影响因素以及不同因素间的互动和相互竞争。孔壁破坏特征的经典理论基础早已奠定，近年来的发展趋势在于裂隙、诱导缝与崩落的自动拾取技术。在深度学习的推动下，在小样本泛化能力、精细化分割技术、决策优化方法上的优化有望显著提升识别准确率和效率。

水压致裂的主动测试方法，能够为地应力探测提供重要的标定信息，广泛适用于不同钻孔场景和环境，具有基础性的意义。但是，水压致裂方法仍然受限于数据量少的问题。孔壁破坏特征的被动观测，能够提供大量且多尺度的应力约束信息，但是可遇不可求；主动诱发孔壁破坏的一些创新方法，如通过局部加热、降温的手段诱发孔壁压缩、拉伸破坏，并利用光纤、声发射等手段进行实时观测（Ohanian, 2016; Trzeciak et al., 2022），现在仍然不具有大规模推广应用的成熟度。2 种方法都能够高效提供应力场总体的关键信息，但是对于应力建模、分析和工程实际应用，还是严重依赖专家进行经验解读，未来的趋势应当是多种方法融合下以高效人工智能为主的分析。

## 4 钻孔中应力观测、数据处理的创新进展

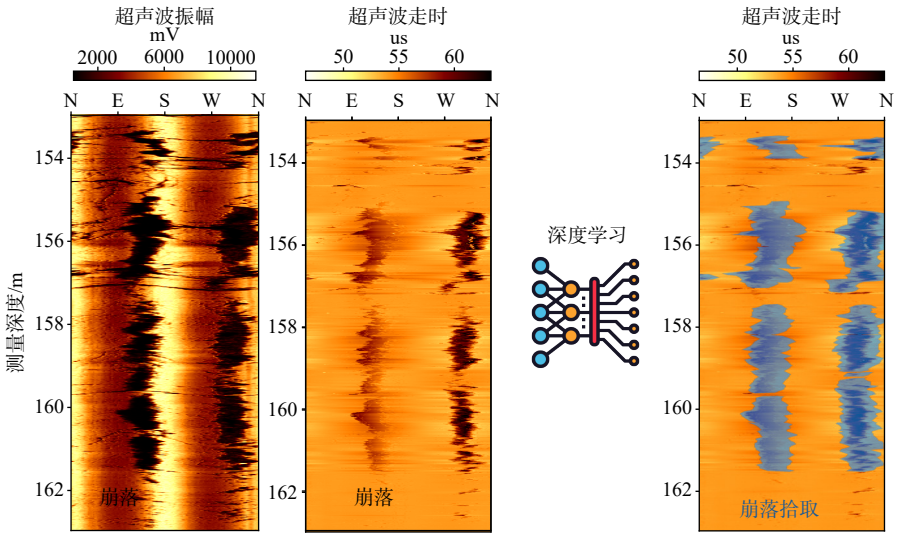
如前述指出，钻孔中应力观测技术目前面临着技术瓶颈，如扩大适用深度、提高分析效率和扩展数据量等。这需要在现有研究基础上，结合新的装备、理论和模拟手段进行技术攻关，进一步提升观测能力。钻孔应力观测流程中的输入–分析–输出这三部分同等重要。在观测手段（即输入）能力提升有限的情况下，通过创新方法从原始数据中拾取更多的应力数据、开展更合理的应力解释，能够从一定程度上优化分析过程和输出端。这里简述与水压致裂测试和钻孔孔壁破坏观测 2 种方法紧密相关的一些科研进展，涉及不同的数据类型、观测尺度和科学问题。

### 4.1 基于人工智能方法拾取钻孔测井数据中的地应力指示物（m～km 尺度）

钻孔成像测井是重要的应力数据输入源之一。随着钻孔成像测井数据体量的增加，利用深度学习算法能够准确、快速地提取地应力信息、识别地应力的变化尤为重要。目前钻孔崩落的产状参数（如中心方位角和宽度）主要依赖于人工拾取（Ask et al., 2024; Rajabi et al., 2024; Schaible and Saffer, 2025）；当崩落数量较多时，人工拾取无疑会消耗大量的时间。基于检测声成像测井数据局部极值的钻孔崩落自动拾取算法（Wang and Schmitt, 2020）能够提高拾取效率，然而这种方法所定义的钻孔崩落判别法则较为理想化。钻孔键槽（keyseats）、天然裂缝以及一些成像测井噪声、伪影和天然裂缝也可能符合钻孔崩落的判别法则，从而导致错误拾取。基于深度学习的钻孔崩落拾取方法（图 2），在信噪比较低的成像测井数据上表现出了较好的鲁棒性（Dias et al., 2020; Yang et al., 2020; Yeom et al., 2025）。然而，目前不论是钻孔崩落还是裂缝智能拾取，其训练样本来源都比较单一（仅来自某钻孔或某工区的正样本；Du et al., 2023; Nasim et al., 2025），崩落、裂缝形态和噪声类型的多样性较差。对于其他来源的测井数据，如果其中的崩落、裂缝形态和噪声类型与训练样本存在较大差异，将可能导致网络模型失效。因此，构建钻孔应力指示物形态和噪声类型多样化的数据集是提高钻孔应力指示物智能拾取泛化效果的关键。另外，融入地质力学先验知识等约束（如崩落、诱导缝等应力指示物的固有形态特征等），进一步动态筛除不符合实际指示物特征的误报结果，能够在复杂条件下准确识别，有效降低误报率，大幅提高使用自动解释的钻孔成像结果进行地应力分析的准确性和可靠性。

### 4.2 利用钻孔群与综合观测手段表征地下岩体空间应力分布（～100 m 尺度）

钻孔中应力观测的常规数据加以创新性的分




超声波成像测井的振幅、走时数据，通过深度学习手段自动拾取崩落等地应力指示物信息

图 2　利用深度学习自动拾取钻孔成像中的崩落示例

Fig. 2　Example of automatic breakout identification from borehole image logs via deep learning

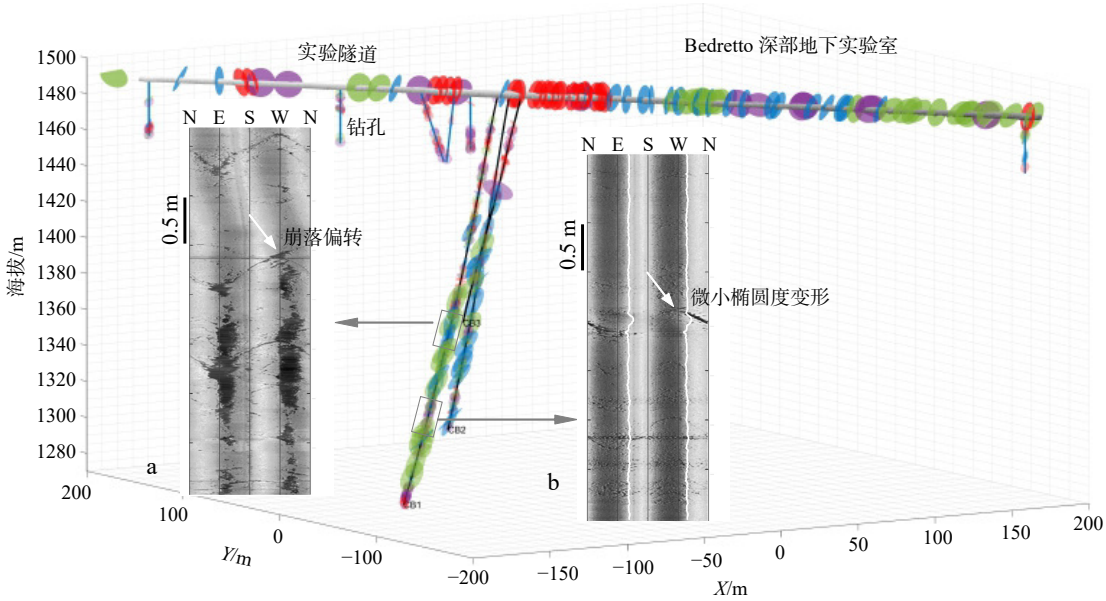
Amplitude and travel–time data of ultrasonic imaging logging are used to automatically extract the information of in-situ stress indicators such as borehole breakouts by means of deep learning.

析，能够充分挖掘其数据潜力，促进对应场景中的应力表征。地下实验室为研究深部原位应力及其力学行为提供了独特的平台。位于瑞士南部阿尔卑斯山脉的 Bedretto 深部地下实验室，依托上覆岩体厚度约 1000 m 的隧道及密集钻孔阵列，为系统开展多手段、多尺度应力观测，表征 100 m 岩体内部的应力变化创造了条件（图 3）。此研究结合 Bedretto 钻孔，通过水压致裂、钻孔崩落和钻孔横截面椭圆度等多种方法的相互验证，获得了覆盖>100 m 空间范围、高分辨率的应力观测数据（Bröker and Ma, 2022; Ma et al., 2022a; Zhang et al., 2023a; Bröker et al., 2024）。传统的水压致裂测试和钻孔崩落观测提供了重要但不连续的应力数据，由钻孔超声波成像得出的横截面椭圆度方位角可以起到钻孔全长应力方向有效延展和补充的作用 (Valley and Evans, 2009; Roshan et al., 2023)。倾斜钻孔中的横截面椭圆度与崩落和诱导缝类似，能够同时提供应力场方向和大小的信息。综合阵列中的多口倾斜钻孔中的连续椭圆度数据，可以对应力场开展不同空间尺度的反演，表征岩体内的应力空间变化。取得的主要认识包括：①深地岩体的应力状态在数 100 m 乃至更小尺度上普遍存在显著的空间非均质性，即便在构造活动不强或岩性相对均一的区域，应力方向和大小仍可能因断层结构、工程扰动或构造应力释放等因素产生连续变化；②单一方法获取的应力数据往往受限于数量和分布，难以揭示应力场的精细结构。将传统方法与创新方法相结合，是提升深地应力场分辨率和覆盖密度的有效途径，以此可构建多源融合的高分辨应力场。

### 4.3　利用深部钻孔中的天然裂隙特性反演地壳岩体总体应力状态（km 尺度）

如前述所说，岩体的摩擦强度和应力状态对于理解地壳的应力赋存机制十分关键，然而，由于地壳岩体的尺度和高度复杂性，目前在地壳岩体内部直接测量这两个物理量仍十分困难。传统应力观测手段如水压致裂法、应力解除法，在深地高温高压的复杂环境中非常受限，目前世界范围内地应力原位测量仍局限在 3 km 的深度范围内。因此，寻找一种能够便捷、准确估算地壳岩体摩擦强度和应力状态的方法，有效衔接分析端和输出端，具有重要的科学和工程学意义。

大量现场观测表明，脆性上地壳中处于剪切滑移应力临界状态的天然裂隙（或断层）通常具有显著导水性，而非临界裂隙则大多不具备导水性（Barton et al., 1995; Ito and Zoback, 2000）。裂隙剪切滑移能够维持其水力开度，保持其导水性；基于钻孔孔温梯度变化识别的裂隙导水性能够表征地质年代较近的裂隙剪切滑移，并蕴含应力场信息。基于此认识，用裂隙导水性表征其剪切应力临界性，考虑充分多样的裂隙分布，可以尝试直接反演钻孔




图中 $X$ 表示正东方向，$Y$ 为正北方向

a—钻孔成像展示的一处钻孔崩落；b—钻孔成像及其反演钻孔微小椭圆度变形

图 3 瑞士 Bedretto 地下实验室应力表征的概况

Fig. 3 Overview of the in-situ stress characterization in the Bedretto Underground Laboratory, Switzerland

(a) Breakout identified on the borehole image log; (b) Borehole ellipticity

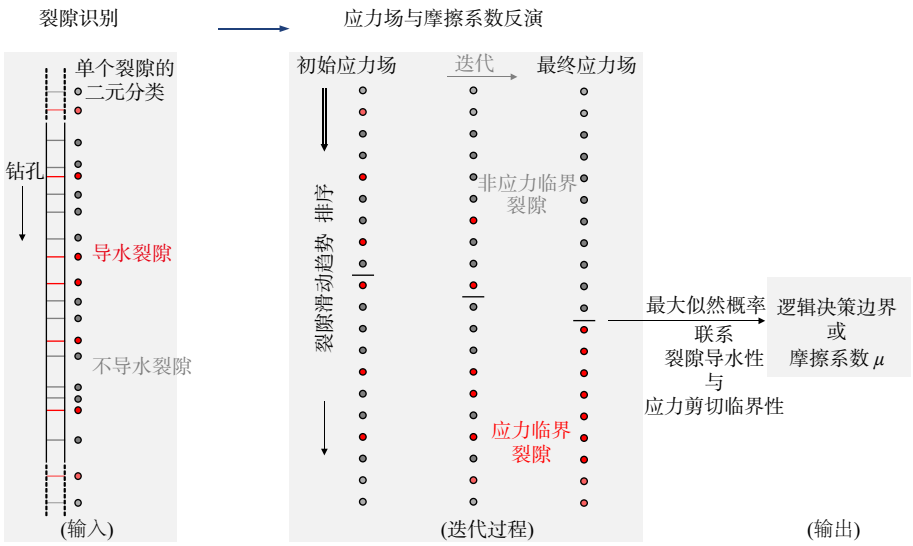
$X$ represents the east direction, and $Y$ represents the north direction.

穿透的地壳岩体应力状态(Zhang et al., 2023b)。采用二元逻辑回归方法，对裂隙应力临界性与导水性进行相关性分析，进一步结合网格搜索算法，通过使裂隙导水性的二元分类获得最优解，反演 km 尺度地壳的应力状态(三向主应力方向与主应力比值；图 4)。美国 Cajon Pass、Long Valley、Nevada Test Site 及德国 KTB 等 4 口经典的科学钻井应用该方法获得的数据显示，应力反演结果与现场原位独立测量结果高度吻合(Zoback et al., 1993)。在反演应力结果下，通过最大化似然概率得到裂隙导水性二元分类的最优决策边界，全部 4 个案例都十分接近 Byerlee 岩石摩擦系数经验值($\mu \approx 0.6$)，证实了实验室岩石摩擦实验结果在 km 尺度地壳岩体中的适用性。该方法仅需常规钻孔成像测井和温度测井数据，通过高效的反演算法经济、准确地获取地壳深部岩体摩擦强度和应力状态，是综合应力赋存机制与数据科学的关于应力观测的新尝试。

## 5 结束语

近几十年来，以水压致裂测试和钻孔破坏观测为代表的钻孔中应力观测，源于经典的理论，基于相对局限的手段、相对有限的结果和相对片面的认识，逐渐拼接起人们对于地壳应力场的总体认识。基于这些“一孔之见”，得以一窥脆性上部地壳的原位状态，连接不同空间尺度的力学现象，推测不同时间尺度的成因机制。“一孔之见”的应力观测，融合了理论、装备和数据分析，连接了地球科学和工程科学，体现了地质力学方法的综合性。

随着深地探测和地下工程的不断推进，对应力原位观测的需求不断增长，地学工作者和工程建设者们对于地壳应力场的认识需要更加基础而精细、准确而高效，“一孔之见”的场景会更加多样化、复杂化。能源开发逐渐由传统的常规化石能源转向致密油气、地热、氢气等非常规能源；新能源产业和储能设备的更新迭代催生了对战略性关键矿产的持续需求；深埋地下结构建设(如能源储库、水利水电、交通物流、韧性城市)在不断拓展广义地下资源的内涵；全球变化、环境保护的需求亟待大规模的二氧化碳、工业废料地质埋存，等等。而这些“向深地要资源”的工业活动都可能伴有不同程度的地质灾害和生态代价(如诱发地震、地表沉陷等)。这些新目标和可能产生的新问题给地质力学带来了前所未有的挑战，同时也给“一孔之见”的应




将钻孔成像和温度测井识别并分类的导水/不导水裂隙，作为输入数据进行应力场和地壳岩体摩擦系数的反演，获得联系裂隙导水性和剪切应力临界性的最大似然概率

图 4　利用钻孔中天然裂隙导水性开展地壳应力场和岩体摩擦系数反演的示意图

Fig. 4　Illustration of the inversion of the crustal stress and rock mass frictional coefficient via natural fracture hydraulic conductivity

Natural fractures are identified and classified through borehole image logs and temperature logs; they serve as input for the inversion of in-situ stress and the crustal rock mass frictional coefficient, which attains maximum likelihood linking fracture hydraulic conductivity and shear stress criticality.

力探测发展带来了新的机遇。

深部地壳岩体所处的极端环境以及岩体本身的复杂性，均难以用常规、单学科的理论体系加以科学解释。地壳应力，不仅受控于外部的构造、地貌作用，也受内部的断层、流体压力控制，为岩体自身的流变、结构面摩擦性质所调节。同样地，这种多重因素耦合的复杂性也局限了当前直接观测地壳应力的手段，并割裂了观测方法、理论和数据处理。探索地应力赋存机制及其空间变化的原位观测和理论工作难以做到较好的协调与整合，限制了应力数据的有效采集与解释；继而限制了应力相关数据库的整合及其大数据应用。在现场观测、理论和数据分析这些方面各自取得的渐进式进展，很难让学者们在更好地理解地壳应力赋存机制的问题上取得根本性的突破。领域内迫切需要提出替代性的思路，融合仪器科学、数据科学和基础地质力学理论，可以从以下 3 个"小"切入点来解决"大"问题，构建应力探测的"新范式"：

（1）探索深部钻孔中应力探测原创性、替代性的手段，借助先进装备高效获取应力指示物，增加同时测量的物理量来尽可能多地采集与应力相关的信息。

（2）扩增地壳应力数据并开展创新性的应力数据分析，扩充获取的数据量和连续性，借助数据科学和人工智能来解读数据，构建多样性数据集反演地壳应力场。

（3）发展简单实用的地壳应力赋存模型，有效联结相适应的应力探测手段和数据分析方法，便于联结数据采集和分析手段，跳出复杂、局限的理论框架，自下而上从数据中提取知识。

**致谢：**感谢中国地质科学院地质力学所陈群策研究员邀请撰写此文。感谢 Bezalel C. Haimson 与 Mark D. Zoback 两位教授作为导师对作者地应力研究的启发与引导。感谢熊思捷、王光宇等课题组同学在文章撰写过程中的协助。文章主要由国家深地科技重大专项"深部应力探测关键技术与实验研究"项目"地应力观测示范与赋存机制研究"课题（编号：2024ZD1000705）资助。

## References

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

ASK M, PIERDOMINICI S, ROSBERG J E, 2024. Image analysis of acoustic data and interpretation of rock stress orientations for geothermal exploration in Gothenburg borehole GE-1, SW Sweden[J]. Geological Society, London, Special Publications, 546(1): 69-91.

BARREE R D D, MISKIMINS J L L, GILBERT J V V, 2015. Diagnostic

fracture injection tests: common mistakes, misfires, and misdiagnoses[J]. SPE Production & Operations, 30(2): 84-98.

BARTON C A, ZOBACK M D, 1994. Stress perturbations associated with active faults penetrated by boreholes: possible evidence for near-complete stress drop and a new technique for stress magnitude measurement [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 99(B5): 9373-9390.

BARTON C A, ZOBACK M D, MOOS D, 1995. Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock[J]. Geology, 23(8): 683-686.

BELL J S, GOUGH D I, 1979. Northeast-southwest compressive stress in Alberta evidence from oil wells[J]. Earth and Planetary Science Letters, 45(2): 475-482.

BJØRLYKKE K, 2001. How faulting keeps the crust strong: comment and reply[J]. Geology, 29(2): 189-190.

BONNET E, BOUR O, ODLING N E, et al., 2001. Scaling of fracture systems in geological media[J]. Reviews of Geophysics, 39(3): 347-383.

BRACE W F, KOHLSTEDT D L, 1980. Limits on lithospheric stress imposed by laboratory experiments[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 85(B11): 6248-6252.

BRÖKER K, MA X D, 2022. Estimating the least principal stress in a granitic rock mass: systematic mini-frac tests and elaborated pressure transient analysis[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 55(4): 1931-1954.

BRÖKER K, MA X D, ZHANG S H, et al., 2024. Constraining the stress field and its variability at the BedrettoLab: elaborated hydraulic fracture trace analysis[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 178: 105739.

BYERLEE J, 1978. Friction of rocks[J]. Pure and Applied Geophysics, 116: 615-626.

CHANG C D, JO Y, 2015. Heterogeneous in situ stress magnitudes due to the presence of weak natural discontinuities in granitic rocks[J]. Tectonophysics, 664: 83-97.

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)

CHESTER F M, EVANS J P, BIEGEL R L, 1993. Internal structure and weakening mechanisms of the San Andreas fault[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 98(B1): 771-786.

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.

CORNET F H, BÉRARD T, BOUROUIS S, 2007. How close to failure is a granite rock mass at a 5 km depth?[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 44(1): 47-66.

CORNET F H, 2017. Vertical stress profiles and long-term rock mass rheology[R]. ARMA 17 - MTS lecture, San Francisco: American Rock Mechanics Association.

DAVATZES N C, HICKMAN S H, 2010. Stress, fracture, and fluid-flow analysis using acoustic and electrical image logs in hot fractured granites of the Coso geothermal field, California, U. S. A. [M]//PÖPPELREITER M, GARCÍA-CARBALLIDO C, KRAAIJVELD M. Dipmeter and borehole image log technology. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists.

DAY - LEWIS A, ZOBACK M, HICKMAN S, 2010. Scale - invariant stress orientations and seismicity rates near the San Andreas Fault[J]. Geophysical Research Letters, 37(24): L24304.

DESROCHES J, KURKJIAN A L, 1999. Applications of wireline stress measurements[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2(5): 451-461.

DIAS L O, BOM C R, FARIA E L, et al., 2020. Automatic detection of fractures and breakouts patterns in acoustic borehole image logs using fast-region convolutional neural networks[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 191: 107099.

DU L, LU X M, LI H Z, 2023. Automatic fracture detection from the images of electrical image logs using Mask R-CNN[J]. Fuel, 351: 128992.

ELLSWORTH W L, 2013. Injection-induced earthquakes[J]. Science, 341(6142): 1225942.

ELSWORTH D, SPIERS C J, NIEMEIJER A R, 2016. Understanding induced seismicity: observational data sets provide a clearer picture of the causes of induced seismicity[J]. Science, 354(6318): 1380-1381.

FAN T Y, LÜ C X, LÜ G X, 2024. Analysis of crustal stress in tectonic ore-forming processes: research status and thought[J]. Geoscience, 38(4): 865-872.

FENG C J, LI B, LI H, et al., 2022. Estimation of in-situ stress field surrounding the Namcha Barwa region and discussion on the tectonic stability[J]. Journal of Geomechanics, 28(6): 919-937. (in Chinese with English abstract)

GAO G Y, ZHANG M Y, WANG C H, et al., 2025. Fine division of recent tectonic stress field and stress profile construction in central Yunnan based on multi-source data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 68(10): 3743-3765. (in Chinese with English abstract)

GUAN L N, JIANG G M, 2023. High-precision earthquake locations and deep fault characteristics beneath Xianyou Area, Fujian Province[J]. Geoscience, 37(1): 40-47.

GUGLIELMI Y, CAPPA F, LANÇON H, et al., 2014. ISRM suggested method for step-rate injection method for fracture in-situ properties (SIMFIP): using a 3-components borehole deformation sensor[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 47(1): 303-311.

GUGLIELMI Y, CAPPA F, AVOUAC J P, et al., 2015. Seismicity triggered by fluid injection–induced aseismic slip[J]. Science, 348(6240): 1224-1226.

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

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.

HARDEBECK J L, HAUKSSON E, 2001. Crustal stress field in southern California and its implications for fault mechanics[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 106(B10): 21859-21882.

HEALY J H, RUBEY W W, GRIGGS D T, et al., 1968. The denver earthquakes[J]. Science, 161(3848): 1301-1310.

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

HUDSON J A, CORNET F H, CHRISTIANSSON R, 2003. ISRM Suggested Methods for rock stress estimation—Part 1: strategy for rock stress estimation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40(7-8): 991-998.

ITO T, ZOBACK M D, 2000. Fracture permeability and in situ stress to 7 km

depth in the KTB scientific drillhole[J]. Geophysical Research Letters, 27(7): 1045-1048.

KIRSCH E G, 1898. Die Theorie der Elastizit t und die Bed rfnisse der Festigkeitslehre[J]. Zeitshrift des Vereines deutscher Ingenieure, 42: 797-807.

KONG W L, HUANG L Y, YAO R, et al., 2021. Review of stress field studies in Sichuan-Yunnan region[J]. Progress in Geophysics, 36(5): 1853-1864. (in Chinese with English abstract)

KRIETSCH H, GISCHIG V, EVANS K, et al., 2019. Stress measurements for an in situ stimulation experiment in crystalline rock: integration of induced seismicity, stress relief and hydraulic methods[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 52(2): 517-542.

LEI X L, SU J R, WANG Z W, 2020. Growing seismicity in the Sichuan Basin and its association with industrial activities[J]. Science China Earth Sciences, 63(11): 1633-1660.

LI B, XIE F R, HUANG J S, et al., 2022. *In situ* stress state and seismic hazard in the Dayi seismic gap of the Longmenshan thrust belt[J]. Science China Earth Sciences, 65(7): 1388-1398.

LISLE R J, SRIVASTAVA D C, 2004. Test of the frictional reactivation theory for faults and validity of fault-slip analysis[J]. Geology, 32(7): 569-572.

LIU Z Y, WANG C H, XU X, et al., 2017. Slip tendency analysis of the mid-segment of Tan-Lu fault belt based on stress measurements[J]. Geoscience, 31(4): 869-876. (in Chinese with English abstract)

LOCKNER D A, MORROW C, MOORE D, et al., 2011. Low strength of deep San Andreas fault gouge from SAFOD core[J]. Nature, 472(7341): 82-85.

LUNDSTERN J E, ZOBACK M D, 2020. Multiscale variations of the crustal stress field throughout North America[J]. Nature Communications, 11(1): 1951.

MA X D, SAAR M O, FAN L S, 2020. Coulomb criterion-bounding crustal stress limit and intact rock failure: perspectives[J]. Powder Technology, 374: 106-110.

MA X D, HERTRICH M, AMANN F, et al., 2022a. Multi-disciplinary characterizations of the Bedretto Lab–a unique underground geoscience research facility[J]. Solid Earth Discussions, 2021: 1-40.

MA X D, ZHANG S H, ZHANG X W, et al., 2022b. Lithology-controlled stress variations of Longmaxi shale–Example of an appraisal wellbore in the Changning area[J]. Rock Mechanics Bulletin, 1(1): 100002.

MA X D, ZOBACK M D, 2020. Predicting lithology-controlled stress variations in the Woodford shale from well log data via viscoplastic relaxation[J]. SPE Journal, 25(5): 2534-2546.

MATTILA J, FOLLIN S, 2019. Does in situ state of stress affect fracture flow in crystalline settings?[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 124(5): 5241-5253.

MCCLURE M, FOWLER G, PICONE M, 2022. Best practices in DFIT interpretation: comparative analysis of 62 DFITs from nine different shale plays[C]//Proceedings of SPE international hydraulic fracturing technology conference & exhibition. Muscat: SPE: D031S011R001.

MCGARR A, ZOBACK M D, HANKS T C, 1982. Implications of an elastic analysis of in situ stress measurements near the San Andreas fault[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 87(B9): 7797-7806.

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)

MORRIS A, FERRILL D A, HENDERSON D B, 1996. Slip-tendency analysis and fault reactivation[J]. Geology, 24(3): 275-278.

NASIM M Q, MAITI T, MOSAVAT N, et al., 2025. Automated detection of geological features: leveraging deep learning for beddings and fractures identification in image logs[J]. SPE Journal, 30(4): 1569-1587.

OBARA Y, SUGAWARA K, 2003. Updating the use of the CCBO cell in Japan: overcoring case studies[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40(7-8): 1189-1203.

OHANIAN J, 2016. In-situ Stress Rock Fracture Sensing with HD-FOS. Luna Innovations Incorporated.

PEŠKA P, ZOBACK M D, 1995. Compressive and tensile failure of inclined well bores and determination of in situ stress and rock strength[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 100(B7): 12791-12811.

PLUMB R A, HICKMAN S H, 1985. Stress - induced borehole elongation: a comparison between the four - arm dipmeter and the borehole televiewer in the Auburn geothermal well[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 90(B7): 5513-5521.

PROVOST A S, HOUSTON H, 2001. Orientation of the stress field surrounding the creeping section of the San Andreas Fault: evidence for a narrow mechanically weak fault zone[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 106(B6): 11373-11386.

RAJABI M, ZIEGLER M, HEIDBACH O, et al., 2024. Contribution of mine borehole data toward high-resolution stress mapping: an example from northern Bowen Basin, Australia[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 173: 105630.

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

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.

SCHAIBLE K E, SAFFER D M, 2025. State of stress across major faults in the Nankai subduction zone estimated from wellbore breakouts[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 130(7): e2024JB030242.

SCHMITT D R, CURRIE C A, ZHANG L, 2012. Crustal stress determination from boreholes and rock cores: fundamental principles[J]. Tectonophysics, 580: 1-26.

SCHOENBALL M, DAVATZES N C, 2017. Quantifying the heterogeneity of the tectonic stress field using borehole data[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 122(8): 6737-6756.

SHAMIR G, ZOBACK M D, 1992. Stress orientation profile to 3.5 km depth near the San Andreas fault at Cajon Pass, California[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 97(B4): 5059-5080.

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.

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

TRZECIAK M, DABROWSKI M, JAROSIŃSKI M, 2020. Stress distribution models in layered, viscoelastic sedimentary basins under tectonic and glacial loads[J]. Geophysical Journal International, 220(2): 768-793.

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.

VALLEY B, EVANS K F, 2009. Stress orientation to 5 km depth in the basement below Basel (Switzerland) from borehole failure analysis[J]. Swiss Journal of Geosciences, 102(3): 467.

WANG C H, SONG C K, GUO Q L, et al., 2014. Stress build-up in the shallow crust before the Lushan Earthquake based on the in-situ stress measurements[J]. Chinese Journal of Geophysics, 57(1): 102-114. (in Chinese with English abstract)

WANG K L, 2021. On the strength of subduction megathrusts[J]. Chinese Journal of Geophysics, 64(10): 3452-3465. (in Chinese with English abstract)

WANG W, SCHMITT D R, 2020. Automated borehole breakout interpretation from ultrasonic imaging: application to a deep borehole drilled into the crystalline crust[C]//Proceedings of the 54th U. S. rock mechanics/geomechanics symposium. ARMA: ARMA-2020-1270.

XIE F R, CUI X F, ZHAO J T, et al., 2004. Regionalization of the recent tectonic stress field in China and adjacent regions[J]. Chinese Journal of Geophysics, 47(4): 745-754.

XING P J, MCLENNAN J, MOORE J, 2022. Minimum in-situ stress measurement using temperature signatures[J]. Geothermics, 98: 102282.

YANG J, GOODFELLOW S D, HARRISON J P, 2020. Automated extraction of borehole breakout properties from acoustic televiewer (ATV) data[C]//Proceedings of the 56th U. S. rock mechanics/geomechanics symposium. Santa Fe: ARMA: ARMA-2022-0408.

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.

YEOM J, KIM H, CHANG C D, et al., 2025. Automatic detection of borehole breakout for image logs using YOLO algorithm[J]. Geoenergy Science and Engineering, 252: 213925.

ZHANG C Y, DU S H, HE M C, et al., 2022. Characteristics of in-situ stresses on the western margin of the eastern Himalayan syntaxis and its influence on stability of tunnel surrounding rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 41(5): 954-968. (in Chinese with English abstract)

ZHANG J, KUANG W H, ZHANG X, et al., 2021. Global review of induced earthquakes in oil and gas production fields[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 52(3): 239-265. (in Chinese with English abstract)

ZHANG J, KUANG W H, ZHANG X, et al., 2021. Global review of induced earthquakes in oil and gas production fields[J]. Reviews of Geophysics and Planetary Physics, 52(3): 239-265. (in Chinese with English abstract)

ZHANG S H, MA X D, 2021b. How does in situ stress rotate within a fault zone? Insights from explicit modeling of the frictional, fractured rock mass[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 126(11): e2021JB022348.

ZHANG S H, MA X D, BRÖKER K, et al., 2023a. Fault zone spatial stress variations in a granitic rock mass: revealed by breakouts within an array of boreholes[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 128(8): e2023JB026477.

ZHANG S H, MA X D, ZOBACK M, 2023b. Determination of the crustal friction and state of stress in deep boreholes using hydrologic indicators[J]. Rock Mechanics Bulletin, 2(1): 100024.

ZHANG S H, MA X D, 2021. Global frictional equilibrium via stochastic, local Coulomb frictional slips[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 126(7): e2020JB021404.

ZOBACK M D, MOOS D, MASTIN L, et al., 1985. Well bore breakouts and in situ stress[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 90(B7): 5523-5530.

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, TOWNEND J, 2001. Implications of hydrostatic pore pressures and high crustal strength for the deformation of intraplate lithosphere[J]. Tectonophysics, 336(1-4): 19-30.

ZOBACK M D, BARTON C A, BRUDY M, et al., 2003. Determination of stress orientation and magnitude in deep wells[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40(7-8): 1049-1076.

ZOBACK M D, 2010. Reservoir geomechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press.

ZOBACK M L, 1992. First - and second - order patterns of stress in the lithosphere: the World Stress Map Project[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 97(B8): 11703-11728.

## 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.

丰成君，李滨，李惠，等，2022. 南迦巴瓦地区地应力场估算与构造稳定性探讨[J]. 地质力学学报，28(6)：919-937.

高桂云，张梦云，王成虎，等，2025. 基于多源数据的滇中现代构造应力场精细化分区及应力剖面构建[J]. 地球物理学报，68(10)：3743-3765.

孔维林，黄禄渊，姚瑞，等，2021. 川滇地区应力场研究进展[J]. 地球物理学进展，36(5)：1853-1864.

雷兴林，苏金蓉，王志伟，2020. 四川盆地南部持续增长的地震活动及其与工业注水活动的关联[J]. 中国科学：地球科学，50(11)：1505-1532.

李兵，谢富仁，黄金水，等，2022. 龙门山断裂带大邑地震空区地应力状态与地震危险性[J]. 中国科学：地球科学，52(7)：1409-1418.

刘卓岩，王成虎，徐鑫，等，2017. 基于地应力实测数据分析郯庐断裂带中段滑动趋势[J]. 现代地质，31(4)：869-876.

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.

王成虎，宋成科，郭启良，等，2014. 利用原地应力实测资料分析芦山地震震前浅部地壳应力积累[J]. 地球物理学报，57(1)：102-114.

王克林，2021. 俯冲带大断层的强度问题[J]. 地球物理学报，64(10)：3452-3465.

张重远，杜世回，何满潮，等，2022. 喜马拉雅东构造结西缘地应力特征及其对隧道围岩稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报，41(5)：954-968.

张捷，况文欢，张雄，等，2021. 全球油气开采诱发地震的研究现状与对策[J]. 地球与行星物理论评，52(3)：239-265.