引用格式：熊思捷，马晓冬，杨跃辉，等，2026. 基于水压致裂数据的浅部地应力精细化表征与分析[J]. 地质力学学报，32（2）：414−426. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025096

Citation: XIONG S J，MA X D，YANG Y H，et al.，2026. Refined characterization and analysis of shallow crustal stresses based on hydraulic fracturing data[J]. Journal of Geomechanics，32（2）：414−426. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025096

基于水压致裂数据的浅部地应力精细化表征与分析

熊思捷[1,2]，马晓冬[1,2]，杨跃辉[3,4]，吴邦宸[3,4]，李阿伟[3,4]，孙东生[3,4]

XIONG Sijie[1,2]，MA Xiaodong[1,2]，YANG Yuehui[3,4]，WU Bangchen[3,4]，LI Awei[3,4]，SUN Dongsheng[3,4]

1. 精密大地测量与定位全国重点实验室，安徽 合肥 230026；
2. 中国科学技术大学地球和空间科学学院，安徽 合肥 230026；
3. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081；
4. 自然资源部地应力工程技术创新中心，北京 100081

1. *State Key Laboratory of Precision Geodesy*, *Hefei* 230026, *Anhui*, *China*;
2. *School of Earth and Space Sciences*, *University of Science and Technology of China*, *Hefei* 230026, *Anhui*, *China*;
3. *Institute of Geomechanics*, *Chinese Academy of Geological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*;
4. *Engineering Technology Innovation Center of In-situ Stress*, *Ministry of Natural Resources*, *Beijing* 100081, *China*

Refined characterization and analysis of shallow crustal stresses based on hydraulic fracturing data

Abstract: ［**Objective**］In-situ stress field characterization is crucial for underground engineering safety, rock stability evaluation, and resource development. Current research in Guangdong Province is mainly concentrated on deep crustal levels, where stress interpretations predominantly rely on focal mechanism inversion and numerical modelling, while shallow stress conditions (<500 m) remain insufficiently constrained due to a lack of direct measurements and fine-scale analysis. To address this gap, this study constructs a shallow stress profile for two boreholes (ZK1 and ZK2, both < 500 m deep) in central–southern Guangdong using hydraulic fracturing and ultrasonic imaging data, aiming to refine shallow stress magnitudes, orientations, and occurrence mechanisms. ［**Methods**］Borehole imaging was applied to record hydraulic fracture morphology before and after pressurization, ensuring accurate extraction of the principal stress orientation, while pressure curves and overburden stress were combined to determine stress magnitude. Stress regimes were further characterized using the A_φ parameter, and only intervals demonstrating reliable fracture propagation and stable pressurization response were selected to ensure high-quality stress results. Based on this, a shallow stress profile was established, and the Coulomb failure criterion was used to compute slip tendency (T_s) to evaluate natural fracture stability. ［**Results**］Within the 253.8–349.8 m interval in ZK1, S_{hmin} ranges from 7.8–12.1 MPa and S_{Hmax} from 13.7–21.7 MPa, corresponding to $A_\varphi \approx 2$–3, indicative of thrust-faulting stress. In ZK2 at depths of 129.2–471.2 m, S_{hmin} is 5.8–9.9 MPa and S_{Hmax} is 9.7–18.2 MPa, and A_φ shows a depth-dependent transition: thrust-faulting characteristics ($A_\varphi \approx 2$–3) above 215.3 m, strike-slip stress ($A_\varphi \approx 1$–2) at intermediate depths, and gradual evolution toward normal-faulting stress ($A_\varphi \approx 0$–1) at greater depths. Hydraulic fractures in both boreholes are predominantly sub-vertical, with stable maximum horizontal stress orientations of N18°W in ZK1 and N15°W in ZK2, with standard deviations of <10°. Nonetheless, shallow intervals show pronounced azimuth deflection, above ～293 m in ZK1, the deviation reaches 23°, and above ～203 m in ZK2, it reaches 29° toward the NNE, possibly suggesting fracture-induced heterogeneity weakens the rock mass, modifies local stress

基金项目：深地国家科技重大专项（2024ZD1000705）

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

第一作者：熊思捷（2001—），男，在读硕士，主要研究方向为钻孔地应力测量。Email：xsj2001@mail.ustc.edu.cn

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

收稿日期：2025−07−30；**修回日期**：2026−01−02；**录用日期**：2026−01−06；**网络出版日期**：2026−03−24；**责任编辑**：王婧

Received：2025−07−30；Revised：2026−01−02；Accepted：2026−01−06；Available Online：2026−03−24；Handling Editor：WANG Jing

anisotropy, and causes reorientation of S_{Hmax}. Slip tendency calculations show T_s <0.4 throughout ZK2, indicating good fracture stability, In contrast, in ZK1, clusters within 290 ± 30 m reach T_s ≈0.6 near the frictional instability limit, accompanied by elevated S_{Hmax} relative to predicted trends, implying higher reactivation potential and mechanical risk. [**Conclusions**] ZK1 is dominated by thrust-faulting stress with S_{Hmax} trending ～N18°W. ZK2 exhibits a progressive transformation from thrust to strike-slip to normal-faulting stress state as depth increases, with S_{Hmax} consistently oriented between N15°W and N18°W. The shallow stress field (<500 m) is different from that of the deeper crust (>5 km), where strike-slip and normal-fault regimes dominate due to high vertical lithostatic loads, while reduced vertical stress in shallow rock favors horizontal compression and thrust-related stress. Fractures in ZK2 are stable, whereas ZK1 contains intervals with high slip potential, which require priority monitoring. [**Significance**] This work provides shallow in situ stress datasets for Guangdong derived from field measurements, significantly improves hydraulic fracturing interpretation reliability, offers essential mechanical parameters for near-surface engineering construction and hazard assessment, and demonstrates that shallow crust stress evolution is controlled by mechanisms distinct from those governing deeper tectonic stress fields, highlighting the scientific necessity of shallow stress measurement.

Keywords: in situ stress; hydraulic fracturing; stress field; stress occurrence state; slip tendency

摘　要：查明浅部地应力场赋存状态，对地下工程的建设及安全运维作用重大，同时有助于揭示地应力的赋存机制。作为常用的地应力测量方法，水压致裂法在数据处理分析中通常将应力大小和方向分开确定：应力大小由压裂曲线解译得出，应力方向则由水力裂缝方位确定。基础此，文章以广东中南部 2 个 500 m 以浅的钻孔（ZK1、ZK2）为研究对象，系统提取并刻画了整孔水力裂缝形态，结合应力相对大小关系，获得了更为准确的应力值；进而构建了研究区应力剖面，并探究了天然裂缝密度对应力状态的影响。结果表明：ZK1 钻孔整体呈逆冲型应力环境，ZK2 钻孔应力环境随深度依次表现为逆冲型、走滑型和正断型；2 个钻孔最大水平主应力方向分别为 N18°W 和 N15°W。该结果不同于区域深部应力特征，揭示了浅部地应力赋存状态及其控制因素的差异。此外，研究发现天然裂缝密度较高也可能引起浅部应力场的变化。天然裂缝滑移趋势分析表明，ZK2 钻孔中的天然裂缝稳定性总体上较好，而 ZK1 钻孔中的部分天然裂缝滑移趋势已接近 0.6 的经验摩擦极限，需重点监测其应力状态，以保障相关工程的安全。

关键词：地应力；水压致裂；应力场；应力赋存状态；滑移趋势

中图分类号：P315.72+7; P55　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1006−6616(2026)02−0414−13

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025096

0　引言

准确获取原位地应力状态是保障地下工程安全、优化深地资源开发及评估地质灾害风险的关键前提(陈群策等, 2019; 秦向辉等, 2023; 曹欢等, 2024; 马天寿等, 2024)。工程实践中, 如何在浅部地层中准确获取主应力量值及方向, 一直是地应力测量面临的核心挑战(王成虎和李蔚, 2025)。传统水压致裂法虽为应用最广泛的应力测量技术(Haimson and Cornet, 2003), 但在浅部地层中仍存在一定局限性: 一方面, 浅部岩体天然裂缝发育密集、水平应力差较小, 常导致压裂曲线特征不典型、瞬时关闭压力与重张压力难以准确识别, 直接影响应力量值的精度; 另一方面, 浅部水力裂缝形态易受到天然裂缝和围岩非均质性的干扰, 增加了应力方向识别的不确定性(马晓冬, 2025)。这些问题直接制约了水压致裂法在浅部地层的应用效果, 也限制了对浅部应力场特征与赋存状态的深入理解。

近年来, 超声波成像测井技术的发展使得在压裂前后获取高分辨率的井壁图像成为可能, 从而实现对水力裂缝与天然裂缝等特征的精准识别(刘宇等, 2024; 赖锦等, 2025)。结合高质量的压裂曲线分析, 该技术为浅部复杂地质条件下的地应力大小与方向判定提供了有力支持, 也开辟了构建精细浅部应力场、深化应力数据价值的新路径。然而, 当前水压致裂数据的处理流程仍有待完善。多数研究将应力大小与方向的获取相互分离: 通常仅依据压裂曲线确定应力大小, 并依赖水力裂缝形态判断应力方向, 未能充分协同利用压裂曲线与井壁成像信息。此外, 浅部应力场的实测研究基础依然薄弱, 特别是在区域尺度上, 对于浅部应力场的控制因素、以及天然裂缝对应力场的调节作用等问题的认识仍不充分。

随着粤港澳大湾区基础设施建设向纵深推进, 广东省已成为抽水蓄能电站、深埋长隧洞及大型水

利枢纽等重大工程集中的核心地带。这些近地表工程的稳定性高度依赖于对浅部地应力状态的精准掌握。然而,该区域地质构造复杂,断层发育,给应力场的准确获取带来了极大挑战。文章选取广东省肇庆—云浮区域作为研究区。针对该区域应力场特征,现有研究主要采用震源机制解与数值模拟方法,结果显示其最大水平主应力(S_{Hmax})方向以北西向为主,应力环境以走滑−正断型为主(杨树新等, 2012)。然而,这些研究多集中于深部(>5 km)应力场,浅部(<500 m)原位实测数据较为缺乏,限制了对浅部应力场特征及其工程响应的理解,亟需通过高精度原位测试予以补充。针对上述问题,文章结合水压致裂应力测试与超声波成像测井数据,对区内 2 个钻孔开展了系统的浅部地应力研究。首先,利用压裂前后井壁成像数据识别并精细刻画水力裂缝形态,据此确定应力方向;其次,通过压裂曲线提取与上覆基岩重力计算,初步获得应力量值;进而结合应力相对大小关系与水力裂缝发育特,筛选可靠性较高的测段,提升应力量值的准确性。在此基础上,进一步挖掘应力数据的潜在价值:一方面探讨天然裂缝密度对局部应力场的控制作用,另一方面通过对比深浅部应力场特征,探讨研究区浅部应力赋存状态及控制因素。最后,基于库仑准则对钻孔内天然裂缝的潜在滑移风险进行定量评估。研究成果可为近地表工程稳定性评估提供关键数据支撑,为优化水压致裂数据处理流程提供参考,同时深化对浅部应力赋存机制的理解。

1 研究区概况

研究区在大地构造上属华夏地块内部,正处于北东向吴川−四会断裂带与北西向西江断裂带的交汇部位,是华南沿海构造活动带的重要组成部分。自早古生代以来,研究区经历了至少 3 期强烈的构造事件:早古生代晚期,强烈的陆内造山作用致使地壳加厚,形成了过铝质花岗岩(Dong et al., 2015);早中生代时期,在多板块汇聚的背景下,华南东部沿海地区形成了北西/北北西向褶皱冲断带(Li et al., 2021);晚中生代时期,受古太平洋板块俯冲的影响,形成了>1000 m 的陆内变形带和大面积分布的岩浆岩(Li et al., 2018)。地貌上,区内以中低丘陵为主,山地、盆地与冲积平原呈相间分布的格局。

当前,研究区应力场呈现出“深部数据相对集中、浅部数据极为零散”的特征。在应力分区上,该区隶属于华南北西向主应力带中段,与珠三角、阳江等地处在同一个北西向应力带内(康英等, 2008),未见独立的小型应力分区,整体 S_{Hmax} 方向以北西向为主。具体而言,深部应力数据(>5.0 km)主要来源于两类震源机制解:一是世界应力地图(Heidbach et al., 2025)等数据库记录的 6 组数据;二是况文欢等(2025)针对 2007—2020 年间 M>3.0 地震事件反演获得的 83 组数据。如图 1 所示,该区深部 S_{Hmax} 方向以北西向为主,应力环境呈正断−走滑型;文章收集的浅部应力数据(<1.0 km)仅 21 组(含 11 组水压致裂、4 组应力解除及 6 组地质反演数据),揭示浅部 S_{Hmax} 集中于北西—北北西向,但应力环境转变为以逆冲−走滑型为主。另外,为量化应力环境,研究引入 A_φ 值参数(Simpson, 1997),其具体计算公式如下:

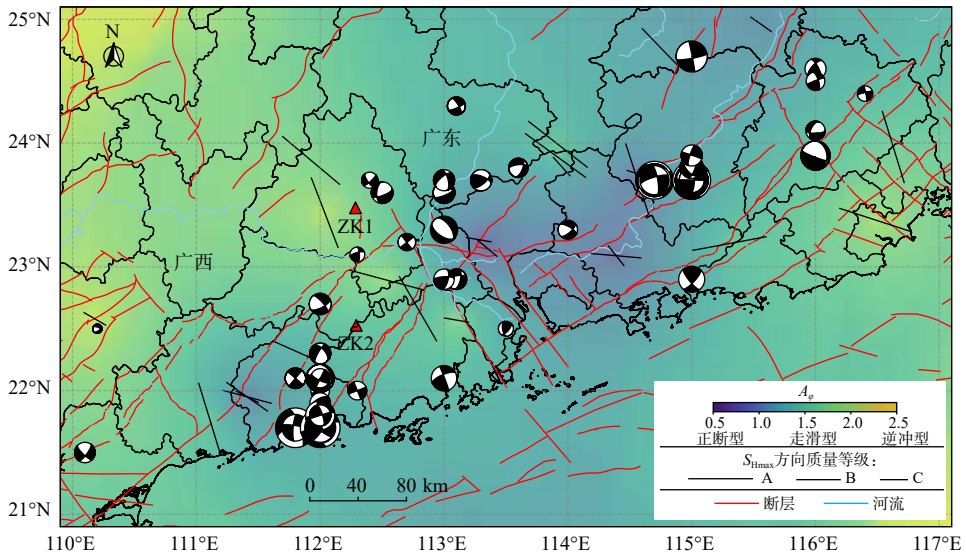
$$\varphi = (S_2 - S_3)/(S_1 - S_3) \tag{1}$$

$$A_\varphi = (n + 0.5) + (-1)^n(\varphi - 0.5) \tag{2}$$

式中,φ 为应力比;S_1、S_2 和 S_3 依次为最大主应力、中间主应力和最小主应力;n 依据应力环境取值:正断型应力环境下,n = 0,对应 A_φ 值范围为 0 ～ 1;走滑型应力环境下,n = 1,对应 A_φ 值范围为 1 ～ 2;逆冲型应力环境下,n = 2,对应 A_φ 值范围为 2 ～ 3。根据应力环境信息设定:正断型应力环境下,A_φ = 0.5;走滑型应力状态下,A_φ = 1.5;逆冲型应力状态下,A_φ = 2.5。通过对 A_φ 进行经验贝叶斯克里金插值,即可估算整个区域的应力状态(Lundstern and Zoback, 2020),最终插值结果以图 1 中底色表示。

2 水压致裂应力测试流程

文章选取的 ZK1、ZK2 钻孔分别位于广东省肇庆市、云浮市(图 1)。其中,ZK1 钻孔附近地表高程 475.0 ～ 625.0 m,上覆基岩厚度约 360.0 ～ 450.0 m;钻孔为孔径 76.0 mm 的垂直钻孔,终孔孔深 376.0 m,静水位位于地表(埋深 0 m),其周边 10.0 km 范围内海拔 86.0 ～ 984.0 m,平均海拔约 467.6 m。ZK2 钻孔附近地表高程 660.0 ～ 760.0 m,上覆基岩厚度约 460.0 ～ 560.0 m;钻孔亦为孔径 76.0 mm 的垂直钻孔,终孔孔深 480.0 m,静水位深度为 33.0 m,其周边 10.0 km 范围内海拔 46.0 ～ 1223.0 m,平均高程约 453.3 m。2 个钻孔周边出露地层主要为燕山期中粒斑状黑云母花岗岩,岩性单一,地质构造相对简单,周围 15.0 km 范围内未发现规模较大的断层。



ZK1 与 ZK2 为 2 个钻孔所在位置；黑色线条指向为 S_{Hmax} 的方向；黑白沙滩球为况文欢等（2025）反演的 83 组震源机制解

图 1　广东及其邻区应力场

Fig. 1　The stress field in Guangdong Province and its adjacent areas

The locations of ZK1 and ZK2 boreholes are marked with triangles. The orientation of the black lines shows the S_{Hmax} azimuth. The beach balls represent 83 focal mechanism solutions inverted by Kuang et al., (2025).

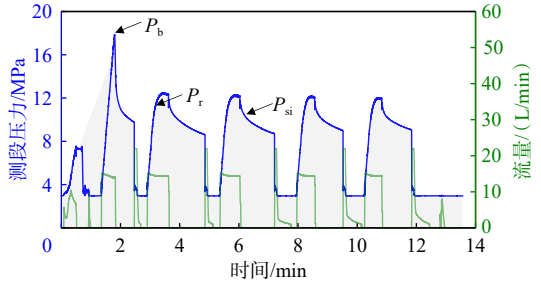
水压致裂应力测试采用单回路测量系统（Yang et al., 2025），通过长度 1.2 m 的可膨胀跨接式封隔器对目标测段实施坐封，利用高压泵注水增压并同步监测实时流量与测段压力（文中分析的压力值均指井下测段的实际压力），最终由转换开关控制解封或压裂。2 个钻孔共完成 23 个测段的应力数据采集，其中 ZK1 钻孔完成了 8 个测段（长度 1.0 m）的应力测试，ZK2 钻孔完成了 15 个测段（长度 1.2 m）的应力测试。为评估岩体透水性，额外在 ZK2 钻孔开展了 12 个测段（长度 5.0 m）的高压压水试验，完成后立即进行水压致裂应力测试。为确保水力裂缝充分起裂与扩展，水压致裂测段均实施 4 ～ 5 个压裂回次；ZK2 钻孔 12 个高压压水测段最多实施 2 个压裂回次，应力参数拾取精度不足，故仅用于应力方向分析。此外，ZK1 钻孔 323.8 m 测段因压力计故障，同样仅用于应力方向分析。

为获取压裂前后井壁水力裂缝、天然裂缝等特征，采用超声波成像测井（Acoustic Borehole Televiewer, ATV）对 2 个钻孔进行扫描录井，获得了压裂前后的井壁 ATV 数据。受套管干扰等因素影响，部分井段数据无效，经剔除异常数据后，最终获得有效数据的深度区间为 ZK1 钻孔 21.0 ～ 365.0 m、ZK2 钻孔 50.0 ～ 475.0 m，为后续水力裂缝识别提供数据支撑。

3　研究方法

3.1　压裂曲线分析

基于压裂曲线可提取破裂压力 P_b、瞬时关闭压力 P_{si} 和裂缝重张压力 P_r 等关键压裂参数（图 2）。文中采用的参数拾取方法具体如下：以首个压裂回次的压力峰值作为 P_b（Rummel, 1987; Schmitt and Haimson, 2017）；采用 dP/dT 法提取 P_{si}（Haimson and Fairhurst, 1967; Lee and Haimson, 1989）；利用切线法提取 P_r（Baumgärtner and Zoback, 1989）。为保证结果的代表性，对同一测段内所有压裂回次的 P_{si} 和 P_r 值分别



P_b、P_{si} 和 P_r 分别表示破裂压力、瞬时关闭压力和裂缝重张压力

图 2　ZK1 钻孔 290.8 m 测段水压致裂典型压裂曲线

Fig. 2　Pressure curve of hydraulic fracturing in 290.8 m of ZK1

P_b、P_{si} and P_r represent breakdown pressure, instantaneous shut-in pressure and fracture reopening pressure, respectively

计算平均值，将其作为该测段的最终 P_{si} 和 P_r 值。此外，岩石抗拉强度 T 和孔隙压力 P_p 亦是水压致裂应力计算中不可或缺的参数。文中采用 P_b 和 P_r 的差值估算 T 值，并以静水压力近似代替实际孔隙压力 P_p（Bredehoeft et al., 1976; Haimson and Cornet, 2003; Zoback, 2007）。基于上述压裂参数，通过经典理论公式可计算最大水平主应力 S_{Hmax} 和最小水平主应力 S_{hmin}（Bredehoeft et al., 1976; Barton et al., 1995; Evans et al., 1999; Zoback and Townend, 2001）。由于 ZK1 钻孔（孔口海拔 467.6 m）和 ZK2 钻孔（孔口海拔 453.3 m）的高程与研究区平均海拔（460.0 m）相近，故采用上覆岩层自重应力近似替代垂向主应力 S_v，从而获得三向主应力大小。

3.2 水力裂缝精细化摘取

ATV 仪器测量的基本参数包括回波的走时与振幅，其中振幅则为回波信号的剩余振幅（图 3a、3b），可高分辨率识别孔壁特征（Zemanek et al., 1969）。测段内水力裂缝一般成对出现，且两侧裂缝的方位角相差约 180°。为精确拾取水力裂缝并获取方位等相关信息，采用分段直线拟合测段内和延伸至测段外的水力裂缝轨迹（图 3c）。文中定义水力裂缝与钻孔轴线的夹角为倾斜角：当水力裂缝倾斜角<15°时，使用红色折线段拟合裂缝轨迹；当倾斜角≥15°时，则用黑色折线段拟合裂缝轨迹（Bröker et al., 2024）。通过提取的水力裂缝方位信息，即可计算得到钻孔 S_{Hmax} 方向。

3.3 天然裂缝滑移趋势计算

开展天然裂缝的摩擦滑移趋势研究，对保障工程安全稳定运行具有重要意义。在摩擦系数相同的条件下，钻孔内的天然裂缝因走向与倾角差异，其摩擦滑移趋势表现出明显不同。文章采用天然裂缝平面内剪应力（τ）与有效正应力（σ_n）的比值 T_s［公式（3）］作为量化摩擦滑移趋势的指标（Morris et al., 1996; Moeck et al., 2009; Zhang et al., 2023）。研究表明，最大和最小主应力的最大比值受到岩体中存在的断层和裂缝的限制（Townend and Zoback, 2000; Zoback and Townend, 2001），即理论临界最大主应力可由公式（4）求得

$$T_s = \tau/\sigma_n \tag{3}$$

$$S_1 = (S_3 - P_p)\left[(\mu^2+1)^{\frac{1}{2}} + \mu\right]^2 + P_p \tag{4}$$

式中，μ 为摩擦系数；在逆冲型应力环境下，$S_3 = S_v$；在走滑型、正断型应力环境下，$S_3 = S_{hmin}$。针对逆冲型和走滑型应力环境，通过对各测段的 S_{hmin} 进行直线拟合，估算整孔 S_{hmin} 的变化值；进而根据公式（4）计算理论临界 S_{Hmax}，并以此估算整孔 S_{Hmax} 的变化趋势，以实现全孔不同深度水平主应力的连续估算。天然裂缝在振幅图像上通常呈正弦曲线状，文中通过绿色正弦曲线对其进行拾取（图 3c），获得整孔天然裂缝的产状信息，并以下球面投影图直观展示其产状特征（图 3d、3e）。基于所获取的天然裂缝

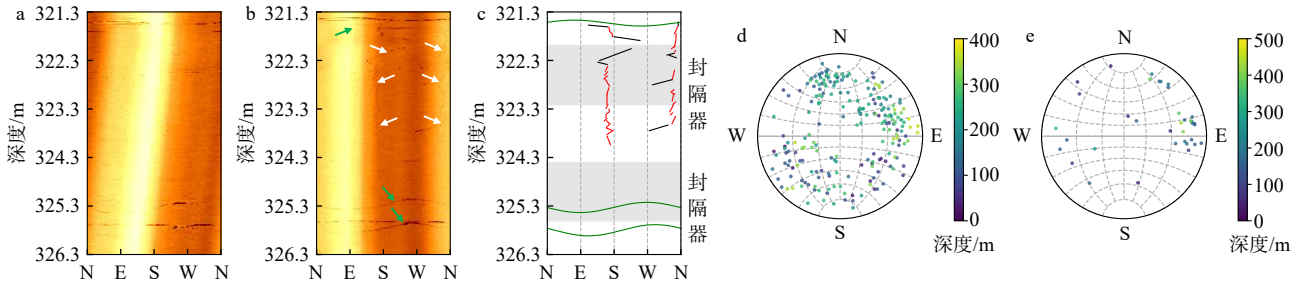


图 b 中白色箭头指示水力裂缝，绿色箭头指示天然裂缝；图 c 中红色折线表示倾斜角小于 15°的拉伸裂缝，黑色折线为倾斜角大于 15°的拉伸裂缝，绿色正弦曲线为天然裂缝；图 d 和 e 中散点为天然裂缝走向和倾角的下球面投影，颜色表示天然裂缝所处深度

a—压裂前振幅图像；b—压裂后振幅图像；c—水力裂缝拾取示意图；d—ZK1 钻孔天然裂缝下球面投影；e—ZK2 钻孔天然裂缝下球面投影

图 3 ZK1 钻孔 323.8 m 测段典型水力裂缝形态及 2 个钻孔天然裂缝下球面投影

Fig. 3 Hydraulic fracture near the depth of 323.8 m in ZK1, and spherical projection under natural fractures of two boreholes

(a) Amplitude image before hydraulic fracturing; (b) Amplitude image after hydraulic fracturing; (c) Schematic diagram of hydraulic fracture picking; (d) Lower hemisphere projection of natural fractures in borehole ZK1; (e) Lower hemisphere projection of natural fractures in borehole ZK2

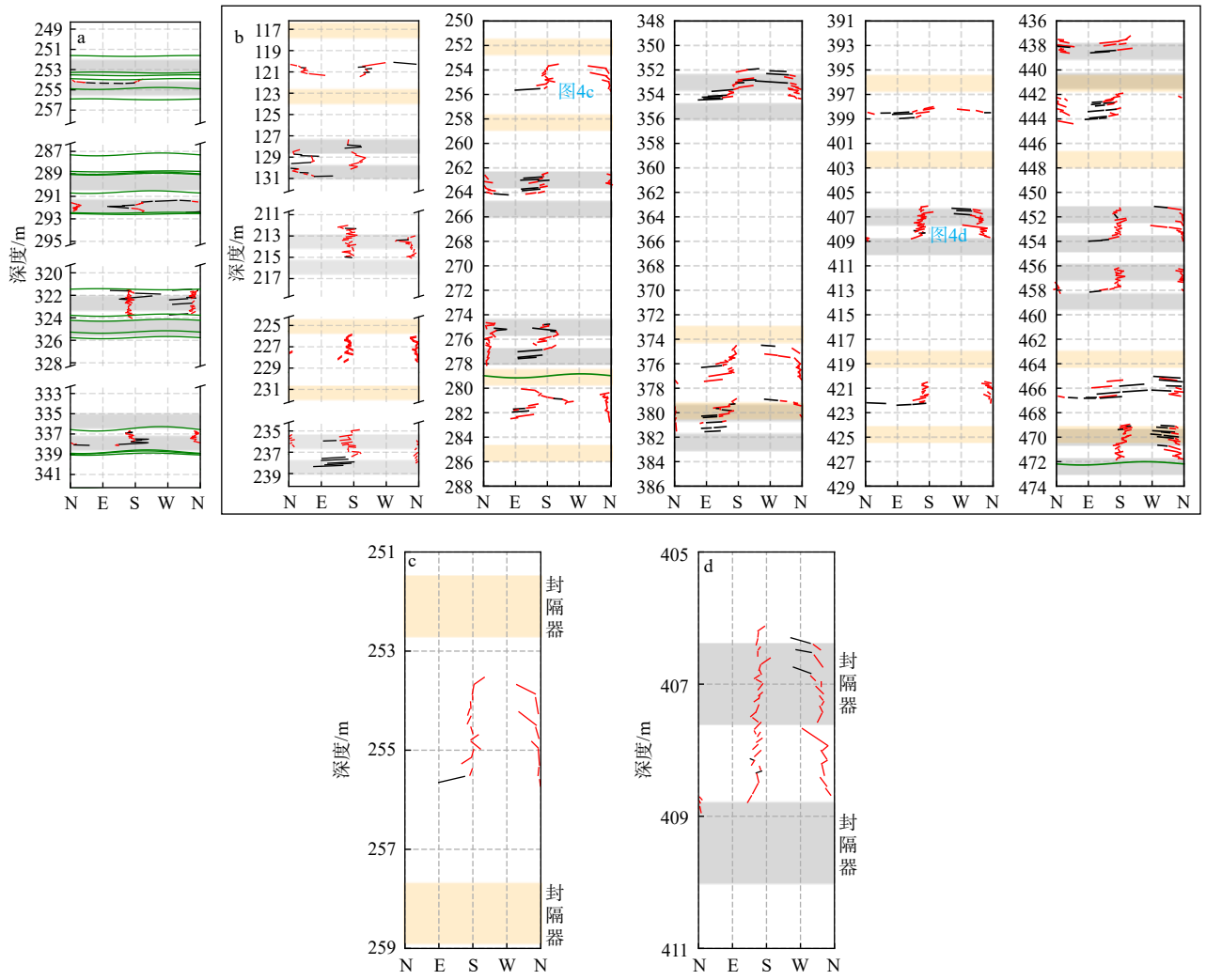
In panel b, white arrows indicate hydraulic fractures, and the green arrows indicate natural fractures. In panel c, red polylines indicate tensile fractures with dip angles less than 15°, while black polylines represent those with dip angles greater than 15°, and the green sinusoidal curves represent natural fractures. Scatters in panels d and e show the lower-hemisphere projections of the strike and dip of natural fractures, with the color representing the depth of natural fractures.

产状信息，结合 S_v 和 P_P 大小及 S_{Hmax} 方向，即可通过公式(3)量化计算整孔天然裂缝的滑移趋势。

4　研究结果

4.1　应力方向

压裂后振幅图像显示：ZK1 钻孔的 9 个测段中，有 5 个测段可识别出水力裂缝(图 4a)；ZK2 钻孔的 27 个测段(包括高压压水测段)中，有 18 个测段可识别出水力裂缝(图 4b)。尽管压裂曲线显示破裂压力特征明显，证实岩体已发生破裂，但部分测段在振幅图像中未显示水力裂缝轨迹。推测其原因可能是测试结束后，压力卸载导致水力裂缝闭合，致使成像测井难以捕捉已闭合的裂缝形态。理想情



灰色阴影表示水压致裂封隔器位置，黄色阴影为高压压水封隔器位置；红色折线表示倾斜角小于 15°的拉伸裂缝，黑色折线为倾斜角大于 15°的拉伸裂缝，绿色正弦曲线为天然裂缝

a—ZK1 钻孔水力裂缝拾取结果；b—ZK2 钻孔水力裂缝拾取结果；c—ZK2 钻孔高压压水测段水力裂缝拾取结果；d—ZK2 钻孔水压致裂测段水力裂缝拾取结果

图 4　ZK1 和 ZK2 钻孔全部测段水力裂缝拾取结果

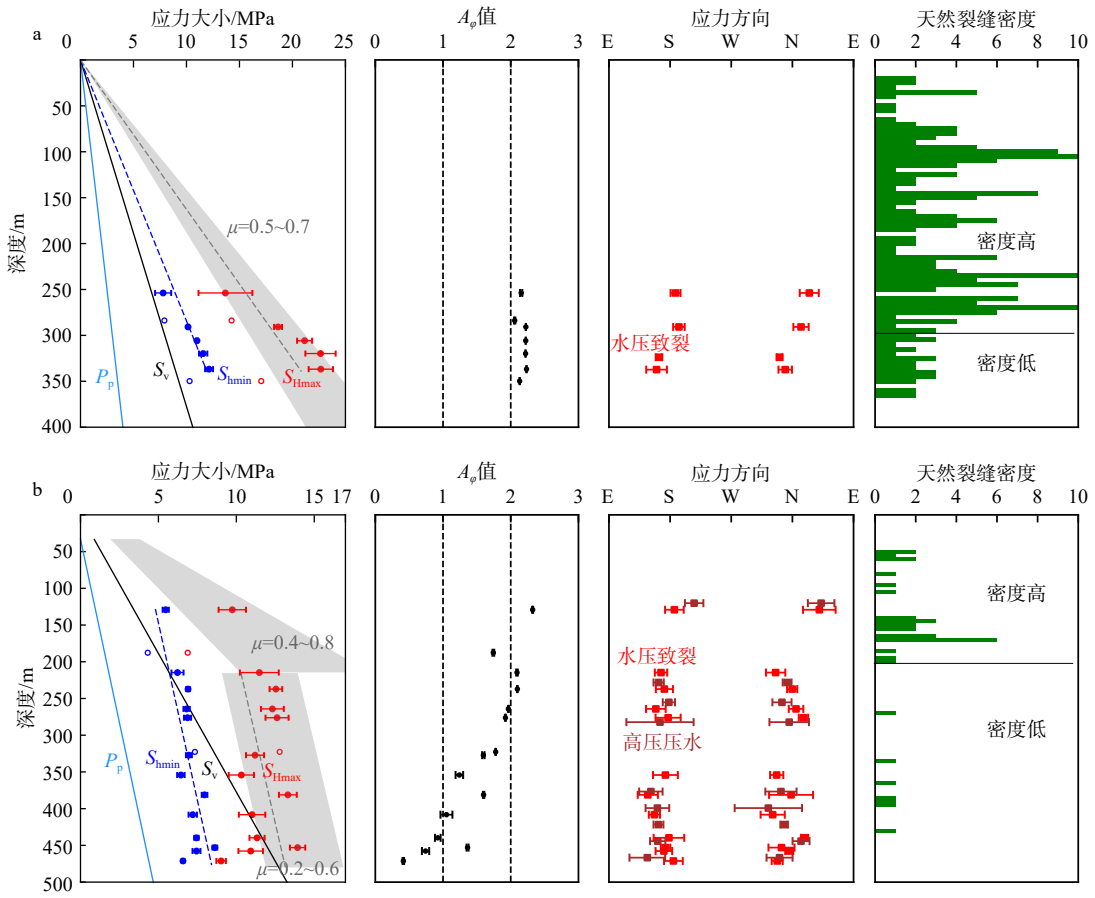
Fig. 4　Hydraulic fracture picks of borehole ZK1 and ZK2

(a) Hydraulic fracture identification results of borehole ZK1; (b) Hydraulic fracture identification results of borehole ZK2; (c) Hydraulic fracture identification results of the high-pressure water test section in borehole ZK2; (d) Hydraulic fracture identification results of the hydraulic fracturing section in borehole ZK2.

The gray shaded area indicates the position of the hydraulic fracturing packer, The yellow shaded areas indicate the packer locations for high-pressure water injection. Red polylines indicate tensile fractures with dip angles less than 15°, while black polylines represent those with dip angles greater than 15°, the green sinusoidal curves represent natural fractures

况下，水力裂缝仅在测段内发育（图 4c），但实际观察中发现部分裂缝延伸超出封隔器范围（图 4d），这可能反映了注水速率过快或注水持续时间偏长，建议在后续水压致裂试验中予以优化控制。进一步分析水力裂缝形态发现：2 个钻孔内水力裂缝并非沿竖直方向平直延伸，而是呈折线状分布。测段内水力裂缝方位变化较为显著，如 ZK1 钻孔 290.8 m 和 ZK2 钻孔 354.2 m 测段，部分水力裂缝方位变化幅度超过 180°。观察发现，方位变化剧烈的水力裂缝其倾斜角基本大于 15°，而倾斜角小于 15°的近轴向水力裂缝方位变化幅度较小，且此类裂缝在 2 个钻孔中占主导地位。根据国际岩石力学与工程学会（ISRM）发布的建议方法，对于垂直钻孔，当水力裂缝倾斜角小于 15°时，即可判定垂直应力为主应力之一，此时水力裂缝方位可表征 S_{Hmax} 的方向（Haimson and Cornet, 2003）。基于钻孔中水力裂缝的总体形态观察，初步认为地应力场中某一主应力方向近似垂直，并且 S_{Hmax} 方向可由倾斜角小于 15°的近轴向裂缝方位直接表征。

2 个钻孔中 S_{Hmax} 方向随深度的变化特征如图 5



应力大小剖面中，空心圆圈表示未观测到水力裂缝的测段，阴影部分为通过公式（4）计算得出的摩擦极限范围，灰色虚线分别为 μ = 0.6（ZK1）、μ = 0.4（ZK2）计算得出的理论最大 S_{Hmax}；裂缝密度剖面图中实横线用于划分天然裂缝密度相对高低

a—ZK1 钻孔应力大小剖面、A_φ 值剖面、应力方向剖面以及天然裂缝密度剖面；b—ZK2 钻孔应力大小剖面、A_φ 值剖面、应力方向剖面以及天然裂缝密度剖面

图 5 ZK1 和 ZK2 钻孔应力剖面

Fig. 5 Stress profile of borehole ZK1 and ZK2

(a) Profiles of stress magnitude, A_φ value, stress orientation and natural fracture density for borehole ZK1; (b) Profiles of stress magnitude, A_φ value, stress orientation and natural fracture density for borehole ZK2.

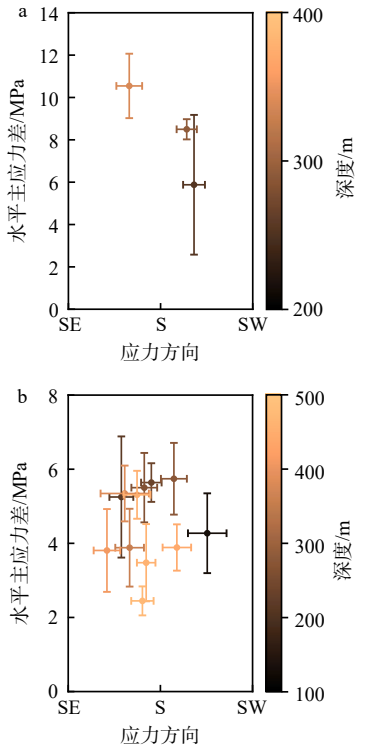
In the stress magnitude profiles, open circles represent intervals where no hydraulic fractures were observed. The shaded area denotes the friction limit range calculated by Equation (4). The gray dashed lines represent the theoretical maximum horizontal principal stress S_{Hmax} calculated with friction coefficients μ = 0.6 and μ = 0.4, respectively. In the natural fracture density profiles, solid horizontal lines are used to distinguish between relatively high and low natural fracture densities.

所示，水力裂缝的 S_{Hmax} 方向通过以下步骤确定：首先拾取倾斜角小于 15°的近轴向裂缝方位，再计算两侧方位角均值和均方差。结果显示，2 个钻孔 S_{Hmax} 方向整体集中于北北西向，但深浅部存在差异：ZK1 钻孔以 293.2 m 为界，浅部（≤293.2 m）为北北东向，深部（≥293.2 m）转为北北西向，深浅部方向差异约 23°；ZK2 钻孔以 203.1 m 为界，浅部（≤203.1 m）为北北东向，深部（≥203.1 m）转为北北西向，深浅部方向差异达 29°。水力裂缝的方位不仅受控于地应力方向，还可能受到周围天然裂缝分布与发育特征的影响。为探究天然裂缝对水力裂缝的影响，每隔 5 m 统计天然裂缝密度并绘制深度分布图（图 5）。结合水平主应力差（图 6）分析发现：ZK1 钻孔浅部测段水平主应力差大多<6.0 MPa，且天然裂缝密度相对较高；ZK2 钻孔整体水平主应力差<6.0 MPa，而浅部测段天然裂缝密度相对较高。浅部较高密度的天然裂缝可能降低局部岩石强度，形成非均匀应力场，促使接近摩擦极限的天然裂缝发生滑动，从而引起应力大小和方向的协同变化（Chang and Jo, 2015）。基于上述情况，文章选取天然裂缝密度较低的深部测段分析应力方向。结果显示：ZK1 钻孔水力裂缝方位角集中于 N18°W 附近，标准差<10°；ZK2 钻孔水力裂缝方位角集中于 N15°W 附近，标准差基本<20°。

4.2　应力大小

各测段压裂曲线分析获得的主应力值见表 1，应力大小剖面中 S_{hmin} 和 S_{Hmax} 的误差范围基于 P_{si}、P_r 的误差通过误差传递公式计算得到（图 5）。观察发现，2 个钻孔中均存在部分测段无法观测到水力裂缝且 S_{hmin} 与 S_v 较为接近的情况（图 7）。典型测段例如：ZK1 钻孔深度 283.8 m 处（S_{hmin} 与 S_v 相差约 0.4 MPa）、349.8 m 处（相差约 1.0 MPa）；ZK2 钻孔深度 187.7 m 处（相差约 0.3 MPa）、322.7 m 处（相差约 0.9 MPa）。这些测段存在水力裂缝沿水平方向起裂的可能，此时压裂曲线拾取的 P_{si} 值反映的是 S_v 的大小（Haimson, 1978）。为提高结果的可靠性，文章剔除了未观测到水力裂缝且 S_{hmin} 与 S_v 较为接近（差值在 1.3 MPa 以内）的测段，仅基于筛选后的测段开展分析。

基于表 1、公式（1）和（2），可计算各测段的 A_φ 值，用于量化钻孔的应力状态。ZK1 钻孔在 253.8 ～ 349.8 m 深度区间内，S_{hmin} 为 7.8 ～ 12.1 MPa、S_{Hmax} 为 13.7 ～ 22.7 MPa；A_φ 值介于 2 ～ 3，指示逆冲型应力环境。ZK2 钻孔在 129.2 ～ 471.2 m 深度区间内，S_{hmin} 为 5.8 ～ 9.9 MPa，S_{Hmax} 为 9.7 ～ 18.2 MPa；A_φ 值显示应力环境变化剧烈——深度<215.3 m，A_φ 值介于 2 ～ 3，表现为逆冲型应力环境；深度>215.3 m，A_φ 值主要介于 1 ～ 2，转为走滑型应力环境；钻孔底部测段的 A_φ 值介于 0 ～ 1，表明随着深度，应力环境呈现向正断型演化的趋势（图 5）。



横向误差棒表示水力裂缝方位的均值及标准差，纵向误差棒表示水平主应力差及其均方差

a—ZK1 钻孔；b—ZK2 钻孔

图 6　ZK1、ZK2 钻孔水平主应力差和水力裂缝方向的关系

Fig. 6　Relationship between horizontal principal stress difference and hydraulic fracture orientation in boreholes ZK1 and ZK2

(a) Relationship between horizontal principal stress difference and hydraulic fracture orientation in borehole ZK1 and ZK2; (b) Relationship between horizontal principal stress difference and hydraulic fracture orientation in borehole ZK2

The horizontal error bars represent the mean and standard of the hydraulic fracture azimuths, while the vertical error bars indicate the horizontal principal stress difference and its standard deviation.

5　讨论

5.1　应力赋存状态

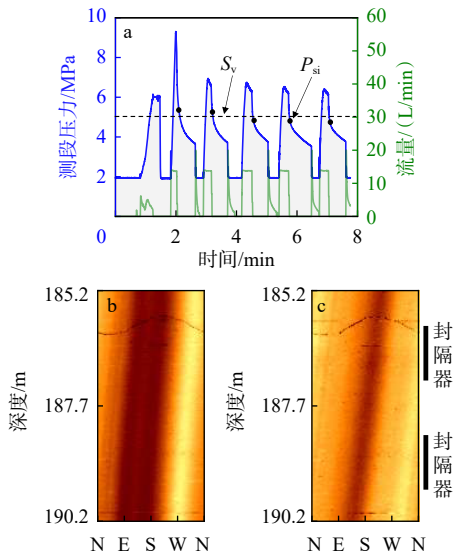
广东及其邻区主要受菲律宾板块向西北方向

表 1 ZK1 和 ZK2 钻孔水压致裂应力测试结果

Table 1 Estimated stress magnitudes and orientations in boreholes ZK1 and ZK2

序号	测段深度/m	P_b/MPa	P_{si}/MPa	P_r/MPa	T/MPa	P_p/MPa	S_{hmin}/MPa	S_{Hmax}/MPa	S_v/MPa	S_{Hmax}方向/(°) 均值±均方差
ZK1										
1	253.8	16.1	7.8	7.2	8.9	2.5	7.8	13.7	6.7	196.4 ± 5.3
2	283.8	11.7	7.9	6.7	5.1	2.8	7.9	14.3	7.5	未观察到水力裂缝
3	290.8	17.7	10.2	8.9	8.8	2.9	10.2	18.6	7.7	192.9 ± 4.9
4	305.8	18.2	11.0	8.8	9.5	3.1	11.0	21.2	8.1	未观察到水力裂缝
5	319.8	14.9	11.6	8.9	6.0	3.2	11.6	22.7	8.5	未观察到水力裂缝
6	323.8					\				162.4 ± 2.3
7	336.8	19.3	12.1	10.4	9.0	3.4	12.1	22.7	8.9	164.8 ± 6.3
8	349.8	15.5	10.3	10.3	5.1	3.5	10.3	17.1	9.3	未观察到水力裂缝
ZK2										
1	120.2					高压压水测段				218.9 ± 8.3
2	129.2	16.7	5.8	6.0	10.7	1.0	5.8	10.4	3.4	203.0 ± 9.4
3	187.7	9.1	4.7	4.9	4.3	1.6	4.7	7.5	5.0	未观察到水力裂缝
4	201.2					未观察到水力裂缝的高压压水测段				
5	214.7	15.7	6.6	5.7	10.0	1.8	6.6	12.1	5.7	161.0 ± 5.8
6	228.2					高压压水测段				167.7 ± 3.5
7	237.2	16.4	7.2	6.5	9.9	2.0	7.2	13.2	6.3	175.7 ± 5.0
8	255.2					高压压水测段				171.5 ± 5.8
9	264.2	16.1	7.1	6.1	10.0	2.3	7.1	12.9	7.0	172.2 ± 6.2
10	276.2	12.6	7.2	5.9	6.7	2.4	7.2	13.3	7.3	186.7 ± 6.3
11	282.2					高压压水测段				170.2 ± 19.6
12	309.2					未观察到水力裂缝的高压压水测段				
13	322.7	15.8	7.7	6.7	9.2	2.9	7.7	13.4	8.6	未观察到水力裂缝
14	327.2	21.8	7.3	7.1	14.8	2.9	7.3	11.9	8.7	未观察到水力裂缝
15	331.7					未观察到水力裂缝的高压压水测段				
16	354.2	8.6	6.8	6.1	2.5	3.2	6.8	11.0	9.4	165 ± 7.0
17	376.7					高压压水测段				157.5 ± 10.1
18	381.2	8.8	8.1	6.5	2.3	3.5	8.1	14.3	10.1	162.6 ± 11.8
19	399.2					高压压水测段				153.0 ± 16.8
20	408.2	17.3	7.5	7.2	10.2	3.8	7.5	11.7	10.8	154.0 ± 6.5
21	421.7					高压压水测段				165.4 ± 3.2
22	439.7	14.5	7.8	7.3	7.2	4.1	7.8	12.0	11.7	188.1 ± 7.0
23	444.2					高压压水测段				177.3 ± 5.9
24	453.0	16.5	9.9	7.2	9.3	4.2	9.9	18.2	12.0	168.7 ± 6.5
25	457.7	17.1	7.8	7.5	9.6	4.3	7.8	11.6	12.1	173.1 ± 4.5
26	466.7					高压压水测段				153.8 ± 11.4
27	471.2	15.5	6.9	6.7	8.8	4.4	6.9	9.7	12.5	171.3 ± 5.5

注: P_b—破裂压力; P_{si}—瞬时关闭压力; P_r—裂缝重张压力; P_p—孔隙压力; T—岩石抗拉强度; S_{Hmax}—最大水平主应力; S_{hmin}—最小水平主应力; S_v—垂向主应力; ZK1中测段2和8以及ZK2中测段3和13为未观察到水力裂缝且S_{hmin}与S_v差值在1.3 MPa以内的测段; 高压压水测段不进行应力大小分析, 仅进行应力方向分析



a—ZK2 钻孔 187.7m 测段压裂曲线；b—压裂前振幅图像；c—压裂后振幅图像

图 7　ZK2 钻孔 187.7 m 测段压裂曲线及其压裂前后振幅图像

Fig. 7　Pressure curves near the depth of 187.7 m, and amplitude images before and after fracturing of borehole ZK2

(a) Fracturing curve of the 187.7 m section in borehole ZK2; (b) Amplitude image before hydraulic fracturing; (c) Amplitude image after hydraulic fracturing

的挤压、印度板块向东北方向的碰撞以及南海盆地向北推移的共同制约。区域深部(>5 km)应力状态以正断−走滑型为主，S_{Hmax} 主要为北西向(蒋维强，1992；闻则刚，2001；康英等，2008；杨树新等，2012；况文欢等，2025)。文章基于 500 m 以浅的钻孔水压致裂测试结果发现，浅部与深部的应力场存在较大差异：浅部(<500 m)应力环境以逆冲型为主，兼具走滑特征；而深部应力环境主要呈现正断−走滑型。同时，浅部 S_{Hmax} 方向主要为北北西向，深部 S_{Hmax} 方向则以北西向为主，两者方向相差约 23°。这种差异反映了深、浅部应力状态不同的控制因素。浅部应力状态受板块运动、碰撞等构造作用的主控(苏生瑞，2002)，且由于浅部上覆岩层较薄，上覆岩层压力较小，区域构造挤压使得浅部更易形成以水平应力占主导的逆冲−走滑型应力环境。相比之下，深部应力状态主要受控于构造作用和重力作用。而水平应力随深度变化速度通常小于垂向应力(孟文等，2017)，因此随着深度增加，垂向应力作用逐渐增强，致使深部应力场更易表现出正断−走滑型应力环境。

从空间尺度来看，深部应力场在不同尺度上存在明显的一致性，但浅部应力场变化显著(Zoback，2007)。这是因为浅部应力水平较低，更易受到局部地形、人类工程活动的影响(廖昕等，2024)。此外，天然裂缝密度和水平主应力差异等因素对米级尺度的应力分布也有较大影响，可能导致应力大小和方向的协同变化。文中 2 个钻孔约 300 m 以浅的井段受高密度天然裂缝的影响较大，S_{Hmax} 方向主要集中于北北东向；而 300 m 以深的井段，S_{Hmax} 方向则转为北北西向，与 5 km 以深的震源机制解结果较为接近。鉴于深、浅部应力状态的控制因素存在差异，在工程实践中仍需依托浅部原位应力测量来获取真实的应力场分布。

5.2　天然裂缝滑移趋势

ZK1 钻孔中共拾取 219 条天然裂缝，裂缝倾角集中于 67°左右，倾向整体较为分散，但随着深度的增加逐渐向北东东向集中(图 3d)；ZK2 钻孔中拾取了 36 条天然裂缝，裂缝倾角集中在 78°左右，倾向整体集中在北东东向(图 3e)。观察图 5 可知，ZK1 钻孔中裂缝的摩擦系数 μ 为 0.5 ～ 0.7，ZK2 钻孔中深部(>215.3 m)裂缝的摩擦系数 μ 为 0.2 ～ 0.6。ZK1 钻孔采用 $\mu=0.6$(均值)计算理论 S_{Hmax}，ZK2 钻孔采用 $\mu=0.4$(均值)计算理论 S_{Hmax}。测段 S_{hmin} 的拟合直线方程如下：

$$S_{\mathrm{hmin-ZK1}} = 0.0335 \times h \tag{5}$$

$$S_{\mathrm{hmin-ZK2}} = 0.0131 \times h + 2.855 \tag{6}$$

式中，h—深度，m。ZK1 钻孔 S_{Hmax} 方向为 N18°W，整体处于逆冲型应力环境，三向主应力及孔隙压力的大小比值不随深度变化，因此任何深度的应力状态均可表征钻孔整体应力状态。为简化天然裂缝摩擦滑移趋势分析，以钻孔 200.0 m 深度处的应力状态作为例，计算钻孔整体摩擦滑移。ZK2 钻孔 S_{Hmax} 方向为 N15°W，但其应力环境随深度变化显著，依次呈现逆冲型(0 ～ 215.3 m)、走滑型(215.3 ～ 482.1 m)及正断型(>482.1 m)应力环境。对此，采用逆走滑、正走滑过渡阶段的应力场分析 ZK2 整孔的天然裂缝摩擦滑移趋势。具体天然裂缝摩擦滑移趋势分析所用应力场模型见表 2。

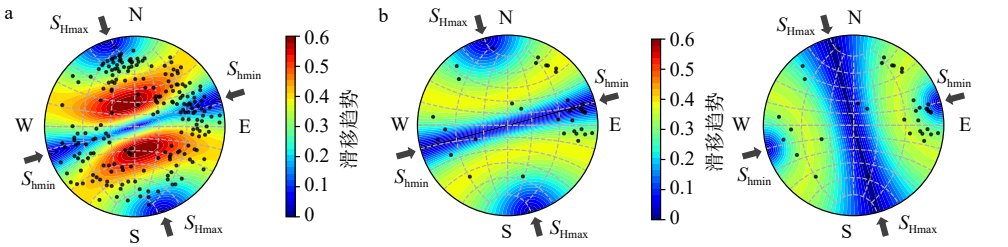
基于公式(4)，结合表 2 中的应力场模型，可计算不同走向和倾角天然裂缝的摩擦滑移趋势 T_s。该研究将计算结果以背景色的形式绘制于图 8 中，与钻孔天然裂缝的下半球投影叠加显示，以实现对裂缝滑移趋势的量化评估。结果显示：ZK1 钻孔天然

表 2 天然裂缝滑移趋势所用应力场模型

Table 2 The stress field models used for calculating the shear slip tendency of natural fractures

钻孔	P_p/MPa	S_{hmin}/MPa	S_{Hmax}/MPa	S_v/MPa	应力场对应深度/m	应力状态	S_{Hmax}方向
ZK1	2.0	6.7	12.4	5.3	200.0	逆冲型	N18°W
ZK2	1.8	5.7	10.0	5.7	215.3	逆走滑型	N15°W
	4.5	8.5	12.8	12.8	482.1	正走滑型	

注: P_p—孔隙压力; S_{Hmax}—最大水平主应力; S_{hmin}—最小水平主应力; S_v—垂向主应力。



S_{Hmax}—最大水平主应力; S_{hmin}—最小水平主应力; 黑色散点表示天然裂缝走向和倾角的下球面投影

a—ZK1 钻孔天然裂缝摩擦滑移趋势; b—ZK2 钻孔天然裂缝摩擦滑移趋势(左侧为 215.3 m 以浅天然裂缝; 右侧为 215.3 ~ 482.1 m 范围内的天然裂缝)

图 8 ZK1 和 ZK2 钻孔天然裂缝滑移趋势

Fig. 8 Slip tendency of natural fractures of borehole ZK1 and ZK2

(a) Frictional slip tendency of natural fractures in borehole ZK1; (a) Frictional slip tendency of natural fractures in borehole ZK2. S_{Hmax}—maximum horizontal principal stress; S_{hmin}—minimum horizontal principal stress; The black scatter points represent the lower hemisphere projection of the strike and dip of natural fractures; Panel b shows the slip tendency of natural fractures above 215.3 m and within 215.3 ~ 482.1 m in sequence.

裂缝发育数量较多, 部分裂缝的 T_s 值接近 0.6(图 8a), 表明当实际摩擦系数低于 0.6 时, 此类裂缝易因剪应力超过抗剪强度而发生滑动, 稳定性较差(Zhang et al., 2021; Feng et al., 2022)。进一步结合产状分析发现, ZK1 钻孔中北北西倾向、倾角约 30°的天然裂缝更易发生滑动。综合天然裂缝分布特征(图 3)与应力大小剖面(图 5)中可以看出, ZK1 钻孔 290.0 m 附近天然裂缝的 T_s 值较高(红色区域), 且 290.0 m 附近测段的实测 S_{Hmax} 值普遍高于最小二乘拟合直线的预测值, 表明该深度附近天然裂缝实际承受的剪应力更高, 真实滑移趋势更大。相比之下, ZK2 钻孔天然裂缝发育数量较少, 且无论在逆冲还是走滑型应力状态下, 其 T_s 值整体低于 0.4(图 8b), 显示出良好的稳定性。因此, ZK1 钻孔周边区域存在天然裂缝失稳风险, 需重点关注。建议采取针对性监测措施与加固手段, 确保地下厂房、高压水道等关键设施的长期稳定性, 为工程安全与可靠运行提供保障。

6 结论

(1)ZK1 钻孔在 253.8 ~ 349.8 m 深度范围内, S_{hmin}=7.8 ~ 12.1 MPa、S_{Hmax}=13.7 ~ 21.7 MPa, 呈逆冲型应力环境。ZK2 钻孔在 129.2 ~ 471.2 m 深度范围内, S_{hmin}=5.8 ~ 9.9 MPa、S_{Hmax}=9.7 ~ 18.2 MPa; 应力环境随深度变化显著——215.3 m 以浅呈逆冲型, 215.3 m 以深转为走滑型, 并随着深度增加呈现向正断型演化的趋势。ZK1 钻孔 S_{Hmax} 方向约为 N18°W, ZK2 钻孔 S_{Hmax} 方向约为 N15°W。

(2)研究区 500 m 以浅与 5 km 以深的应力状态存在显著差异, 反映出深、浅部应力状态的控制因素不同: 深部应力场受控于大尺度的构造应力和重力特征, 而浅部垂向应力水平较低, 更易形成以水平应力为主导的应力环境。

(3)稳定性评估表明, ZK1 钻孔部分天然裂缝的滑移趋势 T_s 值接近 0.6, 稳定性欠佳; ZK2 钻孔中的天然裂缝滑移趋势 T_s 值整体低于 0.4, 稳定性良好。建议在 ZK1 钻孔附近加强裂缝滑移动态监测, 并采取加固与结构优化措施, 以确保相关工程安全与长期稳定。

作者贡献声明: 熊思捷、马晓冬负责论文整体构

思、数据分析、研究方法确立及论文主体撰写工作；马晓冬、杨跃辉、吴邦宸、李阿伟、孙东生参与研究处理、图片绘制，并对论文写作的各环节细节进行审核把关，确保内容严谨规范。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author Contributions：XIONG Sijie and MA Xiaodong were responsible for the overall conception of the paper, data analysis, establishment of research methods, and the main writing of the paper; MA Xiaodong, YANG Yuehui, WU Bangchen, LI Awei, and SUN Dongsheng participated in the processing of research results, drawing of figures, and conducted review and supervision on all detailed aspects of the paper writing to ensure the rigor and standardization of the content. All authors have read and agreed to the submission and publication of the manuscript.

利益冲突声明：本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests：All authors declare no conflict of interests.

References

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

BAUMGÄRTNER J, ZOBACK M D, 1989. Interpretation of hydraulic fracturing pressure-time records using interactive analysis methods[C]//International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Pergamon, 26(6): 461-469.

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

BRÖKER K, MA X, ZHANG S, 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.

CAO H, ZHAO Y, SHUAI D, et al., 2024. In-situ stress estimation method based on seismic curvature attributes of HTI medium and its application in the Weiyuan area[J]. Chinese Journal of Geophysics, 67(5): 1970-1986.

CHANG C, 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. In-situ Stress Measurement by Hydraulic Fracturing in Xuefeng Mountain and Its Significance. Journal of Geomechanics, 25(05): 853-865. (in Chinese)

DONG S, ZHANG Y, ZHANG F, et al., 2015. Late Jurassic–Early Cretaceous continental convergence and intracontinental orogenesis in East Asia: A synthesis of the Yanshan Revolution[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 114: 750-770.

EVANS K F, CORNET F H, HASHIDA T, et al., 1999. Stress and rock mechanics issues of relevance to HDR/HWR engineered geothermal systems: review of developments during the past 15 years[J]. Geothermics, 28(4-5): 455-474.

FENG C, GAO G, ZHANG S, et al., 2022. Fault slip potential induced by fluid injection in the Matouying enhanced geothermal system (EGS) field, Tangshan seismic region, North China[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 22(7): 2257-2287.

HAIMSON B C, 1978. The hydrofracturing stress measuring method and recent field results[C]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Pergamon, 15(4): 167-178.

HAIMSON B C, CORNET F H, 2003. ISRM suggested methods for rock stress estimation—part 3: hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF)[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 40(7-8): 1011-1020.

HAIMSON B, FAIRHURST C, 1967. Initiation and extension of hydraulic fractures in rocks[J]. Society of petroleum engineers journal, 7(03): 310-318.

HEIDBACH O, RAJABI M, DI GIACOMO D, et al. , 2025. World stress map 2025[J].

KANG Y, YANG X, CHEN X, et al., 2008. Inversion of Stress Field in Guangdong and Its Adjacent Areas[J]. Acta Seismologica Sinica, (01): 59-66+105. (in Chinese)

KUANG W H, ZHANG J, YE X W, et al., 2025. Study on Regional Stress Field in Guangdong and Adjacent Areas Based on Relative Focal Mechanism Solution Inversion Method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 68(4): 1258-1270. (in Chinese)

LAI J, SU Y, DANG W L, et al., 2025. Logging evaluation technology of reservoir fractures[J]. Acta Petrolei Sinica, 46(11): 2187-2210. (in Chinese)

LEE M Y, HAIMSON B C, 1989. Statistical evaluation of hydraulic fracturing stress measurement parameters[C]//International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Pergamon, 26(6): 447-456.

LIAO X, LYU G J, CHEN S K, et al., 2024. Study on distribution characteristics and influencing factors of the in-situ stress field in the Gongjue area, eastern Tibet[J]. Progress in Geophysics, 39(3): 938-950.

LI C, WANG Z, LÜ Q, et al., 2021. Mesozoic tectonic evolution of the eastern South China Block: A review on the synthesis of the regional deformation and magmatism[J]. Ore Geology Reviews, 131: 104028.

LI J, DONG S, CAWOOD P A, et al., 2018. An Andean-type retro-arc foreland system beneath northwest South China revealed by SINOPROBE profiling[J]. Earth and Planetary Science Letters, 490: 170-179.

LIU Y, WANG L, LUO Y, et al., 2024. Logging identification of reservoir types of Maokou Formation carbonate rocks in central Sichuan Basin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 48(03): 629-639. (in Chinese)

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

MA T S, ZHANG D Y, LU D Y, et al., 2024. Progress and development direction of intelligent prediction technology of geomechanical parame-

ters[J]. Petroleum Science Bulletin, 9(3): 365-382

MA X D, 2025. How do borehole observations characterize crustal stress?[J]. Journal of Geomechanics, 31(6): 1146-1158

MENG W, GUO C B, ZHANG C Y, et al. , 2017. In-situ Stress Measurement and Its Significance in the Lhasa Block of the Qinghai-Tibet Plateau. Chinese Journal of Geophysics, 60(6): 2159-2171. (in Chinese)

MOECK I, KWIATEK G, ZIMMERMANN G, 2009. Slip tendency analysis, fault reactivation potential and induced seismicity in a deep geothermal reservoir[J]. Journal of Structural Geology, 31(10): 1174-1182.

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

QIN X H, CHEN Q C, MENG W, et al. , 2023. Characteristics of the Present-day In-situ Stress Field in the Tongmai-Bomi Section on the Northern Margin of the Eastern Himalayan Syntaxis. Acta Geologica Sinica, 97(07): 2126-2140. (in Chinese)

RUMMEL F, 1987. Fracture mechanics approach to hydraulic fracturing stress measurements[J]. Fracture mechanics of rock, 217: 221-245.

SCHMITT D R, HAIMSON B, 2017. Hydraulic fracturing stress measurements in deep holes[M]//Rock Mechanics and Engineering Volume 1. CRC Press, 183-225.

SIMPSON R W, 1997. Quantifying Anderson's fault types[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 102(B8): 17909-17919.

SU S R, 2002. Influence of Fault Structures on In-situ Stress Fields and Their Engineering Significance. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 21(2): 296. (in Chinese)

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

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

WEN Z G, WANG Z S, YANG M L, 2001. Simulation and Calculation of Modern Tectonic Stress Field in Guangdong Region. South China Journal of Seismology, (03): 29-36. (in Chinese)

YANG S X, YAO R, CUI X F, et al. , 2012. Analysis of In-Situ Stress Characteristics in Mainland China and Its Active Blocks and North-South Seismic Belt. Chinese Journal of Geophysics, 55(12): 4207-4217. (in Chinese)

YANG Y, SUN D, MA X, 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.

ZEMANEK J, CALDWELL R L, GLENN JR E E, et al., 1969. The borehole televiewer - a new logging concept for fracture location and other types of borehole inspection[J]. Journal of Petroleum Technology, 21(06): 762-774.

ZHANG M, GE S, YANG Q, et al., 2021. Impoundment - associated hydro - mechanical changes and regional seismicity near the Xiluodu reservoir, Southwestern China[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 126(9): e2020JB021590.

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

ZOBACK M D, 2007. Reservoir geomechanics, Cambridge University Press, Cambridge, UK[J].

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.

附中文参考文献

曹欢, 赵杨, 帅达, 等, 2024. 基于HTI介质地震曲率属性的地应力估算方法及其在威远地区的应用[J]. 地球物理学报, 67(05): 1970-1986.

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.

赖锦, 苏洋, 党文乐, 等, 2025. 储层裂缝测井评价技术[J]. 石油学报, 46(11): 2187-2210.

廖昕, 吕改杰, 陈仕阔, 等, 2024. 藏东贡觉地区地应力场分布特征及影响因素研究[J]. 地球物理学进展, 39(03): 938-950.

刘宇, 王亮, 罗洋, 等, 2024. 川中地区茅口组碳酸盐岩储层类型测井识别[J]. 物探与化探, 48(03): 629-639.

蒋维强, 林纪曾, 赵毅, 等, 1992. 华南地区的小震震源机制与构造应力场[J]. 中国地震, (01): 38-44.

康英, 杨选, 陈杏, 等, 2008. 广东及邻区的应力场反演[J]. 地震学报, (01): 59-66+105.

况文欢, 张捷, 叶秀薇, 等, 2025. 基于相对震源机制解反演方法的广东及邻区区域应力场研究[J]. 地球物理学报, 68(4): 1258-1270.

马天寿, 张东洋, 陆灯云, 等, 2024. 地质力学参数智能预测技术进展与发展方向[J]. 石油科学通报, 9(3): 365-382

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

孟文, 郭长宝, 张重远, 等, 2017. 青藏高原拉萨块体地应力测量及其意义[J]. 地球物理学报, 60(6): 2159-2171.

秦向辉, 陈群策, 孟文, 等, 2023. 喜马拉雅东构造结北缘通麦—波密段现今地应力场特征研究. 地质学报, 97(07), 2126-2140.

苏生瑞, 2002. 断裂构造对地应力场的影响及其工程意义[J]. 岩石力学与工程学报, 21(2): 296.

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

闻则刚, 王正尚, 杨马陵, 2001. 广东地区现代构造应力场的模拟计算[J]. 华南地震, (03): 29-36.

杨树新, 姚瑞, 崔效锋, 等, 2012. 中国大陆与各活动地块、南北地震带实测应力特征分析[J]. 地球物理学报, 55(12): 4207-4217.