

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.0404

基于应力多边形与震源机制解的 深部岩体应力状态预测方法初探

王 璞¹, 王成虎¹, 杨汝华^{1,2}, 侯正阳^{1,2}, 王 洪¹

(1. 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085; 2. 中国地质大学(北京) 工程技术学院, 北京 100081)

摘 要: 深部岩体应力量值确定一直是区域地应力场研究中的热点和难点问题, 常用的深部岩体应力量值预测方法多以拟合经验公式外推确定为主, 缺乏理论依据且可靠性低。研究工作基于应力多边形理论, 结合侧压力系数 K 与震源机制解应力形因子 R , 在大范围应力预测结果基础之上, 对深部应力量值进行了精细限定。以河北易县紫荆关地区的原地应力测量为参考, 结合震源机制解资料, 估算获得 6、11、19 km 深度处最大侧压力系数 $K_{\max}$ 分别为 1.07 ± 0.07 、 1.14 ± 0.14 、 1.09 ± 0.09 , 最小侧压力系数 $K_{\min}$ 分别为 0.85 ± 0.15 、 0.88 ± 0.12 、 0.86 ± 0.14 , 并以此计算最大、最小水平主应力, 结果的相对偏差在 6%~17%之间; 利用震源机制解和水压致裂法联合确定的研究区最大水平主应力方向为 $N44.4^\circ E$ 。研究提出并建立的联合震源机制参数 R 和应力多边形限定深部应力状态为深部岩体应力状态估算提供了新的途径。

关 键 词: 深部岩体应力状态; 紫荆关断裂; 应力多边形; 应力形因子; 水压致裂法

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2019)11-4486-11

Preliminary investigation on the deep rock stresses prediction method based on stress polygon and focal mechanism solution

WANG Pu¹, WANG Chen-hu¹, YANG Ru-hua^{1,2}, HOU Zhen-yang^{1,2}, WANG Hong¹

(1. Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing, 100085, China;

2. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: The determination of deep rock stresses is a focused and difficult issue in the study of regional stress field. Most estimating methods for deep rock stresses depend on the extrapolation of fitting empirical formula, which are short of theoretical basis and unreliable. This research proposed the lateral pressure coefficient polygon with reference to stress polygon theory, combined with stress factor R to better constrain stress distribution polygon. The Zijingguan fault belt in Yi county, Hebei province was chosen as the application area. Based on focal mechanism and in-situ stress measurement data in this area, $K_{\max}$, the maximum lateral pressure coefficient, and $K_{\min}$, the minimum lateral pressure coefficient, were estimated for the deep rock masses of 6 km, 11 km and 19 km respectively. The results showed that $K_{\max}$ at three depths are 1.07 ± 0.07 , 1.14 ± 0.14 , 1.09 ± 0.09 and $K_{\min}$ are 0.85 ± 0.15 , 0.88 ± 0.12 , 0.86 ± 0.14 respectively. The relative deviation of results is between 6% and 17%. The orientation of the maximum horizontal principal stress, jointly determined by hydraulic fracturing and focal mechanism methods, is $N44.4^\circ E$. The method proposed and established in this research provides a new estimate means for deep rock stresses.

Keywords: deep rock stresses; Zijingguan fault belt; stress polygon; stress factor; hydraulic fracturing method

1 引 言

深部岩体应力状态确定是深部资源和能源材料开采、深层地下工程空间利用及区域防灾减灾的重要基础工作。目前得到广泛应用的原地应力测量

与估算方法有 10 多种, 获得的应力数据多来源于地壳浅部, 以水压致裂法为例, 目前最大测试深度为 9.1 km, 通常测试深度都在千米以内^[1], 这些数据已为浅部岩土工程设计与灾害防控提供了有力支撑。随着资源开采已进入几千米级深度范围, 例如

收稿日期: 2019-02-25

基金项目: 国家自然科学基金资助(No. 41574088)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41574088).

第一作者简介: 王璞, 1995 年生, 硕士研究生, 主要从事地应力测量与地质力学研究。E-mail: wangpu171@mails.ucas.ac.cn

通讯作者: 王成虎, 1978 年生, 博士, 研究员, 主要从事地应力测量与地质力学研究。E-mail: huchengwang@163.com

最深的油气开采已达 7 500 m, 为预防这些深部工程活动中“三高”问题带来的灾害事故, 深部原地应力环境亟需确定^[2]。同时, 多数地球动力学事件的成核孕育常位于地下 10~35 km^[3], 常规的地应力测量技术方法已不适用, 所以探索深部地壳地应力数据的获取方法也是分析研究地球动力学问题的关键步骤之一。

目前深部岩体应力研究方法大致可分为估算方法和理论计算法。其中估算方法多借助于经验拟合公式^[4-10]、物理试验模型^[11-14]以及数值模拟等手段^[15-20], 例如早期 Hoek 等^[4]提出了基于侧压力系数 K ($K=0.3\sim0.5$) 的应力估算经验公式, 李方全^[5]、李新平^[10]等根据实测应力资料拟合得到了侧压力系数随埋深的分布及水平主应力关于深度的线性计算公式, 这些公式的适用深度小于 3 km 且深部可靠性低。Tigrek 等^[21]从地质力学模出发, 利用地震波反射系数反演得到模型物性参数进而计算地应力分布; Hunt 等^[22]基于胡克定律建立了地层曲率 K_c 与地应力 σ 之间的计算关系 $\sigma = EK_c$ (E 为弹性模量), 他们的分析结果较经验公式法可靠性有一定提高, 然而准确模型建立往往十分复杂且普适性不好。Parsons^[15]基于多因素复杂有限元模型, 以加利福尼亚地区 GPS 数据为边界加载条件, 得到了太平洋-北美板块边区域的应力分布, 并发现最大差应力分布与地震活动性相关; 尽管数值模拟方法的研究结果已经能够解释部分深部工程失稳与地震活动现象, 但它本质上仍是一个考虑多因素的拟合计算结果, 同其他估算方法一样也有一定的局限性。

在地应力理论计算方面, Zoback 等^[23]引入断层摩擦强度理论 (应力多边形理论), 利用摩擦强度约束了最大有效主应力与最小有效主应力的变化范围, 由于结果范围往往过大, 通常还需结合钻井破坏资料进行二次约束。Brudy 等^[24]在德国大陆深部钻探计划 (KTB) 中, 通过分析 8 km 左右井壁的钻井诱发裂缝分布角度与岩石抗拉强度确定了两个水平主应力的相对关系, 结合应力多边形理论估计了 7.7 km 与 8.6 km 深度的全应力张量。Chang 等^[25]以南海增生楔中 4 个钻孔井眼破裂和钻井诱发张裂缝, 基于同样的方法约束了其中两个钻孔深部应力大小。Moore 等^[26]比较海底以下几百米钻孔成孔后不同时间的图像资料, 发现通过电阻率成像估计的井壁破坏范围较宽, 利用应力多边形的方法得到的水平主应力估计值较高。常用的震源机制解也能反映其所在深度主应力量值的相对大小, 通常用应力形因子 R 来表示, 同时考虑到震源机制已有数据量

大、获取方法成熟、深度分布范围广等特点, 可以参考基于钻孔破坏信息进行二次约束的方法, 利用震源机制参数约束应力多边形结果, 进而得到更深部应力量值范围。

本文首先对应力多边形进行改进, 得到侧压力系数多边形, 再将应力形因子 R 与摩擦强度约束地应力的方法相结合, 根据不同断层应力类型, 对侧压力系数进行二次约束, 从而较为准确地预测出深部地应力的范围。研究中结合河北易县紫荆关地区地应力实测数据与小震震源机制解, 运用上述方法对紫荆关区域 6、11、19 km 处地应力的深部地应力状态做出限定估算。

2 应力多边形与应力形因子 R

2.1 应力多边形

Zoback 等^[27]结合 Anderson 断层理论与 Mohr-Coulomb 准则, 对地壳中的原地应力进行限定。基于这两个理论, 可得到忽略内聚力情况下断层所在地区的有效最大主应力、有效最小主应力与摩擦强度之间的关系如下:

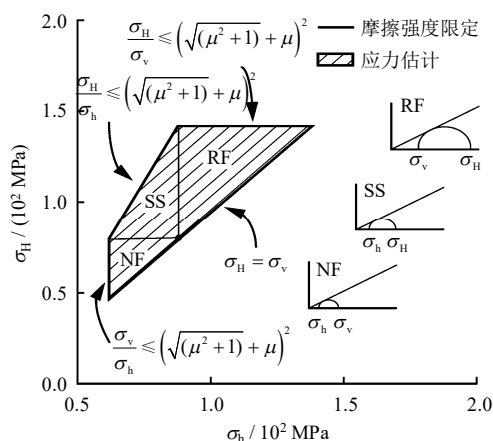
$$\frac{\sigma_1 - P_p}{\sigma_3 - P_p} \leq (\sqrt{\mu^2 + 1} + \mu)^2 \quad (1)$$

式中: σ_1 、 σ_3 为最大、最小有效主应力; S_1 、 S_3 为 2 个主应力; P_p 为孔隙水压力; μ 为断层摩擦系数。根据 Anderson 断层分类理论, 不同断层应力类型垂直应力、最大水平主应力与最小水平主应力与 3 个主应力对应关系如下:

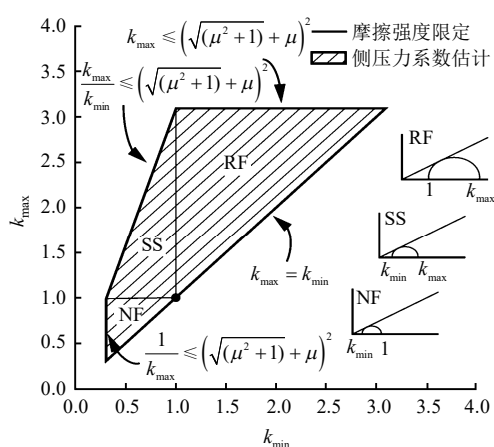
$$\left. \begin{array}{l} \text{正断层: } \sigma_1 = \sigma_v, \sigma_3 = \sigma_h \\ \text{逆断层: } \sigma_1 = \sigma_H, \sigma_3 = \sigma_v \\ \text{走滑断层: } \sigma_1 = \sigma_H, \sigma_3 = \sigma_h \end{array} \right\} \quad (2)$$

式中: σ_v 为有效垂向应力; σ_h 为有效最小水平主应力; σ_H 有效最大水平主应力。通过各种情况的限定, Zoback 等^[27]引入了应力多边形概念, 如图 1 所示, 图中 RF、SS、NF 分别代表正断型、走滑型、逆断型断层应力类型, $k_{\max}$ (σ_H / σ_v)、 $k_{\min}$ (σ_h / σ_v) 分别为有效应力的最大、最小侧压力系数。

应力多边形可以描述给定深度、断层摩擦系数以及孔隙压力情况时确定最大水平主应力与最小水平主应力可能的取值范围。对于实际断层区域地应力状态估算, 还取决于断层的基本类型。但是应力多边形方法得到的地应力量值范围普遍偏大, 所以在实际运用过程多需要结合漏失试验以及井壁破坏规律才能得到较为满意的结果。



(a) 应力多边形



(b) 侧压力系数多边形

图1 应力多边形限定地应力示意图

Fig.1 Diagram of constrain stress using stress polygon

对不同深度的应力进行估计时,使用原有应力多边形方法十分不便(需绘制多个),所以根据应力多边形的特点,对式(1)进行变形,并分别考虑3种基本断层类型主应力对应关系,得到结果为

$$\left. \begin{aligned} k_{\max} &\leq (\sqrt{(\mu^2+1)} + \mu)^2 (\text{逆断层}) \\ \frac{k_{\max}}{k_{\min}} &\leq (\sqrt{(\mu^2+1)} + \mu)^2 (\text{走滑断层}) \\ \frac{1}{k_{\min}} &\leq (\sqrt{(\mu^2+1)} + \mu)^2 (\text{正断层}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $k_{\max}$ 、 $k_{\min}$ 具体表达式为 $k_{\max} = \sigma_H / \sigma_v$, $k_{\min} = \sigma_h / \sigma_v$, 其他符号与之前定义相同。根据式(3),以应力多边形参考,可以得到侧压力系数多边形。如图1(b)所示,侧压力系数多边形反映了侧压力系数与摩擦系数之间的关系,因此可以只通过一个多边形得到由侧压力系数决定的应力变化趋势。在静水压情况下,有效应力侧压力系数与原地应力的侧压力系数转换关系为

$$K_{\max, \min} = (1 - \gamma_w / \gamma_r) k_{\max, \min} + \gamma_w / \gamma_r \quad (4)$$

式中: $K_{\max}$ 、 $K_{\min}$ 分别为原地应力的最大侧压力系数与最小侧压力系数,具体表达式为 $K_{\max} = S_H / S_v$, $K_{\min} = S_h / S_v$, 其中 S_H 为原地最大水平主应力; S_h 为原地最小水平主应力; S_v 为上覆岩层自重应力; γ_w 、 γ_r 分别为孔隙水重度与上覆岩石平均重度。

2.2 应力形因子 R

应力形因子 R 是地震震源机制解反演结果中的一个重要参数,它表示3个主应力的相对大小,是研究地震震源物理与震源处地应力场之间相互作用关系的重要工具,表达式为^[28]

$$R = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (5)$$

R 的表达式还有其他形式,表示的意义都相同,为了避免歧义,以下研究均采用了式(5)的表达形式。

由于断层状态未知情况下,3个主应力无法与最大水平、最小水平及垂直主应力相对应,所以依然以 Anderson 断层理论为基础,分断层情况进行讨论。根据式(2),将不同断层状态主应力对应关系分别代入式(5),可得到由 R 为系数的水平主应力之间的函数表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} \text{正断层: } \sigma_H &= R\sigma_h + (1-R)\sigma_v \\ k_{\max} &= Rk_{\min} + 1 - R \\ \text{逆断层: } \sigma_H &= \frac{1}{1-R}\sigma_h + \frac{R}{R-1}\sigma_v \\ k_{\max} &= \frac{1}{1-R}k_{\min} + \frac{R}{R-1} \\ \text{走滑断层: } \sigma_H &= \frac{R}{R-1}\sigma_h + \frac{1}{1-R}\sigma_v \\ k_{\max} &= \frac{R}{R-1}k_{\min} + \frac{1}{1-R} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

2.3 R 与应力多边形联合限定应力量值

从式(6)中可以看出,不同断层应力状态下 R 的限定线始终过点(1,1),且 R 取极值0或1时,与不同断层状态多边形边界相重合,进一步说明应力形因子可以在应力多边形或侧压力系数多边形的基础上进行二次限定,此方法的侧压力系数限定效果示意图如图2所示。

通常情况下垂直主应力等于上覆岩石的重力。如果 R 值的变化范围已知,那么某一确定深度处 R 可与侧压力系数多边形结合对侧压力系数进行二次限定,再对绝对应力大小做出估算。如图2所示,图中 $R_{\max}$ 、 $R_{\min}$ 分别代表应力形因子的最大、最小

值, 要确定某一深度的应力状态, 在断层属性已知的情况下, 首先利用侧压力系数多边形可以对侧压力系数的范围进行第 1 次限定, 然后做出特定断层应力状态下 R 的范围值所确定的侧压力系数函数关系 (式 (6)), 则这一深度处的侧压力系数也应该介于这两条直线之间 (阴影区域), 综合断层摩擦强度, 对侧压力系数进行了第二次限定。

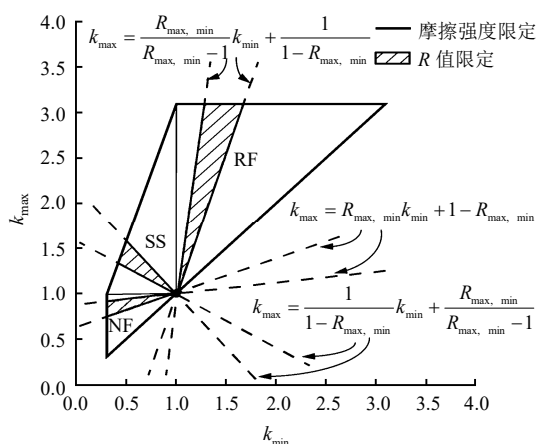


图 2 3 种断层状态下侧压力系数估计示意图

Fig.2 Diagram of lateral pressure coefficient estimation in three faulting stress states

下面将结合紫荆关断裂地区的研究工作对本次研究工作提出的理论进行应用展示。

3 紫荆关断裂带应力情况分析

3.1 地应力测量数据分析

紫荆关断裂带是大兴安岭—太行山—武陵山构造带中段太行山地区的主体构造, 如图 3 所示, 总体走向 $20^\circ \sim 30^\circ$, 倾角为 $60^\circ \sim 75^\circ$ [29-30], 由西侧的乌龙沟—上黄旗断裂和东侧的紫荆关—灵山断裂左阶组成, 断裂带呈北北东向延伸, 长度为 280 km 左右, 是一条重要的太行山山前断裂[31]。河北易县区域内的紫荆关断裂是一条区域性深断裂, 地处华北两大构造单元的分界枢纽部位 (图 3 红色虚线框内), 自北向南纵贯华北全区, 穿越了不同构造单元。本次研究钻造的 4 个钻孔均位于易县紫荆关断裂附近。为了确定区域地应力状态, 贾晋等[32]通过试验研究了其中一个深孔水压致裂原地应力测试数据, 部分原地应力测量数据结果见表 1。

根据测点处获得的最大水平主应力的优势方向 (见图 4), 可以确定研究区域的最大水平主应力方向。由实测地应力数据统计计算可知, 紫荆关地区最大水平主应力的平均方向为 $N44.4^\circ E$ (见图 4(b)), 同时通过收集华北西南部 11 个测点地应

力测量数据[33]分析远场应力情况 (见图 4(a)), 得到的远场最大水平主应力方向与紫荆关地区 (见图 4(b)) 结果基本一致。同时中国大陆地壳运动 GPS 观测资料绘制的地壳运动特征图[34]与京津冀地区近 80 年的震源机制解资料也显示, 华北地区深部的构造应力场为 NE 向[35]。

表 1 ZJGTEST-ZK4 孔水压致裂法地应力测量结果

Table 1 Results of in-situ stress measurement by hydraulic fracturing in borehole ZJGTEST-ZK4

压裂段深度 / m	P_0 / MPa	P_b / MPa	P_s / MPa	P_r / MPa	S_v / MPa	S_H / MPa	S_h / MPa	破裂 方位
219.30~220.06	2.08	16.27	8.48	10.06	5.80	13.30	8.48	N45°E
238.00~238.76	2.26	19.02	8.03	8.79	6.30	13.04	8.03	N43°E
294.50~295.26	2.82	26.08	12.32	15.71	7.79	18.43	12.32	N50°E
313.00~313.76	3.00	23.10	12.47	14.52	8.28	19.89	12.47	N46°E
342.50~343.26	3.29	21.78	12.60	14.26	9.06	20.25	12.60	N40°E
413.00~413.76	3.98	24.42	13.22	15.87	10.93	19.81	13.22	N56°E
485.50~486.26	4.69	24.09	12.29	13.14	12.85	19.04	12.29	N51°E

注: P_0 为孔隙水压力; P_b 为破裂压力; P_s 为瞬时闭合压力; P_r 为重张压力。

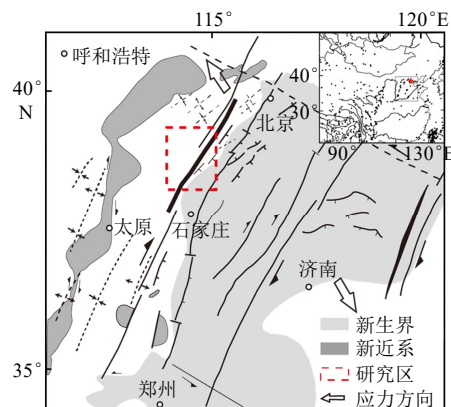


图 3 易县紫荆关地质背景图

Fig.3 Geological map of Zijingguan, Yi County

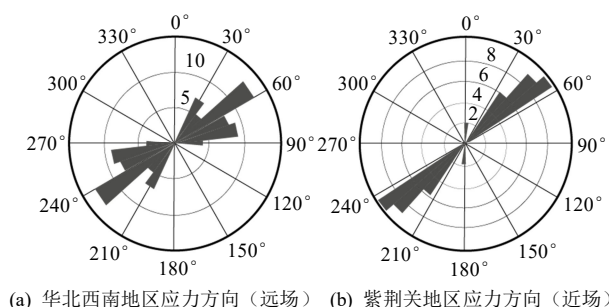


图 4 最大主水平主应力优势方向

Fig.4 Dominant orientations of maximum horizontal principal stresses

区域内地应力场值特征可以由每个测点的最大

大、最小侧压力系数 $K_{\max}$ 和 $K_{\min}$ 来反映。由于侧压力系数 K 受深度的影响, 需要不同测点相同深度的 K 值来进行对比。在本次研究中, 将侧压力系数 K 拟合函数设为: $K = a + b/z$ (其中 a 、 b 为常数), 以求得不同测点处侧压力系数 K 随深度变化的关系。由于研究区范围以及测点范围仅限于紫荆关断裂, 首先对每个测点的 K 值进行计算, 由于每个测点的数据较少拟合图像意义不大, 同时考虑测点距离较近, 所以之后对各个测点数据整体拟合, 拟合结果如图 5、表 2 所示。从拟合结果可以看出, 在浅部 K 值随深度增加而减小, 到 300 m 后开始稳定。

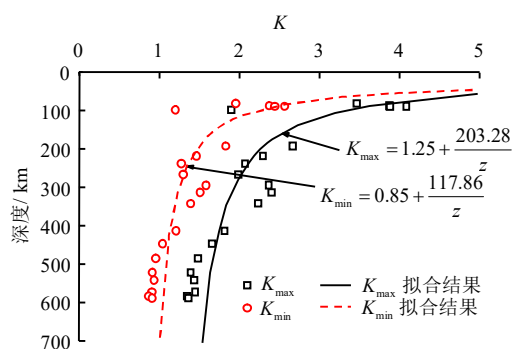


图 5 原地应力 K 值拟合曲线

Fig.5 Fitting curves of K for in-situ stresses

表 2 侧压力系数拟合曲线参数

Table 2 Fitting parameters of lateral pressure coefficients

参数	a		b	
	拟合值	标准误差	拟合值	标准误差
$K_{\max}$	1.25	0.16	203.28	26.68
$K_{\min}$	0.85	0.11	117.86	17.80

通过分析, 得到研究区 600 m 深度内 $K_{\max}$ 范围为 1.36~3.46, $K_{\min}$ 范围为 0.86~2.55。由图可以看出, 研究区 K 值由浅部到深部降低, 在随着深度的增加 $K_{\min}$ 逐渐小于 1, 即应力状态随深度逐渐增加出现由 $S_v < S_h < S_H$ 转为 $S_h < S_v < S_H$ 的情况, 以此变化趋势推断易县紫荆关断裂带深部应力状态为走滑型 ($S_h < S_v < S_H$), 为了进一步确定深部应力状态, 对研究区地震震源机制解进行分析。

3.2 断层摩擦强度确定

断层摩擦强度是应力多边形预测深部应力大小的必要参数之一。原地应力测量数据与震源机制解反演的深部断层应力状态展现出良好的一致性, 且紫荆关断裂带产状与震源机制解反演得到的深部断层情况基本吻合, 所以先由原地应力测量数据与断层产状初步计算得到断层摩擦强度, 再通过测震学的方法计算断层摩擦强度, 二者结合确定最终摩

擦强度的合理大小。

由于部分数据测量深度较浅, 为提高数据质量, 综合分析中不考虑深度小于 50 m 的钻孔数据, 根据 Zoback 对地应力数据的质量分类方法, 其余地应力实测数据质量均在 C 级以上^[36]。为了确定断层的摩擦强度, 当断层符合 Anderson 理论时, 可以利用与地壳剪应力相关的参数 μ_m (最大剪切应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 与平均应力 $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 的比值) 来估计断层摩擦强度^[37-38], 计算结果如表 3 所示, 测量范围内浅部测量段 μ_m 明显偏高, 在 300 m 以下其值随深度的增加趋于稳定, 与 K 值趋于稳定的深度基本一致, 所以取这 300 m 之下的平均值代表断层摩擦强度, 并以此推断得到断层摩擦强度约为 0.36。在地球物理方面, 通常将滑动方向上库仑破裂应力最大的断层面称为最优破裂面, 假设地震发生在优势破裂面上, 则库仑应力达到最大值时应满足:

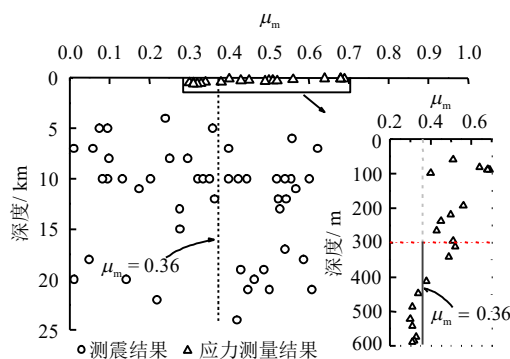
$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \frac{1}{\mu} \quad (7)$$

式中: θ 为最大水平主应力与断层倾向的夹角。如果断层方向已知, 结合震源机制解数据, 也可确定断层摩擦系数。在之前的讨论中已知断层的产状, 结合震源机制解可以得到断层的 μ_m 计算结果如图 6 所示。

表 3 应力数据汇总及计算

Table 3 Summary and calculation of stress data

孔号	测试深度 / m	应力值/ MPa			μ_m
		S_v	S_H	S_h	
ZK-1	58.91~59.75	1.56	3.81	2.78	0.51
	98.07~98.75	2.59	4.92	3.11	0.40
ZK-2	81.51~82.79	2.16	7.48	4.22	0.64
	89.02~90.14	2.36	9.64	5.76	0.69
ZK-3	87.21~88.07	2.31	8.94	5.48	0.68
	89.32~90.24	2.36	9.15	6.05	0.68
ZK-4	192.50~193.40	5.11	13.61	9.53	0.56
	219.30~220.06	5.80	13.30	8.48	0.50
	238.00~238.76	6.30	13.04	8.03	0.45
	265.96~266.73	7.05	13.99	9.14	0.43
	294.50~295.26	7.79	18.43	12.32	0.51
	313.00~313.76	8.28	19.89	12.47	0.52
	342.50~343.26	9.06	20.25	12.60	0.49
	413.00~413.76	10.93	19.81	13.22	0.38
	447.1~448.07	11.84	19.61	12.34	0.34
	485.93~486.33	12.85	19.04	12.29	0.31
	522.54~523.11	13.83	19.21	12.63	0.30
	542.60~543.17	14.36	20.61	13.40	0.31
	573.08~574.1	15.16	21.94	13.76	0.33
	584.08~584.91	15.46	20.81	13.40	0.32
	589.08~590.22	15.60	21.26	14.19	0.31

图 6 μ_m 值计算结果Fig.6 Calculation results of μ_m

此外 Owens 等^[39]、Wang^[40]等通过分析华北地区地震波速与泊松比变化认为华北地区地壳内并不存在大规模部分熔融现象, 研究区深部断层不会出现因摩擦熔融导致的摩擦强度骤降的现象; 杨婷等^[41]利用华北地区的观测台阵收集到的近震和远震 S 波相, 采用近远震联合反演的方法反演得到上地幔速度结构, 表明上地幔速度结构和地质构造基本一致。以上分析结果均表明, 可以使用测量的到的平均摩擦强度作为预测深部应力状态的参数之一。

3.3 研究区小震震源机制解

地震的相关参数是研究地震孕震环境、地震成因及深部构造的基础数据。小震震源机制解在反应断层应力状态的同时, 对于区域应力场扰动较小, 适合用来估算区域应力大小。故通过 2002 年以来易县紫荆关地区的小震初动方向计算的断层面解 (小震数据来自河北易县地震台), 获得地震的 P、T、B 轴, 根据震源机制解 P、T、B 轴推断构造应力场的 3 个应力主轴的方向, 进而推断紫荆关地区构造应力场特征, 采用的小震震源深度范围为 4~25 km, 震级为 2.0~4.8 级。由于需要确定具体某一深度或某一深度范围内的应力大小, 利用不同深度震源机制综合解的结果可能产生较大误差, 所以需要对所得到的震源机制解按深度进行二次划分, 得到不同深度范围震源机制信息, 才能满足利用震源机制解与断层摩擦强度约束深部地应力方法的基本条件。通过小震震源深度频率分布直方图 (见图 7), 选取频率高于邻近区间的深度值作为特征深度, 以此来对小震震源机制解分组反演。图中易县的特征深度分为 6、11、19 km, 结合各深度范围实际震源数量, 将深度范围划分为 4~8、8~16、16~25 km 3 组分别进行反演, 反演所用到的摩擦系数采用之前分析所得数值, 结果如图 8 所示。

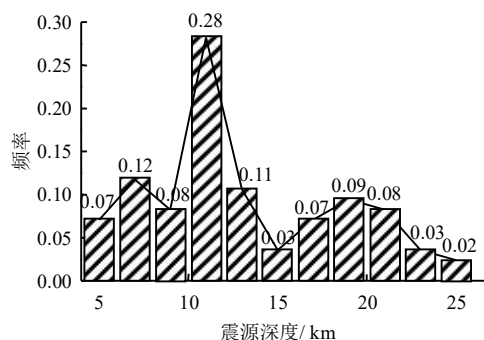


图 7 震源深度频率分布直方图

Fig.7 Histogram of frequency distribution for focal depths

结果表明, 不同深度下紫荆关地区的 P、T 均轴近似水平, 分别为 NE 向、NW 向, 这与汪素云^[42]、许忠淮^[43]等由华北地区的小震初动方向计算得到的结果基本吻合, 反映了研究区小震的震源机制解参数中, 空间分布的一致性是最大的特点。这一结果也与地应力测量数据分析结果达成一致, 进一步肯定 500 m 以下断层应力状态为走滑型, 且最大水平主应力方向与 P 轴方向均为 NE 向。故本文所获得的紫荆关断裂带地应力测量资料与深部震源机制解资料研究结果具有较好的一致性, 具体表现为 P 轴统计方位、最大水平主应力方位、华北地区现今构造应力场方向三者相吻合, 均为 NE 向, 深部断层应力状态为走滑型。

4 紫荆关地区深部应力状态预测

通过对紫荆关断裂带中小震震源机制解的统计分析、实地应力测量结果的分析, 推测得到了紫荆关深部断层属性、断层的摩擦系数以及小震震源机制解应力形因子 R , 通过侧压力系数多边形与应力形因子 R 结合的方法, 对深部地应力状态做出一定的预测。计算过程中所需要的岩石物性参数均根据地区经纬坐标 (北纬 $N39^{\circ}25'37.49''$ 东经 $E115^{\circ}10'13.56''$), 由 USGS 给出的 crustal1.0 统计数据中查询获得, 并参考其他文献进行修正^[40], 具体数值如表 4 所示。

由于深部断层状态为走滑型, 将之前确定的 3 个特征深度 6、11、19 km 分组反演震源机制得到的应力形因子参数代入式 (6), 结合侧压力系数多边形约束结果, 对 3 个深度的侧压力系数进行预测结果如图 9 所示, 其具体数值如表 5 所示。

通过将应力形因子引入应力多边形, 进而对紫荆关断裂带地应力情况进行分析后, 结果如表 5 所示, 通过有效应力与原地应力的侧压力系数转换关系, 得到 6 km 深度内最大水平侧压力系数为 $1.07 \pm$

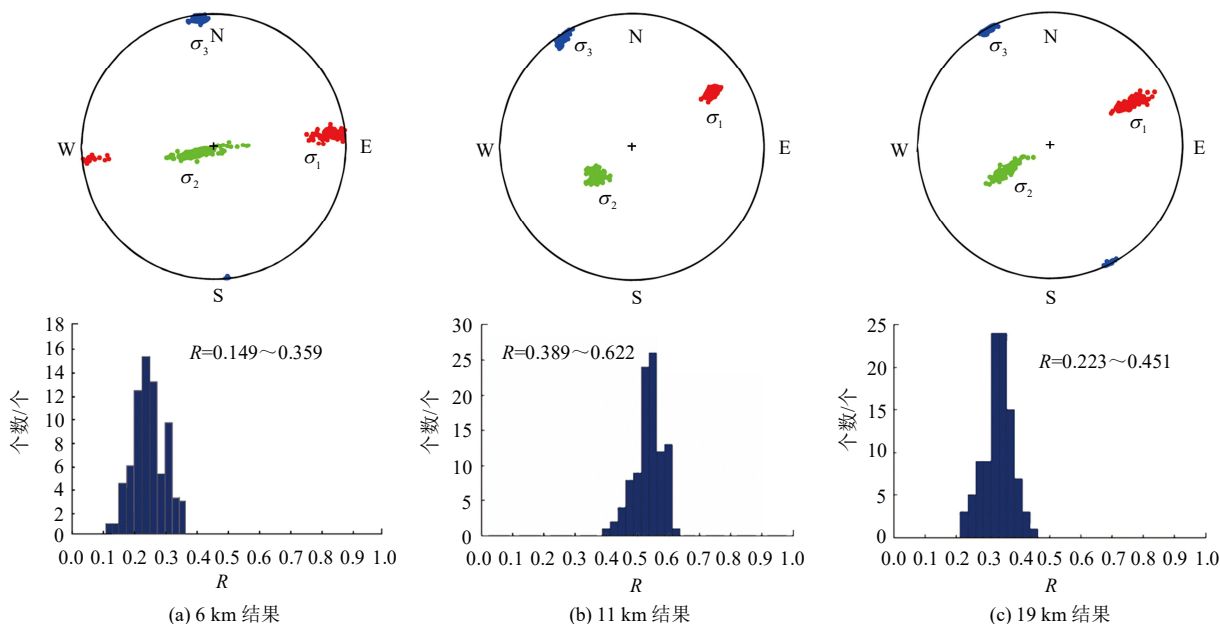


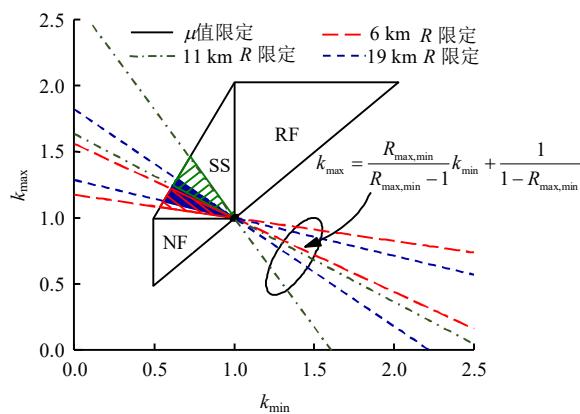
图8 震源机制反演结果

Fig.8 Focal inversion results

表4 研究区地层物性参数表

Table 4 Parameters of stratigraphic properties of study area

编号	深度 / km	V_p / (km/s)	V_s / (km/s)	重度 / (kN/m ³)	泊松比 ν
1	10.8	6.2	3.6	26.7	0.25
2	24.4	6.4	3.7	28.1	0.25
3	37.9	6.8	3.9	29.1	0.25

图9 紫荆关地区深部侧压力系数 k 预测图Fig.9 Prediction of deep lateral pressure coefficient k in Zijinguan表5 K 值预测结果Table 5 Prediction results of K

深度 / km	R		K_{max}		K_{min}	
	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值
6	0.149	0.359	1	1.222	0.604	1
11	0.389	0.622	1	1.459	0.615	1
19	0.223	0.451	1	1.295	0.556	1

0.07, 最小水平侧压力系数为 0.85 ± 0.15 ; 11 km 深度内确定的最大水平侧压力系数为 1.14 ± 0.14 , 最小水平侧压力系数为 0.88 ± 0.12 ; 19 km 深度内确定的最大水平侧压力系数为 1.09 ± 0.09 , 最小水平侧压力系数为 0.86 ± 0.14 。3 个深度最大水平主应力为 171.32 ± 11.12 、 343.88 ± 43.18 、 575.53 ± 50.03 MPa, 相对偏差分别为 6.49%、12.56%、8.69%; 最小水平主应力为 136.87 ± 23.33 、 264.51 ± 36.19 、 450.51 ± 74.99 MPa, 相对偏差分别为 17.05%、13.68%、16.65%。结合浅部侧压力系数分布规律, 侧压力系数与水平主应力随深度的变化如图 10(a)所示, 从图中可以看出, K_{max} 逐渐向 1 趋近, 与海姆准则相符合, K_{min} 不断向双轴应力模型值靠近, 所以以此得到的深部应力结果有一定的参考意义。

5 讨论

基于长期积累的应力测量数据, 不少学者提出了一些预测深部地应力的经验公式, 但这些经验公式多是以浅部地应力测试资料趋势推断深部地应力情况, 导致其区域性极强且深部适用性较差。在华北地区大量地应力数据的基础上, 前人同样提出了不少预测华北地区地应力情况的经验公式, 具体见表 6。取随机深度通过不同经验预测公式计算得到结果, 将二者进行比较, 如图 11 所示。

通过对比紫荆关地区 6 km 范围内不同预测公式与本文预测方法所得到的结果, 预测公式法与本文方法所得到的最小水平主应力吻合程度较高, 但

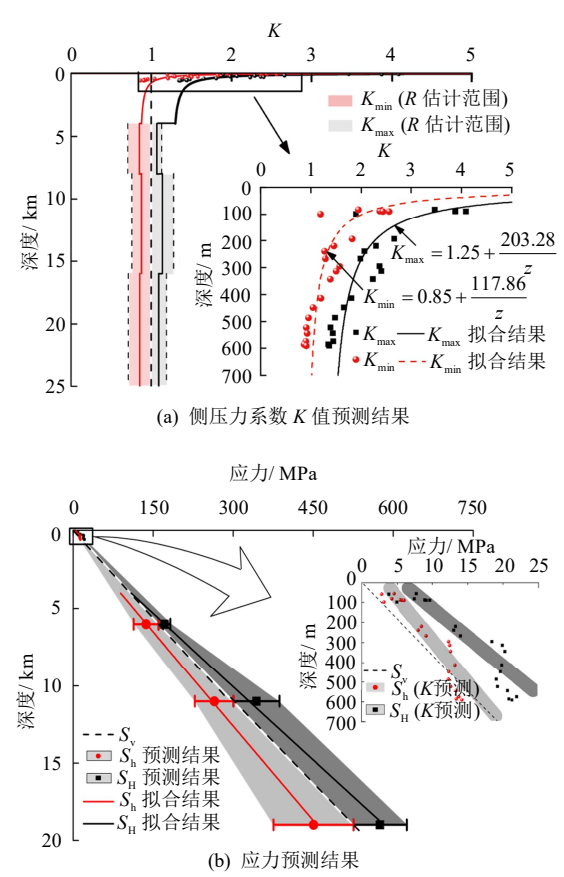


图 10 紫荆关地区侧压力系数与应力预测结果
Fig.10 Prediction results of lateral pressure coefficients and stresses in Zijingshan area

表 6 华北地区地应力预测公式 ^[44-47]			
Table 6 Stress prediction formula in North China			
深度 / km	地区	预测公式 / MPa	备注
1.50~3.20	华北油田	$S_H = 0.030H - 10.5$ $S_h = 0.021H - 5.87$	葛洪魁等 ^[44]
0.95~4.00	京津唐地区	$S_H = 0.024H + 11.01$ $S_h = 0.018H - 15.26$	陈家庚等 ^[45]
0~2.10	华北盆地	$S_H = 0.023H + 1.51$	高建理等 ^[46]
		$S_h = 0.018H - 1.08$	
2.10~4.00	华北盆地	$S_H = 0.025H + 4.16$	高建理等 ^[46]
		$S_h = 0.024H - 15.96$	
0~4.00	华北地区	$S_H = 0.023 \quad 3H + 4.665$ $S_h = 0.016 \quad 2H + 2.100$	黄禄渊等 ^[47]

注：表中 H 代表深度。

预测公式得到的最大水平主应力要略低于本文方法所得到的预测结果，且本文方法预测结果较华北地区经验公式得到的结果整体偏高，这可能与预测过程中所选择的紫荆关地区岩石平均重度较大（> 26 kN/m³）有关。为了更准确地对比个预测公式与本文的预测结果，以各经验公式的最大深度为例计算最大侧压力系数，并与本文结果进行对比，如表 7 所示，可以看出各种预测公式得到的 $K_{\max}$ 或

$K_{\min}$ ，至少有一个值与本文结果相符，其中高建理预测公式的结果^[46]与本文结果完全吻合，进一步说明了本文预测方法准确度较高。另外图 11 中还给出了根据 K 值得到的浅部应力值变化趋势，从而由浅到深完整的估计了研究区应力情况。

表 7 预测公式侧压系数 K 对比 ^[44-47]				
Table 7 Comparison of side pressure coefficient K in the prediction formula ^[45-47]				
序号	$K_{\max}$	$K_{\min}$	预测情况	备注
1	1.30	0.93	$K_{\min}$ 符合	葛洪魁等 ^[44]
2	1.07	0.57	$K_{\max}$ 符合	陈家庚等 ^[45]
3	1.09	0.83	$K_{\min}$ 、 $K_{\max}$ 符合	高建理等 ^[46]
4	0.91	0.62	$K_{\min}$ 符合	黄禄渊等 ^[47]

注：参考值 $K_{\min} = 0.85 \pm 0.15$ ， $K_{\max} = 1.07 \pm 0.07$

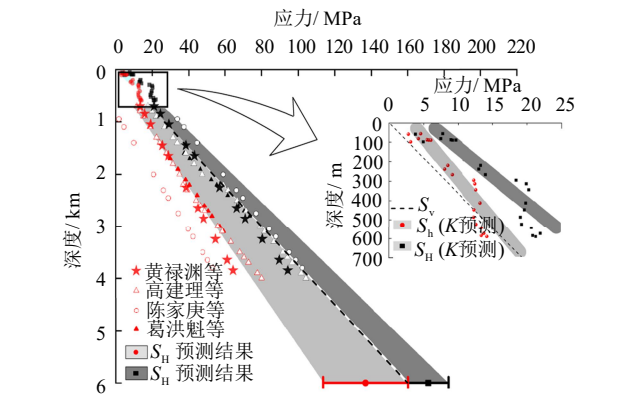


图 11 华北地区地应力预测公式对比
Fig.11 Comparison of in-situ stress prediction formulas in North China

文中是以走滑断层为例使用应力多边形与震源机制解相结合的办法对深部应力进行预测，在预测精度方面，可以看出随着 R 值的增大，最小水平主应力限定范围变小，精度提高，最大水平主应力变化趋势则相反，这是由于 R 所决定的限定直线与应力多边形的特点相关。而对于正断层或者逆断层，使用此方法只能对最大或最小主应力其中一个进行预测，但可以通过概率统计学的方法对另一个应力进行约束，在此不详细讨论。

本文所采用的方法可以从理论的角度出发，通过结合地震震源机制解数据与地应力测量数据对深部断层应力状态进行了估算，最小误差为 6.49%。而通常情况下区域小震数据一般较丰富，所以对于大型超深部岩土工程或是深部资源开采活动，如果区域内具有可供使用的小震数据，也可有效估计其深部应力环境，为灾害预测与防治提供帮助。另外本方法完全遵循 Anderson 断层理论，仅对可近似为 Anderson 模式的断层适用，而对于其他复杂类型的断层应力的预测，还有待进一步进行研究。

6 结 论

(1) 基于易县紫荆关断裂区域地质资料、原地应测量数据与震源机制解的分析结果表明, 区域深部岩体应力状态稳定, 均为有利走滑断层的应力状态; 区域最大水平主应力方向为 $N44.4^{\circ} E$, 深部与浅部、近场与远场的应力方向一致性较好。

(2) 将应力多边形改进得到的侧压力系数多边形与将震源机制解参数应力形因子 R 相结合, 得到深部侧压力系数 K 值的预测方法, 克服了单一方法限定估算应力状态的缺点, 可实现对深部岩体地应力量值有效限定估算。

(3) 使用改进后的方法对紫荆关断裂带不同深度处应力大小进行预测, 得到 6、11、19 km 深度处的最大侧压力系数 $K_{\max}$ 分别为 1.07 ± 0.07 、 1.14 ± 0.14 、 1.09 ± 0.09 , 最大水平主应力大小分别为 171.32 ± 11.12 、 343.88 ± 43.18 、 575.53 ± 50.03 MPa; 最小侧压力系数 $K_{\min}$ 分别为 0.85 ± 0.15 、 0.88 ± 0.12 、 0.86 ± 0.14 , 对应的最小水平主应力大小分别为 136.87 ± 23.33 、 264.51 ± 36.19 、 450.51 ± 74.99 MPa, 以此得出紫荆关深部断层应力变化趋势。

改进方法的限定效果受断层摩擦强度的大小、小震数目及深度分布的直接影响, 要进行更高精度或更大深度范围内的深部地应力预测, 需要从增加不同深度范围的小震数目、多种方法准确限定断层摩擦强度等角度优化进而得到更理想的计算结果。

参 考 文 献

- [1] EMMERMANN R, LAUTERJUNG J. The german continental deep drilling program KTB: overview and major results[J]. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 1997, 102(B8): 18179—18201.
- [2] 谢和平, 高峰, 鞠杨. 深部岩体力学研究探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2161—2178.
XIE He-ping, GAO Feng, JU Yang. Research and development of rock mechanics in deep ground engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(11): 2161—2178.
- [3] ZOBACK M L, ZOBACK M D, ADAMS J, et al. Global patterns of tectonic stress[J]. **Nature**, 1989, 341(6240): 291—298.
- [4] HOEK E, BROWN E T. Underground excavations in rock[M]. London: Institute of Mining and Metallurgy, 1980.
- [5] 李方全, 祁英男. 地壳应力随深度的变化规律[J]. 岩石力学与工程学报, 1988, 7(4): 301—309.
LI Fang-quan, QI Ying-nan. Variation of crustal stresses with depth in China[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1988, 7(4): 301—309.
- [6] 赵德安, 陈志敏, 蔡小林, 等. 中国地应力场分布规律统计分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6): 1265—1271.
ZHAO De-an, CHEN Zhi-min, CAI Xiao-lin, et al. Analysis of distribution rule of geostress in China[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(6): 1265—1271.
- [7] 王章琼, 晏鄂川, 鲁功达, 等. 我国大陆地下水封洞库库址区地应力场分布规律统计分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 1): 251—256.
WANG Zhang-qiong, YAN E-chuan, LU Gong-da, et al. Statistical analysis of in-situ stress field for underground water-sealed storage cavern in Chinese mainland[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(Suppl.1): 251—256.
- [8] 景锋, 盛谦, 张勇慧, 等. 不同地质成因岩石地应力分布规律的统计分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1877—1883.
JING Feng, SHENG Qian, ZHANG Yong-hui, et al. Statistical analysis of geostress distribution laws for different rocks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(7): 1877—1883.
- [9] 张传庆, 周辉, 冯夏庭, 等. 局域地应力场获取的插值平衡方法[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2016—2024.
ZHANG Chuan-qin, ZHOU Hui, FENG Xia-ting, et al. Method for obtaining local stress field based on interpolation and numerical simulation method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(8): 2016—2024.
- [10] 李新平, 汪斌, 周桂龙. 我国大陆实测深部地应力分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊 1): 2875—2880.
LI Xin-ping, WANG Bin, ZHOU Gui-long. Research on distribution rule of geostress in deep stratum in Chinese mainland[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(Suppl.1): 2875—2880.
- [11] DILLEN M W P. Time-lapse seismic monitoring of subsurface dynamics[D]. Delft: Delft University of Technology, 2000.
- [12] 左宇军, 李夕兵, 唐春安, 等. 二维动静组合加载下岩石破坏的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1809—1820.
ZUO Yu-jun, LI Xi-bing, TANG Chun-an, et al. Experimental investigation on failure of rock subjected to 2d dynamic-static coupling loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(9): 1809—1820.
- [13] 何满潮, 苗金丽, 李德建, 等. 深部花岗岩试样岩爆过程实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 865—876.

- HE Man-chao, MIAO Jin-li, LI De-jian, et al. Experimental study on rockburst processes of granite specimen at depth[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(5): 865—876.
- [14] STARR J. Closure stress gradient estimation of the Marcellus shale from seismic data[C]//Society of Exploration Geophysicists: Expanded Abstracts of 81st Annual Internat SEG Mtg. San Antonio: Society of Exploration Geophysicists, 2011: 1789—1793.
- [15] PARSONS T. Tectonic stressing in California modeled from GPS observations[J]. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 2006, 111(B3): B03407.
- [16] MATSUKI K, NAKAMA S, SATO T. Estimation of regional stress by FEM for a heterogeneous rock mass with a large fault[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2009, 46(1): 31—50.
- [17] 钟山, 江权, 冯夏庭, 等. 锦屏深部地下实验室初始地应力测量实践[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 356—366.
ZHONG Shan, JIANG Quan, FENG Xia-ting, et al. A case of in-situ stress measurement in Chinese Jinping underground laboratory[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(1): 356—366.
- [18] 苏利军, 翁建良, 卢文波. 千米深埋隧洞高地应力稳定分析及其工程应用[J]. 岩土力学, 2008, 29(增刊 1): 221—226.
SU Li-jun, WENG Jian-liang, LU Wen-bo. Stability analysis of 1 000 m-deep-buried tunnel under high geostress environment and its engineering application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(Suppl.1): 221—226.
- [19] 谢润成, 周文, 陶莹, 等. 有限元分析方法在现今地应力场模拟中的应用[J]. 石油钻探技术, 2008, 36(2): 60—63.
XIE Run-cheng, ZHOU Wen, TAO Ying, et al. Application of finite element analysis to the simulation of the in-situ stress field[J]. **Petroleum Drilling Techniques**, 2008, 36(2): 60—63.
- [20] 王小龙. 扩展有限元法应用于页岩气藏水力压裂数值模拟研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
WANG Xiao-long. Numerical simulation of hydraulic fracturing in shale gas reservoirs based on the extended finite element method[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
- [21] TIGREK S, SLOB E C, DILLEN MWP, et al. The role of angle dependent reflection coefficients in seismic reflection data to determine the local state of stress [C]//Society of Exploration Geophysicists: Expanded Abstracts of 73rd Annual Internat SEG Mtg. Dallas: Society of Exploration Geophysicists, 2003: 173—176.
- [22] HUNT L, REYNOLDS S, HADLEY S, et al. Causal fracture prediction: Curvature, stress, and geomechanics[J]. **The Leading Edge**, 2011, 30(11): 1274—1286.
- [23] ZOBACK M D, ZOBACK M L, MOUNT V S, et al. New evidence on the state of stress of the san andreas fault system[J]. **Science**, 1987, 238(4830): 1105.
- [24] BRUDY M, ZOBACK M, FUCHS K, et al. Estimation of the complete stress tensor to 8 km depth in the KTB scientific drill holes: Implications for crustal strength[J]. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 1997, 102(B8): 18453—18475.
- [25] CHANG C, MCNEILL L, MOORE J, et al. In situ stress state in Nankai accretionary wedge estimated from borehole wall failures[J]. **Geochemistry Geophysics Geosystems**, 2010, 11(12): Q0AD01.
- [26] MOORE J C, MCNEILL M K, YAMADA Y, et al. Growth of borehole breakouts with time after drilling: implications for state of stress, NanTroSEIZE transect, SW Japan[J]. **Geochemistry Geophysics Geosystems**, 2011, 12(4): Q04D9.
- [27] ZOBACK M, MASTIN L, BARTON C. In situ stress measurements in deep boreholes using hydraulic fracturing, wellbore breakouts and Stonely wave polarization[J]. **Rock Stress and Rock Stress Measurements**, 1986: 289—299.
- [28] GEPHART J W, FORSYTH D W. An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: Application to the San Fernando Earthquake Sequence[J]. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 1984, 89(B11): 9305—9320.
- [29] 曹现志, 李三忠, 刘鑫, 等. 太行山东麓断裂带板内构造地貌反转与机制[J]. 地学前缘, 2013, 20(4): 88—103.
CAO Xian-zhi, LI San-zhong, LIU Xin, et al. The intraplate morphotectonic inversion along the Eastern Taihang Mountain Fault Zone, North China and its mechanism[J]. **Geoscience Frontiers**, 2013, 20(4): 88—103.
- [30] 张秉良, 方仲景, 向宏发. 紫荆关断裂南台段断层物质的研究[J]. 北京地质, 1997(2): 10—13.
ZHANG Bing-liang, FANG Zhong-jing, XIANG Hong-fa. A study of fault trace in the Nantai section of the Zijingguan farcture[J]. **Beijing Geology**, 1997(2): 10—13.
- [31] 薛原. 太行山北段紫荆关断裂带构造特征与活动期次[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
XUE Yuan. Structural Characteristics and evolutionary stages of Zijingguan fault zone in northern taihang mountains[D]. Beijing: China University of Geosciences

- (Beijing), 2015.
- [32] 贾晋, 王成虎, 高桂云, 等. 2 种方法优选确定易县紫荆关最大水平主应力量值[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(增刊 2): 4142—4150.
- JIA Jin, WANG Cheng-hu, GAO Gui-yun, et al. Utilizing two methods to determine the horizontal principal stresses of Zijingguan region, Yixian county, Hebei province[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2018, 37(Suppl.2): 4142—4150.
- [33] 牛琳琳. 京津冀地区现代构造应力场与孕震环境研究[D]. 北京:中国地质科学院, 2018.
- NIU Lin-lin. Study on the tectonic stress field and seismogenic environment in Beijing, Tianjin, Hebei region[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2018.
- [34] 徐菊生, 袁金荣, 高士钧, 等. 利用 GPS 观测结果研究华北地区现今构造应力场[J]. 地壳形变与地震, 1999, 19(2): 81—89.
- XU Ju-sheng, YUAN Jin-rong, GAO Shi-Jun, et al. Research on the present tectonic stress field in North China with GPS observations[J]. **Chinese Journal of Crustal Deformation and Earthquake**, 1999, 19(2): 81—89.
- [35] 马文涛, 徐锡伟, 于贵华, 等. 首都圈地区的地震活动性与断裂的关系[J]. 地震地质, 2004, 26(2): 293—304.
- MA Wen-tao, XU Xi-wei, YU Gui-hua, et al. The relationship between seismic activity and fault activity in Beijing region[J]. **Seismology and Geology**, 2004, 26(2): 293—304.
- [36] ZOBACK M L. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: the world stress map project[J]. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 1992, 97(B8): 11703—11728.
- [37] 王成虎. 地应力主要测试和估算方法回顾与展望[J]. 地质论评, 2014, 60(5): 971—991.
- WANG Cheng-hu. Brief review and outlook of main estimate and measurement methods for in-situ stresses in rock mass[J]. **Geological Review**, 2014, 60(5): 971—991.
- [38] JAMISON D B, COOK NGW. Note on measured values for the state of stress in the Earth's crust[J]. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 1980(B4): 1833—1838.
- [39] OWENS T J, ZANDT G. Implications of crustal property variations for models of Tibetan plateau evolution[J]. **Nature**, 1997: 37.
- [40] WANG C Y, SANDVOL E, ZHU L, et al. Lateral variation of crustal structure in the Ordos block and surrounding regions, North China, and its tectonic implications[J]. **Earth and Planetary Science Letters**, 2014, 387: 198—211.
- [41] 杨婷, 吴建平, 房立华, 等. 华北地区地壳上地幔 S 波三维速度结构[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(2): 441—454.
- YANG Ting, WU Jian-ping, FANG Li-hua, et al. 3-D S-wave velocity structure of crust and upper mantle beneath North China[J]. **Progress in Geophysics**, 2012, 27(2): 441—454.
- [42] 汪素云, 许忠淮, 俞言祥, 等. 北京及邻区现代微震重新定位及其构造含义[J]. 中国地震, 1995(3): 222—230.
- WANG Su-yun, XU Zhong-huai, YU Yan-xiang, et al. Relocation of microearthquakes in Beijing and its neighbouring areas and its tectonic implications[J]. **Earthquake Research in China**, 1995(3): 222—230.
- [43] 许忠淮, 汪素云, 黄雨蕊, 等. 由大量的地震资料推断的我国大陆构造应力场[J]. 地球物理学报, 1989(6): 636—647.
- XU ZHONG-huai, WANG Su-yun, HUANG Yu-rui, et al. The tectonic stress field of Chinese continent deduced from a great number of earthquakes[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 1989(6): 636—647.
- [44] 葛洪魁, 林英松. 油田地应力的分布规律[J]. 断块油气田, 1998, 5(5): 1—5.
- GE Hong-kui, LIN Ying-song. Distribution of in-situ stresses in oilfield[J]. **Fault-Block Oil and Gas Field**, 1998, 5(5): 1—5.
- [45] 陈家庚, 高龙生. 原地应力、岩层原地强度及中国大陆之应力场[J]. 地震学报, 1989, 11(2): 142—152.
- CHEN Jia-geng, GAO Long-sheng. In-situ stress, in-situ strength of rocks and the China mainland stress field[J]. **Acta Seismologica Sinica**, 1989, 11(2): 142—152.
- [46] 高建理, 丁健民, 梁国平, 等. 华北地区盆地内地壳应力随深度的变化[J]. 中国地震, 1987, 3(4): 82—89.
- GAO Jian-li, DING Jian-min, LIANG Guo-ping, et al. Variation of crustal geostress with depth in North China Basin[J]. **Earthquake Research in China**, 1987, 3(4): 82—89.
- [47] 黄禄渊, 杨树新, 崔效锋, 等. 华北地区实测应力特征与断层稳定性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 1): 204—213.
- HUANG Lu-yuan, YANG Shu-xin, CUI Xiao-feng, et al. Analysis of characteristics of measured stress and stability of faults in North China[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(Suppl.1): 204—213.