

doi:10.3799/dqkx.2014.122

金州断裂带北段深孔地应力测量及其活动性

张 鹏^{1,2}, 丰成君^{1,2}, 孙炜峰^{1,2}, 杨海雨^{2,3}, 谭成轩^{1,2}

1. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081

2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

3. 中国地质大学工程技术学院, 北京 100083

摘要: 为查明辽东半岛金州地震活动断裂带现今地应力状态和活动状况, 在该断裂带北段熊岳城东侧开展了随深度系统地取心钻探和水压致裂地应力测量工作, 完成了 600 m 钻探深度范围内地应力测量试验 27 段和水平最大主应力方向测试 5 段。钻探岩心初步揭示了地壳浅表层的岩体结构特征; 随深度系统的地应力测量结果表明, 3 个主应力关系为 $S_v > S_H > S_h$, 垂直应力起主导作用, 易于正断作用发生; 现今最大水平主应力方向为 $56^\circ \sim 81^\circ \text{NE}$, 反映 NNE 走向的金州断裂带北段现今活动具有右行走滑特征。地应力测量结果揭示的金州断裂带正断兼右行走滑特征与已有的该区域研究成果相吻合, 为其现今活动性研究补充了新的动力学数据。

关键词: 辽东半岛; 金州断裂带; 水压致裂; 库伦准则; 正断层; 地震。

中图分类号: P315.72+7

文章编号: 1000-2383(2014)10-1295-12

收稿日期: 2014-01-15

In-Situ Stress Measurement of Deep Borehole in North Segment of Jinzhou Fracture Belt and Analysis on Its Activity

Zhang Peng^{1,2}, Feng Chengjun^{1,2}, Sun Weifeng^{1,2}, Yang Haiyu^{2,3}, Tan Chengxuan^{1,2}

1. Key Laboratory of Neotectonic Movement & Geohazard of Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, China

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

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

Abstract: Haicheng earthquake occurred in the north segment of Jinzhou fracture belt which is the most important active tectonic structure controlling earthquakes in Liaodong Peninsula. In this study, data was collected from 27 in-situ stress and 5 directional testing sensors installed at varying intervals along the total depth of single 600 m borehole located inside a granite rich region in the north segment of Jinzhou fracture belt at the east part of Xiongyue city. Combined with in-situ stress data of $S_v > S_H > S_h$, core sampling of the structural features of shallow earth crust rock formations reveals that the vertical principal stress plays a leading role in normal fault activity. Moreover, measured maximum in-situ principal stress trends towards the northeast-east direction and reflects present tensile properties, with dextral activity, of the Jinzhou segment. The results confirm the previous relevant studies, enriching the dynamics data and facilitating the understanding of the active features of the north segment of the Jinzhou fracture belt.

Key words: Liaodong Peninsula; Jinzhou fracture belt; hydraulic fracturing; Coulomb failure criteria; normal fault; earthquake.

0 引言

2011 年日本本州东海岸附近海域发生 9.0 级大地震, 华北和东北地区地表 GPS 同震位移的测量结

果表明, 在地震发生过程中, 由于太平洋板块构造的强烈俯冲作用导致位于上盘的中国华北和东北地区产生了近东西向的张性应力环境(以上资料引自于 <http://www.cea.gov.cn/manage/html/8a85878816>

基金项目: 国土资源部公益行业专项(No.201211096); 中国地质调查局项目(No.12120113012100); 中国地质科学院地质力学研究所基本科研业务。

作者简介: 张鹏(1986-), 男, 硕士, 研究实习员, 主要从事为地应力测量与监测、岩石力学、构造应力场等方面的研究工作。

E-mail: zhangpeng0713@sina.com

32fa5c0116674a018300cf/_content/11_03/22/1300780240530.html).而在日本大地震之前的地应力测量结果表明华北地区主要处于近东西向的挤压环境中,因此说明 2011 年日本大地震对我国东部大陆主要断裂活动状态的影响非常重要.

金州断裂带是辽东半岛重要的地震活动控制构造带(辽宁省地震局,1986;辽宁地矿局,1989),在该断裂带及其附近,分布有重要的城市、核电站、军事设施、水库、工矿等.同时,省内大多数破坏性地震均沿该断裂带分布,历史上曾经发生 M_s5 级以上地震 8 次,1975 年海城 $M_s7.3$ 级地震就位于该断裂带的北端.

地壳中的断裂构造作用多为地应力作用的结果(中国地质科学院地质力学研究所和国家地震局地震地质大队,1981;王连捷等,1991;孙叶等,1998,2012;谭成轩等,2003),地壳应力状态是地球动力学研究的基本问题之一,开展地应力测量和研究有助于分析断裂活动的动力学机制,探讨地壳运动问题,同时在地震地质、区域地壳稳定性、矿山开采、水利工程、军事工程等方面具有重大的理论意义和应用价值.

为查明金州断裂带原地应力状态和现今活动特征及其潜在发展趋势,本文通过在金州断裂带北段关键构造部位开展深孔地应力测量钻探工程和随深度系统地应力测量和研究,揭示了金州断裂带北段地壳浅表层的现今应力状态,为金州断裂带现今活动性分析提供了新的动力学数据,对于金州断裂带地震地质研究和区域地壳稳定性评价具有重要的现实意义.

1 金州断裂带活动性研究概述

1.1 金州断裂带总体特征

金州断裂带贯穿辽宁省东部地区,是辽宁省内最大的活动断裂带之一(李新等,1998).它南起大连湾,经金州—普兰店—万家岭—熊岳—盖州并一直延伸到海城,长约 200 km,宽度一般为几十米,最窄为 5~6 m,最宽达 100 m,由数十条平行的断裂组成,具有明显的分支复合现象,总体平面几何形态呈舒缓波状延伸.金州断裂带走向为北北东—北东向,倾向为南东向,主断面倾角约 70° .金州断裂带可分为南、北、中 3 段,分别为金州—普兰店、普兰店—万家岭和熊岳—海城以北.断裂带的南段和北段走向总体上呈北东向,中段由于受到北西向断裂的切割,

局部走向发生变化呈近南北向(图 1).

1.2 金州断裂带活动性研究

夏怀宽(1991)认为金州断裂带是位于辽东隆起和下辽河拗陷过渡带的一条中更新世以来活动的断裂带,活动方式比较复杂,第四纪差异运动达 400 m,其附近活动断裂比较发育,是区域构造活动比较强烈的部位.遥感影像的构造解译表明(王丽,1988),北北东向的金州断裂带由数条互相平行的断裂组成且规模较大,沿断裂带两侧的颜色和影响特征比较清晰,一系列水系沿断裂分布,如思拉堡、黄旗堡、黄哨、龙门汤等温泉.依据海岸地貌资料(李建华和杨喆,1987),自第三纪以来辽东隆起相对下辽河—渤海拗陷发生急剧的上升活动,期间金州断裂带表现出一定的活动性,构成了营口—大连地带的控震构造.根据卫星图像上地貌及微地貌反映的形态特征和野外地质地貌分析(王挺梅等,1976;吴明大,1997)表明,金州断裂带在平面上表现为雁列式的北北东向,且在地质历史上有过多次活动.在北段分布着第四纪活动断层,如金家沟断层、熊岳东南陈屯一带断层崖,其断裂形迹清晰明显并控制第四纪地层的发育;而中段和南段的新金北孙大道、金县后半拉山和七里金州台等剖面表明断裂带上覆第四纪残积坡积层中未见构造变动形迹,证实在该段第四纪以来没有明显活动,表明金州断裂带在第四纪时期具有多次活动性,新活动形迹在北段表现最为突出.进一步的断裂带或断层破碎带样品地质测年资料表明(吴明大,1997),断裂带北段的熊岳至盖州间铬铁山金家沟断层最新活动时代为早更新世;中段最晚活动时间为晚更新世;南段,在早更新世有活动.跨断层水准测量资料表明(万波等,2010),断层活动速率可达 0.7 mm/a.受断裂控制,带内发育有中、新生代盆地,如 B1 新生代盆地(图 1).断裂带内岩层挤压明显,并伴有构造角砾岩、糜棱岩、挤压片理和扁豆体的发育.断裂带总的性质表现为南、北两段为正断层,中段为逆断层.

辽东半岛地震资料表明(赵文峰,1989),断裂带对中强地震活动具有明显的控制作用,金州断裂带控制着辽东半岛沿该断裂带分布的破坏性地震和小震群活动.金州断裂带与 NW 向断裂交汇部位往往是发生中强地震的主要部位.据现有资料统计,沿断裂带 5 级以上破坏性地震达 8 次,其中 1861 年金州 6 级地震和最大的 1975 年 $M_s7.3$ 级海城地震均发生在该断裂带上,且沿金州断裂带东侧一带地震活动较为频繁,如分布于此的熊岳、普兰店小震群.现

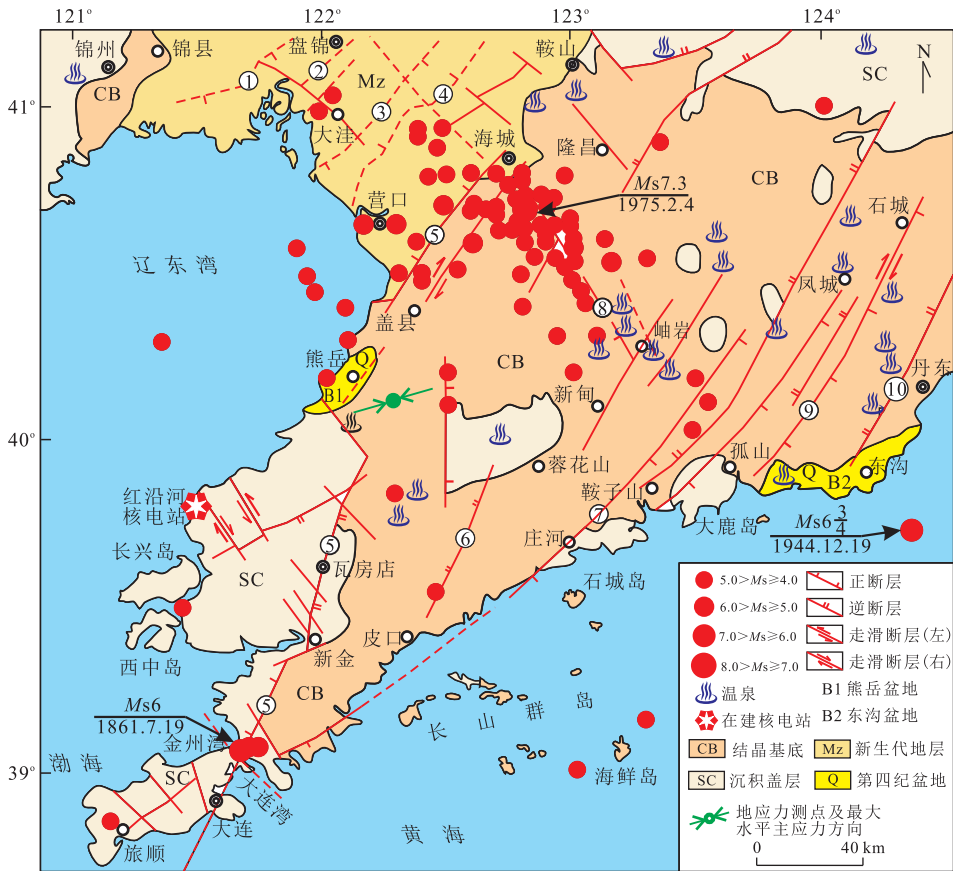


图 1 辽东半岛活动构造分布

Fig.1 Distribution map of active tectonics in the Liaodong Peninsula

①张家街断裂;②台安断裂;③辽中断裂;④牛居—油燕沟断裂;⑤金州断裂带;⑥皮口断裂;⑦庄河断裂带;⑧海城河隐伏断裂;⑨四平街断裂;⑩鸭绿江西支断裂(南段)

今小震活动比较微弱,条带状分布不显著.

区域断裂或动力学性质表明(丁国瑜,1982),NE向金州断裂带是以右旋活动为主的正阶断层带,并且区域构造应力活动以NEE-EW向水平挤压为主,同时,该断裂带具有在区域块断体上上拱所反映的垂直正向应力活动的特征.区域震源机制解认为, P 轴方向为 $66^{\circ}\sim 81^{\circ}$,显示近于水平挤压应力为主;金州断裂带北段海城岔沟村附近7.3级地震震源机制解的 P 轴方位为 66° ,小震震源机制解的平均 P 轴方位为 77° ,表明辽东半岛的区域构造应力场的方向为北东东向(邓启东等,1976;顾浩鼎等,1976).

此外,沿金州断裂分布着一系列活动断层和一系列温泉,是辽宁省温泉分布最多、水温最高的一条“地热带”(夏怀宽和张先泽,1986),如盖州市鲅鱼圈东侧沿线分布有思拉堡温泉和熊岳温泉,其水温分别高达 63°C 和 83°C .由此表明,金州断裂带具有较强的活动特征.

2 金州断裂带北段深孔水压致裂地应力测量

2.1 深孔水压致裂地应力测量孔位的确定和钻探工程

为了分析研究金州断裂带在2011年日本大地震发生后现今活动特征及潜在发展趋势,笔者通过沿金州断裂带开展的活动构造地面、地层、节理、地形地貌等详细调查,在辽东南部盖州市杨镇镇头道沟村(GPS: $40^{\circ}06'46''\text{N}$, $122^{\circ}17'34''\text{E}$, $H=159\text{ m}$)花岗岩体区确定了一个深孔地应力测量孔位(图1).该孔位西距熊岳城约20 km,位于金州断裂带东侧约15 km,属金州断裂带北段,1975年2月5日在其北部海城发生了 $M_s 7.3$ 级大地震,属于金州断裂带关键构造部位之一.

地形地貌上,该地应力测量孔南、北部山高约250 m,距北侧山体较近,两侧山体坡角近直立,属于2条沟谷交汇区(图2).通过钻探工程和详细编

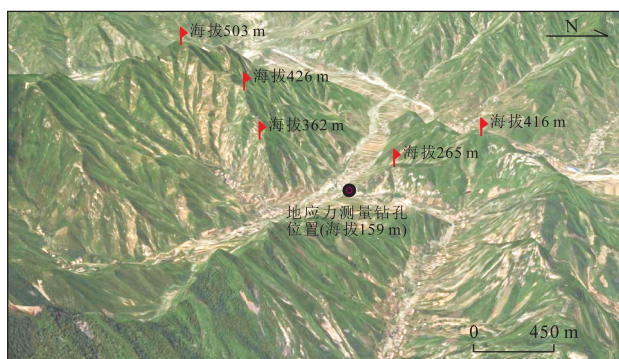


图 2 盖州钻孔位置及其周围地形地貌示意

Fig.2 Location of deep borehole in Gaizhou with surrounding topography and geomorphology

录,其揭示了地层岩性和岩心的岩石质量指标(RQD),笔者在此基础上绘制了岩心钻孔综合柱状图(图3)。钻孔岩心完整性较好,最大岩心长度达6.2 m,适合开展水压致裂地应力测量。根据钻孔岩心编录、节理裂隙统计、钻探岩心的岩石质量指标以及岩石的力学性质等,笔者随钻探深度系统地选取地应力测试段进行水压致裂地应力测量试验。

2.2 深孔水压致裂地应力测量原理

本次地应力测量方法采用的是国际岩石力学学会推荐的水压致裂法(Altmatov *et al.*, 1987; Zoback and Healy, 1992; 陈群策等, 1998; Haimson and Cornet, 2003; 吴满路等, 2010), 该方法是1987年国际岩石力学学会试验方法委员会颁布的确定岩石应力建议方法中所推荐的方法之一, 是目前国际上能较好进行深孔地应力测量的先进方法。本次测量采用水压致裂地应力测量系统(图4)。采用一对可膨胀封隔器将选定的钻孔深度段(即压裂段, 亦称试验段)的上、下部分封隔, 然后通过水泵给试验段加压, 数字采集系统记录施加的压力值随时间变化的实测曲线(图4)。利用同一套井上设备, 将膨胀性能更好的印模器放在压裂段已经压开裂缝的相同位置印模定向, 可以看到印模器上清晰地显示压裂段在水压作用下诱发裂缝的印迹, 并通过换算可得到诱发裂缝的方位。

该方法无需知道岩石的力学参数就可获得地层中现今地应力的多种参量, 并具有操作简便、可在任意深度进行连续或重复测试、测试速度快、测值可靠等特点(Hayashi and Haimson, 1991; 吴满路等, 2005; 丰成君等, 2013; 张鹏等, 2013)。该方法以弹性力学原理为基础, 并要求满足3个前提条件。首先, 岩石要有良好的线弹性、完整性和各向异性; 其次,

压裂液体对岩石是非渗透的; 再者, 岩层中有一个主应力分量的方向和钻孔轴平行。在上述理论和前提下, 根据上覆岩石的重力可以计算垂直应力, 通过分析张开和关闭水力诱发裂缝所记录的压力值, 即可获得特征压力参数, 再据相应的理论公式确定最大、最小水平主应力值以及岩石水压致裂抗拉强度等岩石力学参数。通过水压致裂诱发裂缝的方位来确定垂直于钻孔轴的平面内主应力的方向。水压致裂各岩石力学参数计算关系式如下:

$$S_h = P_s, \quad (1)$$

$$S_H = 3P_s - P_r - P_0, \quad (2)$$

$$S_v = \rho gh, \quad (3)$$

$$T = P_b - P_r, \quad (4)$$

式中: P_b 为水压致裂产生水压裂缝的破裂压力, 单位 MPa; P_r 为水力压裂使水压裂缝重新张开的重张压力, 单位 MPa; P_s 为水压裂缝开始闭合时的关闭压力 (P_b 、 P_r 、 P_s 的取值可见图2水压致裂标准曲线); P_0 为水压致裂压裂段深度的孔隙压力, 单位 MPa; ρ 为岩石密度, 计算时一般取 $\rho = 2.60 \times 10^3 \sim 2.70 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; g 为重力加速度, 单位 m/s^2 ; h 为钻孔岩层深度, 单位 m; T 为岩石抗拉强度, 单位 MPa; S_H 为最大水平主应力, 单位 MPa; S_h 为最小水平主应力, 单位 MPa; S_v 为垂直应力, 单位 MPa。

2.3 地应力测量及数据处理

在600 m深度范围, 共成功获得了27段压裂测试曲线。为了提高各压力参数的取值精度以及相关数据的可比性, 本文采用国际岩石力学学会推荐的5种方法之一的 dt/dp 法进行测量数据的处理(谭成轩等, 2004, 2007; 陈群策等, 2010; 丰成君等, 2012)。另外, 根据压裂测试曲线的初步分析, 考虑到测试结果随深度分布的合理性和科学性, 笔者选取了5个压裂深度段进行印模定向, 以确定钻孔附近地壳浅表层现今最大水平主应力方向。水压致裂形成的裂缝印模清晰, 纵向延伸较长且为对称的竖直裂缝, 基本贯穿整个压裂段, 保证了水压致裂地应力测量结果数据的可靠性和稳定性, 水压致裂测量曲线如图5、6所示, 印模测试结果如表1所示。

2.4 地应力测量结果分析与讨论

下面将从钻孔3个主应力大小随深度变化规律、水平剪应力相对大小对断层活动危险性分析、3个主应力之间的关系及所反映的应力状态类型、最大水平主应力方向及其与区域构造应力场和断层活动方式之间的关系等4个方面对原地应力测量结果进行分析与讨论。

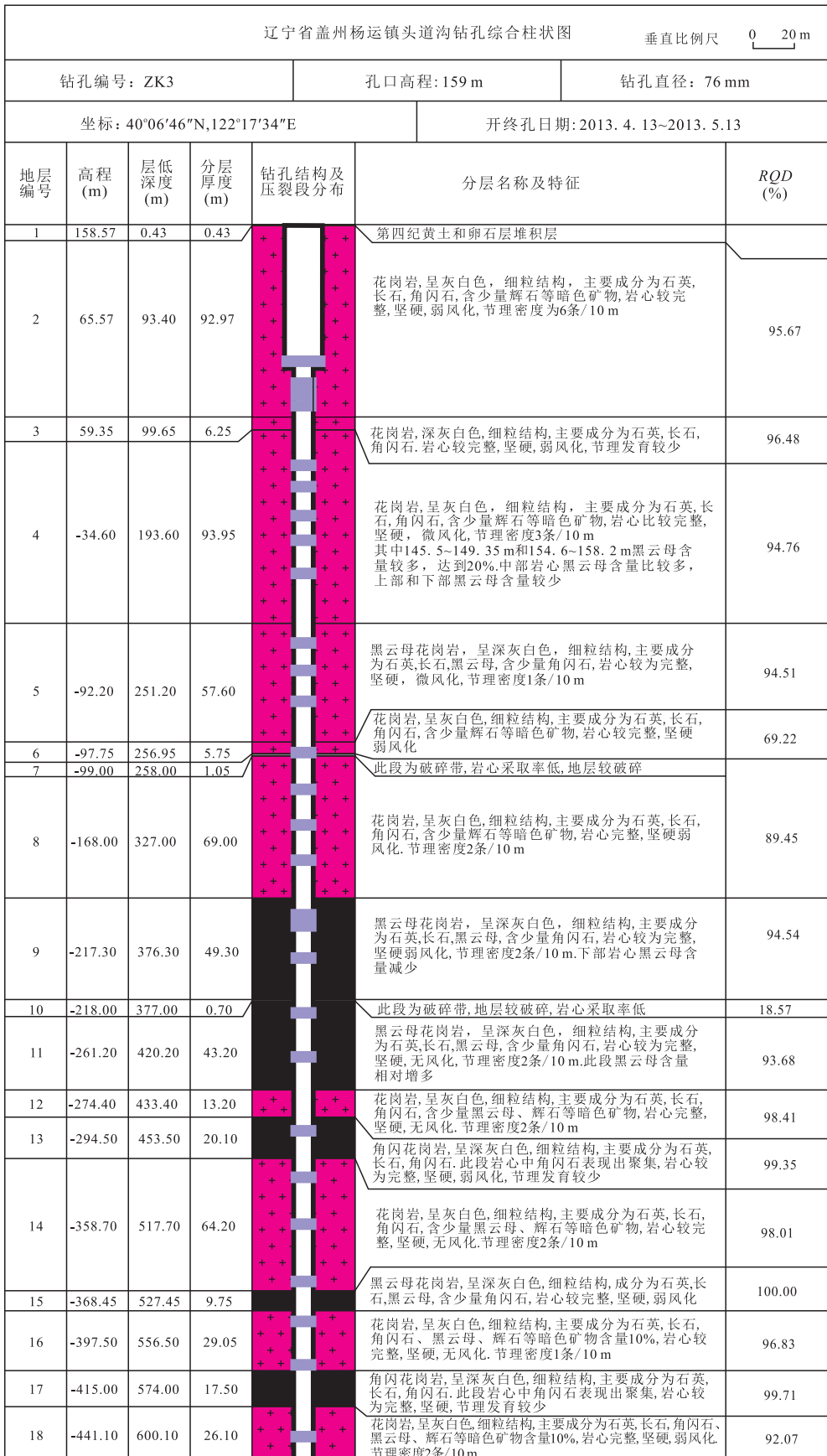


图 3 辽宁盖州深孔钻孔柱状图

Fig.3 Deep borehole histogram in Gaizhou city, Liaoning Province

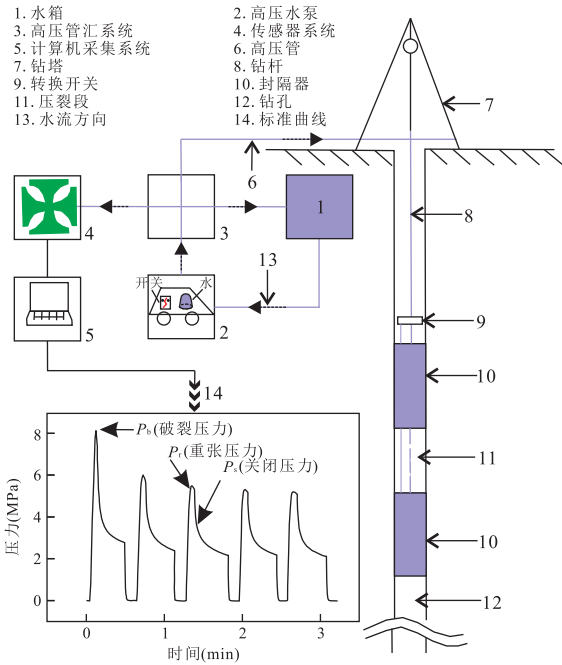


图 4 水压致裂地应力测量系统

Fig. 4 In-situ stress measurement system of hydraulic fracturing

2.4.1 主应力大小随深度变化规律 S_H 和 S_h 随深度的分布规律(图 7)表明,水平主应力值总体上随深度的增加而增大,其线性回归方程为:

$$S_H = 0.0164H + 2.7075, R^2 = 0.6760, \quad (5)$$

$$S_h = 0.0130H + 1.8998, R^2 = 0.8109, \quad (6)$$

$$S_v = 0.0265H, \quad (7)$$

式中: H 为钻孔深度; R^2 为回归相关系数。

受岩体非均质性、高角度节理裂隙、钻孔周围地形(图 2)等因素影响, S_H 和 S_h 随深度线性回归相关性系数不高,均在 0.7 左右。 S_H 和 S_h 随深度线性回归方程中,均含有一定值的常数项,说明存在有较大的水平应力。在钻孔深度 255 m 以上主要受非构造(地形)和区域构造作用影响,在 255 m 以下主要受区域构造应力的影响,具体表现为:在测量深度小于 255 m 的近地表,由于受到非构造因素的影响产生应力集中,尤其是在 200~255 m 出现明显的应力集中区,这主要是受到钻孔周围地形的影响;而在测量深度 255 m 以下,由于受 1973 年海城 $M_s 7.3$ 级地震发生所导致的地应力和能量释放、岩体结构等因素的影响,地应力大小在同等深度、类似岩性等条件下与其他地区相比属于偏小水平。

2.4.2 3 个主应力大小之间的关系 地应力状态往往因地形地貌的影响而受到不同程度的干扰,在深切峡谷谷底、坡角产生明显的应力集中,与其所处位

置即地形地貌有着直接关系。地壳浅表层地应力主要包括构造应力和非构造应力两部分,其中非构造应力主要受地形等因素控制,分布在地壳浅表层三维空间一定的深度范围之上,与下部的构造应力之间应该存在一个理想曲面,即构造应力面,其是由三维空间不同地点非构造应力影响消失的深度点构成的曲面。在构造应力面之上,非构造应力和构造应力同时存在,而在构造应力面之下,仅构造应力存在。水平侧压力和山体高度是影响构造应力面深度的主要因素。Tan *et al.* (2004) 认为,当水平侧压力随深度变化梯度与重力梯度相等时($k=1$),在沟谷谷底,构造应力面深度近似等于山体高度。

钻孔位置的北侧山体与测量孔位高程差约 250 m(图 2),应力集中区深度在 255 m 以上,与上述研究成果较一致。由地应力测量结果(表 1)和图 7 分析可以看出:在 255 m 以上主应力大小之间的关系为 $S_H > S_h > S_v$, 主要受非构造和区域构造作用的综合作用,其中非构造作用的影响因素主要为地形条件,从主应力大小随深度变化曲线可以看到,在深度 255 m 以上出现了明显的应力集中区。而在 255 m 以下主要受区域构造作用的影响,主应力大小之间的关系为 $S_v > S_H > S_h$, 说明该地区地壳浅表层现今构造活动以垂直应力占主导作用,该应力状态有利于正断层活动,这与已有关于金州断裂带北段现今表现为正断层作用的研究结果一致(王挺梅等, 1976; 吴明大, 1997)。

2.4.3 最大水平主应力方向分析 从表 1 和图 6 可以看出,在测量深度范围内,5 个深度段印模定向试验结果较一致,反映该钻孔附近地壳浅表层现今最大水平主应力方向为北东东向,这与震源机制解反映的该区域现今构造应力场方向和其他研究成果基本一致(王兆国等, 2009),表明辽东半岛的现今区域构造应力场的最大水平主应力方向为北东东向。结合金州断裂带北段呈北北东向展布的平面几何形态,前人开展的力学分析表明金州断裂带北段所处的应力状态类型有利于其发生右旋走滑活动,这与区域断裂运动学的分析结果一致(王兆国等, 2009; 万波, 2010)。

2.4.4 该点地应力测量结果区域代表性讨论 实测最大水平主压应力优势方位往往是分析地应力测量结果区域代表性的重要方面,下面主要从日本大地震前辽东半岛区域现代最大水平主压应力优势方位和日本大地震后该点东北本溪实测现今最大水平主压应力方向对该点地应力测量结果的区域代表性

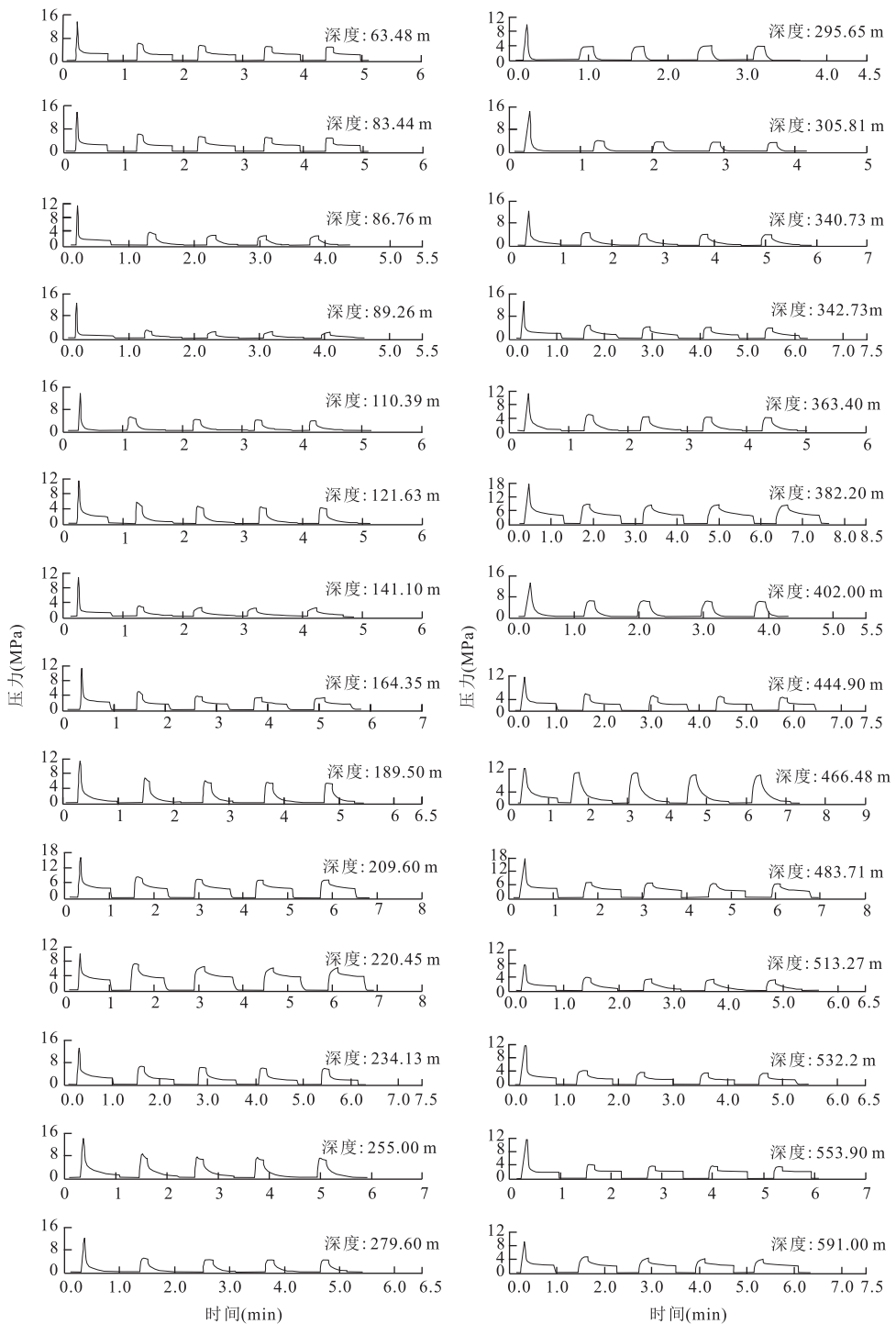


图 5 盖州深孔水压致裂应力测量曲线

Fig.5 Curves of hydraulic fracturing in-situ stress measurement in Gaizhou deep borehole

进行讨论。

日本大地震前,谢富仁等(2003)和《中国大陆地壳应力环境基础数据库》(<http://www.eq-icd.cn/webgis/picture.htm>)综合多种研究方法和成果,编制出版或发布了华北和东北地区现代构造应力场图,其所揭示的辽东半岛区域现代最大水平主压应

力优势方位为 NEE 方向。

此外,金州断裂带北段运动学研究表明其具有右旋走滑活动特征,考虑到断裂的几何学展布,其动力学作用方式应以 NEE 向区域现代水平构造挤压应力为主(王兆国等,2009;万波等,2010)。

日本大地震后,2013年5月研究人员在该测点

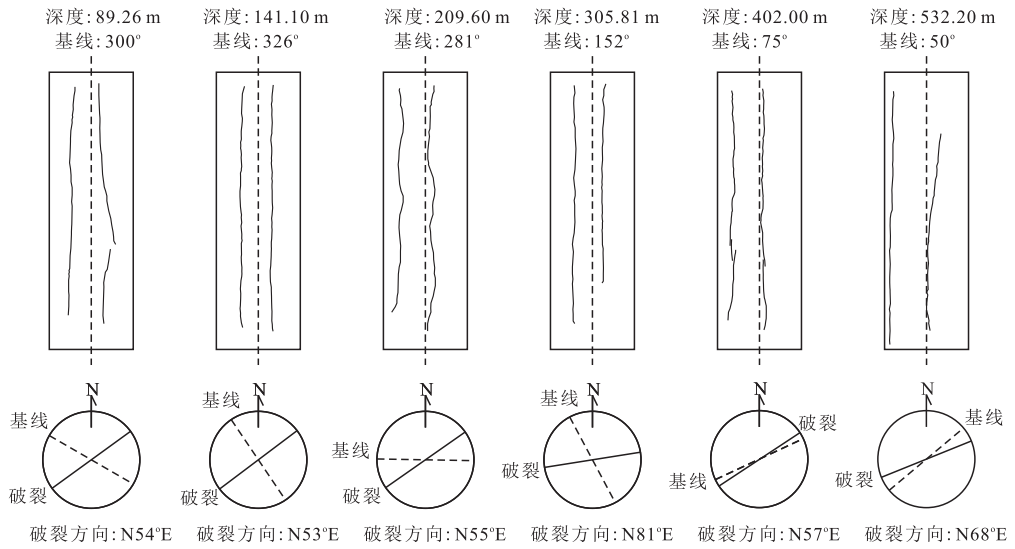


图 6 盖州深孔水压破裂印模形状及其方向

Fig.6 The shape and its direction of hydraulic fracture impression in Gaizhou deep borehole

表 1 辽宁省盖州市 600 m 钻孔水压致裂地应力测量结果

Table 1 Results of in-situ stress measurement in 600 m borehole in Gaizhou city, Liaoning

序号	测段中心深度 (m)	压力(MPa)					主应力(MPa)				S _H 方向
		P _b	P _s	P _r	P _H	P ₀	S _H	S _h	S _v	T	
1	63.48	13.48	5.49	3.98	0.63	0.63	5.82	3.98	1.68	7.99	
2	83.44	10.99	3.88	3.10	0.83	0.83	4.59	3.10	2.21	7.11	
3	86.76	12.34	2.85	2.48	0.87	0.87	3.72	2.48	2.30	9.49	
4	89.26	12.36	2.38	2.04	0.89	0.89	2.85	2.04	2.37	9.98	N54°E
5	110.39	13.57	4.72	3.40	1.10	1.10	4.38	3.40	2.93	8.85	
6	121.63	12.61	5.39	3.72	1.22	1.22	4.55	3.72	3.22	7.22	
7	141.10	11.32	3.03	2.66	1.41	1.41	3.54	2.66	3.74	8.29	N53°E
8	164.35	13.05	4.73	4.00	1.64	1.64	5.63	4.00	4.36	8.32	
9	189.50	13.34	7.38	5.13	1.90	1.90	6.11	5.13	5.02	5.96	
10	209.60	18.69	8.43	7.46	2.10	2.10	11.85	7.46	5.55	10.26	N55°E
11	220.45	12.05	7.12	6.41	2.20	2.20	9.91	6.41	5.84	4.93	
12	234.13	15.34	8.04	6.35	2.34	2.34	8.67	6.35	6.20	7.30	
13	255.00	16.76	9.55	6.70	2.55	2.55	8.00	6.70	6.76	7.21	
14	279.60	15.77	6.69	5.58	2.80	2.80	7.25	5.58	7.41	9.08	
15	295.65	12.60	5.71	5.06	2.96	2.96	6.51	5.06	7.83	6.89	
16	305.81	17.38	6.05	4.90	3.06	3.06	5.59	4.90	8.10	11.33	N81°E
17	340.73	15.87	6.72	6.18	3.41	3.41	8.41	6.18	9.03	9.15	
18	342.73	16.94	6.68	6.34	3.43	3.43	8.91	6.34	9.08	10.26	
19	363.40	14.77	7.67	6.37	3.63	3.63	7.81	6.37	9.63	7.10	
20	382.20	21.89	9.89	8.54	3.82	3.82	11.91	8.54	10.13	12.00	
21	402.00	17.16	8.94	7.10	4.02	4.02	8.34	7.10	10.65	8.22	N57°E
22	444.90	16.29	8.85	7.66	4.45	4.45	9.68	7.66	11.79	7.44	
23	483.71	22.25	10.06	9.78	4.84	4.84	14.44	9.78	12.82	12.19	
24	513.27	13.00	8.14	7.25	5.13	5.13	8.48	7.25	13.60	4.86	
25	532.20	17.90	8.30	7.60	5.32	5.32	9.18	7.60	14.10	9.60	N68°E
26	553.90	17.82	8.65	7.88	5.54	5.54	9.45	7.88	14.68	9.17	
27	591.00	15.56	9.42	9.27	5.91	5.91	12.48	9.27	15.66	6.14	

注: P_b, 岩石原地破裂压力; P_r, 破裂面重张压力; P_s, 破裂面瞬时关闭压力; P_H, 静水柱压力; P₀, 孔隙压力; T, 岩石抗拉强度; S_h, 水平最小主应力; S_H, 水平最大主应力; S_v, 根据上覆岩石埋深计算的垂向主应力(岩石容重取 2.65 g/cm³)。

东北辽宁省本溪市大台沟铁矿开展了 1 000 m 钻孔水压致裂地应力测量(辽宁省本溪市大台沟铁矿水压致裂地应力测量报告, 2013, 中国地质科学院地质

力学研究所), 实测现今最大水平主压应力方向为 N65°E~N85°E。

金州断裂带北段现今地应力测点在构造部位、

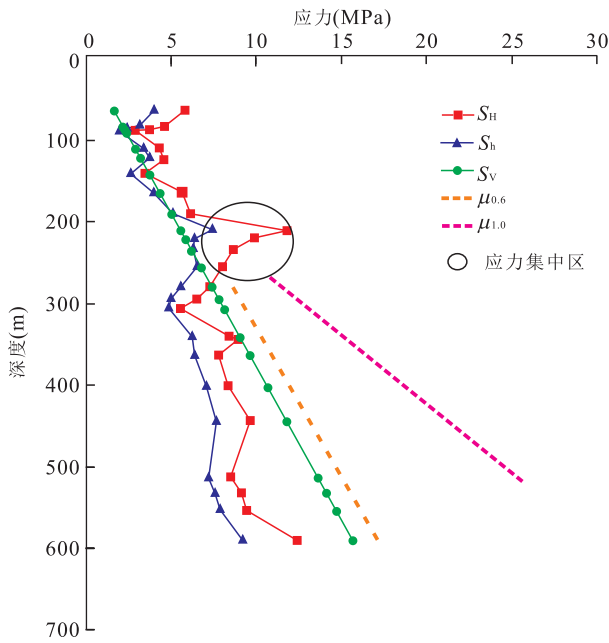


图 7 盖州深孔应力大小随深度分布

Fig.7 Curve of the stress vs. depth in Gaizhou deep borehole

岩性、岩体完整性等方面满足地应力测量的要求,地应力测量方法技术可靠,测量数据系统、准确;从测量结果可以看出 255 m 以下主要受控于区域构造应力作用,实测现今最大水平主压应力方向与辽东半岛日本大地震前的区域现代最大水平主压应力优势方位及日本大地震后本溪现今最大水平主压应力方向基本一致。

因此,该点地应力测量结果具有区域代表性,能够代表金州断裂带北段区域现今构造应力状态。

3 断层滑动危险性探讨

断层的活动性受其所处的应力状态控制,依据库伦准则,如果断层面上的剪应力等于或大于断层面上的滑动摩擦阻力时,断层将产生滑动,即断层滑动如下关系式成立:

$$\tau \geq \mu \sigma_n, \quad (8)$$

式中: τ 为断层面上的剪应力; μ 为摩擦系数(由试验确定); σ_n 为断层面上的正应力; $\mu \sigma_n$ 为断层面上的滑动摩擦阻力。

同样根据库伦准则,对于正断层,最大有效主应力与最小有效主应力之比与摩擦系数 μ 满足下列关系:

$$\sigma_1 / \sigma_3 = (S_1 - p) / (S_3 - p) \leq [(1 + \mu)^{1/2} + \mu]^2, \quad (9)$$

式中: S_1 、 S_3 为断层周围最大与最小主应力; p 为孔隙压力.如果公式(9)左边小于右边,说明断层稳定.反之,断层可能沿断层法线方向与最大主应力夹角为 ϕ 的面产生错动.且 ϕ 与 μ 满足关系:

$$\phi = (\pi/2 + \tan^{-1} \mu) / 2. \quad (10)$$

Byerlee(1978)认为当应力值不大于 100 MPa 时,断层面上的剪应力与正应力比值 μ 为 0.85.张伯崇(1996)认为在应力值为 150~250 MPa 时,岩石摩擦系数 μ 的上限为 1.10,下限 0.65,平均为 0.85,即 μ 取 0.6~1.0 是合理的.本研究表明,该摩擦系数可以近似代表浅部断层面上的滑动摩擦系数。

对于正断层,取 $S_1 = S_v$ 、 $S_3 = S_h$,分别将 μ 取值 0.6 和 1.0 代入公式(9)计算得到正断层活动时最大水平主应力临界值的下限和上限,将其绘制成实测地应力值随深度变化图(图 7).从图 7 可以看出,盖州深孔原地应力大小尚未达到断层瞬间滑动的应力值临界区,表明该钻孔附近断裂带处于相对稳定状态.然而由于受金州断裂带长期活动的影响,尤其是海城地震后造成的地应力和能量释放、地表岩体和钻孔岩心高角度(一般大于 45°)节理裂隙发育,导致盖州深孔地应力测量值处于偏小的水平,但不能排除沿金州断裂带在一些岩体结构完整的部位地应力值较大,且超过断层活动的应力值临界区会存在断层滑动的危险性.关于金州断裂带的稳定安全程度分析仍需要进一步开展断裂带应力场研究,尤其是对断裂带分段活动性研究和稳定性评价。

4 结论与认识

(1)盖州深孔地应力测量结果在同等深度、类似岩性等条件下地应力大小与其他地区相比属于偏小水平;水平主应力大小总体上随深度的增加而增大,在钻孔深度 255 m 以上主要受非构造(地形)和区域构造作用影响,在 255 m 以下主要受区域构造应力的影响。

(2)主应力大小之间的关系表明:在钻孔深度 255 m 以上,由于非构造应力的影响,3 个主应力大小表现为 $S_H > S_h > S_v$,而在钻孔 255 m 以下测量深度范围内,主要受构造应力作用,3 个主应力大小表现为 $S_v > S_H > S_h$,说明该地区地壳浅表层现今构造活动以垂直应力占主导作用,该应力状态有利于正断层活动。

(3)该钻孔附近地壳浅表层现今最大水平主应力方向为北东东向,揭示金州断裂带北段现今活动

具有右行走滑的特征。

(4)运用库伦准则计算的结果表明,金州断裂带北段现今地应力状态尚未达到促使断层失稳的临界状态。

本文在已有关于金州断裂带活动特征和地震活动分析的认识和研究基础上,根据地应力实测结果,对金州断裂带北段现今地应力状态以及活动特性进行了分析和探讨。由于金州断裂带明显的分支复合和复杂的分段活动特征,导致构造应力环境变化复杂,需在金州断裂带其他关键部位进一步开展地应力测量及其他相关工作,完善金州断裂带的活动性分析研究,以及加强该断裂带的地应力实时监测,为地震地质研究和城市安全提供依据和保证。

References

- Altmatov, I. T., Vdovin, K. D., Kojogulov, K. C., et al., 1987. State of Stress in Rock and Rock-Burst Proneness in Seismic Active Folded Areas. 6th ISRM Congress, Montreal, 749—751.
- Byerlee, J., 1978. Friction of Rocks. *Pure and Applied Geophysics*, 116 (4—5): 615—626. doi: 10.1007/BF00876528
- Chen, Q. C., An, M. J., Li, F. Q., 1998. Theoretical Discussion on 3D Hydraulic Fracturing In Situ Stress Measurement. *Journal of Geomechanics*, 4(1): 37—44 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Q. C., An, Q. M., Sun, D. S., et al., 2010. Current In-Situ Stress State of Shanxi Basin and Analysis of Earthquake Risk. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(4): 541—548 (in Chinese with English abstract).
- Deng, Q. D., Wang, T. M., Li J. G., et al., 1976. A Discussion on Source Model of Haicheng Earthquake. *Scientia Geologica Sinica*, (3): 195—204 (in Chinese with English abstract).
- Ding, G. Y., 1982. Discussion on Basic Characteristics of Active Belts in China. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- Feng, C. J., Chen, Q. C., Tan, C. X., et al., 2013. Analysis on Current In-Situ Stress State in Northern Segment of Longmenshan Fault Belt. *Progress in Geophysics*, 28(3): 1109—1121 (in Chinese with English abstract).
- Feng, C. J., Chen, Q. C., Wu, M. L., et al., 2012. Analysis of Hydraulic Fracturing Stress Measurement Data—Discussion of Methods Frequently Used to Determine Instantaneous Shut-In Pressure. *Rock and Soil Mechanics*, 33(7): 2149—2159 (in Chinese with English abstract).
- Gu, H. D., Chen, Y. T., Gao, X. L., et al., 1976. Focal Mechanism of Haicheng, Liaoning Province. Earthquake February 4, 1975. *Acta Geophysica Sinica*, 19(4): 270—285 (in Chinese with English abstract).
- 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). *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 40(7): 1011—1020. doi: 10.1016/j.ijrmms.2003.08.002
- Hayashi, K., Haimson B. C., 1991. Characteristics of Shut-In Curves in Hydraulic Fracturing Stress Measurements and Determination of In Situ Minimum Compressive Stress. *Journal of Geophysical Research*, 96(B11): 18311—18321. doi: 10.1029/91JB01867
- Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Seismic Geological Brigade of China Earthquake Administration, 1981. The Principle and Application of In-Situ Stress Measurement. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Li, J. H., Yang, Z., 1987. Active Fault in Liaodong Peninsula and the Tectonic Setting of the Jinzhou Earthquake of Magnitude 6. *North China Earthquake Sciences*, 5(2): 81—86 (in Chinese with English abstract).
- Li, X., Li, Y., Jiang, H., et al., 1998. Shock Absorption Effect of Jinzhou Fault. *Seismological Research of Northeast China*, 14(6): 24—27 (in Chinese with English abstract).
- Liaoning Bureau of Geology and Mineral Resources, 1989. Regional Geology of Liaoning Province. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Liaoning Earthquake Administration, 1996. Liaoning Province Records, Earthquake Records. Liaoning Science and Technology Press, Shenyang (in Chinese).
- Sun, Y., Tan, C. X., Li, K. S., et al., 1998. Quantitative Evaluation of Regional Crustal Stability. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Sun, Y., Tan, C. X., Miao, P. S., et al., 2012. Seismogeology and Earthquake Prediction. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Tan, C. X., Shi, L., Sun, W. F., et al., 2004. Research on Tectonic Stress Plane. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 23(23): 3970—3978 (in Chinese with English abstract).
- Tan, C. X., Sun, W. F., Zhang, C. S., et al., 2007. An Analysis on Variation of Crustal Stress States at the Shallow Part of Upper Crust in Deep-Cut Valley Region. *Progress in Geophysics*, 22(4): 1353—1359 (in Chinese with English abstract).
- Tan, C. X., Sun, Y., Wang, L. J., 2003. Some Problems of In-

- Situ Crustal Stress Measurements. *Journal of Geomechanics*, 9(3): 275 - 280 (in Chinese with English abstract).
- Tan, C. X., Wang, R. J., Sun, Y., et al., 2004. Numerical Modeling Estimation of the 'Tectonic Stress Plane' (TSP) Beneath Topography with Quasi-U-Shaped Valleys. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(2): 303 - 310. doi: 10.1016/S1365 - 1609(03)00096 - 0
- Wan, B., Li, Y. T., Zheng, S. C., 2010. Determination of Seismogenic Structure for the East of Pulandian M6.0 Earthquake in 1861. *Earthquake Research in China*, 26(3): 304 - 313 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L., 1988. A Discussion on the Stability of the Regional Crust with Interpretation on Structures by Remote Sensing Images in Yingkou Area. *Liaoning Geology*, (4): 360 - 368 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L. J., Pan, L. Z., Liao, C. T., et al., 1991. In-Situ Stress Measurement and Its Application in Engineering. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Wang, T. M., Xiang, H. F., Fang, Z. J., et al., 1976. A Study of the Geotectonic Background and Seismogenic Structures of Haicheng Earthquake. *Scientia Geologica Sinica*, (3): 205 - 212 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. G., Liu, C., Feng, X., et al., 2009. Earthquake Space Distribution and Its Relationships with Main Faults, Deep Structure and Stress Field in Northeast China. *Global Geology*, 28(4): 513 - 519 (in Chinese with English abstract).
- Wu, M. D., 1997. The Features of Activities and Seismic at Jinzhou-Chaoyang Fault Belt in Liaoning Province. *World Geology*, 16(1): 39 - 42, 48 (in Chinese with English abstract).
- Wu, M. L., Zhang, C. S., Liao, C. T., et al., 2005. The Recent State of Stress in the Central Qinghai-Tibet Plateau According to In-Situ Stress Measurements. *Chinese Journal of Geophysics*, 48(2): 327 - 332 (in Chinese with English abstract).
- Wu, M. L., Zhang, Y. Q., Liao, C. T., et al., 2010. Preliminary Results of In-Situ Stress along the Longmenshan Fault Zone after the Wenchuan Ms8.0 Earthquake. *Acta Geologica Sinica*, 84(9): 1292 - 1299 (in Chinese with English abstract).
- Xia, H. K., 1991. The Feature of Jinzhou Active Fault Zone and Its Relation with Seismicity. *North China Earthquake Sciences*, 9(2): 21 - 28 (in Chinese with English abstract).
- Xia, H. K., Zhang, X. Z., 1986. Landforms of the Coastal Area of the Liaodong Peninsula and Their Representative Neotectonic Motion. *Seismology and Geology*, 8(1): 41 - 49 (in Chinese with English abstract).
- Xie, F. R., Chen, Q. C., Cui, X. F., et al., 2003. Study of Crustal Stress Environment in China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhang, B. C., 1996. Pore Pressure, Fault Slip Criterion and Influence of Reservoir Impounding. In: Su, K. Z., Li, F. Q., Zhang, B. C., et al., eds., Integrated Research on the Stress Field and Pore Pressure at the Gorges Site. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- Zhang, P., Qin, X. H., Feng, C. J., et al., 2013. In-Situ Stress Measurement of Deep Borehole in Shandong Segment of Tan-Lu Fracture Belt and Analysis of Its Activity. *Rock and Soil Mechanics*, 34(8): 2329 - 2335 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, W. F., 1989. The Feature of Seismic Structural in Liaoning Province. *Northeastern Seismological Research*, 5(3): 15 - 24 (in Chinese with English abstract).
- Zoback, M. D., Healy, J. H., 1992. In-Situ Stress Measurements to 3.5 km Depth in the Cajon Pass Scientific Research Borehole; Implications for the Mechanics of Crustal Faulting. *Journal of Geophysical Research*, 97(B4): 5039 - 5057. doi: 10.1029/91JB02175

附中文参考文献

- 陈群策, 安美建, 李方全, 1998. 水压致裂法三维地应力测量的理论探讨. *地质力学学报*, 4(1): 37 - 44.
- 陈群策, 安其美, 孙东生, 等, 2010. 山西盆地现今地应力状态与地震危险性分析. *地球学报*, 31(4): 541 - 548.
- 邓起东, 王挺梅, 李建国, 等, 1976. 关于海城地震震源模式的讨论. *地质科学*, (3): 195 - 204.
- 丁国瑜, 1982. 中国内陆活动断裂基本特征的探讨. 北京: 地震出版社.
- 丰成君, 陈群策, 谭成轩, 等, 2013. 龙门山断裂带东北段现今地应力环境研究. *地球物理学进展*, 28(3): 1109 - 1121.
- 丰成君, 陈群策, 吴满路, 等, 2012. 水压致裂应力测量数据分析——对瞬时关闭压力 PS 的常用判读方法讨论. *岩土力学*, 33(7): 2149 - 2159.
- 顾浩鼎, 陈云泰, 高祥林, 等, 1976. 1975 年 2 月 4 日辽宁省海城地震的震源机制. *地球物理学报*, 19(4): 270 - 285.
- 中国地质科学院地质力学研究所, 国家地震局地震地质大队, 1981. 地应力测量的原理和应用. 北京: 地质出版社.
- 李建华, 杨喆, 1987. 辽东半岛活动断裂和金州 6 级地震的构造背景. *华北地震科学*, 5(2): 81 - 86.
- 李新, 李涯, 姜华, 等, 1998. 金州断裂降震效应初探. *东北地震研究*, 14(6): 24 - 27.

- 辽宁地矿局,1989.辽宁省区域地质志.北京:地质出版社.
- 辽宁省地震局,1996.辽宁省志·地震志.沈阳:辽宁省科技出版社.
- 孙叶,谭成轩,李开善,等,1998.区域地壳稳定性量化评价.北京:地质出版社.
- 孙叶,谭成轩,苗培实,等,2012.地震地质与地震预报.北京:地质出版社.
- 谭成轩,石玲,孙炜锋,等,2004.构造应力面研究.岩石力学与工程学报,23(23):3970—3978.
- 谭成轩,孙炜锋,张春山,等,2007.深切峡谷地区地壳浅表层地应力状态变化分析.地球物理学进展,22(4):1353—1359.
- 谭成轩,孙叶,王连捷,2003.地应力测量值得注意的若干问题.地质力学学报,9(3):275—280.
- 万波,李宇彤,郑双成,2010.1861年普兰店东6级地震发震构造判定.中国地震,26(3):304—313.
- 王丽,1988.从遥感影像的构造解译讨论营口地区区域地壳稳定性.辽宁地质,(4):360—368.
- 王连捷,潘立宙,廖椿庭,等,1991.地应力测量及其在工程中的应用.北京:地质出版社.
- 王挺梅,向宏发,方仲景,等,1976.海城地震地质构造背景与发震构造的探讨.地质科学,(3):205—212.
- 王兆国,刘财,冯晖,等,2009.中国东北地区地震空间分布与主要断裂带、深部构造及应力场关系.世界地质,28(4):513—519.
- 吴明大,1997.金州朝阳断裂带的活动特点与地震.世界地质,16(1):39—42,48.
- 吴满路,张春山,廖椿庭,等,2005.青藏高原腹地现今地应力测量与应力状态研究.地球物理学报,48(2):327—332.
- 吴满路,张岳桥,廖椿庭,等,2010.汶川地震后沿龙门山断裂带原地应力测量初步结果.地质学报,84(9):1292—1299.
- 夏怀宽,1991.辽宁金州活动断裂带特征和地震.华北地震科学,9(2):21—28.
- 夏怀宽,张先泽,1986.辽东半岛沿海地区海岸地貌及其所反映的新构造运动.地震地质,8(1):41—49.
- 谢富仁,陈群策,崔效锋,等,2003.中国大陆地壳应力环境研究.北京:地质出版社.
- 张伯崇,1996.孔隙压力、断层滑动准则和水库蓄水的影响.苏恺之,李方全,张伯崇,等,编,长江三峡坝区地壳应力与孔隙水压力综合研究.北京:地震出版社.
- 张鹏,秦向辉,丰成君,等,2013.郯庐断裂带山东段深孔地应力测量及其现今活动性分析.岩土力学,34(8):2329—2335.
- 赵文峰,1989.辽宁地震构造特征.东北地震研究,5(3):15—24.