

包林海, 王成虎, 王显军. 龙陵-瑞丽断裂北段现今地应力特征及其活动性分析[J]. 华南地震, 2015, 35 (4): 104-110. [BAO Linhai, WANG Chenghu, WANG Xianjun. The Current In-situ Stress State in Northern of Longling-ruli Fault and Analysis on Its Activity [J]. South china journal of seismology, 2015, 35(4): 104-110.]

龙陵-瑞丽断裂北段现今地应力特征 及其活动性分析

包林海, 王成虎, 王显军

(中国地震局地壳应力研究所, 北京 10085)

摘要: 为了研究龙陵-瑞丽断裂北段现今地应力状态特征及活动特征, 在该断裂带东南侧开展了2个深孔的水压致裂地应力测量工作。测量结果表明, 地应力量值随深度的增加而增大, 三个主应力之间的关系为 $S_H > S_v > S_h$, 说明该地区现今浅部地壳构造应力占主导作用, 该应力状态有利于走滑断层作用发生。现今最大水平主应力方向为 NEE, 与区域构造应力场方向 NNE 向主应力方向有一些差异, 说明实测结果受到了断层活动的影响, 同时也反映了龙陵-瑞丽断裂现今具有左旋走滑的活动特性。利用库伦准则, 摩擦系数取 0.6~1.0 对断裂的稳定性进行了分析, 结果表明, 现今原地应力大小尚未达到使断层滑动的应力值临界区, 表明龙陵-瑞丽断裂目前处于相对较为稳定的状态, 但是也不能忽略其他因素对断裂稳定性的影响, 下一步的研究重点将是断层内物质的组成成分分析。

关键词: 龙陵-瑞丽断裂; 水压致裂; 地应力; 摩擦系数; 库伦准则

中图分类号: P315.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2015) 04-0104-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2015.04.16

The Current In-situ Stress State in Northern of Longling-ruli Fault and Analysis on Its Activity

BAO Linhai, WANG Chenghu, WANG Xianjun

(Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China)

Abstract: In order to research the current in-situ stress state in the northern of the Longling-ruli fault, in-situ stress measurement using hydraulic fracture have been conducted in two deep holes located in southeast of the fault. The result shows that the value of the stress increases with depth, and the relation among the three principal stresses is $S_H > S_v > S_h$, which indicates that tectonic stress field gives priority to the horizontal stress and stress state is favorable for activity of slip faults. The direction of maximum horizontal principal stress near the fault is NEE, and is different with the direction of regional tectonic stress NNE, which indicates that the

收稿日期: 2014-11-10

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(ZDJ2012-22); 国家自然科学基金(41274100)

作者简介: 包林海 (1982-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事地应力测量及其在工程中的应用的工作。

E-mail: hailinbao@126.com.

fault activity effect the direction of measurement, and also reflects the present sinistral strike-slip properties of the fault. According to coulomb criterion and taking $\mu=0.6-1.0$, the stability of the fault is studied. The result shows that the ratios of sheer to effective normal stress are lower than those Byerlee's law, indicating that Longling-ruli fault is in relatively stable state, but other factors can't be ignored, and the next research emphasis is analysis of composition of the fault zone.

Keywords: Longling-ruli fault; Hydraulic fracture; In-situ stress; Friction coefficient; Coulomb criteria

0 前言

滇西南地区位于印度板块与欧亚板块碰撞带的北东侧,地处青藏高原东南部,是青藏高原物质受到挤压向东流出的通道^[1],区内构造运动强烈,褶皱、断裂十分发育,是我国大陆内部地震活动最强烈的地区之一。有地震记载以来,这一地区已发生6级以上强震数十次,而且大多数地震带都与地表的断裂带基本一致,引起了众多学者对该地区的地震活动性、地壳动力学和构造运动等特征的关注。龙陵-瑞丽断裂北段是滇西南地区NE向构造体系中重要的断裂之一,属于密支那-西盟地块内密支那地块与龙陵-镇康地块的分界断裂^[2],是一条具有深部构造背景且全新世仍在活动的区域性活动断裂。1976年的龙陵7.3级地震和7.4级地震就发生在龙陵-瑞丽断裂带北段附近,是一次典型的双震型事件,该断裂的活动性对整个滇西南地区的地震活动性有着重要影响。因此,研究该断裂的现今地应力状态及其稳定性具有十分重要的意义。

迄今为止,关于龙陵-瑞丽断裂的研究主要集中在运动学特征及地震危险性两个方面。一是利用地貌学、年代学以及地震学方法来研究断裂的构造特征和形成历史,二是利用地震复发模型来研究断裂的地震危险性,这些研究主要集中在对过去不同地质历史时期特征的研究和以历史地震为基础对复发周期进行估计,并没有讨论断裂所处的现今构造应力状态。然而研究断层附近的现今应力状态以及在现今应力状态下断层面上摩擦稳定性同样十分重要,这种分析研究不仅可以帮助我们更好理解断层力学机制,并且能够挖掘出断裂带的孕震信息。

1 龙陵瑞丽断裂现今活动性研究现状

龙陵-瑞丽断裂西南起于瑞丽西南的缅甸境内,向东北经遮放、芒市盆地、龙陵盆地与黄草坝,最后隐伏于镇安盆地附近,境内全长约170

km。该断裂带北端与高黎贡山断裂呈弧形相接,总体走向约为N55°E。由于该断裂途径高山峡谷地带,植被茂盛,使得与该断裂相关的地貌特征很难辨认,因此,对该断裂的研究较少。贺根文等根据遥感解释、构造地貌和地震地质的综合结果,认为龙陵-瑞丽断裂带是一条以左旋走滑作用为主的断裂,在晚第四纪具有一定的活动性^[3],黄学猛依据断错地貌特征和年代学结果,获得了龙陵-瑞丽断裂北段晚更新世晚期以来的平均水平滑动速率为2.2 mm/a,平均垂直滑动速率为0.6 mm/a;全新世以来的平均水平滑动速率为1.8~3.0 mm/a,平均垂直滑动速率为0.5 mm/a,水平滑动速率与垂直滑动速率之比约为4:1,是一条古生代以来长期活动的继承性活动断裂,断裂的活动方式以黏滑为主^[4]。王晋南等对龙陵-瑞丽断裂不同段落、不同分支所做的断层物质年代鉴定表明,大部分段落显示了断裂为中更新世最新活动,个别为中更新世晚期-晚更新世早期的最新活动^[5]。杜义则计算了龙陵-瑞丽断裂地震复发周期,认为该断裂不排除未来发生中等强度的破坏性地震^[6]。

以上各种方法研究结果表明,龙陵-瑞丽断裂为一条现今活动断裂,活动特征为左旋走滑运动,然而众多研究成果中缺少了对现今应力状态(地应力大小和方向)的定量评估。本文通过对断裂带附近2个深孔的地应力测量,揭示了龙陵瑞丽断裂北段地壳浅部的现今应力状态,为龙陵瑞丽断裂现今活动性分析提供了新资料,补充了龙陵瑞丽断裂由浅部到深部的研究工作,对于分析和评价滇西南区域地壳稳定性具有十分重要的意义。

2 地应力测量结果及分析

为了阐明龙陵-瑞丽断裂北段现今应力状态和潜在的发展趋势,在断裂带的东南侧确定了2个深孔的地应力测量点,钻孔位置及最大水平主应力优势方向见图1。

ZK1孔坐标为N24°37', E98°47', 设计孔深为757 m, 稳定静水位为4 m。该孔所取得岩芯主

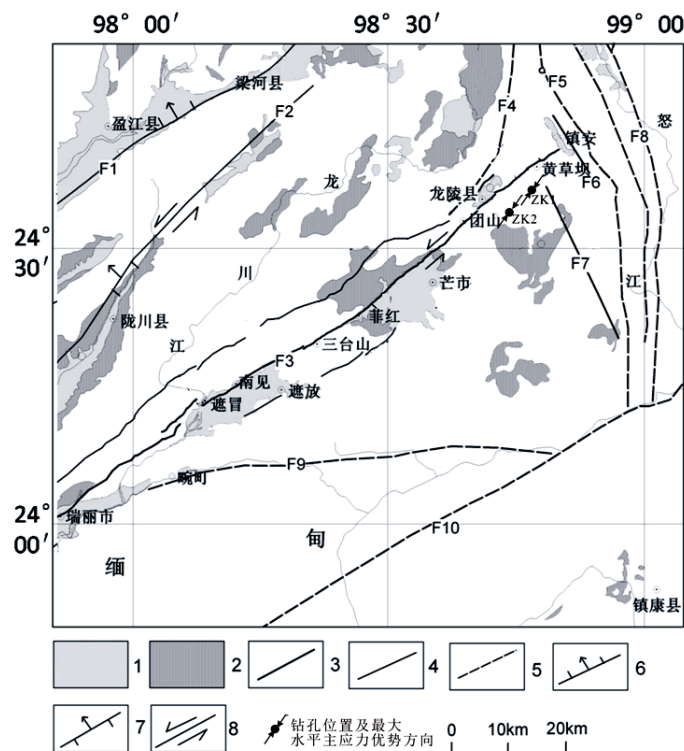


图1 钻孔位置及区域活动构造

Fig.1 Distribution map of boreholes location and active tectonics

要为花岗岩, 测量主要在 400 m 以下进行, 共取得了 9 段应力大小和 3 个测段的应力方向数据。ZK2 坐标为 N24°35', E98°44', 设计孔深为 716 m, 静水位 19 m。该孔所取得的岩芯主要为砂岩, 根据岩芯完整程度共成功取得了 13 个点的应力大小数据和 3 个测段的应力方向数据。测量结果见表 1。

本次地应力测量采用水压致裂法, 该方法为国际岩石力学学会推荐的估算岩石应力的方法之一^[7]。水压致裂技术最早被用来石油和天然气开采的增产, 经过几十年来理论与技术的创新, 目前该技术已经成为测量深部应力的有效方法。该方法的优势在于其不仅能够确定地应力的量值和方向, 而且测量深度大且无需利用岩石力学参数参与计算, 因此在各个领域得到了广泛应用, 并取得了非常好的研究成果^[8-10]。该方法是利用两个可膨胀的橡胶封隔器封隔一段完整的孔段, 以恒定的流速向封隔孔段内注入液体, 产生垂直于最小主应力方向上的水力破裂。地应力量值可以通过整个测试过程中的压力-时间曲线上特征点计算出, 关系式如下:

$$S_H = 3P_s - P_r - P_0$$

$$S_h = P_s$$

其中 S_H 为最大水平主应力; S_h 为最小水平主应力; P_r 为重张压力; P_s 为瞬时闭合压力; P_0 为孔隙压力。垂直主应力 S_v 则由测量深度上覆岩层重力进行估算。由上式可以看出, 瞬时闭合压力 P_s 直接等于最小水平主应力, 最大水平主应力是由 P_r 和 P_s 求出, 因此, P_s 值的准确直接决定着地应力测量结果的可靠性。关于瞬时闭合压力的确定方法, 丰成君等认为对于岩石完整、原生裂隙不发育, 以及压裂曲线标准, 各压裂过程中压裂特征参数明显时, 应选取单切法、 d_p / ld_p 法、 d_r / d_p 方法和马斯卡特方法中的 2 种或 2 种以上方法进行判读瞬时闭合压力值^[11]。

从图 2 中可以看出, 测试所得的压力曲线形态大部分较为规则, 各个特征值较为明显。因此我们采用单切法和 d_r / ld_p 法来确定瞬时闭合压力, 选这两种方法的原因主要是单切法较为简单可行, 而 d_r / ld_p 法则有着比较深入的力学分析基础。整个取值过程都采用计算机程序自动取值, 以便最大程度上减少人工取值所带来的误差。两种取值方法所取得的值较为近似, 相差不大, 可靠性较高。压裂结束后, 将定向的印模器置于测量深度上, 加压使印模器膨胀, 将表面的半硫化橡胶挤入裂缝形成印痕, 最后通过印痕、基线和磁北针三者之间的关系来确定裂缝方位, 即最大水平主应力方位。

表 1 地应力测量结果
Table 1 Result of stress measurement

编号	测段 深度/m	压裂参数 /MPa					主应力值 /MPa			应力方位
		P_b	P_r	P_s	P_o	T	S_H	S_h	S_v	
ZK1	493.12	13.44	8.44	7.94	4.90	5.00	10.48	7.94	13.33	N53°E
	504.20	13.55	9.05	8.55	5.01	4.50	11.59	8.55	13.62	
	601.08	15.01	10.51	10.01	5.97	4.50	13.55	10.01	16.24	
	623.58	/	11.24	10.74	6.20	/	14.78	10.74	16.85	N68°E
	640.97	15.41	13.41	12.41	6.37	2.00	17.45	12.41	17.32	
	654.26	16.05	12.55	12.05	6.51	3.50	17.09	12.05	17.68	
	671.26	15.72	14.22	12.72	6.68	1.50	17.26	12.72	18.13	N48°E
	726.59	18.27	14.77	14.27	7.23	3.50	20.81	14.27	19.63	
	735.26	17.36	14.86	14.36	7.32	2.50	20.90	14.36	19.88	
ZK2	252.48	11.53	8.53	7.53	2.34	3.00	11.72	7.53	6.83	N64°E
	363.79	14.14	10.64	9.14	3.45	3.50	13.33	9.14	9.83	
	377.78	17.28	11.28	9.78	3.59	6.00	14.47	9.78	10.21	
	404.98	17.05	14.05	11.55	3.86	3.00	16.74	11.55	10.95	
	419.13	19.20	13.70	12.20	4.01	5.50	18.89	12.20	11.33	
	488.31	20.39	12.89	11.89	4.70	7.50	18.08	11.89	13.20	N56°E
	510.52	19.11	14.11	13.11	4.92	5.00	20.30	13.11	13.79	
	571.50	/	16.72	14.72	5.53	/	21.91	14.72	15.44	
	595.30	20.16	16.96	14.96	5.77	3.20	22.15	14.96	16.08	
	610.33	/	17.61	16.61	5.92	/	26.30	16.61	16.49	
	652.21	21.53	20.03	18.53	6.34	1.50	29.22	18.53	17.62	N47°E
	673.39	20.74	18.24	17.74	6.55	2.50	28.43	17.74	18.19	
	698.41	/	19.99	18.49	6.80	/	28.68	18.49	18.87	

注: P_b : 岩石破裂压力, T : 岩石原地抗张强度。

2.1 地应力大小

在 740 m 的测量深度范围内, 共成功获得了 22 段地应力大小数据和 6 个深度上的方向数据。图 3 显示了不同深度上最大和最小水平主应力与深度关系, 垂直主应力则由上覆岩层的重量求得。从图中可以看出, S_h 大小总体分布具有明显的离散性, 特别是 500 m 以下。相对于 S_h , S_H 的离散性也较大, 其主要原因是由于 S_H 在估算中, 受到了重张压力确定误差和三倍 S_h 的影响, 在某一程度上加大了其分布的离散性。造成这种离散性的主要因素为钻孔下部岩芯完整程度较差, 加上钻孔过程中岩芯粉以及钻井液的沉淀致使一部分压裂曲线形态不是十分典型, 给最后的取值带来较大的不确定性。尽管应力分布较为离散, 但是水平主应力总体上随深度的增加而增大, 而且可以用与深度有关的应力梯度进行合理限定, 线性相关系数均在 0.6 左右, 其线性回归公式为

$$\begin{aligned} S_H &= 0.025H + 4.91 \quad R = 0.5831 \\ S_h &= 0.017H + 3.29 \quad R = 0.6773 \end{aligned}$$

其中 H 为深度, R 为线性相关系数。

从图 3 中可以看出, S_H 总体上要高于垂直主应力, S_h 总体要低于垂直主应力, 三者的关系为 $S_H > S_v > S_h$, 说明该地区现今浅部地壳构造应力占主导作用, 该应力状态有利于走滑断层的形成。这与前人关于龙陵瑞丽断裂北段为走滑断层的研究成果一致。

2.2 应力方向

2 个钻孔的实测地应力数据显示, 该区最大水平主应力方向为 N47°~68°E, 优势方向为 N56°E, 总体反映区域构造应力场以 NEE 向挤压为主。关于该区域的主压应力场方向, 谢富仁等利用断层滑动资料反演滇西南构造应力张量, 得出镇源-营盘山断裂以西至龙陵断裂带以南地区, 最大主压应力方向为北北东, 应力结构以走滑型为主^[2]; 崔效峰等利用震源机制解, 结合水压致裂数据, 反演了滇西南构造应力场, 分析结果表明, 在滇西南应力区, 震源机制反演的计算结果与水压致裂结果所反映的最大主应力优势分布方式完全一致,

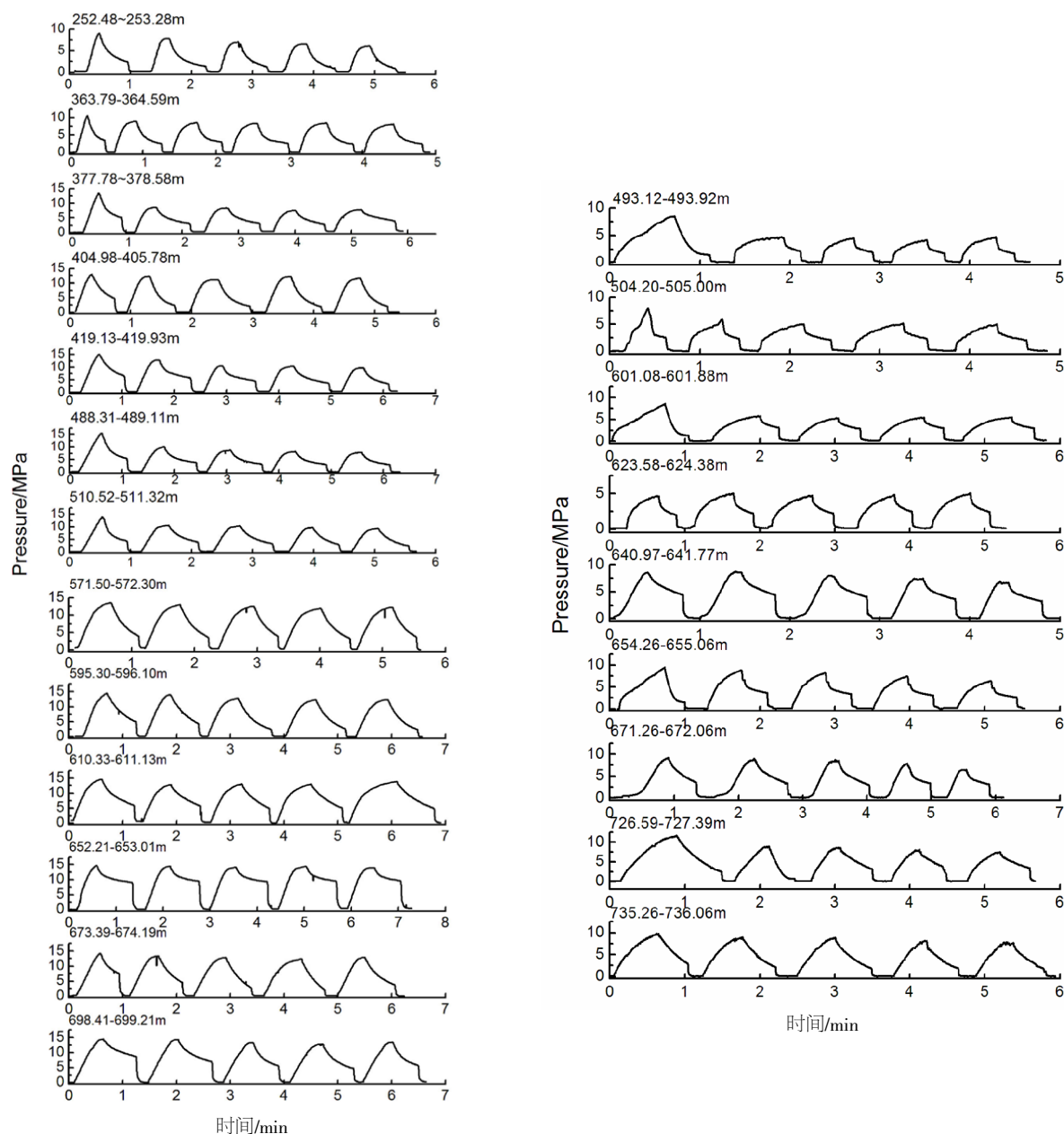


图2 水压致裂地应力实测曲线

Fig.2 Measured curve of in-situ stress by hydraulic fracture

均为北北东-南南西向^[13]；钱晓东等同样利用震源机制解对云南构造应力场进行研究，认为龙陵、保山、泸水一带主要受 NE-NNE 向应力场控制^[14]。

本文中所得到的主压应力优势方向为 NEE 向，与前人研究成果中 NNE 的应力场方向存在一定偏差。初步研究认为造成这种偏差主要有两个原因：一是深度不同，本文中所测量的深度在几百米范围内，而震源机制解给出深度在几公里到十几公里的震源深度，这种深度上的巨大差异造成了应力场方向结果上存在一定偏差；二是大的不连续面对应力方向有一定程度的影响，Hudson 和 Cooling 认为当大的断裂内存在相对较软的物质时，

最大主应力方向很有可能会平行或者垂直于该断裂^[15]。本次测量的 2 个钻孔距离龙陵瑞丽断裂较近，受此断裂影响，所测量的最大主应力方向为 NEE 向，与该断裂走向基本平行。这一应力场特征也从另一方面说明了龙陵瑞丽断裂内可能存在大量较软的物质。

2.3 实测地应力结果与区域应力场关系讨论

研究区所在区域属青藏高原断块区，新构造运动十分强烈，表现为强烈的垂直差异运动和块体的侧向滑移及以近南北向断裂、北西向断裂右旋位移和北东向断裂左旋位移为代表的断裂活动。

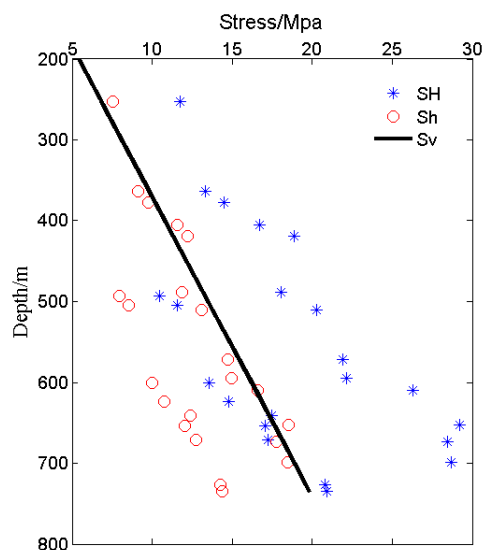


图3 地应力大小随深度变化趋势

Fig.3 Curve of the stress vs depth

青藏高原由于印度板块不断向北推挤, 导致向南东挤出和侧向滑移, 作为块体的北东向边界断裂具明显的左旋走滑特征。区域动力学背景造成了龙陵-瑞丽断裂现今具有左旋走滑的活动特性。

本文测量结果表明, 测孔附近的地壳浅部表层现今最大主应力方向为 NEE 向, 考虑到龙陵瑞丽断裂几何空间展布、现今活动特征以及区域动力学背景, 地应力测量结果具有较好的区域代表性, 能够代表龙陵瑞丽断裂带北段现今构造应力状态。

3 断层稳定性分析

在分析断层稳定性的过程中, 我们主要考虑了两个主要参数。一个是有效应力张量 (包括应力的方向和大小以及孔隙压力); 一个是断层的剪切强度。Brace 等人根据具有孔隙压力的岩石力学实验指出, 对于岩石摩擦等问题, 有效应力的形式为 $\sigma' = \sigma - P_0$, 为作用在断层面上有效正应力, σ 为正应力, P_0 孔隙压力, 即孔隙压力的变化对正应力有影响, 而对剪应力没有影响^[19]。关于孔隙压力, 许多学者认为地壳中不同深度上的孔隙压力等于静水压力, 而且在测量过程中也未发现存在明显的承压水层, 因此, 在计算过程中我们认为孔隙压力等于静水压力。

断层剪切强度我们利用库伦准则进行判定, $\tau_{cr} = \mu \sigma'$, 其中 τ_{cr} 为断层活动的临界剪应力, μ 为摩擦系数。从上式可以看出, 对于给定的应力状

态, 断层的摩擦系数决定着断层的剪切强度。根据前人岩石摩擦的室内实验结果, μ 取 0.6~1.0 是合理的, 世界范围内的实测地应力结果显示, 板块内的断层处于摩擦平衡状态, 而摩擦平衡状态的摩擦系数同样介于 0.6 和 1.0 之间^[20]。将实测的最大和最小水平主应力按有效应力的摩尔圆绘于图 4 中可以发现, 实测出的原地应力大小尚未达到使断层滑动的应力值临界区, 表明龙陵断裂目前处于相对较为稳定的状态。

4 讨论

本次研究中, 我们对断层所处的应力状态和稳定性进行了研究, 但是, 还有许多其他因素影

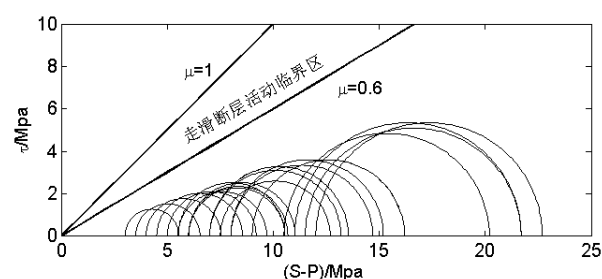


图4 有效主应力莫尔圆及其断层活动性分析

Fig.4 Mohr circle of the effective principal stress and fault activity analysis

响着对断层稳定性的判断, 其主要原因是代表断层强度的摩擦系数还存在很大的不确定性。Byerlee 室内摩擦实验结果认为, 摩擦与岩石的种类及滑动面的粗糙程度无关, 即使滑动面之间存在很厚的断层泥, 岩石的摩擦就好像断层泥根本不存在, 其滑动情况与两块岩石彼此接触在一起的情况一致。但是, 如果断层泥中填充有蒙脱石、蛭石和伊利石等矿物的存在, 摩擦滑动都将会非常容易发生, 换句话说, 摩擦系数的值非常小^[18]。除此之外, 断层的滑动速率对断层的强度也有较大影响, 在断层浅部的温度和压力条件下, 人工模拟石英断层在摩擦滑动过程中会表现出不稳定的速度弱化的滑动行为, 其他硅酸盐矿物在断层浅部的温度和压力条件下也会出现速度弱化的行为^[19], 而前面我们也提到, 龙陵-瑞丽断裂内可能存在大量较软物质。因此, 研究断层内断层泥的组成成分及其摩擦行为十分重要, 这也是下一步研究工作的重点。

众所周知, 地下热流同样会对断层的稳定性有较大影响, 其物理机制是因为地下热流能够引起地下流体压力的升高, 如果断层泥的渗透性足

够低或者热增压效应超过了因渗流和剪切扩容造成的流体扩散减压效应, 过高的孔隙压力就会减小断层面上有效正应力, 显著降低断面上的剪切阻力^[20-21]。值得注意的是, 傅竹武的研究成果表明, 龙陵瑞丽断裂西北侧地壳和上地幔存在大范围的低速区, 由于断裂紧邻腾冲火山地区, 温泉发育, 因为该低速区被认为是地壳内存在上涌的岩浆囊或部分熔融体和上地幔存在热流值较高的物质, 而这种深切断裂正好又为地幔热物质上涌提供了良好通道^[22]。因此, 一旦上涌的热物质提高了地下流体的温度, 而温度又没有得到及时扩散, 就会在局部产生较高的孔隙压力, 进而降低断面上的有效正应力, 使断层极易产生滑动。

5 结语

本文基于龙陵瑞丽断裂附近两个深孔的实测地应力结果, 对该断裂所处的现今地应力状态及其稳定性进行了分析研究, 研究结果概括如下:

(1) 在测量深度范围内, 水平主应力大小总体随深度的增加而增大, 无明显应力集中现象。3 个主应力大小表现为 $SH > Sv > Sh$, 表明该地区现今浅部地壳构造应力占主导作用, 该应力状态有利于走滑断层活动。

(2) 钻孔附近地壳浅部现今最大水平主应力方向为北东东向, 同时, 断裂带对应力方向可能有一定程度的影响。

(3) 利用库伦准则计算结果表明, 龙陵瑞丽断裂北段现今地应力状态尚未达到使断层滑动失稳的临界状态, 但是也不排除其他因素影响断层的稳定性。因此, 下一步研究工作的重点主要是对断层内物质组成成分的分析 and 摩擦行为的研究。

参考文献:

- [1] 曾融生, 孙为国. 青藏高原及其东部邻区的地震活动性和震源机制以及高原物质东流的讨论[J]. 地震学报, 1992, 14 (增刊): 534-564.
- [2] 向宏发, 魏顺民, 徐锡伟, 等. 川滇南部地区活动地块划分与现今运动特征初析[J]. 地震地质, 2000, 22 (3): 253-264.
- [3] 贺根文, 付碧宏, 刘鸣, 等. 龙陵-瑞丽断裂附近的构造地貌与断裂活动性[J]. 地震地质, 2014, 36 (2): 434-448.
- [4] 黄学猛, 杜义, 舒赛兵, 等. 龙陵-瑞丽断裂(南支)北段晚第四纪活动性特性[J]. 地震地质, 2010, 32 (2): 222-232.
- [5] 王晋南, 王洋龙, 安晓文, 等. 1976 年龙陵地震区断裂活动性研究[J]. 地震研究, 2006, 29 (4): 65-372.
- [6] 杜义, 张效亮, 黄学猛, 等. 龙陵-瑞丽断裂北段晚第四纪活动性特征及强震复发间隔[J]. 震灾防御技术, 2012, 7 (3): 215-226.
- [7] HAIMSON B C, CORNET F H. 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 & Mining Sciences, 2003, 40: 1 0 1 1-1 020.
- [8] 郭启良, 王成虎, 马洪生, 等. 汶川 M_s 8.0 级大震前后的水压致裂原地应力测量[J]. 地球物理学报, 2009, 52 (5): 1 395-1 401.
- [9] 张鹏, 秦向辉, 丰成君, 等. 郯庐断裂带山东段深孔地应力测量及其现今活动性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34 (8): 2 329-2 335.
- [10] 丰成君, 陈群策, 谭成轩, 等. 广东核电站地应力测量及其应用[J]. 岩土力学, 2013, 34 (6): 1 745-1 752.
- [11] 丰成君, 陈群策, 吴满路, 等. 水压致裂应力测量数据分析——对瞬时关闭压力 P_s 的常用判读方法讨论[J]. 岩土力学, 2012, 7 (11): 2 149-2 159.
- [12] 谢富仁, 苏刚, 崔效锋, 等. 滇西南地区现代构造应力场分析[J]. 地震学报, 2001, 23 (1): 17-23.
- [13] 崔效锋, 谢富仁, 张红艳. 川滇地区现代构造应力场分区及动力学意义[J]. 地震学报, 2006, 28 (6): 451-461.
- [14] 钱晓东, 秦嘉政, 刘丽芳. 云南地区现代构造应力场研究[J]. 地震地质, 2011, 33 (1): 91-106.
- [15] Hudson, J.A. and Cooling, C.M., in situ rock stresses and their measurement in the U.K. -Part I. The current state of knowledge [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1988, 25, 363-370.
- [16] 陈颢, 黄庭芳, 刘恩儒. 岩石物理学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [17] 丁原章, 邓丽君, 王俊晖. 香港地区晚更新世的构造活动性[J]. 华南地震, 2013, 33 (2): 1-13.
- [18] 姚路, 马胜利. 断层同震滑动的实验模拟——岩石高速摩擦实验的意义、方法与研究进展[J]. 地球物理学进展, 2013, 28 (2): 607-623.
- [19] 张雷, 何昌荣. 粘土矿物的摩擦滑动特性及对断层力学性质的影响[J]. 地球物理学进展, 2014, 29 (2): 620-629.
- [20] Sibson R H. Interactions between temperature and pore-fluid pressure during earthquake faulting and a mechanism for partial or total stress relief [J]. Nature, 1973, 243 (126): 66-68.
- [21] Rice J R. Heating and weakening of faults during earthquake slip [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111 (B5): B05311.
- [22] 傅竹武, 王苏, 刘建华, 等. 利用接收函数方法研究瑞丽-龙陵断裂两侧 S 波速度结构[J]. 地震研究, 2007, 30 (3): 223-228.