

引用格式：李彬，张文，文冉，2022. 陕南特长公路隧道水压致裂法地应力测量结果及工程地质意义分析 [J]. 地质力学学报，28（2）：191–202. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2021053

Citation：LI B, ZHANG W, WEN R, 2022. Study on the hydraulic fracturing in-situ stress measurement in super-long highway tunnels in southern Shaanxi: Engineering geological significance [J]. Journal of Geomechanics, 28（2）：191–202. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2021053

陕南特长公路隧道水压致裂法地应力测量结果及工程地质意义分析

李 彬^{1,2,3}，张 文¹，文 冉⁴
LI Bin^{1, 2,3}，ZHANG Wen¹，WEN Ran⁴

1. 青海大学土木工程学院，青海 西宁 810016；

2. 中国地质科学院地质力学研究所，北京 100081；

3. 自然资源部活动构造与地质安全重点实验室，北京 100081；

4. 四川长宁天然气有限责任公司，四川 成都 610051
1. School of Civil Engineering, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China；

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

3. Key Laboratory of Active Tectonics and Geological Safety, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China；

4. Sichuan Changning Natural Gas Development Co., Ltd, Chengdu 610051, Sichuan, China

Study on the hydraulic fracturing in-situ stress measurement in super-long highway tunnels in southern Shaanxi: Engineering geological significance

Abstract: The complex terrain and marked anisotropy of regional tectonic stress field in western China make the crustal stress state an important assessment parameter. Understanding the regional crustal stress state lays the foundation for assessing the layout at the tunnel design stage and predicting rockburst, fault slip and other engineering disasters in the tunnel construction process. This study aims to explore the current in-situ stress state of the super-long highway tunnels in southern Shaanxi. We did hydraulic fracturing in-situ stress measurement of the Boreholes ZK10 and ZK11 in the Guxiandong tunnel and the Hualongshan tunnel, respectively, and thus characterized the current in-situ stress distribution of the two tunnels. The measurement results show that: The S_H values at the maximum buried depths of the Guxiandong and Hualongshan super-long deep tunnels are 13 MPa and 22 MPa, respectively. The stress relations of the Guxiandong and Hualongshan tunnels are $S_H>S_h>S_v$ and $S_H>S_v>S_h$, respectively, and horizontal principal stress plays a leading role. The S_H direction is NW-NWW, which is basically consistent with the direction of the maximum principal stress in the basic database of crustal stress environment in mainland China. Three conclusions were drawn from the results of in-situ stress measurement in combination with related theories and assessment criteria. Firstly, the angle between the direction of maximum horizontal principal stress and tunnel axis is beneficial to the stability of tunnel surrounding rocks. The overall layout of the two tunnels is reasonable. Secondly, rock burst with moderate strength or above will not occur in the two tunnels according to a comprehensive study using the rock strength-stress ratio method, Tao Zhenyu criterion, Russenes criterion and rock stress-strength ratio method. Thirdly we used Mohr-Coulomb criterion and Bayer’s law, let the friction coefficient μ have the value between 0.6~1.0, and then we analyzed the present stress state of the two tunnels. It is found that the stress of the fault zone near the two tunnels did not reach the critical condition

基金项目：国家自然科学基金（51468055）
This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51468055)

第一作者简介：李彬（1995—），男，在读硕士，研究方向为岩石力学。E-mail: lib0420@126.com

通讯作者：张文（1968—），男，教授，博士，研究方向为岩土工程及防灾减灾。E-mail: 516061874@qq.com

收稿日期：2021-05-26；修回日期：2021-12-20；责任编辑：范二平

of sliding instability of shallow faults in the crust, while it is in a stable stress state.

Key words: southern Shaanxi; in-situ stress; tunnel stability; fault instability; rockburst; highway tunnel

摘 要: 中国西部地区地势复杂, 区域构造应力场各向异性显著, 了解地区地壳应力状态是判断隧道设计阶段线路布设合理性的基础, 也是预测隧道施工过程中可能出现岩爆、断层滑动等其他工程灾害的重要参数。为了研究陕南特长高速公路隧道现今地应力状态, 基于古仙洞隧道钻孔 (ZK10 钻孔) 与化龙山隧道钻孔 (ZK11 钻孔) 水压致裂地应力测量, 获得了两隧道现今地应力分布特征。古仙洞和化龙山特长深埋隧道最大埋深处 S_H 值分别为 13 MPa 和 22 MPa; 古仙洞与化龙山隧道的应力关系分别为 $S_H > S_h > S_v$ 和 $S_H > S_v > S_h$, 水平主应力起主导作用; S_H 方向为近北西—北西西向, 与区域现今构造活动背景基本一致, 主要受秦岭造山带活动断裂影响。基于地应力测量结果、相关理论及判断依据认为: 最大水平主应力方向与洞轴线夹角, 有利于隧道围岩稳定, 研究区内古仙洞与化龙山隧道的总体布置是合理的; 采用岩石强度应力比法、陶振宇判据、Russenes 判据和岩石应力强度比法综合判定研究区内两隧道不具备发生中等强度以上等级岩爆的可能; 利用莫尔-库伦准则及拜尔定律, 摩擦系数 μ 取 0.6~1.0, 对研究区内两隧道的现今地应力状态分析后发现, 两隧道附近断裂带的地应力大小未达到地壳浅部断层产生滑动失稳的临界条件, 处于较稳定的应力状态。

关键词: 陕南地区; 地应力; 隧道稳定性; 断层失稳; 岩爆; 公路隧道

中图分类号: P553 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2022) 02-0191-12

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021053

0 引言

地应力客观赋存于岩体中, 是导致地壳岩体产生变形、断裂、褶皱乃至地震的根本作用力 (张重远等, 2012; 张浩等, 2020)。研究表明, 地应力状态与地下空间的稳定关系密切, 是判断隧道设计阶段线路布设合理性的基础, 也是预测隧道施工过程中可能出现岩爆、断层滑动等其他工程灾害的重要参数 (Amadei and Stephansson, 1997; 王成虎等, 2010; 张重远等, 2013; 孙东生等, 2020; 任洋等, 2021)。

中国西部地区地势复杂、构造作用强烈, 开展深埋铁路和公路隧道等穿越的复杂岩体的地应力特征调查和研究, 对于隧道的工程开挖和支护具有重要的指导意义 (任洋等, 2021)。文章所关注的古仙洞隧道与化龙山隧道位于陕西省安康市平利县和镇坪县, 其长度分别为 4902 m 和 5044 m, 均为特长隧道。构造上, 两隧道位于鄂尔多斯地块与秦岭-大巴造山带之间, 活动断裂十分发育, 区域构造应力场具有强烈的各向异性。相关学者通过震源机制解、水压致裂法和声发射等方法对研究区外围地区地应力特征进行了综合研究 (肖本职等, 2005; 韩金良等, 2007; 杜建军等, 2013; 杨宗宝等, 2017; 牛琳琳等, 2018),

认为研究区外围现今地应力方向为北西西或东西向, 并推测这种应力差异是受到鄂尔多斯地块南缘断层不同程度的影响所致。这些研究成果为现今的工程建设提供了理论基础, 但多集中于研究区外围地区。研究区内构造应力场各向异性强烈, 实测地应力匮乏, 因而在古仙洞隧道与化龙山隧道关键构造部位开展地应力测量及构造应力场研究具有重要的意义和价值。

文章采用水压致裂法对研究区内古仙洞隧道与化龙山隧道进行地应力实测, 获得了两隧道现今主应力大小与方向, 同时通过实测地应力数据, 对研究区现今构造应力场环境、隧道选线合理性、隧道开挖岩爆风险以及隧道附近断层稳定性等工程效应进行分析评价。

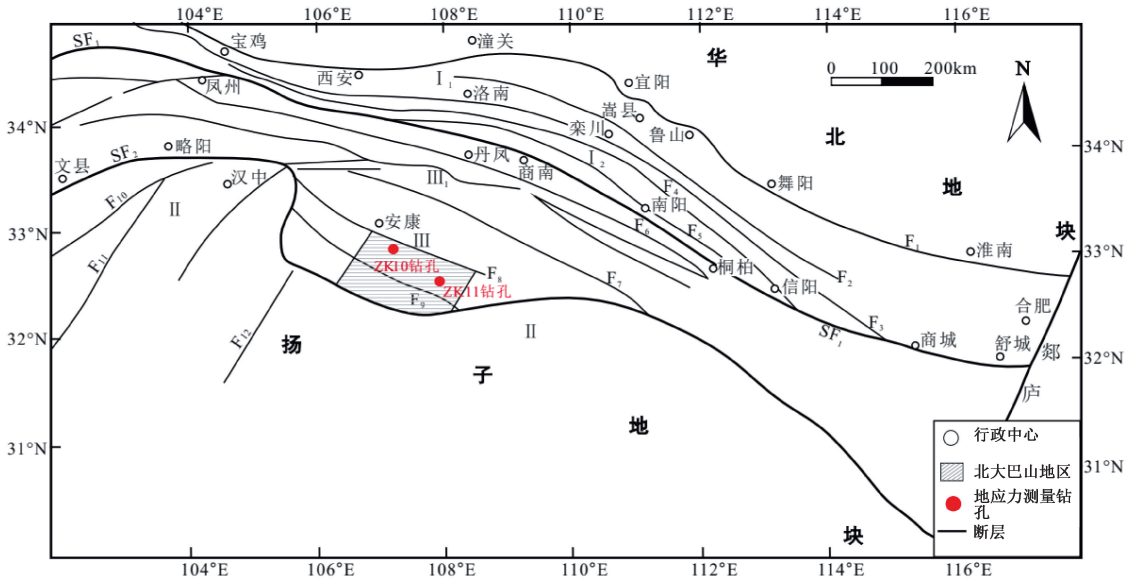
1 区域构造地质背景和钻孔地质特征

1.1 区域构造地质背景

研究区在区域上属于大巴山地区, 处于四川克拉通盆地东北缘与秦岭碰撞造山带之间, 大巴山地区以规模巨大的城口-钟宝断层为界分成南大巴山和北大巴山两个岩石构造单元。介于商丹断层和勉略断层之间的北大巴山 (图 1) 归属于扬子板块, 主要由一套元古代和早古生代火山碎屑岩及深水沉积岩构成。区域地质资料表明, 该区上

地壳盖层均发生了以含蓝晶石、白云母和钙铝榴石等为特征的变质作用, 使原岩变质成大理岩、板岩、片岩和千枚岩。在构造变形特征上, 北大

大巴山冲断推覆构造十分发育。



I₁—秦岭造山带后陆冲断褶皱带; I₂—扬子板块北缘; II₁—秦岭造山带前陆冲断褶皱带; III—秦岭微板块; III₁—南秦岭北部晚古生代断陷带; SF₁—商丹断层; SF₂—勉略断层; F₁—三门峡—鲁山断层; F₂—马超营逆冲推覆断层; F₃—铁炉子—黑沟—栾川逆冲推覆断层; F₄—乔端—瓦穴子断层; F₅—朱阳关—夏馆逆冲断层; F₆—山阳—凤镇逆冲推覆断层; F₇—十堰断层; F₈—石泉—安康逆冲断层; F₉—红椿坝—利平断层; F₁₀—阳平关—大别南缘断层; F₁₁—龙门山断层; F₁₂—华莹山断层

图 1 研究区及邻区地质构造简图 (据柯昌辉, 2013 修改)
Fig. 1 Geological structure diagram of the study area and adjacent area (modified after Ke, 2013)

I₁—Hinterland thrust-fold belt of the Qinling Orogen; I₂—North margin of the Yangtze Plate; II₁—Foreland thrust-fold belt of the Qinling Orogen; III—Qinling Microplate; III₁—Late Paleozoic faulted depression zone in northern South Qinling; SF₁—Shangdan Fault; SF₂—Mianlue Fault; F₁—Sanmenxia-Lushan Fault; F₂—Machaoying thrust-nappe fault; F₃—Tieluzi-Heigou-Luanchuan thrust-nappe fault; F₄—Qiaoduan-Waxuezi Fault; F₅—Zhuyangguan-Xiaguan thrust fault; F₆—Shanyang-Fengzhen thrust-nappe fault; F₇—Shiyan fault; F₈—Shiquan-Ankang thrust fault; F₉—Hongchunba-Liping fault; F₁₀—Yangpingguan-Dabie South Margin Fault; F₁₁—Longmenshan Fault; F₁₂—Hualing Mountain Fault

1.2 钻孔简要地质特征

此次陕南高速公路 G6911 线地应力测量钻孔共 2 个, 古仙洞隧道和化龙山隧道各 1 个, 地应力测量钻孔具体情况如下。

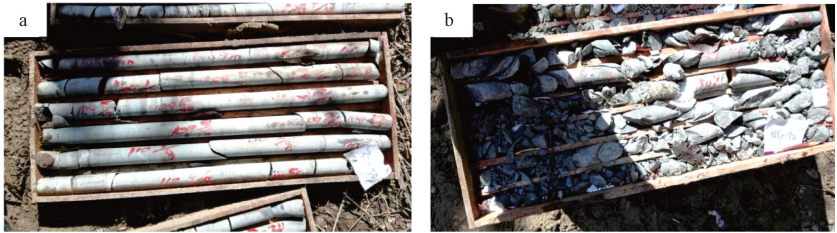
古仙洞隧道钻孔 (ZK10 钻孔) 终孔深度为 278.60 m, 静水位为 178.00 m。钻孔岩性以片岩为主, 且以中—微风化程度为主, 岩体整体较为破碎。现场测试过程主要在 72.16 m 以下进行, 最大测试深度为 266.20 m, 共完成 5 段有效压裂测试和 3 段有效印模测试。

化龙山隧道钻孔 (ZK11 钻孔) 终孔深度为 415.00 m, 静水位为 0。岩芯主要以片岩、板岩为主, 整体较为破碎 (图 2)。现场测试过程从 58.00 m 以下进行, 最大测试深度 347.00 m, 共完成 8 段有效压裂测试和 4 段有效印模测试。

2 地应力测量与分析

2.1 地应力测量方法

水压致裂法是钻孔地应力测量方法的一种, 通过水力压裂产生诱发裂隙的方式来测量地应力。该方法具有操作简单、测量可靠、可直接测得最小水平主应力等优点, 是国际岩石力学学会 (ISRM) 推荐的最新地应力测量方法之一 (Haimson and Cornet, 2003), 在交通工程、水电工程、资源开采等实践中得到了广泛应用, 并取得了大量的研究成果 (陈群策等, 2012, 2019; 王成虎等, 2020), 具体测量程序参考 Haimson and Cornet (2003) 的描述。ZK10 钻孔和 ZK11 钻孔的水压致裂测量均严格按照 ISRM 所要求的步骤进



a—ZK11 钻孔完整段典型岩芯；b—ZK11 钻孔破裂段典型岩芯

图 2 化龙山隧道 ZK11 钻孔典型岩芯

Fig. 2 Typical drill cores of Borehole ZK11 in the Hualongshan Tunnel

(a) Photo showing complete drill cores in Borehole ZK11; (b) Photo showing cracked drill cores in Borehole ZK11

行，在计算水压致裂关键参数时，也采用 ISRM 建议方法进行，其中关闭压力 (P_s) 计算综合了单切线法、 dt/dP vs P 法和 dP/dt vs P 法等计算结果进行最终取值，以确保计算结果准确性 (丰成君等, 2012)。

2.2 地应力测量结果

在 G6911 线古仙洞隧道 ZK10 钻孔和化龙山隧道 ZK11 钻孔中共获得 13 组水压致裂测量曲线，化龙山隧道 ZK11 钻孔水压致裂应力测量曲线如图 3 所示，各深度测段压力记录曲线形态比较标准规范，各压力参数点明确，同一测段的各回次曲线重复性好，能够获得有效测试数据。

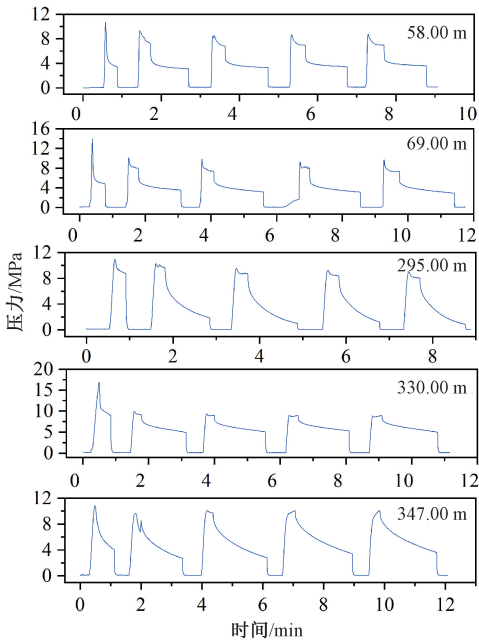
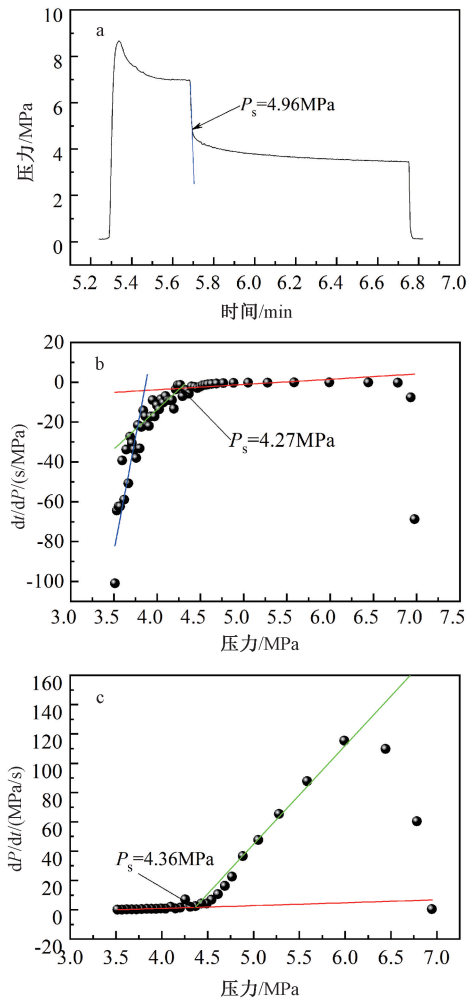


图 3 水压致裂典型应力测量曲线 (化龙山隧道)

Fig. 3 Curves showing typical hydraulic fracturing in-situ stress in the Hualongshan Tunnel

以化龙山隧道 ZK11 钻孔 58.00 m 测段为例 (图 4)，展示了关闭压力 (P_s) 3 种计算方法，并

将 3 种方法平均值作为最终 P_s 取值，参与主应力值计算。古仙洞隧道和化龙山隧道 2 个钻孔水压致裂测量参数及主应力计算结果见表 1。



a—切线法；b— dt/dP vs P 法；c— dP/dt vs P 法

图 4 3 种方法综合确定 P_s 值 (化龙山隧道 58 m)

Fig. 4 Shut-in pressure (P_s) determined by three methods (58 m-deep in Borehole ZK11 in the Hualongshan Tunnel)

(a) Inflection point method; (b) dt/dP vs P method; (c) dP/dt vs P method.

The average value of these methods is used to calculate the P_s .

表 1 ZK10 钻孔和 ZK11 钻孔水压致裂地应力测量结果

Table 1 Results of hydraulic fracturing in-situ stress measurements of Boreholes ZK10 and ZK11

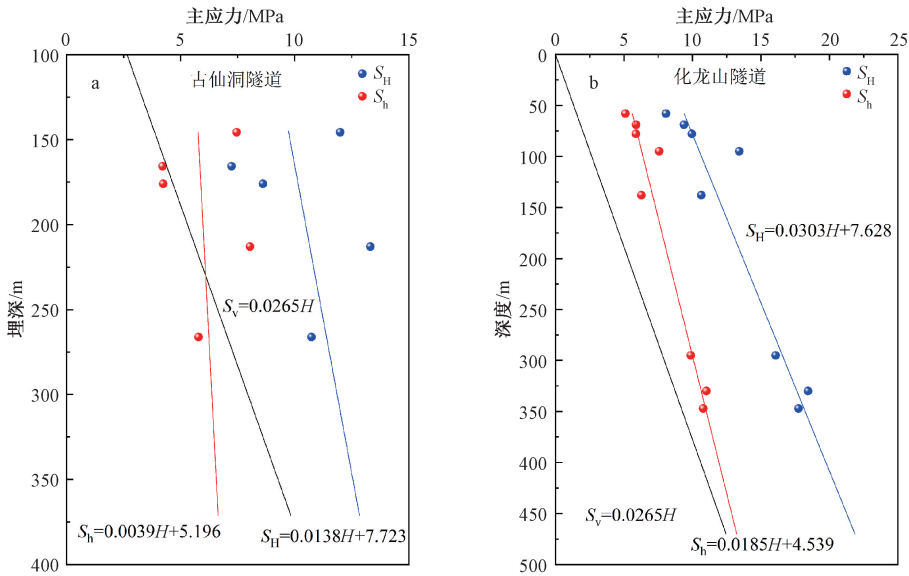
钻孔	深度/m	压裂参数/MPa				主应力值/MPa			破裂方向
		P_0	P_b	P_r	P_s	S_H	S_h	S_v	
ZK10	145.72	0.00	13.51	10.38	7.46	12.00	7.46	3.86	N66°W
	165.71	0.00	10.87	5.39	4.21	7.24	4.21	4.39	
	176.00	0.00	6.45	4.11	4.24	8.61	4.24	4.66	
	212.92	0.35	14.77	10.45	8.04	13.32	8.04	5.64	N60°W
	266.20	0.88	14.54	5.75	5.79	10.74	5.79	7.05	N47°W
ZK11	58.00	0.58	11.28	6.68	5.11	8.07	5.11	1.54	N47°W
	69.00	0.69	14.58	7.62	5.90	9.39	5.90	1.83	N55°W
	78.00	0.78	10.12	6.90	5.88	9.96	5.88	2.07	
	95.00	0.95	13.20	8.37	7.58	13.42	7.58	2.52	
	138.00	1.38	17.51	6.80	6.28	10.66	6.28	3.66	
	295.00	2.95	13.90	10.64	9.89	16.08	9.89	7.82	
	330.00	3.30	20.20	11.35	11.03	18.44	11.03	8.75	N70°W
	347.00	3.47	14.30	11.15	10.79	17.75	10.79	9.20	N66°W

注: P_0 —孔隙压力; P_b —破裂压力; P_r —重张压力; P_s —关闭压力; S_H —最大水平主应力; S_h —最小水平主应力; S_v —垂向应力, 按照等于上覆岩层重度计算, 岩石平均密度取 $2.65\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$

2.3 地应力测量结果分析

基于 ZK10 钻孔和 ZK11 钻孔水压致裂地应力测量结果 (表 1), 整理分析了两个隧道主应力随埋深的散点图, 通过线性拟合获取了主应力值随深度分布和变化规律, 如图 5 所示。分析表明, 古仙洞隧

道钻孔 (ZK10 钻孔) 最大水平主应力随深度呈增大趋势, 最小水平主应力值随深度变化不明显, 在 371 m 埋深处最大水平主应力可达 13 MPa; 化龙山隧道钻孔 (ZK11 钻孔) 主应力值随深度增加而增大, 在 470 m 埋深处最大水平主应力可达 22 MPa。



a—古仙洞隧道主应力随深度变化; b—化龙山隧道主应力随深度变化

图 5 两个隧道主应力随深度变化

Fig. 5 Diagrams showing the change of the principal stresses with depth in the two tunnels

(a) The Guxiandong tunnel; (b) The Hualongshan tunnel

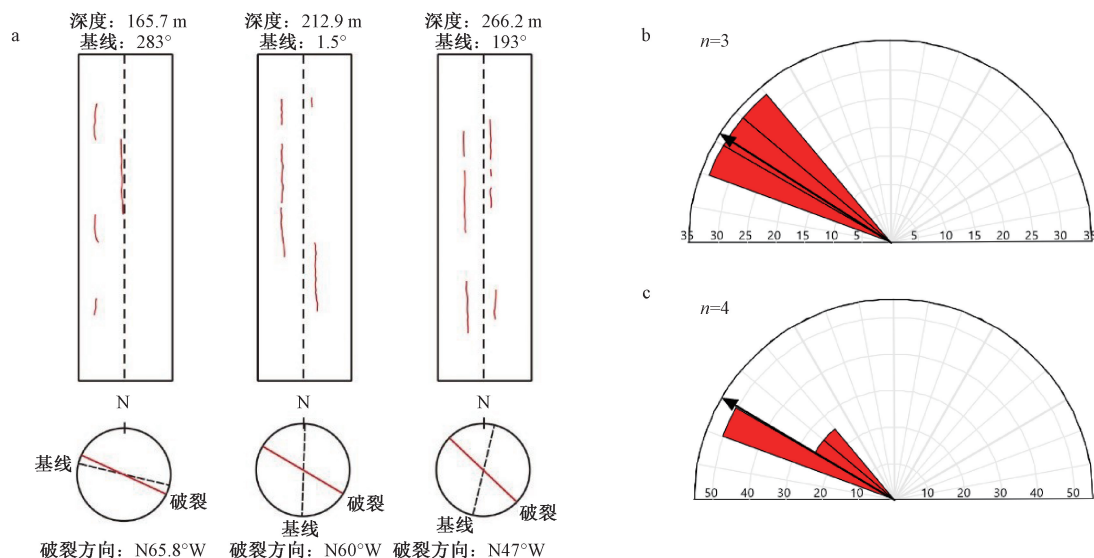
根据 Anderson (1905) 断层理论并结合图 5 可知, 古仙洞隧道在 233 m 处发生应力转换, 由浅至深分别发育逆冲型应力 ($S_H>S_h>S_v$) 和走滑型应力 ($S_H>S_v>S_h$) 2 种地应力类型; 化龙山隧道 3 个主应力之间的关系总体表现为 $S_H>S_h>S_v$, 属于逆

冲型应力类型。同时从图 5 可知古仙洞隧道与化龙山隧道最大主应力均为 S_H , 表明两个隧道现今构造活动以水平应力为主导。

通过水压致裂试验中所得裂隙方位, 古仙洞隧道与化龙山隧道钻孔分别获得 3 个测段与 4 个

测段最大水平主应力方向数据,以古仙洞隧道为例,给出了古仙洞隧道 ZK10 钻孔印模结果(图 6a),两隧道最大主应力玫瑰花图如图 6b、6c 所示。古仙洞隧道 ZK10 钻孔主应力方向由浅至深分别为 $N65.8^{\circ}W$ 、 $N60^{\circ}W$ 和 $N47^{\circ}W$,平均值为 $N58^{\circ}W$,由此可以表明古仙洞隧道 ZK10 钻孔最

大水平主应力优势方向分布在北西之间。化龙山隧道 ZK11 钻孔主应力方向由浅至深分别为: $N47^{\circ}W$ 、 $N55^{\circ}W$ 、 $N70^{\circ}W$ 和 $N66^{\circ}W$,数学平均值为 $N60^{\circ}W$ 。由此可以表明:化龙山隧道 ZK11 钻孔最大水平主应力优势方向分布在北西—北西西之间。



a—古仙洞隧道 ZK10 印模结果; b—古仙洞隧道最大主应力方向; c—化龙山隧道最大主应力方向

图 6 古仙洞隧道印模结果与两隧道最大主应力方向

Fig. 6 Diagrams showing the drilling impression of Borehole ZK10 in the Guxiandong Tunnel and the directions of the maximum principal stress of the two tunnels

(a) Drilling impressions of Borehole ZK10 (b) Maximum principal stress in the Guxiandong Tunnel (c) Maximum principal stress in the Hualongshan Tunnel

3 讨论

3.1 研究区现今构造应力场分析

研究区位于欧亚板块内秦岭造山带中部,其北为华北地块南缘活动边缘,其南为扬子地块北缘被动陆缘(王清晨等,1989),显然,这是影响研究区应力场特征的主要构造背景。文章实测结果表明研究区最大水平主应力方向为北西—北西西向(图 7),与秦岭造山带走向基本一致(嵇少丞等,2008)。吴逸影等(2021)利用横波分裂法对秦岭造山带上地幔各向异性开展了研究,结果表明研究区岩石圈受到壳幔垂直连贯变形作用,为壳—幔强耦合型,暗示着研究区深、浅部应该具有一致的构造应力方向。杜兴信和邵辉成(1999)采用震源机制资料,分区反演了中国现代构造应力场,显示研究区及周边地区最大主压应力轴为近北西西向。谢富仁等(2007)基于板块运动、

水压致裂和震源机制解等多种数据编制的中国大陆地壳应力环境基础数据库显示研究区最大主应力方向为北西西向(图 7)。嵇少丞等(2008)通过地表变形(GPS)获得秦岭造山带中西部地壳运动现今速度场相对欧亚板块的运动方向亦为北西西向。牛琳琳等(2018)、王斌等(2020)通过水压致裂法分析了鄂尔多斯地块南缘应力场成因,认为华北地块的阻挡造成鄂尔多斯地块南缘交接转换区应力发生调整,构造应力场发生偏转,自青藏高原东北缘向鄂尔多斯地块南缘的构造应力方向由北东—北东东向逐渐转为北西向。

3.2 地质与工程灾害分析

3.2.1 隧道布设合理性分析

余莉等(2015)通过对不同应力类型条件下最大水平主应力方向与洞轴线夹角的影响进行研究,将其分为 3 种类型,并确定出最优的最大水平主应力与洞轴线的夹角 α 。

(1) S_H 型 ($S_H > S_h > S_v$), 最优的最大水平主应

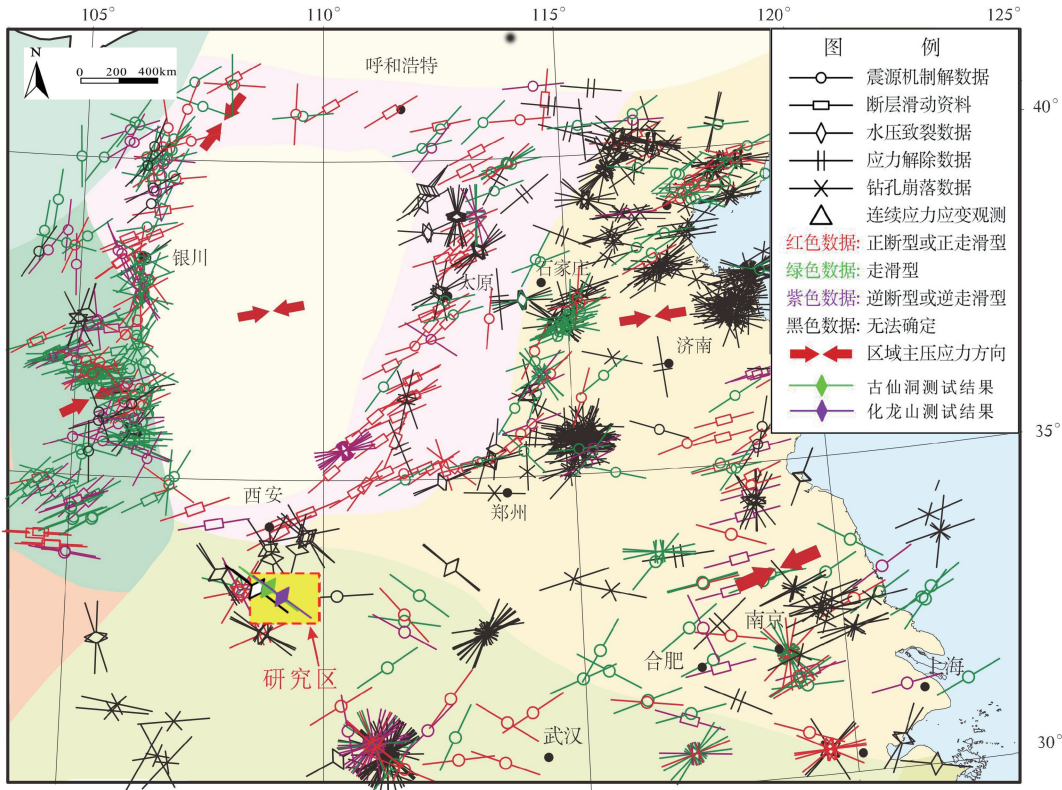


图 7 研究区现今地应力作用方向 (据谢富仁等, 2007 修改)
Fig. 7 Direction of the in-situ stress in the study area (modified after Xie et al. , 2007)

力与洞轴线的夹角 $0^{\circ} < \alpha < 30^{\circ}$ 。

(2) S_{H_v} 型 ($S_H > S_v > S_h$)，最优的最大水平主应力与洞轴线的夹角 α ：

$$\alpha = \frac{1}{2} \arccos \frac{S_H + S_h - 2S_v}{S_H - S_h} \quad (1)$$

(3) S_v 型 ($S_v > S_H > S_h$)，最优的最大水平主应力与洞轴线的夹角 $60^{\circ} < \alpha < 90^{\circ}$ 。

古仙洞隧道深部现今 3 个主应力关系为 $S_H > S_v > S_h$ ，属于 S_{H_v} 型。古仙洞隧道钻孔最大水平主应力方向为 $N60^{\circ}W$ ，隧道轴线方向角度为 $N45^{\circ}W$ ，夹角为 15° 。根据公式 (1) 计算得到隧道埋深范围内最优夹角 $0^{\circ} < \alpha < 10^{\circ}$ ，隧道轴线与最大水平主应力方向虽大于最优夹角，但相差数值较小，对围岩稳定性影响较小。

化龙山隧道 3 个主应力关系为 $S_H > S_h > S_v$ ，属于 S_H 型。化龙山隧道钻孔最大水平主应力方向为 $N58^{\circ}W$ ，隧道轴线方向角度为 $N45^{\circ}W$ ，夹角为 13° ，有利于围岩稳定。

3.2.2 隧道开挖岩爆风险

岩爆是在硐室开挖过程中，围岩卸荷而发生的脆性破坏。一般认为，岩爆多发生在新鲜、坚

硬、完整的脆性岩体中，此外，岩体中的高应力值，尤其是高的差应力值也是发生岩爆的必要条件。文章从地应力的角度，以实测地应力和岩石力学参数为基础，以原岩应力场最大主应力和切向应力准则为判据，采用岩石强度应力比法（国家铁路局，2017）、陶振宇判据（陶振宇，1987）、Russenes 判据（Russenes，1974；张镜剑和傅冰骏，2008）和岩石应力强度比法（徐林生和王兰生，1999）综合评价工程区两处隧道的岩爆风险（表 2）。

其中，Russenes 判据中岩石修正点荷载强度 $I_s(50)$ 是根据现场所取试样室内岩石力学试验所获得的，岩石饱和单轴抗压强度 $R_c = 22I_s(50)$ （Russenes，1974）。研究区内两隧道岩性均为中—微风化片岩，室内试验测得岩石饱和抗压强度值约为 80 MPa；对于岩石强度应力比判据方法和 Russenes 判据方法，研究区内两隧道埋深范围内以走滑型和逆冲型应力类型为主，因此最大主应力 $\sigma_{max} = S_H$ ；对于岩石应力强度比判据方法与陶振宇判据方法，假设隧道横截面为受两向正应力作用的平面应变模型（孟文等，2021），即上覆岩石自

表 2 岩爆风险判据和分级

Table 2 Risk criteria and classification of rock burst

判据方法	判别公式	参数意义	判据阈值	分级情况	判据特点
岩石强度应力比法	$R_c/\sigma_{\max}$	R_c 为岩石饱和单轴抗压强度, MPa; $\sigma_{\max}$ 为最大主应力, MPa	4~7	轻微岩爆	未考虑隧洞开挖过程和初始应力场的应力重分布影响
			2~4	中等岩爆	
			1~2	强烈岩爆	
			<1	极强岩爆	
陶振宇判据	$R_c/\sigma_{\max}$	R_c 为岩石饱和单轴抗压强度, MPa; $\sigma_{\max}$ 为最大主应力, MPa	5.5~14.5	轻微岩爆	
			2.5~5.5	中等岩爆	
			<2.5	强烈岩爆	
岩石应力强度比法	$\sigma_{\theta\max}/R_c$	R_c 为岩石饱和单轴抗压强度, MPa; $\sigma_{\theta\max}$ 为隧道开挖面最大切向应力, MPa	0.3~0.5	轻微岩爆	考虑隧洞开挖过程和初始应力场的应力重分布影响
			0.5~0.7	中等岩爆	
			0.7~0.9	强烈岩爆	
			>0.9	极强岩爆	
Russenes 判据	$I_s(50)/\sigma_{\theta\max}$	$I_s(50)$ 为岩石修正点荷载强度, MPa; $\sigma_{\theta\max}$ 为隧道开挖面最大切向应力, MPa	0.150~0.200	轻微岩爆	
			0.083~0.150	中等岩爆	
			<0.083	强烈岩爆	

重作用引起的垂向应力 (S_v) 和隧道横截面上的水平向正应力 (σ_n), 根据线弹性理论公式, 推得其与水压致裂法实测水平主应力关系如下:

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(S_H + S_h) + \frac{1}{2}(S_H - S_h)\cos2\theta \quad (2)$$

最大切向应力由如下公式计算:

$$\sigma_{\theta\max} = \begin{cases} 3\sigma_n - S_v, & (\sigma_n \geq S_v) \\ 3S_v - \sigma_n, & (\sigma_n < S_v) \end{cases} \quad (3)$$

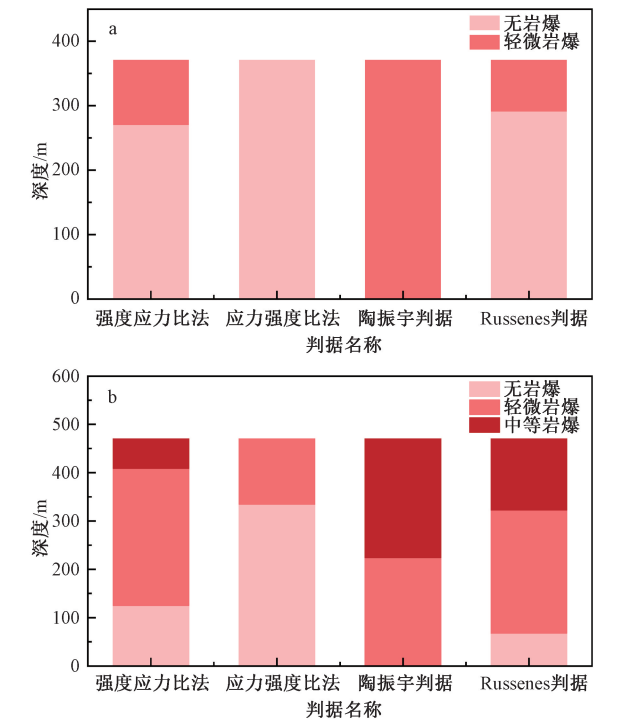
其中, θ 为水平隧道轴向法线方向与最大水平主应力方向的夹角。

通过对岩石强度应力比法、陶振宇判据、Russenes 判据和岩石应力强度比法的相关参数进行计算, 分析了两个隧道岩爆风险与埋深的关系 (图 8, 表 3)。

(1) 对于古仙洞隧道, 陶振宇判据预测岩爆发生可能性最高, 隧道全部埋深范围内均可能发生轻微岩爆; 岩石应力强度比法预测岩爆发生可能性最低, 隧道全部埋深范围内没有发生岩爆可能性; 岩石强度应力比法、Russenes 判据和陶振宇判据虽然在岩爆可能发生深度预测上存在差异, 但均显示本隧道不具备发生中等强度及以上等级岩爆的可能。

(2) 对于化龙山隧道, 陶振宇判据预测岩爆发生可能性最高, 分别自 0 m、224 m 隧道埋深处开始发生轻微岩爆和中等岩爆; 岩石应力强度比法预测岩爆发生可能性最低, 自 323 m 隧道埋深处开始发生轻微岩爆; 上述 4 种方法虽在岩爆可能发生深度的预测上存在差异 (表 2), 但均预测该隧道不具备强烈强度及以上等级岩爆的可能。

(3) 综合对比古仙洞隧道与化龙山隧道岩爆



a—古仙洞隧道岩爆风险评价结果; b—化龙山隧道岩爆风险评价结果

图 8 古仙洞隧道和化龙山隧道岩爆风险评价结果
Fig. 8 Results of rock burst risk assessment for the two tunnels
(a) The Guxiandong tunnel; (b) The Hualongshan tunnel

预测结果发现, 与岩石强度应力比法和陶振宇判据, 岩石应力强度比法和 Russenes 判据预测结果更加保守, 比如陶振宇判据均预测两隧道自地表处就具有发生岩爆的可能, 这显然高估了岩爆发生的可能性。一般来说, 较浅的埋深多为隧道进出口, 或山谷等浅埋区, 上覆地层多为第四纪坡积物和强风化岩体, 岩石强度普遍发生劣化, 难

表 3 古仙洞隧道与化龙山隧道岩爆风险预测结果

Table 3 Predicted results of rock burst risk of the two tunnels				
隧道名称	岩性	判据方法	埋深/m	岩爆等级
古仙洞	片岩	强度应力比法	0~270	无岩爆
			270~371	轻微岩爆
		陶振宇判据	0~371	轻微岩爆
			0~371	无岩爆
		Russenes 判据	0~291	无岩爆
			291~371	轻微岩爆
化龙山	片岩	强度应力比法	0~125	无岩爆
			125~409	轻微岩爆
			409~470	中等岩爆
		陶振宇判据	0~224	轻微岩爆
			224~470	中等岩爆
			0~335	无岩爆
		应力强度比法	335~470	轻微岩爆
			0~68	无岩爆
			68~323	轻微岩爆
		Russenes 判据	323~470	中等岩爆

以积累高应力值, 因而实际上并不具备岩爆的可能性。

(4) 岩石应力强度比法和 Russenes 判据考虑隧道开挖工程中对初始应力场的影响, 能够更好地揭露隧道具体开挖段岩爆发生时岩体应力与岩体强度间的关系。而岩石强度应力比法和陶振宇判据未考虑原岩主应力方向, 也就是隧洞轴线与最大主应力的夹角的影响, 只考虑最大主应力所能引起的最大岩爆等级的可能性, 这也就造成了这两种方法所预测岩爆发生强度和可能性偏高。另外, 岩石强度应力比法和陶振宇判据具有相同的判别公式 R_c/σ_{max} , 但后者的岩爆判据阈值显著高于前者, 造成了岩爆等级和岩爆深度预测的差别, 因此二者的可靠性范围有待于实际施工中对比检验。

上面仅从地应力这一单一因素角度, 对古仙洞隧道与化龙山隧道发生岩爆的可能性进行了分析。但实际上, 引起岩爆的发生还需要岩石新鲜完整, 裂隙不发育或仅有潜在微裂隙等多个条件共同作用。因此, 认为尽管古仙洞隧道、化龙山隧道存在发生围岩岩爆的地应力条件, 但是两隧道岩体破碎段发生岩爆的可能性极低, 岩体完整段具有发生岩爆可能。

3.2.3 研究区断层稳定性分析

研究区位于大巴山地区, 其中城口-钟宝断层和商丹断层冲断推覆构造十分发育。研究表明在合适的地壳应力场作用下, 百米左右深度的裂隙、小断层亦可能发生失稳滑动 (Chang and Jo, 2015;

Wu et al., 2016; Zhang et al., 2017)。因此, 尝试对研究区内现今地壳应力状态和断层稳定性之间的关系进行研究, 以期为研究区内两座隧道设计与施工提供理论依据。

莫尔-库伦准则认为, 在不考虑内聚力条件下, 当断层面上 $\tau \geq \mu \sigma_n$ 时, 即有可能发生滑动失稳, 其中 τ 是断层面上剪应力, μ 是断层摩擦系数, σ_n 则是断层上的正应力。Zoback and Healy (1984) 通过对 Byerlee 断层滑动条件 (Byerlee, 1978a) 进一步研究发现, 发生滑动失稳时, 最大主应力、最小主应力与断层摩擦系数之间的关系可表示为:

$$\frac{S_1 - P_0}{S_3 - P_0} = (\sqrt{\mu^2 + 1} + \mu)^2 \tag{4}$$

公式中, S_1 为断层上最大主应力, S_3 为断层上最小主应力, P_0 为孔隙压力。如若上式左边小于右边则断层稳定, 否则断层将沿“合适的角度” φ 发生滑移破坏, φ 与 μ 的关系可用式 (5) 表示:

$$\varphi = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \mu \right) \tag{5}$$

根据 Anderson 断层理论, 对于不同类型断层, 其 S_1 、 S_3 所对应的实测地应力不同。由于古仙洞隧道由浅至深分别发育逆冲型应力 ($S_H > S_h > S_v$) 和走滑型应力 ($S_H > S_v > S_h$) 两种地应力类型, 公式 (4) 中分别令 $S_3 = S_v$ 和 S_h 、 $S_1 = S_H$; 对于化龙山隧道, $S_1 = S_H$ 、 $S_3 = S_v$ 。

Byerlee (1978b) 综合各种岩石的室内试验资料发现, 大部分岩石的 μ 值在 0.6~1.0 之间。分别将 $\mu = 0.6$ 和 1.0 带入公式 (4), 作为判断断层稳定性的临界值, 具体计算结果如图 9 所示。

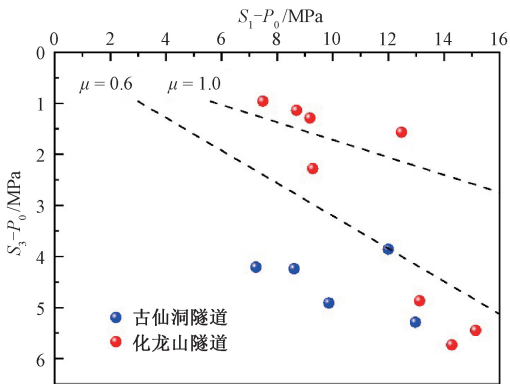


图 9 基于实测应力的研究区段断层滑动稳定性评价

Fig. 9 Assessment of sliding instability of faults in the study area based on measured stress

由图9可见,在 μ 取0.6~1.0条件下,古仙洞隧道实测地应力值位于应力临界值下方,尚未达到断裂失稳滑动的最小值;对于化龙山隧道,浅部地应力实测值已达到断裂滑动失稳条件,部分实测值甚至超过 $\mu=1.0$ 应力值临界区,而深部地应力实测值却低于断层发生失稳破坏临界值,分析其原因可能为浅部沟谷地形影响造成应力集中,随埋深增加,沟谷作用减弱,使得深部实测地应力值均小于临界区,断层处于稳定状态。综上,研究区内古仙洞隧道与化龙山隧道附近断裂均无失稳滑动可能,具有较好的稳定性。

4 结论

(1) 基于G6911高速公路古仙洞和化龙山特长深埋隧道实测主应力分析发现,两隧道最大埋深处 S_H 值分别为13 MPa和22 MPa。实测主应力同时表明,古仙洞与化龙山隧道的应力关系分别为 $S_H>S_h>S_v$ 和 $S_H>S_v>S_h$,水平主应力起主导作用;研究区 S_H 方向为北西—北西。

(2) 通过最大水平主应力方向与洞轴线夹角的关系判断,研究区内古仙洞与化龙山隧道的总体布置是合理的。

(3) 采用岩石强度应力比法、陶振宇判据、Russenes判据和岩石应力强度比法综合评价研究区内两隧道发生岩爆的可能,认为研究区内两隧道不具备发生中等强度以上等级岩爆的可能。

(4) 古仙洞隧道附近断层未达到 $\mu=0.6$ 失稳临界值,化龙山隧道由于沟谷作用使得部分浅部实测数据达到 $\mu=1.0$ 断层失稳临界值,但随深度增加沟谷作用减弱,深部数据均小于 $\mu=0.6$ 失稳临界值。总体上,两隧道附近断层相对稳定,无失稳滑动可能。

References

AMADEI B, STEPHANSSON O, 1997. Rock stress and its measurement [M]. London: Springer Chapman & Hall.

ANDERSON E M, 1905. The dynamics of faulting [J]. Transactions of the Edinburgh Geological Society, 8 (3): 387-402.

BYERLEE J, 1978a. Friction of rocks [J]. Pure and Applied Geophysics, 116 (4-5): 615-626.

BYERLEE J, 1978b. Friction of rocks [M] //BYERLEE J D, WYSS M. Rock friction and earthquake prediction. Basel: Birkhäuser: 615-626.

CHANG C D, JO Y, 2015. Heterogeneous in situ stress magnitudes due

to the presence of weak natural discontinuities in granitic rocks [J]. Tectonophysics, 664: 83-97.

CHEN Q C, FENG C J, MENG W, et al., 2012. Analysis of in situ stress measurements at the northeastern section of the Longmenshan fault zone after the 5.12 Wenchuan earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 55 (12): 3923-3932. (in Chinese with English abstract)

CHEN Q C, SUN D S, CUI J J, et al., 2019. Hydraulic fracturing stress measurements in Xuefengshan deep borehole and its significance [J]. Journal of Geomechanics, 25 (5): 853-865. (in Chinese with English abstract)

DU J J, CHEN Q C, AN Q M, et al., 2013. Hydrofracturing in-situ stress measurement in Hanzhong Basin, Shaanxi Province [J]. Acta Seismologica Sinica, 35 (6): 799-808. (in Chinese with English abstract)

DU X X, SHAO H C, 1999. Modern tectonic stress field in the Chinese mainland inverted from focal mechanism solutions [J]. Acta Seismologica Sinica, 21 (4): 354-360. (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 [J]. Rock and Soil Mechanics, 33 (7): 2149-2159. (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) [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40 (7-8): 1011-1020.

HAN J L, WU S R, TAN C X, et al., 2007. Studies on geostress by comparing result of AE method with that of hydraulic fracturing technique in Dongjiangkou Granite in East Qinling [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 26 (1): 81-86. (in Chinese with English abstract)

JI S C, WANG Q, SUN S S, et al., 2008. Continental extrusion and seismicity in China [J]. Acta Geologica Sinica, 82 (12): 1644-1667. (in Chinese with English abstract)

KE C H, 2013. The ore-forming processes of molybdenum polymetallic deposits to the west side of Mangling Pluton, North Qinling [D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences. (in Chinese with English abstract)

MENG W, GUO C B, MAO B Y, et al., 2021. Tectonic stress field and engineering influence of China-Nepal railway corridor [J]. Geoscience, 35 (1): 167-179. (in Chinese with English abstract)

National Railway Administration of People's Republic of China, 2017. Code for design on tunnel of railway: TB 10003-2016 [S]. Beijing: China Railway Publishing House. (in Chinese)

NIU L L, FENG C J, ZHANG P, et al., 2018. In-situ measurements in the southern margin of the Ordos block [J]. Journal of Geomechanics, 24 (1): 25-34. (in Chinese with English abstract)

REN Y, WANG D, LI T B, et al., 2021. In-situ geostress characteristics and engineering effect in Ya'an-Xinduoqiao section of

Sichuan-Tibet railway [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 40 (1): 65-76. (in Chinese with English abstract)

RUSSENES B F, 1974. Analysis of rock spalling for tunnels in steep valley sides (in Norwegian) [D]. Norway: Norwegian Institute of Technology: 9-17.

SUN D S, CHEN Q C, ZHANG Y Q, 2020. Analysis on the application prospect of ASR in-situ stress measurement method in underground mine [J]. Journal of Geomechanics, 26 (1): 33-38. (in Chinese with English abstract)

TAO Z Y, 1987. Rockburst and its criterion in highly geostress zone [J]. Yangtze River, 18 (5): 25-32. (in Chinese)

WANG B, QIN X H, CHEN Q C, et al., 2020. Measurement results of in-situ stress in Guyuan area of Ningxia on the southwest margin of Ordos block and its causation analysis [J]. Geological Bulletin of China, 39 (7): 983-994. (in Chinese with English abstract)

WANG C H, GUO Q L, HOU Y H, et al., 2010. In-situ stress field and project stability of underground water-sealed oil depots [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 32 (5): 698-705. (in Chinese with English abstract)

WANG C H, GAO G Y, WANG H, et al., 2020. Integrated determination of principal stress and tensile strength of rock based on the laboratory and field hydraulic fracturing tests [J]. Journal of Geomechanics, 26 (2): 167-174. (in Chinese with English abstract)

WANG Q C, SUN S, LI J L, et al., 1989. The tectonic evolution of the Qinling mountain belt [J]. Scientia Geologica Sinica, 24 (2): 129-142. (in Chinese)

WU M L, ZHANG C Y, FAN T Y, 2016. Stress state of the Baoxing segment of the southwestern Longmenshan Fault Zone before and after the $M_s7.0$ Lushan earthquake [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 121: 9-19.

WU Y Y, DENG S Z, NIU F L, et al., 2021. Crust-mantle coupling mechanism beneath the Qinling Orogen Belt revealed by SKS-wave splitting [J]. Chinese Journal of Geophysics, 64 (5): 1608-1619. (in Chinese with English abstract)

XIAO B Z, LUO C W, LIU Y K, 2005. In-situ stress measurement and prediction analysis of tunnel rockburst in West Hubei [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 24 (24): 4472-4477. (in Chinese with English abstract)

XIE F R, CHEN Q C, CUI X F, et al., 2007. Fundamental database of crustal stress environment in continental China [J]. Progress in Geophysics, 22 (1): 131-136. (in Chinese with English abstract)

XU L S, WANG L S, 1999. Study on the Laws of rockburst and its forecasting in the tunnel of Erlang mountain road [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 21 (5): 569-572. (in Chinese with English abstract)

YANG Z B, BAI Y, YIN J M, et al., 2017. In-situ stress measurement and stability assessment of surrounding rock mass in Hejialiang tunnel of Shaanxi province [J]. Yangtze River, 48 (6): 52-56. (in Chinese with English abstract)

YU L, YOU Z M, CHEN J P, et al., 2015. Rock classification for tunnels in high geostress areas [J]. Modern Tunnelling Technology, 52 (3): 23-30. (in Chinese with English abstract)

ZHANG C Y, WU M L, CHEN Q C, et al., 2012. Review of in-situ stress measurement methods [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 31 (3): 305-310. (in Chinese with English abstract)

ZHANG C Y, WU M L, LIAO C T, 2013. In-situ stress measurement and study of stress state characteristics of Jinchuan No. 3 mine [J]. Rock and Soil Mechanics, 34 (11): 3254-3260. (in Chinese with English abstract)

ZHANG C Y, CHEN Q C, QIN X H, et al., 2017. In-situ stress and fracture characterization of a candidate repository for spent nuclear fuel in Gansu, northwestern China [J]. Engineering Geology, 231: 218-229.

ZHANG H, SHI G, WU H, et al., 2020. In-situ stress measurement in the shallow basement of the Shanghai area and its structural geological significance [J]. Journal of Geomechanics, 26 (4): 583-594. (in Chinese with English abstract)

ZHANG J J, FU B J, 2008. Rockburst and its criteria and control [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 27 (10): 2034-2042. (in Chinese with English abstract)

ZOBACK M D, HEALY J H, 1984. Friction, faulting and in situ stress [J]. Annales Geophysicae, 2 (6): 689-698.

附中文参考文献

陈群策, 丰成君, 孟文, 等, 2012. 5·12 汶川地震后龙门山断裂带东北段现今地应力测量结果分析 [J]. 地球物理学报, 55 (12): 3923-3932.

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.

杜建军, 陈群策, 安其美, 等, 2013. 陕西汉中盆地水压致裂地应力测量分析研究 [J]. 地震学报, 35 (6): 799-808.

杜兴信, 邵辉成, 1999. 由震源机制解反演中国大陆现代构造应力场 [J]. 地震学报, 21 (4): 354-360.

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 P_s 的常用判读方法讨论 [J]. 岩土力学, 33 (7): 2149-2159.

国家铁路局, 2017. 铁路隧道设计规范: TB 10003-2016 [S]. 北京: 中国铁道出版社.

韩金良, 吴树仁, 谭成轩, 等, 2007. 东秦岭东江口花岗岩体水压致裂法与 AE 法地应力测量对比研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 26 (1): 81-86.

稽少丞, 王茜, 孙圣思, 等, 2008. 亚洲大陆逃逸构造与现今中国地震活动 [J]. 地质学报, 82 (12): 1644-1667.

柯昌辉, 2013. 北秦岭蟒岭岩体西侧钼多金属矿床成矿作用研究 [D]. 北京: 中国地质科学院.

孟文, 郭长宝, 毛邦燕, 等, 2021. 中尼铁路交通廊道现今构造应力场及其工程影响 [J]. 现代地质, 35 (1): 167-179.

牛琳琳, 丰成君, 张鹏, 等, 2018. 鄂尔多斯地块南缘地应力测量研究 [J]. 地质力学学报, 24 (1): 25-34.

任洋, 王栋, 李天斌, 等, 2021. 川藏铁路雅安至新都桥段地应力特征及工程效应分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 40 (1): 65-76.

孙东生, 陈群策, 张延庆, 2020. ASR 法在井下矿山地应力测试中的应用前景分析 [J]. 地质力学学报, 26 (1): 33-38.

陶振宇, 1987. 高地应力区的岩爆及其判别 [J]. 人民长江, (5): 25-32.

王斌, 秦向辉, 陈群策, 等, 2020. 鄂尔多斯地块西南缘宁夏固原地区原位地应力测量结果及其成因 [J]. 地质通报, 39 (7): 983-994.

王成虎, 郭啟良, 侯硯和, 等, 2010. 地下水封油库场址地应力场及工程稳定性分析研究 [J]. 岩土工程学报, 32 (5): 698-705.

王成虎, 高桂云, 王洪, 等, 2020. 利用室内和现场水压致裂试验联合确定地应力与岩石抗拉强度 [J]. 地质力学学报, 26 (2): 167-174.

王清晨, 孙枢, 李继亮, 等, 1989. 秦岭的大地构造演化 [J]. 地质科学, 24 (2): 129-142.

吴逸影, 邓斯壮, 钮凤林, 等, 2021. 秦岭造山带上地幔各向异性及相关的壳幔耦合型式 [J]. 地球物理学报, 64 (5): 1608-1619.

肖本职, 罗超文, 刘元坤, 2005. 鄂西地应力测量与隧道岩爆预测分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 24 (24): 4472-4477.

谢富仁, 陈群策, 崔效锋, 等, 2007. 中国大陆地壳应力环境基础数据库 [J]. 地球物理学进展, 22 (1): 131-136.

徐林生, 王兰生, 1999. 二郎山公路隧道岩爆发生规律与岩爆预测研究 [J]. 岩土工程学报, 21 (5): 569-572.

杨宗宝, 白银, 尹健民, 等, 2017. 陕西何家梁隧道地应力测量及围岩稳定性评价 [J]. 人民长江, 48 (6): 52-56.

余莉, 尤哲敏, 陈建平, 等, 2015. 高地应力地区隧道围岩分级研究 [J]. 现代隧道技术, 52 (3): 23-30.

张重远, 吴满路, 陈群策, 等, 2012. 地应力测量方法综述 [J]. 河南理工大学学报 (自然科学版), 31 (3): 305-310.

张重远, 吴满路, 廖椿庭, 2013. 金川三矿地应力测量及应力状态特征研究 [J]. 岩土力学, 34 (11): 3254-3260.

张浩, 施刚, 巫虹, 等, 2020. 上海地区浅部地应力测量及其构造地质意义分析 [J]. 地质力学学报, 26 (4): 583-594.

张镜剑, 傅冰骏, 2008. 岩爆及其判据和防治 [J]. 岩石力学与工程学报, 27 (10): 2034-2042.

开放科学（资源服务）标识码（OSID）：

可扫码直接下载文章电子版，也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

