

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202403036



新型双管水压致裂法地应力测试装置及其应用

常方强¹, 梁潇洋¹, 黄梓焰¹, 梁康康², 全露龙², 曹亚南², 常方伟²

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 深部岩土工程勘察(山东)有限公司, 山东 潍坊 261071)

摘要: 提出一种新型双管水压致裂法地应力测试装置, 管路采用C型接头的高压双层钢丝胶管。在浙江省和福建省的16条隧道中进行测试应用, 取得了较好的效果。结果表明: 新型双管水压致裂法地应力测试装置密封效果良好, 能够分别控制封隔段和压裂段进行加压、泄压; 在我国东南沿海地区, 深部岩体中的天然应力场具有明显的方向性, 最大水平主应力与最小水平主应力比值为0.55~0.85, 侧压系数为0.72~4.83, 平均值为2.16。

关键词: 地应力; 水压致裂法; 双管; 岩石力学

中图分类号: TU 45

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)06-0706-06

New Type of Double Pipe Hydraulic Fracturing Method In-Situ Stress Testing Device and Its Application

CHANG Fangqiang¹, LIANG Xiaoyang¹, HUANG Ziyan¹,
LIANG Kangkang², QUAN Lulong²,
CAO Yanan², CHANG Fangwei²

(1. School of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Deep Geotechnical Engineering Survey (Shandong) Limited Company, Weifang 261071, China)

Abstract: A new type of double pipe hydraulic fracturing *in-situ* stress testing device is proposed, using high-pressure double-layer steel wire rubber hoses with C-type joints in the pipeline. The new device are tested and applied in 16 tunnels in Zhejiang Province and Fujian Province, obtaining good results. The results show that the new double pipe hydraulic fracturing *in-situ* stress testing device has good sealing effect, and can control the pressure and relief of the sealing section and fracturing section separately. In the southeastern coastal areas of China, the natural stress field in deep rock masses has obvious directionality, with 0.55-0.85 ratio of maximum horizontal principal stress to minimum horizontal principal stress, the lateral pressure coefficient is 0.72-4.83, the average value is 2.16.

Keywords: *in-situ* stress; hydraulic fracturing method; double pipe; rock mechanics

地应力是地层岩体在长期地质过程中受到地球重力和构造应力共同作用而逐渐形成的, 是地质构造形成与演化, 以及区域地质稳定的重要影响因素^[1]。近年来, 随着国家战略的实施, 一批大型深部地下工程陆续兴建, 相较于浅部岩体, 深部岩体的非线性、不均质性和各向异性更加突出, 深部岩体具有独

收稿日期: 2024-03-24

通信作者: 常方强(1980-), 男, 副教授, 博士, 主要从事海洋工程、岩土工程的研究。E-mail: changfq@hqu.edu.cn。

特的“三高一扰动”特性，即高应力、高地温、高岩溶水压和强烈的开采扰动^[2-3]。

为了准确地测量深部岩体的地应力，国内外已提出了 10 余种方法，如水压致裂法、扁千斤顶（压力枕）法、刚性包体应力计法、声发射法等。这些方法中，水压致裂法由于能够测量出岩体的原始应力状态，应用最为广泛。国内已有较多学者采用水压致裂法测得一些岩体的天然应力^[4-9]，测试设备大都采用地质钻机自带的钻杆作为供压管道，将封隔器连接在钻杆端部，进行下放和供压。由于钻杆采用螺纹连接，故难以保障连接处不会出现渗漏泄压，而压力传感器一般布设在地面上，造成实际施加的压力比测得的数值更小。此外，水压致裂法的操作和测试难度较大，多数学者的研究结果都是基于少数几个钻孔数据展开研究的，对地区统计的经验性不强。基于此，本文提出一种新型双管水压致裂法地应力测试装置，并在浙江省、福建省的 16 条隧道的深部钻孔内进行测试，研究该区域地应力的分布规律。

1 水压致裂法测试

水压致裂法测试建立在弹性力学之上，基于以下 3 个假定：1) 岩体连续、均匀、各向同性；2) 测点岩体为非渗透性，岩体为多孔介质，注入的流体按照达西定律在岩体空隙中流动；3) 钻孔需与其中一个主应力保持平行。

采用水压致裂法测试地应力是在两端的封隔段膨胀后，将压裂段进行密封，然后，在压裂段内进行供压（一般选择水压），采用压裂的峰值、裂隙闭合时的关闭压力和裂隙重新张开时的压力（重张压力）进行计算，确定水平向的最大主应力和最小主应力^[4]。水压致裂法典型压力变化曲线，如图 1 所示。图 1 中： $p_{c,1}$ 为初始开裂压力（峰值压力）； p_s 为关闭压力； $p_{c,2}$ 为重张压力；1~9 为不同的测试阶段。

假设深部岩体中存在的天然应力场，竖向应力 $\sigma_v = \rho g H$ ， ρ 为上覆岩层容重， g 为重力加速度， H 为试验段埋。取岩体垂直钻孔平面进行分析，可得水压致裂应力测量力学模型，如图 2 所示。图 2 中： σ_{\max} 为最大水平主应力； σ_{\min} 为最小水平主应力； p_c 为岩体孔壁位置受到的压力； r 为钻孔半径； $X-X'$ 为水平轴； $Y-Y'$ 为竖向轴； θ 为中心角度。

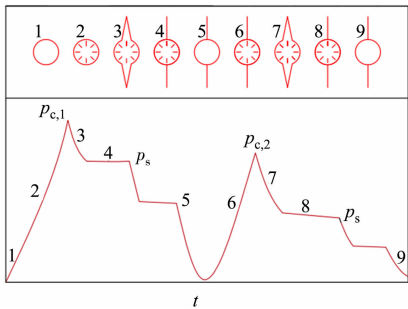
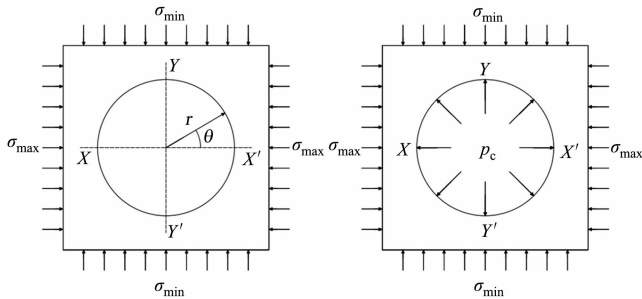


图 1 水压致裂法典型压力变化曲线

Fig. 1 Typical pressure variation curve of hydraulic fracturing method



(a) 力学模型

(b) 应力集中

图 2 水压致裂应力测量力学模型

Fig. 2 Mechanical model of hydraulic fracture stress measurement

当孔壁出现垂直裂缝时，孔壁上应力可用柯西应力集中解进行分析。当 $\theta = 0^\circ$ 时，环向应力 σ_θ 取到最小值；当 $\sigma_\theta \leq -\sigma_t$ (σ_t 为岩体抗拉强度) 时，孔壁开裂，裂隙形成，此时，最小主应力等于关闭应力，可得

$$\sigma_{\max} = \sigma_t + 3\sigma_{\min} - p_c, \tag{1}$$

$$\sigma_{\min} = p_s. \tag{2}$$

通过水压致裂试验，确定 $p_{c,1}$ 、 $p_{c,2}$ 、 p_s ，可计算出 σ_{\max} 、 σ_{\min} 。需要指出的是， $p_{c,1}$ 、 $p_{c,2}$ 、 p_s 均为孔内测测试位置处的数值，而在测试过程中，该位置处的数值应为地面处的实测值与孔内静水压力 p_w 之和，其关系为

$$p_{c,1} = p_{c,1,g} + p_w, \tag{3}$$

$$p_{c,2} = p_{c,2,g} + p_w, \tag{4}$$

$$p_s = p_{s,1,g} + p_w. \tag{5}$$

式(3)~(5)中： $p_{c,1,g}$ 、 $p_{c,2,g}$ 、 $p_{s,1,g}$ 分别为开裂压力、重张压力和关闭压力的计算值。

2 新型双管水压致裂法地应力测试装置

目前,国内使用的水压致裂法仪器多为单回路方式,即单管方式。单回路测试系统将钻杆作为导管,封隔段与压裂段加压致裂时都通过该管道进行实验^[10-12]。首先,将封隔器运送至测试区域,再利用高压泵通过导管对封隔段进行注液,达到设计压力后,通过封隔器顶部的推拉开关将压力由封隔段转换到压裂段内。这种装置较为简单,现场操作简便,便于连续作业^[13],但容易产生以下两个问题。

- 1) 地下所有加压管路都通过钻杆实现,钻杆连接的密封性较差,在设计时并未考虑水压密闭性问题。因此,在打压过程中,管路会出现渗漏,导致压力下降,测试结果可能失真。
- 2) 封隔段和压裂段只能采用一套系统分时控制,无法同时进行控制,因此,在压裂期间无法控制封隔压力。

新型双管水压致裂法装置主要由高压泵站、数据采集系统、串联封隔器、高压胶管和开关等组成,如图 3 所示。

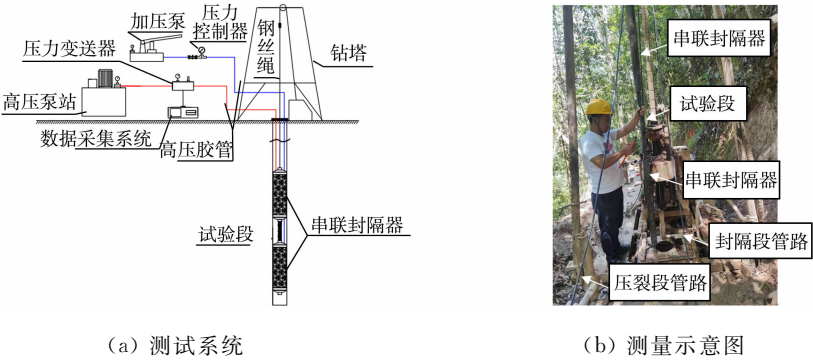


图 3 新型双管水压致裂测试装置

Fig. 3 New type of double pipe hydraulic fracturing testing devices

放弃使用钻杆,采用高压胶管替代,对封隔器等装置进行作业,达到封隔器输送与试验段加压的目的。相较于传统单回路装置,高压胶管具有更高的密封性,测试前可向管道内通入液体进行密封性检查,确保测试期间获得数据的准确性,同时,也更便于携带作业。装置使用高压胶管内部固定双层钢丝网,以增强强度,试验前,对高压胶管施加压力至 50 MPa,未见破坏迹象。高压胶管每段长度为 20~50 m,采用 C 型接头连接,接头处带有橡胶密封圈。此外,采用双回路系统,两条独立的高压胶管分别向封隔段和压裂段加压,相较于传统单回路装置,新型装置可更加高效、精确地控制封隔段与压裂段压力。试验过程中,一旦发现封隔器压力不够,可随时补压,以保障数据测试的可靠性。

3 工程应用实例

为了进一步验证新型双管水压致裂法地应力测试装置的适用性,在浙江省和福建省的 16 条隧道勘察中进行测试。测试地点,如图 4 所示。

测试区域均为山岭隧道,地层岩性主要为第 4 系地层、侏罗系上统地层;浙江省测试区段的岩性多为强风化至中风化晶屑玻屑熔结凝灰岩,灰黄至灰色,玻屑塑变结构,主要以火山灰、浆屑为主,含少量长石、石英矿;福建省测试区段的岩性多为强风化至中风化花岗岩,灰白色至黄褐色,斑状结构,主要含有石英、长石和黑云母,岩性坚硬。

地应力测试深度约为 100~500 m。珠龙隧道 ZLZK3 钻孔地应力测试曲线(测试深度 $h=253.0$ m),如图 5 所示。图 5 中: p 为测试压力。由图 5 可知:地应力测试曲线的上升段和下降段均较为明显,岩石压裂后重张段压力均小于初始压裂段,曲线较为均匀,测试较为理想。

关闭压力的确定对水压致裂法地应力计算非常重要。由式(2)可知,关闭压力等于最小水平主应力,即水压致裂法可直接测出最小水平主应力值。目前,比较常用的 p_s 取值方法有拐点法、单切线法、双切线法、Mauskat 法及流量-压力法等^[14]。文中 p_s 的取值方法主要采用拐点法,对于拐点不明显的情况,则采用单切线法或双切线法。



图 4 测试地点

Fig. 4 Test location

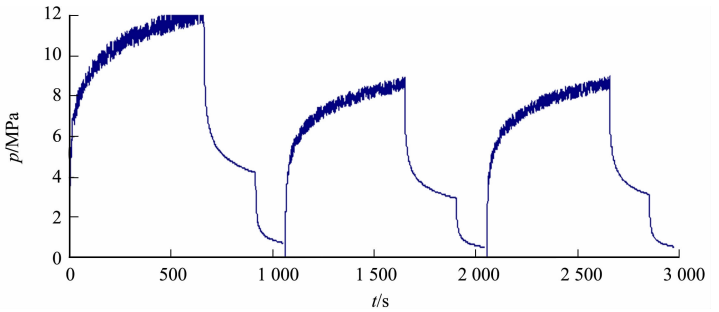


图 5 珠龙隧道 ZLZK3 钻孔地应力测试曲线

Fig. 5 *In-situ* stress test curves of ZLZK3 borehole in Zhulong Tunnel

对地应力进行测试,测试位置处的钻孔直径为 76 mm,由钻孔取出的岩芯可知,岩体完整性良好,岩体呈长柱状、坚硬,均能满足水压致裂条件。水压致裂测试完成后,采用带定位方向的水下摄像头记录破裂的方向和裂缝长度。各钻孔地应力测试结果,如表 1 所示。

表 1 各钻孔地应力测试结果

Tab. 1 *In-situ* stress test results of each borehole

编号	隧道名称	h/m	压裂参数/MPa					主应力值/MPa			破裂方向
			$p_{c,1,g}$	$p_{c,2,g}$	$p_{s,1,g}$	p_w	σ_t	σ_{max}	σ_{min}	σ_v	
1	珠龙隧道	253.0	11.86	8.46	5.51	2.53	3.40	13.13	8.04	6.70	NW22°
		248.0	11.74	8.42	5.02	2.48	3.32	11.60	7.5	6.57	
		243.0	11.61	8.07	4.88	2.43	3.54	11.43	7.31	6.44	
2	如公尖隧道	184.0	11.31	9.34	5.51	1.84	1.97	10.87	7.35	4.88	NW19°
		179.0	10.77	8.04	5.15	1.79	2.73	10.99	6.94	4.74	
		174.0	10.75	7.97	5.11	1.74	2.78	10.84	6.85	4.61	
3	南山岗隧道	193.0	13.71	10.42	6.08	1.93	3.29	11.68	8.01	5.11	NW49°
		188.0	13.44	10.17	6.05	1.88	3.27	11.74	7.93	4.98	
		183.0	13.06	8.74	5.76	1.83	4.32	12.20	7.59	4.85	
4	麻田隧道	129.0	10.02	8.53	4.71	1.29	1.49	8.18	6.00	3.42	NW23°
		124.0	9.72	8.17	4.18	1.24	1.55	6.85	5.42	3.29	
		119.0	9.26	7.91	4.04	1.19	1.35	6.59	5.23	3.15	
5	龙溪隧道	128.0	8.34	6.45	4.12	1.28	1.89	8.47	5.40	3.39	NW36°
		123.0	9.52	7.37	4.12	1.23	2.15	7.45	5.35	3.26	
		118.0	8.47	6.75	3.87	1.18	1.72	7.22	5.05	3.13	
6	黄寮隧道	119.0	8.81	8.10	6.51	1.19	0.71	13.81	7.70	3.15	NW45°
		114.0	9.31	8.84	6.04	1.14	0.47	11.56	7.18	3.02	
		109.0	7.25	6.12	5.01	1.09	1.13	11.09	6.10	2.89	
7	和尚山隧道	235.0	11.62	9.12	5.01	2.35	2.50	10.61	7.36	6.23	NW24°
		230.0	10.41	6.94	4.47	2.30	3.47	11.07	6.77	6.10	
		225.0	9.77	7.41	4.08	2.25	2.36	9.33	6.33	5.96	
8	杨家山隧道	172.0	10.65	8.41	4.88	1.72	2.24	9.67	6.60	4.56	NW25°
		167.0	10.17	8.36	4.74	1.67	1.81	9.20	6.41	4.43	
		162.0	9.86	7.84	4.51	1.62	2.02	8.93	6.13	4.29	
9	四方岩隧道	169.0	11.32	8.97	4.45	1.69	2.35	7.76	6.14	4.48	NW34°
		164.0	11.12	8.54	4.11	1.64	2.58	7.07	5.75	4.35	
		159.0	11.03	8.11	3.87	1.59	2.92	6.68	5.46	4.21	
10	锣鼓山隧道	137.0	9.41	7.84	4.27	1.37	1.57	7.71	5.64	3.63	NW22°
		132.0	8.81	7.71	4.24	1.32	1.10	7.65	5.56	3.50	
		127.0	8.48	7.04	4.13	1.27	1.44	7.89	5.40	3.37	
11	罗坞隧道	282.0	11.23	10.07	4.77	2.82	1.16	9.88	7.59	7.47	NW23°
		277.0	10.47	9.14	4.43	2.77	1.33	9.69	7.20	7.34	
		272.0	9.91	8.77	4.21	2.72	1.14	9.30	6.93	7.21	

续表

Continue table

编号	隧道名称	h/m	压裂参数/MPa					主应力值/MPa			破裂方向
			$p_{c,1,g}$	$p_{c,2,g}$	$p_{s,1,g}$	p_w	σ_t	σ_{max}	σ_{min}	σ_v	
12	金光隧道	183.0	10.12	8.72	4.05	1.64	1.41	6.70	5.69	4.85	NW37°
		173.0	9.73	7.40	3.67	1.54	2.33	6.70	5.21	4.58	
		163.0	8.89	7.34	3.47	1.43	1.56	5.96	4.91	4.32	
13	高仔田1#隧道	169.0	10.74	9.15	6.05	1.37	1.59	11.74	7.42	4.48	NW45°
		160.0	9.86	7.88	5.01	1.28	1.98	9.71	6.29	4.24	
		150.0	8.99	7.45	4.96	1.18	1.54	9.79	6.14	3.98	
14	铁观音隧道	380.5	17.50	14.70	6.60	3.81	2.80	12.71	10.41	10.08	NW25°
		375.5	17.30	14.50	6.10	3.76	2.80	11.31	9.86	9.95	
		370.5	16.10	13.00	6.10	3.71	3.10	12.71	9.81	9.82	
15	仙灵旗隧道	503.0	11.32	9.72	3.07	5.03	1.60	9.55	8.10	13.33	NW25°
		495.0	11.12	8.86	3.01	4.95	2.26	10.07	7.96	13.12	
		487.0	10.47	8.77	2.89	4.87	1.70	9.64	7.76	12.91	
16	狮头山隧道	108.0	8.40	7.40	6.10	0.977	1.00	12.85	7.08	2.86	NW18°
		98.0	8.10	7.10	5.80	0.877	1.00	12.05	6.68	2.60	
		88.0	8.10	6.80	5.50	0.777	1.30	11.25	6.28	2.33	

4 测试结果与讨论

4.1 水平应力具有较强的方向性

由实测结果可知:深部岩体中的天然应力场具有明显的方向性,破裂方向位于 NW18°~NW45°;最大水平主应力与最小水平主应力比值为 0.55~0.85,这与华北地区的数据^[10] 基本接近。因此,东南沿海岩体中水平应力有强烈的方向性和各向异性,在成因历史过程中,受到明显的现代构造应力场的控制。

4.2 水平应力与深度的关系

水平主应力随深度的变化情况,如图 6 所示。由图 6 可知:该测试区域处于中、低地应力区域,应力状态较稳定。通常情况下,岩体中的水平应力随深度的增大而增大,文献[15-16]采用应力解除法和水压致裂法等进行统计,可得水平应力与深度的线性关系式,但也指出数据离散性较大。文中测试结果中,最小水平主应力与深度基本呈正相关关系,但最大水平主应力与深度的相关性较差。

4.3 水平应力普遍大于竖向应力

除仙灵旗隧道外,其他隧道的水平应力普遍大于竖向应力,最大水平应力与竖向应力的比值(侧压系数)一般为 0.72~4.83,多数大于 1.00,平均值为 2.16,表明该区域的最大水平主应力与竖向应力存在一定差异,水平应力作用较为明显,也说明该区域受到较大的水平构造应力控制。三向主应力的关系为 $\sigma_{max} > \sigma_{min} > \sigma_v$,该种形式应力对逆断层活动有利。

各地区侧压系数的对比,如图 7 所示。由图 7 可知:浙江省和福建省的统计结果与世界多数地区的数值基本接近。由此可知,在我国东南沿海地区,在深度 100 m 以下,水平构造应力作为主导,对逆断层活动有利。此外,需注意隧道设计时,过大的侧压系数也可能导致边墙部分承受较大的围岩压力^[17]。

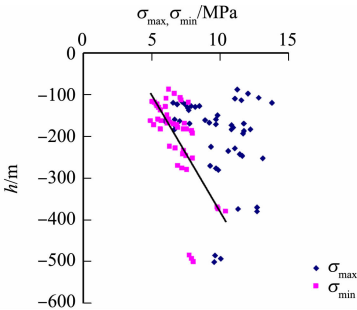


图 6 水平主应力随深度的变化情况

Fig. 6 Variation of horizontal principal stress with depth

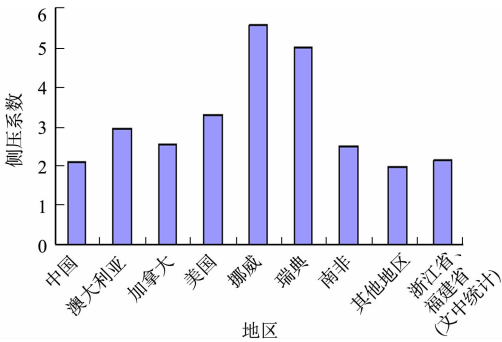


图 7 各地区侧压系数的对比

Fig. 7 Comparison of lateral pressure coefficients in different regions

4.4 测试注意事项

地应力的测试设备常较为笨重,需要的管路较多,如在仙灵旗隧道测试时,最大测试深度为 503.0 m,需要超过 1 000 m 的管路。管路在放入孔内和提升时,需注意管路与钢丝绳必须保持同步,否则,管路容易弯曲、折叠,被卡在孔壁上,因此,可以将管路与钢丝绳每隔 20~30 m 长度上用锁扣锁住,防止管路沿钢丝绳滑落。封隔器直径必须与孔径相适应,一般情况下,封隔器的直径有许多种类,直径过大,下放有时困难,直径过小,则可能影响封隔效果。文中装置封隔器直径为 68 mm,能够封隔 75,90 mm 的孔径。正常情况下,封隔器在 5~10 min 即可基本泄压完毕,但有时管路不慎出现弯曲折叠等问题,会影响封隔器泄压,地面上的压力表无法显示出封隔器内的压力,因此,封隔器的泄压尽量维持时间长一些,如果可行泄压时间做到 30 min 以上,若泄压不完全就提升封隔器,有可能被卡在孔壁上,无法提升,导致封隔器和管路等卡死在孔内。加上碎块状岩体可能出现塌块,地应力的测试存在被卡孔内的风险,建议若钻孔同时做其他测试,如波速、孔内摄像等,地应力测试最好放在最后进行。

5 结论

- 1) 新型双管水压致裂法地应力测试装置采用 C 型接头的双层钢丝高压胶管代替钻杆,密封效果良好,通过地面控制系统能够分别控制封隔段和压裂段进行加压、泄压,避免封隔段压力衰减的问题。
- 2) 我国东南沿海地区,深埋岩体中的天然应力场具有明显的方向性,破裂方向位于 NW18°~NW45°,最大水平主应力与最小水平主应力比值为 0.55~0.85。水平主应力随深度的增大而增大,最小主应力与埋深的正相关关系明显,但最大主应力与埋深的相关性较差。
- 3) 侧压系数一般为 0.72~4.83,大部分大于 1.00,平均值为 2.16,隧道设计时应注意侧压问题。

参考文献:

[1] 贺永胜,王启睿,刘恩来,等.深部岩体地应力分布及测试技术研究进展[J].防护工程,2021,43(4):71-78.

[2] 王金安,李飞.复杂地应力场反演优化算法及研究新进展[J].中国矿业大学学报,2015,44(2):189-205.

[3] 李飞,周家兴,王金安.基于稀少样本数据的地应力场反演重构方法[J].煤炭学报,2019,44(5):1421-1431.

[4] 吕情绪.保德煤矿地应力测试及分布特征分析[J].煤矿机械,2021,42(8):99-102.

[5] 蔡美峰.深部水压致裂地应力测量关键技术研究及其在万福煤矿超千米深部测量中的应用[D].北京:北京科技大学,2006.

[6] 马鹏,赵国平,张永永,等.锦屏超高压岩体水压致裂法地应力测试系统研制与应用[J].长江科学院院报,2012,29(8):58-61,66.

[7] 李金锁,彭华,马秀敏,等.水压致裂地应力测试方法在云南大理一丽江铁路隧道工程中的应用[J].地质通报,2006(5):644-648.

[8] 曾昭友.水压致裂法测试矿井软岩巷道地应力研究[J].煤炭科学技术,2012,40(12):31-34. DOI:10.13199/j.cst.2012.12.37.zengzhy.019.

[9] 赵国平,陈文华,马鹏,等.水压致裂法地应力测试在水电工程中的应用[J].长江科学院院报,2013,30(11):77-82.

[10] 郭文雕,王显军,杨树新.论述原地应力测量水压致裂法发展状况[J].决策探索(中),2018(11):34-36.

[11] 林旭东.水压致裂地应力测试法在煤矿底板突水预测中的应用[J].中国煤炭,2019,45(6):49-52. DOI:10.19880/j.cnki.ccm.2019.06.010.

[12] 邹爱清,韩晓玉,尹健民,等.一种新型绳索取芯钻杆内置式双管水压致裂地应力测试方法及其应用[J].岩石力学与工程学报,2018,37(5):1126-1133.

[13] 王海忠.单回路水压致裂原地应力测量系统的研制与应用[J].地壳构造与地壳应力文集,2004(增刊1):39-44.

[14] 邢博瑞.单孔三维水压致裂原位地应力测量应用研究[D].北京:中国地质大学(北京),2014.

[15] 景锋,胜谦,张勇慧,等.中国大陆浅层地壳实测地应力分布规律研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(10):2056-2062.

[16] 康红普,伊丙鼎,高富强,等.中国煤矿井下地应力数据库及地应力分布规律[J].煤炭学报,2019,44(1):30-40.

[17] 徐能雄,张彬,武雄,等.岩体力学[M].北京:地质出版社,2020.