

岩石 Kaiser 效应测定地应力场的试验研究

陈 强¹, 朱宝龙², 胡厚田¹

(1. 西南交通大学 地质工程系, 四川 成都 610031; 2. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: 用单轴压缩试验测试岩石 Kaiser 效应特征, 进而确定岩体地应力状态的方法, 在岩体工程实践中得到广泛的应用。由于运用 Kaiser 效应法测得的地应力值是新构造应力场最近时期的地应力, 对新建西安—南京铁路秦岭越岭地区采用岩石声发射的单轴压缩 Kaiser 效应法结合微构造法对其地应力场进行研究, 得出其现代地应力场总体方向为 NE 向、各测点处的地应力的具体方向及基本地应力值 15 MPa, 试验结果与实际情况基本吻合。

关键词: 岩石力学; Kaiser 效应; 地应力; 秦岭地区

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2006)07-1370-07

EXPERIMENTAL RESEARCH ON MEASUREMENT OF IN-SITU STRESS FIELD BY KAISER EFFECT

CHEN Qiang¹, ZHU Baolong², HU Houtian¹

(1. Department of Geological Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China)

Abstract: The in-situ stress of rock mass is determined by Kaiser effect of rock under uniaxial compression. This method is applied widely in rock mass engineering. Based on the recent in-situ stress field by Kaiser effect, direction of modern in-situ stress field, direction of in-situ stress in the location of samples and in-situ stress in the three directions are presented by Kaiser effect of rock under uniaxial compression and micro-fault research methodology in Qinling area along Xi'an—Nanjing Railway. Modern in-situ stress field is in the direction of northeast, and the in-situ stress gets up 15 MPa. The results by Kaiser effect are consistent with those of field test.

Key words: rock mechanics; Kaiser effect; in-situ stress; Qinling area

1 引言

岩体地应力是岩体工程最基本也是最重要的工程荷载, 它是进行岩体工程问题数值计算的初始条件之一, 也是分析工程岩体破坏和位移特征的基本因素^[1]。近年来, 随着我国铁路、公路、水利等大型基础建设项目相继上马, 工程建设项目场地及区域的构造应力场特征对工程项目的影 响已得到工程界人士的高度重视, 如何科学、经济、快速、可靠

地对建设区域进行构造应力场测试, 对越岭线路方案的确定, 预测施工时可能出现的工程地质、水文地质问题, 具有十分重要的现实意义。

一般由地质学、地震学、测量学方法可以求得现代地应力场的方向和近似应力值^[1, 2]。仪器量测方法如水压致裂法^[3, 4]、应力恢复法^[5]、应力解除法^[6]等, 也可以同时得到地应力的大小和方向, 但一般成本较高, 测试困难。

岩石声发射试验(Kaiser 效应试验)是材料在外力作用下的声学特性对其受力历史的记忆性。金属

收稿日期: 2005-02-25; **修回日期:** 2005-05-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50278081)

作者简介: 陈 强(1967-), 男, 博士, 1990年毕业于中国矿业大学工程地质专业, 现任副教授, 主要从事岩土体稳定性分析与加固方面的教学与研究工作。E-mail: chenqiang196701@163.com

材料的 Kaiser 效应记忆的是历史上受到的最大应力^[7]。Goodman 等曾对岩石材料进行试验,发现岩石的声学特性也具有对其受力历史的记忆性^[8]。后来,许多学者发现岩石材料的 Kaiser 效应在低应力范围(弹性范围)内具有近似的方向独立性,其记忆的最大应力不超过破坏应力的 50%^[9],在此基础上,可将 Kaiser 效应方法应用于岩体地应力的测试。

将 Kaiser 效应用于研究地应力开始于 20 世纪 70 年代^[10]。近年来利用岩石 Kaiser 效应确定岩体地应力的室内测试方法逐渐应用于工程实践中^[11, 12]。

对 Kaiser 效应的试验研究发现,岩石在 Kaiser 效应理论上不应具有多期性^[13]。与现场测试结果比较,岩石 Kaiser 效应也不像金属材料记忆的是历史上最大应力,而是现代地应力状态^[14]。研究发现,在计算地应力值时,可借助微构造法^[15]成果,最后计算出地应力的大小和方向。同时,研究认为,运用 Kaiser 效应法测得的岩石试样地应力值应该是新构造应力场最近时期的地应力。利用岩石声发射的 Kaiser 效应法实测现代地应力场的大小和方向,具有速度快、成本低、限制少等特点。

新建西安—南京铁路是横跨秦岭山脉的第三条铁路干线,线路穿过著名的秦岭 EW 向构造带。秦岭越岭地区自太古—元古代以来,经历过多次的强烈构造运动,褶皱构造、断裂构造极其发育,该区发育了几条区域性深断裂(F1, F1-1, F2, F3, F4 等),且近期具活动迹象。构造应力场特征对线路走向、长隧道方案、工程结构设计、工程施工方案等都具有显著影响。本文采取岩石声发射的单轴压缩 Kaiser 效应法对其地应力场进行研究,取得了明显的效果。

2 试验设计

2.1 试件

为了分析工作区现代地应力场特征,选用岩石 Kaiser 效应法测定现代地应力,为越岭方案提供更可靠的地应力定量参考值。在测区内 11 个测点上采集 11 组地表岩石定向试样(见图 1)。图 1 中 K1~K11 为岩石定向岩样测点编号,其中有 8 组试样与越岭线路比选方案邻近,同时,在区域上也具有一定的代表性,其物理力学特征见表 1。图中其余点为微构造观测点^[15]。

首先,恢复岩石毛样在大地坐标下的野外现场产状,然后以 Y 轴为北(N),在毛样上建立大地坐标 OXYZ。沿 6 个不同的方向切取 2.5 cm×2.5 cm×7.5 cm 的试件(如图 2 所示)。计算出定向岩样的 6 个切样方向在大地坐标下的方向余弦,每个方向切取 4~6 个试件,并对试件进行精磨以满足试验所要求的精度。

2.2 试验设备

试验所用加载设备,单轴试验采用成都理工大学地质灾害防治与工程地质环境保护国家专业实验室从美国引进的 MTS 数字程控试验机,所用的声发射检测系统是沈阳电子研究所研制的 AET400B 声发射测试系统与定位仪和传感器(频率为 120 kHz),试样加压及声发射接收、放大、处理系统如图 3 所示。

2.3 试验方法设计

在进行单轴压缩 Kaiser 效应的岩石加载和声发射检测前,在试件的上、下端面上各放置 2 层 0.5 mm 厚的聚四氟乙烯薄膜,以隔绝来自端面的噪声。声发射传感器置于试件相对的侧面上,传感器与试件之间涂上少量凡士林,作为耦合剂。门槛电压即阈值设置为 0.4 V,试验前对输出电压与荷载的关系进行标定,放大器增益设为 38 dB。

试验中,为避免速率变化可能触发的声发射事件,采用恒定的加载速率控制加载,以 0.2 和 0.3 MPa/s 为其加载速率(见图 4)。

3 试验结果及分析

3.1 地应力计算方法

通过试验测得的岩石单轴压缩声发射率对数累计-时间曲线如图 5 所示。由图 5 可见,岩石声发射率总数累计有明显的急增现象,其曲线一般有 2 个以上的急增点,即 Kaiser 效应点^[9]。有的试件第一个 Kaiser 效应点出现早,对应的应力较低,有的出现较晚,对应的应力高。利用 Kaiser 效应点对应的压力 P_R ,则有

$$\sigma_R = \frac{P_R}{F_R} \quad (1)$$

式中: F_R 为试件面积, $R = 1, 2, \dots, n_R$, n_R 为各组岩石试件总数。

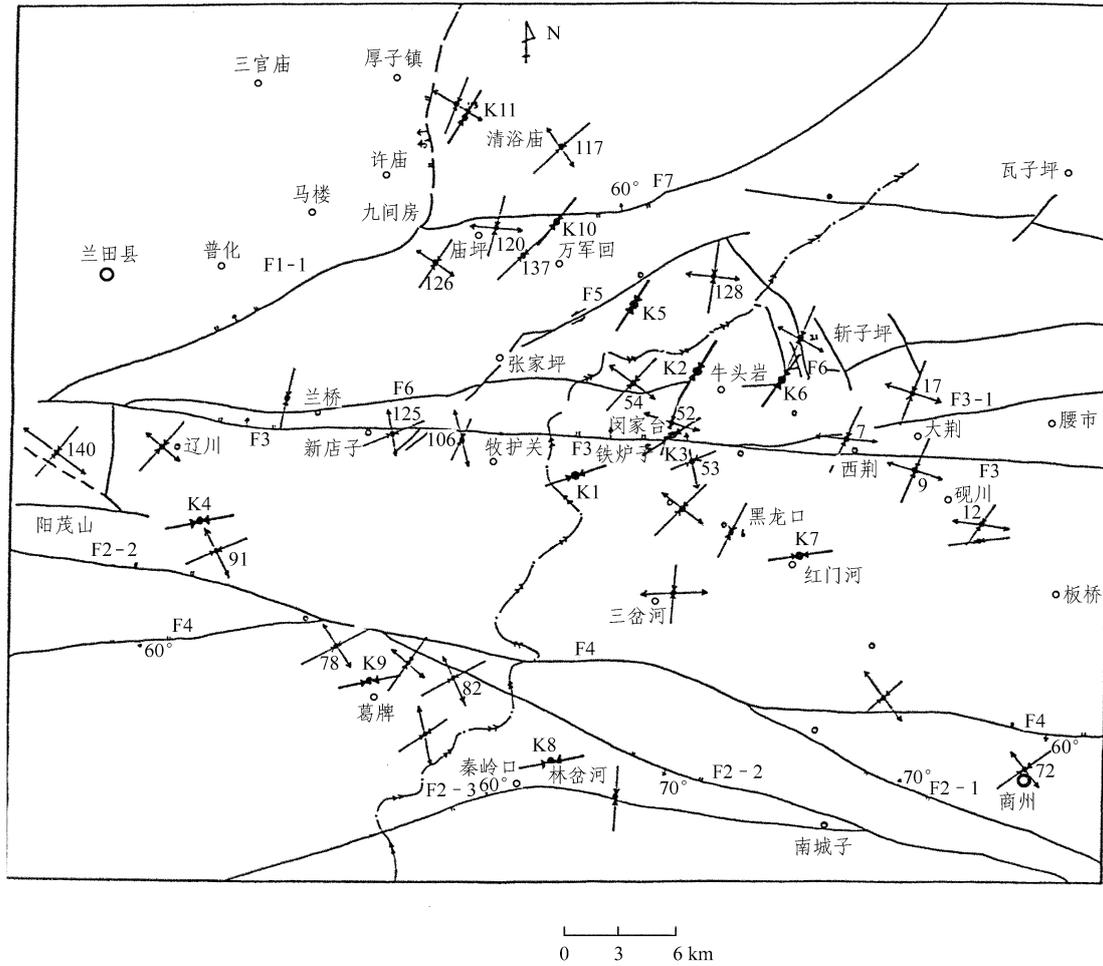


图 1 NE~SW 向地应力场方向特征图及试样采取位置示意图

Fig.1 Characteristic of in-situ stress field in the direction of NE - SW and sample location

表 1 试样的物理力学特征

Table 1 Physico-mechanical characteristics of samples

岩样测点编号	岩样名称	年代	天然容重/(kN · m ⁻³)	单轴抗压强度/MPa	裂隙发育情况	试件组数
K1	灰色石英片岩	Pt _{kn}	27.87	81.29	裂隙发育	2
K2	灰色细晶片岩	Є ₂	27.97	111.45	裂隙发育	2
K3	灰黑色花岗岩	γ ₅	29.23	124.03	微裂隙及晶面发育	1
K4	肉红色花岗岩	γ ₅	26.47	69.51	宏观裂隙及晶面发育	1
K5	深灰色花岗岩	γ ₂	27.10	77.10	微裂隙不发育	1
K6	深灰色白云岩	Є ₃	27.93	49.31	裂隙及晶面发育	2
K7	深灰色片岩	Pt _{kn}	25.84	23.15	裂隙发育	1
K8	白云质大理岩	Cm ₁	26.21	47.92	微裂隙发育	2
K9	角闪片麻岩	Pt _q	26.08	63.45	裂隙发育	2
K10	灰色片麻岩	γ ₅	26.77	78.82	微裂隙及晶面发育	2
K11	浅灰色花岗岩	γ ₅	25.74	87.29	微裂隙及晶面发育	1

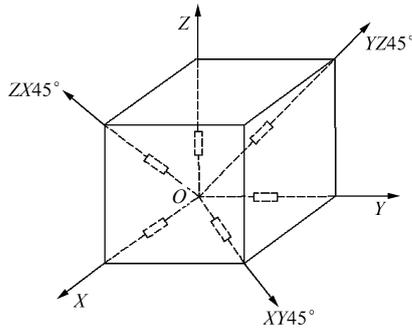


图 2 试件切取方向

Fig.2 Cutting direction of samples

同时, 有

$$\sigma_R = A_{R1}\sigma_X + A_{R2}\sigma_Y + A_{R3}\sigma_Z + A_{R4}\tau_{XY} + A_{R5}\tau_{YZ} + A_{R6}\tau_{ZX} \quad (2)$$

其中,

$$\left. \begin{aligned} A_{R1} &= l_{ij}^2 \\ A_{R2} &= m_{ij}^2 \\ A_{R3} &= n_{ij}^2 \\ A_{R4} &= 2l_{ij}m_{ij} \\ A_{R5} &= 2m_{ij}n_{ij} \\ A_{R6} &= 2n_{ij}l_{ij} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(2), (3)中: $\sigma_X, \sigma_Y, \tau_{XY}$ 及 τ_{ZX} 为大地坐标下的应力分量; l_{ij}, m_{ij}, n_{ij} 为各切样方向相应的方向余弦, i 为第 i 个测试方向 ($i = 1, 2, \dots, 6$), j 为 i 方向的第 j 个试件 ($j = 1, 2, \dots, m_R$), m_R 为各方向试件数。

式(2)的矩阵形式为

$$[A]\{\sigma\} = \{\sigma\}_R \quad (4)$$

式中: $\{\sigma\}$ 为 6 个应力分量组成的列阵, $\{\sigma\}_R$ 为 σ_R 构成的列阵, $[A]$ 为 $m_R \times 6$ 阶系数矩阵。

采用最小二乘法可得到计算 $\{\sigma\}$ 的正规方程如下:

$$[B]\{\sigma\} = \{C\} \quad (5)$$

则有

$$\sigma_1 = 2\sqrt{\frac{-P}{3}} \cos \frac{\omega}{3} + \frac{1}{3}J_1 \quad (6)$$

$$\sigma_2 = 2\sqrt{\frac{-P}{3}} \cos \frac{\omega + 2\pi}{3} + \frac{1}{3}J_1 \quad (7)$$

$$\sigma_3 = 2\sqrt{\frac{-P}{3}} \cos \frac{\omega + 4\pi}{3} + \frac{1}{3}J_1 \quad (8)$$

主应力 σ 的仰角 α 及方位角 β 由下式计算得到:

$$\alpha_i = \arcsin n_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (9)$$

$$\beta_i = \arccos(m_i / \cos \alpha_i) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (10)$$

式(6)~(10)中: P, J_1, n_i, m_i 均为与 $\sigma_X, \sigma_Y, \sigma_Z, \tau_{XY}, \tau_{YZ}, \tau_{ZX}$ 有关的参数。

3.2 结果分析

按照节 3.1 的试验资料整理方法对试验数据进行计算分析, 同时参照微构造法^[15]获得的应力场结果作为 Kaiser 效应的地应力方向的参考值, 得到的地应力场结果见表 2。从表 2 及图 1 中可以得到如下结论。

3.2.1 地应力方向

(1) 工作区现代地应力总体方向为 NE 向。以 F3 断层为界, 又可分为南、北两区, F3 断层以北的主应力方位为 NEE~NE 向, F3 断层以南为 NE~NEE 向。从总体上看, 由北往南主应力方位由 NNE 向 NEE 向转变。

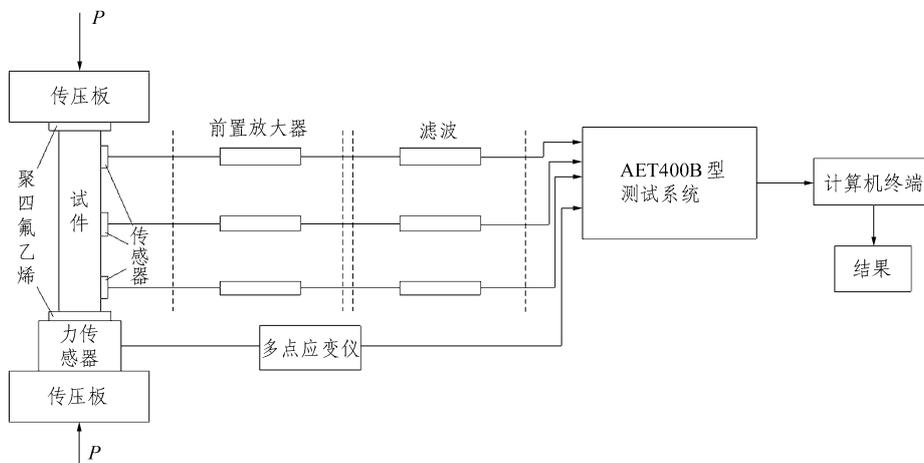


图 3 岩石加载及声发射监测系统示意图

Fig.3 System of loading and monitoring of acoustic emission

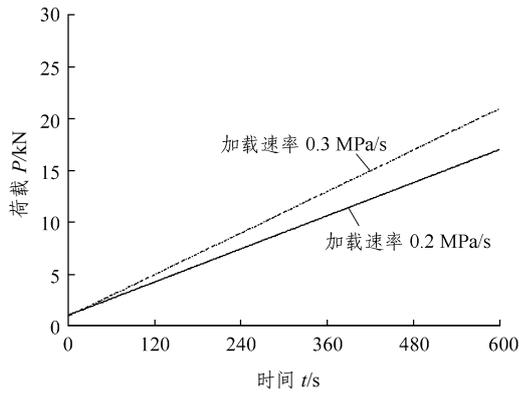


图 4 Kaiser 试验加载速率曲线

Fig.4 Curves of loading velocity in Kaiser test

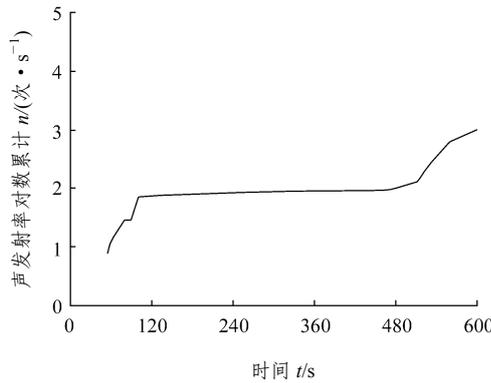


图 5 岩石单轴压缩声发射率对数累计 - 时间曲线

Fig.5 Acoustic emission logarithmic accumulation-time curve of rock under uniaxial compression

(2) 当测点位于 EW 向或 SEE 向延伸的断层附近时, 测点上的应力方向显示向东偏转的特点, 如 K8, K9, K1 和 K10 测点。

(3) 当测点位于 NE 向延伸的断层之间的断块内部时, 主应力方位多显示为 NNE 向, 如 K5, K2, K6 测点。

(4) 当测点位于近 EW 向或 SEE 向延伸的断层之间的断块内部时, 其主应力方向多显示为 NEE 向, 如 K7, K3, K4 测点。

3.2.2 地应力值大小

(1) 工作区的基本应力值在 15 MPa 左右, 显示相对较高的应力水平。这是因为工作区位于秦岭山区, 是现代地壳的隆起区, 现代地应力测量结果表明, 地壳表面的隆起区为高水平应力区, 而盆地(裂谷)为低水平应力区。

(2) 从总体上看, 测点越靠近北部渭河盆地, 地应力值就越低, 向南至工作区中、南部, 应力值增高。如 K10, K11 测点, 距渭河盆地最近, 其应力值也是 11 个测点中最低的 2 个, 反映出由渭河盆地低地应力区向秦岭高应力区过渡的特点。

(3) 当测点位于断层附近时, 应力值相对较低, 位于断块内部时, 应力值相对较高, 如 K5, K8 测点应力值较低, 而 K2, K6 测点应力值较高, 由于

表 2 岩石 Kaiser 试验所得主应力
Table 2 Principal stresses in Kaiser test on rock

岩样 测点 编号	岩样 名称	岩样地 理位置	试件数 /个	σ_1			σ_2			σ_3		
				应力值 /MPa	方位/(°)	倾角/(°)	应力值 /MPa	方位/(°)	倾角/(°)	应力值 /MPa	方位/(°)	倾角/(°)
K1	灰色石 英片岩	沙台子	29	15.37	72.40	8.90	7.30	-32.90	-59.40	4.10	-12.60	29.10
K2	灰色细 晶片岩	牛头岩	32	19.50	33.00	8.50	10.10	-31.90	73.10	0.80	-59.10	-14.50
K3	灰黑色 花岗岩	杨家沟	35	12.50	81.10	7.80	7.00	-11.40	-17.60	2.50	14.10	-70.70
K4	肉红色 花岗岩	董家岩	28	18.80	79.40	15.00	13.50	-1.20	31.60	10.50	-32.40	-54.30
K5	深灰色 花岗岩	碾子沟	33	15.60	31.90	8.80	10.80	-57.30	5.300	8.90	63.50	-79.70
K6	深灰色 白云岩	高扒	36	15.91	36.28	19.13	11.14	-61.42	-41.24	7.45	-41.19	66.19
K7	深灰色 片岩	红门河	26	14.97	83.65	16.88	6.68	-7.29	-3.11	0.39	72.56	-72.82
K8	白云质 大理岩	东沟口	32	15.01	57.69	7.07	12.44	23.46	34.47	9.93	-44.37	-73.07
K9	角闪片 麻岩	苏家沟 口	30	17.17	82.92	11.37	9.68	-21.52	-74.27	2.39	-5.08	12.75
K10	灰色片 麻岩	胡家沟 口	31	10.82	51.40	4.77	8.56	-30.00	61.80	7.12	-41.47	-27.72
K11	浅灰色 花岗岩	翻山村	30	11.14	58.89	14.19	9.58	7.42	-67.91	8.96	-35.43	-16.57

注: 岩样取样深度为近地表, 方位角顺时针为正, 逆时针为负; 倾角以仰角为正, 俯角为负。

秦岭山区断裂带一般为张性或张扭性断裂, 所以地应力表现出释放的特点。

3.2.3 地应力性质

通过对岩样的声发射试验分析可知, 根据以下几个原因可以认为, 岩石 Kaiser 效应试验结果为现代地应力:

(1) 地应力大小和方位在平面分布上具有较强的规律性, 各测点上测得的地应力比值 R ($R = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\sigma_3 - \sigma_1)$) 与附近微断层测点上计算获得的应力比值 R 具有较好的可比性, 也与附近断层的活动性一致。由 R 值的变化可以看出应力作用的性质和强度, R 值越大, 表明 σ_1 起主导作用, 应力差决定构造变形。本区各测点上 R 值的变化特征如下:

① 当测点近于断层时, R 值相对较高, 断层活动强度大, 近旁的测点 R 值也相对较大, 如 K10, K11 测点位于 F1 断层附近, 有较大的 R 值, 另外 K5, K3 和 K1 等测点 R 值也较大, 其断层的活动强度也大。

② 测点位于断块中心部位, 其 R 值较低, 如 K2 测点虽然其应力值是 11 个测点中最高的, 但其 R 值却最低, 与其位于构造相对稳定区有很好的对应关系。

③ K4 测点虽距各活动断层有一定距离, 但它距几条强活动断裂交汇带较近, 因而 K4 测点有较高的 R 值, 其附近的微断层测点 $q - 90 \sim q - 95$ 位于相对较新的 γ_5 年代, 它们的 R 值与 K4 测点的 R 值相当, 较好地反映了这一特定构造部位具有较强的构造活动性。

(2) 据万天丰^[16]的研究, 地应力积累时间一般为 $n \times 10^7$ a, 而应力释放时间一般为 $n \times 10^6$ a。K. Michihiro 等^[14]认为花岗岩、凝灰岩记忆的是现代地应力。

(3) 本次采用与声发射方法相结合的形式测量地应力的结果, 与实际情况比较吻合。就所测定的应力值水平而言, 与前人在华县用其他方法实测地应力结果 N34°E, 19.1 MPa^[17]相当。

4 结 论

(1) 运用 Kaiser 效应法测得的地表岩石试样的地应力值应该是新构造应力场最近时期的地应力。岩石声发射的 Kaiser 效应法实测现代地应力场的大小和方向, 具有速度快、成本低、限制少等特点。

(2) 岩石声发射率时间曲线上一般有 2 个以上的急增点, 即 Kaiser 效应点。试件第一个 Kaiser 效应点出现早, 对应的应力对数累计较低; 出现较晚, 则对应的应力高。

(3) 通过对秦岭越岭地区进行岩石声发射的单轴压缩 Kaiser 效应试验, 得出其现代地应力场总体方向为 NE 向, 以及各测点处的地应力的具体方向; 基本应力值在 15 MPa 左右, 显示相对较高的应力水平, 当测点位于断层附近时, 应力值相对较低, 位于断块内部时, 应力值相对较高。

(4) 通过岩石单轴压缩 Kaiser 效应测定的地应力值, 与实际情况基本吻合。

致谢 感谢邓荣贵教授及付小敏工程师在试验中提供的帮助!

参考文献(References):

- [1] 蔡美峰, 乔 兰, 李华斌. 地应力测量原理和技术[M]. 北京: 科学出版社, 1995.(Cai Meifeng, Qiao Lan, Li Huabin. Principle and Technique of In-situ Stress Measurement[M]. Beijing: Science Press, 1995.(in Chinese))
- [2] Amadei B, Stephansson O. Rock Stress and Its Measurement[M]. London: Chapman and Hall, 1997.
- [3] 王建军. 应用水压致裂法测量三维地应力的几个问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 229 - 233.(Wang Jianjun. Several problems in application of hydraulic fracturing method to in-situ 3D stress measurement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2): 229 - 233.(in Chinese))
- [4] 刘允芳. 水压致裂法地应力测量的校核和修正[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3): 297 - 304.(Liu Yunfang. Check and modification for geostress measurement by hydraulic fracturing technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(3): 297 - 304.(in Chinese))
- [5] 靳晓光, 王兰生, 李晓红. 地下工程围岩二次应力场的现场测试与监测[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 651 - 653.(Jin Xiaoguang, Wang Lansheng, Li Xiaohong. Site testing and monitoring of induced stress field in surrounding rocks of underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(5): 651 - 653.(in Chinese))
- [6] 蔡美峰, 乔 兰, 于 波, 等. 梅山铁矿地应力测量结果及其分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(3): 233 - 239.(Cai Meifeng, Qiao Lan, Yu Bo, et al. Results and analysis of in-situ stress measurement in Meishan iron mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(3): 233 - 239.(in Chinese))

- [7] Kaiser E J. A study on acoustic phenomena in tensile test[Ph.D. Thesis][D]. Munchen: Technische Hochschule, 1959.
- [8] 樊运晓, 吕建国. 现代力学测试技术[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1998.(Fan Yunxiao, Lu Jianguo. Modern Testing Technique of Mechanics[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1998.(in Chinese))
- [9] 秦四清, 李造鼎, 张倬元, 等. 岩石声发射技术概论[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1993.(Qin Siqing, Li Zaoding, Zhang Zhuoyuan, et al. Introduction to Acoustic Emission Technology of Rock[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1993.(in Chinese))
- [10] Tanimoto K, Nakamura J, Fudo R. Application of acoustic emission in in-situ test[A]. In: Proceedings of the 10th Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1978. 573 - 576.
- [11] 张广清, 金 衍, 陈 勉. 利用围压下岩石的凯泽效应测定地应力[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 360 - 363.(Zhang Guangqing, Jin Yan, Chen Mian. Measurement of in-situ stress by Kaiser effect under confining pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(3): 360 - 363.(in Chinese))
- [12] 李造鼎, 宋纳新, 秦四清. 应用岩石声发射凯塞效应测定地应力[J]. 东北大学学报(自然科学版), 1994, 15(3): 248 - 252.(Li Zaoding, Song Naxin, Qin Siqing. Measurement of geostress with Kaiser effect of acoustic emission[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 1994, 15(3): 248 - 252.(in Chinese))
- [13] Yoshikawa S, Mogi K. A new method for estimation of the crustal stress from cored rock samples: laboratory study in the case of uniaxial compression[J]. Tectonophysics, 1981, 74: 323 - 339.
- [14] Michihiro K, Hata K, Fujiwara T, et al. Study on estimating initial stress and predicting failure on rock masses by acoustic emission[A]. In: Rock at Great Depth[C]. Rotterdam: A.A. Balkema, 1989. 1 025 - 1 032.
- [15] 陈 强, 朱宝龙, 王 鹰, 等. 秦岭越岭长隧道地区构造应力场特征分析[J]. 中国铁道科学, 2004, 25(1): 76 - 80.(Chen Qiang, Zhu Baolong, Wang Ying, et al. Analysis of features of regional tectonic stress field in the area of the long-tunnel through Qinling Mountain[J]. China Railway Science, 2004, 25(1): 76 - 80.(in Chinese))
- [16] 万天丰. 构造应力场研究的新进展[J]. 地学前缘, 1995, 2(1/2): 226 - 235.(Wan Tianfeng. The progress of researches on tectonic stress field[J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(1/2): 226 - 235.(in Chinese))
- [17] 刘国昌. 区域稳定工程地质[M]. 长春: 吉林大学出版社, 1993.(Liu Guochang. Regional Stable Engineering Geology[M]. Changchun: Jilin University Press, 1993.(in Chinese))