

DOI: 10.11779/CJGE201912012

Kaiser 效应方向独立性的控制参数理论分析

傅 翔^{1, 2, 3}, 班宇鑫⁴, 谢 强^{*4}, 江小城⁴

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400047; 2. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400047; 3. 长江水利委员会
长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010; 4. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400044)

摘要: 基于 Kaiser 效应由裂纹扩展释放弹性波的认识, 当远场应力为压应力时, 从断裂力学角度对 Kaiser 效应随加载方向变化规律进行了分析, 建立了临界应力 σ_c 与裂纹面方向夹角 β 、裂纹面摩擦系数 f 的理论联系, 揭示了 Kaiser 效应方向独立性机理及其控制参数。结果表明: Kaiser 效应方向独立性受临界应力相对值影响, 其控制参数为初始加载方向与微裂纹面方向的夹角 β_i 、裂纹面的摩擦系数 f 。夹角 β_i 越大, FR 值大于 1.1 所需加载偏转相对角度 γ 越小, 加载方向偏转后所得应力与初始加载应力相差越大, Kaiser 效应方向独立性越明显, 即 Kaiser 效应测量初始应力精度与岩体初始微裂纹分布有关。摩擦系数 f 越小, FR 值大于 1.1 所需加载偏转相对角度 γ 越大, 加载方向偏转后所得应力和初始加载应力相差越小, Kaiser 效应方向独立性越不明显, 即岩样如越湿润, Kaiser 效应测试初始应力结果离散性越大。以上结论与既有试验在变化规律上具有一致性, 并通过特征曲线对比确定了试验控制参数为微裂纹面摩擦系数 f 小于 0.5、初始加载方向与微裂纹面方向夹角 β_i 在 $30^\circ \sim 40^\circ$ 之间, 这均与试验条件较为吻合。以上结论可为进一步研究 Kaiser 效应机理提供参考。

关键词: Kaiser 效应; 裂纹扩展; 方向独立性; 临界应力相对值

中图分类号: TU459 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)12-2272-09

作者简介: 傅 翔(1982—), 男, 重庆人, 博士, 主要从事与岩土工程相关的科研工作。E-mail: fmsx2000@163.com。

Theoretical analysis of controlling parameters of direction independence of Kaiser effect

FU Xiang^{1, 2, 3}, BAN Yu-xin⁴, XIE Qiang⁴, JIANG Xiao-cheng⁴

(1. Hehai School, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400047, China; 2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400047, China; 3. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of the Ministry of Water Resources, Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China; 4. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Based on the acknowledgement that the Kaiser effect is induced by the released elastic wave of crack propagation when the far-field stress is a compressive one, the variation of the Kaiser effect with loading direction is analyzed from the perspective of fracture mechanics. The theoretical relationship among the critical stress σ_c , the direction of the crack surface β and the friction coefficient f of the crack surface is established. The mechanism of the direction independence of the Kaiser effect and its control parameters are revealed. The results show that the direction independence of the Kaiser effect is affected by the relative value of the critical stress, and the control parameters include the angle between the initial loading direction and micro-crack surface β_i and the crack surface friction coefficient f . When the angle β_i is larger, the relative angle of loading deflection γ is smaller to keep FR value greater than 1.1. There is greater difference between the stress obtained after the deflection of the loading direction and the initial loading stress, and the direction independence of Kaiser effect is more obvious. The accuracy of the initial stress measured by the Kaiser effect is related to the distribution of the initial microcrack of the rock mass. The smaller the friction coefficient f , the larger the relative angle γ required for the FR value to be greater than 1.1, and the smaller the difference between the measured stress and the initial loading stress after the deflection, the less obvious the independence of the Kaiser effect. The wetter the rock sample, the greater the dispersion when measuring the initial stress with Kaiser effect. The above

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0407002); 重庆市科委项目(cstc2019jcyj-msxm2176); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201800745, KJQN201802501); 国内内河航道整治工程技术研究中心暨水利水运工程教育部重点实验室开放基金项目(SLK2018B04)

收稿日期: 2018-11-01

*通讯作者(E-mail: xieqiang2000@163.com)

conclusions are consistent with the rules of the previous test results. By comparing the characteristic curves, the control parameters are established: friction coefficient on the microcrack surface is less than 0.5, the angle between the initial loading direction and the microcrack surface is about $30^\circ \sim 40^\circ$, which agrees well with the test conditions. They can provide references for further studies on the mechanism of the Kaiser effect.

Key words: Kaiser effect; crack propagation; direction independence; relative value of critical stress

0 引 言

重大地下工程的安全建设与风险管理是当前国际岩土力学与工程界最为关注的前沿问题,也是我国未来需要重点研究的关键问题,工作之一就是需加强快速、准确的地应力测量新方法和新技术的研究^[1]。矿产开采、水利水电、土木建筑、铁道、公路和其他各种露天或地下岩石开挖工程的设计与建设,都需要获得可靠的现场岩体三维地应力资料。利用岩石 Kaiser 效应原理测量地应力,相比传统方式更简单、快捷、经济,同时还能测量其他方法均不适合的盐膏岩地应力^[2],成为岩石地应力测量中的一种重要方法。

在应用 Kaiser 效应测定地应力过程中, Kaiser 效应的方向独立性是 Kaiser 效应应用于地应力测试中的基本前提。但岩芯钻取方向往往不是现场主应力方向,试验加载方向和现场实际受力方向的偏差,是否对 Kaiser 效应产生影响(方向性问题),将直接关系到测试地应力的精确性和可信度^[12]。为此,很多学者针对不同类型岩石试样的 Kaiser 效应方向性问题,展开了大量的试验研究,得出了不同结论。^①加载方向偏转 90° Kaiser 效应存在方向独立性的观点。卢兴宇^[3]分别用花岗岩和水泥砂浆进行了 Kaiser 效应方向独立性试验,结果表明 Kaiser 效应在垂直的两个方向上互不影响、独立存在。Mihihiro^[4]、Stuart 等^[5]、Hsieha 等^[6]获得了同样的结论。^②加载方向偏转 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间 Kaiser 效应有条件存在方向独立性的观点。Holcomb 等^[7]对整块 Westerly 花岗岩先进行单轴压缩预压,卸压后在这块花岗岩中的不同方向钻取小岩芯,然后对这些小岩芯加载观察 Kaiser 效应,试验结果表明当偏角 $\theta > 10^\circ$ 时则将观察不到 Kaiser 效应,而当偏角 $\theta < 10^\circ$ 时还能观察到 Kaiser 效应,说明第二次加载方向与第一次加载方向的偏转角对 Kaiser 效应有较大影响。Lavrov 等^[8]、阎南^[9]、谢强等^[10-11]、傅翔等^[12]获得了同样的结论,但在可观察到 Kaiser 效应的界限偏角取值上有区别。^③加载方向偏转不存在方向独立性。张大伦^[13]对 5 块岩石试样进行了三轴预压,然后分别从与试件轴向成 0° 、 45° 和 90° 等方向上取 21 个试样,实验结果证实各试样的都有两个 Kaiser 效应点(K_1 , K_2), K_1 对应压力较低的围压, K_2 对应加载值较大的轴压,而当在 $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ 的三维预加

载情况下,从任意方向取样均能反映三维最大主应力值,表明加载偏转方向 Kaiser 效应不存在独立性。

由此可见, Kaiser 效应方向独立性并无定论,与方向偏转角度直接相关。不过通过大量利用声发射方法测量地应力结果与水压致裂法、应力解除法等地应力测量结果对比发现,其测量结果基本相符合,但有偏差^[14-18],说明 Kaiser 效应方向独立在实践上具备独立性,且具有一定条件,但限制条件尚不明确。为弄清 Kaiser 效应方向独立机理,部分学者从理论角度对 Kaiser 效应的方向独立问题进行了探讨,方亚如^[19]对济南辉长岩与房山大理岩进行了双轴压缩试验,就 Kaiser 效应方向独立的裂纹演化问题作出了初步假设,认为当应力水平较低时,微破裂尺度不大,各方向微裂纹可以独立发展,产生对各方向应力历史的独立记忆。其后黄润秋等^[20]也得出了近似结论。邓荣贵等^[21]根据格里菲斯理论的空间问题,对 Kaiser 效应方向独立性进行了初步探讨,提出了一个反映各向异性的 Griffith 模型,并从理论上得出只有当先前主应力方向与试验时主应力方向一致时,方向独立性才成立的结论。Lavrov^[22]综述了 2003 年前的 Kaiser 效应试验和理论研究成果,表明 Kaiser 效应方向独立与微裂纹的竞争起裂机制有直接联系。李庶林等^[23]提出 Kaiser 效应来源于岩石材料受力过程中,其内部原生裂纹和天然缺陷的扩展,以及新微破裂孕育、萌生、演化、扩展和断裂时弹性波的释放。可以发现,目前关于 Kaiser 效应方向独立机理研究均为定性和描述性判断,虽然提出了 Kaiser 效应方向独立机理与裂纹演化机理相关,但并无定量结论。

因此,本文基于 Kaiser 效应由裂纹扩展释放弹性波的认识,运用断裂力学原理,从加载方向偏转下裂纹演化特性的角度展开研究,得出了远场应力为压应力时,加载方向对 Kaiser 效应的影响规律及原因。揭示了 Kaiser 效应方向独立性机理与控制参数。

1 Kaiser 效应点的裂纹扩展判别方法

由于 Kaiser 效应产生的原因是裂纹的形成和扩展,而裂纹扩展的能量明显高于裂纹形成的能量,因此,本文假定 Kaiser 效应由裂纹扩展引起。

如图 1 所示,对于远场应力为压应力时的 II 型裂

纹, 当远场应力方向与裂纹面夹角发生改变, 裂纹开展所需远场应力将随之变化, 使不同夹角的裂纹开裂应力增大(减小), 即增强(减弱)裂纹开裂难度, 导致产生声发射点的所需外部荷载变化, 影响了 Kaiser 效应反应先期荷载值的准确度。因此, Kaiser 效应的方向性问题实质就是方向旋转前后裂纹难度的问题, 并且可以通过临界应力相对值来对开裂难度作量化。

由此, 本文借助断裂力学方法, 以建立远场应力为压应力时, 方向偏转前后的裂纹扩展临界应力相对关系方程, 对单一受压条件下的 Kaiser 效应方向性问题进行分析, 并与文献已有实验结论进行对比, 评价理论方法的合理性。

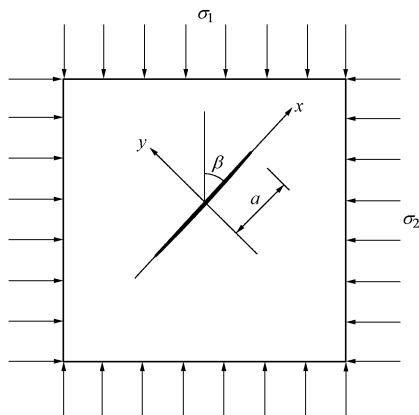


图 1 远场应力受力分析图

Fig. 1 Mechanical analysis of compressive stress in far field

2 临界应力与加载方向的关系

2.1 裂纹扩展模型

建立直角坐标系 xoy , x 轴与裂纹方向平行, y 轴与裂纹中垂线重合, 如图 1。考察无限大线弹性平板内的一条尺度 $2a$ 的 Griffith 裂纹, 边缘受到均匀双轴压力 σ_1 和 σ_2 作用, 裂纹方向和 σ_1 作用方向的夹角为 β , 由应力分量的坐标变换, 远场的应力状态为(依据弹性力学原理, 其中计算单元远场剪应力为 0, 即远场剪应力部分公式为 0):

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xx} &= \sigma_1 \cos^2 \beta + \sigma_2 \sin^2 \beta \\ \sigma_{yy} &= \sigma_1 \sin^2 \beta + \sigma_2 \cos^2 \beta \\ \tau_{xy} &= (\sigma_1 - \sigma_2) \sin \beta \cos \beta \end{aligned} \right\} . \quad (1)$$

于是裂纹面受到的远场剪应力为 $\tau_\infty = \tau_{xy}$, 正应力为 $\sigma_N = \sigma_{yy}$ 。受压属于 II 型裂纹, $K_I = 0$ 。又考虑到裂纹面上作用有摩擦力 τ_f , 所以裂纹表面受到等效剪应力为 $\tau_e = \tau_\infty - \tau_f$ 。进一步的分析应考虑到事实上闭合裂纹面上的摩擦力 $\tau_f(x)$ 并不是均匀分布的。在这里引入等效摩擦力 $\bar{\tau}_f$, 它是 $\tau_f(x)$ 在整个裂纹面上积分意义上的平均。同时, 引入等效摩擦系数 f , 则

$$\bar{\tau}_f = f \sigma_N = f(\sigma_1 \sin^2 \beta + \sigma_2 \cos^2 \beta) , \quad (2)$$

于是等效剪应力为

$$\begin{aligned} \tau_e &= \tau_\infty - \bar{\tau}_f \\ &= \tau_{xy} - f \sigma_{yy} \\ &= \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{2} \sin 2\beta - f(\sigma_1 \sin^2 \beta + \sigma_2 \cos^2 \beta) . \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{裂纹端部的应力强度因子为 } K_{II} &= \tau_e \sqrt{\pi a} , \text{ 或} \\ K_{II} &= \left\{ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{2} \sin 2\beta - f(\sigma_1 \sin^2 \beta + \sigma_2 \cos^2 \beta) \right\} \sqrt{\pi a} . \end{aligned} \quad (4)$$

单轴压应力作用下, 令 $\sigma_1 = \sigma$, $\sigma_2 = 0$, 则

$$K_{II} = \frac{1}{2} \sigma [\sin 2\beta - f(1 - \cos 2\beta)] \sqrt{\pi a} . \quad (5)$$

2.2 临界应力

临界应力为 σ_c , 材料断裂准则为 $K_{II} = K_{Ic}$, 定义含裂纹材料的抗脆断能力为 $\sigma_c \sqrt{a}$, 可得

$$\sigma_c = \frac{2K_{Ic}}{\sqrt{\pi a} [\sin 2\beta - f(1 - \cos 2\beta)]} . \quad (6)$$

其中 K_{Ic} 是材料常数, 而 σ_c 是 f 和 β 的函数, $\sigma_c = \sigma_c(f, \beta)$ 。假设 $K_{Ic} = 1$, $a = 1$, 裂纹角 β 以角度值表示, 摩擦系数 f 取值范围为 [0, 1]。计算结果如表 1 所示, 三者间的关系如图 2, 3 所示。

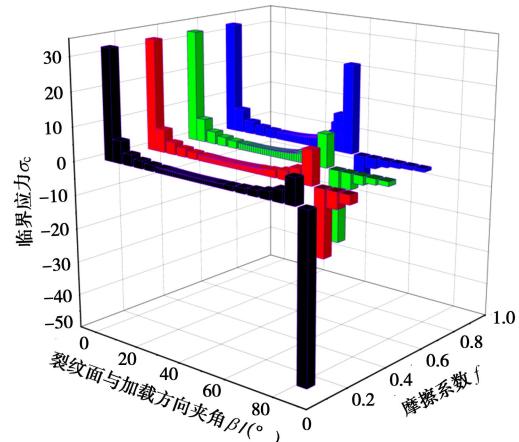


图 2 临界应力 σ_c 分布三维图

Fig. 2 Three-dimensional distribution of critical stress σ_c

(1) 如表 1 和图 1 所示, 临界应力 σ_c 受裂纹面方向与临界应力方向夹角 β 、裂纹面摩擦系数 f 的变化影响较大, 变化趋势呈现非线性特征, 空间分布呈现缓变和突变两区。在摩擦系数 f 相同的情况下, 随着夹角 β 的变化, 临界应力 σ_c 差异会达到数倍, 甚至数十倍, 变化呈现不连续分布。也就是说, 加载方向发生改变, 再次加载所需临界应力将同步改变(增大或减小), 裂纹开展难度变难或变易, 这将导致再次加载 Kaiser 点对应的应力值变大或变小, 影响 Kaiser 点

表 1 临界应力 σ_c 计算结果Table 1 Calculated results of critical stress σ_c

| β 角 | $f=0.1$ | $f=0.3$ | $f=0.5$ | $f=0.7$ | β 角 | $f=0.1$ | $f=0.3$ | $f=0.5$ | $f=0.7$ |
|-----------|---------|---------|---------|---------|-----------|---------|---------|---------|---------|
| 1 | 32.45 | 32.56 | 32.68 | 32.79 | 40 | 1.25 | 1.53 | 1.98 | 2.78 |
| 5 | 6.57 | 6.69 | 6.81 | 6.93 | 41 | 1.25 | 1.54 | 2.02 | 2.91 |
| 10 | 3.36 | 3.49 | 3.62 | 3.77 | 42 | 1.25 | 1.56 | 2.07 | 3.07 |
| 15 | 2.32 | 2.46 | 2.61 | 2.78 | 43 | 1.25 | 1.57 | 2.12 | 3.26 |
| 25 | 1.55 | 1.72 | 1.92 | 2.19 | 44 | 1.25 | 1.59 | 2.18 | 3.48 |
| 26 | 1.51 | 1.68 | 1.90 | 2.18 | 45 | 1.26 | 1.61 | 2.26 | 3.76 |
| 27 | 1.47 | 1.65 | 1.87 | 2.17 | 46 | 1.26 | 1.64 | 2.34 | 4.10 |
| 28 | 1.44 | 1.62 | 1.86 | 2.17 | 47 | 1.27 | 1.67 | 2.44 | 4.53 |
| 29 | 1.41 | 1.60 | 1.84 | 2.18 | 48 | 1.28 | 1.70 | 2.55 | 5.09 |
| 30 | 1.39 | 1.58 | 1.83 | 2.19 | 49 | 1.29 | 1.74 | 2.68 | 5.84 |
| 31 | 1.36 | 1.56 | 1.83 | 2.21 | 50 | 1.32 | 1.83 | 3.01 | 8.47 |
| 32 | 1.34 | 1.55 | 1.83 | 2.23 | 51 | 1.33 | 1.89 | 3.23 | 11.10 |
| 33 | 1.32 | 1.54 | 1.83 | 2.27 | 55 | 1.40 | 2.10 | 4.19 | 26.02 |
| 34 | 1.31 | 1.53 | 1.84 | 2.31 | 60 | 1.58 | 2.71 | 9.66 | -6.18 |
| 35 | 1.29 | 1.52 | 1.85 | 2.36 | 65 | 1.88 | 4.12 | -20.86 | -2.95 |
| 36 | 1.28 | 1.52 | 1.87 | 2.42 | 70 | 2.42 | 9.90 | -4.73 | -1.91 |
| 37 | 1.27 | 1.52 | 1.89 | 2.49 | 75 | 3.59 | -19.33 | -2.62 | -1.40 |
| 38 | 1.26 | 1.52 | 1.91 | 2.57 | 80 | 7.56 | -4.74 | -1.80 | -1.11 |
| 39 | 1.26 | 1.53 | 1.94 | 2.66 | 85 | -48.44 | -2.69 | -1.38 | -0.93 |

的准确度。如摩擦系数 f 为 0.7, 初始夹角 β 为 30° , 初始临界应力为 2.19, 而加载方向偏转 10° 后, 再次加载的夹角 β 变为 40° , 再次加载的临界应力为 2.78, 初次和再次加载的临界应力相对值增大了 1.27 倍, 说明裂纹再次开展的难度变难, 并且 Kaiser 点对应的应力值已经不准确 (FR 值大于 1.1)。

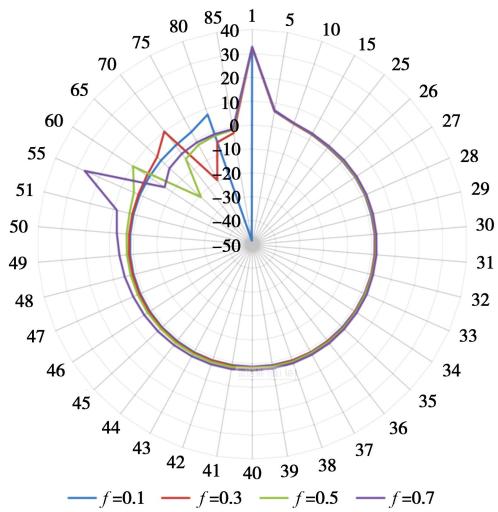
图 3 临界应力 σ_c 随摩擦系数 f 变化曲线

Fig. 3 Variation of critical stress σ_c with friction coefficient f

(2) 如图 3 所示, 摩擦系数 f 分别为 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 时, 临界应力 σ_c 均随夹角 β 的增大而递增, 并且增幅不断变大, σ_c 的最大值分别出现在 β 为 80° , 70° , 60° , 55° (参考区间 $20^\circ \sim 85^\circ$), 表明界面摩擦系数越小, 再次加载的 Kaiser 点准确度越易受影响, 也可暗示如越湿润的岩样, 用于地应力的 Kaiser 效应测试结果离散性越大。

3 加载方向偏转对 Kaiser 效应的影响

3.1 确定临界应力相对值

临界应力相对值 $\frac{\sigma_{\text{后}}}{\sigma_{\text{前}}}$ 与夹角 β 、摩擦系数 f 有相

关性, 并且初次加载和再次加载的临界应力相对值 γ 可反映 Kaiser 点准确性 (FR 取值 0.9~1.1)。

依据式 (1) 可得临界应力相对值为

$$\frac{\sigma_{\text{后}}}{\sigma_{\text{前}}} = \frac{\frac{2K_{\text{IIC}}}{\sqrt{\pi a} [\sin 2\beta_2 - f(1 - \cos 2\beta_2)]}}{\frac{2K_{\text{IIC}}}{\sqrt{\pi a} [\sin 2\beta_1 - f(1 - \cos 2\beta_1)]}} = \frac{\sin 2\beta_2 - f(1 - \cos 2\beta_2)}{\sin 2\beta_1 - f(1 - \cos 2\beta_1)} \quad (7)$$

其中 $\sigma_{\text{前}}$ 和 $\sigma_{\text{后}}$ 分别为初次和再次加载的临界应力, β_1 和 β_2 分别为初次和再次加载方向与裂纹面夹角, f 为裂纹界摩擦系数。图 4 所示实线为初始裂纹面、虚线为加载方向旋转后裂纹面 (以裂纹面旋转等价加载方向偏转)。

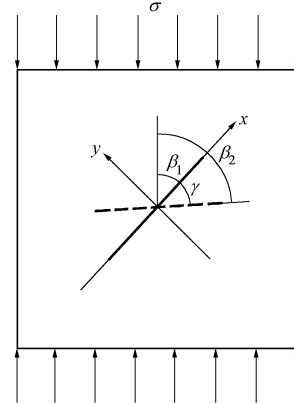


图 4 裂纹面方向变化示意图

Fig. 4 Schematic diagram of rotation of crack surface

3.2 FR 受加载方向偏转的影响规律

$$FR = \frac{\sigma_{\text{后}}}{\sigma_{\text{前}}} \quad . \quad (8)$$

FR 可用于评价 Kaiser 点的准确度, FR 取值 0.9~1.1 时表明 Kaiser 效应存在, 即 Kaiser 点准确, 反之则 Kaiser 点不准确。定义加载方向偏转相对角 $\gamma = \beta_2 - \beta_1$, 表示再次加载方向与裂纹面夹角、初次加载方向与裂纹面夹角之间的差值。

图 5 为摩擦系数 $f=0.5$ 时, 加载方向偏转相对角 γ 与 FR 值关系。Kaiser 效应 FR 值随初始加载方向夹角 β_1 与加载方向偏转相对角 γ 的变化呈现非线性规律变化, 总体呈现随加载方向偏转角 γ 的增加而先递增后减小的趋势。

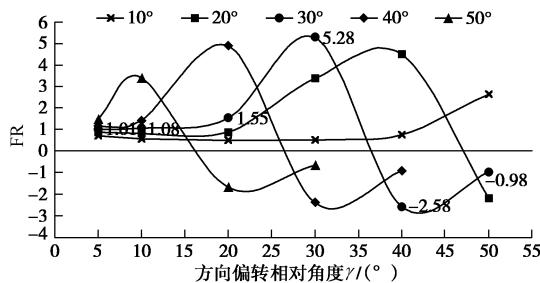


图 5 加载方向偏转相对角 γ 与 FR 值关系

Fig. 5 Relationship between relative angle γ of loading direction deflection and FR value

(1) 初始加载方向夹角 β_1 增加, FR 最大值呈现先增大后减小的趋势, FR 最大值所对应的加载方向偏转相对角 γ 不断减小, 表明加载方向偏转时, Kaiser 效应准确度不只与加载方向的偏转相对角度 γ 有关, 还与初次加载时产生的裂纹角度 β_1 有关。这就解释了前人加载方向偏转 Kaiser 效应试验中, 所得的关于 Kaiser 效应消失的结论不一原因: 与未考虑初次加载时产生的裂纹角度 β_1 不同有关。

(2) 初始加载方向夹角 β_1 为 10° 时, 加载方向的偏转相对角度 γ 大于 45° 后, FR 值已远超 1.1, 表明偏转 45° 时 Kaiser 效应才消失, Kaiser 效应在偏转 45° 范围内均对初始加载应力有记忆, 即 Kaiser 效应方向不独立。而初始加载方向夹角 β_1 变为 30° 时, 加载方向的偏转相对角度 γ 大于 10° 后, FR 增大到 1.1, 表明只需偏转 10° Kaiser 效应便会消失, Kaiser 效应在偏转较小角度 10° 范围内对初始加载应力有记忆, 即 Kaiser 效应近似方向独立。这与 Holcomb 等^[7]的试验结论一致, 并为其试验结果对应的控制参数量化区间。当初始加载方向夹角 β_1 增大到 50° 后, 加载方向的偏转相对角度 γ 大于 5° 后, FR 增大到 1.1, 表明偏转小角度 Kaiser 效应消失, Kaiser 效应方向独立。由此可见, 初始加载方向夹角 β_1 越大, 方向偏转后再

次加载的 Kaiser 点, 反映初始加载应力的准确度递增。初始加载方向夹角 β_1 在 $30^\circ \sim 45^\circ$ 方向范围内可视为 Kaiser 效应方向独立, Kaiser 点能够准确反映初始加载应力。

3.2 裂纹扩展方向受裂纹面摩擦系数的影响规律

当应力达到临界应力 σ_c , 则可得

$$\sigma_c \sqrt{a} K_{II} = \sigma_c \sqrt{a} K_{IIC} \quad , \quad (9)$$

即

$$\sigma_c \sqrt{a} = \frac{\sigma_c \sqrt{a} K_{IIC}}{K_{II}} \quad . \quad (10)$$

$\beta = \beta_m$ 时, $\sigma_c \sqrt{a}$ 为最小, 此时裂纹按 β_m 扩展, 为裂纹扩展的优势角:

$$\partial(\sigma_c \sqrt{a}) / \partial \beta = 0, \quad \partial^2(\sigma_c \sqrt{a}) / \partial \beta^2 > 0 \quad . \quad (11)$$

将式(10)代入式(11), 就得到

$$\frac{\partial \sigma_c \sqrt{a}}{\partial \beta} = -\frac{\sigma_c \sqrt{a} K_{IIC}}{K_{II}^2} \frac{\partial K_{II}}{\partial \beta} \quad . \quad (12)$$

式(12)等效为 $\partial K_{II} / \partial \beta = 0$, $\partial^2 K_{II} / \partial \beta^2 < 0$ 。求 $\sigma_c \sqrt{a}$ 的极小值就等效为求 K_{II} 的极大值。假设 K_{II} 中只有 β 为变量, 则当 $\beta = \beta_m$ 时, 裂纹状态处于临界状态, 则由式(5)得出

$$\frac{\partial K_{II}}{\partial \beta} = \sigma \sqrt{\pi a} (\cos 2\beta - f \sin 2\beta) \quad , \quad (13)$$

因此 $\partial K_{II} / \partial \beta = 0$ 的根为

$$\tan 2\beta_m = \frac{1}{f} \text{ 或 } \beta_m = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{1}{f} \right) \quad . \quad (14)$$

优势角 β_m 与摩擦系数 f 关系如图 6 所示。

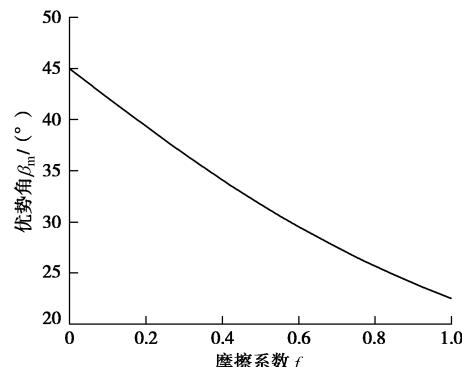


图 6 优势角 β_m 与摩擦系数 f 的关系

Fig. 6 Relationship between advantage angle β_m and friction coefficient f

优势角 β_m 与摩擦系数 f 存在非线性反比例关系。优势角 β_m 随着裂纹界面摩擦系数 f 的增加而减小, 说明裂纹界面摩擦系数变化, 会导致下次裂纹开裂路径发生变化, 使得裂纹开裂难易程度变化, 导致 Kaiser 效应信号延迟或提前。表明加载方向偏转后 Kaiser 点能否准确反映初始加载应力大小, 还与摩擦系数 f 密切相关。摩擦系数 f 的变化, 会使得 Kaiser 效应产生

和加载方向偏转同样的效果。

4 控制参数试验验证

为验证 Kaiser 效应方向独立性的控制参数理论分析合理性, 将以上计算结果与 Holcomb 的试验结论进行对比, 从变化规律和控制参数两方面进行说明。

4.1 试验规律

文献中的试件采用 Westerly 花岗岩, 尺寸为 $18.5 \text{ cm} \times 10.3 \text{ cm} \times 22.5 \text{ cm}$ (长×宽×高)。先对整块花岗石试件进行 190 MPa 的单轴压缩预压, 卸压后在试件侧面钻取 3 个圆柱, 如图 7 所示, 并编号 1, 2, 3。然后在这三根圆柱的直径方向以不同旋转方向钻取小岩芯, 岩芯直径为 2.5 cm 。对这些小岩芯作 5 MPa 围压下的三轴压缩试验, 为降低 Kaiser 效应的时间延迟效应, 整块花岗岩预压、两次钻芯、三轴压缩试验等全部试验工作在 15 d 内完成, 试验结果如表 2 所示。结果表明, 当偏角 $<10^\circ$ 时, Kaiser 效应对立方体试块 190 MPa 的预压有较好记忆; 但当偏角 $>10^\circ$ 时, Kaiser 效应记忆准确度明显降低, 说明第二次加载方向与第一次加载方向的偏转角对 Kaiser 效应有较大影响, Kaiser 效应存在方向独立性。

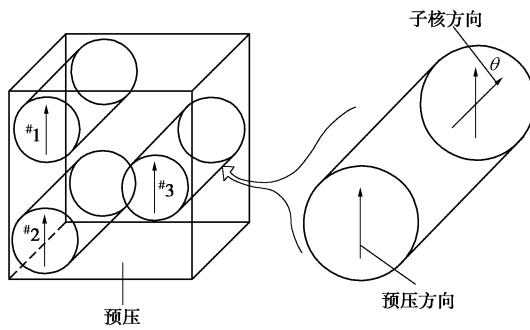


图 7 试验原理

Fig. 7 Testing principle

表 2 试验结果

Table 2 Results of tests

| 编号 | 旋转角度 /($^\circ$) | 预压值 /MPa | Kaiser 点 /MPa | 极限强度 /MPa |
|----|--------------------|----------|---------------|-----------|
| 1 | 5 | 190 | 194 | 325 |
| 2 | 5 | 190 | 189 | 333 |
| 3 | 10 | 190 | 162 | 332 |
| 4 | 10 | 190 | 158 | 330 |
| 5 | 15 | 190 | 150 | 328 |
| 6 | 20 | 190 | 153 | 332 |
| 7 | 20 | 190 | 158 | 323 |
| 8 | 30 | 190 | 132 | 335 |
| 9 | 30 | 190 | 135 | 335 |
| 10 | 45 | 190 | 131 | 321 |
| 11 | 45 | 190 | 126 | 315 |
| 12 | 90 | 190 | 117 | 326 |
| 13 | 90 | 190 | 131 | 330 |

用 FR 值来评价 Kaiser 点对预压应力的记忆准确度, FR 值在 $0.9\sim1.1$ 之间表示 Kaiser 点对初次应力

记忆准确, 当 FR 值大于 1.1 后, 表明 Kaiser 点已经无法准确记忆预压应力。

图 8 为试验所得 FR 值随加载方向偏转相对转角 γ 变化的分布图, 如果加载方向偏转大于 10° , FR 值将大于 1.1, 说明该方向试验所得 Kaiser 点已经无法准确反应预压应力, 即 Kaiser 效应在较小偏转角度 ($<10^\circ$) 范围内, 能准确记忆先期应力数值, Kaiser 效应具有独立性特征, 这与图 4 分析结论相一致, 但偏转 10° 以上的规律有一定的偏差, 该问题会在下面的分析中进行讨论。

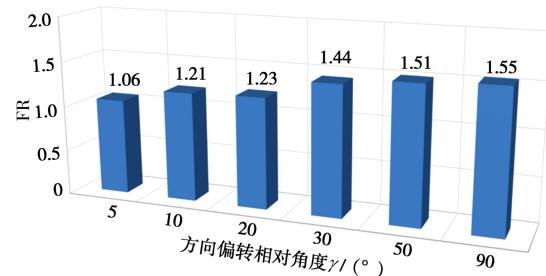


图 8 试验方向偏转相对角与 FR 值关系

Fig. 8 Relationship between relative angle of direction rotation and FR value

4.2 试验与理论对比

因图 5 为摩擦系数 $f=0.5$ 时, 加载方向偏转相对角 γ 与 FR 值关系, 为更好地对比偏转角度大于 10° 后, 理论和试验在加载方向偏转相对角 γ 与 FR 值关系的吻合度, 在图 9 中补充了摩擦系数 f 为 0.1 和 0.3 的计算结果。如图 9 (a), (b), (c) 分别是摩擦系数 f 为 0.5, 0.3, 0.1 时的加载方向偏转相对角 γ 与 FR 值关系图, 其中虚线为试验数据, 图例 “0.5–10°” 表示摩擦系数 f 为 0.5、初始加载方向夹角 β_1 为 10° 。可看出, 相同摩擦系数下的 FR 值增速随着初始加载方向夹角 β_1 减小而减缓, 表明预压时初始微裂纹方向的变化对 Kaiser 点记忆先期应力有较大影响, 这对运用 6 个方向的 Kaiser 点值计算地应力的测量精度不利, 即初始微裂纹方向如果与所测主应力方向越接近, 计算得到的主应力将越不准确。如图 9 (a) 中的 “0.5–10°” 曲线, 在加载方向旋转角度达到 40° 前, FR 值均未超过 1.1, 也就是说此范围内测得的应力值与预加载值 (先期应力) 几乎一样, Kaiser 效应不具有独立性, 计算条件不成立。

同时, 相同初始加载方向夹角 β_1 的 FR 值, 随着摩擦系数 f 的减小, 增速同样出现递减趋势, 也就是加载方向的变化对 Kaiser 点记忆先期应力的影响减小, Kaiser 效应的方向独立性越不明显, 这对 Kaiser 效应测量地应力的应用同样不利。即试样越湿润或越柔软, 用 6 个方向所测应力计算得到的主应力离散性

越大。如图 9 (c) 中的“0.1–10°”曲线, 当旋转角度达到 50° 前, FR 值均未超过 1.1, 同样说明此范围内测得的应力值与预加载值(先期应力)几乎一致, 则 Kaiser 效应不具有独立性, 计算条件不成立。

由此可见 Kaiser 效应方向独立与岩石细观结构状态直接相关, 相关性参数为初始加载方向夹角 β_1 (初始微裂纹面与初始加载方向夹角)、加载方向偏转相对角 γ 和摩擦系数 f 。对比图 9 中不同特征曲线和试验曲线的趋势和数值发现, 理论曲线的 FR 值随着加载方向偏转相对角 γ 的增大, 均会出现陡增的趋势, 而试验曲线变化比较平稳。究其原因, 为理论模型中裂纹在加载方向偏转后, 会严格按照原有裂纹面继续开裂, 所以无论加载方向偏转相对角 γ 多大, 产生的原有裂纹面继续开展所需外力有多高, 都会按照原有裂纹面继续开裂, 进而出现 FR 值陡增现象。而对于试验而言, 初次加载产生的微裂纹如果再次开展所需外力过大时, 会出现裂纹新增, 而不完全严格沿已有裂纹应力路径发展, FR 值始终处于平稳变化过程。

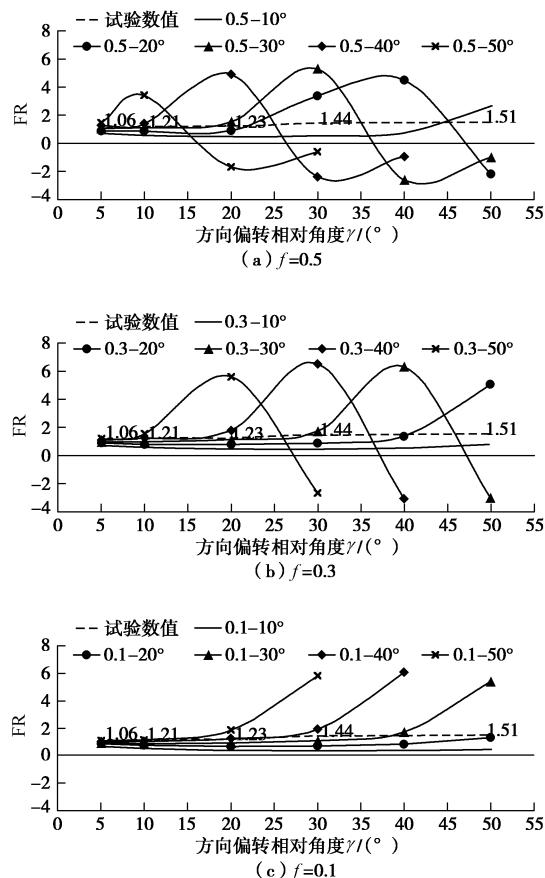


图 9 试验与理论结果对比

Fig. 9 Comparison between test and theoretical results

因此, 试验结论的细观控制参数确定如下: 沿加载方向偏转相对角 γ 增大方向, 理论和试验曲线匹配度最好且对应的加载偏转相对角 γ 最大的曲线特征参

数, 作为试验中试件的匹配参数(只考虑理论和试验共有的原微裂纹开展部分)。对比发现试验曲线与 0.5–30°, 0.3–30°, 0.1–40° 具有较好的一致性。摩擦系数 f 小于 0.5, 表明试件或处于非干燥状态; 初始加载方向夹角 β_1 在 30–40°, 表明该立方块在单轴预压后, 微裂纹方向与加载方向夹角或偏小。这均与试验条件较为吻合: 试验中的整块花岗石为 18.5 cm×10.3 cm×22.5 cm(长×宽×高)立方体, 预加载微裂纹会按照对角线方向分布, 而高度大于长度, 按对角线计算加载方向与微裂纹方向夹角小于 40°; 同时钻芯过程会用到水, 为了减小 Kaiser 效应时间延迟, 在较短时间内完成了所有试验, 钻芯试件在试验中可能未处于干燥状态。

5 结 论

本文以 Kaiser 效应由裂纹扩展释放弹性波的认识, 从断裂力学角度对远场应力为压应力时, Kaiser 效应随加载方向变化规律进行了分析, 建立了临界应力 σ_c 与裂纹面方向夹角 β 、裂纹面摩擦系数 f 的理论联系, 揭示了 Kaiser 效应方向独立性机理与控制参数, 得到如下结论:

(1) Kaiser 效应方向独立性与临界应力 σ_c 的变化直接相关, 控制参数为裂纹面方向与临界应力方向夹角 β 和裂纹面摩擦系数 f 。加载方向发生改变, 再次加载所需临界应力将同步改变(增大或减小), 裂纹开展难度变难或变易, 这将导致再次加载 Kaiser 点对应的应力值变大或变小, 影响 Kaiser 点的准确度。

(2) Kaiser 效应准确度不只与加载方向的偏转相对角度 γ 有关, 还与初次加载时产生的裂纹角度 β_1 有关(初始微裂纹面与初始加载方向夹角), 以往试验的结论不一致, 原因可能与初次加载时产生的初始裂纹面方向不同有关, 而初始微裂纹方向如果与所测主应力(预加载应力)方向越接近, 计算得到的主应力将越不准确。

(3) 微裂纹面摩擦系数 f 为 0.5, 初始加载方向夹角 β_1 在 30°~45° 方向时, Kaiser 效应在偏转 10° 范围内对初始加载应力有很好的记忆, 而大于 10° 后再次加载 Kaiser 点记忆初始应力的准确度显著降低, 即 Kaiser 效应方向独立, 这与 Holcomb 等^[7]所作试验结论一致, 其控制参数为微裂纹面摩擦系数 f (小于 0.5) 和初始加载方向夹角 β_1 (30°~40°), 这均与文献试验条件较为吻合。

(4) 裂纹面摩擦系数 f 对 Kaiser 效应方向独立性有较大影响, f 分别为 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 时, 临界应力 σ_c 均随夹角 β 的增大而递增, 并且增幅不断变

大, σ_c 的最大值分别出现在 β 为 80° , 70° , 60° , 55° (参考区间 $20^\circ \sim 85^\circ$)。摩擦系数 f 越小, 再次加载的 Kaiser 点准确度越易受影响。暗示如越湿润的岩样, 用于地应力的 Kaiser 效应测试结果离散性越大。其原因为裂纹面摩擦系数变化, 导致裂纹再次开展时路径发生变化, 致使裂纹开裂难易程度变化, 导致 Kaiser 效应信号出现延迟或提前所致。

参考文献:

- [1] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1945–1956. (QIAN Qi-hu. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 1945–1956. (in Chinese))
- [2] 葛伟凤, 张飞, 陈勉, 等. 盐膏岩 DRA-Kaiser 地应力测试方法初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 1): 3138–3142. (GE Wei-feng, ZHANG Fei, CHEN Mian, et al. Research on geostress measurement using DRA-Kaiser method in salt-gypsum formation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 3138–3142. (in Chinese))
- [3] 卢兴宇. 关于 Kaiser 效应和应力方向的初步探讨[J]. 重庆建筑工程学院院报, 1987(3): 83–91. (LU Xing-yu. Preliminary discussion on the Kaiser effect and the stress orientation[J]. Chongqing; Journal of College of Civil Engineering, 1987(3): 45–46. (in Chinese))
- [4] MIHIRO K. Rock at great depth[M]. Rotterdam: Balkema, 1989, 2: 1025–1032.
- [5] STUART C E, MEREDITH P G, MURRELL S A F, et al. Anisotropic crack damage and stress-memory effect in rocks under triaxial loading[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1993, 30: 937–941.
- [6] HSIEHA A, DIGHTA P, DYSKIN A V. The rock stress memory unrecoverable by the Kaiser effect method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 75: 190–195.
- [7] HOLCOMB D J, COSTIN L S. Detecting damage surfaces in brittle materials using acoustic emissions[J]. Journal of Applied Mechanics, 1986, 53(3): 536–544.
- [8] LAVROV A, VERVOOTR A, WEVERS M, et al. Experimental and numerical study of the Kaiser effect in cyclic Brazilian tests with disk rotation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(3): 287–302.
- [9] 阎南. 岩石 Kaiser 效应方向独立性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008. (YAN Nan. Research on direction independence of rock Kaiser effect[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2008. (in Chinese))
- [10] 谢强, 邱鹏, 余贤斌, 等. 利用声发射法和变形率变化法联合测定地应力[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4): 559–564. (XIE Qiang, QIU Ze, YU Xian-bin, et al. Initial stress measurements with AE and DRA combined technique[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 559–564. (in Chinese))
- [11] 谢强, 唐家辉, 鲁鲲鹏, 等. 受不同加载偏转角影响的含裂纹砂岩劈裂声发射试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(10): 1862–1870. (XIE Qiang, TANG Jia-hui, LU Kun-peng, et al. Acoustic emission characteristics of cracked sandstones affected by different rotating angles of loading under splitting test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(10): 1862–1870. (in Chinese))
- [12] 傅翔, 谢强, 江小城. 受拉加载方向变化对 Kaiser 效应点准确度的影响[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(7): 1365–1370. (FU Xiang, XIE Qiang, JIANG Xiao-cheng. Effects of tensile loading direction on the accuracy of Kaiser effect point determination[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(7): 1365–1370. (in Chinese))
- [13] 张大伦. 确定岩石中先存应力状态的声发射法[J]. 地震地质, 1984, 31(2): 121–127. (ZHANG Da-lun. Use of Acoustic emission method for estimation of preexisting stresses in the rock[J]. Seismology and Geology, 1984, 31(2): 121–127. (in Chinese))
- [14] LEHTONEN A, COSGROVE J W, HUDSON J A, et al. An examination of in situ rock stress estimation using the Kaiser effect[J]. Engineering Geology, 2012, 124(1): 24–37.
- [15] 彭瑞, 孟祥瑞, 赵光明, 等. 不同岩性岩石声发射地应力测试及其应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(9): 3377–3384. (PENG Rui, MENG Xiang-rui, ZHAO Guang-ming, et al. Acoustic emission in-situ stress testing of different lithology rock and its application[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(9): 3377–3384. (in Chinese))
- [16] 张东明, 白鑫, 齐消寒, 等. 含层理岩石的 AE 特征分析及基于 Kaiser 效应的地应力测试研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(1): 87–97. (ZHANG Dong-ming, BAI Xin, QI Xiao-han, et al. Acoustic emission characteristics and in-situ stresses of bedding rock based on Kaiser effect[J].)

- Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(1): 87 - 97. (in Chinese))
- [17] 赵 奎, 余 彬, 李期森, 等. 大理岩声发射 Kaiser 效应法测量原岩应力试验研究[J]. 有色金属科学与工程, 2017, **8**(3): 88 - 93. (ZHAO Kui, YU Bin, LI Qi-shen, et al. Experimental study on in-situ stress measurement from marble using the acoustic emission method[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2017, **8**(3): 88 - 93. (in Chinese))
- [18] 石 凯, 梅甫定, 程明胜, 等. 循环加载高应力对大理岩 Kaiser 效应影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(12): 2906 - 2916. (SHI Kai, MEI Fu-ding, CHENG Ming-sheng, et al. Experimental study on the effect of high stress of cycle loading on Kaiser effect in marble[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(12): 2906 - 2916. (in Chinese))
- [19] 方亚如. 岩石声发射 Kaiser 效应的方向独立性[J]. 地震地磁观测与研究, 1986, **7**(2): 22 - 28. (FANG Ya-ru. Research on direction independence of rock Kaiser effect[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 1986, **7**(2): 22 - 28. (in Chinese))
- [20] 黄润秋, 王士天. 用 Kaiser 效应测试地应力的新认识[C]// 全国第三届岩土工程地质大会论文集, 1988, 中国: 56 - 60. (HUANG Run-qiu, WANG Shi-tian. The new understanding of using the Kaiser effect to test the crustal stress[C]// The 3rd Conference of Geo-Engineering, 1988, China: 56 - 60. (in Chinese))
- [21] 邓荣贵, 付小敏. 用 Kaiser 效应测定地应力的几个问题探讨[C]// 第二届全国岩石动力学学术会议, 1990, 宜昌: 221 - 225. (DENG Rong-gui, FU Xiao-min. Discussions on some problems for measuring geostress using Kaiser effect[C]// Proceedings of 2nd National Academic Conference on Rock Dynamic Mechanics, 1990, Yichang: 221 - 225. (in Chinese))
- [22] LAVROV A. The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, **40**(2): 151 - 171.
- [23] 李庶林, 唐海燕. 不同加载条件下岩石材料破裂过程的声发射特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(1): 47 - 52. (LI Shu-lin, TANG Hai-yan. Acoustic emission characteristics in failure process of rock under different uniaxial compressive loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(1): 47 - 52. (in Chinese))

本期广告索引

- 封 2 北京筑信达工程咨询有限公司
 封 3 南瑞集团水利水电技术分公司
 封 4 上海分元土木工程科技有限公司
 后插 1 广州国光仪器有限公司
 后插 2 北京理正软件股份有限公司