

DOI: 10.11779/CJGE201407022

受拉加载方向变化对 Kaiser 效应点准确度的影响

傅 翔¹, 谢 强^{1, 2*}, 江小城³, 王龙飞¹, 刘华吉¹, 张晓旋¹

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆 400045;
3. 重庆源道建筑规划设计有限公司 重庆 400016)

摘要: 基于 Kaiser 效应由裂纹扩展释放弹性波产生的认识, 依据断裂力学理论就加载方向变化对 Kaiser 效应的影响进行分析。研究了远场应力为拉应力时, 二维 I, II 型混合裂纹扩展的临界应力相对值、FR 比值与加载方向偏转角之间的关系。结果表明: 加载方向对 Kaiser 效应点反应岩石记忆先期荷载值的准确度有较大影响, 其变化大小与临界应力相对值正相关。若第一次加载方向与裂纹面垂直, 偏转角度从 $0^\circ \sim 90^\circ$ 变化, 裂纹扩展临界应力相对值和 FR 比值均不断增大。偏转角为 $0^\circ \sim 20^\circ$ 时, FR 比值变化范围为 1~1.1, Kaiser 效应点记忆较为准确, 但第二方向所记忆的荷载并非该方向的正应力值。偏转角为 90° 时, 临界应力相对值和 FR 比值均趋近于无穷大, 裂纹在该裂纹面方向上不能发展, 说明 Kaiser 效应消失。这与部分学者的试验结果一致, 说明此类劈裂试验中 Kaiser 效应的产生, 裂纹扩展是主要原因, 也在某种程度上解释了该类试验加载方向偏转角度越大, Kaiser 效应越来越不明显的问题。

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: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)07-1365-06

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

Influence of tensile loading direction on accuracy of determining Kaiser effect point

FU Xiang¹, XIE Qiang^{1, 2*}, JIANG Xiao-cheng³, WANG Long-fei¹, LIU Hua-ji¹, ZHANG Xiao-xuan¹

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Chongqing University), Ministry of Education, Chongqing 400045, China; 3. Chongqing Yuandao Architectural Planning & Design Co., Ltd., Chongqing 400016, China)

Abstract: The Kaiser effect is caused by the elastic waves generated by the crack propagation. Based on this common understanding and the theory of fracture mechanism, the influence of the loading direction on the Kaiser effect is discussed when the far field stress is the tensile one. The relationship between the critical stress of the crack propagation for I + II mixed mode in plane, the value of Felicity ratio (FR) and the rotational angle of loading are studied. The results show that the loading direction has important influence on whether the Kaiser effect can correctly reproduce the information on the peak stresses of the rock experienced in the past. If the loading in the first cycle is perpendicular to the crack and the rotational angle changes from 0° to 90° , the critical stress of the crack propagation and the FR value will increase with the rotational angle. When the rotational angle varies between 0° to 20° , the FR will value the changes between 1 to 1.1, and the “Memory” of the Kaiser effect is more accurate, while the stress memorized by rock in the second direction is not the normal one according to that direction. When the rotational angle is 90° , both the critical stress of the crack propagation and the FR value increase to infinite, and the crack isn’t able to propagate in its crack surface. Hence it results in complete disappearance of the Kaiser effect. They are consistent with those of some other researchers. Therefore it can be concluded that the crack propagation is the main cause of the Kaiser effect in this kind of split tests. It can also explain why the Kaiser effect becomes more and more inapparent with the increasing rotation angle.

Key words: Kaiser effect; crack propagation; directional dependency; critical stress; relative value

0 引 言

材料在受到外部作用下, 应变能得到积累, 当能

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (51008319); 第 43 批留学回国人员科研启动基金项目 (教外司留 [2011] 1568 号); 长江学者和创新团队发展计划资助项目 (IRT1045)

收稿日期: 2013-10-30

*通讯作者

量积累到一定程度使裂纹增生, 材料局部区域快速卸载释放应变能, 产生瞬态弹性波的现象称为声发射

(acoustic emission, 简称 AE)。至 1950 年, 德国科学家 Kaiser 发现受单向拉伸力作用的金属材料, 当应力达到材料所受过的最大先期应力时, 会有明显的声音发射出现, 即著名的 Kaiser 效应^[1-2] (Kaiser effect, 简称 KE)。后来 Goodman 等^[3]在岩石压缩试验中证实了 Kaiser 效应的存在。正是由于岩石具备这样记忆先期应力的能力, 使声发射方法在岩石地应力测量中得到广泛应用。但由于 Kaiser 效应机理及其影响因素的相关问题尚未弄清, 例如 Kaiser 效应的方向性问题, 应力水平^[4-7]、湿度^[8-9]、时间延迟^[10-17]、加载速率^[18-19]等对 Kaiser 效应的影响等。

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。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, 得出许多不同结论, 如 Stuart CE 等^[20]、Mihihiro K^[21]、卢兴宇^[22]认为 90° 方向上有方向独立性; 张雪等^[23]、黄志鹏等^[24]、方亚如^[25]、黄润秋等^[26]认为 90° 方向上不具有方向独立性; Holcomb 和 Costing^[27-28]、Lavrov 等^[29]认为偏转角较小 ($<10^\circ$) 时仍然能观察到 Kaiser 效应, 当偏角较大时 Kaiser 效应不再明显。少数学者也从理论角度对其进行了初探, 如邓荣贵、付小敏等认为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, 一般情况下 Kaiser 效应不具有方向独立性。

虽然基于 Kaiser 效应具有方向独立性的研究成果众多, 但在关于 Kaiser 效应方向性的研究中仍然存在着很多争议和不明确的地方。在偏移主应力一定方向后再次加载, Kaiser 效应点是否记忆且只记忆该方向正应力峰值, 各个方向是否独立记忆的问题上并没有定论。并且 Kaiser 效应方向性的研究, 一直以来都缺少有效的理论解释。本文基于 Kaiser 效应由裂纹扩展释放弹性波的认识和能量法的断裂准则, 从断裂力学角度对 Kaiser 效应随加载方向变化规律进行分析, 得出了远场应力为拉应力时, 加载方向对 Kaiser 效应的影响规律及原因。

1 Kaiser 效应点的裂纹扩展判别方法

对于 Kaiser 效应的产生原因, 比较统一的解释是裂纹的形成和扩展所致, 而裂纹形成相对于裂纹扩展

而言能量要低很多, 因此, 本文假定 Kaiser 效应由裂纹扩展引起。

如图 1 所示, 对于远场应力为拉应力时的 I 型裂纹, 当裂纹面与远场应力方向垂直时, 所需开裂临界应力最小, 而旋转 90° (裂纹面与远场应力方向平行), 所需开裂临界应力接近无穷大 (张裂纹不可能扩展), 即岩体不会产生该裂纹开裂方向的声发射现象。由此可见, 加载方向的变化改变了受力单元体远场应力方向和体内裂纹面方向的夹角大小, 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 效应反应岩石记忆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。

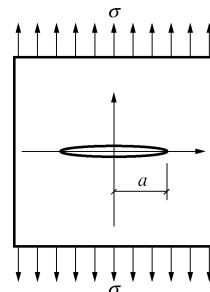


图 1 二维远场拉应力椭圆裂纹

Fig. 1 Ellipse crack under tensile stress

为此, 本文通过建立方向偏转前后的裂纹扩展临界应力比方程, 对 Kaiser 效应在单一条件下的方向性问题进行解释, 并且通过计算 Felicity 比值来与已有实验结论进行对比, 评价理论方法的合理性。

2 临界应力相对值与加载方向的关系

以下通过建立无限平面空间内的椭圆穿透型微裂纹, 在远场拉应力下, 裂纹面和应力作用方向的夹角与受拉临界应力比方程, 分析加载方向对裂纹开裂难度程度的影响。

2.1 裂纹扩展模型

为简化分析过程, 假定材料为线弹性脆性材料, 就简单的二维穿透型裂纹而言, 由 Griffith 准则, 对于远场应力为拉应力时的 I 型裂纹如图 1 所示。

根据能量的观点得出裂纹发展的临界应力如下:

$$\sigma_I = \sqrt{\frac{2Er}{\pi a}}, \quad (1)$$

式中, E 为杨氏模量, r 为单位面积的表面能, a 为裂隙半长度。当再次加载方向偏转 $\pi/2 - \beta$ 时, 应力作用方向与裂纹方向相对位置如图 2 所示。

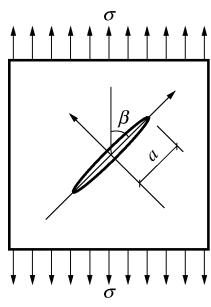


图 2 应力作用方向偏转一定角度后

Fig. 2 Ellipse crack under compressive stress with a rotation

2.2 确定临界应力相对值

因岩石开裂一般属于复合型裂纹问题, 根据薛昌明理论研究弹性材料复合型加载产生断裂情况, 此时存在着 I 型 II 型裂纹, 而没有 III 型裂纹。假设初始状态裂纹面与远场应力方向垂直(图 1 所示), 则临界应力相对值为

$$\frac{\sigma}{\sigma_1} = \left\{ \frac{(1-2\nu)}{4\mu(a_{11}\sin^2\beta + 2a_{12}\sin\beta\cos\beta + a_{22}\cos^2\beta)\sin^2\beta} \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

式中, σ_1 为 I 型裂纹时的断裂强度, a_{11} , a_{12} , a_{22} 为平面应变系数, ν 为泊松比。

$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= \frac{1}{16\mu} [(3-4\nu-\cos\theta)(1+\cos\theta)], \\ a_{12} &= \frac{1}{16\mu} (2\sin\theta)[\cos\theta-(1-2\nu)], \\ a_{22} &= \frac{1}{16\mu} [4(1-\nu)(1-\cos\theta)+(1+\cos\theta)(3\cos\theta-1)], \\ a_{33} &= \frac{1}{4\mu}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, θ 为断裂角, 即裂纹扩展方向与裂纹面的夹角。

2.3 计算断裂角 θ

对于 I 型和 II 型混合裂纹定义应变能密度因子 S 如下:

$$S = a_{11}k_1^2 + 2a_{12}k_1k_2 + a_{22}k_2^2 + a_{33}k_3^2, \quad (4)$$

式中, $k_1 = K_I / \sqrt{\pi}$, $k_2 = K_{II} / \sqrt{\pi}$ 。此时, 因不存在 III 型裂纹忽略第 4 项。裂纹发展方向取决于应变能密度因子的极小值 S_{min} , 即由式(5)所决定的 $\theta = \theta_0$ 。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial \theta} &= 0, \\ \frac{\partial^2 S}{\partial \theta^2} &> 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

当裂纹开始失稳扩展时有

$$S_c = S(k_1, k_2, k_3) \quad (\theta = \theta_0). \quad (6)$$

当前情况: $K_I = \sigma\sqrt{\pi a} \sin^2\beta$, $K_{II} = \sigma\sqrt{\pi a} \sin\beta\cos\beta$;

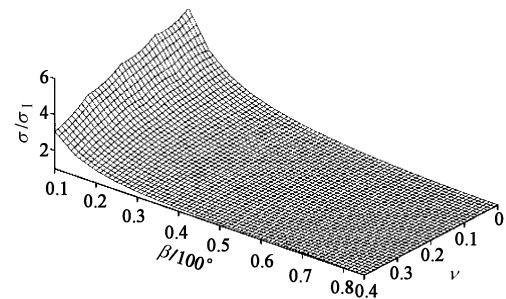
带入式(4)、(5)中 ($k_3 = 0$), 则

$$2(1-2\nu)\sin(\theta_0 - 2\beta) - 2\sin 2(\theta_0 - \beta) - \sin 2\theta_0 = 0. \quad (7)$$

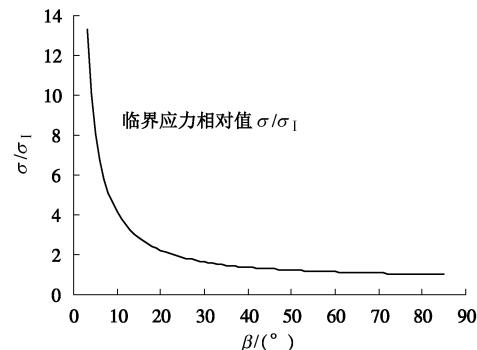
显然当 β 已知, 因 ν 为常数时, 可以求出 θ_0 , 将 θ_0 代入式(3)可以求得 a_{11} , a_{12} , a_{22} , 最后返回式(2), 则可求得 σ/σ_1 值。采取牛顿迭代法求解式(7)得到。

2.4 临界应力相对值与夹角 β 的关系

平面应变系数 a_{11} , a_{12} , a_{22} 按 $(\chi) \frac{1}{16\mu}$ 计算。由式(2)可得临界应力相对值 σ/σ_1 , 其分布关系如图 3, 4 所示。

图 3 临界应力相对值 σ/σ_1 随夹角 β 变化的空间分布图Fig. 3 Spatial distribution of relative value of critical stress with angle β

angle β

图 4 $\nu = 0.1$ 时的临界应力相对值变化曲线Fig. 4 Curve of relative value of critical stress for $\nu = 0.1$

从图 3, 4 可以看出, 对于 I, II 型混合裂纹临界应力有如下规律:

(1) 随裂纹面和加载方向的夹角增大, 裂纹扩展临界应力相对值变小, 整个过程单调。

(2) 当裂纹面与加载方向呈 0° 时, 理论上临界应力相对值趋于无穷大。

(3) 可以看到, 夹角相差相同角度时, 其临界应力比值并不相同。例如 $\nu = 0.2$ 时, 裂纹与应力夹角 10° 时 $\sigma_c = 4.135\sigma_1$; 夹角为 20° 时 $\sigma_c = 2.575\sigma_1$; 裂纹夹角为 30° 时 $\sigma_c = 1.837\sigma_1$ 。可以看到: $\sigma_c(20^\circ)/\sigma_c(10^\circ) = 0.623$; 然而同样相差 10° , $\sigma_c(30^\circ)/\sigma_c(20^\circ) = 0.725$ 。

$\sigma_c(20^\circ) = 0.713$ ，其比例并不相同。

(4) 裂纹的扩展临界应力值不仅与裂纹面上的正应力有关，还与裂纹面上的切应力有关。

3 偏转方向对 Kaiser 效应的影响

假设第一次加载应力方向与裂纹面垂直，则以上结果实际上就是偏转 $\pi/2 - \beta$ 角度再次加载的情况，偏转后的 σ 即为 Kaiser 效应所记忆的荷载值。

第一方向作用 σ_0 时，则由摩尔圆可得，第一方向引起第二方向的正应力 $\sigma_{\frac{\pi}{2}-\beta} = \sigma_0 \sin^2 \beta$ ，则该方向正应力与 Kaiser 效应所记忆荷载的比值即为 FR 值：

$$FR = \frac{\sigma}{\sigma_{\frac{\pi}{2}-\beta}} = \frac{\sigma}{\sigma_0 \sin^2 \beta} \text{, 计算结果如图 5。}$$

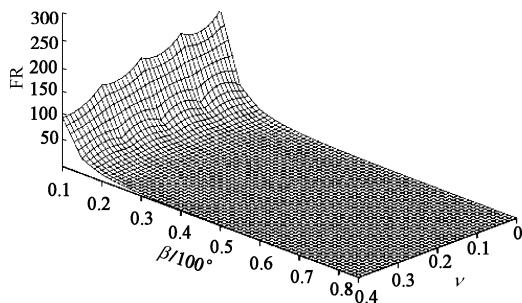


图 5 FR 比值随夹角 β 变化的空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution of specific value FR with angle β

从图 5 可以看出，若 Kaiser 效应对应于该方向正应力，当再次加载偏转方向 $\partial = \pi/2 - \beta$ 较大时，即 β 较小时，Kaiser 效应很难发生。当偏转角度大于 80° 时所需要的正应力甚至达到数百量级。这就能在某种程度上解释为什么加载方向偏转角度越大，Kaiser 效应变得越来越不明显。

若以应力作用方向与裂纹面垂直为第一加载方向，则远场拉应力下的二维椭圆裂纹加载方向变化对 Kaiser 效应影响如下：

(1) 当偏转角度 ∂ 为 $0^\circ \sim 20^\circ$ 时，即 $\beta = 90^\circ$ 到 $\beta = 70^\circ$ 时 Kaiser 效应点所记忆荷载与第一加载方向最大荷载的比值变化范围为 $1 \sim 1.1$ ，说明偏转角度较小时，Kaiser 效应对先期应力的反应较为准确。

(2) 当偏转角度 ∂ 为 90° 时，即 $\beta = 0^\circ$ 时临界应力趋于无穷大，此时裂纹无论在多大的应力下都不可能发展。反映到 Kaiser 效应上，即是偏转 90° 的情况下不可能观察到 Kaiser 点。

(3) 偏转角度从 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的变化过程中，临界应力值不断增大，即第二方向 Kaiser 点所对应荷载与第一方向历史所加最大荷载的比值将不断增大。

(4) 从 FR 的变化可以看到，第二方向所记忆的

荷载并非该方向的正应力值。

(5) 与裂纹面相差相同角度，临界应力值的变化并不成同比例。如 $\nu = 0.2$ 时，裂纹与应力夹角 10° 时 $\sigma_c = 4.135\sigma_1$ ；夹角为 20° 时 $\sigma_c = 2.575\sigma_1$ ；裂纹夹角为 30° 时 $\sigma_c = 1.837\sigma_1$ 。可以看到： $\sigma_c(20^\circ)/\sigma_c(10^\circ) = 0.623$ ；然而同样相差 10° ， $\sigma_c(30^\circ)/\sigma_c(20^\circ) = 0.713$ ，也即表明当存在多方向的多条裂纹时，偏转一定角度后声发射累计曲线将出现多个 Kaiser 点。相对于均为同一方向裂纹而言，Kaiser 点的清晰程度减弱。

以上分析结果与其他学者^[30-31]所作劈裂试验结果接近。

4 结 论

以 Kaiser 效应是裂纹发展的结果这一假定为基础，以能量理论确定的断裂准则为判据，分析了二维无限空间中椭圆穿透型裂纹在远场拉应力下，断裂临界应力随加载方向和裂纹夹角变化的变化规律，从理论的角度对加载方向对 Kaiser 效应的影响进行了尝试性思考，得到如下结论：

(1) 对于任意某一裂纹，裂纹的扩展的临界应力不仅与裂纹面正应力有关，还与裂纹面上的切应力有关，也即是说偏转一定角度后 Kaiser 效应点所记忆的荷载并非为该方向的正应力。

(2) 裂纹发展临界应力对于不同裂纹形态其变化规律有着显著不同。即不能简单的仅以偏转角度一个因素作为变量来对加载方向变化对 Kaiser 效应的影响作出普遍意义上的评估。

(3) 在偏转相同角度时，如从 $5^\circ \sim 10^\circ$ ，与从 $15^\circ \sim 20^\circ$ 比较，临界应力值并不成同比例变化。即在理想状态下，偏转一定角度后 Kaiser 效应点将变得不再清晰，或出现多个拐点。

(4) 当偏转角度为 $0^\circ \sim 20^\circ$ 时，理论上 Kaiser 效应对先期应力的反应较为准确；对于偏转角度接近 90° 的情况不可能出现 Kaiser 效应。

(5) 二维平面拉应力下裂纹情况分析得到的 Kaiser 效应规律与一些学者^[31-32]所进行的劈裂试验结果吻合较好。

参考文献：

- [1] KAISER J. Erkenntnisse und folgerungen aus der messung von gera — uschen bei zugbeanspruchung von metallischen werkstoffen[J]. Archiv Eisenhüttenwesen, 1953, 24(1/2): 43 - 45.
- [2] BARR S P, HUNT D P. Anelastic strain recovery and the

- Kaiser Effect retention span in the Carrmenellis granite[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1999, **32**(3): 169 - 193.
- [3] GOODMAN R E. Subaudible noise during compression of Rock[J]. Gco Soe Am Bull, 1963, **74**: 487 - 490.
- [4] FEERINEIS N. Anwendung der schallemissionanalyse(SEA) als zerstörungsfreies Prüfverfahren für Beton[J]. Dissertation TH Darmstadt, 1982: 511 - 524.
- [5] 纪洪广, 李造鼎. 混凝土材料凯塞效应与 Felicity 效应关系的研究[J]. 应用声学, 1997, **16**(6): 33 - 44. (JI Hong-guang, LI Zao-ding. Experimental study on the relationship of kiser and felicity effect in concrete material[J]. Applied Acoustics, 1997, **16**(6): 33 - 44. (in Chinese))
- [6] 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))
- [7] 卢运虎, 陈 勉, 金 衍, 等. 碳酸盐岩声发射地应力测量方法实验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(8): 62 - 68. (LU Yun-hu, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Experimental study on stress measurement for sound emission in carbonate formation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(8): 62 - 68. (in Chinese))
- [8] KURITA K, FUJII N. Stress memory of crystalline rocks in acoustic emission[J]. Geophys Res Lett, 1979, **6**: 9 - 12.
- [9] YOSHIKAWA S, MOGI K. A new method for estimation of the crustal stress from rock samples: laboratory study in the case of uniaxial compression[J]. Tectonophysics, 1981, **74**: 323 - 339.
- [10] LI C, NORDLUND E. Experimental verification of the Kaiser effect in rocks[J]. Rock Mech Rock Eng, 1993, **26**: 333 - 351.
- [11] GOODMAN R E. Subaudible noise during compression of rocks[J]. Bull Geol Soc Am, 1963, **74**: 487 - 490.
- [12] HOLCOMB D J. Using acoustic emission to determine in situ stress: problems and promise[J]. Geomechanics, 1983, **57**: 11 - 21.
- [13] YOSHIKAWA S, MOGI K. Experimental studies on the effect of stress history on acoustic emission activity—a possibility for estimation of rock stress[J]. J Acoust Emission, 1989, **8**(4): 113 - 123.
- [14] KOERNER R M, LORD A E. AE detection of prestress in soil and rock[C]// Proceedings of the Fourth Conference on AE/MA in Geologic Structures and Materials. Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, 1989: 73 - 86.
- [15] FILIMONOV Y L, LAVROV A V, SHKURATNIK V L. Prospects of memory effects for stress measurement applications in rock salt[C]// Proceedings of EUROCK'2001 Symposium. Rotterdam: A A Balkema, 2001: 59 - 63.
- [16] SHIN K, KANAGAWA T. Kaiser effect of rock in acousto-elasticity, AE and DR[C]// Proceedings of the Fifth Conference on AE/MA in Geologic Structures and Materials. Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, 1995: 197 - 204.
- [17] MICHIIHIRO K, HATA K, YOSHIOKA H, et al. Determination of the initial stresses on rock mass using acoustic emission method[J]. J Acoust Emission, 1991/1992, **10**(1/2): 63 - 76.
- [18] 陈 勉, 张 艳, 金 衍, 等. 加载速率对不同岩性岩石 Kaiser 效应影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28** (增刊 I): 2599 - 2606. (CHEN Mian, ZHANG Yan, JIN Yan, et al. Experimental study of influence of loading rate on Kaiser effect of different lithological rocks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **28**(S1): 2599 - 2606. (in Chinese))
- [19] LAVROV A. Kaiser effect observation in brittle rock cyclically loaded with different loading rates[J]. Mech Mater, 2001, **33**: 669 - 677.
- [20] 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]. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 1993, **30**: 937 - 941.
- [21] MIHIHIRO K. Rock at great depth[M]. Rotterdam: A A Balkema. 1989: 1025 - 1032.
- [22] 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(7): 45 - 46. (LU Xing-yu. Preliminary discussion on the Kaiser effect and the stress orientation[J]. Journal of College of Civil Engineering, Chong-qing, 1987(7): 45 - 46. (in Chinese))
- [23] 张 雪, 刘建中, 曹新玲, 等. 岩石在有围压条件下的声发射凯瑟效应[J]. 东北地震研究, 1990(12): 77 - 86. (ZHANG Xue, LIU Jian-zhong, CAO Xin-ling, et al. The Kaiser effect of acoustic emission of rocks under the condition with confining pressure[J]. Northeastern Seismological Research, 1990(12): 77 - 86. (in Chinese))
- [24] 黄志鹏, 朱可善, 郭映忠. 岩石 Kaiser 效应方向独立性试

- 验研究[J]. 长江科学院院报, 1998, **15**(2): 34 - 37.
(HUANG Zhi-peng, ZHU Ke-shan, GUO Ying-zhong. Experimental study on rock kaiser effect's direction independence[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1998, **15**(2): 34 - 37. (in Chinese))
- [25] 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))
- [26] 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. 北京, 1988: 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. Beijing, 1988: 56 - 60. (in Chinese))
- [27] HOLCOMB D J, COSTIN L S. Detecting damage surfaces in brittle materials using acoustic emissions[J]. J Appl Mech 1986, **53**: 536 - 544.
- [28] HOLCOMB D J. General theory of the Kaiser effect[J]. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 1993, **30**: 929 - 935.
- [29] 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 & Mining Sciences, 2002, **39**(3): 287 - 302.
- [30] 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))

本期广告索引

- 封 2 北京筑信达工程咨询有限公司
封 3 北京理正软件股份有限公司
封 4 南京南瑞集团公司
后插 1 台州建元勘察仪器有限公司
后插 2 西安力创材料检测技术有限公司