

Kaiser 效应测原岩应力过程的数值模拟和理论分析

李元辉¹, 袁瑞甫^{1,2}, 张春明¹, 赵兴东¹

- (1. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110004;
2. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 焦作 454000)

摘要: 用岩石破裂过程分析软件(RFPA^{2D}), 采用与常用的 Kaiser 效应测原岩应力过程相似的加载路径, 对岩石试样进行数值模拟实验。基于统计损伤力学理论, 对 Kaiser 效应的机理进行分析, 并在理论上验证数值实验的结果。结果表明: Kaiser 效应的本质是对岩石内部损伤程度的记忆, 传统用 Kaiser 效应测原岩应力的方法测得的应力值往往比真实值要小, 而且, 岩样在原岩中受到的侧向应力越大, 用该方法测得的轴向应力值与真实值相差越大。因此, 要得到准确的原岩应力, 必须根据岩石的损伤本构关系对单轴加载测得的 Kaiser 效应点应力值进行校正。

关键词: 原岩应力; 数值模拟; Kaiser 效应; 损伤

中图分类号: TD 311 文献标识码: A

Numerical simulation and theoretical analysis on procedure of estimating in-situ stress by Kaiser effect

LI Yuan-hui¹, YUAN Rui-fu^{1,2}, ZHANG Chun-ming¹, ZHAO Xing-dong¹

- (1. School of Resource and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China;
2. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454100, China)

Abstract: Numerical test was carried out by using software of Rock Failure Process Analysis (RFPA^{2D}) to simulate the stress that the rock specimens were suffered in the process of estimating the in-situ stress by Kaiser effect. Based on statistical damage mechanics theory, the mechanism of Kaiser effect was analyzed, and the numerical test result was verified by rock strength theory. The results show that the mechanism of Kaiser effect is the memorizing ability of damage level in rock. The traditional method of estimating in-situ stress by Kaiser effect is not appropriate, for the result is usually smaller than real value, furthermore, greater confining compression that the specimen suffered in the rock mass would result in greater difference between the Kaiser effect stress acquired from uniaxial loading in laboratory and real level of in-situ stress. Consequently, to estimate the in-situ stress more accurately, the adjustment based on the damage constitutive relation must be done to the Kaiser effect stress value acquired from uniaxial loading.

Key words: in-situ stress; numerical simulation; Kaiser effect; damage

声发射(Acoustic emission, AE)是材料内部由于微裂纹的萌生和扩展快速释放能量而产生的弹性波。1953年, Kaiser 首先发现金属材料中的声发射具有不可逆现象^[1], 即对材料进行重复加载时, 只有载荷达到材料先前所受的最大载荷后, 才会有明显的声发射产生, 材料的这种“记忆”现象被称为 Kaiser 效应。

1963年, Goodman 通过实验发现在岩石材料中也存在 Kaiser 效应^[2]。此后, Kaiser 效应就因其能直观表现岩石的记忆能力而受到研究者的关注, 并且被广泛用于测试原岩应力^[3-5]。

岩石声发射 Kaiser 效应的力学本质是岩石受先前载荷所形成的特定的微裂纹只有在达到先前最大载荷

时才重新扩展。Kaiser 效应表现的是岩石对所遭受外部环境记忆, 而其本质是岩石对自身受到的损伤程度的记忆, 它明确表达了岩石材料破坏过程的不可逆性^[6]。在用 Kaiser 效应测定原岩应力时, 通常采用的方法是在原始岩芯上取 6 个(或 9 个)方向上的试样, 然后在实验室里做单轴压缩声发射实验, 测得各试样的 Kaiser 效应点应力, 以此应力值作为岩芯轴向方向上的原岩应力值, 最后用弹性力学理论求出岩芯所处环境的原岩应力。但是, 岩石试样在实验室里单轴压缩与岩石所受的原岩应力显然不是同一个应力状态, 岩样处于原岩中一般会同时受到多个方向的应力, 而单轴压缩时岩石只受到轴向的压应力, 其他方向的应力则被释放。显然, 岩石处于多轴应力状态与单轴应力状态相比其内部结构变化不一样, 为此, 本文作者应用岩石破裂过程分析软件(RFPA^{2D}), 对上述测试原岩应力的过程进行了数值模拟, 并且基于统计损伤力学理论对模拟结果进行分析。

1 数值模型设定

在 RFPA^{2D} 中建立数值模型, 试样的尺寸为 100 mm×50 mm, 模型划分为 200×100 个单元。设定试样的力学性质(单元的弹性模量及强度)服从 Weibull 分布 $\Phi_C(m, \beta)$, 其中 m 为构成岩石的所有单元力学性质的均质程度, β 为单元力学性质的平均值。本模型单元的弹性模量和强度的分布形态分别为 $\Phi_E(3.0, 60 \text{ GPa})$ 和 $\Phi_\sigma(2.5, 0.2 \text{ GPa})$, 单元的拉压强度比为 1/10, 内摩擦角为 30°。采用修正的摩尔—库仑准则 (Mohr—Coulomb Criterion) 作为单元破坏的判据。关于 RFPA 的介绍和使用方法参见文献[7-9]。

2 数值模拟结果

2.1 加载路径

一般用 Kaiser 效应测原岩应力过程中岩样所受的应力路径为: 在原岩中岩样受到多向应力(一般为压应力), 取出岩样后应力解除, 在实验室做声发射实验时岩样受到单轴压应力。数值实验设计试样的加载路径与上述应力路径相似: 首次加载方式为常规三轴加载, 轴向采用位移控制加载, 每步加载 0.002 mm, 加载至 0.12 mm, 围压采用应力控制加载, 与轴向加载同时进行, 然后同时卸轴压和围压, 二次加载采用单轴加载, 加载至试样破坏(后文称为 C—U 加载路径)。

2.2 单轴循环加载 Kaiser 效应验证

为了更清晰地认识不同应力路径对 Kaiser 效应的影响, 首先对试样进行简单的单轴循环压缩数值实验(位移控制, 每步加载 0.002 mm), 得到声发射累计数与应力关系曲线(见图 1)以及加载步与应力和声发射率的关系图(见图 2), 与真实的实验结果^[3]非常吻合。由图 1 和 2 可见, 单轴循环加载条件下, 可以观测到 Kaiser 效应, 在未达到上次加载的最大应力水平时声发射不出现。Kaiser 效应十分准确的记忆了试样先前所受的最大应力, 即 Felicity 比值等于 1。

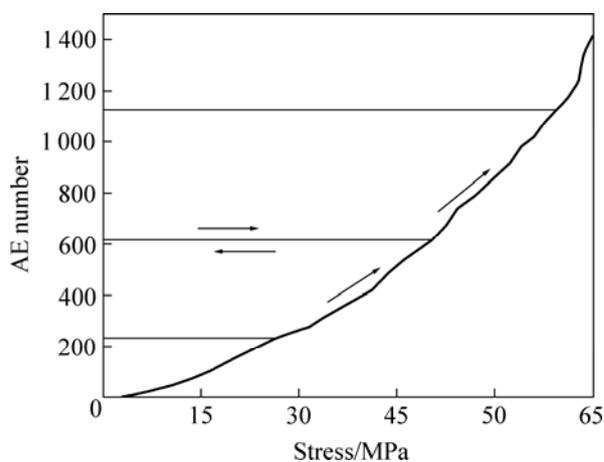


图1 单轴循环加载AE数与应力关系

Fig.1 AE number vs stress under uniaxial cyclic loading

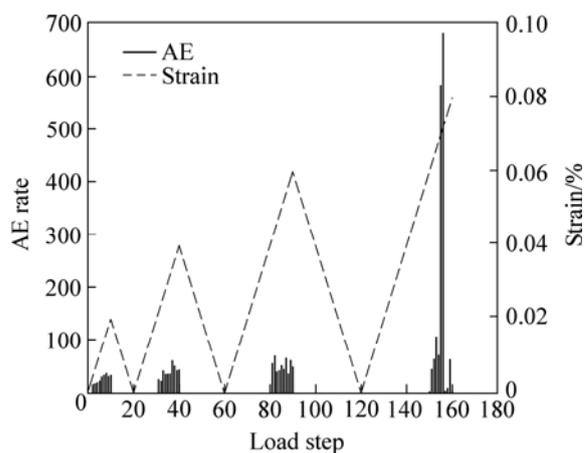


图2 单轴循环加载加载步与AE率和应变关系

Fig.2 AE rate vs load step under uniaxially cyclic load

2.3 设计加载路径的模拟结果

根据设计的加载路径分别对 5 个试样进行了实验, 5 个试样的最大轴向变形都为 0.12 mm, 围压分别加到 5、10、15、20 和 30 MPa。表 1 列出了不同围压下的实验结果。

从表 1 可以看出, 围压越大, 试样产生同样的轴

向变形(0.12 mm)需要的轴向压力也就越大,而二次加载时恢复有效声发射时的应力(Kaiser 效应点应力)越小,即 Felicity 比值越小。图3所示为设计加载路径中轴向应力与 AE 累计数的关系(最大围压加到 10 MPa),图中的箭头表示轴向加载路径。与图1中 Kaiser 效应严格遵循 Felicity 比值等于 1 不同,在图3中虽然也可以观测 Kaiser 效应,但是 Kaiser 效应点的出现明显提前(Felicity 比值等于 0.24)。图4所示为 Felicity 比值与首次加载时围压水平的关系,由图可见,首次加载围压值对 Kaiser 效应记忆最大轴向应力的准确程度影响很大,当首次加载最大围压加到 5 MPa 时,测得的 Kaiser 效应点应力值仅为先前最大应力的 46%(Felicity 比值等于 0.46),当围压达到 30 MPa 时, Felicity 比值则降到了 0.06。

由此可见,不同加载路径下 Kaiser 效应记忆的应力值并不准确,这也证明 Kaiser 效应的本质是对岩石所受损伤程度的记忆而不是先前加载的最大应力。

表1 不同围压下的实验结果

Table 1 Experimental results in different confining compression

Sample	Max confining pressure/MPa	Max axial stress/MPa	Kaiser effect stress/MPa	Felicity ratio
S1	5	96.0	43.7	0.46
S2	10	106.4	25.4	0.24
S3	15	112.8	15.8	0.14
S4	20	118.4	10.7	0.09
S5	30	123.7	7.3	0.06

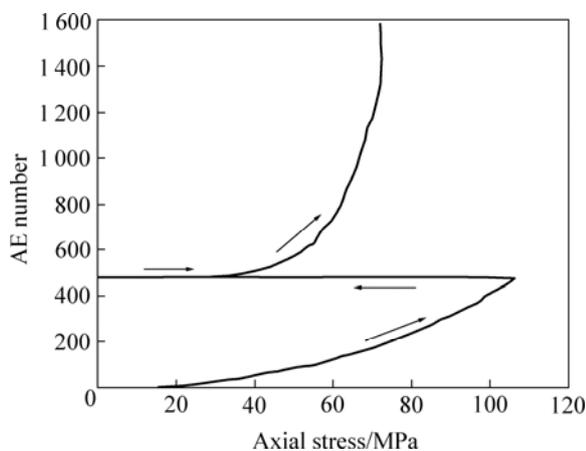


图3 最大围压为10 MPa时轴向应力与AE数的关系

Fig.3 AE number vs axial stress at maximum confining pressure 10 MPa

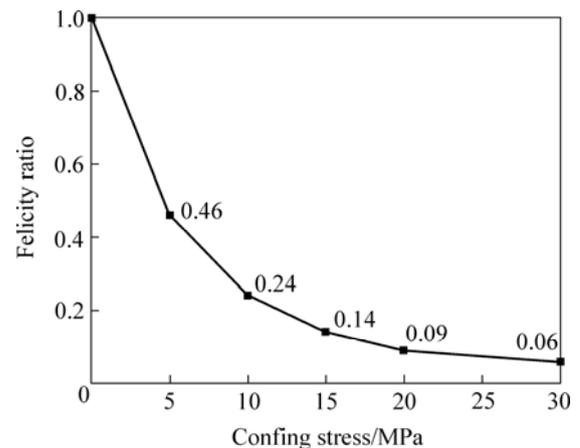


图4 Felicity比值与首次加载围压值的关系

Fig.4 Relationship between Felicity ratio and confining stress level in previous loading cycle

由于围压的保护作用,在首次加载中加的围压越大,试样达到同样的轴向变形时内部所受的损伤越小,所以在单轴加载时就越早恢复正常的声发射。

3 理论分析

3.1 Kaiser 效应的机理

根据统计损伤力学理论^[10-11],假定把岩石划分成若干个含有不同缺陷的微元体,微元体被划分的足够小,以至可以对其做如下假设:1)微元体符合广义胡克定律;2)微元体的破坏符合修正后的 Coulomb 准则^[12]。由于微元体的组成成分和所含的缺陷不一样,微元强度也不等,一般认为岩石材料微元体的一维强度符合 Weibull 统计分布规律:

$$\varphi(\sigma_c) = \frac{m}{\sigma_0} \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_0} \right)^{m-1} \exp \left[- \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中 m 和 σ_0 分别为 Weibull 形态参数和分布标度, σ_c 为微元体的抗压强度, $\varphi(\sigma_c)$ 为加载强度为 σ_c 时微元体破坏的概率。

如前所述, Kaiser 效应的本质是岩石变形过程中损伤的不可逆性,即在同一加载路径下,只有当应力超过其以前所受的最大应力水平时,新的损伤才会产生。因此,假设首次对岩石施加的应力为 $\sigma_{(1)}$,岩石内部强度小于 $\sigma_{(1)}$ 的微元体就会破坏,同时伴随有声发射出现;当下次重新加载时,如果应力小于 $\sigma_{(1)}$ 则不会再有新的微元体破坏,也就没有声发射出现,只有当应力超过 $\sigma_{(1)}$ 才会有新的微元体破坏,声发射也重新恢

复。所以, 对于第 i 次加载, 声发射数可表示为:

$$\frac{n_i}{N} = \begin{cases} 0 & \sigma \leq \sigma_{i-1} \\ \int_{\sigma_{i-1}}^{\sigma} \varphi(x) dx & \sigma > \sigma_{i-1} \end{cases} \quad (2)$$

式中 $i=1, 2, 3, \dots$, σ_{i-1} 为第 $i-1$ 次加载的应力水平, n_i 为第 i 次加载的声发射次数, N 为岩石完全破坏时总的声发射次数。当微元强度 σ 服从 Weibull 分布(假设形状参数 m 等于 3), 则可以绘出岩石在循环加载条件下的破坏过程示意图形, 也即 Kaiser 效应的机理, 结果如图 5 所示。

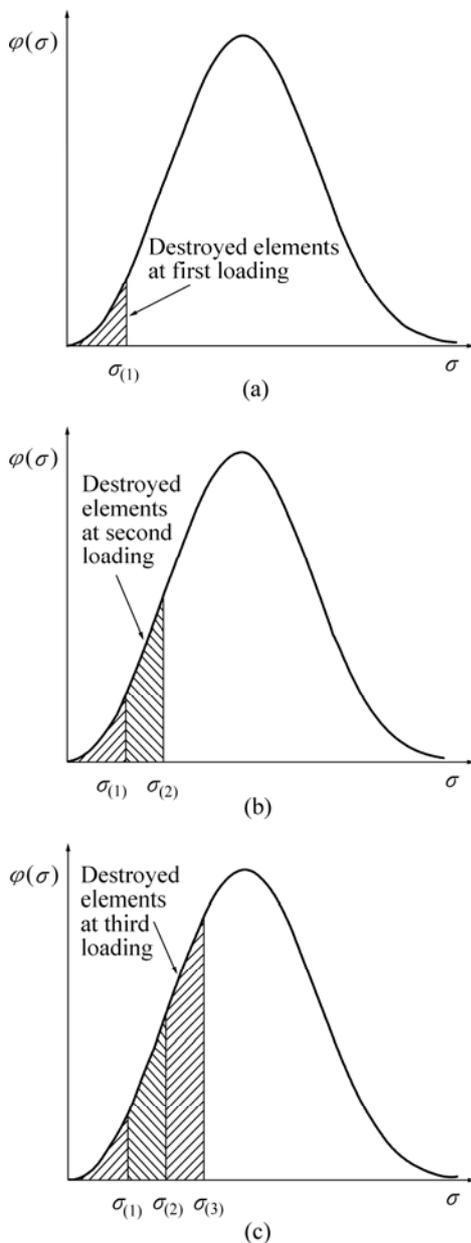


图 5 岩石微元体强度分布及循环加载下的破坏过程
Fig.5 Strength distribution of rock cell and failure process in cyclic loading: (a) $\sigma=\sigma_{(1)}$; (b) $\sigma=\sigma_{(2)}$; (c) $\sigma=\sigma_{(3)}$

3.2 围压对微元体强度的影响

由于微元体的破坏符合修正后的 Mohr—Coulomb 准则, 则在常规三轴加载条件下微元体的破坏条件可表示为:

$$\sigma_1 - \frac{(1 + \sin \theta)}{(1 - \sin \theta)} \sigma_3 \geq \sigma_c \quad (3)$$

式中 θ 为摩擦角, σ_c 为微元体的单轴抗压强度, 其分布规律符合式(1)。图 6 所示为有围压条件下微元体的破坏条件。从式(3)及图 6 可以看出, 由于在常规三轴加载条件下, 使微元体破坏的轴压 σ_1 随着围压 σ_3 的增大而增大。因此, 用单轴加载方式测的 Kaiser 效应应力要小于岩石原来的轴向应力, 并且围压越大测得的结果与真实应力相差越大, 这与前述实验结果吻合。

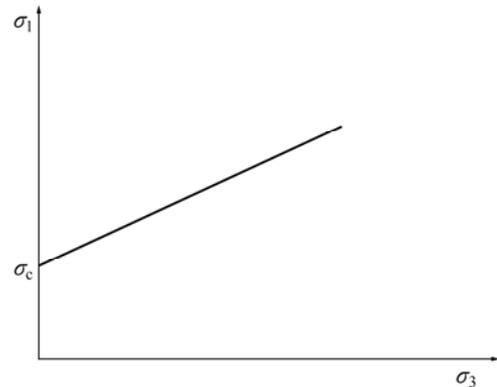


图 6 常规三轴加载微元体破坏条件
Fig.6 Failure criterion of rock cell in conventional triaxial loading

4 结论

- 1) 采用 C—U 加载路径测的 Kaiser 效应点应力值要小于先前加载的轴向应力(Felicity 比值小于 1), 即 Kaiser 效应提前, 而且, 首次加载的围压越大, Felicity 比值越小。由于用 Kaiser 效应测原岩应力方法对岩样的加载路径与 C—U 加载路径的相似, 因此用该方法测原岩应力要小于真实值。
- 2) 由于组成岩石的微元体强度是不均匀的, 导致岩石在首次加载过程中一直伴随着微元体的破坏而产生损伤, 重新加载时, 强度低的微元体已经破坏, 因此只有加载强度超过上次加载水平, 才会有新的微元体破坏, 这就是 Kaiser 效应的产生机理。
- 3) 根据修正的 Coulomb 准则, 使微元体破坏的

轴向压力随着围压的增加而增大,这在理论上也说明 C—U 加载路径测得的 Kaiser 效应点应力值要小于首次加载的最大轴向应力。因此可以推定前述采用的 Kaiser 效应测原岩应力的方法在理论上是不恰当的。因为 Kaiser 效应的本质是对岩石内部损伤的记忆,所以要想得到准确的原岩应力,必须根据岩石的损伤本构关系对单轴加载测得的 Kaiser 效应点应力值进行校正。

REFERENCES

- [1] Kaiser J. A Study of Acoustic Phenomena in Tensile Test[D]. Munich: Technische Hochschule München, 1953.
- [2] Goodman R E. Sub audible noise during compression of rock[J]. *Geo Soc Am Bull*, 1963, 74: 487–490.
- [3] Li C, Norlund E. Experimental verification of the Kaiser effect in rock[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1993, 26(4): 333–351.
- [4] 陈 勉, 陈治喜, 金 衍. 用斜井岩芯的声发射效应确定深层地应力[J]. *岩石力学与工程学报*, 1998, 17(3): 311–314.
CHEN Mian, CHEN Zhi-xi, JIN Yan. Determination of in-situ stresses at great depth by using acoustic emission technique of inclined core[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1998, 17(3): 311–314.
- [5] Lockner D. The role of acoustic emission in the study of rock fracture[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1993, 30(7): 883–899.
- [6] 樊运晓. 损伤: Kaiser 效应记忆机理的探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(2): 254–258.
FAN Yun-xiao. Damage: the mechanism of Kaiser effect[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(2): 254–258.
- [7] TANG Chun-an. Numerical simulation of rack failure and associated seismicity[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(2): 249–262.
- [8] 唐春安, 王述红, 傅宇方. 岩石破裂过程数值试验[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
TANG Chun-an, WANG Shu-hong, FU Yu-fang. Numerical test of rock failure process[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [9] 王善勇, 唐春安, 徐 涛, 谭志宏. 矿柱岩爆过程声发射的数值模拟[J]. *中国有色金属学报*, 2003, 13(3): 754–759.
WANG Shan-yong, TANG Chun-an, XU Tao, TAN Zhi-hong. Numerical simulation on acoustic emission during pillar rock burst[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2003, 13(3): 754–759.
- [10] 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1993.
TANG Chun-an. The catastrophes in rock failure process[M]. Beijing: Coal Industry Press, 1993.
- [11] Lemaitre J. A course on damage mechanics[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1992.
- [12] Brady B H G, Brown E T. Rock mechanics[M]. 2nd ed. London: Chapman & Hall, 1993: 101–106.

(编辑 杨幼平)