

单轴压缩试验下裂纹闭合阶段岩石 KAISER 效应的研究

樊运晓

(中国地质大学工程技术学院 北京 100083)

摘要 选择花岗闪长岩和大理岩进行了单轴压缩试验下裂纹闭合阶段的 KAISER 效应(KE)研究, 试验结果表明: 裂纹闭合阶段有 KE 出现, 岩石 KE 具有记忆先前应力、应变、弹性模量、泊松比和损伤因子的能力; 岩石 KE 的机理在于对其先前损伤的记忆。

关键词 裂纹闭合阶段, KAISER 效应, 力学参数, 恰当比

分类号 TU 45

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2001)06-0793-04

1 引言

材料或结构受外力或内力作用产生变形以及破坏断裂, 并以弹性波形式释放弹性能的现象称为声发射。德国学者 Kaiser 提出了声发射具有不可逆性, 并首先在金属中发现了这一现象。后来以他的名字命名为 KAISER 效应, 简称 KE。1963 年, Goodman 提出了岩石也具有 KE^[1], 即岩石具有记忆先前应力的能力, 从此, 岩石的 KE 研究拉开了序幕。就 KE 记忆的应力水平, 文[2]认为岩石声发射信号在裂纹闭合阶段很低, 只有新裂纹产生时才会有大量的信号出现, 岩石出现 KE 的应力范围为岩石破坏应力的 70%~97%; 文[3]提出 KE 的记忆水平严格存在于岩石变形的弹性阶段。就 KE 记忆的内容, 文[4]提出岩石还具有记忆先前最大应变的能力, 其记忆准确程度高于对应力的记忆。岩石在裂纹闭合阶段是否有 KE 出现? KE 究竟记忆岩石的哪些力学参数? 记忆准确程度如何? 本文选择花岗闪长岩和大理岩进行单轴压缩试验下裂纹闭合阶段的 KE 研究。

2 试验原理及方法^[1]

标准岩芯试样通过力传感器测定载荷, 其外表

面粘贴垂直于轴线和平行于轴线的应变片以测试横向变形和纵向变形, 在应变片附近固定探头采集声发射信号。载荷、变形和声发射信号通过 A/D 模板进入计算机, 经标定后可测得各点应力 σ 、横向应变 ϵ_t 、纵向应变 ϵ_l 以及声发射信号。弹性模量 E 、泊松比 ν 及损伤因子 D 值在此基础上计算, 具体定义见本文第 3 部分。

经测定, 花岗闪长岩和大理岩破坏应力分别为 186 和 152 Mpa。本试验加载阶段, 应力为 8~15 MPa, 根据文[2]的理论, 该加载范围属于裂纹闭合阶段。

3 表征岩石记忆能力的参数

(1) 恰当比值(FR)

文[5]称 KE 应力与先前最大应力的比值为应力恰当比值(FR(δ)), 应力恰当比值表征岩石 KE 记忆先前应力的能力, 该值越接近 1 表示记忆越准确; 恰当比值大于 1 表示岩石记忆能力滞后, 反之则表示记忆超前。将此概念延伸至其他力学参数如应变、弹性模量、泊松比、损伤等, 各项 KE 值与其先前最大值之比分别称为应变恰当比值(FR(ϵ))、弹性模量恰当比值(FR(E))、泊松比恰当比值(FR(ν)) 和损伤恰当比值(FR(D)):

$$FR(\epsilon_s) = \epsilon_{sK} / \epsilon_{sP}, \quad FR(\epsilon_t) = \epsilon_{tK} / \epsilon_{tP},$$

1999 年 12 月 7 日收到初稿, 2000 年 3 月 3 日收到修改稿。

作者 樊运晓 简介: 女, 32 岁, 博士, 2000 年毕业于中国地质大学(北京)工程技术学院工程地质专业, 现任副教授, 主要从事工程地质方面的科研与教学工作。

$FR(E) = E_K / E_P$, $FR(\nu) = \nu_K / \nu_P$, $FR(D) = D_K / D_P$
 式中: 下标 K, P 分别为 KE 点值与所对应的先前最大值。

(2) 平均恰当比值(PFR)

为了更进一步分析试验数据, 定义研究范围内平均恰当比值 $PFR = (\sum FR_i) / n$, 平均恰当比值的好坏反映了研究范围内整体上岩石记忆能力的好坏。

(3) 恰当比均差值(PE_{err})

定义恰当比值与 1 差值的绝对值为岩样记忆误差值, 即 $E_{err} = |FR - 1|$, 记忆误差值客观地反映了岩石记忆超前或滞后的绝对程度; 所有试样记忆误差的平均值为该试样的均差值 PE_{err} , 即

$$PE_{err} = (\sum |FR_i - 1|) / n$$

恰当比均差值不大于 1, 反映了岩石记忆能力的损失程度。无论记忆能力超前或滞后, 均差值越大, 则表明岩石记忆先前参数的能力损失越强烈; 反之, 均差值越小, 则表示恰当比值越趋近于 1, 记忆损失越微弱。

(4) 恰当比偏差值(PD_{ev})

在某一范围内, 岩石的记忆能力可能普遍超前, 也可能普遍滞后, 定义在研究范围内各个恰当比值与该研究范围内平均恰当比差值的绝对值为该试验 KE 记忆能力的偏差值, 即 $D_{ev} = |FR - PFR|$ 。研究范围内所有 KE 偏差值的平均值称为平均偏差值 PD_{ev} , 即 $PD_{ev} = (\sum |FR_i - PFR|) / n$ 。

平均偏差值说明了研究范围内所有 KE 记忆先前状态的稳定程度。平均偏差值越小, 说明记忆稳定性越好; 反之, 则说明研究范围内 KE 记忆超前或者滞后波动厉害, 记忆稳定性差。

4 弹性模量、泊松比、体积应变及损伤因子的求法

弹性模量是指在弹性范围内应力与应变的比值, 表示为 $E = \sigma / \epsilon$ 。

弹性模量反映了岩石材料的坚固性, 表现了岩石的致密程度。在本试验中, 为了掌握采集数据随时间的变化规律, 了解整个试验过程中应力-应变关系, 将采集数据各点的应力值与其纵向应变的比值定义为该点的弹性模量, 记作 $E_i = \sigma_i / \epsilon_{ai}$ 。

同理, 定义各采集点横向应变与纵向应变的比值为该点的泊松比, 即 $\nu_i = \epsilon_{vi} / \epsilon_{ai}$ 。

宏观上岩石弹性模量 E_{err} 和固有基质弹性模量 E 的差异正是由于岩石内部微观裂纹的变化而造成的, 无论是裂纹张开阶段还是闭合阶段, 都可以把

岩石弹模与其固有弹模的差异用微观的平均裂纹长度来表示, 文[6]定义了损伤因子 D , 其具体表达式及相应各点的表达式分别为

$$D = \sqrt[3]{\frac{E}{E_{err}} - 1}, \quad D_i = \sqrt[3]{\frac{E_i}{E_{err}} - 1}$$

5 试验结果

(1) 存在性及记忆内容

试验表明: 花岗闪长岩和大理岩在裂纹闭合阶段都有 KE 出现, 图 1 给出某大理岩的声发射-应力曲线。其先前所受最大应力为 12.4 MPa。从图 1(a) 可以看出: 在加载初始阶段基本上没有声发射信号, 当应力超过 8 MPa 之后, 声发射信号骤然增大, 说明有明显的 KE 出现。图 1(b) 用回归法确定了岩石出现 KE 效应的应力 KE 点值为 8.3 MPa, 其记忆先前应力的恰当比值为 0.669; 即用同样方法测定其记忆先前纵向应变、横向应变以及弹性模量、泊松比和损伤的恰当比值, 有关数据见表 1。图 2 给出某花岗闪长岩试样 KE 记忆各项参数的声发射总数-各力学参数曲线。

表 1 两类岩石记忆先前参数的恰当比值

Table 1 Felicity ratio of remembering previous parameters for two kinds of rocks

试样号	应力	纵向应变	横向应变	弹性模量	泊松比	损伤因子
A1	0.825	0.811	0.783	1.017	0.963	0.981
A2	0.744	0.769	0.857	0.959	1.159	1.018
A3	0.649	0.626	0.714	1.040	1.127	0.983
A4	0.633	0.654	0.650	0.962	0.976	1.018
A5	0.692	0.751	0.661	0.921	0.883	1.040
B1	0.669	0.725	0.659	0.918	0.909	1.032
B2	0.698	0.767	0.705	0.911	0.927	1.039
B3	0.967	0.973	0.953	0.994	0.983	1.003
PFR	0.735	0.760	0.748	0.965	0.991	1.014
PE _{err}	0.265	0.241	0.256	0.044	0.081	0.023
PD _{ev}	0.083	0.071	0.085	0.038	0.076	0.019

注: 表中 A 代表花岗闪长岩, B 代表大理岩。

(2) 记忆准确度比较

从平均恰当比值来看, 岩石记忆先前应力和两项应变的能力基本相当, 恰当比值均 < 1, 平均恰当比值约为 0.7, 说明两类岩石记忆应力和应变能力普遍超前, 记忆准确度为 70%; 岩石记忆先前弹性模量、泊松比和损伤因子的能力基本相当, 恰当比值 > 1 和 < 1 都有出现, 表示其记忆先前的能力超前和滞后都有发生, 平均恰当比值在 0.9 以上, 其记忆准确度高于 90%, 明显好于前 3 项, 但由于岩石记忆超前和滞后都有发生, 进一步的判断还需从

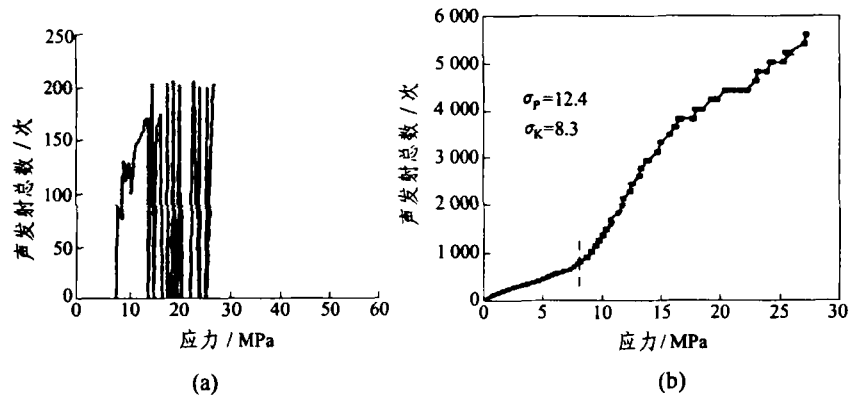


图 1 某大理岩样(B1 试样)声发射-应力曲线、声发射总数-应力曲线
Fig.1 AE-stress curves and total AE-stress curve of a marble sample(No. B1)

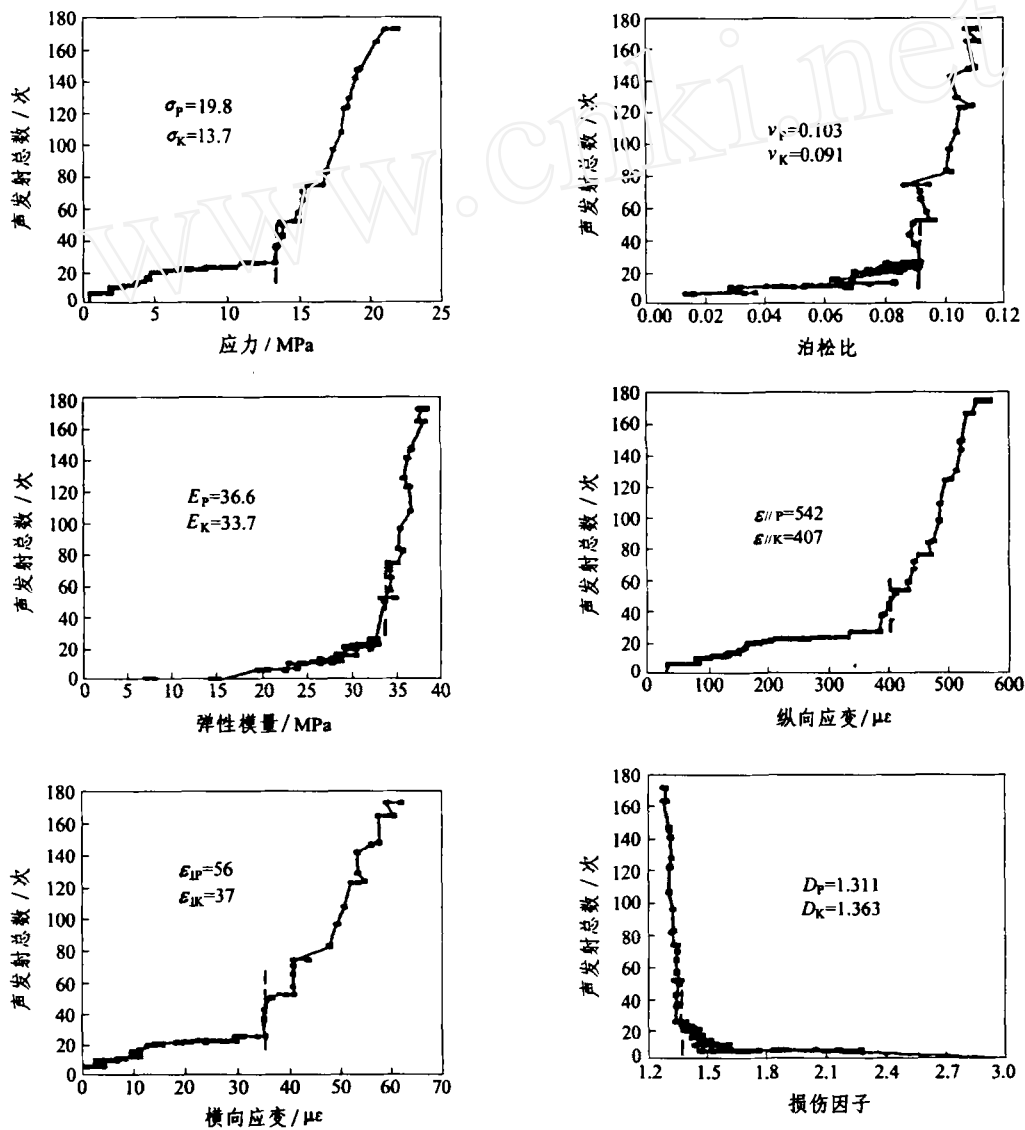


图 2 某花岗闪长岩(A5 试样)声发射总数-各力学参数曲线
Fig.2 Total AE-mechanical parameters curves for a granodiorite sample (No.A5)

恰当比均差值和恰当比偏差值来确定。

恰当比均差值从另一个侧面补充说明岩石记忆的准确程度,岩石记忆先前损伤因子的均差值最小,

说明其恰当比值最接近 1,因而岩石记忆先前损伤因子的能力最好;平均偏差值反映了试验阶段岩石记忆先前参数的稳定程度,岩石记忆先前损伤因子

的偏差值最小,表明在试验阶段内,岩石记忆超前或滞后的波动小,记忆稳定性好^[7, 8]。

6 结 论

(1) 试验结果表明:花岗闪长岩和大理岩在裂纹闭合阶段有 KE 出现。

(2) 两类岩石具有记忆先前应力、先前纵向应变、横向应变以及先前弹性模量、泊松比和先前损伤因子的能力。

(3) 两类岩石记忆应力与两项应变的能力基本相当,记忆准确程度约为 70%;记忆先前弹性模量、泊松比的能力明显提高,准确度达到 90%;记忆先前损伤因子的能力最为准确,平均恰当比值高达 99%,最高记忆误差值仅为 4%。

(4) 岩石 KE 的机理在于其对先前损伤的记忆,具体表现为记忆准确且记忆稳定性好。

参 考 文 献

- 1 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,1998,540~544
- 2 Boyce G M. A study of the acoustic emission response of various rock type[Master Thesis][D].Drexel: Drexel University, 1981
- 3 秦四清,李造鼎.岩石声发射技术概论[M].成都:西南交通大学出版社,1993
- 4 Michihiro K. Study on estimating stresses by Kaiser Effect of AE[A]. In: Hardy H Reginald Jr. ed. Proc. 26th US Symposium on Rock Mechanics[C]. Chicago: Trans. Tech. Pub, 1991, 981~992
- 5 Hardy H R Jr. Application of the Kaiser Effect for the evaluation of in-situ stresses[A]. In: Proc. 3rd Conference on the Mechanical Behavior of Salt[C]. Paris: [s.n.], 1984
- 6 樊运晓.损伤:KAISER 效应记忆机理探讨[J].岩石力学与工程学报,2000,19(2):254~258
- 7 陈卫忠,李术才,朱维申等.考虑裂隙闭合和摩擦效应的节理岩体能量损伤理论与应用[J].岩石力学与工程学报,2000,19(2):131~135
- 8 韩贝玲,徐嘉谟.关于岩石“固结应力”记忆模型的探讨[J].岩石力学与工程学报,1999,18(1):112~114

RESEARCH ON KAISER EFFECT DURING CLOSING PERIOD OF ROCK CRACKS UNDER UNIAXIAL LOADING

Fan Yunxiao

(China University of Geosciences, Beijing 100083 China)

Abstract The KAISER effect during closing period of rock cracks under uniaxial loading is studied. The test result shows that KE occurs during closing period of rock cracks and the rocks have the ability to remember their previous stress, strain, Young's modulus, Poisson ratio and damage factor. The mechanism of rock's KAISER effect does be remembering its previous damage.

Key words closing period of crack, KAISER effect, mechanics parameters, felicity ratio

重庆轻轨隧道创新施工新水平

经过中铁一局三公司的科学攻关,重庆轻轨较(场口)新(山村)线重点控制工程马家堡隧道顺利通过重庆市电信大楼等高层建筑和繁华交通要道,实现安全优质贯通,创造出城市地下施工无扰动、无沉降、无震裂新水平,为我国城市地下工程施工积累了新经验。

重庆轻轨较(场口)新(山村)线是我国西部大开发重点工程之一,采用国际先进水平的跨座式单轨系统,线路全长 14.35 km,纵贯重庆市狭长的渝中半岛,中铁一局三公司承建的轻轨工程马家堡隧道由两座平行单线隧道组成,每孔长 474 m,宽 4.7 m,高 7.9 m,地处重庆渝中区长江二路繁华地段,洞项上部是重庆市交通干线,车辆行人密集,每小时通过车辆 500 余辆,道路两侧商业店面、居民楼房林立,各种电力通讯线路密如蛛网,特别是隧道进入 300 m 后要通过 18 层高的电信中枢——重庆市电信大楼和一座 60 年代修建的 8 层砖混结构居民楼,且埋深仅 12 m,稍有不慎就会造成通讯中断、建筑物下沉等严重后果。中铁一局三公司对隧道开挖过程中的关键工序——爆破,进行了集中攻关,采取小药量、频爆破、增加覆盖物等方法,有效地控制了飞石;在隧道掘进施工中,为实现无扰动、无沉降、无震裂的目标,顺利实现了地面零沉降,香港建筑协会、日本轻轨专家组参观考察后一致认为马家堡隧道创出了城市地下施工新水平。

(摘自 2001.6.12《科技日报》)