

# 岩石声发射 Kaiser 效应的数值模拟试验研究<sup>1)</sup>

傅宇方<sup>1</sup>唐春安<sup>1,2</sup><sup>1</sup>(东北大学岩石破裂与失稳研究中心, 沈阳 110006) <sup>2</sup>(中国科学院力学研究所 LNM, 北京 100080)

**摘要** 运用岩石破裂过程分析 RFPA<sup>2D</sup> 系统, 对岩石破裂过程中声发射 Kaiser 效应进行了数值模拟试验研究, 得到了与物理试验现象十分吻合的模拟结果。

**关键词** 声发射, 非均匀性, 破裂, 数值模拟

## 1 引言

对材料进行重复加卸载实验时, 只有载荷达到材料先前所受最大载荷时, 才有明显的声发射 (Acoustic Emission, 简称 AE) 产生, 材料这种“记忆”现象被称为 Kaiser 效应。1950 年, 德国人 J. Kaiser 在做金属拉伸实验时发现了这一现象<sup>[1]</sup>。随后, Goodman(1963 年)<sup>[2]</sup> 等人在砂岩和石英岩压缩实验中也证实了 Kaiser 效应的存在。

Kaiser 效应的发现为解决岩石力学和工程中诸如测定岩体地应力状态历史、损伤估计等问题带来了新方法。这种方法具有简单、可操作性强、经济的特点, 因而在岩石力学及工程领域具有广阔的应用前景。然而, 尽管在过去的几十年中, 人们通过大量的实验<sup>[1,3,4]</sup> 和现场测试, 对 Kaiser 效应的发生机制及其相关的问题进行了分析研究, 但是, 许多机理问题和实验、现场测试数据分析尚缺少理论的解释<sup>[1]</sup>。唐春安、陈忠辉等<sup>[5~7]</sup> 基于岩石损伤和声发射具有一致性的假定, 用连续损伤力学观点推演出岩石声发射的一般理论模式, 通过解析理论讨论了单轴压缩状态下岩石声发射的 Kaiser 效应。但是, 由于解析模型难以考虑局部微损伤间的相互作用, 不能研究裂纹的成核、贯通和相互作用对声发射的影响, 因此在实际应用中受到很大的局限。

鉴于此, 基于文献 [7~10] 介绍的原理: (1) 引入基元力学参数 (弹模、强度等) 的统计分布规律, 以反映岩石材料的非均匀性; (2) 通过相变基元的参数弱化或退化, 模拟材料破坏的非连续性; (3) 相变基元的力学性质不可逆; (4) 基元相变前后均为线弹性体。运用有限元技术, 东北大学岩石破裂与失稳研究中心开发了岩石破裂过程分析的软件系统 RFPA(Rock Failure Process Analysis)。其最大特点是可考虑材料

的非均匀性, 并引入渐进破坏模型, 可以分析脆性非均匀材料的破裂过程。利用这个数值模拟工具, 笔者对岩石在循环加、卸载条件下的 Kaiser 效应进行了初步的数值模拟试验分析。

## 2 模型建立

本文采用单轴受压 (平面应力) 岩样模型, 岩样的尺寸为 100mm×50mm, 模型划分为 100×50 个单元。加载过程采用位移控制的加载方式, 模拟试验机的工作方式。加载总步数 720 步, 采用重复加、卸载, 其中 13 次加载, 12 次卸载, 每步加载位移量  $\Delta s = 0.0015 \text{ mm}$ 。

为了研究岩石非均匀性的影响, 设定岩石的力学性质 (单元的弹性及强度性质) 服从 Weibull 分布<sup>[8~10]</sup>  $\phi_c(m, \beta)$ , 其中参数  $m$  为形状参数, 反映岩石材料力学性质的均匀性,  $m$  越大, 表明构成岩石的基元间力学性质差别小, 岩石的性质越均匀;  $\beta$  为反映岩石材料平均性质的参数。本模型中, 弹模和强度的分布参数分别为  $\phi_c(1.5, 60000 \text{ MPa})$  和  $\phi_\sigma(1.5, 200 \text{ MPa})$ 。采用修正的库仑准则 (Coulomb) 作为单元破坏的准则。本模型中单元材料的拉、压强度比为 1/10, 内摩擦角为 30°。采用 Monte-Carlo 方法对单元进行随机赋值, 具体实现方法见文献 [11]。

具体模型的形状和参数分布见图 1 所示。图中的



图 1 岩样模型示意图

1) 中国科学院力学研究所非线性连续介质力学国家实验室 (LNM) 开放基金项目资助。

1999-07-07 收到第 1 稿, 2000-03-07 收到修改稿。

灰度代表单元弹模值的大小. 亮度越高, 值越大. 模型建立的详细方法 (包括在模型中如何考虑材料非均匀性), 请参见文献 [8~10].

### 3 模拟结果分析及讨论

图 2 为循环加、卸载条件下岩石声发射数的 RFPA 模拟曲线. 图中的灰色箭头代表了原来加载循环的最大应力. 在整个第 1 个循环中, 声发射 (AE) 连续地产生. 但是, 在第 3 个循环中, 直到载荷增加到第 1 个循环的最大应力水平, 新的声发射 (AE) 才产生. 这样通过 RFPA 软件再现了 Kaiser 效应. 相同的现象在随后的循环模拟中也出现了. 同实验结

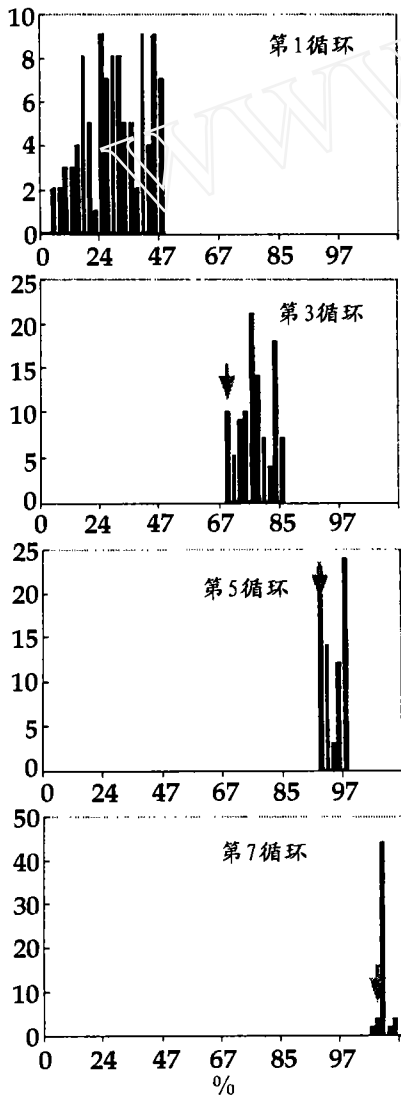


图 2 循环加、卸载声发射数 (个)- 强度百分比 (%) 曲线

果 [3] 相比较, RFPA 的模拟结果较好地反映了声发射的 Kaiser 效应规律的存在. 同时, 也必须注意, 在实验结果中的高应力水平阶段, 声发射并没有准确地按照 Kaiser 效应的定义出现. 在文献 [3] 中, 作者采用了 8 种岩石, 共计 61 个岩样进行了 Kaiser 效应的验证实验. 在实验中发现, 对于不同类型的岩石试样, 如果按照 Kaiser 效应的严格定义, Kaiser 效应只是在一定的范围 (相对峰值载荷较低的应力水平) 内存在. 在 RFPA 模拟结果中的高应力阶段 (如在图 2 第 7 个加、卸循环), 在达到上一循环最大主应力处的略微提前一点的地方岩石声发射产生. 这个现象被称为 Felicity 效应 [3], 在文献 [1] 实验结果中也能够观察到这一现象.

图 3 为循环加、卸载载荷 - 位移曲线的 RFPA 数值模拟结果. 同典型的实验结果 [12] 有着较好的一致性, 可见 RFPA 引入材料非均匀性和采用的破坏处理方法很好地再现了实验结果. 尽管在 RFPA 中的单元模型是基于弹性损伤本构关系, 模型所反映的力学行为比较简单, 但是构成材料非均匀单元行为的宏观累积表现却是复杂的, 全过程曲线表现出变形非线性和弱化现象, 也反映了材料构成单元破坏后的不可逆性, 即加、卸载路径不可逆. 这说明 RFPA 所采用的处理材料损伤、破坏的方法是能够比较实际地反映材料的破坏机理, 至少提供了一种具有正确倾向性真实情况的粗略描述.

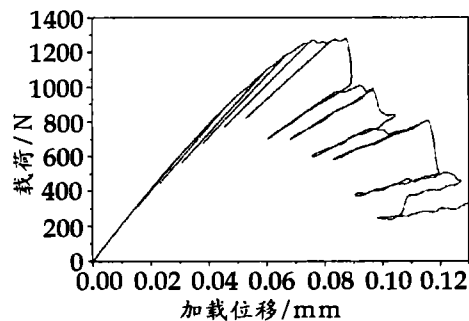


图 3 循环加、卸载载荷 - 位移曲线

图 4 为岩样循环加、卸载破裂过程的 RFPA 模拟结果. 图中单元的灰度代表了构成岩样的单元材料性质, 亮度越高单元材料的弹性模量越高. 岩样的宏观破裂面呈倒“Y”字形, 这与现有的诸多实验结果是一致的.

### 4 结 论

本文利用 RFPA 系统模拟了岩石破裂过程中的

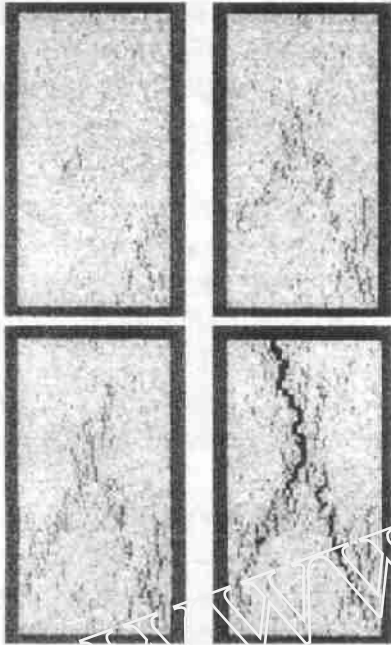


图4 岩样破裂过程模拟结果

Kaiser 效应。得到了基于弹性损伤模型的完整的载荷-位移曲线和声发射曲线,其结果同实验现象具有很好的一致性。说明 RFPA 系统引入介质非均匀性和所采用的单元破坏处理方法是正确的、合理的,能够比较客观地反映岩石破裂过程的本质规律。

### 参 考 文 献

- 1 秦四清,李造鼎等. 岩石声发射技术概论. 成都:西南交通大学出版社, 1993
- 2 Goodman R E. Subaudible noise during compression of rock. *Geo Soc Am Bull*, 1963, 74: 487~490
- 3 Li C, Norlund E. Experimental verification of Kaiser effect in rocks. *Rock Mechanics and Rock Engin*, 1993, 26(4): 333~351
- 4 Seto M, Nag D K, Vutukuri V S. Experimental verification of the Kaiser effect in rock under different environment conditions. *Eurock'96*. 1996. 1~8

(上接第54页)

促进学术交流、繁荣学术事业的作用。

与会代表一致认为本届大会是一次圆满成功的大会,显示了我国复合材料研究、开发和应用方面的新成就,同时必将对我国复合材料事业的发展起到积极的作用。就目前情况而言,我国复合材料研究与先进国家相比仍有不小差距。会议建议,加强以下几个方面的研究: 1. 复合材料的实验研究; 2. 原材料研究,特别是纤维的研究; 3. 成型工艺控制和智能化; 4. 复合材料性能/价格比的提高; 5. 复合材料应用向民用领域的扩展; 6. 复合材料的修补技术; 7. 多功能复合材料中,结构与性能以及与环境的耦合问题; 8. 复合材料的数据库和评价技术。

- 5 Tang C A, Chen Z H, Xu X H, Li C. A theoretical model for Kaiser effect in rock. *Pure Appl Geophys*, 1997, 150: 203~215
- 6 陈忠辉,唐春安,徐小荷,李春林. 岩石声发射 Kaiser 效应的理论和实验研究. *中国有色金属学报*, 1997, 7(1): 9~12
- 7 唐春安. 脆性材料破裂过程分析的数值试验研究方法. *力学与实践*, 1999, 21(2): 21~24
- 8 Tang C A. Numerical simulation of rock failure and associated seismicity. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1997, 34(2): 249~262
- 9 唐春安. 岩石破裂过程声发射的数值模拟研究. *岩石力学与工程学报*, 1997, 16(4): 368~378
- 10 傅宇方. 岩石脆性破裂过程的数值试验研究. 东北大学博士论文, 2000
- 11 傅宇方. 岩石破裂过程的数值模拟研究. 东北大学硕士论文, 1997
- 12 Chang K J, Yang T W. A constitutive model for the mechanical properties of rock. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1982, 19: 123~133

### NUMERICAL TEST ON KAISER EFFECT IN ROCK FAILURE PROCESS

FU Yufang<sup>1</sup> TANG Chun'an<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>(CRISR, Northeastern University, Shenyang 110006, China)

<sup>2</sup>(LNM, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** The newly developed software, Rock Failure Process Analysis (RFPA), is used to study the Kaiser Effect in rock failure subjected to uniaxial compression. The numerical results agree well with the observed experimental phenomenon.

**Key words** acoustic emission, heterogeneity, failure, numerical simulation