

态矢量方法的实验研究^{*}

余怀忠¹, 尹祥础^{1,2}, 张永仙^{1,2}, 夏蒙芬^{1,3}, 梁乃刚¹, 李 敏¹,
许昭永^{1,4}, 彭克银^{1,2}, 颜玉定^{1,5}, Victor Kukshenko⁶,
Wu Zhishen⁷, Qi Li⁷, Surguei Elizarov⁸

(1. 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100080; 2. 中国地震局分析预报中心, 北京 100036; 3. 北京大学, 北京 100871; 4. 云南省地震局, 云南 昆明 650041; 5. 广东省地震局, 广东 广州 510070; 6. Ioffe Physical Technique Institute, Russian Academy of Sciences, Russia; 7. Ibaraki University, Japan; 8. Interunis Ltd, Moscow, Russia)

摘要: 在地震等灾变的发生之前, 会出现一定的前兆现象。文中通过实验方法对这些前兆现象之一的态矢量的异常变化进行了研究。实验使用声发射技术 (Acoustic Emission), 对三轴应力条件下岩石试件内部微裂纹的产生和扩展进行了记录。实验结果表明在岩石试件最终破坏之前, 表征态矢量的相关参量都发生了异常明显的变化, 这表明态矢量的异常变化可以被用作为岩石等脆性材料灾变的前兆, 使用态矢量方法可以对脆性材料的破坏乃至地震作出预测。

关键词: 态矢量; 声发射; 临界点; 地震预测

中图分类号: P315.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-3274(2004)03-0001-07

引言

为了能对地震等灾变破坏作出成功的预测, 地震学家们提出了多种理论和方法, 其中临界点理论就是一种新近提出的、并得到广泛重视的理论^[1~8], 基于这一理论所提出的一系列前兆现象, 如加卸载响应比 (LURR)^[9~12]、能量加速释放 (AER) 等, 它们反映了震源区固体介质损伤演化的物理实质, 并且能够较为定量地刻画出地震演化进程以及灾变的逼近程度, 因此在实际地震预测中起了重要作用。

本文所研究的态矢量方法是研究岩石等脆性材料损伤演化的一种新方法^{[13],[14]}, 它通过态矢量的相关计算量变化, 刻画出系统内部微损伤的产生、发展、集中、破坏的演化过程, 进而能够较为直观地反映出灾变发生的临界点, 因而它是能够预测岩石等脆性材料破坏的又一种重要前兆现象。尹祥础等^[13]曾利用态矢量方法对地震活动性的演化进行过研

* 收稿日期: 2003-11-25; 修改回日期: 2004-01-30

基金项目: 中国财政部 APEC 专项基金; 国家自然科学基金项目 (10232050); 国家 973 项目 (2002CB412706); 中国科学院计算网络中心项目 (INF105-SCE-2-02)

作者简介: 余怀忠 (1975-), 男, 安徽合肥人, 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室博士研究生。

究,分析了几个著名震例,发现地震前其态矢量的相关计算量发生了显著的变化,同时还利用该方法对云南地区的地震活动趋势进行了一定的探索。

本文通过岩石破裂 AE 实验对态矢量方法做了进一步研究。AE 事件与地震事件在本质上是相同的,两者都是对系统内部损伤发生的时、空、强的连续记录,且在定位方法上也具有一致性。同时,由于岩石等脆性材料中的 AE 与地震相同,通过岩石破裂声发射实验能够直接模拟地下岩石圈的损伤演化过程,因此在地震研究中常常应用岩石破坏实验的研究结果。AE 现象是由于材料内部弹性能的迅速释放产生的,AE 技术主要是用来对材料在受载情况下,其内部的损伤进行监测的一种方法,所记录到的声发射信号则包含了损伤的定位情况及其相关信息,而如何将瞬时的信号用仪器记录下来并从这些信号中提取出有用的参数,是研究 AE 技术的关键问题。

近年来,AE 技术得到了很大的发展,如美国、日本、俄罗斯等国家就有着较高的水平。本文的实验就采用了俄罗斯科学院 Ioffe 物理技术研究所的 AE 测试仪,以 AE 的形式详细记录了岩石材料内部发生损伤的时、空、强演化过程(与地震发生的三要素直接相对应)^[15];并且以数字方式输出 AE 信号的相关特征量,用这种记录方式所记录到的 AE 信号量远远大于传统的、以波形方式记录的 AE 信号量。本文的实验是通过国际合作的方式进行,参加方有中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室(LNM)、中国地震局分析预报中心、俄罗斯科学院 Ioffe 物理技术研究所、日本 Ibaraki 大学、北京大学、云南地震工程研究院等。

1 实验系统

实验采用的材料为片麻岩(Gneiss),分大、小二种试件,尺寸分别为:大试件 105 cm × 40 cm × 10 cm(图 1)和小试件 14 cm × 7 cm × 7 cm(图 2),其相关物理参数为:模量 $E = 27$ GPa,泊松比 $\nu = 0.26$,密度 $\rho = 2.6 \times 10^3$ kg/m³,波速 $v = 3200$ m/s。加压设备为 500 t 岩石三轴应力试验机(长江 500 万能型试验机)。使用俄罗斯 A-Line16D 声发射测试仪(12 位精度,12 个通道)对试件内部损伤发生的时间、位置和强度进行探测。

岩石试件在加载之后产生裂纹时将释放能量,这种能量以应力波的形式进行传播,当传播到试件表面时被 AE 探头所接收,接收到的就是 AE 信号。10 个声发射探头分别被固定在试件的自由表面,如图 1,2 所示,其中“ ”表示探头所在位置。10 个通道相互独立的接收试件内部产生的高频 AE 信号,该系统的最高采样频率为 5 MHz,在本次实验中为 1 MHz,带通滤波范围为 50 kHz ~ 250 kHz(通常 AE 信号低于 200 kHz)。AE 信号被放大和滤波以后传送到核心处理器进行分析和处理,然后用数字信号输出相关的特征量,包括时间、能量、幅值、AE 源的定位坐标等,这样能够明显提高 AE 信号的记录信息量,本文的实验中所记录到的 AE 信号数达到 10^5 个之多。

每个 AE 事件都与试件内部微裂纹的发生或扩展相对应,同时它还包括了 AE 信号所反映的各种相关特征量。这样,就可以通过对 AE 事件的收集和分析来确定裂纹的产生和发展等行为^[16]。被接收到的 AE 时间等相关参数,可以用来为声发射事件提供三维的定位^[17]。实验中,AE 事件定位的绝对误差小于 1 cm。如上所述,AE 事件的定位结果反映了岩石的破坏情况,同时也是对 AE 记录情况的直接反映。

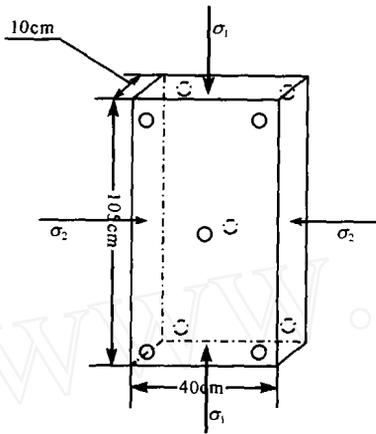


图 1 大试件的尺寸、加载方式和声发射探头的布置

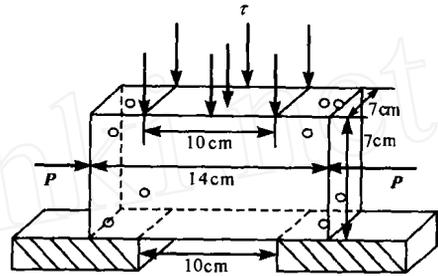


图 2 小试件的尺寸、加载方式和声发射探头的布置

大试件采取轴压与侧压同时加载的方式(图 1)。侧压: 在较小的侧面上通过钢块均匀的加载, 达到 60 t 后保持至实验结束(侧压最大能达到 100 t); 轴压: 压头在试件端部均匀加载, 直至试件破坏(轴压最大能达到 500 t)。小试件采用的加载方式如图 2 所示, 试件的上端加载剪力, 侧向加载载荷 $P=10\text{ t}$, 保持至实验结束。实验中, 大试件的轴压 σ_1 以及小试件的剪力 τ 的加载历史、相应的声发射记录结果分别如图 3 和图 4 所示。试件在最后一个加载阶段中达到剪切破坏。

由图 3 和图 4 的记录结果能看到, 在循环载荷的作用下, 当载荷水平较低时, 载荷初到某一水平时, AE 事件明显急剧增加, 而在同一载荷水平随后的循环加载过程中, AE 事件会逐渐衰减; 当载荷水平较高时(接近临界值), 则没有这种现象。

2 声发射定位

如果把 AE 发射源的位置记为 (x_o, y_o, z_o) , 试件表面的探头位置分别记为 (x_n, y_n, z_n) , $n = 1, 2, 3, \dots$, 如果假设波速已知, 则需要至少 4 个探头所记录到的信息对 AE 发射源进行空间定位, 而要进一步的提高 AE 定位精度, 就需要更多的 AE 探头。在本文的实验中, 试件的自由面上共有 10 个 AE 探头对 AE 信号进行记录, 定位时可根据信号到达探头的时间先后来进行分析。一般来说, 如果试件的厚度与长度之比远小于 1, 定位误差约为 1 cm。

大试件的 AE 定位结果余怀忠等^[18]已经进行了研究, 本文只对小试件的定位情况进行讨论。图 5 为小试件的 AE 定位结果, 整个定位过程共分为 4 个阶段, 各个加载阶段的 AE 发射源的个数分别为 275 (0 ~ 581 s)、385 (581 ~ 1572 s)、3829 (1572 ~ 2380 s)、480 (2380 ~ 2678 s)。从图中可以看出, 在加载的前二个阶段, AE 事件数较少也比较离散, 此时损伤程度还不足以造成岩石试件发生根本性的破坏。随着载荷的增加, 当接近临界值时, 试件内部的微损伤开始迅速的发展, 并且开始出现明显的集中。如图 5 所示, 在第三个加载阶段结束时, 明显的破裂面已经形成, 这预示着试件的最终破坏即将到来。此后, 损伤继续扩展到岩石试件的表面(第四个加载阶段), 就形成了宏观的破坏, 而在这一阶段虽然载

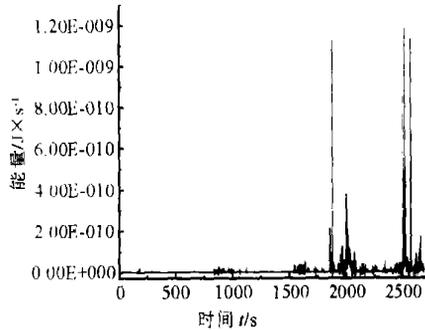
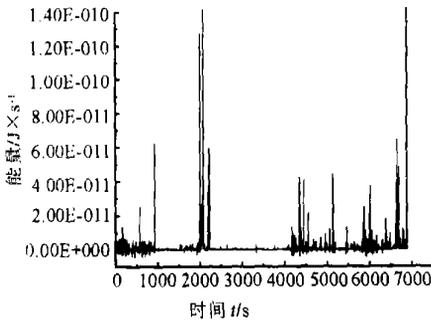
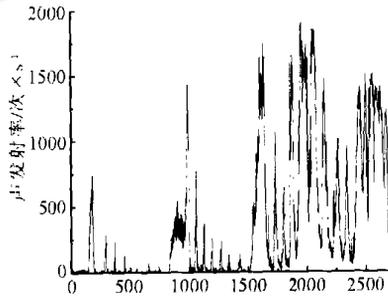
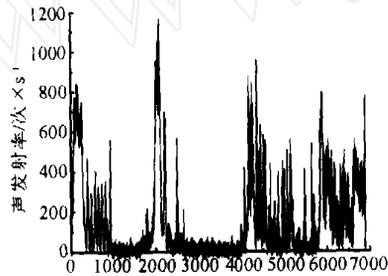
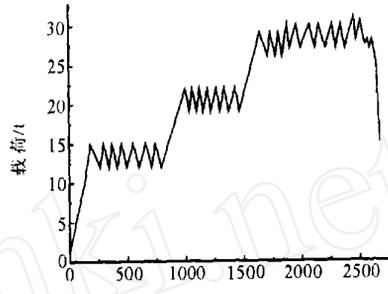
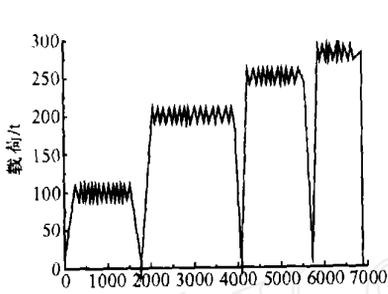


图3 大试件的轴压 σ_1 加载

图4 小试件的剪力 τ 加载

历史及声发射记录结果

历史及声发射记录结果

荷有所增加,但所记录到的 AE 事件数相对于上一阶段并没有明显继续增多。这一结果清楚地表示了岩石试件的破坏过程。

3 数据处理和分析

按照尹祥础等^{[13],[14]}的定义,态矢量是一种对连续场进行粗粒化描述的方法^[19]。按照这一方法,把连续场分成 N 个子区域,在某一时刻 t 内,子区域 i 内的物理量 V_i 就是矢量的第 i 个分量,这样的 N 维矢量就称为态矢量。态矢量描述了物理量 V 在时间 t 的状态(空间分布)。通过对各个不同时刻态矢量的分析,就能刻画出该连续场的演化情况。

在本文的研究中,取 AE 能量的平方根(Benioff strain)作为对应的物理量 V ,大试件划分的单元数 $N = 4 \times 6 = 24$,小试件划分的单元数为 $N = 3 \times 4 = 12$ (选择单元数多少与破坏尺度的关系在另文中进行了论述^[14]),研究态矢量的模以及转角变化。

态矢量的模 $|\vec{V}_i|$ (以下用 M 表示)

$$M = |\vec{V}_i| \quad (1)$$

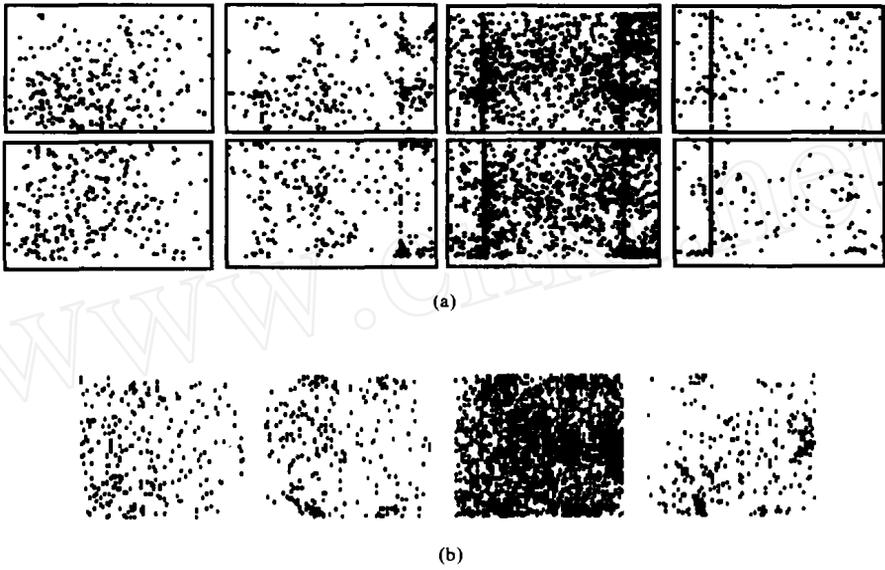


图 5 小试件的声发射源定位结果

(a) 上排图为试件顶端的观测结果，下排图为试件正面观测结果；(b) 由侧面观测的结果

态矢量 \vec{V}_{t-t} 、 \vec{V}_t 之间的夹角的变化(以下用 $\theta_{t-t,t}$ 表示)

$$\theta_{t-t,t} = \arccos \left(\frac{\vec{V}_{t-t} \cdot \vec{V}_t}{V_{t-t} \cdot V_t} \right) \quad (2)$$

大、小试件的分析结果分别如图 6 和图 7 所示。

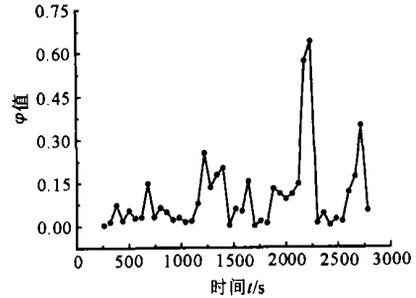
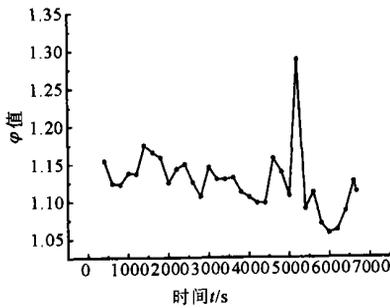
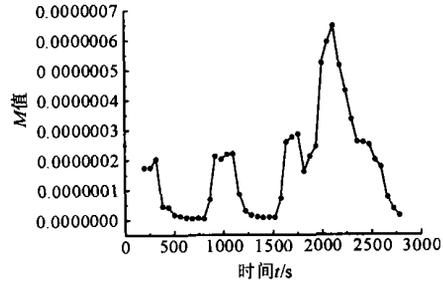
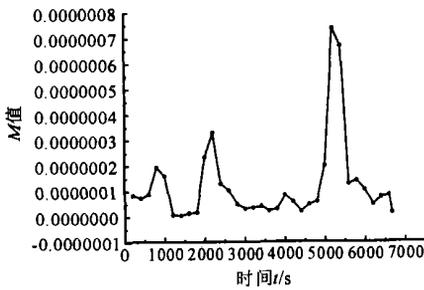


图 6 大试件的态矢量演化图

图 7 小试件的态矢量演化图

4 讨论

从以上分析结果可以看出,岩石试件在临近破坏之前态矢量都发生了明显异常的变化,态矢量的这种演化规律与试件内部的损伤发展过程是相一致的。在加载的初始阶段,如图 5 前二图所示,岩石试件内部的损伤较少,也比较分散,态矢量的模及态矢量的转角变化都不明显;随着载荷的增大,试件内部损伤开始明显增多,同时损伤也开始出现明显的集中,这时态矢量的模和转角都会出现明显的急剧增大(如图 6, 7 所示);当破裂面形成以后,如图 5 的第四阶段,从现象上看此时记录的声发射事件数目开始减少,同时也没有新的集中区域出现,因此态矢量的模和转角都没有出现明显的变化,从图 6、图 7 也能看到,相对于上一阶段,态矢量的模和转角在临近破坏之前都有所减小。

本文是对循环载荷条件下、岩石试件破坏前态矢量演化过程的实验研究,而单调载荷条件下态矢量的演化过程, YIN Xiang-chu *et al*^[13]已做了相关的研究。

通过实验还对加卸载响应比(LURR)理论以及能量加速释放(AER)进行了一定的研究,结果表明态矢量、加卸载响应比以及能量加速释放,它们的演化过程具有一致性。当态矢量的变化较为稳定时,加卸载响应比值的变化也比较稳定且值较小,能量释放也没有表现出明显的加速过程。随着材料向着临界状态的接近,在同一时间段中这三种参数都开始出现异常的变化,此后随着载荷的增加、损伤的发展,态矢量、加卸载响应比、能量释放都开始表现出明显的异常变化。这表明态矢量方法同加卸载响应比、能量加速释放等基于临界点理论的前兆现象相同,能够对损伤演化的物理本质作出较为准确的反映。但是其本身又独立于别的前兆变化,它通过对各个不同时刻系统的状态变化对灾变进行预测。

态矢量方法相对于其他前兆方法,具有其本身的优点。首先,加载方式没有限制,只需要考虑响应量的变化,而不必研究系统所受的应力状态。其次,态矢量方法不需要深入了解系统损伤演化的历史,只需对一段时期内的态矢量演化进行分析即可。最后,对应的物理量选择的范围很广,可以使用能量、应变、事件数甚至地应力、地磁等物理量,因此态矢量方法具有很强的可操作性。

参考文献:

- [1] Vere-Jones D. Statistical theory of crack propagation[J]. *Math Geol*, 1977, 9: 455-481.
- [2] Sornette A, Sornette D. Earthquake rupture as a critical point: Consequences for telluric precursors[J]. *Tectonophysics*, 1990, 179: 327-334.
- [3] Sornette D, Sammis C G. Complex critical exponents from renormalization group theory of earthquakes: Implications for earthquake predictions[J]. *J Phys I*, 1995, 5, 607-619.
- [4] Sammis C G, Smith S W. Seismic cycles and the evolution of stress correlation in cellular automation models of finite fault networks[J]. *Pure Appl Geophys*, 1999, 155: 307-334.
- [5] Bowman D D, Ouilon G, Sammis C G, *et al*. An Observation test of the critical earthquake concept[J]. *J geophys res*, 1998, 103(24): 359-372.
- [6] Rundle J B, Klein W, Gross S. A physical basis for statical patterns in complex earthquake populations: models, predictions and tests[J]. *Pure Appl Geophys*, 1999, 155: 575-607.
- [7] Jaume S C, Sykes L R. Evolution toward a critical point: a review of accelerating seismic moment/energy release prior to large great earthquakes[J]. *Pure Appl Geophys*, 1999, 155: 279-306.
- [8] 吴忠良. 地震震源物理中的临界现象[M]. 北京: 地震出版社, 2000.
- [9] 尹祥础, 陈学忠, 宋治平, 等. 加卸载响应比理论(LURR)一种新的地震预报方法[J]. *地球物理学*

报, 1994, 37(6): 767-775.

- [10] YIN Xiang-chu, CHEN Xue-zhong, SONG Zhi-ping, *et al.* A new approach to earthquake prediction: the Load/ Unload Response Ratio (LURR) theory[J]. PAGEOPH, 1995, 145(3/4): 701-715.
- [11] YIN Xiang-chu, Wang Yu-cang, PENG Ke-yin, *et al.* Development of a new approach to earthquake prediction: Load/ Unload Response Ratio (LURR) theory[J]. Pure appl geophys, 2000, 157: 2365-2383.
- [12] Yin X C, Mora P, Peng K, *et al.* Load-Unload Response Ratio and Accelerating Moment/ Energy Release critical region scaling and earthquake prediction[J]. PAGEOPH, 2002, 159: 2511-2523.
- [13] YIN Xiang-chu, YU Huai-zhong, Victor Kukshenko, *et al.* Load-Unload Response Ratio (LURR), Accelerating Energy Release (AER) and State Vector evolution as precursors to failure of rock specimens [J]. Pure Appl Geophys, 2004, 161 (9/10): 55-65.
- [14] 尹祥础, 余怀忠, 张永仙. 态矢量——分析地震活动性的一种新方法[J]. 中国地震, 2004, 20(2): 15-25.
- [15] Lockner D A. The role of emission in the study of rock failure[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Asstr, 1993, 30(7): 883-899.
- [16] Tomilin N G, Damaskinskaya E E, Kuksenko V S. Formation of a fracture focus during the deformation of heterogeneous materials (granite) [J]. Fiz Tverd Tela(St Petersburg), 1994, 36: 3101-3112.
- [17] Lockner D A, Byerlee J D, Kuksenko V, *et al.* Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite[J]. NATURE, 1991, 350 (7): 39-42.
- [18] 余怀忠, 尹祥础, 夏蒙芬, 等. 加卸载响应比(LURR)理论的实验研究[J]. 中国地震, 2003, 19(1): 58-66.
- [19] Reichl L E. A modern course in statistical physics[M]. University of Texas, 1980.

Experimental study of state vector

YU Huai-zhong¹, YIN Xiang-Chu^{1, 2}, ZHANG Yong-xian^{1, 2}, XIA Meng-fen^{1, 3},
LING Nai-gang¹, LI Min¹, XU Zhao-yong^{1, 4}, PENG Ke-yin^{1, 2}, YAN Yu-ding^{1, 5},
Victor Kukshenko⁶, Wu Zhishen⁷, Qi Li⁷, Surguei Elizarov⁸

(1. LNM, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080; 2. Center for Analysis and Prediction, CEA, Beijing 100036; 3. Peking University, Beijing 100871; 4. Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650041; 5. Earthquake administration of Guangdong Province, Guangzhou 510070; 6. Lofe Physical technique Institute, Russian Academy of Sciences, Russia; 7. Ibaraki University, Japan; 8. Interunis Ltd, Moscow, Russia)

Abstract: Before catastrophe, such as earthquakes, some precursors will appear. The tremendous change of state vector is one of them, which has been investigated in the present paper. By using acoustic emission technique the creation and growth of microcracks in rock specimens that stressed by triaxial stresses have been registered during the course of the experiment. The experimental results indicate that prior to the failure of rock specimens, all the related parameters of state vector have been undergone remarkable change. That means state vector could be adopted as precursor for catastrophe in brittle media and also served as a measurement to predict failure of brittle media and earthquakes.

Key words: State vector; Acoustic emission; Critical point; Earthquake prediction