

# 灾变破坏的一种单参数前兆及其在破坏时间预测中的应用

杨航<sup>1</sup>, 郝圣旺<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 燕山大学建筑工程与力学学院, 秦皇岛, 066004

<sup>2</sup> 中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京, 100190

**摘要:** 临界幂律奇异性前兆行为已成为探索破坏时间预测的一个重要途径, 但是, 其临界幂指数的不确定性是该方法在实际应用中面临的一个重要困难。本研究基于实验室蠕变试验和火山喷发数据, 对测量响应量变化率及其加速度演化特征进行了系统分析, 表明了应变率与应变加速度的比值在临近破坏前会呈现线性演化的临界前兆行为。在此基础上, 运用累积时间窗口和滑动时间窗口两种方法对实验室试样蠕变破坏时间和火山喷发时间进行了正向预测探索, 结果表明, 基于该线性前兆行为的预测效果与实际结果之间吻合较好, 预测结果稳定。由于滑动时间窗口总是采用最新的观测数据, 而且能够排除早期偏离前兆趋势的数据点的影响, 因而更适合实际工程应用。

**关键词:** 临界; 前兆; 破坏时间; 预测

## 引言

地震、火山喷发、山体滑坡等自然灾害与人们的生产生活息息相关, 一直以来都是科学与技术领域关注的难题。应对这类极端小概率事件的一个重要途径就是寻找其前兆特征, 在灾害发生前发出预警预报。前兆特征, 指的是灾变破坏发生前呈现出的异常响应。当前, 基于响应量演化过程的监测来探索前兆信息并借此预测灾变破坏, 已经成为探索灾变破坏预测预警的重要手段, 这也是近年来研究者的关注热点<sup>[1-5]</sup>。前兆研究面临的关键问题, 是如何准确地提取与破坏直接关联的、具有物理意义的前兆信号, 并采取适当的处理方法, 实现破坏的预测。

在地震、火山喷发<sup>[6-10]</sup>和山体滑坡<sup>[11-14]</sup>等灾变破坏发生前, 应变等响应量会呈现出加速发展特征<sup>[11,15-17]</sup>。白以龙、夏蒙芬课题组<sup>[2,18-20]</sup>从灾变破坏的机理出发, 发现这种加速行为可以表示为幂律特征

$$R = k(\lambda_f - \lambda)^{-\beta} \quad (1)$$

式中,  $k$  和  $\beta$  为常量,  $\lambda$  为控制变量,  $R$  代表响应量相对于控制变量的改变。实验室试验<sup>[2,18]</sup>和 GPS 实地测量的地震数据<sup>[18-20]</sup>也初步证实了这一结果。当加载控制变量与时间成线性关系时, 式 (1) 可演化为下式

$$\dot{\Omega} = k(t_f - t)^{-\beta} \quad (2)$$

式中,  $t_f$  为破坏时间,  $\dot{\Omega}$  表示响应量  $\Omega$  的变化率。实验室蠕变破坏试验<sup>[21-23]</sup>的研究成果证实了这一临界幂律行为。

但是, 临界幂指数  $\beta$  存在分散性和不确定性。岩石变形试验<sup>[2]</sup>表明幂指数  $\beta$  的平均值是 0.51; 郝圣旺<sup>[23]</sup>等人对岩石的蠕松试验以及王影冲<sup>[24]</sup>等人对混凝土的蠕松试验研究发现幂指数  $\beta$  大约是 2/3; 粘弹性纤维束模型<sup>[25,26]</sup>的分析结果表明幂指数  $\beta=0.5$ 。最为关键的是, 在破坏前临界幂指数是未知的。所以, 临界幂指数  $\beta$  的不确定性是基于公式 (1) 和 (2) 表达的临界前兆特征预测破坏时间的一个重要难点。

郝圣旺等人<sup>[27]</sup>在上述表达式的基础上, 导出了一种新的临界前兆表达式

$$\dot{\Omega}\ddot{\Omega}^{-1} = C(t_f - t) \quad (3)$$

式中,  $\dot{\Omega}$  和  $\ddot{\Omega}$  分别代表响应量  $\Omega$  对时间  $t$  求一阶导和二阶导,  $C$  为常数,  $t_f$  为破坏时间。该临界前兆表达式与以往表达式相比, 优点在于表达式 (3) 中只包含一个参数  $C$ , 消掉了幂指数, 不需要对幂指数进行拟合分析。

本文基于实验室蠕变破坏试验对临界前兆表达式 (3) 进行了后验验证。同时, 为了将该单参数线性前兆特征运用到实际工程破坏预测当中, 我们运用“累积时间窗口”和“滑动时间窗口”两种方法对实验室试样蠕变破坏时间和火山喷发时间进行了正向探索预测。

## 1 试验设计

本试验采用闭环位移加载方式, 即控制试验机作动器的运动过程。试验开始前, 先对试样进行预压, 使试样中的微裂隙或节理面压密闭合, 受力更均匀。本试验预压至 5 kN, 预压时间 3 min, 每个试样预压 3 次。试验中, 先以 2 mm/min 的速率控制试验机作动器至预先设定值, 然后保持作动器位移不变, 观察试样的应力应变时程演化特征。由于试验机压头不是绝对刚性, 试验中的总位移包括试验机压头变形值和岩石试样变形值两部分, 因此, 本试验在岩石试样两侧安装精度为 0.001mm 的千分表来单独测量岩石试样的变形值。

图 1 是一个典型试样的完整试验曲线。其中 OA 段是初始应力加载段, 随着作动器位移的增加, 岩石试样的应力和变形均单调增加; AB 段作动器位移保持不变, 岩石试样发生蠕变变形直至最终发生宏观破坏。由试验曲线可以看出试验中作动器位置控制很稳定。

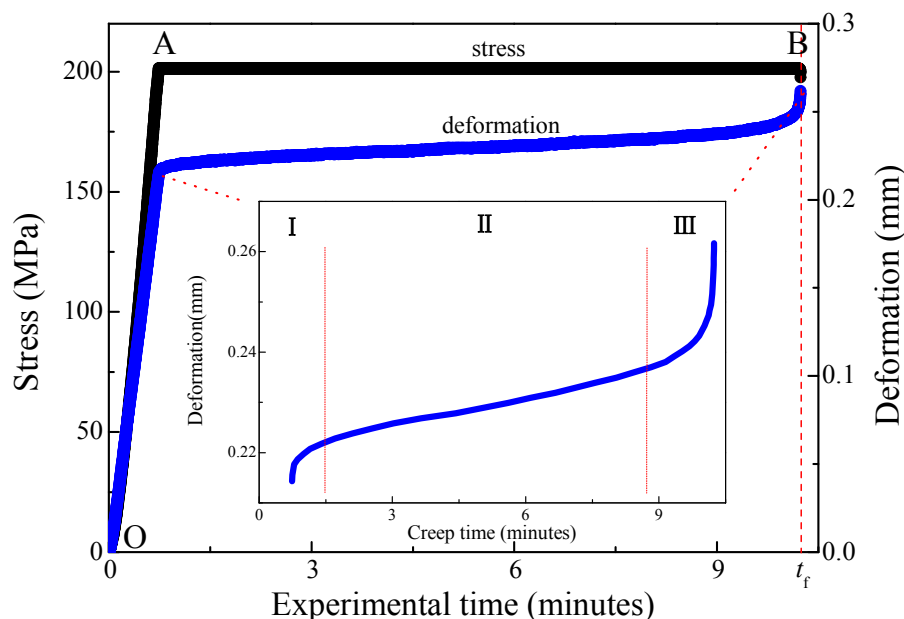


图 1 应力和变形演化曲线

Fig.1 stress and deformation evolution curve

## 2 花岗岩蠕变试验中单参数临界前兆特征

为了说明  $\dot{\epsilon}\dot{\epsilon}^{-1}$  在临近破坏时的线性前兆行为, 图 2 给出了蠕变实验中 3 个试样的  $\dot{\epsilon}\dot{\epsilon}^{-1}$  随时间演化的时程曲线。图 2a、b、c 中的插入图给出的是临近破坏时的放大图及实验数据点的线性拟合结果。可以看出, 在加速蠕变阶段,  $\dot{\epsilon}\dot{\epsilon}^{-1}$  的值单调递减直至试样最终发生宏观破坏。并且在临近破坏时,  $\dot{\epsilon}\dot{\epsilon}^{-1}$  呈现较为明显的线性趋势。

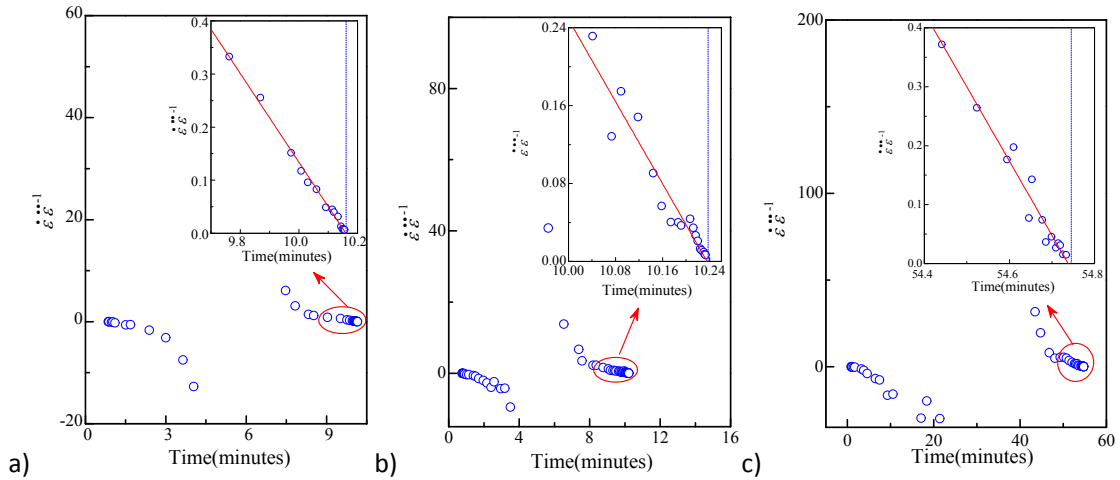


图 2 三个试样的  $\dot{\epsilon}\epsilon^{-1}$  演化曲线

Fig.2 evolution curves of  $\dot{\epsilon}\epsilon^{-1}$  for 3 samples

### 3 实验室蠕变试验破坏时间后验预测

由临界前兆表达式 (3) 可知, 将  $\dot{\epsilon}\epsilon^{-1}$  拟合直线外推至 0 点, 其与时间横轴的交点坐标即为破坏时间  $t_f$ 。基于此认识, 本文运用“累积时间窗口”和“滑动时间窗口”两种方法来研究基于该前兆特征预测破坏时间的预测效果。累积时间窗口, 即从某一数据点开始, 逐渐增加数据点, 进行线性拟合和预测。该方法中, 随着时间的推移, 窗口包含的数据点越来越多。滑动时间窗口方法中, 每次线性拟合都是从不同的数据点开始, 以不同的数据点结束。所以, 该方法每次预测均是利用最新采样的数据点, 没有包含早期的数据点。

为了说明两种方法的预测过程和预测效果, 图 3 和图 4 分别给出了其中一个试样运用这两种方法的预测结果。图中竖向蓝色虚线标示的是试验测量的实际破坏时间, 红色的拟合直线与时间横轴的交点即为该时刻的预测结果。两种方法中直线拟合均采用的是最小二乘法线性拟合。可以看出, 两种方法的预测结果与实际破坏时间非常接近, 且均给出了较为稳定的预测结果。这从另一方面也证明了该线性前兆行为的有效性。

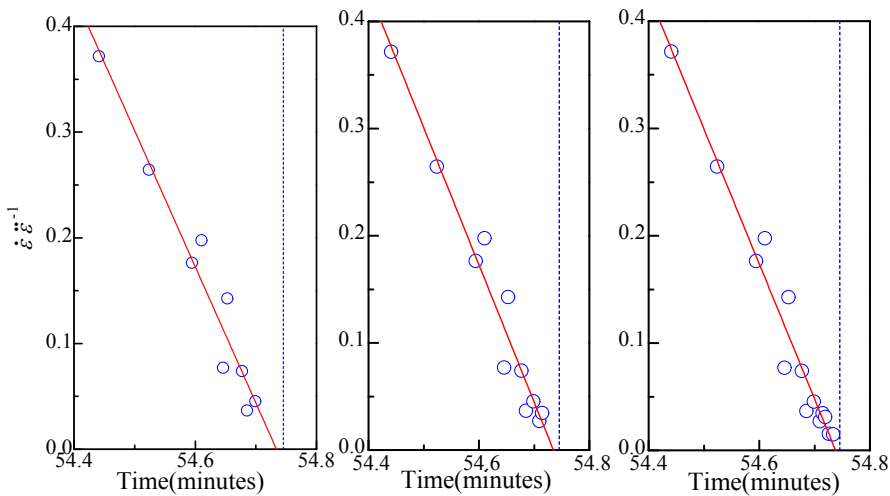


图 3 累积时间窗口的预测结果

Fig.3 Predicted results using cumulative time window

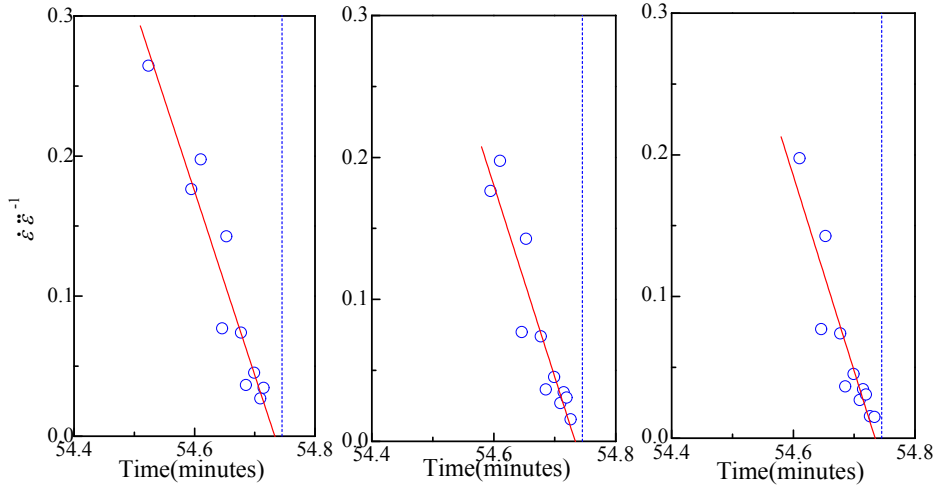


图 4 滑动时间窗口的预测结果

Fig.4 Predicted results using moving time window

需要指出的是，上述预测过程是基于呈现临界线性前兆行为的数据来展开的。但是，在实际工程中，由于破坏时间的未知性，很难事先确定呈现该临界线性前兆行为的数据点。从图 2 可以知道，加速蠕变阶段  $\dot{\epsilon}\epsilon^{-1}$  的值单调递减，但是只有在临近破坏前才呈现较为明显的线性关系，如果从加速阶段早期数据点开始拟合并进行预测，会出现预测时间先于窗口中最新数据点对应的的时间，这种预测结果毫无意义，如图 5 所示。滑动窗口则可以排除早期偏离该线性趋势的数据点的影响，从而避免出现这种不良预测效果。而且，滑动窗口总是利用最新采样的数据点来预测破坏时间，因此，“滑动时间窗口”方法更适合于实际应用。

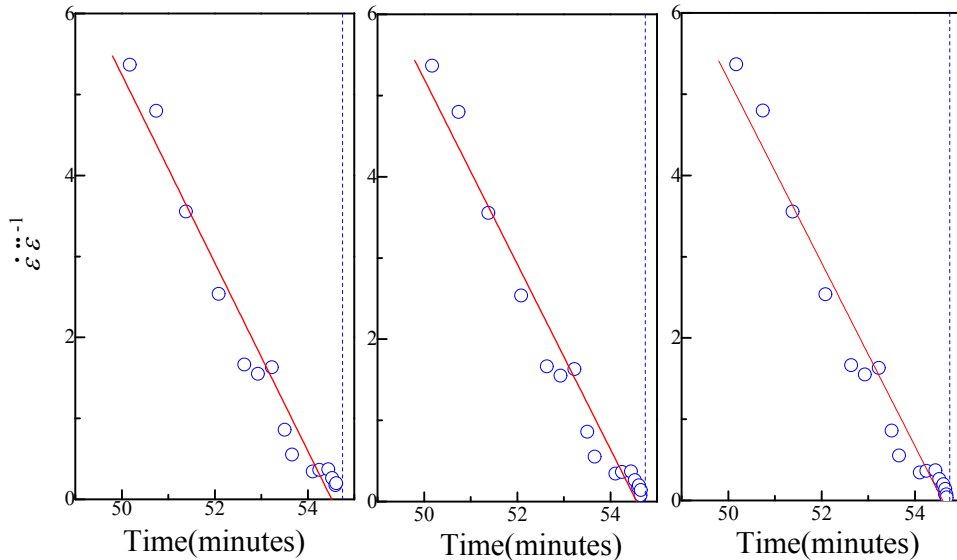


图 5 累积时间窗口的不良预测效果

Fig.5 Bad prediction results using cumulative time window

#### 4 火山喷发预测效果检验

为了检验该单参数线性临界前兆在实际工程中的应用效果，本研究选择 Bezymyanny 火山的部分监测数据对喷发时间进行预测。 $(t_e-t)$ 表示距离火山喷发剩余天数。图 6 和图 7 分别给出了运用上述两种方法对火山喷发时间预测的结果，可以看出，预测结果均与火山实际喷发时间非常接近，这表明该线性临界前兆在实际工程当中的应用效果良好，能够较为准确地预测破坏时间。

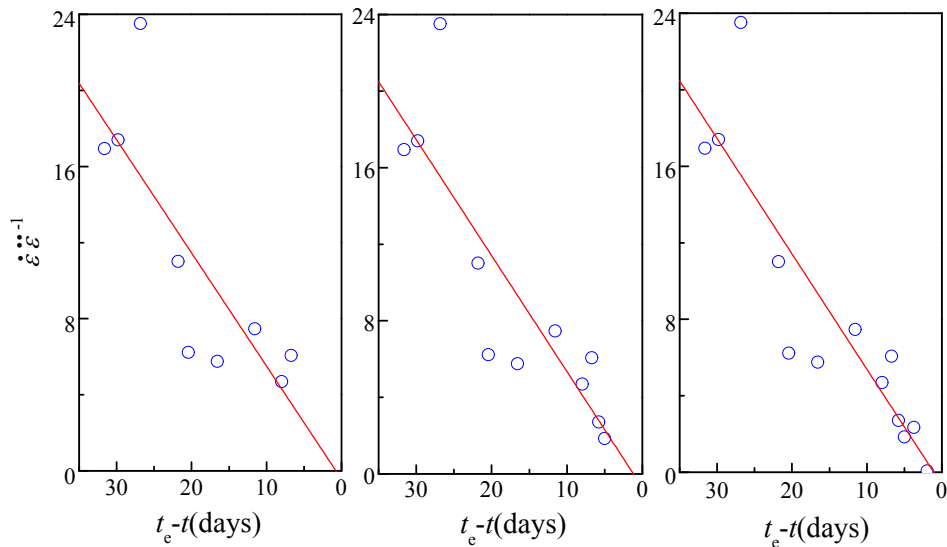


图 6 累积时间窗口预测火山喷发时间

Fig.6 Prediction of time-to-eruption of volcano using cumulative time window

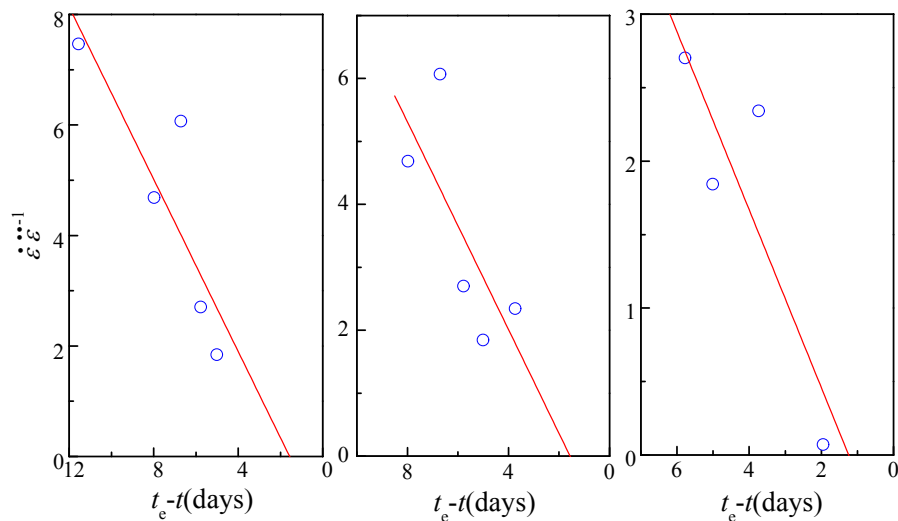


图 7 滑动时间窗口预测火山喷发时间

Fig.7 Prediction of time-to-eruption of volcano using moving time window

## 5 结论

本研究在实验室中开展了岩石蠕变破坏试验对表达式 (3) 进行了后验验证, 同时对蠕变破坏时间和火山喷发时间的正向预测进行了探索, 得到以下结论:

(1) 与以往临界前兆表达式相比, 表达式 (3) 消除了临界幂指数的影响, 不需要对其进行拟合分析, 应用更为简便。

(2) 实验室岩石蠕变破坏试验结果验证了线性单参数临界前兆表达式 (3) 的有效性, 表明临近破坏时  $\hat{\epsilon}\hat{\epsilon}^{-1}$  呈现较为明显的线性趋势。

(3) 基于新的线性临界前兆行为, 运用“累积时间窗口”和“滑动时间窗口”两种方法对实验室蠕变破坏时间和 Bezymanny 火山喷发时间进行了正向预测, 均显示出稳定良好的预测效果。

## 参考文献

- 1 吴忠良, 陈运泰. 地震预测与统计物理. 物理, 2002,31(6):365-371 (Wu Zhongliang, Chen Yuntai. Earthquake prediction and statistical physics. *Physics*, 2002, 31(6): 365-371 (in Chinese))
- 2 Hao Shengwang, Rong Feng, Lu Mingfu, et al. Power-law singularity as a possible catastrophe warning observed in rock experiments. *International Journal of*

*Rock Mechanics and Mining Sciences*,2013,60:253-262.

3 蒋长胜, 吴忠良. 强震前的“加速矩释放”(AMR)现象: 对一个有争议的地震前兆的回溯性震例研究. *地球物理学报*, 2009,52(3):691-702(Jiang Changsheng,Wu Zhongliang.Accelerating Moment Release(AMR)before strong earthquakes:A retrospective case study of a controversial precursor.*Chinese Journal of Geophysics*,2009,52(3):691-702(in Chinese))

4 Rundle JB, Turcotte DL, Shcherbakov R, et al. Statistical physics approach to understanding the multiscale dynamics of earthquake fault systems. *Reviews of Geophysics*, 2003, 41(4): 1019–1048.

5 Yin Xiangchu, Chen Xuezhong, Song Zhiping, et al. A new approach to earthquake prediction: The load/unload response ratio (LURR) theory. *Pure and Applied Geophysics*, 1995, 145: 701 – 715.

6 Voight B. A method for prediction of volcanic eruptions. *Nature*,1988,332(6160), 125–130.

7 Voight B, Cornelius RR. Prospects for eruption prediction in near real-time. *Nature*,1991, 350(6320), 695–698.

8 McGuire WJ,Kilburn CRJ. Forecasting volcanic events: some contemporary issues, *Geologische Rundschau*,1997, 86(2), 439–445.

9 Kilburn CRJ,Voight B. Slow rock fracture as eruption precursor at Soufriere Hills volcano, Montserrat, *Geophysical Research Letters*,1998,25(19):3665–3668.

10 De la Cruz-Reyna S,Reyes-Davila GA. A model to describe precursory material-failure phenomena: Applications to short-term forecasting at Colima volcano, Mexico. *Bulletin of Volcanology*,2001, 63(5), 297–308.

11 Petley DN, Higuchi T, Petley DJ,et al. Development of progressive landslide failure in cohesive materials.*Geology*, 33(3), 201–204,doi:10.1130/G21147.1(2005).

12 Saito M. Forecasting the time of occurrence of a slope failure.In: *Proceedings of 6th international conference on soil mechanics and foundation engineering*, Montreal. Toronto: University of Toronto Press, 537–541(1965, September 8–15).

13 Saito M. Forecasting time of slope failure by tertiary creep.In: *Proceedings of 7th international conference on soil mechanics and foundation engineering*, Mexico, 677–683(1969).

14 Fukuzono T. A new method for predicting the failure time of a slope. In: *Proceedings of IVth international conference and Field Workshop on Landslides*,Tokyo,1985, Tokyo University Press, 145–150.

15 Chastin SFM,Main IG. Statistical analysis of daily seismic event rate as a precursor to volcanic eruptions, *Geophysical Research Letters*,2003,30(13),L24617.

16 Smith R, Kilburn CRJ,Sammonds PR. Rock fracture as a precursor to lava dome eruptions at Mount St Helens from June 1980 to October 1986. *Bulletin of Volcanology*,2007, 69(6), 681–693.

17 Collombet M, Grasso JR,Ferrazzini V. Seismicity rate before eruptions on Piton de la Fournaise volcano: implications for eruption dynamics, *Geophysical Research Letters*,2003, 30(21), 2099.

18 陆明富. 双轴加载下非均匀介质的损伤演化与灾变. [博士学位论文].北京: 中国科学院研究生院. 2011:11-127.

19 徐海元. 地壳变形的非均匀演化重构及灾变前兆分析. [博士学位论文].北京: 中国科学院大学. 2015:39-73.

20 Lu Mingfu, Li Li, Xia Mengfen,et al.Co-seismic energy release and relevant region of Tohoku M9.0 earthquake.*Science China:Earth Sciences*,2011,54(7): 947-950.

21 H. Nechad, A. Helmstetter, R. El Guerjouma, et al. Creep Ruptures in Heterogeneous Materials. *Physical Review Letters*.2005, 94(4): 045501.

22 Heap MJ, Baud P, Meredith PG,et al. Time-dependent brittle creep in Darley Dale sandstone. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*.2009, 114, B07203, doi:10.1029/2008JB006212.

23 Hao Shengwang, Zhang Baoju, Tian Jifeng,et al. Predicting time-to-failure in rock extrapolated from secondary creep. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*. 2014, 119(3), 1942–1953.

24 王影冲, 王鼎, 郝圣旺. 混凝土蠕变与应力松弛耦合破坏及临界幂律行为, 第 24 届全国结构工程学术会议论文集第 I 册, 第 24 届全国结构工程学术会议, 厦门, 2015. 《工程力学》杂志社, 2015. 423-429.

25 Hao Shengwang, Zhang Baoju, Tian Jifeng. Relaxation creep rupture of heterogeneous material under constant strain.*Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics*.2012, 85(1), 012501.

26 Hao Shengwang, Zhang Baoju, Tian Jifeng. Creep rupture in a bundle of slowly relaxing fibres. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L Journal of Materials Design and Applications,2012,226(226):144-148.

27 Hao Shengwang, Liu Chao, Lu Chunsheng, et al. A relation to predict the failure of materials and potential application to volcanic eruptions and landslides.*Scientific Reports*.6:27877;doi:10.1038/srep27877(2016).

# A PRECURSOR WITH ONE PARAMETER IN CATASTROPHIC FAILURE AND ITS APPLICATION IN TIME-TO-FAILURE PREDICTION

Yang Hang<sup>1</sup>, Hao Shengwang<sup>1,2</sup>

1. *School of civil engineering and Mechanics, Yanshan University, Hebei Qinhuangdao, 066004*

2. *The State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of mechanics, Chinese academy of sciences, Beijing, 100190*

**Abstract:** The critical power-law singularity precursor behaviors have been widely accepted as a significant way to explore the method to predict the time-to-failure. However, the uncertainty of power exponent is a major problem to apply this method to practical application. Based on two kinds of data sets from laboratory creep failure experiments on granites and volcanic eruptions, the complete evolution properties of strain rate and acceleration of measured response are illustrated systematically. The result shows that the proportion of strain rate with respect to acceleration represents a linear evolution ahead of catastrophic failure. On the basis of this critical linear precursor, both cumulative and moving time window techniques are developed to explore positive prediction of time-to-failure of samples in laboratory and time-to-eruption of volcano. There is a slight difference between predicted failure time based on this linear precursor behavior and real time-to-failure. Both proposed techniques give a stable prediction nearby the failure. The moving window technique is preferred since it always uses the most recent data and excludes the effects of early data deviating significantly from the linear trend, thus, it is more suitable for practical applications.

**Key words:** Criticality; Precursor; Time-to-failure; Prediction