



非线性科学专辑·评述

准脆性固体的灾变破坏及其物理前兆

郝圣旺^{①②*}, 白以龙^②, 夏蒙芬^{②③}, 柯孚久^{②④}

① 燕山大学建筑工程与力学学院, 秦皇岛 066004;

② 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;

③ 北京大学物理学院, 北京 100871;

④ 北京航空航天大学应用物理系, 北京 100191

*联系人, E-mail: hsw@ysu.edu.cn

收稿日期: 2014-04-23; 接受日期: 2014-07-29

国家重点基础研究发展计划资助项目(编号: 2013CB834100)

摘要 准脆性固体的灾变破坏如地震、滑坡、地下工程的失效等给人类生产和生活带来了巨大影响, 由于其非线性演化过程的复杂性, 这类灾变破坏的触发机理与预测方法一直是困扰工程界和科学界的难题. 我们在对固体灾变破坏中的几个基本问题: 灾变破坏的机理、无序非均匀效应、局部化行为和响应量的前兆特征进行了阐述, 并对其研究进展和研究现状进行了评述, 分析了准脆性固体损伤的非线性演化和局部化、灾变破坏前兆研究面临的困难和机遇.

关键词 灾变破坏, 非均匀, 局部化, 前兆, 地震

PACS: 83.80.Nb, 83.85.St, 91.60.Dc, 91.60.Ba

doi: 10.1360/SSPMA2014-00115

准脆性固体如岩石内部包含有如空洞、裂隙等天然缺陷, 这些内部损伤一方面导致了材料的实际强度比其理想强度低 2 到 3 个量级, 另一方面这些损伤在外载如力、温度等作用下会演化发展最终导致材料的宏观破坏. “固体的破坏是一个持续了三百年的科学难题, 至今尚未能真正解决, 今日由于固体材料的破坏而造成的经济损失, 据西方国家统计高达国民生产总值的百分之八至十一”^[1].

一般来说, 准脆性固体在外力作用下有两种破坏形式^[2-14], 一种是损伤渐进式发展, 材料的应力和变形准连续演化直至最后的宏观失效; 另一种失效模式是材料损伤发展到一定程度后诱发突然的宏观

脆性破坏, 破坏时材料的应力和变形等响应量会发生突跳, 这种破坏称为灾变式破坏^[15-20].

灾变式破坏会发生在自然界或实际工程中的不同尺度上^[16-20]. 从自然界中的地震、雪崩这类巨大的灾变破坏到地下工程开挖中的岩爆、煤气体突出等事故, 从航天飞机失事到矿柱的失稳等等, 给人们生产和生活带来了深重影响. 但是, 灾变破坏的不确定性和突发性使得其预防和预测十分困难, 是困扰工程界和科学界的复杂难题^[21-27].

当前, 固体灾变破坏的研究一方面集中于损伤演化过程及机理的认识和理解, 另一方面在于探索灾变破坏的前兆特征. 随着研究的深入, 对其中的一

引用格式: 郝圣旺, 白以龙, 夏蒙芬, 等. 准脆性固体的灾变破坏及其物理前兆. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44: 1262-1274

Hao S W, Bai Y L, Xia M F, et al. Catastrophic rupture of quasi-brittle solids and its precursors (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2014, 44: 1262-1274, doi: 10.1360/SSPMA2014-00115

些根本性的问题进行综合性的思考和总结显得十分必要. 譬如, 非均匀效应对探索灾变破坏预测途径有哪些影响? 灾变破坏前兆研究面临哪些机遇与挑战? 理论和数值模拟模型建立面临什么样的新问题? 等等. 这些问题清晰的认识, 将有助于理解自然界和工程中灾变破坏的触发机理及其预测途径的探索, 并为相关理论和数值模型的建立提供概念上的支撑. 基于此, 本文将对准脆性固体灾变破坏的四个基本问题: 灾变破坏的含义和特征、无序非均匀效应、局部化行为和统计物理前兆进行综合性分析和探讨.

1 灾变破坏的含义与特征

灾变破坏是一类急剧发展的强烈破坏现象, 在数学上可表征为控制变量的一个无穷小增量导致系统的一个有限响应^[21,22]. 很多重大的灾变破坏现象呈现出突发性和自持性. 突发性指的是灾变破坏一旦触发便迅速发展, 使人猝不及防; 同时, 灾变破坏一般是一种自持过程, 可在内部储存的能量驱动下发展, 灾变破坏一旦出现便难以逆转或控制.

灾变破坏的含义可以从控制量-响应量演化曲线来给出一个直观解释. 图 1 是准静态单调加载下(可以是位移控制或力控制), 控制变量与响应量之间的关系曲线. 该曲线演化到临界点 F 时, 控制变量的单调增加, 将使得曲线不能按路径 FHR 连续演化, 而是突跳到 R 点. 这个突跳就是灾变破坏在控制量-响应量曲线上的反映. 可以看出, 当完整的控制量-响应量曲线上没有峰值点时, 控制变量的单调增加不会导致曲线的突跳, 即不会诱发灾变破坏, 此时宏观破坏是连续的渐进式失效.

为了对这个问题有一个更清晰的认识, 让我们来看看实验室准静态单调加载下准脆性固体的试验结果. 图 2(a)是实验室准静态位移控制单轴加载下灾变破坏的力-位移曲线. 可以看出, 灾变破坏时, 试样的载荷-位移曲线并没有完整地走完全过程, 而是在最大载荷点之后的, 发生了一个从 F 点到 R 点的突跳. 而渐进式失效时(如图 2(b)所示), 试样的应力-应变曲线连续演化, 直到最终完全失去承载能力.

研究者们曾经将实验室里这类灾变破坏的原因归结为实验机刚度的不足^[4,11]. 但是, 后续研究表明, 即便是刚性实验机加载, 有时也会导致试样的灾变破坏^[13,14,21,22]. 其主要原因在于准脆性固体损伤和

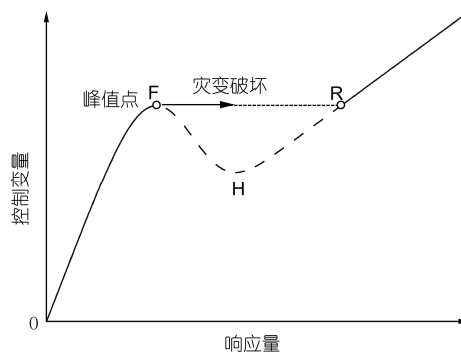


图 1 控制量-响应量演化曲线(灾变破坏或渐进式破坏)
Figure 1 Evolution of control-response variables (Catastrophic rupture or Gradual failure).

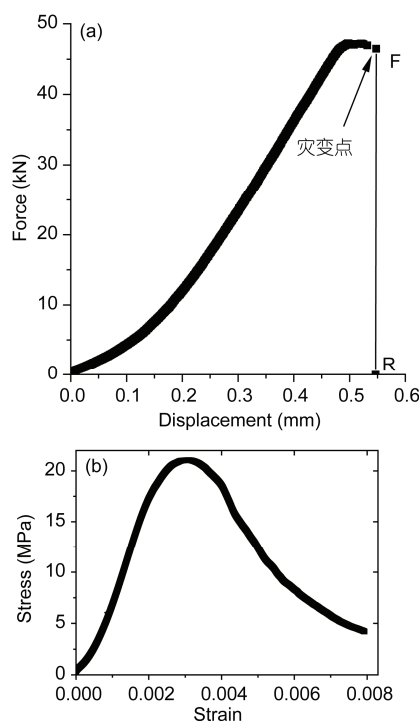


图 2 位移控制单轴加载实验曲线
(a) 灾变破坏试样载荷-位移曲线; (b) 渐进式失效时应力-应变曲线
Figure 2 Experimental results of Uniaxial compression tests. (a) A typical force-displacement curve for catastrophic rupture; (b) stress vs strain curve for gradual failure.

变形演化的局部化行为^[21,22]. 固体损伤演化的局部化行为加深了灾变破坏问题的复杂性和预测的困难程度, 局部化使得固体的行为很难再用整体平均量来统一刻画. 从而, 也就导致了可测量响应量演化特征的难预知性. 宏观响应量的演化特征决定于内部结构的非均匀性和非线性的演化过程, 该过程涉及

多个尺度上无序非均匀性的跨尺度耦合^[23-33], 其与材料内部微损伤的成核、发展、串级和相互作用密切相关^[34-40]. 刻画固体内部微观演化过程需要深刻了解其非均匀效应和局部化演化特征.

2 灾变破坏的无序非均匀效应

很早时, 列奥纳多·达·芬奇^[41](Leonardo da Vinci)注意到金属丝的拉伸强度会随其长度增加而降低. 但是, 基于连续介质力学的一个简单分析, 我们就能知道具有相同横截面积的金属丝应该具有相同拉伸强度. 为什么会产生这个矛盾呢? 现在, 我们知道是材料的无序非均匀性效应的结果. 连续介质力学有一个重要假设, 就是将材料处理成理想均匀体. 在具有显著非均匀效应的样本中, 这个假设常常会与真实情形产生较大偏差^[42]. 基于材料强度的无序非均匀性特征的认识, 人们认为固体的断裂首先会在微裂纹或微缺陷这些“弱点”成核, 而当横截面积相同时, 金属丝越长, 其包含“弱点”的概率越高, 所以其强度越低. 更为复杂的是, 无序非均匀效应及其导致的复杂的应力重分布过程, 有时会使使得强度高的单元先于强度低的单元发生破坏(图 3)^[23].

正如前文所述, 准脆性固体通常是由多种矿物晶粒(或骨料)、胶结物及孔隙缺陷等随机分布组成的混合物. 这种结构特点直接导致了其内部微观结构的无序非均匀性. 微损伤、微缺陷等在空间上的随机分布导致了材料的弹性模量、强度等在空间上的非均匀特征, 也导致了固体损伤演化和应力重分布过程在时间和空间上的复杂性^[23]. 从而, 也直接导致了其宏观响应行为的复杂性和样本个性^[24-28]. 也就是说初始平均宏观性质大体相同的样本, 其宏观破坏特征会呈现显著差别. 这种差异一方面表现为样本最终宏观破坏模式是灾变破坏还是渐进式连续损伤失效的不确定性; 另一方面表现为各样本的灾变破坏点的显著差异.

更为棘手的是, 准脆性固体受载过程中, 其非均匀性会表现在多个不同尺度上, 而且这些非均匀性的空间分布是无规的. 这种多尺度的无序非均匀性会引起跨尺度的敏感性行为^[27-29]. 尤其在接近灾变破坏时, 起初可能并不明显的无序非均匀性和随机性会起关键性作用. 但是, 两者之间的直接关联还有待揭示.

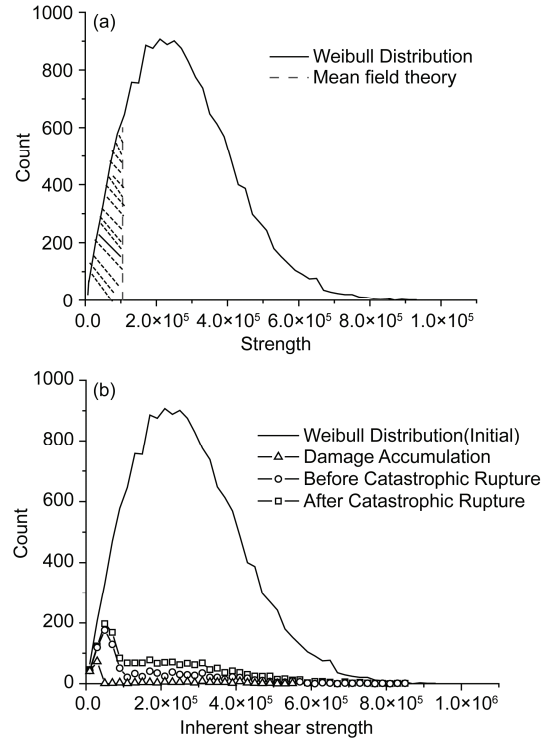


图 3 细观单元固有强度的初始分布特征(采用 Weibull 分布)与损伤单元数目(各曲线下的面积)^[23,72]

(a) 平均场意义下的损伤单元数目(直线与 Weibull 分布之间所夹的阴影面积, 直线所在的位置等于平均场近似下的真应力); (b) 损伤演化各过程损伤单元. 一些拥有高强度的单元因为应力重分布导致其应力的增加也发生了损伤; 然而同时又有一些强度低于平均真应力的单元反而没有损伤

Figure 3 Initial Weibull distribution of shear strength and the counts of damaged elements (the area under corresponding curves in a plane stress case [23,72]. (a) Mean field theory, the area between the Weibull distribution and the vertical dashed line is the total of damaged elements (shaded); (b) the counts for different steps.

值得一提的是, 准脆性固体的非均匀特征既带来了灾变破坏的复杂性, 反过来其又会带来灾变破坏的较为明显的前兆行为^[24,30], 因此又有利于灾变破坏的预测. 研究表明, 材料的非均匀性愈强, 其预警可能会越容易. 日本在地震预测方面的许多进展就与其对非均匀性与灾变破坏预测的关联的认识有关^[30,40].

研究者们试图引进相关模型和参数来描述固体的非均匀程度^[43]. 比如通过引入幂律分布或指数分布来描述材料的细观非均匀性^[44], 分析其非均匀参数与宏观响应之间的关联等. 这些模型对于认识固体非均匀程度与宏观破坏、应力应变曲线、强度等宏

观响应之间的关联性,具有重要意义.但是,需要注意的是,基于整体平均场近似的参数,在描述固体临近灾变破坏的特性时会产生非常大的偏差.尤其是局部化转变之后,这种偏差会更大.局部化转变之后,固体的损伤和变形主要集中在局部化区.此时,固体的非均匀性特征明显区别于前期损伤随机分布的特征,其宏观响应也就可能与基于早期的非均匀参数推算的结果有较大偏离.

3 局部化行为

局部化是准脆性固体损伤演化诱致宏观破坏的一个普遍现象^[27,35,45-53].局部化指的是固体损伤演化过程中,其初始阶段的随机损伤和随机涨落的变形会逐渐集中到一个比样本尺度小得多的较窄区域.所以,局部化本身也是一种重要的非均匀特征.这里把它单独提出来,一方面是考虑到其在准脆性固体破坏中的重要影响,另一方面是因为局部化明显区别于早期整体平均场意义下的无序非均匀性.

一般来说,线性稳定性方法^[52,53]导出的是均匀场线性失稳的条件,回答的是对平均场发生微小偏离时是否进一步发展的问題.但是,局部化演化是一种宏观局部尺度的现象,与微损伤的细观尺度不在一个层次上,很难基于微小扰动下的线性失稳分析方法来处理^[54].基于细观损伤(微损伤)表象和基于细观物质单元表象,研究者们^[27,55,56]提出了描述非均匀准脆性固体损伤演化和灾变性破坏现象的统计细观损伤力学.在这个理论框架基础上,通过对固体微损伤成核、扩展与愈合的统计描述,发现损伤演化是由几个无量纲参数决定的,局部化是微损伤非线性发展的结果.

局部化转变之后,样本会形成两类变形明显不同的区域^[21,22,48,57,58],一类是高应变聚集的局部化区,另一类是低应变的非局部化区.样本的最终破坏发生在比样本尺寸小得多的局部化区^[14,21,22,48],局部化区微裂纹或微损伤之间的相互作用和相互串级导致了固体的宏观脆性破坏^[59,60].从而,局部化转变之后样本的宏观物理力学特征将不能再用初始阶段表征样本宏观平均性质的物理量来统一刻画^[21,22,48,61],材料的宏观物理力学行为与局部化区的特征和局部化程度等直接关联.局部化演化诱发灾变破坏的机理^[21,22,48],就在于非局部化区能量的释放驱动局部化

区损伤和变形的演化发展,当非局部化区的能量释放超过局部化区能量耗散能力时,就诱发系统的突然破坏——灾变破坏.所以,灾变破坏决定于局部化区能量耗散特征和非局部化区的能量释放之间的竞争关系.而这两种能量特征均依赖于局部化区的尺度和局部化区的损伤演化特征.所以,为探索地震的触发机理与预测方法,研究者们通过在断层区取样的方式来认知断层区岩石的力学和物理特征^[62,63].

实验观测表明^[21,22,48],损伤和变形局部化的发展呈现为局部化区的逐渐形成和局部化区损伤加速发展两个阶段,并且局部化与灾变破坏这两种不确定现象之间存在一定的关联.在加载初期的很长一段时间,试样局部应变失稳点在空间上呈随机分布,试样的表面应变场呈弱涨落的随机均匀分布.随着灾变破坏点的临近,局部应变失稳点会稳定地聚集到宏观破裂面附近,而局部化区之外的失稳点逐渐消失^[21,22].同时,应变场不均匀性明显增强,应变涨落值和自相关性明显上升,一个高应变的局部化区逐渐在宏观破裂面附近形成(如图4(a)所示).基于此认识,白以龙课题组^[21,22,48]给出了一个定义局部化区尺度的方法,并对单轴压缩加载试验下岩石试样的局部化区的尺度进行了测量.基于局部化区的尺度对灾变破坏进行了试验预测的结果表明^[10,12],如果不考虑试样的局部化,整体平均场近似的预测结果与实际的结果差别较大,而依据局部化区尺度对局部化区和非局部化分别采用分区平均场近似的预测结果与真实结果非常接近(如图4(b)所示).

可以看出,局部化区尺度与灾变破坏之间有着非常重要的关联.试样局部化以后,局部化区的尺度对试样的宏观名义应力-应变曲线的演化特征有着重要影响^[21,22].白以龙课题组实验^[21,22,48]中的大理岩和花岗岩(试样尺度:高40 mm,长20 mm,宽16 mm)的局部化区尺度约为4-8 mm. Lockner 等人^[64]实验观测中的岩石局部化区尺度约为2-6 mm. Harris 等人^[65]认为局部化区的尺度约为材料平均粒径的17倍左右.而 Scarpelli 等人^[66]和 Roscoe 等人^[67]认为局部化区尺度约为微观粒径的10倍左右, Calvetti 等人^[68]则估计局部化区尺度大约为微观颗粒粒径的3-4倍.实际上,局部化区尺度及其演化模式的研究是一个重要难题.局部化区的形成决定于微裂纹和微损伤的相互作用和相互串级.而且,局部化转变及局部化区形成和演化过程往往伴随有晶粒破碎、晶界破坏和穿晶裂

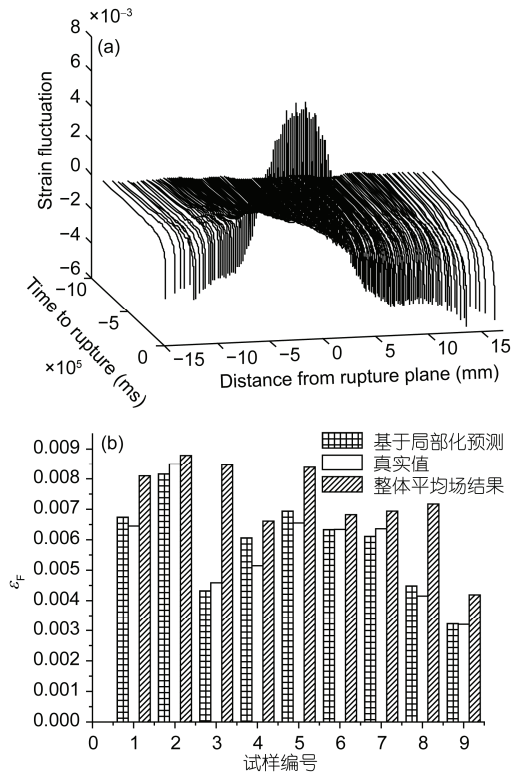


图4 局部化演化及灾变破坏预测结果^[21,22]

(a) 应变涨落的时空演化特征; (b) 基于局部化区尺度和整体平均场预测灾变破坏的实验结果

Figure 4 Localization evolution and rupture prediction [21,22]. (a) Spatio-temporal pattern of strain fluctuation; (b) the predicted results based on the local mean-field and global mean-field approximation.

纹等^[69,70]. 所有这些因素加深了局部化成核和演化过程的复杂性. 最终局部化区尺度是否具有尺度依赖性, 还有待于进一步探索.

局部化区不能归结为常规意义上的剪切带, 它可能是多个剪切带^[71]或高损伤区构成的变形或损伤高度集中的区域. Rong 等人^[23,72]通过数值模拟说明了局部化区损伤串级的复杂过程和时空特征. 固体损伤演化存在三种典型局部化带, 即膨胀带(Dilatant Bands)^[73]、剪切带(Shear Bands)^[74]和压缩带(Compacting Bands)^[46,74,75]. 但是, 局部化区形成过程中存在着多种机制的相互作用^[76], 局部化区尺度的定义十分困难^[46,77]. 其中一个重要的问题就是灾变破坏前会形成多个潜在的高应变区构成的斑图, 最终的宏观破坏与多个高应变区(或剪切带)的发展特征密切相关^[78]. 局部化斑图演化存在两种重要的现象^[21]: 一种是局部化区的串级和相互作用; 另一个方面是

主导性局部化区的相互竞争. 所以, 哪种局部化演化模式会最终诱发宏观破坏具有随机性和不确定性. 局部化斑图演化动力学过程是一个十分关键又困难的问题.

4 响应函数(量)的灾变破坏前兆行为

应对地震等灾变破坏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, 前兆研究也是研究灾变破坏这类复杂性事件的一个重要途径. *Nature* 和 *Science* 两个著名期刊关于地震预测的讨论^[79-81], 加深了研究者们对捕捉灾变破坏前兆重要性的认识. 特别是近年来汶川等地震给人类带来的深重灾难, 促使人们重新审视以往的灾变破坏前兆行为, 并对新的灾变前兆的寻找提出了要求.

响应(量)函数在临近灾变破坏时呈现的异常行为, 可以视为一类灾变破坏前兆. 响应量的演化既依赖于微观细节, 同时也是这些细节在宏观上的反映^[24,27,30,82,83]. 当前, 基于响应量演化过程的监测来探索灾变前兆信息并借此预测灾变破坏, 已成为了探索灾变破坏预警的重要手段, 这也是近年来研究者们关注的热点^[84-92].

现代测量手段为灾变破坏前兆研究提供了丰富的数据. 研究者们从理论和实验等不同的角度揭示了许多表征材料内部损伤的物理信号, 如变形^[21,22]、声发射信号^[93-95]、电信号^[95]和电磁信号^[96]等, 并对这些信号在灾变破坏前呈现的前兆行为进行了观测和分析. 在可测信号方面的重大进展使得问题的关键转向了如何基于这些物理参数的变化, 提取与灾变破坏直接相关的前兆信息, 寻找灾变破坏的共性前兆^[97].

灾变前兆研究方面的大量成果给灾变破坏的研究带来了许多重要的启示. 例如, 将灾变破坏作为一种临界现象的模型或自组织模型, 改变了地震预测研究中的一些传统观念^[84], 也进一步丰富和加深了人们对灾变破坏的认识. 基于临界现象模型, 研究者们认为非均匀介质会展现出一些普适性特征^[39,40,86,81], 并发现了一些物理量在灾变破坏前会呈现幂律行为^[39,40,88,91,92]或类似于自组织临界模型中的标度律特征^[98]. 基于这些前兆行为的认识, 研究者们把灾变破坏比拟为类 spinodal 的失稳现象^[99]或物理学中的一阶^[91]或二阶相变^[92]. 尽管这种类比的合理性还有待

进一步研究, 但其表明了前兆是探索灾变破坏预测途径及其机理是一个可行的方法.

地震学家很早就注意到, 在一些地震发生之前, 可以观测到地震活动或者由地震活动所表征的地形变速率的“加速”现象^[84,85,98,99]. 这其中比较有影响的工作就是认为 Benioff 应变^[100]的聚集行为可以描述为与时间相关的幂律行为 $(t_F-t)^m$, 这里 t_F 代表灾变破坏的时间. Sornette^[101]基于平均场理论和临界相变理论得出 $m=-1/2$, 而 Rundle 等人^[99]基于 spinodal 失稳分析得出 $m=-1/4$, Ben-Zion 和 Lyakhovsky^[102]的结果表明该幂律行为的幂指数近似为 0.3. 基于这些认识, 研究者们发展了利用这种“加速”过程来推测未来地震发生时间的计算方法^[84]. 但是, 这里面临着前兆的普适性问题以及在实际应用中数据拟合的分散性的处理方法问题^[102,103]. 主要原因就在于, 在非灾变的失效行为中的某个阶段也会出现类似的“加速”行为.

近年来, 国内在该领域研究取得了重要进展, 揭示了许多重要的灾变破坏前兆, 如临界敏感性^[27,82]、跨尺度涨落^[27,82]、幂律奇异性^[88]、局部化^[21,22,27,47,48]、加卸载响应比^[90,104-106]、态矢量^[104]、分形维数的突然变化^[107]及地质灾害发生频率的幂律规则^[108]等. 这些研究对于灾变机理的认识和灾变破坏预测途径的探索有着重要意义. 尹祥础课题组^[90,104-106]对态矢量和加卸载响应比两种灾变破坏共性前兆进行了大量的理论和实验研究. 他们提出了一个定量地表征地震孕育过程的参数—加卸载响应比(简称 LURR), 并在将该理论应用于地震预测方面进行了很好的探索, 将局部化区和非局部化区的相互作用发展为复联模型^[106]. 马瑾课题组^[109-112]对热场对变形场的响应、卫星热红外信息与断层活动的关系、前兆与岩石和断层构造之间的关联等进行了深入研究, 探索基于断层变形温度场演化寻找物理量在进入亚失稳状态的响应特征^[112].

白以龙、夏蒙芬课题组^[21,22,27,47,48,79]经过多年的研究, 揭示了临界敏感性、跨尺度涨落与局部化等灾变破坏的共性前兆特征. 他们在较系统的理论、数值和实验研究基础上, 发现当系统趋向灾变破坏点时, 它对外界控制变量响应的敏感程度会显著提高, 称为临界敏感性. 通过大量岩石实验观测, 发现系统在细观、宏观局部、以及宏观整体三个尺度上的响应均呈现临界敏感性. 揭示了一种灾变破坏的临界幂律奇异性前兆行为, 即在趋近灾变破坏点时, 系统对于

控制变量的响应量会呈现 $-1/2$ 阶的临界幂律奇异性(如图 5 所示). 基于无灾变的渐进式破坏的实验观测, 发现在某个阶段也会出现响应量升高的现象, 但是其趋势与幂律奇异性有差异. 进一步地, 他们给出了基于该临界幂律奇异性特征进行灾变破坏的预测的方法, 并对预测结果进行了实验验证. 基于这些结果, 他们对灾变破坏的预测方法及其机理进行了系统的阐述.

可以看出, 灾变前兆的探索工作对于灾变破坏的研究具有重要的推动作用. 灾变前兆研究既是研究灾变破坏这类复杂现象的一个可行方法, 也是进行灾变破坏预测的一个重要的途径. 正如地震学研

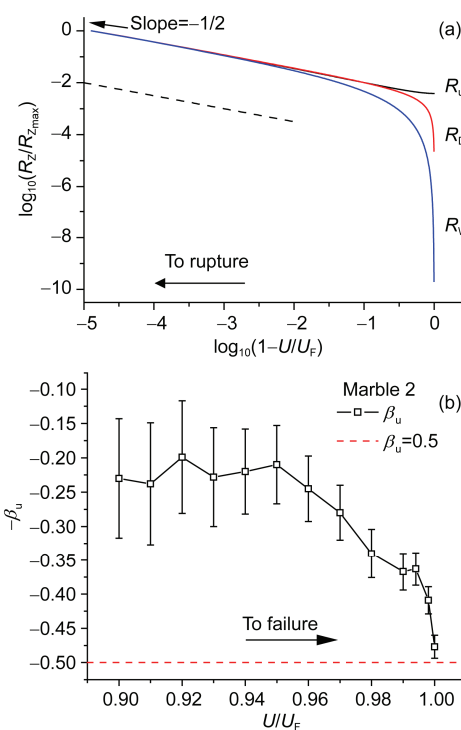


图 5 (网络版彩图)-1/2 阶临界幂律奇异性前兆

(a) 灾变破坏幂律奇异性前兆的解析分析结果^[21]. 图中斜虚线的斜率为 $-1/2$, 用来与响应函数的演化曲线作对照; (b) 岩石实验中, 滑动窗口幂指数拟合结果^[88]. 可以看出, 临近灾变破坏点, 幂指数趋近于 -0.5 , 且拟合误差越小. R_u , R_D 和 R_w 分别代表变形 u 、损伤 D 和能量 W 相对于控制变量 U 的变化率

Figure 5 (Color online) A power law singularity with power law index $-1/2$. (a) Analytical results verifying the power law singularity. The dashed inset with a slope $-1/2$ is drawn for comparison. (b) The evolving behaviors of power law exponents $-\beta_u$ with corresponding error bars [88]. R_u , R_D and R_w are the increments of deformation u , damage fraction D and cumulative energy release W of a sample induced by unit increment of the governing displacement U .

者们^[113]所指出, 在并不是地震的所有物理性质都可预测的情况下, 整理清楚可以预测的物理性质, 并尽可能地将其应用于防震减灾实际工作正成为地震学家现阶段的努力方向。

但是, 令人遗憾的是, 以往研究者们揭示的许多前兆信号对于灾变破坏的预测效果并不明确。一些所谓的前兆特征并非只是灾变破坏时独有, 也就是说, 有时这些信息的出现并不一定伴随着灾变破坏的发生, 因为在无灾变时的情况下也可能出现类似的信号, 而有的灾变破坏发生前却未能观察到类似的前兆行为。这样就可能造成实际预报中的漏报和虚报。如备受人们关注的“加速矩释放(Accelerating Moment Release, AMR)”现象引起了研究者们热烈的讨论^[83,87,103,114]。争议的焦点主要在于如何选取用于识别 AMR 现象的信号和 AMR 现象作为一种可能的地震前兆是否具有普遍性两个方面。因为, 研究者们发现一些地震前并未观测到明显的 AMR 现象^[115], 而出现 AMR 现象也并不一定对应未来一定有强震发生, 利用人工合成的随机地震目录也很容易得到 AMR 现象^[87,114]。前兆的“提取”与“甄别”是当前面临的一个重要挑战。

5 岩石断裂与摩擦

库仑定律通常作为完好岩石的破裂准则。石耀霖等人^[116]通过考虑震后主应力方向改变, 修正了传统库仑应力计算中沿地震破裂面滑动方向计算剪应力变化的方法。库仑定律主要考虑第一、三主应力影响, 但中间主应力对岩石强度、破裂前兆有着重要影响^[117]。将断裂力学基本原理引入岩石力学是岩石物理学的一个重要研究方向。脆性岩石中的断层破坏通常与剪切破坏密切相关, 同时实验室岩石受压破坏时通常呈现宏观剪切破坏形式。所以, 相对于张开型(I 型)破坏, 人们更多关注的是岩石的剪切(II 型或 III 型)破坏。在剪切滑动初始阶段, 剪切破坏区剪应力随滑动位移增加逐渐升高, 达到峰值后剪应力会随滑动位移的增加而下降, 表现出滑动弱化行为^[117,118]。当滑动位移继续增加达到某一数值后, 剪应力趋近于其残余摩擦应力, 不再变化。

单轴或双轴加载条件下, 裂纹的扩展或相互作用通常对应的是二维问题。地球内部岩石裂纹和断层常常更接近三维问题, 国内早期(如尹祥础课题

组^[119,120])就取得了有关岩石三维裂纹扩展的重要结果。需要指出的是, 众多拉伸裂纹的扩展和串级也会形成宏观上的剪切破裂形式^[121]。

岩石滑动摩擦^[122-125]主要表现为稳定滑动和粘滑两种形式。岩石滑动失稳不仅决定于摩擦面本身特性, 而且与外界弹性环境刚度直接关联。Byerlee 定律^[126]是探索岩石摩擦强度的一个重要基础。他将大量岩石摩擦试验资料进行了分类整理。结果表明, 在低正应力时, 摩擦系数与岩石种类关联不大, 而主要决定于滑动面的粗糙度。在高压(200 MPa 以上)时, 摩擦系数与岩石种类和滑动面特性关联均很小。所以, 当断层处于这个压力深度(约为 7-8 km)之下时, 其性状已经变得不重要。但是, 在近地表的 7-8 km 范围内(围压 200 MPa 以内), 断层面的性状(粗糙度, 形态, 岩性等)的影响不容忽视。比如, 研究者们^[118]试图从岩石断面空间功率谱密度及其分形特征来探索岩石断裂能的尺度依赖性。

速率-状态摩擦本构定律^[124,127-129]是地震和断层力学研究的一个重要关注点。不过, 当前的摩擦定律主要还是经验性的, 其中的速度或状态(正应力或温度)等均为宏观量, 相关内在的物理过程还知之甚少。基于宏观与微观相互关联的探索, 比如将摩擦定律、仪器观测结果和断层区实地观测等综合起来研究^[130,131]将十分关键。石耀霖课题组^[132-136]对岩石的热导率、渗透率等岩性进行了系统研究, 取得了重要结果。他们对岩石流变实验结果估算岩石圈流变结构的多种不确定性进行了讨论^[136]。首次建立了基于 D3Q27 数值模型, 将 X 射线 CT 断层成像技术与格子玻尔兹曼理论相结合, 从而便捷地获取岩石内部三维结构数据^[132-134]。在此基础上, 对高温压耦合下浸润岩石摩擦机理进行了研究^[133,134], 为应用数值方法研究高温压浸润岩石物性提供了一种新方法。首次讨论了高温压情形下, 岩石瞬态微观摩擦机理。

探索主导地震转变的微观物理机理已经成为断层力学研究的一个核心目标^[138]。研究表明, 断层区纳米或微米尺度的过程可能会对断层的动态滑移弱化起控制性作用^[139]。高压或高速剪切诱发的相变和动态重结晶等^[140-142]微观过程的观测和研究成为了一个重要研究方向。伴随岩石剪切和摩擦产生的升温而激化的物理化学过程会促进地震滑动^[143]。利用原子力显微镜等观测快速滑移形成的断层镜面和纳

米晶层等^[144]已成为理解断层剪切的一个重要手段。所以,小尺度和微观过程的观测手段、如X射线CT扫描^[145-148]、聚焦激光束(FIB)^[148-150]、透射电镜术(TEM)^[148,149]、扫描电镜(SEM)^[150]、扫描透射电镜(STEM)^[150]、拉曼光谱^[150]等的引进和联合使用已成为了解岩石构造和断层习性的重要方法。

地震通常是完好岩石的破裂和断层滑移失稳两者的一个综合性行为^[118,130]。岩石破裂和断层滑移过程伴随的瞬态微观物理化学过程与地震破坏之间的关联还有待探索。将完好岩石破坏与断层滑动摩擦结合起来研究会对该问题的进展起重要作用。断裂面的分形特征能否为探索完好岩石破裂与断层滑移之间的统一本构模型^[118]架起一座桥梁?

6 结束语

固体的失效破坏是涉及断层破坏、岩爆等灾害和航空、航天领域的重要基本问题。强地震等灾变破坏的一个鲜明特点,就是其属于带有突发性和不确定性的小概率极端事件。对付这种不确定性事件的一个重要的途径就是寻找其中的关联性特征,比如稳定发展阶段与破坏脆性和破坏时间之间的关联^[151]。局部化是准脆性固体通向灾变破坏的一个重要途径

或前兆特征,理解固体局部化演化特征及其与灾变破坏之间关联是这里的一个关键问题。局部化演化研究表明,基于整体平均场近似的灾变破坏预测误差较大,其计算值比实际测量值要大。而基于局部化区的演化特征来进行预测具有良好的预测效果,应更具意义。当前,GPS^[152]和合成孔径雷达干涉(InSAR)测量技术在地面变形场和滑坡等监测中得到了广泛应用,具有较高的测量精度。这些测量结果提供了丰富的变形演化分析数据,从而,局部化演化诱致灾变破坏的工作深入研究将会为地震、滑坡等灾害预测提供指导性的新途径和探索思路。

灾变破坏前兆研究既是探索其预测方法的重要途径,又是理解灾变破坏机理的一个重要方法。在提取灾变破坏物理前兆的响应函数过程中,前兆特征是否与最终的灾变破坏直接关联是关键。这一方面涉及到对响应函数的合理定义和选取,另一方面涉及到信号的可识别问题。也就是说,要寻找与灾变直接相关的、普适的、处于噪声水平之上的、可测量的信号。

各种微观观测手段的联合使用,促进了对岩性、断层习性和高温压、高速剪切等条件下的微观物理化学过程的认识和理解,使得从宏观到微观多个尺度上来综合理解和解释相关现象及经验性结果成为了可能。

参考文献

- 1 白以龙. 固体的破坏. 见: 复杂性科学探索. 北京: 民主与建设出版社, 1999. 188-199
- 2 Jeager J C, Cook N G W, Zimmerman R. *Fundamentals of Rock Mechanics*. London: Wiley-Blackwell, 2007
- 3 Spaeth W. Einfluss der federung der zerreißmaschine auf das spannungs-dehnungs-schaubild. *Arch Eisenhuettenwesen*, 1935, 6: 277-283
- 4 Hundson J A, Crouch S L, Fairhurst C. Soft, stiff and servo-controlled testing machines: A review with reference to rock failure. *Eng Geology*, 1972, 6: 155-189
- 5 Whitney C S. Discussion on a paper by V.P. Jensen. *J Am Concr Inst*, 1943, 39: 5842-5846
- 6 Peng R D, Xie H P, Ju Y, et al. Effect of elastic accumulation energy of testing machine on the mechanical measurement of rocks (in Chinese). *Mech Eng*, 2005, 27(3): 51-55 [彭瑞东, 谢和平, 鞠杨, 等. 试验机弹性储能对岩石力学性能测试的影响. *力学与实践*, 2005, 27(3): 51-55]
- 7 Salamon M D G. Stability, instability and design of pillar workings. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1970, 7(6): 613-631
- 8 Barnard P R. Researches into the complete stress-strain curve for concrete. *Mag Concr Res*, 1964, 16(49): 203-210
- 9 Bernhard P K. Influence of the elastic constant of tension testing machines. *ASTM Bull*, 1937, 88: 14-15
- 10 Cook N G W. The failure of rock. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1965, 2: 289-403
- 11 Labuz J F. The problem of machine stiffness revisited. *Geophys Res Lett*, 1991, 28(3): 439-442
- 12 Hughes B P, Chapman G P. The complete stress-strain curve for concrete in direct tension. *Bull RILEM*, 1966, 30: 95-97
- 13 Wawersik W R, Fairhurst C. A study of brittle rock fracture in laboratory compression. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1970, 7(5): 561-575
- 14 Labuz J F, Biolzi L. Class I vs Class II stability: A demonstration of size effect. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 1991, 28: 199-205

- 15 唐春安. 岩石破裂过程中的灾变. 北京: 煤炭工业出版社, 1993
- 16 Chen Y, Kam-Ling T, Chen F B, et al. The Great Tangshan Earthquake of 1976: An Anatomy of Disaster. New York: Pergamon Press, 1988
- 17 Abercrombie R E, Mori J. Occurrence patterns of foreshocks to large earthquakes in the Western United States. *Nature*, 1996, 381: 303–307
- 18 Ohnaka M. Rupture in the laboratory. *Science*, 2004, 303(19): 1788–1789
- 19 Stoddart D R. Catastrophic damage to coral reef communities by earthquake. *Nature*, 1972, 239: 51–52.
- 20 Munawar Chaudhri M, Chen L Y. The catastrophic failure of thermally tempered glass caused by small-particle impact. *Nature*, 1986, 320: 48–50
- 21 郝圣旺. 非均匀介质的变形局部化、灾变破坏及临界奇异性. 博士学位论文. 北京: 中国科学院力学研究所, 2006
- 22 Hao S W, Wang H Y, Xia M F, et al. Relationship between strain localization and catastrophic rupture. *Theor Appl Fract Mech*, 2007, 48: 41–49
- 23 荣峰. 非均匀脆性介质损伤演化的多尺度数值模拟. 博士学位论文. 北京: 中国科学院力学研究所, 2006
- 24 Sornette D. Predictability of catastrophic events: Material rupture, earthquakes, turbulence, financial crashes, and human birth. *Proc Nat Acad Sci USA*, 2002, 99: 2522–2529
- 25 Ciliberto S, Guarino A, Scoretti R. The effect of disorder on the fracture nucleation process. *Physica D*, 2001, 158: 83–104
- 26 Xia M F, Song Z Q, Xu J B, et al. Sample-specific behavior in failure models of disordered media. *Commun Theor Phys*, 1996, 25: 49–54
- 27 Bai Y L, Wang H Y, Xia M F, et al. Statistical Mesomechanics of solid, linking coupled multiple space and time scales. *Appl Mech Rev*, 2005, 58: 372–388
- 28 Xia M F, Ke F J, Bai J, et al. Threshold diversity and trans-scales sensitivity in a nonlinear evolution model. *Phys Lett A*, 1997, 236: 60–64
- 29 Xu X H, Ma S P, Xia M F, et al. Synchronous multi-scale observations on rock damage and rupture. *Theor Appl Fract Mech*, 2005, 44: 146–156
- 30 Mogi K. Earthquake prediction research in Japan. *J Phys Earth*, 1995, 43: 533–561
- 31 Main I G. A damage mechanics model for power-law creep and earthquake aftershock and foreshock sequences. *Geophys J Int*, 2000, 142: 151–161
- 32 Xia M F, Han W S, Ke F J, et al. Statistical meso-scale damage mechanics and damage evolution induced catastrophe (I) (in Chinese). *Adv Mech*, 1995, 25(1): 1–38 [夏蒙芬, 韩闻生, 柯孚久, 等. 统计细观损伤力学和损伤演化诱致灾变(I). *力学进展*, 1995, 25(1): 1–38]
- 33 Xia M F, Han W S, Ke F J, et al. Statistical meso-scale damage mechanics and damage evolution induced catastrophe (II) (in Chinese). *Adv Mech*, 1995, 25(1): 145–173 [夏蒙芬, 韩闻生, 柯孚久, 等. 统计细观损伤力学和损伤演化诱致灾变(II). *力学进展*, 1995, 25(2): 145–173]
- 34 Mogi K. Study of elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and their relation to earthquake phenomena. *Bull Earthquake Res Inst*, 1962, 40: 125–173
- 35 Hirata T, Satoh T, Ito K. Fractal structure of spatial distribution of microfracturing in rock. *Geophys J R Astr Soc*, 1987, 90: 369–374
- 36 Lockner D. The role of acoustic emission in the study of rock fracture. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1993, 30: 883–899
- 37 Turcotte D L, Shcherbakov R. Can damage mechanics explain temporal scaling laws in brittle fracture and seismicity? *Pure Appl Geophys*, 2006, 163: 1031–1045
- 38 Garcimartín A, Guarino A, Bellon L, et al. Statistical properties of fracture precursors. *Phys Rev Lett*, 1997, 79: 3202–3205
- 39 Guarino A, Garcimartín A, Ciliberto S. An experimental test of the critical behaviour of fracture precursors. *Eur Phys J B*, 1998, 6: 13–24
- 40 Johansen A, Sornette D. Critical ruptures. *Eur Phys J B*, 2000, 18: 163–181
- 41 da Vinci L. I libri di Meccanica Nella Ricostruzione Ordinata di Arturo Uccelli Preceduti da Un'introduzione Critica e da un Esame Delle Fonti. Milano: Hoepli, 1940
- 42 Lund J R, Byrne J P. Leonardo Da Vinci's tensile strength tests: Implications for the discovery of engineering mechanics. *Civil Envir Eng Syst*, 2001, 18(3): 243–250
- 43 Weibull W. A Statistical Theory of the Strength of Materials. Stockholm: Generalstabens Litografiska Anstalts Förlag, 1939
- 44 Pradhan S, Hansen A, Chakrabarti B K. Failure processes in elastic fiber bundles. *Rev Mod Phys*, 2010, 82: 499–555
- 45 Issen K A, Rudnicki J W. Conditions for compaction bands in porous rock. *J Geophys Res*, 2000, 105(B9): 21529–21536
- 46 Rathbun A P, Marone C. Effect of strain localization on frictional behavior of sheared granular materials. *J Geophys Res*, 115: B01204, doi:10.1029/2009JB006466

- 47 Li H L, Bai Y L, Xia M F, et al. Damage localization as a possible precursor of earthquake rupture. *Pure Appl Geophys*, 2000, 157(11–12): 929–1943
- 48 Hao S W, Xia M F, Ke F J, et al. Evolution of localized damage zone in heterogeneous media. *Int J Damage Mech*, 2010, 19(7): 787–804
- 49 Wood D M. Some observations of volumetric instabilities in soils. *Int J Solids Struct*, 2002, 39: 3429–3449
- 50 Torenti J M, Desrues J, Benajja E H, et al. Stereopotogrammetry and localization in concrete under compression. *J Eng Mech*, 1991, 117(7): 1455–1465
- 51 Bai Y L, Xia M F, Ke F J, et al. Damage field equation and criterion for damage localization. In: *Rheology of Bodies with Defects*, Proc of IUTAM Symposium. Wang R, ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. 55–66
- 52 Rudnicki J W, Rice J R. Conditions for the localization of deformation in pressure-sensitive dilatant materials. *J Mech Phys Solids*, 1975, 23: 371–394
- 53 Benallal A, Claudia C. Perturbation growth and localization in fluid-saturated inelastic porous media under quasi-static loadings. *J Mech Phys Solids*, 2003, 51: 851–899
- 54 Paterson M S, Wong T F. *Experimental Rock Deformation-The Brittle Field*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005. 145
- 55 Bai Y L, Xia M F, Ke F J, et al. A self-closed system of equation evolution. *Int J Fract*, 1996, 78: 331–334
- 56 Bai Y L, Xia M F, Ke F J, et al. Closed trans-scale statistical microdamage mechanics. *Acta Mech Sin*, 2002, 18(1): 1–17
- 57 Olsson W A, Holcomb D J. Compaction localization in porous rock. *Geophys Res Lett*, 2000, 27(21): 3537–3540
- 58 Bazant Z P, Pijaudier-Cabot G. Measurement of characteristic length of nonlocal continuum. *J Eng Mech ASCE*, 1989, 115: 755–67
- 59 Wong T F, Baud P, Klein E. Localized failure modes in a compactant porous rock. *Geophys Res Lett*, 2001, 28(13): 2521–2524
- 60 Krajcinovic D, Rinaldi A. Statistical damage mechanics-Part I: Theory. *J Appl Mech*, 2005, 72: 76–85
- 61 Voyiadjis Geoge Z, Deliktas B. Multi-scale analysis of multiple damage mechanisms coupled with inelastic behavior of composite materials. *Mech Res Commun*, 2000, 27(3): 295–300
- 62 Carpenter B M, Marone C, Saffer D M. Weakness of the San Andreas Fault revealed by samples from the active. *Nat Geosci*, 2011, 4: 251–254
- 63 Zoback M D, Zoback M L, Mount V S, et al. New evidence on the state of stress on the San Andreas Fault system. *Science*, 1987, 238: 1105–1111
- 64 Lockner D A, Byerlee J D, Kuksenko V, et al. Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite. *Nature*, 1991, 350(7): 39–42
- 65 Harris W W, Viggiani G, Mooney M A, et al. Use of stereophotogrammetry to analyze the development of shear bands in sand. *Geotechn Testing J*, 1995, 18(4): 405–420
- 66 Scarpelli G, Wood D M. Experimental observations of shear band patterns in direct shear tests. In: *The Proceedings IUTAM Conference on Deformation and Failure of Granular Materials*, Delft (Balkema Publ. Rotterdam), 1982. 473–484
- 67 Roscoe K H. The influence of strains in soil mechanics. *Geotechnique*, 1970, 20(2): 129–170
- 68 Calvetti F, Combe G, Lanier J. Experimental micromechanical analysis of a 2D granular material: Relation between structure evolution and loading path. *Mech Cohesive-Frictional Mat*, 1997, 2(2): 121–163
- 69 Brace W F, Silver E, Hadley K, et al. Cracks and pores: A closer look. *Science*, 1972, 173: 162–163
- 70 Sprunt E, Brace W F. Direct observation of microcavities in crystalline rocks. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1974, 11: 139–150
- 71 Cerato A B, Lutenegeger A J. Specimen size and scale effects of direct shear box tests of sands. *Geotech Test J*, 2006, 29: 507–516
- 72 Rong F, Wang H Y, Xia M F, et al. Catastrophic rupture induced damage coalescence in heterogeneous brittle media. *Pure Appl Geophys*, 2006, 163: 1847–1865
- 73 Bernard X D, Eichhub P, Aydin A. Dilation bands: A new form of localized failure in granular media. *Geophys Res Lett*, 2002, 29(24): 2176
- 74 Besuelle P. Compacting and dilating shear bands in porous rocks: Theoretical and experimental conditions. *J Geophys Res*, 2001, 106(nB7): 13435–13442
- 75 Wong T F, Baud P, Klein E. Localised failure modes in compactant porous rock. *Geophys Res Lett*, 2001, 28(13): 2521–2524
- 76 Fossen H. Deformation bands formed during soft-sediment deformation: Observations from SE Utah. *Marine Petroleum Geology*, 2010, 27: 215–222
- 77 Sibson R H. Thickness of the seismic slip zone. *Bull Seismol Soc Am*, 2003, 93(3): 1169–1178
- 78 Gajo A, Bigoni D, Muir W D. Multiple shear band development and related instabilities in granular materials. *J Mech Phys Solids*, 2004, 52: 2683–2724
- 79 Geller R J, Jackson D D, Kagan Y Y, et al. Earthquakes cannot be predicted. *Science*, 1997, 275: 1616–1617

- 80 Main I. Is the reliable prediction of individual earthquakes a realistic scientific goal? *Nat Debates*, 1999
- 81 Wyszynski M. Cannot earthquakes be predicted? *Science*, 1997, 278: 487–490
- 82 Xia M F, Wei Y J, Ke F J, et al. Critical sensitivity and trans-scale fluctuations in catastrophic rupture. *Pure Appl Geophys*, 2002, 159: 2491–2509
- 83 Mignan A. Non-critical precursory accelerating seismicity theory (NC PAST) and limits of the power-law fit methodology. *Tectonophysics*, 2008, 452: 42–50
- 84 Wu Z L, Chen Y T. Earthquake prediction and statistical physics (in Chinese). *Physics*, 2002, 31(6): 365–371 [吴忠良, 陈运泰. 地震预测与统计物理. *物理*, 2002, 31(6): 365–371]
- 85 Rundle J B, Turcotte D L, Shcherbakov R, et al. Statistical physics approach to understanding the multiscale dynamics of earthquake fault systems. *Rev Geophys*, 2003, 41: 1019–1048
- 86 Jaumé S C, Sykes L R. Evolving towards a critical point: A review of accelerating seismic moment energy release prior to large and great earthquake. *Pure Appl Geophys*, 1999, 155: 279–306
- 87 Jiang C S, Wu Z L. Accelerating Moment Release (AMR) before strong earthquakes: A retrospective case study of a controversial precursor (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2009, 52(3): 691–702 [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]
- 88 Hao S W, Rong F, Lu M F, et al. Power-law singularity as a possible catastrophe warning observed in rock experiments. *Int J Rock Mech Mining Sci*, 2013, 60: 253–262
- 89 Voight B. A method for prediction for volcanic eruption. *Nature*, 1988, 332: 125–130
- 90 Yin X C, Chen X Z, Song Z P, et al. A new approach to earthquake prediction: The load/unload response ratio (LURR) theory. *Pure Appl Geophys*, 1995, 145: 701–715
- 91 Zapperi S P, Ray H E, Stanley A, et al. First-order transition in the breakdown of disordered media. *Phys Rev Lett*, 1997, 78: 1408–1411
- 92 Moreno Y, Gómez J B, Pacheco A F. Fracture and second-order phase transitions. *Phys Rev Lett*, 2000, 85: 2865–2868
- 93 Zhang R, Xie H P, Liu J F, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of rock failure under uniaxial multilevel loadings (in Chinese). *Chin J Rock Mech Eng*, 2006, 25(12): 2584–2588 [张茹, 谢和平, 刘建锋, 等. 单轴多级加载岩石破坏声发射特性试验研究. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(12): 2584–2588]
- 94 Feng X T, Masahiro S. Fractal structure of the time distribution of microfracturing in rocks. *Geophys J Int*, 1999, 136(1): 275–285
- 95 Lei X L, Masuda K, Nishizawa O, et al. Detailed analysis of acoustic emission activity during catastrophic fracture of faults in rocks. *J Struct Geol*, 2004, 26: 247–258
- 96 Freund F T, Takeuchi A, Lau B W. Electric currents streaming out of stressed igneous rocks - A step towards understanding pre-earthquake low frequency EM emissions. *Phys Chem Earth*, 2006, 31: 389–396
- 97 Bleier T, Dunson C, Alvarez C, et al. Correlation of pre-earthquake electromagnetic signals with laboratory and field rock experiments. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, 2010, 10: 1965–1975
- 98 Christensen K, Danon L, Scanlon T, et al. Unified scaling law for earthquakes. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2002, 99(Suppl 1): 2509–2513
- 99 Rundle J B, Klein W, Turcotte D L, et al. Precursory seismic activation and critical-point phenomena. *Pure Appl Geophys*, 2000, 157: 2165–2182
- 100 Benioff H. Earthquake and rock creep. *Bull Seismol Geol Soc Am*, 1951, 41(1): 31–62
- 101 Sornette D. Mean-field solution of a block-spring model of earthquakes. *J Phys I France*, 1992, 2: 2089–2096
- 102 Ben-Zion Y, Lyakhovskiy V. Accelerated seismic release and related aspects of seismicity patterns on earthquake faults. *Pure Appl Geophys*, 2002, 159: 2385–2412
- 103 Vere-Jones D, Robinson R, Yang W. Remarks on the accelerated moment release model-Problems of model formulation, simulation and estimation. *Geophys J Int*, 2001, 144: 517–531
- 104 Yin X C, Yu H Z, Kukshenko V, et al. Load-unload response ratio (LURR), accelerating moment/energy release (AM/ER) and state vector evolution as precursors to failure of rock specimens. *Pure Appl Geophys*, 2004, 161: 2405–2416
- 105 Yin X C, Liu Y. Load-unload response ratio—An interplay between earthquake prediction and mechanics (in Chinese). *Adv Mech*, 2013, 43(6): 555–580 [尹祥础, 刘月. 加载卸载响应比——地震预测与力学的交叉. *力学进展*, 2013, 43(6): 555–580]
- 106 刘月. 加载卸载响应比用于地震预测若干问题的研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2014
- 107 Lu C, Mai Y W, Xie H. A sudden drop of fractal dimension: A likely precursor of catastrophic failure in disordered media. *Phil Mag Lett*, 2005, 85(1): 33–40
- 108 Xu Q, Huang R Q. Power law between volume and frequency of geological hazards (in Chinese). *J Chengdu Univ Technol*, 1997,

- 24(Sppul): 91–96 [许强, 黄润秋. 地质灾害发生频率的幂律规则. 成都理工学院学报, 1997, 24(增刊): 91–96]
- 109 Ma J, Wang Y P, Chen S Y, et al. Discussion on relation between satellite thermal infrared information and faults activities (in Chinese). *Prog Nat Sci*, 2005, 15(12): 1467–1475 [马瑾, 汪一鹏, 陈顺云, 等. 卫星热红外信息与断层活动关系讨论. 自然科学进展, 2005, 15(2): 1467–1475]
- 110 Chen S Y, Ma J, Liu P X, et al. A thermal physical index to explore current tectonic activity with satellite remote sensing (in Chinese). *Sci China-Earth Sci*, 2012, 55: 290–295 [陈顺云, 马瑾, 刘培洵, 等. 利用卫星遥感获取现今构造活动信息的热物理指标研究. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(2): 211–216]
- 111 Ma J, Liu L Q, Ma S L. Fault geometry and departure of precursors from epicenter (in Chinese). *Earthquake Res China*, 1999, 15(2): 106–115 [马瑾, 刘力强, 马胜利. 断层几何与前兆偏离. 中国地震, 1999, 15(2): 106–115]
- 112 Ma J, Sherman S I, Guo Y S. Identification of meta-unstable stress state based on experimental study of evolution of the temperature field during stick-slip instability on a 5° bending fault (in Chinese). *Sci China-Earth Sci*, 2012, 42(5): 633–645 [马瑾, Sherman S I, 郭彦双. 地震前亚失稳应力状态的识别——以5°转折断层变形温度场演化的实验为例. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(5): 633–645]
- 113 Jiang C S. The key physical problems in earthquake prediction research (in Chinese). *Rec Develop World Seismol*, 2007, 9: 2–10 [蒋长胜. 与地震预测有关的关键物理问题. 国际地震动态, 2007, 9: 2–10]
- 114 Hardebeck J L, Felzer K R, Michael A J. Improved tests reveal that the accelerating moment release hypothesis is statistically insignificant. *J Geophys Res*, 2008, 113: B08310
- 115 Mignan A, King G C P, Bowman D D, et al. Seismic activity in the Sumatra-Java region prior to the December 26, 2004 (Mw = 9.0–9.3) and March 28, 2005 (Mw = 8.7) earthquakes. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 244: 639–654
- 116 Shi Y L, Cao J L. Some aspects in static stress change calculation—case study on Wenchuan earthquake (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2010, 53(1): 102–110 [石耀霖, 曹建玲. 库仑应力计算及应用过程中若干问题的讨论——以汶川地震为例. 地球物理学报, 2010, 53(1): 102–110]
- 117 陈颛, 黄庭芳, 刘恩儒. 岩石物理学. 北京: 中国科学技术出版社, 2009
- 118 Ohnaka M. A constitutive scaling law and a unified comprehension for frictional slip failure, shear fracture of intact rock, and earthquake rupture. *J Geophys Res*, 2003, 108(B2): 2080
- 119 Teng C K, Yin X C, Li S R, et al. Experimental study of three dimensional fracture in plate specimens with nonpenetrating crack (in Chinese). *Acta Geophys Sin*, 1987, 30(4): 371–378 [滕春凯, 尹祥础, 李世愚, 等. 非穿透裂纹平板试件三维破裂的实验研究. 地球物理学报, 1987, 30(4): 371–378]
- 120 Yin X C, Li S R, Li H, et al. Experimental study of interactions between two flanks of a closed crack (in Chinese). *Acta Geophys Sin*, 1988, 31(3): 307–314 [尹祥础, 李世愚, 李红, 等. 闭合裂纹面间相互作用的实验研究. 地球物理学报, 1988, 31(3): 307–314]
- 121 Healy D, Jones R R, Holdsworth R E. Three-dimensional brittle shear fracturing by tensile crack interaction. *Nature*, 2006, 439(7072): 64–67
- 122 Scholz C H. Earthquakes and friction laws. *Nature*, 1998, 243: 37–42
- 123 Marone C. Laboratory-derived friction laws and their application to seismic faulting. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 1998, 26: 643–696
- 124 Rubin A M. Episodic slow slip events and rate-and-state friction. *J Geophys Res*, 2008, 113: B11414
- 125 Ben-David O, Rubinstein S M, Fineberg J. Slip-stick and the evolution of frictional strength. *Nature*, 2010, 463(7277): 76–79
- 126 Byerlee J. Friction of rocks. *Pure Appl Geophys*, 1978, 116(4): 615–626
- 127 Dieterich J H. Modeling of rock friction: I experimental results and constitutive equations. *J Geophys Res*, 1979, 84: 2161–2168
- 128 Ruina A. Slip stability and state variable friction laws. *J Geophys Res*, 1983, 88: 10359–10370
- 129 Scuderi M M, Niemeije A R, Collettini C, et al. Frictional properties and slip stability of active faults within carbonate-evaporite sequences: The role of dolomite and anhydrite. *Earth Planet Sci Lett*, 2013, 369–370: 220–232
- 130 Marone C, Richardson E. Learning to read fault-slip behavior from fault-zone structure. *Geology*, 2010, 38(8): 767–768
- 131 Fagereng Å, Sibson R H. Mélange rheology and seismic style. *Geology*, 2010, 38: 751–754
- 132 Zhu B J, Shi Y L. Study of tight sandstone permeability from lattice boltzmann & digital rock model (in Chinese). *Chin J Theor Appl Mech*, 2013, 45(3): 384–394 [朱伯靖, 石耀霖. 波尔兹曼数字岩芯致密砂岩渗透率研究. 力学学报, 2013, 45(3): 384–394]
- 133 Zhu B J, Liu X Y, Cheng H H, et al. Application of digital rock technology to saturated rock friction mechanism under high pressure and temperature (in Chinese). *Prog Geophys*, 2013, 28(4): 1689–1699 [朱伯靖, 刘旭耀, 程惠红, 等. 基于数字岩芯技术的高温高压浸润岩石摩擦机理研究. 地球物理学进展, 2013, 28(4): 1689–1699]
- 134 Zhu B J, Shi Y L. Three-dimensional flow driven pore-crack networks in porous composites: Boltzmann Lattice method and hybrid hypersingular integrals. *Theor Appl Fracture Mech*, 2010, 53(1): 9–41
- 135 Zhu B J, Liu C, Shi Y L, et al. Saturated dislocations transient propagation-evolution in olivine structure under ultra high-coupled thermal-force fields. *Theor Appl Fracture Mech*, 2012, 58(1): 9–20
- 136 Liu S Q, Li Y B, Tian H Q, et al. Numerical simulation on thermal conductivity of wet porous rock (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2012, 55(12): 4239–4248 [刘善琪, 李永兵, 田会全, 等. 含湿孔隙岩石有效热导率的数值分析. 地球物理学报, 2012, 55(12): 4239–4248]
- 137 Shi Y L, Cao J L. Effective viscosity of China continental lithosphere (in Chinese). *Earth Sci Frontiers*, 2008, 15(3): 82–95 [石耀霖, 曹建

- 玲. 中国大陆岩石圈等效粘滞系数的计算和讨论. 地学前缘, 2008, 15(3): 82–95]
- 138 Verberne B A, de Bresser J H P, Niemeijer A R, et al. Nanocrystalline slip zones in calcite fault gouge show intense crystallographic preferred orientation: Crystal plasticity at sub-seismic slip rates at 18–150°C. *Geology*, 2013, 41: 863–866
- 139 Chen X, Madden A S, Bickmore B R, et al. Dynamic weakening by nanoscale smoothing during high-velocity fault slip. *Geology*, 2013, 41: 739–742
- 140 Greshake A, Fritz J, Böttger U, et al. Shear-induced ringwoodite formation in the Martian shergottite Dar al Gani 670. *Earth Planet Sci Lett*, 2013, 375: 383–394
- 141 Linckens J, Bruijn R H C, Skemer P. Dynamic recrystallization and phase mixing in experimentally deformed peridotite. *Earth Planet Sci Lett*, 2014, 388: 134–142
- 142 Smith S, Di Toro G D, Kim S, et al. Coseismic recrystallization during shallow earthquake slip. *Geology*, 2013, 41: 63–66
- 143 Collettini C, Viti C, Tesi T, et al. Thermal decomposition along natural carbonate faults during earthquakes. *Geology*, 2013, 41: 927–930
- 144 Siman-Tov S, Aharonov E, Sagy A, et al. Nanograins form carbonate fault mirrors. *Geology*, 2013, 41: 703–706
- 145 Zhu P, Zhang K, Wang Z, et al. Low-dose, simple, and fast grating-based X-ray phase-contrast imaging. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107(31): 13576–13581
- 146 Bryson J F J, Herrero-Albillos J, Kronast F, et al. Nanopaleomagnetism of meteoritic Fe-Ni studied using X-ray photoemission electron microscopy. *Earth Planet Sci Lett*, 2014, 396: 125–133
- 147 Sakamaki T, Ohtani E, Urakawa S, et al. Measurement of hydrous peridotite magma density at high pressure using the X-ray absorption method. *Earth Planet Sci Lett*, 2009, 287: 293–297
- 148 Knowles E, Staudigel H, Templeton A. Geochemical characterization of tubular alteration features in seafloor basalt glass. *Earth Planet Sci Lett*, 2013, 374: 239–250
- 149 Janssen C, Wirth R, Reinicke A, et al. Nanoscale porosity in SAFOD core samples (San Andreas Fault). *Earth Planet Sci Lett*, 2011, 301: 179–189
- 150 Lepot K, Benzerara K, Philippot P. Biogenic versus metamorphic origins of diverse microtubes in 2.7 Gyr old volcanic ashes: Multi-scale investigations. *Earth Planet Sci Lett*, 2011, 312: 37–47
- 151 Hao S W, Zhang B J, Tian J F, et al. Predicting time-to-failure in rock extrapolated from secondary creep. *J Geophys Res Solid Earth*, 2014, 119: 1942–1953
- 152 Lu M F, Li L, Xia M F, et al. Co-seismic energy release and relevant region of Tohoku M9.0 earthquake. *Sci China-Earth Sci*, 2011, 54(7): 947–95

Catastrophic rupture of quasi-brittle solids and its precursors

HAO ShengWang^{1,2*}, BAI YiLong², XIA MengFen^{2,3} & KE FuJiu^{2,4}

¹*School of Civil Engineering and Mechanics, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;*

²*State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics (LNM), Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

³*Department of Physics, Peking University, Beijing 100871, China;*

⁴*Department of Applied Physics, Beihang University, Beijing 100191, China*

Catastrophic rupture of brittle solids is very significant in, such as earthquakes, landslides, pillar failures, the movement of underground works and instability of structure. However, there is still a limited understanding of the triggering mechanism in natural catastrophic ruptures and their prediction. The principal purpose of this paper is to present a comprehensive demonstration on four key points, i.e., mechanism of catastrophic rupture, effects of heterogeneity, localization and physical precursors. Based on the analysis of the progress on them, we propose the current difficulties and potential strategies in research of damage nonlinear evolution, localization and catastrophic precursors.

catastrophic rupture, heterogeneous, localization, precursor, earthquake

PACS: 83.80.Nb, 83.85.St, 91.60.Dc, 91.60.Ba

doi: 10.1360/SSPMA2014-00115