实验室研究揭示地震震源过程

董鹏¹, 夏开文^{1,2*}

1. 天津大学, 水利仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072;

2. Department of Civil and Mineral Engineering, University of Toronto, Toronto, Ontario M5S 1A4, Canada

* 联系人, E-mail: kaiwen.xia@utoronto.ca, kaiwen@tju.edu.cn

2021-10-12 收稿, 2022-02-22 修回, 2022-02-23 接受, 2022-02-24 网络版发表

国家重点研发计划(2018YFC1503302)、国家自然科学基金(42174061)和天津市自然科学基金(19JCZDJC40400)资助

摘要 地震是最具毁灭性的自然灾害之一, 给很多国家带来了严重的人员和财产损失. 我国是大陆地震最为频繁、地震灾害最为严重的国家之一. 因此, 了解地震的发生机理乃至预测地震是地球科学界亟待解决的重大科学问题. 近几十年来, 基于实验室研究获得了大量类似于天然地震的实验室地震事件, 并通过对这些事件的精细观测揭示了震源物理过程的基本规律, 加深了人们对于震源物理过程的认识. 本文首先阐述实验室地震研究的发展简史, 然后系统梳理实验室地震研究在地震前兆、破裂传播等方面取得的重要进展及存在的问题. 最后, 探讨实验室地震研究所面临的挑战, 并展望实验室地震研究未来的方向与关键科学问题, 以期深化对震源过程的理解, 进而促进地震预测研究的发展.

关键词 实验室地震, 震源过程, 地震前兆, 破裂动力学

地震是一种突发的自然灾害, 给很多国家造成了严重的灾难. 21世纪以来, 全球超过8级的强震已经达到24次(<http://usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/lists-maps-and-statistics>), 强震发生率处于较高的水平^[1]. 我国是遭受大陆地震灾害最为严重的国家: 世界上约35%的7级以上大陆地震发生在我国; 20世纪全球因地震死亡的120万人中我国占59万^[2]; 21世纪以来, 我国经历了2008年汶川地震和2010年玉树地震, 惨痛的灾难仍历历在目. 在我国城市化和经济高度发展的今天, 地震对国民经济发展及人民生命财产造成的威胁和损失越来越大. 因此, 加强地震科学研究, 推进防震减灾工作既是重要的基础性、公益性事业, 也是国家公共安全的重要组成部分.

地震科学研究的最终目的是能够预测地震, 减轻地震造成的损失. 地震预测是指同时给出未来地震的时间、地点、大小(简称为地震的时空强三要素), 并给

出预测的可信程度. 在预测时间尺度上, 地震预测可分为长期、中期、短期和临震预测. 地震预测既是地球科学领域的一个宏伟的科学目标, 也是公认的世界性科学难题. 近几十年来, 全世界地震学家针对不同的预测时间尺度提出了各类有助于地震预测的方法, 但是成功预测的案例却屈指可数. 特别是在地震的短临预测方面, 由于观测到的地震前兆现象具有非唯一性^[3], 大多的预测只能以经验性预测为主, 其效果远落后于实际需求. 总体而言, 目前的地震预测研究尚处于初期的科学探索阶段, 总体水平仍然不高, 特别是短临预测水平更是难以满足社会公众的需求^[4]. 因此, “是否存在有助于预报的地震先兆”被*Science*杂志列为125个最具挑战性的科学难题之一.

地震预测之所以困难, 其直接原因是当前人们对震源过程的了解仍然十分有限. 近几十年来, 随着观测技术的发展, 密集观测台网、干涉合成孔径雷达测量

引用格式: 董鹏, 夏开文. 实验室研究揭示地震震源过程. 科学通报, 2022, 67: 1378–1389

Dong P, Xia K W. Laboratory investigations probing earthquake source process (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 1378–1389, doi: [10.1360/TB-2021-1061](https://doi.org/10.1360/TB-2021-1061)

(InSAR)、全球导航卫星系统(GNSS)观测网等先进观测技术被应用于天然地震观测研究。虽然地震学家在天然地震观测研究方面取得了长足的进步,得到了较为全面的认识,揭示了地震是破裂在断层面上开始、传播和终止的过程。然而,目前人们对地震的认知仍然十分有限,主要体现在:对地震的发生规律认识不够清晰;对地震的孕育机制认识不够全面。其根本原因是地球具有不可入性、大地震具有非频发性以及地震物理过程具有复杂性^[4]。由于地球具有不可入性,研究人员难以直接地对地震的孕育破裂过程进行观测,仅能够通过观测数据对破裂过程进行反演,难以获得高分辨率的观测结果。由于大震具有非频发性,同一地区的地震案例储备仍然不够充分,难以用于研究地震的孕育及发展的一般性规律特征。由于地震物理过程具有复杂性,研究人员难以对地震的发展过程及其控制机制进行确切的解释,仍存在争议的问题。总体而言,目前研究人员对地震的破裂过程,特别是破裂起始和破裂扩展过程仍然缺乏细致的了解。

另一方面,随着高性能计算的发展,数值模拟方法也被广泛应用于地震破裂动力学研究方面。在给定断层模型、初始(应力)条件、破裂准则、边界条件以及成核机制的条件下,可以对地震破裂传播的动力学过程进行模拟^[5,6]。现阶段,主要的数值方法包括有限差分法、边界积分方程法、有限元法、谱元法等。然而,

数值模拟方法本身也存在诸多的假定,无论是初始条件还是破裂准则,抑或是成核机制,其适用性仍有待于进一步的研究。

实验室地震研究是指在实验室内人为可控地产生大量的、与天然地震相似的实验室断层破裂失稳现象,并通过高分辨率、高精度的观测手段对失稳过程(即实验室地震的震源过程)进行直接观测(图1)。不难看出,实验室地震研究既能够有效地克服天然地震观测研究中面临的困难,又能够摆脱数值模拟研究对假定条件的依赖性。因此,开展实验室地震研究有利于清楚地揭示地震震源过程(包括地震的孕育、破裂的起始、传播和停止)对于断层几何及加载条件的依赖关系,这不仅关系到对地震孕育机制及破裂传播的一般性规律等重大基础问题的科学认知,还对地震科学实验场的建立具有现实指导意义,对地震预测研究起到重要的理论支撑。

随着国家重大科研基础设施“地震科学实验场”纳入《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》,地震震源过程研究迎来了新的机遇和挑战。实验室地震研究作为研究地震震源过程的一种重要手段,对于揭示震源过程的物理学机制起到了关键性的作用。为此,本文介绍实验室地震研究的发展历史、基本现状和热点问题,并对实验室地震研究的未来发展方向进行展望,希望能够

图1 天然地震观测和实验室地震研究的关系

Figure 1 Interrelationship between field observations of natural earthquakes and experimental investigations of laboratory earthquakes

推动实验室地震研究的创新和完善,对地震震源过程研究提供有益的参考.

1 实验室地震研究简史

实验室地震研究可以追溯到1966年Brace和Byerlee^[7]的黏滑实验,他们提出黏滑(stick-slip)是浅源地震的一种机制.该研究的意义在于指出地震过程由断层面的摩擦行为控制,既支持了地震断层成因说,又将摩

擦学理论引入地震学领域,开辟了震源过程研究的新纪元.一般而言,开展有效的实验室地震研究需具备两个条件:一方面,在实验室内可控地产生可比拟天然地震的实验室地震;另一方面,对实验室地震的孕震及同震期间的物理场信息进行高分辨率、高精度观测.随着实验技术的迅速发展,各类先进的加载装置和观测方法被用于研究断层的破裂或摩擦滑动行为.表1按时间顺序列举了在实验室地震研究领域内国内外著名的

表 1 实验室地震研究发展简史

Table 1 Brief development of laboratory investigations of earthquakes

起始时间(年)	国家	研究机构	负责人	加载方式	材料及最大断层长度(cm)	观测内容
1972	美国	Columbia University	Scholz C H	双轴	花岗岩 20	位移
1972	美国	State University of New York	Wu F T	单轴	树脂 11.8	应变、声发射
1973	美国	University of California, San Diego	Brune J N	直剪	橡胶 22	位移
1978	美国	United States Geological Survey (USGS)	Dieterich J H	双轴	花岗岩 17	应变
1981	美国	USGS	Dieterich J H	双轴	花岗岩 200	应变
1986	日本	University of Tokyo	Ohnaka M	双轴	花岗岩 40	应变 位移
1986	苏联	Institute of the Physics of the Earth, Academy of Sciences of Union of Soviet Socialist Republics	Sobolev G A	单轴	混凝土 174	应变
1990	日本	University of Tokyo	Mogi K	双剪	花岗岩 100	应变
1995	中国	中国地震局地质研究所	马瑾	双轴	花岗岩 65	应变、位移、 声发射、温度
2003	日本	Geological Survey of Japan	Lei X	三轴	花岗岩 10	声发射
2004	以色列	Hebrew University of Jerusalem	Fineberg J	直剪	PMMA 15	界面接触、位移、 应变
2004	美国	California Institute of Technology	Rosakis A J	单轴	Homalite-100 15	光弹、位移
2010	意大利	Department of Seismology and Tectonophysics	Nielsen S	单轴	树脂 14.5	光弹
2011	美国	University of California, Berkeley	Glaser S D	直剪	PMMA 18	声发射、位移
2012	美国	University of Southern California	Goebel T H W	三轴	花岗岩 10.7	声发射
2013	法国	École Normale Supérieure	Schubnel A	三轴	花岗岩 8	声发射、应变
2014	日本	National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention (NIED)	Fukuyama E	直剪	变质辉长岩 150	应变、声发射、位移
2018	美国	Cornell University	McLaskey G C	直剪	花岗岩 310	应变、位移、声发射

研究机构, 并对其实验装置和观测方法进行简要介绍。

由表1可见, 实验室地震的研究装置一方面向容纳大尺度的实验断层模型发展, 以便于对震源过程开展更为全面的研究; 另一方面向三轴应力加载条件发展, 用以还原孕震深度附近的应力环境。此外, 在观测方法方面, 也逐渐向高时空分辨率、高精度以及多场(位移、应变、振动等)联合观测发展, 便于从多角度对震源过程进行精细观测。通常岩石或者高分子模型材料被用来制作实验室断层模型, 高分子材料具备和岩石类似的摩擦性质, 而且通过尺度效应可以等效10倍以上尺寸的岩石模型。值得注意的是, 数字图像相关方法(digital image correlation, DIC)作为经典的实验力学方法, 具有高精度、高分辨率以及全场观测的优点, 也被应用于实验室地震研究中。例如, Rubino等人^[8]结合超高速摄影技术和DIC方法测得了同震摩擦演化关系, 强调闪热效应(flash heating)对断层摩擦弱化的重要贡献。Zhuo等人^[9]结合高速摄影技术、DIC方法以及声发射监测技术, 揭示了震前预滑加速发展和震颤(tremor)主频增大的一致性特征。近期, 天津大学也建立了实验室地震研究装置(图2)。该装置为双轴加载, PMMA或者岩石制作的断层长度可达70 cm。利用低速/高速摄影系统及多通道应变采集系统, 可对全场位移和多点应变的演化过程开展同步观测, 适用于研究地震孕育过程、同震破裂传播以及地震全周期内断层滑移演化行为。

2 实验室地震研究现状

众所周知, 震源过程是破裂或位错在断层面上开始、传播和终止的过程^[5]。本文着重从地震前兆和同

震破裂传播这两个方面, 介绍实验室地震研究所取得的重要结果。

2.1 地震前兆

地震的发生是一个由慢变快的物理力学过程, 是应有前兆的^[3]。地震前兆是断层临近破裂失稳时发生的异常现象, 是开展地震短临预测的重要依据。尽管研究人员提出的地震前兆多达数十种, 但是这些前兆和地震之间的确定性关系仍经不起检验。1997年, 国际地震学与地球内部物理学协会(IASPEI)下属的地震预测委员对已被提出的天然地震前兆进行评估总结, 得出的结论是: 我们并不清楚如何利用这些所谓的前兆对地震进行预测^[10]。天然地震的观测受到诸多不利因素(例如观测精度、观测密度、天然地质构造条件的非均匀性等)的干扰, 导致对实际震源过程的理解存在偏差, 得到的结论不具有普适性。实验室地震研究恰好是检验地震前兆的一种重要手段。通过实验室地震研究, 地震学家揭示或验证了一些地震的前兆现象。

2.1.1 预滑移

震前发生局部的滑移加速现象通常被认为是预滑移。在天然地震观测中, 研究人员基于大地测量方法直接获取了大量有关前兆预滑移的证据^[11]。此外, 利用天然的重复地震(repeating earthquakes)也能研究预滑移行为。重复地震是由局部的小凹凸体(asperity)在蠕滑(creep)的持续加载下发生重复性破裂所形成的, 因而能反映断层蠕滑的行为, 适用于探测断层深部的蠕滑^[12]。俯冲带地震震前存在重复地震事件, 同时还发生前震的有序迁移现象, 这表明在地震成核过程中, 存在

图2 天津大学实验室地震研究装置。具备全场位移和多点应变的瞬态同步观测

Figure 2 Laboratory earthquake setup in Tianjin University. The real time full-field displacement and multi-point strain can be synchronously acquired

前兆性的预滑行为^[13,14]。此外,大陆地震也伴随有预滑。例如,陈棋福团队^[15,16]依据重复地震观测,揭示了在2008年汶川地震前,龙门山断裂带深部存在比浅部更快的蠕滑事件。总体而言,研究预滑现象对于了解地震起始过程以及评估地震灾害具有重要的意义。

在实验研究方面, Scholz等人^[17]最早发现在震前存在先兆性的蠕滑过程。此后, Dieterich^[18]更为全面的观测表明,断层的预滑经历了由慢到快的扩展过程,最终形成高速扩展,导致宏观失稳。Ohnaka和Kuwahara^[19]基于类似的实验现象,初步建立了地震成核模型,并指出成核过程其实就是地震前兆的根源。同一时期, Ellsworth和Beroza^[20]提出了预滑模型(preslip model)和级联模型(cascade model)来解释天然地震的成核机制。按预滑模型的描述,地震的成核表现为无震滑移的扩展,而前震仅仅是预滑成核过程的副产品。预滑模型的现实依据正是在实验室中观测到的预滑现象,并在随后的实验中得到了进一步的验证^[21],而且研究人员也对影响预滑特征的因素进行了探讨。一般而言,对于实验室内较为均匀的断层,失稳前几乎均能观测到预滑(成核)过程。

如果前兆预滑和地震之间存在联系,那么就可以通过预滑的特征来推断地震的发生时刻。按照预滑模型,预滑区域的扩展经历了准静态扩展—加速扩展这一转换过程。寻找出加速扩展的标志对预测地震的发生时刻起到重要作用。卓燕群等人^[22]分析了预滑发展的协同化特征,并指出协同化作用的加强标志着断层进入亚失稳阶段,地震即将发生。可是,如何将实验室中得到的亚失稳理论应用于天然地震预测仍然有待进一步研究。此外,最新的研究表明,前兆性的预滑也透露出最终地震大小的信息。例如, Acosta等人^[23]基于小样品的三轴实验总结出前兆预滑和最终地震释放能量之间存在正相关性,但是该预滑与大样品实验中的局部预滑未必相同,将该关系准则直接应用于天然地震预测的时机还远未成熟。

2.1.2 前震

大多数地震具有前震。因此,前震活动特征也是进行地震短临预测的重要依据。实验研究揭示,在断层宏观失稳前,通常出现声发射事件的数量加速增多的现象^[24]。而且,这些声发射事件的 b 值在震前出现异常的降低^[25]。 b 值是对地震活动性进行统计获得的参数,而且具有一定的物理意义。 b 值能够反映一个区域所处的应力水平和接近强度极限的程度,与区域差应力呈负

相关^[26]。由此来看,区域的 b 值分析对于地震预测具有重要意义。

此外,声发射事件也会存在时空迁移特征,这可以用于指示破裂的扩展传播过程^[27]。而且,声发射事件的时空迁移与预滑的发展存在同步性^[28]。尽管声发射事件释放的能量仅占震前释放能量的极少一部分,但它们在成核过程中也可能起到重要的促进作用^[29,30]。更巧合的是,声发射事件的迁移特征恰好与级联模型描述相似。在级联模型中,地震的成核是从小凹凸体的破裂开始,然后小破裂依次触发周围其他凹凸体的破裂,形成前震序列;最终,这些小破裂触发最大凹凸体的破裂,产生了主震^[20]。然而,级联模型意味着这些前震序列的发生具有随机性,前震与主震在各自的起始阶段并没有区别,因此最终的地震是无法预测的。需要注意的是,前震和主震之间的物理关系目前仍不明确,并不是所有的大地震都具有前震,也不是所有的小震之后都会产生更大的地震。

2.1.3 波速异常

20世纪70年代,地震学家发现在天然地震前地壳波速比出现异常变化,该现象被认为是地震的前兆。Nur^[31]提出著名的膨胀-扩散(dilatancy-diffusion)地震前兆模型,解释地震前波速比异常变化的机制。然而,并不是所有的地震都发生前兆性的波速异常,这导致波速异常前兆饱受质疑^[32]。

实验室研究证明了震前存在波速异常现象。Marone团队^[33]对断层破裂失稳全过程波速演化特征进行研究,观察到失稳前剪切带的波速发生降低,指出地震孕育过程中加速的蠕滑造成了波速的降低,且该信号可作为失稳前兆。同时,他们的研究还揭示,在震前弹性波幅值也会发生先兆性的降低,且幅值降低持续的时间与地震的大小呈正相关^[34]。需要注意的是,断层围岩的波速受到多方面因素的影响:一方面,预滑的发展会导致波速降低;但另一方面,持续的加载反而造成波速的增大^[35]。此外,实验室研究还揭示了震前波速异常变化的物理机制。由于断层的实际接触面积和弹性波波速存在一定的正相关性^[36],因此在地震孕育过程中,断层局部接触的蠕变会改变弹性波的传播特性^[37],从而导致波速异常现象。

2.1.4 前兆研究面临的难题

从现有的研究成果来看,尽管实验室地震研究证明存在若干种地震前兆现象,但目前这些前兆研究对于天然地震短临预测起到的作用极为有限。我们认为,

要改变目前基于前兆研究的地震短临预测现状, 仍需解决以下几个难题.

第一, 地震的大小是否与成核过程有关仍旧悬而未决. 这就意味着, 即使能够从成核过程中发现前兆, 但是并不清楚如何利用这种前兆进行地震短临预测. Ellsworth和Beroza^[20]认为成核持续的时间、释放的能量以及滑移量与地震大小呈正相关, 并得到一些证据的佐证. 但是, 也有研究并不赞成以上观点. 例如, Mori和Kanamori^[38]对1995年Ridgecrest地震序列进行分析后发现: 小地震和大地震的P波记录在一开始是沿着同一上升曲线演化; 唯一的区别在于, 小地震更早地偏离了该上升曲线. 这就意味着, 大地震和小地震具有相同的起始过程, 地震的大小是由破裂传播过程控制. 因此, 从成核阶段推断最终地震的大小是不可行的. 此后, 关于这一争议问题的报道仍持续不断^[39,40]. 而且, 这一争议问题由于涉及地震早期预警(earthquake early warning), 成为当下的热点问题.

第二, 地震遵循何种成核模型尚存在争议^[41]. 由于不同的成核模型具有不同的前兆特征, 因此这个问题的解答对前兆信号的选择具有指导意义. 即使对于同一个地震, 研究人员推断出的地震成核模式甚至也不一致. 例如, 对于1999年 M_w 7.6 Izmit地震, Bouchon等人^[42]发现震前存在重复地震. 因此, 他们认为地震的成核是由蠕滑驱动的. 而Ellsworth和Bulut^[43]更为精细的观测表明, 并没有明显的证据表明存在重复地震, 前震序列近乎是由西向东依次触发形成的, 最终产生主震, 这与级联模型的描述相符. Yamashita等人^[44]的实验结果显示, 成核模型依赖于断层的均匀程度: 预滑模型适用于描述均匀断层的地震成核过程, 而级联模型则适用于非均匀断层. 事实上, 预滑和级联还可能同时在成核过程中起到驱动作用^[30]. 近期, McLaskey^[29]通过实验揭示了这种现象, 概念性地提出了第3种成核模型——速度依赖的级联模型(rate-dependent cascade up model). 该模型认为, 成核过程首先遵循预滑模型, 并伴随有前震事件. 但是, 在预滑区扩展到临界成核长度之前, 某一个前震就可能直接触发整个断层的失稳. 在天然地震观测方面, 也有关于这种复合成核模型的报道^[45].

第三, 缺乏判别地震前兆的标准. 例如, 前兆性的慢滑移往往见于震例回溯研究中; 而现实的情况是, 慢滑移是一种较为普遍的断层滑移行为, 特别是在俯冲带. 那么, 如何判别这些慢滑移是常规的慢滑移事件还

是前兆性地预滑并预测地震是一个国际性难题. 此外, 前震被普遍认为是地震的前兆, 但现实的情况是, 在分析地震活动性时, 难以判断一个地震序列里是否已经包含了主震. Gulia和Wiemer^[46]的研究表明, 分析 b 值的时间序列能区分主震是否已经发生. 但是, 利用 b 值成功预测的震例比较少, 且国际上对于这种观点仍存在大量争议. 这是由于 b 值的确定本身就面临一些困难^[47], 一方面, 可靠的 b 值计算通常需要上千个地震, 而孕震区未必能在短临时间尺度内孕育足够的可被观测的地震; 另一方面, b 值的大小还受到地震目录的完整性的影响.

2.2 同震破裂传播

对于天然地震, 地震学家通常结合地震波记录、大地测量等数据来反演断层的同震破裂传播过程. 然而, 由于受观测精度、观测密度以及反演假定等条件的影响, 得到的破裂模型与实际过程存在一定的偏差. 此外, 同一断层的发展周期为几十到上千年不等, 缺乏当代地球物理的重复观测. 而某些断层的地震行为尚未被记录. 实验室地震研究恰巧弥补了以上不足, 为研究同震动态破裂过程提供了新的手段.

2.2.1 破裂速度

地震的破裂速度是重要的震源物理参数. 首先, 破裂速度影响到地震能量的分配(energy partition). 断层破裂时的辐射效率随着破裂速度的增大而提高^[48], 即更高的破裂速度导致较多的能量以地震波的形式向外辐射. 同时, 破裂速度的急剧变化会导致地震波中的高频成分增强. 因此, 研究地震的破裂速度对于地震灾害评估以及防震减灾具有重要意义.

天然地震的观测结果表明, 大多数浅源地震的极限破裂速度为0.75~0.95倍的围岩介质剪切波速(C_s), 不超过瑞利波速(C_R)^[48]. 而少量地震的破裂速度可以超过 C_s , 也就产生超剪切破裂(supershear rupture). 由于早期的观测精度有限, 关于天然地震的超剪切破裂是否存在一度存在争议. 而通过实验室地震研究可以直接获得超剪切破裂存在的直接证据. Xia等人^[49]利用动光弹方法首次观测到了实验室断层超剪切破裂所激发出的马赫锥, 并直接证明了破裂由亚瑞利速度转换到超剪切速度所遵循的Burridge-Andrews机制^[50], 如图3(a)~(c)所示. Xia等人^[51]还开展了双材料断层(bimaterial fault, 即断层两侧围岩介质相异)的破裂传播实验(图3(d)), 发现了破裂在两个传播方向的速度不一致(图3

图 3 (网络版彩色)动光弹实验揭示破裂传播过程。(a)~(c) 均匀断层超剪切破裂的成核、超剪切转换及激发马赫锥的过程^[49], Copyright © 2004, AAAS. 非均匀断层破裂:(d) 非均质断层模型;(e) 非均质断层非对称破裂亚剪切破裂^[51], Copyright © 2005, AAAS. (f) 非均质断层非对称破裂, 西侧为广义瑞利破裂(破裂速度为 $+C_{GR}$), 东侧为超剪切破裂^[51], Copyright © 2005, AAAS

(e), (f)). 在剪切破裂的传播过程中, 由于断层材料的差异, 破裂前方的正应力会发生非一致性的变化, 从而影响两侧破裂的传播速度. 这些结果被用于解释天然地震(1999 M_w 7.6 Izmit地震、1999 M_w 7.1 Düzce地震和 2004 M_w 6.0 Parkfield地震)的非对称破裂现象.

控制断层破裂传播速度的因素是研究人员关心的问题. 尽管数值模拟研究指出断层的应力状态影响着破裂传播过程, 但数值模拟研究中所采用的破裂准则和成核过程本质上属于人为的假定条件, 共同影响着破裂传播过程. 实验室研究可以尽量减少假定条件对破裂传播过程的影响, 从而提取出影响破裂传播速度的因素. 例如, Ben-David等人^[52]通过应力分布非均匀的直剪实验发现, 局部的破裂速度与局部剪应力和正应力的比值(τ_0/σ_0)呈正相关. 该结果与Passelègue等人^[53]的三轴实验结果基本一致. 后者指出, 断层整体 τ_0/σ_0 的增大会引起破裂速度的提高. 需要注意的是, Passelègue等人^[53]还发现, 破裂速度与应力降存在一定的正相关性. 然而, 该结论却与天然地震观测得出的结论相悖. Chounet等人^[54]分析了近100个天然地震的观测数据, 发现破裂速度与应力降呈负相关. 综上所述,

尽管实验室地震研究在地震破裂速度方面取得了丰硕的成果, 但需要注意的是, 控制地震破裂速度的关键因素尚未得到统一认识, 仍缺乏确切的力学模型来描述其作用机制, 且实验结果与天然地震观测结果之间的矛盾也有待解决.

2.2.2 破裂模式

地震包含两种破裂模式(rupture mode), 分别是裂纹式(crack-like)和脉冲式(pulse-like). 前者是指断层某一点的上升时间与破裂持续时间相当, 而后者是指上升时间远小于破裂持续时间. Heaton^[55]对天然地震的破裂过程进行分析总结, 得到的结论是: 破裂是以自愈合滑动脉冲的形式在断层上传播.

地震以脉冲式进行破裂传播的物理机制是研究人员关注的问题. 数值模拟研究表明, 存在诸多能够导致脉冲式破裂的因素, 主要包括摩擦准则^[56]、边界条件^[57]、断层的非均匀性^[58]等. 通过实验室地震研究可对以上这些因素进行检验. Lu等人^[59]通过实验观测到实验室断层的脉冲式破裂现象, 并指出断层的预应力水平控制着破裂模式, 当断层预应力水平较低时才能产生脉冲式破裂. 断层的非均匀性对破裂模式的影响

更为复杂。Shlomai和Fineberg^[60]通过开展双材料断层的自发式破裂实验,发现在正方向(软材料的滑移方向)的破裂大多为脉冲式,而在负方向上的破裂为裂纹式。而Xia和Rosakis^[61]基于含低速带断层的破裂实验发现:在正方向上,破裂以裂纹式传播;而在负方向,由于地震波在低速带内的反射及叠加作用,破裂常以脉冲式进行传播。不难发现,Xia和Rosakis^[61]的结论与Shlomai和Fineberg^[60]的结论恰好相反。双材料界面的破裂本身就是一个复杂的力学问题,仍有待进一步的研究。

3 展望

目前,实验室地震研究虽然取得了丰硕的成果,推动着震源过程研究的进步,但仍有待进一步的完善。从以下几个角度对今后实验室地震研究的发展进行展望,希望对实验室地震领域乃至震源过程领域的研究人员有所启示。

3.1 发展多场联合观测方法

现阶段,影响震源过程的诸多因素尚未得到充分的研究。因此,亟须充分发挥实验室地震研究在实验可重复性和观测充分性上的优势,发展多场联合观测方法,对位移、应变、声发射、波速、电磁辐射、温度等物理场进行高精度的同步观测,了解多种物理场的时空演化特征,掌握震源过程各物理场的基本演化模式,探索震源过程的物理力学规律。

尤其是在地震成核过程研究方面,还需发挥实验室地震研究在观测精度和观测密度上的突出优势。由于成核过程是断层弱化(应力应变释放)和进一步局部化的结果,高密度的应力(应变)观测十分重要。此外,断层变形阶段的划分对于把握地震成核的进程具有重要意义。马瑾^[3]提出的亚失稳概念在断层变形阶段划分方面取得了重要的进展,使后续的研究具备更明确的阶段划分思路。目前,根据实验观测结果,研究人员通常将预滑过程划分为预滑区的初期稳定扩展阶段和后期加速扩展阶段^[44,62]。但是,这些研究主要是在较低的正应力条件下开展的,因此,观测到的成核过程可能并不全面,值得今后在更大范围的正应力条件下进行更为全面的探索。

3.2 真三轴应力条件下的震源过程

破裂的起始、传播和停止均与断层的应力条件密切相关。现有的结论大多是在双轴荷载和围压条件下

获得的,这些荷载条件与实际的孕震环境仍然存在差异,未见真三轴应力条件下断层破裂的相关研究。不同于围压加载,真三轴应力状态尽最大可能还原了实际断层的应力环境。真三轴应力状态下,地震前兆具有什么表现形式仍是不得而知。此外,关于中间主应力对断层破裂发展的影响特征及其作用机制的研究仍是一片空白。因此,亟须进一步研发真三轴实验室地震研究装置,并同时还原孕震深度上的温度及渗流等环境条件,开展多场耦合作用下实验室地震研究,完善震源过程理论体系。

3.3 地震周期规律性特征研究

研究地震周期规律性特征,包括间震积累、震前孕育、同震破裂、震后愈合等阶段,主要关注应力积累、地震成核、破裂传播和停止、震后应力调整和恢复等行为,从而全面地了解断层活动的全生命周期过程(图4),为建立有效物理预测机制提供理论基础。研究的主要内容包括:地震周期中各阶段内断层的运动和应力演化特征;地震周期内前一阶段断层活动行为对后一阶段行为的影响特征及控制机制;地震周期内断层弱-强化的表现特征及物理机制。

3.4 多学科领域协同研究

实验室地震研究是一个跨学科的研究领域,涉及地震学、岩石力学、断裂力学、流体力学、声学、光学等,其目的是通过一系列的基础理论及实验方法研究震源过程,总结基本规律,揭示地震机理。因此,加强多学科之间的交流有利于推动实验室地震研究的发展。

然而,室内实验条件仍然与野外断层在诸多方面仍存在较大的差别。例如,实验室中的加载率($10^{-7}/s \sim 10^{-5}/s$)通常比天然构造的加载率($3 \times 10^{-8}/a \sim 3 \times 10^{-7}/a$)^[48]高出约7个数量级。同时,实验室的断层尺度要远小于天然断层。研究表明,无论是加载速率^[63]还是断层尺度的相对大小^[64],均影响着断层的破裂失稳特征。因此,将实验中得到的规律外推至天然地震时仍需谨慎。此外,应力环境、温度条件、渗流环境、边界条件、断层形貌、物质属性等方面的差异也是需要注意的问题。尽管部分方面(如应力、温度甚至渗流环境)存在的问题可以通过三轴实验来解决,但是也会给观测带来不便。由此可见,实验研究也存在固有的缺陷和不足,主要侧重于规律性和机理性的研究。

图4 实验室地震研究地震周期规律特性

Figure 4 Probing characteristics of earthquake cycles using laboratory earthquake methods

通过实验室地震研究得到一般性的规律和机理之后,便可以建立断层力学本构模型描述断层滑移行为的基本特征。然后基于数值模拟方法,采用与实际相符的边界条件、应力条件和加载条件,模拟地震的孕育及破裂传播行为,并与天然地震的观测结果进行对比,获得相应的震源参数。在此基础上,开展大量模拟分析,对未来的地震破裂行为进行预估,对地震灾害风险进行评估。由此可见,数值模拟研究是联系实验研究和天然地震观测研究之间的重要桥梁。因此,将实验研究、数值模拟研究和天然地震观测研究有机地结合在一起^[65],形成优势互补,产生良性循环,有利于拓展

对震源过程的认知,推动地震预测研究的发展。

更重要的是,亟需系统性地开展基础性、综合性的对地球内部及对地震的观测、探测与研究计划^[4],加快地震科学实验场等重大项目的建设和推进工作,突破震源过程研究领域一系列难题,为地震预测提供理论基础,促进地震科学在减轻地震灾害中的应用。

4 总结

总体来说,经过各国研究人员的不懈努力,实验室地震研究领域得到了快速和长足的发展,具体表现在:(1) 实验室地震研究的观测方法向高分辨率、高精度、精细化方向发展;(2) 实验室地震研究得到的结论被广泛用于解决实际震源过程中的难题。震源过程研究中还存在许多争论颇多和难以完美解释的问题,尽管目前的实验室地震研究尚且不能给予解答,但随着实验室地震研究技术水平的不断提高以及研究人员的合作努力,实验室地震研究一定会取得更多的成果和突破。因此,实验室地震研究仍然是震源过程研究领域的重要方向,其在建立和完善震源过程研究体系与揭示震源过程机制方面具有非常重要的意义。

总之,震源过程是极具挑战性和前沿性的地球科学的研究方向,需要各研究领域内广大专家学者采用不同的研究手段、齐心协力共同推进,可望在不久的将来取得突破性进展,更好地服务于地震预测研究。

参考文献

- Yue H, Zhang Y, Gai Z X, et al. Resolving rupture processes of great earthquakes: Reviews and perspective from fast response to joint inversion. *Sci China Earth Sci*, 2020, 63: 492–511 [岳汉, 张勇, 盖增喜, 等. 大地震震源破裂模型: 从快速响应到联合反演的技术进展及展望. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50: 515–537]
- Zhang P Z, Deng Q D, Zhang Z Q, et al. Active faults, earthquake hazards and associated geodynamic processes in continental China (in Chinese). *Sci China Earth Sci*, 2013, 43: 1607–1620 [张培震, 邓起东, 张竹琪, 等. 中国大陆的活动断裂、地震灾害及其动力过程. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43: 1607–1620]
- Ma J. On “whether earthquake precursors help for prediction do exist” (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2016, 61: 409–414 [马瑾. 从“是否存在有助于预报的地震先兆”说起. *科学通报*, 2016, 61: 409–414]
- Chen Y T. Earthquake prediction: Retrospect and Prospect (in Chinese). *Sci China Ser D Earth Sci*, 2009, 39: 1633–1658 [陈运泰. 地震预测: 回顾与展望. *中国科学D辑: 地球科学*, 2009, 39: 1633–1658]
- Madariaga R, Ruiz S. Earthquake dynamics on circular faults: A review 1970–2015. *J Seismol*, 2016, 20: 1235–1252
- Xu J, Zhang H, Chen X. Rupture phase diagrams for a planar fault in 3-D full-space and half-space. *Geophys J Int*, 2015, 202: 2194–2206
- Brace W F, Byerlee J D. Stick-slip as a mechanism for earthquakes. *Science*, 1966, 153: 990–992
- Rubino V, Rosakis A J, Lapusta N. Understanding dynamic friction through spontaneously evolving laboratory earthquakes. *Nat Commun*, 2017, 8: 15991
- Zhuo Y Q, Liu P, Chen S, et al. Laboratory observations of tremor-like events generated during preslip. *Geophys Res Lett*, 2018, 45: 6926–6934
- Wyss M. Second round of evaluations of proposed earthquake precursors. *Pure Appl Geophys*, 1997, 149: 3–16

- 11 Lay T. A review of the rupture characteristics of the 2011 Tohoku-Oki M_w 9.1 earthquake. *Tectonophysics*, 2018, 733: 4–36
- 12 Igarashi T, Matsuzawa T, Hasegawa A. Repeating earthquakes and interplate aseismic slip in the northeastern Japan subduction zone. *J Geophys Res*, 2003, 108: 2249
- 13 Kato A, Obara K, Igarashi T, et al. Propagation of slow slip leading up to the 2011 M_w 9.0 Tohoku-Oki earthquake. *Science*, 2012, 335: 705–708
- 14 Kato A, Nakagawa S. Multiple slow-slip events during a foreshock sequence of the 2014 Iquique, Chile M_w 8.1 earthquake. *Geophys Res Lett*, 2014, 41: 5420–5427
- 15 Chen Q F, Li L. Deep deformation of the Longmenshan fault zone related to the 2008 Wenchuan earthquake (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 1917–1933 [陈棋福, 李乐. 2008年汶川地震与龙门山断裂带的深浅部变形及启示. 科学通报, 2018, 63: 1917–1933]
- 16 Li L, Chen Q F, Niu F L, et al. Deep slip rates along the Longmen Shan fault zone estimated from repeating microearthquakes. *J Geophys Res*, 2011, 116: B09310
- 17 Scholz C, Molnar P, Johnson T. Detailed studies of frictional sliding of granite and implications for the earthquake mechanism. *J Geophys Res*, 1972, 77: 6392–6406
- 18 Dieterich J H. Preseismic fault slip and earthquake prediction. *J Geophys Res*, 1978, 83: 3940–3948
- 19 Ohnaka M, Kuwahara Y. Characteristic features of local breakdown near a crack-tip in the transition zone from nucleation to unstable rupture during stick-slip shear failure. *Tectonophysics*, 1990, 175: 197–220
- 20 Ellsworth W L, Beroza G C. Seismic evidence for an earthquake nucleation phase. *Science*, 1995, 268: 851–855
- 21 Latour S, Schubnel A, Nielsen S, et al. Characterization of nucleation during laboratory earthquakes. *Geophys Res Lett*, 2013, 40: 5064–5069
- 22 Zhuo Y Q, Guo Y S, Ji Y T, et al. Slip synergism of planar strike-slip fault during meta-instable state: Experimental research based on digital image correlation analysis (in Chinese). *Sci China Earth Sci*, 2013, 56: 1881–1887 [卓燕群, 郭彦双, 汲云涛, 等. 平直走滑断层亚失稳状态的位移协同化特征——基于数字图像相关方法的实验研究. 中国科学: 地球科学, 2013, 56: 1881–1887]
- 23 Acosta M, Passelègue F X, Schubnel A, et al. Can precursory moment release scale with earthquake magnitude? A view from the laboratory. *Geophys Res Lett*, 2019, 46: 12927–12937
- 24 Dresen G, Kwiatak G, Goebel T, et al. Seismic and aseismic preparatory processes before large stick-slip failure. *Pure Appl Geophys*, 2020, 177: 5741–5760
- 25 Goebel T H W, Schorlemmer D, Becker T W, et al. Acoustic emissions document stress changes over many seismic cycles in stick-slip experiments. *Geophys Res Lett*, 2013, 40: 2049–2054
- 26 Scholz C H. On the stress dependence of the earthquake b value. *Geophys Res Lett*, 2015, 42: 1399–1402
- 27 Lei X. How do asperities fracture? An experimental study of unbroken asperities. *Earth Planet Sci Lett*, 2003, 213: 347–359
- 28 McLaskey G C, Kilgore B D. Foreshocks during the nucleation of stick-slip instability. *J Geophys Res Solid Earth*, 2013, 118: 2982–2997
- 29 McLaskey G C. Earthquake initiation from laboratory observations and implications for foreshocks. *J Geophys Res Solid Earth*, 2019, 124: 12882–12904
- 30 McLaskey G C, Lockner D A. Preslip and cascade processes initiating laboratory stick slip. *J Geophys Res Solid Earth*, 2014, 119: 6323–6336
- 31 Nur A. Dilatancy, pore fluids, and premonitory variations of t_s/t_p travel times. *Bull Seismol Soc Am*, 1972, 62: 1217–1222
- 32 McGarr A. Earthquake prediction: Absence of a precursive change in seismic velocities before a tremor of magnitude $3\frac{3}{4}$. *Science*, 1974, 185: 1047–1049
- 33 Kaproth B M, Marone C. Slow earthquakes, preseismic velocity changes, and the origin of slow frictional stick-slip. *Science*, 2013, 341: 1229–1232
- 34 Shreedharan S, Bolton D C, Rivière J, et al. Preseismic fault creep and elastic wave amplitude precursors scale with lab earthquake magnitude for the continuum of tectonic failure modes. *Geophys Res Lett*, 2020, 47: e2020GL086986
- 35 Shreedharan S, Bolton D C, Rivière J, et al. Competition between preslip and deviatoric stress modulates precursors for laboratory earthquakes. *Earth Planet Sci Lett*, 2021, 553: 116623
- 36 Nagata K, Kilgore B, Beeler N, et al. High-frequency imaging of elastic contrast and contact area with implications for naturally observed changes in fault properties. *J Geophys Res Solid Earth*, 2014, 119: 5855–5875
- 37 Hedayat A, Haeri H, Hinton J, et al. Geophysical signatures of shear-induced damage and frictional processes on rock joints. *J Geophys Res Solid Earth*, 2018, 123: 1143–1160
- 38 Mori J, Kanamori H. Initial rupture of earthquakes in the 1995 Ridgecrest, California Sequence. *Geophys Res Lett*, 1996, 23: 2437–2440
- 39 Ide S. Frequent observations of identical onsets of large and small earthquakes. *Nature*, 2019, 573: 112–116
- 40 Olson E L, Allen R M. The deterministic nature of earthquake rupture. *Nature*, 2005, 438: 212–215
- 41 Gombert J. Unsettled earthquake nucleation. *Nat Geosci*, 2018, 11: 463–464
- 42 Bouchon M, Karabulut H, Aktar M, et al. Extended nucleation of the 1999 M_w 7.6 Izmit earthquake. *Science*, 2011, 331: 877–880
- 43 Ellsworth W L, Bulut F. Nucleation of the 1999 Izmit earthquake by a triggered cascade of foreshocks. *Nat Geosci*, 2018, 11: 531–535

- 44 Yamashita F, Fukuyama E, Xu S, et al. Two end-member earthquake preparations illuminated by foreshock activity on a meter-scale laboratory fault. *Nat Commun*, 2021, 12: 4302
- 45 Yao D D, Huang Y H, Peng Z G, et al. Detailed investigation of the foreshock sequence of the 2010 M_w 7.2 El Mayor-Cucapah earthquake. *J Geophys Res Solid Earth*, 2019, 124: e2019JB019076
- 46 Gulia L, Wiemer S. Real-time discrimination of earthquake foreshocks and aftershocks. *Nature*, 2019, 574: 193–199
- 47 Marzocchi W, Spassiani I, Stallone A, et al. How to be fooled searching for significant variations of the b -value. *Geophys J Int*, 2020, 220: 1845–1856
- 48 Kanamori H, Brodsky E E. The physics of earthquakes. *Rep Prog Phys*, 2004, 67: 1429–1496
- 49 Xia K, Rosakis A J, Kanamori H. Laboratory earthquakes: The sub-Rayleigh-to-supershear rupture transition. *Science*, 2004, 303: 1859–1861
- 50 Andrews D J. Rupture velocity of plane strain shear cracks. *J Geophys Res*, 1976, 81: 5679–5687
- 51 Xia K, Rosakis A J, Kanamori H, et al. Laboratory earthquakes along inhomogeneous faults: Directionality and supershear. *Science*, 2005, 308: 681–684
- 52 Ben-David O, Cohen G, Fineberg J. The dynamics of the onset of frictional slip. *Science*, 2010, 330: 211–214
- 53 Passelègue F X, Schubnel A, Nielsen S, et al. From sub-Rayleigh to supershear ruptures during stick-slip experiments on crustal rocks. *Science*, 2013, 340: 1208–1211
- 54 Chouinet A, Vallée M, Causse M, et al. Global catalog of earthquake rupture velocities shows anticorrelation between stress drop and rupture velocity. *Tectonophysics*, 2018, 733: 148–158
- 55 Heaton T H. Evidence for and implications of self-healing pulses of slip in earthquake rupture. *Phys Earth Planet Inter*, 1990, 64: 1–20
- 56 Beeler N M, Tullis T E. Self healing slip pulses in dynamic rupture models due to velocity-dependent strength. *Bull Seismol Soc Am*, 1996, 86: 1130–1148
- 57 Day S M. Three-dimensional simulation of spontaneous rupture: The effect of nonuniform prestress. *Bull Seismol Soc Am*, 1982, 72: 1881–1902
- 58 Huang Y, Ampuero J P. Pulse-like ruptures induced by low-velocity fault zones. *J Geophys Res*, 2011, 116: B12307
- 59 Lu X, Lapusta N, Rosakis A J. Pulse-like and crack-like ruptures in experiments mimicking crustal earthquakes. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2007, 104: 18931–18936
- 60 Shlomaï H, Fineberg J. The structure of slip-pulses and supershear ruptures driving slip in bimaterial friction. *Nat Commun*, 2016, 7: 11787
- 61 Xia K, Rosakis A J. Laboratory earthquakes along faults with a low velocity zone: Directionality and pulse-like ruptures. *Extreme Mech Lett*, 2021, 46: 101321
- 62 Ohnaka M, Shen L F. Scaling of the shear rupture process from nucleation to dynamic propagation: Implications of geometric irregularity of the rupturing surfaces. *J Geophys Res*, 1999, 104: 817–844
- 63 Guérin-Marthe S, Nielsen S, Bird R, et al. Earthquake nucleation size: Evidence of loading rate dependence in laboratory faults. *J Geophys Res Solid Earth*, 2019, 124: 689–708
- 64 McLaskey G C, Yamashita F. Slow and fast ruptures on a laboratory fault controlled by loading characteristics. *J Geophys Res Solid Earth*, 2017, 122: 3719–3738
- 65 Shi Y L, Sun Y Q, Luo G, et al. Roadmap for earthquake numerical forecasting in China—Reflection on the tenth anniversary of Wenchuan earthquake (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 1865–1881 [石耀霖, 孙云强, 罗纲, 等. 关于我国地震数值预报路线图的设计——汶川地震十周年反思. 科学通报, 2018, 63: 1865–1881]

Summary for “实验室研究揭示地震震源过程”

Laboratory investigations probing earthquake source process

Peng Dong¹ & Kaiwen Xia^{1,2*}

¹ State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

² Department of Civil and Mineral Engineering, University of Toronto, Toronto, Ontario M5S 1A4, Canada

* Corresponding author, E-mail: kaiwen.xia@utoronto.ca, kaiwen@tju.edu.cn

Earthquakes are one of the most devastating natural hazards, causing serious disasters worldwide. The threat and loss caused by earthquakes has become more severe with continued urbanization and economic growth. China has many continental earthquakes, and the associated seismic hazards are a major national problem. Thus, the investigation of the earthquake source process and earthquake prediction is important and urgent.

Based on field observations, seismologists have revealed that earthquakes are essentially ruptures developing on faults, including initiation, propagation, and termination phases. However, due to the infrequency of large earthquakes, the impenetrability of the Earth, and the complexity of the source process, the earthquake governing mechanism has still not been completely resolved. This has significantly hampered earthquake prediction, the most important practical application of earthquake studies.

Since the famous stick-slip experiment, laboratory investigations of earthquakes have become a popular method to uncover the mysteries of earthquakes. In the laboratory, researchers can perform highly instrumented and controlled laboratory experiments to circumvent the challenges faced in field studies. Researchers can nucleate as many controlled laboratory earthquakes as they want, facilitating the isolation and evaluation of all possible controlling factors. In addition, advanced diagnostic methods can be applied to laboratory experiments, favoring the refined observation and statistical analysis of experimental results.

Based on the results of laboratory earthquakes, significant progress has been made in understanding the earthquake initiation process and precursory phenomena. It has been reported that there is a slow and smoothly accelerating earthquake nucleation process before the dynamic rupture. During this process, several abnormalities are observed and identified as indicators of laboratory earthquakes, including precursory slip, a sequence of foreshocks and a decrease in seismic velocities. Moreover, the relationships between the precursory phenomena and final events have been established preliminarily. These results are, in general, consistent with observations from natural earthquakes. Despite this progress in experimental studies, there are still several unresolved problems that inhibit the prediction of earthquakes using existing theories. Firstly, it is not clear whether the magnitude of final events is correlated to the nucleation phase. Several studies have shown that large and small earthquakes have identical onsets, suggesting that it is not possible to infer the final size of earthquakes from the nucleation phase. Secondly, how earthquakes nucleate is still under debate: The nucleation process of earthquakes may follow either preslip model or cascade model. These uncertainties in the nucleation model complicate the monitoring of earthquake precursors. Finally, it is difficult for seismologists to distinguish the precursors of earthquakes from unrelated phenomena. For example, some slow slips are reported to precede megathrust earthquakes, but many slow slips are not followed by earthquakes. It is also difficult to tell whether the largest earthquake in an ongoing sequence has already occurred or is yet to come.

Apart from the earthquake initiation process, seismologists are also concerned with the dynamics of the rupture process because it is directly related to earthquake hazards. Studies of laboratory earthquakes have improved our understanding of the dynamics of earthquakes. For example, the supershear ruptures have been conclusively demonstrated experimentally and the Burridge-Andrews mechanism has been proved as the underlying mechanism for nucleation of supershear ruptures. In addition, laboratory studies have shown that the stress state and stress drop control the earthquake rupture speeds, which is consistent with the results of numerical simulations.

To improve our knowledge of the earthquake source process and thus help predict earthquakes, there is an urgent need to conduct more systematic laboratory investigations of earthquakes. Combining field observations, numerical simulations, theoretical analyses, and laboratory investigations, promises to achieve major breakthroughs in understanding of earthquake source mechanisms and to further improve earthquake prediction and seismic hazard mitigation.

laboratory earthquakes, source process, earthquake precursor, rupture dynamics

doi: [10.1360/TB-2021-1061](https://doi.org/10.1360/TB-2021-1061)