



综述

岩石高速摩擦实验与地震物理过程

缪阿丽, 马胜利

(中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室, 北京 100029)

摘要:简述了最近20年来国内外岩石高速摩擦实验研究领域的进展和动态:岩石高速摩擦实验技术的发展实现了对高滑动速率、大位移的地震过程的实验模拟;其结果揭示了岩石和断层泥在地震滑动速率下的力学性状,深化了对断层滑动弱化机制、临界滑动距离、以及地震发生过程的认识和理解;实验在假玄武玻璃成因方面取得了重要进展,并提出了断层发生地震滑动可能留下的其它地质证据,可望为研究断层滑动性状与地震物理过程提供新的思路和信息。岩石高速摩擦实验今后的发展方向主要包括:发展具有加温系统和孔隙压系统的岩石高速摩擦实验装置,研究水热作用下岩石和断层泥的高速摩擦性状;室内实验和地震资料分析相结合研究断层滑动和地震机制;室内实验和野外地质调查相结合探索断层发生地震错动的地质证据等等。

关键词:高速摩擦实验;滑动弱化;临界滑动距离;地震破裂过程;断层物质

中图分类号: P584 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2009)04-0385-08

High-velocity Rock Frictional Experiment and Physical Process of Earthquake

MIAO A-li, MA Sheng-li

(State key laboratory of Earthquake Dynamic, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing, 100029, China)

Abstract: The progress of research on high-velocity rock frictional experiments in China and abroad in last 20 years is reviewed briefly. The progress in this field is mainly presented at following aspects. (a) The development of experimental technique in high-velocity rock friction has realized the simulation on earthquake process with high slip rate and large displacement become realistic. (b) The results reveal the mechanical properties of rocks and fault gouges under seismic slip velocity, which promotes our understanding on the weakening mechanism of fault slip, the critical slip distance and the earthquake process. (c) The experiments have made important progress in the cause of pseudotachylite and suggested other possible geological evidences left by seismic fault slip, which may offer new ideas and information for studying fault frictional properties and physical process of earthquake. It is prospected that the further study in high-velocity rock frictional experiment will focus on following aspects: developing high-velocity rock friction apparatus with temperature and pore pressure systems and investigating the high-velocity frictional properties of rocks and fault gouges under hydrothermal condition, studying mechanism of fault slip and earthquake by combining laboratory experiment and seismic data analysis, and seeking after geological records of seismic slip by combining laboratory experiment and field geological investigation.

收稿日期:2009-06-05

基金项目:“十一五”国家科技专项:汶川地震断裂带科学钻探(WFSD)

作者简介:缪阿丽(1984—),女(汉族),浙江台州人,博士研究生,主要从事构造物理实验研究。

Key words: High-velocity frictional experiment; Slip weakening; Critical slip distance; Earthquake rupture process; Fault zone material

0 引言

岩石摩擦实验研究在地震研究中具有重要作用。基于岩石摩擦实验结果提出的地震断层粘滑说^[1]在地震机制中具有开拓意义,并推动了相关实验和理论研究的深入开展。在随后的研究中取得了一系列重要的成果,如根据实验结果总结出 Byerlee 摩擦定律^[2],提出了依赖于速率和状态的摩擦本构关系^[3-5],开展了地震滑动成核的研究^[6-7]等等,深化了对地震失稳机制和地震物理过程的理解。在这些研究中,大多数摩擦实验依托于双轴和三轴摩擦实验,滑动速率一般小于 $10\ \mu\text{m/s}$,滑动位移大多不超过 $10\ \text{mm}$ ^[8],因此可称为小位移低速摩擦实验。这样的实验结果及其相关理论虽然在模拟和理解断层活动与地震失稳方面发挥了重要作用,但也遇到了一些困难,特别是在理解地震发生过程中的一些现象时尤为明显。其中尤为重要,地震发生时断层表现为高速、大位移滑动。因此对地震过程的深入理解促使人们开始关注大位移高速摩擦实验。最近 20 年来,日、美、意等国的一些研究团队致力于高速岩石摩擦实验,取得了大量的研究成果,解释了一些低速摩擦实验无法解释的现象,为更好地理解模拟地震物理过程提供了基础。本文对此研究领域的进展和动态进行综述,其中简要介绍目前用于岩石高速摩擦的主要实验设备,概述岩石高速摩擦实验研究的主要进展,包括断层滑动弱化机制、临界滑动距离、地震破裂过程、高速摩擦的产物等。还对存在的主要问题及下一步的研究方向进行讨论。

1 岩石高速摩擦实验设备

岩石高速摩擦实验的基本要求是滑动速度高、滑动距离大。为了满足这两个条件一般采用旋转式摩擦装置。最早用于岩石高速摩擦实验的设备是由摩擦焊接公司制作的摩擦焊接机,其最大转速可达 $3000\ \text{r.p.m.}$,加拿大纽宾士域大学的 Spray 最先用这种设备在实验室模拟了假玄武玻璃的形成^[9]。上世纪 90 年代初 Shimamoto 在日本东京大学研制了一台旋转剪切高速摩擦机,这是第一台真正意义上的岩石高速摩擦实验设备^[10]。其基本原理是将两个配套的岩石样品固定在样品箱里,其中一个品施加剪切力。摩擦滑动的距离理论上不受限制,而滑动速度范围为 $0.1\sim 2.5\ \text{m/s}$ 。通过改变样品结构

该设备也可用于研究断层泥的高速摩擦性质。鉴于这台高速摩擦实验机不能控制孔隙水压,且速率范围有限,Shimamoto 在日本京都大学研制了第二套高速摩擦设备—宽滑动速率热液摩擦机(wide slip-rate hydrothermal friction apparatus),其滑动速率范围为 $3\ \text{mm/yr}\sim 10\ \text{m/s}$,并可以在超临界孔隙流体压力下进行高速摩擦实验,其中最大孔隙压达 $50\ \text{MPa}$ ^[11]。两台设备共同的缺点是所能施加的正应力都不大($<20\ \text{MPa}$)。2007 年 Shimamoto 将其第一台和第二台高速摩擦机的设计合二为一,为日本静冈大学研制了一台高速摩擦机;Hirose 以 Shimamoto 第二台高速摩擦机为基础,在日本海洋研究开发机构高知岩芯研究所研制了一台正应力更高、速度更快的岩石高速摩擦实验机,目前正在运行调试之中,本世纪初,美国布朗大学 Tullis 研究组对其原有的旋转剪切岩石变形仪^[12]进行了改进,使其能够开展岩石高速摩擦实验,滑动速率可达 $1\ \text{m/s}$,正应力可达 $100\ \text{MPa}$ ^[13];意大利国家地球物理与火山研究所正在研制岩石高速摩擦实验机,其技术指标为滑动速率 $1\ \mu\text{m/s}\sim 9\ \text{m/s}$,正应力 $<50\ \text{MPa}$ 。

总之,最近 20 年来,岩石高速摩擦实验技术得到了长足的发展,实现了对高滑动速率、大位移的地震过程的实验模拟,为地震机制和地震物理过程研究提供了全新的实验手段。

2 岩石高速摩擦实验的主要结果

随着实验技术的发展,岩石高速摩擦实验研究不断深入,发表了大量实验结果以及相关的理论和模拟成果,其内容涉及面也很广。本文仅以滑动弱化机制、临界滑动距离、地震破裂过程、高速摩擦的产物等为主题,概述岩石高速摩擦实验研究取得的主要进展。

2.1 断层滑动弱化机制

地震发生的力学本质是断层由于滑动而弱化,因而无法承受作用其上的应力。因此研究断层滑动的弱化机制对于地震研究极为重要。基于低速摩擦实验结果的 Byerlee 定律认为,岩石的摩擦系数与岩石和矿物类型无关,除了一些层状硅酸盐矿物外,绝大部分岩石和矿物的摩擦系数在较低和较高正应力下分别为 0.85 和 0.6 ^[2]。但岩石高速摩擦实验结果表明,在一定条件下岩石的摩擦系数会变得更

低,即断层会出现滑动弱化现象。

Goldsby 和 Tullis^[13]、Di Toro 等^[14]发现,当滑动速率达到 100 mm/s 时,石英岩的摩擦系数就变得很低(~ 0.2),他们认为这是由于在断层面上细颗粒石英与水作用产生了一薄层硅质凝胶体,从而导致了剧烈的弱化;关于水与硅酸盐颗粒之间的相互作用,Fuji 等^[15]、Jones 等^[16]的研究表明当湿度从 80% 降到 0% 时,两个硅酸颗粒间的支持力将减少 50%;Fayed^[17]的研究表明,颗粒间的支持力还与颗粒大小有关,颗粒越小,支持力越大。显然这些结果可以为上述实验结果提供理论支持。Mizoguchi 等^[18]在对辉长岩进行的高速摩擦实验中发现,在正常室内湿度条件下,断层在滑动结束后几分钟内能够完全恢复其强度;但在干燥空气条件下强度并没有得到恢复。他们认为前者是由冷却作用导致的,是由于水与断层泥颗粒之间发生了相互作用所引起的;而后的弱化是由于摩擦生热使碎屑颗粒中的水分蒸发而变得干燥,从而导致了摩擦强度的大幅度降低。

Han 等^[19]对 Carrara 大理岩进行的高速摩擦实验结果表明,方解石的热分解作用能够引起断层弱化。其原因认为是由于纳米级超细颗粒的生成。其他关于热分解作用的高速摩擦实验研究也得到了相同的结果^[20-21]。Mizoguchi 等^[22]发现 Carrara 大理岩的摩擦系数比野岛断层泥摩擦系数要小,尽管它们的摩擦行为很相似,一个可能的解释是 Carrara 大理岩纳米级的超细颗粒的产生。Green 和 Marone^[23]认为超细粒产物的形成可能对中深源地震的产生起到决定性的作用。这些实验结果说明超细颗粒的产生能够导致断层弱化。

Hirose 和 Shimamoto^[24]用辉长岩进行了一系

列高速摩擦实验,分析了摩擦熔融作用对断层摩擦的影响。实验过程出现了两个滑动弱化阶段,分别对应图 1 中的 a~b 阶段和 d~e 阶段。他们认为第一个弱化与快速加热有关,是由在微米尺度的凹凸体接触面上的快速加热导致热弱化而引起有效强度的降低^[25];第二个弱化则是断层面上熔融体的产生和生长导致了其剪切应变率的降低。在两个弱化阶段之间出现一个摩擦强化的过程,这是由于熔融逐渐形成一层薄的连续的熔体层,导致接触面积增大而使摩擦系数增大^[26-28]。摩擦熔融对断层弱化作用的影响比目前知道的其他任何因素的影响都要大^[24]。此外,摩擦产生的熔体对处于中地壳深度的断层滑动也能起到润滑剂的作用^[29],即熔化润滑作用^[30]。

热压作用是由孔隙压力和由于摩擦生热导致的有效正应力减小共同作用所引起的,它是另一种可能的断层弱化机制^[31-34]。热压作用连同孔隙坍塌以及断裂带封闭,是维持高流体压力的有效机制。在断裂带足够薄^[35]以及水压扩散率足够低^[34,36]的情况下,热压作用非常重要。Andrews^[37]用此机制解释了 1999 年台湾集集地震中出现的在断层南部显示了高频率能量释放的地震运动、而在北部却并没有这种记录的现象。

除上述机制之外,还有其他一些弱化机制。例如摩擦生热导致的热破裂能使岩石的单轴强度降低两个数量级^[38],特别是对含有会经历相变的石英的岩石。在没有发生熔融作用的高速摩擦滑动过程中,这种热破裂作用是最有可能的滑动弱化机制,但是直到目前仍不能确定在深部是否存在如此巨大的热破裂效应,因为在一定压力下由热破裂产生的裂缝会发生愈合^[27]。

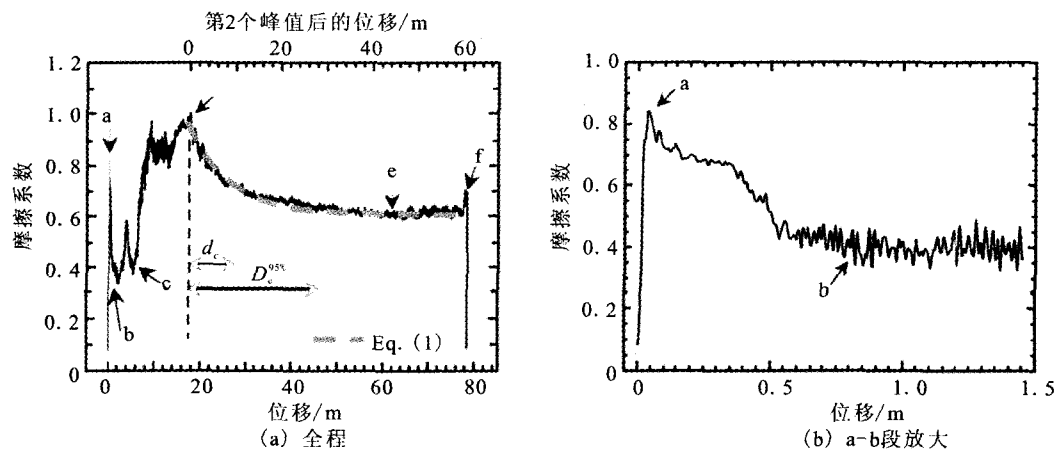


图1 摩擦系数随位移的变化(据文献[24])

Fig. 1 Change of friction coefficient with displacement (From reference[24]).

2.2 临界滑动距离

断层开始滑动后,如果断层弱化速率比促使它运动的构造应力释放率大时,断层就会失稳而引发地震^[3,39]。其中存在一个临界滑动距离 D_c (图2)^[7,40],它是决定断层运动和地震过程的一个重要参数^[7,40-41],称作滑动弱化距离。 D_c 值越小,断层运动越不稳定^[42]。然而实验室获得的 D_c 值与地震资料得到的 D_c 值存在很大的差异:实验室低速摩擦实验得到的 D_c 值在 $10\ \mu\text{m}\sim 1\ \text{mm}$ 之间^[7],而从地震资料得到的 D_c 值在 $10\ \text{cm}\sim 1\ \text{m}$ 之间^[43-46]。尽管有一些研究工作试图用断层尺度上的差异去解释这种巨大的差别^[47-49],但似乎不能使人完全信服。而高速摩擦实验及其相关的研究给出了一些新的结果和解释。

Hirose and Shimamoto^[50] 根据分形维数与断层带力学性质存在的系统相关性,提出了一种利用在不同位移下滑动面上的假玄武玻璃的分形维数估计 D_c 的方法,打破了因尺度差异实验室得到的 D_c 值不可能与地震资料得到的 D_c 值一致的传统认识。Hirose 等^[51] 还根据断层面上的假玄武玻璃的厚度和断层位移之间的关系估计出了 D_c 的量级。但这两个方法的前提是断层发生熔融作用,这存在一定的局限性,因为在自然界的大型断层带上摩擦熔融作用并不普遍存在^[51]。Wibberley and Shimamoto^[42] 通过研究日本中央构造带断层带中心的滑动

区岩石的流体运移性质,认为如果把热压作用作为滑动弱化机制就能解释实验室和地震资料得到的结果不一致的矛盾。

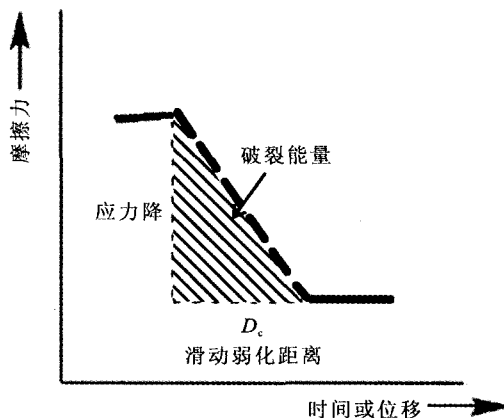


图2 临界滑动弱化距离 D_c 示意图

Fig. 2 Diagram of the critical slip weakening distance.

Noda 等^[52] 通过高速摩擦实验及相关的数值模拟得出了 D_c 值与流体运移性质、变形带宽度以及滑动速率的关系。图3显示的是深度范围为 $1\sim 5\ \text{km}$ 、变形带宽度为 $5\sim 50\ \text{mm}$ 、滑动速率为 $0.01\sim 1\ \text{m/s}$ 时热压作用的强弱程度。结果显示在深度为数公里、变形带宽度小于 $10\ \text{mm}$ 、滑动速率大于 $0.3\ \text{m/s}$ 时, Hanaore 断层的滑动弱化距离 D_c 在几十厘米到 $1\ \text{m}$ 之间,与地震资料获得的 D_c 相当,而在其他情况下 D_c 值都为几米。

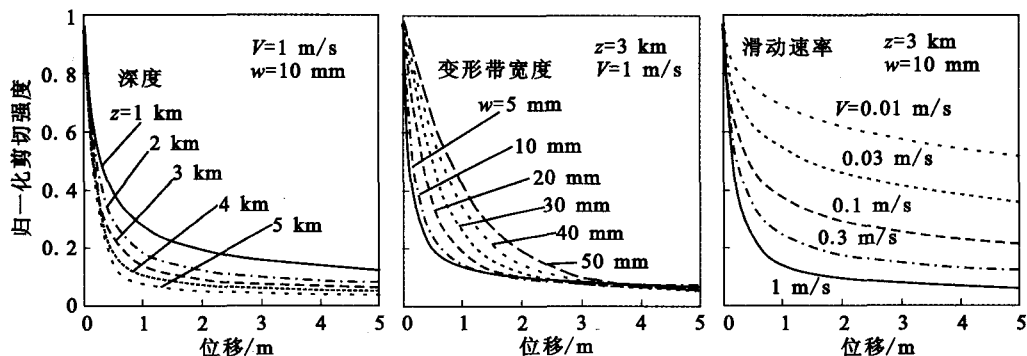


图3 由热压作用导致的滑动弱化曲线图(归一化的剪切强度—断层位移)(据文献[52])

Fig. 3 Slip-weakening curves due to thermal pressurization as expressed by normalized shear strength versus fault displacement. (From reference[52]).

研究发现, D_c 值还受其它很多因素的影响: Mizoguchi 等^[22] 的高速摩擦实验结果显示当正应力从 $0.5\ \text{MPa}$ 增大到 $1.85\ \text{MPa}$ 时, D_c 值也相应的从 $40\ \text{m}$ 降到 $5\ \text{m}$;任何能影响温度的因素都能影响 D_c 值^[28],增大变形区域比增大位移更能抑制温度的升高,变形区域越宽 D_c 值越大;没有碎屑物质的

断层其 D_c 比有碎屑物质的断层要大^[18]。

2.3 地震破裂过程

在实验地震学研究领域最关键但也是最困难的任务是如何在实验室里模拟地震过程。近年来,岩石高速摩擦实验取得的一些结果有助于理解地震的破裂过程。

O'Hara 等^[53]开展的含沥青的煤质断层泥的高速摩擦实验显示了几个与地震相关的现象,包括:摩擦生热导致挥发组分挥发、气体加压和滑动弱化。其中在实验的第二、第三阶段出现的气体挥发以及孔隙压力的增加都是热压作用导致的。而最重要的结果是在第三个阶段出现的剪切应力快速降低的同时孔隙坍塌,与地震破裂过程中出现的行为类似。

Mizoguchi 等^[22]利用采自 1995 年阪神地震发震断层—野岛断层的断层泥开展了高速摩擦实验获得了与实际地震资料相近的摩擦系数的衰减量、 D_c 值、以及地震破裂能等。

2.4 高速摩擦的产物

断层高速滑动形成的产物对研究发震断层的活动具有十分重要的意义。一种黑色隐晶质断层岩—假玄武玻璃已为人们所认识已经将近一个世纪了,常被作为地震断裂运动的证据^[30,54-55]。许多学者已对它的微观结构以及化学性质进行了细致的研究^[30,54,56-59],并在实验室里成功产生了假玄武玻璃^[9,55,60-61]。但对于假玄武玻璃究竟是碎裂作用的结果还是熔融作用的结果,曾有很大的争议^[30,62]。Spray^[63]率先开展了高速摩擦滑动实验,结果表明实验中先发生碎裂作用,之后发生了摩擦熔融作用,因此认为假玄武玻璃是碎裂作用和熔融作用共同作用的产物。Tsutsumi^[64]用二长闪长岩开展了高速摩擦实验,产生了具有与天然假玄武玻璃结构相同的玻璃质物质,通过统计其中碎屑的粒径分布,得到超细粒基底比例为 60~70%,这个比例与用 X-ray 散射分析得到的结果一致,也证明了假玄武玻璃是熔融作用和碎裂作用共同作用的产物。

断层的高速运动是否还会留下其它地质证据? Cowan^[65]认为只持续几秒钟的发震断层滑动不可能留下可识别的地质证据。但近年来岩石高速摩擦实验研究表明,断层在地震速率下滑动有可能留下很多可反映断层物质发生物理—化学过程的证据。高速摩擦实验研究表明,断层摩擦滑动后断层物质磁性增强。Fukuchi 等^[66]的实验生成了类似于假玄武玻璃的黑色粘性物体,具有很强的铁磁共振(FMR)信号。研究表明,这种信号的存在是由于断层泥中所含的 γ -FeOOH 发生热脱水而生成了 γ -Fe₂O₃ 的缘故,因此根据 FMR 信号可以来探测地震断层滑动过程中是否曾有过加热过程。尽管 γ -Fe₂O₃ 因其晶格缺陷通常不能被 XRD(X 射线散射)探测到,但是铁磁共振信号(FMR)能够被 ESR 探测到。Fukuchi^[67]用 ESR 对野岛断层上的假玄

武玻璃进行了测量,发现具有很强的 ESR 吸收性能,这是由于其中存在着能产生铁磁共振信号的矿物,特别是磁性氧化铁^[68-69]。Fukuchi 等^[66]也尝试用 FMR 信号来重建野岛断层在阪神地震中摩擦生热引起的温度变化。模拟结果表明,在阪神地震中野岛断层在 390 m 深度上摩擦生热引起的温度达到 390 °C。断层高速摩擦滑动只要存在短暂的生热过程,即使不足以达到矿物的熔点,都能增大断层带物质的磁化率^[70]。

Han 等^[19-20]在对碳酸岩断层泥进行的实验中发现,碳酸岩在进行高速摩擦时会发生热分解作用,释放 CO₂ 而生成氧化物,如方解石热分解生成 CaO,菱铁矿热分解生成 Fe₃O₄ 等。Han 等^[71]的实验得出菱铁矿、白云岩和方解石这三种碳酸岩物质的分解温度分别为 580 °C、800 °C、和 900 °C,且认为菱铁矿分解形成的黑色磁性物质具有稳定的性质,可作为发震断层滑动的地质证据。他们用实验结果解释了 1999 年集集地震发震断层—车笼埔断层的性质,黑色断层泥磁性有所增强、缺失菱铁矿但存在方解石的原因并非蒸发作用而是断层滑动使断层带温度达到了菱铁矿的分解温度但又未能使方解石发生热分解。由此他们提出,碳酸岩的分解作用不仅能使断层在地震速率下发生弱化,还能指示地震过程中断层带的温度。

高速摩擦实验研究还表明,在岩石快速滑动发生摩擦熔融过程中岩石中所含的 Ar 同位素与周围环境中所含的 Ar 同位素形成新的平衡,而使熔融体中的 K-Ar 年龄被重新设定^[72]。此外,Buttard 等^[73]的高速摩擦实验表明,天然粘土断层泥中出现的球状团粒说明断层在高速滑动过程中孔隙水发生了相变,这也可作为断层的地震滑动提供证据。

3 需要深入研究的问题

随着研究工作的不断深入,也揭示了许多在岩石高速摩擦实验领域需要深入研究的问题,我们认为基于目前研究中存在的问题和地震机理研究的需求,今后一段时间岩石高速摩擦实验研究应重点包括以下几个方面:

(1) 在实验技术方面,现有岩石高速摩擦实验装置虽实现了对断层的地震滑动基本特征—高速度和大位移的模拟,但还需要研究诸如环境温度、流体等因素的影响。此外,摩擦滑动的速度依赖性摩擦滑动本构关系^[5]中极为重要的参数,而目前的实验装置尚不能有效地研究高速摩擦的速度依赖性。

因此发展具有加温和加孔隙压功能,具有较宽速度范围且能进行"速度台阶"实验的岩石高速摩擦实验装置应是今后的努力方向。

(2) 在实验研究方面,利用能够更好地模拟实际断层环境条件的实验技术,系统研究岩石和断层泥的高速摩擦性状仍将是岩石高速摩擦研究领域的主要任务。地下流体对变质作用和变形过程有很重要的影响^[74-75],而现有高速摩擦实验结果基本上都是在"干燥"条件下进行的。尽管如此,实验结果也已清楚地反映出"流体"的影响。因此需要系统开展流体作用下岩石和断层泥的高速摩擦实验,分析流体对断层高速滑动与地震过程的影响作用。另一项重要的内容是系统开展岩石高速摩擦的速度依赖性研究,发展和完善岩石摩擦的本构关系,为地震发生机制和成核过程研究提供基础。

(3) 室内实验和地震资料分析相结合,研究断层滑动和地震机制应是今后的发展趋势。其中主要包括以下两方面的内容:第一,高速摩擦实验在断层滑动弱化机制方面取得了显著的进展,但同时也揭示了弱化机制的复杂性。对于一条断层或一次地震而言,如果几种弱化机制共同存在,也有必要了解哪种机制占主导。这就需要结合具体断层或地震震例研究各种弱化机制的适用范围。第二,高速摩擦实验在利用断层物质研究一些地震的重要参数(如摩擦系数的变化量、 D_c 值、地震破裂能等)方面取得了与地震资料很接近的结果,从而为推测断层带上未来强震的相关参数提供了一种新思路。因此,在利用更多的实例进行检验、确证的基础上,对活动断裂带的断层物质开展高速摩擦实验,"预测"未来强震的重要参数,是一项具有理论和实际意义的工作。

(4) 室内实验与野外地质研究相结合,寻找和研究断层地震滑动的地质证据是一个有意义的研究方向。岩石高速摩擦实验表明,断层的地震滑动除可能产生假玄武玻璃外,还可能留下其他一些可反映断层物质发生物理-化学变化的证据,如具有铁磁共振信号(FMR)的物质、磁化率变化、碳酸岩分解作用的产物、球状团粒结构的形成等,这些证据可供研究发震断层的应力状态与变形行为,对地震物理过程研究极为重要。此项工作的开展需要结合地震断层带、特别是近期发生过强震的断层带物质的地质研究来开展。

(5) 近期发生过强震的断层带特别适合于开展高速摩擦实验研究。对阪神地震断层带(野岛断层)、集集地震断层带(车笼埔断层)的研究,特别是

对两个地震断层带钻探工程获得的断层带物质的研究所获得的丰硕成果充分说明了这一点。2008年5月12日汶川8级地震地表破裂带上有多个基岩露头,而且目前正在地震断层带实施科学钻探,这为开展岩石高速摩擦实验提供了有利的条件。我们应以此为起点,开展岩石高速摩擦实验研究,深化对断层运动和地震物理过程的认识。

[参考文献]

- [1] Brace W F, Byerlee J D. Stick-Slip as a Mechanism for Earthquakes[J]. *Science*, 1966, 153: 990-992.
- [2] Byerlee J D. Friction of rocks[J]. *Pure Appl. Geophys.*, 1978, 116: 615-626.
- [3] Dieterich J H. Time-dependent friction and the mechanics of stick slip[J]. *Pure Appl. Geophys.*, 1978, 116: 790-806.
- [4] Dieterich J H. Modeling of rock friction: 1. Experimental results and constitutive equations[J]. *J. Geophys. Res.*, 1979, 84: 2161-2168.
- [5] Runa A L. Slip instability and state-variable friction laws[J]. *J. Geophys. Res.*, 1983, 88: 10359-10370.
- [6] Dieterich J H. A model for the nucleation of earthquake slip[J]. *Geophys. Monogr.*, 1986, 6: 37-47.
- [7] Ohnaka M. Earthquake source nucleation: a physical model for short-term precursors[J]. *Tectonophysics*, 1992, 211: 149-178.
- [8] Paterson M S, Wong T F. *Experimental Rock Deformation: The Brittle Field (2nd Ed)*[M]. Heidelberg, Germany: Springer, 2005: 347.
- [9] Spray J G. Artificial generation of pseudotachylite using friction welding apparatus: Simulation of melting on a fault plane[J]. *J. Struct. Geol.*, 1987, 9: 49-60.
- [10] Shimamoto T, Tsutsumi A. A new rotary-shear high-speed frictional testing machine[J]. *Journal of the Tectonic Research Group of Japan*, 1994, 39: 65-78 (in Japanese with English abstract).
- [11] Shimamoto T, Tsutsumi A, et al. Friction, deformation and fluid-flow apparatuses at Kyoto University[EB/OL]. Kozo Chishisu, 2006, L4111A, issn: 1340-7570 49: 49-71 (Japanese).
- [12] Week J D, Tullis T E. Frictional sliding of dolomite: A variation in constitutive behavior[J]. *J. Geophys. Res.*, 1985, 90: 7821-7826.
- [13] Goldsby D L, Tullis T E. Low frictional strength of quartz rocks at subseismic slip rates[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, 29: 1844, doi:10.1029/2002GL015240.
- [14] Di Toro, Goldsby D L, Tullis T E. Friction falls towards zero in quartz rock as slip velocity approaches seismic rates[J]. *Nature*, 2004, 427: 436-439.
- [15] Fuji M, Machida K, Takei T, et al. Effect of wettability on adhesion force between silica particles evaluated by atomic

- force microscopy measurement as a function of relative humidity[J]. *Langmuir*, 1999, 15: 4584-4589.
- [16] Jones R, Pollock H M, Cleaver J A S, et al.. Adhesion force between glass and silicon surface in air studied by AFM: Effects of relative humidity, particle, size, roughness, and surface treatment[J]. *Langmuir*, 2002, 18: 8045-8055.
- [17] Fayed M E. Handbook of Powder. Science and Technology 2nd ed. [M]. Boca Raton: CRC Press, 1997:898.
- [18] Mizoguchi K, Hirose T, Shimamoto T, et al.. Moisture-related weakening and strengthening of a fault activated at seismic slip rates[J]. *Geophysical research letters*, 2006, 33: L16319, doi: 10.1029/2006GL026980.
- [19] Han R, Shimamoto T, Ando J, et al.. Seismic slip record in carbonate-bearing fault zones: An insight from high-velocity friction experiments on siderite gouge[J]. *Geology*, 2007, 35:1131-1134.
- [20] Han R, Shimamoto T, Hirose T, et al.. Ultra-low friction of carbonate faults caused by thermal decomposition[J]. *Science*, 2007, 316: 878-881, Doi:10.1126/science.1139763.
- [21] Brantut N, Schubnel A, Brunet F, et al.. High velocity frictional properties of pure kaolinite and natural kaolinite-bearing fault gouges[J]. *Geophysical Research Abstracts*, 2007, 9: 00927, SRef-ID:1607-7962/gra/EGU2007-A-00927.
- [22] Mizoguchi K, Hirose T, Shimamoto T, et al.. Reconstruction of seismic faulting by high-velocity friction experiments: An example of the 1995 Kobe earthquake[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L01308, doi: 10.1029/2006GL027931.
- [23] Green H W II, Marone C. Instability of Deformation[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2002, 51: 181-199, doi: 10.2138/gsrmg.51.1.181.
- [24] Hirose T, Shimamoto T. Growth of molten zone as a mechanism of slip weakening of simulated faults in gabbro during frictional melting [J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, 110: B05202, doi: 10.1029/2004JB003207.
- [25] Rice J R. Flash heating at asperity contacts and rate-depend friction[J]. *Eos. Trans. AGU*, 1999, 80(46): Fall Meet (Suppl.):681.
- [26] Tsutsumi A, Shimamoto T. Frictional properties of monzodiorite and gabbro during seismogenic fault motion[J]. *J. Geol. Soc.*, 1996, 102: 240-248.
- [27] Tsutsumi A, Shimamoto T. High-velocity frictional properties of gabbro[J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24: 699-702.
- [28] Tsutsumi A, Shimamoto T. Temperature Measurements along Simulated Faults during Seismic Fault Motion[J]. *Geol. Congr.*, 1997, 5: 223-232.
- [29] Di Toro, Hirose T, Nielsen S, et al.. Natural and Experimental Evidence of Melt Lubrication of Faults During Earthquakes[J]. *Science*, 2006, 311: 647-649.
- [30] Sibson R H. Generation of pseudotachylite by ancient seismic faulting[J]. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1975, 43: 775-794.
- [31] Sibson R H. Interactions between temperature and pore fluid pressure during an earthquake faulting and a mechanism for partial or total stress relief[J]. *Nature*, 1973, 243: 66-68.
- [32] Lachenbruch A H. Frictional heating, fluid pressure, and the resistance to fault motion[J]. *J. Geophys. Res.*, 1980, 85: 6097-6112.
- [33] Mase C W, Smith L. Effects of frictional heating on the thermal, hydrologic, and mechanical response of a fault[J]. *J. Geophys. Res.*, 1987, 92: 6249-6272.
- [34] Andrews D J. A fault constitutive relation accounting for thermal pressurization of pore fluid[J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, 107: 2363, doi:10.1029/2002JB001942.
- [35] Sibson R H. Thickness of the seismic slip zone[J]. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 2003, 93: 1169-1178.
- [36] Rice J R. Heating and weakening of faults during earthquake slip[J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, 111: B05311, doi: 10.1029/2005JB004006.
- [37] Andrews D J. Partition of energy in Earthquakes(abstract) [A]//Radiated Energy and the Physics of Faulting. Chapman Conference[C]. Portland, Maine: Am. Geophys. Union, 2005.
- [38] Ohtomo Y, Shimamoto T. Significance of thermal fracturing in the generation of fault gouge during rapid fault motion: an experimental verification. *Structural Geology*[J]. *Journal of Tectonic Research Group of Japan*, 1994, 39: 135-144. (in Japanese with English abstract).
- [39] Jaeger J C, Cook N G W. Fundamentals of Rock Mechanics. (Third Ed.) [M]. London: Chapman and Hall, 1979:593.
- [40] Scholz C H. The Mechanics of Earthquake Faulting[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1990.
- [41] Ida Y. Cohesive force across the tip of a longitudinal shear crack and Griffith's specific surface energy[J]. *J. Geophys. Res.*, 1972, 84:3796-3805.
- [42] Wibberley Christopher A J, Shimamoto T. Earthquake slip weakening and asperities explained by thermal pressurization [J]. *nature*, 2005, 436: 689-692. doi: 10.1038/nature03901.
- [43] Ide S, Takeo M. Determination of constitutive relations of fault slip based on seismic wave analysis[J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102: 27379-27391.
- [44] Fukuyama E, Mikumo T, Olsen B. Estimation of the critical slip-weakening distance: theoretical background. *Bull*[J]. *Seism. Soc. Am.*, 2003, 93: 1835-1840.
- [45] Mikumo T, Yagi Y. Slip-weakening distance in dynamic rupture of in-slab normal-faulting earthquakes[J]. *Geophys. J. Int.*, 2003, 155: 443-455.
- [46] Mikumo T, Olsen K B, Fukuyama E, et al.. Stress-breakdown time and slip-weakening distance inferred from slip-velocity functions on earthquake faults[J]. *Bull. Seism. Soc., Am.*, 2003, 93: 264-282.
- [47] Scholz C H. The critical slip distance for seismic faulting[J].

- Nature, 1988, 336: 761-763.
- [48] Marone C J, Kilgore B D. Scaling of the critical slip distance for seismic faulting with shear strain in fault zones[J]. Nature, 1993, 362: 618-621.
- [49] Ohnaka M, Shen L F. Scaling of the rupture process from nucleation to dynamic propagation: implications of geometric irregularity of the rupturing surfaces[J]. J. Geophys. Res., 1999, 104: 817-844.
- [50] Hirose T, Shimamoto T. Fractal dimension of molten surfaces as a possible parameter to infer the slip-weakening distance of faults from natural pseudotachylytes[J]. J. Struct. Geol., 2003, 25: 1569-1574.
- [51] Hirose T, Shimamoto T. Slip-Weakening Distance of Faults during Frictional Melting as Inferred from Experimental and Natural Pseudotachylytes[J]. Bulletin of the Seismological Society, 2005, 95: 1666-1673.
- [52] Noda H, Shimamoto T. Thermal Pressurization and Slip-Weakening Distance of a Fault: An Example of the Hanaore Fault, Southwest Japan[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2005, 95: 1224-1233, doi: 10.1785/0120040089.
- [53] O'Hara K, Mizoguchi K, Shimamoto T, et al.. Experimental frictional heating of coal gouge at seismic slip rates: Evidence for devolatilization and thermal pressurization of gouge fluids[J]. Tectonophysics, 2006, 424: 109-118.
- [54] Magloughlin J F, Spray J G. Frictional melting process and products in geological materials: introduction and discussion[J]. Tectonophysics, 1992, 204: 197-206.
- [55] Spray J G. Viscosity determinations of some frictionally generated silicate melts: implications for fault zone rheology at high strain rates[J]. J. Geophys. Res., 1993, 98: 8053-8068.
- [56] Allen. Mechanism of frictional fusion in fault zones[J]. J. Struct. Geol., 1979, 1: 231-243.
- [57] O'Hara K D. Major and trace element constraints on the petrogenesis of a fault-related pseudotachylyte, western Blue Ridge province, North Carolina[J]. Tectonophysics, 1992, 204: 279-288.
- [58] Lin A, Shimamoto T. Selective melting processes as inferred from experimentally generated pseudotachylytes[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 1998, 16: 533-545.
- [59] Obata M, Karato S. Ultramafic pseudotachylyte from the Balmuccia peridotite, Ivrea-Verbano zone, northern Italy[J]. Tectonophysics, 1995, 242: 313-328.
- [60] Spray J G. Generation and crystallization of an amphibolite shear melt: An investigation using radial friction welding apparatus[J]. Contrib. Mineral Petrol., 1988, 99: 464-475.
- [61] Killick A M. Pseudotachylyte generated as a result of a drilling "burn-in" [J]. Tectonophysics, 1990, 171: 221-227.
- [62] Wenk H R. Are pseudotachylytes products of fracture or fusion? [J]. Geology, 1978, 6: 507-511.
- [63] Spray J G.. Pseudotachylytes controversy: Fact of friction? [J]. Geology, 1995, 23: 1119-1122.
- [64] Tsutsumi A. Size distribution of clasts in experimentally produced pseudotachylytes[J]. J. Struct. Geol., 1999, 21: 305-312.
- [65] Cowan D S. Do faults preserve a record of seismic slip? A field geologist's opinion[J]. J. Struct. Geol., 1999, 21: 995-1001.
- [66] Fukuchi T, Mizoguchi K, Shimamoto T. Ferrimagnetic resonance signal produced by frictional heating: A new indicator of paleoseismicity [J]. J. Geophys. Res., 2005, 110: B12404, doi: 10.1029/2004JB003485.
- [67] Fukuchi T. Strong ferrimagnetic resonance signal and magnetic susceptibility of the Nojima pseudotachylyte in Japan and their implication for coseismic electromagnetic changes [J]. J. Geophys. Res., 2003, 108 (B6): 2312, doi: 10.1029/2002JB002007.
- [68] Ishida S, Fujimura Y, Fujiyoshi K, et al.. ESR studies of iron oxide in porcelain body[J]. Yogyo kyokaishi, 1983, 91: 37-42.
- [69] Ishida S, Fujimura Y, Fujiyoshi K, et al.. ESR studies of Fe ions in fired kaolinite and sericite[J]. J. Clay Sci. Jpn., 1983, 23: 7-17.
- [70] Tanikawa W, Mishima T, Hirono T, et al.. High magnetic susceptibility produced in high-velocity frictional tests on core samples from the Chelungpu fault in Taiwan[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34: L15304, doi: 10.1029/2007GL030783.
- [71] Han R, Shimamoto T, et al.. Friction-induced decomposition of siderite and dolomite and their weakening effect on simulated faults at seismic slip-rates[M]. Singapore: Asica Oceania Geosciences Society, 2006: 797-798.
- [72] Sato K, Hirose T, Kumagai H, et al.. A K-Ar age reset of frictionally melted gabbro and detect for degassed noble gas (abs.) [A] // Geochimica et Cosmochimica Acta. Special Supplement, Abstracts of the 17th Annual V. M. Goldschmidt Conference[C]. Cologne, Germany, 2007, 71: A878-A878.
- [73] Boutareaud S, Calugaru D, Han R, et al.. Clay-clast aggregates: A new textural evidence for seismic fault sliding? [J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35: L05302, doi: 10.1029/2007GL032554.
- [74] Etheridge M A, Wall U J, Vernon R H. The role of the fluid phase during regional metamorphism and deformation[J]. Journal of Metamorphic Geology, 1983, 205-226.
- [75] Hickman S, Sibson R, Bruhn R. Introduction to special section: Mechanical involvement of fluids in faulting[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100: 12831-12840.