

地震科技前沿快报

2020 年第 8 期 （月刊 总第 20 期）

中国地震局科学技术委员会
中国地震局地震预测研究所

中国科学院兰州文献情报中心
中国科学技术信息研究所

本期概要

- 1、在地震滑移过程中弱相的形成和热的产生控制着断层摩擦
- 2、美科学家将开发新的综合地球动力学模型框架
- 3、加科学家首次证明慢地震与板块边界的动态流体过程有关

在地震滑移过程中弱相的形成和热的产生控制着断层摩擦

地震的触发机制和震级是由断层的摩擦性质决定的。实验研究表明，无论什么物质，当滑移速率接近地震滑移速率时，摩擦系数都会发生骤降。由于地震滑移过程中极端的加载环境，发生了很多由热引起的、相互竞争的物理过程（如矿物分解、纳米颗粒润滑、熔融等），并且它们通常会改变物质的性质。本研究表明，大量不同岩石类型的实验数据可以通过热启动的机制结合弱矿物相的产生来解释。考虑到断层运动过程中所有过程的能量平衡，研究人员提出了一个与实验数据相符合，并且可以解释在所有滑移速率下的断层摩擦滑移行为的框架。相关研究成果于 2020 年 1 月发表在 Nature Communications。

摩擦力沿先存断层演变的知识非常重要，因为由此可获取地震滑移的许多特征。尤其是随着滑移速率和距离的增加摩擦力发生下降，而这决定了可能的地震成核。如果弱化速率大于由围岩中弹性应变能释放所决定的一个关键值，将会导致诱发地震的动态滑移发生。除了地震成核，摩擦系数的演化也决定了断层滑移的扩展和停止，并且也控制着断层滑移过程中能量耗散的形式和比例。后者至关重要，因为它决定了有多少能量会通过断层释放到地表。

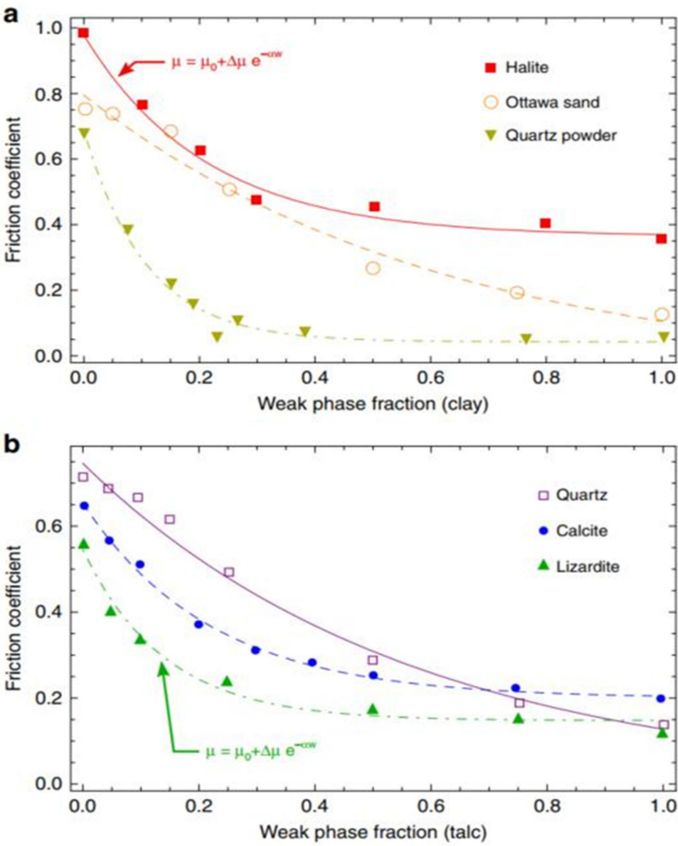


图 1 弱相比对对稳态摩擦系数的影响

在过去的 20 年，已经进行了大量再现地震滑移这种极端环境的实验研究。高速摩擦滑移实验仪器的出现使人们能够进行达到地震滑移速率的实验，进而表征不同滑移速率条件下的断层滑移行为。在大多数情况下，

无论什么物质，当滑移速率接近地震滑移速率时，摩擦力都会骤降，然而对于不同的岩性，引起这种快速弱化的机制却是不同的。所有这些弱化机制的一个共同特征是相转变，例如矿物的分解、纳米颗粒的润滑、熔融等。在本研究中，研究人员提出了一种热-化学-力学模型来描述高速摩擦实验过程中物质的热敏性以及弱相的产生。

力学本构方程：为了描述弱相对强弱相混合物摩擦行为的影响以及相改变对力学行为的影响，研究人员考虑了在低速($<10^{-5}\text{m/s}$) 条件下的实验，发现摩擦系数 μ 随着弱相比比例的增加而减小，并符合 $\mu = \mu_0 + \Delta\mu e^{-\alpha w}$ 。

热-化学-力学模型：力学本构方程也被包含在这一模型中。这种统一的方法旨在协调各种材料在不同速度下的观测结果。力学本构方程被应用到断层泥物质，在这里，弱相的产生被建模为一个吸热的一阶化学转化，影响能量平衡方程并遵循质量平衡。所选模型的几何形状比断层泥大一到两个数量级，以便为温度和相变的扩展施加远场边界条件。研究者使用连续算法确定模型的稳态，以测试以下假设：热启动的弱化和弱相形成的组合可能解释在多个数量级的剪切速度上观察到的稳态摩擦响应。

模型稳态：可以确定系统对加载速度五个不同的响应阶段。阶段 I：材料强度由准静态摩擦力控制。观察到微不足道的温度升高或弱相产生。阶段 II：在没有任何弱相产生的情况下，温度升高导致摩擦系数下降。阶段 III：随着速度和温度的升高，会生成小部分的弱相，吸收了多余的温度并降低了对摩擦系数的热弱化作用。这取决于弱化系数的值，摩擦系数可经历中等程度的增加。阶段 IV：最终，产生弱相，并达到临界值为止，该临界值将主导摩擦系数并导致材料不受约束地弱化。阶段 V：反应物耗尽后，温度将不受控制地升高，摩擦系数将降至零。

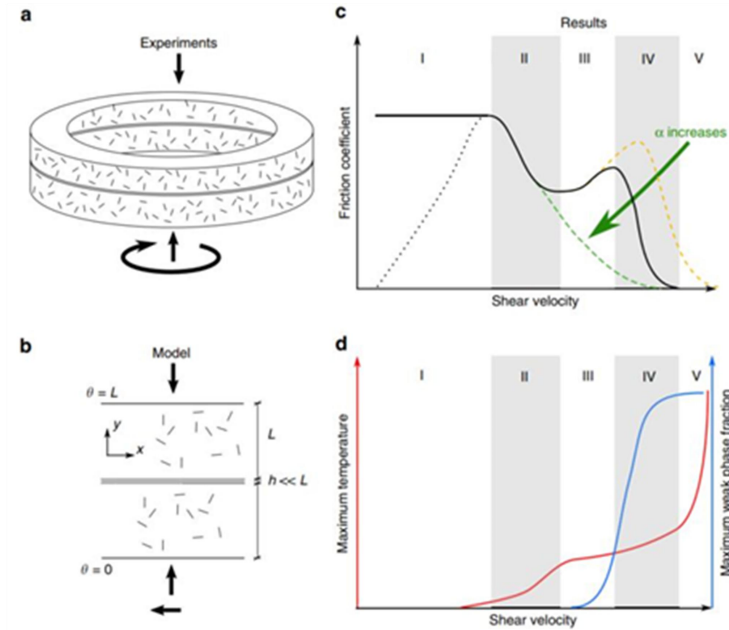


图2 模型的几何形态和稳态阶段

与实验数据的摩擦力比较：图3总结了6组不同物质、不同速度的独立实验结果，模型与实验结果符合的很好。该模型的有趣特征之一是在中等速度下通过实验观察到的再硬化，而无需假设任何其他硬化机制。当相变和力学响应的能量差别很大时，可以在不产生弱相的情况下提高温度，从而实现这种再硬化。如果不是这种情况，则模型的中间状态不明确。

相变：对于每种材料，根据实验观察结果突显了推断的相变和所产生的弱相。但是，对于其中大多数而言，关于哪个相变是弱化的根源尚无普遍共识。因为通常会触发几种机制，并且很难分离每种机制的作用。此外，在高速滑移过程中可能会产生微观结构特征和不稳定相，而实验后在微观结构中留下很少或没有证据。然而，该模型能够准确捕获微观结构的观察结果。同样，它使研究人员能够检索不同过程的参数信息，例如活化能，并评估温度变化。这可以用作与实验后样品的微观结构做比较的基础。在图4中，研究人员总结了获得图3摩擦系数结果所需的温度和弱相比的演

变。基于这两张图，可以解译不同材料支撑摩擦阻力宏观响应的过程。

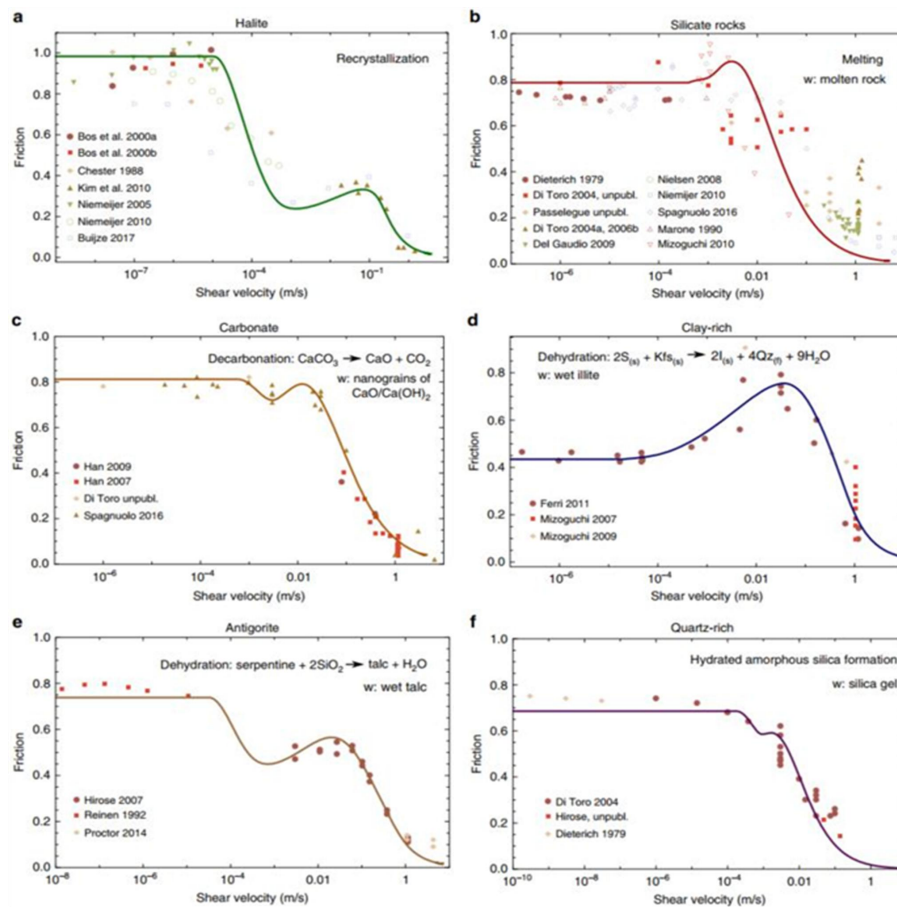


图3 不同材料的模拟结果

温度和相变的演化：将模型在弱相开始出现时预测的温度与相变的理论活化温度进行比较。在所有情况下，模型的温度均低于理论温度，这意味着相变是在晶粒的接触处局部开始的，在这里温度可能高于整体温度。对于硅酸盐岩石，研究者使用一组独特的参数。因为熔融温度取决于二氧化硅含量，而辉长岩，橄榄岩或花岗岩的二氧化硅含量不同，因此对于这一组实验的更详细描述应考虑到这种影响。在图 4d 中报告的熔融温度是辉长岩的熔融温度。尽管对于力学行为而言必不可少，但通常很难检测到局部相变。这也解释了为什么从特定的传感器或微观结构观察中获得相变

证据时，在实验中获得的速率要比模型预测的高。

值得注意的情况是盐岩，其使数据更好拟合的弱化因子为 $\alpha=0$ ，这意味着在剪切过程中生成的任何弱相都不会影响摩擦系数，推测这是因为材料在剪切过程中发生了重结晶。这是一种相变，只不过产生了具有不同粒径的相同矿物。尽管没有直接产生弱相，但重结晶会影响能量平衡，进而影响所产生的温度，进而影响断层泥的力学行为。但是，对于这种材料，也可能发生了盐岩的局部熔融，但是可能通过重结晶消除了微结构证据。

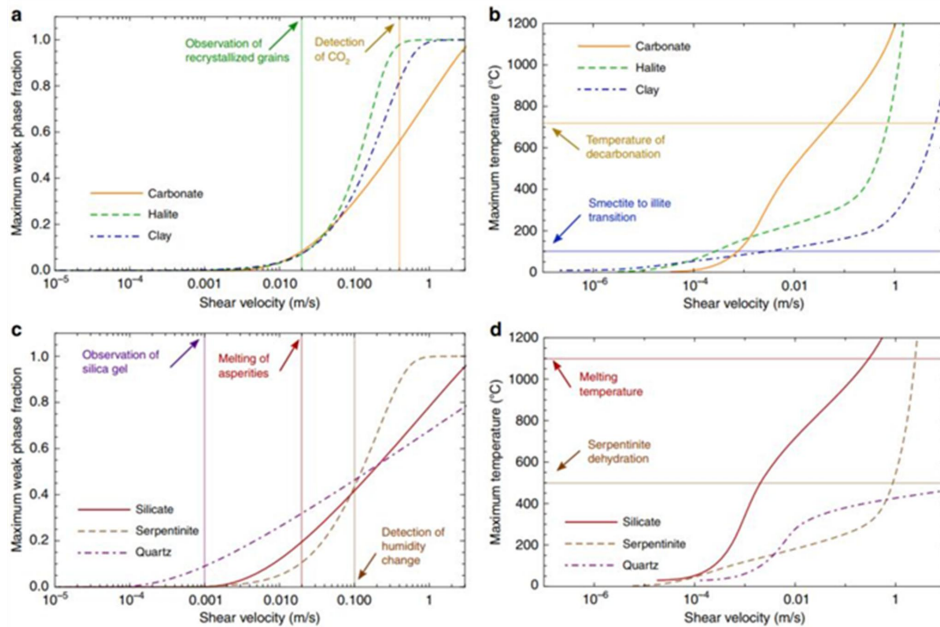


图4 随着速度的变化，温度和弱相比比例的变化

对于蛇形石和富含粘土矿物的断层泥，温度随速度升高，引起材料脱水，这可由滑石或伊利石的存在来证明。然而，干伊利石比干蒙脱石具有更高的剪切强度，而纯干滑石在低速时是弱相，但在高速时却不然。然而，这两种情况下的相变还涉及水的释放。滑石与水的混合物的摩擦系数为 0.2，几乎与速度无关。而且，蒙脱石脱水产生的大量水使伊利石表现出较高含水量，这降低了表观摩擦系数。因此，在蛇纹石和蒙脱石存在的情况下，

弱相可能是脱水产物和水的混合物。

有许多证据表明，在高速剪切碳酸盐岩石时会发生脱碳。高速实验中，电解质型传感器检测到了 CO_2 的显著增加，微观结构观察表明，存在着非常细粒的 CaO 和 CaOH 粉末。对于这些物质，弱化作用可归因于碳酸盐的热分解作用（分解为石灰和 CO_2 的纳米颗粒），但是这种弱化作用的微观机理尚未得到充分理解。

对自然条件下的启示：这些结果表明，在干燥条件下，剪切过程中断层泥内部热的产生以及相变可能是主要机理。基于物理的模型使研究人员能够解析主要的物理机制并限制参数的值。这些参数随正应力和样本大小变化的知识将允许将实验结果外推到自然条件。但是，在自然条件下，断层很少处于干燥条件，并且通常被加压流体饱和，这种情况很难进行高速实验研究。流体的存在会触发其他机制，例如成孔、压溶或热加压。此类机制的加入反过来可能会改变系统的稳态响应，也可能导致瞬变，从而可能使系统远离其稳态响应。在此情况下，需要基于高速干实验和低速饱和实验的结果建立详细模型，以评估滑移和地震成核的主要机制。

来源：Rattez H. & Veveakis M. Weak Phases Production and Heat Generation Control Fault Friction During Seismic Slip. Nature Communications, 2020, 11-350, doi:10.1038/s41467-019-14252-5.

美科学家将开发新的综合地球动力学模型框架

2020 年 1 月 6 日，美国克莱姆森大学发布新闻称，该校研究人员 Timo Heister 获得了美国国家科学基金会（NSF）250 万美元的资助，将开发一个新的综合地球动力学模型框架，该框架将提供从地球地幔边界到其表面的真实模拟。

地幔厚度超过 1800 英里，处于地球表面和超热地核之间，由热的富含铁的岩石组成，这些岩石缓慢向上移动，逐渐冷却。这种被称为对流的传热过程会引起一系列地质事件，从而导致地震、火山爆发或山脉形成。

长久以来，研究人员希望更好地了解对流过程和其他地球动力学活动，但由于压力和温度过高，无法深入研究地幔了解正在发生的情况。取而代之的是，科学家们使用地震成像来进行推断，并依靠计算模型来模拟岩石和构造板块在数千至数百万年时间尺度上的缓慢运动，从而推测出地球表面以下发生了什么。

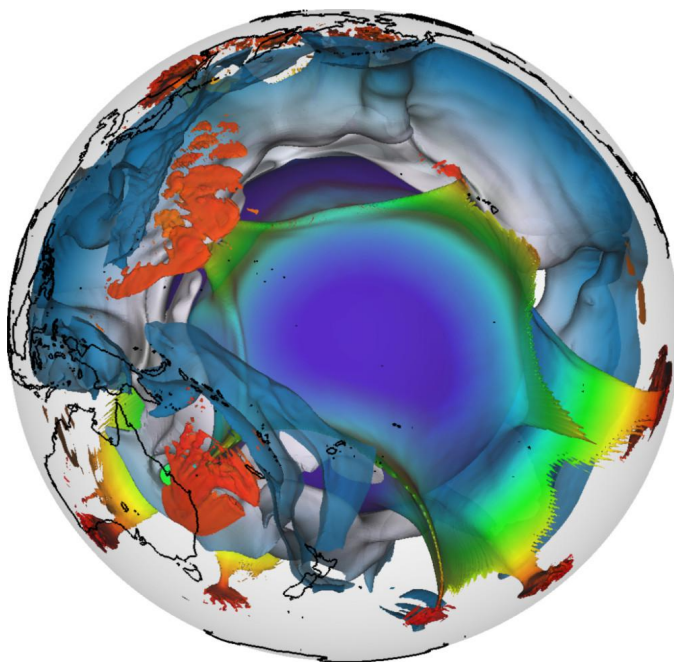


图 1 模型时间 2.5 亿年后，全球地幔对流的最终状态

新框架将基于 Heister 和其他团队成员在过去八年中创建的开源软件工具——地球对流问题的高级求解器（Advanced Solver for Problems in Earth's Convection, ASPECT），其可模拟地幔中的过程，已被全球地球科学研究人员广泛使用。

ASPECT 的模拟有可能提供对广泛主题的巨大洞察，包括构造板块运动和形变随时间和空间的变化、岩浆流动和地球内部的水循环、深部地球的结构和地表演化等。据 Heister 称，他将使用地震活动、构造板块运动、地核温度以及地震学家、地球和行星科学家生成的其他数据作为 ASPECT 的数据源，在高性能计算工具上运行 ASPECT 模拟，比如克莱姆森大学的 Palmetto 集群和其他超级计算机。

研究人员将使用 ASPECT 来计算出一个参考状态，帮助人们尽可能地了解地幔的当前状况。一方面，科学家可以利用参考状态进行区域高分辨率模拟；另一方面，科学家可以进行他们自己的全球模拟，以确定地球表面下的岩石如何对压力作出反应，特别是在构造板块边界。

来源：Clemson mathematician helps deepen understanding of Earth's mysterious mantle

<https://newsstand.clemson.edu/mediarelations/clemson-mathematician-helps-deepen-understanding-of-earths-mysterious-mantle/>

加科学家首次证明慢地震与板块边界的动态流体过程有关

2020 年 1 月 22 日，加拿大渥太华大学发布新闻称，该校的一个研究小组取得了一项重要突破，首次证明慢地震与板块边界的动态流体过程有关，这将有助于更好地了解慢地震的起源和行为。

慢地震是近 20 年前科学家发现的一种新型地震。这些地震产生的运动非常缓慢（一次地震可以持续几天，甚至几个月），以至于几乎无法察觉。它们不像普通地震那样可怕和破坏性强，其不会引发地震波或海啸。这些地震发生在一个板块在另一个板块之下滑动的区域（称为“俯冲带断层”），与发生规则地震的区域相邻，但更深。同时，其行为也与常规地震大为不同。

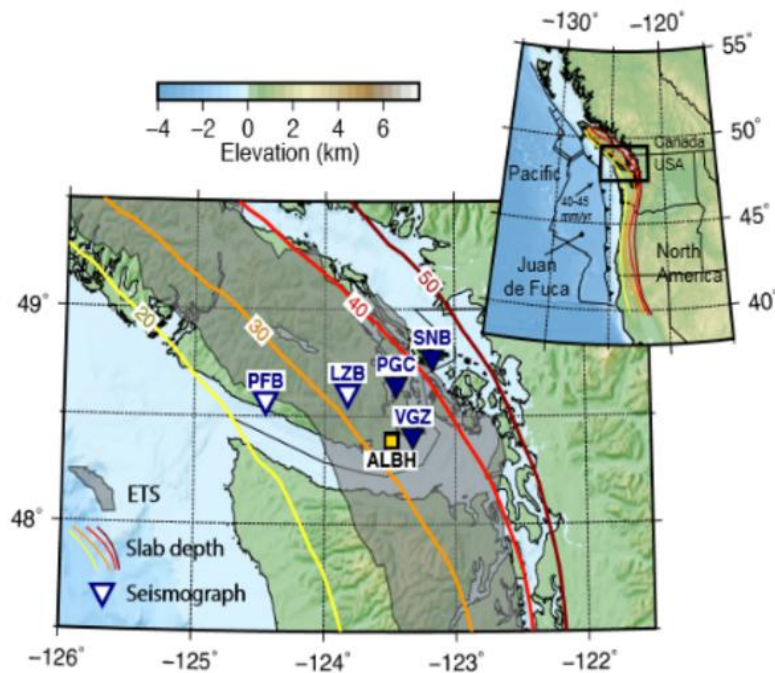


图 1 地震仪器的安装位置（灰色阴影区表示慢地震发生的地方）

加拿大渥太华大学地球与环境科学系的研究人员对此进行研究，他们利用类似于超声波成像的技术和地震记录绘制出这些慢地震发生区域的

地球结构图，通过分析发生地震的岩石的性质，得出结论：这些慢地震与板块边界的动态流体过程有关。慢地震相当复杂，此前研究表明，许多慢地震的理论模型要求这些流体的压力在地震周期内波动。

事实上，2009 年，渥太华大学的 Audet 教授曾亲自提出证据，证明慢地震发生在地球内部流体压力异常高的地区。Audet 教授表示，地球深处的岩石充满了液体，尽管其数量很小。在 40 km 深处，施加在岩石上的压力非常大，通常会把液体挤出，就像挤压海绵一样。然而，这些流体被禁锢在岩石中，实际上是不可压缩的。因此，流体压力上升到非常高的值，这基本上削弱了岩石，并产生慢地震。

过去几年的几项研究表明，这些事件与流体压力的动态变化有关，但迄今为止，还没有确凿的经验证据。该研究则建立了第一个直接证据，证明流体压力确实在慢地震期间波动。

来源：uOttawa Researchers Find Evidence to Explain Behavior of Slow Earthquakes

<https://media.uottawa.ca/news/uottawa-researchers-find-evidence-explain-behavior-slow-earthquakes>

Jeremy M, Gosselin Pascal Audet, Clément Estève, Morgan McLellan, Stephen G, Mosher Andrew J. & Schaeffer. Seismic Evidence for Megathrust Fault-Valve Behavior During Episodic Tremor and Slip. Science Advances, 2020, 6 (4): eaay5174, doi: 10.1126/sciadv.aay5174

主 送：中国地震局领导