



## 压力之下

为了解当前压裂实践的更多信息,麻省理工学院 (MIT) 的研究人员正在借助 Phantom 高速摄像机分析高压流体是如何开裂岩石的。

水力压裂,或“压裂”,是最近的热门话题。这个过程包括钻入地下,然后引导高压水压裂岩石,释放里面的气体。虽然压裂对能源行业产生了重大影响,但许多评论者都担心环境问题,尤其是地震和潜在地下水污染方面的问题。

在 Phantom 高速摄像机的帮助下,麻省理工学院 (MIT) 地球资源实验室 (ERL) 的研究人员一直在努力更好地了解压裂过程。实验室使用摄像机观察裂缝如何在不同荷载条件下在不同类型的岩石 (包括石膏、大理石、花岗岩、页岩) 中发生和发展。由于裂缝发展速度非常快,高速摄像机在分析过程中不可或缺。

最近,该团队一直在研究水力压裂,依靠流体压力来产生荷载。“特别是,我们正在探索水力压裂过程如何受到加压开口的形状和注入流体在岩石基质中渗透的影响,”研究生 Ignacio Martin Arzuaga Garcia 表示。“这两个因素在产生打破岩石所需的压力中起着重要作用。”

## 完整图像

在一组实验中，Garcia 测试了石膏——一种软硫酸盐矿物。他把一个 4 x 2 x 1 英尺的试样置于双轴装载架中，轴向荷载 4.5 兆帕 (MPa)，横向荷载 1 MPa。然后，他用液压在岩石中压出同心开口，直至断裂，使用数据采集 (DAQ) 系统跟踪开口内的内部压力和注入液体的体积。

由于压裂过程非常快，Garcia 使用 Phantom v2511 高速摄像机以每秒 2,000 帧 (fps) 的速度记录了该过程，这有助于他确定断裂发生时刻以及导致的断裂模式。DAQ 装置在压裂过程中将高速视频与压力体积曲线同步。

ERL 团队研究的特别之处在于，生成了压裂过程的完整图像。大多数研究岩石力学的小组只能在压裂过程完成后再分析压裂过程。“但在这个过程中，出现了很多裂缝，”博士生 Omar Al-Dajani 解释道。“有些裂缝开裂早，闭合也较早。如果没有看到完整的过程，则分析仅基于最后留下的断裂。因此，我们捕捉到了迄今为止没有人见过的情形。”

### 卓越的分辨率和内存

几年来，ERL 研究人员一直在他们的实验室里使用高速摄像机。“他们在这段时间进步了很多，尤其是在内存和分辨率方面，”Al-Dajani 表示。过去，摄像机内存非常小，他和同事受到局限，录制时间非常短。同时，以前的高速摄像机的传感器分辨率不够高，无法破译快速压裂过程更精确的细节。

但 Phantom v2511 克服了这些问题。它具有高达 96 GB 的高速内存，相当于 10,000 fps 和 1280 x 800 分辨率下 33 秒录制时间。在不牺牲图像质量或速度的情况下，它以 100 万像素的全分辨率和高达 100 万 fps 的分辨率实现 25,000 fps 的录制速度。根据所研究的材料，采用多个帧速率，包括花岗岩的 10,000~15,000 fps 和页岩的 1,000~3,000 fps。该摄像机还集成了具有 28 微米像素尺寸的定制 CMOS 传感器，高感光度，克服了高速录制相关的典型光线缺陷。

“更长的录制时间和高分辨率图像帮助我们以非常精确的细节捕捉开裂过程，”Al-Dajani 表示。“据我所知，以创造开裂过程的方式进行此类液压断裂实验，我们是唯一这么做的群体。”



Phantom v2511 摄像机。

## 高速录像与数据采集

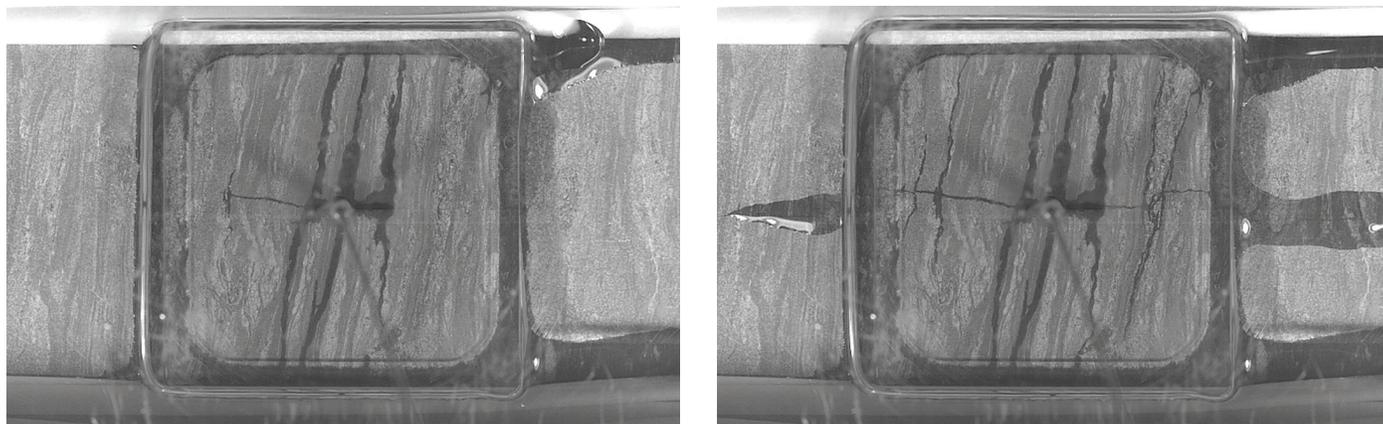
将高速成像和数据采集 (DAQ) 系统相结合,对于研究快速运动事件而言非常有价值。将 Phantom 高速摄像机与流行的现成 DAQ 单元连接,让您轻松同时采集模拟数据和视频数据。然后,您可以在 Phantom 摄像机控制 (PCC) 软件中将同步视频和模拟数据并排可视化,从而提高工作流程效率,并带来有关当前流程的新见解。

“Phantom 摄像机背后的输出渠道让我们能够轻松运行其他采集设备,”麻省理工学院校友、博士生 Qiuyi Bing Li表示。“我们想知道视频对应的是哪一时段的岩石内压力、荷载或地震能量。这为我们提供了非常精确的结果。”

## 得出结论

Garcia 根据水力压裂实验的结果得出了两个结论。首先,加压缺陷的形状对引发断裂所需的压力(即临界压力)有重要影响。与具有边界更锐利的开口(如带凹口的圆形)相比,更平滑的开口(如圆形或椭圆形)需要更高的液压压力。槽口越长,临界压力越小。

第二,注入的流体渗透到岩石的基质中会降低临界压力。虽然这些结果并不新鲜,但实验引入了一种创新的高速测试程序,成功地验证了过去的结论。



Phantom v2511 帮助 MIT 团队捕捉液压压裂过程,包括裂缝何时出现以及如何发展。请注意第一张图像到第二张图像中裂缝的发展。

“Phantom 摄像机非常关键，我们得以确定裂缝发生的确切瞬间，并了解该瞬间的压力和位置，”Garcia 表示。“因为它能跟上快速压裂过程，所以它能告诉我们两个断裂各自确切对应的是哪一帧。在描述断裂发展时，这是非常重要的一部分。”

了解液压裂缝的确切几何形状能为石油和天然气行业压裂实践的设计和施工提供信息。

## 其他研究方法

ERL 研究人员也采用了高速数据采集以外的实验方法。例如，麻省理工学院校友 Qiuyi Bing Li 采用了数字图像相关性 (DIC) 的方法。这是一种非接触式技术，它使用高速摄像机和特殊软件对变形、位移和应变进行光学测量。具体来说，他分析了高速记录中岩石的单个像素，以便量化其在压裂过程中位移。Al-Dajani 也使用了 DIC。他表示：“我正在研究量化压裂过程区的损坏半径——这是石油和天然气应用中的一个关键问题，”。



某些 Phantom 摄像机符合出口许可标准。有关更多信息，请访问 [www.phantomhighspeed.com/export](http://www.phantomhighspeed.com/export)。