

## 工业水力压裂的挑战

作者：

考奈特·弗兰·萨奥斯（CORNET François Henri），法国斯特拉斯堡大学地球科学学院和观测站（École et observatoire des sciences de la terre (EOST), Strasbourg）荣誉教授

水力压裂是指施加于岩石中流体的压力超过一定阈值时发生的破裂过程。这一过程可以是自然发生的，例如玄武岩火山爆发（图 1），也可以是人为的，例如油气开采。直到最近，油气开采只涉及到自然储层，水力压裂作业并未造成任何环境问题。但在过去的 15 年里，这项技术一直被应用于母岩内部的油气的开采。此应用现在需要更好地控制水力裂缝的几何形状，以避免对环境造成任何负面影响。这种控制是通过实时监测这些流体注入引起的微震活动来确保的，鉴于所涉及的信号较弱，则需要特殊设备来检测。



### 1.水力压裂:一种自然现象

所有的岩石都有一定的**孔隙**，即未填充固体的体积。在通常的**压力**下，这种多孔空间可以充满液体（如水、卤水、烃类化合物、熔岩等）或气体（如空气、天然气等）。另一方面，即使仅仅是由于**土地的重量**，岩石的固体部分仍可以传递存在于任何岩石地块中的**自然应力**。

**水力裂缝是纯拉伸断裂**（参见断裂力学的基本概念），其方向取决于应力特性。

在这本百科全书物理学的主题下的《物质如何形变：流体和固体》一文中，进一步讨论了应力的概念。在此让我们回顾一下**压力和应力的一个主要差异**，这会有助于更好地理解水力裂缝的发展。

当压力作用于平面时，将产生一个垂直于此表面的作用力，其大小与压力值和表面面积成正比。当对同一表面施加一种应力时，会产生一个力，其方向通常与该表面**不垂直**。这种力可以分解为垂直于表面的分量（称为**法向分量**）和表面平面上的分量（称为**切向分量**）。对于所有应力场，这两个分量的振幅取都取决于所考虑的表面**方向**。有三个相互垂直的表面分量，切向分量为零。与这三个方向均有关的法向分量的振幅随表面的方向的变化而变化。其中，最小的被称为**最小主成分**，最大的被称为**最大主成分**。

总之，静止的流体可以说是以同样的方式向各个方向传递压力，而静止的固体则不是这样。因此，水力裂缝在垂直于固体中最小主应力分量方向的平面上形成。



图 1.自然水力压裂的一个例子：富尔奈斯火山(留尼汪岛)玄武岩喷发的第一阶段。[来源：Aline Peletier 拍摄 (OVPF/IPGP) ]

在留尼汪岛熔炉峰，可以被观察到玄武岩火山的喷发，这是**自然界水力压裂**的一个例子。在火山下面几公里处有一个岩浆室，充满了熔融岩石（岩浆）。当腔室中的压力达到某个临界值时，会形成**水力裂缝**，使熔岩逸出到表面（图 1）。当熔岩喷发停止，岩浆凝固时，这些裂缝形成的结构被称为**火山岩脉**。

水力裂缝的**扩展速率**取决于裂缝内流体压力的分布。当压裂液是不可压缩的

液体（水、泥浆、熔岩等）时，**扩展过程是稳定的**。因为随着裂缝开始，裂缝体积增加，这就会导致流体中的压力降低。裂缝的扩展需要注入液体，因此扩展速率取决于裂缝的注入速率。注入一旦停止，裂缝的扩展就会停止。

例如，一个**火山岩脉**（图 1）形成过程中，其扩展速率与人步行的速率大致相当（约 100 m/min）。



图 2.冰岛的岩墙：一旦岩浆冷却，火山岩墙对应于大型平面结构，其几何结构证明了岩浆侵位时局部主应力的方向。[来源：A.Gudmunsson 照片]。

由于水力裂缝的扩展垂直于岩体中的最小主应力，其比大尺度的几何结构受到**最小主应力**变化的调控。例如，图 2 显示，一旦岩浆冷却，火山岩脉对应于大型扁平的结构会提供局部应力状态信息。

因此，控制人工水力裂缝的几何结构需要提前了解岩体中最小主应力的变化。

## 2.水力压裂在油气开发中的应用

油气来源于与形成沉积岩的各种元素（砂岩、石灰石、粘土、盐等）同时沉积在海底的有机物的分解。当这些沉积物质被深埋时，油气往往会迁移到砂岩和石灰岩中最多孔的区域。因此，在生成油气的**母岩**和在地质时间尺度上储存油气的**储集岩**之间得以区分。

传统的油气开采是通过**钻井**（参见“钻井技术的一些特征”）**到达储集岩**。钻井可以使得油气向表面流动。这种流动导致钻孔附近的压力迅速下降，而钻头处的流速也因此降低。

早在 20 世纪 40 年代，人们就认识到，通过水力压裂可以将产量**维持在很好的水平**。将加压液体注入储集岩，产生稳定的拉伸破坏，并垂直于固体块中的最小主应力[1]。

但如果我们只注水，当注水停止时，下降的压力和闭合的裂缝对油气开采无任何影响。在实际操作中，该技术是**用标准液体（钻井泥浆或水）开始压裂**，然后**注入粘性液体，将砂悬浮其中**（图 3）（参见本百科全书中的“沙子”一节）（链接：沙子）。在当其注入结束时，压力下降且裂缝闭合，砂粒保持在原位，从而确保有效地油气开采。该操作由一些专业人士进行，他们已学会控制用于悬砂液体的粘度。事实上，该粘度必须很高，以便悬浮液中砂的密度尽可能高，但压裂作业结束之时必须尽可能低，以免阻碍油气开采。



图 3.非常规油气开采的水力压裂作业。底部有可供注入约 500 立方米的水箱。在右下角的图中可以看到钻头。储罐前面的卡车提供流体-砂混合物的准备，流体-砂混合物由两排卡车安装的泵注入。每台泵的功率约为 500 马力。[来源：斯伦贝谢的照片]

因此，运营商开发的产品特点是随时间而变化：注砂应粘度高，而现场安装 24-48 小时后粘度低，以便油气开采。

**注入量通常为几百立方米**（图 3），特殊情况时会达到几千立方米。对于可以用酸溶解钙质储集岩，使用**酸液进行压裂**，能将局部岩石溶解，从而在水力压裂壁中形成流动通道。因此，在注入结束时，裂缝闭合时仍保持渗透性，无需注砂。在石油术语中，这些操作被称为“**酸压裂**”。

经验表明，在同等深度下，砂岩和石灰岩的最小主应力要低于同样渗透性很低的泥灰岩和粘土中。因此，确保了油气储藏的存在的**泥灰岩和粘土层**，也**阻碍了开采产生的水力裂缝的垂直延伸**。

现今，世界上所有的油气生产（无论是气相还是液相）都涉及水力压裂作业，自 20 世纪 40 年代以来一直如此，并未对生活在地面的居民造成过任何不便。值得注意的是，水力压裂只是优化储层岩开采的“工具”之一。另一个传统的“工具”-包括优化开发井的位置，并使用某些井注入或多或少热流体，将油气“推”到生产区。注入流体的热量使局部温度升高，从而降低油气的粘度，以利于其流动。在实际操作中，储层的最佳运行被认为是使其所含油气总量保持在 35%到 45%之间。

既然我们已知道如何**水平钻井**（参见钻井技术的一些特征），我们也知道如何开采**未从母岩**，即非常规油气储层中**释放的油气**。母质，或者气体被称为**页岩气**。由于母岩是多孔而不渗透的（这些孔隙是绝缘的，彼此之间不连通），这些油气通常是以气体形式存在于母岩之中。水平钻井在基岩中进行，涉及**大量水力压裂作业**（图 4）。尽管这些自然液体包含所需的油气（通常为气相），但由于它们含有**非常丰富的卤水**，这些卤水必须回注到深处。它们是这些作业造成**潜在污染的真正来源**，包括诱发地震（见下文讨论）。

此外，**母岩中的最小主应力**通常高于母岩上下地形中的主应力。因此，如果水力压裂作业的注入量过大，这些水力裂缝有可能将母岩与上方更具渗透性的土壤连接起来。在这种情况下，如果**作业太浅**（深度小于 500 m），则可能会对目前使用的地下水造成污染。因此，重要的是要有**实时控制水力裂缝的垂直延伸的工具**，以消除这些污染风险。这个工具的使用会诱发微地震活动。

### 3.加压流体注入引起的微地震

根据压力扰动的幅度，受压流体注入岩石层，这可能会引起之前已存在**裂缝的滑动**或产生**水力裂缝**[2]。事实上，已存在的裂缝中包含的流体压力与该裂缝支撑应力的**法向分量**相反，但切向分量会保持不变。可以看出，当裂缝中的流体压力与裂缝支撑的**法向分量**之间的差值变得过小时，**切向分量**会在裂缝平面内引起切向位移。

因此，根据注入**速率**和注入井中是否存在已有的裂缝，这可能会出现**水力裂缝**或沿已预先存在的裂缝滑动。我们已经看到，**水力裂缝的扩展是稳定的**，因此不会产生微地震。但在已有的裂缝上**诱发的滑动通常是不稳定的**，这会产生**微地震**。



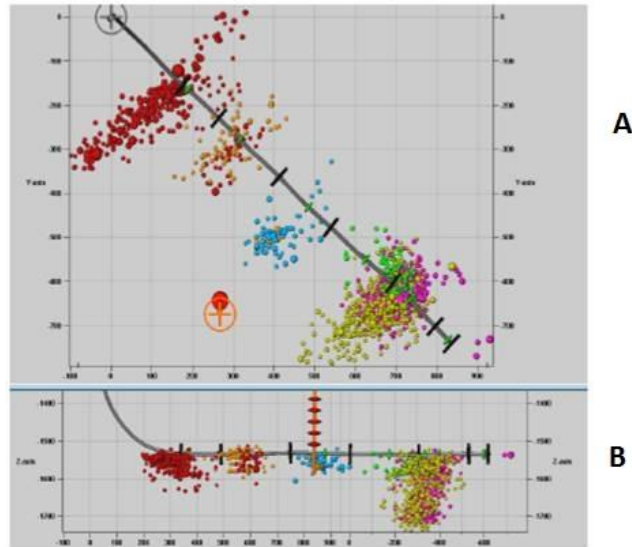


图 4. 诱发微地震活动的位置有助于水力裂缝的延伸图的绘制。(a) 俯视图；裂缝垂直于钻孔。(b) 显示水平钻孔几何形状和微地震传感器位置的垂直平面中的横截面图(垂直橙色结构)。  
[图的来源：, S.Maxwell, Schlumberger]。

在其扩展过程中，水力裂缝总是在某个时刻与先前存在的渗透性或强或弱的裂缝相交。然后，水力裂缝中的流体可以将压力传递给这些裂缝中存在的流体。如果这些压力变化足够大，则可能引发失稳滑动。因此，可以通过定位与水力裂缝相交的既有裂缝上产生的微地震事件来绘制**水力裂缝**的延伸情况（图 4）。这是页岩气开采中使用的技术。

在基岩中进行水平钻孔。然后形成了一系列小型水力裂缝，这些裂缝也必须保留在母岩中。通过绘制诱发微震活动图，实时监测这些裂缝的扩展延伸。由于其发射的信号频率高，振幅低，所以检测这些微地震需要安装非常特殊的监听设备。

过去四十年开展的地震学工作表明：不稳定剪切运动的振幅及由此产生的微震信号，尤其要取决于滑动面的尺寸和由破坏释放切向分量的下降幅度。微震地震和地震一样，以其震级为特征。震级是以对数来量化（因此是非线性的）。所以，为了设定数量级，3 级、4 级和 5 级分别对应于约 0.3km、1km 和 3km 长的**断层动态故障**。微震通常指震级小于 3 级的微震事件。对于自然地震区，如加利福尼亚州，每周至少记录一次 4 级地震，并相应地确定当地建筑物的尺寸。

应注意的是，地震运动干扰效应的重要参数与其说是震级，不如说是**加速度值和感知到该加速度的持续时间**。这些特征取决于破裂源和考虑效应点之间的距离。距离越远，信号衰减越大。因此，4 级 10 公里深断裂的地表扰动可能比 3

公里深的 3 级断裂小。但这些影响不仅取决于距离，还涉及到地震波穿过地形的性质。此性质被称为**场地影响**，而这取决于观测点的地质和岩土结构。**水力裂缝**引起微震事件的震级**通常远小于 2 级**，甚至常为负值（震源的米制或分米制范围）。

因此，我们要指出的是，**页岩气开采的真正问题之一**不是与水力压裂有关的微地震，而是由于开采过程中产生的**大量卤水**（大于 4 级）的回注而引起的地震活动。这些卤水需要深层回注，但会**引发破坏性地震**，其中一些地震在美国**俄克拉荷马州达到了 5 级以上**。倘若注入速率及与这些注入相关的超压得到更好的控制，这些地震可能会避免的。

---

## 参考资料和说明

[1] Hubbert M.K. & Willis D.G., 1957. Mechanics of hydraulic fracturing. Trans., Am. Inst. Min. Eng. 210, pp 153-163.

[2] Cornet F.H., 2016. Seismic and aseismic motions generated by fluid injections. Geomech. Ener. Envir., vol. 5, pp 42-54.

---

译者：吴文超

审校：崔岩山

责任编辑：胡玉娇