

网站地图 (<http://www.imech.cas.cn/serv/wzdt/>) |

联系我们 ([http://www.imech.cas.cn/serv/lxfs/201212/t20121205\\_3698646.html](http://www.imech.cas.cn/serv/lxfs/201212/t20121205_3698646.html)) |

所内网 (<http://www.imech.cas.cn/serv/szxx/>) | 所内网 (<https://ioa.imech.ac.cn>) |



<https://mail.imech.cas.cn/> | [English \(<http://english.imech.cas.cn/>\)](http://english.imech.cas.cn/)

Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences

中国科学院 (<http://www.cas.cn/>)

(<http://www.imech.cas.cn/>)



当前位置：首页 (../..../..../) >> 科学传播 (../..../..../) >> 力学园地 (../..../) >> 前沿动态 (../..../)

## 【前沿动态】为页岩油气储层“原位诊脉”

2023-05-26 15:04

[【放大 缩小】](#)

编者按：力学研究所非线性力学国家重点实验室赵亚溥研究团队一直坚持从事页岩油气开发利用领域的研究工作。近期，他们研发了一种“原位诊脉”方法，利用页岩气储层开发过程时得到的压裂数据，对工程进展情况实时监测。该项技术已经应用于我国新疆油田、长庆油田的120余口井，增产效果显著，获得了油田现场的高度评价。本刊特此发布介绍此项技术的文章，以飨读者。

### 为页岩油气储层“原位诊脉”

杜书恒，孙富强

大家可能知道“诊脉”是中医对人体健康评估的一种有效方式，但是你听说过对岩石储层诊脉吗？那就听我们讲讲吧。

#### 1 页岩及页岩气

地球的表面被多种多样的岩石所覆盖着，地球岩石圈主要由三种岩石组成：火成岩、变质岩和沉积岩。其中含量最多的为沉积岩，它又称水成岩，占覆盖地表的岩石的70%左右。风化的各种岩石颗粒经大气、水流、冰川等的搬运，到某个地点沉积，并经高压的成岩作用而逐渐形成的岩石即为沉积岩。在沧海桑田的变迁中，与岩石

颗粒一同沉积下来的，还有包括动植物尸骸等所形成的有机物。这些有机物经长期的生物化学作用而形成油母质（又音译做“干酪根”），油母质不溶于普通的有机溶剂，但在地球内部的高温高压作用下，会裂解释放出石油或天然气，这是当今世界的主要能源之化石燃料。



图1 富含原油的地下3500米页岩样品（作者采集自中国新疆准噶尔盆地）

页岩是沉积岩的一种，因其一般具有薄书页状或薄片层状结构而得名。页岩气就是以游离或吸附状态赋存于页岩储层中的天然气。它的储量巨大，但开采难度高。近二十年来，因开采技术的逐渐成熟，富集于页岩中的油气资源得到了有效的商业开发，并在与常规能源的竞争中取得了一定的优势，从而影响世界能源格局。显然，它直接关系到国家的能源战略安全。

## 2 页岩储层特征与主要开采技术

沉积岩由于是经悠悠岁月的历史沉积而成，所以呈现明显的垂直分层特征，其中每一地层可大体认为是水平延伸的。储有页岩油气资源的地层，一般叫做页岩储层。我国页岩储层主要分布于四川盆地、塔里木盆地、河西走廊、鄂尔多斯盆地和松辽盆地等地区，大多埋藏在地下2000-4000米的地层中，储层有效厚度为20-200米。相比于国外的主要页岩储层而言，我国页岩储层埋藏更深。由于上覆岩石的重量大，因此也被压得更“实”，导致储层孔隙度和渗透率更低，也就是说我国页岩油气储层的空腔（在学术上采用“孔隙率”来表征）更少，运输流体的能力（在学术上采用“渗透率”来表征）更差，因而开采难度更大。同时，页岩储层处于高度复杂的受力环境之中，例如有地心的引力、地球板块的挤压等等。此外，随着埋藏深度的增加，岩石温度也逐渐增加。而且，储层岩石还会受到地磁场等电磁作用。所以，页岩储层处于错综复杂的力、电、磁相互作用的环境之中。

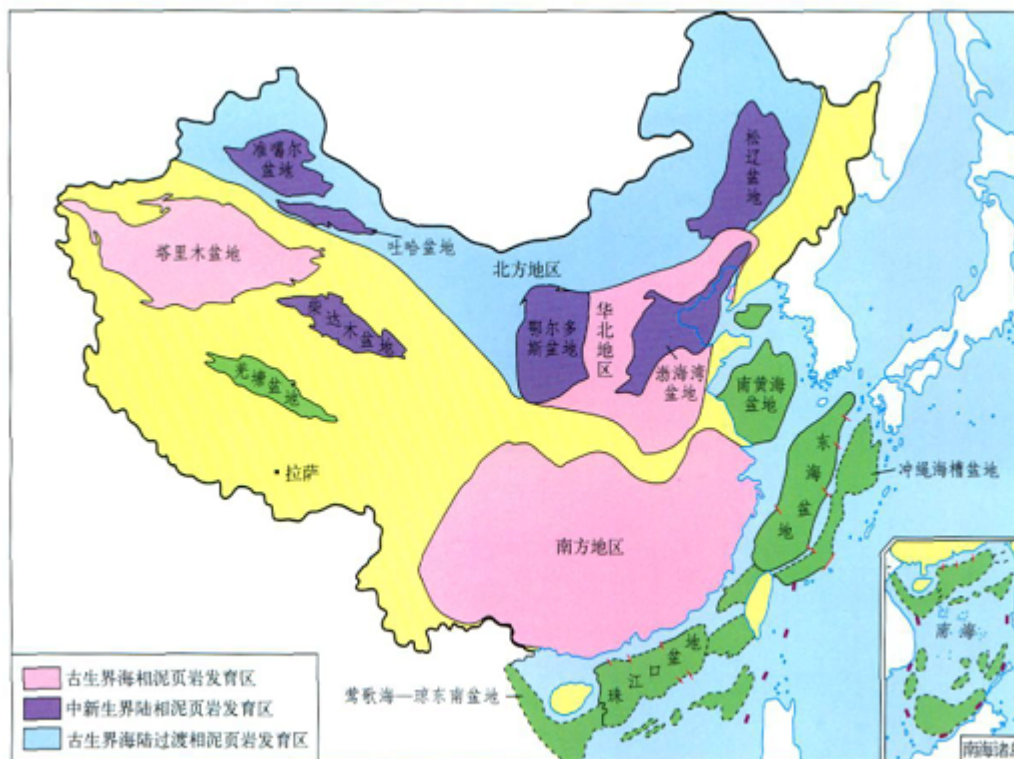


图2 我国主要页岩类型分布[4]

本世纪以来，页岩气的成功商业开采主要依赖于两项技术的大规模应用，即水平井技术和水力压裂技术。水平井技术，顾名思义，就是页岩气的开采井在深层基本不变的水平方向延伸。这样就满足了打井方向与页岩储层的方向一致的要求，可以使开采井尽可能覆盖储层更多的区域。水力压裂技术，就是使用大量的（每次可达上万吨级）的低黏度压裂液，以极大压强注入储层，目的是在页岩储层中产生为数众多而密集、并且可以相互连结成复杂形状的裂纹网络。显然，应当使储层越碎越好，这样就可以克服页岩储层渗透率低的缺点，实现页岩气的有效开采。那么，页岩的真实断裂情况到底如何？是否所有页岩储层的断裂情况都一致呢？

### 3 页岩储层断裂特征及工程识别

一般而言，材料的断裂行为大体可分为两类：脆性断裂和韧性断裂。它们的主要区别为：脆性断裂一旦发生，便会引起整块材料的全局性断裂，典型例子为防弹玻璃的断裂，日常中的手机屏幕破碎也可归为此类；韧性断裂则是一条主要裂缝延伸的局部断裂，典型例子为金属的断裂，日常中撕开包装袋的过程也可归为此类。图3给出水力压裂中岩石与流体相互作用导致断裂的示意。在页岩气开采过程中，储层的性质和压裂工况这两个因素就好像太极图中的两仪，共同决定了中间的水力裂纹的形成与扩展情况。

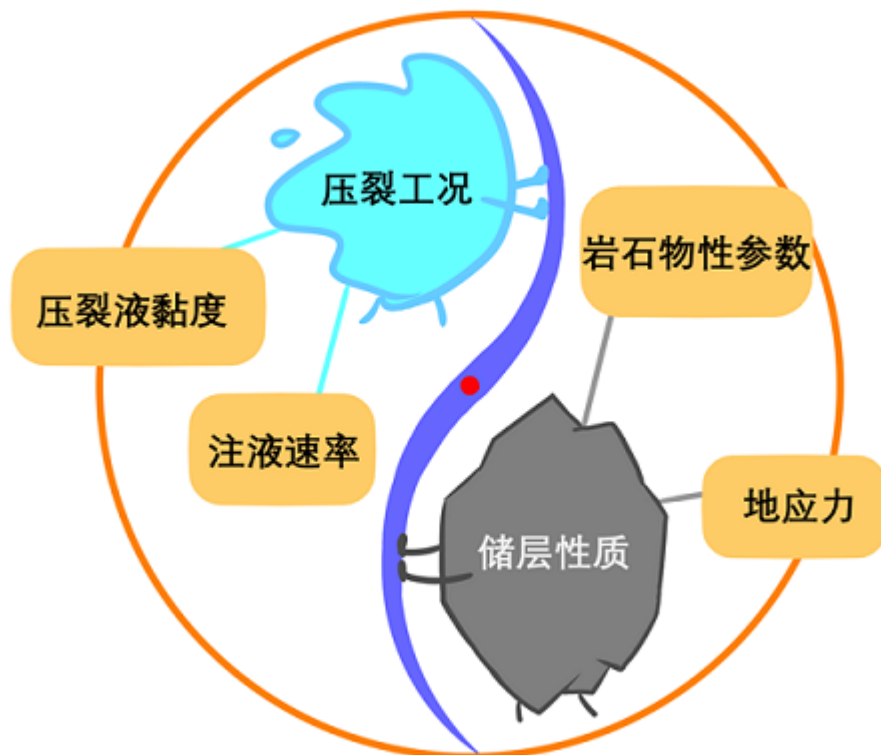


图3 水力压裂中岩石与流体相互作用导致断裂的示意图（图片来源：作者绘制）

显而易见，脆性断裂更有利于页岩气的高效开采，因为可以最大程度沟通页岩孔隙。然而，脆性断裂和韧性断裂并不是非此即彼的二元分类，它们之间存在着多种过渡状态。断裂特征的过渡程度也取决于材料自身性质，工程上称这种性质为“脆性”。由于储层的成岩过程和所处环境的不同，页岩储层脆性呈现着巨大的差异，即使是同一储层，不同位置处页岩的性质差异也不容小觑。对页岩储层的脆性进行评估，是设计压裂开采方案的重要一环，只有精准的脆性评估才能够使得方案设计因地制宜、有的放矢。此外，在页岩气开采过程中还需要实时监测工程进展情况和储层断裂情况，以便及时调整压裂方案，保持工程平稳高效进行。

#### 4 为页岩诊脉

如前所述，工程的顺利进行需要对页岩储层和整体开采系统进行有效的评估。然而，对如此复杂且深层的系统进行评估，其难度不亚于诊断人体内部各个器官的健康水平。因为由于工程量巨大而且上面覆盖了几千米的地层，对开采系统既不能“抽血化验”又不能“解剖观测”，因此失去了“体内”的真实环境。那么，是否能找到有效的方法对页岩储层和开采系统进行评估呢？为此，中科院力学所赵亚溥研究团队的科研人员借鉴了中医诊断的“望闻问切”方法，将其中的“闻”与“切”两种手段结合一起应用到了页岩气开发的评估中来。

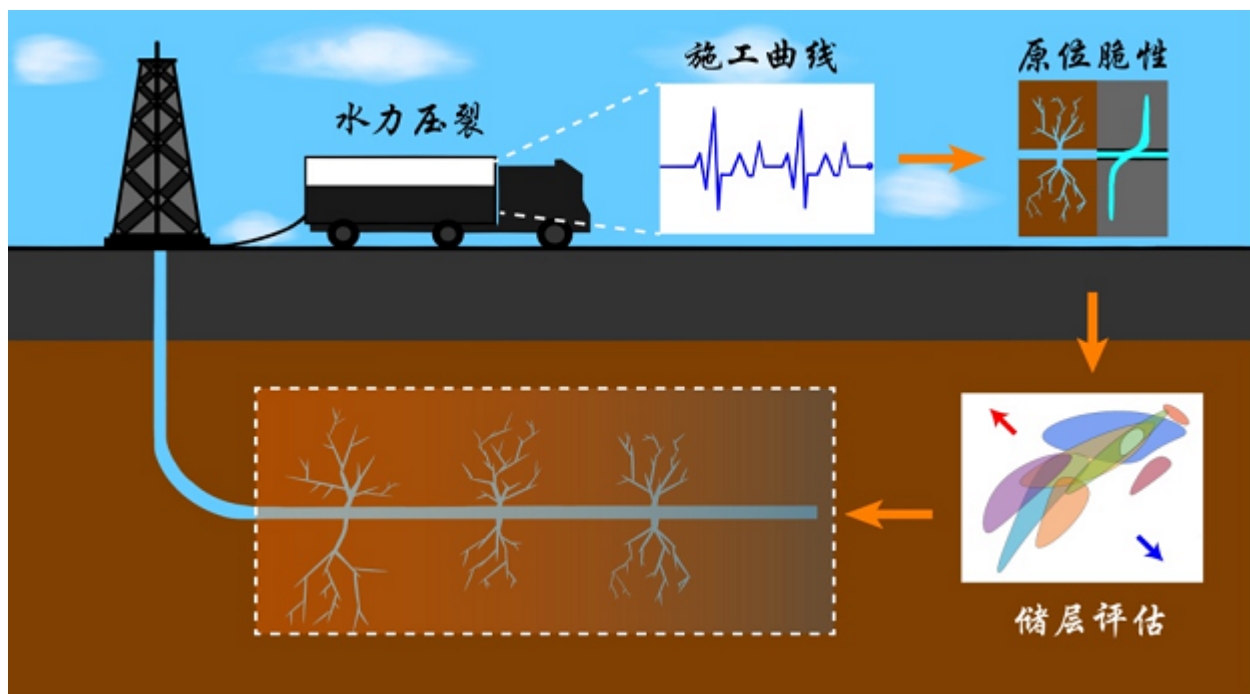


图4 为页岩原位“诊脉”的技术路线示意[3]

大家知道，中医中的“切”是指分析人的脉搏跳动规律。而在页岩气开发中也将所注入流体压强随时间波动规律记载了下来，称为“施工曲线”。因为压裂液作为流体，在储层中流动时遇到岩石开裂或天然裂缝、孔隙等时都会有相应的压强变化。研究人员通过分析施工曲线的变化规律，在施工曲线的特征点处获取关键信息，得到了储层岩石的强度、断裂韧性、脆性等重要参数。那么，如何对这些重要参数进行分析和对比，使它们更好地服务于工程现场，便成了重要问题。为此，研究团队借鉴了工程材料界常用来对材料性质进行快速对比和表征的Ashby图研究方法，并于2020年将首次将这种方法应用在地质工程领域。利用Ashby图方法，将从施工曲线中获得的两个储层重要参数（岩石拉伸强度和岩石断裂韧性）分别作为横坐标和纵坐标，便可以和其他储层进行横向对比，也可以和储层自身不同时刻、不同位置的数据进行纵向对比，从而找到最合适的压裂方案。这里要特别指出的是，这种将施工曲线和Ashby图相结合的分析方法无需将岩石样品取出，这样就避免了失去原有储层环境条件的弊病，所获得的参数为岩石在储层真实环境下的真实参数。这也是“原位”诊断的要义所在。同时，一般情况下正式施工之前往往需要试压，研究人员可以利用试压时的施工曲线获得所需信息。如此获得的真实参数将为施工方案的制定提供更为精确的信息。

在“切”的基础之上，中科院力学所赵亚溥研究团队的研究人员还运用了“闻”的方法。在储层压裂进行过程中，岩石的破裂往往会伴随着微地震事件的发生，同时释放出弹性波（或称为微地震波）。这种微地震波的幅值往往较小，人们无法直接感知，但可以通过位于地面和井下的微地震探测仪感知并记录。我们把这种借助仪器听到来自岩石破裂声音的方法，称之为“闻”。研究人员通过将压裂施工曲线和微地震记录数据相结合进行分析，发现了有近80%左右的岩石破裂事件发生于压裂施工曲线波动的极值处与波动最剧烈处。这表明现场的施工人员可以通过实时观测分析施工曲线数据来得到地下几千米处储层的断裂情况，进而分析、知晓工程对储层的改造效果如何。这样就大大缩短了现场施工和分析反馈的周期，使得对施工方案的分析与调整可以在施工过程中实时进行。图5是中科院力学所赵亚溥研究团队在利用他们所研发的“原位诊脉”方法来研究页岩气储层开发过

程时得到的三段压裂数据。在每幅图内，下方为微地震等级的柱状图，上方为施工曲线波动曲线。如果将下方的柱状微地震等级数据与上方压裂施工曲线波动曲线相对应，我们就可以发现大多数微地震事件发生在施工曲线的压强残差极值处和波动最剧烈处。这样，就验证了我们这种“原位诊脉”方法的可行与可靠。

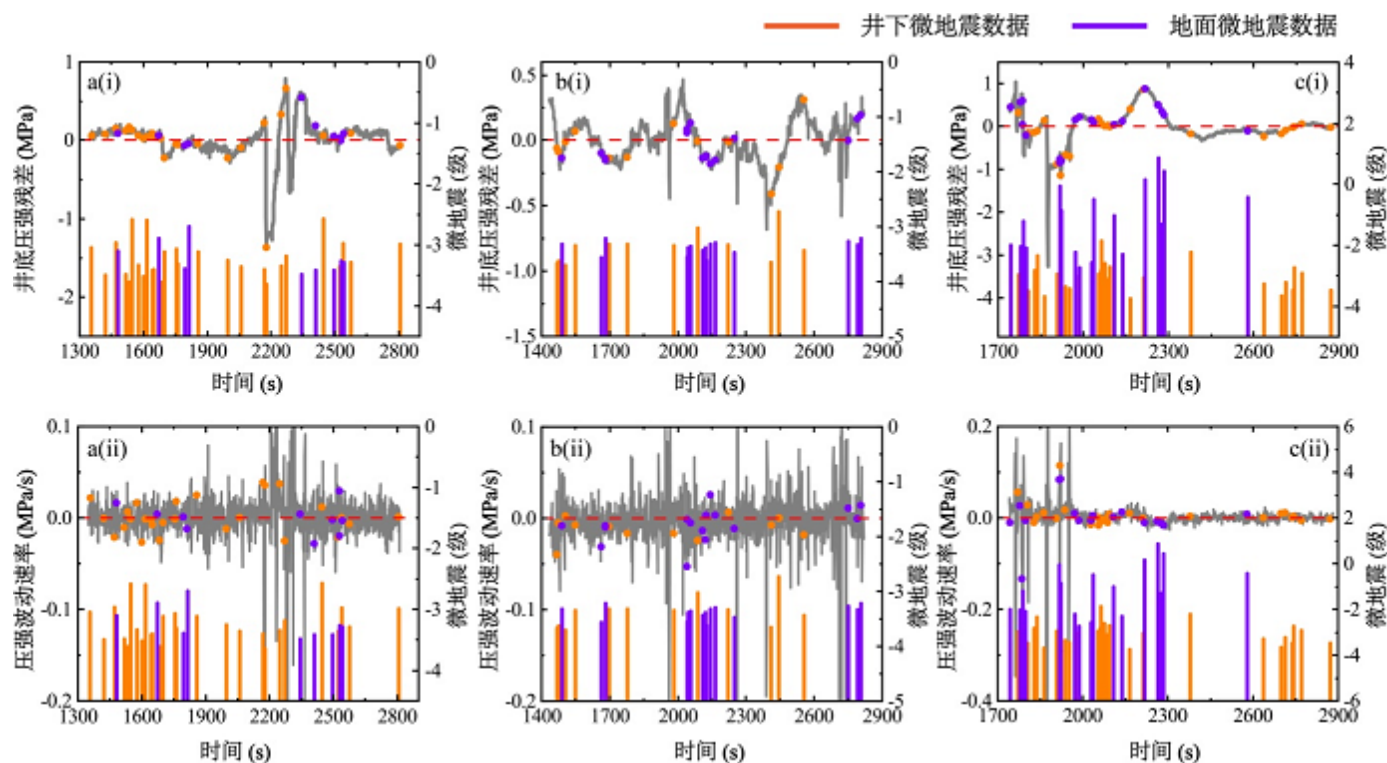


图5 为页岩储层原位诊脉所得微地震数据示意[3]

中国科学院力学研究所赵亚溥研究团队在多年来在研究非常规能源的高效开发和利用的实践中，基于物理力学的原理和方法，提出并发展了一套通过理论、实验、仿真、人工智能等途径，对力场、辐射场、温度场、电场进行耦合研究的“力-能学”框架。这里介绍的为页岩进行原位“诊脉”的研究就是“力-能学”研究框架下进行的，并且已经应用于我国新疆油田、长庆油田120余口井，增产效果显著，获得了油田现场的高度评价。

#### 参考文献

- [1] 赵亚溥. 近代连续介质力学, 北京: 科学出版社, 2016.
- [2] Zhao, Y. P. (2022). Physical mechanics investigation into carbon utilization and storage with enhancing shale oil and gas recovery. *Science China-Technological Sciences*, 65, 490-492.
- [3] Sun, F., Du, S., & Zhao, Y. P. (2022). Fluctuation of fracturing curves indicates in-situ brittleness and reservoir fracturing characteristics in unconventional energy exploitation. *Energy*, 252, 124043.
- [4] 邹才能, 董大忠, 王社教, 李建忠, 李新景, 王玉满, 李登华, 程克明. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力. *石油勘探与开发*, 2010, 37 (06): 641-653.

- [5] Sun, F., Shen, W., & Zhao, Y. P. (2019). Deflected trajectory of a single fluid-driven crack under anisotropic in-situ stress. *Extreme Mechanics Letters*, 29, 100483.
- [6] Sun, F., & Zhao, Y. P. (2020). Geomaterials Evaluation: A New Application of Ashby Plots. *Materials*, 13(11), 2517.



中国科学院  
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES

(<http://www.cas.cn>)

中国科学院力学研究所 版权所有 京ICP备05002803号 京公网安备110402500049

地址：北京市北四环西路15号 邮编：100190

(<http://bszs.conac.cn/sitename?method=show&id=081D2D6355AD574EE053022819ACCBA7>)

