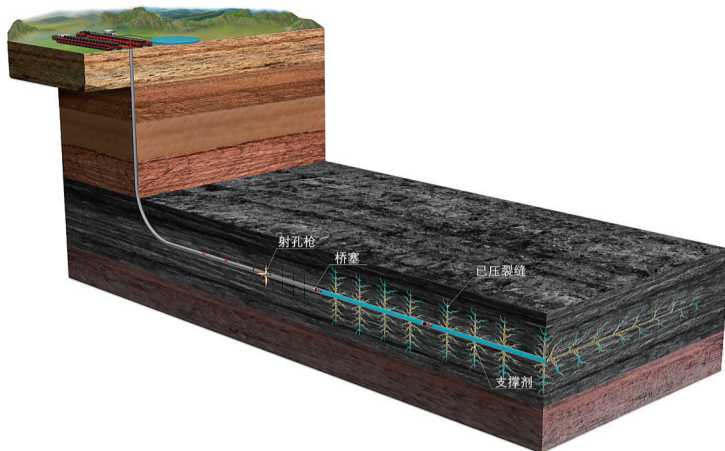


修建地下“公路”，让页岩油动起来

□ 孟思炜 刘一杉 邓大伟



“页岩非常致密，有油也采不出来，即便采出来也不能高产”，这是长期以来的“定论”。有这样的“定论”，是因为页岩储层中的原油赋存于纳米级的孔隙喉道中，自然条件下无法有效流动至井筒中。因此，要实现页岩油的有效开采，必须通过先进的工程技术手段“打碎”致密页岩储层，在页岩孔隙喉道与井筒之间构建起可以让原油流动的“高速通道”。那么，如何建立这样的通道呢？水力压裂技术可担此任。



非常规储层体积压裂后裂缝示意图。孟思炜 绘制

“打碎”储层让油气流出来

1947年，美国进行了世界首次水力压裂增产试验，揭开了储层增产改造技术的序幕。在水力压裂作业中，石油工程师利用泵车将携带高强度支撑剂的压裂液，通过井筒注入储油层，使地层在高压下破裂延伸成缝，并利用支撑剂的支撑作用，在压后储层中构筑出油气迁移的“高速通道”。

然而，随着非常规油气资源逐步成为勘探开发主战场，传统水力压裂技术虽然能够在储层中打开具有一定导流能力的人工裂缝，但受制于致密的储层特征，基质孔隙内的油气仍然难以流入裂缝内，无法实现油气的有效开采。面对这一难题，体积压裂技术应运而生，其理念是通过工程技术手段“打

碎”储层，在形成多条主裂缝的同时，在主裂缝的侧向形成多级次生裂缝，构成复杂的裂缝网络。对比常规水力压裂，体积压裂相当于在修建“主干道”的同时，配套了“乡道”“村道”等多级“公路网络”，油气从纳米级“卧室”流出后能够以最短距离进入“公路网络”内，大幅提升了通行效率。

人工裂缝高度、长度欠佳

一些国际石油公司根据古龙页岩油的前期研究得出结论：“获得商业油流的风险非常高，不存在已知具有商业开发价值的类似湖相页岩区块。”古龙页岩油开采为何困难？原因主要有两点。

第一点原因是，当前已投入规模化开发的其他页岩油藏，其开发目标层黏土含量一般少于10%，而古龙页岩的平均黏土含量高于35%，这使储层具有极强的塑性特征（即在外力作用下可任意改变其形状而不被破裂的

性能）。这就像我们揉捏橡皮泥时，橡皮泥的形状会发生变化但其本身并不会破裂；但当我们击打破璃时，它却会发生破碎，这就说明橡皮泥的塑性比玻璃强。在古龙页岩层中进行压裂施工时，储层岩石相对更容易发生变形，但难以产生延伸较远的裂缝，大幅限制了裂缝沟通的储层范围。

第二点原因是，古龙页岩广泛发育了形态复杂的页理缝，密度可以达到每米数百条至数千条，看上去就像一堆有硬有软、有

厚有薄、凹凸不平的纸板堆叠在一起，石油地质学家将这种结构形象地称为“千层小薄饼”。要垂直穿过“千层小薄饼”型页岩，压裂液无疑会遇到层层阻挡，水平方向上的页理缝成为压裂液流动的相对优势通道，但在黏土矿物和复杂页理缝形态的共同作用下，水平裂缝难以向远处延伸。石油工程师通过现场监测数据发现，古龙页岩油形成的人工裂缝有效高度不足10米，有效长度不足200米，有效改造体积仅为相同施工规模下致密油藏的40%。

“控近扩远”，形成复杂裂缝网络

如何破解古龙页岩油“千层小薄饼”储层压裂增产改造难题？水利工程中，工程师们通过修建水坝，将分散在不同支流的水资源在主河道上进行集中管理，形成更大的水流力量用于发电等用途，从而提高水资源的利用效果。石油工程师采用相似的思路，创新提出了以“控近扩远”为核心的压裂设计理念。

所谓“控近”，就是让压裂液

集中力量、形成合力，造出更大规模的裂缝“主干道”。我们发现清水比蜂蜜更容易渗入微裂缝，这是因为与水相比，蜂蜜有更高的黏度。而在压裂作业中，石油工程师通过在压裂液中加入一定成分的添加剂，同样可以大幅度提高液体的黏度，抑制压裂液在微裂缝中流失。

“扩远”则是让压裂液在远井区域“主干道”周围造出更多的“乡

道”和“村道”，让更多的油气以最短的距离进入“公路网络”内，最终汇聚于“主干道”中，通过井筒采出。为实现这一目标，石油工程师在使用高黏度压裂液造出“主干道”后，巧妙地改用一定比例的低黏度压裂液以高排量继续注入地层。这些压裂液顺着主裂缝来到远井区域后进一步冲击储层，由于黏度较低、更容易渗入到页理缝内，形成复杂的裂缝网络。

“细油长流”，保持页岩油流动动力

水力压裂作业完成后，油井就具备了生产条件。但原油要从大小为头发丝直径（约70微米）千分之一的页岩孔隙中流出，并跨越多级裂缝网络，产出是长期、缓慢的。

石油工程师从水力压裂初始设计阶段就开始研究如何让原油流得更容易。增大压裂液量或在压裂液体系中增加易溶于原油的

气体，可置换出原油，提高地层压力，进而增大产油量。在压裂液中加入表面活性剂，可降低油水界面的表面张力，增强油的流动性。

页岩油在开采一段时间后，压力和产量都会降低，如果压力下降过快，会导致裂缝闭合、高速流动通道关闭。因此，“控压生产、细油长流”的页岩油开发对策，可让地

层能量有序释放，既能够维持较长时间的驱动能量，又能避免流动通道的过早关闭，延长稳产期，提升最终的采出程度和开发效益。

（作者孟思炜系中国石油勘探开发研究院高级工程师，刘一杉系中国石油勘探开发研究院博士后，邓大伟系大庆油田勘探开发研究院高级工程师）

科普经验一线谈

在江西省吉安市永新县龙田乡，油菜花连阡陌，一阵阵欢笑声从花汀村科技中心科普活动室传来，回荡在花海之中。这里是江西省第一个村级科普中心。在江西省科技厅的支持下，在2023年，花汀村科技中心由花汀村委会同江苏省南通市海门科技馆协作建立，并稳定运行至今。

围绕儿童特点，合理设计科普活动区

《全民科学素质行动规划纲要（2021—2035年）》要求，实施馆校合作行动，引导中小学充分利用科技馆、博物馆、科普教育基地等科普场所广泛开展各类学习实践活动。

永新是劳务输出大县，农村留守儿童数量较多，高质量课外活动的供给有限。在课外时间，孩子们常常抱着手机不放。通过建设村级科普中心，花汀村有针对性地组织开展多元趣味性活动，促进了留守儿童健康成长，降低了留守儿童对手机的依赖，为提升孩子们的科学素质作出了有益尝试。

场地改造方面，花汀村充分考虑了留守儿童的年龄特点和兴趣爱好，分3个区域设置科普互动区。

一是改造学前儿童科普体验区，为低龄儿童提供以互动性、大动作操作为主要体验方式的专区，配套认知学习板、安全教育及科学教育互动科普展品等设备。

二是增设学龄儿童科普体验区，通过互动体验、科普图文解读等方式，降低学习难度，提升孩子们对科学的兴趣。

三是为全村小朋友的科普活动配备专业教室，配齐教学桌椅、线上直播课堂设备、科普活动套件等。

场地建设完成后，海门科技馆积极与花汀村科技中心进行帮扶对接，通过提供一系列的科普活动、科普课程，并派出专业的科普老师，为乡村儿童带来了难得的学习机会。

盘活现有资源，精心策划直播课堂

在村委会人员高效、负责的管理下，花汀村科技中心充分利用科技资源，为村民和公众提供了富有成效的科普服务。

为确保科普教育的持续性和普及性，并用好、用活科普活动室，这里每周日上午10时至11时都会举办线上线下相结合的直播科普课堂。线下教室座无虚席，除本村儿童外，一些临近村庄的儿童也被吸引而来。

直播前，相关工作人员会提前发布详细的课堂主题、材料准备等信息，以便家长和孩子做好准备，并对多媒体教学设备进行全面检查调试，以保障直播的流畅性。直播课程安排既注重趣味性，也注重参与性，让孩子们有机会动手实践，提供更多的学习可能性。精彩的授课增长了孩子们的科学知识、激发了他们的学习兴趣，为留守儿童补充了“心理营养”。

（作者马玲蔚系江苏省南通市海门区通源小学一级教师，李霞系江苏省南通市海门科技馆副馆长）



孩子们在科普活动室学习科普知识。（花汀村科技中心供图）

江西花汀村：让留守儿童爱上科普

□ 马玲蔚 李霞