

水力压裂：叩开“石头缝”里的油气宝藏，筑牢国家能源安全之基

想象一下，厨房的天然气灶那跳跃的蓝色火苗，温暖着千家万户的生活。但你知道吗？这些天然气的“老家”，可能藏在几千米深的地下，被锁在像磨刀石一样坚硬、密不透风的岩石里！这种被封存在极其致密岩石微小孔隙中的宝贵资源，就叫致密油气。它们像被锁在坚固“石头宝箱”里的宝藏，虽然储量巨大，但传统的钻井采油方式，就像用吸管去吸实心砖头里的水，根本吸不出来多少，经济上完全不划算。

这种“看得见、摸不着、采不出”的困境，严重影响着我们国家的能源安全。要知道，我们每天消耗的石油和天然气，有超过 70% 的石油和 40% 以上的天然气需要从国外进口。一旦国际风云变幻，能源供应就可能“卡脖子”，这关系到国家能源安全和民生大计的大问题！

那么，如何撬开这些坚固的“石头宝箱”，把里面的油气“宝贝”高效地开采出来呢？答案就是一项革命性的技术——水力压裂！你可以把它理解为给大地做一场精密的“岩石疏通手术”。正是这项技术，让曾经“死气沉沉”的致密油气藏焕发生机，极大地加速了它们的开采速度，成为了保障国家能源安全、把能源饭碗牢牢端在自己手里的关键利器！

一、石头里的困局——宝藏近在咫尺，却难以触及

1. 富饶的“地下粮仓”

中国地下的致密油气资源，好比一个巨大的“地下能源粮仓”。据估算，其技术可采量相当于数十亿吨石油和超十万亿立方米天然气！主要藏在鄂尔多斯盆地（如苏里格气田、长庆油田）、四川盆地（如涪陵、长宁-威远页岩气田）、松辽盆地等。如果这些资源能被有效开发，将极大充实我们自家的“粮仓”，减少对外“买粮”（进口）的依赖。

2. “磨刀石”里的油珠子：开采之难

想象一下普通砂岩储层像一块疏松多孔的海绵，油和气能相对自由地流出来。而致密储层呢？它更像一块被压得无比密实的磨刀石。里面的孔隙小得可怜（头发丝的几十分之一），而且彼此之间连通性极差。专业技术术语为渗透率极低。简单说，就是油气在这种“磨刀石”里流动极其困难，比在“海绵”里慢成千上万倍！传统直井打到这种储层，产量往往低到连成本都收不回来，成了“鸡肋”。

二、水力压裂——大地深处的“疏通手术”

水力压裂的核心思想，就是人工制造通道，连通孤岛。其原理可概括为“高压造路，砂粒撑桥”。

1. 第一步：高压“水枪”开岩缝

地面上的“超级泵车军团”（压裂机组）开足马力。它们由数十台甚至上百台重型卡车组成，核心是超大功率的柱塞泵（想象成无数个超高压注射器）。这些泵车将大量特制的“手术液”（压裂液）以排山倒海之势（压力超过 100 兆帕，相当于指甲盖大小面积承受 1000

公斤重量!)), 通过井筒注入几千米深的目标岩层。这股强大的液压如同无数把无形的高压水枪在地下猛烈冲击岩石。当压力超过岩石自身



的抗张强度时，岩石就被硬生生地“劈开”或“撑裂”，形成新的裂缝（主裂缝），并向四周延伸出许多细小的分支（次级裂缝）。

图 1 压裂车队（左图为泵车，右图为仪表车）

2. 第二步：砂粒“支架”保畅通

光有裂缝还不够！一旦停止注液，压力下降，裂缝会像有“记忆”的橡皮筋一样，很快重新合拢。解决之道在于支撑剂。在注入压裂液的中后期，将大量坚硬、耐磨的小颗粒（支撑剂）混入液流中，一起泵入新生成的裂缝。当施工结束，压力撤除，裂缝试图闭合时，这些被“冲”进裂缝深处的小颗粒就起到了微型“千斤顶”或“防塌方支架”的作用。它们卡在裂缝里，阻止裂缝完全闭合，从而在致密的岩石中，永久性地撑开了一条条高导流的油气“高速公路”。



图 2 压裂液携带支撑剂

3. 第三步：构建“地下立体高速网”

最终，在目标储层内部，形成了一张复杂、立体、延伸数十至数百米的裂缝网络系统。这张网的巨大表面积（有时相当于几个足球场大小！），将原本互不连通的微小孔隙有效地串联起来，使得困在“孤岛”中的油气有了汇集和流向井筒的通道。效果如同在“磨刀石”里建造了一个四通八达的“高速公路网”，油气流动的阻力大大降低，流速和产量呈几何级数增长！



图 3 SY1 井桥射联作分段压裂施工现场

三、智慧升级——从“单行道”到“立体高速网”的工艺飞跃

现代水力压裂的惊人效果，不仅是靠蛮力，更是靠工艺智慧的结晶——“水平井+分段多簇体积压裂”。

1. “躺着挖宝藏”：水平井钻井技术

传统直井像一根垂直插入地下的“吸管”，与油层的接触面积非常有限。水平井钻井技术则是让钻头先垂直钻到油层顶部，然后近乎

水平地在油层内部横向“躺”着钻进数百米甚至上千米！这相当于把“吸管”加长“横躺在油层里”，与油气的接触面积几十倍甚至上百倍地增加。

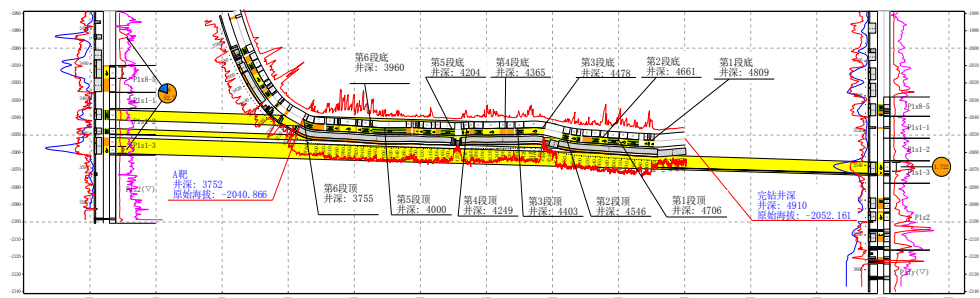


图 4 xxx 水平井井眼轨迹

2. “精准多点爆破起裂”：分段多簇压裂

光有长“吸管”还不够。需要在长水平段上精准地制造出大量裂缝入口。利用高科技井下工具（如可溶解桥塞、智能滑套），将长长的水平井筒分隔成许多独立的小“手术室”（分段，通常 15-30 段甚至更多）。在每个“手术室”内，用射孔枪在套管上精准射开多个孔眼群（簇，通常 3-6 簇）。压裂时，高压液流依次注入每个“手术室”，通过该段内的多个簇孔眼同时起裂岩石。这样就能在储层中一次性制造出密集、复杂、互相连通的立体裂缝网络（体积压裂），实现对储层体积的全方位、立体化改造。

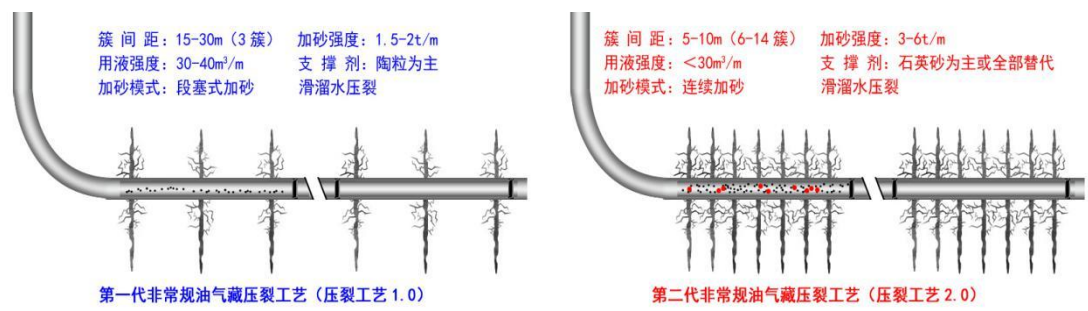


图 5 水平井体积压裂工艺示意图

3. 效果：

这种组合工艺彻底改变了早期单一裂缝的模式，单井控制的油气储量（泄油/气面积）和产量呈几何级数增长。一口水平井配合分段压裂的效果，往往相当于十几口甚至几十口传统直井！

四、赋能大国命脉——压裂技术筑牢国家能源安全基石

水力压裂技术对于加速开采致密油气、保障国家能源安全，具有不可替代的战略价值。

1. 国产油气“加速器”，产量跃升显成效：

正是依靠水力压裂技术，鄂尔多斯盆地的致密油气、四川盆地的页岩气等实现了规模化、效益化开发。长庆油田年产油气当量突破6500万吨，连续多年位居中国第一大油气田，其中致密油气贡献巨大。中国页岩气年产量已突破240亿立方米，跃居世界第二位。这些宝贵的国产增量，有效弥补了部分老油田的产量递减。

2. 唤醒“沉睡宝藏”，盘活巨量资源：

水力压裂技术这把“金钥匙”，成功解锁了占中国油气资源总量相当大比例的致密油气资源。这显著增加了国内能源供应的“家底”和战略纵深，让更多“沉睡”的资源转变为可利用的现实产能。

3. 提升自给能力，增强战略韧性：

国产油气产量的提升，直接降低了石油、天然气对外依存度。虽然依存度依然较高，但自主供给能力的增强，显著提升了我国应对国际油价剧烈波动、地缘政治冲突导致供应链中断等风险的能力，让国家能源供应的自主权、可控性大大增强。

4. 支撑国计民生，惠及千家万户：

稳定、可靠的国产油气供应，是国家经济社会平稳运行的基石。

工厂的机器需要能源驱动，城市的灯火需要能源点亮，千家万户的取暖做饭离不开清洁的天然气。致密油气的大规模开发，特别是页岩气的利用，直接保障了工业生产和居民生活的能源需求，也有力支持了区域经济发展。

五、挑战与未来——向着更深、更绿、更智能迈进

尽管成就斐然，挑战依然存在。成本优化方面，压裂作业成本高昂，持续降本为保障经济性的关键。环保要求方面，水资源消耗、返排液处理、甲烷逸散控制、微地震影响等需持续关注，推动更绿色环保的压裂技术（如无水/少水压裂、高效返排液处理回用技术）和严格监管。深层超深层开发方面，向更深、更复杂储层进军，对压裂装备、材料和工艺提出极限要求。

结语

水力压裂，这项“点石成金”的工程技术，已深刻改变了全球能源格局。对于中国而言，它不仅是解锁巨量致密油气资源、实现产量跨越式增长的核心利器，更是筑牢国家能源安全防线的战略支柱。从轰鸣的国产大功率压裂车组，到精心调配的滑溜水体系，再到高强度的人造陶粒支撑剂，每一次压裂作业，都是向大地深处索取清洁能源的壮举。面向未来，在保障安全、环保的前提下，持续推动水力压裂技术的自主创新与升级，高效开发利用好宝贵的致密油气资源，对于中国端牢能源饭碗、实现能源独立自主具有不可估量的重大意义。这片大地深处的“石头缝”宝藏，正通过科技之力，源源不断地转化为支撑国家繁荣发展的澎湃动力。