

油井水力压裂技术在油田开发中的应用分析

宋伟刚 丁志强

胜利油田油气井下作业中心滨南作业区

摘要：本文着重探讨了油井水力压裂的定义和关键组件，分析了油井水力压裂技术的主要特点，并且针对油田开发中油井水力压裂技术应用的关键步骤展开了相关研究，希望能够充分突显油井水力压裂技术的应用价值，扩大这项技术的应用范围，整体提升油田开发的效率、安全性和可持续性，从而打开全新的能源格局，满足整个社会的能源需求。

关键词：油井水力压裂技术；油田开发；应用分析

【DOI】10.12252/j.issn.2096-6261.2023.11.074

引言

油井水力压裂技术是油田开发中不可或缺的重要技术，可以显著提高生产率，最大限度地减轻对环境的影响，有效预防运营风险，高质量完成作业任务，在能源需求和环境保护之间取得平衡。深入了解油井水力压裂技术应用的关键步骤，才能彻底打破传统的作业模式，积极应对油田开发的复杂性，使油田开发迎来全新的发展机遇，拥有良好的发展前景。

一、油井水力压裂技术的简要概述

（一）定义

水力压裂是一种广泛用于从深层地下储层提取石油和天然气的增产技术。这一创新工艺涉及将高压流体混合物注入井筒中，以在目标岩层中产生裂缝或裂隙。这些裂缝充当通道，促进碳氢化合物（石油和天然气）从储层流向井眼，从而提高生产率和总体资源采收率。从本质上讲，水力压裂是一个多步骤的过程，需要仔细规划、执行和监控。它首先在地下岩层中钻探井眼，通常达到数千至数万英尺的深度。一旦达到所需的深度，就会用钢管和水泥对井进行套管，以提供结构完整性并防止流体迁移到周围地层中。

（二）关键组件

水力压裂的过程较为复杂，涉及各种组件的协同工作。这些组件包括：（1）支撑剂：支撑剂是注入岩层中形成的裂缝中的固体材料，以保持裂缝开放并促进石油和天然气的流动。这些材料有多种形式，包括沙子、陶瓷珠和树脂涂层沙子。支撑剂的选择取决于地层的地质特征、井深和所需的裂缝导流能力等因素。由于其可用性和成本效益，沙子是最常用的支撑剂。它通常由精细研磨的二氧化硅颗粒组成，能够承受高压和高温。陶瓷支撑剂具有更高的强度和抗破碎性，使其适用于更深的井和更恶劣的油藏条件。树脂涂层砂可增强耐用性和导电性，同时最大限度地减少细粉迁移和支撑剂回流。

支撑剂的尺寸和浓度经过精心选择，以优化裂缝导流能力并确保长期油井产能。支撑剂在裂缝内的正确放置和分布能最大限度地提高储层中的石油和天然气采收率。

（2）压裂液：压裂液在水力压裂过程中充当支撑剂和化学添加剂的载体介质。这些液体主要由水组成，并辅以各种添加剂，以提高性能并解决操作过程中遇到的特定挑战。水构成压裂液的大部分，通常占总体积的90%或更多。它作为将支撑剂输送到裂缝中并施加水压以在岩层中产生和扩展裂缝的主要介质。水还充当溶剂，促进化学添加剂的溶解和分散。将化学添加剂加入到压裂液中以实现特定的目标，例如黏度控制、流体稳定性、减少摩擦、杀菌活性和阻垢。常见的添加剂包括减摩剂、表面活性剂、杀菌剂、缓蚀剂、pH调节剂和阻垢剂。这些添加剂经过精心挑选和配制，以优化压裂液的性能，同时最大限度地降低环境和运营风险。胶凝剂用于增加压裂液的黏度，使其能够悬浮支撑剂并在高压条件下保持裂缝宽度。可以添加交联剂以增强胶凝剂的有效性，从而更好地控制流体黏度和裂缝导流能力。

（3）泵和搅拌机：高压泵和混合器是水力压裂过程的重要组成部分，负责以所需的速率和压力向井下输送压裂液和支撑剂。这些泵能够产生数千至数万磅每平方英寸（psi）的压力，具体取决于储层深度和地层特征。泵用于将压裂液加压至足以在岩层中引发和扩展裂缝的水平。它们配备了复杂的控制系统，可以实时调节流体流量、压力和成分，从而精确控制压裂过程。混合器用于在注入井之前在地面将压裂液与支撑剂和化学添加剂混合。它们确保支撑剂和添加剂在整个流体中均匀分散，最大限度地减少不一致性并优化压裂性能。搅拌机还可以采用实时监控和数据分析等先进技术，以提高运营效率和可靠性。

二、油田开发中油井水力压裂技术的主要特点

（一）大容量水力压裂技术

大容量水力压裂 (HVHF) 是一种在高压下将大量压裂液注入井眼以在储层内形成广泛的裂缝网络的技术, 通常用于低渗透性的深层页岩地层, 因为在这些地层中, 传统的钻井和完井方法不足以满足生产需求, 可能导致生产率过低。该技术的主要特点包括: (1) 大量压裂液: HVHF 作业涉及在相对较短的时间内将数百万加仑的压裂液注入井眼。需要大量的流体来产生大量裂缝并将其传播到储层深处, 从而增加可用于碳氢化合物提取的表面积。(2) 高泵送压力: 为了克服岩层的阻力并引发裂缝, HVHF 作业需要数千至数万磅每平方英寸 (psi) 的高泵送压力。这些压力由强大的泵产生, 能够以超过每分钟数千加仑的速度输送流体。(3) 广泛的裂缝网络: HVHF 的目标是创建一个复杂的互连裂缝网络, 与储层内的天然裂缝和层理面相交。该网络增强了地层的渗透性, 从而改善了流体流动并增加了碳氢化合物的采收率。(4) 多级压裂: HVHF 作业通常涉及多级压裂技术, 其中沿井眼的多个层段依次压裂, 以最大限度地提高储层接触和生产潜力。每个阶段都涉及将压裂液和支撑剂注入井眼的隔离部分, 从而在整个储层中形成一系列裂缝。

(二) 小量水力压裂技术

小量水力压裂 (LVHF) 是一种向井筒注入少量压裂液的技术, 通常与先进的压裂技术相结合, 以实现高效的储层增产。该技术的主要特点包括: (1) 减少流量: 与 HVHF 相比, LVHF 作业使用的压裂液量要少得多, 通常每级使用数千至数万加仑。减少的流量有助于最大限度地减少对环境的影响、用水量和流体处理要求。

(2) 优化裂缝设计: LVHF 作业的重点是优化裂缝设计和布置, 以最大限度地提高储层接触面和生产效率。先进的建模技术和井下监测工具通常用于设计适合特定油藏特征和生产目标的压裂处理方法。(3) 先进压裂技术: LVHF 可以采用先进的压裂技术, 例如精确压裂, 即沿井眼的目标间隔选择性地引发裂缝, 或分段压裂, 即顺序形成多个较小的裂缝, 以刺激储层的不同部分。这些技术可以实现精确的油藏管理和生产潜力的优化。

(4) 环境考虑因素: LVHF 运营通过最大限度地减少用水量、地表干扰和地下水污染风险, 优先考虑环境可持续性和法规合规性。可以使用凝胶氮气或二氧化碳等替代压裂液来减少对水基液体的依赖并减轻对环境的影响。

(三) 水平水力压裂技术

水平水力压裂 (HHF), 也被称为水平钻井或定向钻井, 这是一种通过目标地层水平钻探井眼, 然后注入

压裂液和支撑剂以形成垂直于井眼轴线的裂缝的技术。该技术的主要特点包括: (1) 水平井眼: HNF 作业首先将垂直或倾斜井眼钻至一定深度, 然后水平转向穿透目标地层。水平钻井可以增加与储层的接触, 最大限度地与含碳氢化合物岩石接触并提高生产潜力。(2) 多级压裂: HNF 作业通常采用多级压裂技术, 类似于 HVHF, 其中水力压裂沿着井眼的水平部分以规则的间隔开始。每个阶段都涉及注入压裂液和支撑剂, 以形成垂直于井眼轴线的裂缝, 从而增加可用于碳氢化合物提取的表面积。(3) 储层接触: 与垂直钻井相比, HNF 能够实现更大的储层接触, 因为水平井眼与多层含碳氢化合物岩石相交。这种增加的接触改善了流体流动并有利于从储层中提取石油和天然气。(4) 提高生产率: 与单独的垂直钻井相比, HNF 作业通常会带来更高的生产率和最终采收率。通过最大化储层接触并形成广泛的裂缝网络, HNF 增强了地层的渗透性并改善了流向井眼的流体, 从而在井的使用寿命内增加了碳氢化合物的产量。

三、油田开发中油井水力压裂技术应用的关键步骤

(一) 井眼钻井和套管

井眼钻井和套管是油井水力压裂过程的首要步骤。此阶段涉及: (1) 钻机设置: 将钻机调至井场并放置在指定的钻井位置上。钻机人员组装和安装必要的设备, 包括井架、钻杆和钻井液循环系统。(2) 钻井作业: 钻井过程开始于将钻头插入地表, 然后钻柱旋转并向下移动以穿透岩层。钻井泥浆是水、黏土和添加剂的混合物, 通过钻杆循环以润滑钻头、冷却钻井设备并将岩屑带到地面。(3) 地层评估: 在钻井过程中定期进行测量和取样, 以评估地层特征, 包括岩石类型、孔隙度、渗透率和流体含量。这些信息可帮助地质学家和工程师优化井位并选择合适的水力压裂间隔。(4) 套管安装: 达到所需深度后, 将钢套管柱插入井眼并固结到位, 以提供结构支撑、隔离地层并防止流体运移。根据油井设计和监管要求, 可以安装多层套管, 包括表层套管、中间套管和生产套管。(5) 固井作业: 水泥浆被泵入套管并循环到套管和井壁之间的环形空间中。水泥在套管和周围岩石之间凝固并形成持久的黏结, 密封流体运移的潜在路径并确保井的完整性。

(二) 断裂起始

完成钻井和套管作业后, 水力压裂过程的下一步是裂缝起裂。此阶段涉及: (1) 射孔: 将射孔枪或聚能射孔弹放入井筒中并定位在目标地层对面。这些设备用于在套管和周围的水泥中形成开口或穿孔, 使水力压

裂液进入储层。(2) 裂缝测绘: 部署实时井下监测工具, 例如压力计、温度传感器和声学设备, 以监测裂缝扩展并确保储层内的最佳位置。先进的建模技术和数据分析用于预测裂缝行为并相应地调整泵送参数。(3) 注入控制: 压裂液在高压下被泵入井眼, 以在目标地层中引发裂缝。仔细控制泵送速率、压力和流体成分, 以优化裂缝萌生和扩展, 同时最大限度地降低地层损害或流体流失的风险。(4) 裂缝扩展: 当压裂液注入井眼时, 它通过克服岩石的围压和抗拉强度在岩层中产生裂缝。这些裂缝从井眼向外延伸, 为石油和天然气从储层流到井眼创造了通道。

(三) 压裂液的泵送

裂缝开始后, 水力压裂过程需立即将压裂液泵入井眼。此阶段涉及: (1) 流体注入: 高压泵用于以受控的速率和压力将压裂液注入井眼。压裂液通常由水、化学添加剂和支撑剂组成, 它们悬浮在流体中并被带入裂缝中。(2) 流体成分: 压裂液的成分经过精心设计, 以优化裂缝导流能力、流体流动性和储层相容性。可包含化学添加剂以控制黏度、减少摩擦、防止腐蚀、抑制细菌生长和增强支撑剂输送。(3) 支撑剂输送: 支撑剂(例如沙子或陶瓷珠)与压裂液混合并注入裂缝中, 以在泵送压力释放后保持裂缝打开。根据储层特征和生产目标选择支撑剂浓度和尺寸, 以最大限度地提高裂缝导流能力和油气采收率。(4) 泵送参数: 密切监测和实时调整泵送速率、压力和流体体积, 以优化裂缝几何形状、流体分布和储层接触。压裂处理可以设计为多个阶段或间隔, 以刺激储层的不同部分并最大限度地提高生产潜力。

(四) 支撑剂注入

泵送压裂液后, 水力压裂过程的下一阶段是注入支撑剂。此阶段涉及: (1) 支撑剂浆料制备: 支撑剂, 例如砂或陶瓷珠, 在表面混合装置中与压裂液混合以形成支撑剂浆料。然后将泥浆泵入井眼并与压裂液一起带入裂缝中。(2) 支撑剂注入: 支撑剂浆液在高压下注入裂缝中, 导致裂缝扩展并延伸到储层中。当压裂液流回地面时, 支撑剂沉入裂缝中, 使裂缝保持打开状态, 并在泵送压力释放后防止裂缝闭合。(3) 支撑剂浓度和尺寸: 支撑剂的浓度和尺寸是根据储层特征、地层渗透率和生产目标精心选择的。较高的支撑剂浓度和较小的颗粒尺寸通常用于渗透率较低的地层, 以最大限度地提高裂缝导流能力和油气采收率。(4) 支撑剂回流控制: 采取措施尽量减少支撑剂回流到地面并确保长期裂缝导流能力。这些可能包括使用树脂涂层支撑剂、化学

添加剂或转向剂来增强支撑剂填充稳定性并减少细粒迁移。

(五) 骨折闭合

裂缝闭合是水力压裂过程的最后阶段, 一旦泵送作业停止, 裂缝自然开始闭合。此阶段涉及: (1) 压力释放: 压裂作业完成后, 泵送作业停止, 井筒中的压力逐渐释放。随着压力降低, 由于周围岩石的自然应力和压实作用, 裂缝开始闭合。(2) 支撑剂充填层形成: 压裂过程中沉积在裂缝中的支撑剂充当机械支柱, 防止裂缝完全闭合。随着时间的推移, 支撑剂沉淀成固结的支撑剂充填层, 保持裂缝导流能力并为石油和天然气流向井眼提供通道。(3) 储层再加压: 随着裂缝闭合和支撑剂充填固结, 由于碳氢化合物和天然储层流体的积聚, 储层可能会经历再加压。这种增加的压力有助于在油井的整个使用寿命期间维持生产率并保持储层连通性。(4) 生产作业: 一旦裂缝闭合, 油井通常会投入生产, 并利用泵或天然储层压力将石油和天然气生产到地面。在此基础上, 可以通过定期维护, 制定不同类型的维护方案, 选择应用一系列的维护方法, 同时加强油井干预和油藏管理实践, 持续监控生产率并全面优化油井性能。

结语

总而言之, 油井水力压裂技术具有极高的应用价值, 不仅重塑了能源格局, 为油田开发提供了很大便利, 而且推动了经济增长, 确保了能源安全, 平衡了能源需求, 可谓一举数得。因此, 在今后的油田开发实践中, 油井水力压裂技术应该得到更好的应用, 通过延长油井的开采期限, 展开更大范围的能源供应, 为更具弹性和可持续的能源未来铺平道路。

参考文献

- [1] 李绍凤. 油井压裂增产技术及其创新[J]. 化学工程与装备, 2022(08): 84-85.
- [2] 孙琳峰. 水力压裂增透技术的应用[J]. 化学工程与装备, 2022(07): 66-67.
- [3] 朱新宇. 油井压裂增产技术及创新[J]. 化学工程与装备, 2022(01): 66-67.
- [4] 贾进章, 葛佳琪, 甄纹浩, 赵丹. 水力压裂增透技术及应用研究[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(10): 63-68.
- [5] 张有河. 高压水力压裂切顶技术在综采工作面初采放顶中的应用[J]. 煤炭与化工, 2022, 45(02): 5-8+53.