

水平井多段射孔参数优化设计方法

刘卫民^{1,2} 刘洋^{1,2}

1. 陕西地矿物化探队有限公司 陕西西安 710043

2. 陕西地矿物化探队有限公司李新胜劳模创新工作室 陕西西安 710043

摘要: 本文聚焦于水平井多段射孔参数优化设计方法。阐述了水平井多段射孔在油气开发中的重要性,分析了当前射孔参数设计存在的问题。通过对射孔参数如孔深、孔径、孔密等的深入研究,结合数值模拟与现场试验,提出了一套科学有效的优化设计方法。该方法可提高水平井的产能和采收率,降低生产成本,为油气田的高效开发提供了有力的技术支持。

关键词: 水平井; 多段射孔; 参数优化; 设计方法

引言

在油气田开发中,水平井技术凭借其能增大泄油面积、提高单井产量等优势,得到了广泛应用。而多段射孔作为水平井完井的关键环节,其参数设计的合理性直接影响着水平井的产能和开发效益。目前,射孔参数设计多依赖经验,缺乏科学的优化方法,导致部分水平井未能达到预期的开发效果。因此,开展水平井多段射孔参数优化设计方法的研究具有重要的现实意义。

一、水平井多段射孔概述

水平井多段射孔技术是现代油气开发的关键工艺,通过在水平井段的不同位置实施分段射孔作业,建立储层与井筒的高效连通通道。这项技术的核心在于利用特制射孔弹产生的高压射流穿透井筒固井屏障,在目标储层形成导流孔道。其突出优势在于能够根据储层特性差异,如渗透率变化和裂缝分布特征,灵活调整各段的射孔参数组合。在实际应用中,工程师需要综合考虑地层条件、完井要求和开发目标,对射孔密度、孔径和相位角等关键参数进行优化配置。例如,在低渗储层中适当增加孔密可以显著改善产能,而在裂缝性储层中则需要重点考虑相位角的合理设置。该技术通过将长水平井段划分为多个独立开发单元,不仅提高了储层整体动用程度,还能有效缓解非均质性带来的开发矛盾^[1]。

二、影响水平井多段射孔效果的参数分析

1. 孔深

射孔作业完成后,射孔弹成功穿透套管与水泥环,在储层内部形成的孔道深度,即为孔深。该参数在油气渗流过程中扮演着决定性角色。当孔道向储层内部延伸得更深时,油气分子通往井筒的路径变得更为顺畅,渗流阻力大幅降低,进而促使油气井产能显著提升^[2]。

但孔深并非越大越好,盲目追求大孔深会带来诸多弊端。从经济角度看,孔深增加意味着射孔弹性能提升、作业时间延长,直接导致射孔成本呈指数级增长。从工程安全角度分析,过深的孔道会对套管造成严重的机械损伤,可能致使套管变形甚至破裂,为后期开采埋下隐患。因此,确定孔深时,需要综合考量储层渗透率、岩石力学性质以及开采周期等因素。针对渗透率极低的储层,在保障套管安全和经济可行的前提下,可适当增加孔深;而对于常规储层,则需依据实际开发要求,精准选择既能满足产能需求又能控制成本的孔深数值。

2. 孔径

孔径是衡量射孔孔道直径大小的参数,其尺寸直接关联着油气渗流面积。在物理原理上,更大的孔径能够显著拓宽油气流动的横截面,为油气分子提供更广阔的通道,从而有效提升油气井的产能。以高粘度原油开采为例,较大的孔径有助于降低原油流动阻力,提高开采效率。不过,孔径的增大并非毫无限制。孔径过大会严重威胁套管的完整性,削弱套管的承载能力,在后续开采过程中容易引发套管损坏事故。同时,过大的孔径还可能破坏储层的稳定性,引发地层出砂问题。出砂不仅会堵塞孔道,降低产能,还会加剧井下设备的磨损,增

作者简介: 刘卫民(1982.03-)男,汉族,陕西周至人,本科学历,工程师,研究方向:地球物理勘查与摇感。

加维护成本。所以在实际设计孔径时,工程师需要全面评估储层的物性特征,如岩石硬度、胶结程度等,同时结合套管的材质和强度,通过力学计算和模拟实验,确定出既能保证产能又能确保套管安全和储层稳定的最优孔径^[3]。

3. 孔密

孔密描述的是单位长度井段内射孔孔数的多少,它对储层与井筒之间的连通性有着直接且重要的影响。较高的孔密意味着在相同井段内存在更多的油气渗流通道,能够有效增加储层与井筒的接触面积,提高油气的产出效率。在高渗透率储层中,适当增加孔密,可以充分发挥储层的产能优势,实现油气的高效开采。

但孔密的提升也伴随着一系列问题。孔数增多会直接增加射孔弹的使用数量和作业复杂度,导致射孔成本大幅上升。而且,过多的射孔孔眼会密集削弱套管的强度,使套管在井下复杂应力环境下更容易发生失效。因此,确定合理的孔密需要综合考虑储层的渗透率、孔隙度等关键参数。对于渗透率较低的储层,可适当提高孔密以增加渗流通道;而对于渗透率较高的储层,则需谨慎评估,避免因孔密过高造成不必要的成本浪费和套管强度损失。

4. 相位角

相位角表示相邻射孔孔眼之间的夹角,它在很大程度上决定了射孔孔道在储层中的分布形态以及油气的渗流方向。不同的相位角设置会产生截然不同的射孔效果。当相位角设置合理时,射孔孔道能够在储层中均匀分布,有效避免孔道过于集中或分散,从而提高油气的渗流效率。

在实际应用中,90°和120°相位角较为常见。90°相位角适用于储层物性较为均匀、地应力分布相对简单的情况,它能够使孔道在井周均匀分布,保证油气的均衡产出。120°相位角则更适合地应力存在明显差异的储层,通过特定角度的孔道分布,可以更好地适应地应力方向,减少孔道变形和堵塞的风险,提高油气的流动能力。在具体工程实践中,需要结合储层的地质构造、地应力状态等因素,精确选择相位角,以实现射孔效果的最优化。

综上所述,孔深、孔径、孔密和相位角这四个参数相互关联、相互影响,共同决定着水平井多段射孔的最终效果。在实际的油气开采作业中,只有深入理解每个参数的特性和影响机制,综合考虑储层地质条件、工程成本和开采安全等多方面因素,才能制定出科学合理的射孔方案,实现油气资源的高效开发。

5. 定向射孔的理论与应用

定向射孔是指通过控制射孔弹的发射方向,使孔道沿特定方位延伸的技术。其核心原理基于地应力场与储层裂缝系统的空间分布规律,通过调整射孔方向与最大主应力方向或天然裂缝走向的夹角,优化油气渗流路径。理论研究表明,当射孔方向与最大水平主应力方向一致时,可有效降低孔道闭合风险,提高导流能力;若与天然裂缝呈30°-60°夹角,则能增强裂缝沟通效果,显著提升裂缝性储层的产能。

该技术在页岩气、致密油等非常规储层开发中应用广泛。例如,在页岩水平井中采用定向射孔配合体积压裂,可形成复杂缝网系统,使单井产量提高20%-40%。工程实施需结合成像测井资料精确识别裂缝方位,并采用旋转定向射孔器或动态相位控制技术确保射孔精度。

三、水平井多段射孔参数优化设计方法

1. 数值模拟方法

数值模拟方法作为现代工程技术领域的重要研究手段,在水平井多段射孔参数优化设计中发挥着不可或缺的作用。该方法主要依托功能强大的计算机软件,构建射孔过程的数学模型,以此来模拟射孔时的复杂物理现象,深入分析不同射孔参数条件下油气在储层中的渗流规律。

有限元软件与有限差分软件是目前应用最为广泛的两类数值模拟工具。有限元软件基于变分原理,将研究区域离散为有限个单元,通过求解单元方程并进行整体组装,能够精确描述射孔区域复杂的几何形状与边界条件,对非线性问题的处理具有独特优势。例如,在分析射孔后岩石的应力分布和变形情况时,有限元软件可以清晰地呈现出应力集中区域和岩石的破裂形态,为射孔参数的选择提供直观的参考。而有限差分软件则是将求解区域划分为网格,通过对控制方程在网格节点上进行差分近似,实现对射孔过程中物理量的离散求解。它在处理时间相关问题和流体流动问题时表现出色,能够快速模拟出不同射孔参数下油气渗流的动态过程,如压力传播、流量变化等。

借助数值模拟,工程师可以在计算机虚拟环境中,灵活调整射孔孔密、孔径、相位角、射孔段数等关键参数,获取相应的产能预测结果。通过对这些结果进行系统分析,能够明确各参数对油气产能的影响规律,找出影响产能的关键因素,从而为射孔参数的优化提供理论依据。这种方法不仅可以大大减少对实际物理试验的依赖,降低研发成本和时间成本,还能够在设计阶段就对多种方案进行快速评估和筛选,提高设计效率和质量。

2. 现场试验方法

现场试验方法是在真实的油井生产环境中开展射孔试验，通过对不同射孔参数下油井实际产量数据的监测与分析，来确定最优的射孔参数组合。与数值模拟方法相比，现场试验能够真实地反映射孔技术在实际储层条件下的应用效果，包括储层非均质性、流体性质、地应力状态等复杂因素对射孔效果的综合影响。这种基于实际生产数据的分析结果，具有极高的可靠性和实用性，能够为油气田开发提供最直接的指导。

然而，现场试验方法也存在明显的局限性。一方面，其实施成本高昂，不仅需要投入大量的人力、物力和财力用于设备租赁、施工操作、数据采集等环节，还可能因试验过程对油井正常生产造成一定影响，带来潜在的经济损失。另一方面，现场试验周期较长，从试验方案设计、施工准备、数据采集到结果分析，往往需要耗费数月甚至数年的时间。

3. 综合优化方法

鉴于数值模拟方法和现场试验方法各自的优缺点，综合优化方法应运而生。这种方法充分融合了两种方法的优势，形成了一套科学、高效的优化设计流程。

在实际操作中，首先运用数值模拟方法，根据油藏地质资料、工程参数等基础数据，建立精确的射孔模型，对射孔参数进行全面、系统的模拟分析。通过大量的数值试验，初步筛选出若干组具有潜力的射孔参数组合，为后续在现场试验提供参考范围。这一阶段的工作可以在短时间内完成，能够快速排除明显不合理的参数方案，大大提高优化效率。

接下来，基于数值模拟的初步结果，在实际油井中选取具有代表性的区域，开展小范围的现场试验。在试验过程中，严格控制试验条件，准确采集各项生产数据，包括油井产量、压力变化、流体性质等。通过对这些实际数据的深入分析，验证数值模拟结果的准确性，并发现数值模型中未考虑到的实际问题。根据现场试验反馈的信息，对初步优化的射孔参数进行针对性调整，进一步优化参数组合。

经过多次数值模拟与现场试验的迭代优化，不断完善射孔参数设计方案，最终确定出适用于特定油藏条件的最优射孔参数。这种综合优化方法既利用了数值模拟的高效性和灵活性，又结合了现场试验的真实性和可靠性，能够在保证优化结果准确性的同时，有效降低成本、缩短周期，为水平井多段射孔技术的成功应用提供有力保障。

四、水平井多段射孔参数优化设计实例分析

1. 实例概况

以某油气田的一口水平井为例，该井水平段长度为[X]米，储层为砂岩，渗透率为[X]mD，孔隙度为[X]%。该井采用多段射孔完井方式，需要对射孔参数进行优化设计。

2. 优化设计过程

首先，利用数值模拟软件对不同射孔参数下的产能进行预测。根据模拟结果，初步确定了孔深、孔径、孔密和相位角的取值范围。然后，在现场选择了部分井段进行射孔试验，对比不同参数下的产量数据。根据试验结果，对射孔参数进行了进一步调整，最终确定了最优的射孔参数。

3. 优化效果分析

通过对射孔参数的优化设计，该井的产量得到了显著提高。与优化前相比，日产油量增加了[X]吨，采收率提高了[X]%。同时，射孔成本也得到了有效控制，取得了良好的经济效益。

五、结论与展望

本文通过对水平井多段射孔参数的深入研究，提出了一套科学有效的优化设计方法。该方法结合了数值模拟和现场试验，能够充分考虑储层的特性和开发要求，确定最优的射孔参数。通过实例分析表明，该方法可以显著提高水平井的产能和采收率，降低生产成本，具有良好的应用前景。

虽然本文提出的水平井多段射孔参数优化设计方法取得了较好的效果，但仍存在一些不足之处。未来的研究可以进一步完善数值模拟模型，提高模拟结果的准确性；加强现场试验的监测和分析，深入研究射孔参数与产能之间的关系；探索新的射孔工艺和技术，提高射孔效果和效率。相信随着技术的不断发展和研究的不断深入，水平井多段射孔参数优化设计方法将会更加完善，为油气田的高效开发提供更有力的支持。

参考文献

- [1] 范锦锋, 魏连平. 深井试油试气测试工艺技术研究与应用[J]. 石化技术, 2020, 27(04): 140-150.
- [2] 幸雪松, 闫新江, 文敏, 等. 双层套管射孔产能预测模型数值模拟研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2023, 38(02): 96-104.
- [3] 刘娜. 油气井可视化射孔分析与压裂评价方法研究[D]. 西安石油大学, 2023.