

低渗透油藏井下压裂增产效果的主控因素研究

闫雨佳

川庆钻探长庆井下靖边项目部 陕西 西安 710016

摘要：低渗透油藏作为全球石油资源的重要组成部分，其增产效果的主控因素研究对于提高采收率和保障能源供应具有重要意义。本研究综合运用地质、工程和流体等多学科理论，通过数值模拟和实验分析相结合的方法，深入探讨了地质因素（如储层物性、地应力状态）、工程因素（如压裂液性能、支撑剂设计）和流体因素（如原油性质、压裂液配伍性）对低渗透油藏井下压裂增产效果的影响机制，为优化压裂设计和提高增产效果提供了理论依据和技术支持。

关键词：低渗透油藏；井下压裂；增产效果；主控因素；开采效益

引言：随着全球能源需求的不断增长和常规石油资源的日益枯竭，低渗透油藏的开发已成为石油工业的重要方向。低渗透油藏渗透率低、产能有限，需要采用有效的增产技术来提高采收率。井下压裂作为一种重要的增产手段，其效果受到多种因素的共同影响。开展低渗透油藏井下压裂增产效果的主控因素研究，对于优化压裂设计、提高增产效果和保障能源供应具有重要意义。

1 低渗透油藏与压裂技术概述

1.1 低渗透油藏的定义

低渗透油藏是指基质渗透率较低的油藏，通常是指低渗透的砂岩油藏。低渗透油藏是一个相对的概念，其定义并没有全球统一的标准和界限，而是根据不同国家、不同时期的资源状况和技术经济条件而划定的。因此，关于低渗透油藏的各项参数变化较大。在我国，根据实际生产特征和油层平均渗透率的大小，低渗透储层被进一步划分为三类：一般低渗透储层、特低渗透储层和超低渗透储层。一般低渗透储层的渗透率接近正常油藏，但产量较低，需要采取压裂技术才能取得较为正常的采收率。特低渗透储层的渗透率与正常油藏相比差异较大，难以开采，需要配合较多的较大型技术措施才能较为有效地投产。超低渗透储层的油层非常致密，渗透率和正常油藏相比差异非常明显，基本不具备开发价值，但如果这类油藏埋藏较浅、油层较厚，在先进技术的配合下，也可以进行开发，并取得一定的经济效益。低渗透油藏多生成于中、新生代陆相盆地，具有一些基本沉积特征。储油层一般呈现出非均质性、低渗透率、地下裂缝多且细微、液体流动阻力大、液液和液固面相互作用力大的特点。这些特点导致低渗透油藏在正常生产中出现稳产状态差、产量低、注水井吸水力差等问题。如何解决这些问题，是石油行业急需研究的重要课题。

1.2 压裂技术的基本原理

压裂技术，特别是水力压裂技术，是低渗透油藏开发中常用的增产措施。水力压裂的基本原理是通过高压大排量的泵，利用液体传压的原理，将具有一定粘度的液体以大于油层吸收能力的排量向井内注入，使井筒内的压力逐渐提高。当压力增高到大于油层破裂所需要的压力时，油层就会形成一条或几条水平或垂直裂缝。继续注入液体时，裂缝会向油层深处延伸与扩展，直到液体注入速度等于油层渗透速度时，裂缝才会停止延伸与扩展。为了防止停泵后裂缝闭合，需要在挤入的液体中加入支撑剂（如石英砂、核桃壳等），使油层中形成导流能力很强的添砂裂缝。这些裂缝改变油层的渗滤条件，显著降低流动阻力，增加流动面积，从而提高产量。压裂增产的主要原理包括：（1）改变渗滤条件：压裂前，油从地层流向井底遵循平面径向流规律，流动面积越来越小，流动阻力越来越大。压裂后，形成了填砂裂缝，导流能力高，流动面积增大，流动阻力大大下降，使产量大大提高^[1]。（2）突破近井堵塞带：油井在生产过程中，地层中的各种杂质等堵塞物随油流带到井底附近，形成堵塞带，导致油流流动困难。当裂缝穿过了堵塞带后，油就通过裂缝流向井底，阻力减小，产量提高。（3）扩大、沟通地层中原有的微裂缝：压裂过程中，裂缝会扩大并沟通地层中原有的微裂缝，进一步提高了产量。随着低渗透油气藏开发的不断深入，体积压裂技术逐渐崭露头角。体积压裂是在水力压裂过程中，使天然裂缝不断扩张和脆性岩石产生剪切滑移，形成天然裂缝与人工裂缝相互交错的裂缝网络，从而增加改造体积，提高初始产量和最终采收率。体积压裂技术特别适用于低渗、超低渗油气藏、致密气、煤层气、页岩气的经济有效开发。

2 低渗透油藏在全球石油资源中的重要性

低渗透油藏在全球石油资源中占据着举足轻重的地位。随着常规石油储量的日益减少，低渗透油藏作为一类重要的非常规油气资源，逐渐成为了全球石油勘探和开发的主要对象。这类油藏的特点在于渗透率低、丰度低、单井产能有限，但其储量巨大，分布广泛，涵盖了从砂岩、碳酸盐岩到火山岩等多种类型。在全球已探明的石油储量中，低渗透油藏所占比例显著，特别是在一些主要的产油国和地区，低渗透油藏更是成为了支撑油气产量稳产增产的关键因素。对于全球能源安全而言，低渗透油藏的开发具有重大战略意义。随着全球经济的快速发展和人口的不断增长，能源需求持续攀升，而常规石油资源的枯竭速度却在加快。低渗透油藏的高效开发不仅能够有效缓解能源供应紧张的局面，还能为各国提供更为稳定的能源来源，低渗透油藏的开发还促进相关技术的进步和创新，如压裂技术、水平井技术等，这些技术的应用不仅提高油气采收率，还降低开发成本，为全球石油工业的可持续发展注入新的活力。

3 低渗透油藏井下压裂增产效果主控因素的理论分析

3.1 地质因素

地质因素是影响低渗透油藏井下压裂增产效果的首要因素，主要包括地层岩石性质、储层物性、地应力状态及天然裂缝发育情况。地层岩石性质决定了压裂过程中裂缝的形成与扩展特性。例如，脆性岩石（如石英砂岩、碳酸盐岩）在压裂时更容易形成复杂裂缝网络，从而提高压裂效果；而塑性岩石则倾向于形成较窄且直的裂缝，增产效果相对较差，岩石的强度和硬度也会影响裂缝的扩展速度和方向。储层物性，如渗透率、孔隙度、含油饱和度等，直接影响压裂液的注入效率和裂缝的导流能力。渗透率低意味着流体流动阻力大，需要更高的压裂压力和更大的排量来形成有效裂缝。孔隙度则决定了储层的储集能力，高孔隙度有利于裂缝内支撑剂的均匀分布，提高裂缝的导流效率。含油饱和度则影响压裂液与原油的置换效率，进而影响压裂后的产能。地应力状态对裂缝的走向和形态具有决定性影响，在压裂过程中，裂缝总是沿着最小主应力方向扩展。天然裂缝的发育情况对压裂增产效果具有重要影响。天然裂缝的存在可以作为压裂液流动的通道，促进裂缝的扩展和沟通，过多的天然裂缝也可能导致压裂液过早泄漏，降低压裂效率。

3.2 工程因素

工程因素主要包括压裂液性能、支撑剂类型与用量、压裂施工工艺及参数等。压裂液的性能直接影响裂

缝的形成和扩展，理想的压裂液应具有低摩阻、高携砂能力、良好的造缝性能和易于返排的特点。压裂液的粘度、滤失性、破胶性能等参数需要根据储层特性进行优化调整，以提高压裂效率^[2]。支撑剂的选择和用量对裂缝的导流能力具有重要影响，支撑剂的粒径、强度、密度等特性需要与裂缝宽度和地层压力相匹配，以确保裂缝在长期生产过程中的稳定性。同时合理的支撑剂用量可以最大化裂缝的导流面积，提高产能。压裂施工工艺及参数的选择对压裂效果具有决定性影响。施工工艺包括压裂方式（如常规压裂、体积压裂等）、压裂阶段划分、压裂液注入顺序等。参数则包括压裂压力、排量、泵注时间等。这些工艺和参数的选择需要根据储层特性、压裂液性能和支撑剂特性进行综合优化，以实现最佳的压裂效果。

3.3 流体因素

流体因素主要包括原油性质、压裂液与原油的配伍性及压裂液返排性能。原油性质，如粘度、密度、凝固点等，会影响压裂液与原油的置换效率和流动性能。高粘度原油在压裂后难以被置换出裂缝，导致产能下降。压裂液与原油的配伍性对于压裂后的产能具有重要影响。配伍性差可能导致压裂液与原油发生乳化、沉淀等不良反应，降低裂缝的导流能力。压裂液的返排性能影响压裂后的产能恢复速度和最终采收率。返排性能差的压裂液容易在裂缝和地层中残留，导致地层伤害和产能下降。

4 低渗透油藏井下压裂增产效果主控因素的数值模拟研究

4.1 数值模拟模型的建立

在低渗透油藏井下压裂增产效果主控因素的数值模拟研究中，建立准确、高效的数值模拟模型是首要任务。该模型的建立需综合考虑地质、工程和流体等多方面的因素，以全面反映压裂过程中裂缝的形成、扩展及流体在裂缝和地层中的流动情况。地质因素方面，模型需包含储层的岩石力学性质（如弹性模量、泊松比、抗拉强度等）、储层物性（如渗透率、孔隙度、含油饱和度等）以及地应力状态（如最小主应力方向、大小等）。这些信息通过地质调查和测井数据获取，并作为模型输入参数。工程因素方面，模型需考虑压裂液的性能（如粘度、滤失性、破胶时间等）、支撑剂的类型与用量、压裂施工工艺及参数（如压裂压力、排量、泵注时间等）。这些因素通过实验室实验和现场测试确定，并作为模型的控制变量。流体因素方面，模型需考虑原油的性质（如粘度、密度等）、压裂液与原油的配伍性

以及压裂液的返排性能。这些因素通过化学分析和物理实验确定,并作为模型的重要参数。在模型建立过程中,还需考虑裂缝的扩展机制、流体在裂缝和地层中的流动规律以及裂缝与地层的相互作用。这通常涉及复杂的数学物理方程和数值求解方法,如有限元法、有限差分法、离散元法等。通过合理的假设和简化,可以建立适用于低渗透油藏压裂增产效果预测的数值模拟模型^[3]。

4.2 数值模拟结果与分析

建立好数值模拟模型后,接下来是对模型进行求解和分析。通过输入地质、工程和流体等方面的参数,模型可以模拟压裂过程中裂缝的形成、扩展以及流体在裂缝和地层中的流动情况。数值模拟结果显示,地质因素对压裂增产效果具有显著影响,储层的岩石力学性质决定了裂缝的形成和扩展特性,如脆性岩石更容易形成复杂裂缝网络,从而提高压裂效果。储层物性则影响压裂液的注入效率和裂缝的导流能力。地应力状态对裂缝的走向和形态具有决定性影响,准确把握地应力方向及大小对于优化压裂设计至关重要。工程因素对压裂增产效果同样具有重要影响,压裂液的性能直接影响裂缝的形成和扩展效率,合理的压裂液配方和注入参数可以显著提高压裂效果。支撑剂的选择和用量对裂缝的导流能力具有重要影响,合理的支撑剂设计可以最大化裂缝的导流面积。压裂施工工艺及参数的选择需要根据储层特性和压裂液性能进行优化调整,以实现最佳的压裂效果。流体因素对压裂增产效果的影响也不容忽视,原油性质会影响压裂液与原油的置换效率和流动性能,从而影响压裂后的产能。压裂液与原油的配伍性对于压裂后的产能具有重要影响,配伍性差可能导致压裂液与原油发生乳化、沉淀等不良反应,降低裂缝的导流能力。压裂液的返排性能则影响压裂后的产能恢复速度和最终采收率。通过对数值模拟结果的分析,可以深入了解压裂过程中裂缝的形成、扩展及流体在裂缝和地层中的流动规律,以及各主控因素对压裂增产效果的影响程度。这为后续优化设计 and 应用提供了重要依据。

4.3 数值模拟结果的优化与应用

基于数值模拟结果的分析,可以对压裂设计进行优化,以提高低渗透油藏的增产效果。优化方向主要包括

地质因素、工程因素和流体因素三个方面。在地质因素方面,可以通过调整压裂井位和压裂方向来优化裂缝的扩展路径,使裂缝更好地沟通储层中的天然裂缝和孔隙,提高储层的渗透率,根据储层物性的差异,可以制定差异化的压裂策略,以提高压裂效果。在工程因素方面,可以优化压裂液的性能和注入参数,如调整压裂液的粘度、滤失性和破胶时间等,以适应不同储层特性的需求。还可以优化支撑剂的类型、粒径和用量,以提高裂缝的导流能力^[4]。在压裂施工工艺方面,可以探索更加高效、环保的压裂方法和技术,如体积压裂、连续油管压裂等。在流体因素方面,可以优化原油的开采方式和压裂液的配伍性,以减少压裂过程中的地层伤害和产能下降,可以探索更加有效的压裂液返排技术,以提高压裂后的产能恢复速度和最终采收率。优化后的压裂设计可以应用于实际生产中,通过现场试验和监测来验证数值模拟结果的准确性和可靠性,还可以根据生产数据对数值模拟模型进行进一步的修正和完善,以提高模型的预测能力和精度。

结束语

在低渗透油藏井下压裂增产效果的主控因素研究中,深入探讨了地质、工程和流体等多方面因素对压裂效果的影响,取得了丰硕的研究成果。这些成果不仅揭示了压裂增产的复杂机制,也为优化压裂设计、提高采收率提供了科学依据和技术支撑。未来,将继续深化研究,探索更加高效、环保的压裂技术和方法,为低渗透油藏的高效开发贡献智慧和力量,推动石油工业的可持续发展。

参考文献

- [1]张洪涛.杨峰.《低渗透油藏压裂增产新技术研究,矿物岩石地球化学通报,2019,38(02):329-334.
- [2]陈海峰.张欣欣.杨云博,结束压裂对低渗透油藏开发效果影响研究,油田化工,2023,32(01):75-81.
- [3]刘强.吴敏.朱乾.低渗透油藏压裂液新体系研究,油气井测试,2018,27(06):26-30.
- [4]李伟平.韩启臣.申筠良.《低渗透油藏压裂增产方案总结与优化思路,石油钻探技术,2022,50(03):37-42.