

# 低渗透储层安全环保石油压裂技术探析

叶志强 张 伟

中石化西南石油工程有限公司井下作业分公司 四川 德阳 618000

**摘 要：**低渗透储层作为石油资源的重要组成部分，其开发面临诸多挑战。文章深入探析了低渗透储层安全环保石油压裂技术的最新进展，包括避射与前置液处理技术、高能气体压裂技术、封隔器分层压裂技术及水平井分段酸化压裂工艺等。通过对比分析这些技术的原理、优势及适用性，本文旨在为低渗透储层的高效、安全、环保开发提供理论支持和实践指导，推动石油工业的可持续发展。

**关键词：**低渗透储层；安全环保；石油压裂技术

**引言：**低渗透储层作为当前石油勘探开发的重要领域，其储量大、分布广，但开采难度大、成本高。随着环保意识的增强和安全生产要求的提高，传统压裂技术已难以满足低渗透储层高效、安全、环保开发的需求。因此探索和研究低渗透储层安全环保石油压裂技术显得尤为重要。本文旨在综合分析当前低渗透储层压裂技术的最新进展，探讨其在安全环保方面的优势与局限，为低渗透储层的可持续开发提供理论参考和实践指导。

## 1 低渗透储层特征与挑战

### 1.1 储层特征概述

低渗透储层是油气开发中具有重要意义的一类储层。其特征主要包括几个方面：第一，孔隙度低。低渗透储层的孔隙度通常小于10%，这意味着岩石中的孔隙空间相对较小，流体（如石油和天然气）在其中流动的难度较大。这种低孔隙度直接影响了储层的储集能力和流体流动性。第二，渗透率低。渗透率是衡量流体通过岩石孔隙能力的指标。低渗透储层的渗透率通常小于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，远低于中高渗透储层。这导致流体在储层中的流动速度缓慢，自然产能低下。第三，岩石致密坚硬。低渗透储层的岩石通常较为致密和坚硬，胶结程度高，这使得储层在开采过程中难以被有效压裂和改造。第四，微裂缝发育。尽管储层岩石致密，但在不均衡的地应力作用下，内部通常发育有较多的微裂缝。这些微裂缝虽然对渗透性能有一定的改善作用，但其连续性差、延伸范围小，因此改善程度有限。第五，水敏性强。由于低渗透储层中的粘土矿物含量较高，岩石的水敏性相对较强。这意味着在注水开采过程中，储层的渗透性能可能会因水的侵入而发生变化，影响开采效果。第六，储层非均质性。低渗透储层的非均质性较强，储层性质在空间上分布不均，这给开采带来了更大的挑战。

### 1.2 开采挑战分析

低渗透储层的开采面临多方面的挑战，由于储层孔隙度和渗透率低，自然产能通常很低，难以满足经济开采的需求。为了提高产量，往往需要采取压裂等增产措施，但这也会增加开采成本。注水开采是油气田开发中常用的方法，但在低渗透储层中，由于注水井吸水能力低、启动压力和注水压力高，注水效果往往不佳。这导致地层压力难以有效补充，影响开采效果<sup>[1]</sup>。低渗透储层在开采过程中，由于渗流阻力大、能量消耗快，地层压力下降迅速，稳产难度较大。见水后产液指数急剧下降，也增加了稳产的难度。虽然微裂缝对低渗透储层的渗透性能有一定的改善作用，但其发育不均、连续性差，使得开采过程中难以形成有效的渗流通道，影响开采效率。由于低渗透储层的复杂性，开采过程中需要采用先进的技术和设备，如整体高效压裂、投球法多层压裂等。这些技术的应用需要较高的技术水平和成本投入。

## 2 低渗透储层在全球石油资源中的重要性

低渗透储层在全球石油资源中占据着至关重要的地位，其储量丰富，分布广泛，是许多国家石油资源的重要组成部分。随着全球能源需求的不断增长，石油资源的勘探和开发变得愈发重要。而低渗透储层，尽管开采难度较大，但其巨大的储量潜力使得其成为石油资源开发的重要方向。这些储层往往位于复杂的地质构造中，需要通过先进的勘探和开发技术来有效开采。低渗透储层的开发利用不仅有助于增加石油资源的供应量，还能够缓解能源供应紧张的局面，对于保障国家能源安全、促进经济发展具有重要意义。因此加强低渗透储层的勘探和开发，提高开采效率和技术水平，已成为全球石油工业发展的重要趋势。

## 3 传统压裂局限性分析

### 3.1 环境污染风险

传统压裂技术通常使用大量的化学剂，这些化学剂

在压裂过程中可能会泄漏到地层中，对地下水、土壤和生态环境造成潜在的污染风险。特别是在一些生态环境脆弱或敏感的地区，这种污染风险更为显著。这些化学剂可能包含有毒有害物质，一旦泄漏到环境中，可能对当地生态系统造成长期影响。压裂过程中产生的废水、废气和固体废弃物也需要妥善处理，否则也会对环境造成污染。因此传统压裂技术在环境保护方面面临着严峻的挑战，需要采取更加环保的压裂技术和方法来降低环境污染风险。

### 3.2 地层伤害问题

传统压裂技术可能会对地层造成一定的伤害，这种伤害主要来源于压裂过程中使用的化学剂和高压水流对地层岩石的破坏作用。由于低渗透储层的岩石致密、孔隙度低，压裂过程中产生的裂缝可能无法有效地沟通储层中的流体通道，导致流体流动困难。压裂过程中使用的化学剂可能会与地层岩石发生反应，改变其物理和化学性质，从而进一步降低储层的渗透性能。这种地层伤害问题不仅会影响开采效果，降低油井的产量和采收率，还会增加后续开采的难度和成本。

### 3.3 裂缝控制难度

传统压裂技术在裂缝控制方面存在一定的难度。由于低渗透储层的非均质性强、岩石性质复杂，裂缝的延伸和分布往往难以预测和控制<sup>[2]</sup>。在实际压裂过程中，裂缝可能会偏离预设方向或形成多条小裂缝，而无法形成有效的渗流通道。这种裂缝控制难度不仅会降低压裂效果，使得油井的产量和采收率难以达到预期目标，还会增加开采过程中的不确定性和风险。

### 3.4 能源损耗与成本问题

传统压裂技术在能源损耗和成本方面也存在一定的问题。由于压裂过程中需要大量的能量和化学剂，这不仅会增加开采成本，还会对能源资源造成一定的浪费。同时传统压裂技术的施工周期长、效率低，也会进一步增加开采成本和时间成本。这些问题使得传统压裂技术在低渗透储层开采中的经济性受到质疑。

## 4 安全环保石油压裂技术分析

在石油勘探与开发领域，压裂技术作为提高油气井产量的重要手段，经历了从传统到现代、从粗放到精细的转变。随着环保意识的增强和安全生产要求的提高，安全环保石油压裂技术应运而生，旨在减少环境污染、保障生产安全、提高压裂效率。

### 4.1 避射与前置液处理技术

避射技术是一种在压裂施工中精确控制压裂层位的技术，通过调整射孔位置，避免压开不需要的夹层或地

层，从而减少对非目标地层的伤害。这一技术尤其适用于油层埋藏深度适中、夹层较多且不易造缝的油井。通过避射技术，可以确保压裂液和支撑剂准确进入目标地层，提高压裂效率，同时降低对非目标地层的污染和伤害。在具体实施中，避射技术通常与前置液处理技术相结合。前置液是压裂施工中的关键组成部分，其主要作用是在压裂液之前注入地层，以破裂地层并造成一定尺寸的裂缝。前置液的选择和处理对于压裂效果至关重要。通过优化前置液的配方和注入参数，可以降低地层破裂压力，提高裂缝的延伸效率，前置液还可以携带一些特殊的化学剂，如降滤失剂、粘土稳定剂等，以减少压裂液对地层的污染和伤害。避射与前置液处理技术的结合应用，不仅可以提高压裂效率，还可以降低对非目标地层的伤害和污染。这一技术在实践中取得了显著成效，为石油勘探与开发提供有力支持。

### 4.2 高能气体压裂技术

高能气体压裂技术是一种利用火药或火箭推进剂在井筒中快速燃烧产生的高温高压气体压裂地层的技术。该技术通过产生多条辐射状裂缝，改善近井地带的渗透性能，从而增加油气井产量。高能气体压裂技术具有施工简便、设备需求少、对环境影响小等优点，尤其适用于低渗透油井或油田区块。在高能气体压裂过程中，气体发生器在目的层段引燃后，药柱以优化燃烧方式进行可控燃烧，迅速产生高温高压气体。这些气体对井壁形成脉冲加载，使井筒周围的岩石受到压缩<sup>[3]</sup>。当井筒内的压力超过对应加载速率下地层岩石的破裂压力时，即在井筒周围形成多条径向裂缝。这些裂缝的形成有助于改善地层的渗透性能，提高油气井的产量。与传统的水力压裂技术相比，高能气体压裂技术具有显著的优势。首先，高能气体压裂后形成的裂缝不能完全闭合，因此裂缝本身的导流能力强。其次，裂缝可以穿透伤害带，沟通近井带的天然裂缝，进一步改善地层的渗透性能。另外，高能气体压裂还可以降低地层的破裂压力，使得后续的水力压裂施工更加容易进行。最重要的是，高能气体压裂技术对环境的影响较小，符合当前环保要求。

### 4.3 安全性与环保性分析

安全环保石油压裂技术的核心在于确保施工过程中的安全性和对环境的友好性。在安全性方面，现代压裂技术采用了多种安全措施来降低施工风险。例如，通过精确控制压裂液和支撑剂的注入参数，可以避免地层过度破裂和井筒失稳等问题。采用先进的监测和预警系统，可以实时监测施工过程中的关键参数，及时发现并处理潜在的安全隐患。在环保性方面，安全环保石油压

裂技术注重减少化学剂的使用和废弃物的排放。通过优化压裂液的配方和注入参数,可以降低化学剂对地层的污染和伤害。采用先进的废水处理工艺,可以将废水中的有害物质去除或降低至安全水平,避免对环境和生态系统造成不良影响,还可以采用循环利用的方式,将废水中的有用成分回收利用,降低资源浪费。除了上述措施外,安全环保石油压裂技术还注重提高施工效率和降低能耗。通过采用先进的施工设备和工艺,可以减少施工过程中的能源消耗和排放。通过优化施工参数和流程,可以提高压裂效率和采收率,降低生产成本。

#### 4.4 封隔器分层压裂技术

封隔器分层压裂技术是一种利用封隔器将目的层与上下油层隔离开来,对目的层进行单独压裂的技术。该技术适用于多层油气井的开采,尤其是当各层之间的破裂压力存在差异时。通过封隔器分层压裂技术,可以对每一层进行精确的压裂施工,提高压裂效率和采收率。在实施封隔器分层压裂技术时,首先需要根据地质资料和井筒条件选择合适的封隔器和管柱组合。通过射孔作业在目的层形成孔眼,以便压裂液和支撑剂能够进入地层。利用封隔器将目的层与上下油层隔离开来,确保压裂液和支撑剂只进入目的层。通过精确的压裂施工参数和流程控制,对目的层进行压裂作业。封隔器分层压裂技术的优点在于可以精确控制压裂层位和压裂参数,提高压裂效率和采收率。该技术还可以降低对非目标地层的伤害和污染,符合当前的环保要求。在实践中,封隔器分层压裂技术已经取得显著成效,为多层油气井的开采提供有力支持。

#### 4.5 水平井分段酸化压裂工艺

水平井分段酸化压裂工艺是一种结合了水平井技术和酸化压裂技术的先进开采工艺。该技术通过在水平井的不同段进行酸化压裂作业,提高地层的渗透性能和采收率。水平井分段酸化压裂工艺适用于低渗透、高粘度、高含蜡等复杂油气藏的开采。在实施水平井分段酸化压裂工艺时,首先需要根据地质资料和井筒条件设计合理的井身结构和分段方案。然后在水平井的不同段进行射孔作业,形成孔眼以便酸液和压裂液能够进入地层。接下来利用酸化压裂技术对不同段进行压裂作业<sup>[4]</sup>。

在压裂过程中,酸液可以溶解地层中的堵塞物质,提高地层的渗透性能;压裂液可以形成裂缝并携带支撑剂进入地层,保持裂缝的张开状态。水平井分段酸化压裂工艺的优点在于可以显著提高地层的渗透性能和采收率。通过在不同段进行压裂作业,可以充分利用地层中的储量和能量。同时该技术还可以降低开采成本和提高生产效率。在实践中,水平井分段酸化压裂工艺已经取得了显著成效,为复杂油气藏的开采提供有力支持。水平井分段酸化压裂工艺还具有一定的灵活性,根据不同的地质条件和开采需求,可以调整酸化压裂的参数和流程,以适应不同的情况。例如,可以调整酸液的浓度和类型、压裂液的注入压力和排量等参数,以获得最佳的开采效果。在安全环保方面,水平井分段酸化压裂工艺也采取了一系列措施来降低施工风险和对环境的影响。例如,采用先进的监测和预警系统实时监测施工过程中的关键参数;优化酸液和压裂液的配方和注入参数以减少对地层的污染和伤害;采用先进的废水处理工艺处理施工过程中的废水等。这些措施确保了水平井分段酸化压裂工艺在施工过程中的安全性和对环境的友好性。

#### 结束语

综上所述,低渗透储层的安全环保石油压裂技术对于提高采收率、降低环境污染及保障生产安全具有重要意义。随着技术的不断进步和创新,未来低渗透储层的开发将更加高效、环保。本文所探讨的技术为低渗透储层的开发提供了新思路和方法,期待在实践中得到广泛应用和推广,为石油工业的绿色发展贡献力量。

#### 参考文献

- [1]蔡勤阁.低渗透储层安全环保石油压裂技术探析[J].石油石化物资采购,2021(24):93-94.DOI:10.12316/j.issn.1674-0831.2021.24.045.
- [2]谢磊.浅析石油钻井酸化压裂技术现状及环保措施[J].石化技术,2019,26(02):65.
- [3]张强,田金川.油田压裂返排液处理技术研究[J].化工设计通讯,2023,49(1):41-43.
- [4]郭兵,李谋斌.油井压裂的风险及安全对策.化学工程与装备,2023:73-74+87.