

X 井区砂岩储层水力压裂施工参数优化设计

石工 2102 班：吴宜倍 指导教师：周德胜 论文类型：毕业论文

摘要：本文应用 Petrel 勘探开发软件一体化平台 Kinetix 模块进行裂缝扩展形态模拟的研究方法，探讨了 X 井区砂岩储层直井水力压裂施工参数优化问题。首先，对比分析多种裂缝模型（P3D、PLANAR3D、KGD、PKN、UFM）的特性与适用范围，选定能模拟水力裂缝与天然裂缝相互作用的 UFM 模型进行模拟研究；其次，基于裂缝扩展形态模拟结果，优化压裂液粘度为 $50\text{mPa} \cdot \text{s}$ 、支撑剂组合为主阶段 30/50 目陶粒、尾追 20/40 目陶粒、施工排量约为 $11\text{m}^3/\text{min}$ 、前置液比例为 37%及砂比 15.0%；最后，通过模拟得出优化方案下的裂缝参数，缝长 215.68m、缝宽 131.87 m、改造体积 122m^3 、平均导流能力 $509.77\text{ mD} \cdot \text{m}$ ，得出上述优化参数可有效提升储层改造效果的结论，并提出该优选方案可为 X 井区压裂施工方案制定提供重要依据的相关建议。

关键词：砂岩储层；数值模拟；施工参数；裂缝扩展形态

1. 研究背景

随着全球能源消费格局的深刻变革、双碳战略的全面推进、我国能源消费结构的持续升级与常规油气资源储量的逐年递减。实现能源结构升级转型的同时保障能源安全是我国能源发展的必要趋势。在中国石油集团经济技术研究院《2024 年国内外油气行业发展报告》中的数据显示，2024 年，一次能源消费总量全球比上年增长 1.9%，中国比上年增长 4%。国内天然气产量连续 8 年保持百亿方增产势头。展望 2025 年，全球能源需求将继续保持小幅增长，能源向绿色低碳转型的长期趋势不会改变。我国作为全球能源消费量最大的国家，能源整体呈现出需求量大但供给量不足的矛盾。在这样的能源形势下，非常规油气的开发在打破供给矛盾上显得尤为重要。

部分砂岩储层在物性特征上呈现出低孔隙度、低渗透率的特点，基于这样的物性特征，仅仅使用常规开发手段难以对砂岩储层实现经济有效开采，这促使水力压裂技术成为目前砂岩储层实现储层改造以达到增产目标的核心手段。

X 井区目前研究资料少、研究程度低，现有研究多局限于基础物性分析，缺乏系统性的压裂参数优化研究，实际开采过程中仍存在裂缝扩展规律不明、施工参数设计机制不清等问题。

本研究以 X 井区为研究对象，使用利用 Petrel 勘探开发软件一体化平台的 Kinetix 模块，结合研究区块致密砂岩储层特点，通过构建地质-工程一体化模型，以裂缝扩展形态和提高裂缝平均导流能力为目标进行压裂施工参数优化。对其进行施工

参数优化可以为继续进行 X 井区砂岩储层水力压裂优化设计提供一定的支持。

2. 发展现状

2.1 水力压裂技术的发展现状

水力压裂技术自 1947 年在美国堪萨斯州 Hugoton 油田首次试验成功后，逐步成为低孔低渗储层构建渗流通道的重要手段。20 世纪 50 年代起广泛应用于常规油气田增产，至 80 年代工艺持续优化，奠定了不可替代的地位。

近年来，针对复杂储层特性，技术创新呈现多元化趋势，分别实现了控缝与增透技术革新，工艺联作创新，酸压技术革新，转向与增效技术优化及前沿交叉融合，实现原油高效动用。

2.2 水力压裂技术的发展现状

水力裂缝模型研究历经从经典二维模型到复杂缝网模拟的演进。20 世纪 50-70 年代，经典二维模型奠定基础，衍生出 KGD 模型与 PKN 模型。20 世纪 80 年代起，离散裂缝网络 (DFN) 模型兴起，国内学者持续推进。2009 年后，非常规裂缝模型 (UFM) 成为复杂缝网模拟核心，引入天然裂缝交互与应力阴影效应机制，并于 2013 年完善验证。当前 UFM 模型已成为模拟天然裂缝发育储层水力压裂的核心工具。

2.3 水力压裂技术的发展现状

压裂施工参数优化研究围绕储层适配性与效益最大化持续深化，在常规参数精细化调控、复杂结构井与缝网控制参数创新及智能优化方法应用多个方面同步发展。当前优化研究呈现多参数协同、地质模型驱动与智能算法融合趋势，显著提升储层改造精准度与开发效益。

3. 相关分析

3.1 压裂数值模型的建立

本章利用 Petrel 勘探开发软件一体化平台的 Kinetix 模块，结合 X 井区致密砂岩储层基本特征，基于裂缝扩展数值模拟理论建立了三维直井压裂裂缝扩展模拟模型。为后续的参数建立了基础。根据多种模型内容及其适用范围，由于 UFM 模型可以模拟水力裂缝与天然裂缝之间的相互作用，同时能充分地描述压裂施工过程中的复杂裂缝扩展情况，结合本研究中的 X 井区所处目标区块天然裂缝发育的地质特征，在后续的施工参数优化中选择 UFM 模型进行研究。

结合目标区块基本情况和目标井基础数据，利用 Kinetix 模块建立裂缝扩展模拟模型，其具体流程包括：井筒模型建立、储层参数设置、射孔参数设置、泵注程序设

置、天然裂缝设置。

3.2 压裂施工材料优化

3.2.1 压裂液粘度优化

为研究压裂液粘度对裂缝扩展形态的影响，本节以目标直井压裂模型为基础，在保持其他参数不变的情况下，单独改变压裂液粘度，进行了 9 组压裂液粘度下的裂缝扩展形态模拟。

通过观察模拟结果中的改造缝长、改造缝宽、平均导流能力。可以发现，在一定压裂液粘度范围内，压裂施工的改造缝长会随着压裂液粘度的增加而增加，改造缝宽和平均导流能力会随着压裂液粘度的增加而减小，但变化幅度都会减小至趋于稳定。因此，最终选用粘度为 $50\text{mPa} \cdot \text{s}$ 的压裂液材料。

3.2.2 支撑剂优化

在压裂液优化的基础上，即选用 $50\text{mPa} \cdot \text{s}$ 粘度的压裂液，同时保持其他参数不变，选用不同目数的陶粒用作模拟支撑剂，具体模拟了 6 组支撑剂目数下裂缝扩展形态及其中的支撑剂分布。在本研究模拟中，施工常用的 20/40 目支撑剂得到的平均导流能力为 $513.01 \text{ mD} \cdot \text{m}$ ，30/50 目支撑剂得到的平均导流能力为 $433.56 \text{ mD} \cdot \text{m}$ ，其导流能力差别较小。结合本次施工参数优化设计诉求，即最大化压裂增产效果，同时保证经济性的整体考虑，设计混合加砂，即主加砂阶段采用 30/50 目陶粒，尾加砂段追加 20/40 目陶粒。

3.3 压裂施工材料优化

3.3.1 压裂液排量优化

选取已经优选完成的压裂施工材料。同时，保证其他施工参数不变，分别模拟 11 组压裂液排量下裂缝的扩展形态及缝内支撑剂分布情况。

在一定压裂液施工排量范围内，压裂施工的改造缝长会随着压裂液施工排量的增加而增加，改造缝宽和平均导流能力会随压裂液施工排量的增加而降低，最终增幅与降幅逐渐降低至趋于稳定。优化压裂液施工排量为 $11 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

3.3.2 前置液比例优化

该部分选取已经优选完成的压裂施工材料，选用 $11\text{m}^3/\text{min}$ 的压裂液施工排量，同时保证其他施工参数不变，分别设置 7 组前置液比例来研究裂缝的扩展形态及缝内支撑剂分布情况。

在一定前置液比例范围内，压裂施工的改造缝长会随着前置液比例的增加而增加，

改造缝宽会随前置液比例的增加而降低。平均导流能力也会随着压裂液施工排量的增加而减小，但变化幅度较小。最终优化前置液比例为 37%。

3.3.3 砂比优化

该部分选取优化后的施工材料， $11\text{m}^3/\text{min}$ 排量，37%的前置液比例，分别设置 7 组砂比来研究裂缝的扩展形态及缝内支撑剂分布情况。结果表明随着砂比的增加，平均导流能力从 $303.37\text{ mD}\cdot\text{m}$ 逐渐增加至 $509.77\text{ mD}\cdot\text{m}$ ，且平均导流能力的增幅逐渐变缓。结合经济性考虑，优化砂比为 15.0%。

3.4 结果与分析

将优化得到的压裂施工材料与压裂施工参数整合，压裂优化方案选择粘度为 $50\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 的压裂液；设计混合加砂，即主加砂阶段采用 30/50 目陶粒，尾加砂段追加 20/40 目陶粒；优化得到的施工排量为 $11\text{m}^3/\text{min}$ 左右；设置前置液比例为 37%；砂比 15.0%。该方案模拟得到的改造缝长为 215.68m、改造缝宽为 131.87m、改造体积为 122m^3 、平均导流能力为 $509.77\text{mD}\cdot\text{m}$ ，均满足设计要求。

4. 研究结论及对策建议

4.1 研究结论

对比多种裂缝模型适用条件以及使用特点，可以模拟水力裂缝与天然裂缝之间的相互作用的 UFM 模型适合本文规律研究。在 X 井区地质参数的基础上建立模型，通过逐个优化，得到了各裂缝参数随施工参数的变化规律，得到优化后的方案，对该方案进行模拟施工，得到的裂缝参数满足设计要求。

4.2 对策建议

X 井区最终建议优化方案的施工参数为： $50\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 粘度的压裂液，组合注入两类支撑剂，主加砂阶段采用 30/50 目陶粒，尾加砂段追加 20/40 目陶粒；施工排量为 $11\text{m}^3/\text{min}$ ；前置液比例为 37%；砂比为 15.0%。最终优化得到的改造缝长 215.68m，改造缝宽 131.87m，改造体积 122m^3 ，平均裂缝导流能力 $509.77\text{ mD}\cdot\text{m}$ ，满足目标区块设计需求。可指导 X 井区实际施工。