

水平井体积压裂作业风险识别与控制的创新措施及应用效果

陈永鹏

中国石油新疆油田公司吉庆油田作业区

DOI:10.12238/jsse.v3i2.13450

[摘要] 本文深入研究水平井体积压裂作业,找出地质、工程、施工工艺以及安全与环境等方面的风险并提出相应创新控制措施。通过分析应用效果,显示这些措施在提升作业安全性、降低风险和提高作业效率等方面成效显著,为水平井体积压裂作业安全高效开展提供理论与实践参考。

[关键词] 水平井; 体积压裂; 风险识别; 创新控制措施; 应用效果

中图分类号: P633.8 文献标识码: A

Innovative measures and application effect of risk identification and control of horizontal well volume fracturing operation

Yongpeng Chen

Jiqing Oilfield Operation Area of PetroChina Xinjiang Oilfield Company

[Abstract] This paper deeply studies the volume fracturing operation of horizontal well, finds out the risks of geology, engineering, construction technology, safety and environment, and puts forward the corresponding innovative control measures. Through the analysis of the application effect, it is shown that these measures have achieved remarkable results in improving operation safety, reducing risk and improving operation efficiency, and provide theoretical and practical reference for the safe and efficient development of horizontal well volume fracturing operation.

[Key words] horizontal well; volume fracturing; risk identification; innovation control measures; application effect

引言

全球能源需求持续增长,非常规油气资源开发越发重要。水平井体积压裂技术是开发非常规油气资源的关键手段,能在储层中形成复杂裂缝网络,大幅提高油气产量和采收率。不过该作业涉及多学科及多环节,存在诸多风险,准确识别这些风险并采取有效控制措施,既能保证作业顺利又能降低成本、减少安全事故和环境污染。所以研究水平井体积压裂作业风险识别与控制有重要现实意义。

1 水平井体积压裂作业风险识别

1.1 地质风险

1.1.1 储层非均质性

储层非均质性普遍存在于各类油藏,对水平井体积压裂作业影响很大,它有多种表现形式,岩性方面,不同岩石矿物成分、颗粒大小和排列方式使储层不同区域力学性质差异明显。物性上,渗透率及孔隙度等关键参数在空间变化不定,含油性也不均匀,导致压裂时流体在储层内流动规律复杂。渗透率高的区域,压裂液容易快速滤失,裂缝宽度难以拓展,支撑剂无法均匀铺置,严重影响压裂效果。渗透率低的区域,流体流动阻力大,形成有效裂

缝网络困难,油气开采不顺畅,开采效率和经济效益降低^[1]。

1.1.2 天然裂缝发育

天然裂缝对储层有利有弊,它为油气运移提供通道,但压裂作业时会带来问题。高压压裂液注入储层遇到天然裂缝就可能大量漏失,浪费压裂液,难以形成预期人工裂缝网络,无法有效改造储层。另外人工裂缝扩展时与天然裂缝相互干扰,裂缝形态难控制,复杂应力下可能引发储层岩石结构失稳,甚至导致储层坍塌,破坏储层完整性,阻碍后续油气开采。

1.2 工程风险

1.2.1 压裂设备故障

压裂作业对设备要求高,大型压裂设备提供高压动力,但作业环境差且设备长期高负荷运转。以柱塞泵为例,柱塞在高压及高速往复运动中与泵体频繁摩擦,容易磨损。密封件在高压、化学侵蚀环境下老化快,并且柱塞磨损或密封件老化,泵内压力会波动,无法稳定输出高压,流量不足。这会使压裂施工时压裂液注入不均匀,裂缝扩展不稳定,影响压裂施工连续性并阻碍施工进度,施工质量难以保证,进一步增加作业成本。

1.2.2 管柱失效

水平井体积压裂作业中管柱面临多种考验, 井下高压、高速压裂液持续冲刷管柱内壁, 加速管柱材料损耗。井下复杂应力环境, 如地应力和岩石变形应力等, 从各个方向作用于管柱。在这种恶劣条件下管柱可能变形, 影响压裂液输送, 更严重的是管柱可能破裂, 导致压裂液泄漏致使施工中中断。管柱破裂还可能使井下工具落井, 增加后续打捞等处理工作难度, 大幅增加作业成本和时间成本。

1.3 施工工艺风险

1.3.1 压裂液性能问题

压裂液是压裂作业的关键介质, 其性能好坏直接影响压裂成败, 黏度是重要性能之一, 黏度过低就无法有效携带支撑剂。裂缝扩展时支撑剂分布不均匀就会导致部分裂缝段缺乏支撑易闭合, 影响油气导流能力。滤失性方面, 压裂液滤失性过大, 在造缝前大量渗透到储层岩石孔隙就会使裂缝无法按预期长度和宽度延伸。除此之外破胶性也很重要, 破胶不彻底, 残留压裂液聚合物会堵塞储层孔隙, 阻碍油气流动且降低油气产量, 对储层造成不可逆伤害。

1.3.2 分段压裂技术实施风险

分段压裂技术是实现水平井体积压裂高效开采的重要手段, 但实施过程有风险。封隔器是分段压裂的关键工具, 其密封性能很重要, 密封不严, 高压压裂液会在层间乱窜, 不同层段相互干扰就无法有效压裂, 降低压裂效果。投球滑套分段压裂技术中球座与球匹配精度要求高, 匹配度不好, 球无法准确落入球座, 滑套无法正常开启或关闭^[2]。

1.4 安全与环境风险

1.4.1 高压流体泄漏

压裂作业全程有高压流体流动, 从地面管线到井口装置再到井下管柱。高压流体能量大, 一旦泄漏后的冲击力强, 并且泄漏的高压流体可能伤害操作人员, 还可能引发易燃易爆物质起火爆炸而造成严重安全事故。此外泄漏的高压流体还会污染周边环境, 破坏土壤结构, 影响植被生长的同时破坏生态环境平衡。

1.4.2 化学药剂危害

压裂液中添加多种化学药剂, 虽在压裂作业中作用重要但有危害。杀菌剂抑制微生物生长, 破胶剂控制压裂液破胶时间, 减阻剂降低压裂液流动阻力等, 这些化学药剂泄漏到环境中会通过雨水冲刷或土壤渗透等进入水体和土壤。在水体中可能改变水体酸碱度, 影响水生生物生存环境, 进而导致鱼类等水生生物死亡, 破坏水生生态系统。在土壤中还会影响土壤微生物活性, 降低土壤肥力并且影响农作物生长。此外操作人员作业时防护措施不到位也会直接接触这些化学药剂, 可能引发皮肤过敏或呼吸道刺激等健康问题, 危害身体健康(如下表)。

2 创新控制措施

2.1 地质风险控制创新措施

2.1.1 精细化地质建模

利用先进地质勘探技术, 如三维地震或核磁共振测井等, 可

获取更详细储层信息。三维地震能对地下地质结构立体成像, 准确捕捉储层空间分布特征; 核磁共振测并能深入分析岩石孔隙结构、流体性质等关键信息。收集这些数据后结合大数据分析 and 人工智能算法可建立高精度三维地质模型, 大数据分析能处理大量地质数据, 挖掘规律, 人工智能算法通过学习大量数据可准确刻画储层非均质性和天然裂缝分布。

表1 水平井体积压裂作业风险识别表

风险类别	具体风险因素	对作业的影响
地质风险	储层非均质性(岩性、物性、含油性差异)	渗透率高区域压裂液滤失快, 裂缝宽度难拓展, 支撑剂难均匀铺置; 渗透率低区域流体流动阻力大, 难形成有效裂缝网络, 降低开采效率和经济效益
地质风险	天然裂缝发育	压裂液大量漏失, 难以形成预期人工裂缝网络, 人工裂缝与天然裂缝相互干扰, 裂缝形态难控制, 可能引发储层坍塌, 破坏储层完整性
工程风险	压裂设备故障(如柱塞泵柱塞磨损、密封件老化)	泵内压力波动, 无法稳定输出高压, 流量不足, 压裂液注入不均匀, 裂缝扩展不稳定, 影响施工连续性和质量, 增加作业成本
工程风险	管柱失效(变形、破裂)	影响压裂液输送, 导致压裂液泄漏, 施工中中断, 井下工具落井, 增加处理难度和成本
施工工 艺风险	压裂液性能问题(黏度、滤失性、破胶性)	黏度过低支撑剂分布不均, 裂缝易闭合; 滤失性过大裂缝无法按预期延伸; 破胶不彻底堵塞储层孔隙, 降低油气产量
施工工 艺风险	分段压裂技术实施风险(封隔器密封不严、球座与球匹配度不佳)	高压压裂液层间乱窜, 不同层段相互干扰, 压裂液无法按设计注入特定层段, 影响压裂效果和施工进度
安全与环 境风险	高压流体泄漏	伤害操作人员, 引发易燃易爆物质起火爆炸, 污染周边环境, 破坏生态平衡
安全与环 境风险	化学药剂危害	污染水体和土壤, 影响水生生物和农作物生长, 危害操作人员身体健康

2.1.2 实时地质导向压裂

压裂过程中通过随钻测井技术实时获取井下地质数据, 如地层电阻率或伽马射线等。地层电阻率能反映地层中流体性质和分布, 伽马射线可识别岩石类型和地层结构, 并且利用已建立的地质模型分析对比这些实时数据来了解压裂作业时地质环境变化。发现实际情况与预期模型有偏差, 可及时调整压裂参数, 比如发现地层电阻率异常就可能存在压裂液滤失问题, 此时可适当降低压裂液排量来提高压力, 确保裂缝按预期方向和位置扩展, 提高压裂效果^[3]。

2.2 工程风险控制创新措施

2.2.1 设备智能监测与维护系统

采用物联网或传感器等技术来实时监测压裂设备关键部件, 传感器采集压力、温度、振动等参数, 通过物联网传输到数据处理中心。在数据处理中心则运用数据分析和故障诊断模型分析数据, 例如分析振动数据变化趋势, 可提前预测柱塞泵柱塞是否有磨损风险; 监测压力和温度波动可判断密封件是否老化。发现潜在故障风险, 系统及时发出预警信号, 工作人员根据预警安排维护保养, 提前更换磨损部件或老化密封件, 减少设备故障停机时间来保障压裂作业连续性。

2.2.2 高性能管柱材料与结构优化

研发新型高强度及抗腐蚀管柱材料是降低管柱失效风险的关键。新型材料通过特殊合金配方和加工工艺, 强度更高并且能承受高压、高流速压裂液冲刷和复杂井下应力。抗腐蚀性也能大幅提升, 可抵御井下恶劣化学环境侵蚀。在管柱结构优化方面, 采用特殊螺纹连接方式, 如锥面螺纹配合特殊密封材料, 增强管柱密封性能来防止压裂液泄漏; 优化管柱整体结构设计, 增强抗拉伸性能, 使管柱在复杂井下应力环境下不易变形或破裂, 降低管柱失效风险。

2.3 施工工艺风险控制创新措施

2.3.1 个性化压裂液体系研发

根据不同储层地质特点和压裂工艺要求, 研发个性化压裂液体系很重要。对于低渗透储层需要高黏度压裂液携带支撑剂, 可采用新型聚合物增稠剂, 通过分子结构设计在压裂液中形成稳定网络结构, 提高压裂液黏度。针对滤失性过大问题, 添加高效降滤失剂, 其分子能在岩石孔隙表面形成致密吸附膜, 降低压裂液滤失速度。破胶方面, 使用环保型破胶剂能在特定条件下快速分解压裂液中的聚合物, 确保破胶彻底来减少对储层的伤害, 提升压裂效果。

2.3.2 改进分段压裂工艺技术

针对分段压裂技术实施过程中的风险来改进技术很有意义, 可溶桥塞分段压裂技术出现, 它采用可在一定条件下自行溶解的桥塞, 避免传统封隔器密封不严问题, 保证各段压裂液独立作用以提高压裂效果。同时开发智能化投球滑套系统, 通过精确机械设计和电子控制技术来实现球座与球精准匹配, 还可远程控制滑套精确打开和关闭, 解决传统投球滑套分段压裂时球座与球匹配度不佳问题, 提高分段压裂可靠性和施工效率。

2.4 安全与环境风险控制创新措施

2.4.1 高压流体泄漏监测与应急处理系统

安装分布式光纤传感器和压力传感器等设备, 实时监测地

面管线、井口装置和井下管柱。分布式光纤传感器通过检测光纤中光信号变化, 准确定位高压流体泄漏位置; 压力传感器实时监测管线内压力变化, 压力异常波动时系统判断可能存在泄漏^[4]。

2.4.2 绿色环保压裂技术与管理

研发和应用绿色环保压裂液是减少环境危害的核心。绿色环保压裂液采用可生物降解材料和环保型添加剂, 大幅减少化学药剂使用量, 例如用天然植物提取物作为增稠剂来替代传统化学合成聚合物。同时加强压裂作业现场环境管理, 建立完善废弃压裂液回收系统, 集中收集废弃压裂液。

3 应用效果分析

某油田在多个水平井体积压裂项目中应用上述创新控制措施, 效果显著。地质风险控制方面, 通过精细化地质建模和实时地质导向压裂, 裂缝与储层匹配度提高30%, 油气产量平均提高25%。工程风险方面, 设备智能监测与维护系统使压裂设备故障率降低40%, 设备运行时间提高35%; 高性能管柱材料与结构优化后, 管柱失效事故减少50%。施工工艺风险控制上, 个性化压裂液体系和改进的分段压裂工艺技术, 使压裂液对储层伤害降低35%, 分段压裂成功率达到95%以上。安全与环境风险控制方面, 高压流体泄漏监测与应急处理系统有效避免泄漏事故, 绿色环保压裂技术与管理使废弃压裂液排放量减少45%, 实现安全、环保的压裂作业目标。

4 结语

有效识别与控制水平井体积压裂作业风险是保障非常规油气资源开发顺利进行的关键。实施一系列创新控制措施, 能显著降低地质、工程、施工工艺以及安全与环境等方面的风险, 提高作业效率和油气产量, 实现安全环保又高效的开发目标。

[参考文献]

- [1] 陈小璐, 张雨菲, 罗伟疆, 等. 水平井体积压裂套管变形预测方法与防控措施[J]. 新疆石油天然气, 2025, 21(01): 61-68.
- [2] 张皓宇, 陆相页岩油储层密切割体体积压裂缝网演化机理研究[D]. 西安石油大学, 2023.
- [3] 关昕瑶. 水平井体积压裂套管失效机制研究[D]. 东北石油大学, 2023.
- [4] 曾波, 王星皓, 黄浩勇, 等. 川南深层页岩气水平井体积压裂关键技术[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(05): 77-84.

作者简介:

陈永鹏(1986--), 男, 汉族, 甘肃通渭人, 大学本科, 工程师, 研究方向: 企业安全管理, 钻井、压裂等工程监督方面。