

深井高温高压射孔技术难题与对策

孙 涛

中石化经纬有限公司巴州胜利测录井分公司 新疆 库尔勒 841000

摘要：深井高温高压储层极端的温压、地应力与腐蚀流体工况，致使射孔作业面临工具适配性差、管柱井筒安全风险高、施工定位精度不足及现场质控难度大等诸多技术难题，严重制约深层油气高效开发。本文系统梳理各类核心难题成因，从工具优化、管柱防护、工艺升级、现场管控四方面提出针对性改进对策，可有效提升深井射孔作业稳定性与储层改造质量，为深层油气安全高效开采提供技术参考。

关键词：深井高温高压；射孔技术；难题；对策

引言：随着油气勘探开发逐步向深层地层推进，深井高温高压储层已成为油气增储上产的核心领域。深井储层超高温、超高压、高地应力、高腐蚀的极端工况，大幅提升了射孔作业难度，常规射孔技术与设备难以适配现场工况，易出现工具失效、孔型畸变、管柱受损、储层伤害等问题。为破解深井射孔技术瓶颈，保障井筒完整性与施工安全，亟需剖析技术难题，优化配套工艺与装备体系。

1 深井高温高压射孔作业工况及技术原理

1.1 深井高温高压储层工况特征

(1) 温度压力特征：深井储层井筒环境极端恶劣，普遍存在超200℃高温、120MPa以上高压的工况参数，高温会加速器材老化、失效，高压对井下工具承压性能、结构稳定性提出极高要求，是射孔作业核心极限工况条件。(2) 地层应力特征：深层地层整体呈现高地应力状态，且地层构造复杂、应力分布不均，使井周形成非均匀、复杂的力学环境，易引发井壁失稳、孔道变形、地层坍塌等问题，干扰射孔成型质量。(3) 储层流体特征：储层流体多具备高含硫、高密度特性，高硫介质会对射孔工具、管柱产生强腐蚀作用，高密度流体易引发井下压力激动、液击现象，大幅提升作业泄漏、设备损坏等安全风险^[1]。

1.2 高温高压射孔核心技术原理

(1) 聚能射孔破岩机理：依托聚能装药爆轰效应形成高速聚能射流冲击破岩，高温高压环境会改变炸药爆轰速率与能量传递效率，作业需精准适配极端工况下的爆轰能量衰减、传递规律，保障破岩效果。(2) 射孔作业整套原理：射孔管柱可实现井下精准受力承载、压力稳定传递与多级密封防护，通过专用起爆装置适配高温高压工况，完成安全、可靠起爆，形成一体化井下作业运行体系。(3) 多维度耦合作用机理：射孔作业完成孔

道成型的同时，会改变近井储层应力分布，造成储层压实伤害，需把控孔道成型、储层改造与井筒完整性的耦合关系，规避作业引发的井筒失效问题。

1.3 深井射孔作业系统组成

(1) 核心工具系统：以耐高温高压射孔枪、专用射孔弹为核心，适配极端温压工况，具备高强度、抗腐蚀、抗形变能力，是实现高效破岩射孔的核心载体。

(2) 井下配套系统：包含精准可控的起爆控制系统、全段密封防护系统及高强度井下配套管柱，保障井下起爆稳定、密封可靠、管柱运行安全。(3) 地面保障系统：由地面监测、压力调控及安全防护设备组成，可实时监控井下工况参数，动态调控作业压力，及时处置突发风险，保障整体作业安全有序开展。

2 深井高温高压射孔核心技术难题

2.1 射孔工具适配性难题

(1) 深井极端高温高压环境会严重影响射孔弹爆轰性能，炸药装药稳定性下降，爆轰能量出现明显衰减，导致射孔有效穿深不足，无法有效穿透储层污染带。同时爆轰射流成型紊乱，造成射孔孔型不规则、孔径不均匀，大幅降低射孔作业质量与储层改造效果。(2) 常规井下密封材料耐受温压极限较低，在超高温、超高压工况下易发生热老化、塑性变形、硬化失效等问题，无法维持稳定密封状态。作业过程中极易出现井下密封渗漏、压力失衡等故障，直接影响射孔管柱整体密封性，引发作业安全隐患。(3) 射孔枪体、连接接头等核心金属构件长期处于高温承压环境，金属材料力学性能大幅下降，抗拉、抗压及抗形变能力降低。在持续高压与应力集中作用下，构件易出现扭曲形变、螺纹失效、本体开裂等损坏问题，导致工具提前失效。

2.2 井筒与管柱安全控制难题

(1) 射孔瞬间会产生剧烈爆轰冲击与瞬时压力激

动,形成高强度脉冲载荷,直接作用于井下管柱。剧烈冲击会引发管柱高频振动、局部应力过载,造成管柱螺纹松动、管壁损伤、构件疲劳,长期累积易导致管柱断裂失效。(2)深层高地应力与射孔瞬时压力耦合作用,使井筒套管受力分布不均,局部出现应力集中现象。高压载荷极易造成套管挤压变形、破损、错动等问题,破坏井筒整体完整性,后续易出现井漏、井壁坍塌等井下复杂情况。(3)作业过程中井下温度、压力频繁交变,使射孔管柱长期承受交变载荷,持续产生疲劳损伤。随着作业时长增加,管柱疲劳裂纹不断扩展,大幅提升作业中途工具失效、管柱卡钻、遇阻的风险,严重威胁施工安全^[2]。

2.3 射孔作业工艺与精度难题

(1)深井井筒深度大、井眼轨迹复杂,井筒内流体摩阻高、管柱传递损耗大,导致井下工具定位精度难以把控。储层薄、层位精准度要求高,作业时难以实现射孔弹精准对位目标储层,极易出现射孔错位、漏射、偏射问题。(2)常规电子起爆元件耐高温性能较差,在深井高温工况下,内部电路、感应元件稳定性大幅下降,元器件参数易发生漂移。施工中频繁出现误起爆、拒起爆、延迟起爆等故障,严重影响射孔作业稳定性与施工进度。(3)深层储层围压极高,射孔完成后,孔道岩壁失去原有应力平衡,在高围压挤压作用下极易发生坍塌、缩径问题。同时射孔爆轰会加剧近井储层压实效应,导致压实带厚度增加、渗透率下降,严重降低储层油气导流能力。

2.4 现场安全与质控难题

(1)深井高温高压极端工况对施工参数敏感度极高,压力、温度、排量等参数微小波动,都会引发井下复杂情况。作业参数可控性差,有效安全施工窗口十分狭窄,对施工操作精度和现场管控标准要求极高。(2)井下工况监测设备受高温高压环境限制,数据传输延迟、采样精度不足,无法实时、精准捕捉井下工具运行状态、孔道成型质量及压力变化,难以提前预判工具失效、孔道坍塌等异常问题,故障处置存在滞后性。(3)深井作业同时叠加高压、高温、高腐蚀多重风险因素,各类风险相互耦合、叠加放大,井下突发故障类型多、不确定性强。且深井井下作业环境封闭、工况复杂,突发险情的排查与应急处置难度极大,安全管控难度高。

3 深井高温高压射孔技术优化对策与应用

3.1 耐高温高压射孔工具优化改进

(1)针对深井高温高压环境下射孔弹爆轰衰减、穿深不足、孔型畸变等问题,开展射孔弹药型优选与结构

优化。筛选适配200℃以上高温、120MPa超高压工况的高能耐热炸药,替换传统普通装药体系,有效抑制高温环境下药剂热分解、能量衰减等问题。同时优化射孔弹聚能罩结构与聚能角度,调整装药配比,提升爆轰能量集中度与射流成型稳定性,大幅增强极端工况下的岩石穿透能力,保证射孔穿深达标、孔型规整,改善储层射孔改造效果。(2)为解决常规密封材料高温老化、高压变形、井下渗漏等故障,对井下密封系统进行升级优化。摒弃普通橡胶、简易密封构件,选用氟橡胶、聚醚醚酮等特种耐温耐压密封材料,搭配金属复合密封结构,兼顾耐高温、抗高压、抗腐蚀性能。同时优化密封安装结构与压紧方式,增设多级密封防护层级,弥补单一密封结构的性能短板,有效抵御高含硫流体腐蚀与高压挤压作用,全方位提升井下工具密封可靠性与作业稳定性^[3]。

(3)针对射孔枪体、接头金属构件易形变、开裂、疲劳损坏的难题,开展材质升级与结构优化。选用高强度合金钢材质替代传统管材,提升枪体抗拉、抗压、抗冲击力学性能,适配长期高温承压工况。同时优化枪体开孔布局、接头螺纹结构与连接方式,消除局部应力集中点,增强枪体整体结构强度,提升抗爆轰冲击、抗形变、抗疲劳损伤能力,有效降低工具井下失效概率,延长井下工具作业使用寿命。

3.2 井筒与管柱安全防护技术对策

(1)为缓解射孔爆轰冲击引发的管柱振动、应力过载损伤,依托数值模拟技术建立射孔爆轰管柱力学仿真模型。精准模拟射孔瞬间爆轰压力传递、管柱振动响应、应力分布变化规律,基于仿真数据优化管柱组合搭配、下入速度、作业排量等关键参数。通过匹配最优管柱结构与施工参数,削弱瞬时脉冲载荷对管柱的冲击作用,降低管柱振动幅度与应力损伤,从技术层面规避管柱变形、断裂等故障。(2)采用射孔生产一体化集成管柱结构,简化井下管柱组合,减少多级连接带来的结构隐患。配套高性能隔离封隔器实现井下分层隔离、压力隔离,有效隔绝射孔爆轰冲击载荷与地层高压流体,避免冲击压力直接作用于套管和生产管柱,大幅降低套管变形、破损风险,全方位保护井筒与生产管柱结构完整性,为后续油气生产提供稳定的井筒条件。(3)优化井下环空保护液体系,针对深井高温高压、高含硫腐蚀工况,研发适配性强的专用保护液。通过调整保护液配方,提升其耐高温、抗腐蚀、抗流变性能,可在管柱外壁形成稳定保护膜,有效抵御高硫流体腐蚀。同时缓冲温度、压力交变带来的管柱疲劳应力,缓解交变载荷对管柱的反复损伤,抑制管柱腐蚀、疲劳开裂等问题,提

升管柱长期作业安全性^[4]。

3.3 射孔施工工艺精准优化技术

(1) 针对深井井筒摩阻大、定位偏差大、射孔对位不准的问题,引入高精度深井定位与动态校深技术。依托井下精准测距、轨迹校正技术,实时修正管柱下入深度偏差,精准定位储层有效射孔段,规避井眼轨迹复杂、管柱位移带来的定位误差。通过全程动态校深、精准对位,彻底解决射孔偏位、漏射、错射等问题,保障射孔作业精准覆盖目标储层,提升储层改造有效率。

(2) 为改善高温环境下电子起爆元件稳定性差、故障频发的问题,创新采用“压力起爆+延时控制”复合起爆模式。结合压力起爆高可靠性与延时起爆可控性的优势,规避单一起爆方式的缺陷,适配高温高压极端井下环境。通过精准设定起爆压力与延时参数,杜绝高温导致的误起爆、拒起爆、延迟起爆故障,大幅提升井下起爆作业的稳定性、精准性与安全性。(3) 结合深层高围压储层地质特征,针对性优化射孔施工核心参数。科学调整射孔密度、相位分布、孔径大小,避免孔道密集应力叠加、孔径不合理引发的孔壁失稳问题。通过优化爆轰能量释放方式,降低射孔对近井储层的压实伤害,减小压实带厚度,维持储层原始渗透率,有效规避射孔后孔道坍塌、缩径问题,保障储层良好的油气导流能力。

3.4 现场施工管控与质量保障体系

(1) 结合深井高温高压射孔极端工况风险特征,建立标准化施工作业流程,细化从工具检测、管柱下入、射孔施工到起钻收尾的全流程操作规范。同步制定风险分级管控清单,对高温失效、高压泄漏、管柱损伤等各类风险进行等级划分,明确管控标准、责任节点与防控措施,实现风险前置管控,缩小作业安全风险隐患,规范现场施工操作。(2) 配套搭建实时井下工况动态监测系统,依托耐高温高压井下监测元件,全程采集井下温度、压力、管柱

振动、孔道成型等关键数据,实现施工全过程实时监控、数据同步传输。系统可自动识别参数异常并触发预警,帮助现场人员及时掌握井下工况,提前预判工具失效、孔道异常、压力失衡等问题,实现隐患早发现、早处置^[5]。

(3) 针对深井复杂工况风险叠加、应急处置难度大的问题,完善高温高压射孔专项应急处置方案。围绕管柱卡钻、密封失效、孔道坍塌、起爆故障等常见突发险情,制定标准化处置流程与应急预案,明确处置步骤、设备调配、人员分工。定期开展现场应急演练,提升施工团队对复杂故障的快速处置能力,最大限度降低突发事故造成的施工损失与安全风险。

结束语

本文全面总结了深井高温高压射孔作业的工况特征与技术原理,精准剖析工具适配、安全管控、施工精度及现场质控四大核心难题,配套形成全方位、系统化的技术优化对策。通过器材升级、工艺改良、管柱防护及标准化管控,可有效规避极端工况作业风险,改善射孔成型质量、降低储层伤害,助力深井射孔作业提质增效,为深层油气资源高效、安全开发筑牢技术支撑。

参考文献

- [1]李刚,王磊.超深井高温高压射孔管柱损伤机理及防控对策[J].石油钻探技术,2025,53(2):89-96.
- [2]陈超.高温高压气井射孔工艺优化及现场应用[J].油气井测试,2025,34(4):34-39.
- [3]李明远.超深井射孔套管损伤机理与防护技术研究[J].石油机械,2024,52(7):102-108.
- [4]王浩,田勇.深层高温高压储层增效射孔技术优化[J].天然气技术与经济,2023,17(3):45-50.
- [5]苏明,张建军.高温高压深井射孔起爆系统可靠性优化研究[J].测井技术,2022,46(5):652-656.