

超深超高压井钢丝作业难点分析与风险控制

侯云杰 侯明明 李贵廷 王立军 (长城钻探工程有限公司测试分公司, 北京 100110)

摘要: 钢丝试井作业是指通过缠绕在绞车上的钢丝利用机械的上下提放将压力计送入井底获取以获取井下温度、压力等参数。随着土乌两国浅中层油气资源可勘探开发空间越来越小, 超深、超高压井作业逐年增加, 且富含 H_2S 概率也增加, 井身结构及生产管柱组合更加复杂, 新的问题和困难不断出现, 对钢丝作业的设备、工具以及人员等都提出了更高的技术要求。本文分析了超深超高压井作业的技术难点与风险并给出作业指导。

关键词: 超深; 超高压; 钢丝作业; 技术难点; 风险控制

多年来油气开发主要集中在浅层、中层以及地质条件相对简单的地层, 随之而来的是浅中层油气资源的衰减。在日益增加的需求和技术进步的双重推动下, 超深 (超过 6000m)、超高压 (超过 70MPa) 和富含 H_2S 井勘探开发不可避免, 如乌兹别克 MX 井是一口“五高”井, 即高温 163℃, 高压 111MPa、高含硫 46%、高含盐 (氯离子含量 $21.5 \times 10^4 mg/l$)、高深 5918m。钢丝技术因其便捷、经济、适用范围广等特点, 成为了研究储层参数、气井产能和获取高压物性样的关键技术手段。物体两面性决定钢丝作业技术巨大优势背后存在了其先天不足: 脆弱易断、易卡、易上顶。因此, 如何在安全、高效完成数据、资料获取同时减少设备损坏、降低风险发生, 具有十分重要的探究价值。

1 超深超高压井钢丝作业技术难点

1.1 H_2S 腐蚀

超深含硫气井, 井内流体酸性强, 对钢丝、工具、仪器、井口防喷设备腐蚀严重。超高压和温度, 增加硫化物应力破坏风险, 对工具、设备等的防硫等级要求更高。影响硫化氢腐蚀的环境因素有: 温度、pH、流速、氯根浓度, 其中温度 5℃-90℃是主要腐蚀发生区间, 22℃时腐蚀速度最快。钢丝作业腐蚀最严重的是井口防喷设备、井下工具丝扣部分。

1.2 超高井口压力

井口压力 100MPa 以上, 单一防喷屏障可靠系数降低, 且大大增加了操作难度和风险等级。当压力达到 140MPa 以上时, 井口装置的抗压能力会大幅度削弱, 降低井口作业的安全系数。

1.3 水合物冰堵

水合物是指在一定温度、压力条件下, 天然气中某些组分 (如甲烷、硫化氢、二氧化碳等) 能与液态水形成白色结晶状物质。水合物生成一般需满足三个基本条件: ①存在水合物形成体; ②合适的温度和高压; ③适当水量。超高压超深井气井作业中, 投产或长时间关井后开井, 井口附近会由于温度上升缓慢造成节流压差, 在焦耳-汤姆生效应影响下, 井口附近流体温度会大幅下降, 导致水合物生成、堆积; 另外, 钢丝作业容易在防喷盒处产生气体泄漏, 导致从高温高压降低至低温低压, 过程会产生大量饱和水蒸汽和天然气, 在防喷盒处

形成水合物, 引发冻堵。另外, 防喷管保温性能不良, 现场施工时内部极易汇聚腐蚀性极强的水合物, 加重腐蚀管汇的破坏, 导致安全隐患。

1.4 硫化物产出

硫在酸性气体中以两种形式存在: 硫与硫化氢反应生成的多硫化氢, 物理溶液中。这两种形式通常不能长久保持, 天然气在井内运移过程发生温度、压力变化, 硫与流体间的饱和状态也随之变化, 导致硫积淀。生成的硫有具有过冷倾向, 以液态下形式与气体流过管道, 并被固化的硫催化, 以很快的速度固化、堆积, 沉积在管道中。

1.5 盐结晶析出

超深井原始地层温度、压力高, 普遍穿越多组砂岩, 遭遇高矿化度底水、边水几率高。同时, 超深井完井管柱长度大、结构复杂, 井筒外温度环境变化大, 水气同产阶段并筒结垢析盐现象普遍。于铁峰等 (2017) 对明哥布拉克区块地层水研究发现流体运移过程压力下降后, CO_2 从溶液中析出, 导致 $CaCO_3$ 快速凝结成垢, 进而 NaCl 在晶核附近吸附快速析出。盐析出进一步促进 $CaCO_3$ 的沉淀析出速度。结晶盐堆积不仅会导致工具遇阻、遇卡, 严重还会造成震击器失效。

1.6 高产

超深井同时可能遭遇超高产量, 加之超深井完井管柱复杂, 井内气体流态会更复杂。高速不稳定流会增加以下几个风险: ①流态复杂、产量高增加工具上顶、遇卡风险; ②不稳定流态会增加工具震动, 对压力计防震性能要求更高; ③高温、高产增加工具脱扣、粘扣风险。

2 风险预防与应急措施

针对以上风险提出如下应对措施。

2.1 抗 H_2S 腐蚀

选择适合硫化氢环境的井口防喷设备 (WPCE)、钢丝、井下工具 (BHA)、及压力计 (DHMG)。根据前文分析, 硫化氢腐蚀在 22℃湿润环境下腐蚀最严重, 另外, 拉应力较大处也更容易发生腐蚀。在钢丝作业中腐蚀最严重位置就是井口防喷设备、钢丝井口段 (拉力大、温度适宜、存在游离水)、钢丝工具丝扣连接处。因此, 降低硫化氢腐蚀危害可以从以下几点着手: ①提高 WPCE 金属材质防硫等级, 橡胶密封件 (如 O 圈、盘

根等)单一材质无法同时符合高压、高温、硫化氢需求,需根据现场情况不同材质组合使用,防喷管密封圈建议选用“三环”体系(O型圈,背圈,开口圈),盘根参考表1;②钢丝选择 SUPA75 或以上等级,推荐 3.18mm 钢丝;③ BHA 由于处于井底,温度高,腐蚀相对较轻,着重考虑丝扣连接处,推荐使用快速接头(QC)连接,如 HD QRJ 型;④ DHMG 除材质满足防腐要求外,建议表面采用惰化防腐涂层,另外连接处需采用金属密封。

表 1 常见盘根性能及经济性对比

项目	材质	适用环境		经济性
1	聚氨酯-Urethane	高压、中温	耐 H ₂ S	中等价位
2	硬质聚氨酯-Hard Urethane	超高压、中温	耐 H ₂ S	高价位
3	绕线丁腈橡胶-Rubber(Nitrile)and Cord	低压、低温	——	便宜
4	铁氟龙-Teflon	超高压、中温	耐 H ₂ S	高价位
5	氟橡胶-Viton	中压、高温	耐 H ₂ S	较高价位

2.2 多屏障防井口刺漏

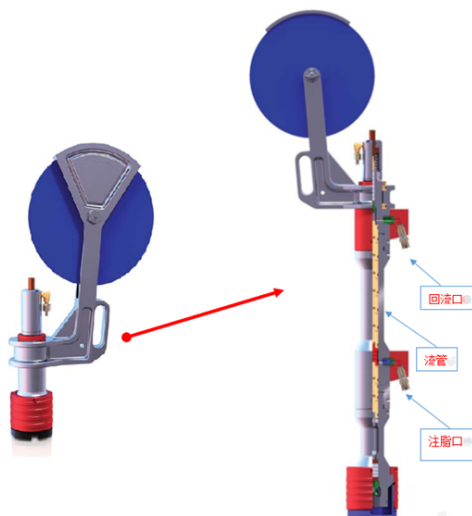


图 1 防喷盒替换为高压防喷盒(防喷盒+流管)

表 2 流管与注入口数量参考表

井口压力 /MPa	注入口数量 / 个	流管数量 / 根
28~56	0~1	0~4
56~84	1~2	4~6
> 84	2	≥ 6

钢丝作业通常有两道防喷屏障:防喷盒(stuffing box),单/双闸板钢丝防喷器(wireline valve)。这在高压作业中不能满足安全需要,将两道屏障增加为三道屏障,在防喷盒下部增加动态密封流管,如图 1,流管选择参考表 2。另外,钢丝防喷器也要选用更加安全的三闸板或

四闸板,井口压力超过 100MPa 建议选用四闸板,且防喷器与井口间需采用法兰连接,以增加安全性。

2.3 物理+化学法共同防治水合物冰堵

结合水合物形成三个基本条件,从温度和提高水合物形成条件两方面入手。①条件许可情况下,钢丝工具入井前开井“跑温”,提高井筒内外温度,跑温产量建议达到 $75 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;②低温天气或超高井口压力时,井口使用蒸汽加热,可使用 3/8" 不锈钢管缠绕井口防喷系统;③使用甲醇或乙二醇等化学抑制剂降低水化物形成风险;④控制流管注入压力(1.1~1.2 倍井口压力),减少井内流体进入流管。

2.4 井筒预处理与合适生产制度防硫化物阻卡

硫化物堆积主要通过预处理来解决,措施分为溶剂溶解、加热融化和化学反应三类。完成井筒预处理后,要先进行钢丝通井,通井工具选择需要注意,传统通井规(gauge cutter)因其下边缘锋利,一方面会将井壁附着物刮落,后续试井过程可能会流出附着到工具上,另一方面也容易卡入赃物内。因此要选用带有圆角的通井工具,如图 2(左)。另外,试井过程要选择合适的生产制度,在产量低于 $28.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 时,硫化物堆积几率增加。

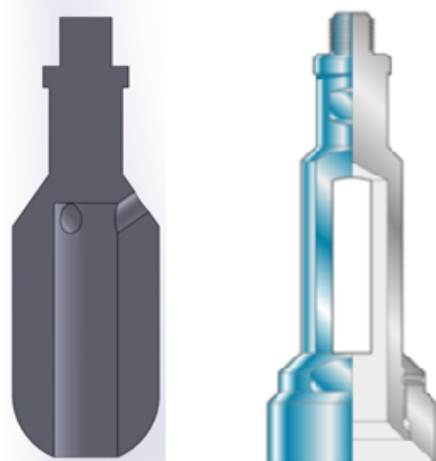


图 2 通井工具选择

2.5 优化工具组合降低盐结晶及高产带来的风险

结晶盐和高速流体带来的风险无法从源头上避免,降低作业风险从工艺流程和工具串优化两方面着手。①钢丝入井前,尽可能清洁井筒,降低原有结晶带来的风险;②变更生产制度时要缓慢操作,同时密切观测钢丝张力;③流压测试时选择相对小直径的工具串,并适当增加配重;④工具串尾部为直径最大处;⑤通井工具串使用强力震击器+机械震击器组合;⑥试井工具串接入丢手绳帽或丢手短接,推荐使用非投棒式;⑦产能测试首选工作筒投放式压力计悬挂器,如 Otis 悬挂系统等,投放无法达到要求时才悬吊测试。

3 现场操作要点

3.1 设备及工具仪器检查

钢丝检查,钢丝长度应超过最大作业井深 500m(约 2 层)。合金钢丝扭力测试(wrap test)不低于 8 圈,检

测断面平滑整齐;破断拉力不低于额定载荷 85%。压力计除选择满足温度、压力量程且在标定有效期内的,还需选择匹配性最好的两支或多支使用。震击器选择、检查与设定:机械震击器,选择合适冲程(508mm/762mm),横向摆动间隙正常,固定销钉无变形;强力震击器,按照使用原则选取液压震击器或弹簧震击器,根据井深、钢丝许可拉力设定激发张力值。

3.2 设备摆放与安装

试井车宜摆在上风位置,距离井口 15m~30m,滚筒中部对准井口,前后车轮应固定。撬装注脂装置等配套设备距离井口 25m 以上。条件不满足时,应采用相对安全的措施。打开采油树上法兰(快速由壬)前,需确定 7# 闸阀满足密封要求后再进行。现场风速大于 6 级(14m/s)时不得进行拆装作业,防喷盒离地面高度 $\geq 10\text{m}$ (无钻机情况),应用 3 根或 4 根绷绳稳固。

3.3 钢丝防喷设备试压

试压压力大于等于最高预计油口压力 1.2 倍且不高于最大工作压力,逐级试压程序最少需包含低压(0.1 倍井口压力)和高压各 15min,压降不超过 0.7MPa 为合格。连续多趟钢丝作业,更换工具后可使用井口压力试压,但需控制起压速度。

3.4 剪切销钉选择与装配

很多钢丝作业涉及剪切销钉操作,销钉剪切方式分为单面剪切、双面剪切和侧面剪切,侧面剪切一般销钉直径小需要剪切力小,此处主要讨论单面剪切和双面剪切。常见销钉材质有铝、黄铜、普钢,三种材质同尺寸剪切值逐渐升高。一般剪切值计算是指单面剪切值,选择时按照总面数选择销钉材质和数量。另外,当使用剪切螺钉时,需对称安装;若使用剪切销钉,且外部无销钉保护套时,安装后需将销钉两端铆大;向上震击剪切销钉一般不大于 $\phi 10\text{mm}$,向下震击剪切销钉一般不大于 $\phi 6\text{mm}$ 。

3.5 设定深度零点

钢丝工具入井前,绞车计数器应在转盘面或油管挂锁紧螺栓位置校零,并计算油补距补差。需注意的是校深位置不总是工具串最下部,如压力计投放零点位置则为锁定机构位置并需记录压力计传感器到锁定机构长度。

3.6 起下钢丝、震击操作

起下钢丝要平稳,禁止空档遛放钢丝。通过井下安全阀速度应小于 30m/min,且需做上提实验并记录张力。通过井下安全阀后可逐渐提高速度,但不应超过 60m/min。变径上下 15m 内时速度应小于 30m/min。下放工具,每 500m 进行张力测试,观察张力是否正常,井况复杂时适当增加测试频率。上提钢丝作业要配合扭矩阀使用,每上提 500m 调低扭矩到刚好能拉动钢丝为止。

震击操作,要适当调大绞车油门,震击操作要迅速冷静。震击作业前需进行张力测试,并确定震击器开合自如。每震击 4~5 次,需冷却钢丝 5min;震击每超过 45

次,或连续震击超过一定时间(碳钢 3h,合金钢丝 2h),需起出工具剪掉部分钢丝(约 30m)重新做绳帽后继续操作。浅井处进行机械震击操作时,钢丝弹性伸长量小,要人力拉钢丝震击操作,拉动钢丝时使用绳索或吊带进行操作;使用弹簧震击器或液压震击器时需要配合加速器使用。

3.7 工具进出油管操作

一般情况下,工具串应下至油管鞋 50m 以上。若确需下出油管鞋,工具串下出油管鞋应具备以下条件:①油管鞋下端具有引鞋;②钢丝绳帽具有标准打捞颈;③入井工具各连接部位无 90° 台阶。工具进出油管鞋操作要求:①速度应平稳、缓慢,密切观察钢丝张力变化;②距引鞋 30m 前,上提钢丝速度控制在 10m/min 以下,并调低绞车扭矩。

3.8 投捞操作

投捞操作前选取靠近工作筒位置的油管内进行张力测试,丢手、打捞前后测试张力需在同一位置、同一速度下进行。堵塞器、锁芯等投放操作时,需先低速敲击将工具送到位,然后提高震击速度,避免工具到位前卡住。投捞过程深度确定以上提震击器完全打开位置为准。

3.9 长时间悬停操作

工具长时间悬停时,井口装置应挂禁止操作警示牌,液动主阀应上好护帽。井下安全阀的控制装置应置于手动打开位置,并挂警示牌。压紧钢丝密封盘根,确保防喷盒无渗漏。在钢丝绞车至井口地滑轮之间的钢丝上设置醒目的标识物。用刹车刹住滚筒,并在井口用钢丝卡子卡住钢丝,并安排人员值守巡查。

4 结语

综上所述,超深超高压井钢丝作业会面临诸多新的挑战,如水化物冰堵、结晶盐阻卡、高压刺漏等,但钢丝作业在整个勘探、开发过程优势不可替代,研究钢丝作业面临的问题、提出解决方案并进行风险评估,非常具有实践意义。

参考文献:

- [1] 吴志均,段德祥,王文广等.明格布拉克构造“五高”深井试油测试技术[J].油气井测试,2020,29(2):13-20.
- [2] 翟鹏.含硫超深井试气技术难点探讨[J].化工管理,2013(8):144.
- [3] 陆峰等.高压气井钢丝试井作业天然气水合物的预防对策分析[J].钻采工艺,2018,41(2):61-64.
- [4] 马旺兵.高温高压状态下钢丝试井作业技术的实践应用与风险控制[J].工艺技术,2020(4):244-245.
- [5] 陈康良.含硫气井的硫沉积及其解决途径[J].石油钻采工艺,1990(5):73-79.
- [6] 刘文远,胡瑾秋,姚天福,欧阳铁兵,李相方.深水气井生产过程中的井筒结垢实验规律[J].石油钻采工艺,2020,42(3):375-384.
- [7] 于铁峰,阮井泉,庞占东,等.高矿化度储层油井结盐机理研究[J].油气井测试,2017,26(1):13-15.