

# 陇东区域大井眼超深探井安全钻完井技术研究

惠铁军, 董家林, 童泽亮

川庆钻探工程有限公司长庆钻井总公司, 陕西 西安 710021

**摘要:** 为探索鄂尔多斯盆地西南部中元古界长城系崔庄组、白草坪组暗色泥岩及烃源岩情况, 部署了一口超深探井-PT-\*井, 设计井深6250米, 钻穿长城系进入太古界完钻。采用四开结构, 邻井资料少、地质不明、无超深井施工经验, 白垩纪疏松易漏含砾、井斜难控制、深层超高温、地层坚硬可钻性差等难题共存, 如何安全钻井, 颇具挑战。

**关键词:** 大井眼; 钻具组合; 井壁防塌; 防漏治漏; 完井工具

## Study on the Safe Drilling and Completion Technology of Large Well Hole Ultra-Deep Exploration Hole in Longdong Area

Hui Tiejun, Dong Jialin, Tong Zeliang

CCDC Changqing General Drilling Company, Xi'an, Shaanxi 710021

**Abstract:** In order to explore the situation of dark mudstone and hydrocarbon source rocks in Cuizhuang Formation and Balawn Formation of the Middle Proterozoic Great Wall system in the southwest Ordos Basin, an ultra-deep exploration well-PT-\* well was deployed, with the designed depth of 6250 meters, drilled through the Great Wall system and drilled into the Swire Circle. Using the four-open structure, little data, unknown geology, no ultra-deep well construction experience, Cretaceous loose leakage, difficult to control, deep ultra-high temperature, hard formation, poor drillability and other problems coexist, how to drill safely is quite challenging.

**Keywords:** large well hole; drill tool combination; well wall to prevent collapse; leakage prevention and treatment; well-completion tool

## 引言

长城系超深探井具有埋藏深、大井眼、地层应力大、钻井液维护难度高、测斜仪器耐温不足等难点; 长城系发育有变质含砾石英砂岩<sup>[1]</sup>, 研磨性高, 可钻性差, 单只钻头进尺少, 机速低; 延长组、刘家沟、双石层等地层天然裂缝发育, 地层承压能力低, 区域内漏失井比例43.5%; 埋深4500-6000m的古地温130℃-185℃, 需配套耐温更高、封堵更强的钻井液。

## 一、超深探井施工难点分析

(一) 多层多段井漏。自上而下有黄土层、洛河、延安煤层、长<sub>3</sub>、长<sub>7</sub>、纸坊、和尚沟、石盒子、太原煤层、三山子、北大尖10个易漏层位。

(二) 山西组富含深灰色、黑色泥岩导致防塌难度大, 携砂难; 长城系崔庄组灰绿色泥页岩易塌, 井径扩大严重, 易卡钻。

(三) 大井眼钻进蹿跳钻, 易造成钻具疲劳、螺杆断裂, 设备振动损坏; 返速低, 携砂难, 易造成沉砂卡钻; 钻头切削齿线速度大, 磨损快, 机速低。

(四) 长城系地层硬度大、密度高, 岩石单轴抗压强度高, 机速低, 可钻性差, 单只进尺少。

## 二、超深探井安全钻完井关键配套技术

### (一) 444.5mm 大井眼钻具组合设计

大井眼施工工具的损坏一是由于钻具的纵向振动<sup>[2]</sup>、横向振

动、扭转振动相互叠加作用后形成横向摆动与井壁接触, 形成新的切点, 产生较大交变应力, 引发疲劳断裂; 二是钻具外径与井眼不匹配, 强度不足造成损坏。因此, 合理的螺杆钻具外径、钻铤外径及长度对于减低钻具故障, 防斜打直, 快速钻进尤为重要。

1. 钻铤尺寸: 钻铤尺寸决定着井眼的有效直径 $D_{he}$ 。

$$D_{he} = \frac{D_h + D_c}{2}$$

式中 $D_h$ -- 钻头直径, cm;  $D_c$ -- 钻铤外径, cm; 霍奇根据上述理论提出了允许最小钻铤外径 $D_{cmin}$ 的计算公式:

$$D_{cmin} = 2D_{cjo} - D_h$$

式中 $D_{cjo}$ -- 套管接箍外径, cm;  $D_h$ -- 钻头直径。

计算出444.5mm井眼钻铤直径为285.5mm。当下部组合中采用螺杆钻具、安装扶正器, 可使用稍小的钻铤, 一般在444.5mm井眼采用228.6mm~279.4mm的钻铤。

2. 钻铤长度: 钻铤长度取决于最大钻压、选定的钻铤尺寸与所需钻铤重量。

按目前广泛采用的浮力系数法, 应保证在最大钻压时钻杆不

作者简介: 惠铁军(1984.02-), 男, 汉族, 陕西西安人, 工程师, 本科, 从事深井钻完井技术与井下事故复杂处置与研究。

承受压缩载荷, 所需的钻铤重量由下式计算:

$$G_c = \frac{W_{\max} \cdot S_f}{K_f \cdot \cos \alpha} \quad K_f = 1 - \frac{\rho_m}{\rho_s}$$

式中  $G_c$ —所需钻铤的重量, KN;  $W_{\max}$ —设计最大钻压, KN;  $S_f$ —安全系数, 取值范围 1.15~1.25;  $K_f$ —浮力系数;  $\rho_m$ —钻井液密度  $g/cm^3$ ;  $\rho_s$ —钢材密度  $g/cm^3$ ;  $\alpha$ —井斜角  $^\circ$

根据钻铤重量并考虑钻铤尺寸选择的有关因素, 即可确定各段钻铤的长度和钻铤柱的总长度, 其长度可通过下式确定:

$$L_c = \frac{W_{\max} \cdot S_n}{q_c \cdot K_f \cdot \cos \alpha}$$

式中  $L_c$ —所需钻铤长度  $m$ ;  $W_{\max}$ —设计最大钻压 KN;  $K_f$ —浮力系数;  $S_n$ —安全系数;  $q_c$ —钻铤单位重量 KN/m;  $\alpha$ —井斜角  $^\circ$

PT-\* 井 444.5mm 井眼 1318m, 假设钻压 140KN, 钻井液密度为  $1.10g/cm^3$ , 井斜角  $\leq 2^\circ$ ,  $S_f$  取值 1.25,  $S_n$  取值 1.2, 使用 228.6mm 钻铤 3 根 (27m)、203.2mm 钻铤 6 根 (54m), 计算得出 177.8mm 钻铤长度为 55.9m (未考虑 286mm 螺杆钻具、244.5mm 液压减震器重量)。

### 3. 大井眼快速钻进防斜打直组合:

对于旋转钻井, 破岩机械能量采用比钻压与转速的乘积来衡量, 受制于大井眼钻具尺寸的限制, 钻头上施加的钻压不足<sup>[3-4]</sup>, 造成大井眼机械能量不足, 目前国内常使用的 444.5mm 及以上钻头的比钻压远低于 215.9mm 和 311.2mm 钻头  $20kN/in$  的水平。要提高机械能量除了提高钻压外还可采用动力钻具提高钻头转速达到提高机械能量的目的。在保持恒定比钻压的条件下如将钻头转速提高, 也会使机械钻速有较大幅度的提高<sup>[5]</sup>。

结合 HT14 井施工数据, 采用双扶单弯动力钻具组合钻进, 可以提高钻头转速而且使用大尺寸螺杆能够采用更高的钻压来提高钻井速度, 起到了很好的防斜打直作用。

## (二) 深井个性化 PDC 钻头设计

### 1. 444.5mm 井眼钻头设计<sup>[6]</sup>

针对环河—直罗组泥岩和砂岩, 可钻性好, 埋藏浅, 设计了 7 刀、16 mm 双排齿、强保径、抗冲击能力强的 TS716PDC 钻头, 大深排屑槽流道设计, 利于井底净化。

直罗底部含有不均质石英砂岩、泥岩等, 岩性混杂, 设计了 9 刀、16 mm 双排齿、强保径、抗冲击能力强的 SD6921PDC 钻头。

### 2. 311.2mm 井眼钻头设计

针对延长组—刘家沟大段均质砂岩, 设计了 6 刀、16 mm 双排齿、强保径的 SFD65DH 钻头, 采用 55-60l/s 排量钻进, 保证净化, 实现了 311.2mm 单只钻头进尺 1353 米最高记录, 为区块最优指标。

针对下古界张夏—徐庄, 岩性密度大, 单轴抗压强度高, 研磨性强, 钻头磨损严重, 进尺低, 设计了 8 刀、13 mm 双排齿、加强保径带倒划眼、肩部限位、鼻部抗冲击能力强的 SFD85DH 钻头; 针对蓟县—长城系洛峪口地层的高研磨性, 设计了 8 刀、13 mm 双排齿、强保径、带孕镶保径齿的个性化高抗磨 TS813 钻头, 应用效果良好。

### 3. 长城系 215.9mm 井眼钻头改进及设计

深井段因地层高温、压实性强、岩石抗压强度高因素, PDC 钻头钻速慢、单只进尺少; 普遍采用涡轮+孕镶钻头施工, 但孕镶钻头本体长、满眼、涡轮扭矩低等原因, 易发生钻头阻卡。

通过分析地层岩性及特性, 优化改进使用哈里伯顿 GT84DRS 系列钻头+中速螺杆钻具组合, 提高了耐磨性及抗冲击性, 改变 PDC 破岩为冲击压碎、研磨再带出井筒的破岩方式。该钻头施工过程中扭矩平稳, 钻时稳定, 单只钻头进尺逐步突破到 216m。

在深井段使用耐温 160-170 $^\circ$ C、3/4 头高速螺杆+PDC 钻头钻进, 钻头转速 300-400rpm, 提高硬地层破岩效率, 相较于孕镶+涡轮钻进组合, 提速约 65.9%。

## (三) 高抗温钻井液体系及井壁防塌

针对深井温度高, 钻井液性能难控制, 在 HT14 井基础上实验改进出超高温钻井液体系, 该体系以抗高温 FT401、SMP-3、KFT、白土、石灰石为主要处理剂, 复配 K-PAM、KCl、3000 目 ZDS 进行防塌、封堵, 具有强封堵、低失水、高抗温 (180 $^\circ$ C) 性, 兼顾纳米级粒度处理剂复配, 控粘度、降固含, 高剪切稀释性, 低循环压耗, 减少地层呼吸效应, 防塌防漏效果良好。

深井钻井液除高抗温外, 在钻进过程中应勘测全套性能, 控制塑性粘度, 降低循环压耗, 预防井漏; 可靠的流变性是携砂清理井筒的关键, 通过井眼清洁监测分析调整处理钻井液。通过高抗温钻井液体系的应用, 崔庄组泥岩稳定性大幅加强。HT14 井崔庄组泥岩打开周期 34d, 剥落坍塌严重, 返出岩屑失真; PT-\* 井至完井时崔庄组打开 90d, 井下正常, 电测井径扩大率最大仅 14.8%, 裸眼段起下钻正常。

## (四) 311.2mm 大井眼完井技术与应用

良好、稳定、清洁的井眼是下入套管的关键, 深井大井眼如何清理干净井筒是作业的难点。通过通井组合刚度计算、与套管刚度对比模拟、使用定制的 304mm 岩屑清除扶正器<sup>[7]</sup>通井、分段携砂清洗井筒、短起下验证等措施, 采用“工具+工艺+钻井液”相结合的方式清洁井筒, 以保障套管下入顺利, 同时也应根据井深提前调节套管长度, 考虑套管伸长量, 裸眼悬空尽量控制在 5m 以内。

根据胡克定律计算 4657m 技术套管在自重下的伸长量<sup>[8]</sup>:

$$\Delta L = \frac{q \cdot L^2 \cdot 100}{2 \cdot E \cdot A} \cdot \delta$$

L 为套管长度  $m$ ,  $q$  为套管单重  $kg/m$ ,  $E$  为弹性模量  $E=210GPa$ ,  $A$  为管材横截面积  $cm^2$ ,  $\delta$  为浮力系数, 计算出套管伸长量为:  $347.26cm, 4657m+3.48m < 4663m$ , 符合套管下深+伸长量小于井深的要求, 满足下套管条件。

采用单扶组合通井, 根据水平井斜井段井眼与套管相容性分析<sup>[9]</sup>中刚度对比  $1.32 > 1$ , 满足套管下入要求。

## (五) 元古界长城系螺杆钻具组合取心技术

PT-\* 井首次在陇东区域元古界长城系采用孕镶取心钻头+川式耐高温高强取心筒+螺杆/顶驱的井底动力驱动的复合回转钻进工艺进行取心作业<sup>[10]</sup>, 外筒材料为 42CrMo 钢, 其弹性模量  $E=210GPa$ , 屈服应力值  $930MPa$ , 设安全系数 1.5, 则许用应力:  $930 \div 1.5=620MPa$ 。计算出最大拉力为:  $F = \delta \cdot A = 620 \cdot (172^2 - 136^2) \cdot 3.14 \div 4 \div 1000 = 5399.28kN$ , 实际使用时, 割心拉力不会超过  $150kN$ , 因此工具安全, 满足施工要求。

取心钻头转速 110-120rpm, 机速提高, 基本与全面钻进钻相当, 较常规取心方式提高 46.93%。

## (六) 深井井漏防治技术

对于深井而言, 裸眼段井漏, 极易造成漏塌矛盾, 导致井

下复杂。PT-\*井四开施工中,在北大尖、白草坪段(4884-5174m)共发生14次多点长段漏失,其中2次失返;2次通过随堵、11次挤封、1次注水泥堵漏方式,堵漏均取得良好效果。

在钻进过程中通过地层岩性、元素分析得出漏失原因:一是玄武岩喷发过程中地层中产生气泡,聚集形成“气包”,此地层漏失为填充型,无长效性。钻至5757m瞬时消耗 $1.3\text{m}^3$ 后正常,后续再无消耗。二是地层本身承压能力弱,当量ECD过高会发生漏失。钻至4884m时,漏速 $18\text{--}20\text{m}^3/\text{h}$ ,通过挤封提高地层承压后正常。三是地层在沉积过程中,受侵蚀、水流等影响,存在微裂缝(如北大尖、白草坪组含有方解石),在5123-5238m钻进时,当钻时加快,返出岩屑中还有方解石时,都不同程度发生了漏失。通过漏速、漏失压力分析、随钻元素分析,判断漏失原因及类型,优选抗高温堵漏材料,粒径按照正态分布,最大化与地层裂缝匹配,通过随堵、挤封、注水泥堵漏工艺,完成堵漏工作。

### (七) 深井段井下故障复杂预防技术

深井段钻进主要有钻具断裂、落物卡钻、坍塌卡钻等主要井下故障,深井因钻具悬重大,抗拉余量低,极易出现钻具故障。可靠的钻具及检测是有效防止钻具故障的有效手段。为更好的传递扭矩及保障钻具接头处的密封,PT-\*井采用了双台阶 $139.7\text{mm}$ 钻杆+ $127\text{mm}$ 钻杆的复合钻柱钻进<sup>[11]</sup>,通过泵压双坐岗监控、每趟钻对入井接头及钻铤探伤、卸扣释放应力、定期倒换等措施,无钻具故障发生。

在长城系北大尖下部存在棕红色变质沉积岩,沉积岩与变质岩互层、变质岩空隙间填充物胶结不牢,钻进时受钻头挤压刮削、撕裂滑脱破碎,岩屑为片、块状( $0.5\text{cm}\times 2\text{cm}\times 2\text{cm}$ ),易出现钻头阻卡,采取每钻进 $2\text{m}$ 进行一次拉划,清除钻头处岩屑,打替根方式钻进,能有效降低卡钻风险。还应根据钻时、岩屑、元素分析,细化钻进参数匹配:沉积岩地层稳定且连续,宜适当增加钻压 $10\text{--}20\text{KN}$ ,提高钻速;变质岩弱化钻压,保护钻头,同时防卡;地层岩屑返出带有方解石等填充物时,可能出现漏失,应提前随堵漏剂钻进防漏。

## 三、实施效果

通过以上钻井技术的配套实施,取得了显著效果:井身质量全优,与同类型井相比,机械钻速大幅提高、钻井周期大幅缩短。

### (一) 井身质量全优

PT-\*井井身质量全优。井斜得到有效控制,一开段( $0\text{--}315\text{m}$ )井斜最大仅为 $0.88^\circ$ (井深 $250\text{m}$ ),二开井段( $315\text{--}1318\text{m}$ )最大井斜仅为 $1.15^\circ$ (井深 $1275\text{m}$ ),三开井段( $1318\text{--}4663\text{m}$ )最大井斜 $1.15^\circ$ (井深 $1275\text{m}$ ),全角变化率只有 $0.45^\circ/30\text{m}$ ,远远小于设计中全角变化率标准 $3.0^\circ/30\text{m}$ 。四开井段( $4663\text{--}5818\text{m}$ )最大井斜 $1.15^\circ$ (井深 $5550\text{m}$ ),全角变化率只有 $0.598^\circ/30\text{m}$ ,远远小于设计中全角变化率标准 $4^\circ/30\text{m}$ 。井径扩大率得到有效控制,平均井径扩大率仅为 $8.11\%$ ,小于一般井径扩大率 $10\%$ 。

### (二) 机械钻速大幅提高

$444.5\text{mm}$ 井段机速达到 $16.5\text{m}/\text{h}$ ,比HT14井提高 $134\%$ , $311.2\text{mm}$ 井段机速达到 $13.03\text{m}/\text{h}$ ,比HT14井提高 $59.5\%$ 。在长城系北大尖变质岩地层使用PDC+高速螺杆钻进,相较于孕镶+涡轮钻进组合,提速约 $65.9\%$ ,同时规避涡轮钻具易卡风险,实现长城系高研磨变质岩地层去涡轮施工。

### (三) 钻井周期大幅度缩短

$311.2\text{mm}$ 井眼用时 $40.75\text{d}$ 钻至井深 $4663\text{m}$ ,比设计周期缩短 $13\text{d}$ 。创造了区块元古界 $311.2\text{mm}$ 井眼单只钻头最高进尺 $1353\text{m}$ 、 $311.2\text{mm}$ 井眼钻深最深、长城系单只钻头最高进尺 $216\text{m}$ 、长城系取心最高机械钻速 $3.67\text{m}/\text{h}$ 等8项指标记录。

### (四) 应用高抗温钻井液体系并壁稳定性大幅提高

通过高抗温钻井液体系的应用,崔庄组泥岩稳定性大幅加强,HT14井崔庄组泥岩打开周期 $34\text{d}$ 剥落坍塌严重,返出岩屑失真;PT-\*井至完井时崔庄组打开 $90\text{d}$ ,井下正常,电测井径扩大率最大仅 $14.8\%$ ,平均井径扩大率 $8.11\%$ ,远远低于设计要求的 $20\%$ ,裸眼段起下钻正常。

### (五) 深层系防治漏效果显著

在北大尖、白草坪段( $4884\text{--}5174\text{m}$ )发生过14次多点长段漏失,钻具组合中安装PBL,应用随漏、桥浆挤封等,成功率 $100\%$ ,节约处置时效 $167.5\text{h}$ 。

### (六) 元古界地层取心技术突破

首次在陇东区域长城系采用孕镶取心钻头+川式高强取心筒+螺杆+顶驱的复合回转钻进工艺进行取心,取心钻头转速 $110\text{--}120\text{rpm}$ ,速度大幅提高,基本与全面钻进钻时相当,较常规取心方式钻提高 $46.93\%$ 。共使用螺杆取心 $3$ 趟,取心进尺 $16.6\text{m}$ ,取心收获率 $100\%$ 。

## 四、结论与建议

1. 如配备大尺寸钻铤( $279\text{mm}$ )采用大钻压钻进提高破岩机械能量, $444.5\text{mm}$ 井眼的机械钻速必定会有大幅度提高。
2. 长城系北大尖下部变质岩钻进,需弱化参数,利于保护钻头,延长寿命。
3.  $444.5\text{mm}$ 井眼采用单弯螺杆组合,螺杆度数应不大于 $1.25^\circ$ 。PT-\*井使用 $0.75^\circ$ 螺杆,防斜打直效果好,未出现因井眼扩大交变载荷变大引发的钻具断裂。

### 参考文献

- [1] 井向辉, 才才利, 白海峰, 等. 鄂尔多斯盆地元古界长城系沉积、储层特征及油气勘探潜力 [C] // 中国矿物岩石地球化学学会岩相古地理专业委员会, International Society of Palaeogeography (ISP, 国际古地理学会), 中国矿物岩石地球化学学会沉积学专业委员会, 中国地质学会沉积地质专业委员会. 第十七届全国古地理学及沉积学学术会议摘要集——专题17 超深储层表征与规模优质储层形成、保存机理. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院; 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室; 2023:3. DOI:10.26914/c.cnkihy.2023.040876.
- [2] 苏凯, 孙友宏, 贾瑞. 基于有限元法的钻杆柱纵向振动分析 [J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2015, 42(12):52-56.
- [3] 钻井手册(甲方) [M]. 北京: 石油工业出版社, 1990.
- [4] 张国龙, 曹满党, 倪益明. 深井大尺寸井眼钻速低的原因及对策 [J]. 石油钻探技术, 2001, 29(2):24-25.
- [5] 潘仁杰. 莫深1井 $\phi 444.5\text{mm}$ 大尺寸井眼钻井技术 [J]. 天然气工业, 2008(07).
- [6] 王雷, 李勇, 李洪利, 等. 页岩油地层高效PDC钻头的设计及应用 [J]. 设备管理与维修, 2023, (12):62-64. DOI:10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2023.06D.24.
- [7] 张鑫, 何阳, 和鹏飞, 等. 新型配切削齿扶正器在渤海油田的应用 [J]. 科技创新与应用, 2015, (3):123.
- [8] 杨明清, 刘忠. 钻进中钻具伸长量的计算 [J]. 录井技术, 2003, (04):38-42.
- [9] 石崇东. 水平井斜井段井眼与套管相容性分析 [J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2018, 20(01):63-66.
- [10] 张伟. 螺杆钻具取心钻进系统(KIBM系统) [J]. 探矿工程, 1987, (02):60-62.
- [11] 陈锋, 宾国成, 刘志虎, 等. 钛合金/钢钻杆复合钻柱动力学特性分析与优化设计 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2024, 48(03):75-83.