

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2020034

塔里木油田库车山前超高压盐水层 精细控压钻井技术

刘 伟¹, 周英操¹, 石希天², 王 瑛¹, 雷万能², 李 牧¹

(1. 中国石油集团工程研究院有限公司, 北京 102206; 2. 中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司, 新疆库尔勒 841000)

摘 要: 塔里木油田库车山前巨厚盐膏层普遍发育超高压盐水, 且盐膏层中夹杂破裂压力低的泥岩层, 导致安全钻井密度窗口窄, 易发生井涌、井漏、井塌和卡钻等井下故障。通过精细描述钻井液循环系统流量变化特征, 定量分析钻井液出入口流量差与溢流量、漏失量及高密度钻井液弹性变形量间的相互关系, 可以实时快速判断溢流和漏失, 计算求取地层压力, 并将自动控压排水与控压压回相结合, 精确控制地层与井底的压力差, 有效控制合适的盐水返出量, 大幅降低溢流、井漏等井下风险, 形成了超高压盐水层微流量精细控压钻井技术。该技术在克深 A 井和克深 B 井进行了现场试验, 均安全快速钻穿超高压盐水层, 大幅提高了机械钻速, 缩短了钻井周期, 降低了钻井成本。研究与应用表明, 超高压盐水层微流量精细控压钻井技术可快速发现溢流和漏失, 精确控制地层盐水返出或者钻井液漏入地层, 实现可控微溢流或漏失, 大幅减少了盐水排放时间, 确保了井眼稳定, 实现了安全快速钻穿超高压盐水层的目的, 为超深井复杂地层高效钻进提供了新的技术手段。

关键词: 超高压盐水层; 控压钻井; 微流量控制; 溢流; 井漏; 库车山前; 塔里木油田

中图分类号: TE249

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2020)02-0023-06

Precise Managed Pressure Drilling Technology for Ultra-High Pressure Brine Layer in the Kuqa Piedmont of the Tarim Oilfield

LIU Wei¹, ZHOU Yingcao¹, SHI Xitian², WANG Ying¹, LEI Wanneng², LI Mu¹

(1. CNPC Engineering Technology R & D Company Limited, Beijing, 102206, China; 2. PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang, 841000, China)

Abstract: Ultra-high pressure brine development (pressure coefficient of up to 2.65) is common in the thick salt formation of the Kuqa Piedmont in the Tarim Oilfield, and the salt formation contains a mudstone layer with a low fracture pressure gradient, which leads to a narrow drilling safety density window, prone to downhole problems such as spill, lost circulation, collapse, stuck pipe, etc. By precisely describing the flowrate change characteristics of drilling fluid circulation system, and quantifying the correlation among the inlet/outlet flowrate difference of the drilling fluid, the spill volume, leakage volume and the elastic deformation volume of high-density drilling fluid, it is possible to realize the rapid and real-time identification of spill and leakage and calculate the formation pressure. By combining the automatic pressure-controlled drainage and pressure-controlled bull-heading, it is possible to accurately control the difference between the formation pressure and bottomhole pressure, and effectively control the appropriate amount of brine return. In this way, it is possible to significantly reduce the downhole risks of both spill and leakage, forming the managed pressure drilling technology by a fine controllable micro-flowrate in an ultra-high pressure brine layer. The technology has been tested in Well Keshen A and B, and drilled through the ultra-high pressure brine layers safely and quickly, which greatly increases the ROP, shortens the drilling cycle and saves the drilling cost. Research and application showed that the managed pressure drilling technology by fine micro-flowrate control in ultra-high pressure brine layer could quickly detect spill and leakage, accurately control formation brine return or lost circulation of drilling fluid, and achieve a controllable micro-spill or leakage, which can reduce the brine discharge time greatly, ensure the borehole stability, and achieve the purpose of drilling through ultra-high pressure brine layer safely and quickly. The technology has provided a technical means for the efficient drilling of ultra deep wells in complex formations.

Key words: ultra-high pressure brine layer; managed pressure drilling; micro-flowrate control; spill; lost circulation; Kuqa Piedmont; Tarim Oilfield

塔里木油田库车山前构造蕴含丰富的天然气资源, 是我国天然气上产的重要区块。该构造超深井深部巨厚盐膏层岩性复杂, 普遍发育超高压盐水层(地层压力系数最高达 2.65), 纵向上分布无规律, 且盐层间夹杂破裂压力低的泥岩层, 导致安全钻井密度窗口窄, 钻井过程中仅调整钻井液密度无法平衡地层压力, 井喷、井漏和卡钻等井下故障频发。

收稿日期: 2019-12-24; 改回日期: 2020-02-04。

作者简介: 刘伟(1977—), 男, 安徽当涂人, 2000年毕业于江汉石油学院石油工程专业, 2004年获中国石油大学(北京)油气井工程专业硕士学位, 2008年获中国石油勘探开发研究院油气井工程专业博士学位, 教授级高级工程师, 主要从事控压钻井技术与装备研发、深井超深井钻井技术研究工作。E-mail: liuweidri@cnpc.com.cn。

基金项目: 国家科技重大专项课题“深井超深井井筒安全钻井技术与装备”(编号: 2016ZX05020-003)资助。

据统计,近10年来库车地区发生超高压盐水溢流的井占总井数的25%以上,损失数亿元,严重制约了该地区天然气的高效勘探开发^[1]。

以前,塔里木油田钻进超高压盐水层时采用手动控压排水技术^[1-4],通过手动控制节流阀调节井口回压和钻井液排量,使盐水按一定比例均匀侵入环空钻井液中然后排出,且为了避免单次排水量过大(盐水侵入体积一般不允许大于环空体积的30%)导致的高套压及油基钻井液破乳风险,要求多次排出盐水,以降低超高压盐水层的地层压力^[5-9],在溢流与井漏之间寻找压力平衡点,安全钻穿盐水层。随着超高压盐水层压力控制精度的要求越来越高,手动控压排水技术已经很难满足安全钻井的需求。为此,国外开展了恒定井底压力的控压钻井技术研究及现场应用^[10-19],在高压盐水层(地层压力系数约2.10)压力控制和钻井液密度设计方面取得良好的效果;但是,库车地区山前构造超高压盐水层的压力控制问题更为复杂,且没有可借鉴的成功案例。

笔者应用自主研发的精细控压钻井系统^[20-23],根据压力、流量双目标控制原则,通过精细描述钻井液循环系统流量变化特征,将自动控压排水与控压压回相结合,精确控制地层压力与井底环空压力的压力差,实现了可控微溢流或漏失,形成了超高压盐水层微流量精细控压钻井技术,并在克深A井与克深B井进行了现场试验,均安全快速钻穿超高压盐水层,大幅减少了盐水排放时间,保证了井眼稳定,为库车地区山前构造超高压盐水层安全快速钻进提供了一种新的技术手段,也为类似复杂地层的安全高效钻进提供了技术借鉴。

1 超高压盐水层控压钻井技术难点

库车山前巨厚盐膏层普遍发育,埋深484.00~7 945.00 m,层间发育超高压盐水层。超高压盐水层与薄弱地层(主要是破裂压力低的泥岩层)位于同一裸眼段内,且超高压盐水层纵向上分布无规律,安全钻井密度窗口窄,应用常规钻井技术钻进时,因无法准确预测盐水层压力,难以合理设计钻井液密度,导致井底压力无法达到平衡,开泵就会发生井漏,而静止或者起钻时就会发生盐水溢出。分析认为,库车山前超高压盐水层控压钻井过程中,存在的主要技术难点为:

1)盐水层压力超高,压力系数最高达2.65,超高密度钻井液(钻井液密度最高达2.60 kg/L、压井液

密度最高达2.85 kg/L)的流变性很难控制。

2)超高压盐水层间存在薄弱地层,且其盐水容积和压力分布没有规律,井筒压力变化复杂,极易出现溢流、井漏同存,建立压力平衡困难。

3)井筒存在明显的呼吸效应,压力流量反馈严重滞后,导致在地面判断井底压力变化、井筒与地层的流体交换十分困难。以克深A井为例,启停泵时钻井液出口流量出现严重延迟,启泵20~30 min内,入口进入量较出口返出量累计多2~3 m³;进出口流量达到平衡后停泵,20~30 min后出口才断流,累计多返出2~3 m³。

2 超高压盐水层精细控压钻井工艺

与常规超深井相比,库车山前超深井因发育超高压盐水层而在钻井液流量监控方面存在很大差异,一是由于井深导致流量反馈信号的延迟,二是由于钻井液密度高而导致的弹性变化。因此,需要监测钻井液出入口流量的延迟量,标定启停泵特征、钻井液特征等,但常规手动控压排水技术无法满足流量监控的需求,而精细控压钻井技术具有压力控制精度高、流量监测精度高2个显著优势,通过精确控制井底压力与地层压力的压力差、钻井液循环入口与出口的流量差,能实现安全快速排放盐水的目的,从而解决高压盐水层安全高效钻进的难题。

2.1 微流量控制方程的建立

根据达西定律,以线性渗流公式描述井筒与地层的流体交换(可能是超高压盐水进入井筒,也可能是钻井液进入地层):

$$\Delta Q = KA\Delta p/L \quad (1)$$

式中: ΔQ 为井筒与地层间的流体交换速度,即溢流速度或者漏失速度,cm³/s; A 为井筒与超高压盐水层的接触面积,cm²; K 为渗流系数,cm²/(Pa·s); L 为渗流通道长度,cm; Δp 为井底与地层的压力差,Pa。

由式(1)可以看出,由于 K 、 A 和 L 均为客观因素而不可改变,因此, Δp 是影响盐水溢流量或者钻井液漏失量的主要因素。在此基础上,针对启停泵及井筒压力复杂多变的问题,在建立钻井液循环系统流量分析模型(如图1所示)的基础上,得到了超高压盐水层微流量控制方程:

$$Q_{in} = Q_{out} + Q_s - Q_l - Q_e \quad (2)$$

式中: Q_{in} 为钻井液入口进入量,m³; Q_{out} 为钻井液出口

返出量, m^3 ; Q_s 为盐水溢流体积, m^3 ; Q_l 为钻井液漏失体积, m^3 ; Q_e 为高密度钻井液弹性变形量, m^3 。

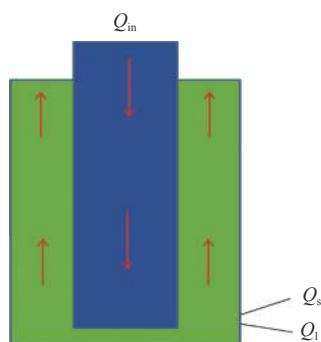


图 1 钻井液循环系统流量分析模型

Fig.1 Flowrate analysis model of drilling fluid circulation system

2.2 控压钻井技术方案

由于超高压盐水层安全钻井密度窗口窄, 甚至无窗口, 所以不能采取井底压力恒定的压力控制方式, 需通过调整井口压力的大小, 逐步摸索溢流或者漏失的程度, 逐渐达到井底压力平衡。因此根据地层压力窗口特性及是否易漏, 设计了以排为主、控溢止漏和以压为主、止溢控漏 2 种控压钻井技术方案。

2.2.1 以排为主、控溢止漏方案

图 2 为可控微溢流精细控压钻井压力控制基本原理(图中, p_s 为井口回压, MPa; p_h 为井底压力, MPa; p_p 为地层孔隙压力, MPa; p_f 为地层破裂压力, MPa; p_l 为地层漏失压力, MPa)。由图 2 可见, 安全密度窗口上限为 p_f 和 p_l 中的小者, 下限为 p_p 。

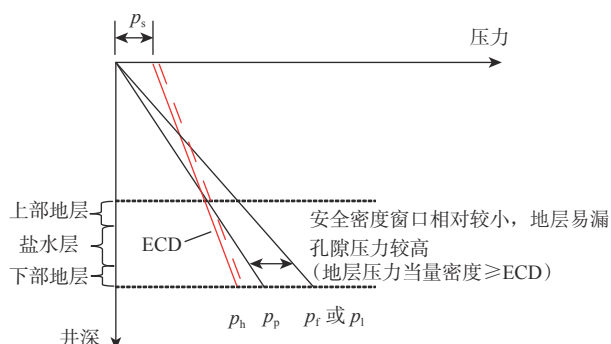


图 2 可控微溢流精细控压钻井压力控制基本原理

Fig.2 Basic principles of precise managed pressure drilling by controlling micro-overflow

以排为主、控溢止漏方案适用于超高压盐水层压力较高、安全密度窗口较窄和地层易漏的情况, 以排放盐水为主, 兼顾避免钻井液漏失, 有效控制溢流速度, 缓慢释放地层压力。该方案设计采用较

低密度钻井液钻进超高压盐水层, 井底压力为钻井液静水压力+循环摩阻+井口回压(规定不超过 5.0 MPa, 一般为 0.5~3.0 MPa), 要求当量循环密度(ECD)一般比地层压力当量密度低 0.01~0.06 kg/L。现场施工时, 控制 p_h 小于 p_p , 严格控制排放盐水速度, 逐步释放地层压力, 实时监测钻井液是否漏失, 要求实现不漏不溢。

2.2.2 以压为主、止溢控漏方案

图 3 为可控微漏失精细控压钻井压力控制基本原理(图中参数与图 2 中相同)。以压为主、止溢控漏方案适用于超高压盐水层压力较低、安全密度窗口较大、地层不易垮塌的情况, 以压回为主, 适当压开薄弱地层, 控制漏失速度, 兼顾避免因地层反吐、流体置换等问题而发生溢流。该方案设计采用较高密度钻井液钻进超高压盐水层, 井底压力为钻井液静水压力+循环摩阻+井口回压(规定不超过 5.0 MPa, 一般为 0~0.5 MPa), 要求 ECD 接近地层压力当量密度(差值一般不超过 0.01~0.02 kg/L)。现场施工时, 若 p_h 初始值低于 p_p , 根据溢流情况, 可较快地增加井口回压, 无需释放地层压力, 快速达到不漏不溢的状态, 钻穿目的层。

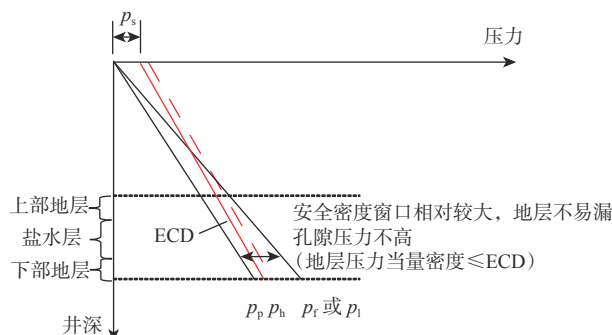


图 3 可控微漏失精细控压钻井压力控制基本原理

Fig.3 Basic principles of precise managed pressure drilling with controllable micro-leakage

2.3 控压钻井工艺措施

库车山前盐水层超高温超高压, 目前国内还没有满足要求的抗高温高压环空压力测量工具, 因此, 需利用水力学软件模拟计算、实时监测钻井液出入口流量, 维持井底压力恒定, 实施微流量控压钻井。其钻井工艺措施为:

1) 正常钻进、扩眼和通井。在该工况下, 需要设计合理的钻井液密度, 监测钻井液出入口流量, 保持井底压力处于微欠平衡状态。

2) 接单根。施工时需利用回压补偿系统提高井口回压, 以补偿环空压力损耗。

3)起下钻。起钻时井口回压控制在5.0~7.0 MPa,控压起钻到设计井深,控压注入重浆帽,转为常规起钻。下钻时,常规下钻到重浆帽底部,控压替出重浆,然后控压下钻,井口回压控制在4.0~6.0 MPa。

2.4 井下故障处理措施

1)溢流。如果发生溢流,按照一次升高0.5 MPa、观察5 min的原则,逐步提高井口回压,直至溢流终止;如果溢流对压力变化极其敏感,可以减小井口回压一次调整值;如果井口回压高于5.0 MPa,则以0.01~0.02 kg/L的幅度提高钻井液密度,直至井口回压低于5.0 MPa。

2)钻井液漏失。如果发生钻井液漏失,在允许的井口回压范围内,按照一次0.5 MPa的原则降低井口回压,直至漏失终止;如果钻井液漏失对压力变化极其敏感,可以减小井口回压一次调整值。如果井口回压降至0.5 MPa以内,井下钻井液仍然漏失,漏速小于1 m³/h时,正常控压钻进;否则,需降低钻井液密度,一个循环周钻井液密度降低0.01~0.02 kg/L。

3 现场应用

塔里木油田克深A井与克深B井钻进超高压盐水层时应用了精细控压钻井技术,实现了可控微溢流或漏失,大幅缩短了盐水排放时间,保证了井眼稳定,实现了安全快速钻穿超高压盐水层的目的。其中,克深B井首次实现零密度窗口安全钻穿超高压盐水层,解决了采用放水泄压法施工49 d无进尺的难题,仅用时11 d一趟钻完成超高压盐水层钻进作业。下面以克深B井为例介绍精细控压钻井技术现场应用情况。

3.1 井眼概况

克深B井设计井深7 626.00 m,设计采用塔标II五开井身结构。由于四开钻遇高压盐水层时发生溢流,采用手动控压排水方式无法有效控制溢流,于是应用精细控压钻井技术钻穿高压盐水层后,提前下入四开套管封固,实钻井身结构为:一开采用 $\phi 558.8$ mm(22")钻头钻至井深200.00 m, $\phi 473.1$ mm(18⁵/₈")套管下深200.00 m;二开采用 $\phi 431.8$ mm(17")钻头钻至井深4 000.00 m, $\phi 365.1$ mm(14³/₈")套管下深4 000.00 m;三开采用 $\phi 333.4$ mm(13¹/₈")钻头钻至井深6 749.00 m, $\phi 293.4$ mm+ $\phi 273.1$ mm(11¹/₂" + 10³/₄")套管下深6 749.00 m;四开采用

$\phi 241.3$ mm(9¹/₂")钻头钻至井深7 068.00 m, $\phi 196.9$ mm+ $\phi 206.4$ mm(7³/₄" + 8¹/₈")套管(壁厚206.38 mm,强度较高)悬挂封固6 347.51~7 068.00 m复合盐层井段,固井后 $\phi 196.9$ mm(7³/₄")套管回接至井深5 847.00 m;五开采用 $\phi 168.3$ mm(6⁵/₈")钻头钻至井深7 366.00 m, $\phi 139.7$ mm(5¹/₂")尾管悬挂6 690.18~7 367.70 m井段, $\phi 206.4$ mm+ $\phi 196.9$ mm(8¹/₈" + 7³/₄")生产套管回接至井口;六开采用 $\phi 111.1$ mm(4³/₈")钻头钻至井深7 465.00 m, $\phi 93.2$ mm(3⁴³/₆₄")筛管下深7 298.00~7 465.00 m。

该井四开井段采用密度2.50 kg/L的钻井液钻至井深6 898.21 m时遇到超高压盐水层(见图4),实测井底地层压力系数为2.61。采用常规钻井技术钻进高压盐水层时,出现停泵就溢、开泵就漏的复杂情况,无安全密度窗口,累计排水41次,共排出盐水1 717.5 m³,套压稳定在7.5 MPa以上,盐水层压力无降低趋势。为此,决定使用密度2.57~2.58 kg/L的钻井液,应用精细控压钻井技术,采用微流量加井底恒压模式微过平衡钻进,主要水力参数模拟结果为:钻井液密度2.54~2.58 kg/L,ECD为2.62~2.64 kg/L,循环钻井液时井口回压控制在1.0~4.0 MPa,停泵时井口回压控制在3.0~7.0 MPa。

3.2 控压钻井施工及效果

克深B井超高压盐水层精细控压钻井施工主要包括控压划眼和控压钻进2个阶段。

3.2.1 控压划眼

该井钻遇高压盐水层时手动控压排水无效,盐膏层井段缩径严重,所以采取了控压划眼下钻,即采取微流量控制模式,精确控制井口回压,保持井下微漏的状态顺利将裸眼划通,为控压钻进奠定基础。该井划眼至井深6 894.10 m时发现井漏,立压由23.1 MPa降至19.7 MPa,出口流量由15.6 L/s降至11.2 L/s。同时,6 883.00~6 893.00 m井段划眼困难,频繁憋停顶驱。控压起钻至井深6 738.00 m(套压控制在4.5~5.0 MPa),关井观察,节流循环(排量13.0 L/s),地面调整钻井液性能,重新控压下钻划眼到底。

控压划眼主要参数为:井口回压2.3~4.5 MPa,钻井液密度2.58 kg/L、漏斗黏度120~144 s、排量10.1~13.4 L/s,立压18.5~21.3 MPa,井底ECD为2.65~2.67 kg/L。

3.2.2 控压钻进

该井自井深6 898.21 m开始应用精细控压钻井技术钻进,钻至井深6 924.00 m时发现井漏(立压

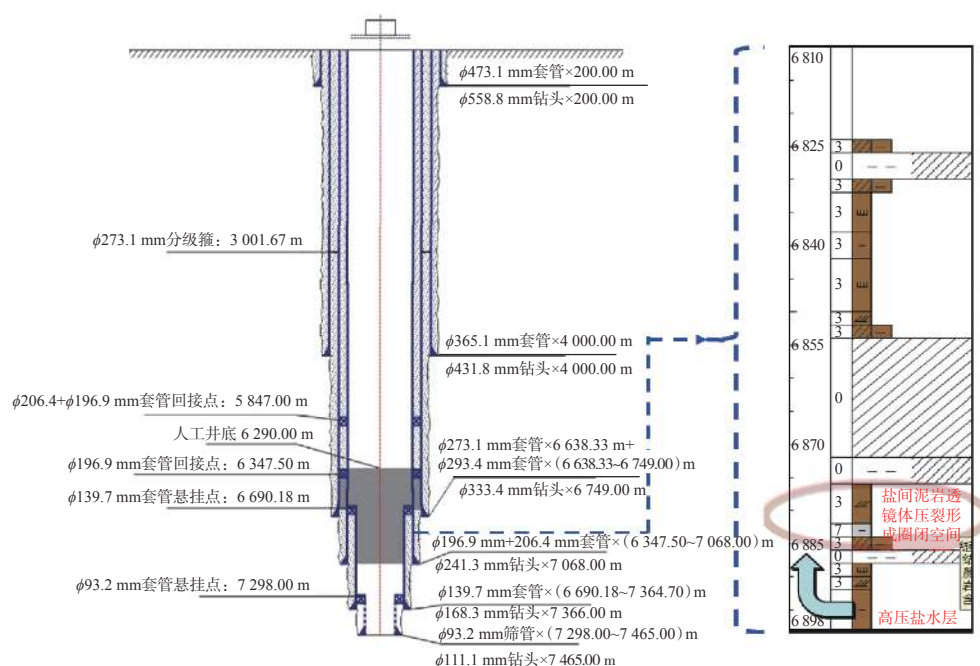


图 4 克深 B 井实钻井身结构及盐水层位置

Fig.4 The actual casing program and brine layer position of Well Keshen B

由 23.2 MPa 降至 22.0 MPa, 套压 2.0~2.5 MPa, 钻井液出口流量减少 2 L/s, 漏失密度 2.58 kg/L 的油基钻井液 3.6 m³, 控压起钻至井深 6 746.00 m (套压 3.8~5.0 MPa), 节流循环 (排量 10.0~13.0 L/s), 关井观察, 地面调整钻井液性能, 控压下钻, 钻至井深 6 890.00 m 时节流循环 (排量 12 L/s), 恢复钻进, 钻至四开中完井深 7 068.00 m, 进尺 169.79 m。

控压钻进主要参数为: 井口回压 0.5~5.1 MPa, 钻井液密度 2.56~2.58 kg/L、漏斗黏度 90~160 s, 立压 18.5~21.3 MPa, 排量 10.1~13.4 L/s, 井底 ECD 2.63~2.66 kg/L。控压起下钻和接单根时, 井口回压控制在 3.5~7.0 MPa。

克深 B 井应用精细控压钻井技术用时 11 d 一趟钻钻穿高压盐水层, 四开井段平均机械钻速 2.26 m/h, 与该地区四开膏盐岩段平均机械钻速 1.30 m/h 相比, 机械钻速提高了 73.8%, 钻井时效大幅提高, 从而降低了钻井成本。

4 结论与建议

1) 精细控压钻井技术可实现全过程微流量监控, 在保证压稳地层及井下安全的条件下微过平衡钻进, 从而防止溢漏, 安全钻穿超高压盐水层, 大幅减少了非生产时间, 缩短了钻井周期。

2) 超高压盐水层控压钻进过程中, 始终保持全过程压稳地层, 控制了盐水对钻井液的污染, 从而

大幅降低了钻井液成本。

3) 精细控压钻井过程中, 通过监测钻井液流量的变化和调整井口回压, 可及时发现钻井液漏失, 并准确确定漏层的位置, 有利于快速采取堵漏措施, 防止井下恶性故障的发生。

4) 目前库车山前超深井多采用高密度油基钻井液钻进, 钻井液流变性随井温变化较大, 体积弹性影响显著, 现有水力计算模型功能相对单一, 计算结果误差也较大, 尚待完善提高。

5) 超高压盐水层窄密度窗口固井仍存在巨大技术挑战, 常规固井工艺易压漏地层, 无法保证固井质量, 而现有控压钻井技术尚无法有效保障固井过程中多段流体 (钻井液、前置液、水泥浆和后置液等) 流动条件下, 精确控制井底压力在安全作业窗口内, 实现不溢不漏, 因此急需研究新型精细控压固井技术, 以有效提升库车山前超高压盐水层固井质量。

参 考 文 献

References

- [1] 尹达, 叶艳, 李磊, 等. 塔里木山前构造克深 7 井盐间高压盐水处理技术 [J]. 钻井液与完井液, 2012, 29(5): 6-8.
YIN Da, YE Yan, LI Lei, et al. High pressure salt water treatment technology of Well Keshen7 in foothill structural zone of Tarim[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2012, 29(5): 6-8.
- [2] 田径. 钻遇盐膏层高压盐水的井控技术 [D]. 成都: 西南石油大学, 2012.
TIAN Jing. Well control technology of high pressure brine drilling

- in salt gypsum layer[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2012.
- [3] 卢俊安, 王春生, 冯少波, 等. 超高压盐水溢流处置技术[J]. 钻采工艺, 2017, 40(5): 5-7.
- LU Jun'an, WANG Chunsheng, FENG Shaobo, et al. Disposal measures for ultra-high-pressure brine overflow[J]. *Drilling & Production Technology*, 2017, 40(5): 5-7.
- [4] 汪蓬勃. 基于巨厚盐膏层以及碳酸盐储层的钻井技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- WANG Pengbo. Research on the drilling technique based on the layer of thick salt paste and carbonate reservoir[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [5] 周健, 贾红军, 刘永旺, 等. 库车山前超深超高压盐水层安全钻井技术探索[J]. 钻井液与完井液, 2017, 34(1): 54-59.
- ZHOU Jian, JIA Hongjun, LIU Yongwang, et al. Research on safe drilling technology for ultra deep ultrahigh pressure saltwater zones in Piedmont Area, Kuche[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2017, 34(1): 54-59.
- [6] 周健. 塔里木油田 KS9 区块含盐地层钻井关键技术研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2017.
- ZHOU Jian. Study on key techniques of salt formation drilling on KS9 Block of Tarim Oilfield[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2017.
- [7] 梁红军, 李军, 李卫东, 等. 高压盐水层控压放水室内实验研究[J]. 钻采工艺, 2019, 42(2): 21-23.
- LIANG Hongjun, LI Jun, LI Weidong, et al. Experimental study on controlled pressure discharge of high pressure brine out of formations[J]. *Drilling & Production Technology*, 2019, 42(2): 21-23.
- [8] 董萌. 克拉苏构造盐膏层钻井提速措施研究与应用[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- DONG Meng. The research and application of the high quality and high speed drilling of salt layer in Kelasu[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [9] 任保友, 刘锋报, 徐兴梁, 等. 塔里木山前构造克深某区块盐膏层井漏技术处理[J]. 西部探矿工程, 2018, 30(2): 75-78.
- REN Baoyou, LIU Fengbao, XU Xingliang, et al. Treatment of lost circulation in salt gypsum layer in Keshen Block of Tarim Piedmont Structure[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2018, 30(2): 75-78.
- [10] 周英操, 崔猛, 查永进. 控压钻井技术探讨与展望[J]. 石油钻探技术, 2008, 36(4): 1-4.
- ZHOU Yingcao, CUI Meng, ZHA Yongjin. Discussion and prospect of managed pressure drilling technology[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2008, 36(4): 1-4.
- [11] CHATAR C, IMLER M D. Overcoming a difficult salt drilling environment in the Gulf of Mexico: a case study[R]. SPE 128192, 2010.
- [12] 张桂林. 土库曼斯坦亚苏尔哲别油田控压钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(6): 37-41.
- ZHANG Guilin. Application of managed pressure drilling technology in Azores Area, Turkmenistan[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2010, 38(6): 37-41.
- [13] CURRY D A, LOURENCO A M, LEDGERWOOD L W, et al. The effect of borehole pressure on the drilling process in salt[R]. SPE 173023, 2015.
- [14] 韩烈祥. CQMPD 精细控压钻井技术应用与思考[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(5): 559-562.
- HAN Liexiang. Application and thinking of CQMPD fine pressure controlling drilling technology[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2018, 40(5): 559-562.
- [15] QASIM Ashraf, ALI Khalid, KHURRAM Luqman, et al. Managed pressure drilling saves multimillion dollar well from abandonment; enabled operator to drill and isolate section to target depth in a challenging plastic salt formation[R]. IPTC 19438, 2019.
- [16] 苏勤, 邢树宾. 缅甸 D 区块 Yagyi-1x 井控压钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(4): 25-28.
- SU Qin, XING Shubin. Managed pressure drilling for Well Yagyi-1x in Block D of Myanmar[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2011, 39(4): 25-28.
- [17] 史肖燕, 周英操, 赵莉萍, 等. 精细控压钻井过程中溢流的模拟和控制[J]. 石油机械, 2019, 47(5): 24-30.
- SHI Xiaoyan, ZHOU Yingcao, ZHAO Liping, et al. Influx simulation and control during managed pressure drilling[J]. *China Petroleum Machinery*, 2019, 47(5): 24-30.
- [18] 周英操, 杨雄文, 方世良, 等. PCDS- I 精细控压钻井系统研制与现场试验[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(4): 7-12.
- ZHOU Yingcao, YANG Xiongwen, FANG Shiliang, et al. Development and field test of PCDS- I precise managed pressure drilling system[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2011, 39(4): 7-12.
- [19] 王江帅, 李军, 任美鹏, 等. 控压钻井环空多相流控压响应时间研究[J]. 石油机械, 2019, 47(5): 61-65.
- WANG Jiangshuai, LI Jun, REN Meipeng, et al. Study on response time of multi-phase annular flow in MPD[J]. *China Petroleum Machinery*, 2019, 47(5): 61-65.
- [20] 周英操, 刘伟. PCDS 精细控压钻井技术新进展[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(3): 68-74.
- ZHOU Yingcao, LIU Wei. New progress on PCDS precise pressure management drilling technology[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(3): 68-74.
- [21] 周英操, 杨雄文, 方世良, 等. 国产精细控压钻井系统在蓬莱 9 井试验与效果分析[J]. 石油钻采工艺, 2011, 33(6): 19-22.
- ZHOU Yingcao, YANG Xiongwen, FANG Shiliang, et al. Field test and analysis on effect of auto-controlled pressure drilling system in the Well Penglai 9[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2011, 33(6): 19-22.
- [22] 刘伟, 周英操, 段永贤, 等. 国产精细控压钻井技术与装备的研发及应用效果评价[J]. 石油钻采工艺, 2014, 36(4): 34-37.
- LIU Wei, ZHOU Yingcao, DUAN Yongxian, et al. Development of domestic fine controlled pressure drilling technology and equipment and evaluation on their application effect[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2014, 36(4): 34-37.
- [23] 周英操. 精细控压钻井技术及其应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2018.
- ZHOU Yingcao. Precise pressure management drilling technology and its application[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018.