

盐井钻井过程中地层压力异常识别与应对策略研究

韦钦鹏

中煤浙江地质集团有限公司杭州分公司 浙江 杭州 310000

摘要: 盐层及其伴生地层(如膏盐层、泥页岩层)具有独特的物理化学性质和复杂的地质构造,极易诱发地层压力异常,进而导致井涌、井喷、井壁失稳、卡钻等一系列复杂事故,严重威胁人员安全、设备完整及生态环境。本文旨在系统研究盐井钻井过程中地层压力异常的成因机理、精准识别方法及科学应对策略。首先,深入剖析了盐层地质特性与压力异常的内在关联;其次,综合论述了基于地震资料、邻井数据、随钻监测(LWD/MWD)及钻井参数响应等多种手段的地层压力预测与实时监测技术;再次,针对不同类型的压力异常(高压、低压、压力过渡带),提出了包括优化钻井液体系、动态调整钻井参数、应用控压钻井(MPD)技术及强化井控管理在内的综合性应对策略;最后,通过典型工程案例分析,验证了所提方法的有效性。研究成果可为盐井安全高效钻探提供理论支撑与实践指导。

关键词: 盐井钻井; 地层压力异常; 压力预测; 随钻监测; 钻井液; 控压钻井

引言

深部盐层通常埋藏于数千米之下,经历了多期次的构造运动,形成了褶皱、断层、盐丘、盐枕等复杂地质体。这些复杂的地质条件,加之盐岩本身固有的蠕变性、溶解性和各向异性,共同构成了盐井钻井作业中高风险的技术挑战。其中,地层压力异常是贯穿盐井钻探全过程的核心难题。所谓地层压力异常,是指地层孔隙流体压力显著偏离静水压力的现象,主要表现为异常高压(超压)和异常低压(欠压)。在盐井钻井中,异常高压常源于欠压实作用、构造挤压、盐岩塑性流动封隔以及流体热增压等机制;而异常低压则多由地层剥蚀、流体采出或盐岩溶解形成溶洞所致。一旦钻井液柱压力无法有效平衡地层压力,轻则引发溢流、井涌,重则导致灾难性的井喷事故;反之,若钻井液密度过高,则可能压漏低压地层,造成钻井液大量漏失,甚至诱发井壁垮塌。传统的钻井压力管理方法在面对盐层这种高度非均质、强非线性的复杂介质时,往往显得力不从心。因此,如何在钻前精准预测、钻中实时识别并动态调控以应对地层压力异常,已成为保障盐井钻井安全、提高钻井效率、降低综合成本的关键所在。

1 盐层地质特性与地层压力异常成因机理

1.1 盐层的物理化学特性

盐岩(主要成分为NaCl)是一种典型的弹-粘-塑性材料,其力学行为对温度、应力状态和时间高度敏感。一是蠕变性:在持续应力作用下,盐岩会发生缓慢而持续的塑性流动。这种特性使其能够像流体一样填充周围空间,从而形成高效的区域性盖层,将下伏地层中的流体(油、气、水)封闭起来,这是形成异常高压最普遍

的原因之一。二是溶解性:盐岩易溶于淡水。在钻井过程中,若钻井液滤失量过大或使用了不合适的水基钻井液,会溶解井壁盐岩,形成不规则的“大肚子”井眼,不仅破坏井壁稳定性,还可能沟通不同压力系统的地层,引发压力串扰。三是低强度与各向异性:盐岩的抗压强度远低于常规砂岩或灰岩,且其力学性能随晶体取向变化,这使得井壁更容易在非均匀应力场下发生塑性变形或剪切破坏。

1.2 地层压力异常的主要成因

结合盐层特性,地层压力异常成因主要有:(1)欠压实作用:快速沉积盆地中,上覆沉积物重量未及及时被孔隙水排出平衡,下伏地层“过载”,盐层作为封隔层加剧此过程,形成异常高压。(2)构造挤压与盐体活动:构造挤压直接增大地层压力,盐岩流动会挤压周围地层,使局部压力骤升^[1]。(3)流体热增压:埋深增加使地温上升,孔隙流体受热膨胀,被致密封隔层封闭后压力升高。(4)渗透压力:高矿化度卤水层与低矿化度淡水层相邻,因半透膜效应,水分子渗透在卤水层产生额外压力,叠加到孔隙压力上。(5)异常低压成因:地下水长期开采、地层抬升剥蚀或盐岩溶解成溶洞,会使局部地层压力低于静水压力。

2 地层压力异常的识别与预测方法

2.1 钻前预测技术

钻前预测旨在为钻井设计提供初始的“压力剖面图”。(1)地震速度反演法:这是目前应用最广泛的区域压力预测方法。基本原理是,异常高压地层由于欠压实,其岩石骨架疏松,地震波传播速度低于正常压实趋势下的速度。通过建立正常压实趋势线(NCTL),并与实际地

震层速度进行对比,利用Eaton法、Bowers法等经验公式即可估算地层压力。对于盐丘等强速度扰动体,需采用先进的全波形反演(FWI)技术以提高精度。(2)邻井数据分析法:充分利用同一区块或邻近构造已钻井的测井、录井、试油及钻井报告数据,是构建目标井压力模型最直接有效的方法。通过对比地层岩性、电阻率、声波时差、密度等测井曲线的变化,可以识别出压力过渡带和异常压力层段。

2.2 随钻实时监测与识别技术

钻前预测存在不确定性,随钻实时监测是动态修正压力模型、及时预警的关键。

2.2.1 随钻测量(MWD)与随钻测井(LWD)

一是随钻伽马(GR):可清晰识别盐层(通常GR值很低)与泥页岩(GR值高)的界面,而压力过渡带常位于泥页岩底部。二是随钻电阻率(Rt):异常高压地层由于孔隙度高、含水饱和度高,电阻率通常会显著降低^[2]。三是随钻声波(DT):与地震速度原理类似,随钻声波时差增大是进入欠压实、异常高压地层的直接信号。

2.2.2 钻井参数响应分析(DC指数法)

这是最经典、应用最广泛的随钻压力监测方法。DC指数综合反映了钻压、转速、钻速和钻头尺寸等因素,其计算公式为:

$$d_c = \log(60 \times \text{ROP} / (N \times D_b)) / \log(12 \times \text{WOB} / (10^6 \times D_b))$$

其中,ROP为机械钻速,N为转速, D_b 为钻头直径,WOB为钻压。在正常压实趋势下,DC指数随井深增加而增大。当钻遇异常高压地层时,岩石强度降低,ROP会突然加快,导致DC指数偏离正常趋势线而下降。通过实时绘制DC指数曲线并与邻井或区域正常趋势线对比,可有效识别压力异常。

2.2.3 气体录井监测

在油气显示层段,地层压力异常常常伴随着后效气、基值气或组分异常。虽然盐井主要目的层为盐矿,但其上下盘常伴生有含油气层系,气体参数的突变同样是压力系统变化的重要指示。

2.2.4 井涌/井漏监测

最直接的异常信号。通过高精度的钻井液池体积监测系统 and 出口流量计,可以实时捕捉到微小的溢流(井涌)或漏失(井漏)现象,这是地层压力与井筒压力失衡的最终表现。

3 地层压力异常的应对策略

3.1 优化钻井液体系

面对盐层特有的溶解性与压力敏感性,钻井液体系的设计必须兼顾压力平衡、井壁稳定与防溶三大核心功

能。首要任务是实现钻井液密度的精准控制,使其始终维持在地层孔隙压力与破裂压力之间的安全窗口内。对于常规盐层,可通过常规加重或稀释手段调节密度;但对于高压与低压互层并存的窄窗口井段,则需依赖更先进的压力控制技术。在此基础上,必须采用饱和盐水钻井液体系,即在水相中加入足量的氯化钠(或针对钾盐层使用氯化钾),使溶液达到饱和状态,从而消除钻井液与盐岩之间的化学势差,从根本上抑制盐岩的溶解,保持井眼几何形态的规整。为进一步提升井壁稳定性,需在饱和盐水基液中复配高效的处理剂。优质的降滤失剂(如改性聚合物或磺化沥青)能够形成薄而致密、韧性良好的泥饼,有效减少滤液向地层的侵入,防止因水化膨胀或盐溶导致的井壁弱化^[3]。同时,引入粒径匹配的物理封堵剂(如超细碳酸钙、石蜡微球或弹性颗粒)可对盐岩中的微裂缝或溶蚀孔洞进行有效封堵,提高井壁的整体承压能力,为安全起下钻和测井作业创造条件。

3.2 动态调整钻井参数

钻井参数不仅是反映地层特性的“传感器”,更是主动调控井筒压力平衡的重要“执行器”。在接近已知或预测的压力过渡带时,应采取预防性措施,主动降低钻压和转速,从而减缓机械钻速。这种操作策略具有双重意义:一方面,可避免因ROP(机械钻速)突增导致DC指数误判或掩盖真实的地层压力变化;另一方面,能有效控制钻头对地层的瞬时冲击力,防止在脆弱的高压或低压界面处诱发井涌或井漏。此外,水力参数的优化同样关键。环空返速必须足够高以确保岩屑的有效携带,避免沉砂卡钻;但过高的泵排量又会显著增加循环压耗,导致当量循环密度(ECD)逼近甚至超过地层破裂压力,尤其在低压溶洞发育段风险极高。因此,需根据实时井下情况,精细调整泵排量,并结合高效喷嘴组合优化水力能量分配,在携岩能力与ECD控制之间取得最佳平衡,实现钻井过程的平稳可控。

3.3 应用控压钻井(MPD)技术

当面对压力窗口极窄(如小于 0.1g/cm^3)的超深复杂盐层时,常规钻井技术往往束手无策,此时控压钻井(MPD)成为保障作业安全的核心技术。MPD的核心原理是通过地面回压控制系统(通常包括旋转控制头、自动节流管汇和回压泵)对井口施加一个精确可控的附加压力,从而将井底压力(BHP)主动维持在一个预设的安全恒定值。其压力控制方程可表述为:井底压力等于静液柱压力、循环压耗与井口回压三者之和。这一机制的最大优势在于实现了井底压力的连续、精确控制,彻底克服了常规钻井中因停泵、起下钻等工况转换导致的

ECD剧烈波动问题^[4]。例如,在钻穿高压盐水层时,MPD可通过增加井口回压补偿钻井液密度不足;而在进入低压溶洞段时,则可迅速释放回压甚至建立微负压,避免压漏地层。这种“动态平衡”能力使得MPD特别适用于穿越盐丘、膏盐层与异常压力互层共存的极端复杂井段,已成为现代深部盐矿勘探开发不可或缺的关键技术。

3.4 强化井控管理与应急预案

首先,必须严格执行24小时坐岗观察制度,由专人不间断监控钻井液池体积、出口流量、泵压、悬重等关键参数的变化趋势,做到对微小溢流或漏失的早发现、早判断、早处置。其次,井控硬件设施必须可靠匹配。防喷器(BOP)组的额定工作压力应不低于目的层最高预期地层压力,并配备完整的剪切闸板、全封闸板等功能模块,且需定期进行功能测试与维护保养,确保其在紧急关井时能够迅速、可靠地密封井口。最后,必须针对盐井特有的风险场景——如盐溶导致的突发性大漏、高压卤水层的快速溢流、以及盐膏层蠕变引起的卡钻等——制定详细、可操作的专项应急预案。预案应明确不同险情下的关井程序、压井方法(如司钻法、工程师法)、堵漏材料选择及人员分工,并定期组织桌面推演和实战演练,确保全体作业人员熟悉流程、反应迅速、协同高效,真正将“安全第一”的理念落实到每一个操作细节之中。

4 工程案例分

4.1 案例背景

某钾盐矿勘探井,设计井深4500米。邻井资料显示,在3800-4200米井段存在一个大型盐丘,其顶部为异常高压含水层(压力系数1.85),而盐丘内部及底部则发育有因古地下水溶蚀形成的低压溶洞群(压力系数0.75)。该井段压力窗口极窄,仅为0.1g/cm³,常规钻井风险极高。

4.2 实施过程与效果

综合地震反演和邻井数据,精细刻画了盐丘形态及高低压地层的空间展布,制定了详细的MPD施工方案。采用KCl饱和盐水钻井液体系,初始密度1.30g/cm³,并备

有加重和稀释材料。全程应用LWD(GR,Rt,DT)和DC指数进行实时压力监测。MPD应用当钻至3780米,DC指数开始明显下降,LWD电阻率同步降低,判断即将进入高压层。立即启动MPD系统,通过调节井口回压,将井底压力精确控制在略高于1.85g/cm³当量密度的水平。成功钻穿400米厚的高压含水层,未发生任何溢流。进入盐丘主体后,监测到钻井液失返,判断已钻遇低压溶洞。MPD系统迅速将井口回压降至零甚至微负压,同时将钻井液密度降至1.20g/cm³,有效防止了因压差过大导致的井壁进一步垮塌,并顺利完成了该井段的钻进和取心作业。

5 结语

本文研究盐井钻井中地层压力异常识别与应对策略,得出以下结论:盐层特性使地层压力异常成因复杂,涉及多种机制耦合。单一预测或监测方法难满足盐井高风险作业需求,需构建融合多维度信息的实时化压力识别体系,以全面把握井下压力状态。应对方面,优化饱和盐水钻井液体系是基础,动态调整钻井参数是常规手段,控压钻井(MPD)技术对超深复杂盐井安全钻进至关重要。此外,严格井控管理和应急预案是安全保障。展望未来,盐井钻井压力管控技术将更智能精准,借助人工智能与大数据建立智能预测模型可提升预测准确性,数字孪生技术能实现实时仿真与决策支持,研发新型高性能盐水钻井液可适应更深更复杂盐层钻探。

参考文献

- [1]李春山,等.深部盐膏层钻井关键技术研究进展.石油钻探技术,2020,48(03):1-10.
- [2]邹晓峰.盐井钻、修井打捞技术分析[J].中国井矿盐,2019,50(06):25-27.
- [3]薛子平,马仙女,马雄伟.套管侧钻技术在盐井中的应用[J].氯碱工业,2025,61(03):1-2+24.
- [4]王治国,李根奎,杨国杰.盐井大井斜开窗侧钻水平井绕腔连通技术[J].石油钻采工艺,2017,39(04):429-434.