

基于数值模拟的卡钻井段应力分布规律与安全钻井液窗口确定

宋俊杰¹, 申少广²

1. 中海油服一体化和新能源事业部平台作业公司, 天津 300450

2. 中海油服油田化学事业部塘沽作业公司钻完井液业务部, 天津 300450

DOI:10.61369/ERA.2026100001

摘要 : 井周应力的分布状态直接和卡钻事故产生关联, 这类井下的复杂事故在钻井工程当中会频繁地出现, 岩石力学原理开展揭示卡钻井段应力分布规律的工作, 进而开展阐明井壁稳定性的作用机理的工作。井眼形成引发了井周应力的重分布, 切向应力集中以及径向应力卸荷共同发挥作用, 使得井壁稳定性出现下降, 要是钻井液密度偏低, 那井壁就可能会出现坍塌缩径的情况, 进而引发卡钻; 要是密度偏高, 那就可能导致地层破裂扩径, 同样会造成卡钻问题。本文来确立安全钻井液密度窗口的判定准则以及现场实施途径, 为开展防范以及管控卡钻事故的工作提供了理论基础和操作指引。

关键词 : 卡钻; 井壁稳定; 应力分布; 安全钻井液窗口; 岩石力学

Numerical Simulation-Based Stress Distribution Law of Stuck Pipe Interval and Determination of Safe Drilling Fluid Window

Song Junjie¹, Shen Shaoguang²

1. Platform Operation Company, Integrated and New Energy Division, China Oilfield Services Limited, Tianjin 300450

2. Drilling & Completion Fluid Department, Tanggu Operation Company, Oilfield Chemistry Division, China Oilfield Services Limited, Tianjin 300450

Abstract : The distribution of circumferential stress around a borehole is directly related to stuck pipe incidents. Such downhole complex accidents frequently occur in drilling engineering. The rock mechanics principle is adopted to reveal the stress distribution law of stuck pipe intervals and further illustrate the mechanism of wellbore stability. The formation of the wellbore triggers the redistribution of stress around the borehole. The combined effects of tangential stress concentration and radial stress unloading reduce wellbore stability. If the drilling fluid density is too low, wellbore collapse and hole shrinkage may occur, thereby causing stuck pipe. If the density is excessively high, formation fracture and hole enlargement may be induced, which also leads to stuck pipe. This paper establishes the criteria for determining the safe drilling fluid density window and its field implementation approach, providing theoretical basis and operational guidelines for preventing and controlling stuck pipe accidents.

Keywords : stuck pipe; wellbore stability; stress distribution; safe drilling fluid window; rock mechanics

引言

在油气钻井作业开展的过程当中, 井下常常会出现卡钻事故, 这类情形不仅普遍存在, 并且危害极大, 钻柱被卡在井眼当中, 其活动受到了限制, 这样就会使得非生产时间得以大幅增加, 甚至还可能引发井眼报废或者侧钻等比较严重的问题。钻井工程当中事故频繁发生, 卡钻问题显得尤其突出, 它所引发的经济损失在井下事故方面占据着显著的位置, 卡钻的缘由较为复杂, 涉及到地质条件、钻井液性能、钻柱力学以及井眼轨迹等多个方面的因素。卡钻现象的主要原因是井周应力失衡, 从而引发了井眼形态的变化或者井壁的塌陷, 井眼形成的时候, 地层岩石原本所具有的三向应力平衡就被打破了, 应力会在井壁这个新自由面上开展重新分布工作。井壁破坏的主要原因是应力重分布超出了岩石的承载极限, 从而引发坍塌掉块或者井眼缩径的情况, 并且会造成钻柱卡阻, 深入开展对卡钻井段应力分布规律的理解工作, 准确地去评估井壁稳定的状况, 来确定适宜的钻井液密度范围, 这对于预防卡钻事故开展管理工作是极为重要的。鉴于岩石力学原理, 开展对钻井卡钻段应力分布特性的系统阐述, 去处理井壁失稳的力学机制分析工作, 来实现安全钻井窗口确定方法的提出, 目的是给现场的钻井作业提供理论指导。

一、卡钻井段井周应力分布特征

（一）原始地应力状态

地应力状态可以借助主应力数值差异来开展划分，分为三类典型模式，垂向主应力在正断层应力区开展主导地位的占据工作，最大水平主应力紧跟在后面，最小水平主应力处于末尾位置。走滑断层应力区呈现出最大水平主应力、垂向主应力以及最小水平主应力依次递减这样的分布情况，逆断层应力区会呈现出最大水平主应力，其次是最小水平主应力，而垂向主应力是最小的。水合物储层钻井过程中，高温钻井液通过热传导、热对流等方式向地层传输的热量会导致不同程度的水合物分解，从而加剧井壁的失稳状况。^[1]井壁的稳定性会受到地应力状态的显著影响，不同的应力条件所引发的结果差异极大程度上，在进行钻井工作之前，原始的地应力场处于一种相对平衡的状态，岩石在三维应力环境当中得以维持稳定，并没有出现破裂的情况，钻井作业会把这种平衡打破。

（二）井眼形成后的应力重分布

在井眼钻穿了之后，原本占据着空间的岩石被进行移除，井壁变成了新的自由面，这样一来，井周应力场会发生根本性的转变，并且应力状态会被重新进行分配，井眼形成的瞬间，井壁的径向应力会从原地应力马上降低到钻井液柱压力，这是最为明显的变化。在钻开地层之前，地层的主要应力场称为地应力，通常将地应力分为3个分量，即垂向应力（上覆岩层应力）、最大水平应力以及最小水平应力。^[2]切向应力出现了急剧攀升的情况，进而引发了应力集中现象，在井周的不同方位方面，切向应力所出现的增长幅度是存在差别的。在钻井过程中，由于其复杂的地质成因和多变的海洋环境，深水、超深水钻井对井壁稳定的分析精度要求更高，为防止出现井壁失稳，应合理计算安全钻井液密度，使井壁既不因钻井液密度过低而发生剪切破坏，引起地层坍塌，又不因钻井液密度过高而压裂地层。^[3]在最小水平主应力方向上，应力集中这种现象是最为突出的，它的数值能够达到原地应力的若干倍；切向应力在最大水平主应力方向上所产生的集中程度相对来说比较低。井眼轨迹以及地应力状态同时对轴向应力的复杂演变开展影响工作，直井当中，轴向应力是受垂向主应力以及泊松效应所主导的，它的波动范围通常没有切向应力那么显著，井壁表层的应力会进行重新分配，这种效应会持续向地层内部延伸，并且逐渐减弱。井壁周边的应力分布呈现出梯度变化的情况，在远离井壁的区域会逐渐趋近原始地应力的状态，钻井活动对地层所产生的扰动，它的影响范围大致被局限在井眼半径倍数之内，要是超出了这个界限，那么地层就基本上会维持它的原始状态。

二、卡钻发生的力学机制

（一）井壁失稳的基本模式

剪切破坏模式经常在钻井液密度不足的情况下出现，井壁岩石所承受的切向应力超出了它的抗剪极限，这使得岩石进入了剪切屈服状态，井壁岩石会因为发生剪切破坏而碎裂剥落，这样就会致使井径扩大，甚至导致井壁失稳。井眼环空当中堆积了大量坍塌物，要是情况严重的话，钻柱会被紧紧地包裹住，从而形成卡钻，要是钻井液密度超出了合理范围，那么拉伸破坏模式就会出现，井壁岩石所承受的切向应力，有可能会转变为拉应力。要

是井壁岩石所承受的拉应力超越了它的抗拉强度，那就会引发拉伸破裂，进而出现沿着井轴延伸的纵向裂缝，钻井液漏失风险是由裂缝扩展所导致的，并且井壁剥落会引发扩径卡钻的情况。钻井液密度区间呈现出两种破坏模式的相反特性，这就决定了安全钻井窗口的存在，也就是：钻井液密度控制时，既不能过低，否则会发生剪切破坏，也不能过高，否则会发生拉伸破坏。

（二）坍塌—缩径型卡钻的力学过程

井壁岩石呈现出塑性特性，主要原因是钻井液密度没能有效地抗衡井周应力，岩石在切向应力集中的区域当中萌生并且扩展了微裂隙，应力持续地作用，微裂隙会逐步地贯通，这样宏观破裂面就得以形成。井壁岩石由于约束失效进而出现剥落现象，最终掉到环空区域当中，井周的应力分布呈现出并非均匀的特性，切向应力峰值的方位会成为优先开展作用的区域，在正断层应力区域当中，坍塌现象通常会沿着最小水平主应力方向展现出来；走滑断层的应力区当中，坍塌方向呈现出了复杂的特性。那么井眼截面在井壁坍塌之后会发生变形，把圆形转变成椭圆形，它的长轴方向和坍塌方向保持一致，岩块会持续不断地堆积在井底环空这个地方，钻柱以及井壁之间的间隙被堆积物给填满了，这样钻柱就被卡住了。井眼缩径现象会直接导致钻柱活动受到限制，坍塌缩径卡钻呈现出渐进的这个特性，初期仅仅是表现为起下钻的阻力有所增加，要是没有及时去处理，就会马上演变为严重卡钻。

（三）破裂—扩径型卡钻的力学过程

井壁承受着由于钻井液高密度所引发的过度内压，井周切向应力的峰值区域当中，原本处于受压状态有可能转变为受拉状态，岩石具备比较强的抗压能力，然而抗拉性能却很明显地偏弱。要是有了拉应力产生，那么井壁就会倾向于开展拉伸致使的破裂工作。在深井钻井过程中，尽管井壁存在泥饼的遮挡作用，但钻井液在压差作用下仍然会渗流进入地层，使得井壁周围岩体的孔隙压力增大，引起岩石的体积应变。^[4]拉伸破坏所呈现出来的是沿着井轴方向开展的纵向裂缝，井壁的裂缝朝着地层的深处开展扩展，并且这样一来就会致使钻井液大量流失，会加剧裂缝扩展现象，并且引发连锁反应。

（四）影响卡钻的主要因素

地质条件是导致卡钻现象出现的根本控制要素，在高构造应力区、断层破碎带、软硬交错地层以及膨胀性泥页岩等地质条件当中，卡钻的风险会显著提高，泥页岩所出现的水化膨胀现象，特别值得去开展深入探究工作。当埋深大于1500 ~ 3000 米时，大部分水以结合水的形式存在，堆积在蒙脱石单元层之间，厚度至少有4个分子层厚。^[5]水敏性泥页岩和钻井液接触之后，它的体积因为水化作用而出现膨胀，强度也会随之下降。即便钻井液密度处于合适的水平，缩径卡钻的风险仍会存在，钻井液的特性会对卡钻风险产生影响。钻井液的滤失性能、流变性、润滑性等这方面因素，均和卡钻现象有着密切的关联，井壁发生水化的缘由是滤失量极大程度上过量，岩屑的携带工作会受到流变性不适宜的影响，钻柱以及井壁之间的摩擦会因为润滑性较差而增大。

三、安全钻井窗口的确定

（一）安全钻井窗口的内涵

钻井液密度的安全操作区间，也就是平常所说的安全钻井窗

口,井壁的稳定状态得以维持,并且剪切破坏以及拉伸破坏都没有发生,井壁剪切破坏临界密度会决定窗口的下限,这通常被叫做坍塌压力;井壁拉伸破坏所对应的临界密度,决定了窗口的上限,这一般被叫作破裂压力。而安全钻井液密度窗口的下限选取地层孔隙压力和坍塌压力的最大值,在深水深部的成岩地层的井壁围岩尚处于弹性状态,通常可以根据摩尔库伦准则确定其坍塌压力。^[6]安全钻井液窗口的宽度,直接和井段施工的复杂性以及风险缓冲空间关联,要是钻井液密度处于较宽的井段当中,那么它的选择空间就会更大,同时钻井的风险也会随之降低;井段窗口比较狭窄,需要对钻井液密度开展精准的调控工作,要是微小的偏差,那就可能会引发卡钻。那么要是地质条件比较复杂,钻井液的安全区间就可能会变得极小。对于直井来说,较小的水平地应力差情况下,井眼的钻井液密度安全窗口相对较宽,但是深水井的破裂压力整体偏低。^[7]坍塌压力超出破裂压力的情况经常出现,这也就是所谓的无安全窗口现象,常规钻井方法在实施方面会面临困境,那么像控压钻井这种特殊技术就成了必要的选择。

(二)安全钻井窗口的现场应用

钻井液密度需要在安全范围当中进行灵活的调整,随着钻井深度持续不断地增加以及地层结构不断地变化,安全窗口的数值也会跟着进行相应的调整,开展钻井液密度随钻状态下的调整工作,来实现动态优化。钻井过程中钻井液密度大小的设计不仅要求能维持井壁稳定防止井壁的张性破裂(井漏)和剪切垮塌(井塌)还要能够维持井内压力平衡避免地层流体大量流入井内造成地层流体对钻井液的污染以及井漏、井喷、压差卡钻等工程事故。^[8]需要把静态密度以及动态密度开展区分,钻井液在环空当中流动的时候,会产生流动阻力,这样就让井底承受的压力比静止液柱所产生的压力要大,当高流速以及狭窄环空间隙同时存在的时候,差异就变得格外突出。对于现代石油钻井来说,存在固有特点,一方面,在储层底部,由于温度较低,可导致钻井液变得黏稠,降低液体的六边形,提高了液体的循环阻力,对窄密度窗口安全钻井存在成一定干扰。^[9]现场作业要兼顾静态以及循环工况的安全边界,在静态的时候,井壁要保持稳定,而在循环的时候,要避免地层破裂,进行起下钻作业的过程当中,需要高度留意,起钻操作会引发抽吸效应,这样井底压力就会随之下降,有可能触发地层失稳;下钻这个过程会激发井底的压力产生波动,可能就会诱发地层破裂。

四、卡钻预防的技术对策

(一)钻井液性能优化

钻井液形成了构成井壁稳定的首要屏障,钻井液的滤失以及抑制性能对于卡钻预防工作而言是极为关键的,除了密度方面,进行钻井液滤失量的控制工作,目的在于降低滤液朝着地层渗透的程度。随着井壁及地层渗透性增大,地层破裂压力降低,坍塌压力升高,安全钻井液密度范围变小。^[10]那么井周孔隙压力会因为滤液侵入而出现改变,与此同时有效应力会跟着降低,这样一来井壁的自我支撑能力就会因此而减弱,针对渗透性地层,降滤失剂可以有效地开展滤液流失的管理工作;裂缝性地层需要把堵漏材料引入进来,来实现裂缝的封堵。提高抑制效能主要是把焦点放在泥页岩地层方面,水基钻井液在接触水敏性泥页岩之后,它发生水化膨胀,进而致使强度出现下降,这样缩径卡钻的风险就增加了,运用油基或者高性能水基钻井液体系,借助引入页岩抑制剂,就可以有效地去处理遏制地层水化效应的工作,来实现维持井壁结构稳固的目的。

五、结束语

(1)卡钻的发生与井周应力分布状态密切相关,那么井壁在井眼形成之后,径向应力得以实现释放,切向应力就会出现聚集,要是应力重新分布这方面超过了岩石所能够承受的极限,井壁就会发生失稳的情况,从而引发卡钻。

(2)卡钻存在两种典型模式,井壁在钻井液密度处于偏低的情况下,会因为剪切作用而遭受破坏,进而引发坍塌以及缩径的问题,最终使得卡钻事故得以发生;要是钻井液密度过高,井壁就会发生拉伸破坏,进而导致破裂-扩径型卡钻。

(3)钻井安全窗口是由地层坍塌压力以及地层破裂压力一起来确定的,钻井的难度会体现在窗口宽度这个方面,要是窗口越窄,那么卡钻的风险就会越大,安全窗口的确定需要全面开展对地应力状态、岩石力学特性以及钻井液和地层之间所进行的相互作用的考量工作。

(4)为了开展预防卡钻的工作,需要把多种技术手段进行整合,所涵盖的方面有井眼轨迹的优化设计、钻井液性能的调整提高、操作流程的精细管控,并且在复杂工况下选用控压钻井等专项工艺。

参考文献

- [1] 李庆超,刘钰文,吴静娟.海域水合物储层安全钻井液密度窗口确定新方法[J].油气与新能源,2024,36(05):44-56.
- [2] Ayoub D, Cheraghi M S, Anthony D W, et al. 利用井筒稳定性分析确定砂岩安全钻井液密度窗口[J].石油勘探与开发,2019,46(05):974-980+1014.
- [3] 李华洋,吴惠梅,严科,等.南海西部某井区安全钻井液密度窗口的确定[J].石油化工应用,2020,39(04):8-11.
- [4] 李玉伟,艾池,王志成,等.深井安全钻井液密度窗口影响因素[J].油气地质与采收率,2013,20(01):107-110+118.DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2013.01.027.
- [5] 田波.深水钻井安全钻井液密度窗口确定方法研究[D].中国石油大学,2009.
- [6] 何黎.深水钻井安全钻井液密度窗口影响因素分析[D].中国石油大学(北京),2017.
- [7] 李雪松,周长所,朱海燕,等.深水地层钻井液密度安全窗口确定方法研究[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(14):143-145+148.
- [8] 陈森,梁大川,李磊.深井超深井安全钻井液密度窗口研究进展[J].天然气工业,2008,(01):85-87+170.
- [9] 冯量,王周强.安全钻井液密度窗口的确定[J].石化技术,2021,28(08):180-181.
- [10] 蔚宝华,王炳印,曲从锋,等.高温高压储层安全钻井液密度窗口确定技术[J].石油钻采工艺,2005,(03):31-34+37-83.DOI:10.13639/j.odpt.2005.03.013.