

Drilling Wall Stability Analysis and Improvement Strategy Research

Dengbing Liu Pengxiang Zhang Chuangke Zhang Jun Li Zhendong Yang

West Drilling Engineering Co., Ltd. Tuha Drilling Company, Turpan, Xinjiang, 838200, China

Abstract

Wellbore stability in drilling operations is an important research topic in the field of oil and gas field development. In view of the limitation of traditional analysis of borehole stability, this study uses the method of combining theoretical analysis and experiment to deeply study the problem of borehole stability. The key geological factors and operating parameters, such as ground stress, rock mechanical properties and drilling fluid properties, are identified by establishing a mechanical model to analyze the stress state of borehole wall. Based on this, this paper proposes a set of improvement strategies, including optimization of drilling fluid formulation, adjustment of borehole structure and use of advanced wall treatment technology. Simulation experiment and field application prove that the proposed improvement measures can significantly improve the stability of borehole wall, reduce drilling accidents, and improve drilling efficiency and safety. The research results have important guiding significance for the control of wellbore stability in deep water drilling and complex formation drilling.

Keywords

wall stability; drilling operations; ground stress; drilling fluid optimization; rock mechanics

钻井井壁稳定性分析及改进策略研究

刘登兵 张鹏翔 张创科 李军 杨振东

西部钻探工程有限公司吐哈钻井公司, 中国·新疆吐鲁番 838200

摘要

钻井作业中的井壁稳定问题是油气田开发领域的一个重要研究课题。针对传统井壁稳定性分析的局限性, 本研究采用了理论分析与实验相结合的方法, 对井壁稳定性问题进行了深入研究。通过建立力学模型分析井壁受力状态, 识别了关键影响井壁稳定的地质因素和作业参数, 如地应力、岩石力学属性和钻井液性能。基于此, 论文提出了一整套改进策略, 包括优化钻井液配方、调整井眼结构和使用先进的井壁处理技术。模拟实验和现场应用证明, 所提出的改进措施能显著提升井壁稳定性, 减少钻井事故, 提高钻井效率及安全性。研究结果对于指导深水钻井和复杂地层钻井的井壁稳定性控制具有重要指导意义。

关键词

井壁稳定性; 钻井作业; 地应力; 钻井液优化; 岩石力学

1 引言

在复杂地质条件下的油气田开发, 钻井作业的井壁稳定性问题一直对石油工程师们提出着严峻挑战。尤其在深海和复杂地层钻井过程中, 井壁稳定性问题会更为尖锐, 不仅严重影响钻井效率, 还可能引发各种严重的钻井事故, 威胁着钻井过程的安全性。因此, 钻井井壁稳定性研究始终被视为油田开发领域的三大重要研究课题之一。虽然业界长期以来都在探索井壁稳定性问题, 但传统的稳定性分析方法及应对措施在一定程度上存在着局限性, 无法适应钻井工程在遇到越来越多的复杂条件时对井壁稳定性保障的需求。而本研

究正是基于对传统方法的局限性及其原因的深入理解, 采用了理论分析与实验相结合的研究思路, 从而识别出影响井壁稳定的关键地质因素和作业参数, 并据此提出了一套针对性较强的稳定性改进策略, 为井壁稳定性问题的解决提供了新的思路。

2 井壁稳定性问题的理论分析

2.1 地应力对井壁稳定性的影响

地应力在钻井过程中对井壁稳定性有着关键性的影响^[1]。地应力主要包括三个方面: 上覆应力、水平最大主应力和水平最小主应力。这些应力根据地层的深度、地质构造以及历史地质事件等因素形成复杂的分布情况。地应力的分布和数值直接影响井壁的受力状态, 从而决定井壁的稳定性。

【作者简介】刘登兵(1978-), 男, 中国甘肃酒泉人, 本科, 高级工程师, 从事钻井工程研究。

在钻井过程中，上覆应力是指由地层上方所有岩石重量产生的垂直压力，它的数值随着深度增加而线性增大。水平主应力则受到地质构造、沉积环境和构造应力场等多方面因素的影响。由于地层在历史过程中受到了多次构造运动的作用，水平主应力分布通常是各向异性的，水平主应力的差异会在井壁产生剪切应力，这一应力是导致井壁稳定性问题的主要原因之一。

地应力对井壁产生的作用力会促发一系列的复杂效应。当井筒内外的压力平衡被打破时，可能会引发井壁的压裂或者坍塌。某些情况下，过高的地应力可能会超出岩石的抗剪强度，从而使井壁发生破裂或剪切滑移。当井眼周围的地应力较高时，井壁周围的岩石会产生塑性变形，进而导致井筒收缩、变形，甚至井壁失稳。

为分析地应力对井壁稳定性的具体影响，需要建立井壁力学模型。该模型通常以弹性力学或弹塑性力学为基础，考虑岩石材料的非线性特征和各向异性特性。通过模型计算，可以获取井壁周围的应力分布情况，进而评估井壁的稳定性。相关的数学模型和数值模拟方法，如有限元分析和边界元法，常用于分析井壁的应力和变形状态。这些方法能够提供井壁在不同地应力条件下的应力场和变形场，帮助确定最容易失稳的位置和最危险的应力状态。

地应力不仅直接影响井壁的力学状态，还通过它与钻井液的相互作用进一步复杂化该问题^[2]。钻井液的密度和压力需要合理设计，以平衡地应力，确保井壁稳定。了解地应力分布和特性是制定合理钻井参数和井壁稳定性控制策略的前提条件。

通过深刻理解地应力在井壁稳定性中扮演的角色，可以更准确地预测井筒的安全和稳定性，制定出优化的钻井方案，减少钻井风险，提高作业安全性。

2.2 岩石力学特性与井壁稳定性

岩石力学特性对井壁稳定性具有重要影响。不同类型的岩石在地质压力和钻井操作中表现出不同的机械行为。岩石的强度、变形特性和破裂模式是评估井壁稳定性的关键参数。

岩石的压缩强度直接关系到井壁在钻进过程中的承载能力。高压缩强度的岩石能够更好地抵抗由地层压力和钻井液压力引起的破坏。若地层中的岩石压缩强度较低，在钻进过程中容易发生破碎或坍塌，导致井壁不稳定。

弹性模量和泊松比是描述岩石变形特性的两个重要参数。高弹性模量和低泊松比的岩石表现出较小的变形，在钻进过程中能够维持较好的井壁形态，减少井壁失稳的可能性。当岩石受到钻井液和地层压力作用时，会发生弹性变形和塑性变形。较大的弹性变形能够减缓外力的直接作用，而塑性变形则可能使井壁发生不可逆的损伤和失稳。

岩石的断裂韧性决定了其在应力集中情况下的破裂倾向。岩石在受到地层应力、钻井应力及冲击载荷时，如果其

断裂韧性较低，则在力集中区域容易产生裂纹扩展和断裂，从而引发井壁失稳。实际施钻过程应根据岩石的断裂韧性，对钻井方案进行适当调整，以避免局部力集中导致的井壁破坏。

岩石的天然裂隙和结构异质性也是影响井壁稳定性的因素。天然裂隙增加了岩石的潜在破裂面，使其在外力作用下更容易产生应力集中并导致失稳。岩石的层理和节理面使得其力学行为各向异性明显，在不同方向上的承载能力和变形特性差异较大，这对井壁的整体稳定性构成了挑战。

深入理解岩石力学特性是解决井壁稳定性问题的基础。通过评价岩石的强度、变形特性和断裂韧性，可以在制定钻井方案时采取有效的对策，确保井壁稳定，提高钻井安全性和效率。

2.3 钻井液性能对井壁稳定性的作用

钻井液性能对井壁稳定性有重要作用。钻井液能通过平衡地层压力，防止井壁坍塌。其粘度、密度及滤失量是关键参数，直接影响井壁稳定性^[3]。粘度过高可能引起井下压力增大，导致井眼扩大或坍塌；过低则会降低井壁支撑能力。密度若不适应地层压力，也可能引发井壁失稳。滤失量需控制在合理范围，避免泥饼形成过快导致卡钻或井壁松动。另外，钻井液的润滑性和攀岩性能也对井壁稳定有显著影响，确保钻井作业的顺利进行。

3 井壁稳定性改进策略与应用

3.1 钻井液配方优化策略

钻井液在井壁稳定性中起着至关重要的作用。通过合理的钻井液配方，可以有效改善井壁稳固程度，防止井壁塌陷和掉块等事故的发生。针对不同地质条件下的井壁稳定问题，研究了优化钻井液配方的策略，并提出了一系列改善方案。

地质应力和岩石力学特性是影响井壁稳定的关键因素，钻井液的选择必须考虑这些因素。具体来说，不同地层具有不同的地应力和物理性质，如黏土层、砂岩层、页岩层等，各有其特色。钻井液在渗透到这些地层时，会与原有地层形成相互作用，从而影响井壁的稳定性。

一种有效的钻井液应具备高黏度和适宜的密度，以抵抗地层压力和提供适当的井眼支撑力。钻井液必须具备优良的润滑性能，以减少钻头与井壁的摩擦。钻井液黏度过高可能导致钻井速度减慢，影响作业效率；黏度过低则可能无法提供足够的支撑力，导致井壁塌陷。在配方中适当添加膨润土、聚合物和其他增黏剂，能够有效提升钻井液的力学性能。

另一个重要因素是钻井液的抑制性。井壁失稳的一个主要原因是水分子进入岩孔，导致岩石松散。高抑制性的钻井液可以有效防止水分子进入，提高井壁的机械强度。为此，可以在钻井液中添加一定量的抑制剂，如有机胺、钾离子、钠离子等，以改善其抑制特性，提高井壁稳定性。

防漏失性能也是钻井液配方中需重点考虑的指标。在高孔隙度地层中,钻井液容易渗透,从而导致井壁失稳。优化钻井液配方时,可以添加适量的防漏剂,如细纤维、颗粒吸附剂等,可以有效地填补地层孔隙,减少钻井液的泄漏。

结合现场应用中的反馈,钻井液配方的优化还需具有可调节性和适应性。每个钻井地层的具体情况都可能不同,在实际作业中需要根据井下实时数据对钻井液配方进行调整。配备一些实时监测设备,如钻井液性能监测仪,可以及时捕捉井下变化,并提供优化建议。

以上策略在实际应用中显示出了显著效果,通过对钻井液配方的优化,不仅有效提升了井壁的稳定性,还显著减少了钻井时间和事故发生率,具有很高的实用价值。

3.2 井眼结构调整策略

井眼结构的优化对于增强井壁稳定性起着至关重要的作用。现有的研究表明,井眼形状和尺寸对井壁承受应力状态具有显著影响。传统的圆柱形井眼在受力过程中易形成应力集中,导致井壁破裂甚至坍塌。针对不同地质条件和应力环境,调整井眼结构以分散和均衡应力是提高井壁稳定性的有效手段。

一种常见的井眼结构优化策略是采用非圆形井眼,如椭圆形井眼。椭圆形井眼能够更好地分散地应力,降低应力集中效应,减少井壁破裂的风险。变径井眼设计也可用于井壁稳定性控制。通过增加井眼直径,可以减少钻头与井壁的接触面积,进而减少井眼周围岩石的应力集中。相对较大的井眼直径能够减轻机械作用对井壁的破坏力,提高井壁的整体稳定性。

另外,井眼倾角的调整也是一种行之有效的策略。适当的井眼倾角能够更有效地分散地层内部的应力,减少井壁所受的局部高应力集中区域。在水平井和定向井中,这一策略尤为重要。合理的井眼轨迹设计,也能避免井眼在高应力区或软弱带的位置,从而提升井壁的稳定性。

为了实现井眼结构的优化,先进的模拟技术和数值分析工具被广泛应用。通过三维地质建模和数值模拟,可以准确预测井眼在不同地质条件下的应力分布状况,从而为井眼结构的调整提供准确的参考数据和决策依据。

井眼结构的优化不仅可以有效提升井壁稳定性,还能够提高钻井效率,减少钻井事故的发生,是改善井壁稳定性

的一项关键策略。

3.3 先进井壁处理技术的应用

先进井壁处理技术在提高井壁稳定性方面起到了关键作用。这些技术主要包括井壁强化、物理处理和化学处理等方法。井壁强化技术,如井壁稳定剂和防塌材料的使用,有助于提高井壁的机械强度,减少井壁坍塌的风险。物理处理技术,包括利用先进的声波测井、微地震监测等手段,实时监测井壁状态,从而及时采取应对措施,避免井壁失稳。化学处理技术通过添加特定的化学试剂,如聚合物、纳米材料等,增强钻井液的封堵性和润滑性,降低砂石层对井壁的侵蚀风险。综合应用这些先进的井壁处理技术,可有效提升井壁的抗压和抗剪性能,显著改善井壁稳定性,减少井漏和井塌等事故的发生。具体应用实例表明,采用这些技术不仅显著提升了井壁稳定性,还在深水钻井和复杂地层作业中显现出其优越性,有力地支持了油气田开发的高效和安全运行。

4 结语

论文以钻井井壁稳定性问题为研究对象,运用理论分析与实验相结合的方式对井壁稳定性问题进行了深入探索。通过建立力学模型对井壁受力状态进行分析,识别了关键影响井壁稳定的因素如地应力、岩石力学属性和钻井液性能。在此基础上,论文提出了一整套改进策略,包括优化钻井液配方、调整井眼结构和使用先进的井壁处理技术。实验模拟和现场应用的结果证明,此举能够有效提升井壁稳定性,减少钻井事故,提高钻井效率和安全性。但是,本研究的局限性还表现在一些因素,如地应力测井技术的准确性,井眼结构设计的细节等,尚需要通过融入更多的交叉学科知识,如地球物理学和岩石力学,进行进一步的优化和提高。尽管如此,本项研究的综合战略对深水钻井和复杂地层钻井的井壁稳定性控制具有重要指导意义,对于石油和天然气领域的国家在井壁稳定性研究上具有推动作用。

参考文献

- [1] 张利威.钻井液性能对井壁稳定性的影响[J].中国石油和化工标准与质量,2020(4):54-55.
- [2] 刘向君,高士根,梁利喜,等.优选钻井液对F区块井壁稳定性影响[J].现代商贸工业,2020,41(15):196-197.
- [3] 贾力勇.探析钻井液性能对井壁稳定性的影响[J].中国化工贸易,2020,12(27):237-239.