

页岩油高温高压钻井技术及其经济效益研究

廖 悠（胜利石油工程有限公司西南分公司，山东 东营 257000）

摘要：本文主要研究页岩油高温高压钻井技术及其经济效益。通过分析页岩油开发的技术难题，特别是在高温高压环境下的挑战，结合当前钻井技术的进展，探讨了适用于此类环境的钻井技术，其中就包括了高温高压钻井设备的选型、钻井液系统的优化方法及压力管理策略等。此外，本文还对高温高压钻井技术的经济效益进行了分析，评估了技术投资的回报与风险，希望可以为页岩油开采实践提供一定的学术参考。

关键词：页岩油；高温高压；钻井技术；经济效益；技术挑战

中图分类号：TE242 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)017-0063-03

Research on High-Temperature and High-Pressure Drilling Technology for Shale Oil and Its Economic Efficiency

Liao You (Sinopec Shengli Petroleum Engineering Co., Ltd. Southwest Branch, Dongying Shandong 257000, China)

Abstract: This study focuses on high-temperature and high-pressure (HTHP) drilling technology for shale oil and its economic efficiency. By analyzing the technical challenges in shale oil development, particularly under extreme HTHP conditions, and integrating advancements in current drilling technologies, this paper explores drilling solutions tailored to such environments. Key aspects include the selection of HTHP drilling equipment, optimization of drilling fluid systems, and pressure management strategies. Additionally, the economic efficiency of HTHP drilling technology is evaluated, with an assessment of the return on investment (ROI) and associated risks. The findings aim to provide academic insights for advancing shale oil extraction practices.

Keywords: Shale Oil; High-Temperature and High-Pressure (HTHP); Drilling Technology; Economic Efficiency; Technical Challenges

页岩油的开采近年来成为能源领域的研究热点，页岩油的开发大大提高了我国的能源自给能力。然而，随着开采深度和温度、压力的增高，钻井作业在实际操作中也面临着一系列技术挑战。其中，高温高压环境下的钻井作业对设备、材料以及技术要求提出了更高的标准，因此，研究并掌握高温高压钻井技术对页岩油开采具有重要意义。

1 页岩油开采的技术挑战

1.1 页岩油的分布与开采前景

页岩油通常存在于较深的地层中，特别是温度超过150℃的地区。其开采具有较大的技术难度，涉及到钻井、完井、压裂等多个环节。页岩油层一般具有低渗透性和低产能，但通过水平钻井和水力压裂技术，能够有效提升产量^[1]。根据不同地区的地质条件，页岩油的储量分布具有高度不确定性，且一般存在较高的天然气和水的夹层，因此需要高度精确的储层评估与监测。使用地震勘探技术和地质模型分析可以有效帮助定位油层及评估储层压力，进而决定合适的开采方式。页岩油层的矿物组成、裂缝发育程度及其物理性质（如渗透率和孔隙度）是影响开采效率的关键因素，通常这些层的渗透率仅为10⁻³到10⁻⁶达西（D），给传统开采技术带来了巨大挑战。

1.2 高温高压环境下的挑战

在页岩油的开发过程中，高温高压环境给钻井作业带来了诸多挑战。随着开采深度的增加，地下温度和压力不断升高，通常达到150℃以上，压力超过30MPa，这对钻井设备、钻井液及压力管理系统提出了极高的要求。在高温下，许多钻井设备和材料的性能会受到极大影响。例如，钻头的耐久性在高温和高压的双重条件下往往迅速降低，特别是在钻井过程中，设备和工具的摩擦和热效应可能导致其提前失效。此外，高温环境下的钻井液也面临着热稳定性不足的问题，传统的水基钻井液在超过150℃时可能会发生降解，从而影响钻井液的润滑性和冷却性能。另一方面，高压环境不仅使得压力控制变得更加复杂，而且极端的井下压力也会加剧井壁的稳定性问题，增加井壁坍塌的风险^[2]。在某些情况下，井下压力的剧烈波动可能导致井喷等严重安全事故。此外，随着深井作业的推进，井下环境的复杂性大大增加，传统的压力监控和控制方法难以适应这一变化，要求开发更加高效、精确的压力管理技术。这些挑战使得高温高压条件下的钻井作业在设备选择、技术实施和操作安全性等方面都面临着较大困难，成为页岩油开采中的关键技术瓶颈。

2 页岩油高温高压钻井技术

2.1 高温高压钻井设备

如表1所示，在高温高压条件下，钻井设备必须具备出色的耐高温、耐高压性能。例如，钻头的材料选择尤为重要。常见的钻头材料如高合金钢和硬质合金，需要经过特殊热处理以增强其耐久性和抗磨损性能。为了应对极端温度和压力环境下的磨损，硬质合金（如钨合金）常被用于钻头的制造。这些材料能够承受温度高达200℃以上的环境，并且在长时间的钻井过程中保持良好的工作性能。另外，钻井设备中的密封系统和轴承材料也需要具备抗高温和高压的能力。例如，耐高温橡胶和金属合金被广泛应用于密封部件，以保证在高温下仍能有效防止流体泄漏和污染。

2.2 钻井液系统的优化设计

在高温高压环境下，钻井液的性能会受到显著影响，尤其是粘度、热稳定性及其与井下环境的相互作用，因此需要针对钻井液的性能进行一定的优化（见表2）。常规的水基钻井液在温度超过150℃时，易发生降解，导致其流变性、润滑性、以及冷却能力下降，从而影响整个钻井作业的效率和安全性。为了应对这一问题，近年来，页岩油钻井液采用了改进的聚合物液体系统，如基于有机高分子的合成液或油基与水基混合液。这些改良液体在高温下具有更好的热稳

定性、较低的热膨胀率和良好的流动性能，能够在高压和高温环境下提供持续的润滑效果。目前，一种常见的优化方案是使用聚合物改性钻井液，如聚丙烯酰胺（PAM）类液体和纳米技术强化的钻井液，这些材料在高温下能够保持其结构和流变性质，避免在温度和压力剧烈变化时产生降解。为了增强流变性和降低摩擦系数，钻井液中的固体颗粒浓度及其大小分布也需精确调节，通常添加适量的微细颗粒，如膨润土、硅土或天然高分子复合物。

2.3 压力管理与实时监控技术

在高温高压环境下，压力管理对钻井作业至关重要。井下压力的剧烈变化可能导致井壁坍塌、井喷等事故，严重时还会损害钻井设备。在现代钻井中，压力监控技术（重要参数见表3）可以通过部署井下传感器，实时监控井筒内的压力、温度和流体的动态状态，并将数据传输至地面控制系统。通过这些数据，地面工程师可以精准调节钻井液的流量、密度等参数，控制井下压力。此外，现代压力监控系统常配备自动化阀门和压力控制装置，当监测到井下压力超过设定的安全阈值时，系统能够自动启动保护措施，如调节钻井液的流量或启动减压装置，以避免压力失控。在深井和高压井的钻井过程中，智能化压力管理系统已成为必备技术，能够提高井下操作的安全性和可靠性，

表1：高温高压钻井设备关键参数

| 参数 | 数值 | 说明 |
|--------|-----------------|------------------------|
| 钻井温度 | 150℃ 至 200℃ | 高温条件下，设备需具备耐高温能力 |
| 井下压力 | 30 MPa 至 60 MPa | 井深越大，压力越高，需要设备具备高压承受能力 |
| 钻头材料 | 高合金钢，硬质合金 | 高耐磨性，适应极端温度环境 |
| 钻井液粘度 | 300-600 cP | 需根据压力、温度调整粘度 |
| 钻井液稳定性 | 热稳定性至 200℃ | 保持钻井液在高温下的稳定性 |

表2：高温高压钻井液性能优化参数

| 参数 | 典型值 | 说明 |
|----------|-------------------|---------------------------|
| 钻井液温度稳定性 | 稳定至 200℃ | 聚合物液体在 200℃ 下不降解 |
| 钻井液粘度 | 300-600 cP | 粘度需要根据井下温度和压力进行调节 |
| 流变性 | 良好（塑性指数为 1.0-2.5） | 保证液体在钻井过程中能够保持适当的流动性和冷却性能 |
| 润滑性能 | 摩擦系数降低至 0.1 | 降低钻头与井壁之间的摩擦，延长设备寿命 |
| 热膨胀率 | 低于 5% | 保证液体在高温下不会发生膨胀或变稠 |

表3：压力管理系统关键参数

| 参数 | 典型值 | 说明 |
|------------|------------------------|----------------------|
| 井下压力监控精度 | ±0.1 MPa | 精确监测井下压力变化，确保实时调整 |
| 压力调整响应时间 | ≤ 1 分钟 | 确保在压力异常波动时，快速响应并采取措施 |
| 自动化调节能力 | 高自动化 | 系统可根据实时数据自动调节液体流量与压力 |
| 安全压力阈值设定范围 | 设定在安全范围内，通常为 50-60 MPa | 针对不同地质条件，动态调整压力阈值 |

防止井喷或突发事故的发生。

2.4 钻井作业技术创新

随着技术不断进步，许多创新型钻井技术被引入高温高压钻井作业中，显著提高了作业效率和安全性。自动化钻井系统能够通过先进的计算机控制系统，实时优化钻井参数，如钻头转速、进尺速度和钻井液流量。这些自动化控制系统利用人工智能算法，分析实时数据，自动调整钻井工艺，减少人为操作误差，提高作业效率和安全性。智能化监控系统通过集成先进的传感器技术，实时监测井下环境参数，如温度、压力、钻头磨损和井壁稳定性，并通过数据分析预测潜在风险。这些系统能够实时生成报告，提供决策支持，帮助工程师及时采取措施。此外，系统可以自动检测并调整钻井液的流量、粘度等参数，确保钻井作业在最佳条件下进行。

3 高温高压钻井技术的经济效益分析

3.1 技术投入成本与收益回报

高温高压钻井技术的初期投入主要集中在以下几个方面：钻井设备的采购、钻井液系统的研发与改进、压力管理系统的建设、以及操作人员的培训等。特别是钻井设备的采购，涉及到高合金钢、硬质合金材料以及特殊热处理的钻头和钻井工具，这些设备的成本较高。此外，为了适应高温高压环境，还需要对现有的钻井液系统进行优化，这可能涉及到新型聚合物、油基与水基混合液的研制与实验，因此相关研发费用也是初期投入的重要组成部分。尽管这些投入在初期看似巨大，但通过提高钻井效率、延长设备使用寿命、减少设备故障和井喷等事故的发生，可以在中长期内实现显著的经济回报。例如，通过高效的钻井液系统和自动化钻井技术，能够减少钻井时间和井下作业时的风险，从而降低钻井总成本。自动化和智能化的压力监控系统也能够及时发现潜在的安全隐患，减少井喷事故的发生，避免高昂的事故修复费用。

3.2 成本与风险控制优化效益

高温高压钻井技术在实际应用中，虽然能够显著提高油气产量，但由于其设备采购和维护成本较高，且面临着一定的技术风险，因此，合理的成本和风险控制措施至关重要。尤其是对于钻井设备的耐用性、维护周期以及钻井液的替换成本，需要提前做好评估和规划。

①设备采购与维护成本的优化：高温高压钻井技术需要的设备较为昂贵，而且在使用过程中，这些设备需要定期维护以确保高效运作。随着技术的不断发展，新型材料和先进设备的出现有助于降低设备采购成本。此外，定期的设备检测和高效的维护管理，也

能延长设备使用寿命，降低长期的运营成本。

②钻井液系统的费用节约：钻井液的替换和优化系统在高温高压环境下的运行成本较高。尤其是在采用油基或聚合物改性钻井液时，这些液体的采购费用和使用成本可能比传统水基液体高出数倍。因此，优化钻井液配方、提高液体的回收利用率，能够有效降低这部分费用。

③风险管理效果提升：在高温高压环境下，井壁坍塌、井喷等事故的发生将带来巨大的财务损失。通过高效的压力监控和管理系统，可以及时识别潜在的风险并进行预警。这不仅能避免事故的发生，还能减少设备维修和停机时间，从而提高整体生产效率。

3.3 技术投资回报与长期效益

高温高压钻井技术的技术投资回报率（ROI）是评估其经济效益的重要指标。根据多项行业数据分析，虽然初期投入较高，但在长周期内，该技术通过提高生产效率、减少事故和故障的发生、以及提高油气回采率，能够实现显著的经济回报。例如，在某些项目中，采用高温高压钻井技术后，钻井周期减少了30%–40%，产量提升了15%–20%，同时设备维护费用降低了10%–15%。这些效益的累积可以使得企业的投资回报率显著提高。

4 结论

由于页岩油资源的不断开发以及开采深度的不断增加，传统的钻井技术已无法满足高效、安全的开采要求。高温高压钻井技术因为提升了设备性能、优化了钻井液系统以及引入了智能化压力监控等手段，不仅可以更加有效的应对这些挑战，还可以更为显著的提高钻井效率和作业安全性。尽管高温高压钻井技术在初期投资上涉及较大的资金投入，尤其是在设备采购、技术研发和人员培训等方面的费用相对较高，但从长期来看，这一技术投入的经济回报是显著而可观的。技术一旦落实，可以大幅提高我们的钻井效率、延长设备寿命、减少设备故障和井喷等事故的发生，企业也能够实现显著的成本节约和产量提升，最终提高我们的投资回报率。因此，技术优化和风险控制的有效结合，不仅确保了页岩油开采作业的稳定性和安全性，还为油气开采企业带来了可持续的经济效益。

参考文献：

- [1] 李振川,李冰青,张胜鹏,范琳,曹晟.吉木萨尔页岩油水平井钻井关键技术研究[J].钻采工艺,2024,47(06):159-166.
- [2] 齐洪岩,吴承美,胡可,陈依伟,徐田录,王永娇.准噶尔盆地吉木萨尔凹陷页岩油效益开发关键技术与实践[J].新疆石油天然气,2024,20(03):15-22.