

深井钻井中高效破岩技术发展研究与经济性分析

张 亮（胜利分公司石油工程监督中心，山东 东营 257000）

摘 要：在石油勘探向深部地层推进的趋势下，深井钻井技术的重要性愈发凸显，高效破岩技术成为关键突破点。本文以胜利油田为研究对象，深入剖析其发展现状与创新成果，系统分析经济性，对比传统与新型破岩技术的成本收益，结合实际案例量化经济效益，为该技术的推广应用提供理论与实践参考。

关键词：深井钻井；高效破岩技术；技术发展；经济性分析

1 引言

石油在全球能源结构中占据核心地位。随着浅层油气资源逐渐减少，石油勘探开发向深部地层进军，深井钻井作业规模和难度不断增加。深井面临高温、高压、岩石硬度大等复杂地质条件，传统破岩技术弊端明显，破岩效率低、钻头磨损快，严重制约钻井进度、大幅增加成本。胜利油田长期致力于深井钻井技术创新。高效破岩技术有效解决了深井钻井难题，从经济层面看，能提高钻井效率、缩短周期、降低设备损耗和维护成本，增加油气产量，提升企业经济效益和竞争力。深入研究该技术的发展与经济性，对石油勘探开发行业可持续发展意义重大。

2 深井钻井的特点及传统破岩技术面临的经济困境

2.1 高温高压环境

井深增加，井底温度和压力呈指数级上升。胜利油田部分深井，实测井底温度达 220℃，压力 180MPa。高温使岩石物理力学性质改变，内部矿物晶体结构变化致强度降低，塑性增强，传统以脆性断裂为主的破岩方式失效。如 180℃以上高温时，页岩塑性变形，冲击破岩易使岩石塑性流动而非破碎，破岩效率大幅降低。

高压对钻井设备和工具要求极高，密封性能、材料强度需满足高压条件，否则易泄漏、损坏。高压还影响钻井液性能，增加调控难度。这不仅大幅提高设备采购成本，还增加维护和更换频率，加重经济负担。

2.2 岩石性质复杂

深井岩石历经漫长地质作用，成分和结构复杂，硬度大、研磨性强，部分具明显各向异性。胜利油田深井勘探中的花岗岩，硬度高且矿物颗粒分布不均，钻头钻进受力不均，磨损加剧。页岩地层层理发育，垂直和平行层理方向力学性质差异大，常规破岩方法难以适应。

复杂岩石性质增加破岩难度，需更先进破岩工具

和技术，提高破岩成本。钻头频繁磨损更换延长钻井时间，间接增加经济成本。

2.3 井身结构复杂

为保证井壁稳定，深井钻井常采用多层套管结构，使井身结构复杂，钻井摩阻大幅增大。某 7000m 深井采用三层套管，摩阻比浅井增加 5-8 倍。井深增加，钻井液循环路径变长，压力损失增大，每增加 1000m 井深，循环压力损失约增加 10-15MPa，对钻井液性能和泵功率要求更高。井身结构复杂增加钻井设备负荷，加剧设备磨损，使钻井液使用量 and 处理成本大幅上升。为满足循环压力，需配备更高功率泵，进一步增加能源消耗和设备采购成本。

3 高效破岩技术的发展与创新

3.1 新型钻头的研发

3.1.1 混合钻头的设计

针对深井岩石特性，胜利油田研发新型混合钻头，融合牙轮钻头冲击破岩和 PDC 钻头切削破岩优势。硬岩段，牙轮高速冲击使岩石产生疲劳裂纹破碎；软岩段，PDC 片高效切削提高破岩效率。

通过大量室内实验和现场试验优化牙轮和 PDC 片布局及结构参数。根据岩石硬度和研磨性，合理调整牙轮数量、尺寸及 PDC 片切削角度和密度。花岗岩地层增加牙轮数量和尺寸提高冲击能量；软岩地层优化 PDC 片切削角度提高切削效率。优化后的混合钻头破岩效率提高 30%-50%。破岩效率提升缩短钻井时间，减少设备使用时长，降低设备租赁和维护成本。某井使用传统钻头钻井周期 120 天，采用混合钻头后缩短至 80 天，节约成本约 300 万元。

3.1.2 新型材料的应用

钻头制造采用新型耐高温、耐磨损材料，如热稳定聚晶金刚石（TSP）作为切削齿材料，在 200℃以上高温和 150MPa 以上高压环境，仍能保持良好热稳定性和耐磨性，使用寿命比传统金刚石复合片延长 2-3

倍。在钻头基体材料中添加钨、钼等特殊合金元素,提高基体强度和韧性,细化晶粒、增强晶界结合力,降低钻头钻进损坏风险。实际应用中,新型材料钻头基体抗疲劳性能提高 40% 以上,降低钻头损坏率。钻头使用寿命延长、损坏率降低,减少采购数量,节约采购成本。胜利油田某区块采用新型材料钻头后,每年钻头采购成本降低 40%,约 200 万元。

3.2 钻井参数优化

3.2.1 基于岩石力学的参数优化

深入研究深井岩石力学性质,建立高精度岩石破碎模型。利用岩石抗压强度、抗拉强度、弹性模量等参数,结合钻井力学分析,为不同岩石特性优化钻井参数提供理论依据。硬度高的岩石,适当提高钻压和转速增加破岩能量。钻进抗压强度 200MPa 的花岗岩时,钻压提高到 20t–25t,转速提高到 120–150 转/分钟,破岩效率明显提高。塑性较强的岩石,降低钻压、提高转速,利用切削齿切削破岩。钻进塑性页岩时,钻压降低到 10t–15t,转速提高到 180–200 转/分钟,避免岩石塑性流动,提高破岩效率。实时监测钻井参数变化,如扭矩、钻压、泵压等,结合岩石破碎模型动态调整。扭矩突然增大可能遇硬岩,及时增加钻压、降低转速避免钻头损坏;泵压异常时,根据钻井液循环路径和压力损失模型调整排量,保证钻井液正常循环。基于岩石力学的参数优化减少钻头磨损和设备损坏,降低维护成本。某井通过优化钻井参数,钻头使用寿命延长 20%,设备维护成本降低 30%,约 150 万元。

3.2.2 智能钻井参数控制系统的应用

胜利油田引入智能钻井参数控制系统,利用传感器实时采集钻井数据,包括钻头受力、转速、温度,以及钻井液密度、粘度、流量等。通过先进算法和人工智能技术处理分析数据,自动调整钻井参数。系统检测到扭矩突然增大,判断遇硬岩,自动增加钻压、降低转速避免钻头损坏;检测到泵压异常,自动调整钻井液排量保证正常循环。智能控制系统提高参数调整及时性和准确性,破岩效率比人工调整提高 20%–30%。智能系统应用不仅提高破岩效率,还减少因参数不合理导致的钻井事故,降低经济损失。胜利油田某区块应用该系统后,每年因避免钻井事故节约经济损失约 100 万元。

3.3 破岩辅助技术的应用

3.3.1 水力破岩技术

深井钻井应用高压水射流辅助破岩技术,在钻头喷嘴处产生高压水射流,利用冲击力和切割作用辅助

机械破岩。水射流使岩石表面形成微裂纹,降低强度,提高机械破岩效率,还能清洗井底,减少岩屑重复破碎。钻进时岩屑易在井底堆积影响破岩效率,高压水射流及时冲离岩屑,保持井底清洁,提高破岩效果。

优化水射流压力、流量和喷嘴结构,使其与机械破岩更好协同。根据不同岩石地层硬度和孔隙度调整水射流参数,实现最佳破岩效果。水力破岩技术提高破岩效率,缩短钻井周期,降低钻井成本。

某井采用水力破岩技术后,钻井周期缩短 15 天,节约成本约 150 万元。破岩效率提高使油气产量提前释放,增加企业收益。

3.3.2 井下动力钻具的应用

为提高钻头破岩能量,胜利油田在深井钻井中应用井下动力钻具,如螺杆钻具和涡轮钻具。井下动力钻具为钻头提供额外旋转动力,使其获得更高转速和扭矩。螺杆钻具利用钻井液压力能转化为机械能驱动钻头旋转,使用后钻头转速提高 50% 以上,破岩效率显著提升。涡轮钻具利用钻井液动能驱动涡轮带动钻头,具有转速高、扭矩稳定特点,在深井和超深井钻井有独特优势。井下动力钻具应用提高破岩效率,减少钻井时间,降低设备租赁和人工成本。胜利油田某区块应用后,每口井钻井时间缩短 10 天,节约成本约 100 万元。

4 高效破岩技术的经济性分析

4.1 成本分析

4.1.1 设备采购成本

新型高效破岩技术设备初期采购成本较高,如新型混合钻头价格比传统钻头高 30%–50%。但从长期看,其破岩效率高、使用寿命长,综合成本降低。传统 PDC 钻头在某深井每 100m–150m 需更换,新型混合钻头每 300m–500m 更换,虽单次采购成本高,但更换次数减少使总体采购成本降低。

智能钻井参数控制系统初期投入大,能有效避免因参数不合理导致的设备损坏,减少设备维修和更换成本。胜利油田某区块采用后,设备维修和更换成本每年降低 30%,约 150 万元。

4.1.2 运行维护成本

高效破岩技术运行中,破岩效率提高使钻井周期缩短,设备运行时间减少,降低设备磨损和维护成本。新型材料应用增强设备耐用性,减少维护次数和成本。

采用新型材料制造的钻头,基体抗疲劳性能提高,减少因钻头损坏的维修和更换,每年可节省维护成本 30%–40%。智能钻井参数控制系统实时监测设备运行

状态,及时发现解决潜在问题,进一步降低设备故障率和维修成本。某井应用高效破岩技术后,设备运行维护成本每年降低 200 万元。

4.2 收益分析

4.2.1 钻井效率提升带来的收益

应用高效破岩技术,胜利油田深井钻井平均机械钻速提高 30%~50%,钻井周期明显缩短。多个项目中平均钻井周期缩短 30~40 天,加快油气勘探开发进度,使区块油气产能提前释放。某区块原本每年完成 5 口深井钻井,应用后每年可完成 7~8 口,按每口井日产油气 100t,每吨油气价值 5000 元计算,每年增加油气收入 $(7-5) \times 100 \times 365 \times 5000 = 3.65$ 亿元。

4.2.2 井身质量保障带来的收益

高效破岩技术使钻井过程更平稳,减少井眼不规则问题,井眼扩大率和缩径率平均降低 10~15 个百分点。良好井身质量为后续固井、完井等作业提供有利条件,提高油气井使用寿命和生产能力。

从固井看,规则井眼使水泥浆均匀分布,提高固井质量,减少油气泄漏风险。统计显示,采用高效破岩技术后,固井质量不合格率从 10% 降至 3% 以内。以胜利油田某区域 100 口油气井为例,固井质量提升后每年减少因固井问题导致的油气损失约 5000t,按每吨油气价值 5000 元计算,每年避免经济损失 2500 万元。

油气井使用寿命方面,井身质量改善增强井壁稳定性,油气井使用寿命预计延长 5~10 年。仍以上述区域 100 口油气井为例,假设每口井平均日产油气 80t,按延长 5 年计算,可额外产出油气 $80 \times 365 \times 5 \times 100 = 1460$ 万吨,带来收益 $1460 \times 5000 = 730$ 亿元。稳定井身结构还有利于提高油气采收率,预计可使油气采收率提高 10~15%,意味着相同油气储量下能开采更多油气资源,增加企业收益。

4.3 案例分析:胜利油田某区块应用高效破岩技术的经济效益

胜利油田某区块以往采用传统破岩技术,平均每口井钻井成本 3000 万元,钻井周期 120 天,每年完成 6 口井钻井任务。该区块平均每口井日产油气 80t,按每吨油气价值 5000 元计算,每年油气收入为 $80 \times 365 \times 6 \times 5000 = 8.76$ 亿元。

采用高效破岩技术后,平均每口井钻井成本降低至 2000 万元,钻井周期缩短至 90 天,每年可完成井数增加到 8 口。同时,每口井日产油气量提升至 90t。

此时每年钻井成本为 $2000 \times 8 = 1.6$ 亿元,每年油

气收入为 $90 \times 365 \times 8 \times 5000 = 13.14$ 亿元。与传统技术相比,每年钻井成本降低 $(3000 \times 6 - 2000 \times 8) = 2000$ 万元,每年油气收入增加 $13.14 - 8.76 = 4.38$ 亿元。

此外,高效破岩技术应用减少设备维修和更换次数,每年节约设备维护成本 300 万元。因井身质量提升,减少后续作业风险和成本,如固井质量提升减少油气泄漏处理成本,每年约节省 100 万元。综合来看,该区块采用高效破岩技术后,每年经济效益提升约 $4.38 + 0.2 + 0.03 + 0.01 = 4.62$ 亿元。

5 结论与展望

本文对胜利油田深井钻井中高效破岩技术深入研究,系统分析其技术发展与创新成果及经济性。研究表明,高效破岩技术在应对深井复杂地质条件上优势显著,有效解决传统破岩技术的问题,从多方面为企业带来巨大经济效益。

成本方面,虽新型高效破岩技术初期设备采购成本增加,但长期看,通过提高破岩效率、延长设备使用寿命、降低设备损耗和维护成本等,总体成本大幅降低。收益方面,钻井效率提升使油气产能提前释放,井身质量保障提高油气井使用寿命和采收率,带来可观经济收益。然而,随着深井钻井向更深、更复杂地层发展,高效破岩技术仍面临挑战。超深井(深度超过 8000m)和特殊地质构造地层中,现有破岩技术和工具可能无法满足需求,需进一步研发更先进技术和工具。激光破岩技术、纳米材料在钻头中的应用等前沿技术虽前景广阔,但目前处于实验室研究或初步应用阶段,需加大研发投入和技术攻关。

同时,加强深井岩石力学性质研究,建立更完善的岩石破碎理论模型,对优化高效破岩技术意义重大。通过多学科交叉融合,将岩石力学、材料科学、信息技术等学科最新成果应用于该技术领域,不断推动技术创新发展。

未来,高效破岩技术不断完善发展,有望进一步降低深井钻井成本,提高油气勘探开发效率,为保障国家能源安全和推动石油勘探开发行业可持续发展做出更大贡献。

参考文献:

- [1] 杨超超,王红发,张颜伊,王亚兰.随钻测井地质导向技术在水平井钻井中的应用[J].测井技术,2022,46(05):625-631+637.
- [2] 邵才瑞,翟星雨,原野,张福明,张庆勋.井筒信息一体化地层建模及地质导向技术[J].测井技术,2021,45(03):227-232.