

油基钻井液 TCP 射孔技术研究与应用

李舜水*

中海石油（中国）有限公司上海分公司，上海，中国

*通讯作者

【摘要】国内某海域储层因其孔隙大喉道小的储层特点，易遭受水锁伤害，水相侵入后导致井壁失稳和储层损害。本文针对完井射孔作业中储层损害问题，进行了油基钻井液 TCP 射孔技术的适用性，并对现场应用效果进行了分析。油基钻井液射孔孔径明显大于清水介质，且射孔后岩心渗透率高于清水介质射孔后岩心渗透率，表明油基钻井液对储层损害程度更小；氟胶圈-360 及 CGFJ7316 牌号的 O 形圈，均能在油基钻井液中正常密封。现场应用效果表明，油基钻井液减少了对储层的伤害，有效提高射孔后的产能释放；油基钻井液 TCP 射孔作业后，起出检查射孔枪发射率 100%，且孔径较大，射孔位置准确。研究成果对海上保护储层射孔技术研究具有理论和现实意义。

【关键词】油基钻井液；水相圈闭；TCP 射孔；井壁稳定；储层保护

1.引言

众多学者从射孔工具、射孔工艺和保护储层射孔液等多个方面进行了大量研究工作。姚磊等^[1]针对油管输送射孔工艺，起射孔管柱过程中存在溢流、井涌、井喷隐患这一问题，研制了一种小直径封隔器。常昕等^[2]对尾声信号弹结构进行了研究。杜克拯等^[3]针对恩平 23-A 油田大位移井，研究出了应用 LWD 伽马工具测量射孔校深伽马曲线的新方法。文小娟等^[4]通过重新设计作业管柱，并添加多个压力点火头分段延时起爆，大大降低了水平井油管输送长井段射孔的作业风险和施工成本。蔡金亮等^[5]指出目前采用的 TCP 负压射孔工具从设计原理上忽略了负压阀联通孔泄压延时性和点火棒在短油管内下落速度非瞬时性等问题。于秋来等^[6]引进了不受井深和井斜等限制条件的环空加压射孔装置，解决了投棒点火负压射孔的难题，且在渤海和东海海域多年的作业实践中取得了良好的应用效果。刘占奇等^[7]研究了 TCP 平衡射孔、负压单独诱喷工艺，射孔后尽量减少射孔工作液向储层入侵。潘嘉等^[8]指出限流法压裂 TCP 射孔技术在煤层气藏中具有很好的适应性。王友春等^[9]研究优化了大位移小尾管井 TCP 射孔技术，该技术在东海某 2 井成功进行完井射孔作业，初始原油产量达到 96m³/d。杨子等^[10]研究结果表明，管柱下放速度越大，管柱外径越大，封隔器以下的“憋压”效应越大；在未出现明显“憋压”效应时，点火头压主要取决于井液的静水压力。

东海地区存在大段砂泥岩互层，泥岩极易

水化膨胀，伴随微裂缝发育，在钻井过程中极易发生起下钻遇阻和憋扭矩，甚至井壁失稳等复杂情况。采用油基钻井液可以较好地解决东海钻井井壁失稳难题，降低了东海地区泥岩地层的井壁失稳频次^[11]。本文进行了油基钻井液 TCP 射孔技术与现场应用，射孔作业在下入过程中可持续建立有效循环，极大降低下入过程中复杂情况的发生；通过投球点火的方式，有效形成了对井眼稳定性的保护措施，避免了在点火过程中因憋压而导致井眼失稳的风险；油基钻井液介质内射孔可更好的包裹并携带射孔后残留物，减少残留物沉淀导致的固相形成；起出后检查射孔枪发射率 100%，且孔径较大，射孔位置准确。

2.工区储层易发生水相圈闭损害

工区主力开发层系整体表现为大型辫-曲交互型水道沉积，储层较发育，砂地比平均 50%~60%。储层物性受埋深影响明显，随着埋深的增加，储层孔隙度和渗透性逐渐降低，垂向上的变化规律清楚，主要为中孔中渗透层。砂岩类型主要为长石岩屑质石英砂岩，碎屑成分中石英含量 60%~76%，长石含量 11%~21%，岩屑含量 11%~23%。胶结物主要是泥质和硅质，少量粘土矿物，粘土矿物以高岭石为主、其次为蒙脱石、伊/蒙混层和伊利石。

孔隙结构是流体在地下岩石中主要的赋存空间，孔隙类型及其结构在很大程度上决定了流体在地层中的渗流能力，微观孔隙结构是造成储层物性差异的主要内在因素。从铸体薄片和扫描电镜可知储层孔隙类型主要以粒间

孔、粒内孔为主，是典型的孔隙型储层，储层流体的渗流通道主要是喉道，流体流动能力受孔隙结构影响大。储层颗粒间点-线接触或者线-线接触导致出现孔隙大而喉道小的典型特征，孔喉的配位数平均低于3，连通性一般，其喉道类型主要为可变断面的收缩部分是主要喉道，次为片状、弯片状喉道。工区储层这种典型的孔隙结构导致液相在通过喉道处由于液阻和楔压效应而产生额外的阻力，从而使得液相返排困难，尤其是存在凝析油时更易在孔喉处发生堵塞。

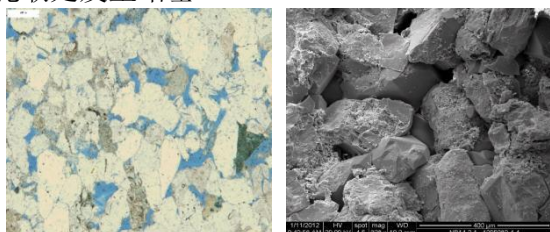


图 1.工区储层岩心铸体薄片(左)与扫描电镜分析(右)

采用石英玻璃片测试了研究区块地层水的接触角。石英玻璃片先用 1%HCl 浸泡 2 小时除去表面杂质，在将石英玻璃片放入蒸馏水中浸泡清洗掉表面盐酸。使用胶头滴管吸取地层水滴在玻璃片上，使用微距摄像头拍摄，接触角测试结果如图 2。地层水的接触角为 35.2° ，表明储层岩石为强水湿状态，岩石的水的吸附能力强，使得发生水相滞留时，水相难以返排。

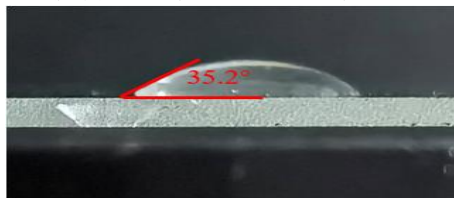


图 2.地层水接触角测试

在钻完井过程中，出于环保和成本问题，海上油气藏常用水基钻完井液。由于低渗储层带来的高毛管力，钻完井液会在水相自吸作用下进入油气储层。工区储层是典型的孔隙型储

层，不发育裂缝，毛管自吸作用是外来流体进入储层的主要方式。储层粘土矿物除高岭石外，含量最多的就是蒙脱石和伊/蒙混层，其次为伊利石，侵入地层的水相容易诱发粘土膨胀和微粒运移从而进一步降低孔喉半径，最终导致液相返排困难。过平衡压力下钻完井作业中，在侵入压力的作用下，液相侵入深度更远，液相滤失量更大。一方面，在储层自然压差作用下，这部分侵入水相难以返排，另一方面，在水相侵入过程中，钻完井液中的固相也会侵入孔隙，在近井地带形成致密滤饼，并且固相还可能会堵塞孔喉，导致水相更能返排。

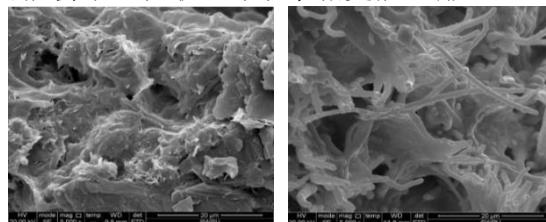


图 3.蒙脱石膨胀致使微孔变小(左)和毛发状伊利石膨胀变大(右)

3.射孔液采用油基钻井液的适应性分析

3.1 油基钻井液储层损害程度评价

通过测定样品射孔液伤害与未被射孔液伤害的气测渗透率，计算样品渗透率恢复值，评价被不同比例射孔液对岩石样品的伤害情况。相比水基完井液，油基钻井液对储层伤害程度更小。打靶试验采用清水及比重分别为 1.1SG、1.3SG、1.5SG 的油基钻井液四种介质进行打靶试验，油基钻井液介质射孔孔径明显大于清水介质，且油基钻井液介质射孔后岩芯渗透率高于清水介质射孔后岩芯渗透率。



图 4.清水、油基钻井液中射孔实验室实验

表 1.在清水和不同比重油基钻井液介质中射孔后的渗透率恢复测试结果

序号	样品编号	射孔前气体渗透率 (mD)	射孔后气体渗透率 (mD)	渗透率恢复%	备注
1	QS1-4	0.132	0.307	233	清水
2	QS5-8	0.132	0.269	205	
3	NJ1.1-1-4	0.0916	0.290	317	钻井液 $\rho=1.1SG$
4	NJ1.1-5-8	0.0916	0.188	205	
5	NJ1.3-1-4	0.0773	0.336	435	钻井液 $\rho=1.3SG$
6	NJ1.3-5-8	0.0773	0.148	192	
7	NJ1.5-1-4	0.161	0.404	252	钻井液 $\rho=1.5SG$
8	NJ1.5-5-8	0.161	0.243	151	

3.2 油基钻井液浸泡 O 型圈密封性能

将氟胶圈-360、CGFJ7316 两种胶料制作的 O 形圈，经油基钻井液浸泡后进行耐外压试验以验证其密封性能，并进行耐温、耐压后的拉伸及硬度检测以确定其性能变化情况。氟胶圈-360 胶料的 5 件 O 形圈 $\Phi 148.59\times 5.33$ ，150℃条件下浸泡 10h 后，其中 1 件 O 形圈局部脱皮，其余 4 件外观无损毁；浸泡后拉伸检测可知拉伸强度较小，硬度较要求值低 14.3°~10.2°。CGFJ7316 胶料的 4 件 O 形圈 $\Phi 53.57\times 3.53$ ，150℃条件下浸泡 10h 后，外观无损毁；浸泡后耐外压 120MPa/15min，试验工装未出现泄露、变形；浸泡、耐压后扯断伸长率满足要求值，拉伸强度较要求值低 1.45MPa~0.45MPa，硬度较要求值低 8.7°~7.3°。CGFJ7316 胶料的 4 件 O 形圈 $\Phi 23.39\times 3.53$ ，150℃条件下浸泡 10h 后，外观无损毁；浸泡后耐外压 120MPa/15min，试验工装未出现泄露、变形；浸泡、耐压后扯断伸长率满足要求值，拉伸强度较要求值低 2.1MPa~1MPa，硬度较要求值低 7.4°~6.7°。实验结果表明，氟胶圈-360 及 CGFJ7316 牌号的 O 形圈，均能在油基钻井液中正常密封。



图 5.钻井液浸泡后 O 形圈密封性能验证试验

4.现场应用

4.1 射孔井基本情况

XX-5 井实钻及测井资料表明，该井钻遇多套气层/差气层，测井解释气层斜厚 255.2m/垂厚 253.1m，差气层斜厚 125.3m/垂厚 124.4m。采用两套层系完井，层系一为上层系，层系二下层系，封隔器放置于两套层系之间，需满足上、下层系均为自由开关。层系一完井射孔起止井段为 4377.1m~4778.1m（斜深），跨度 401.0m，净射孔厚度 47.8m，采用平衡和后效体射孔，层系二采用裸眼完井，下打孔管到井底，油管下深到斜深 5270m 以下；鉴于井段

4838~5270m 可能存在出水风险，需下入裸眼封隔器和盲管封堵该层段。

采用管柱内加压点火，采用投球压力开孔起爆装置；点火头压力：顶部点火头：3190psi~4265psi，底部点火头：2098psi~3115psi。

采用打孔管&刮管一体化管柱：射孔底界 4778.1m，分层封隔器深度 4787m，浮箍顶深 4802.84m，设计尾管悬挂器下深 4797m，为上层系留出射孔口袋 19m。

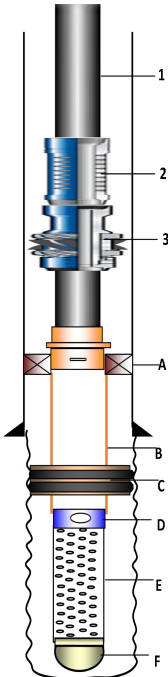


图 6.打孔管&刮管一体化管柱

4.2 作业风险与解决措施

射孔枪首次在油基钻井液中射孔作业，存在射孔枪扣橡胶密封失效、枪管进液点火失败的风险。解决措施：提前沟通，针对射孔枪连接处橡胶 O 圈在油基钻井液中，经钻井液浸泡 150℃/10h，耐外压 120MPa/10min 后，做密封性能测试，O 圈密封性能试验结果：氟胶圈-360 及 CGFJ7316 牌号的 O 形圈均能在本次试验钻井液介质中正常密封。

射孔段层位压力系数 1.0，射孔液比重 1.45SG，存在射孔后漏失的风险。解决措施：同钻井确认，9-5/8"套管管鞋固井当量 1.59SG 未漏、4300m 处当量 1.5SG 未漏，固射孔后漏失风险小，届时射孔后循环，逐级提排量，关注好循环池液面，严防循环漏失，现场已准备好油基钻井液堵漏材料。

油基钻井液介质中，存在固相沉降，堵塞投球起爆器，导致点火失败的风险。措施：改进投球起爆器的流动通道，扩大投球前的循环

泄流面积,降低固相杂质沉降堵塞投球起爆器的风险。

4.3 射孔效果评价

采取油基钻井液内 TCP 射孔具有显著优点: (1) 更好的保护井壁稳定性: 较水基完井液相比,油基钻井液可更好的维护储层,减少对储层的伤害,有助于维持储层渗透率,有效提高射孔后的产能释放; (2) 减少残留物沉积: 油基钻井液介质内射孔可更好的包裹并携带射孔后残留物,减少残留物沉淀导致的固相形成; (3) 射孔效果: 起出后检查射孔枪发射率 100%,且孔径较大,射孔位置准确。

本次采用管柱内加压点火,投球压力开孔起爆装置。射孔管柱可高排量下入技术: 投球前剪切压力是投球后的 2~3 倍; 复杂情况可控技术: 考虑油基钻井液中下入射孔管柱暂无可参考先例,本次射孔作业在下入过程中可持续建立有效循环,极大降低下入过程中复杂情况的发生; 裸眼段井眼维稳技术: 通过投球点火的方式,有效形成了对井眼稳定性的保护措施,避免了在点火过程中因憋压而导致井眼失稳的风险。

油基钻井液对于裸眼储层保护效果已得到充分实践证明,本次作业成功实现在油基钻井液中射孔作业,但从另一方面油基钻井液稠度高、难处理等问题给射孔起枪阶段的油基钻井液处理带来了诸多挑战。本次作业将“绿色发展”理念+“金点子”小改进相结合,助力蓝色海洋环境保护: (1) 充分调动资源,备足吸油毛毡: 形成了从射孔枪起出、吊至猫道机、甩至悬臂梁全流程的油基钻井液防滴漏措施; (2) 工具小发明,形成“包”、“刮”、“擦”、“吹”油基钻井液极限留井处理措施; (3) 甩至悬臂梁带油基钻井液残余射孔枪再次吸油毛毡擦拭、包裹并静置。

5. 结论

(1) 储层孔喉比大,液相(油、水)在狭窄喉道处,减小或堵塞气相流动通道,气相渗透率急剧降低,发生水相圈闭效应。

(2) 油基钻井液可更好的维护储层,减少对储层的伤害,有助于维持储层渗透率,有

效提高射孔后的产能释放;油基钻井液介质内射孔可更好的包裹并携带射孔后残留物,减少残留物沉淀导致的固相形成。

(3) 油基钻井液 TCP 射孔作业后,起出检查射孔枪发射率 100%,且孔径较大,射孔位置准确。

(4) 通过投球点火的方式,有效形成了对井眼稳定性的保护措施,避免了在点火过程中因憋压而导致井眼失稳的风险。

参考文献:

- [1]姚磊,陈丽君.TCP 小直径封隔器封井工艺技术[J].油气井测试,2023,32(01): 22-26.
- [2]常昕,张虎,刘正彦等.油管传输射孔(TCP)用尾声信号弹的研究[J].火工品,2017,(03): 22-26.
- [3]杜克拯,曹鹏飞,夏竹君等.南海东部超深大位移定向井射孔校深新方法[J].能源技术与管理,2022,47(01): 180-183.
- [4]文小娟.分段延时起爆射孔技术在油田水平井中的应用[J].江汉石油职工大学学报,2020,33(04): 42-44.
- [5]蔡金亮.TCP 负压射孔工具对真实负压值的影响研究[J].石油工业技术监督,2019,35(08): 53-56.
- [6]于秋来.基于哈根-泊肃叶流的 TCP 管柱下放压力场分析[J].油气井测试,2018,27(05): 7-12.
- [7]刘占奇.渤海油田大斜度井射孔工艺[J].当代化工研究,2022,(01): 144-146.
- [8]潘嘉.限流法压裂 TCP 射孔在织金煤层气井的应用[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(13): 108-110.
- [9]王友春.东海超深大位移小尾管井 TCP 射孔技术[J].油气井测试,2020,29(04): 68-72.
- [10]杨子,陈光峰,盛廷强等.负压射孔方式在海上油田探井测试中的应用与改进[J].钻采工艺,2018,41(04): 109-112.
- [11]胡蝶,郑铭,王磊等.反渗透钻井液体系的研究及其在东海的实践应用[J].海洋石油,2024,44(02): 89-93.