



东胜气田致密气藏经济开发钻完井关键技术

蒋新立 李明忠 张军义 董强伟 李德红 宋文宇

Key Technologies of Drilling and Completion for Economic Development of Tight Gas Reservoirs in Dongsheng Gas Field

JIANG Xinli, LI Mingzhong, ZHANG Junyi, DONG Qiangwei, LI Dehong, SONG Wenyu

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2025004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

苏里格致密气藏超长水平段水平井钻井完井关键技术

Key Technologies for Drilling and Completing Horizontal Wells with Ultra-Long Horizontal Sections in the Sulige Tight Gas Reservoirs

石油钻探技术. 2022, 50(1): 13–21 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021056>

苏里格气田致密气藏水平井优快钻井技术

Optimized Fast Drilling Technology for Horizontal Wells in the Tight Gas Reservoirs in Sulige Gas Field

石油钻探技术. 2020, 48(5): 27–33 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020083>

顺北超深超高温油气藏钻完井提速关键技术

Key Technologies for Improving Drilling and Completion Speed in Shunbei Ultra-Deep and Ultra-High-Temperature Oil and Gas Field

石油钻探技术. 2024, 52(3): 21–27 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2024060>

长庆油田致密气水平井超长水平段安全钻井完井技术

Safe Drilling and Completion Technologies for Ultra-Long Horizontal Section of Tight Gas Horizontal Wells in Changqing Oilfield

石油钻探技术. 2022, 50(5): 14–19 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2022095>

加拿大M致密砂岩气藏高效开发技术

High-Efficient Development Technologies for the M Tight Sandstone Gas Reservoir in Canada

石油钻探技术. 2022, 50(1): 97–102 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021123>

涪陵页岩气田加密井钻井关键技术

Key Drilling Technologies of Infill Wells in the Fuling Shale Gas Field

石油钻探技术. 2020, 48(5): 21–26 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020039>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2025004

引用格式: 蒋新立, 李明忠, 张军义, 等. 东胜气田致密气藏经济开发钻完井关键技术 [J]. 石油钻探技术, 2025, 53(1): 10–16.

JIANG Xinli, LI Mingzhong, ZHANG Junyi, et al. Key technologies of drilling and completion for economic development of tight gas reservoirs in Dongsheng Gas Field [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2025, 53(1): 10–16.

东胜气田致密气藏经济开发钻完井关键技术

蒋新立, 李明忠, 张军义, 董强伟, 李德红, 宋文字

(中石化华北石油工程有限公司技术服务公司, 河南郑州 450006)

摘 要: 为了解决鄂尔多斯盆地东胜气田致密气藏钻完井过程中存在的漏塌频发、机械钻速低和固井完整性要求高等问题, 在分析工程地质特征的基础上, 开展了钻完井关键技术研究。优化了井身结构, 开发了 KCl-聚胺强封堵钻井液体系、KPD 堵漏浆等, 形成了漏塌高效预防与治理技术; 优化设计了异形齿 PDC 钻头和钻井参数, 优选了钻井工具, 配套了井眼轨迹控制技术, 形成了非均质地层钻井提速技术; 开发了超低密度水泥浆、弹韧性防窜水泥浆, 配套了全封固井、高效顶替和尾管悬挂及回接工艺, 形成了低承压地层水平井固井技术。该钻完井关键技术在东胜气田 94 口水平井进行了集成应用, 平均钻井周期缩短了 34.4%、完井周期缩短了 32.1%, 固井质量优质率由 26.7% 提至 84.3%。研究与应用结果表明, 集成形成的东胜气田钻完井关键技术提速降本效果显著, 为鄂尔多斯盆地北缘复杂构造致密气藏经济效益开发提供了工程技术保障。

关键词: 致密气藏; 防漏堵漏; 钻井液; 钻井提速; 固井完整性; 东胜气田

中图分类号: TE242; TE257

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2025)01-0010-07

Key Technologies of Drilling and Completion for Economic Development of Tight Gas Reservoirs in Dongsheng Gas Field

JIANG Xinli, LI Mingzhong, ZHANG Junyi, DONG Qiangwei, LI Dehong, SONG Wenyu

(Technology Service Company, Sinopec Huabei Oilfield Service Corporation, Zhengzhou, Henan, 450006, China)

Abstract: In order to solve the problems of complex leakage and collapse, low rate of penetration, and high requirements for cementing integrity during drilling and completion in Dongsheng Gas Field of Dongsheng Gas Field, key drilling and completion technologies were studied based on the analysis of engineering geological characteristics. Efficient prevention and treatment technologies for leakage and collapse were formed by optimizing the casing program and developing KCl-polyamine strong plugging drilling fluid system and KPD plugging slurry. Drilling speed enhancement technology for heterogeneous formation was developed by designing personalized PDC bits and drilling parameters, optimizing bottom hole assembly, and supporting wellbore trajectory control. Horizontal well cementing technology for low pressure-bearing formation was formed by developing ultra-low density cement slurry, elastic and ductile anti-channeling cement slurry, supporting technology of fully sealed cementing, and achieving efficient displacement, tail pipe suspension, and reconnection process. The above key technologies for drilling and completion have been integrated and applied in 94 horizontal wells in Dongsheng Gas Field, reducing the average drilling cycle by 34.4% and the completion cycle by 32.1%, increasing the cementing quality rate from 26.7% to 84.3%. The research and application results indicate that the key technologies for drilling and completion in Dongsheng Gas Field have a significant effect on speed improvement and cost reduction, providing engineering and technical support for the economic development of tight gas reservoirs in the northern edge of Ordos Basin.

Key words: tight gas reservoir; leak prevention and plugging; drilling fluid; drilling speed enhancement; cementing integrity; Dongsheng Gas Field

收稿日期: 2024-02-02; 改回日期: 2025-01-12。

作者简介: 蒋新立 (1974—), 男, 河南驻马店人, 1998 年毕业于中国地质大学 (武汉) 勘查工程专业, 高级工程师, 主要从事钻完井工程技术研究与工程管理工作。E-mail: petroleumupc@163.com。

通信作者: 李明忠, limingzhong.oshb@sinopec.com。

基金项目: 中国石化科技攻关项目“致密气藏钻完井及压裂关键工程技术与应用”(编号: P20001)资助。

东胜气田致密气藏位于鄂尔多斯盆地北缘,属于典型的低压、低渗、低产、低丰度气藏,天然气资源量 $1.692\ 2\times 10^{12}\text{ m}^3$, 探明储量 $2\ 518\times 10^8\text{ m}^3$ ^[1]。该致密气藏构造复杂、开发单元跨度大,前期天然气钻探开发中存在诸多严峻挑战,水平井平均钻井周期 70.1 d、完井周期 80.7 d,固井密封完整性不足,造成单井钻井成本高,无法满足经济开发要求。为此,借鉴苏里格气田和大牛地气田钻完井技术^[2-6],立足地质与工程一体化、技术与经济一体化的原则,按照“特点条件+适应性关键技术”的攻关思路,通过分析硬脆性泥页岩井壁失稳机理、异形齿的破岩机理,优化井身结构,设计异形齿 PDC 钻头,优选钻井工具,优化钻具组合和钻井参数,开发高性能钻井液、堵漏浆、水泥浆体系等,形成了东胜气田经济开发钻完井关键技术,并在该气田的 94 口水平井进行了应用,应用后漏塌复杂损失显著降低,机械钻速明显提高,大幅缩短了钻井周期。

1 工程地质特征及技术难点

影响东胜气田钻完井工程质量和施工效率的因素,可以概括为以下 4 个方面:

1) 断裂发育,钻井井漏频繁。东胜气田断层发育,断穿层位多,形成了大量高角度裂缝,垂向贯穿深;褶皱背斜发育,在背斜顶部产生了大量复杂构造缝;在断层和褶皱作用下,泥岩层出现了不规则碎裂裂隙。成像测井显示,裂缝网络复杂,具有多尺度特征。在井筒压力下,1~10 mm 天然裂缝易发生压差式漏失,10~150 μm 层理、微裂缝易发生裂缝扩展性漏失^[7],2 种漏失类型频次占比分别为 32.8% 和 67.2%,平均单井损失时间 5.17 d。

2) 泥岩发育,井壁失稳突出。东胜气田多套地层泥岩发育,不同层位泥岩特征存在差异,石千峰组、石盒子组为棕红色和棕褐色泥岩,山西组、太原组为破碎及弱结构面的深灰色泥岩、碳质泥岩,黏土矿物含量 30%~45%,以伊/蒙混层和伊利石为主,存在纳米、微米宽度及部分可见的裂缝;具有较强水化膨胀性,又易应力剥落,黏土矿物水化膨胀差异和微观结构引起水化不稳定是造成井壁失稳的主要机理^[8]。在工程上,石千峰组、石盒子组等泥岩发育地层与刘家沟组等漏失地层同处于水平井斜井段,漏塌互相诱导。该气田属于河相沉积,实钻时常出现砂体提前或滞后、变薄或缺失等情况,斜井段常需在泥岩段提高造斜率中靶或大井斜稳斜探

顶,水平段常需在泥岩层调整井眼轨迹,加剧了井壁失稳,平均单井损失时间 7.23 d。

3) 岩性和井眼轨道复杂,机械钻速低。东胜气田纵向上分布多套砂、砾和泥岩互层,延长组底部有含砾石夹层,纸坊组、下石盒子组、太原组等有部分砂砾岩,下石盒子组、山西组等储层砂体致密,石英含量较高,破岩效率低,采用 PDC 钻头容易发生崩齿或研磨性磨损。井眼轨道复杂,二维水平井靶前距小于 300 m,造斜率达到 6°/30m 以上;三维水平井偏移距 180~350 m,常设计大井斜扭方位段,综合难度系数大于 2.0^[9]。滑动钻进井段长,摩阻扭矩大,滑动钻进时的钻时大于 20 min/m。

4) 易井漏,封固段井筒密封完整性要求高。东胜气田刘家沟组承压能力低,固井时井漏造成技术套管难以全封;低排量注替制约了顶替效率,水泥封固段质量较差;被迫采用反挤补救,无法保证反挤与正注衔接及反挤封固质量。全井封固率仅 15.0%,固井质量优质率 26.7%。致密气藏以分段多簇体体积压裂改造方式为主,射孔密度大,高排量、大液量施工时易导致水泥环段间、簇间封隔失效,严重影响压裂改造效果和长效开发。尾管固井时悬挂器的耐压能力仅 35 MPa,回接管柱的锚定、密封能力不足,多口井出现油套连通和套管弯曲变形问题,压裂作业无法完成。

2 漏塌高效预防与治理技术

2.1 井身结构设计

在井漏高风险区,刘家沟组漏失压力与石盒子组坍塌压力的窗口窄,漏塌并存。将常规三开井身结构(见图 1)优化为“导管+二开井身结构”,如图 2 所示。导管 80 m,封固岩性疏松、胶结程度低的第四系黄土层;一开钻至石千峰组中下部砂岩地层,封固刘家沟组等低承压地层;二开斜井段钻至 A 靶点后继续钻进水平段,直至钻至设计完钻井深。较之常规三开井身结构,一开井段的重点在防漏,使用低密度钻井液钻进;二开井段的重点在防塌,提高钻井液密度钻进,解决刘家沟组井漏与石盒子组泥岩地层井壁失稳间的矛盾,实现漏塌分治。但在井漏低风险区,仍采用常规三开井身结构,二开钻至 A 靶点中完,三开进行水平段专打,有助于水平段延伸,降低对储层的伤害。

2.2 井壁稳定钻井液技术及应用方案

通过分析东胜气田井壁失稳机理,确定“物化

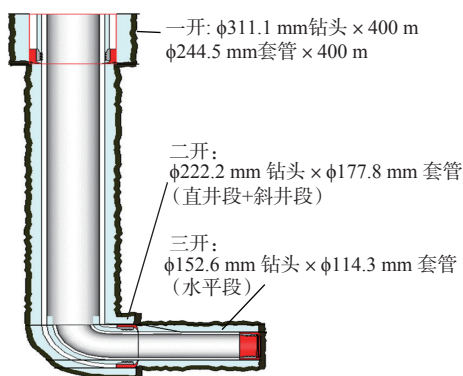


图1 常规三开水平井井身结构

Fig.1 Conventional three-section casing program of horizontal well

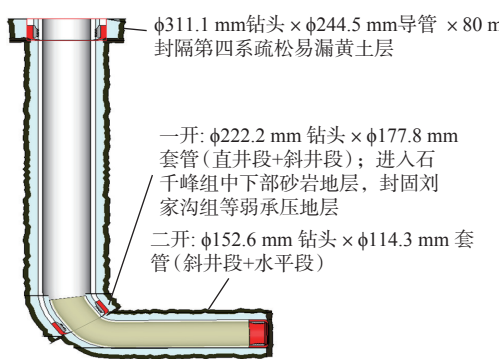


图2 新二开水平井井身结构

Fig.2 New two-section casing program of horizontal well

封固井壁、化学活度平衡、加强抑制水化”的技术思路,构建了KCl-聚胺强封堵钻井液体系^[10]。泥岩微裂缝宽度 $5\sim 25\ \mu\text{m}$,按照 $d_{90}=20\ \mu\text{m}$ 优化800目、1500目和3000目等不同粒径超细碳酸钙的配比;复配胶乳沥青、纳米乳液、聚合醇等材料,通过表面改性、变形封堵、浊点效应等作用协同封堵微裂缝^[11]。优选低分子聚胺抑制剂抑制水化膨胀,加量不少于0.2%,单层吸附在黏土片层表面,降低水化斥力,阻止水分子进入。KCl加量在5.0%以上,不仅能减弱黏土矿物的水化分散,还能降低钻井液的水活度,减少滤液向近井地带的扩散、渗透。岩心柱被钻井液滤液浸泡120 h后仍保持原样,无崩散现象,如图3所示(a1—d4为钾胺基钻井液滤液浸泡,b1—b4为KCl-聚胺强封堵钻井液滤液浸泡)。针对山西组、太原组等破碎与弱结构面泥岩,加入井壁强化剂,形成“外柔内刚”的核壳结构,提高在泥岩表面的吸附能力和随钻封堵效果。

分段优化钻井液性能,一开直井段上部采用低固相聚合物钻井液,配方为2.0%~4.0%膨润土+

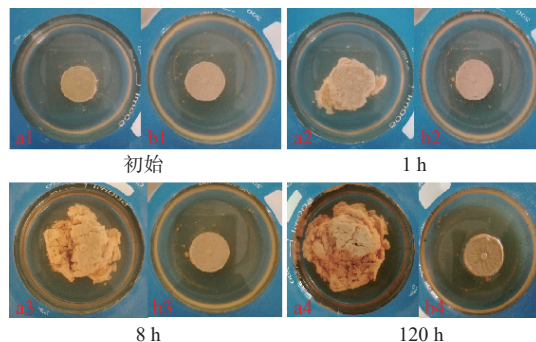


图3 岩心柱崩解试验

Fig.3 Core column disintegration experiment

0.1%~0.2%K-PAM+0.2%~0.3%NH₄HPAN,密度控制在1.10 kg/L以下,漏斗黏度30~40 s,钻井液滤失量控制在10 mL以内;延长组等高渗透砂岩地层,适当增大K-PAM加量,以减小虚滤饼厚度。进入造斜点后,补充0.8%~1.0%包被抑制剂、0.1%聚胺抑制剂、0.5%LV-PAC和1.0%~2.0%NH₄HPAN,控制滤失量低于6 mL,预防石千峰组垮塌;一开中完时,控制密度低于1.12 kg/L。二开前,加入KCl、聚胺抑制剂、纳米乳液、胶束剂、超细碳酸钙等将钻井液转型,密度调整至1.12 kg/L,滤失量低于5.0 mL,漏斗黏度40~50 s,高温高压滤失量低于10 mL,动切力5~8 Pa;随着井斜角增大,补充抑制剂、封堵剂、黄原胶和润滑剂;逐步提高钻井液密度,钻至下石盒子组盒2段时提至1.20 kg/L,入窗前提至1.23 kg/L,漏斗黏度50~60 s;水平段钻遇泥岩层时,物理防塌和化学防塌相结合,保证超细碳酸钙、纳米乳液等封堵剂加量大于7.0%,密度提至1.25 kg/L。

2.3 裂缝发育地层高效防漏堵漏技术

东胜气田裂缝特征复杂,诱导式漏失与压差式漏失并存。在井筒压力作用下,等效应力沿层理、微裂缝向尖端传递,造成微裂缝长度增长,漏失程度增大。通过优选超细碳酸钙、竹纤维、弹性石墨等,优化了随钻预封堵承压防漏钻井液,砂床承压能力大于7 MPa(250~375 μm 石英砂床);钻至刘家沟组前,定时定量补充封堵材料,及时封堵裂缝端口,形成附加周向应力,阻断压力向裂缝尖端传递^[12]。针对压差式恶性漏失,集合裂缝封堵与隔断封堵原理,开发了以固化剂、架桥材料、填充材料、触变剂为主体的可控膨胀堵漏(KPD浆^[13])。该堵漏浆具有强触变、快早强、短促凝等特性,封堵强度大于20 MPa/(12 h×70℃)。当漏失速率大于5 m³/h时,堵漏管柱下放至漏层顶部,利用固井泵车泵入该堵漏浆堵漏,一次堵漏成功率大于90%。

3 非均质地层钻井提速技术

3.1 异形齿 PDC 钻头

在直井段进行了提高钻头抗冲击设计, $\phi 222.2$ mm 钻头采用五刀翼、 $\phi 16.0$ mm 复合片、双排齿结构, 前排为“三棱齿+斧形齿”组合, 后排布置 2~3 个锥齿, 深内锥冠部轮廓, “一趟钻”完成直井段。在斜井段提高定向性能和破岩效率, $\phi 222.2$ mm 钻头采用微螺旋四刀翼、 $\phi 16.0$ mm 复合片、6 个 $\phi 10.3$ mm 微扭冲喷嘴, 双排齿结构设计, 前排为“斧形齿+平面齿”组合, 浅内锥冠部轮廓, 一体钻头缩短整体长度, “一趟钻”完成斜井段。在水平段进行了提高抗研磨性设计, $\phi 152.4$ mm 钻头采用五刀翼、 $\phi 16.0$ mm 复合片、双排齿结构, 耐磨损复合片, 前排为“三棱齿+斧形齿”组合, 全金刚石保径, 中深内锥设计, 1~2 趟钻完成斜井段。

3.2 钻井参数优化设计

构建钻井参数数据库, 用灰色关联模型分析了东胜气田钻速敏感因素(排序为转速、钻压、排量), 并对比了不同层位钻速的敏感性, 结果见图 4、图 5。

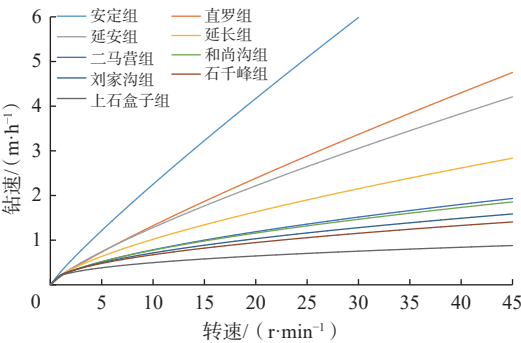


图 4 各层位钻速与转速的关系

Fig.4 Relationship between drilling speed and rotational speed at each layer

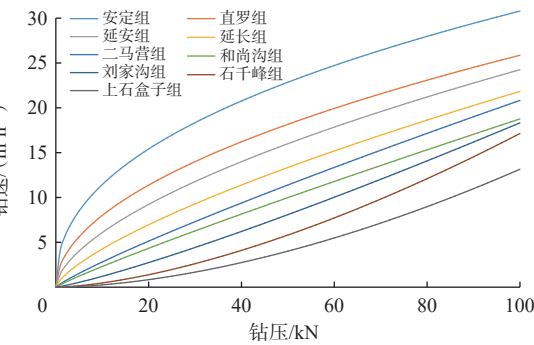


图 5 各层位钻速与钻压的关系

Fig.5 Relationship between drilling speed and weight on bit at each layer

由图 4 和图 5 可知: 埋深较浅或强度较低地层的钻速与钻头转速呈近线性关系; 随着埋深增深或强度增强, 钻速对转速的敏感性降低, 钻速对钻压的敏感性增强。

根据东胜气田钻速敏感因素分析结果, 在钻机、钻井泵和地层承压等条件约束下, 优化设计了钻井参数, 结果见表 1。根据设计结果, 软地层采用高转速-中低钻压参数, 中硬地层采用中等转速-中等钻压参数, 硬地层采用中低转速-中高钻压参数。

表 1 东胜气田分井段、分层位钻井参数优化设计结果
Table 1 Optimization design results of drilling parameters for segment and layer in Dongsheng Gas Field

井眼 直径/mm	井段	层系	钻压/kN	转盘转速/ (r·min ⁻¹)	排量/ (L·s ⁻¹)
222.2	直井段	安定组	20~60	70	40~45
		直罗组	40~60	70	40~45
		延安组	40~60	70	40~45
		延长组	40~60	60	40~45
		二马营组	60~100	60	38~40
		和尚沟组	80~100	60	36~38
		刘家沟组	100~120	60	26~28
		石千峰组	100~120	60	28~32
	斜井段	石千峰组	100~120	60	28~32
		上石盒子组	100~120	50	30~34
盒3段		100~120	40~50	30~34	
盒2段		100~120	40~50	30~34	
152.4	水平段	盒1段	40~80	50~60	18~20

3.3 钻井工具配套

基于钻井参数优化设计, 优选适配性好的螺杆钻具。直井段上部地层抗压强度较低、可钻性较好, 使用高转速螺杆; 刘家沟组及以下地层抗压强度增高、研磨性增强, 使用低转速大扭矩螺杆。配套降摩减阻工具, 降低滑动钻进摩阻, 提高定向效率与机械钻速。三维斜井段或短靶前距斜井段配套水力振荡器, 利用产生的轴向振动将静摩擦转变为动摩擦。钻进 $\phi 152.4$ mm 水平段时, 水力振荡器因压降大、泵压过高受到限制, 于是配套了双向扭摆自动控制系统^[14], 滑动定向钻进时控制顶驱或转盘扭转上部钻具, 以缩短静摩擦段的长度。

3.4 井眼轨迹控制技术

为提高导向的准确性, 采取井震结合方法, 形

成“确定随机结合、分级相控、地震约束”三维地质建模方法,表征气藏的空间展布;利用随钻测井、岩屑录井等,实时修正三维地质模型,更新储集体构造形态、砂体横向展布认识;制定靶点着陆、水平段导向方案,提高中靶效率和砂岩的钻遇率^[15]。

优化钻具组合,减少滑动钻进进尺,提高井眼轨迹控制效率。斜井段采用 $\phi 165.1\text{ mm}$ (1.75°)或 $\phi 172.0\text{ mm}$ (1.75°)高造斜率螺杆,优化了弯点和下稳定器中距钻头的距离,造斜率分别提高了 $2.7^\circ/30\text{ m}$ 和 $3.0^\circ/30\text{ m}$ (见表2)。在满足实钻造斜率不小于设计造斜率(中靶垂深上提 0.50 m)的前提下,按照安全优快施工原则,斜井段上部砂岩地层多滑动钻进,以提高造斜率;泥岩层多复合钻进,以保证井眼规则。井斜角大于 45° 后容易形成岩屑床,摩阻增大,若复合钻进的增斜率满足要求,则以复合钻进为主。入窗前 50 m 将井斜角控制在 83° 左右稳斜探顶,发现气层后在增斜至 90° 的过程中实现入窗。水平段采用“变径稳定器+ 1.25° 弯螺杆”的钻具组合,变径稳定器外径在 142.0 mm 与 152.0 mm 间转换,以提高水平段井眼轨迹的调控能力。

表2 高造斜螺杆与常规螺杆的对比

Table 2 Comparison between high inclination screw and conventional screw

螺杆	弯点到钻头 距离/mm	下稳定器中到 钻头距离/mm	造斜率/ ($^\circ$)·(30 m) ⁻¹
7LZ165×1.75° 高造斜螺杆	1 300	420	12.7
7LZ165×1.75° 常规螺杆	1 500	690	10.0
7LZ172×1.75° 高造斜螺杆	1 260	480	12.0
7LZ172×1.75° 常规螺杆	1 567	670	9.0

4 低承压地层水平井固井技术

4.1 水泥浆体系

针对 $\phi 222.2\text{ mm}$ 技术套管在刘家沟组固井中的漏失问题,开发了基于复合减轻剂的超低密度水泥浆,密度为 1.15 和 1.25 kg/L ,水泥石抗压强度大于 $3.5\text{ MPa}/(24\text{ h}\times 70^\circ\text{C})$,加压 30 MPa 前后密度差小于 0.01 kg/L ,较同密度水泥浆成本降低了 $18.4\%\sim 41.6\%$ 。针对 $\phi 152.4\text{ mm}$ 尾管固井时的气窜问题及压裂改造需要,优选增韧、增弹材料和晶格膨胀剂等,开发了弹韧性防窜水泥浆,SPN系数小于3,抗折强度大于 $7\text{ MPa}(48\text{ h})$,弹性模量 $3.5\sim 8.0\text{ GPa}$ 。

4.2 全封固井工艺

在钻进刘家沟组时如发生漏失且堵漏后地层承压无显著提升,采用“裸眼封隔器+免钻双级箍”一体化固井工具,工具安放在刘家沟组顶以上 50 m 井段,一级固井后坐封封隔器,并进行二级固井,由裸眼封隔器承托刘家沟组以上环空液柱压力,实现全封固。

若采用一次固井,固井前利用钻井液在环空-套管内的循环摩阻测试地层的承压能力^[16],根据测试结果采用不同固井工艺。若井内无法建立循环或刘家沟组的承压能力低于 1.20 kg/L ,采用“ 1.25 kg/L 超低密度水泥浆+正注反挤”施工,正注水泥浆返至刘家沟组中下部,由井口反挤至刘家沟组,正注与反挤时间间隔不短于 12 h 。参考水泥浆反挤进入漏层的压力特征,优化反挤浆量和排量,促进正注与反挤的衔接^[17]。若刘家沟组承压能力高于 1.20 kg/L ,采用 1.15 kg/L 超低密度水泥浆进行一次全返固井施工,若期间发生漏失则采取反挤补救。

4.3 低承压地层高效顶替工艺

为满足套管偏心率 >0.7 的要求,对于 $\phi 222.2\text{ mm}$ 技术套管,直井段每5根套管、斜井段每3根套管安放1只弓形弹簧扶正器;对于 $\phi 152.4\text{ mm}$ 生产套管,水平段每2根套管安放1只树脂滚轮扶正器或树脂旋流扶正器,重叠段每3根套管安放1只弓形弹簧扶正器。受地层承压能力和固井车机泵能力限制,水泥浆难以达到紊流或塞流,因此使用低返速紊流冲洗液和高返速塞流隔离液,利用紊流和塞流进行复合顶替^[18],以保证顶替效率。水平段采用清水替浆,有助于降低套管偏心率。采用“正注反挤”工艺,正注时向井内注入 20 m^3 低黏切钻井液,反挤时由井口向环空泵入 10 m^3 以上冲洗液,以充分破坏环空内钻井液因长期静止形成的胶凝结构。

4.4 尾管悬挂固井及回接工艺

为保证致密气藏安全高效压裂施工,使用耐压 70 MPa 、自带锁紧结构的全通径尾管悬挂器^[19],既简化了回接管串,又解决了常规悬挂器回接后密封、锚定不足的问题。悬挂器坐挂在井斜角 $40^\circ\sim 45^\circ$ 的位置,封固段垂深浅,在尾浆静胶凝强度过渡阶段易发生气窜,采用钻井液循环加压或井口憋压方式,确保静胶凝强度发展到 480 Pa 前持续有效压稳。

5 现场应用

2020年以来,持续开展了东胜气田水平井钻完

井提速提效关键技术的集成应用, 累计实施了 94 口水平井, 平均钻井周期 46.0 d, 平均完井周期 54.8 d。与 2019 年采用常规技术的井相比, 钻井周期缩短了 34.4%, 完井周期缩短了 32.1%, 提速降本效果显著(具体对比情况见表 3)。其中, 最短钻井周期纪录 22.8 d、完井周期 28.1 d, 该纪录井完钻井深 4 650 m, 平均机械钻速 20.95 m/h。

表 3 2020 年以来应用井与 2019 年未应用井的效果对比
Table 3 Comparison of effects of test wells since 2020 and untreated wells in 2019

年份	井数/口	平均井深/m	平均钻井周期/d	平均完井周期/d
2019	38	4 236	70.1	80.70
2020	19	4 417	52.2	60.80
2021	27	4 146	37.8	44.67
2022	26	4 593	49.3	58.90
2023	22	4 552	46.9	57.20

分析各单项技术或单项指标应用效果, 可知:

1) 应用 KCl-聚胺强封堵钻井液体系、随钻预封堵承压防漏钻井液和 KPD 堵漏浆, 漏塌预防成功率和堵漏效率得到有效提升。对比 2019 年, 漏失率由 37.2% 降至 25.7%, 平均单井漏处理时间由 5.17 d 缩短至 1.98 d, 缩短了 61.7%, 平均单井损失时间由 7.23 d 缩短至 3.24 d, 缩短了 55.2%。

2) 应用个性化 PDC 钻头和提速工具, 分井段分层位适度优化钻井参数, 优化井眼轨迹控制工艺, 机械钻速显著提高。二开直井段平均钻头使用数量 1.33 只, 与 2019 年相比单井段钻头数量减少了 0.34 只, 直井段“一趟钻”占比 66.7%、“两趟钻”占比 100%; 斜井段平均钻头使用数量 1.61 只, 单井段钻头数量减少了 0.67 只, 斜井段“一趟钻”占比 47.8%、“两趟钻”占比 91.3%; 三开水平段平均钻头使用数量 2.10 只, 单井段钻头数量减少了 1.04 只, 水平段“两趟钻”占比 65.2%。全井平均机械钻速 12.22 m/h, 与 2019 年平均机械钻速 9.69 m/h 相比提高了 26.1%。

3) 应用超低密度水泥浆、全封固井工艺、高效顶替工艺等, 固井质量优质率由 26.7% 提至 84.3%, 全井封固率由 15.0% 提至 53.3%, 未发生因回接管柱造成的压裂改造失败。

6 结论与建议

1) 通过优化漏塌分治井身结构, 开发 KCl-聚胺

强封堵钻井液和 KPD 堵漏浆, 设计异形齿 PDC 钻头, 优选高造斜大功率螺杆和辅助工具, 优化钻井参数、井眼轨迹高效控制工艺, 形成了漏塌高效防治钻井技术和非均质地层钻井提速技术, 大幅减少了漏塌复杂损失, 显著提高了机械钻速, 缩短了钻完井周期。通过开发超低密度水泥浆、弹韧性防窜水泥浆, 配套低承压地层高效顶替、防漏全封固井和分段压裂用尾管悬挂及回接工艺, 形成了致密气藏水平井固井技术, 提高了固井质量, 为分段压裂提供了良好的井筒条件。

2) 东胜气田水平井各井段仍未实现“一趟钻”完成, 建议立足提高单趟钻进尺和机械钻速的双重目标, 持续开展个性化 PDC 钻头设计等提速技术的迭代升级研究。KPD 堵漏浆堵漏作业时间长, 随钻预封堵承压钻井液提高地层的承压能力尚未满足要求, 建议进行基于随钻堵漏循环阀的 KPD 堵漏浆堵漏试验, 攻关高承压封缝及堵漏技术。

3) 建议采用学习曲线法, 结合钻完井成本分析, 集成应用低成本实用技术和高端工程技术, 进一步提升现有技术的提速提效能力, 保障东胜气田致密气藏的经济效益开发。

参 考 文 献

References

- [1] 何发岐, 张宇, 王付斌, 等. 鄂尔多斯盆地中国石化“十三五”油气勘探进展与新领域[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(5): 1-12.
HE Faqi, ZHANG Yu, WANG Fubin, et al. Petroleum exploration progress and new field of Sinopec in Ordos Basin during the 13th Five-Year Plan period[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(5): 1-12.
- [2] 史配铭, 薛让平, 王学枫, 等. 苏里格气田致密气藏水平井优快钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(5): 27-33.
SHI Peiming, XUE Rangping, WANG Xuefeng, et al. Optimized fast drilling technology for horizontal wells in the tight gas reservoirs in Sulige Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(5): 27-33.
- [3] 史配铭, 李晓明, 倪华峰, 等. 苏里格气田水平井井身结构优化及钻井配套技术[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(6): 29-36.
SHI Peiming, LI Xiaoming, NI Huafeng, et al. Casing program optimization and drilling matching technologies for horizontal wells in Sulige Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(6): 29-36.
- [4] 余浩杰, 王振嘉, 李进步, 等. 鄂尔多斯盆地长庆气区复杂致密砂岩气藏开发关键技术进展及攻关方向[J]. 石油学报, 2023, 44(4): 698-712.
YU Haojie, WANG Zhenjia, LI Jinbu, et al. Key technological progress and breakthrough direction for the development of complex tight gas reservoirs in Changqing Gas Field, Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(4): 698-712.

- [5] 史配铭,倪华峰,石崇东,等.苏里格致密气藏超长水平段水平井钻井完井关键技术[J].石油钻探技术,2022,50(1):13-21.
SHI Peiming, NI Huafeng, SHI Chongdong, et al. Key technologies for drilling and completing horizontal wells with ultra-long horizontal sections in the Sulige Tight Gas Reservoirs[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(1): 13-21.
- [6] 侯博,李录科,张珩林,等.低压低渗透气田 $\phi 139.7$ mm 套管开窗侧钻水平井钻井液技术[J].石油钻采工艺,2023,45(5):555-561.
HOU Bo, LI Luke, ZHANG Henglin, et al. Drilling fluid technology for sidetracking horizontal wells with $\phi 139.7$ mm casing windows in low-pressure and low-permeability gas fields[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2023, 45(5): 555-561.
- [7] 李德红,罗宏志,李明忠,等.东胜气田刘家沟组易漏地层随钻防漏技术研究[J].钻探工程,2022,49(5):111-117.
LI Dehong, LUO Hongzhi, LI Mingzhong, et al. Technology of prevention leak while drilling for leaky formation in Liujiagou Formation in Dongsheng Gas Field[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(5): 111-117.
- [8] 白传中,刘刚,徐同台,等.裂缝性泥页岩地层防塌误区及强封堵防塌对策[J].钻井液与完井液,2021,38(3):337-340.
BAI Chuansong, LIU Gang, XU Tongtai, et al. Misunderstanding of fractured shale collapse prevention and plugging method for preventing borehole collapse[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2021, 38(3): 337-340.
- [9] 薛让平,李录科,杨光.三维水平井难度系数的界定与应用[J].钻采工艺,2019,42(1):96-98.
XUE Rangping, LI Luke, YANG Guang. Classification of difficulty degrees of 3D horizontal wells and application[J]. Drilling & Production Technology, 2019, 42(1): 96-98.
- [10] 邱正松,徐加放,吕开河,等.“多元协同”稳定井壁新理论[J].石油学报,2007,28(2):117-119.
QIU Zhengsong, XU Jiafang, LYU Kaihe, et al. A multivariate cooperation principle for well-bore stabilization[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(2): 117-119.
- [11] 于雷,张敬辉,李公让,等.低活度强抑制封堵钻井液研究与应用[J].石油钻探技术,2018,46(1):44-48.
YU Lei, ZHANG Jinghui, LI Gongrang, et al. Research and application of plugging drilling fluid with low-activity and high inhibition properties[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(1): 44-48.
- [12] 张磊,谢涛,张羽臣,等.钻井过程中井筒裂缝动态扩展规律研究[J].非常规油气,2021,8(2):114-119.
ZHANG Lei, XIE Tao, ZHANG Yuchen, et al. Research on dynamic propagation law of wellbore fractures in drilling process[J]. Unconventional Oil & Gas, 2021, 8(2): 114-119.
- [13] 吴天乾,李明忠,蒋新立,等.杭锦旗地区裂缝性漏失钻井堵漏技术研究与应用[J].钻探工程,2020,47(2):49-53.
WU Tianqian, LI Mingzhong, JIANG Xinli, et al. Research and application of plugging technology for fracture type leakage in the Hangjinqi area[J]. Drilling Engineering, 2020, 47(2): 49-53.
- [14] 王海斌,牛庄洼陷页岩油大尺寸井眼优快钻井技术[J].石油机械,2023,51(7):43-50.
WANG Haibin. Optimal and fast drilling technology for large-size shale oil wells in Niuzhuang Subsag[J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51(7): 43-50.
- [15] 赵兰.基于三维地质建模的定录导一体化技术在J58井区中的应用[J].录井工程,2017,28(3):36-41.
ZHAO Lan. Integration technology of orientation, mud logging and geosteering based on 3D geological modeling in Wellblock J58[J]. Mud Logging Engineering, 2017, 28(3): 36-41.
- [16] 吴天乾,李明忠,李德红,等.固井前地层漏失压力动态测试方法[J].石油钻采工艺,2019,41(3):283-287.
WU Tianqian, LI Mingzhong, LI Dehong, et al. A dynamic test method for the formation leakage pressure before cementing[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019, 41(3): 283-287.
- [17] 吴天乾,李明忠,李建新,等.杭锦旗地区正注反挤固井技术研究[J].钻采工艺,2021,44(3):104-107.
WU Tianqian, LI Mingzhong, LI Jianxin, et al. Study on cementing technology of forward injection and reverse extrusion in Hangjinqi area[J]. Drilling & Production Technology, 2021, 44(3): 104-107.
- [18] 吴天乾,李明忠,蒋新立,等.鄂尔多斯杭锦旗区块低漏失压力井固井工艺技术[J].复杂油气藏,2018,11(4):69-73.
WU Tianqian, LI Mingzhong, JIANG Xinli, et al. Cementing technology for low leakage pressure wells in Hangjinqi area, Ordos Basin[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2018, 11(4): 69-73.
- [19] 李明忠.鄂尔多斯盆地杭锦旗地区水平井尾管固井工艺技术[J].断块油气田,2018,25(5):661-664.
LI Mingzhong. Liner cementing technology of horizontal well in Hangjinqi area, Ordos Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2018, 25(5): 661-664.

[编辑 令文学]