

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2023073

引用格式: 张金平, 倪华锋, 史配铭. 鄂尔多斯盆地东部气田盐下高含硫储层安全高效钻井技术 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(3): 22-29.

ZHANG Jinping, NI Huafeng, SHI Peiming. Safe and efficient drilling in presalt high-sulfur reservoirs in the eastern gas fields of Ordos Basin [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(3): 22-29.

鄂尔多斯盆地东部气田盐下高含硫储层 安全高效钻井技术

张金平, 倪华锋, 史配铭

(中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆钻井总公司, 陕西西安 710018)

摘 要: 鄂尔多斯盆地东部气田盐下高含硫储层主要为奥陶系马家沟组, 其碳酸盐岩-膏盐岩互层发育, 存在破碎屑岩层、大段膏盐层及压力异常地层, 钻井过程中易出现井壁垮塌、井眼缩径、含 H_2S 高压天然气侵、井漏及卡钻等井下故障及复杂情况, 导致机械钻速低、安全高效钻进难度较大。为此, 开展了“储层专打”井身结构设计, 集成高抗 H_2S 井控装备、防喷工具及工具的标准配套, 研究应用了“高效 PDC 钻头+大扭矩单弯螺杆+MWD+随钻震击器”的储层复合钻井防斜防卡打快技术, 探索性应用了精细控压钻井技术, 优选复配出具有强“抗盐、抗钙、抗泥”能力的高密度饱和盐水钻井液, 形成了鄂尔多斯盆地东部气田盐下高含硫井储层安全高效钻井技术。鄂尔多斯盆地东部气田的 5 口井应用了该技术, 平均钻井周期 54.3 d, 平均机械钻速 8.35 m/h, 其中三开储层段平均钻井周期 11.67 d, 较前期完钻的 MT1 井缩短了 52.03%, 储层段平均机械钻速 6.85 m/h, 较 MT1 井提高了 69.97%, 平均井径扩大率 6.16%, 电测一次成功率 100%, 未发生井下故障和复杂情况。该技术为鄂尔多斯盆地东部气田盐下高含硫气藏安全高效勘探开发提供了技术支撑。

关键词: 高含硫; 碳酸盐岩; 膏盐层; 饱和盐水钻井液; 安全钻井; 机械钻速; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE242

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2023)03-0022-08

Safe and Efficient Drilling in Presalt High-Sulfur Reservoirs in the Eastern Gas Fields of Ordos Basin

ZHANG Jinping, NI Huafeng, SHI Peiming

(Changqing Drilling Company, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, Xi'an, Shaanxi, 710018, China)

Abstract: The main presalt high-sulfur reservoirs are located in the Ordovician Majiagou Formation, eastern gas field of the Ordos Basin, interbedded and developed with carbonate zone and gypsum zone. In addition, broken clastic rock, large interval of gypsum, and formations with abnormal pressure are observed. Further, wellbore collapse, tight hole, high-pressure natural gas containing H_2S invasion, lost circulation, stuck drilling, and other downhole failures and complex situations are easily encountered while drilling, leading to a low rate of penetration (ROP) and difficulties in safe and efficient drilling. Therefore, the casing program optimization design of “special drilling for particular reservoir” was carried out, which integrated high H_2S well control equipment, blowout prevention equipment, and equipment standards. Combination drilling, anti-deviation and fast drilling technologies, i.e. “high-efficiency polycrystalline diamond compact (PDC)bit + high-torque single-curved screw + measurement while drilling(MWD) + drilling jar” were studied and applied. A pilot test used precisely managed pressure control drilling technology was carried out. The high-density saturated brine drilling fluid system with strong anti-salt, anti-calcium, and anti-mud was optimized and compounded, forming the technology for safe and efficient drilling of presalt high-sulfur reservoirs in eastern gas fields of Ordos Basin. The technology was applied in five wells, with an average drilling duration of 54.3 d

收稿日期: 2022-12-08; 改回日期: 2023-05-08。

作者简介: 张金平 (1970—), 男, 甘肃静宁人, 1992 年毕业于长庆石油学校石油工程专业, 2002 年毕业于西安石油学院钻井技术专业, 工程师, 现从事定向井、水平井钻井完井技术与相关管理工作。E-mail: zjssczip@cnpc.com.cn。

基金项目: 中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆钻井总公司重点科技计划项目“长庆区域 12 1/4"及以上大井眼钻井提速技术研究”(编号: CQ2022B-Z-10-3) 资助。

and an average ROP of 8.35 m/h. Specifically, there was an average drilling duration of 11.67 d in the third section, 52.03% shorter than that of the early drilled well, MT1, an average ROP of 6.85 m/h for the reservoir interval, 69.69% higher than that of MT1, and an average hole enlargement ratio of 6.16%. The electrical logging had a success rate of 100% for a first run. There is no downhole failure or complex situation. It provides a technical support for safe and efficient exploration and development of presalt high-sulfur gas reservoirs in the eastern gas fields of Ordos Basin.

Key words: high-sulfur; carbonate rock; gypsum salt layer; saturated brine drilling fluid; safety drilling; penetration rate; Ordos Basin

鄂尔多斯盆地东部气田位于伊陕斜坡东部近南北向的次级隆起带,受海水振荡及中央古隆起的阻隔影响,沉积为腐泥型有机质类型的古隆起奥陶系海相盐下碳酸盐烃源岩气藏^[1-5]。随着对该气田地地质构造认识的不断深入和工程技术水平的不断提升,2021年,MT1井试气获得 $35.2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 高产工业气流,奥陶系海相盐下碳酸盐岩复杂气层勘探开发获得新突破。但是,该井在钻进奥陶系碳酸盐岩储层过程中溢流、井漏、缩径、井塌、卡钻等井下故障和复杂情况频繁发生,导致机械钻速低,钻井周期长达 81.17 d,其中处理井下溢流耗时 4.71 d,如何实现奥陶系盐下高含硫碳酸盐岩储层安全高效钻进成为当前亟需解决的难题。为此,开展了“储层专打”井身结构设计、优良高抗硫井控装备及工具的标准配套、“高效 PDC 钻头+大扭矩单弯螺杆+MWD+随钻震击器”储层段复合钻井防斜防卡打快技术、精细控压钻井技术及饱和盐水钻井液等技术攻关及集成配套,形成了鄂尔多斯盆地东部气田盐下高含硫储层安全高效钻井技术,并在该气田的 5 口井进行了应用,提速效果显著,平均钻井周期大幅缩短,为奥陶系盐下深层碳酸盐岩裂缝性油气资源的高效勘探开发提供了技术支撑。

1 储层岩性特点及钻井技术难点

鄂尔多斯盆地东部气田主要储层为下古生界奥陶系马家沟组碳酸盐岩地层,自上而下分为马六段、马五₁₋₅亚段、马五₆₋₁₀亚段、马四₁亚段、马四₂亚段、马四₃亚段、马三段、马二段、马一段和寒武系三山组,其中马五₁₊₂亚段为风化壳储层,马五₄亚段、马五₅亚段、马五₆亚段、马五₇亚段、马四段和马三段为白云岩储层,岩性致密,具有高压低渗特点,属高含硫气藏,埋深 2 500~3 300 m,其中马六段、马四段和马二段为局限台地沉积,发育厚层碳酸盐岩;马五段、马三段和马一段为蒸发台地沉积,膏岩、盐岩与薄层白云岩、泥质碳酸盐岩互层发育,厚度大,分布面积广;马五₅亚段、马四段为含

H₂S 高压气层;三山组、张夏组为深灰色泥质云岩、云质灰岩。该气田奥陶系盐下高含硫碳酸盐岩储层钻井作业主要存在以下技术难点:

1)奥陶系马家沟组储层存在古风化壳碎屑岩层、大段膏盐层和泥质碳酸盐岩互层,其中马一段、马三段和马五₆亚段等含厚度 80~140 m 的盐岩段,钻井期间缩径、井塌、卡钻、井漏等井下故障和复杂情况频繁发生,且处理难度大,处理周期长。

2)奥陶系马五₅亚段、马四段储层为晶间孔、微裂缝发育,埋藏深度 2 800~3 000 m,地层压力系数达到 1.58~1.64,地层压力达到 40.05~42.39 MPa,钻井过程中易出现气侵、溢流等井下复杂情况,井控风险高。

3)奥陶系马家沟组碳酸盐岩储层属于被视为“禁区”的高含硫气藏^[6-12],H₂S 含量达到 32 633.60~50 130.50 mg/m³,腐蚀性强,对井控设备、钻具等装备的材质、机械性能等的要求更高,且易对人员造成人身伤害,安全钻井难度大。

4)上部奥陶系马四段储层存在异常高压气层,下部寒武系、长城系地层压力低,钻进地层界面时易发生井漏,导致溢漏同存,钻井井控风险高,处置难度大。

5)马家沟组碳酸盐岩储层灰质含量高,岩性致密,可钻性级值 6.5~7.5,钻进过程中 PDC 钻头易磨损,单只钻头进尺少,机械钻速低于 4.0 m/h,无法满足安全快速钻进的需求。

6)钻遇大段膏盐层及含 H₂S、CO、CO₂ 等酸性气体高压储层,极易造成高密度钻井液发生钙侵、盐侵和泥侵,导致钻井液被污染,造成钻井液性能无法满足安全钻井的需要,钻井液维护处理难度大^[13-15]。

2 安全高效钻井技术

为满足鄂尔多斯盆地东部气田盐下高含硫碳酸盐岩储层安全高效钻井需求,从井身结构设计、高抗硫井控装备与工具标准配套、储层复合钻井防斜

防卡打快技术、精细控压钻井技术、高密度饱和盐水钻井液等方面进行了技术攻关,形成了该盆地东部气田盐下高含硫储层安全钻井技术。

2.1 井身结构设计

对地层三压剖面预测结果(见表1)及MT1井完井资料进行综合分析,结合该区域地层特性及钻井技术难点,进行井身结构设计。由表1及MT1井的实钻情况可知:

1)根据地层孔隙压力梯度,将地层分为2套压力系统,第1套为第四系至石炭系本溪组,地层孔隙压力梯度0.50~1.00 MPa/100 m,仅石盒子组、本溪组等个别地层的孔隙压力梯度达1.25 MPa/100 m;第2套为奥陶系马家沟组,地层孔隙压力梯度相差较大,达到0.75~1.60 MPa/100 m,较第1套地层压力梯度高0.25~0.60 MPa/100 m。

2)从破裂压力梯度来看,第四系至石炭系本溪组地层破裂压力梯度为1.60~2.20 MPa/100m,地层承压能力较高,但刘家沟组地层破裂压力梯度为1.35~1.45 MPa/100m,地层承压能力较低,易发生破裂而引起井漏;奥陶系马家沟组地层破裂压力梯度为1.30~1.90 MPa/100m,较第四系至石炭系本溪组

地层破裂压力梯度低。

3)分析地层坍塌压力发现,马四₁₋₂亚段存在盐膏层,坍塌压力梯度1.08 MPa/100 m,采用低密度钻井液钻进时井壁易失稳垮塌,其余地层的坍塌压力梯度较低,地层稳定性相对较好。

4)塌漏矛盾突出,储层井控风险高。该气田已钻井MT1井实钻情况显示,刘家沟组地层承压能力低,钻井液密度大于1.20 kg/L时,易发生失返性漏失;二叠系石千峰组、石盒子组、山西组及石炭系本溪组泥岩、煤层等地层,钻井液密度低于1.20 kg/L时易失稳垮塌;奥陶系马家沟组碳酸盐岩储层存在异常高压、大段膏岩层,井控及井下安全风险高。

根据该气田地层三压力剖面,考虑邻井钻井过程中出现的井下故障及复杂情况,认为可以将三叠系延长组至石炭系本溪组设计在同一开次钻进,对于承压能力低的刘家沟组可采取承压堵漏措施,提高地层承压能力;由于奥陶系马家沟组存在异常高压、大段膏岩层,溢流、井涌和井塌的风险高,只能提高钻井液密度实现安全钻进,需下入一层套管封隔马家沟组顶部及以上地层。由此可知,2个必封点分别为地表第四系欠压实地层和三叠系延长组至

表1 鄂尔多斯盆地东部气田地层三压力剖面预测结果

Table 1 Prediction results of formation three-pressure profiles in the eastern gas fields of Ordos Basin

	地层	井深/m	地层孔隙压力梯度/ (MPa·(100 m ⁻¹))	地层破裂压力梯度/ (MPa·(100 m ⁻¹))	地层坍塌压力梯度/ (MPa·(100 m ⁻¹))
三叠系	延长组—和尚沟组	1340	0.50~0.75	2.10~2.20	0.60~0.75
	刘家沟组	1620	0.50~0.75	1.35~1.45	0.50~0.75
二叠系	石千峰组	1905	0.50~1.00	1.75~2.15	0.65~0.90
	石盒子组	2220	0.50~1.25	1.60~2.05	0.75~0.80
	山西组	2340	0.50~0.85	1.60~2.05	0.65~0.75
	太原组	2385	0.50~0.90	1.60~2.15	0.75~0.80
石炭系	本溪组	2445	0.50~1.35	1.60~2.05	0.75~0.90
奥陶系	马五 ₁₋₅ 亚段	2540	0.75~1.50	1.50~1.75	0.85~0.90
	马五 ₆₋₁₀ 亚段	2735	0.75~1.35	1.50~2.00	0.85~0.90
	马四 ₁ 亚段	2780	0.90~1.25	1.50~1.60	0.85~1.05
	马四 ₂ 亚段	2835	0.90~1.25	1.50~1.60	0.85~1.05
	马四 ₃ 亚段	2885	0.90~1.25	1.40~1.90	0.75~0.85
	马三段	3085	0.50~1.35	1.55~1.85	0.75~0.85
	马二段	3175	0.50~0.90	1.30~1.75	0.75~0.85
	马一段	3240	0.50~1.35	1.50~1.75	0.75~0.85
寒武系	张夏组	3290	0.50~1.30	1.60~1.85	0.75~0.85

奥陶系马家沟组顶部。因此,设计采用“储层专打”的三开井身结构:一开,采用 $\phi 444.5\text{ mm}$ 钻头钻至井深 500 m, $\phi 339.7\text{ mm}$ 表层套管下至井深 500 m,封固第四系欠压实地层;二开,采用 $\phi 311.1\text{ mm}$ 钻头钻至井深 2 795 m,钻穿石炭系本溪组,进入奥陶系马家沟组 30 m, $\phi 244.5\text{ mm}$ 套管下至井深 2 790 m,封固三叠系刘家沟组、二叠系和石炭系;三开,采用 $\phi 215.9\text{ mm}$ 钻头钻进马家沟组盐下高含硫碳酸盐岩储层段,进入寒武系张夏组 50 m 完钻,下入 $\phi 177.8\text{ mm}$ 套管固井(见图 1)。

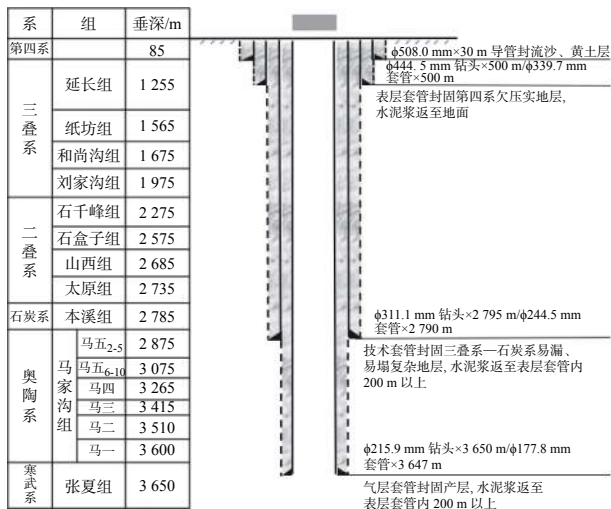


图 1 鄂尔多斯盆地东部气田井身结构设计结果

Fig.1 Design result of casing program in the eastern gas fields of Ordos Basin

2.2 高抗硫井控装备与工具的标准配套

东部气田奥陶系马家沟组盐下碳酸盐岩储层产出气中硫化氢含量高,马五段、马四段地层压力系数高达 1.64,钻井过程中井控风险高。为此,开展了高标准井控装备的集成配套,形成了适合该气田盐下高含硫井井控装备与工具的标准配套,确保了高含硫井井控安全。

1)高抗硫防喷器组。选用高抗硫 EE 级材质的防喷器组合,自上而下分别为 35 MPa 旋转防喷器(FX35-17.5/35 MPa)+70 MPa 环形防喷器(FH35-70)+70 MPa 剪切闸板防喷器(FZJ35-70)+70 MPa 双闸板防喷器(2FZ35-70)+70 MPa 四通(FS35-70)+105 MPa 芯轴式标准双级套管头,防喷器组中所有与井内流体等介质接触的区域均采用镍基合金堆焊,以提高其防腐能力。

2)节流压井管汇组。选用 EE-1.5 级高抗硫材质、压力等级 70 MPa 的节流管汇(2YJG-70)和压井

管汇(YG-70),节流阀的内腔、阀座、阀盖和垫环槽,各阀门、管件的垫环槽部位中与流体接触处均采用镍基合金堆焊,应用 SS316 不锈钢钢圈;采用专用硬质抗硫材质、与标准法兰连接的防喷管线,主通径 $\geq 103.0\text{ mm}$,节流管汇、压井管汇与四通平直连接,防喷管线平直接至距井场 100 m 的放喷池,主防喷管线采用电子自动点火装置;液气分离器罐内径 1 200 mm,容积 6 m³,最大处理量 8 000 m³/d,额定工作压力 1.6 MPa,进液管线内径 103.0 mm,排液管线内径应大于进液管线内径,排气管线内径不小于 203.3 mm。

3)辅助防喷工具。配备高抗硫钻具内防喷工具、防硫钻具等专属防硫装备及工具,包括钻具止回阀、顶驱上下旋塞阀、钻杆回压阀抢装工具、防喷钻杆;配备与钻杆尺寸相符的液压“死卡”及绳索各 1 套、钻台“一键关井”应急操作台、SS105 级防硫钻具。

4)安全应急装备。除了正压式呼吸器、空呼吸气机、便携式检测仪等常规防护设施外,增配了鼻夹式逃生呼吸器,H₂S、CO、CH₄、O₂“四合一”便携式气体检测仪,CO₂及 SO₂复合式气体检测仪,最大量程为 1 500 mg/m³(1 000 ppm)的 H₂S 检测仪,12 通道固定式气体检测仪,并在井场四角安装硫化氢监测仪等有毒有害气体监测防护设施;增设 2 个容量 24 m³的立式重晶石罐,6 个容量 50 m³的加重浆储备罐,共储备密度 1.80 kg/L 的加重浆 300 m³,全力保障高含硫盐下井控安全。

2.3 储层段复合钻井防斜防卡打快技术

为提高碳酸盐岩储层机械钻速,并实现井眼轨迹的高效控制,通过优选高效 PDC 钻头及大扭矩单弯螺杆、应用 MWD 无线随钻测斜仪和优化钻具组合,形成了“高效 PDC 钻头+大扭矩单弯螺杆+MWD+随钻震击器”的储层段复合钻井防斜防卡打快技术。

1)高效 PDC 钻头优选。奥陶系马家沟组储层的岩溶角砾岩、云质泥岩、泥质膏质云岩、深灰色灰岩、膏盐岩及硬石膏互层发育,非均质性强,灰质含量高,抗研磨性强;寒武系巨厚深灰色泥质云岩、云质灰岩具有岩石强度高,硬度大等地质特性,优选了冠部形状为单圆弧抛物线的五刀翼(2 主+3 辅)PDC 钻头,匹配进口异形切削齿(如图 2 所示),将传统的“剪切”破岩方式变为“剪切+挤压”复合破岩方式,减少剪切不均质地层时因憋钻而造成的钻头崩齿损坏;采用双排加密、高攻击角度布齿设

计,优化前后排切削齿出刃高度差,前排布置25颗 $\phi 16\text{ mm}$ 的主切削齿,肩部增加3颗异形齿,以增强钻头抗冲击性及研磨性,提高钻头的破岩效率。

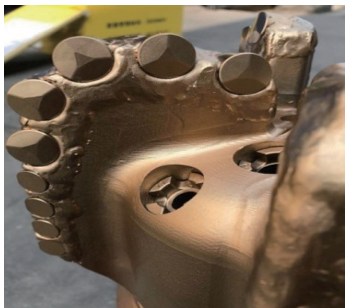


图2 异形切削齿高效PDC钻头

Fig.2 High-efficiency PDC drilling bit with irregular-shaped cutting tooth

2)大扭矩单弯螺杆优选。针对PDC钻头在“高转速+高钻压”条件下切削齿接触研磨性强的碳酸盐岩地层瞬间产生过大冲击载荷,易造成切削齿崩齿损坏的问题,可选择“低转速+大扭矩+高钻压”的钻井参数,并优选低转速大扭矩螺杆,通过降低螺杆转速、增大螺杆扭矩、逐步提高钻压的方式,提高PDC钻头钻进硬地层的切削效率,并达到有效保护PDC钻头的目的^[16-17]。为此,优选了5级7:8头低转速大扭矩螺杆(7LZ172 $\times$ 7.0-5型),其转速84~168 r/min,最大允许排量38 L/s,最大扭矩能够达到12 165 N $\cdot$ m,最大功率180 kW,可满足低转速、大扭矩、高钻压条件下高效破岩的要求。

3)预弯曲动力学防斜纠斜防卡钻具组合优化。为实现碳酸盐岩储层井眼轨迹的高效控制,达到防卡、提速的目的,选用由单弯螺杆、MWD无线随钻测斜仪和随钻震击器组成的预弯曲动力学防斜纠斜防卡钻具组合,实现井眼轨迹的实时监测和导向控制^[18-20]。钻具组合为 $\phi 215.9\text{ mm}$ PDC钻头+7LZ172 $\times$ 1.25°弯螺杆($\phi 110.0\text{ mm}$ 稳定器)+ $\phi 212.0\text{ mm}$ 稳定器+461 $\times$ 460回压阀+ $\phi 165.1\text{ mm}$ 钻铤 $\times 9$ 根+461 $\times$ 410转换接头+ $\phi 165.1\text{ mm}$ 随钻震击器+ $\phi 127.0\text{ mm}$ 加重钻杆 $\times 15$ 根+ $\phi 127.0\text{ mm}$ 钻杆。主要钻井参数:钻压60~100 kN,转速50~60 r/min,排量32~34 L/s,泵压15~19 MPa。

2.4 精细控压钻井技术

该气田奥陶系马家沟组盐下碳酸盐岩储层钻进过程中易发生气侵、井涌和井漏,溢漏转换密度窗口窄,井控风险高,处置难度大等问题,首次探索性应用了精细控压钻井技术。该技术通过控制井口回压,实现井筒压力微过平衡^[21-22],钻进时控制井口回压不

超过3.0 MPa,接单根、带压起钻时,控制井口回压不超过5.0 MPa。若井口回压 $< 5.0\text{ MPa}$,采用节流管汇循环排气、点火;若井口回压 $\geq 5.0\text{ MPa}$ 且有明显持续升高趋势,立即关闭防喷器,转换为节流管汇循环排气、点火或者提高钻井液密度。控压钻进过程中,当井口回压逐渐升至5.0 MPa时,按照循环周以0.01 kg/L的幅度逐步提高钻井液密度,以降低井口回压,保证井口安全;若发生溢流,立即关井,求取关井立压,据此控制井口套压不超过5.0 MPa,采用精细控压自动节流控制系统节流循环除气点火,调整钻井液密度循环压井,当井口套压接近5.0 MPa时,转换节流管汇循环压井;采用“控压起钻+重浆帽”的起钻方式,裸眼井段起钻时控制井口压力不超过3.0 MPa,钻头进入技术套管后,泵入重浆帽,保持储层上部钻井液液柱压力比地层孔隙压力高3.0 MPa,封住储层裸眼井段,再正常起钻。起钻过程需连续灌浆,下钻过程采用原井浆循环替出井内重浆,并逐步实时调整控压值。现场实践表明,精细控压钻井技术可有效减少因地层压力敏感引起的气侵、井涌、井漏等井下复杂情况,实现高含硫盐下储层的安全钻进。

2.5 高密度饱和盐水钻井液技术

奥陶系马家沟组盐下高含硫碳酸盐岩储层存在大段膏盐层,为防止膏岩、盐岩水化溶解分散造成井壁失稳垮塌,压稳高压气层,确保井下及井控安全,应用了具有极强“抗盐、抗钙、抗泥”污染能力的高密度饱和盐水钻井液,其基浆配方为:清水+0.20%~0.30%烧碱+2.00%~3.00%抗盐土+0.50%BLA-MV+0.05%K-PAM+5.00%树脂+4.00%沥青+3.00%封堵剂+0.10%~0.20%黄原胶+25.00%NaCl+8.00%~10.00%KCl+重晶石+1.00%~2.00%除硫剂。为防止钻遇高压气层时出现气侵,依据地层孔隙压力系数,三开钻进前,将钻井液密度调整为1.35 kg/L,钻开储层后利用精细控压钻井技术逐步提高钻井液密度,以平衡地层压力,确保井控安全;钻井液中加入8.00%~10.00%KCl+25.00%NaCl,控制钻井液中 Cl^- 质量浓度为170~190 g/L,以降低滤液水活度,防止盐岩水化溶解。同时保持钻井液中 K^+ 质量浓度较高,以增强钻井液抑制性,抑制泥页岩与钻屑的水化分散,确保盐膏层、泥岩夹层井段井壁的稳定^[23-25]。钻井液主要性能:密度1.35~1.80 kg/L,漏斗黏度50~70 s,动切力8~15 Pa,塑性黏度小于55 mPa $\cdot$ s,初切力1~4 Pa,终切力3~6 Pa,API滤失量 $\leq 5.0\text{ mL}$ 。

钻井液主要维护处理措施为:

1) 钻井液中加入 1.0%~2.0% 除硫剂, 保持其 pH 值 ≥ 10 ; 钻进高压地层和高气测井段时, 将除硫剂加量提高至 2.0%, 使钻井液 pH 值达到 11, 提高钻井液抗酸性气体污染的能力。

2) 钻进含膏地层时, 将钻井液中的纯碱加量提高至 0.3%~0.5%, 控制钻井液矿化度 ≤ 400 mg/L, 严防钻井液钙侵污染。

3) 三开钻进中加入 4.0%~6.0% 的 GT-MF、单封类随钻堵漏剂, 逐步提高地层承压能力。

4) 采用清水配置胶液, 通过胶液罐均匀混入钻井液, 胶液补充速率小于 $2.5\text{ m}^3/\text{h}$, 以保持钻井液流变性和脱气性能的稳定。

5) 钻进过程中, 保持钻井液中树脂类处理剂加量大于 5.0%、沥青类处理剂加量大于 4.0%、超细碳酸钙加量大于 3.0%, 以控制滤失量, 形成优质滤饼,

提高护壁能力。

3 现场应用效果

2022 年, 鄂尔多斯东部气田盐下高含硫储层安全高效钻井技术在佳县、榆阳区块 5 口井进行了现场应用, 钻机月速度 $1\,456\text{ m}/\text{台月}$, 平均钻井周期 54.3 d , 平均机械钻速 $8.35\text{ m}/\text{h}$, 与同区域未应用该技术的邻井 MT1 井相比(见 表 2), 钻井周期缩短了 33.1%, 钻机月速度提高了 35.28%, 机械钻速提高了 67.67%, 提速效果显著, 且三开钻进碳酸盐岩储层段过程中未发生井塌、井漏、卡钻等井下故障或复杂情况, 首次实现了长庆油田高含硫气藏安全高效钻井, 为奥陶系盐下深层碳酸盐岩裂缝性油气资源的高效勘探开发提供了技术支撑。

表 2 2022 年完成的 5 口井与前期同区域邻井 MT1 井的主要钻井指标对比
Table 2 Comparison of key indicators of five wells completed in 2022 with early adjacent well MT1 in the same area

年份	完井 数量/口	平均 井深/m	储层井段 平均长度/m	储层井段三开 钻井周期/d	储层井段机械 钻速/($\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$)	平均井径 扩大率, %	钻井 周期/d	钻机月速/ ($\text{m}\cdot\text{台}^{-1}\cdot\text{月}^{-1}$)	机械钻速/ ($\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$)
2022	5	3 230	590	11.67	6.85	6.16	54.30	1 456.00	8.35
2021	1	3 190	805	24.33	4.03	11.70	81.17	1 076.32	4.98

由 表 2 及实钻结果可以看出:

1) 5 口井三开储层井段平均钻井周期 11.67 d , 较 MT1 井缩短了 52.03%; 平均机械钻速 $6.85\text{ m}/\text{h}$, 较 MT1 井提高了 69.97%; 平均井径扩大率 6.16%, 直井最大井斜角 2.8° , 井底位移 5.80 m , 井身质量达标, 机械钻速显著提高。

2) 精细控压钻井技术能够有效发现气侵和井漏, 且处置高效, 有效降低了复杂时效, 实现井控安全。其中, YY1 井第一时间发现气侵 3 次与井漏 1 次, 最高控压 3.5 MPa , 控压钻井期间, 成功点火 30 次; M172 井第一时间发现气侵 1 次, 最高控压

3.2 MPa , 控压钻井期间, 成功点火 15 次, 实现了钻进、起下钻、后效处置作业全程精细控压, 确保了钻井作业安全。

3) 5 口井钻进过程中, 高密度饱和盐水钻井液的性能均能保持稳定, 且抑制防塌性能、流变性和脱气性良好, 携岩效果好, 未发生井壁失稳垮塌等井下复杂情况。其中, MT6 井三开 $2\,529\sim 2\,950\text{ m}$ 井段钻遇膏岩层占比 19.0%, 盐岩占比 9.7%, 钻井周期 2.58 d , 机械钻速高达 $8.42\text{ m}/\text{h}$, 平均井径扩大率 3.37%, 电测、起下钻、下套管和固井施工作业均顺利完成。该井三开井段钻井液主要性能见 表 3。

表 3 MT6 井三开井段钻井液主要性能
Table 3 Main performance of drilling fluid in the third section of Well MT6

井深/m	密度/($\text{kg}\cdot\text{L}^{-1}$)	漏斗黏度/s	滤失量/mL	塑性黏度/($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	动切力/Pa	静切力/Pa	$c(\text{Cl}^-)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	pH值
2 550	1.40	51	4.8	40	9.0	1.5/3.0	177 500	10.0
2 650	1.54	53	4.2	42	10.5	2.0/3.0	184 600	10.5
2 750	1.60	65	4.0	45	12.0	3.0/5.0	191 700	10.0
2 850	1.73	67	3.8	47	14.0	3.0/5.0	188 100	10.5
2 950	1.80	72	4.0	54	16.0	4.0/6.0	195 200	11.0

4 结论与建议

1) 针对鄂尔多斯盆地东部气田盐下高含硫储层钻井中存在的机械钻速低、溢流、井漏、缩径、井塌、卡钻等井下故障和复杂情况频繁发生的技术难点, 通过技术攻关与技术集成, 形成了以井身结构设计、高抗硫井控装备与工具的标准配套、精细控压钻井技术、高密度饱和盐水钻井液等关键技术为核心的盐下高含硫储层安全高效钻井技术, 并在该气田5口井进行了成功应用, 机械钻速大幅提高, 且有效保证了井下安全。

2) 精细控压钻井技术能实现井筒压力平衡重建, 解决了储层安全密度窗口窄、溢流、井漏等井下复杂情况, 实现了盐下高含硫储层的安全钻进。

3) 现场应用效果表明, 高密度饱和盐水钻井液具有良好的“抗盐、抗钙、抗泥”污染性能和良好的润滑防卡性能, 解决了碳酸盐岩储层钻井过程中的井塌、溢流和卡钻等技术难点, 满足了膏盐岩地层安全钻井的需要。

4) 为进一步提高盐下高含硫储层钻井速度, 建议开展“高效PDC钻头+恒扭矩工具+大扭矩单弯螺杆+MWD+随钻震击器”钻具组合的优化, 以提高单只钻头进尺, 实现碳酸盐岩储层一趟钻完钻。

参 考 文 献

References

- [1] 王国亭, 程立华, 孟德伟, 等. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系古岩溶型碳酸盐岩致密储层特征、形成机理与天然气富集潜力[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(4): 685-695.
WANG Guoting, CHENG Lihua, MENG Dewei, et al. Characterization and formation of the Ordovician tight paleokarst carbonates in the eastern Ordos Basin and its gas accumulation[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(4): 685-695.
- [2] 罗清清, 刘波, 姜伟民, 等. 鄂尔多斯盆地中部奥陶系马家沟组五段白云岩储层成岩作用及孔隙演化[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(1): 102-115.
LUO Qingqing, LIU Bo, JIANG Weimin, et al. Diagenesis and pore evolution of dolomite reservoir in the 5th member of the Ordovician Majiagou Formation, central Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(1): 102-115.
- [3] 任海蛟, 吴伟涛, 赵靖舟, 等. 鄂尔多斯盆地中部奥陶系马四段天然气成藏主控因素[J]. 特种油气藏, 2021, 28(2): 27-33.
REN Haijiao, WU Weitao, ZHAO Jingzhou, et al. Key controlling factors of natural gas accumulation in the Ordovician Ma member 4 in the central Ordos Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(2): 27-33.
- [4] 何江川, 余浩杰, 何光怀, 等. 鄂尔多斯盆地长庆气区天然气开发前景[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 23-33.
HE Jiangchuan, YU Haojie, HE Guanghui, et al. Natural gas development prospect in Changqing gas province of the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 23-33.
- [5] 徐延勇, 申建, 张兵, 等. 鄂尔多斯盆地中东部上古生界致密气成藏条件差异性分析[J]. 断块油气田, 2022, 29(5): 577-583.
XU Yanyong, SHEN Jian, ZHANG Bing, et al. Analysis on differences of tight gas accumulation conditions of Upper Paleozoic in central and eastern Ordos Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2022, 29(5): 577-583.
- [6] 蒲洪江, 兰凯, 刘明国, 等. 元坝101-1H酸性气藏超深水平井优快钻井技术[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(2): 12-15.
PU Hongjiang, LAN Kai, LIU Mingguo, et al. Fast drilling technology for ultra-deep horizontal Well 101-1H in Yuanba acidic gas reservoir[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(2): 12-15.
- [7] 贾佳, 夏忠跃, 冯雷, 等. 鄂尔多斯盆地神府区块小井眼优快钻井关键技术[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(2): 64-70.
JIA Jia, XIA Zhongyue, FENG Lei, et al. Key technology of optimized and fast slim hole drilling in Shenfu Block, Ordos Basin[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(2): 64-70.
- [8] 邓昌松, 张宗潭, 冯少波, 等. 高含硫、大漏、超深水平井钻完井技术: 以塔里木油田中古10HC井为例[J]. 石油钻采工艺, 2018, 40(1): 27-32.
DENG Changsong, ZHANG Zongtan, FENG Shaobo, et al. Drilling and completion technologies suitable for ultradeep horizontal wells of high sulfur content and serious circulation loss: A case study on Well 10HC of Middle Paleozoic in Tarim Oilfield[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(1): 27-32.
- [9] 乐宏, 范宇, 李玉飞. 高温高压含硫气井完整性关键技术: 以安岳特大型气田为例[J]. 天然气工业, 2022, 42(3): 81-90.
YUE Hong, FAN Yu, LI Yufei. Integrity key technologies for high temperature and high pressure sour gas wells: A case study of the supergiant Anyue Gas Field[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(3): 81-90.
- [10] 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.
- [11] 刘锋, 张晓飞, 胡维首, 等. 鄂尔多斯下古碳酸盐岩气井缝囊修井液稳气控水技术[J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(3): 400-404.
LIU Feng, ZHANG Xiaofei, HU Weishou, et al. Fuzzy-ball workover fluid based gas stabilization and water control technology for the gas wells in the Lower Paleozoic carbonate reservoirs of the Ordos Basin[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43(3): 400-404.
- [12] 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.

- [13] 张顺元, 柳丙善, 姜治, 等. 伊朗阿扎德干复杂碳酸盐岩油气藏钻井提速技术 [J]. 天然气工业, 2016, 36(8): 107–115.
ZHANG Shunyuan, LIU Bingshan, JIANG Zhi, et al. ROP improvement technologies for complicated carbonate oil and gas reservoirs in the Azadegan Oilfield, Iran[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(8): 107–115.
- [14] 宋武强, 张彦瑞, 李瑾, 等. J45 断块盐下水平井钻井关键技术 [J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(4): 402–407.
SONG Wuqiang, ZHANG Yanrui, LI Jin, et al. Key technologies for drilling horizontal wells in the subsalt layer of Fault Block J45[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(4): 402–407.
- [15] 张锦虹, 宋玥, 刘书勤, 等. Power-V 在克深 102 井膏盐岩层中的应用 [J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(6): 13–17.
ZHANG Jinhong, SONG Yue, LIU Shuqin, et al. Application of Power-V in gypsum-salt rock[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(6): 13–17.
- [16] 刘湘华, 刘彪, 杜欢, 等. 顺北油气田断裂带超深水平井优快钻井技术 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(4): 11–17.
LIU Xianghua, LIU Biao, DU Huan, et al. Optimal and fast drilling technologies for ultra-deep horizontal wells in the fault zones of the Shunbei Oil & Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(4): 11–17.
- [17] 白彬珍, 曾义金, 葛洪魁. 顺北 56X 特深水平井钻井关键技术 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(6): 49–55.
BAI Binzhen, ZENG Yijin, GE Hongkui. Key technologies for the drilling of ultra-deep horizontal Well Shunbei 56X[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(6): 49–55.
- [18] 邓柯, 刘殿琛, 李宸晓. 预弯曲动力学井斜控制技术在长宁构造气态钻井中的应用 [J]. 钻采工艺, 2020, 43(2): 38–40.
DENG Ke, LIU Dianchen, LI Chengxiao. Application of pre-bending dynamic well inclination control technology in gas drilling in Changning Structure[J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(2): 38–40.
- [19] 刘科柔, 张辉, 王新锐, 等. 双稳定器预弯曲钻具组合防斜特性动力学评价方法 [J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(3): 281–288.
LIU Kerou, ZHANG Hui, WANG Xinrui, et al. Dynamic evaluation method of anti-deflection characteristics of double-stabilizer pre-bending BHA[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43(3): 281–288.
- [20] 狄勤丰, 朱卫平, 姚建林, 等. 预弯曲动力学防斜打快钻具组合动力学模型 [J]. 石油学报, 2007, 28(6): 118–121.
DI Qinfeng, ZHU Weiping, YAO Jianlin, et al. Dynamic model of bottom hole assembly used in pre-bending dynamic vertical and fast drilling technology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(6): 118–121.
- [21] 赵德, 赵维青, 卢先刚, 等. 西非 S 深水区块裂缝性碳酸盐岩地层控压钻井技术 [J]. 石油钻采工艺, 2022, 44(1): 20–25.
ZHAO De, ZHAO Weiqing, LU Xiangang, et al. Managed pressure drilling technology for fractured carbonate formation in deep water Block S, West Africa[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(1): 20–25.
- [22] 童传新, 张海荣, 徐璧华, 等. 深水井精细控压套管研究 [J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2021, 43(4): 175–182.
TONG Chuanxin, ZHANG Hairong, XU Bihua, et al. A study of precisely managed pressure during casing running in deep water wells[J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition), 2021, 43(4): 175–182.
- [23] 祝学飞, 孙俊, 舒义勇, 等. ZQ2 井盐膏层高密度欠饱和盐水聚磺钻井液技术 [J]. 钻井液与完井液, 2019, 36(6): 716–720.
ZHU Xuefei, SUN Jun, SHU Yiyong, et al. A high density undersaturated saltwater drilling fluid for salt and gypsum drilling in Well ZQ2[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2019, 36(6): 716–720.
- [24] 舒义勇, 孙俊, 祝学飞, 等. 中秋区块 ZQ2 井盐膏层水基钻井液技术 [J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(6): 703–707.
SHU Yiyong, SUN Jun, ZHU Xuefei, et al. Water based drilling fluid technology developed for the salt-gypsum bed in Well ZQ2 of the Zhongqiu Block[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019, 41(6): 703–707.
- [25] 赵宏波, 杨松, 陈国飞, 等. 分级堵漏技术在鄂尔多斯盆地东部的应用 [J]. 钻井液与完井液, 2021, 38(5): 583–592.
ZHAO Hongbo, YANG Song, CHEN Guofei, et al. Study and application of mud loss control technique with graded LCMS in the east of Ordos Basin[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2021, 38(5): 583–592.

[编辑 陈会年]