

引文: 余朝毅. 四川盆地超深层钻完井技术进展及其对万米特深井的启示[J]. 天然气工业, 2024, 44(1): 40-48.

SHE Chaoyi. Progress in ultra-deep drilling and completion technology in the Sichuan Basin and its implications for extra-deep wells of more than ten thousand meters in depth[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(1): 40-48.

四川盆地超深层钻完井技术进展及其对万米特深井的启示

余朝毅

中国石油西南油气田公司

摘要: 四川盆地超深层海相碳酸盐岩油气资源丰富, 是寻找特大型油气田、开拓油气增储上产新领域的重要方向, 但超深层钻完井面临地层条件更加复杂、井筒环境更加极端等工程技术挑战。为进一步指导万米特深井的安全高效钻探, 通过梳理超深层钻完井技术难点, 系统总结了四川盆地超深层钻完井关键技术, 并提出了下步钻完井技术的发展建议。研究结果表明: ①形成的超深复杂地层三压力预测监测技术精确预测了复杂地层压力系统及地应力场分布, 准确刻画断层、裂缝、溶洞等展布规律, 结合非常用井身结构拓展技术, 提高了井身结构设计应对复杂地层钻探的能力; ②形成的钻一测一固一完全过程精细控压技术, 解决了超深井、特殊复杂井钻井液安全密度窗口窄导致“溢漏共存”、固井质量低等难题; ③研发的高效钻头与大扭矩螺杆、扭力冲击器等抗高温提速工具, 解决了深部难钻地层钻井钻头易磨损、破岩效率低的工程难题; ④研发的抗高温钻井液体系提升应对高温深井的钻井液技术保障能力, 升级第二代韧性水泥, 解决了工作液抗高温能力不足等难题, 保障超深井建井质量。结论认为, 超深层钻完井技术的发展与进步, 使得深井钻深能力突破 9 000 m 已经成为现实, 形成的关键技术有力地支撑了四川盆地超深层油气资源的高效勘探开发, 对于万米特深层科学钻探和油气增储上产新领域拓展具有重要技术支撑作用。

关键词: 四川盆地; 超深层; 钻完井技术; 技术进展; 万米特深井; 难题与挑战; 发展建议

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2024.01.004

Progress in ultra-deep drilling and completion technology in the Sichuan Basin and its implications for extra-deep wells of more than ten thousand meters in depth

SHE Chaoyi

(PetroChina Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu, Sichuan 610051, China)

Natural Gas Industry, Vol.44, No.1, p.40-48, 1/25/2024. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: The ultra-deep marine carbonate rocks in the Sichuan Basin are rich in oil and gas resources, which is an important direction for searching for super large oil and gas fields and exploring new fields for oil and gas reserves and production increase. However, drilling and completion of ultra-deep wells face engineering and technical challenges such as more complex stratigraphic conditions and more extreme wellbore environments. In order to provide a guidance for the safe and efficient drilling of extra-deep wells of ten thousand meters deep, this paper sorts out the technical difficulties in ultra-deep drilling and completion, systematically summarizes the key technologies in the ultra-deep drilling and completion in the Sichuan Basin, and proposes the development of drilling and completion technologies in the next step. And the following research results are obtained. First, the three-pressure prediction and monitoring technology for ultra-deep complex strata can accurately predict the distribution of pressure system and in-situ stress field in complex strata, and accurately describe the distribution laws of faults, fractures and vugs. And combined with the unconventional well structure prolongation technology, it can improve its ability of casing program design to deal with the drilling in complex strata. Second, the fine pressure control technology for the whole process of drilling, logging and cementing can solve "overflow and leakage coexistence", poor cementing quality and other problems caused by narrow safety density window of drilling fluid in ultra-deep wells and special complex wells. Third, the high-temperature ROP improvement tools such as efficient bit, large-torque screw and torsional impactor can address the engineering difficulties in drilling deep hard-to-drill strata, e.g. bit wear and low rock breaking efficiency. Fourth, the high-temperature drilling fluid system can enhance the ability to guarantee drilling fluid technologies in high-temperature deep wells. The upgraded second generation of tenacious cement improve the high temperature resistance of working fluid, ensuring the construction quality of ultra-deep wells. In conclusion, the development and advancement of ultra-deep drilling and completion technology has made the drilling depth of over 9 000 m come true. Those key technologies provide a powerful support for the efficient exploration and development of ultra-deep oil and gas resources in the Sichuan Basin and play an important role in supporting the scientific drilling in extra-deep strata of ten thousand meters in depth and the discovery of new fields for oil and gas reserves and production increase.

Keywords: Sichuan Basin; Ultra-deep strata; Drilling and completion technology; Technological progress; Extra-deep well of ten thousand meters in depth; Difficulties and challenges; Development suggestions

基金项目: 中国石油关键核心技术攻关项目“万米超深层油气资源钻完井关键技术与装备研究”(编号: 2022ZG06)。

作者简介: 余朝毅, 1971年生, 正高级工程师; 长期从事常规和非常规油气开发研究及技术管理工作。地址: (610051) 四川省成都市成华区府青路一段1号。ORCID: 0009-0002-7891-5051。E-mail: shecy@petrochina.com.cn

0 引言

中国深层超深层油气资源丰富、开发潜力巨大，其资源量达 671 亿吨油当量，占油气资源总量的 34%^[1-2]，已成为国内油气勘探开发的重大战略接替领域。近年来，中国超深特深井钻井数量持续增长、井深逐年增加，已成世界深井钻井第一大国。9 000 m 级超深井的钻探能力支撑超深层油气勘探实现了新突破，展示了超深层油气勘探巨大潜力。塔里木盆地 LT1 井，完钻井深 8 882 m，钻揭埋深 8 200 m 仍有液态烃；四川盆地 PS6 井，完钻井深 9 026 m，创国内最深直井纪录，油气勘探开发不断向深层超深层推进。

四川盆地是典型的叠合盆地，经历了多期构造运动，深层超深层发育大面积烃源岩、规模储集体和区域盖层，油气成藏条件有利。近年来新发现的优质油气田主要分布在超深层，如磨溪—高石梯、双鱼石、大兴场等气田^[3-5]。为寻找超深层油气富集区带和有利钻探目标，中国石油西南油气田公司（以下简称西南油气田）部署实施了一系列深井超深井钻探工程。1976 年，在四川广安完钻的女基井成为国内首口 6 000 m 级超深井（井深 6 011 m）。1977 年，在四川绵阳实施的关基井是国内首口超过 7 000 m 的超深井（完钻井深 7 175 m）。2012 年，在四川盆地西北部（以下简称川西北）双鱼石构造实施的 ST1 井取得发现，成为当时国内投产压力最高的一口气井，该井钻探井深超过 7 000 m，为该区块后续栖霞组气藏勘探开发奠定了基础。2011—2012 年，在四川盆地中部（以下简称川中）安岳气田实施的 GS1 井、MX8 井分别在震旦系、寒武系获气超 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 工业气流，拉开了川中古隆起安岳气田效益开发的序幕。四川盆地勘探开发领域不断向深层超深层拓展，“十三五”期间，完钻 6 000 m 以上超深井 207 口，平均井深 6 475 m，平均钻井周期 219.6 d，平均机械钻速 4.28 m/h；完成试油 665 口井，平均单井测试产量 $32.41 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。2018 年，在达州实施的五探 1 井，井深首超 8 000 m，完钻井深达到 8 060 m。2022 年在广元剑阁实施的 SY001-H6 井，井深首超 9 000 m（完钻井深 9 010 m），创当时国内陆上最深水平井纪录。2023 年，在蓬莱气区完钻国内最深直井纪录（PS6 井，完钻井深 9 026 m）。

超深层是四川盆地勘探开发重点，也是工程技术面临挑战最大、井下事故复杂最多、难题最集中的领域。四川盆地纵向上产层多达 31 层，部分高含硫，

风险探井普遍存在地层不确定性、多压力系统、超窄密度窗口等特点，上部过渡层系压力系统不明确，小断层、微裂缝、褶皱挠曲等识别精度不高，导致故障复杂处理时效长。近三年风险探井平均复杂时效 8.8%，其中井漏占 43% ~ 79.8%。深部难钻地层须家河组、吴家坪组、沧浪铺组、金宝石组等地层钻井效率低、钻井周期长，制约了四川盆地深井超深井提速提效。

1 四川盆地超深层钻完井关键技术进展

四川盆地是新中国天然气工业的摇篮，虽历经 70 余年的勘探开发，仍屡有重大发现，油气勘探仍处于早中期，潜力巨大。自“十二五”以来，西南油气田持续开展关键技术攻关、优化与集成实践，超深层油气钻完井技术快速发展，完钻 8 口 8 000 m 以上超深井，2 口 9 000 m 以上特深井，8 000 m 级超深井钻井技术体系逐步成熟，钻深能力迈上 9 000 m 台阶，形成了超深井钻完井核心技术系列，打造了深层超深层油气勘探开发的“利剑”，为万米深地油气勘探工程实施奠定了基础。

1.1 超深复杂地层钻井压力预测监测及风险预警技术

四川盆地深层超深层压力系统复杂，必封点、风险点多，裸眼段长，地质预测难度大。针对超深层油气藏压力信息存在不确定性强、工程风险预知性差的难题，创新井震结合高精度地震速度处理方法，以多方法交互式单井孔隙压力分析为基础，在单井层速度约束的基础上，结合地震速度及测井声波对地震数据进行时深标定，实现地层压力的高精度计算，揭示了超深层异常压力系统成压机理及三维展布规律，形成基于地震—测井—随钻岩屑等多源数据融合的超深复杂地层三压力预测监测技术，精确预测复杂地层压力系统及地应力场分布，预测精度 85% 以上；准确刻画断层、裂缝、溶洞等展布规律，井壁失稳、井漏、溢流等复杂预测符合率达到 80% 以上，为深井井身结构优化设计提供基础。

四川盆地西南部（以下简称川西南）大兴场深层区块地质不确定性强、纵向上压力系统复杂、风险度高。为此，基于地震—测井—随钻岩屑等多源数据，建立了区块三维地质工程一体化模型，精细刻画断层/裂缝展布（图 1），开展三维地应力、地层三压力、裂缝及岩石抗钻特性预测等方面研究，预测和描述了必封点和风险点，为风险探井工程方案设计和优化奠定了基础，完钻 11 口风险探井均顺利钻达地质目标。

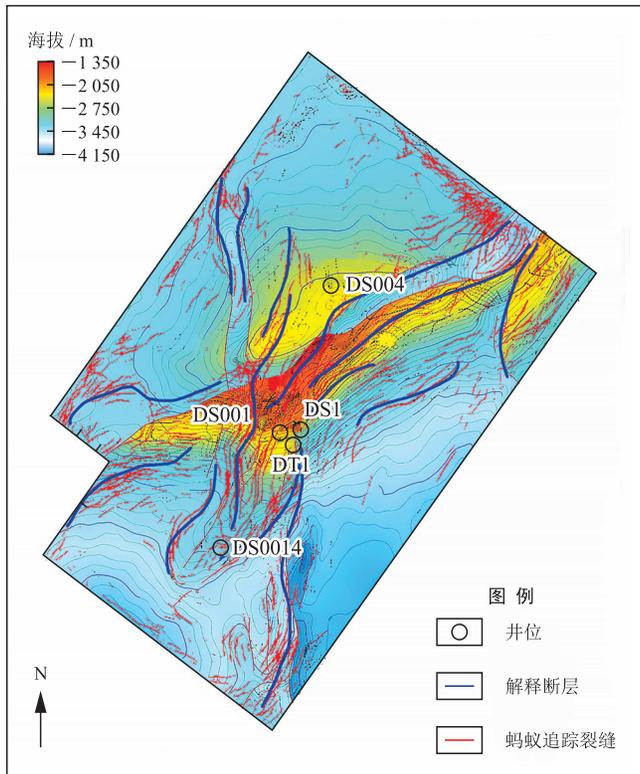


图 1 大兴场构造须家河组断层 / 裂缝展布图

1.2 非常用井身结构拓展技术

针对深层超深层复杂多压力系统，必封点多，现有井身结构完井尺寸小、层次不够用等难题，通过优化钻头与套管尺寸系列、合理匹配套管与井眼环空间隙，应用非标套管、膨胀管、随钻扩眼等技术，提高了井身结构设计应对复杂地层钻探的能力，逐步形成了适合川西北、川中古隆起北斜坡、川东等复杂深井的多套井身结构优化方案^[6-7]，最多实现 8 层井身结构，助力打成了一批高难度井。

针对盐膏层及窄间隙井眼起下钻频繁阻卡、下套管难度大等难题，研制了耐温 200 °C，适用于 $\varnothing 215.9$ mm、 $\varnothing 241.3$ mm 等尺寸井眼的随钻扩眼工具，形成了随钻扩眼作业施工工艺，成功实施多口风险探井随钻扩眼试验，最大井径扩大率 13%，为复杂地层的顺利钻进及膨胀管封堵技术的实施奠定了基础。针对深层超深层高温高压、高地应力等复杂工况，膨胀管井身结构拓展存在的管体强度不足、易变形的难题，攻克 N80 等高钢级膨胀管技术，最高胀后屈服强度超过 750 MPa、抗拉强度超过 800 MPa，膨胀压力介于 36 ~ 39 MPa^[8]。 $\varnothing 299$ mm 大尺寸膨胀管在西南油气田 Z203H5-8 井低压漏失层成功实施裸眼封堵作业，封堵井段长度 828.14 m，刷新我国最大应用管径施工纪录。成功解决了该井历时 4 个

月反复堵漏未取得成功的难题，膨胀管作业后内径达 286 mm，在不改变原井身结构的情况下，保障了该井后续的安全高效钻进。

通过对地层压力和风险的精准识别、深化承压能力认识，坚持承压堵漏经验做法，HX1 井井身结构拓展首次突破 8 层。HX1 井设计井深 8 031 m，实钻过程中，地层与设计存在较大差异^[9]。侏罗系较设计加厚 304 m 且钻遇设计外发育于须家河组—飞仙关组断层，实钻 3 套二叠系长兴组—吴家坪组—茅口组地层重复，与设计三叠系—寒武系地层重复不符。为此，优化设计五开技术套管下深至 5 740 m（相比原设计深下 990 m），制订吴家坪组铝土质泥岩与碳质页岩层段“分段承压 + 油基钻井液 + 偏心钻头”的技术方案，成功钻穿下部井段倒转复杂带地层，成为国内最先实现八开八完井身结构的井（图 2），取得重大工程突破。

1.3 精细控压钻测固完一体化技术

针对超深井、特殊复杂井钻井液安全密度窗口窄导致“溢漏共存”，固井作业面临漏失复杂多、顶替效率差、固井质量低等难题，在前期精细控压钻井技术研究的基础上，研发形成具有国际先进水平的钻—测—固—完全过程精细控压技术。包括钻前精细控压适应性评价方法、钻进阶段地层安全密度窗口监测技术、起下钻阶段液柱压力动态控制工艺、电测阶段钻柱传输测井动态压力控制工艺、固井阶段控压固井井底压力动态监控技术以及完井阶段的完井管柱起下压力动态控制技术等 16 项技术^[10-11]。装备耐压 35 MPa、控制精度 ± 0.2 MPa、溢漏监测精度 ± 0.1 m³、井口最高控压能力 12.5 MPa，技术指标优于国际同类技术，对提升四川盆地复杂地质条件下钻完井安全高效作业成效显著。

针对蓬莱气区部分地层存在异常高压，长段裸眼地层易发生溢漏同存复杂，油层悬挂套管提前中完的井在筇竹寺组、麦地坪组与灯影组高低压互存，常规钻井方式难以安全钻进的问题，2022 年在 PS11 等 14 口井开展精细控压钻测固完一体化技术现场应用 32 井次，可按需有效控制井下环空当量循环密度（ECD），平均钻井液漏失量较常规钻井降低 92.72%，平均复杂时间较常规钻井降低 86.88%。一举扭转了蓬莱气区复杂深井超深井常规钻井“钻不成、固不好、产量低、成本高”的被动局面。

1.4 钻井提速配套技术

1.4.1 高效钻头与大扭矩螺杆

针对深部难钻地层岩石强度高、研磨性强、可

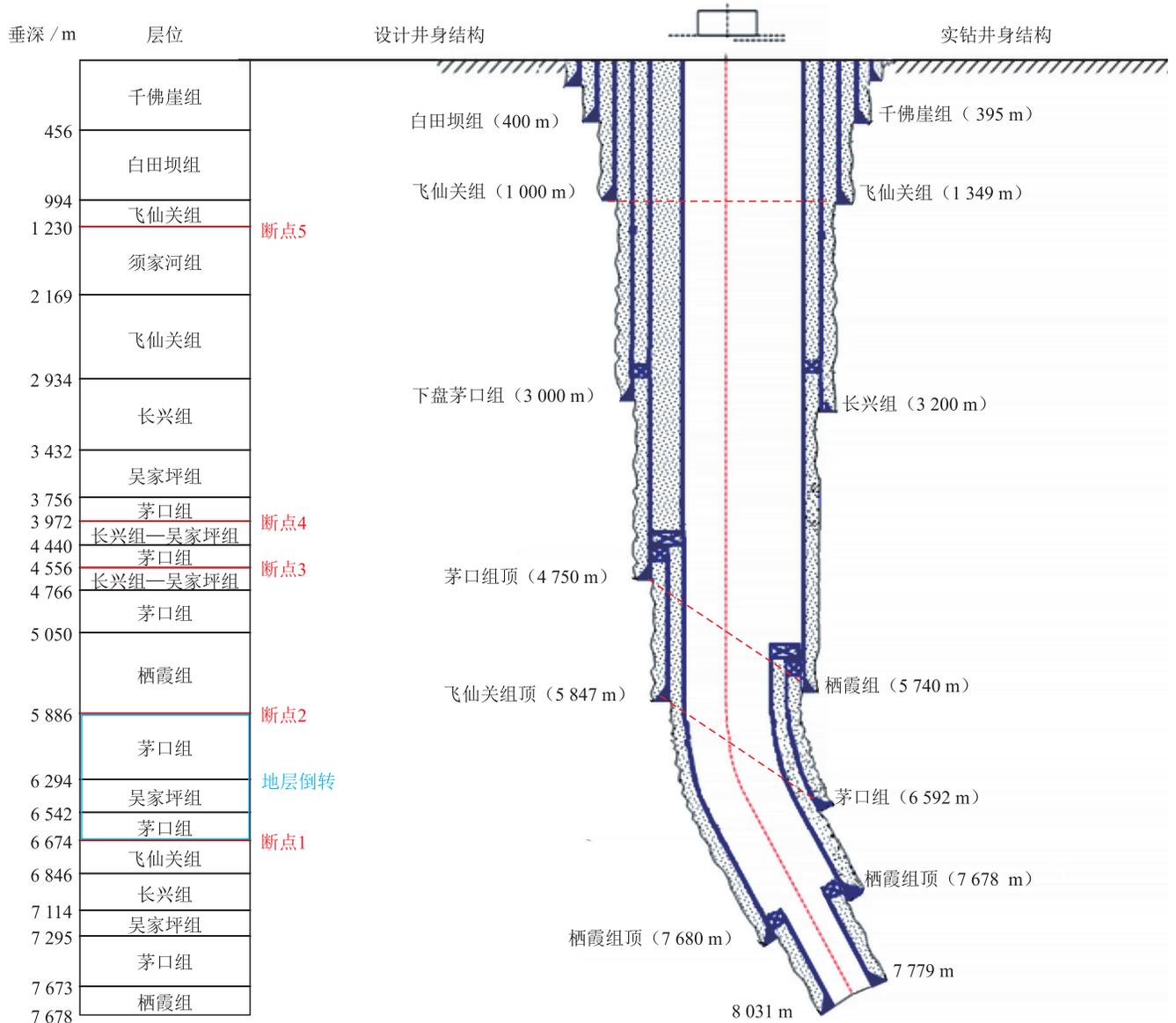


图 2 HX1 井八开井身结构示意图

钻性差，钻头易磨损、破岩效率低的难题，优选多种非平面齿 PDC 钻头、PDC/ 牙轮复合钻头、PDC/ 孕镶齿复合钻头等系列钻头，实现了四川盆地须家河组砂砾岩，沧浪铺组、金宝石组等强研磨性硬地层钻井大幅提速。突破耐温 200 °C 高温橡胶弹性体配方，自主研发形成长寿命、大扭矩、耐高温螺杆系列，最高耐温超过 175 °C，使用寿命 200 h 以上，累计现场应用超过 100 井次，最大应用井深超过 8 000 m，有效减少起下钻次数，提高钻井效率。

针对蓬莱气区须家河组地层厚度大、趟钻次数多（3 ~ 7 趟钻）、机械钻速慢的难题，将原 6 刀翼钻头优化为 7 刀翼，通过刀翼数的增加提高布齿密度，平衡心部齿载荷，在钻遇强研磨性、高冲击性地层

时钻头失稳的情况下有效降低钻头心部齿载荷，提高钻头寿命，同时配套大扭矩螺杆，在 PS17 井等开展现场试验，首次实现射洪—盐亭区块 1 趟钻钻穿须家河组，创区域内须家河组趟钻次数最少、单趟钻进尺最长、钻井时间最短 3 项纪录（图 3）。

针对雷口坡组、嘉陵江组地层大套膏岩揉皱带地层倾角大（12°~40°）、常规钻进易斜、吊打机速慢的难题，优选“高效 PDC 钻头+垂直钻井工具+大扭矩螺杆”防斜打快钻具组合，在蓬莱气区开展试验应用 15 井次，井斜角均控制在 0.5° 以内，平均机械钻速 8.02 m/h，同比常规钻井提高 85.05%。

1.4.2 适用于高密度钻井液的抗高温提速工具

针对超深井下部地层钻进速度慢、周期长的难

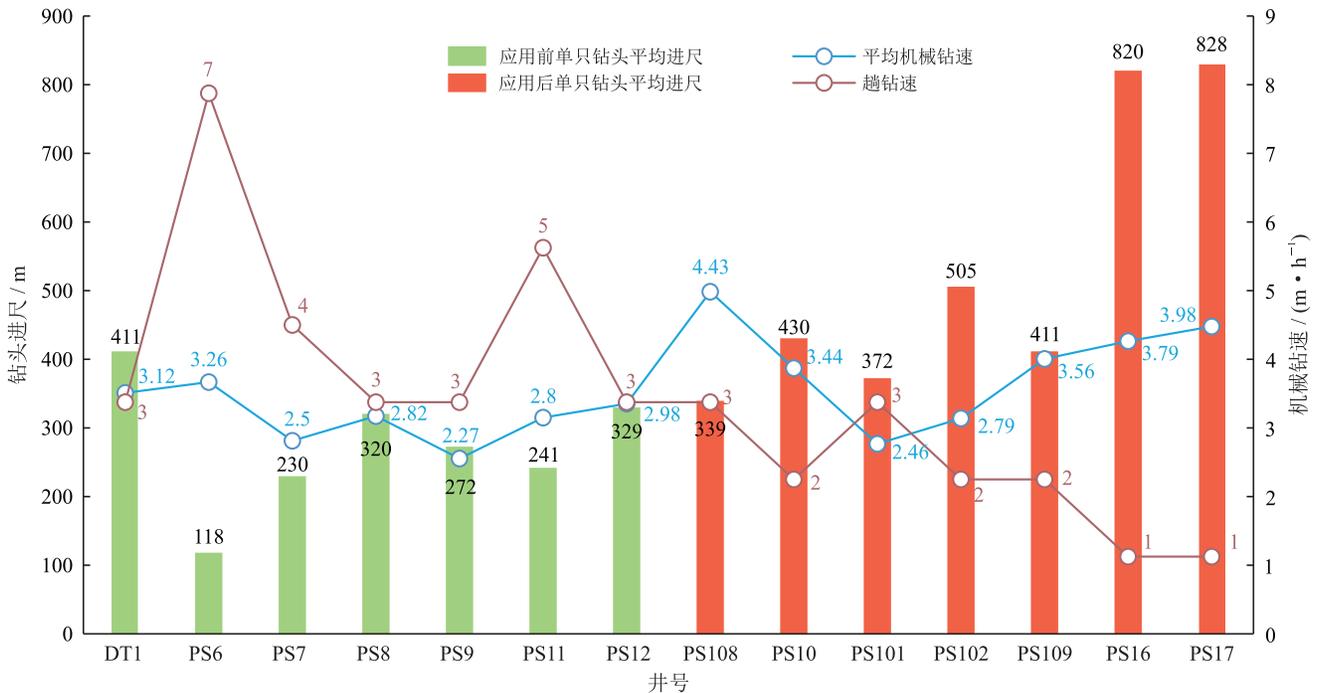


图 3 蓬莱气区须家河组钻头使用情况统计图

题, 形成适应高密度钻井液的扭力冲击器, 助力提高深部难钻地层机械钻速。优选机械动密封材料, 增大工具环空间隙, 解决工具抗高温能力不足、流道压降高、对钻井液颗粒敏感性差等技术难题, 工具适应钻井液密度大于等于 2.0 g/cm^3 , 耐温 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在 GS125 井茅口组一高台组成功应用 (井深 $4\ 095 \sim 4\ 389 \text{ m}$), 单趟进尺 294 m , 与邻井同地层相比, 平均机械钻速提高 21.2% , 创同类型工具最高密度钻井液应用纪录。

针对超深井钻柱振动剧烈、下部井段水力能量传递效率低、井底破岩能量不足等难题, “变害为利”, 将钻柱有害振动机械能转化为钻头破岩水力能量, 研制了井底钻柱减振增能工具。利用钻柱上下振动压缩钻井液使之增压, 可产生 100 MPa 以上的超高压射流, 在减小钻柱振动保护钻头的同时, 提高了井底射流压力, 实现井下增能破岩。解决井下振动强度大、井底水力能量不足的问题, 为深井钻井安全与井下增能破岩提供了新手段。

1.5 抗高温钻井液体系与防漏堵漏技术

1.5.1 抗高温钻井液体系

围绕抗超高温井筒工作液面临的科学问题, 探明超高温井筒工作液关键材料耐温抗盐作用机理, 通过聚合物分子结构设计优化、构效关系和聚合工艺研究、无机功能材料创新, 研制系列井筒工作液关键新材料 (流型调节剂、降滤失剂、高温保护剂、

封堵剂、储层保护剂等 5 种钻井液处理剂), 突破了抗高温降滤失、润滑、水活性调节等关键材料制约, 形成的水基钻井液耐温 $220 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上, 抗盐超过 15% , 应用密度最高 2.40 g/cm^3 。针对油基钻井液超高温乳剂效率低、稳定性不足的难题, 突破超高温油基钻井液处理剂作用机理, 研发超高温钻井液降滤失剂等关键助剂, 形成抗高温油基钻井液体系^[12-13], 在四川盆地高温复杂深井应用 20 余井次, 其中 DS1 井应用温度超过 $200 \text{ }^\circ\text{C}$, 提升了应对高温深井的钻井液技术保障能力。

1.5.2 防漏堵漏技术

四川盆地裂缝性、破碎性地层均存在不同程度漏失, 如 ST1 井钻进至栖霞组时钻井液 (密度 $1.87 \sim 1.96 \text{ g/cm}^3$) 发生漏失 11 次, 共漏失钻井液 $1\ 407.6 \text{ m}^3$ ^[14]。针对长裸眼段堵漏效果差的难题, 开展漏失机理研究, 在堵漏材料和配方评价基础上, 优选出了粗、中、细不同粒径的堵漏材料, 研制了 11 种中细粒径低浓度、粗粒径高浓度的多级配复合堵漏配方, 形成了以粗中细粒径材料逐级搭配, 逐级注入中细粒径低浓度和粗粒径高浓度堵漏浆的多级配复合承压堵漏技术, 堵漏后承压能力提升 5 MPa 以上。2022 年, 在 PS7 井和 ZS102 井采用多级配复合承压堵漏技术, 将 $7\ 409 \text{ m}$ 、 $5\ 919 \text{ m}$ 裸眼井段承压能力分别提高 8 MPa 、 5 MPa , 为后续顺利钻进作业创造条件。

1.6 高温高压固井技术

针对深井超深井高温高压环境下固井水泥浆失效、失稳现象严重,存在水泥石强度衰退等难题,研发超高温降失水剂、悬浮稳定剂等新材料,形成抗循环温度 220 °C 高性能水泥浆体系,适用温度范围宽(循环温度 70 ~ 220 °C),稠化时间线性可调,API 失水量小于等于 50 mL,沉降稳定性小于等于 0.03 g/cm³,抗压强度高且无衰退,能满足井底循环温度 220 °C 的深井超深井固井要求,在此基础上形成超深层小间隙长井段固井工艺技术,解决固井工具及工作液抗高温能力不足等难题,保障超深井建井质量。

针对蓬莱气区尾管固井环空平衡压力控制难度大、密封失效风险高的难题,开展气窜机理分析,优化升级精细控压固井工艺,开展遇气自愈合水泥浆体系试验,在 PS4 井等 16 井次推广应用,平均固井质量合格率 77.03%,同比前期试验井提高 14.9% (图 4)。

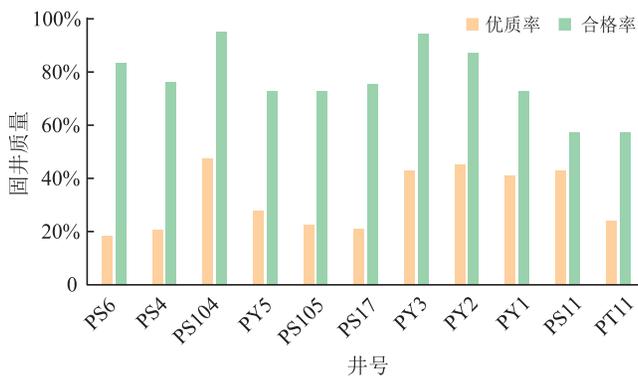


图 4 蓬莱气区高温高压固井技术推广应用统计图

2 万米深井面临的挑战

四川盆地构造复杂,对于万米深井来说,钻完井技术难度更大。主要表现为压力系统复杂,必封点和风险点多,井身结构设计难度大。局部发育断层、裂缝,井漏、井壁失稳风险高。预测万米深井井底最高温度为 224 °C,最高压力为 138 MPa,硫化氢含量最高为 48 g/m³,对井下工具仪器、井筒工作液要求高;超长管柱安全风险大,还可能面临超深小井眼作业、超深小井眼事故复杂处理、井控等一系列工程难题。

2.1 纵向上压力系统复杂,断层裂缝发育,局部井段安全密度窗口窄,井身结构设计难度大

万米科探井纵向依次要钻遇 25 套地层、复杂压力系统和异常地质体,必封点多,裸眼段长。泥盆

系及以下未钻揭井段长 3 000 m 左右,压力预测难度大、精度低,安全风险大。

复杂的工程地质环境导致四川盆地深层超深层海相碳酸盐岩井身结构设计难度高^[15]。易垮塌层、易漏难堵地层、难钻地层、高压气层、高压盐水层、膏盐层等复杂层致必封点多,且变化无规律可循。同一裸眼段可能存在易漏失、易垮塌、异常高压等多个复杂层,若井身结构设计不合理,单个复杂可能同存叠加,如同一裸眼段喷漏同存、井漏与井壁失稳同存等,密度窗口窄,井筒内各段压力与不同层段的地层压力难以稳定平衡,反复发生复杂,增加处理时效,严重时甚至导致井眼工程报废^[16]。

2.2 超高温、超高压对钻完井工具仪器和井筒工作液提出了更高的要求

根据区域邻井资料,预测万米井底温度 224.2 °C,最高地层压力位于麦地坪组(138.47 MPa)。井下工具仪器在超高温超高压双重恶劣工况下,电子电路与密封材料加速老化,且酸性环境和强烈振动会加速失效;井下通讯信号质量随井深增加呈指数级衰减,对现有随钻测控等钻完井工具、仪器提出了更高的挑战,垂直钻井工具、螺杆钻具、固井尾管悬挂器等关键工具耐温压能力亟需迭代升级;高温条件下,钻完井液处理剂发生降解、失效,黏土发生钝化,造成钻完井液流变性及沉降稳定性恶化,性能调控难^[17-18],体系性能失稳,带来小井眼井段摩阻高、井壁失稳风险加剧。

2.3 上部大尺寸井眼长,自流井组、须家河组和 8 000 m 以深地层可钻性差,机械钻速低,钻井周期长

万米深井井身结构设计层次多,上部大尺寸井眼尺寸更大、井深更深,井眼清洁难度大、破岩扭矩大且钻具振动导致的疲劳风险大、机械钻速更慢。双鱼石构造 Ø444.5 mm 钻头在 500 ~ 2 500 m 钻进时,机械钻速仅 3.75 m/h。剑门关组发育含砾细砂岩,自流井组中、底部发育灰白色块状砾岩,偶见燧石砾岩,下部菱铁矿发育,地层非均质性强,钻具振动剧烈,破岩能量利用率低,SY001-X7 井平均机械钻速 1.50 m/h,断钻具事故多发,Ø444.5 mm 及以上大尺寸井眼中断钻具占比 44.2%。此外,万米深井 8 000 ~ 10 000 m 超深层超高温高压条件下岩石力学特征及破碎机理认识不清,地应力高、下部岩石压实程度高、硬度大、研磨性强、可钻性 10 级以上,超深超长井段沿程能耗大、井下动力有效传递困难,钻头单趟进尺短,严重制约钻进效率。

万米深井上部大尺寸井眼环空返速低, 接近岩屑运移临界速度, 携岩效率低, 沉砂卡钻风险大。上部 $\text{Ø}812.8 \text{ mm}$ 井眼环空容积高达 663 L/m , 即使采用 170 L/s 排量 (超四川盆地历史最大排量 70%), 环空返速仅 0.26 m/s ; $\text{Ø}593.73 \text{ mm}$ 井眼环空容积 335 L/m (井眼扩大率考虑 10%), 采用 110 L/s 排量, 环空返速仅 0.35 m/s ; 携砂困难, 井底钻头重复切削, 环空岩屑反复摩擦, 环空岩屑浓度持续上升, 泵压异常, 温度异常, 环空堵塞风险高。

2.4 高温高压固井环空间隙小、封固段长、安全窗口窄, 固井质量难以保障

万米超深层油气藏温度压力高, 同时碳酸盐岩地层裂缝、溶洞发育, 部分地层存在气液置换效应, 固井环空气窜风险高^[19-20]。一方面, 井底高温易导致水泥浆处理剂失效, 流变性、沉降稳定性调控困难、水泥石强度衰退^[21]; 另一方面, 部分超深井封固段长, 顶底温差大, 水泥浆性能难以兼顾。此外, 部分井段存在窄密度窗口, 固井中溢漏同存, 不仅影响固井质量, 且井控风险高^[22]。受套管层序限制, 超深井尾管固井一般环空间隙小, 施工摩阻及泵压高, 顶替效率低。深井超深井小井眼段采用油基钻井液降低井下摩阻后, 固井时井壁上的油膜难以冲洗干净, 钻井液、隔离液和水泥浆呈现出严重的化学不兼容, 影响水泥环胶结质量^[23-24]。

3 发展建议

3.1 突破万米级深井井身结构优化设计与拓展技术

融合地震、测井、随钻岩屑、环空温压场测量等多源数据分析, 研发形成超深复杂地层压力及风险高精度预测技术, 提高超深复杂地层钻井风险预警准确率, 为万米深井井身结构优化设计提供基础。突破 P110 钢级膨胀管和抗强振随钻高效扩眼工具, 为万米深井满足 $\text{Ø}139.7 \text{ mm}$ 及以上尾管完井, 7~8 层及以上井身结构优化与拓展提供关键技术保障。

3.2 加强万米级深井极端工况下岩石、流体、管柱相互作用机理与调控机制基础研究

揭示超深地层高地应力失衡、超高温地层冷却致裂、水活性变化等多重因素耦合叠加井壁失稳机理, 明晰超深地层流体—力学—固体—温度耦合作用下岩石变形和破裂机理, 支撑超高温高压条件下井壁稳定技术取得突破; 攻克超长管柱强非线性运动、

高摩阻, 地面动力难以有效传递井下的难题, 揭示超高温高压超深条件下能量传递与流动保障机理, 明晰超长管柱强非线性运动条件下钻具损伤机理, 创建岩石/水、处理剂/水超高温作用分子结构模型, 揭示超高温高压超长井段条件下降摩阻及地面动力有效传递机理, 支撑万米深井钻井液降摩阻及能量有效传递技术取得突破。

3.3 加强万米级高温高压环境下钻完井装备、工具及工作液攻关

持续加大深地未来产业领域超高温高压钻井工程技术与工具、高温高压井筒工作液等基础前沿技术研究和原创技术攻关, 以新技术新装备培育引领新产业发展。针对超高温高压高应力给装备、井下工具带来的挑战^[25], 全面推动万米深井关键装备、工具与材料等的研发及应用, 不断打造深井工程技术利器, 为万米深井的顺利实施提供支撑和保障。攻克高耐磨复合钻头、抗 $240 \text{ }^\circ\text{C}$ 高温螺杆、多向耦合提速工具等, 为万米超深层钻井提速打造利器; 突破大尺寸、抗强振随钻高效扩眼工具、抗 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 高温垂直钻井工具、抗 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 高温随钻测控系统、 105 MPa 高密封尾管悬挂器、 210 MPa 测试用压力测量工具、耐 175 MPa 超高压井口等多项关键核心技术, 推动超深层工程技术装备迭代升级, 实现万米深井打得成、固得好、采得出。攻克抗超高温高盐井筒工作液关键材料、超高温评价方法等瓶颈技术, 形成自主可控、系列化、国产化处理剂, 建立配套评价方法, 构建抗 $260 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上钻井液及水泥浆体系, 实现高端井筒工作液材料与体系的自主化、国产化, 为万米深井安全高效钻井提供技术支撑。

3.4 大力发展智能钻完井技术, 助力钻完井业务数字化转型、智能化发展

聚焦油气钻完井工程技术未来发展需求, 积极探索人工智能应用场景, 按照整体规划、分步实施、重点突破的原则, 攻关与 AI 技术深度融合的智能钻完井技术。利用大数据、云计算、人工智能等, 打造主导未来的“自动驾驶”钻井系统。突破钻头—井筒—地层环境感知方法, 形成闭环优化调控机制。研制 $15\ 000 \text{ m}$ 智能钻机与压裂装备、智能化井下工具等为代表的智能钻完井软件、装备、工具, 将钻机装备与井下工具联动并协同工作在一个数字化平台, 助推钻完井技术步入智能化新时代, 大幅拓展复杂油气开发规模和效益, 支撑工程技术跨越式发展。

4 结论

四川盆地超深井钻完井关键技术快速发展，成功实施了一批标志性超深井钻完井作业，加速了四川盆地深层超深层海相碳酸盐岩油气资源的勘探开发进程，为万米深地油气科探工程的顺利实施打下了坚实基础。

1) 基于地震—测井—随钻岩屑等多源数据融合的超深复杂地层三压力预测监测技术，精确预测复杂地层压力系统及地应力场分布，准确刻画断层、裂缝、溶洞等展布规律，为深井井身结构优化设计提供基础，结合膨胀管、随钻扩眼等非常用井身结构拓展技术，提高了井身结构设计应对复杂地层钻探的能力。

2) 钻—测—固—完全过程精细控压技术解决超深井、特殊复杂井钻井液安全密度窗口窄导致“溢漏共存”，固井作业面临漏失复杂多、顶替效率差、固井质量低等难题；高效钻头与大扭矩螺杆、扭力冲击器、井底钻柱减振增能工具等抗高温提速工具，解决深部难钻地层岩石强度高、研磨性强、可钻性差，钻头易磨损、破岩效率低的难题；抗高温钻井液体系提升应对高温深井的钻井液技术保障能力，第二代韧性水泥，解决工作液抗高温能力不足等难题，保障超深井建井质量。

3) 万米超深层高温高压和复杂流体环境，给钻机装备、井下工具仪器、井筒工作液等带来巨大挑战。需要进一步深化极端工况下岩石、流体、管柱相互作用机理认识，加快万米深井井身结构优化设计与拓展、抗超高温高压井下工具仪器及工作液、深部地层能量有效传递与高效破岩提速、超高温高压井壁稳定与井筒工作液降摩阻、超高温高压试油完井与储层改造等关键技术攻关，为万米深地科探工程的实施提供技术保障，为支撑万米级深层油气勘探开发取得突破和引领未来深地产业发展提供关键工程技术支撑。

参 考 文 献

- [1] 李阳, 薛兆杰, 程喆, 等. 中国深层油气勘探开发进展与发展方向[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 45-57.
LI Yang, XUE Zhaojie, CHENG Zhe, et al. Progress and development directions of deep oil and gas exploration and development in China[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 45-57.
- [2] 于京都, 郑民, 李建忠, 等. 我国深层天然气资源潜力、勘探前景与有利方向[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(10): 1398-1408.
YU Jingdou, ZHENG Min, LI Jianzhong, et al. Resource potential, explorative prospect and favorable direction for natural gas in deep formation of China[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(10): 1398-1408.
- [3] 杨雨, 文龙, 谢继容, 等. 四川盆地海相碳酸盐岩天然气勘探进展与方向[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 44-55.
YANG Yu, WEN Long, XIE Jirong, et al. Progress and direction of marine carbonate gas exploration in Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 44-55.
- [4] 汪海阁, 黄洪春, 毕文欣, 等. 深井超深井油气钻井技术进展与展望[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 163-177.
WANG Haige, HUANG Hongchun, BI Wenxin, et al. Deep and ultra-deep oil/gas well drilling technologies: Progress and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 163-177.
- [5] 汪海阁, 黄洪春, 纪国栋, 等. 中国石油深井、超深井和水平井钻完井技术进展与挑战[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(3): 1-11.
WANG Haige, HUANG Hongchun, JI Guodong, et al. Progress and challenges of drilling and completion technologies for deep, ultra-deep and horizontal wells of CNPC[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(3): 1-11.
- [6] 苏强, 陈颖杰, 沈欣宇, 等. 川西地区超深井井身结构优化研究与应用——以双鱼石构造为例[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2017, 37(20): 180-181.
SU Qiang, CHEN Yingjie, SHEN Xinyu, et al. Optimization research and application of ultra deep well bore structure in western Sichuan: Taking Shuangyushi structure as an example[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2017, 37(20): 180-181.
- [7] 郑有成, 郭建华. 长裸眼恶性漏失井膨胀管堵漏适用技术[J]. 天然气工业, 2023, 43(8): 98-107.
ZHENG Youcheng, GUO Jianhua. Application of expandable tubular plugging technology in long open hole wells with severe lost circulation[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(8): 98-107.
- [8] 冯定, 王高磊, 侯学文, 等. 膨胀管技术研究现状及发展趋势[J]. 石油机械, 2022, 50(12): 142-148.
FENG Ding, WANG Gaolei, HOU Xuewen, et al. Research situation and development trend of expandable tubular technology[J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50(12): 142-148.
- [9] 邓虎, 贾利春. 四川盆地深井超深井钻井关键技术与展望[J]. 天然气工业, 2022, 42(12): 82-94.
DENG Hu, JIA Lichun. Key technologies for drilling deep and ultra-deep wells in the Sichuan Basin: Current status, challenges and prospects[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(12): 82-94.
- [10] 伍贤柱, 万夫磊, 陈作, 等. 四川盆地深层碳酸盐岩钻完井技术实践与展望[J]. 天然气工业, 2020, 40(2): 97-105.
WU Xianzhu, WAN Fulei, CHEN Zuo, et al. Drilling and completion technologies for deep carbonate rocks in the Sichuan Basin: Practices and prospects[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(2): 97-105.
- [11] 万夫磊, 唐梁, 王贵刚. 川西双鱼石构造复杂深井安全快速钻井技术研究与实践[J]. 钻采工艺, 2017, 40(5): 29-32.

- WAN Fulei, TANG Liang, WANG Guigang. Research and application of deep well drilling technique for Shuangyushi structure in west Sichuan[J]. *Drilling & Production Technology*, 2017, 40(5): 29-32.
- [12] 王中华. 国内钻井液技术进展评述 [J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(3): 95-102.
WANG Zhonghua. Review of progress on drilling fluid technology in China[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(3): 95-102.
- [13] 李宁, 杨海军, 文亮, 等. 库车山前超深井抗高温高密度油基钻井液技术 [J]. *世界石油工业*, 2020, 27(5): 68-73.
LI Ning, YANG Haijun, WEN Liang, et al. High temperature and high density oil-based drilling fluid for ultra-deep wells in Kuqa Piedmont[J]. *World Petroleum Industry*, 2020, 27(5): 68-73.
- [14] 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.
- [15] 韩烈祥. 川渝地区超深井钻完井技术新进展 [J]. *石油钻采工艺*, 2019, 41(5): 555-561.
HAN Liexiang. New progress of drilling and completion technologies for ultra-deep wells in the Sichuan-Chongqing area[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2019, 41(5): 555-561.
- [16] 邹灵战, 毛蕴才, 刘文忠, 等. 盐下复杂压力系统超深井的非常规井身结构设计——以四川盆地五探 1 井为例 [J]. *天然气工业*, 2018, 38(7): 73-79.
ZOU Lingzhan, MAO Yuncai, LIU Wenzhong, et al. Unconventional casing programs for subsalt ultra-deep wells with a complex pressure system: A case study on Well Wutan 1 in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(7): 73-79.
- [17] 罗人文, 龙大清, 王昆, 等. 马深 1 井超深井钻井液技术 [J]. *石油钻采工艺*, 2016, 38(5): 588-593.
LUO Renwen, LONG Daqing, WANG Kun, et al. Drilling fluid for the super-deep Well Mashen-1[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2016, 38(5): 588-593.
- [18] 王星媛, 陆灯云, 吴正良. 抗 220 °C 高密度油基钻井液的研究与应用 [J]. *钻井液与完井液*, 2020, 37(5): 550-554.
WANG Xingyuan, LU Dengyun, WU Zhengliang. Study and application of a high density oil base drilling fluid with high temperature resistance of 220 °C[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2020, 37(5): 550-554.
- [19] 罗翰, 何世明, 罗德明. 川深 1 井超高温高压尾管固井技术 [J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(4): 17-21.
LUO Han, HE Shiming, LUO Deming. Ultra-high temperature and high pressure liner cementing technology in Well Chuanshen 1[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(4): 17-21.
- [20] 张新亮, 祁正玉, 王晓强, 等. 川深 1 井非常规系列尾管悬挂器应用分析 [J]. *石油矿场机械*, 2021, 50(3): 57-61.
ZHANG Xinliang, QI Zhengyu, WANG Xiaoqiang, et al. Application analysis of unconventional liner hanger in Chuanshen 1 Well[J]. *Oil Field Equipment*, 2021, 50(3): 57-61.
- [21] 宋有胜, 邹建龙, 赵宝辉, 等. 高石梯—磨溪区块高压气井尾管固井技术 [J]. *钻井液与完井液*, 2017, 34(2): 111-116.
SONG Yousheng, ZOU Jianlong, ZHAO Baohui, et al. Liner cementing the high pressure gas wells in the Block Gaoshiti-Moxi[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2017, 34(2): 111-116.
- [22] 陈敏, 赵常青, 林强, 等. 川渝地区窄安全密度窗口天然气深井固井新技术 [J]. *天然气勘探与开发*, 2021, 44(3): 62-67.
CHEN Min, ZHAO Changqing, LIN Qiang, et al. New cementing technique for deep gas wells with narrow safe density window in Sichuan and Chongqing[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2021, 44(3): 62-67.
- [23] 沈欣宇, 胡锡辉, 杨博仲, 等. 近平衡压力固井技术在超深易漏失井的应用——以五探 1 井 $\varnothing 168.3\text{mm}$ 尾管固井为例 [J]. *石油钻采工艺*, 2020, 42(1): 35-39.
SHEN Xinyu, HU Xihui, YANG Bozhong, et al. Application of the near equilibrium pressure cementing technique in ultra deep leakage wells: A case study on the $\varnothing 168.3\text{ mm}$ liner cementing of Well Wutan 1[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2020, 42(1): 35-39.
- [24] 伍葳, 刘成, 蒲俊余, 等. 川渝地区天然气井深井固井工程复杂案例分析 [J]. *天然气勘探与开发*, 2020, 43(4): 98-105.
WU Wei, LIU Cheng, PU Junyu, et al. Cementing complexity in deep natural gas wells, Sichuan-Chongqing area[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2020, 43(4): 98-105.
- [25] 王志刚, 王稳石, 张立焯, 等. 万米科学超深井钻完井现状与展望 [J]. *科技导报*, 2022, 40(13): 27-35.
WANG Zhigang, WANG Wenshi, ZHANG Liye, et al. Present situation and prospect of drilling and completion of 10000 meter scientific ultra deep wells[J]. *Science & Technology Review*, 2022, 40(13): 27-35.

(修改回稿日期 2023-11-19 编辑 王 斌)



本
文
互
动