

川西气田海相超深水平井成像测井工艺研究

张正玉, 樊靖宇, 刘殿清

中石化经纬有限公司西南测控公司, 四川 成都

收稿日期: 2023年1月7日; 录用日期: 2023年2月23日; 发布日期: 2023年3月3日

摘 要

川西气田海相超深碳酸盐岩气藏是四川盆地的重要油气勘探开发目标, 但超深、高温高压、高含硫和井壁稳定性差等复杂井况一直制约着水平井成像测井资料数据采集, 对气藏评价和产能建设产生了严重影响。本文针对性地开展了应对川西气田海相超深水平井复杂井况的成像测井仪器和配套工具研究, 研制了高强度高温高压偶极声波和灯笼体电成像测井仪器及大功率泵下枪和高强度可调金属扶正器超深水平井成像测井配套工具, 建立了安全、高效、可靠川西气田海相超深水平井成像测井工艺, 形成的川西气田海相超深水平井成像测井工艺取得了良好的现场应用效果, 具有广阔的应用和推广前景。

关键词

川西气田, 超深水平井, 成像测井, 测井工艺, 配套工具

Study on Imaging Logging Technology of Marine Ultra Deep Horizontal Wells in West Sichuan Gas Field

Zhengyu Zhang, Jingyu Fan, Dianqing Liu

Xinan MWD/LWD Logging Corporation, Sinopec Matrix Corporation, Chengdu Sichuan

Received: Jan. 7th, 2023; accepted: Feb. 23rd, 2023; published: Mar. 3rd, 2023

Abstract

The ultra deep carbonate gas reservoir in West Sichuan Gas Field is an important target for oil and gas exploration and development in Sichuan Basin, but the complex well conditions such as ultra

deep, high temperature high pressure (HTHP), high sulfur content and poor wellbore stability have always restricted the data acquisition of imaging logging data in horizontal well, which has a serious impact on gas reservoir evaluation and productivity construction. This paper focuses on the research of imaging logging tools and matching tools to deal with the complex well conditions of marine ultra deep horizontal wells in West Sichuan Gas Field, develops the rigid HTHP dipole acoustic wave and lantern structure electric imaging logging tools, high-power pump gun and high strength adjustable metal centralizer imaging logging tools for ultra deep horizontal wells, and establishes a safe, efficient and reliable imaging logging technology for marine ultra deep horizontal wells in West Sichuan Gas Field. The imaging logging technology for marine ultra deep horizontal wells in West Sichuan Gas Field has achieved good field application results and has broad application and promotion prospects.

Keywords

West Sichuan Gas Field, Ultra Deep Horizontal Well, Imaging Logging, Logging Technology, Supporting Tools

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水平井钻井技术发展带动了国内外采用的水平井常规测井工艺快速进步,适应了超深水平井测井工艺需求,国内众多专家、学者针对水平井常规测井工艺输送技术、电缆湿接头测井工艺电缆保护、测井仪器高温高压性能提升及扶正器改进等水平井常规测井设备研发和测井工艺难点进行了深入研究[1]-[10],在国内诸多油气藏水平井中取得了成功实践[11] [12] [13] [14] [15]。国内油气藏勘探开发逐渐向深层致密油气藏、断块油气藏、隐蔽油气藏、非常规油气藏等发展,地质对象精确评价难度越来越大,为了满足复杂油气藏精确描述、实时解释和现场决策水平井特殊测井工艺的需求日趋迫切,但受超深、超长测量井段、井底高温高压、强腐蚀性、仪器偏心等因素影响,现有成像测井仪器性能、测井工艺将面临巨大的挑战,成像测井仪器长时间稳定工作、安全优质采集测井资料是必须要面对的问题。川西气田海相雷口坡组气藏天然探明储量超千亿立方米,是中石化继普光和元坝气田之后在四川盆地发现的第3个超深碳酸盐岩大型气田[16],该气藏埋深6000 m左右,地层温度超过150℃,气藏高含H₂S,超深、高温高压、井壁稳定性差和高含硫等严苛的测量环境,对成像测井仪器及配套工具性能提出更高要求,水平井成像测井施工风险高;成像测井需要大功率、长时间工作和大数据稳定传输的电气性能以及测井居中对配套工具的电气性能和居中性能提出了更高要求。因此,如何根据川西气田海相超深水平井复杂井况下成像测井施工需求,需要进行超深水平井复杂井况下成像测井工艺深入研究,以建立适合川西气田海相超深水平井成像测井工艺,实现复杂井况下超深水平井成像测井施工质量和时效。

2. 高强度高温高压成像测井仪

川西气田海相超深水平井复杂井况对偶极声波和电成像测井仪器强度和耐温耐压性能要求更高,现有偶极声波和电成像测井仪器难以满足要求,需研制新的高强度高温高压成像测井井下仪。首先,根据川西气田超深水平高压、高含硫和井壁稳定性差等复杂井况特点,新型成像测井仪器承压外壳体采用高强度、耐腐蚀性和导磁特性的钛合金 TC18 金属,解决了现有成像测井仪器抗拉抗压力和抗硫化氢腐蚀

较弱的难题。新型成像测井仪器在外壳外径 96 mm，内径 70 mm，横向抗压指标达到 214 MPa 以上，轴向抗拉抗压指标达到 20T，耐硫化氢腐蚀性能强。

其次，成像测井仪器采用 200℃超高温芯片和元器件，内部电路采用低功耗集成电路、厚膜电路，同时采用保温瓶 + 主动制冷技术，半导体主动制冷技术可以保证连续供电的条件下，实现 200℃/20 小时的连续高温工作目标。成像测井仪器供电电池采用 180℃电池芯，同时采用新的电池玻璃钢外壳缠绕方式和电气线路布线方式，设计冗余组装空间，解决了电池高温体积膨胀后挤破内部电气线路，造成电池短路故障难题，提高了高温工作环境下电池安全性和可靠性。

再次，新型偶极声波测井仪器隔音体采用高强度金属外壳相邻行列刻槽位置交叉变换圆周刻槽方式，辅以加强肋条新结构(图 1)，大量的数字模拟分析结果表明：新型隔音体抗拉强度 30T、抗压强度 20T，较传统隔音体抗拉强度 20T、抗压 5T 抗压抗拉能力大幅度提升，实现了偶极声波仪器整体强度显著提升，解决了传统声波仪器由于隔音体采用外壳圆周均匀刻槽方式导致抗压能力较弱导致偶极声波测井仪器难以满足复杂井况下高强度要求。同时，新型隔音体延时效果较好，试验证明其直达波达到时间高于 600 ms 满足声波测井要求。设计偶极声波测井仪器专用“铁布衫”——金属网状保护套，该保护套由 TC4 钛合金制成，表面制作了密集分布的小孔，超高的金属强度与优化的结构不仅很好地保护了仪器，以此避免声学晶体外部保护胶囊被井内岩屑或异物刺破，提高偶极声波测井仪器在超深复杂水平井中的适用性(图 2)。

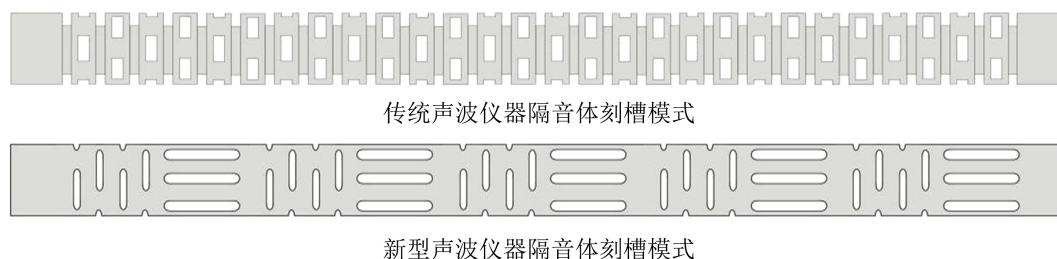


Figure 1. Comparison of grooved structure between new type and traditional sound insulation body

图 1. 新型隔音体与传统隔音体刻槽结构对比图



Figure 2. Metal mesh protective sleeve of new dipole acoustic logging tool

图 2. 新型偶极声波测井仪金属网状保护套

最后，针对复杂井况下现有电成像测井仪极易发生阻卡，电成像仪器极板遇卡落井风险高，设计并研制了新型灯笼体电成像测井仪器。新型灯笼体电成像测量极板采集灯笼体推靠结构设计，上下推靠臂设计为对称的梯形推靠结构，极板两侧实现铰链连接，实现既可在轴向上旋转，又可随井壁扩张，具备两个方向自由度，实现良好贴靠(图 3)。推靠臂控制马达通过扭矩限制器实现动力可控，减小电成像测井仪井下遇卡几率，当仪器遇卡时也能使得成像测井仪解卡能力更强，整体降低了成像测井施工遇卡风险，明显改善电成像测井资料质量。同时由于新型灯笼体电成像仪器材料和机械强度优化，满足最大拉力 40T、最大下压力 20T 的复杂井况水平井测井施工需求。

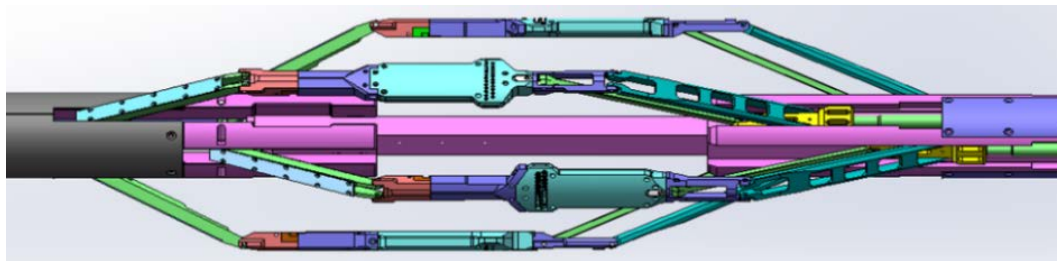


Figure 3. Schematic diagram of the structure and principle of the lantern body electrical imaging logging tool
图 3. 灯笼体电成像测井仪结构原理示意图

3. 超深水平井成像测井配套工具

测井仪器扶正器是一种用于在井下固定保护仪器的工具，在测井过程中以保持仪器具有良好的居中状态。目前，国内常用的测井仪器扶正器为通电压缩反弹式扶正器、硬质橡胶扶正器和灯笼状的金属片扶正等，这些类型扶正器在减少仪器与井壁的接触面积、降低仪器遇阻的可能性方面起到了积极作用。但对井壁稳定性较差的井眼难以起到良好扶正效果；扶正器弹力较小，能够支撑的仪器重力有限，并且在高温高压影响而变形和容易脱落，导致井下测井仪粘卡和损坏。

新研制的高强度可调金属扶正器由扶正器扰性接头、灯笼扶正体、扶正导向器和导向胶锥四部分组成的(图 4)。挠性接头具有较好的挠性，能够在侧向力的作用下发生 2° 以内的偏转，提高对测井仪器的引导能力；扶正导向器能够自由伸缩，在不同井壁状况时能够自动调节尺寸，实现仪器的扶正并有效防止粘卡。采用高强度、高抗疲劳性无磁弹性金属的可调金属扶正器主体，具有可调的专门扶正导向装置，经过特殊工艺焊接在滑动端和固定端上，实现固定端在卡槽的作用下完全紧固、滑动端可以滑动，灯笼体结构的扶正器本体直径为 92 mm，扶正器自由撑开可达到 215 mm，耐压超过 140 MPa，抗压强度超过 5T，尤其适合于重量较大的成像测井仪器，确保了成像测井仪器呈居中状态测量，提高了对测井仪器的导引能力和居中能力，使得超深水平井测井资料质量和施工安全得到保障。

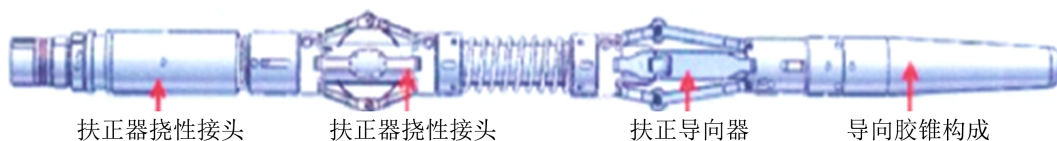


Figure 4. Schematic diagram of structure principle of high-strength adjustable metal centralizer
图 4. 高强度可调金属扶正器结构原理示意图

泵下枪是电缆湿接头头钻具输送测井中连接地面系统、井下仪器供电和数据传输的重要工具，常规泵下枪导电环和绝缘套过线空间小和电流小，成像测井高压发射功率较大存在常规泵下枪损坏风险，信号来回发射过程中容易出现积碳并导致泵下枪接触不良问题，使用材质为不锈钢，防腐蚀性能差，导电环容易受到硫化氢腐蚀并影响导电和通讯能力，难以满足高温高压、高含硫环境下复杂井况下大功率和大数据量传输的超深水平井成像测井施工需求。

新型大功率泵下枪材质采用钛合金，提高了耐温、耐压和耐腐蚀性能，其导电性能也更强。结构上采用棒式结构，有别于常规泵下枪针式结构，棒式泵下枪明显增加了泵下枪电极环面积，提升了泵下枪内部贯通线功率，其电气性能和数据传输稳定性更好。新型大功率泵下枪能够满足高温高压、高含硫条件下的成像测井所需求的高电压(600V)、大电流(3A)以及大数据量传输要求，保证了川西气田超深水平井高温高压、高含硫和复杂井况等测井环境下电缆湿接头钻井输送成像测井一次成功率，数据传输稳定可靠。

4. 超深水平井成像测井工艺

国内外水平井测井采集技术主要以电缆湿接头钻具输送测井、泵出式存储测井和直推式存储测井等水平井测井方式为主,形成了较为成熟的水平井常规测井工艺,但针对偶极声波、电成像和二维核磁共振等水平井成像测井工艺可借鉴的经验和成功案例较少。本文通过高强度高温高压成像仪器及配套工具研制,形成了高温高压、高含硫和井壁稳定性较差等复杂井况的川西气田海相超深水平井偶极声波、电成像和二维核磁共振测井等成像测井工艺。

1) 超深水平井偶极声波测井工艺

直推存储式测井工艺是将仪器串连接在钻具底部由钻具的移动带动仪器运动,可完成上提下放测井,井下仪器实时存储测井数据与地面记录时深文件进行匹配,完成钻井测井原始数据采集。该工艺的应用改变了传统的测井方式,脱离了测井绞车和电缆,一次下井可以完成常规综合测井项目及偶极声波测井项目,测井项目全且测井资料可靠,逐渐成为目前水平井测井的主要工艺技术之一。因此,根据川西气田海相超深水平井复杂井况对偶极声波测井施工要求,形成了以研制的高强度高温高压存储式偶极声波测井仪和高强度可调金属扶正器为主的直推存储式偶极声波测井工艺,该工艺具有强度大、耐高温耐压耐腐蚀能力强的优势;仪器具有独立的信号记录、传输和存储系统,能够避免远距离传输弊端,保障了测井资料质量;无电缆对接环节,不受钻具尺寸、造斜点、测量井段影响,大大降低了电缆湿接头钻井输送测井对接失败风险,显著提高了测井施工时效。

超深水平井偶极声波测井工艺具体实施步骤:① 测前仪器准备:高强度高温高压偶极声波测井仪及入井配套工具探伤、加温试验、通断绝缘和油量检查、加装声波发射和接收窗口专用金属防护罩以及更换仪器防硫密封圈;② 测前井眼准备:通井大下钻摩阻不超过 20T,井内油气上窜速度稳定时间大于测井时间的 1.5 倍,提高钻井液抗高温性能确保 48 小时粘切变化率不超过 20%,并添加除硫剂;③ 测前钻具数据准备:钻井工程师编写钻具组合表,钻井、录井、测井三方核对数据;④ 下井偶极声波仪器顶部加装旋转短节、下部加装高强度可调金属扶正器,降低仪器遇阻卡的风险;⑤ 测井施工中下放钻具必须按照钻具组合表进行下钻,起下钻过程中,除整立柱外,其他不进行坐吊卡操作;⑥ 测井过程中测井人员全程司钻房坐岗及时与钻井队沟通,与测井操作室保持通讯通畅;⑦ 测井遇卡钻事件,按钻井队正常起下钻卡钻操作规程处理卡钻事故;⑧ 测井施工完成后,仪器出井拆卸后进行存储数据读取及深度匹配。

直推存储式偶极声波测井工艺已在川西气田海相超深复杂井况水平井中得到广泛成功应用,其中在 X1 井中一次下井完成常规标准和直推存储式偶极声波测井,实现直推存储式偶极声波测井工艺在川西气田海相超深水平井直推存储式偶极声波测井工艺突破,该直推存储式偶极声波测井工艺测井成果图显示单极和偶极声波信号清晰(图 5),偶极声波测井资料质量优质,创造了川西气田超深水平井偶极声波测量深度最深(7216 米)和温度最高(160℃)两项施工纪录。

2) 超深水平井电成像和二维核磁共振测井工艺

鉴于目前国内外暂无存储式电成像与二维核磁共振测井仪研发,因此,川西海相超深水平井电成像与二维核磁共振测井工艺仍选择电缆湿接头钻具输送测井工艺。电缆湿接头钻具输送测井工艺是把电缆测井仪器通过一个公头外壳连接到钻杆(油管)底部,然后通过由钻杆(油管)把仪器输送到目的层顶部。当仪器到达目的层顶部后,然后在钻杆(油管)柱的上端接上一个旁通短节,并把连接电缆的泵下枪,通过旁通短节下入钻杆(油管)内,最后用泥浆泵把电缆和泵下枪泵下,使泵下枪与公接头在机械上锁定,电气上绝缘,在电路上接通,对接成功后可进行下钻或起钻测井,完成测井数据采集。根据川西气田海相超深水平井复杂井况对电成像测井施工要求,形成了以研制的新型灯笼体电成像测井仪和大功率泵下枪为主

的电缆湿接头钻具输送电成像测井工艺，新型大功率泵下枪由其独特的棒式结构和大功率特征，较好保障了对接成功率和大功率供电以大数据量稳定传输；新型灯笼体电成像测井仪独特的灯笼体推靠结构有效降低复杂井况下仪器阻卡风险，同时极板良好井壁贴靠性能保证了电成像测井资料质量(图 6)。

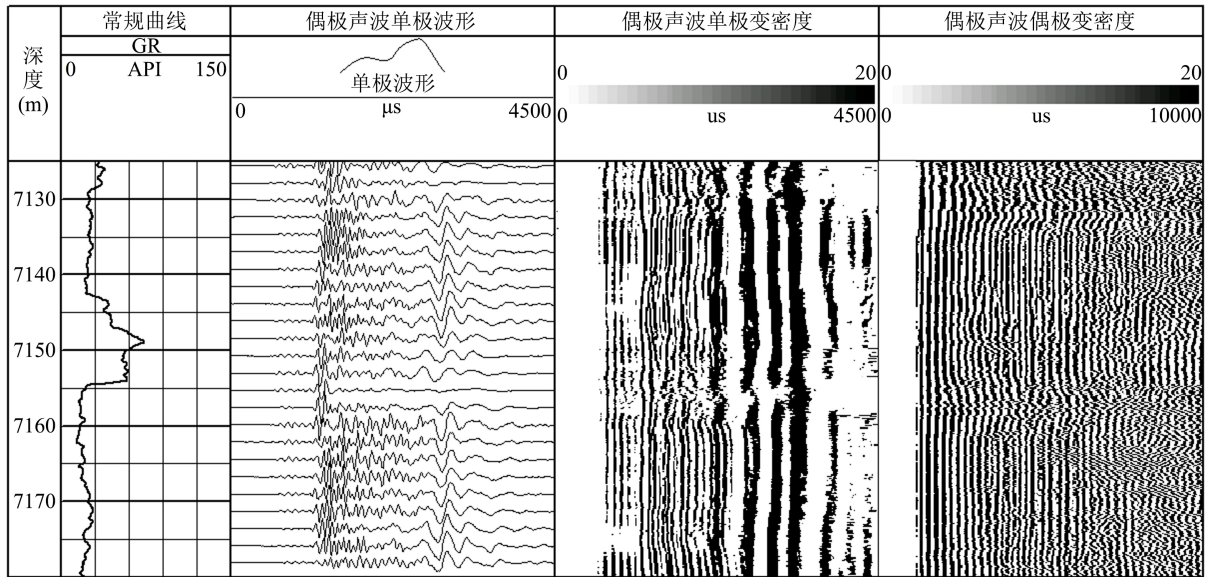


Figure 5. Dipolar acoustic logging results of marine horizontal well X1 in West Sichuan Gas Field

图 5. 川西气田海相水平井 X1 井偶极声波测井成果图

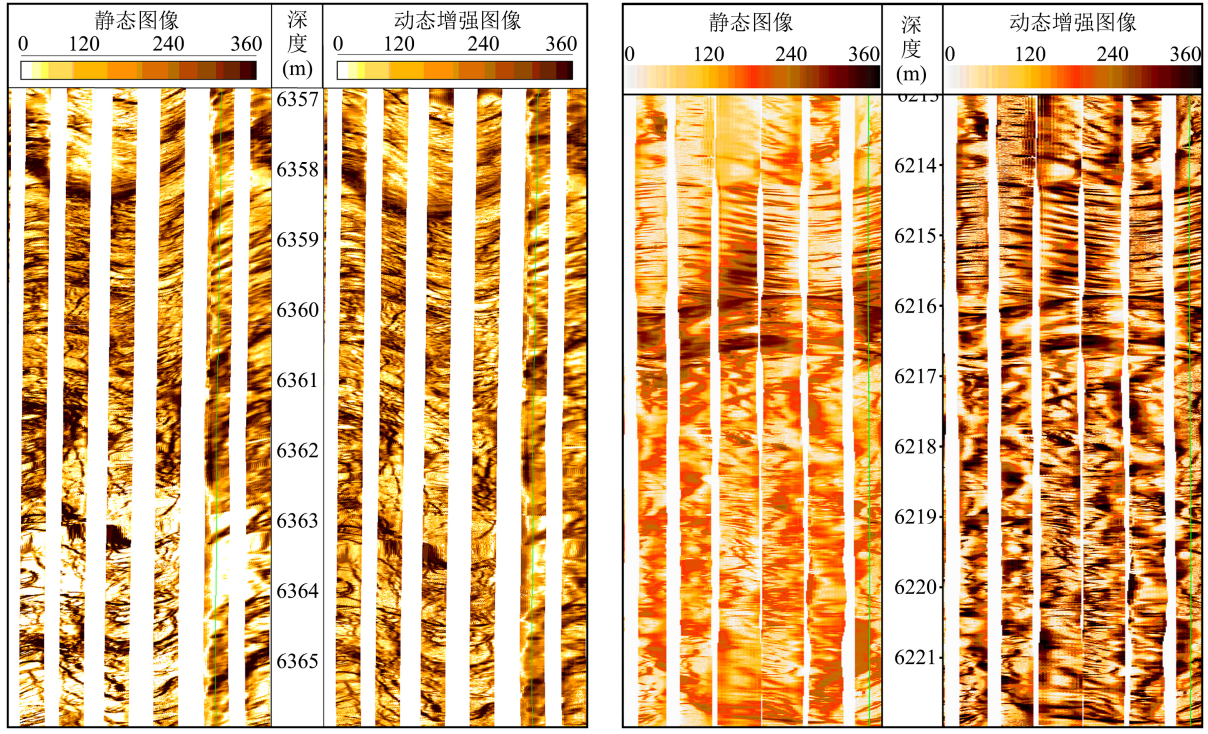


Figure 6. Logging results of lantern body electric imaging logging of horizontal well X2 (left) and well X3 (right) in Sichuan Basin

图 6. 四川盆地 X2 井(左图)和 X3 井(右图)灯笼体电成像测井水平井测井成果图

形成基于长水平段低速速度匹配、仪器保护和大功率泵下枪技术的川西气田超深水平井电缆湿接头钻具输送二维核磁共振测井工艺，该工艺通过超低速绞车性能升级及速度精确匹配，解决了二维核磁共振测井井下仪器在长时间超低速稳定测量、绞车与钻具速度精确同步难题；通过采用耐磨材质加厚仪器保护套，解决了早期二维核磁共振测井水平井施工中仪器外保护套被磨穿造成探头天线受损，测井成功率和质量较差难题，有效保障了长水平井段海相硬地层二维核磁共振测井数据采集质量(图 7)和提升了测井时效。

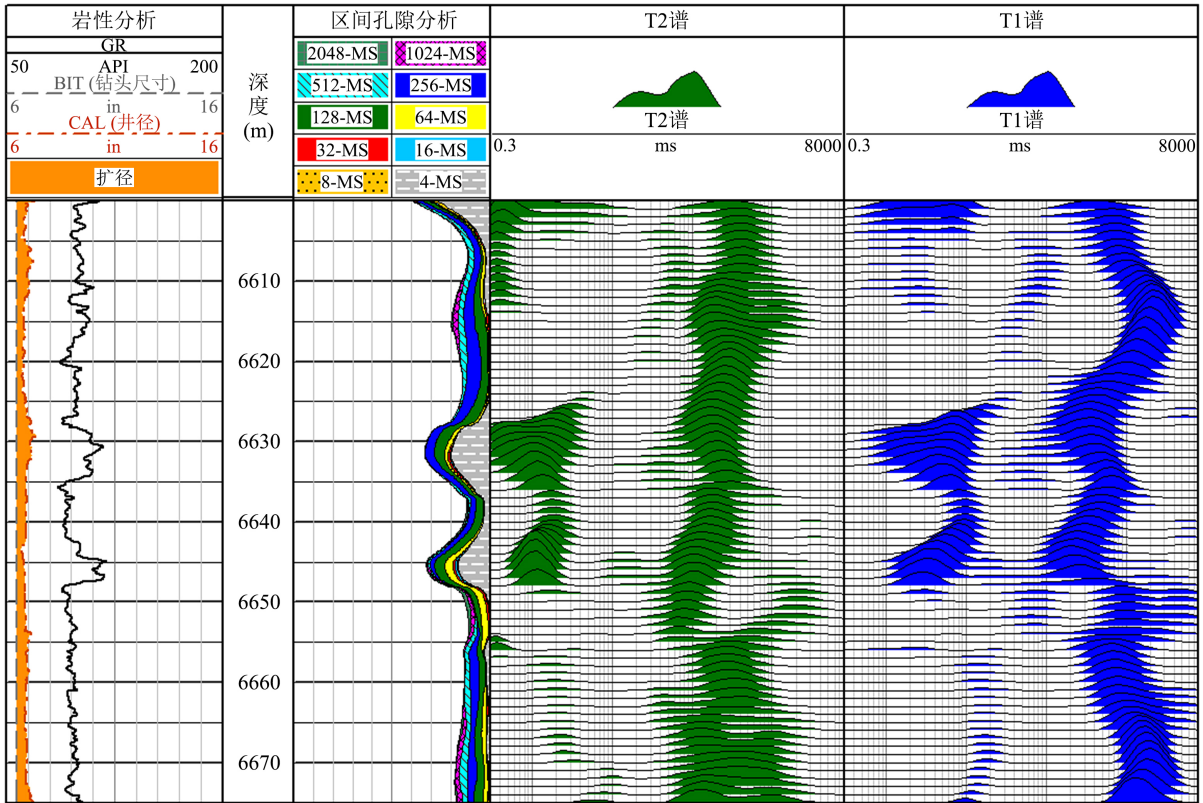


Figure 7. 2D NMR logging results of ultra-deep horizontal well X4 in West Sichuan Gas Field
图 7. 川西气田超深水平井 X4 井二维核磁测井成果图

超深水平井电成像和二维核磁共振测井工艺具体实施步骤：① 测前仪器准备：高强度高温高压电成像及二维核磁共振测井仪及入井配套工具探伤、加温试验、通断绝缘和油量检查、加装厚型二维核磁共振测井仪保护套及更换仪器防硫密封圈；② 测前井眼准备：通井大下钻摩阻不超过 20T，井内油气上窜速度稳定时间大于测井时间的 1.5 倍，提高钻井液抗高温性能确保 48 小时粘切变化率不超过 20%，并添加除硫剂，循环钻井液需使用不低于 70 目的滤网过滤钻井液；③ 电缆对接点前每一柱钻具必须通径，钻具底部最少 300 米钻具水眼大小无变化；④ 下井电成像及二维核磁共振仪器顶部加装旋转短节、下部加装高强度可调金属扶正器，降低仪器遇阻卡的风险，电缆对接后井口加装电缆保护工具；⑤ 测井施工中接、卸钻具立柱时，坐吊卡高度必须低于 10 cm；⑥ 对接点一般选在套管内套管鞋附近，井斜角 < 60°；⑦ 保证钻机性能稳定，尤其二维核磁共振测井时钻具上提下放速度控制在 2 m/min 内；⑧ 测井过程中测井人员全程司钻房坐岗及时与钻井队沟通，与测井操作室保持通讯通畅；⑨ 测井遇卡钻事件，电成像仪器完成推靠臂合拢后，先抽出电缆，再按钻井队正常起下钻卡钻操作规程处理卡钻事故。

形成的川西海相超深水平井成像测井工艺在川西海相油气藏水平井勘探开发实践中成功应用 23 井次,其中直推存储式偶极声波测井工艺应用 15 井次,电缆湿接头钻井输送电成像和二维核磁共振测井工艺应用 8 井次(其中 X6-2 井电缆湿接头钻井输送二维核磁共振测井工艺未一次性成功),取得测井施工一次性成功率 95.7%,测井资料质量合格率为 100%。因此,实际应用效果分析表明:建立的川西海相超深水平井成像测井工艺技术安全、高效、可靠,较好地地为川西海相深层碳酸盐岩气藏高效勘探开发和产能建设提供了有力的测井原始资料采集测井工艺技术支撑。

5. 结论

1) 研制了耐温耐压 200℃/172 MPa,抗压抗拉强度均达到 20T 的新型高强度高温高压成像测井仪器及配套工具,满足了川西海相超深水平井高温高压、高含硫和井壁稳定性差等复杂井况下测井数据采集对测井设备的严苛要求。

2) 建立的直推存储式偶极声波测井工艺和电缆湿接头钻具输送电成像和二维核磁共振测井工艺取得将早期川西气田超深水平井测井一次性成功率不足 70%提高到 95.7%,测井资料质量合格率不足 80%提高到 100%,有效解决了川西海相超深水平井复杂井况环境下安全、高效和可靠的测井原始数据采集难题。

3) 形成的川西海相超深水平井测井工艺在川西海相深层碳酸盐岩气藏高效勘探开发和产能取得了良好的应用效果,具有广阔的应用和推广前景。

参考文献

- [1] 张正玉,袁军,李阳兵. 高强度高温高压直推存储式测井系统在超深井的应用[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(5): 117-124.
- [2] 刘殿清. 元坝气田超深水平井测井难点与对策[J]. 天然气工业, 2016, 36(A1): 26-32.
- [3] 朱桂清. 水平井测井技术译文集[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.
- [4] 李湘涛,秦羽乔,陈四平,葛华,田芳. 水平井测井仪器输送技术及其应用[J]. 石油机械, 2014, 42(8): 98-102.
- [5] 卢世春,王爱英,雷真田,等. 湿接头式水平井测井原理和仪器改进[J]. 石油仪器, 2012, 26(6): 44-45, 48.
- [6] 赵金秋,邵芳. 八臂滚轮扶正器的设计[J]. 石油仪器, 2006, 20(5): 23-24, 27.
- [7] 徐爱舫,陈黎升,岳向阳,赵强. 电动扶正器的改进及应用[J]. 石油仪器, 2000(5): 58-59.
- [8] 周天夫. 提升测井仪器耐高温性能方法探讨[J]. 石化技术, 2019, 26(3): 43-47.
- [9] 汪磊. 新型测井扶正器结构设计和应用[J]. 石化技术, 2018, 25(5): 317.
- [10] 李德生. 湿接头式水平井测井常见问题研究[J]. 国外测井技术, 2021, 42(8): 62-65.
- [11] 万平杰. 湿接头水平井测井中的技术难点[J]. 测井技术, 2005, 39(3): 268-271.
- [12] 刘欣,程子阳,杨士振. 湿接头式油管输送水平井测井工艺及应用[J]. 国外测井技术, 2018, 39(4): 62-65.
- [13] 罗荣,李双林,罗军. 超深侧钻水平井测井工艺在塔河油田的应用[J]. 测井技术, 2012, 36(3): 300-303.
- [14] 肖世匡. 水平井测井工艺在江汉油田的应用研究[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(2): 104-105.
- [15] 贾乐国. 水平井测井工艺及其应用[J]. 石油科技论坛, 2007, 26(3): 43-47.
- [16] 苏成鹏,何莹,宋晓波,董波,吴小奇. 四川盆地川西气田中三叠统雷口坡组气藏气源在认识[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 341-352.