

doi: 10.11720/wtyht.2022.0061

张建伟, 杨卓静, 王新杰, 等. 碳储深孔超声成像测井系统设计与应用[J]. 物探与化探, 2022, 46(6): 1500-1506. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.0061>

Zhang J W, Yang Z J, Wang X J, et al. Design and application of the ultrasonic imaging logging system for deep carbonate geothermal reservoirs[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(6): 1500-1506. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.0061>

碳储深孔超声成像测井系统设计与应用

张建伟^{1,2}, 杨卓静¹, 王新杰^{1,2}, 李胜涛¹, 赵玉军¹

(1. 中国地质调查局 水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051; 2. 自然资源部 地质环境监测工程技术创新中心, 河北 保定 071051)

摘要: 京津冀地区和雄安新区地热资源分布广泛, 以深部碳酸盐岩热储层为主要特征。为了实现热储稳产、增产, 采用超声波成像测井技术对储层裂缝参数进行检测、评价, 分析地下岩体构造裂缝的分布规律, 是非常有效的手段。本文针对深部碳酸盐岩热储层高温、高压的应用环境, 研发了超声成像测井系统, 满足了井深在 4 000 m 以深、井径 150~500 mm、温度达到 110 °C 以上、连续工作时间 12 h 以上、每米井段像点数大于 5 万点的使用要求。整套设备在雄安新区 D22 井进行了测井试验, 结果表明: 所研制的超声成像测井系统成像效果清晰、裂缝识别度高, 各项性能指标均达到国外同类先进设备水平, 能够为深部碳酸盐岩热储层的裂缝、破碎带识别以及产状分析提供一种高效的技术手段。

关键词: 深部碳酸盐岩热储层; 超声成像测井系统; 雄安 D22 井; 裂缝识别

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2022)06-1500-07

0 引言

京津冀地区和雄安新区地热资源丰富, 以深部碳酸盐岩热储层为主要特征, 分布广泛。为了实现热储稳产增产, 为深部地热的规模化开发提供技术支撑, 需要在热储表征、安全增产、综合评价等关键技术取得突破^[1-2]。在热储增产稳产过程中, 科技工作者在探井、钻井、成井等方面做了大量工作, 但由于井孔数量有限, 挖掘储层潜能成为持续性稳产的关键。

深部碳酸盐岩热储层的裂缝为流体提供储集空间以及运移通道。如何准确地识别裂缝的位置、形态、倾角、倾向等参数, 据此查明地下岩体构造裂缝的分布规律, 并进行有效评价是测井解释的重点和难点^[3]。

目前, 在水利工程地质勘察中, 对裂缝的识别一般采用电阻率测井、波速测井、放射性测井、地层倾

角测井等常规测井技术。以上方法的缺点是只能从测井曲线的形态变化上大致推测裂缝的存在位置, 不能查明裂缝的具体形态及产状特征; 成像测井具有高的纵向和横向分辨率, 可视化程度高, 能够提供丰富的井壁及井眼周围的信息, 既可以从测井图像中直观定性识别地层、裂缝以及构造形态, 还可以用图像形式定量解释各种层面结构, 并利用数据处理方法对测井图像做定量处理和分析。成像测井方法包括电成像、声成像及核磁成像等, 其中, 超声波成像测井是指利用声波在不同的泥浆、岩石中传播时, 所产生的声波传播速度、波幅度以及频率等声学特性的变化来研究钻井的地质剖面、分析固井质量的一种技术。该方法在地球物理勘探领域得到了广泛的应用, 可以用来生成碳酸盐岩储层孔隙度谱^[4-7]。

超声波成像测井设备首先应用于石油行业, 后来应用于水文环境勘测中。目前, 大部分采用进口设备, 但设备昂贵、售后及技术支持等存在很大的局

收稿日期: 2022-02-16; 修回日期: 2022-04-14

基金项目: 国家重点研发计划项目“深部碳酸盐岩热储层天然构造及人工干预下综合评价技术”(2019YFB1504103)

第一作者: 张建伟(1983-), 男, 汉族, 硕士, 高级工程师, 主要从事深部热储层探测设备研发及应用工作。Email: chegs_jianwei@st.bitbu.edu.cn

通讯作者: 杨卓静(1984-), 女, 学士, 工程师, 主要从事地质环境监测仪器研发与应用工作。Email: 277357053@qq.com

限性^[8-9]。因此根据工程需求,研发具有自主知识产权的超声成像测井设备,满足深部碳酸盐岩热储层开发需要,具有重要意义。

1 超声波成像系统设计

1.1 系统使用环境分析

1.1.1 压力分析

超声波成像测井系统工作在水、油、泥浆等高压液态环境中,本文所研究的深部碳酸盐岩热储层测井深度达4 000 m、压力达到40 MPa以上。为了保证数据采集、通讯等硬件电路中各单元的密封性能,选用440C不锈钢材料作为探管外壳材质,设计合理的密封形式和结构进行保护,实现密封、防水、耐高温和持久性,防止出现硬件短路故障,保证仪器能够在高温、高压环境中正常运行。

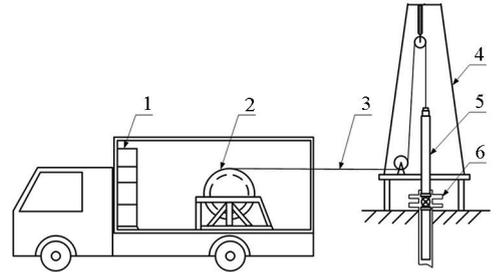
1.1.2 温度分析

电子设备的主要失效形式是热失效,过热损坏已成为电子设备的主要故障形式^[10]。据统计,有55%的电子设备的失效是由于温度超过规定值引起的,因此对电子设备进行热设计,实施有效的热控制是提高产品可靠性的关键。深部碳酸盐岩热储层测井温度较高,从本文所获取的D22井测温数据可知,随着井深的变化,储层温度逐渐升高,二开温度76~82℃,三开温度83~94℃,全孔测井过程预设12 h以上。

1.2 测井系统设计

1.2.1 测井系统的组成

测井系统主要由测井车、测井地面控制系统、测井铠装电缆和超声成像测井探头等组成,其中,地面控制系统包括上位机、测井控制器和绞车控制器等;井下超声波探测仪由高压防水电连接器、扶正器、硬件电路和不锈钢壳体等部分组成。深部碳酸盐岩热储层测井系统组成如图1所示。



1—测井车;2—测井地面控制系统;3—测井铠装电缆;4—井架;
5—超声成像测井探头;6—井口

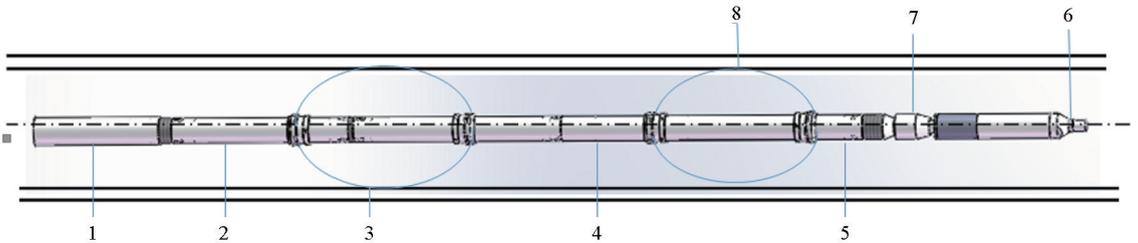
1—technical vehicle for logging; 2—well logging ground control system;
3—well logging armoured cable; 4—derrick; 5—ultrasonic imaging logging sensor; 6—wellhead

图1 测井系统组成示意

Fig. 1 Schematic diagram of the logging system

1.2.2 超声成像测井系统井下部分

超声成像测井探头由机械和电气2部分组成。其中,机械部分包括不锈钢壳体、电连接器和扶正器等组成;硬件电路由声像总成单元、方位监测单元、信息采集与处理单元、数据传输单元和DC电源单元组成,如图2所示。



1—声像总成单元;2—方位监测单元;3—信息采集与处理单元;4—数据传输单元;5—DC电源单元;6—电连接器;7—不锈钢壳体;8—扶正器

1—sound image assembly unit; 2—position monitoring unit; 3—information acquisition and processing unit; 4—data transmission unit;

5—DC power unit; 6—electric connector; 7—stainless steel housing; 8—casing centralizer

图2 超声成像测井探头示意

Fig. 2 Schematic diagram of the ultrasound imaging logging sensor

井下测井硬件电路主要完成超声波信号的产生、采集、处理等工作,并将相应的结果经载波通信单元发送给地面控制系统,根据测井数据合成最终的井壁图像。各部分的功能如下:

1) 声像总成单元主要由超声换能器、旋转系统和聚焦反射模块等组成。超声换能器主要负责脉冲信号的发射和回波信号接收;旋转系统带动聚焦反

射模块旋转,实现激励声束反射至井壁以及井壁回波声束反射至换能器。

2) 方位监测单元采用三轴重力加速度计和MEMS三轴磁阻传感器组成。重力加速度传感器获得钻孔的倾斜参数,磁阻传感器获得钻孔的方位。获取的井斜及方位数据用于成像时井下探管旋转引起的方位偏移修正,确保测井结果的准确性。

3) 信息采集与处理单元分为井下和井上两部分,如图 3 所示。井下部分主要功能是获取测井数据,数据获取主要由 2 种主控芯片配合完成,其中单片机选择美国微芯公司 (MiCroShip) 生产的 PIC18F2480,该款芯片具有耐高温和高频特性,其功能主要是获取外设传感器的数据,包括井斜传感器、磁阻传感器、温度传感器、电压监控等参数。

FPGA 采用 LATTICE 公司生产的 LCMXO1200,主要功能包括数据编码、声波信号的发射、接收、控制及信号处理,并负责与井上部分进行载波通信及交互供电。井上部分以 32 位 ARM 处理器 STM32F407 为主控单元,主要功能包括交互供电、数据解码、绞车控制、深度记录以及与上位机通信。

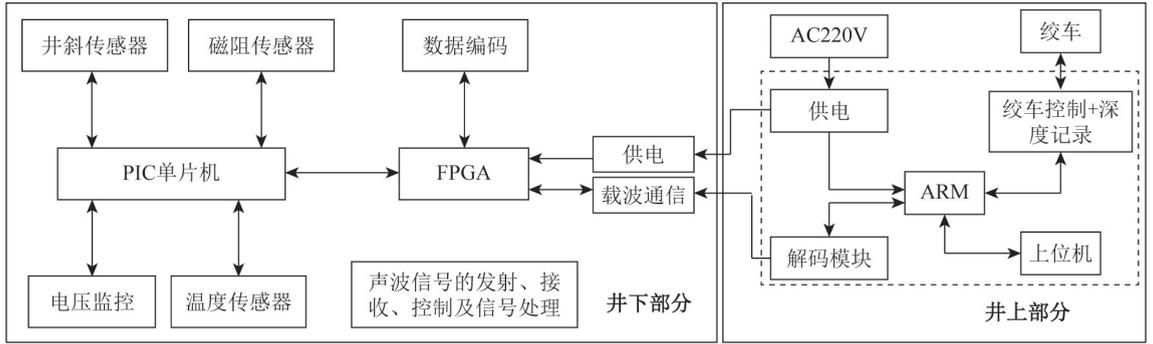


图 3 信息采集与处理单元原理

Fig. 3 Schematic diagram of the information acquisition and processing unit

4) 数据传输单元采用电压发送,电流信号回传的载波通信技术,具备高速通信抗干扰能力,将井下获取的数据实时传输至地面。采用单芯铠装线缆作为通信载体,大幅度缩小了线缆直径,节省了井下布设空间,并大幅度提高通信稳定性。

5) 系统需要不同电源形式保障各个单元协同运行,其中变频动力绞车需要 AC220V 供电,地表数据采集仪器及井下探测电路需要 DC±15 V、DC±5 V、DC3.3 V 供电。所有电源均来自于地表 AC220V,系统根据需求设计合理的稳压、逆变的方式为各个单元供电。

6) 电连接器将铠装测井电缆和井下超声成像测井仪器牢固连在一起,使得信号电缆不承受负载。

7) 不锈钢壳体采用 440C 不锈钢作为壳体材料,设计耐温、密封结构保证井下探测器耐高温和防水性能,保护探测器内部器件,使仪器能够在高温、高压下正常运行。

8) 扶正器套接在井下超声测井仪器的外壳上,实现井下超声测井仪器居中功能。防止由于仪器不居中导致接收到的回波信号变弱,图像变暗,影响成像质量。

1.3 系统主要技术参数

根据热储层测井需要确定各个功能单元技术指标,井下超声成像仪主要技术参数如表 1。

采用在供电电缆上同步调制解调监测信号的总线技术替代了传统的供电和信号传输分离的多线制总线技术。

表 1 超声成像仪主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of the ultrasonic imaging device

序号	参数	参数值
1	换能器频率	0.8~1.2 MHz(可调)
2	方位精度	±1°
3	单圈成像扫描点数	300
4	扫描速率	5 r/s
5	测井速度	0~6 m/min(可调)
6	纵向分辨率	10 mm

1.4 测井系统工作流程

结合图 1~图 3,热储层超声成像测井系统的工作流程如下:①由地面控制器下发的测井指令,通过井下电缆传送,启动井下超声测井仪器声波发射和数据采集等工作;超声波在介质中传播时,井径越大则传播时间越长,井壁质地越密则波阻抗越高从而反射波幅度会变大。②旋转电机与超声换能器在结构上紧密连接,电机的转动带动超声换能器旋转,从而实现换能器对井周的扫描。电机的转速对应仪器的横向扫描速率,通过电子线路控制电机的转速,实现仪器横向扫描速率的控制,电机转速越快,声波换能器对井周的扫描越快。③主控单元负责信号的采集,综合传播时间与反射波幅度等指标,便能够分析井壁的裂缝、孔洞发育情况。④将测量的信息经过编码后通过测井电缆传送至地面仪器;⑤地面仪器将接收的井下声波信息数据进行解码,利用地面仪器计算机中的测井软件对解码的数据进行成像,从而实现在地面仪器计算机中呈现反映井下信息的超

声测井图像。

1.5 声波成像数据解释软件

声波成像数据解释软件是根据测井数据差异性与岩石物理性质的对应关系识别地层岩性和地质特征的工具。地热深孔的成井特点是开次多、井径大、储层温度高,由于井况及高温、高压环境的影响,超声成像测井过程中声波行程长,测井数据会伴有严重的噪声干扰及温度漂移。原始数据解释之前,采用小波变换对超声成像测井数据进行去噪处理,构建适合地热深孔噪声特征的二维信号小波变换去噪算法,对每一层的高频系数进行阈值量化处理,最后根据小波分解的低频系数和经过修正的高频系数计算二维信号的小波重构。将去噪的测井资料进行数据校正、资料显示与处理、图像解释分析,最终得到测井解释结果。

基于 Visual Studio 2010 研发的声波成像数据解释软件与超声成像测井系统配套使用,能够将超声成像测井系统获取的原始数据着色成像,并能够利用数据拼接、曲线拟合、像素调整等功能进行储层裂缝、破碎夹层进行解释,系统具有良好的跨平台性,同时支持所有主流操作系统及大多数主流的大型数据库^[10]。图形化的操作向导,智能的帮助提示,丰富的颜色渲染功能方便用户操作,为超声测井后期数据处理提供技术支撑。

数据解释软件可展示测井曲线、声幅成像、产状分析曲线等信息,包含裂缝拟合、矩形拟合、原始数据编辑等功能,软件中的统计工具可以自动列出统计图及产状数据,统计图分为雷达图和产状图,图中包含裂缝的倾角、倾向、开度、区域裂缝条数等,用户可以根据需求任意选择展示效果。软件可以将统计图以图片形式导出,同时可以导出产状数据,数据表格式为 Excel。

2 测井试验与结果应用

2.1 仪器重复性检验

重复性是检验超声成像测井设备的关键指标之一,选择一眼下入井管的水井进行重复性测试。图4和图5为钻井中某一井管连接处重复性图像对比,测量中采用人工磁北信号指示图像方位。其中,图4为第一次测井图像,图5为第二次测井图像,从图中可见,两段井管连接位置图像清晰,显示位置一致,井管内壁特征划痕纵向重复性很好,横向图像走势基本一致。因此证明超声成像测井设备重复性良好。为了验证深部碳酸盐岩热储层超声成像测井系

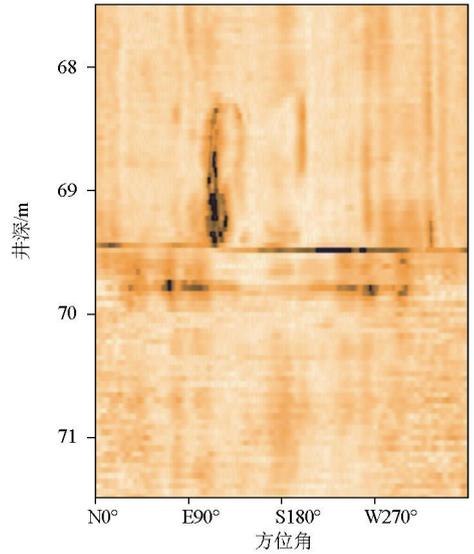


图4 重复性试验第一次测井图像

Fig. 4 The first logging image of the repetitive test

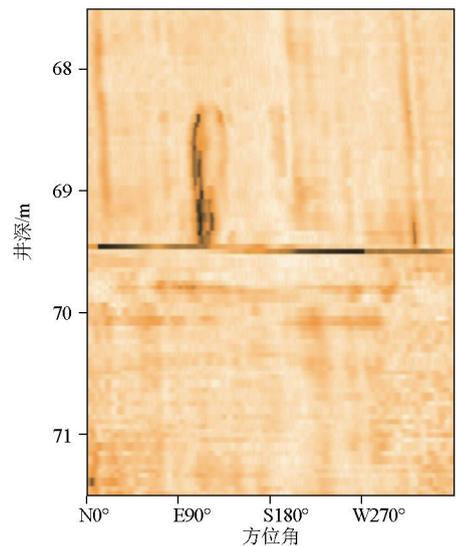


图5 重复性试验第二次测井图像

Fig. 5 The second logging image of the repetitive test

统的测井效果,在雄安新区试验基地进行了现场试验。

2.2 野外测井试验

2.2.1 试验地点

研究区域位于雄安新区的容城县城与安新县城之间,属于容城凸起与牛驼镇凸起的交界。试验D22井位于牛驼镇凸起南端,背斜翼部断陷的地堑地块,位于容城断裂和徐水断裂的交汇处。D22井共三开,共3 517.18 m,各部分参数为:一开:孔深0~987.14 m,孔径445 mm;二开:孔深987.14~2 204.18 m,孔径311 mm;三开:孔深2 204.18~3 517.18 m,孔径216 mm。

2.2.2 测井条件及运行参数

试验运行参数如表1所示,测井时钻井液参数

表 2 井液参数

Table 2 Drilling fluid parameters

序号	参数	参数值
1	密度	1.07 g/cm ³
2	漏斗黏度	32 s
3	失水量	6 mL/30 min
4	泥饼厚度	0.6 mm
5	含砂量	0.7%
6	pH 值	9

如表 2 所示。

2.2.3 试验结果

通过所研发的超声成像测井系统对 D22 井进行储层产状扫描试验,采用解释软件对深部热储层测井数据进行成像解释。原始测井数据包含的地层信息可以通过成像图上的颜色、形态等反映出来。图像的形态包含块状、线状、条带状、斑状等模式,这些分类代表不同的地质意义。亮色块状模式表示岩性较密,如致密碳酸盐岩等,暗色块状模式表示典型

的泥岩、高孔地层等。明暗相间的条带状模式表示砂泥岩互层。线状模式表示裂缝、人工诱导裂缝、断层等。斑状模式表示溶蚀孔洞、井壁地层剥落等。图 6 为测井图像片段和裂缝产状解释情况。图像片段着色区别度高,成像效果清晰,每米井段像点数大于 5 万点,地热深孔超声成像测井试验效果良好。

图 7 中测井图像中的解释结果用蝌蚪图表示,每条红色曲线代表一条裂缝,圆点所在的深度为裂缝深度,圆点所在的角度即为倾角,短线指示裂缝的方位角度,从图像中可以判断井下 2 762~2 767 m 井段裂缝丰富,通过解释结果可对裂缝的地层、方位及构造形态等特征进行定性解释,经计算也可以对裂缝的性质及产状信息进行定量分析。图 7 为 D22 井二开段裂缝形态的综合展示图,图中每个圆点代表一条裂缝,圆点所处位置包含每条裂缝的倾向、倾角信息及纵向分布规律。图 8 为 D22 井二开段裂缝的产状图,图中统计了裂缝垂向分布规律。

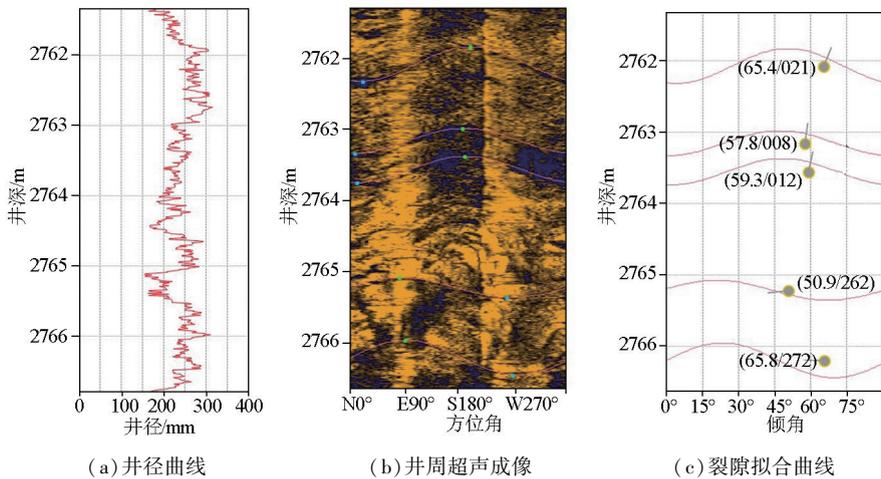


图 6 D22 井的测井图像片段 1
Fig. 6 A logging image fragment of well D22

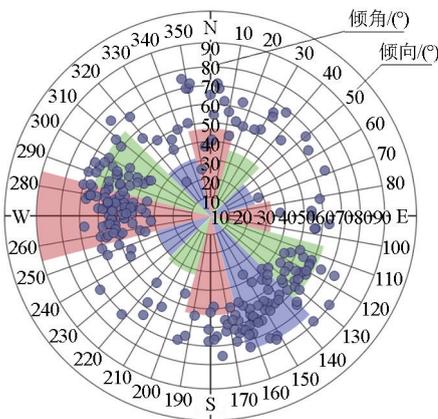


图 7 裂缝形态综合展示

Fig. 7 Comprehensive display diagram of the crack form

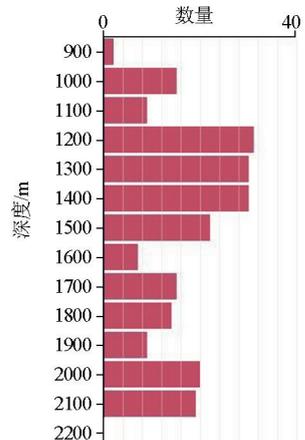


图 8 裂缝产状统计

Fig. 8 Statistics diagram of crack number

2.3 测井结果验证

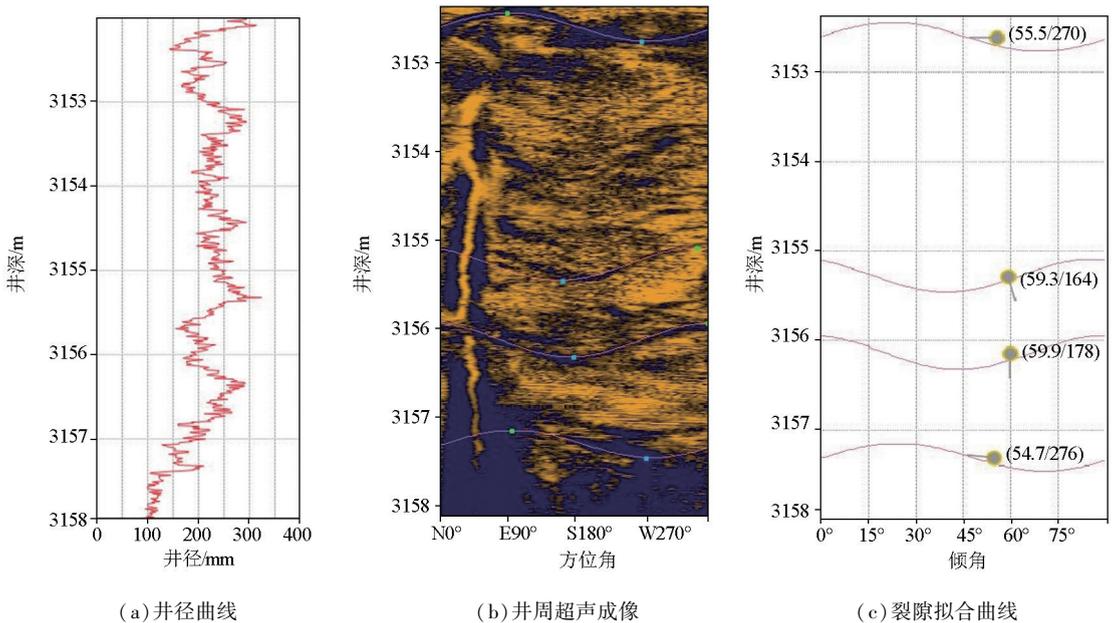
对比钻井取心编录资料,验证超声成像解释准确性。根据钻井取心情况,以3 153.59~3 157.49 m井段岩心为例,此段取心进尺3.9 m,岩心长度3.7 m,岩心采取率94.9%,岩心照片如图9所示:此段岩心较为完整,根据编录结果,岩心上部为深灰、灰色泥质白云岩,下部为灰黑色白云岩,含石英、燧石,岩心下部有明显岩性改变。

超声成像通过颜色区分不同岩层,图像的客观形成和井壁的密度相关,颜色越亮说明回波越强,岩石密度越大,因此可客观区分出不同岩层。图10中解释井下约3 157 m位置存在开度较大裂缝,同时此处图像颜色区分度较大,提示岩层变化,与钻遇地层岩心情况一致。



图9 D22井岩心片段(3 153.59~3 157.49 m)

Fig. 9 Core fragment of well D22(3 153.59~3 157.49 m)



(a) 井径曲线

(b) 井周超声成像

(c) 裂隙拟合曲线

图10 D22井的测井图像片段2

Fig. 10 A logging image fragment of well D22

2.4 测井结果应用

选择合适的位置进行储层压裂是地热能源开采利用的常用手段,压裂位置的选择与增产效果密切相关。超声成像测井结构能够支撑岩层结构及裂缝评估,为储层增产提供压裂建议。对D22井全孔段测井结果进行分析:①该孔节理裂缝较发育,随深度相对均匀分布,且破碎带较多;②节理裂缝主要优势方向为SWW—NWW,倾角主要分布在50°~70°;③最大水平主应力方向基本在NEE(NE20°左右)。

为增加裂缝贯通能力且能保证钻孔孔壁完整性,建议选择节理裂缝发育程度一般,且无破碎带或者破碎地层深度段较小处。结合图7、图8以及产状数据分析,得到优先压裂深度段共8段:深度

2 243~2 284 m、深度2 330~2 368 m、深度2 413~2 437 m、深度2 700~2 775 m、深度2 800~2 818 m、深度3 200~3 212 m、深度3 220~3 245 m、深度3 265~3 293 m。

3 结论

针对深部碳酸盐岩热储层特点,研发了超声波成像测井系统。从机械结构上保证了系统的耐高温性、密封性、耐久性,保证设备正常运行;硬件电路设计合理,声幅成像与时差成像对比明显、成像效果清晰;解释软件保证了裂缝定量统计及定性分析。以雄安新区D22井为试验基地,对设备的各项技术性

能进行了实测验证。结果表明,系统实现了各项预期功能,性能指标达到国外同类设备水平,测井结果为压裂增产提供优先压裂位置。该项技术不局限于地热能勘查,也可以应用于水资源调查、页岩气储层勘查、煤田地质勘查等领域,市场前景广阔。

参考文献 (References):

- [1] 吴爱民,马峰,王贵玲,等. 雄安新区深部岩溶热储探测与高产能地热井参数研究[J]. 地球学报,2018,39(5): 523-532.
Wu A M, Ma F, Wang G L, et al. A study of deep-seated Karst geothermal reservoir exploration and huge capacity geothermal well parameters in Xiongan New Area[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2018,39(5): 523-532.
- [2] 白青清,田林,吕欣萍,等. 容城—牛驼镇凸起碳酸盐岩层地热开发小微断裂探究[J]. 城市建设理论研究:电子版,2020(11): 39-40.
Bai Q Q, Tian L, Lu X P, et al. Exploration of small and micro fracture of geothermal development of raised carbonate layer in Rongcheng-Niutuo Town[J]. Theoretical Study on Urban Construction: Electronic Edition, 2020(11): 39-40.
- [3] 刘东明,林振洲,高文利,等. 藏南泽当科学钻探 ZDSD-1 孔超声成像测井解释[J]. 物探与化探,2017,41(4): 672-677.
Liu D M, Lin Z Z, Gao W L, et al. Interpretation of ultrasonic imaging logging data obtained in Drill Hole ZDSD-1 of the Zedang Scientific Drilling in Tibet[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017,41(4): 672-677.
- [4] 涂善波,郭良春,姜文龙. 基于成像测井技术的地下岩体裂隙分布规律预测研究[J]. 河南水利与南水北调,2019,48(1): 83-85.
Tu S B, Guo L C, Jiang W L. Study on crack distribution of underground rock mass based on imaging logging[J]. Henan Water Re-

- sources and South-to-North Water Diversion, 2019,48(1): 83-85.
- [5] 朱文娟. 成像测井资料在裂缝识别中的应用[J]. 石油仪器, 2009,23(3): 45-47, 101.
Zhu W J. Application of imaging logging data in crack identification[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2009,23(3): 45-47, 101.
- [6] 夏琼. 基于超声波技术的井壁成像系统设计[J]. 化工管理, 2018(24): 65.
Xia Q. Design of well wall imaging system based on ultrasonic technology[J]. Chemical Enterprise Management, 2018(24): 65.
- [7] 付青青. 超声成像测井图像增强和复原方法研究[D]. 荆州: 长江大学, 2020.
Fu Q Q. Research of enhancement and restoration method for ultrasonic logging images [D]. Jingzhou: Changjiang University, 2020.
- [8] 冯延强,乔宝强,焦仓文,等. CS404 小口径超声成像测井探管研制[J]. 铀矿地质, 2020,36(1): 46-51.
Feng Y Q, Qiao B Q, Jiao C W, et al. CS404 development of small caliber ultrasonic imaging logging tube [J]. Uranium Geology, 2020,36(1): 46-51.
- [9] 占志鹏. 井周超声成像仪主控系统设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
Zhan Z P. Design of main control system for circumferential borehole ultrasonic imaging tool [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [10] 方志强,付桂翠,高泽溪. 电子设备热分析软件应用研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2003(8): 737-740.
Fang Z Q, Fu G C, Gao Z X. Application research on thermal analysis software of electronic systems [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003(8): 737-740.

Design and application of the ultrasonic imaging logging system for deep carbonate geothermal reservoirs

ZHANG Jian-Wei^{1,2}, YANG Zhuo-Jing¹, WANG Xin-Jie^{1,2}, LI Sheng-Tao¹, ZHAO Yu-Jun¹

(1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Baoding 071051, China; 2. Innovation Centre of Geological Environment Monitoring Engineering Technology, Ministry of Natural Resources, Baoding 071051, China)

Abstract: Geothermal resources are widely distributed in the Beijing-Tianjin-Hebei region and the Xiongan New Area and are mainly characterized by deep carbonate geothermal reservoirs. To achieve stable and increased production of geothermal reservoirs, it is effective to detect and evaluate the fracture parameters of reservoirs and analyze the distribution patterns of tectonic fractures in underground rock masses using the ultrasonic imaging logging technique. Targeting the high-temperature and high-pressure environment of deep carbonate geothermal reservoirs, this study developed an ultrasonic imaging logging system, which can be used under the conditions of well depth greater than 4,000 m, well diameter of 150~500 mm, temperature greater than 110°C, continuous operating time greater than 12 h, and pixels per meter of a geological well greater than 50,000. The equipment of this ultrasonic imaging logging system has been tested in well D22 in Xiongan New Area. The test results show that the developed ultrasonic imaging logging system has a clear imaging effect and high identification degree of fractures and that its various performance indicators are comparable to those of advanced foreign equipment. Therefore, this system can provide an efficient technical method for identifying fractures and fractured zones and analyzing the occurrence of deep carbonate geothermal reservoirs.

Key words: deep carbonate geothermal reservoir; ultrasonic imaging logging system; Well D22 in Xiongan; fracture identification