

# 井下可视化成像检测技术在水平井的应用

杨义兴<sup>1,2</sup>, 桂捷<sup>1,2</sup>, 罗有刚<sup>1,2</sup>, 隋明祥<sup>1,2</sup>, 严正国<sup>3</sup>, 刘潍龙<sup>3</sup>

1. 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司油气工艺研究院 陕西西安 710021

2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室 陕西西安 710021

3. 西安石油大学电子工程学院 陕西西安 710065

通讯作者: Email: 945613662@qq.com

项目支持: 中国石油天然气股份有限公司关键核心技术攻关项目“可视化修井检测工具研制”(2024ZG29); 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司科技项目“井筒可视化修井打捞作业技术与试验”(2025D3JS02)

引用: 杨义兴, 桂捷, 罗有刚, 等. 井下可视化成像检测技术在水平井的应用[J]. 油气井测试, 2025, 34(4): 52-58.

Cite: YANG Yixing, GUI Jie, LUO Yougang, et al. Application of downhole visualization imaging detection technology in horizontal wells[J]. Well Testing, 2025, 34(4): 52-58.

**摘要** 常规检测方式无法对水平井的复杂井筒环境真实状况进行准确检测。基于井下可视化成像检测系统的原理, 介绍了该系统的井下仪器及地面系统的框架组成。针对可视化成像检测仪器在水平井中应用的仪器输送问题, 首次提出了油管泵送创新工艺, 通过过水限位设计利用流体推力解决水平段输送难题, 突破了传统连续油管作业的作业弊端; 同时, 确立了井液透光性浊度 $\leq 50$  NTU的量化标准; 并且对电缆爬行器、连续油管、穿缆连续油管、油管泵送四种输送工艺的仪器串组成、力学模型、适用场景等进行了详细的对比分析。应用结果表明, 四种输送工艺在不同井况下皆可直接获取井下影像。该技术为了解井下状况、制定合理的修井方案提供直观参考依据, 可显著缩短作业时间, 降低作业成本。

**关键词** 可视化成像技术; 水平井检测; 输送工艺; 油管泵送; 爬行器; 穿缆连续油管; 连续油管

中图分类号: TE937 文献标识码: B DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2025.04.009

## Application of downhole visualization imaging detection technology in horizontal wells

YANG Yixing<sup>1,2</sup>, GUI Jie<sup>1,2</sup>, LUO Yougang<sup>1,2</sup>, SUI Mingxiang<sup>1,2</sup>, YAN Zhengguo<sup>3</sup>, LIU Weilong<sup>3</sup>

1. Oil & Gas Technology Research Institute of PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710021, China

2. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an, Shaanxi 710021, China

3. School of Electronic Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China

**Abstract:** Conventional detection methods struggle to accurately assess the complex wellbore environment of horizontal wells. Based on the principles of a downhole visualization imaging detection system, the framework composition of the downhole tools and surface system is introduced, the downhole tools of the system, as well as its framework comprising surface modules in is introduced. To address the challenges in conveying visualization imaging tools in horizontal wells, an innovative tubing pumping process was proposed for the first time. By utilizing fluid thrust through a water-limiting design, this process overcomes conveyance challenges in horizontal sections, surpassing limitations of traditional coiled tubing operations. A quantitative standard for well fluid transparency (turbidity  $\leq 50$  NTU) was also established. Furthermore, a detailed comparative analysis was conducted among four conveyance methods—cable crawler, coiled tubing, cable-passed coiled tubing, and tubing pumping—in terms of tool string composition, mechanical models, and application scenarios. Field applications demonstrated that all four methods could directly acquire downhole images under different well conditions. This technology provides intuitive references for understanding downhole conditions and designing workover strategies, significantly shortening operation time and reducing costs.

**Keywords:** visualization imaging technology; horizontal well inspection; conveyance method; tubing pumping; crawler; cable-passed coiled tubing; coiled tubing

近年来,随着钻完井及储层改造技术的进步,中国在低渗透乃至致密油藏中,水平井的应用数量

大幅增加,水平段越来越长,使大量不可动用储量变成了可采储量<sup>[1]</sup>。水平井在持续生产后可能会

出现油、气、水在水平段分层流动、井液侵入方向会受重力影响等问题。水平井分段多簇压裂技术是非常规油气资源开发的核心技术之一,通过在压裂段内进行多簇射孔,能够在单次泵注下同时形成数条水力裂缝,有效降低施工成本。但常规的测井方式可能存在测井数据不准确、测井环境不适合等多种因素,影响对水平井的有效评价<sup>[2-4]</sup>。

国内外目前有很多针对水平井的检测方法,斯伦贝谢、贝克修斯和 Sondex 等国外公司开发了水平井组合检测工具,主要检测仪器为自然伽马和流量仪<sup>[5-6]</sup>;国内水平井检测主要采用直井测井仪器完成,有脉冲中子氧活化测井、硼中子测井、产液剖面测井、成像测井等<sup>[7]</sup>。这些检测方法都需要获得测井曲线后由专业人员进行资料解释,解释原理主要依托井内流体流动理论模型,然而由于井身斜度大、含水高、对检测过程和施工工艺有较大要求<sup>[8-10]</sup>。目前现有的水平井检测方法都存在一定的局限性。

随着成像技术、电缆传输技术的不断进步,井下电视发展迅速。井下可视化成像检测技术是利用井下摄像机和电缆高速传输技术直接获取井下视频图像的检测技术,直接获得井况实时的流畅视频,具有检测结果直观、解释方法简单等优点<sup>[11-13]</sup>。国外的斯伦贝谢、贝克修斯、哈利伯顿等多家公司开发了基于井下电视的可视化系统<sup>[14-16]</sup>,如国内目前有多家公司开发了电缆传输的井下成像技术,例如中油测井公司的 CPLog 多维高精度成像测井系统、西安正源井像的 VideoLog 可视化井下电视等,基于电缆传输的可视化成像技术,可通过高速率传输可实现地面对井下井况的实时观测,提高了对于水平井水平段的认识<sup>[17-18]</sup>。

为了全面、精准获取水平井水平段井况,最大程度消除井下问题的不确定性,提高测井措施的针对性和有效率,将可视化检测技术应用到水平井检测中具有重要意义。本文研究了井下电视可视化检测技术在水平井中应用的工艺流程,介绍了电缆爬行器、连续油管、穿缆连续油管和油管泵送四种输送可视化检测设备的作业工艺,通过现场测试验证了四种工艺的可行性,为水平井井筒检测提供了新的检测方法。

## 1 井下可视化成像检测系统

井下可视化成像检测系统由井下仪器和地面

系统两部分组成。井下仪主要完成视频获取与编码功能,将编码后的视频经测电缆传送至地面系统。地面系统实现对井下仪器的控制以及视频解码。视频采集与分析软件集成在地面系统中,对获取的井下视频进行处理和分析。

### 1.1 井下仪器

井下仪器主要包括 DC-DC 电源、LED 光源及其驱动电路、温度测量单元、高清成像单元(包括高温镜头和摄像头模组)、视频处理单元、电缆图传单元、通信控制单元。井下仪器主要由以下模块组成,如表 1 所示。

表 1 井下仪器模块组成  
Table 1 Downhole tool module configuration

模块	功能
DC-DC 电源模块	将地面提供的直流高压电转换为井下电路所需的低压电源。
LED 光源及其驱动电路	为井筒图像获取提供光源
温度测量单元	获取井下仪内部及井筒温度
高清成像单元	包括高温镜头和摄像头模组,用于获取井筒内视频图像
视频处理单元	对获取的井下视频图像进行编码
电缆图传单元	将编码后的视频图像数据通过测井电缆上传
通信控制单元	接收地面控制命令,实现井下灯光亮度控制、焦距调节及镜头旋转等操作

### 1.2 地面系统

地面系统包括可视化检测平台和视频采集软件两部分组成。其中可视化检测平台主要由 AC-DC 电源、井下供电电源、电缆图传单元、视频处理单元、字符叠加单元、录像存储单元、电缆测深单元、通信控制单元组成。

AC-DC 电源单元通过将交流 220 V 电源转换为低压直流电,为可视化检测平台各单元供电。井下供电电源单元通过测井电缆为井下仪提供直流高压电。电缆图传单元接收测井电缆上传的视频数据,转发给视频处理单元。视频处理单元解码井下上传的视频图像,发送给字符叠加单元,并对叠加完字符信息的视频进行编码,便于录像存储。字符叠加单元将测量的深度信息和视频标题、时间等信息叠加到视频上。录像存储单元将处理好的视频图像进行录像存储,便于回放观看。电缆测深单元接收测井车上光电编码器输出,计算电缆下井深度。通信控制单元配置电缆测深、字符叠加单元相关参数,向视频采集分析软件上传深度测量数据。

## 2 水平井井筒可视化成像检测工艺设计

可视化成像检测技术应用到水平井的关键问题,是如何解决井下工具在水平井水平段的运送,目前,水平井井下工具输送主要有电缆爬行器、穿缆连续油管,油管泵送等四种方式。四种运送方式的特点和工艺条件各不相同,可结合具体的井况进行选择。

### 2.1 作业方式

#### 2.1.1 电缆爬行器作业

电缆爬行器作业适用于水平井段的短距离检测,具有实时传输视频图像的优势。然而,其输送距离有限,适用于井深较浅的水平井。爬行器采用7芯井下总线,为可视化成像检测仪器提供四根缆芯过线。可视化成像检测仪器和爬行器各自使用不同的电缆缆芯,采用独特的并行传输方式,保持了各自独立频域的信号传输和通信控制。在爬行器行进过程中实时采集井下视频并传输到地面,爬行器为可视化成像检测仪器在水平段的行进提供动力,将可视化成像检测仪输送到目的位置;可视化成像检测仪器给爬行器充当“眼睛”,提高了爬行器作业的安全性,大大降低了爬行器井下遇卡事故的风险。七芯电缆爬行器作业可兼容电缆的直读模式和存储模式。

水平井爬行器作业可视化井下仪器串分为两个部分:首先仪器的最前端为井下电视,后端连接数据遥传单元,主要应用是与地面系统进行通信,前后增加扶正器短节保持仪器在井筒内处于中心位置,爬行器组合依次为驱动短节、推靠短节、电子短节、CCL短节,组成完整的井下仪器串。如图1所示。

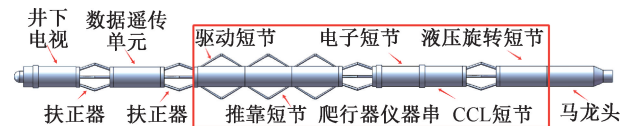


图1 爬行器与井下电视组合图

Fig. 1 Combination of crawler and downhole television

两套遥传系统通过使用不同的缆芯,独立工作,保持了各自独立的传输控制协议,从而实现了组合下井,协同工作。爬行器使用其中四条缆芯,其余三条缆芯从爬行器贯通供可视化成像检测仪器使用,外皮连接到仪器外壳,作为电源地共用。

在电缆爬行器作业时,爬行器所需要的牵引力要克服井筒摩擦阻力, $\theta$ 为井斜角,摩擦系数 $\mu$ 与井筒粗糙度相关。其力学平衡方程为式

$$F_{\text{traction}} = F_{\text{friction}} + F_{\text{gravity}} \sin\theta \quad (1)$$

式中: $F_{\text{traction}}$ 为爬行器牵引力,N; $F_{\text{friction}}$ 为井筒摩擦阻力,N; $F_{\text{gravity}}$ 为爬行器及仪器串的重力,N; $\theta$ 为井斜角,°。

电缆爬行器主要针对大斜度及水平井( $>60^\circ$ )的情况下可以自主爬行,无需流体介质等,适应复杂井筒轨迹,但要求工具串质量小于500 kg。且七芯电缆爬行器存在电缆阻抗高导致的供电与信号传输问题、维护复杂性与成本较高等缺点。

#### 2.1.2 连续油管作业

连续油管作业时,由于没有专用的数据传输通道,井下仪器采用电池组供电,工作方式为存储式。这种作业方式的优点在于对现场环境的要求较低,数据可在井下进行有效存储,在测井结束仪器上提后对数据进行读取和下载。

连续油管作业可视化成像检测仪器井下工具串的组合,如图2所示。仪器的前端为井下电视,其后连接电池组为仪器进行供电,前后两个扶正器保证仪器在井筒内处于中心位置,后面连接循环阀、安全丢手和卡瓦连接器保证仪器串在井下正常工作。

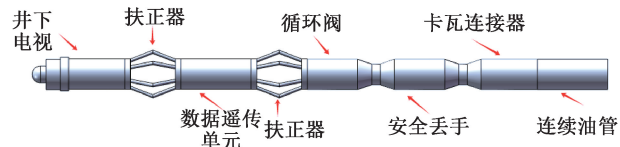


图2 普通连续油管工具串组合

Fig. 2 Conventional coiled tubing tool string combination

在连续油管进行作业时,仪器在水平段易发生螺旋屈曲,其临界载荷可通过Lubinski公式修正:

$$F = \frac{EI}{R^2} \left( \frac{\pi}{2} \right)^2 \quad (2)$$

式中: $F$ 为临界屈曲载荷是连续油管发生螺旋屈曲的最小轴向压力,N; $E$ 为弹性模量是材料抵抗弹性变形的能力,Pa; $I$ 为截面惯性矩是反应管柱截面形状对抗弯曲能力的物理量, $\text{m}^4$ ; $R$ 是水平井段的弯曲半径,m。

通过控制下放速度( $\leq 30 \text{ m/min}$ )可避免失稳。连续油管主要针对超深井、抗井喷能力强、压力较大的井筒环境进行作业,但存在无法实时观测井筒

环境进行数据传输,下入深度和轨迹的控制无法精确控制等问题。

### 2.1.3 穿缆连续油管作业

穿缆连续油管作业兼具电缆测井和连油测井的优势,输送距离远,又具备图像实时传输通道,是长水平段水平井比较理想的作业方式。单芯电缆传输速率慢,图像帧率低。多芯电缆传输速率快,图像帧率较高,视频流畅度好。

穿缆连续油管作业时,水平井可视化井下工具串(见图3):仪器的最前端为井下电视,与连续油管作业的区别在于穿缆连续油管可进行直读式作业,后端需要连接数据遥传用于和地面系统进行通信,后面连接循环阀、安全丢手,卡瓦连接器保证仪器串在井下正常工作。穿缆连续油管适用于超长水平井段,支持实时数据交互,但作业成本较高且下放速率受限。

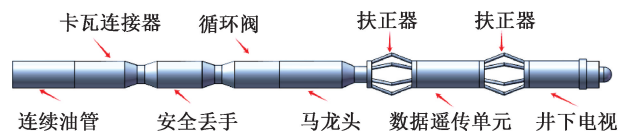


图3 带缆连续油管工具串组合

Fig. 3 Cable-through coiled tubing tool string

### 2.1.4 油管泵送作业

油管泵送作业是采用了一种创新的方法,主要针对于长水平段水平井检测,这种方法是传统连续油管作业的延伸。将一个喇叭形状的过水限位与油管相连,其内部的凹槽设计与扶正限位器上的凸起相交错,形成了一个稳固的连接。这种方法通过向井内注入水流,能够有效地利用水流的动力,推动可视化监测仪器在水平井内部移动,从而实现对井下情况的实时监控和精准分析。这种方法不仅提高了作业的效率,还增强了对井下环境的观察能力。

油管泵送作业时,在整体仪器串的后方添加过水限位和扶正限位,两个扶正限位的作用在于保持仪器在水平井段的平衡,使井下电视处于中心位置,过水限位保证液体流动产生的稳定推力,仪器串组合如图4所示。



图4 过水限位和扶正限位组合

Fig. 4 Water level limit switch and alignment limit switch combination

需要满足仪器运动方程式

$$F = \frac{f\rho v^2 L}{2D} + \rho gh \quad (3)$$

式中: $F$ 为仪器在井筒中运动所需的总推力,N; $f$ 为摩擦系数,取决于管壁粗糙程度; $\rho$ 为流体密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ; $v$ 为流速, $\text{m}/\text{s}$ ; $L$ 为管长, $\text{m}$ ; $D$ 为管径, $\text{m}$ 。优化泵注排量( $2 \sim 5 \text{ m}^3/\text{min}$ )可确保仪器平稳推进。

油管泵送主要针对于极端的井筒环境和较大的工具输送,且输送效率较高,但作业周期较长,对井筒的清洁和岩石碎屑的处理要求较高。

## 2.2 可视化成像检测系统作业井筒环境要求

因不同油气井的井况各不相同,通常会对井筒内情况进行预处理,可视化成像检测基于可见光成像技术,因此对井筒内介质的透光性有一定的要求,一般对井液浊度要求为 $\leq 50 \text{ NTU}$ ,如图5所示。

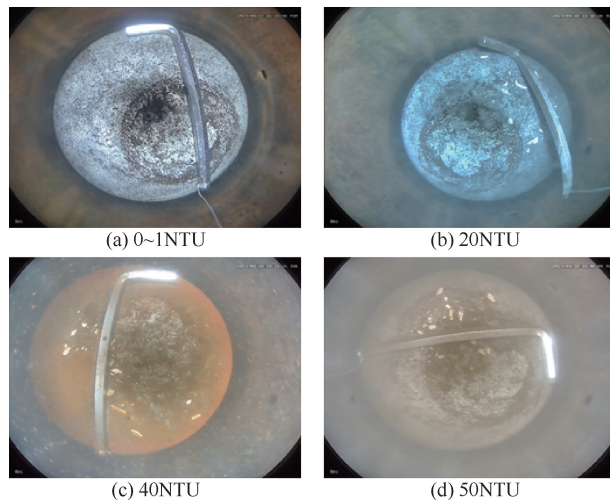


图5 井液浊度情况

Fig. 5 Wellbore fluid turbidity condition

根据 Lambert-Beer 定律,光在介质中的衰减遵循下式:

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (4)$$

式中: $I_0$ 为初始光强, $\text{lux}$ ; $I$ 为穿透介质后的光强, $\text{lux}$ ; $\mu$ 为介质的衰减系数, $\text{cm}^{-1}$ ; $x$ 为光程, $\text{m}$ 。通过改变 LED 光源的波长选择和光强调节,可有效提升图像信噪比 SNR。

在作业之前通常会对井筒内进行通井、冲砂、洗井、井口附近井筒预处理等,目的是保证仪器下井时的通过性,防止油污或脂类污染镜头及改善井液的透光性等,从而保证仪器工作的成功性,提高仪器的工作效率。

在油管泵送作业中,利用泵送液体产生的推力

### 3 现场应用

井下可视化成像检测技术在长庆油田多个油水井、页岩气井、煤层气井等不同地质、不同井况的约8口水平井进行了测井作业,通过以上测井工艺,仪器在工作后都获取了可靠的视频图像及数据,为测井解释提供了有力的图像依据。

#### 3.1 七芯电缆爬行器技术应用案例

A井为油井,井深约为3200 m,其中1900 m为垂直井,700 m为水平井。在测井前使用清水对井筒内进行循环清洗,直至返排液满足可视化监测要求。井下电视连接六臂滚轮扶正器及爬行器组成下井仪器,地面与电缆车进行连接。此次测井目的使用爬行器运送可视化检测设备,查看2238~3140 m射孔孔眼堵塞和套管内壁情况。图6为从A井获取的不同情况的水力喷砂射孔图像、包括正常射孔、严重腐蚀的射孔图像、套管结垢和正常节箍图像。

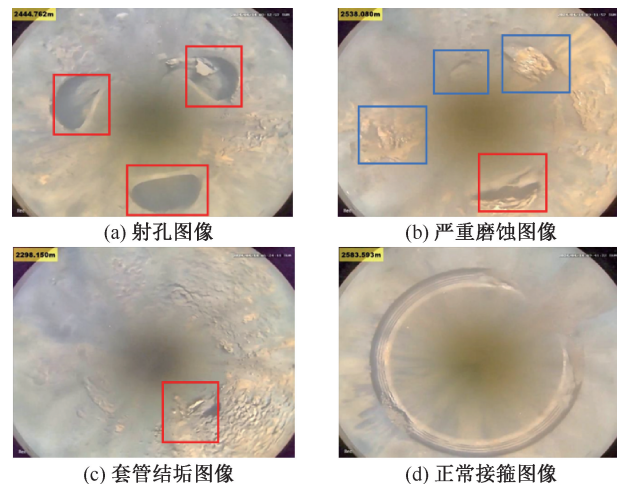


图6 不同情况的水力喷砂射孔

Fig. 6 Hydraulic sand jet perforation under different conditions

A井的测井结果显示,水力喷砂射孔的孔眼形态存在显著差异。通过视频分析软件,可以对孔眼的开启程度、堵塞情况等定量分析。例如,图6a展示了正常水力喷砂孔眼的图像,图6b展示了严重磨蚀的图像。这些图像为制定针对性的改造方案提供了重要依据。结合测井报告可知,爬行器工艺能使可视化成像检测系统正常作业。

#### 3.2 连续油管技术应用案例

B井为煤层气井,井深约为5300 m,其中3100 m为垂直井,2200 m为水平井。目的是通过可视化成像测井检测B井,通过连续油管输送可视化成像检测仪器,完成对井筒内压裂后压裂

层段套管形态、射孔孔眼变化、等进行影像采集,并通过采集资料对炮眼冲蚀情况进行分析,评估压裂效果。如图7所示,可清晰见到欠腐蚀、堵塞射孔图像,套管内壁附着物图像和正常节箍图像。

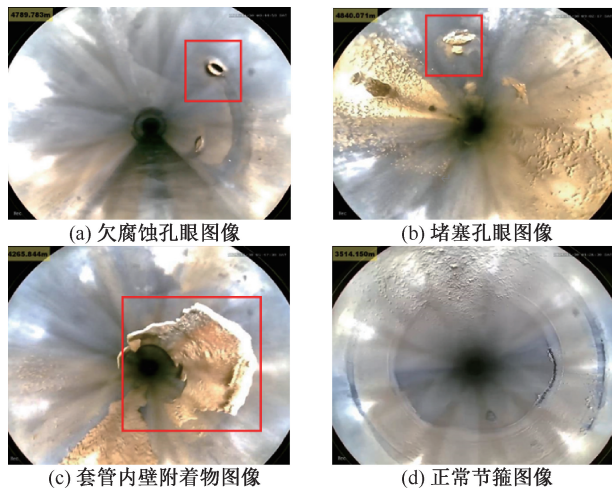


图7 不同情况的套管内壁

Fig. 7 Conditions of casing inner wall under different scenarios

B井的测井结果显示,在对井内的射孔进行识别统计,同时对射孔的磨蚀情况进行分析,该井在测量的629个测量孔眼中,欠磨蚀占比46.58%,中等磨蚀占比52.62%,严重磨蚀占比0.80%。结合测井报告可知,连续油管工艺能使可视化成像检测系统正常作业。

#### 3.3 穿缆连续油管技术应用案例

C井为油气井,井深约为3077 m,其中其中840 m为垂直井,2237 m为水平井。目的是对C井全射孔井段进行性观测,查看套管壁是否有桥塞滑落的痕迹。通过穿缆连续油管进行可视化成像检测射孔孔眼磨蚀情况结果如图8所示。

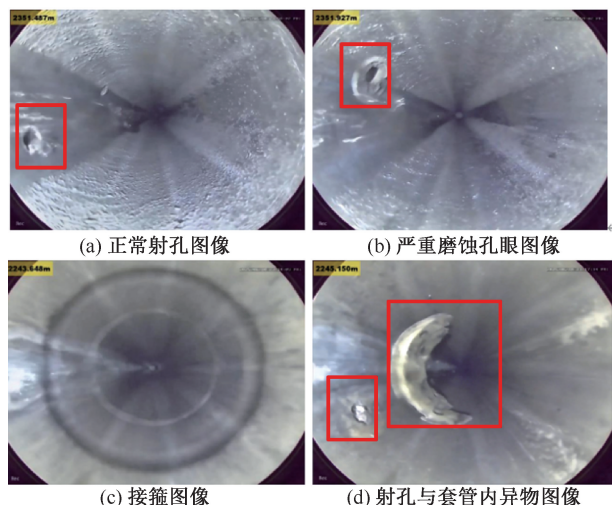


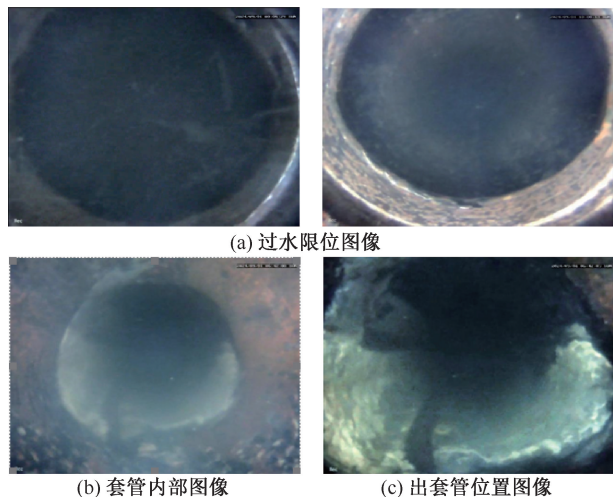
图8 不同情况的射孔及井筒情况

Fig. 8 Different perforations and wellbore conditions

C井的测井结果显示,可视化检测共录取到井筒内2 245~2 659 m的完整视频图像,视频录取率100%。射孔段设计共9段23簇492个射孔。有效测量段2 245~2 354 m,共2段5簇60个射孔孔眼,其中遮挡孔眼4个,遮挡率为6.67%;识别56个射孔孔眼,识别率100%;对可识别的射孔进行了定量分析。结合测井报告可知,穿缆连续油管工艺可以使可视化成像检测系统正常作业。

### 3.4 油管泵送技术应用案例

D井为油气井,井深约为4 600 m,其中1 800 m为垂直井,2 800 m为水平井。目的是通过可视化成像测井检测C井井筒内查看1 920~1 944 m裸眼段情况,为该井的下一步作业提供依据。如图9所示,油管泵送技术所使用的过水限位图像和套管内壁图像。



(a) 过水限位图像

(b) 套管内部图像

(c) 出套管位置图像

图9 套管图像

Fig.9 Casing image

C井的测井结果显示,1 913~1 921.064 m套管内壁完整,无明显异常,从1 921.142 m出套管进入裸孔段,1 921.2~1 943.7 m呈现裸孔状态,可见红褐色判断为原套管外壁,灰白色判断为水泥,黑色部分根据提供信息,判断为岩层,仪器在1 943.722 m遇阻。结合测井报告可确定,连续油管工艺能使可视化成像检测系统正常作业。

## 4 结论

(1)通过现场实践验证了井下电视成像可视化检测在水平井中的适用性,系统论证了电缆爬行器、连续油管、穿缆连续油管及油管泵送四种输出工艺的可行性。结果表明不同工艺可针对性解决水平井水平段仪器输送难题:如电缆爬行器主要针

对大斜度及水平井( $>60^\circ$ )工况实现自主爬行,无需流体介质驱动,适应复杂井眼轨迹,但要求工具串质量小于500 kg;连续油管主要应对超深井、高压井筒环境,具备强抗井喷能力,但存在无实时数据传输、深度与轨迹控制精度不足等局限;穿缆连续油管专用于超长水平井段,支持实时数据交互,但作业成本较高且下放速率受限;油管泵送聚焦极端工况(高温高压)及大尺寸工具输送,但作业周期长,且需严格保障井筒清洁度。可视化技术能直接获取井下影像(如射孔形态、套管内壁状态),解决了常规测井依赖间接数据解释的局限性,为水平井井筒评价、压裂效果分析及修井方案制定提供了直观的科学依据。

(2)验证了国内外公司开发的井下电视系统在水平井中的适用性。且首次提出了油管泵送创新工艺,通过过水限位设计利用流体推力解决水平段输送难题,突破了传统连续油管作业的作业弊端。开发了多工艺适配方案,克服了前人单一工艺的缺陷;确立了井液透光性的量化标准(浊度 $\leq 50$  NTU)。

(3)未来可开发智能化分析工具,集成AI的智能图像识别技术。当前依赖人工读判视频,容易造成较大误差。实时图像传输速率受电缆带宽限制较大,需开发更高效率的压缩算法。

致谢:感谢长庆油田分公司油气工艺研究院同意本文公开发表,感谢西安石油大学电子工程学院提供技术支持。

### 参考文献

- [1] 李国欣,朱如凯. 中国石油非常规油气发展现状、挑战与关注问题[J]. 中国石油勘探,2020,25(2):1-13.  
LI Guoxin, ZHU Rukai. Development status, challenges and key issues of unconventional oil and gas in china petroleum exploration industry [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 1-13.
- [2] 蔡恒亮,米硕,徐宏科,等. 石油水平井生产测井仪器输送工艺的研究[J]. 石化技术,2024,31(3):177-178.  
CAI Hengliang, MI Shuo, XU Hongke, et al. Research on conveyance technology of production logging tools in petroleum horizontal wells [J]. Petrochemical Industry Technology, 2024, 31(3): 177-178.
- [3] 许维修,牛步能,杜旭,等. 水平井测井技术中关键工艺及应用[J]. 化学工程与装备,2021(11):77-78.  
XU Weixiu, NIU Buneng, DU Xu, et al. Key techniques and applications in horizontal well logging technology [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2021(11):77-78.

- [4] 刘保山. 水平井生产测井施工工艺的研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(6): 175-177.  
LIU Baoshan. Research on operational procedures for production logging in horizontal wells[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2025, 45(6): 175-177.
- [5] 严正国, 张帆帆, 刘江波. 油气井可视化检测技术研究进展及应用展望[J]. 石油管材与仪器, 2024, 10(6): 14-18.  
YAN Zhengguo, ZHANG Fanfan, LIU Jiangbo. Research progress and application prospects of visual inspection technology for oil and gas wells[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2024, 10(6): 14-18.
- [6] 王波, 聂其海, 陈进娥, 等. 四维多波地震在油藏动态监测中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(2): 340-345.  
WANG Bo, NIE Qihai, CHEN Jin'e, et al. Application of 4D multi-Component seismic in reservoir dynamic monitoring[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56(2): 340-345.
- [7] 雷群, 胥云, 杨战伟, 等. 超深油气储集层改造技术进展与发展方向[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 193-201.  
LEI Qun, XU Yun, YANG Zhanwei, et al. Progress and development trends of stimulation technologies for ultra-deep oil and gas reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 193-201.
- [8] 谢维扬, 刘旭宁, 吴建发, 等. 页岩气水平井组产量递减特征及动态监测[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(2): 257-265.  
XIE Weiyang, LIU Xuning, WU Jianfa, et al. Production decline characteristics and dynamic monitoring of shale gas multi-well Pads[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(2): 257-265.
- [9] 赵金洲, 陈曦宇, 李勇明, 等. 水平井分段多簇压裂模拟分析及射孔优化[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(1): 117-124.  
ZHAO Jinzhou, CHEN Xiyu, LI Yongming, et al. Simulation analysis and perforation optimization for staged multi-Cluster fracturing in horizontal Wells[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(1): 117-124.
- [10] 张海博, 郭海敏, 戴家才, 等. 水平井持水率成像测井仪 CAT 的应用[J]. 石油仪器, 2008, 22(2): 33-34.  
ZHANG Haibo, GUO Haimin, DAI Jiakai, et al. Application of CAT holdup imaging logging tool in horizontal wells[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2008, 22(2): 33-34.
- [11] 严正国, 魏美丽, 吕国强. 基于 ONVIF 协议的井下电视客户端的研究[J]. 现代电子技术, 2018, 41(20): 165-167.  
YAN Zhengguo, WEI Meili, LYU Guoqiang. Research on downhole video client based on ONVIF protocol[J]. Modern Electronics Technique, 2018, 41(20): 165-167.
- [12] 张家田, 郑向秀, 吴银川, 等. 可视化测井技术的发展、装备及应用[J]. 测井技术, 2018, 42(5): 489-496.  
ZHANG Jiatian, ZHENG Xiangxiu, WU Yinchuan, et al. Progress, equipment and applications of visual logging technology[J]. Well Logging Technology, 2018, 42(5): 489-496.
- [13] 刘颖. 国内外老油田套损特征及大庆油田套损防控建议[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(6): 58-65.  
LIU Ying. Characteristics of casing damage in domestic and international mature oilfields and prevention suggestions for Daqing oilfield[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(6): 58-65.
- [14] YI Xifeng, LIU Yuguo, ZHANG Feng, et al. Image mosaic in visual detection of wellbore[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1894(1): 012060.
- [15] 程栋彬, 高志勇, 张小云. 基于信息复用的多路 x265 视频编码系统设计[J]. 电视技术, 2017, 41(1): 1-5.  
CHENG Dongbin, GAO Zhiyong, ZHANG Xiaoyun. Design of multi-Channel x265 video encoding system based on unformation multiplexing[J]. Video Engineering, 2017, 41(1): 1-5.
- [16] ZHOU Z, HE J, HUANG M, et al. Casing pipe damage detection with optical fiber sensors: a case study in oil well constructions[J]. Advances in Civil Engineering, 2010, 2010(2): 129-137.
- [17] 阎绍佑, 巨亚锋, 梁万银, 等. VideoLog 可视化测井油管接箍自动识别方法[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2020, 35(6): 115-118.  
KAN Shaoyou, JU Yafeng, LIANG Wanyin, et al. Automatic tubing coupling recognition method for VideoLog visual logging[J]. Journal of Xi'an Shiyu University (Natural Science Edition), 2020, 35(6): 115-118.
- [18] SHI P, JIANG Q, SHI C, et al. Oil well detection via large-scale and high-resolution remote sensing images based on improved YOLO v4[J]. Remote Sensing, 2021, 13(16): 3243.

编辑 吴志力

第一作者简介: 杨义兴, 男, 1976 年出生, 首席技师, 本科, 2011 年 7 月毕业于兰州大学工商管理专业, 现主要从事油气水井维护、大修打捞、增产增注、新工艺新技术研究试验等。电话: 13993481632, Email: yyx4\_cq@petrochina.cn.com。通信地址: 陕西省西安市经济开发区明光路长庆油田油气工艺研究院, 邮政编码: 710018。