

# 水平井深度可视化监测快速找水试验探索

刘汉斌<sup>1,2</sup>, 李大建<sup>1,2</sup>, 王晓飞<sup>3</sup>, 杨海涛<sup>1,2</sup>, 张桓<sup>3</sup>, 高晓涛<sup>4</sup>

1. 中国石油长庆油田分公司油气工艺研究院 陕西西安 710018

2. 中国石油低渗透油气田勘探开发国家工程实验室 陕西西安 710018

3. 中国石油长庆油田分公司第十二采油厂 甘肃庆阳 745000

4. 中国石油长庆油田分公司培训中心 陕西西安 710018

通讯作者: Email: ldj\_cq@petrochina.com.cn

项目支持: 中国石油集团(股份)重大专项“水平井找堵水技术试验”(2019F-28)

引用: 刘汉斌, 李大建, 王晓飞, 等. 水平井深度可视化监测快速找水试验探索[J]. 油气井测试, 2024, 33(1): 55-60.

Cite: LIU Hanbin, LI Dajian, WANG Xiaofei, et al. Depth visualization monitoring for rapid water detection in horizontal wells[J]. Well Testing, 2024, 33(1): 55-60.

**摘要** 为了实现低产液量水平井快速找水,突破常规井下电视测井在水平井找水测试领域的应用界限,提出水平井深度可视化监测快速找水技术。通过研发专用仪器接头,融合现有井下电视测井、套管外水泥胶结测井(RBT)、多臂井径成像+磁测壁厚测井(2M)技术为一体,设计形成了井下电视+RBT+2M为核心的深度可视化综合监测工艺管柱。矿场试验2口井,采用爬行器输送、预置测井仪的方式,在油井泵抽生产条件下,实现了井筒彩色全帧率视频图像、套管外水泥环胶结状况、套管壁厚及内径变化特征信息的全面监测,综合水平井段固井质量、井筒形貌特征、产层段产出状态分析,精准确定了出水位置,为水平井快速找水测试开辟了新方向。

**关键词** 水平井; 井下电视; RBT测井; 2M测井; 固井质量; 射孔孔眼; 压裂改造

中图分类号: TE358 文献标识码: B DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2024.01.010

## Depth visualization monitoring for rapid water detection in horizontal wells

LIU Hanbin<sup>1,2</sup>, LI Dajian<sup>1,2</sup>, WANG Xiaofei<sup>3</sup>, YANG Haitao<sup>1,2</sup>, ZHANG Huan<sup>3</sup>, GAO Xiaotao<sup>4</sup>

1. Oil&Gas Technology Research Institute of Petrochina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710018, China

2. Petrochina Low Permeability Oil and Gas Field Exploration and Development of the National Engineering Laboratory, Xi'an, Shaanxi 710018, China

3. Oil Production Plant No. 12 of Petrochina Changqing Oilfield Company, QingYang, Gansu 745000, China

4. Training Centre of Petrochina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710018, China

**Abstract:** In order to achieve rapid water detection in low yield horizontal wells and surpass the application limitations of conventional downhole television logging in water detecting tests, a technology for depth visualization monitoring of horizontal wells for rapid water detection was proposed. By developing specialized instrument connections and integrating existing downhole television logging, radial bond tool (RBT) logging, and multi-arm wellbore diameter imaging + magnetic thickness logging (2M) technologies, a comprehensive monitoring process string with downhole television + RBT + 2M as the core was designed, which realized depth visualization. Two wells were tested on site using crawler transportation and preset logging instruments. Under the conditions of oil well pumping and production, comprehensive monitoring of colorful fullview video images of the wellbore, the cement bond condition of the casing exterior, casing wall thickness, and inner diameter variation were achieved. By further integrating the cementing quality of the horizontal section, wellbore morphology characteristics, and production status of the producing layers, the precise determination of the water outlet location was achieved. This process opens up a new direction for rapid water detection tests in horizontal wells.

**Keywords:** horizontal well; downhole television; RBT logging; 2M logging; cementing quality; perforation holes; fracturing stimulation

井筒状态形貌、产层段产出特征的测试描述是水平井开发过程中一项重要测井内容主要为油井

井筒配套(蜡垢腐蚀预防等)、特殊处理(落物打捞)、措施调整(找堵水、重复改造、套损修复等)提

供重要参考依据,目前主要通过单项测井技术的应用来获取数据信息:如采用井下电视测井,可以直观获得井筒落鱼鱼顶形貌、揭示井筒漏失井段套管变形情况,以及结合形态学研究,对井下视频图像进行处理,通过特定参数的抽取获得套管接箍识别、射孔孔眼形貌尺寸差异特征,尤其是在生产条件下开展井下电视测井,在井筒井液透明度较高的条件下,通过产层段视频采集回放,还具备生动直观描述产出特征的潜力。梅俊炜、阚绍佑等结合井下电视测井视频图像进行套损、套管接箍识别研究应用<sup>[1-2]</sup>,王德福、张斌山、罗未平等开展了井下电视图像处理、标定研究,为拓宽井下电视测井应用打下基础<sup>[3-5]</sup>,刘卫、王元胜、黄志平等就井下电视在生产测井以及油田水平井上应用开展了研究,建立了油田开发动态监测新手段<sup>[6-8]</sup>,张家田、谢荣华等阐述了井下电视可视化测井技术、装备的发展及方向,就油田动态监测技术完善提出认识<sup>[9-11]</sup>。套管完井水平井套外水泥环胶结质量是衡量建井质量的一项重要指标,主要通过RBT(径向水泥胶结测井仪)测井来确定,通过RBT测井评价,对于油井后期各种措施选层、效果评价具有重要参考意义。MIT/MTT测井主要是用来揭示套管内壁因腐蚀、结垢结蜡等因素影响引起内径的变化特征,结合套管壁厚的变化,综合判断井筒套管完整性,定位腐蚀、套损、套变、结蜡结垢井段,指导后期井筒处理、井筒修复等措施<sup>[12]</sup>。单项测井技术应用能够获取特定条件下井筒状况信息,但在综合分析时容易产生片面理解认识,有时候还能引起错误描述。为了全面采集井筒信息数据,如果针对某口井分别开展不同类型监测内容测井,会大幅度提高测井成本,不利于低油价下油井降本增效政策的执行。

低渗透油田低液量水平井快速找水测试目前仍是行业内主要技术瓶颈之一,基于井下电视测井技术的发展,借鉴井下电视生产动态条件下采集产层段产出特征视频图像的技术方法,结合井筒形貌特征监测,在识别评价套损、串层、套管腐蚀穿孔等因素基础上,进行水平井段出水层段的有效识别,从而提出了融合现有水平井井下电视测井技术、套管径向水泥胶结测井技术、多臂井径成像+磁测壁厚测井技术为一体,通过井筒深度可视化综合测井实现水平井快速找水测试的技术路线;在此基础上,充分利用井下电视、RBT、2M测井技术仪器输送、监测数据存储、监测兼容的共性,设计了井下电

视+RBT+2M一体化测井工艺管柱,创新研制了兼容性测井仪器连接接头,首次成功将三种测井仪器有机连接,形成一体化测井仪器串;采用爬行器输送、预置测井仪至井下,在油井生产状态条件下,通过井筒内彩色全帧率视频图像采集、套外水泥环胶结质量信息连续监测、井筒套管壁厚及内径变化特征描述,全面掌握井筒内形貌特征、流体流型流态、产层段产出状态,实现水平井深度可视化测试达到快速精准找水目标;矿场探索试验2口井试验表明,成功捕捉到了水平段产层段出水、产油特征视频图像,客观展现了井筒蜡垢杂质堆积状态,为指导水平井后期控水措施调整、井筒处理提供了可靠数据资料,矿场应用意义重大。

## 1 深度可视化监测工艺管柱设计

针对抽油机有杆泵举升水平井,为了实现在泵抽条件下的井筒可视化测试,设计采用爬行器将测井仪器串输送预置到水平井段,然后在直井段下入泵抽管柱,测井铠装电缆从油套环空引出地面,实现一边泵抽、一边通过测井电缆控制爬行器在水平井段爬行、监测;井下电视、RBT测井仪、MIT/MTT测井仪通过专用接头进行连接,形成一体化测井工具串;井口配套专用测井井口,满足测井电缆起下作业及井口密封性;地面配套专用测井车配合,完成整套工艺测井过程中数据监测、传输、保存以及井下仪器参数调控(见图1)。

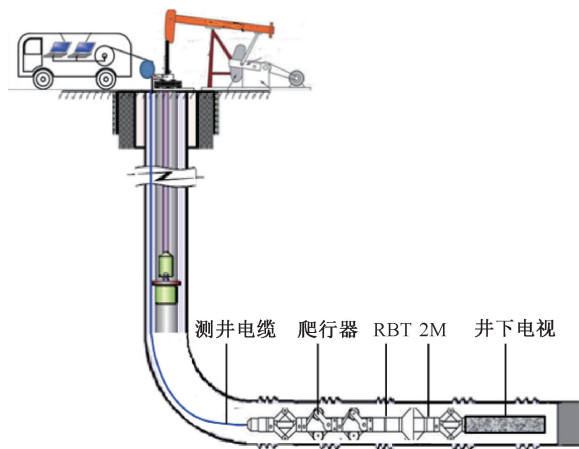


图1 井下电视+RBT+2M综合测井工艺管柱  
Fig.1 Downhole TV +RBT+2M integrated logging process string

## 2 测井仪器接头研发与选配

为有效集成、融合现有井下电视、2M、RBT测井仪器,提升工艺系统整体技术性能,研发了专用测

井仪器接头,实现了测井仪器间有效连接、适配;同时通过选配测井仪器、设计深度可视化监测工艺管串,满足了现场实施技术要求。

2.1 测井仪器接头研发

依据测试仪器端部接头相同扣型(43 mm 螺纹母扣)的兼容性特点,研发测井仪器连接通用接头,其中变径接头上端设计为 60.3 mm 螺纹母扣与爬行器端部公扣连接,同时设计了电缆穿越孔槽,方便后期变径接头下端测井仪器电缆穿越、连接;各测井仪器采用存储方式测井,测井仪器之间无需连接电线(见图 2)。



图 2 测井仪器连接接头  
Fig. 2 Logging tool connection joint

2.2 测井仪器选配

根据可视化综合监测工艺目的,在全面调研国内外测井仪器技术水平与现状前提下,综合考虑兼容性、先进性、仪器参数指标适应性,优选工艺相匹配的国内外公司测井仪器。

井下电视测井仪:优选目前国产 VideoLog 可视化测井仪,能够实现井下彩色全帧率视频图像采集功能,结合形态学处理,通过对抓取的图像、视频进行特殊处理,可以实现对井筒内特定物体、部位进行尺寸形貌的定量分析识别,外径 54 mm,长度 2.49 m,耐压 60 MPa,工作直流电压 200 V,帧率 1~25 fps,分辨率 352×288 px。

RBT 测井仪:优选 Sondex 公司研制的多扇区水泥胶结监测评价仪,满足水平井段套管外水泥环胶结质量、连续程度的精准监测、量化分析评价(见图 3),主要技术参数为外径 73 mm,长度 3.55 m,耐温 175 ℃,测速 800 m/h,换能频率 22 kHz。



图 3 RBT 测井仪  
Fig. 3 RBT logging instrument

MIT/MTT 测井仪:优选 Sondex 公司研制的 40 臂井径成像测井仪和高精度磁测壁厚测井仪(见图 4),分别对水平井段套管内壁形貌及套管厚度变化进行综合测试,分析解释套管内壁及本体的结垢结蜡、腐蚀以及套变状况,MIT 测井仪外径 70 mm,

长度 1.4 m,耐温 175 ℃,精度 2 mm,测速 600 m/h;MTT 测井仪外径 43 mm,长度 2.09 m,耐温 150 ℃,精度<15%管壁厚,测速 600 m/h。

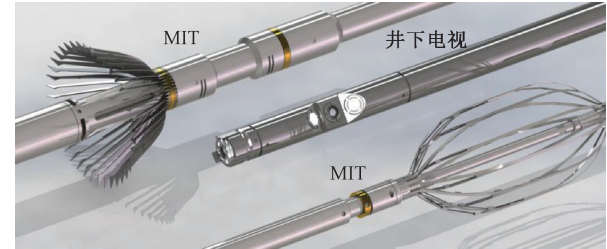


图 4 井下电视+2M 测井仪  
Fig. 4 Downhole TV +2M logging instrument

输送仪器:选配 BHGE 公司生产的 MDT 型号爬行器,外径 64 mm,耐温 150 ℃,最高速度 540 m/h,最大负载 907 kg,满足 1 000~1 500 m 水平井段爬行牵引。

3 矿场试验与出水位置判识

开展现场试验评价,验证深度可视化监测工艺的可靠、适应性能:通过现场井下电视视频图像采集、产层段产出特征描述,多臂井径成像、磁测壁厚监测与井筒形态形貌特征综合分析,判识了出水位置,达到了依据深度可视化监测进行找水测试的工艺目的。

3.1 选井与现场试验

基于井下电视测井对井筒液体透光性较高的要求,为了获得较高质量井筒内壁形貌特征、产层段产出特征、射孔孔眼形态差异变化监测数据与信息,优选 2 口不同压裂改造方式、高含水水平井开展现场测试对比试验。里平 X 井:日产液 13.55 m<sup>3</sup>,日产油 0.13 t,含水 99%,水力喷射多段多簇压裂改造 9 段,开展井筒静态条件下(无泵抽)可视化综合测试试验。徐平 X 井:日产液 8.20 m<sup>3</sup>,日产油 0.31 t,含水 96%,可溶球座体积压裂改造 12 段 81 簇,开展井筒静态与泵抽条件下可视化综合测试试验。

为了提高井下电视测试质量,测试前对井筒进行了通井、刮削、大排量活性水(清水)洗井作业,尤其是在洗井作业环节,要求井口返出液与泵入洗井液水质一致,保证井筒内液体透光性好。2021 年 7 月先后完成 2 口井现场测试试验,均取得了测试成功。

根据井下电视+RBT+2M 综合测试结果,分别开展产层段产出特征、井筒形态形貌特征以及综合监测结果进行了展示对比与解释分析。



3.2 产层段产出特征监测

根据水平井段采集的井下电视视频图像显示,沿井筒轴向监测方向,相对非泵抽,泵抽条件下水平井段产层段动态变化特征更明显,能够更容易发现微弱产出层段向井筒流动现象;主要出水层段产出特征表现为从侧向射孔孔眼向井筒明显的流动,产出水为黑色浑浊水或褐色浑浊水(见图 5a、5b),

产出液进入井筒后,与井筒液体快速混合,这一点从产油层段产出特征变化以及井口实际产出情况也能得到验证。产油层段主要表现为以油珠形式向井筒冒出(见图 5c),油珠产出后沿井筒轴向向跟部流动。同时也观察到很多射孔孔眼表现出静止、没有流体流动现象(见图 6、图 7),认为这些射孔孔眼可能没有产出贡献。



5a

5b

5c

图 5 徐平 X 井在泵抽条件下水平井段产出特征图像

Fig. 5 XP X well produced the feature image of horizontal section under pumping conditions

3.3 井筒形态形貌特征监测

根据井下电视采集孔眼形貌图像分析,不同压裂改造方式射孔孔眼形貌对比显示,水力喷射分段多簇压裂改造方式表现为每簇 2 孔,孔眼尺寸相对较大(见图 6),分析认为是由于水力喷砂射孔过程中,压裂液携压裂砂产生明显冲蚀效应是导致射孔孔眼变大的主要原因。多段多簇体积压裂改造方式表现为每每簇 3 孔,孔眼形貌、尺寸规则,孔眼尺寸小(见图 7)。

裂砂反吐堆积现象(见图 8b);水平井段产液流态看,水平井段层流现象明显,部分井段表现出明显油水分层流动特征(见图 8c)。



图 7 徐平 X 井人工火工射孔孔眼图像

Fig. 7 XP X well image of the artificial fire perforation hole

2M 测井结果显示,通过多臂井径成像、磁测壁厚监测数据解释分析,水平井段射孔孔眼形貌显示非常清楚,呈现射孔方位角、孔眼形貌大小差异化现象(见图 9a);同时不同位置井段出现一定程度的套管腐蚀引起井筒内径变大、甚至出现轻微穿孔问题(见图 9b)、结垢引起井筒内径变小现象(见图 9c)。

以徐平 X 井为例,水平井段套外水泥环胶结情况 RBT 监测结果显示,套管外水泥环第一、第二胶结面胶结程度整体良好,水泥环分布连续,综合评价固井质量较好,满足水平井段机械封隔器卡堵控水技术要求(见图 10)。



图 6 里平 X 井水力喷射射孔孔眼

Fig. 6 LP X well hydraulic jet perforation

从井下电视采集视频图像还可以观察到,即使经过大排量洗井作业,井筒内垢蜡及杂质堆积现象仍然严重、普遍,尤其是在水平井段趾部,分析认为由于通井过程中把井筒内部分垢杂质推移至水平井段趾部所致(见图 8a);部分射孔孔眼附近出现压



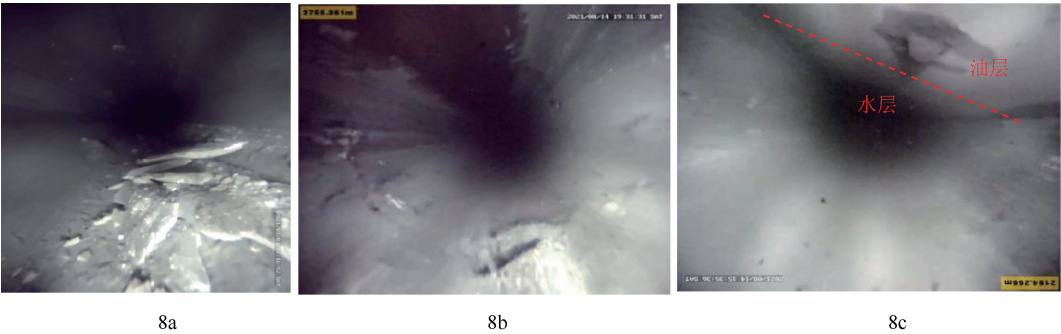


图 8 井筒垢堆积、层流、孔眼附近压裂砂反吐堆积图片

Fig. 8 Picture of wellbore scale accumulation, laminar flow, fracturing sand backflow accumulation near the hole

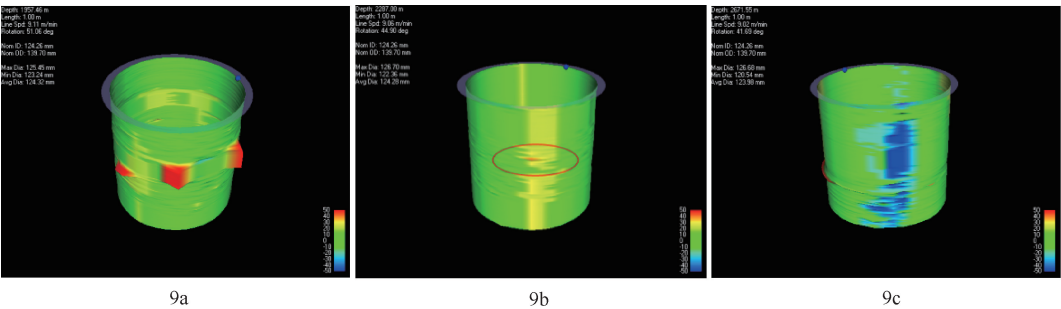


图 9 徐平 X 井水平井段 2M 测井图示

Fig. 9 The 2M well logging diagram of horizontal section of XP X well

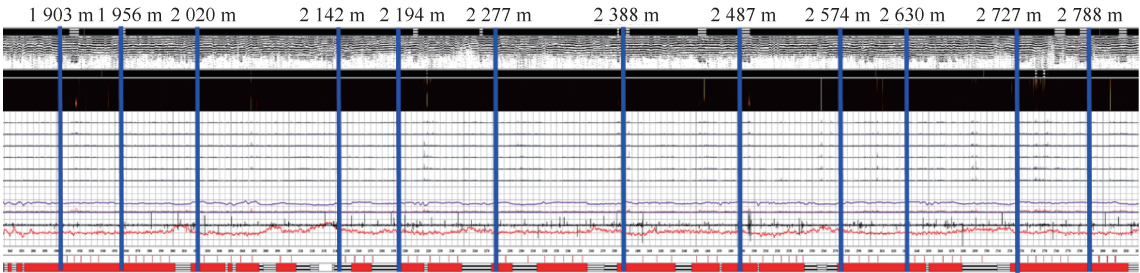


图 10 徐平 X 井水平井段固井质量测试结果图示

Fig. 10 Illustration of cementing quality test results of horizontal section of XP X well

3.4 综合测井判识出水位置

以徐平 X 井泵抽条件下综合测井结果为例,通过井下电视监测直观显示,在水平井段 2 319 m、2 598 m 位置,产出流体与井筒流体融合扩散,判断产出类型主要为产水;水平井段 1 906 m、2 653 m、2 755 m 位置,产出流体主要为油珠,与井筒流体不溶,并随着井筒流体向水平井跟端运移,判断主要为产油。同时结合井筒套管 2M 测井、RBT 监测资料数据看,主要产水层段位置附近套管完整,不存在腐蚀穿孔问题(见图 11);套外水泥环胶结状况良好,排除了套外其它出水层窜流的可能性;所以从井下电视+RBT+2M 综合监测结果分析认为徐平 X 井主要为两个出水段。

深度可视化测井,通过多手段测井方式有机融合联测,实现相关资料信息相互佐证、互相支撑,能够有效精准确定出水层段,排除出水层段判识的多

解性,这为水平井快速找水测试提供了一种新途径,也为水平井后期井筒措施的优选、措施方案优化提供依据。

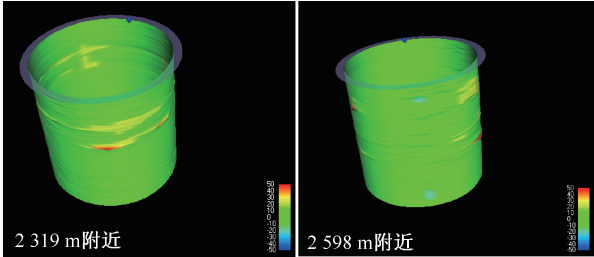


图 11 徐平 X 井主要出水位置 2M 测井图示

Fig. 11 The 2M logging diagram of the main outlet location of XP X well

4 结论

(1)在对现有测井技术调研基础上,利用井下电视+RBT+2M 测井仪器输送方式、存储式测井特

点、供电形式等方面的兼容性、互补性等特点,设计了井下电视+RBT+2M一体化综合测井工艺管柱,实现了深度可视化测井。

(2)井下电视+RBT+2M综合测井技术试验成功,验证了测井技术集成应用可行性,综合产层段产出特征、井筒形貌、套管水泥胶结固井质量等信息解释,能够快速精准判识水平井出水位。

(3)深度可视化测井监测出水位置试验,拓展了水平井快速找水技术手段,对测井联作跨领域应用具有一定借鉴意义。

**致谢:**感谢中油测井公司杨德龙、西安石油大学严正国老师给予视频图像处理分析、测试曲线解释方面的指导。

#### 参考文献

- [1] 梅俊炜. 连续油管井下电视技术在套损检测中的应用——以涪陵页岩气井为例[J]. 江汉石油职工大学学报, 2017, 30(3): 38-40.  
MEI Junwei. Application of Downhole TV technology of coiled tubing in casing damage detection [J]. Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers, 2017, 30(3): 38-40.
- [2] 罗未平. 非常规测井技术在水平井生产测试中的应用[J]. 石油钻采工艺, 1999, 21(4): 78-81.  
LUO Weiping. Application of unconventional logging technology in horizontal well production testing [J]. Oil Drilling & Production Technology, 1999, 21(4): 78-81.
- [3] 王元胜, 王晓峰. 电视成像测井技术在油田开发中的应用[J]. 河南石油, 2000, (6): 10-12.  
WANG Yuansheng, WANG Xiaofeng. Application of TV imaging logging technology in oilfield development [J]. Henan Petroleum, 2000, (6): 10-12.
- [4] 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. Development, equipment and application of visual logging technology [J]. Well Logging Technology, 2018, 42(5): 489-496.
- [5] 刘卫, 谭德庆, 李超, 等. 可见光井下电视在生产测井领域的应用[J]. 石油仪器, 2012, 26(2): 47-48.  
LIU Wei, TAN Deqing, Li Chao, et al. Application of visible downhole TV in production logging [J]. Petroleum instruments, 2012, 26(2): 47-48.
- [6] 王德福, 于景良, 孙鼎俊. 超广角井下电视系统在井下测量中的标定和应用[J]. 电子测量与仪器学报, 1999,

13(3): 34-39.

WANG Defu, YU Jingliang, SUN Dingjun. The definiens and application of super wide angle bore hole television system in bore hole surveying [J]. Journal of Electronic Measurement and instrumentation, 1999, 13(3): 34-39.

- [7] 黄志平, 戴恩汉, 范建玲, 等. 井下电视测井技术的应用[J]. 断块油气田, 2002, 9(3): 66-67.

HUANG Zhiping, DAI Enhao, Fan Jianling, et al. Application of Downhole TV logging technology [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2002, 9(3): 66-67.

- [8] 阚绍佑, 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 identification method of tubing based on VideoLog [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2020, 35(6): 115-118.

- [9] 张家田, 严正国, 胡长岭, 等. 井下视频成像测井技术[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(4): 714-717.

ZHANG Jiatian, YAN Zhengguo, HU Changling, et al. Down-hole video imaging technology [J]. Journal of instrumentation, 2007, 28(4): 714-717.

- [10] 张斌山, 严正国, 张郁山, 等. 视频测井图像处理技术与应用[J]. 测井技术, 2019, 43(4): 376-379.

ZHANG Binshan, YAN Zhengguo, ZHANG Yushan, et al. Video log interpretation processing technology and its application [J]. Well Logging Technology, 2019, 43(4): 376-379.

- [11] 谢荣华. 国内油田动态监测技术新进展及发展方向[J]. 测井技术, 2007, 31(2): 103-106.

XIE Ronghua. Recent progress and orientation of oilfield dynamic monitoring technologies in China [J]. Well Logging Technology, 2007, 31(2): 103-106.

- [12] 马涌贵, 朱坤, 胡友良. MIT 结合 RBT 测井资料在 H 油田套损评价方面的应用[J]. 石油管材与仪器, 2018, 4(5): 11-14.

MA Yonggui, ZHU Kun, HU Youliang. Application of MIT with RBT logging data for casing damage evaluation in H oilfield [J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2018, 4(5): 11-14.

编辑 程莹

**第一作者简介:**刘汉斌,男,1977年出生,高级工程师,2001年毕业于大庆石油学院石油工程专业,目前主要从事油田勘探、压裂与管理工作。电话:029-86590676, 13772150507, Email: lhb\_cq@petrochina.com.cn。通信地址:陕西省西安市未央区明光路长庆油田新技术开发中心, 邮政编码:710018。