

文章编号: 1004-1338(2018)05-0489-08

可视化测井技术的发展、装备及应用

张家田, 郑向秀, 吴银川, 苏娟, 罗青平

(西安石油大学电子工程学院, 光电油气测井与检测国家教育部重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要: 可视化测井是一种利用井下摄像机直接获取并眼视频图像的测井技术, 包括可见光井下电视、短波红外井下电视和 X 光散射成像井下电视等。可见光井下电视成像质量好, 应用领域广, 技术成熟度高, 但需要井液透光; 短波红外井下电视能够透视原油成像; X 光散射井下电视具有很强的介质穿透能力, 能在充满泥浆的裸眼井中获取并眼视频图像。新型测井电缆彩色全帧率井下电视兼具了光纤井下电视和鹰眼井下电视各自的优点, 是当前具应用前景的可视化测井技术, 对油气生产企业降本增效, 安全环保有重要意义。

关键词: 可视化测井技术; 可见光; 红外; X 光散射

中图分类号: P631.84 **文献标识码:** A

Doi: 10.16489/j.issn.1004-1338.2018.05.001

Development, Equipment and Application of Visual Logging Technology

ZHANG Jiatian, ZHENG Xiangxiu, WU Yinchuan, SU Juan, LUO Qingping

(Photoelectric oil and Gas Logging and Detection of the Key Laboratory of The Ministry of Education, College of Electronic Engineering, Xi'an Shiyu University, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: Visual logging is a kind of logging technology that directly uses the downhole camera to obtain borehole video images, which includes visible light downhole TV, shortwave infrared downhole TV and X-ray scattering imaging downhole TV. Visible light downhole TV is characterized by good imaging quality, wide application and high technical maturity, but it requires that the well liquid can transmit light. Shortwave infrared downhole TV can be imaged through crude oil. X-ray scattering downhole TV have strong medium penetration capabilities, which can capture borehole video images in open-hole wells filled with mud. These new well logging cable color full-frame downhole TV combines the advantages of optical fiber downhole TV and Hawkeye downhole TV. It brings the development of visible downhole television to a new historical stage and is the most promising visual logging technology. If sufficient attention and vigorously promotion are obtained, it will be of great significance for the oil and gas production enterprises to reduce costs and improve efficiency, as well as safety and environmental protection.

Keywords: visual logging technology; visible light; infrared; X-ray scatter

0 引 言

可视化测井技术通过利用面阵传感器(照相机、摄像机)获取井下静态图像或运动图像, 将传统测井技术所获得的曲线、二维图像等测井数据直接以图

像呈现, 直观高效。研究通过对可视化测井技术概念、分类、应用以及其发展作出综合论述, 分析其所存在的优势与局限。可视化测井技术能直观检测并眼、套管和井内生产状况, 在套损井治理和生产井监测中应用前景广阔, 可见光井下电视是当前可视化

第一作者: 张家田, 男, 1963 年生, 教授, 研究方向为电磁测量及仪器。E-mail: jtzhang@xsyu.edu.cn

通讯作者: 郑向秀, 女, 1993 年生, 硕士, 研究方向为信号与信息处理。E-mail: sugarn9396@163.com

测井发展和应用重点。测井电缆彩色全帧率井下电视兼备了光纤井下电视和鹰眼井下电视的优点,是重点推广和应用的可视化测井技术和装备。

1 可视化测井

1.1 定义及分类

2017年12月23日由西安石油大学和中国石油集团测井有限公司联合主办的“2017可视化测井与套管井诊断修复前沿技术研讨会”上正式提出了可视化测井的概念,并将可视化测井技术定义为利用面阵传感器(通常是照相机和摄像机)直接获取井下视频图像的一种成像测井技术。相比传统测井解释成像,可视化测井将井下状况进行直接的视觉呈现,具有直观、高效、信息量大、可信度高等优点,能最大程度地消除传统测井解释中存在的多解性和不确定性。

可视化测井技术目前主要包括可见光成像测井技术、短波红外(SWIR)成像测井技术及X光散射(Visuray)成像测井技术。

1.2 应用领域

可视化测井技术可以帮助油气生产企业生产技术人员看到井内实时状况和动态,不仅可用于井眼检测、套管检测、落物打捞、射孔产出、生产监测等领域,任何套管井、生产井和井下作业的检测需求都有可视化测井的用武之地。Visuaray成像测井由于X光良好的介质穿透特性,也可用于充满泥浆的裸眼井检测中。

2 可视化测井技术的发展

2.1 可见光井下电视

2.1.1 发展历史

(1) 同轴电缆井下电视。最早的井下电视测井开始于20世纪50年代,用电缆直接将摄像机放入井中进行观测,当时井下仪体积较大,耐温耐压和测井深度都非常有限,主要应用于水井检测。为将井下电视技术应用于油气井检测中,人们开始研究外径更小,耐温耐压性能更高,传输距离更远的专用井下电视测井装备。1963年,T. R. Reinhart^[1]介绍了一种采用长度5 000 m、外径 $\frac{9}{16}$ in* 双层铠装同轴电缆传输黑白模拟图像的井下电视。仪器直径 $4\frac{3}{4}$ in,最大测井深度4 600 ft,最高耐压5 000 psi**,最高耐温120 ℉。

同轴电缆井下电视能够传输流畅的黑白模拟视频图像,但是仪器外径和电缆外径较大,井口带压作业时,井控和配重要求较高,施工难度较大。

(2) 光纤井下电视。1992年,C. C. Cobb等^[2]介绍了一种利用外径 $\frac{7}{32}$ in 光纤测井电缆实时传输井下视频的测井系统。仪器外径 $1\frac{11}{16}$ in,最高耐压10 000 psi,采用模拟光调制技术,传输黑白模拟视频图像。仪器外径和电缆外径较小,适用于井口带压作业。同年,R. A. Rademaker等^[3]介绍了一种利用连续油管作业的光纤井下视频测井系统,采油连续油管技术,可将光纤井下电视应用于水平井和大斜度井,由于通过连续油管能够向井中泵入清水,边洗边测,有助于改善井液透光性和视频质量,同时也能达到给摄像头降温的作用,拓展了井下电视的应用范围。

光纤井下电视图像清晰流畅、实时性好,在井眼检测、套管检测、落物打捞、射孔产出、生产监测等方面取得广泛应用,然而随着油气井探测深度的增加,同轴电缆井下电视和光纤井下电视的局限性也逐渐突显。

(3) 鹰眼井下电视。1999年,J. L. Whittaker等^[4]指出了光纤井下电视在工作载荷、耐温以及防硫等方面的局限性,另外,由于同轴电缆和光纤电缆并非测井常规装备电缆,需要配备专用电缆滚筒和测井车,在航空运输和连续油管作业方面有很大不便。该文同时介绍了一种采用普通铠装测井电缆的“鹰眼”井下电视测井系统,适用于高温、高压、腐蚀性井液环境和水平井连续油管作业。鹰眼井下电视虽在井眼条件适应性方面有很大的进步,但由于测井电缆传输带宽的限制,只能传输黑白图像,第1代产品帧率仅为0.29 f/s。经过几代改进,帧率提高到0.59、0.9 f/s,但是图像的实时性和流畅度相比光纤井下电视有较大的差距。

鹰眼井下电视虽然图像不连续,但由于其采用普通铠装测井电缆,作业成本大大降低,并且适用于高温、高压、腐蚀性井液环境和水平井作业,在套管错断、套管变形、井眼阻塞、落物打捞等领域也有独特的技术优势,在全球范围内取得广泛认可和大规模应用。

(4) 测井电缆彩色全帧率井下电视。光纤井下电视图像实时、清晰、流畅,应用效果好,但需要专用

* 非法定计量单位,1 ft=12 in=0.304 8 m,下同

** 非法定计量单位,1 psi=6 894.76 Pa,下同

光纤滚筒和地面设备,成本较高、应用环境受限。鹰眼井下电视采用普通铠装测井电缆,环境适应性好,但图像实时性、清晰度、流畅度与光纤井下电视有较大差距。

如果能在测井电缆上达到光纤井下电视的视频效果,能极大地促进井下电视的技术的发展和应用,但由于光纤测井电缆结构和井眼环境适应性方面的原因以及普通铠装电缆带宽和传输速率的限制,井下电视测井技术及装备在 10 多年的时间里几乎没有大的进展。

2015 年,EVCAM 研制传输速率超过 200 kbit/s 的 Optis[®] HD Electric Line 井下电视测井系统,采用最新的井下视频技术,能够在单芯和多芯测井电缆上实时传输彩色高清视频,最大帧率可以达到 25 f/s。Tobben Tymons 等^[6]指出,单芯电缆高速遥传技术,视频处理和存储技术的结合及在井下电视中的创新应用,极大地降低了作业成本,提高了井下电视作业效率,拓展了井下电视的应用领域,将油气井监测带入到视频时代。

2017 年,西安石油大学研制 Visualog 系列测井电缆可视化测井系统,采用新一代测井电缆网络高速传输技术,实现了彩色全帧率网络视频在普通单芯/多芯铠装测井电缆上的实时传输^[7]。

测井电缆彩色全帧率井下电视的出现,兼备了测井电缆井下电视系统低成本、高可靠,井眼条件适用性强和光纤电缆井下电视实时性好,图像清晰流畅的优点,将可视化测井技术的发展和應用帶入到新的历史阶段。

2.1.2 可见光井下电视测井装备

目前,国内外井下电视测井装备主要包括光纤井下电视、鹰眼井下电视和测井电缆彩色全帧率井下电视 3 大类,可在中国提供井下电视测井服务的厂商和主要设备如下。

(1) Expro's DHV ViewMAX LiteTM Camera。Expro's 井下电视可将井下问题可视化,其井下电视测井技术已经通过超过 5 000 口油气井的应用得到证实。ViewMAX 光纤和测井电缆均可适用,具体技术参数见表 1。

表 1 Expro's DHV ViewMAX LiteTM Camera 主要技术参数

长度/ m	最大外 径/mm	重量/ kg	最高耐 温/℃	最高耐 压/MPa	最大帧率/ (f·s ⁻¹)
3.8	54	29.5	125	69	1.2 e-line, 30 光纤

(2) KateWell's KATEYE 鹰眼井下电视。KATEYETM 鹰眼井下电视可适应深井高温高压作业的复杂环境,该设备可通过单芯或 7 芯电缆下入井中,应用于油气井和水井等工业领域,其主要技术参数见表 2。

表 2 KateWell's KATEYE 鹰眼井下电视主要技术参数

最大外 径/mm	最大耐 压/MPa	最高耐温/ ℃	最大帧率/ (f·s ⁻¹)
54	103	125/150	1.5,单芯 460p×460p

(3) EVCAM's Optis[®] HD Electric Line。Optis[®] HD Electric Line 井下电视采用最新井下视频技术通过标准单芯/多芯铠装电缆传输实时彩色高分辨率视频。其主要技术参数见表 3。

表 3 EVCAM's Optis[®] HD Electric Line 主要技术参数

最大外 径/mm	最高耐 压/MPa	最高耐温/ ℃	镜头
43	103	125/150	彩色镜头和侧视镜头

(4) 西安石油大学 VLT54-5000A 彩色全帧率网络高清可视化测井系统。VLT54-5000A 彩色全帧率网络高清可视化测井系统,采用最先进的测井电缆网络高速传输技术,在 5 500 m 测井电缆上的数据传输速率最高超过 2 Mbit/s,具有电缆自适应特性和标准 10/100 M 以太网接口,可在单芯、多芯测井电缆上传输彩色全帧率网络高清视频图像,视频帧率可达 25 f/s,是真正的彩色全帧率井下电视。VLT54-5000A 主要技术指标见表 4。

表 4 VLT54-5000A 彩色全帧率网络高清可视化测井系统主要技术参数

最大外 径/mm	最高耐 压/MPa	最高耐 温/℃	图像分辨 率/dpi	最大帧率/ (f·s ⁻¹)
54	70	155	1280×720/ 640×360	25

2.1.3 可见光井下电视测井技术应用

可见光井下电视测井技术利用其获取的井下视频可直观高效地对井况作出判断,可广泛应用于井眼检测:井眼阻塞、变形、扩/缩径、坍塌;套管检测:套管腐蚀、结垢、变形、穿孔、裂缝、错断;落鱼打捞:落鱼位置、类型、鱼顶形状;射孔产出:产出类型(水、气、油)及产量评估;生产监测:产液类型、分层、出水、出砂、泄漏等。

(1) 套损检查。2018 年 4 月底,长庆油田某井停止产油,出液含水率 100%。前期在井壁中放置封隔器进行隔采作业,2 次放置封隔器后均未起到封隔作用且无法找到具体原因。为查找其原因,采用可见光井下电视对该井进行视频检测(见图 1)。

从图 1 可见,目标井上部井段井壁规则无明显异常,而到了 1 542.5 m 处目标井段套管结垢腐蚀严重,还观察到射孔段射孔炮眼同样结垢严重。严重的结垢可能是导致该井封隔器无法起到封隔作用和含水率上升无法正常出油的原因之一。利用可见光井下电视测井系统还观察到了该井清晰的套管接箍图像和人工井底图像,为判断套管是否脱扣、观察井底落物情况及制定打捞计划提供了可靠的资料。

(2) 落物捕捞。2018 年 1 月,可见光井下电视在中国中部某油田某井进行了井眼检测,配接国产 7 芯铠装测井电缆,采用缆芯 1 和 7 进行网络高速传输,网络连接速率超过 2 Mbit/s。图像分辨率

640 dpi×480 dpi,帧率 25 f/s,彩色图像。最大测井深度 1 982 m,作业时长 3 h,视频清晰流畅,无明显延迟,无卡顿现象。测井视频图像发现:井中落物(见图 2);部分井段套管接箍处有附着物堆积(见图 3);裸眼井段井眼严重不规则,有井壁侵蚀和扩径现象(见图 4)。

(3) 钻井事故核查。2018 年 5 月中国西北部油田某井发生钻井事故,钻机在钻井时钻破套管钻入地层,在原井眼旁边钻出新井眼,作业人员发现钻井循环上来循环物为泥浆后及时停钻。由于事故深度在 80 m 左右处,故停钻后先下入胶皮电缆井下电视观察,但胶皮电缆抗拉性等环境适应性较差,井下电视掉入井中。最后选用在铠装测井电缆上进行传输的可见光井下电视测井系统进行观察。测井结果见图 5 和图 6。

使用可见光井下电视进行 2 次检测,第 1 次在套管内直接观察,测井结果图 5。结果显示该井在 72 m

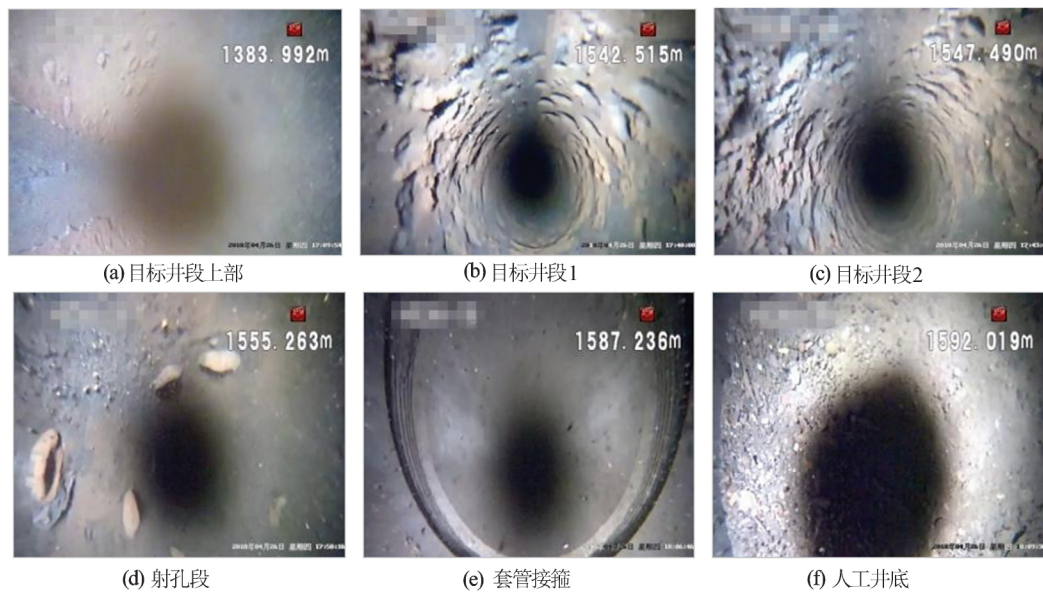


图 1 井底图像



图 2 井中落物图像



图 3 套管接箍处的附着物堆积



图 4 不规则井眼

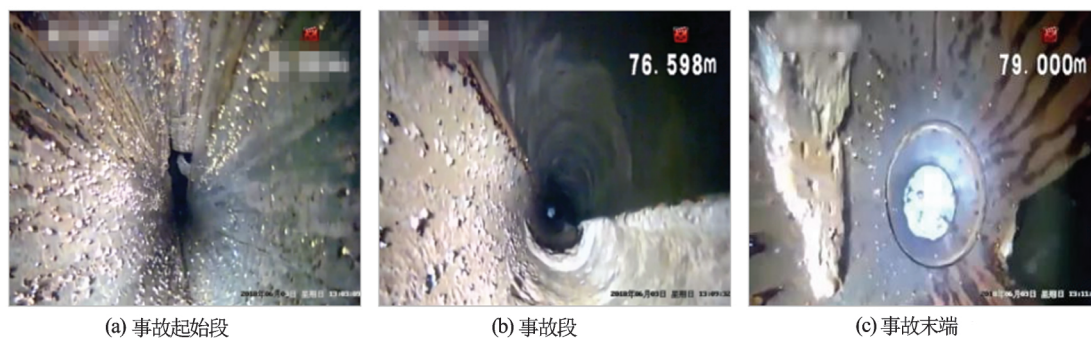


图 5 在套管内测井图像

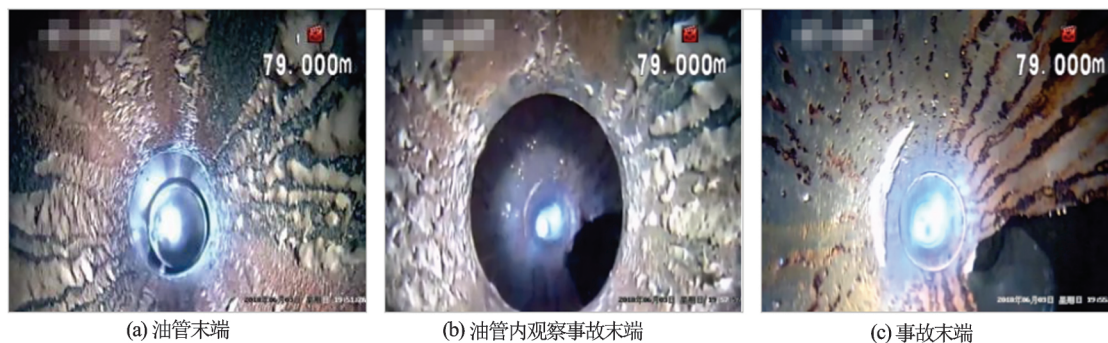


图 6 通过油管观察测井图像

处出现套管破损,仪器继续下放发现套破进一步扩大。在 76 m 处钻井事故钻出的新井眼几乎和原井眼平行。约 79 m 处套管破损消失,推测钻机彻底偏离,在旁边钻出新井眼。

为了鉴定该事故井中下入仪器是进入原正常井眼还是进入新的事故井眼。故先下入油管至目标位置,再在油管内下入井下仪。测井结果见图 6。在 79 m 处发现液面,然后在井下仪不动油管上提一段

距离之后井下仪发现套损结束位置。

对比2次测井结果发现,钻机在该井72 m处开始偏离原井眼方向,之后偏离程度逐渐加大,在约79 m处彻底偏离,在原井眼旁边钻出新井眼。通过在井筒内先下入油管,之后再在油管内下入井下仪观察,确定了正常的仪器下入会进入原井眼而不是进入新的事故井眼,这些资料进一步说明该井存在修复的可能性。

(4) 可见光井下电视测井技术工艺要求。可见光井下电视测井技术在实际测井过程中有一定的工艺要求,尤其是在井液替换及井壁刮削等方面。在测井之前,需用清水洗井直至替换原井液,待油水分分离彻底方可进行测井作业。如果油水分离不够彻底,导致井液浑浊透光性差,就会很大程度影响井下电视的使用。不仅不能获得清晰的井况视频,还可能导致仪器碰撞鱼头、缩径处等,造成仪器损坏进水。同时,如果是多年生产有严重结垢的被测井,在检查其井壁破损、变形和腐蚀时,需用刮削器对井壁进行刮削。否则,井壁上的结垢、油渍会掩盖实际井壁状况。所以,要提高测井成功率,必须做到:①进行落鱼打捞,即对落鱼位置、类型、鱼顶形状等进行确定时,只需对井液进行替换,洗井至井口进出水质一致。②当遇到套管腐蚀、结垢、变形、错断等情况,需用刮削器进行井筒刮削,在结蜡结垢严重段至少刮削3次以上,不畅通段多次重复刮削,确保井下电视测井技术作业要求。③当遇到井眼堵塞、变形,或找漏时,同样要用通井规进行通井,或打电缆桥塞。④以上均为井口不带压力测井,若遇到带压井,必须在下井前做好防喷工作。

以上工艺要求在一定程度上也是可见光井下电视测井技术的局限性,如果不能满足对井液井壁的要求,则不能获得清晰的井况视频。

2.2 SWIR 井下电视

可见光井下电视测井技术虽然取得了广泛的应用,但要求井液必须透光。而原油并不透光,因此,井下电视测井前需要洗井。为了让井下电视能透过原油获取井眼图像,降低井下电视对井液透光性的要求,开始研究透视原油成像的井下电视测井技术和装备。

1999年,John A. Hother 申请了英国专利“borehole imaging system”,发明了一种波长在可见光波段之外的井下电视系统^[11],同年,申请了美国专利“imaging sensor”,发明了一种用于井下电视的图像传感器,工作波长超出可见光波段,工作于红

外波段^[12]。2001年,John A. Hother, SPE/Proneta Ltd 发表了透过原油拍摄到的硬币表面图案^[13]。2002年,John A. Hother 进一步发表了其利用原理样机在原油中拍摄到的图像^[14]。2004年,John A. Hother 申请了美国专利“Imaging sensor optical system”,发明了一种应用于井下电视图像传感器的光学系统,可选择发射/检测2种不同波段的光^[15]。2016年,Jinyin Yang 采用 SWIR 高速摄像机拍摄到水滴滴入原油的过程,原油在 SWIR 摄像机画面中完全透明^[16](见图7)。

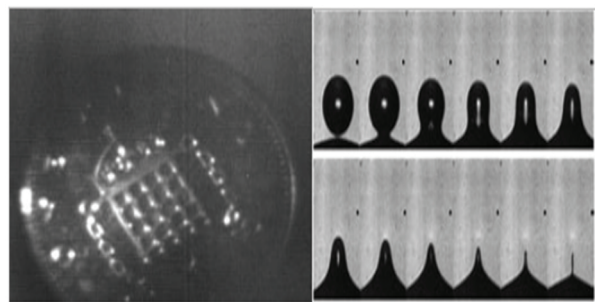


图7 透过原油拍摄到硬币的图像及水滴滴入原油过程的图像

SWIR 镜头可透视原油已经被充分证实,但在 Jinyin Yang 的实验中,水在 SWIR 镜头下却是完全不透明的。油气井中最常见的介质是空气、水、原油及其混合物,因此,需要找到使油水均透明的方法才具有应用价值。John A. Hother 尝试用2种波长的光分别解决透视水和透视原油的问题,但由于不同波长的光焦平面不同,镜头设计仍然有较大难度。

John A. Hother 和 Jinyin Yang 的研究使得我们看到了研制透视原油的 SWIR 井下电视的希望,但仪器的研制还有关键的技术问题有待解决。

2.3 Visuray 井下电视

SWIR 井下电视虽有望解决原油透视的问题,但仅限于透视原油,为了使井下电视具有更好的井内介质穿透特性,使井下电视不仅适用于套管井和生产井,也适用于充满泥浆的裸眼井检测,X射线井下电视进入了人们的研究视野^[19]。Visuray 项目团队通过近10年的努力,研制成功了 Visuray X 光散射井下电视成像测井装备。2005年,项目团队在实验室透过泥浆拍摄到井眼图片^[20]。2007年,长4 m,直径9 in 的原型机在 Stavanger 外的 Ullrigg 试验井进行了实验。2015年,外径3 5/8 in,适用于铠装测井电缆,型号为 VR90 的商用测井仪在德国进行了井下试验。2017年,第2代产品 VR90s 研

制成功^[21]。

Visuray X 光散射井下电视测井系统能够具有良好的介质透视特性,相比较其他成像测井技术,几乎不受井液的影响,适用于油、气、水以及泥浆等多种介质,能够节约洗井或井液置换等作业的成本,提高测井效率。透过泥浆拍摄到井眼图像,通过解释可合成三维图像,但由于发生散射的 X 光非常微弱,检测难度大,图像的分辨率、视觉效果和可见光井下电视相比有较大差距。井内高温、高压环境对设备环境适用性要求较高。同时井眼的尺寸要求设备必须小型化,而目前的 X 光检测设备大多庞大(见图 8)。

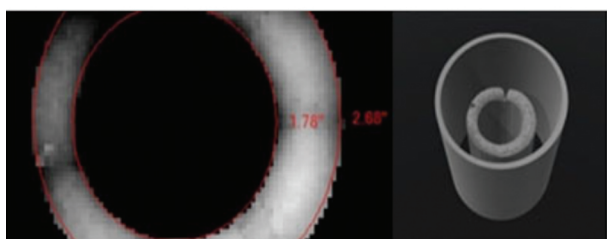


图 8 Visuray 拍摄到的套管阻塞物图像及三维解释结果

3 可视化测井技术对比与应用前景分析

就目前发展阶段而言,可见光井下电视整体作业成本低、检测效率高、检测结果直观,能帮助油气生产企业掌握油气井健康状况,病变部位及原因、生产状况及生产能力。具备较好的应用基础,丰富的应用案例,新型测井电缆彩色全帧率井下电视兼具了光纤井下电视视频实时流畅高清的特性和测井电缆井下电视低成本、高可靠、井眼条件适宜性广的优点,突破了井下电视发展的技术瓶颈,将可视化测井技术带入到新的发展阶段。除对仪器本身耐温、耐压性能,光源不断地提升,可结合四十臂井径仪,磁壁厚测井仪等成熟的测井仪进行组合测井,也可结合一些打捞工具直接对井况进行处理,使得测井结果更全面、有效。

可见光井下电视要求井液透明这一局限仍不可忽略,SWIR 井下电视虽解决了可见光井下电视洗井这一问题。但由于不同波长的光焦平面不同,镜头设计仍然有较大难度,还不具备商用条件。Visuray 虽可商用,但应用案例较少,应用效果还有待验证,加之技术普及程度、生产成本和产能的限制,还不具备大规模应用条件。但他们为可视化测井技术提供了未来发展方向和想象空间。

随着中国对环境保护重视程度的提高和污染治理投入的加大,以及油气生产企业发展转型对成本控制 and 效益考核的要求,可视化测井的需求会有快速甚至是爆发式的增长。

4 结论

(1) 可见光井下电视虽有一定的局限性,但整体作业低成本、检测效率高、检测结果直观明了,目前仍是可视化测井发展和应用的重点。

(2) SWIR 井下电视和 Visuray 井下电视,由于其技术普及程度、生产成本和产能的限制,不具备大规模应用条件。但他们为可视化测井技术提供了未来发展方向和想象空间。

(3) 可视化测井装备应当与常规测井装备实现组合测井,成为生产测井和工程测井的必备工具。

(4) 可视化测井技术能直观检测井眼、套管和井内生产状况,在套损井治理和生产井监测中应用前景广阔,应得到足够重视和大力发展。

参考文献:

- [1] REINHART T R. Down-hole television [J]. Drilling and Production Practice, 1963(1): 63-125.
- [2] SCHULTZ P K. A Real-time fiber optic downhole video system [C] // Offshore Technology Conference, Houston, USA, 4-7 May 1992.
- [3] RADEMAKER R A, OLSZEWSKI K K, GOIFFON J J, et al. A coiled-tubing-deployed downhole video system [C] // The 67th Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE24794, Washington, 1992.
- [4] WHITTAKER J L, SCHULTZ P K, BAKER D L. Development of a portable downhole camera system for mechanical inspection of wellbores [C] // The International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium, SPE54105, USA, 1999.
- [5] Expro Downhole video [EB/OL]. <https://www.exprogroup.com/products-services/well-intervention/cased-hole-intervention/downhole-video-and-camera-services/downhole-video>.
- [6] TOBBEN T, SUSAN M. Moving the oil and gas sector into the video age: vision assisted well interventions reduce cost and add value [C] // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, SPE-183270-MS, Abu Dhabi, 7-10 November, 2016.
- [7] 严正国, 严正娟. 通过铠装测井电缆获取井下彩色全帧率视频的装置及方法: CN107529037A [P]. 2017.

- [8] 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(4): 714-717.
- [9] 严正国, 张家田. 井下电视图像压缩技术 [J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2007(5): 94-97, 129-130.
- [10] MADDOX S. Perforation-specific inflow fluid characterization with downhole video [C] // The 1998 SPE India Oil and Gas Conference, 7-9, April 1998
- [11] JOHN A H. Borehole imaging system: GB2332331A, 13. 04 [P]. 1999.
- [12] JOHN A H. Imaging sensor; US6472660B1 [P]. 2002-10-29.
- [13] JOHN A H. Imaging through crude oil with high resolution [C] // The 2001 SPE Annual Technical Conference, Louisiana, 2001.
- [14] JOHN A H, ROBERT A C. Seeing through crude oil: results from demonstrator [C] // The 2002 Offshore Technology Conference, OTC14194, Houston, Texas, USA, 6-9 May, 2002.
- [15] JOHN A H, ROBERT A C. Imaging sensor optical system; US20040211894A1 [P]. 2004-10-28.
- [16] YANG J Y, GUO J, JIANG W W. A novel drop-fall algorithm based on digital features for touching digit segmentation [C] // Information Technology Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON) 2016 IEEE 7th Annual, 1-4, 2016.
- [17] 楚广生, 宋玉龙, 李祥琛, 等. 基于 SCMOS 的近红外透雾成像系统 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(6): 138-141.
- [18] 夏琳茜. 一种基于近红外光谱透雾系统的原理与实现 [J]. 红外与激光工程, 2007, 6(36): 234-237.
- [19] COOK J M, GARRY G, GEEHAN T M, et al. Mud/shale interaction: model wellbore studies using X-ray tomography [C] // The SPE/IADC Drilling Conference, SPE/IADC 25729, Amsterdam, 23-25 February, 1993.
- [20] VISURAY. VR90® X-ray diagnosis illuminate problem with stuck tubing [EB/OL]. <http://www.visuray.com/case-studies/illuminating-a-problem-with-stuck-tubing>.
- [21] VISURAY. An iamging revolution [EB/OL]. <http://www.visuray.com/about-us/about-visuray>.
- [22] VISURAY. VR90® service shows clear solution to stuck tubing [EB/OL]. <http://www.visuray.com/case-studies/assessing-top-of-twisted-off-tubing-section>.
- [23] VISURAY. Determining position of stuck fish [EB/OL]. <http://www.visuray.com/case-studies/determining-position-of-stuck-fish>.
- [24] MELISSA S, MORTEZA E, SPENCER G, et al. X-ray backsatter imaging in an oil well [C] // The SPE Annual Technical Conference and Exhibition, SPE-170706-MS, Amsterdam, 27-29 October, 2014.
- [25] MELISSA S, RADU A, JUAN A, et al. Innovation wireline X-ray diagnostic service reduces risk during well intervention; a case study [C] // Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, SPE-183171-MS, Abu Dhabi, 7-10 November, 2016.
- [26] SPANNUTH M R, ACHIHAI J A, GONZALEZ C, et al. Improving intervention efficiency with a novel X-ray diagnostic service; a case study [C] // The SPE/ICo TA coiled Tubing&Well Intervention Conference & Exhibition, SPE-184798-MS, Houston, TX, USA, 21-22 March, 2017.
- [27] TEAGUE P N. Imaging of backscattered ionizing radiation—a key enable for through mud borehole imaging [C] // The Offshore Technology Conference, OTC-21667, Houston, 2-5 May, 2011.
- [28] CALLERAME J. X-ray backscatter imaging: photography through barriers [J]. Powder Diffraction, 2006, 21(2): 132-135.
- [29] MCNICOL J, JOPPE B. Working smarter on well intervention operations [C] // The IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, IADC/SPE-115216, Jakarta, 25-27 August, 2008.
- [30] WALKER G F [C] // The SPE eastern regional meeting, SPE-13360-MS, Charleston, 31 October-2 November, 1994.

(收稿日期: 2018-07-12 本文编辑 余迎)

科技论文中英文摘要编写四要素

目的——研究、研制、调查等的前提、目的和任务以及所涉及的主题范围

方法——涉及的原理、理论、条件、对象、材料、工艺、结构、手段、装备、程序等

结果——课题的结果、数据,被确定的关系,观察的结果,得到的效果、性能等

结论——结果的分析、研究、比较、评价、应用,以及提出的课题、假设、启发、建议、预测等