

连续油管分布式光纤测井技术在产出剖面中的应用

林清金¹, 沈开元², 蒋应飞², 罗强¹, 姚杰¹, 陶春呈²

1. 中国石油塔里木油田分公司东河采油气管理区 新疆库勒 841000
2. 中国石油集团西部钻探工程有限公司试油公司 新疆克拉玛依 834000

通讯作者: Email: xjsyjyf@cnpc.com.cn

项目支持: 中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司重大科技专项“碎屑岩油藏开发中后期提高采收率关键技术研究与应用”(2018E-1805); 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“陆相中高成熟度页岩油勘探开发关键技术研究与应用”(2019E-2606)

引用: 林清金, 沈开元, 蒋应飞, 等. 连续油管分布式光纤测井技术在产出剖面中的应用[J]. 油气井测试, 2023, 32(1): 58-62.

Cite: LIN Qingjin, SHEN Kaiyuan, JIANG Yingfei, et al. Application of coiled tubing distributed optical fiber logging technology in production profile [J]. Well Testing, 2023, 32(1): 58-62.

摘要 传统生产测井工艺的井下测试仪器易被塔里木东河油田注气受效井井筒内沥青质糊死, 不能完成涡轮流量曲线测量, 流体密度测量也受到较大影响。引进的连续油管光纤测井技术将光纤穿入连续油管, 随着连续油管下入井中, 实现全井段的温度和声波等参数实时测量。测井过程中不需要来回移动光缆, 消除了传统测试工具必须在井中来回移动测量扰动井内环境平衡造成的数据偏差, 使测井结果更高效、更准确。结合油藏、地质工程数据, 对解释成果进行分析, 结果与实际生产情况相符, 验证了连续油管分布式光纤测井的适用性和技术优势。该技术在××1-10H 井成功应用, 为油田油气井动态监测提供了新的技术手段。

关键词 注气开发; 连续油管; 光纤测井; 实时测量动态监测; 温度; 声波; 产出剖面; 储层评价

中图分类号: TE355 **文献标识码:** B **DOI:** 10.19680/j.cnki.1004-4388.2023.01.010

Application of coiled tubing distributed optical fiber logging technology in production profile

LIN Qingjin¹, SHEN Kaiyuan², JIANG Yingfei², LUO Qiang¹, YAO Jie¹, TAO Chuncheng²

1. Donghe Oil and Gas Production Management Area, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China
2. Oil Testing Company, Western Drilling Engineering Co., Ltd., PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China

Abstract: In the Donghe oilfield, the Tarim Basin, the downhole testing instrument used in traditional production logging process is easily smeared by asphaltene in wellbores affected by gas injection, which disables the measurement of turbine flow curve and also impedes the measurement of fluid density. The imported coiled tubing optical fiber logging technology can realize the real-time measurement of parameters such as temperature and sound waves in the entire wellbore, by penetrating the optical fiber into the coiled tubing to allow it run together with the coiled tubing into the wellbore. The logging results are more efficient and accurate, since this technology does not need to move the optical cable back and forth, as do as traditional testing tools which must be moved to realize measurement, which disturbs the environmental balance in the wellbore and thus leads to data deviation. Combined with reservoir and geological engineering data, the interpretation results were analyzed. The analysis results are consistent with the actual production situation, which verifies the applicability and advantages of the coiled tubing distributed optical fiber logging technology. This technology was successfully applied in Well ××1-10H. It provides a new option for dynamic monitoring of wells.

Keywords: gas injection; coiled tubing; optical fiber logging; real-time measurement; dynamic monitoring; temperature; sound wave; production profile; reservoir evaluation

塔里木东河油田进入开发后期, 通过注天然气提高采收率。注气开发过程中, 注气受效井逐步出现沥青质在井筒沉积的现象, 传统测井工具下入后, 极易出现被沥青质糊死, 导致部分资料录取不上或录取资料不准确。刘军严等^[1]、任利华等^[2]针

对塔里木油田采用光纤式永久温压监测系统技术, 得出了光纤测试技术能够实时快速地实现油气井温度和声波数据的采集。光纤测试方式可分为油管外永久式和光纤连续油管测试, 永久式光纤测试虽然可以实现长期的井下监测, 但工艺复杂, 费用

较高^[3];连续油管光纤测井技术,将光纤穿入连续油管内部,随着连续油管下入井中,实现全井段温度和声波等参数实时测量。测井过程中不需要来回移动光缆,消除了传统测试工具必须在井中来回移动测量扰动井内环境平衡造成的数据偏差,使测井结果更高效、更准确^[4-5]。

1 测试原理

连续油管分布式光纤产出剖面测试将光纤穿入连续油管内部,只需将连续油管下入到目的层段,利用光的散射原理,得到在井下不同深度的温度、声波等参数的变化,实现全井筒测试。

1.1 分布式光纤测试技术原理

将穿有 DAS&DTS 光纤的连续油管下入到生产井目标层段,采用分布式光纤温度感应技术(DTS)和分布式光纤声波感应技术(DAS)组合的方式进行联合监测^[6]。光在光纤中传播后产生的反向散射光分别为瑞利散射、布里渊散射和拉曼散射三种(见图1)。其中拉曼散射中斯托克斯光对温度不敏感,反斯托克斯光对温度较敏感,反斯托克斯与斯托克斯光的比值与散射介质的温度成正比,实现光纤分布式温度测量^[7]。利用瑞利散射对振动(声波)敏感的特性,当振动(声波)作用在光纤上时,引起瑞利散射反向散射光的相位和强度变化,通过光强来实现对微弱振动和声波信号的检测和定位^[8]。

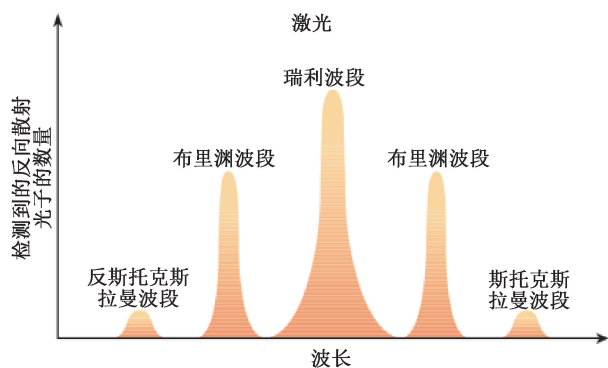


图1 反向散射光分布图

Fig.1 Backscattered light distribution diagram

1.2 散射光定位

分布式光纤测试过程中,一般采用光纤的光时域反射原理(即拉曼散射的温敏原理和温敏关系),对反向散射光进行定位^[9]。从发射激光脉冲进入光纤开始计时,可实时确定脉冲光与入射端的距离及该距离处的散射光返回发射端所需要的时间,得出不同时间的散射光对应的不同距离

信息^[10]。

散射光发生处与接收时间的关系为

$$L = \frac{ct}{2n} \quad (1)$$

式中: L 为光纤产生散射光的位置, m ; c 为真空中光速, m/s ; t 为脉冲光进入光纤到接收到回波信号之间的时间差, s ; n 为光纤的折射率。

通过高速采集不同时刻的光纤散射光信号,可以得到整根光纤每一点的信号值,从而实现分布式测量的目的^[11]。

2 测试资料解释原理

产出剖面解释以 DTS 数据解释^[12]为主,结合 DAS 数据解释来进行。DTS 数据解释使用一维热力学模型来模拟井筒射孔段在稳定产出状态下的温度响应^[13]。

2.1 基于 DAS 的生产评价原理

低频 DAS 信号对温度变化具有非常高的敏感性,可用于井筒内瞬态热段塞信号的监测。假定生产流体各相态均匀混合,DAS 测量信号 $D(x,t)$ 和井筒温度 $T(x,t)$ 之间关系如下

$$\beta D = \frac{\partial T}{\partial t} = -v \frac{\partial v}{\partial x} (T_p - T) + U(T_f - T) + G \frac{dz}{dx} \quad (2)$$

式中: β 为 DAS 光相位转换系数; v 为流体速度, m/s ; U 为井壁热传导系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; G 为生产流体温压系数; T_f 为周围岩层温度, $^\circ C$; T_p 为生产流体温度, $^\circ C$; T 为井内温度, $^\circ C$; z 为井垂直深度, m ; x 为井测量深度, m 。

式(2)两边对时间求导后可简化如下:

$$D = f(vt - x) e^{-Ux} \quad (3)$$

式中: t 为时间, s ; U 为衰减系数。

通过式(3)可得到累积流速百分比,累积流速百分比可等效为累积生产百分比。该方法能够可靠的测量瞬态下的流体速度,从而对各段簇进行生产评价,但流体速度测量的空间分辨率较低,无法对单个孔簇进行准确评价。

2.2 基于 DTS 的生产评价原理

基于 DTS 的生产评价使用一维热力学模型模拟井筒生产段在稳态下的温度响应。考虑井筒热力学模型计算网格的一个格点(见图2),设 x 为井筒轴向坐标,当前格点的长度为 Δx 的一个小量。设稳定生产时井口总产量的流体速度为 v ,产量积累分布为 $R(x)$,即生产段从趾端起 R 为 0,到跟端 R 为 100%。则当前格点流入的流体速度为 $vR(x)$,流体

温度为 $T(x)$; 设当前格点内新增生产流速为 $v\Delta R$, 生产流体温度为 T_p 。

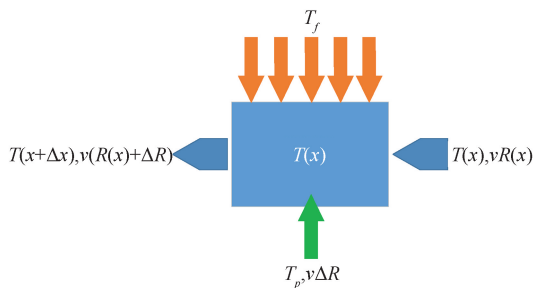


图2 一维稳态热力学模型格点示意图

Fig. 2 Grid diagram of one-dimensional steady-state thermodynamic model

设井筒周围岩层/油藏温度为 T_f , 对当前格点建立稳态热力学方程, 可得

$$\frac{dT}{dx} = \frac{U}{vR}(T_f - T) + \frac{1}{R} \frac{dR}{dx}(T_f - T - dT_{JT}) - G \frac{dz}{dx} \quad (4)$$

式中: U 为井壁热传导系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; dT_{JT} 为焦汤效应温差, $^\circ C$ 。

式(4)左边如写成差分形式即为 $(T(x + \Delta x) - T(x))/\Delta x$, 也就是井筒内流体在经过这一格点后的温度变化。公式右边第一项代表井筒热传导导致的温度变化, 第二项代表热对流导致的温度变化, 公式右边最后一项代表生产流体温压关系。生产剖面解释使用至少两个 DTS 的温度测量结果。一个是 T_f , 即井筒周围的储层温度, 由关井一段时间后的基线测量值代表。另一个则是稳产时的井内温度曲线 T , 即模型反演目标曲线。模型通常由上千个模型格点构成, 是一个非线性强的高维问题。模型的反演存在解的非唯一性, 即各段簇不同的产量分布可能对应相同的温度剖面, 无法满足准确的生产评价需要。

2.3 DAS&DTS 联合反演生产评价

假设稳产与关井—开井时测量的各生产簇的贡献比例保持不变, 超低频 DAS 测量得出的流体速度之比可以作为基于 DTS 温度测量的生产剖面模型的有效约束。基于 DAS&DTS 数据联合反演, 能够提高 DTS 反演精度, 从而对各段簇进行准确的生产评价。

首先, 各孔簇的产量标准化到 0~1 区间, 流体速度之比 R 定义为

$$R(x) = 1 - (1 - R_{bot}) \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{\sum_{i=1}^N P_i} \quad (5)$$

式中: P_i 为第 i 个孔簇标准化后的产量, P_x 为孔簇位置, R_{bot} 为趾端标准化后的流速。

$$\varepsilon^2 = \|T - T'\|_2^2 + \lambda \|R - R'\|_2^2 \quad (6)$$

式中: T' 为稳产阶段 DTS 测量的井筒温度, R' 为 DAS 测量的相对流速。

基于式(5)、式(6), 利用蒙特卡罗方法进行反演计算, 求取各孔簇的产量及不确定度, 从而对各段簇进行准确的生产评价。

3 现场应用

××1-10H 井是位于塔里木盆地塔北隆起东河塘断裂背斜带东河 1 号背斜上的一口开发井, 井深 6 331.00 m, 水平段 313.60 m, 油产量 89.40 m^3/d , 气产量 $2.48 \times 10^4 m^3$ 。为找出注气受效位置, 采用光纤连续油管进行 DTS&DAS 测试。该井先后在生产条件(气产量 $2.48 \times 10^4 m^3/d$ 、油产量 89.40 m^3/d)和关井条件下测试, 并获取流动温度和地温剖面。

3.1 DAS 产出剖面定性解释

光纤分布式声学传感器 DAS 通常用于测量声学信号, 每个测量频道的测量值实际上与该段局部光纤的长度变化正相关。实际上, 除了声信号(压力)以外, 温度变化信号也可以使局部光纤段长度发生变化。经过信号处理后, 超低频的 DAS 信号可用于观测微小的温度变化。

××1-10H 低频 DAS 数据经处理, 开井瞬间低频 DAS 监测结果见图 3 所示。

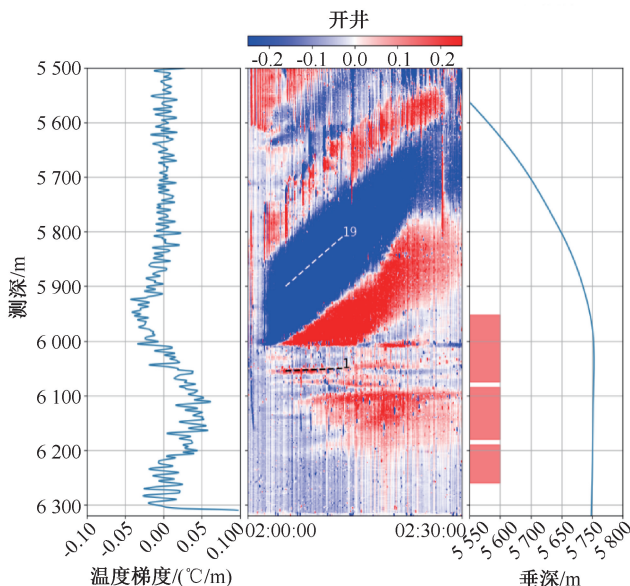


图3 开井瞬间低频 DAS 监测

Fig. 3 Instantaneous low frequency DAS monitoring during well opening

第一道是温度梯度曲线,在 5 900~6 000 m 附近出现明显的温度负异常。第二道是生产制度下低频 DAS 数据处理结果,低频 DAS 显示 6 010 m 以下井段未见有明显的流体产出。6 010 m 以上地层,有显著的向直井段流动的温度段塞流信号。对温度段塞流信号求解流速,能够约束 DTS 反演模型,提高产出剖面解释精度。

3.2 DTS 产出剖面定量解释

××1-10H 井录取了关井和稳定生产阶段的 DTS 数据。对原始 DTS 数据进行校深、校正后,为减小测量误差,以关井阶段及生产阶段录取的 DTS 数据平均值作为最终井温数据。关井和稳定生产阶段录取的 DTS 温度曲线见图 4,温度剖面见图 5。

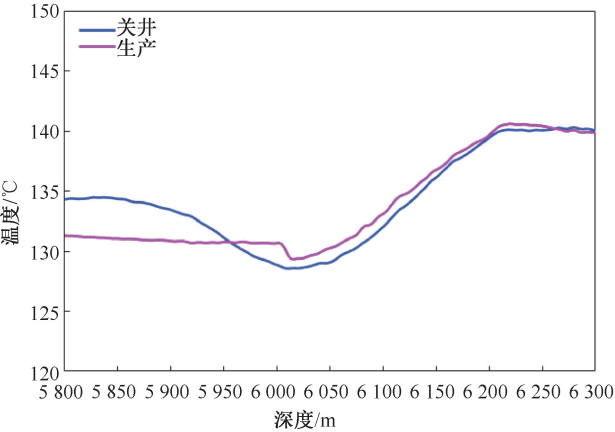


图 4 关井及生产阶段温度曲线
Fig. 4 Temperature curves during shut-in and production phases

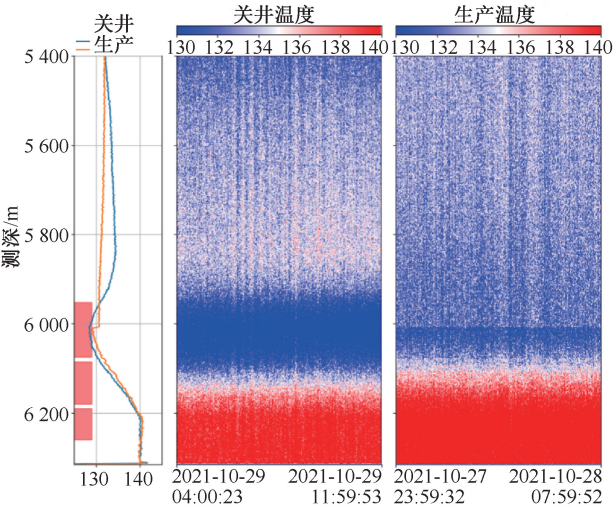


图 5 关井及生产阶段温度剖面
Fig. 5 Shut-in and production temperature profile

可以看出,××1-10H 井关井阶段温度曲线在 5 950~6 080 m 显示出非常显著的冷却效应,稳定

生产阶段在 6 010 m 附近出现了明显的温度变化。说明该井段是主力生产层,其他井段生产贡献很低。基于稳态热力学模型,利用蒙特卡洛方法对稳定生产下采集的 DTS 温度数据进行反演,见图 6 所示,求取生产贡献比例最优解。

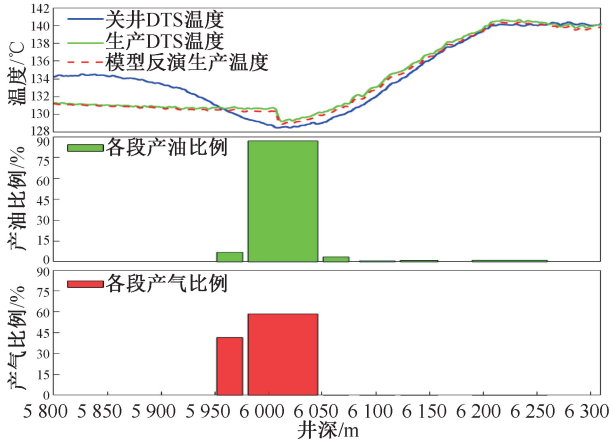


图 6 生产阶段各层段生产贡献
Fig. 6 Production contribution of each layer in the production stage

通过以上处理、分析,得到该井稳定生产下产出剖面测井解释成果,见表 1 所示。

表 1 稳定生产下生产贡献百分比
Table 1 Production contribution percentage under stable production

序号	层位	顶深 /m	底深 /m	油产量 / (m ³ ·d ⁻¹)	气产量 / (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)
1	C	5 952	5 976	6.06	1.03
2	C	5 976	6 051	77.69	1.45
3	C	6 051	6 075	3.13	0
4	C	6 085	6 118	0.64	0
5	C	6 118	6 163	0.89	0
6	C	6 190	6 260	0.98	0

由表 1 可见,本井生产层段主要位于水平段跟部(5 952.00~5 976.00 m、5 976.00~6 051.00 m),其他井段产量贡献很低。

4 结论

(1)连续油管分布式光纤测井技术在××1-10H 井成功应用,解决了塔里木东河油田注气开发后,注气受效井生产过程中沥青质析出导致动态监测资料录取少的问题,为塔里木油田油气井动态监测提供了新的技术手段。

(2)分布式声波传感系统的低频 DAS 信号对温度变化具有非常高的敏感性,通过开井和关井期间的热段塞流流速之比对分布式温度传感系统 DTS

测量的产出剖面模型进行约束,可以更准确地评价储层产出情况。

(3)从解释结果来看,发现水平段产出剖面极其不均匀,主要产出层段集中,加深了油藏开发人员对地层特征的认识,有利于注气开发方案优化调整。

致谢:感谢塔里木油田东河采油气管理区、西部钻探试油公司的大力支持,并同意本文公开发表。

参考文献

- [1] 刘军严,杨向同,刘洪涛,等. 光纤式永久温压监测系统在大北 204 井的应用[J]. 钻采工艺, 2014, 37(1): 108-110.
LIU Junyan, YANG Xiangtong, LIU Hongtao, et al. Application of fiber-optic permanent temperature and pressure monitoring system in well Dabei 204 [J]. Drilling & Production Technology, 2014, 37(1): 108-110.
- [2] 任利华,陈德飞,潘昭才,等. 超深高温油气井永久式光纤监测新技术及应用[J]. 石油机械, 2019, 47(3): 75-80.
REN Lihua, CHEN Defei, PAN Zhaocai, et al. Field application of permanent fiber monitoring for ultra-deep high temperature oil and gas well [J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47(3): 75-80.
- [3] 邹顺良. 分布式光纤产出剖面测试技术应用[J]. 测井技术, 2021, 45(4): 439-444.
ZOU Shunliang. Application of distributed optical-fiber production profile testing [J]. Well Logging Technology, 2021, 45(4): 439-444.
- [4] 徐昊洋,王燕声,牛润海,等. 水平井连续油管输送存储式产液剖面测试技术应用[J]. 油气井测试, 2014, 23(3): 46-48.
XU Haoyang, WANG Yansheng, NIU Runhai, et al. Application of memory fluid production profile testing technology conveyed by coiled tubing to horizontal well [J]. Well Testing, 2014, 23(3): 46-48.
- [5] 王伟佳. 连续油管光纤测井技术及其在页岩气井中的应用[J]. 石油钻采工艺, 2016, 38(2): 206-209.
WANG Weijia. Well logging via coiled tubing fiber optic infrastructures and its application in shale gas wells [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2016, 38(2): 206-209.
- [6] 朱世琰,李海涛,张建伟,等. 分布式光纤测温技术在油田开发中的发展潜力[J]. 油气藏评价与开发, 2015, 5(5): 69-75.
ZHU Shiyan, LI Haitao, ZHANG Jianwei, et al. Potential of fiber optic distributed temperature sensing technology for oilfield development [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2015, 5(5): 69-75.

- [7] GABRIELE BOLOGNINI, ARTHUR HARTOG. Raman-based fibre sensors: trends and applications [J]. Optical Fiber Technology, 2013, 19(6): 15-18.
- [8] 蒋鹏. 基于瑞利散射的分布式光纤振动传感技术研究[D]. 国防科学技术大学, 2012.
JIANG Peng. Research on distributed optical fiber vibration sensor based on rayleigh backscattering light [D]. National University of Defense Technology, 2012.
- [9] 谢孔利. 基于 φ -OTDR 的分布式光纤传感系统[D]. 电子科技大学, 2008.
XIE Kongli. Distributed optical fiber Sensing System based on φ -OTDR [D]. University of Electronic Science and Technology of China, 2008.
- [10] 戴月祥,张伯新,伍永巴依,等. 水平井分布式光纤井温产液剖面测井技术及应用分析[C]//. 2021 油气田勘探与开发国际会议论文集(上册), 2021: 269-277.
DAI Yuexiang, ZHANG Boxin, WU Yongbayi, et al. Logging technology and application analysis of well temperature production profile based on distributed optical fiber in horizontal wells [C]//. Proceedings of 2021 International Conference on Oil and Gas Field Exploration and Development, 2021: 269-277.
- [11] 陈小安,杨留强,李进强,等. 光纤传感测井技术在数字油田的应用前景分析[C]//. 第七届数字油田国际学术会议论文集, 2021: 51-56.
CHEN Xiaolan, YANG Liuqiang, LI Jinqiang, et al. Application prospect analysis of optical fiber sensing logging technology in digital oilfield [C]//. Proceedings of the 7th International Academic Conference on Digital Oilfields, 2021: 51-56.
- [12] 宋红伟,郭海敏,戴家才,等. 分布式光纤井温法产液剖面解释方法研究[J]. 测井技术, 2009, 33(4): 384-387.
SONG Hongwei, GUO Haimin, DAI Jiakai, et al. Study on log interpretation of the optical fiber distributed temperature measurement system [J]. Well Logging Technology, 2009, 33(4): 384-387.
- [13] 刘建成,段银鹿,温柔,等. 连续油管光纤测井技术在产气剖面中的应用[J]. 测井技术, 2021, 45(3): 253-259.
LIU Jiancheng, DUAN Yinlu, WEN Rou, et al. Application of coiled tubing optical fiber logging technology in gas production profile [J]. Well Logging Technology, 2021, 45(3): 253-259.

编辑 方志慧

第一作者简介:林清金,男,1983 年出生,高级工程师,2006 年获中国地质大学(武汉)地质学学士学位,现主要从事油气田开发和管理工。电话:0996-2174953; Email:linqingj_tlm@petrochina.com.cn。通信地址:新疆维吾尔自治区库尔勒市石化大道塔里木油田公司,邮政编码:841000。