

The Application of Distributed Optical Fiber Production Logging Technology in Shale Gas

Chengrong Wang¹, Chunhui Liu¹, Chaomo Zhang², Jianjun Tian¹, Wenqing Zhang¹, Yun Rui³

¹Tuha Division, China Petroleum Logging Co. Ltd., Hami Xinjiang

²Geophysics and Oil Resource Institute, Yangtze University, Wuhan Hubei

³China Petroleum Zhejiang Oilfield Branch, Hangzhou Zhejiang

Email: zhang7801@263.net

Received: Oct. 9th, 2019; accepted: Oct. 24th, 2019; published: Oct. 31st, 2019

Abstract

In order to effectively solve the problem of the difficulty of the logging instrument to bottom of the well and accurately measuring production in each production layer, in this paper, it has formed a set of logging technology in distributed temperature and acoustic fiber output profile logging by technical issues. Tuha Division, China Petroleum logging Co. Ltd. has carried out the out profile logging task using distributed fiber in Sichuan Gold Dam shale gas block of Zhejiang Oilfield in domestic firstly and has obtained high-quality log data, which provides the support for further exploration of shale gas resources.

Keywords

Shale Gas, Distributed Optical Fiber, Producing Profile Logging

分布式光纤产气剖面测井技术研究应用

王成荣¹, 刘春辉¹, 张超谟², 田建军¹, 张文青¹, 芮 昫³

¹中国石油测井有限公司吐哈分公司, 新疆 哈密

²长江大学, 地球物理与石油资源学院, 湖北 武汉

³中国石油浙江油田分公司, 浙江 杭州

Email: zhang7801@263.net

收稿日期: 2019年10月9日; 录用日期: 2019年10月24日; 发布日期: 2019年10月31日

摘 要

为了有效地解决页岩气水平井产气剖面测井仪下井难, 准确测量各产层产气量的难题, 本文通过攻关、

文章引用: 王成荣, 刘春辉, 张超谟, 田建军, 张文青, 芮昫. 分布式光纤产气剖面测井技术研究应用[J]. 地球科学前沿, 2019, 9(10): 1006-1015. DOI: 10.12677/ag.2019.910106

研究形成一套应用分布式温度、声波的光纤产出剖面测井技术,较好的解决了此项难题,中油测井吐哈分公司在浙江油田的四川黄金坝页岩气区块进行了国内首次页岩气水平井分布式光纤产气剖面测井任务并取得了优质的测井数据,为油田进一步开发页岩气资源提供了技术支持。

关键词

页岩气, 分布式光纤, 产出剖面

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

影响页岩气储层产气能力的因素是多方面的,既有地质方面的原因,又有压裂施工方面的原因。为了能够高效开发页岩气资源,需要详细了解各个产层产气量。本文主要研究以分布式光纤测井技术采用光纤作为传感器和传输介质,分多个生产制度测量井下产层段整列温度、声波数据,应用专用软件、处理、解释方法,获得各产层准确产气量。中油测井吐哈分公司在浙江油田的四川黄金坝页岩气区块进行了国内首次页岩气水平井分布式光纤产气剖面测井任务并取得了优质的测井数据,为油田进一步开发页岩气资源提供了技术支持。

1.1. 常规测井技术现状及特点

目前,主要的水平井产出剖面测井系列包括:斯伦贝谢公司的FSI和SONDEX公司的MAPS阵列生产测井仪。其中,FSI测井系列主要包括4个微转子流量计,测量、6对光学和电阻探针传感器,分别用来测量分层的流体流速、持气率以及持水率参数[1]。MAPS测井系列主要包括阵列式电容持率CAT、阵列式电阻持率RAT以及阵列式涡轮流量SAT[2]。在测井时,两者都需要采用不同测速上下移动电缆测量多条曲线。对于井口压力较大的生产井,在实际测井时,需要用密封脂进行密封,活动的电缆对密封产生负面效果,无法长时间分生产制度进行测井;常规测井系列仪器都存在一定外径,对于采用油管或较小套管生产的井,无法采用常规测井系列测井;对于大多数水平井,常规测井系列通常不能覆盖全部测量段。

1.2. 分布式光纤测井技术现状及特点

分布式光纤测井是运用光纤的一维特性进行测量的技术,可以同时获得随时间变化的测井信息,它可以在整个光纤长度上对沿光纤分布的环境参数进行连续测量[3]。光纤传感器及光纤传输具有抗电磁干扰、耐腐蚀、可工作于恶劣环境、信息量大、灵敏度高、重量轻、体积小、可挠曲、便于复用测量及对被测介质影响小等特点,非常适合油田开发测井的需要[4]。在实际测井时,分布式光纤测井技术具有易下井的特点,对于超长水平段井具有较高测井成功率;能够胜任较小通径生产井的测井需求;由于分布式光纤测井不移动,能够满足多个生产制度下的测井需求。

2. 分布式光纤测井原理

2.1. 喇曼散射及温敏原理

由分子振动、固体中的光学声子等元激发与激发光相互作用所产生的非弹性散射称为喇曼散射,其

光强只与温度有关。在散射光中除有与激发光波长相同的弹性成分(瑞利散射)外,还存在比激发光波长长的斯托克斯光散射和比激发光波长短的反斯托克斯光散射,这一现象称为喇曼效应[5]。

2.2. 布里渊散射

布里渊散射是光在不均匀介质中传播发生的一种散射现象,它的频率和强度相对入射光均会发生变化。光通过光纤时,光子和光纤中自发的热运动产生的声子产生非弹性碰撞,发生自发布里渊散射。散射光的频率相对入射光的频率发生变化,变化的大小与散射角和光纤的材料有关(折射率、杨氏模量、泊松比、密度等)[5]。

2.3. 分布式光纤温度测量原理

光纤对温度的测量源于光纤中传播的光与光纤介质周围温度的定量关系。光纤温度测量原理的主要依据是光纤的光时域反射原理以及光纤的背向喇曼散射温度敏感效应。在光纤传输过程中,当一个光脉冲从光纤的一端射入光纤时,光脉冲将沿着光纤向前传播,同时,光纤的每一点又会产生反射,其中有一部分反射光与入射光的方向相反(或称为背向)。这种背向反射光的强度与该点周围的温度有相关性:反射点的温度越高,反射光的强度越大,测出反射光的强度便可以计算出反射点的温度。

在实际测量过程中,光纤存在输出不稳、弯曲、接头损耗等缺点,因此采用双通道双波长比较法测量温度,具体是:对反射光中的斯托克斯和反斯托克斯散射分别采集,然后利用两者光强强度的比值解调出温度信号,考虑反斯托克斯散射光对温度更加敏感,因此将反斯托克斯散射光作为信号通道[5]。

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} - \frac{k}{hc\Delta\gamma} [\ln R(T) - \ln(T_0)] \quad (1)$$

式中, $R(T)$: 反斯托克斯光强与斯托克斯光强比值; T_0 : 恒温槽给的温度; $k/hc\Delta\gamma$: 刻度系数。

通过对光纤系统进行温度标定,就可以根据公式(1)计算出环境的实际温度。

2.4. 基于布里渊散射频移特性的 BOTDR 声波测量原理

分布式光纤声波测量主要是通过测定入射光的后向布里渊散射光相关参数的变化实现的。布里渊散射频移和强度与光纤材料的声速有关,而声速受光纤材料的热光特性和弹光特性的影响,因此,光纤中的温度和应变的变化会引起布里渊散射频移和强度的变化[5][6]。

$$v_B = v_{as} - v_o = v_o - v_s = 2v_o \frac{nV_A}{c} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2)$$

$$V_A = \sqrt{(1-k)E/(1+k)(1-2k)\rho} \quad (3)$$

$$v_B(T, \varepsilon) = \frac{2v_o}{c} n(T, \varepsilon) \sqrt{\frac{E(T, \varepsilon)[1-k(T, \varepsilon)]}{[1+k(T, \varepsilon)][1-2k(T, \varepsilon)]\rho(T, \varepsilon)}} \quad (4)$$

式中, v_B : 布里渊散射频移; v_s : 斯托克斯光频率; v_{as} : 反斯托克斯光频率; n : 介质折射率; c : 真空光速; V_A : 光纤中的光速; θ : 散射角; V_a 为温度和应变的函数; k : 泊松比; E : 杨氏模量; ρ : 光纤纤芯密度。

例如,对于普通单模石英光纤 $n \approx 1.46$, $V_A \approx 5890$ m/s, 通过计算,有:

$$v_B(T_0, \varepsilon) = v_B(T_0, 0)(1 + 4.48\varepsilon) \quad (5)$$

光纤环境声波引起光纤应变的变化,通过测量应变数值,从而达到光纤测量声波和声速的目的。

2.5. 分布式光纤定位测量原理

从光脉冲进入光纤开始计时, 则 t 时刻在发射端收到的散射回波信号便是表征该信号是由距发射端 L 处的光纤产生的。

$$L = \frac{ct}{2} \tag{6}$$

式中, L : 光纤产生散射的位置; c : 光在光纤中的传播速度; t : 光脉冲进入光纤到接收到回波信号的时间差。

因此, 只要接收端的频率足够高, 采样时间足够小, 就可以得到整根光纤每一点的信号值, 实现分布式测量的目的。

3. 分布式光纤产气剖面测井技术流程(见图 1)

- 1) 地面设备。地面设备的核心装备为激光发射器和激光接收器。
- 2) 井下仪器。一根单芯光缆以高达 1 米分辨率连续探测和定位, 长达 40 公里的光纤转变成 40,000 个传感器, 频率范围 $< 5 \text{ Hz to } 20 \text{ kHz}$ (见图 2)。
- 3) 为了保证井底压力对光纤不造成损害, 在连续油管底部采用专用的密封部件进行密封; 为了保证地面转动部件对光纤不造成损伤, 采用锚定、密封装置对光纤进行固定(见图 3)。

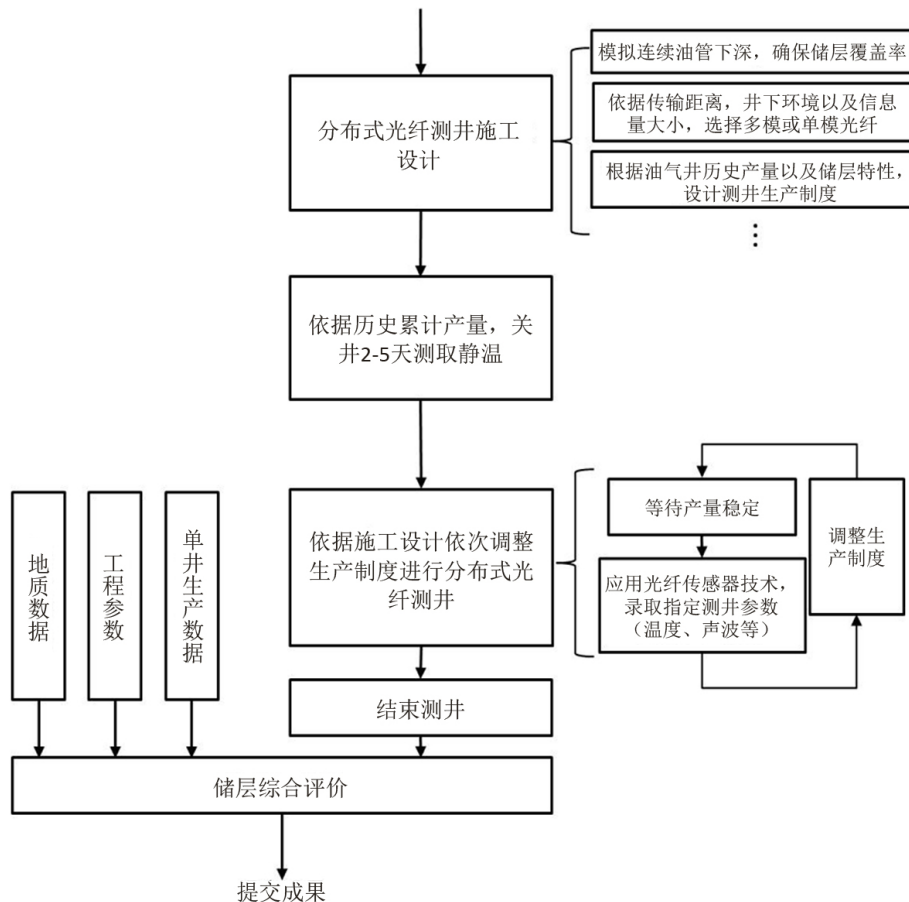


Figure 1. Flow chart of distributed fiber production gas profile logging
图 1. 分布式光纤产气剖面测井技术流程图

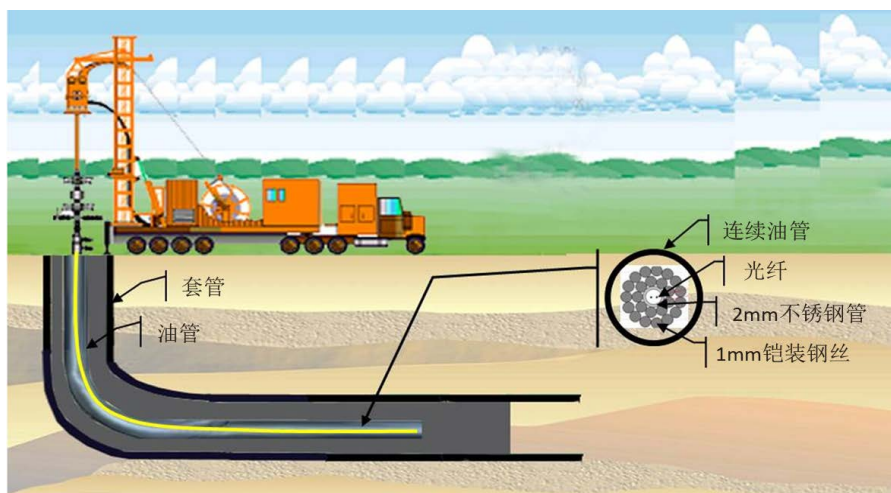


Figure 2. Schematic diagram of distributed fiber production gas profile logging
图 2. 分布式光纤产气剖面测井示意图



Figure 3. Ground equipment schematic diagram
图 3. 地面设备示意图

为了获得更完整的理解，分分布式温度传感器(见表 1)与布式声波传感器(见表 2)通常组合使用；布式声波传感器采用单模光纤，如果允许更多噪声的话可以采用多模光纤；分分布式温度传感器采用多模光纤；不受温度参数(井眼环境条件)影响。

Table 1. Parameters of distributed optical fiber temperature sensor (DTS)

表 1. 分布式光纤温度传感器(DTS)参数表

监测范围	20公里
最小采样间隔	0.25米
最小空间分辨率	1米
温度重复性	0.01℃
可用测量方式	单端测量/双端测量
单次测量时间	30秒~24小时

Table 2. Parameters of distributed fiber optic acoustic sensor (DAS)
表 2. 分布式光纤声波传感器(DAS)参数表

最小监测距离	10 米
最大监测距离	40 公里
波长	2/3/5/10/20/50 米
取样间隔	0.67
最小监测频率	1 赫兹
最大监测频率	2 万赫兹

4. 分布式光纤产气剖面解释方法(见图 4)

油、气、水三相热容不同，当储层有不同流体产出时，其产生的焦耳 - 汤姆逊效应通常可以为产出流体类型的评价提供可靠信息[7]。

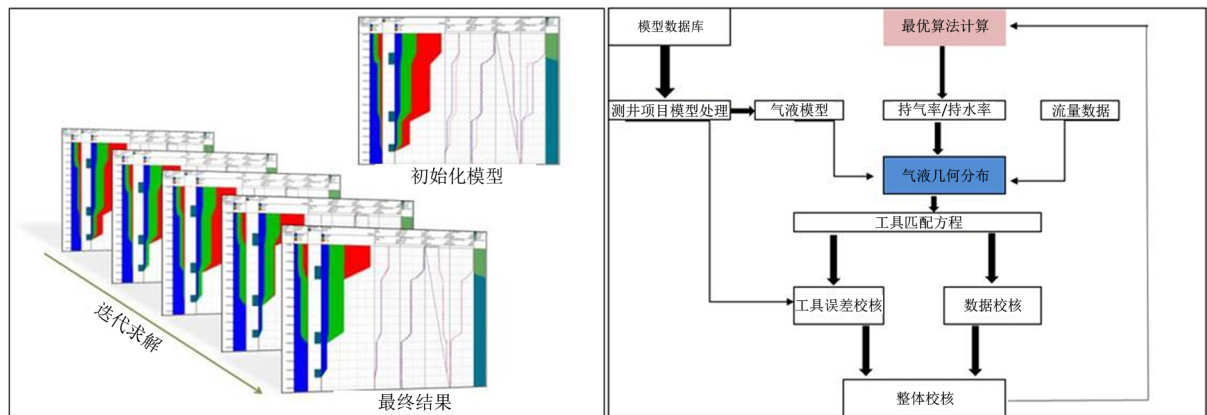


Figure 4. Evaluating flow chart of distributed fiber production gas profile logging
图 4. 分布式光纤产出剖面解释流程图

在非射孔段不存在流体交换，井筒与地层热传导是影响温度的主要因素，假设油气井稳定产出，流体不存在明显的压缩效应，则有[8] [9]：

$$T_f(Z,t) = T_{Ge} + g_G A - g_G Z + (T_{fe} - T_{Ge} - g_G A) e^{-Z/A} \quad (7)$$

式中， $T_f(Z,t)$ ：井筒 Z 点在 t 时刻的温度； T_G ：产液点地温； g_G ：地温梯度； Z ：距流体入口以上的距离； T_{fe} ：进入井筒的流体温度； A ：驰豫距离。

两边取导，

$$A = \frac{T_G - T_f(Z,t)}{dT_f/dZ} \quad (8)$$

驰豫距离 A 与流体热容 C_f 、流体密度 ρ_f 、流量 q_f 以及时间函数 $f(t)$ 有关。当 $q > 100$ bbl/d 和 t 大于数天时，

$$A = 1.66 C_f \cdot f(t) \cdot \rho_f \cdot q_f \quad (9)$$

当 $t \geq 100$ 天时，

$$f(t) = -\ln \frac{r_{ce}}{2\sqrt{\alpha t}} - 0.29 \quad (10)$$

r_{ce} : 套管外径; α : 地层热扩散系数。

通过监测生产过程中产生的声音扰动来进行流体声速计算, 再根据方程通过声速可以求出持率[10]。

$$\begin{cases} Y_g + Y_w + Y_o = 1 \\ \rho_g Y_g + \rho_w Y_w + \rho_o Y_o = \rho_f \\ \frac{Y_g}{\rho_g s_g^2} + \frac{Y_w}{\rho_w s_w^2} + \frac{Y_o}{\rho_o s_o^2} = \frac{1}{\rho s_f^2} \end{cases} \quad (11)$$

式中, Y_o 、 Y_g 、 Y_w : 持油率、持气率、持水率; ρ_o 、 ρ_g 、 ρ_w 、 ρ : 油、气、水、混合流体密度; s_o 、 s_g 、 s_w 、 s_f : 声波在油、气、水中的声速以及总声速。

对于气井而言, $Y_o = 0$, 从而有:

$$\begin{cases} q_f = \frac{\frac{T_G - T_f(Z, t)}{dT_f}}{dZ} \\ \quad \quad \quad \frac{1.66 C_f \rho_f \left(-\ln \frac{r_{ce}}{2\sqrt{\alpha t}} - 0.29 \right)}{C_f = Y_w \cdot C_w + Y_g \cdot C_g \\ Y_g + Y_w = 1 \\ \rho_g Y_g + \rho_w Y_w = \rho_f \\ \frac{Y_g}{\rho_g s_g^2} + \frac{Y_w}{\rho_w s_w^2} = \frac{1}{\rho s_f^2} \end{cases} \quad (12)$$

根据公式(12), 结合PVT、井口产量等数据, 采用迭代方式求解; 在得到混合流体流量 q_f 以及流体持率 Y_w 、 Y_g 参数之后, 应用气液漂流模型计算日产水量 q_w 以及日产气量 q_g 参数[8]。

$$\begin{cases} v_m = \frac{q_f}{A} \\ q_g = A \cdot Y_g (C_o v_m + v_s) \\ q_w = q_f - q_g \end{cases} \quad (13)$$

式中, v_m : 混合流体流速; A : 管柱横截面积; C_o : 两相的分布特性; v_s : 气液滑脱速度。

5. 分布式光纤产气剖面实例

实例 1: XXX 井是四川黄金坝页岩气区块布置的一口生产井, 实际压裂 19 段, 共计 53 簇; 2018 年 3 月, 中油测井吐哈分公司成功完成了国内第一口分布式光纤产气剖面测井项目, 进行了 4 个生产制度测试, 生产制度分别为: 1.2 万方/天、2 万方/天、3 万方/天、4 万方/天, 并针对 4.3 万方/天的生产制度进行了定量解释。

解释结论:

1) 从产气剖面解释结果看, 段簇贡献差异较大, 第 4、6、7、20 段没有产量贡献。第 10 段产量最高, 占总产量的 19%。第 14~19 段占总产量 38%。产气量贡献小的段为 1、2、3、5、8、12、13 有 50% 射孔簇没有产量, 24% 射孔簇高于平均产量, 最高单簇射孔第 24 簇占总产量的 14.8% (见图 5、图 6, 表 3)。

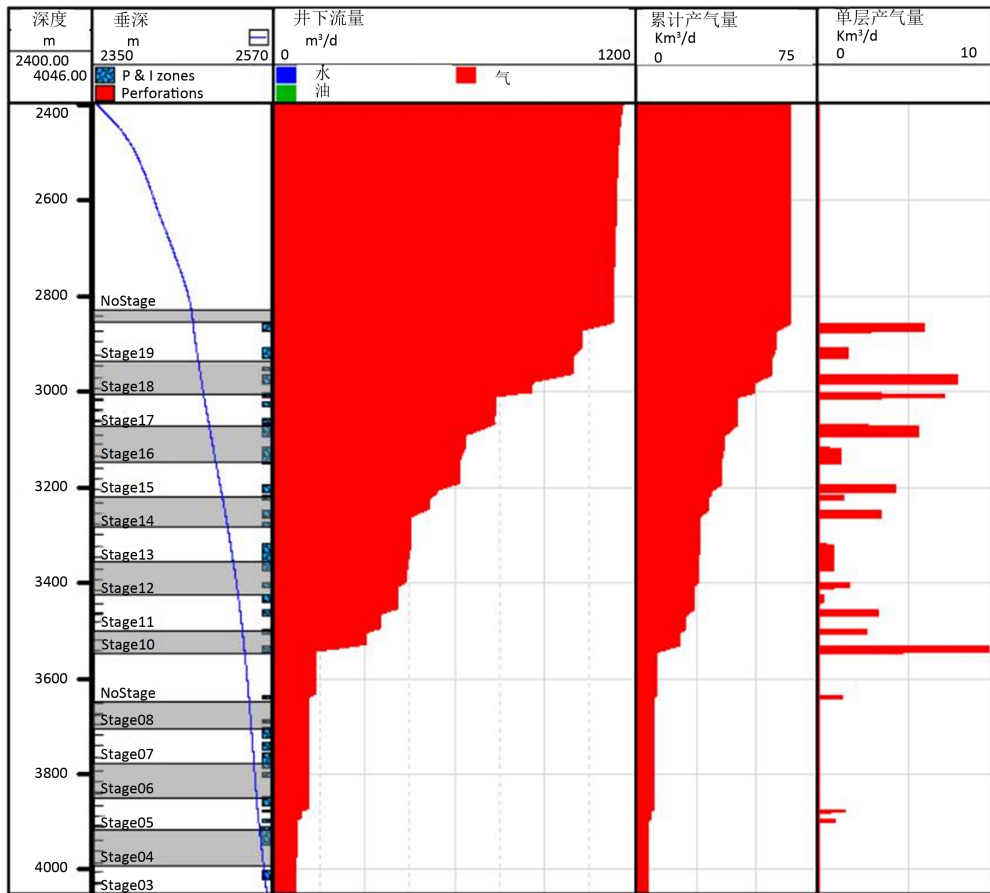


Figure 5. Distributed fiber production gas profile result of YS108H19-1 (43,000 m³/d)
 图 5. YS108H19-1 井分布式光纤产气剖面成果图(4.3 万方/天)

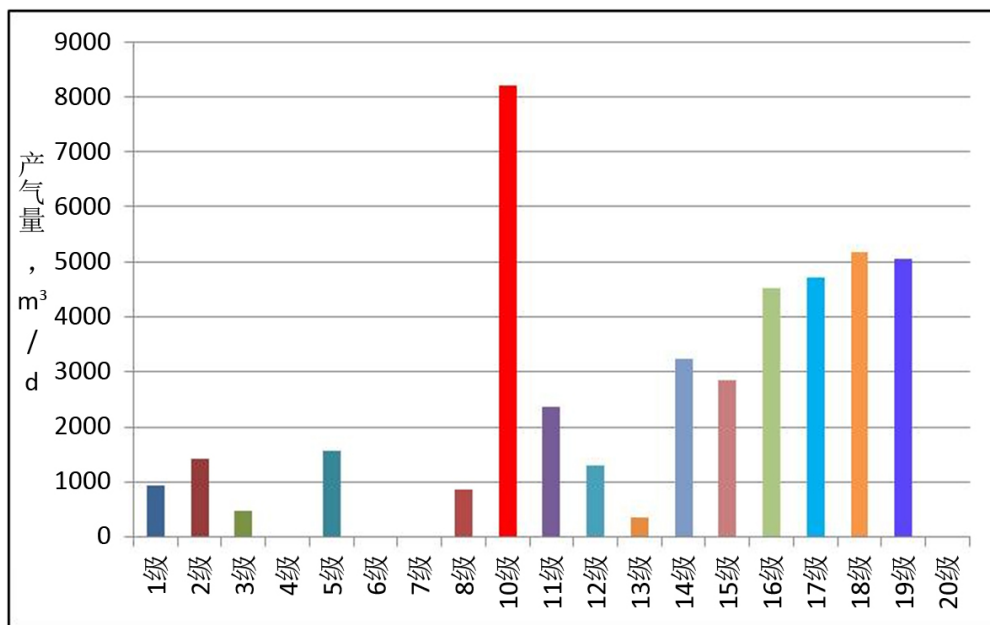


Figure 6. Distributed fiber production gas profile gas column diagram of YS108H19-1
 图 6. YS108H19-1 井分布式光纤产气剖面各级产气量柱图

Table 3. Log results of distributed fiber gas production profile
表 3. 分布式光纤产气剖面测井成果表

级数	顶深	底深	产气量	相对产气量
	m	m	m ³ /d	%
20	2840	2841	0	0.00
19	2873	2925	5053	11.75
18	2946	2994	5172	12.03
17	3016	3061	4720	10.98
16	3089	3136	4513	10.50
15	3160	3205	2852	6.63
14	3232	3278	3231	7.51
13	3299	3346	350	0.81
12	3370	3415	1292	3.00
11	3443	3481	2361	5.49
10	3519	3541	8210	19.09
8	3652	3697	851	1.98
7	3718	3766	0	0.00
6	3793	3840	0	0.00
5	3865	3909	1558	3.62
4	3938	3986	0	0.00
3	4004	4051	473	1.10
2	4080	4139	1419	3.30
1	4170	4193	946	2.20

2) 通过改变工作制度,反映了储层动用变化(见图 7), 14~19 级储层启动生产压差较大, 可能原因储层压裂效果一般、存在污染等。14~19 级是主要产气段, 启动生产压差较大, 建议对 14~19 级重新压裂、解堵措施; 10 级以下产气较少, 可能原因储层本身裂缝不发育或受邻井影响。

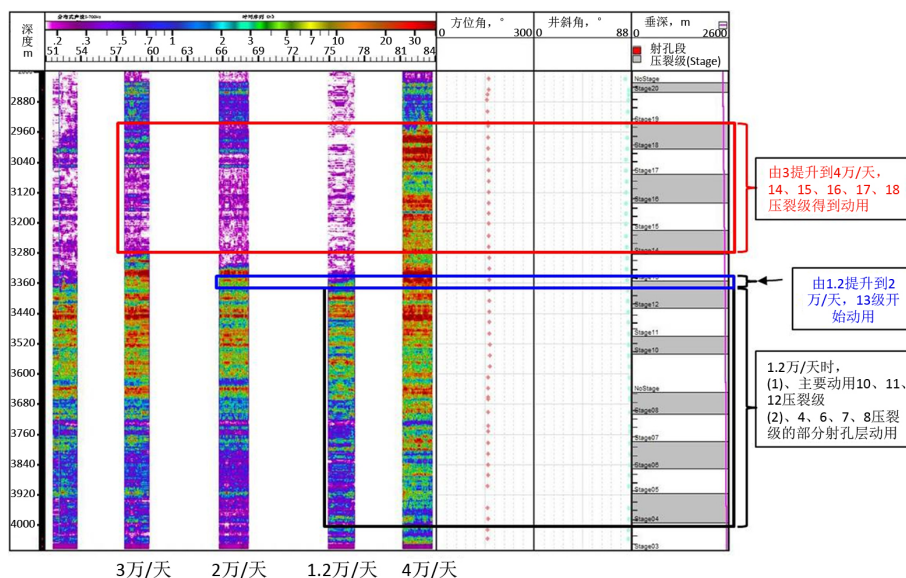


Figure 7. Reservoir utilization of YS108H19-1 under different production systems
图 7. YS108H19-1 井不同生产制度下储层动用示意图

6. 结束语

分布式光纤产出剖面测井技术能够有效解决页岩气水平井产气剖面测井资料录取难的行业难题, 具有测井成功率高, 测量各产层产气量更加准确的特点。XXX 井应用分布式光纤测井技术完成了国内首口分布式光纤产气剖面测井任务, 测试获得了准确的各产层产量信息, 为这个页岩气区块的高效开发提供了技术支持。

基金项目

“十三五”国家油气重大专项项目 37 课题(课题编号: 2017ZX05063)资助课题。

参考文献

- [1] 王佳伟. 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.
- [2] 金建勋, 胡海涛, 吴玲敏, 等. 水平井生产测井仪器介绍及应用[J]. 国外测井技术, 2015(3): 23-25.
- [3] 吕海宝, 楚兴春, 黄锐. 分布式光纤传感器的现状及发展趋势[J]. 宇航计测技术, 1998(2): 1-8.
- [4] 张向林, 陶果, 刘新茹. 光纤传感器在油田开发测井中的应用[J]. 测井技术, 2006(3): 267-269.
- [5] 和志明, 陈智雍. 分布式光纤温度测井及其信号滤波法的改进[J]. 石油仪器, 2010, 24(5): 4-7+99.
- [6] 何玉钧, 尹成群, 李永倩, 等. 一个新型的基于全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪 BOTDR 系统[J]. 光子学报, 2004(6): 721-724.
- [7] 朱世琰. 基于分布式光纤温度测试的水平井产出剖面解释理论研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2016.
- [8] 郭海敏. 生产测井导论[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- [9] 宋宏伟, 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.
- [10] 闫正和, 罗东红, 唐圣来, 等. 基于光纤分布式声波传感器的井下多相流测试研究[J]. 油气井测试, 2017, 26(2): 9-12+75.