

矿场光纤声波数据计算产液剖面：模型与应用

胡晓东^{1*}, 蒋宗帅¹, 王小玮², 周福建¹, 赵杨¹, 龚浩楠¹, 王雅晶¹, 余迪明³

1 中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院, 北京 102249

2 中国石油新疆油田公司采油工艺研究院, 克拉玛依 834000

3 苏州中科地星创新技术研究所, 苏州 215011

* 通信作者, huxiaodong@cup.edu.cn

收稿日期: 2024-05-10; 修回日期: 2025-01-03

国家自然科学基金面上项目(水击压力波—光纤声波数据融合的多裂缝尺寸反演方法, 52374019)

摘要 生产井产液剖面的实时准确监测对油田开发动态调整具有重要指导意义, 有助于评估产层产液占比、优化水平井压裂改造参数、调整生产动态。而基于分布式光纤声波技术的产液剖面测试是近年来兴起的一种新技术, 具有准确度高、实时性强的优点, 适用于油气田井下高温高压、狭小复杂环境。然而现有分布式光纤产液剖面监测研究多集中于理论研究及室内实验, 而在矿场实际生产过程中, 光纤井下信号受复杂噪声干扰, 响应特征多变, 缺乏利用 DAS 技术分析井下流动事件及产量剖面计算的成熟分析流程与模型。本文提出了一套适用于矿场产液剖面计算的模型与计算流程, 在生产井开展分布式光纤声波传感监测采集不同工况光纤数据, 对其进行频率分析确定有效频段, 并从声波能量的角度计算产液剖面, 有效解决了分布式声波光纤数据产量剖面计算的分析处理方法较少的问题。针对 3 口矿场实测数据开展分析, 结果表明: 此次测试在 400~800 Hz 频率范围内, 开关井状态下的 FBE 能量差值最大, 能够在保留较多流动信息的情况下滤除大多数背景或环境噪声。在开井后, 3 口井均存在一定的能量响应滞后情况, 且在生产过程中, 产层位置并不是覆盖所有深度, 存在优势进液区域, 但第二次开井后, 整体产液剖面分布更为均匀。先后两次开关井的 FBE 能量强度不同, 第一次生产过程的绝对 FBE 能量更强。

关键词 分布式声学光纤传感; 稠油井; 矿场数据; 数据分析

中图分类号: E345; TP274

Calculation of fluid-producing profiles from mine fiber-optic acoustic data: Model and application

HU Xiaodong¹, JIANG Zongshuai¹, WANG Xiaowei², ZHOU Fujian¹, ZHAO Yang¹, GONG Haonan¹, WANG Yajing¹, YU Diming³

1 Unconventional Petroleum Research Institute, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2 Oil Production Technology Research Institute of PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Karamay 834000, China

引用格式: 胡晓东, 蒋宗帅, 王小玮, 周福建, 赵杨, 龚浩楠, 王雅晶, 余迪明. 矿场光纤声波数据计算产液剖面: 模型与应用. 石油科学通报, 2025, 10(03): 553–564

HU Xiaodong, JIANG Zongshuai, WANG Xiaowei, ZHOU Fujian¹, ZHAO Yang, GONG Haonan, WANG Yajing, YU Diming. Calculation of fluid-producing profiles from mine fiber-optic acoustic data: Model and application. Petroleum Science Bulletin, 2025, 10(03): 553–564. DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.02.006

3 Suzhou Innovative Research Institute of Earth and Planetary Sciences Co.Ltd, Suzhou 215011, China

Received: 2024-05-10; Revised: 2025-01-03

Abstract The real-time and accurate monitoring of the production well fluid profile is crucial for guiding dynamic adjustments in oilfield development. It plays a critical role in evaluating the proportion of fluid produced from different production layers, optimizing parameters for horizontal well fracturing, and adjusting production dynamics. In recent years, fluid profile testing based on distributed acoustic sensing (DAS) technology has emerged as a new method with high accuracy and strong real-time capabilities. This technique is particularly suitable for the high-temperature, high-pressure, and narrow-complex downhole environments commonly found in oil and gas fields. However, most current research on distributed fiber-optic profile monitoring is focused on theoretical studies and laboratory experiments, with limited application to actual production conditions of the mining field operations. In actual production, downhole fiber-optic signals are often subject to interference from complex noise, and their response characteristics can be highly variable. Furthermore, there is a lack of mature analysis processes and models for using DAS technology to analyze downhole fluid events and calculate production profiles. This paper proposes a model and calculation process for fluid profile analysis that can be applied to mining field production scenarios. The method involves deploying distributed fiber-optic acoustic sensing to collect fiber-optic data under various operational conditions. Frequency analysis is then performed to identify effective frequency bands, and the fluid profile is calculated from the perspective of acoustic energy. This approach addresses the challenge of limited analysis methods for calculating production profiles from distributed acoustic fiber-optic data. To validate the proposed model and process, the paper analyzes data from three wells in a mining field. The results indicate that in the 400-800 Hz frequency range, the maximum difference in Fiber-Based Energy (FBE) energy occurs during well switching. This allows the system to filter out most background and environmental noise while retaining important flow-related information. After opening the wells, all three wells showed a delay in energy response. During the production phase, the production layers did not extend to all depths, and a dominant influx region was observed. However, after the second well opening, the overall fluid profile distribution became more uniform. Additionally, the intensity of the FBE energy varied between the first and second well openings, with stronger absolute FBE energy observed during the first production phase. These findings provide valuable insights into optimizing oilfield operations and improving the accuracy of fluid profile monitoring through distributed acoustic sensing technology.

Keywords distributed acoustic fiber optic sensing; heavy oil well; mine data; data analysis

DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.02.006

0 前言

在油田开发过程中,实时准确的生产井产液剖面监测对于评估产层产液占比、优化水平井压裂改造参数、调整生产动态及实施老井改造效果等方面具有重要的指导意义。传统的产量剖面测试方法,如集流伞式测井仪、流体数字成像仪(DEFT)、阵列涡轮持率测井仪(MAPS)以及井筒流体扫描成像测井仪(FSI)测井,常受限于井筒内径、复杂结构、长度或者流量较低,难以实现生产过程生产剖面实时监测^[1-4]。近年来,光纤传感技术在油气测井领域得到广泛应用,其作为一种既充当传感器又能够充当信号传输介质的特殊传感器,具有信号无延迟、测试稳定、抗电磁干扰能力强;测量精度高、测试范围较广;能够进行连续动态实时监测,测试距离可达 10 km 以上;适合各种严苛工作条件,可在高湿度、高温环境下运行;光纤横截面积小,安装简便、对井筒干扰小,可安装于多种位置;光纤测试周期灵活可控,测试快速的优点^[5-11]。

当前基于分布式光纤计算产液剖面,更多使用

分布式温度传感技术(Distributed Temperature Sensor, DTS),因为DTS技术较早引入油气测井领域且其成本较低,且测试更为简单直观^[12-16]。2008年Wang等人^[17]提出了使用DTS技术进行产出剖面分析的新模型,该模型基于稳态能量守恒,通过正演模型模拟计算生产剖面沿井筒温度分布,再根据所测温度估算产量剖面。2010年,Li等人^[18]提出了一种基于瞬态温度预测模型来模拟水驱油藏水平井温度动态的方法,并对几口实例井进行分析。2019年,Hemink等人^[19]介绍了一种基于DTS的回温测量温度解释方法,并在注水井和注聚合物井中进行了DTS回温测量,并拟合注入剖面。2023年,Xu等人^[20]提出了一种使用DTS技术获得各产层贡献率及全井动态变化情况的技术,并在一口生产井上获得了该井各产层的贡献。基于DTS技术计算生产剖面虽然更为成熟且成本更低,但是井下复杂传热可能掩盖储层温度特征且温度变化不一定表明流体流入,此外DTS数据对产量变化的响应慢,对于实时精确产量监测存在一定问题^[21]。

分布式声波传感技术是一项革命性的新技术,发

展迅速，在国外已经处于生产试验和应用阶段^[22-25]。2019年，Jin等人^[26]提出一种方法，通过DTS技术测量稳态井筒温度再通过分布式光纤传感技术(Distributed Acoustic Sensor, DAS)测量瞬态温度段塞信号来计算井筒流速，通过稳态温度与流速并基于马尔可夫链蒙特卡洛随机算法反演总产液分布，并搭建实验装置对方法进行验证，其需要基于DTS技术计算稳态温度，无法摆脱对DTS测试需对温度进行校准的繁复流程及解决实时性不足的问题。2020年，Pakhotina等人^[27]提出了一种从DAS测量的声学信号解释流速分布的方法。2021年，Noble等人^[28-29]在北海一关井3年的泄露井开展DAS监测，提出了一种新型声学数据处理方法，分离流动信息与背景噪声，确定流体流动的来源及流动路径，并利用该方法监测泄露位置并成功隔离了泄漏点并恢复生产，该方法重点在于对DAS数据井下事件特征的识别，分析流动事件随深度和时间的变化。2021年，Grubert等人^[30]利用分布式声学传感技术计算生产剖面，并进行井间干扰分析，揭示储层间的连通情况，评估油田性能及产量，研究关注邻井活动开始时的储层间相互作用，没有解释产量剖面计算方法。当前基于DAS技术进行产液剖面计算方法研究较少，因此需要一种实时计算产量剖面的方法。

本文提出了一种更为普遍的分布式声学光纤数据

的处理分析方法，根据DAS数据实时计算每个产层位置的能量大小，从能量角度计算阶段产液剖面及实时产液剖面。对3口生产井开展分布式声学光纤监测，对DAS数据进行频谱分析及FBE能量谱计算，并分析得到阶段产量剖面及实时产量剖面，发现了一些稠油井声学光纤监测的规律

1 矿场数据采集

本文通过分布式声学光纤传感器(DAS)对3口稠油井进行监测，采集了正常生产过程中的光纤数据。测试井垂深均在600 m左右，测深约1000 m，产层段长度200~300 m，通过筛管加砾石充填方式进行完井，图1是传感光纤下入方式及井身结构示意图。本次测试采用油套环空内下入可重复使用合金铠装光纤，光纤在位于技术套管内的副管中进行数据采集。本次测试采用临时安装的可重复式铠装光纤，该铠装光纤最外层使用不锈钢层保护，最内层是两根单模光纤与两根多模光纤，铠装光纤在油套环空无法充分下入到井底完全采集到整个产层的流动响应情况，但3口测试井中两口井光纤覆盖筛管段75%以上，均覆盖主要产液层段。1次测试过程分为4段，分别为第一次关井、第一次生产、第二次关井、第二次生产，每段时

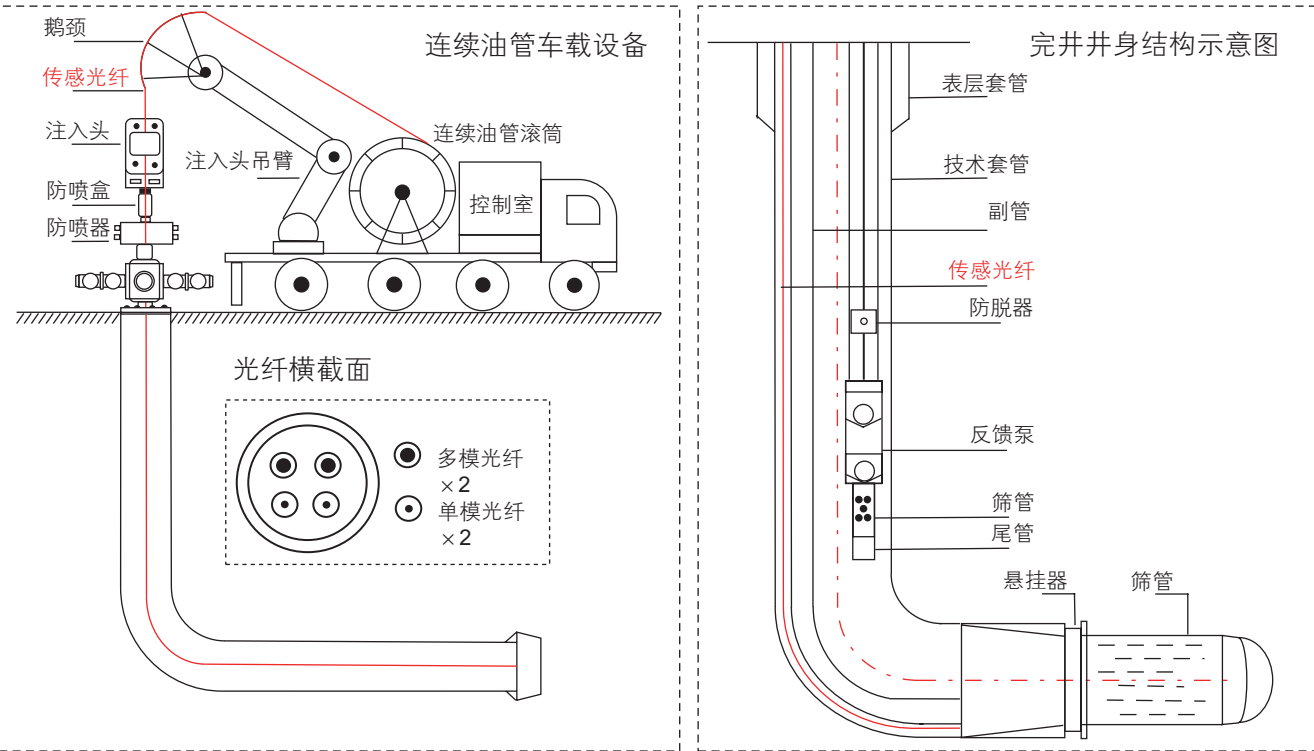


图1 连续油管车载光纤设备及完井井身结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of continuous tubing truck-mounted fiber optic equipment and well completion structure

间 1 h, 即两次从关井到生产的过程。通过下入副管的单模光纤采集井下生产过程中的响应数据并与关井情况进行对比。本次测试所使用的测试参数为 4 KHz 采样率、2.5 m 空间采样率、27 dB 光源强度、标距长度 10 m 并每分钟保存一个数据文件, 对 3 口井进行测试共得到了 750 个应变率数据文件。

2 矿场数据处理模型

2.1 数据处理过程

矿场数据处理模型包括频带提取 (Frequency Bands Extracted, FBE) 能量计算模型和产液剖面计算模型两个子模型。如图 2 所示, 首先截取生产段的一段数据进行傅里叶变换, 分析可能频率范围, 计算所选取频段 FBE 能量, 根据 FBE 能量信噪比得到适宜频率范围, 计算得到对应频段的 FBE 能量。再根据测试时的生产制度对数据进行分段, 计算每段数据的平均 FBE 能量, 再结合关井时的 FBE 能量计算生产状态的绝对 FBE 能量, 最后计算各产层深度产量占比。

2.2 FBE 能量计算模型构建

一般来说, 不同频带 DAS 数据所蕴含的信息截然不同, 较高频率段 DAS 数据则可能含有流体流动信息^[31]。对 DAS 数据的有效频率段采用频谱分析, 其公

式如下

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x[n]e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

其中, $x[n]$ 代表离散时间信号, $X(f)$ 表示信号在频率 f 上的幅度和相位信息, 通过该过程将时域上的 DAS 转换到频率域, 观察数据在频率域上的特征。根据频率成分分布, 选取对应的频率范围 $[f_{\text{low}}, f_{\text{high}}]$ 。根据所选取的范围进行滤波, 即

$$y(t) = x(t) \times h(t) \quad (2)$$

其中, $h(t)$ 为冲激响应函数是滤波器频率响应函数 $H(f)$ 的傅里叶逆变换, 通过滤波将数据处理为仅含有所需频率范围的高信噪比 DAS 数据。下式即为傅里叶逆变换过程公式

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(f)e^{j2\pi ft} df \quad (3)$$

能量计算周期 T , s; 及对应频率 f , Hz, 可以计算得到能量 E , 即

$$E = 10 \lg \left(\frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} |F(j\omega)|^2 d\omega}{T} \right) \quad (4)$$

其中, 圆频率 ω 可由频率 f 通过下式计算,

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (5)$$

FBE 能量谱描述了信号在特定频率带内的能量分布情

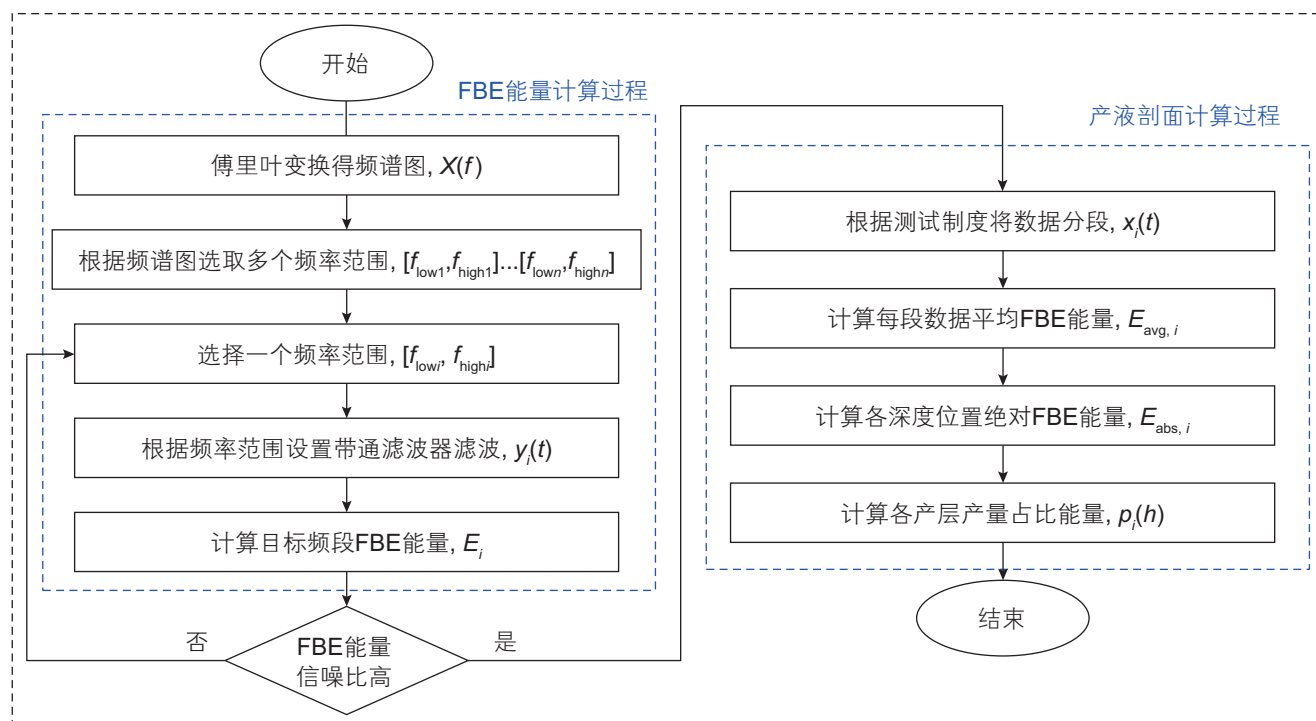


图 2 光纤声波数据计算产液剖面模型的流程图

Fig. 2 Flowchart of fiber-optic acoustic wave data to compute a model of the fluid-producing profile

况，从而可以得到在目标频段范围内各事件的能量强度，对井下流动响应事件形成定量的分析。

2.3 产液剖面计算模型构建

FBE 能量作为描述井下流动事件能量强度的指标，在声学研究中具有重要意义。通过对 FBE 能量的定量分析，推断井下各位置的产量水平，从而为资源开发和管理提供了重要依据。根据测试方案将数据在时域上分段，再在每个深度上对每段进行 FBE 积分并计算该段平均 FBE 能量强度。根据生产与关井过程的平均能量强度差值计算绝对 FBE 能量平均强度，对其计算过程如下。

根据测试方案将数据分段，将数据 $x(t)$ 分解为 N 段，每段的长度根据测试时间不同分别为 $x_i(t)$ ，可以表示为

$$x(t) = \sum_{i=1}^N x_i(t) \tag{6}$$

计算各深度每段数据的平均 FBE 能量谱。

首先计算该段数据的总能量 $X(f)$ ，根据测试时间 $T(i)$ 计算得到该段数据的平均能量 $E_{\text{avg},i}$ 。通过与前一段数据的平均能量做插值计算得到该段数据的均对能量 $E_{\text{abs},i}$ 。

$$X(f) = \int_{n=-\infty}^{\infty} x[n] e^{-j2\pi f t} dt \tag{7}$$

$$E_{\text{avg},i} = \frac{10 \lg \int_{f_1}^{f_2} |X_i(f)|^2 df}{T(i)} \tag{8}$$

$$E_{\text{abs},i} = E_{\text{avg},i} - E_{\text{avg},i-1} \tag{9}$$

计算不同深度的绝对能量占整个深度能量的比值，从而计算得到每个产层深度的产量占比 $P_i(h)$ 。其中， h 表示深度，m。

$$P_i(h) = \frac{E_{\text{abs},i}(h)}{\sum_{h_{\text{start}}}^{h_{\text{end}}} E_{\text{abs},i}(h)} \tag{10}$$

式中 $P_i(h)$ 代表每个产层深度的产量占比。

3 结果与讨论

对 3 口井开展 FBE 能量及产液剖面分析，确定有

效信号频段、产液剖面、产层特征等，表 1 是 3 口测试井的基础数据及测试参数，采用临时可重复使用铠装光纤，传感光纤无法完全下入井底。每口井测试过程为两次关井、两次生产，有 3 次制度切换。

3.1 有效频段分析

井下流动信号复杂，可能在多个频段存在响应，依据信号特征筛选合适的分析频段，是准确计算产液剖面的首要问题。以 3 井为例，截取一段时间的数据并进行频谱分析，得到其频率成分瀑布图，并截取缔管段位置的频谱图，如图 3、4 所示。从传感光纤整体瀑布图中可以发现，从频率成分来看可以分为 5 段，分别是 0~400 Hz、400~800 Hz、800~1200 Hz、1200~1600 Hz、1600~2000 Hz，其中 0~400 Hz 强度最高，400~800 Hz 段次之，接下来 3 段近似但依次衰落，并在频段上呈现良好周期性。从产层段光纤频谱瀑布图上可以发现产层段频谱强度在 800~850m 段较高。对比非产层与产层位置频谱图，可以发现主要区别存在与 1~100 Hz，推测注采泵及地面噪声主要影响 0~100 Hz 频段，流动事件特征可能存在于 100~400 Hz、400~800 Hz、800~1200 Hz、1200~1600 Hz 及 1600~2000 Hz 频段。

为了进一步理清流动事件在频谱上的响应，对比分析了 3 口井开关井操作的光纤数据。在下入光纤后尚未开井情况下，井筒内流体基本不流动，可以粗略认为产层段不存在流动事件。而在生产状态下，抽油机启动会造成产层流体流动从而引起光纤信号的响应。因此，开关井状态下信号差异越大，越能准确反映流动信息，即信噪比越高。以 3 井为例，结果如图 5 所示，0~100 Hz、0~400 HZ 信号强，但在开关井时均有响应，信号杂乱，难以分析。400~800 HZ、800~1200 HZ 在开关井时均呈现出较大差异，1200~1600 Hz、1600~2000 Hz 差异不明显。进一步计算了 FBE 能量谱响应之和，结果如表 2 所示。开关井状态下，在 400~800 Hz 频率范围内，开关井状态下的 FBE 能量差值最大，为 5.4%，保留信息差值最多，可以认为此次测试中，400~800 Hz 能够在保留较多流动信息的情况下滤除大多数背景或环境噪声。

表 1 3 口测试井基础数据及测试参数

Table 1 Basic data and test parameters for three test wells

井序号	人工井底/m	光纤下入深度/m	筛管段/m	产液量/m ³
1	931.35	825	725.9~931.8	18.6
2	887.00	844	690.1~884.1	8.5
3	1015.75	923	724.8~1015.8	8.0

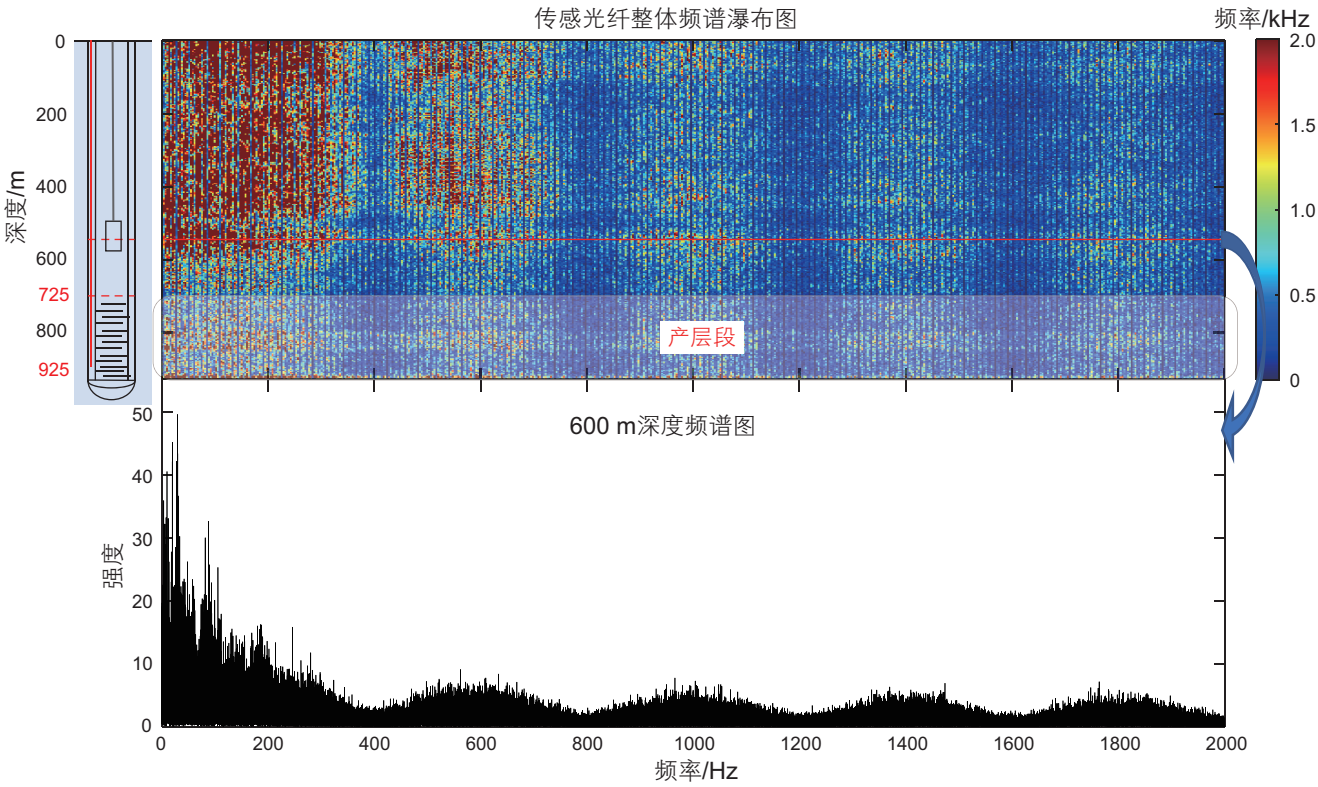


图 3 传感光纤整体频谱瀑布图及 600 m(非产层)深度频谱图
Fig. 3 Overall spectral waterfall map of the sensing fiber and spectral map at 600 m (non-production layer) depth

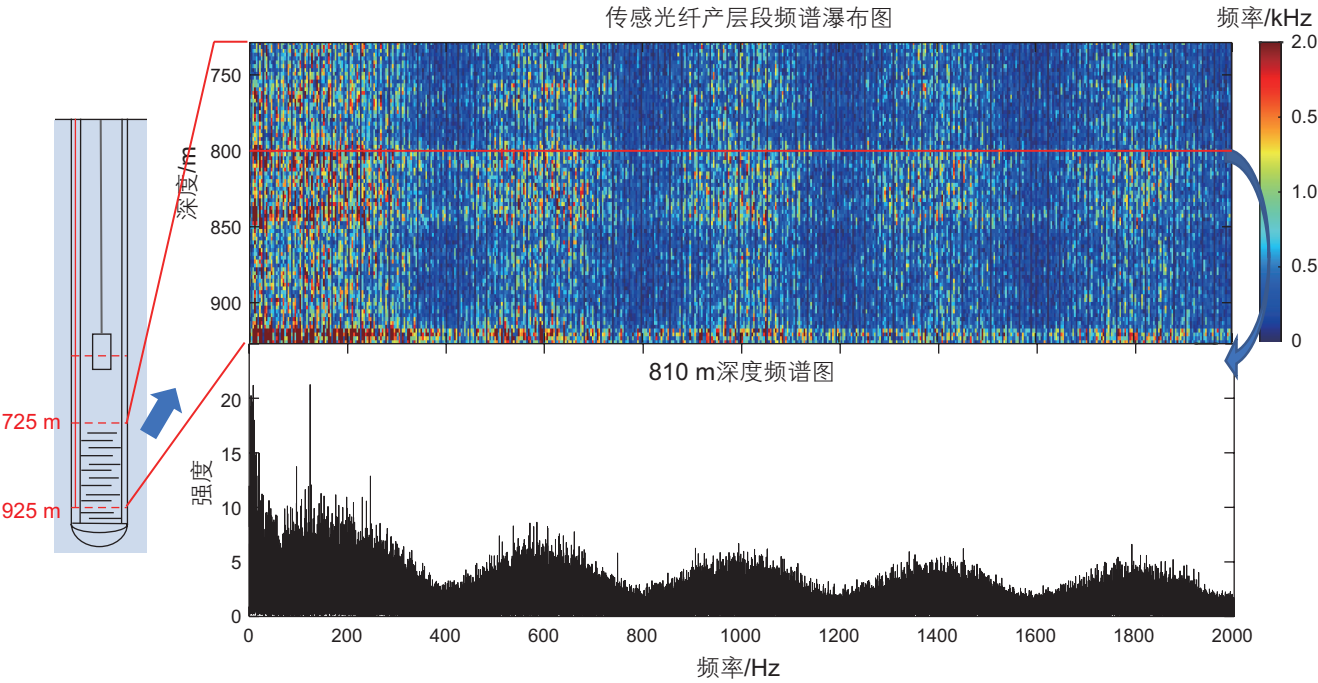


图 4 产层段光纤频谱瀑布图及 810 m(产层)深度频谱图
Fig. 4 Fiber-optic spectral waterfall and spectral map at depth of 810 m (production layer) in the production layer section

3.2 产液剖面分析

对测试井进行频率分析,发现 3 口井均在 400~

800 Hz 频段滤波效果较好。分别计算 3 口测试井的 400~800 Hz 频段的 FBE 能量瀑布图,其结果如图 6 所示:通过对 400~800 Hz 频段进行 FBE 能量谱绘制,可

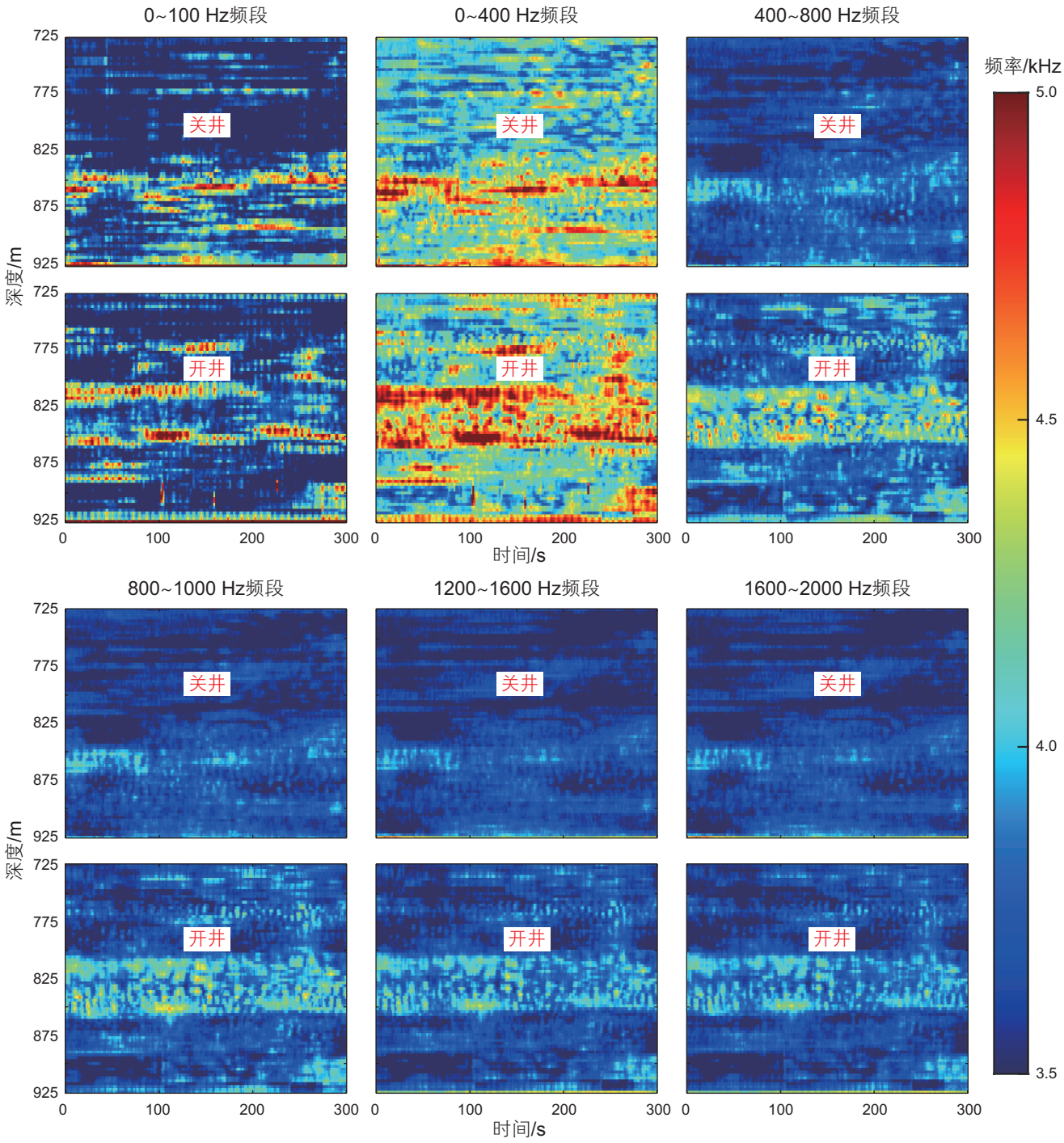


图 5 不同频段 FBE 能量瀑布图对比
Fig. 5 Comparison of FBE energy waterfall plots for difference frequency bands

表 2 不同频段 FBE 能量总值及差值

Table 2 The total energy values and differences of FBE energy spectra for different frequency bands

频率成分/Hz	0~100	0~400	400~800	800~1200	1200~1600	1600~2000
关井状态 FBE 能量总值/dB	879 202.1	1 004 296.1	886 598.5	876 113.5	868 661.1	864 898.6
开井状态 FBE 能量总值/dB	897 519.2	1 034 345.1	934 100.3	909 771.6	895 150.9	891 864.3
FBE 能量差值/dB	18 317.1	30 049	47 501.8	33 658.1	26 489.8	26 965.7
FBE 能量变化比例	2.1%	3.0%	5.4%	3.8%	3.0%	3.1%

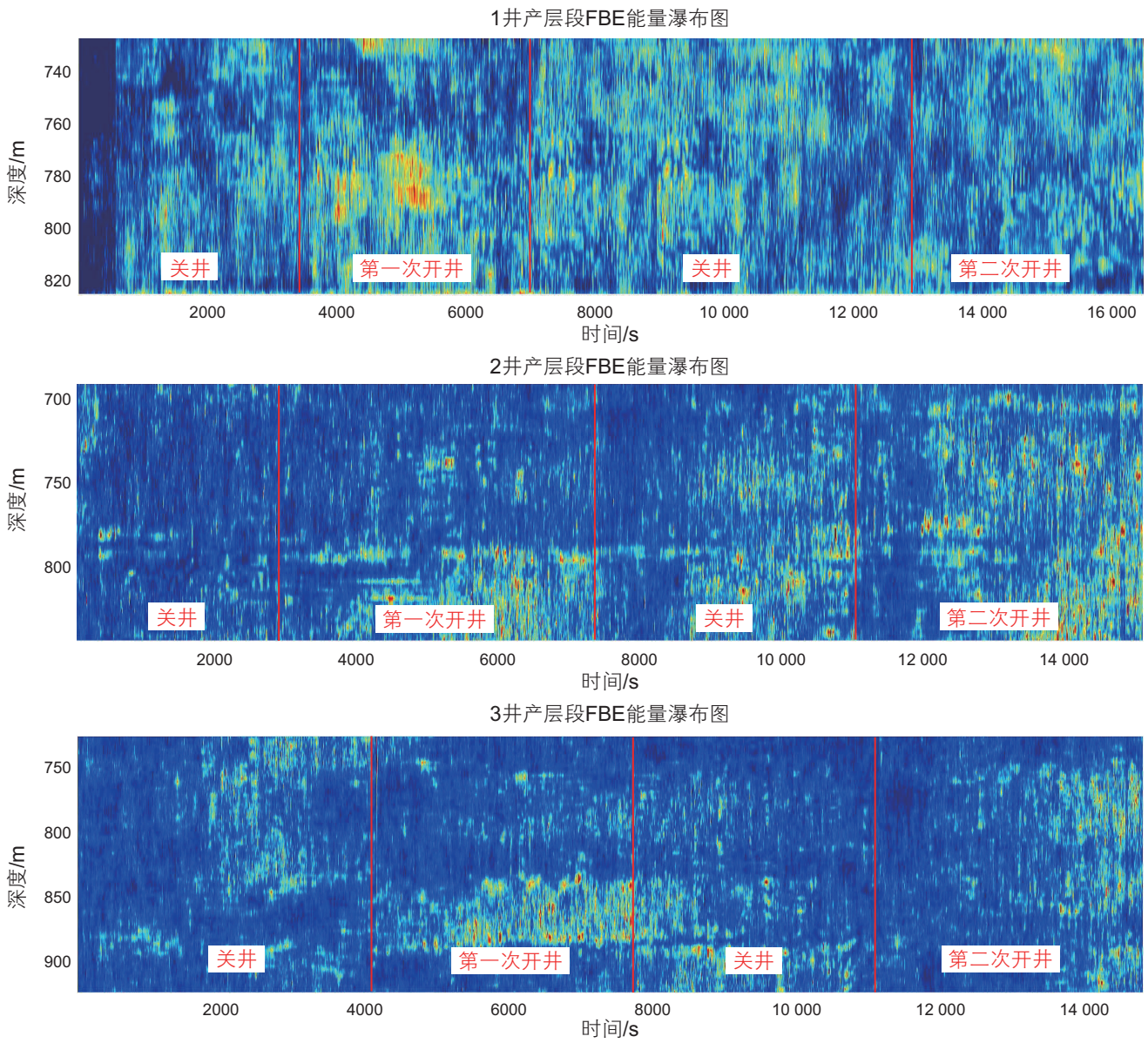


图 6 3 口井产层段 FBE 瀑布图
Fig. 6 FBE waterfall map of the production in the 3 wells

以清晰看出 4 个不同生产过程，从相对时间 0 s 开始测试，光纤刚刚下入井筒，约 1 h 后开启抽油机开始生产，产液层段开始进液，生产约 1 h 后关闭抽油机停止生产，待油井稳定约 1 h 后再次开始生产。

FBE 能量瀑布图上，3 口井在开井后均存在一定的能量响应滞后情况，抽油机开启后延迟约 20 min 后产层段才出现明显能量响应。这可能是由于产液一段时间后，能量下降，且关井时间短(第一次开井前关井约 4 h，第二次开井前仅关井 1 h)，井底能量尚未完全得到恢复。第一次开井主要产液位置位于下半部分产层，而第二次开井后，整体产液剖面分布更为均匀。在关井之后，产液并没有完全停止，这表明井口

关闭时，井下可能仍存在一定的流动。

3.3 产层特征量化分析

FBE 均值能量与井下流量呈现正相关关系。基于 FBE 均值能量可粗略判断产层不同位置实时进液情况。计算了 3 口井两次开井过程中各产层位置的均值 FBE 能量，如图 7 和表 3 所示。结果表明 3 口井第一次开井的均值能量均大于第二次开井。其中，1 井第二次开井总能量比第一次开井降低 60.6%、2 井降低 30.4%、3 井降低 26.3%。同时，第二次开井整体流量分布较为均匀，这与上文针对 FBE 能量瀑布图的分析结果一致，第一次开井时，产液位置整体位于产层偏

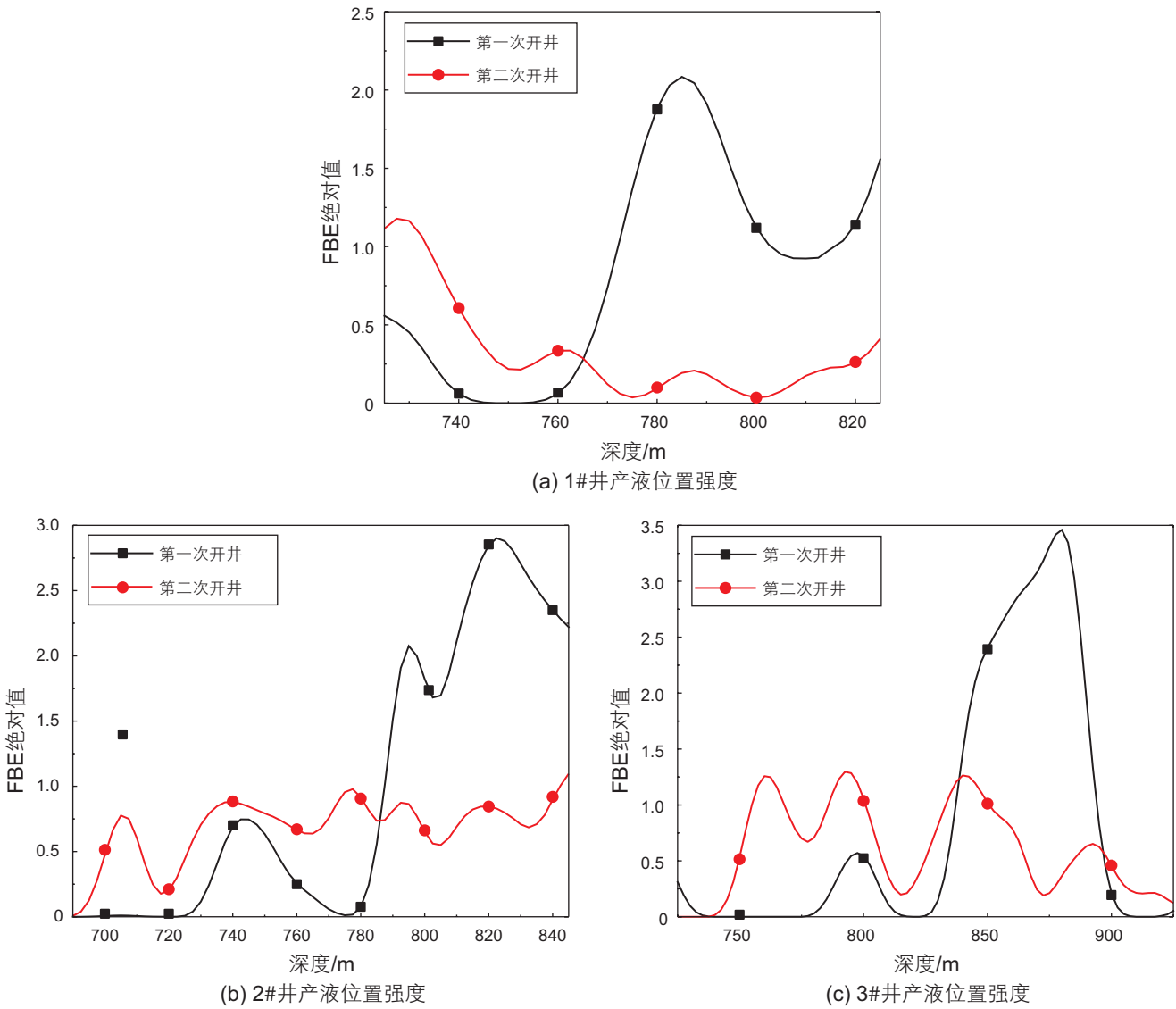


图 7 3 口井产液位置分析
Fig. 7 Production location analysis of 3 wells

表 3 3 口井能量变化统计表
Table 3 Statistics of energy changes in 3 wells

井号	第一次开井能量和/dB	第二次开井能量和/dB	能量变化值/dB	变化比值
1#	344 578.7	135 700.0	208 878.7	60.6%
2#	617 996.5	430 200.0	187 796.5	30.4%
3#	669 080.3	493 053.6	176 026.7	26.3%

下部分，而二次开井后，在产层偏上的位置，均出现了有效产液层。

进一步分析实时进液情况，通过实时能量强度从而计算实时进液剖面，其具体实时计算方法为每 10 s 为计算一次产液剖面以实现实时计算。以 3 井为例，计算了产层位置 725~925 m 实时信号强度。如图 8 所示，第一次开井过程中，刚开始 760~780 m 段

和 820~870 m 段进液，随后，820~870 m 段进液增加，760~780 m 段减少，当 820~870 m 段成为主要进液段后始终占据主导地位。这表明，优势流动通道一旦形成，其流量占比始终较高。在第二次开井过程中，没有明显优势进液簇，整体产层分布较为均匀，刚开始第二次生产，进液位置同第一次类似在 800~910 m 段。随时间变化，产液位置上移，且产层分布逐渐均匀，

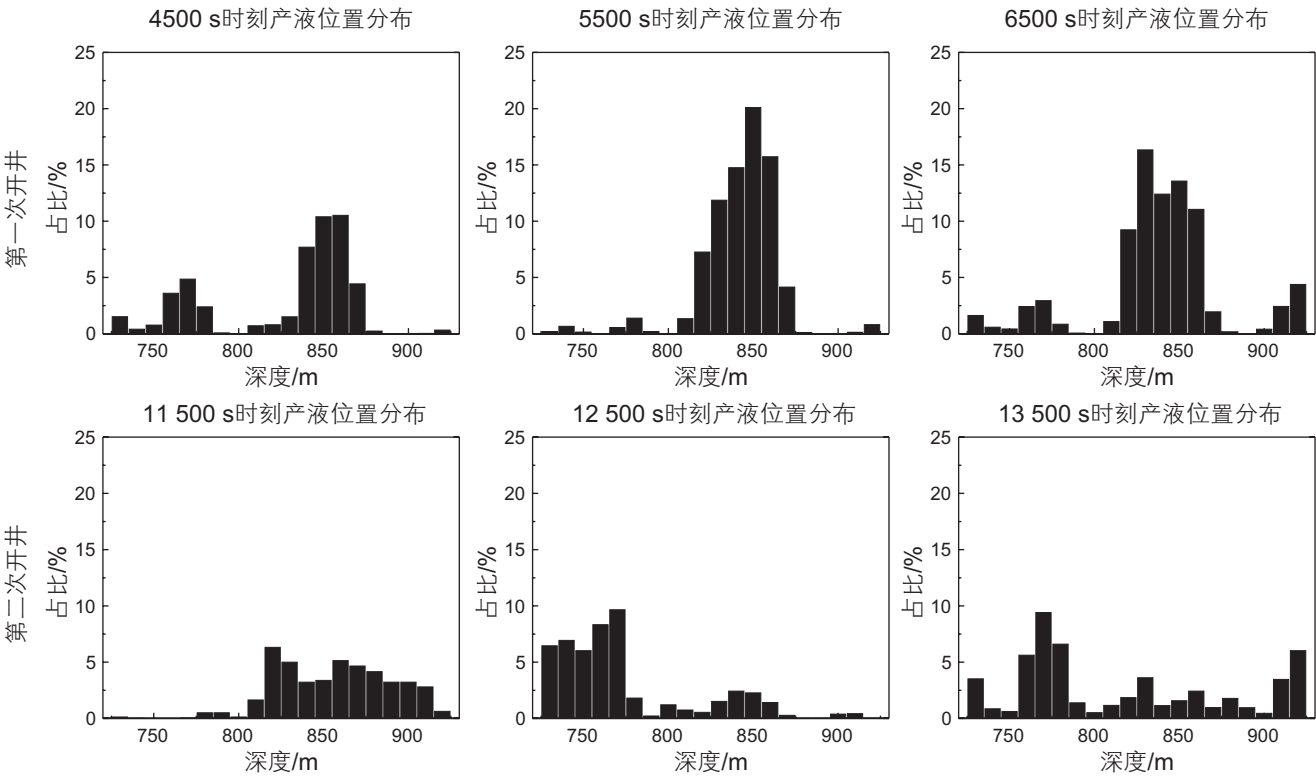


图 8 第 1,2 次开井不同时刻的产液位置分布
Fig. 8 Distribution of fluid production locations at different moments of the first and second well openings

与 FBE 瀑布图得出的结论一致。

4 结论

对我国西北 3 口稠油井开展了分布式声学光纤传感监测测试, 采集了正常生产过程中的 DAS 数据。构建了 FBE 计算模型及产液剖面计算模型, 通过实际数据对产液剖面计算方法进行验证与优化, 结合实时能量强度实现实时产层分析, 并对测试数据进行频谱分析、FBE 能量谱计算以及产液剖面计算, 形成一套完整的 DAS 数据计算产液剖面的方法。根据 3 口井的 FBE 能量谱图及产液剖面图进行分析, 本文得到了以下结论:

- (1) 形成了一套对分布式声波光纤数据计算产液剖面的数据处理方法, 并通过现场数据验证了其可行性
- (2) 针对此次测试井, 在 400~800 Hz 频率范围内, 开关井状态下的 FBE 能量差值最大, 在保留较多流动信息的情况下滤除大多数背景或环境噪声;
- (3) 在此次测试井生产过程中, 3 口井均存在一定的能量响应滞后情况(约 20 min);
- (4) 第二次开井后比起第一次开井, 整体产液剖面分布更为均匀;
- (5) 先后两次开关井的 FBE 能量强度不同, 第一次生产过程的绝对 FBE 能量更强, 推测关井时间对于绝对 FBE 能量强度存在一定影响。

参考文献

[1] 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 H Y, WANG Y S, NIU R H, 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.]

[2] 胡金海, 黄春辉, 刘兴斌, 等. 国内产液剖面测井技术面临的挑战与取得的新进展[J]. 石油管材与仪器, 2015, 1 (6): 10-15. [HU J H, HUANG C H, LIU X B. et al, Challenges and progresses on domestic production profile well logging technology [J], Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2015, 1(6): 10-15.]

[3] 栾宝琨, 韩海亮, 刘恒, 等. 井下成像技术在勘探开发领域中的应用[J]. 矿产勘查, 1-7[2025-03-14]. [LUAN B K, HAN H L, LIU

- H, et al. Application of downhole imaging technology in drilling engineering[J]. Mineral Exploration, 1–7[2025–03–14].]
- [4] 李阳. 油气井可视化层流分析方法研究[D]. 西安石油大学, 2023. [LI Y. Study on visual laminar flow analysis method of oil and gas Wells[D]. Xi'an Shiyu University, 2023.]
- [5] UKIL A, BRAENDLE H, KRIPPNER P. Distributed temperature sensing: Review of technology and applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 12(5): 885–892.
- [6] KURASHIMA T, HORIGUCHI T, TATEDA M. Distributed-temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers[J]. Optics Letters, 1990, 15(18): 1038–1040.
- [7] CULVERHOUSE D, FARAH F, PANNELL C N, et al. Potential of stimulated Brillouin scattering as sensing mechanism for distributed temperature sensors[J]. Electronics Letters, 1989, 25(14): 913–915.
- [8] 费芹. 基于拉曼散射的分布式光纤测温系统的设计与优化[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016. [FEI Q. Design and optimization of distributed optical fiber temperature sensor system based on Raman scattering [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.]
- [9] LU P, LALAM N, BADAR M, et al. Distributed optical fiber sensing: Review and perspective[J]. Applied Physics Reviews, 2019, 6(4).
- [10] SLAMA M H, SAFAR E, AL-DOSSARY A F, et al. Revolutionizing leak identification in mature fields: Coiled tubing telemetry and Distributed Temperature Sensing (DTS) unveiled in a paradigm-shifting, cost-effective intervention approach—A case study from North Kuwait Border Field[C]//ADIPEC, Abu Dhabi, UAE, November 2024.
- [11] PATEL D, WEE K, GORGI S, et al. Success story: 64 wells with hybrid real time DTS/DAS monitoring and permanent downhole gauges installed in the United Arab Emirates[C]// Paper SPE–202681–MS presented at the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE, November 2020.
- [12] 李亚辉. 基于DTS数据的底水气藏水平井产出剖面解释模型及实现[D]. 成都: 西南石油大学, 2018. [LI Y H. Production profile interpretation model and its software development based on DTS data for horizontal well in bottom water gas reservoir[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.]
- [13] CARNAHAN B D, CLANTON R W, KOEHLER K D, et al. Fiber optic temperature monitoring technology[C]. SPE 54599 presented at SPE Western Regional Meeting, 1999.
- [14] FOUCAULT H, POILLEUX D, DJURISIC A, et al. A successful experience for fiber optic and water shut off on horizontal wells with slotted liner completion in an extra heavy oil field[C]. SPE 89405 presented at SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery Tulsa, 2004.
- [15] CARPENTER C. Permanent fiber-optic DTS evaluates production enhancement[J]// J Pet Technol 75 (2023): 62–64.
- [16] 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 S L. Application of distributed optical-fiber production profile testing[J]. Well Logging Technology, 2021, 45(4): 439–444.
- [17] WANG X, LEE J, THIGPEN B, et al. Modeling flow profile using distributed temperature sensor DTS system[C]//SPE Intelligent Energy International Conference and Exhibition. SPE, 2008: SPE–111790–MS.
- [18] LI Z Y, ZHU D. Predicting flow profiles of horizontal well by downhole pressure and DTS data for water-drive reservoir[J]. SPE Production & Operations, 2010, 25(3): 296–304
- [19] HEMINK G, GROEN L, DEITRICK G, et al. Fiber optic based reservoir surveillance for injection conformance monitoring and production profiling in EOR fields[C]//SPE EOR Conference at Oil and Gas West Asia. SPE, 2016.
- [20] XU J, YANG Q, SUN W, et al. Study on continuous monitoring technology of fiber-optic production profiling[C]//SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. SPE, 2023.
- [21] MACPHAIL W, KIRKPATRICK J, BANACK B, et al. SAGD production observations using fiber optic distributed acoustic and temperature sensing: "SAGD DAS-Listening to wells to improve understanding of inflow" [C]//SPE Canada Heavy Oil Conference. SPE, 2016.
- [22] SHOTARO N, YUJI Y, TAKUJI M, et al. Continuous DAS measurements during CCUS operations onshore Japan[C]//SEG/AAPG International Meeting for Applied Geoscience & Energy, Houston, Texas, August 2024.
- [23] HADDAD M, MOHSEN A. Interpretation of DAS-Based slow strain for monitoring of hydraulic-fracture reopening during multiple injection cycles at the devine fracture pilot site[C]//SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference, Houston, Texas, USA, June 2024.
- [24] YAN Q, YANG Z, GONG W X, et al. New understanding of temperature change rules of horizontal sections of different well body structures and the relationship between production capacity and stimulation parameters based on DAS/DTS [C]// GOTECH, Dubai, UAE, May 2024.
- [25] 杜元凯. 基于分布式光纤声波传感的管道流量监测技术研究[D]. 齐鲁工业大学, 2023. [DU Y K. Research on pipeline flow monitoring technology based on distributed fiber optic acoustic sensing[D]. Qilu University of Technology, 2023.]
- [26] JIN G, FRIEHAUF K, ROY B, et al. Fiber optic sensing-based production logging methods for low-rate oil producers [C]//SPE/AAPG/

- SEG Unconventional Resources Technology Conference. URTEC, 2019.
- [27] PAKHOTINA I, SAKAIDA S, ZHU D, et al. Diagnosing multistage fracture treatments with distributed fiber-optic sensors[C]. SPE199723, 2020.
- [28] NOBLE L, LANGNES T, JONES C, et al. Well integrity flow detection using novel acoustic pattern recognition algorithms[C]. SPE203447, 2020.
- [29] NOBLE L, REES H, LANGNES T, et al. Using distributed fibre optic sensing to recover well integrity and restore production[C]//SPE/ICoTA Well Intervention Conference and Exhibition. SPE, 2021.
- [30] GRBERT M A, LI X, BOWN T, et al. Well interference testing using fiber optics production analysis[C]//SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference. URTEC, 2021.
- [31] LI T, QIAO W, LI H, et al. Distributed acoustic sensor based sand content detection in solid-liquid two-phase flow[C]//2020 Asia Communications and Photonics Conference (ACP) and International Conference on Information Photonics and Optical Communications (IPOC), Beijing, China, 2020.

(编辑 马桂霞)

第一作者及通信作者: 胡晓东(1984 年—), 男, 博士, 副研究员, 博士生导师, 主要从事水力压裂预测(裂缝扩展/支撑剂运移等)监测与智能优化等研究, huxiaodong@cup.edu.cn。