引用格式：万有余，林海，周慰，等，2026. 基于套外光纤监测的页岩油水平井压后产出效率评价[J]. 地质力学学报，32（1）：213−226. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025090

Citation: WAN Y Y，LIN H，ZHOU W，et al.，2026. Evaluation of post-fracturing production efficiency in shale oil horizontal wells based on behind-casing fiber-optic monitoring[J]. Journal of Geomechanics，32（1）：213−226. DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025090

基于套外光纤监测的页岩油水平井压后产出效率评价

万有余[1]，林　海[1]，周　慰[2]，刘　震[2]，江昊焱[1]，谢贵琪[1]，刘世铎[1]，刘　永[1]，杨建轩[1]，伍坤宇[1]

WAN Youyu[1]，LIN Hai[1]，ZHOU Wei[2]，LIU Zhen[2]，JIANG Haoyan[1]，XIE Guiqi[1]，LIU Shiduo[1]，LIU Yong[1]，YANG Jianxuan[1]，WU Kunyu[1]

1. 中国石油天然气股份有限公司青海油田公司，甘肃 敦煌 736202；
2. 中油奥博（成都）科技有限公司，四川 成都 611631
1. *Petroleum PetroChina Qinghai Oilfield Company* (*Gansu*), *Dunhuang* 736202, *Gansu*, *China*;
2. *Optical Science and Technology* (*Chengdu*) *Ltd*., *Chengdu* 611631, *Sichuan*, *China*

Evaluation of post-fracturing production efficiency in shale oil horizontal wells based on behind-casing fiber-optic monitoring

Abstract: ［**Objective**］The efficient development of shale oil in the Yingxiongling area of the Qaidam Basin relies on horizontal well volumetric fracturing. Accurately evaluating cluster efficiency during stimulation and post-fracturing production performance remains a key challenge. This study aims to investigate the application and effectiveness of behind-casing fiber-optic sensing technology for this purpose. ［**Methods**］Based on the principles of distributed fiber-optic sensing, this technology was deployed behind the casing to monitor fracturing operations and subsequent production in shale oil horizontal wells. The analysis focused on interpreting the monitoring data to assess fracture initiation and cluster contribution. ［**Results**］The behind-casing fiber-optic monitoring provided clear diagnostic results. Compared to the conventional uniform perforation method, employing a tapered perforation design increased the cluster initiation rate during fracturing from 62% to 88%, representing a 26% improvement. Furthermore, the post-fracturing production efficiency per stage was enhanced from 0.94 m^3 per stage to 3.20 m^3 per stage, a 2.4-fold increase. An additional operational finding was that controlling the fracturing operation to within 8 hours after setting the metallic dissolvable bridge plug reduced fluid loss during the treatment by 7.43%. ［**Conclusions**］The tapered perforation strategy significantly improves both cluster initiation and production contribution in the studied shale oil formation. Furthermore, optimizing the timing of fracturing operations after bridge plug setting can effectively mitigate fluid loss. ［**Significance**］This study demonstrates the practical value of behind-casing fiber-optic monitoring for guiding key engineering decisions. The findings provide precise guidance for optimizing perforation design and operational timing in volumetric fracturing of shale oil horizontal wells in the Qaidam Basin, contributing to enhanced stimulation effectiveness and development efficiency.

Keywords: Qaidam basin; Yingxiongling area; shale oil; fiber optic; monitor; perforation; slope gradient; output efficiency

摘　要：柴达木盆地英雄岭地区页岩油资源丰富，水平井体积压裂是实现其高效开发的关键技术。为了

基金项目：中国石油天然气股份有限公司攻关性应用性科技重大专项（2023ZZ15）

This research was financially supported by the Major Special Project of PetroChina Company Limited for Key and Applied Technologies (Grant No. 2023ZZ15).

第一作者：万有余（1983—），男，硕士，高级工程师，主要从事油气田勘探开发储层改造工作。Email：wanyouyuqh@petrochina.com.cn

通信作者：周慰（1993—），男，硕士，工程师，主要从事分布式光纤压裂数据处理、产液剖面解释和光纤工程监测等方面研究应用工作。Email：weizhouup@163.com

收稿日期：2024−07−20；**修回日期**：2025−12−26；**录用日期**：2026−01−21；**网络出版日期**：2026−01−21；**责任编辑**：王婧

Received：2024−07−20；Revised：2025−12−26；Accepted：2026−01−21；Available Online：2026−01−21；Handling Editor：WANG Jing

能够更加精准地评价页岩油水平井体积压裂施工中的簇开启率和压后生产中的产出效率，基于光纤传感内在机理，深入探究套外光纤监测技术在页岩油压裂作业及生产评价中的独特优势，并系统剖析该技术于柴达木盆地页岩油水平井体积压裂实践中的应用成效。套外光纤监测资料解释表明，相较于均匀射孔方式，采取坡度射孔方式可使压裂施工中簇开启率由62%提升至88%，增幅26%；压后产出效率由0.94 m^3/段提升到3.20 m^3/段，提升幅度为2.4倍。此外，将金属性可溶桥的压裂作业控制在入井后8小时内，使施工漏液量减少了7.43%。文章研究成果和认识，为柴达木盆地英雄岭页岩油水平井体积压裂的射孔方式优选及桥塞入井后施工时机的抉择提供了精准指引。

关键词：柴达木盆地；英雄岭；页岩油；光纤；监测；射孔；坡度；产出效率

中图分类号：TE357.1; P634.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1006−6616(2026)01−0213−14

DOI：10.12090/j.issn.1006-6616.2025090

0 引言

在当今全球能源格局深刻变革的时代背景下，能源安全与可持续供应已然成为各国发展的关键议题。石油与天然气的稳定供给对国家经济的平稳运行起着举足轻重的作用，在资源困难的条件下中国原油年产量保持在2×10^8 t水平(贾承造, 2024)。随着常规石油资源的日益开采与消耗，寻找替代能源和发掘非常规油气资源迫在眉睫，页岩油便是其中备受瞩目的焦点之一。中国作为能源消费大国，页岩油资源的高效开发更是迫在眉睫(陈小慧, 2017)。研究表明，中国页岩油资源量大，陆相盆地中高成熟度页岩油地质资源量为283×10^8 t(胡文瑞等, 2024)，为能源领域注入了新的希望曙光。从地域分布来看，松辽盆地、渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地以及准噶尔盆地等大型沉积盆地，成为探明储量的主要贡献地区。

柴达木盆地，作为中国西部重要的含油气盆地，独特的地质演化历史铸就了其丰富的页岩油资源基础。根据中国石油天然气集团有限公司(简称中国石油)第4次资源评价初步结果，柴达木盆地西部坳陷(简称柴西坳陷)古近系是盆地内新生界最重要的含油气系统之一，常规石油资源量24.38×10^8 t、天然气资源量6315×10^8 m^3、页岩油资源量21×10^8 t，发育全球独具特色的高原油气系统(刘国勇等, 2024)。同时，盆地内复杂的构造运动，既促进了有机质的热演化，又造就了多样的储集空间，使得页岩油得以有效富集。近年来，勘探技术的飞速进步为柴达木盆地页岩油资源的深入探究提供了有力支撑：高精度地震勘探技术能够精准识别地下页岩油储层的分布范围与构造特征；微纳米孔隙分析技术深化了科研人员对页岩油赋存状态的认知(陈敬国等, 2024)。英雄岭页岩油储层具有低孔隙度、低渗透率的典型特征，常规开采技术难以实现页岩油的经济有效动用，而水平井+体积压裂技术的发展成为了实现页岩油有效开发的关键技术(陈琰等, 2024)。水平井技术能够大幅增加井筒与油层的接触面积，使更多的页岩油藏通过人工裂缝，扩大波及体系；体积压裂技术通过创建复杂的人工裂缝网络，将原本致密的页岩油储层改造为具备高导流能力的渗流体系，极大地提高了页岩油的采收率(马立军等, 2024)。

水平井分段多簇压裂技术作为非常规油气资源开发的核心手段，其监测技术的发展直接关系到压裂改造效果和油气采收率的提升。随着技术进步和市场需求的增大，当前的监测技术逐渐从单一参数向多维度、高精度、实时化方向推进。国内外用于水平井压裂监测与诊断的技术主要有微地震监测技术、分布式光纤监测技术、压力测试技术、示踪剂产出剖面测试技术和阵列声波成像测井技术等。

传统的压裂作业凭借有限的经验与间接信息推断地下复杂的情况，难以精准把控工艺细节、评估效果。随着先进的压裂监测手段相继涌现(王欣等, 2023)，微地震监测技术利用布置在地面或井中的检波器，捕捉岩石破裂产生的微小地震信号，能实时追踪人工裂缝在地下三维空间的扩展路径、形态与尺寸，可实时追踪裂缝的动态发育情况，为后续评价压裂效果提供了关键依据，比如判断裂缝是否有效沟通了油气富集区(崔明月等, 2014)。分布式光纤传感技术能够沿着井筒连续测量温度、应变等参数，进而推断裂缝的开启、闭合状态以及流体的渗流特性，有助于深入了解地质储层的非均质性对压裂效果的影响，精准识别储层的“甜点”区域，

促使压裂工艺优化(李晓蓉等, 2022)。赵丽芝等(2022)以理论分析为基础,建立分布式光纤监测裂缝扩展的有限单元模型(FEM),结合 OFDR 分布式光纤监测裂缝实验分析得到光纤应变峰值与裂缝宽度之间的函数关系,提高了分布式光纤监测裂缝宽度的准确性。何乐等(2024)采用套管外分布式光纤开展压裂过程实时监测,发现多簇间流量分配呈随机动态变化,影响多簇进液的均匀性;且段间窜通存在 2 种光纤 DAS 信号响应模式,可揭示管内和水泥环 2 种段间窜漏路径。吕振虎等(2024)利用管外光纤监测技术监测暂堵前后段内各射孔簇进液量的变化,指出暂堵球直径与孔眼直径不匹配、孔眼朝向具有随机性、高边孔眼难以封堵等因素影响暂堵效果。王立歆等(2024)系统阐释了井下光缆布设、光缆深度标定、DAS 信号处理、压裂期间 DAS 响应提取和解释的方法,并结合涪陵页岩气井组的套管外光纤压裂监测实例,展示了 DAS 技术给非常规油气水力压裂监测带来的新视角和新认识。刘合等(2024)深入分析庆城页岩油水力压裂实验场的最新数据和成果,聚焦多簇扩展均匀性评价,为页岩油水平井分段多簇压裂提出优化建议,提高了光纤监测技术在非常规油气领域的应用潜力。Liu et al.(2024)通过耦合井筒−油藏−地质力学模拟,提高了对 DSS 信号与裂缝水力特性之间关系的理解。这些压裂监测手段的发展,加速了压裂工艺、压裂效果和地质储层的评价进程,不仅为压裂工艺技术不断迭代升级注入强大动力,也为非常规油气资源的可持续开发保驾护航。

在柴达木盆地英雄岭页岩油的勘探开发中,应用了诸多的监测手段,例如地面微地震监测、井下微地震监测、高频压力剂监测、示踪剂监测等,为评价人工裂缝的走向与尺寸、复杂缝网特征及井间干扰等提供了依据。然而,对于常规的射孔方式是否满足压裂改造要求、金属型桥射是否密封性好以及不同射孔方式的产液贡献是否存在差异等问题认识不清,制约了英雄岭页岩油水平井体积压裂改造。

该研究基于前期监测结果,开展套外光纤监测工作,涵盖方案设计、现场监测、资料处理及总结分析。结合英雄岭储层地质特征,设计套外光纤压裂与产剖一体化监测方案。压裂期间,通过均匀射孔与坡度射孔对比实验优选射孔方式,分析桥塞密封性关键因素以提升其密封性能;返排期间,分析不同射孔方式对储层改造效果的影响。通过该监测结果认识,对比分析压裂施工中的桥射联作、桥塞密封性、簇开启率、簇进液量及产出效果,进一步探索完善页岩油水平井压裂工艺技术体系。

1　分布式光纤传感技术原理

分布式光纤传感技术基于光纤信号散射特征,实现了了对声波、温度与应变等物理量的分布式、连续测量。下文首先阐述了光纤在测量声波、温度以及应变方面的基本原理,进而介绍了基于压裂 DAS 响应特征的进液量计算模型,实现了压裂加砂进液的定量解释。该技术的应用,实现了油藏产出的定量解释,为油藏产出认识与生产制度优化提供有力支持。

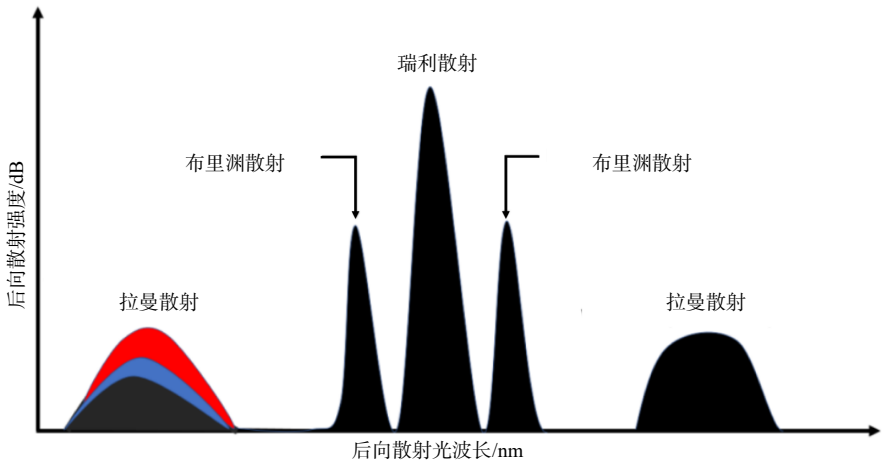
1.1　光纤监测基本原理

分布式光纤传感技术兴起于 20 世纪 70 年代。该技术中,光纤自身即是传感器也是传输媒介,其快速发展得益于光时域反射(OTDR)技术的出现。OTDR 技术最早由 M.K.Barnoski 等人提出,早期主要用于光纤断缆等异常事件的定位。其原理是通过激光器向传感光纤中输入光脉冲,脉冲在传播过程中会产生后向散射光并反向传输(卢聪等, 2024),由于光在光纤中的传输速度恒定,接收端通过解析不同时刻返回的后向散射光信号,即可获取沿光纤分布的空间点信息。

分布式光纤传感器作为一种前沿的监测装置,具有良好的抗干扰能力和稳定性,能够在恶劣的环境下保持正常工作,为油田的勘探、开发和生产提供有力的技术保障(张旭苹等, 2024)。当激光脉冲从光纤的一端射入后,会沿着光纤向前传播,与光纤内部分子发生弹性和非弹性碰撞,故光脉冲在传播中的每一点都会产生散射。其中部分散射光沿入射方向反向传播,形成后向散射光,其性质(频率、相位或强度)与散射位置的温度、应变、振动、压力等物理参数呈强相关,因此通过分析后向散射光就可以计算散射位置的物理参数。结合解调后的物理参数,光纤传感技术在石油领域已拓展到压裂监测、井筒完整性监测、地震活动、生产/注入剖面监测、碳捕集、利用与封存(CCUS)等各个方面。

分布式光纤技术作为新兴地球物理技术,在油田领域应用最为广泛的为分布式光纤声波传感技术(DAS, Distributed Acoustic Sensing),分布式光纤温度传感技术(DTS, Distributed Temperature Sensing)

和分布式光纤应变传感技术(DSS, Distributed Strain Sensing)。这三大光纤传感技术,均基于光纤不同的散射特征(图 1),在散射频率、散射强度等各个方面存在差异(张辉等, 2023),因此能实现多场景、差异化的应用。



拉曼峰呈现的不同颜色,代表不同温度条件下的拉曼散射强度

图 1 分布式光纤传感后向散射光谱示意图

Fig. 1 Schematic diagram of backscattering spectrum in distributed fiber-optic sensing

The different colors of the Raman peak represent the Raman scattering intensity under different temperature conditions.

具体而言,DAS 主要依赖于光纤的瑞利散射(Rayleigh scattering)。瑞利散射属于弹性散射,当光子与光纤中的静态杂质、密度起伏等相互作用时,仅改变传播方向,不发生能量交换,散射光的波长与入射光完全相同,只在入射光波长位置出现单一峰(图 1)。其散射频率相对较高,对声波等高频信号具有较高的敏感度,能够精确地捕捉到微小的声学变化,因此在监测地下流体流动产生的声波信号等方面表现出色。DTS 基于拉曼散射(Raman scattering)。拉曼散射是一种非弹性散射过程,光子与光纤材料光学声子发生能量交换,产生频移的斯托克斯和反斯托克斯 2 个频移光;当光子将能量传递给声子时,会产生频率较低、波长较长的斯托克斯光,当光子从处于激发态的声子吸收能量时,则产生频率较高、波长较短的反斯托克斯光;两者分别出现在入射光波长的两侧,且斯托克斯光强度远高于反斯托克斯光(图 1)。根据玻尔兹曼分布,介质中处于高能级的粒子数随温度升高呈指数增加,使反斯托克斯光强度显著上升,而斯托克斯光强度受温度影响极小。因此,其强度比与温度呈指数关系,通过检测该比值,可准确测量温度。DSS 则通常基于布里渊散射(Brillouin scattering)。布里渊散射同样属于非弹性散射,在光子与声子之间发生能量与动量交换后产生 2 个散射峰,其能量交换小,因此在散射图中紧挨着中心瑞利峰(图 1),其散射频移与光纤所受的应变有关,通过分析布里渊散射频移的变化,能够感知光纤所处环境的应变状态,从而用于监测油藏岩石的变形和裂缝的产生与扩展。

在油田生产开发中,根据应用场景布设光纤略有不同,目前主流的布设方式有:套管内、套管外、油管外以及连续油管布设等,不同方式各具优势与局限(刘合等, 2024)。整体上,国内外研究和攻关的方向仍以套管外永置式光纤为主,旨在实现对油气井实现全生命周期管理。尽管该技术尚未完全成熟、初始投资成本较高且未实现大规模应用,但其能够提供长期、连续、实时的监测数据,有助于优化生产决策、降低维护成本。需要指出的是,在断层发育、地层破碎、固井质量差的地区,光纤的铺设和固定难度较大,易受到地质运动的影响而发生断裂或移位。因此,未来的研究应聚焦于降低系统成本、提升其在极端条件下的鲁棒性,并通过多技术融合与跨区域合作,不断丰富其应用数据库,以逐步攻克成本高、复杂条件下光缆易断裂等难题(Pakhotina et al., 2020)。

随着分布式光纤传感技术在油气勘探开发领域的深入应用和广泛推广(苟量等, 2021),该技术

正为智慧油气田的构建提供全新智能感知手段。目前光纤已具备钻井−固井−压裂−生产一体化全生命周期监测能力，助力现场开发方案调整和生产制度优化，在未来智慧油气田建设中将发挥重要的技术支撑作用（申林方，2025；隋微波等，2023）。

1.2　分布式光纤压裂解释模型

DAS 技术作为一种新兴监测手段，能够实时监测压裂过程中射孔簇的声学信号，从而推断各压裂簇的加砂进液情况。其主要原理在于：压裂液通过射孔孔眼进入地层时，会因高压流体喷射、冲击、湍流产生高频声波振动，与常规背景噪声相比，此类信号在幅值以及频谱分布上均存在差异，因此可进行射孔簇进液量的计算。

基于实验和计算流体动力学模拟发现，在忽略冲蚀效应和射孔相位对流速影响的条件下，声波能量与流体流速之间存在显著的相关性，具体表现为声学能量与流体流量的三次方对数之间的线性关系：

$$\log\left(q^3\right) = A \cdot L_{\mathrm{sp}} + B \tag{1}$$

式中：L_{sp}—声学信号（声压级），dB；q—流量，$\mathrm{m^3/s}$；A、B—校正参数，常数。

分布式光纤声波（DAS）信号的能量与声学信号具有一致的相关性，因此可代替公式（1）中的 L_{sp}。水力压裂期间，需要对采集的声波 DAS 数据进行数字滤波及快速傅里叶变换处理，将其转换至频带域（FBE；毕振辉等，2021），进而计算某个时间段内特定深度位置的声波能量。在此基础上，通过对 FBE 信号进行时间平均，确定不同射孔簇之间的边界，从而确定初始深度窗口。该窗口将用于后续对每个射孔簇的 FBE 信号进行平均处理：

$$E_{\mathrm{av}}(x) = \frac{1}{N_{\mathrm{t}}} \sum_{t=1}^{N_t} E(x,t) \tag{2}$$

式中：E_{av}—FBE 信号时间平均值，dB；x—射孔在光纤上的位置，m；N_{t}—压裂期间的时间步长数；$E(x, t)$—某时间下的 FBE 频带能量，dB。

利用上述进液估计公式可将每个射孔簇的 FBE 信号转换为进液量。为评估整个压裂阶段的液量分布，需对各射孔簇的能量在时间维度上进行累加，进而得到各射孔簇的进液量。结合压裂施工参数，可综合分析该段压裂的加砂进液效果，并优化后续的压裂施工方案。

1.3　分布式光纤产液剖面解释模型

水平井产出剖面解释的目标，是将分布式光纤测试测得的温度和压力数据解释为流量分布。首先，将油藏渗流、井筒多相流及油藏和井筒热学模型构成的复合模型作为正演模型，计算出温度和压力剖面；然后，将分布式光纤测试数据与正演模型结果进行拟合，定量解释出产出剖面，从而获得水平井的流量分布情况。

研究过程基于动量守恒和能量守恒原理，分别建立了油藏模型和井筒模型。每种模型中又耦合了热学模型和渗流模型，从而构建了 4 个相互关联的子模型：油藏渗流模型、油藏热学模型、井筒多相流模型及井筒热学模型。通过上述模型进行耦合求解，可获得水平井温度剖面。

油藏渗流模型为三维非稳态多相流模型，其渗流控制方程如下：

$$\nabla \cdot \left[\frac{\rho_i k k_{\mathrm{ri}}}{\mu_i}(\nabla p_i - \rho_i g \nabla D)\right] = \frac{\partial}{\partial t}(\phi \rho_i S_i) \tag{3}$$

式中：ρ—密度，$\mathrm{kg/m^3}$；ϕ—孔隙度，%；S—饱和度，%；t—时间，s；k—地层渗透率，$\mathrm{m^2}$；r—相对含义，无量纲；k_{r}—相对渗透率，无量纲；μ—黏度，mPa·s；p—压力，MPa；g—重力加速度，9.8 $\mathrm{m/s^2}$；D—由某一基准面算起的垂直方向深度（向下为正），m；i—流体各相，水相和油相。

油藏热学模型综合考虑了焦尔−汤姆逊效应和多种微热效应的影响。在近井筒地带，其数学表现形式为：

$$-\left[\sum_i (\phi \rho_i S_i C_{\mathrm{pi}}) + (1-\phi)\rho_{\mathrm{r}} C_{\mathrm{pr}} \frac{\partial T}{\partial t} + \sum_i \left(\phi S_i \beta_i \frac{\partial p_i}{\partial t}\right) T\right] = \sum_i \rho_i u_i \cdot C_{\mathrm{pi}} \nabla T + \sum_i u_i \cdot \nabla p_i - \sum_i \beta_i T (u_i \cdot \nabla p_i) + \sum_i \rho_i g u_i \cdot \nabla D - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \tag{4}$$

$$\beta = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_{\mathrm{p}} = \frac{1}{V}\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_{\mathrm{p}} \tag{5}$$

式中：C_{p}—比热容，J/（kg·℃）；u—渗流速度，m/s；β—热膨胀系数，1/℃；p—压力，MPa；V—体积，$\mathrm{m^3}$；T—温度，℃。

井筒多相流模型主要基于质量守恒和动量守恒原理建立，其控制方程为：

$$\frac{\mathrm{d}p_{\mathrm{wb}}}{\mathrm{d}y} = -\frac{\rho_{\mathrm{wb,m}} f v_{\mathrm{wb,m}}^2}{R_{\mathrm{inw}}} - \frac{\mathrm{d}\left(\rho_{\mathrm{wb,m}} v_{\mathrm{wb,m}}^2\right)}{\mathrm{d}y} - \rho_{\mathrm{wb,m}} g \sin\theta \tag{6}$$

式中：p_{wb}—多相混合流体压力，MPa；$v_{\mathrm{wb,\ m}}$—多相混合流体速度，m/s；$\rho_{\mathrm{wb,m}}$ 为多相混合流体密度，$\mathrm{kg/m^3}$；f—摩擦系数，无量纲；R_{inw}—井筒半径，m；

g—重力加速度，9.8 m/s²；θ—井筒倾斜角，°。

井筒热学模型基于能量守恒原理建立。总传热系数包括：流体在井筒内壁的热对流，以及油管、套管和水泥环之间的热传导等。忽略动能项和黏性切变项，得到井筒温度梯度方程如下：

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}=\frac{(\rho v C_{\mathrm{p}}K_{JT})_T}{(\rho v C_{\mathrm{p}})_T}\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x}+\frac{2\alpha_{T_{\mathrm{l}}}}{R(\rho v C_{\mathrm{p}})_T}(T_{\mathrm{l}}-T)-\frac{(\rho v)_T}{(\rho v C_{\mathrm{p}})_T}g\sin\theta \tag{7}$$

式中：α—热膨胀系数，1/℃；K_{JT}—焦耳汤姆逊效应系数，无量纲；T_l—地层温度，℃。

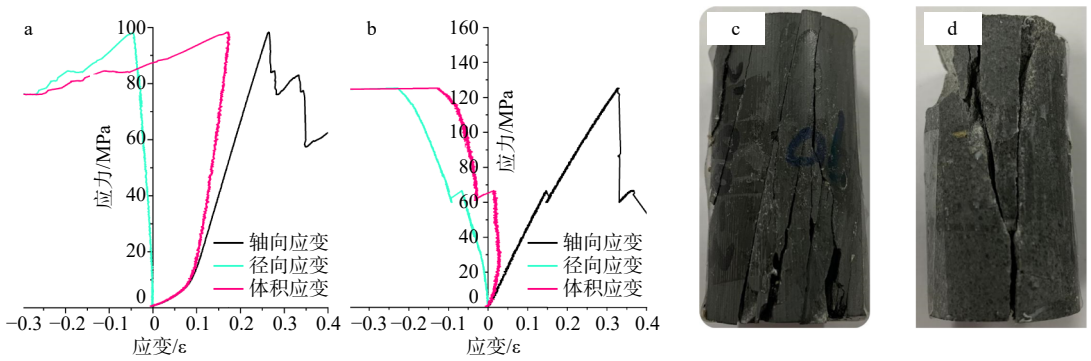
基于以上 4 个数学模型，利用有限差分的方式进行反演求解，最终获得水平井的温度分布剖面。

2 基于光纤监测调整的压裂实践

柴达木盆地英雄岭油气构造带是近年来油气勘探的重要区域。围绕“以水平井落实甜点箱体、验以井组试验验证提效模式、以直井合采探索增效潜力”三方面核心工作展开，该区勘探实现了显著突破。2021 年完试的 7 口直井均产工业油流，其中 CP1 井日产油 124 m³、气 15358 m³，成功实现了战略突破。

该区页岩油储层主要发育 2 类岩性：纹层状页岩与薄层状页岩。纹层状页岩由富有机质纹层与富碳酸盐纹层高频交互构成，纹层厚度多<1 mm；薄层状页岩以碳酸盐矿物为主，层理厚度多>1cm，二者呈复杂叠置分布（图 2）。

纹层状页岩和薄层状页岩的应力−应变曲线（图 2a、2b）显示，前者的杨氏模量低于后者，泊松比高于后者。纹层状页岩的抗压强度约为 90～100 MPa，而薄层状页岩的抗压强度为 120～130 MPa，前者显著低于后者。纹层状页岩的应力−应变曲线上具有应变台阶，该现象主要是其内部微裂隙发生错动所致。抗压强度低、具有应变台阶主要跟纹层状页岩的微裂隙高度发育相关。由 2 种岩芯单轴压缩实验后的破裂形态图（图 2c、2d）可知，两者皆易沿层理缝扩展和沟通，形成复杂裂缝网络。其中，纹层状页岩由于层理缝更为发育，压缩破坏后的形态更为复杂，产生的裂缝条数更多；薄层状页岩岩芯压后的裂缝条数相对较少，裂缝形态较为简单，主要形成共轭的 X 型剪切裂缝（万有余等，2025）。



a—纹层状页岩应力−应变曲线；b—薄层状页岩应力−应变曲线；c—纹层状岩芯破裂形态图；d—薄层状岩芯破裂形态图

图 2 纹层状和薄层状页岩应力−应变曲线及单轴压缩后破裂形态图

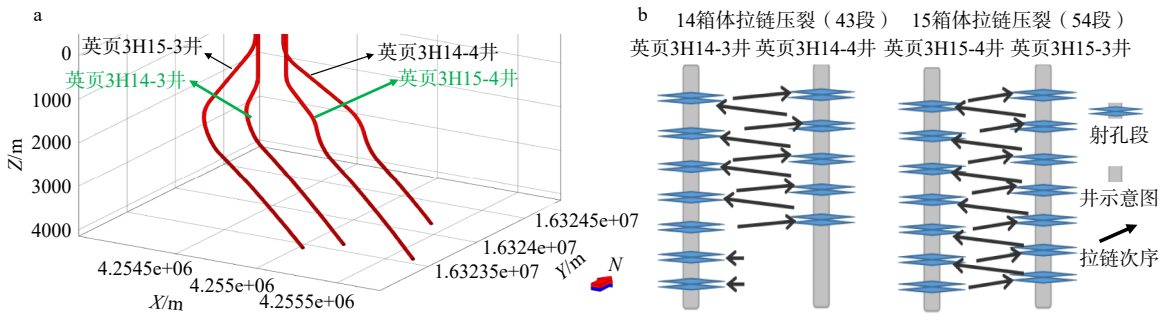
Fig. 2 Stress–strain curves and fracture morphologies after uniaxial compression of laminated and thin-bedded shale

(a) Stress–strain curves of laminated shale; (b) Stress–strain curves of thin-bedded shale; (c) Fracture morphology diagram of laminated core; (d) Fracture morphology diagram of thin-bedded core

在英雄岭第三个平台（英页 3H）部署及钻探共计 4 口井。目的储层岩性以纹层状+层状灰云岩为主，表现为中等偏强应力敏感、中等偏弱水敏、弱碱敏及弱盐敏。岩芯测试显示，储层杨氏模量为 25～40 GPa，泊松比为 0.23～0.28，可压性指数为 52%～68%，水平主应力差达 15.4 MPa，整体表现为中等杨氏模量、中等偏高泊松比及较高的主应力差（孟文，2022；王冠民等，2024）。

英页 3H 平台 4 口井的井间距为 600 m，累计压裂 93 段。在其中 2 口井中下入套管外永置式光纤监测系统（图 3a），用于评价段簇开启效率、进液量及暂堵效果，实时优化水平井压裂施工方案，评估深层页岩油压裂效果、探究压后产出主控因素。

该平台井采用“同步+拉链”立体压裂的作业



a—英页 3H 平台 4 口井轨迹示意图；b—英页 3H 平台 4 口井拉链式压裂次序

图 3　英页 3H 平台拉链式压裂部署井位（绿色箭头所指为光纤监测井）

Fig. 3　Well placement for zipper fracturing on the Yingye 3H platform (the wells indicated by green arrows are equipped with fiber-optic monitoring)

(a) Schematic diagram of well trajectories for four wells in Yingye 3H Platform; (b) Zipper fracturing sequence of four wells in Yingye 3H Platform

方式施工(图 3b)，可在同一平台对多口井进行同时压裂或交替压裂，极大提高了压裂作业效率。同时，通过优化布井模式和施工参数，在平台井组内实现多方位、多层次的压裂改造，能够最大限度地动用平台周边的地质储量，形成更大的储层改造体积，提高油气井的产量和采收率。

研究以英页 3H15-4 井的压裂监测为重点。该井基础参数如下：水平段杨氏模量平均为 41.4 GPa，泊松比平均为 0.296，最大水平主应力平均为 95.9 MPa，最小水平应力平均为 80.5 MPa，水平应力差平均为 15.4 MPa，可压性指数均值为 0.52，整体地层可压性较好。基于英雄岭干柴沟组页岩油储层特性、加密切割体积压裂思路，以形成复杂的裂缝网络为目的，该井共设计实施 27 段 148 簇压裂，总入地液量 47500 m^3，总加砂量 4696 m^3，进液强度 32 m^3/m，加砂强度 3.16 m^3/m，单段加砂量 130～250m^3。

监测采用中油奥博(成都)科技有限公司自主研发的 DAS 及 DTS 采集设备。其中，DAS 采集参数为：空间分辨率 1 m，采样间隔 1 ms，采样频率 0～2000 Hz；DTS 采集参数为：空间分辨率 0.25 m，采样间隔 30 s，温度分辨率 0.01℃。

由于目前缺乏可用于对比分析的实际监测资料，无法融合高频压力、示踪剂等多源数据进一步评估该技术的可靠性和误差范围，因此，文章结论仅基于实测光纤监测数据进行解释说明。

2.1　段内射孔方式优化

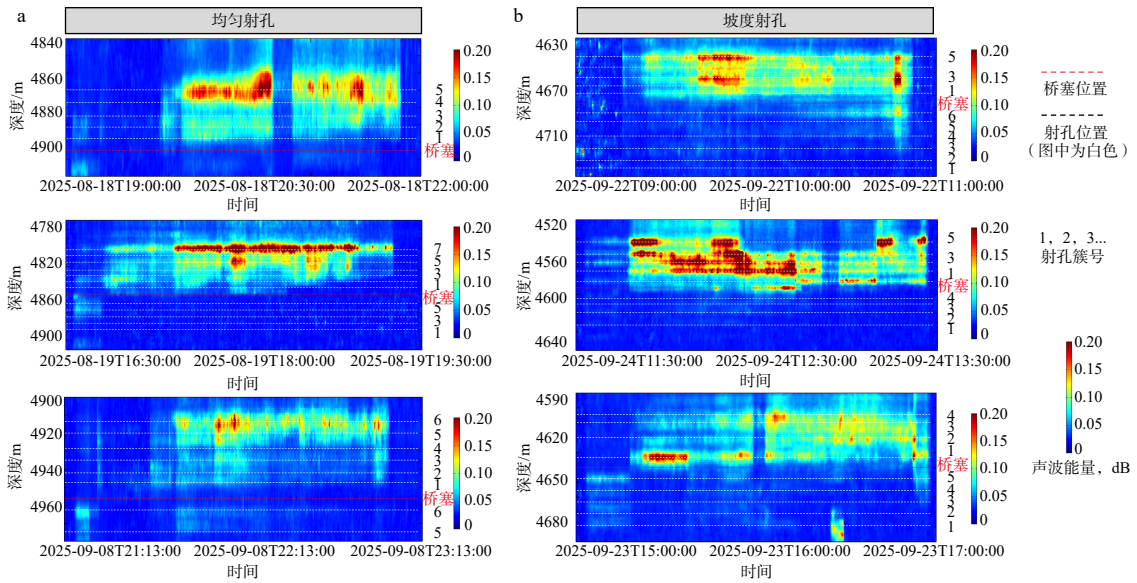
在压裂前期，充分考虑地质工程因素，优选孔隙度较大、含油饱和度较高、全烃含量高的位置进行射孔，以保障高产。该井一、二类储层钻遇率高，不同深度下储层条件类似，前期均采用均匀射孔压裂。然而，实际监测结果显示，均匀射孔并未达到各簇均匀起裂的效果，段内裂缝开启率较低，压裂液主要集中在各段的跟端(即井筒的较近端)，而趾端(即井筒的较远端)在裂缝开启和进液效果方面表现相对较差(图 4a)。这种段内进液分布不均匀性导致人工裂缝的扩展不均匀，影响压裂的整体效果。为提升储层改造效果，现场实时调整了射孔方式，改用坡度射孔压裂。以第 4 段为例，原设计均匀布孔 6 簇每簇 5 孔；压裂后依据 DAS监测数据计算各簇进液占比，并以此优化后续段内 6 簇的社恐弹数配置。再例如在第 8 段中，将布孔方式变更为跟端 2 簇每簇 4 孔、中间 2 簇每簇 6 孔、趾端 2 簇每簇 8 孔的坡度射孔设计。调整后，趾端各簇的裂缝开启及进液效果改善显著，各簇开启率整体提升，压裂液进入更为均匀，段内改造均匀性也得到了明显改善(图 4b)。

通过实时监测与动态调整，采用“减少跟端射孔，增加趾端射孔”的策略，提高了压裂改造效果，为该区后续射孔方案优化提供了有力的数据支撑。

2.2　桥塞施工方式优化

水平井分段多簇压裂是提高油气井产量的有效手段，而桥塞作为这一过程中的关键工具，为每一段的压裂作业提供相对独立的压裂环境，确保压裂液和支撑剂更好地进入地层，促进复杂人工裂缝的生成。因此，桥塞的密性直接关系到压裂效果的好坏。

在英页 3H15-4 井光纤压裂监测期间，现场对桥塞的密封效果进行实时监测，计算了段内的进液量



a—均匀射孔光纤 DAS 示意图；b—坡度射孔光纤 DAS 示意图

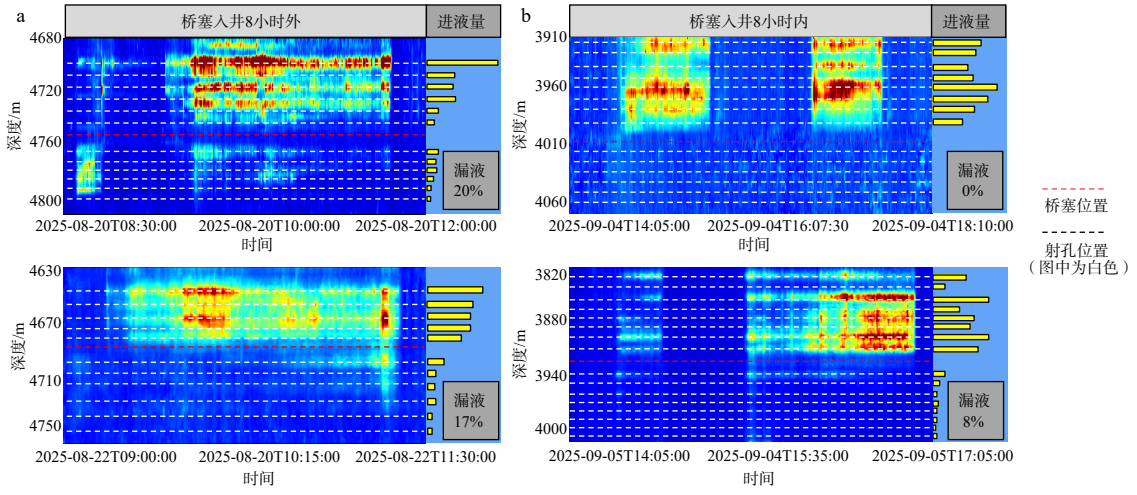
图 4 均匀射孔压裂与坡度射孔压裂光纤 DAS 信号对比

Fig. 4 Comparison of fiber-optic DAS signals between uniform perforation fracturing and slanted perforation fracturing

(a) Schematic of fiber-optic DAS for uniform perforation; (b) Schematic of fiber-optic DAS for tapered perforation

以及漏液量(图 5)。监测结果清晰显示，不同桥塞入井时间下，桥塞封隔性能存在明显差异。

当桥塞入井 8 小时后进行压裂时，相应两段的漏液量分别是 20% 和 17%(图 5a)。现场记录显示，这两段桥塞入井时间分别为 11.5 小时和 11 小时。分析认为，桥塞漏液与桥塞入井时间较长有关，后续作业时调整为，分别在桥塞入井 2.5 小时和 2.2 小时内实施压裂。DAS 瀑布图显示，桥塞下部声波能量较桥塞 8 小时以上压裂时明显减弱，通过计算得知漏液量分别是 0% 和 8%(图 5b)。对比结果表明，桥塞井下时间越短，密封效果越好。对英页 3H15-4 井各段的桥塞密封效果进行统计发现，桥塞入井 8 小时后压裂的段平均漏液量达 14.25%，密封性均较差；而在桥塞入井 8 小时内压裂的平均漏液量为



a—桥塞入井 8 小时外压裂光纤 DAS 示意图；b—桥塞入井 8 小时内压裂光纤 DAS 示意图

图 5 英页 3H15-4 井桥塞入井 8 小时前后压裂漏液现象对比

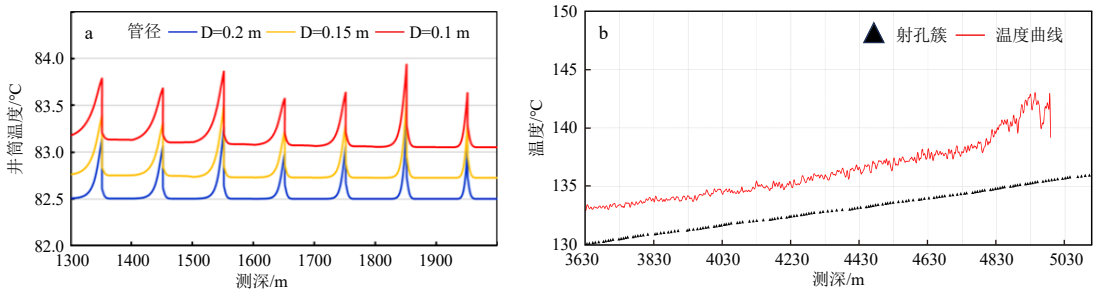
Fig. 5 Comparison of fluid loss before and after eight hours of plug setting in Well Yingye 3H15-4 using hydraulic fracturing

(a) Schematic of fiber-optic DAS during fracturing beyond eight hours after bridge plug setting; (b) Schematic of fiber-optic DAS during fracturing within 8 hours after bridge plug setting

6.82%，密封性均较好，保障了本段压裂簇的开启。

2.3　基于光纤测试的页岩油压后产出认识

套管外光纤监测系统不仅能在压裂过程中实时评价压裂效果，也可在后期产出过程中实现井下的产出剖面定量分析。根据油藏压裂水平井温度剖面特征数值模拟（图 6a），在流体从储层产出至井筒的过程中，分布式光纤测温（DTS）监测到的温度曲线并非平滑的直线，而是在特定的射孔簇位置呈现出明显的“局部温升”异常特征。这一现象主要源于流体的节流效应（焦耳–汤姆逊效应）：当高压储层中的流体通过射孔孔眼节流进入井筒时，流体压力骤然降低，导致其温度瞬时升高，从而在 DTS 温度剖面上形成可识别的温度峰值。通过峰值提取法，对温度剖面上的峰值进行识别；并结合英页 3H15-4 井压裂射孔簇位置设计，对去噪后的 DTS 温度剖面进行分析，识别出光纤覆盖具有段产出贡献的射孔簇（图 6b）。



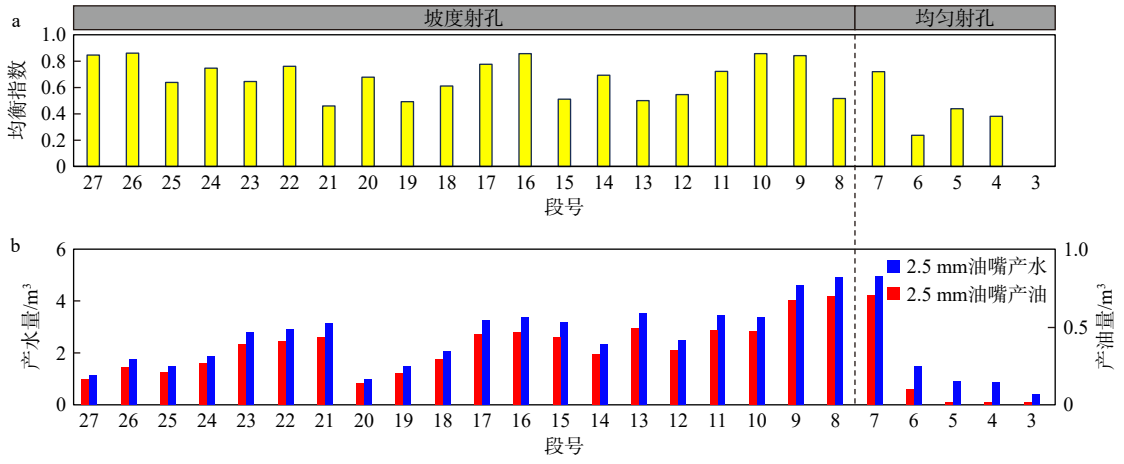
a—压裂水平井温度剖面特征图；b—英页 3H15-4 井温度曲线图

图 6　压裂水平井温度剖面特征数值模拟及英页 3H15-4 井实测温度曲线

Fig. 6　Numerical simulation of temperature profile characteristics in fractured horizontal wells and measured temperature curves of Well Yingye 3H15-4

(a) Characteristic diagram of temperature profile for fractured horizontal wells; (b)Temperature curve of Well Yingye 3H15-4

在英页 3H15-4 井生产过程中，利用关井温度曲线以及生产温度曲线，反演得到放喷期间井下各段的产出情况（图 7）。压裂均匀指数评价结果显示（图 7a），均匀指数越接近 1，该段的压裂改造效果较好。产出剖面结果显示（图 7b），水平井各段之间的产出量存在显著差异：整体表现为采用坡度射孔的段产出均较高，平均产量 2.26 m^3/段，而均匀射孔的井段产出量则相对较低，平均产量 0.94 m^3/段。对比



a—英页 3H15-4 井压裂后各段均匀指数柱状图；b—-英页 3H15-4 井压裂后各段产出效果柱状图

图 7　英页 3H15-4 井压后各段改造均匀性与产出效果

Fig. 7　Production performance of each interval after fracturing in Well Yingye 3H15-4

(a) Histogram of uniformity index for each interval of Well Yingye 3H15-4 after fracturing; (b) Histogram of production performance for each interval of Well Yingye 3H15-4 after fracturing

图 7a 与图 7b 可发现，均匀指数与后期产出剖面结果具有明显正相关性。第 3—7 段采用均匀射孔，均匀指数较低，产出效果较差；反之，第 8—27 段采用坡度射孔，压裂效果较好，后期产量较高。

为排除液量、砂量等因素的影响，进一步对比第 4 段和第 11 段的产出情况：前者产量较低，而后者产量相对较高。综上表明，对比均匀射孔，坡度射孔更易提高页岩油的产出效率。

3 基于光纤监测的压裂及产出分析

3.1 簇开启率提升分析

现场先后采用了均匀射孔与坡度射孔 2 种方式。通过统计英页 3H15-4 井各段簇数、开启簇数、簇开启率及平均开启率等数据，比较不同射孔方式对压裂改造效果的影响，结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出，不同射孔方式下簇开启率存在明显差异。前期 3—7 段采用均匀射孔的方式，光纤监测显示簇开启率低，且各簇开启及进液集中在跟段；调整为坡度射孔后，各簇均匀起裂，簇开启率明显提高，进液均匀性得到改善。数据显示，均匀射孔段的平均簇开启率为 62.62%；而坡度射孔段的平均簇开启率为 87.92%，较前者提高了 26%，表明坡度射孔改善了压裂改造效果。

由于各簇实际射孔簇数不一，依据实测数据对比同等液量、砂量等工程因素下均匀射孔与坡度射孔下的结果。以均匀射孔的第 4 段与坡度射孔的第 11 段为例，结果显示同等液量、砂量条件下，坡度

表 1 英页 3H15-4 井簇开启率统计数据表

Table 1 Statistical data of cluster well initiation rate for Well Yingye 3H15-4

压裂段	液量/m³	砂量/m³	射孔方式	簇数/个	开启簇数/个	簇开启率/%	平均开启率/%
第3段	2218.13	103.82	均匀射孔	6	—	—	62.26
第4段	2205.86	182.86		6	3	50.00	
第5段	1868.74	106.04		5	3	60.00	
第6段	2325.38	166.31		7	4	57.14	
第7段	2069.63	146.29		6	5	83.33	
第8段	2013.22	174.82	坡度射孔	6	6	100.00	87.92
第9段	1767.53	192.57		5	5	100.00	
第10段	1629.85	142.28		4	4	100.00	
第11段	2156.34	186.19		5	4	80.00	
第12段	1822.38	15013.95		5	4	80.00	
第13段	1834.38	164.07		6	4	66.70	
第14段	1746.58	161.22		5	5	100.00	
第15段	2006.93	217.33		6	6	100.00	
第16段	1703.84	188.04		6	5	83.33	
第17段	1381.59	140.82		5	5	100.00	
第18段	1708.42	170.52		5	4	80.00	
第19段	1585.60	181.43		4	3	75.00	
第20段	1363.26	123.13		3	3	100.00	
第21段	1704.71	164.46		8	7	87.50	
第22段	2187.61	221.22		8	6	75.00	
第23段	2127.99	223.97		8	6	75.00	
第24段	1816.60	190.89		6	6	100.00	
第25段	1586.50	145.88		5	4	80.00	
第26段	1252.46	125.24		5	5	100.00	
第27段	933.16	101.91		4	4	100.00	

射孔的各簇开启率和均匀指数明显高于均匀射孔。

综上，在英页 3H15-4 井的现场监测中，各簇开启率的提升主要得益于坡度射孔方式的采用，原因主要有以下 3 点。

（1）地应力场重构与裂缝竞争抑制。英页 3H15-4 井在前期压裂设计阶段考虑了地层的影响，以物性相似的地层为间隔进行分段压裂设计，尽量降低由于地层差异大导致的进液不均匀问题。根据岩石力学理论，最大主应力方向上岩石的抗拉强度相对较弱，裂缝通常沿最大主应力方向扩展。然而，均匀射孔条件下，多个射孔簇的对称分布会引发“裂缝竞争效应”：在压裂过程中，最先起裂的裂缝由于优先占据了压裂液的能量，会迅速形成主导裂缝，并显著抑制后续射孔簇的裂缝扩展；由于压裂液的能量有限，一旦主导裂缝形成，剩余的能量就不足以支持其他裂缝的充分扩展（毕振辉等，2021）。相比之下，坡度射孔通过精心调整射孔弹的数量和布局，有效重构了射孔簇周围的地应力分布，打破了均匀射孔下的几何对称性，使得各射孔簇周围的应力状态变得复杂多样。这种新的地应力场减轻了近井筒区域的地应力集中效应，降低了裂缝竞争效应的发生概率，使得各射孔簇中的裂缝有更多的机会和能量进行扩展，而不再是形成单一的主导裂缝。

（2）流体动力学参数优化与流量均匀分配。在均匀射孔过程中，由于井筒摩阻与惯性效应的共同作用，往往导致各射孔簇之间流体分配不均，进而造成簇开启率低、进液均匀性较差等问题。具体表现为：近井端的射孔簇因流速过高而形成局部高压区，压裂液优先进入该区域，抑制了其他簇的有效开启。坡度射孔通过差异化布置射孔弹数量（趾端多，跟端少），调节各簇间流体阻力分布。趾端因射孔弹数量较多，流动阻力相对较小，促使更多的流体向趾端流动；跟端由于射孔弹数量较少，流动阻力相对较大，流体流量相应减少，从而实现了各射孔簇之间流量的均匀分配，提高了压裂液的利用率以及簇开启率。

（3）应力阴影效应削弱与多裂缝协同扩展。已扩展裂缝对邻近区域的应力屏蔽（即应力阴影效应）是抑制多簇开启的主要因素之一。研究结果表明，距离较近的裂缝之间存在较强的应力干扰，会限制裂缝扩展延伸，降低裂缝的宽度及长度（肖佳林等，2024）。在均匀射孔条件下，主导裂缝的扩展会显著提高邻近区域的闭合压力，导致后续裂缝难以起裂。此现象在水平井分段多簇射孔压裂过程中尤为明显，严重影响了压裂效果和油气井的生产效率。由于应力干扰，外侧裂缝受到外向应力较小，而中部裂缝受到内向挤压应力较大，导致中部压裂裂缝流体流动受阻，向外部两侧流动，造成各射孔簇未被压开及注液量的分布不均。坡度射孔通过分散射孔弹数量，在易于起裂的根部减少簇内射孔数量，在不易起裂的趾部增加簇内射孔数量，保障整个水平段的各簇均匀起裂。北美某页岩气井采用变射孔参数方案进行了现场试验（跟部五簇孔径为 0.91 cm，趾部五簇为 12.19 cm），支撑剂示踪剂监测结果显示射孔簇被充分压开（蒋恕等，2023；王洋，2023），体现了该思路在削弱应力阴影、实现多裂缝协同扩展方面的有效性。

3.2　金属性可溶桥塞渗漏分析

在执行“金属性可溶桥塞入井 8 小时内压裂”措施前，英页 3H15-4 井已完成压裂 10 段，平均漏液量占比为 14.25%，桥塞漏液量较多；在实施该措施后，后续压裂的 17 段，平均漏液量占比为 6.82%，降低了 7.43%，提高了压裂液利用效率和整体压裂效果，支撑了压裂工程目标的实现。结合现场实践分析，漏液量的成功控制主要得益于以下 2 个方面。

（1）减少桥塞井下时间，提高密封效果。由于英页 3H15-4 井属于深层页岩油气井，实测井底温度约 140℃，在高温条件下镁铝合金溶解较快；同时，材料强度统一性存在差异，导致金属桥塞的稳定性降低（杨敏等，2024）。因此当桥塞在井下停留时间过长，部分结构溶解导致桥塞密封性降低，进而引发漏液。

（2）优选携带销钉式结构的金属性可溶桥塞。桥射联作期间包含销钉密封与卡瓦式密封 2 种机制。压裂期间发现，销钉结构的桥塞在此平台密封性优于卡瓦密封。卡瓦密封在井下可能因压力的突升发生微位移，导致密封界面出现间隙，在压裂过程中漏液量较多；且从力学角度分析，卡瓦锚定力受套管表面粗糙度影响较大，若套管存在磨损或腐蚀，卡瓦的初始坐封效果可能迅速衰减（何祖清等，2013）。相比之下，销钉结构通过机械锁定形成刚性连接，即使在动态载荷下也能维持压缩状态，防止密封界面松弛；此外，销钉式桥塞通过预置销钉实现胶筒与套管的刚性固定，相较于卡瓦的摩擦锚定，销钉可提供更均匀的径向支撑力。卡瓦密封依赖卡瓦牙与套管的局部啮合，接触应力集中于齿尖区

域,易造成套管损伤并引发应力集中导致的密封失效;而销钉设计通过多点分布将接触应力分散至更大面积,降低局部过载风险,从而提升密封可靠性。

3.3 压后产出效率提高分析

英页 3H15-4 井产液剖面结果显示,水平井均匀射孔共计 7 段,平均产液贡献率为 0.94 m^3/段;坡度射孔共计 20 段,平均产液贡献率为 2.26 m^3/段。坡度射孔段产出效率提高了 2.4 倍,产出效果更好。该优势主要得益于坡度射孔对裂缝网络的优化以及对砂堵风险的降低。

(1)坡度射孔促进了复杂裂缝网络的形成。基于前期光纤压裂监测的认识,均匀射孔导致跟端部分优势簇形成,并抑制其余簇开启,致使压裂裂缝扩展均匀性较差;执行坡度射孔后,各压裂段簇开启率明显提高,多簇裂缝开启使得裂缝间形成良好的协同作用,在扩展过程中可相互补充和支撑,共同承担地层应力,减少裂缝之间的竞争和干扰(孙景行等,2022),有利于形成复杂裂缝网络,从而增加裂缝表面积,为油气的流动提供了更多的运移通道,提高油气的产出效果。

(2)坡度射孔降低了砂堵的可能性。均匀射孔使流体主要从个别开启的簇流出,流速快、冲击力大,易导致井周砂粒松动随流体进入射孔孔眼,进而增加砂堵的可能性;坡度射孔通过提升各簇开启率,使各簇射孔更均匀地分布,流体从更多簇流出,流速相对降低,对地层的冲刷和破坏作用减弱,从而减少出砂,降低了砂堵风险。

4 结论与建议

4.1 主要结论

(1)基于青海油田英页 3H 平台深层页岩油套管外光纤监测实例,对比了不同射孔方式对页岩油各簇开启率及改造均匀性的影响。结果表明,均匀射孔易致使压裂期间近井筒段产生主导裂缝,抑制后续各簇开启;调整为坡度射孔后,簇开启率由 62% 提高至 88%,改善了压裂改造效果。

(2)针对平台压裂施工期间的漏液现象,系统开展了全井段漏液量的定量评价。研究发现,金属性可溶桥塞的密封性随入井时间延长而降低。入井 8 小时内压裂,平均漏液量 6.82%;超过 8 小时,平均漏液量升至 14.25%。这说明,金属性可溶桥塞在长时间入井后,其密封性能会受到一定影响,从而导致漏液。为确保压裂改造的质量和效果,建议在桥塞下入后的 8 小时内尽快进行压裂施工。

(3)光纤长期生产动态监测证实,射孔方式对压后产出存在一定影响。相较于均匀射孔方式,坡度射孔方式通过优化射孔布局,能够更有效地提高簇开启率,促进复杂缝网形成,改善压裂改造效果,提高压后产出效率。

4.2 未来工作建议

基于此次监测认识及当前技术发展趋势,为深化光纤监测在体积压裂优化中的作用,建议在以下方面持续攻关:

(1)开展多参数实验对比,构建大数据基础。该研究虽然展示了分布式光纤监测技术在深层页岩油压裂监测中的应用效果,但仍存在样本段数样较少等局限性。建议后续进一步优化对比试验,实验多种射孔方式,进行均匀射孔、纺锤型射孔、均匀射孔等同等地质工程情况下的压裂改造效果评价与压后评估,进一步优化射孔方案。

(2)深化数据分析,优化解释模型与方法。建议结合大数据与人工智能等先进技术,建立更加精准、高效的数据解释模型和方法,提高对光纤监测数据的解读能力。通过深入分析监测数据,揭示地下储层品质、水力裂缝扩展等主控机制,为针对性改进井网布置、增产改造工艺和排采制度等提供科学依据。

作者贡献声明: 万有余、林海、周慰负责论文构思、数据分析、研究方法和论文写作;刘震、刘世铎、刘永参与数据分析和技术手段的实践应用和绘图;张庆辉,房国庆,谢贵琪,江昊焱参与数据分析、研究方法和修改。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: WAN Youyu, LIN Hai, and ZHOU Wei conceived the study, performed data analysis, designed the research methodology, and drafted the manuscript; LIU Zhen, LIU Shiduo, and LIU Yong participated in data analysis, practical application of technical approaches, and figure generation; ZHANG Qinghui, FANG Guoqing, XIE Guiqi, and JIANG Haoyan were involved in data analysis, refinement of the research methodology, and manuscript revision. All authors have read and approved the submission and publication of the

manuscript.

利益冲突声明：本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests: All authors declare no conflict of interests.

References

BI Z H, WANG L, YANG H Z, et al., 2021. Development and verification of a physical simulation experiment system for initiation and propagation of multiple clusters of hydraulic fractures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 40(11): 2273-2285. (in Chinese with English abstract)

CHEN J G, DENG Z W, WANG F, et al., 2024. Key seismic exploration techniques for identifying small faults and carbonate fracture-cavity bodies in Yingxiongling structural belt, Qaidam Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 59(2): 290-298. (in Chinese with English abstract)

CHEN X H, 2017. Advances in the research on the occurrence state and resources assessment of shale oil[J]. Science Technology and Engineering, 17(3): 136-144. (in Chinese with English abstract)

CHEN Y, ZHANG Y S, XU Z H, et al., 2024. Breakthroughs in hydrocarbon exploration in the Ganchaigou area, Qaidam Basin and their implications[J]. Oil & Gas Geology, 45(4): 1018-1031. (in Chinese with English abstract)

CUI M Y, LIU Y Z, XIU N L, et al., 2014. Analysis of factors affecting the formation of Effective Stimulated Reservoir Volume (ESRV)[J]. Oil Drilling & Production Technology, 36(2): 82-87. (in Chinese with English abstract)

GOU L, ZHANG S H, YU G, et al., 2021. Optical sensing promotes intelligence, innovation and development of reservoir geophysical technology[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 40(5): 55-64. (in Chinese with English abstract)

HE L, ZHU J H, LIANG X, et al., 2024. Evaluation of multi-cluster fracturing effects in horizontal shale gas wells based on optic fiber monitoring outside casing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 52(4): 110-117. (in Chinese with English abstract)

HE Z Q, DING S D, LIAN Z H, et al., 2013. Setting process simulation on bridge plug research[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 35(2): 164-169. (in Chinese with English abstract)

HU W R, ZHANG S T, XU S Y, et al., 2024. Practice, challenges and prospects of oil and gas field development in China[J]. China Petroleum Exploration, 29(5): 1-11. (in Chinese with English abstract)

JIA C Z, 2024. Prospects and five future theoretical and technical challenges of the upstream petroleum industry in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 45(1): 1-14. (in Chinese with English abstract)

JIANG S, LI Y P, DU F S, et al., 2023. Recent advancement for improving gas production rate from perforated clusters in fractured shale gas reservoir[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 13(1): 9-22. (in Chinese with English abstract)

LI X R, LIU X F, ZHANG Y, et al., 2022. Application and progress of oil and gas well monitoring techniques based on distributed optical fiber sensing[J]. Oil Drilling & Production Technology, 44(3): 309-320. (in Chinese with English abstract)

LIU G Y, WU S T, WU K Y, et al., 2024. Characteristics and hydrocarbon accumulation model of Paleogene whole petroleum system in western depression of Qaidam Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 51(5): 951-961. (in Chinese with English abstract)

LIU H, MU L J, QI Y, et al., 2024. Evaluation and optimization suggestions of multi-cluster equilibrium of segmented fracturing based on optical fiber monitoring[J]. Drilling & Production Technology, 47(6): 1-7. (in Chinese with English abstract)

LIU L J, GUO X L, WANG X G, 2024. Integrated wellbore-reservoir-geomechanics modeling for enhanced interpretation of distributed fiber-optic strain sensing data in hydraulic-fracture analysis[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 16(8): 3136-3148.

LU C, LI Q Y, GUO J C, 2024. Research progress of distributed optical fiber sensing technology in hydraulic fracturing[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 14(4): 618-628. (in Chinese with English abstract)

LYU Z H, LYU B, LUO Y, et al., 2024. Optimization of in-stage multi-cluster temporary plugging scheme based on optical fiber monitoring[J]. Petroleum Drilling Techniques, 52(1): 114-121. (in Chinese with English abstract)

MA L J, CHAI H Q, FENG L Y, et al., 2024. Optimization of reasonable well spacing for continental interbedding shale oil horizontal wells using field parameter method[J]. Oil Drilling & Production Technology, 46(3): 317-325. (in Chinese with English abstract)

MENG W, TIAN T, SUN D S, et al., 2022. Research on stress state in deep shale reservoirs based on in-situ stress measurement and rheological model[J]. Journal of Geomechanics, 28(4): 537-549. (in Chinese with English abstract)

PAKHOTINA I, SAKAIDA S, ZHU D, et al., 2020. Diagnosing multistage fracture treatments with distributed fiber-optic sensors[J]. SPE Production & Operation, 35(4): 852-864.

SHEN L F, HUA T, WANG Z L, et al., 2025. Effect of parameter spatial variability on fracture propagation morphology of rock hydraulic fracturing[J]. Rock and Soil Mechanics, 46(4): 1294-1302. (in Chinese with English abstract)

SUI W B, WEN C Y, SUN W C, et al., 2023. Joint application of distributed optical fiber sensing technologies for hydraulic fracturing monitoring[J]. Natural Gas Industry, 43(2): 87-103. (in Chinese with English abstract)

SUN J X, ZENG B, LIU J C, et al., 2022. Modeling study on the hydraulic fracturing of deep shale reservoir in southern Sichuan[J]. Journal of Engineering Geology, 30(4): 1193-1202. (in Chinese with English abstract)

WAN Y Y, WANG X Q, LIN H, et al., 2025. Experimental study on sweet spot evaluation of Yingxiongling shale oil reservoir[J]. Science Technology and Engineering, 25(11): 4496-4504. (in Chinese with English abstract)

WANG G M, ZHU X Y, LIU H, et al., 2024. The application of sedimentary microfacies on the fracability of tight sandstone reservoir in Chang 7 member of Longdong area in the Ordos Basin[J]. Journal of Geomechanics, 30(6): 893-905. (in Chinese with English abstract)

WANG L X, LU Z Y, YANG X C, et al., 2024. Research and Application of Distributed Optical Fiber Fracturing Monitoring Technology[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 31(6): 1039-1046. (in Chinese with English abstract)

WANG X, CAI B, LI S, et al., 2023. Development process and prospect of CNPC's reservoir stimulation technologies[J]. Oil Drilling & Production Technology, 45(1): 67-75. (in Chinese with English abstract)

WANG Y, GAO R, LIU W, 2023. Design of concrete crack displacement sensor based on optical fiber bending loss[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 42(3): 87-90. (in Chinese with English abstract)

XIAO J L, LI B L, YOU Y, et al., 2024. Analysis of fracturing fracture characteristics and production increase and stimulation strategy of continental shale in Fuxing Block[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 31(6): 1066-1075. (in Chinese with English abstract)

YANG M, LIU T, HE Y, et al., 2024. Development and application of all metal soluble bridge plug at high temperature[J]. Petrochemical Industry Technology, 31(1): 82-84. (in Chinese with English abstract)

ZHANG H, LÜ Q T, ZHANG Y, et al., 2023. Recent advances in geoscience using Fiber Bragg Grating(FBG) and Distrusted Acoustic Sensing(DAS) and the road ahead[J]. Progress in Geophysics, 38(3): 1416-1454. (in Chinese with English abstract)

ZHANG X P, ZHANG Y X, WANG L, et al., 2024. Current status and future of research and applications for distributed fiber optic sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 44(1): 0106001. (in Chinese with English abstract)

ZHAO L Z, TANG F J, ZHOU Z, 2022. Experimental and numerical analysis of cracking monitoring based on distributed optical fiber[J]. China Measurement & Test, 48(12): 7-14. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

毕振辉，王磊，杨涵志，等，2021. 多簇水力裂缝起裂与扩展物理模拟试验系统研制及验证[J]. 岩石力学与工程学报，40(11)：2273-2285.

陈敬国，邓志文，王飞，等，2024. 柴达木盆地英雄岭构造带小断层和碳酸盐岩缝洞体识别地震勘探关键技术[J]. 石油地球物理勘探，59(2)：290-298.

陈小慧，2017. 页岩油赋存状态与资源量评价方法研究进展[J]. 科学技术与工程，17(3)：136-144.

陈琰，张永庶，徐兆辉，等，2024. 柴达木盆地干柴沟地区勘探突破及启示[J]. 石油与天然气地质，45(4)：1018-1031.

崔明月，刘玉章，修乃领，等，2014. 形成复杂缝网体积(ESRV)的影响因素分析[J]. 石油钻采工艺，36(2)：82-87.

苟量，张少华，余刚，等，2021. 光纤传感推动油藏地球物理技术智能创新发展[J]. 石油科技论坛，40(5)：55-64.

何乐，朱炬辉，梁兴，等，2024. 基于管外光纤监测的页岩气水平井多簇压裂效果评价[J]. 石油钻探技术，52(4)：110-117.

何祖清，丁士东，练章华，等，2013. 桥塞坐封过程仿真模拟研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版)，35(2)：164-169.

胡文瑞，张书通，徐思源，等，2024. 中国油气田开发实践、挑战与展望[J]. 中国石油勘探，29(5)：1-11.

贾承造，2024. 中国石油工业上游前景与未来理论技术五大挑战[J]. 石油学报，45(1)：1-14.

蒋恕，李园平，杜凤双，等，2023. 提高页岩气藏压裂井射孔簇产气率的技术进展[J]. 油气藏评价与开发，13(1)：9-22.

李晓蓉，刘旭丰，张毅，等，2022. 基于分布式光纤声传感的油气井工程监测技术应用与进展[J]. 石油钻采工艺，44(3)：309-320.

刘国勇，吴松涛，伍坤宇，等，2024. 柴达木盆地西部坳陷古近系全油气系统特征与油气成藏模式[J]. 石油勘探与开发，51(5)：951-961.

刘合，慕立俊，齐银，等，2024. 基于光纤监测的分段压裂多簇均衡性评价与优化建议[J]. 钻采工艺，47(6)：1-7.

卢聪，李秋月，郭建春，2024. 分布式光纤传感技术在水力压裂中的研究进展[J]. 油气藏评价与开发，14(4)：618-628.

吕振虎，吕蓓，罗垚，等，2024. 基于光纤监测的段内多簇暂堵方案优化[J]. 石油钻探技术，52(1)：114-121.

马立军，柴慧强，冯立勇，等，2024. 矿场参数法优化陆相夹层型页岩油水平井合理井距[J]. 石油钻采工艺，46(3)：317-325.

孟文，田涛，孙东生，等，2022. 基于原位地应力测试及流变模型的深部泥页岩储层地应力状态研究[J]. 地质力学学报，28(4)：537-549.

申林方，华涛，王志良，等，2025. 参数空间变异性对岩石水力压裂裂隙扩展形态的影响[J]. 岩土力学，46(4)：1294-1302.

隋微波，温长云，孙文常，等，2023. 水力压裂分布式光纤传感联合监测技术研究进展[J]. 天然气工业，43(2)：87-103.

孙景行，曾波，刘俊辰，等，2022. 川南深层页岩水力压裂缝网扩展规律数值模拟研究[J]. 工程地质学报，30(4)：1193-1202.

万有余，王小琼，林海，等，2025. 英雄岭页岩油储层甜点评价的实验研究[J]. 科学技术与工程，25(11)：4496-4504.

王冠民，祝新怡，刘海，等，2024. 沉积微相在致密砂岩可压裂性分析中的应用：以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组7段为例[J]. 地质力学学报，30(6)：893-905.

王立歆，路智勇，杨心超，等，2024. 分布式光纤压裂监测技术研究及应用[J]. 断块油气田，31(6)：1039-1046.

王欣，才博，李帅，等，2023. 中国石油油气藏储层改造技术历程与展望[J]. 石油钻采工艺，45(1)：67-75.

王洋，高瑞，刘炜，2023. 基于光纤弯曲损耗的混凝土裂缝位移传感器设计[J]. 传感器与微系统，42(3)：87-90.

肖佳林，李保林，游园，等，2024. 复兴区块陆相页岩压裂成缝特征与增产改造策略分析[J]. 断块油气田，31(6)：1066-1075.

杨敏，刘涛，何宴，等，2024. 高温全金属可溶桥塞的研发与应用[J]. 石化技术，31(1)：82-84.

张辉，吕庆田，张毅，等，2023. 光纤布拉格光栅(FBG)和分布式声波传感器(DAS)在地学中的应用进展及发展方向[J]. 地球物理学进展，38(3)：1416-1454.

张旭苹，张益昕，王亮，等，2024. 分布式光纤传感技术研究和应用的现状及未来[J]. 光学学报，44(1)：0106001.

赵丽芝，唐福建，周智，2022. 分布式光纤裂缝监测实验与数值分析[J]. 中国测试，48(12)：7-14.