

# 智能示踪剂产出剖面测试技术

邱德家<sup>1,2</sup>, 郭肖<sup>1,2</sup>, 何祖清<sup>1,2</sup>, 庞伟<sup>1,2</sup>

1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室 北京 102206

2. 中国石化石油工程技术研究院完井研究所 北京 102206

通讯作者:Email: didj. sripe@ sinopec. com

项目支持:国家重大专项“低渗透油气藏高效开发钻井”技术课题5“高压低渗油气藏固完井技术”(2016ZX05021005)、中国石油化工股份有限公司科技部前瞻项目“智能标记物井下流体识别方法研究”(P20033)

引用:邱德家,郭肖,何祖清,等. 智能示踪剂产出剖面测试技术[J]. 油气井测试,2021,30(4):44-49.

Cite: DI Dejia, GUO Xiao, HE Zuqing, et al. Intelligent tracer production profile testing technology [J]. Well Testing, 2021,30(4):44-49.

**摘要** 针对水平井产出剖面测试需求和传统生产测井技术的局限性,介绍了智能示踪剂产出剖面测试技术的国内外技术现状和发展趋势,探讨了智能示踪剂产出剖面测试技术。该技术将具有不同识别号的示踪剂置入井下不同生产层段,生产过程中,示踪剂溶解在不同层段的产出流体中返排到井口,进行取样及实验室化验分析。通过示踪剂不同的物理特性和浓度分析,可以反演不同层段流体性质和产量。俄罗斯某地区一口水平井采用水力压裂进行开发,共压裂了5段,压裂期间投入5种油溶性示踪剂和5种水溶性示踪剂,根据示踪监测结果及时了解油井各段的产量变化,为油井生产优化和井筒干预提供了依据。该技术适用性广,成本低,可长期分段监测水平井产液剖面,在技术和成本上具有显著优势。

**关键词** 智能示踪剂; 产出剖面测试; 生产测井; 水平井; 支撑剂; 碳量子点; 量子点条带

**中图分类号**:TE357      **文献标识码**:B      **DOI**:10. 19680/j. cnki. 1004-4388. 2021. 04. 008

## Intelligent tracer production profile testing technology

DI Dejia<sup>1,2</sup>, GUO Xiao<sup>1,2</sup>, HE Zuqing<sup>1,2</sup>, PANG Wei<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 102206, China

2. Well Completion Research Institute, SINOPEC Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 102206, China

**Abstract:** In view of the requirements of horizontal well production profile testing and the limitations of traditional production logging technology, this paper introduces the technical status and development trend of intelligent tracer production profile testing technology at home and abroad and discusses the intelligent tracer production profile testing technology. In the process of production, the tracer dissolves in the produced fluid of different layers and flows back to the wellhead for sampling and laboratory analysis. Through the analysis of different physical properties and concentrations of tracers, the fluid properties and production of different intervals can be inversed. A horizontal well in a certain area of Russia was developed by hydraulic fracturing. Five sections were fractured. Five kinds of oil-soluble tracers and five kinds of water-soluble tracers were used during the fracturing period. According to the tracer monitoring results, the production changes of each section of the oil well were timely understood, which provided the basis for oil well production optimization and wellbore intervention. The technology has wide applicability and low cost. It can monitor the liquid production profile of horizontal wells in sections for a long time and has significant advantages in technology and cost.

**Keywords:** intelligent tracer; production profile test; production logging; horizontal well; proppant; carbon quantum dots; quantum dot stripe

随着油气井钻探技术的进步,国内外普遍采用水平井进行油气田开发。然而,随着油气田开发的深入,水平井见水问题突出,导致单井产量下降。近年,中石化西北油田碎屑岩油藏水平井平均含水超过73.3%,含水高于80%的井占开井总数46%,严重影响单井产量<sup>[1]</sup>。中石化鄂北杭锦旗锦58井

区压裂后产液量每天大于30 m<sup>3</sup>的井32口,平均试气产液量达到50.3 m<sup>3</sup>,平均无阻流量仅5.3×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,高产液严重制约气井产能有效释放<sup>[2]</sup>。油气井见水后,产量快速下降,储量无法有效动用,需要及时了解水平井见水时间和见水层段,为油气田开发方案调整提供依据。

目前,连续油管输送阵列测试仪器和分布式光纤温度测试是水平井产出剖面测试的主要技术手段。连续油管输送阵列测试仪器技术在深井、出砂井、小井眼、复杂结构井,以及高温高压油气井中应用受到限制<sup>[3-5]</sup>。光纤温度压力测试具有长期监测、成本高、施工难度大及资料解释难度大的特点,技术需要进一步完善<sup>[6-8]</sup>。

近几年,国外利用智能示踪剂监测技术进行水平井产出剖面测试得到快速发展。挪威的 RES-MAN(雷斯曼)公司从2005年开始专注于研究井下产层产液量智能监测技术。该公司目前已开发出172种独特的智能示踪剂体系,包括80种油溶体系、80种水溶体系和17种气溶体系。水溶性示踪剂和油溶性示踪剂一起使用,可以确定地层水突破的位置和时间。该项技术获得2013年世界石油最佳生产技术提名奖,并且成功应用于50个油田160口井<sup>[9-10]</sup>。英国的 Tracerco 公司开发了一种微量物质智能示踪剂-LAN Tracer,该示踪剂分别具有水敏性、油敏性和气敏性,这三种示踪剂分别遇到水、油和气时才会溶解<sup>[11]</sup>。当限定化学物质与不同压裂层段轻烃类气体相遇时,会根据与目标流体的接触反应程度释放不同的化学气体物质(气敏性系统)。示踪剂智能化监测技术能够提供一种无干扰的化学监测方案,准确地确定地层流体性质和流量,监测地层水突破的位置和时间等<sup>[12-13]</sup>。俄罗斯 Geosplit 公司开发了基于碳量子点的智能示踪剂技术,形成了量子涂层支撑剂和量子示踪带2种形式的智能监测技术。从2015年开始,利用智能示踪剂在俄罗斯进行了19口水平井监测,2016年完成了41口水平井智能示踪剂监测,2017年完成55口井智能示踪剂监测,监测井数量逐年增加。美国利用示踪剂技术监测压裂水平井超过30 000段,沙特阿美和阿根廷等国家也利用这项技术进行常规和非常规油气井监测<sup>[14]</sup>。

赵郑嘉等<sup>[15]</sup>在分段压裂过程中选择特征各异的液体示踪剂,与压裂液一同泵入地层,返排过程中进行示踪剂监测。该方法在鹿鹿凹陷致密油体积压裂井束探2x井进行了测试,优选了7种不同示踪剂分别注入7个压裂层段。通过分析在不同时间取得的246个样品,得到了7个层段的产液贡献率,为体积压裂优化设计和产能评价提供了新的方法。于永生等<sup>[16]</sup>开发了水平井油管传输示踪剂分段找

水技术,针对目前水平井找水作业的需求和技术难点,利用稀土元素的丰度和元素间 $\gamma$ 峰值的干扰等性能特点,选取由中子照射产生的5种自然界中不存在的同位素示踪剂,通过冶金工艺将其制备成具有一定孔隙度的固态示踪剂,并将其放置在具有有限压打开结构的释放装置中,通过油管输送至水平井内,分布在不同井段测试产出流体中不同同位素示踪剂的信号强度,分析测试数据找到出水位置。李林凯等<sup>[17]</sup>提出了基于示踪剂返排的致密油压裂缝网评价方法。针对压裂缝网表征的问题,在压裂过程中示踪剂添加到压裂液中注入油藏并返排至地面,基于示踪剂返排曲线,运用时间矩阵理论,建立了累计流动能力与累计储存能力图版用于评价裂缝网络。智能示踪剂技术应用于水平井产液剖面测试在国内起步较晚,示踪剂的优选、测试工艺及资料解释方面还不完善,需要进一步研究攻关<sup>[18-19]</sup>。

## 1 量子点示踪剂的原理和特点

传统示踪剂的种类较多,主要为放射性元素、稳定同位素和化学物质,例如荧光染料和无机离子等。然而,放射性元素越来越受到限制,荧光染料和无机离子虽然无害,但是染料在储层中高温条件下会分解,无机离子要求长期的探测时间,这些条件限制了常规示踪剂的使用。

近年来,碳量子点示踪剂在国外得到快速发展,主要因为它的特殊荧光属性和化学传感,以及生物成像功能。碳量子点本身无毒性,具有在高温、高PH值的稳定性,以及耐光褪色的功能,另外碳量子点与杂原子混合或者引进表面功能团能够提高他的荧光属性。碳量子点可以与亲水基和非亲水基形成官能团,展现强烈的荧光属性,制备出油溶性、水溶性和气溶性的示踪剂。不同粒径的碳量子点或者参杂不同元素能够显示不同的光谱特征,可以制备出多种不同识别号的智能示踪剂。目前,国外利用碳量子点研制出超过60种智能标记物。碳量子点的制备可以通过电化学方法,燃烧法,水热法,氧化作用,微波和物理方法制造,成本相对较低,能够大量使用。

量子点示踪剂应用于产出剖面测试,需通过特殊工艺将量子点与聚合物和可溶性材料加工成混合材料,均匀涂敷在陶粒支撑剂表面,形成支撑剂量子点涂层<sup>[20]</sup>,如图1所示。聚合物遇油、遇水膨

胀形成聚合物骨架,不但形成量子点移动通道,而且可以维持支撑剂的强度,避免在地层中压坏或改变聚合物颗粒的几何尺寸,有利于形成油气渗流通道。涂层内充填遇油、水溶解的功能性材料,产生亲水、亲油或者亲气通道,使量子点由聚合物内部逐渐运移到支撑剂表面,起到溶解和缓释的作用,延长井下流体动态监测时间。另外一种形式,将碳量子与高分子材料混合加工成具有一定孔隙度和渗透性的量子点示踪带,量子点示踪带缠绕在完井管柱上,地层流体可以通过示踪带,并携带分别具有油溶性、水溶性或气溶性的量子点示踪剂返排到井口,通过井口取样分析,达到井下流体监测的作用。

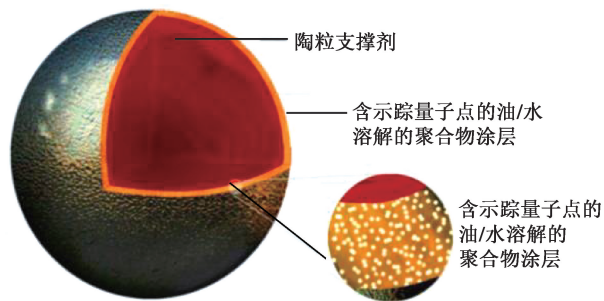


图1 含量子点示踪剂的支撑剂涂层

Fig.1 Marked polymer-coated proppant with quantum dots

智能示踪剂产出剖面测试技术,利用具有不同识别号的示踪剂置入井下不同生产层段,生产过程中示踪剂溶解在不同层段的产出流体中返排到井口,然后进行井口取样及实验室化验分析。通过示踪剂不同的物理特性和浓度分析,可以反演不同层段流体性质和产量。这项技术具有适用性广、成本低、长期分段监测水平井产液剖面的特点,在技术和成本上具有显著优势。

## 2 智能示踪剂的投放方法

目前,智能示踪剂的井下投放主要有以下三种方法:

第一种方法是液体示踪剂混合在压裂液中,压裂过程中随压裂液进入到地层,溶解在地层流体中,然后随流体返排到井口进行取样,带回实验室利用仪器进行化验分析,如图2所示。这种方法的主要测试工艺是根据地层孔隙度、储层温度预设值及分层段数量,确定示踪剂的种类数量、标记及用量。在分层压裂或酸化过程中向各分层段注入不同标记的示踪剂,并对分层压裂或酸化完成后的返

排液进行油、气、水分离及采样,根据样品中每种示踪剂的浓度,生成示踪剂产出曲线,将每种示踪剂产出曲线进行拟合计算,并结合测试总产量计算出各层段的产量,生成动态产能剖面和静态产能剖面。这种投放方法在压裂液返排期间示踪剂被大量排出,监测时间一般为1-6个月左右,监测时间较短。相对于液体示踪剂,目前开发了支撑剂表面涂层示踪剂,压裂过程中随支撑剂进入地层,这种示踪剂具有缓慢释放功能,监测时间可以达到3-5年,具有长期监测的效果。

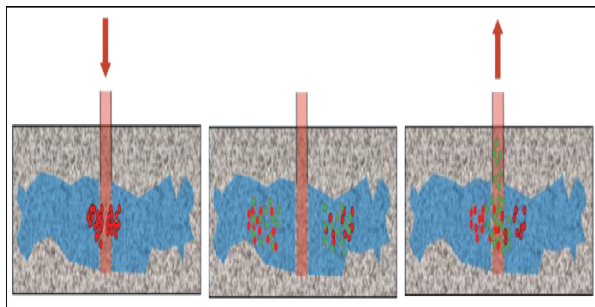


图2 示踪剂运行轨迹

Fig.2 Trajectory of tracer flow in downhole

第二种方法是示踪剂投放工具作为油管短节下入油井中,作为一种井下油管示踪剂传输找水方法及装置。井下示踪设备为管柱结构,包括抽油泵、套压阀、封隔器、滑套、示踪剂、测试装置、原有油管、小油管、球座,地面检测设备为色谱仪。在井下封隔器分段封隔的情况下,出水段井下设备在接触地层水后选择性缓慢释放示踪剂,当钻井液沿井筒环空排至井口时通过地面检测设备对钻井液中示踪剂含量和种类进行检测,最后通过对地层出水的反演判断出水层位、出水量。该方法可以快速、准确的判断水平井出水位置与出水量,为油气田开发方案调整提供决策依据。

第三种方法是智能示踪剂与聚合物材料混合加工成的固体条带装入释放短节内,示踪剂条带外面罩上筛网,起到保护及释放示踪剂的作用。释放短节连接完井管柱,可以与防砂筛管、调流控水工具或其它完井工具连接,在完井过程中释放短节下入到各个产层。生产过程中,当地层流体流经示踪剂,示踪剂溶解在地层流体中,随流体返排到井口,定期在井口取样,然后带到实验室进行化验,分析计算各压裂段的流体产出情况,这种方法能够长时间监测各段地层流体的产出情况,一般为3-5年,对于水平井的见水时间和见水层段监测效果明显。



3 智能示踪剂检测及解释方法

智能示踪剂检测主要采用地面检测,根据取样方式的不同,资料解释模型主要分为瞬态模型和稳态模型。

3.1 示踪剂取样方法

目前,示踪剂地面检测方法主要有两种:一种方法利用井口探测装置进行示踪剂连续探测采样,实时探测示踪剂信号,对信号实施不间断采样、数字滤波、数据存储,对产液中示踪剂含量做微量分析。能够探测到不同层段流体示踪剂信号的相对强度,依据信号相对强度计算产液剖面,得到流量分布图。这种方法适用于示踪剂实时探测技术,在油井正常生产过程中适时测试井筒流动剖面。

第二种地面检测方法是根据油气井产出情况和监测目的,定期在井口取样送实验室化验分析。根据示踪剂的特殊属性,采用高精度分光光度计或者荧光光谱仪对样品进行检测,分析出各层段示踪剂的种类和浓度,绘制各段示踪剂的浓度曲线,建立智能示踪剂的化验分析方法,能够有效分析各段示踪剂浓度。建立智能示踪剂流体识别解释模型,能够定量计算各段流体产出情况,这种方法适用于油气井产出剖面测试的长期监测<sup>[21]</sup>。

3.2 资料解释方法

根据取样方式的不同,资料解释模型主要分为瞬态模型和稳态模型<sup>[22]</sup>。瞬态模型适用于瞬态采样,即油气井关井之后重新开井的情况,一般用于产出剖面解释。智能示踪剂系统释放示踪剂的速度与单段地层流体的流量无关,从正常生产的示踪剂浓度中无法提取产液剖面信息,需要通过示踪剂冲洗模型和到达模型来计算。

稳态解释是在油气井稳定生产状态下,通过示踪剂浓度检测来解释油气井的生产状态,这与瞬态解释方法有根本区别,在油气井稳态流动下没有高浓度示踪剂团存在,而是利用示踪剂的浓度水平及其变化趋势来解释,且主要用于水平井见水时间和见水层段的监测。

4 现场应用

俄罗斯秋明油田一口水平井采用水力压裂进行开发,共压裂了 5 段,压裂期间投入 5 种油溶性示踪剂和 5 种水溶性示踪剂。2017 年 10 月至 2018 年 7 月在井口进行了取样分析。根据取样解释结果(图 3、图 4),各压裂段产出流体在测试期间变化较大。压后第一个月,油井压裂后各段产量相对均匀,总体上水平段趾端产量较低,产量占比仅为 7%,水平段跟端产量较高,占比为 35%。2017 年 11 月,各段产量趋于接近。然而,2017 年 12 月到 2018 年 5 月,第 4 段产量增长较快,从产量占比 39% 增涨到 81%。2018 年 6 月到 2018 年 7 月,第 4 段和第 5 段依然产量较高,总体上靠近跟端产油量较大。在产水方面,主要是第 4 段占比较高,而且随着时间推后,产量越来越大。根据示踪剂监测可得,测试井在生产过程中各段的产量变化较大,其中第 4 段的产油和产水增加较快。通过智能示踪监测能够及时了解测试井各段的产量变化,为油井生产优化和井筒干预提供依据。

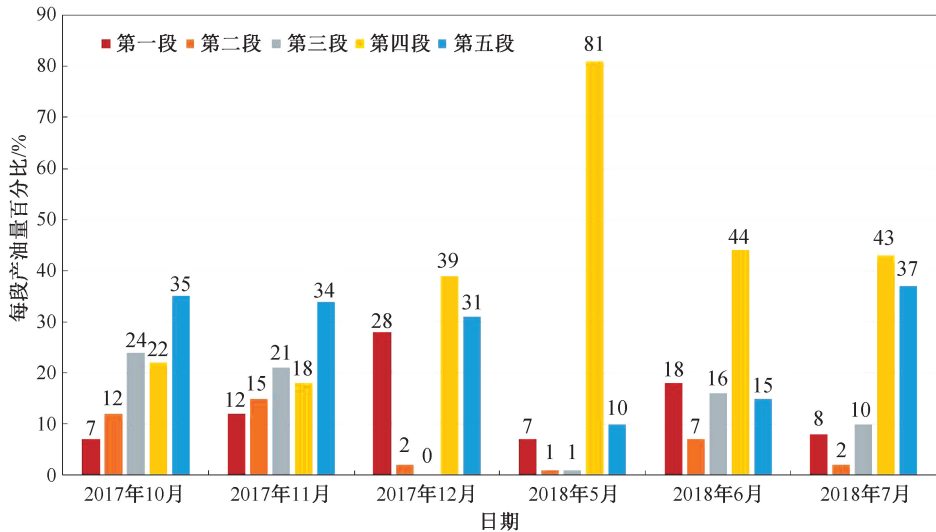


图 3 各压裂段产油情况  
Fig.3 Oil flow rate in each fracture

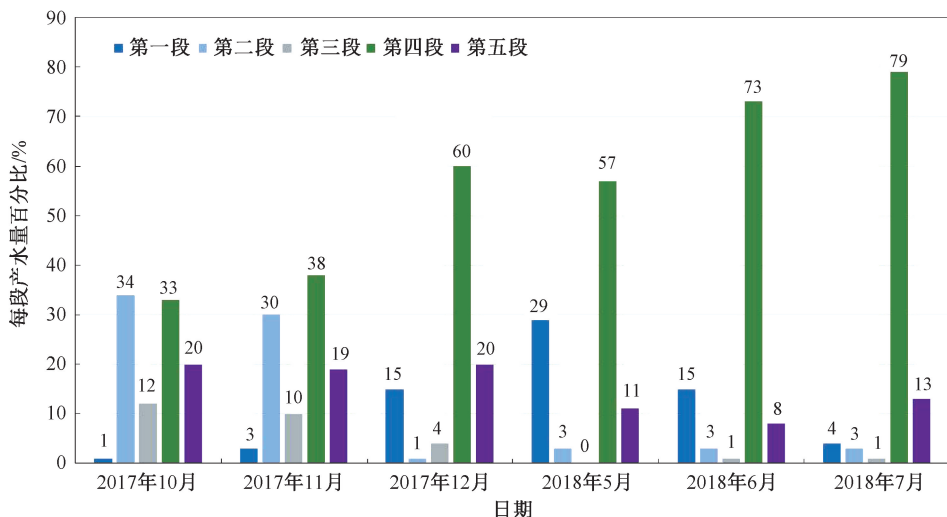


图4 各压裂段产水情况

Fig.4 Water flow rate in each fracture

## 5 结论

(1)智能示踪剂产出剖面测试技术是一项新兴的测试技术,具有长期分段、分相态监测产液剖面的特点,相对于传统生产测井技术具有适应性广、成本低、长期分段监测和施工风险低等优点,适用于水平井、超深井、复杂结构井等传统生产测井仪器无法下入的油气井,在技术和成本上具有显著优势。

(2)这项技术应加强基础研究,包括智能示踪剂产品的研发和制备,示踪剂在不同流体中溶解、扩散和流动机理,以及智能示踪剂的投放工艺、检测方法和资料解释方法等研究,尽快形成具有自主知识产权的智能示踪剂产出剖面测试技术。

**致谢:**感谢中石化石油工程技术研究院完井测试项目组提供本文宝贵的数据资料。

## 参考文献

- [1] 赵崇镇. 水平井自适应调流控水装置研制与应用[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(3): 95-100.  
ZHAO Chongzhen. Development and application of an autonomous inflow control device in horizontal wells [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(3): 95-100.
- [2] 丁景辰. 高含水致密气藏水平井稳产原因分析及启示——以鄂尔多斯盆地大牛地气田为例[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(1): 127-134.  
Ding Jingchen. Analysis and inspiration of stable production of horizontal wells in high water saturation tight gas reservoir: A case study of Daniudi Gasfield, Ordos basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(1): 127-134.
- [3] 邸德家, 毛军, 张同义, 等. 涪陵页岩气水平井产出剖面

测试技术分析与应用[J]. 测井技术, 2016, 40(6): 731-735.

DI Dejia, MAO Jun, ZHANG Tongyi, et al. Production profile testing analysis and its application in Fuling shale gas horizontal wells [J]. Well Logging Technology, 2016, 40(6): 731-735.

- [4] 庞伟, 邸德家, 张同义, 等. 页岩气井产出剖面测井资料分析及应用[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(2): 700-706.

PANG Wei, DI Dejia, ZHANG Tongyi, et al. Analysis and application of production logging data in shale gas well [J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(2): 700-706.

- [5] 邹顺良, 杨家祥, 胡中桂, 等. FSI 产出剖面测井技术在涪陵页岩气田的应用[J]. 测井技术, 2016, 40(2): 209-213.

ZOU Shunliang, YANG Jiaxiang, HU Zhonggui, et al. Application of FSI production profile logging technique in Fuling shale gas field [J]. Well Logging Technology, 2016, 40(2): 209-213.

- [6] 宋红伟, 郭海敏, 戴佳才, 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.

- [7] 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 Zhaoai, 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.

- [8] 贾振甲, 孙达, 李方宇, 等. 致密油储层试油分布式光纤传感监测技术[J]. 油气井测试, 2018, 27(3): 58-65.

- JIA Zhenjia, SUN Da, LI Fangyu, et al. Monitoring technique involving distributed optical fiber sensor for well testing in tight oil reservoirs [J]. *Well Testing*, 2018, 27(3):58-65.
- [9] NIKJOO E. Novel realtime tracer technology for continuous well and reservoir monitoring [C]. *SPE 197691*, 2019.
- [10] ANOPOV A, ALSHURAIM F, SHAMMERI F, et al. Permanent downhole chemical tracer system for wireless surveillance and optimiziing well production [C]. *SPE 189364*, 2018.
- [11] ZHANG K S, TANG M, YONG S S, et al. Evaluation of stage contribution and interwell connectivity during initial flowback and oil production in a tight oil horizontal stimulation using tracer technology [C]. *SPE 181854*, 2016.
- [12] PANICHELLI P, MARTÍNEZ J R, CRESPO P, et al. Advanced reservoir characterization in vaca muerta using chemical tracer technology [C]. *SPE 188923*, 2017.
- [13] OVCHINNIKOV K, GURIANOV A, BUZIN P, et al. Production logging in horizontal wells without well intervention [C]. *SPE 187751*, 2017.
- [14] MURUGESAN S, KUZNETSOV O, SURESH R, et al. Carbon quantum dots fluorescent tracers for production and well monitoring [C]. *SPE 181503*, 2016.
- [15] 赵政嘉,顾玉洁,才博,等. 示踪剂在分段体积压裂水平井产能评价中的应用[J]. *石油钻采工艺*, 2015, 37(4):92-95.
- ZHAO Zhengjia, GU Yujie, CAI Bo, et al. Application of tracer in productivity evaluation for horizontal wells under segmented volume fracturing [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2015, 37(4):92-95.
- [16] 于永生,廖汉明,齐行涛,等. 水平井油管传输标记物分段找水技术[J]. *石油钻探技术*, 2019, 47(2):105-108.
- YU Yongsheng, LIAO Hanming, QI Xingtao, et al. Segmented water location technology via conveyed tubing marker for horizontal wells [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2019, 47(2):105-108.
- [17] 李林凯,姜汉桥,李俊键,等. 基于示踪剂返排的致密油压裂缝网评价方法[J]. *特种油气藏*, 2017, 24(5):102-106.
- LI Linkai, JIANG Hanqiao, LI Junjian, et al. Techniques for assessments of hydraulic fracture network in tight oil reservoir based on tracer discharging [J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2017, 24(5):102-106.
- [18] 春辉. 示踪剂智能化技术[J]. *石油钻采工艺*, 2014, 36(6):100.
- CHUN Hui. Intelligent technology of tracer [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2014, 36(6):100.
- [19] 常青,刘音,卢伟,等. 微量物质示踪剂对页岩油水平井压后排液诊断技术[J]. *油气井测试*, 2021, 30(3):32-38.
- CHANG Qing, LIU Yin, LU Wei, et al. Diagnostic technology of trace substance tracer for backflow liquid after fracturing in shale oil horizontal well [J]. *Well Testing*, 2021, 30(3):32-38.
- [20] ANOPOV A, OVCHINNIKOV K, KATASHOV A. Production logging using quantum dots tracers [C]. *SPE 195048*, 2019.
- [21] ELAHI S H, JAFARPOUR B. Dynamic fracture characterization from tracer-test and flow-rate data with ensemble kalman filter [J]. *Energy Weekly News*, 2019(1):157-159.
- [22] 高兴军,徐薇薇,余义常,等. 智能化学示踪剂技术及其在油藏监测中的应用[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(5):532-544.
- GAO Xingjun, XU Weiwei, YU Yichang, et al. Intelligent chemical tracer technology and its application to reservoir surveillance [J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(5):532-544.

编辑 刘振庆

第一作者简介:邸德家,男,1980年出生,博士,副研究员,2013年毕业于中国石油大学(北京)地质资源与地质工程专业,主要从事生产测井和完井测试方面的研究工作。电话:010-56606185,15901313253;Email:didj.sripe@sinopec.com。通信地址:北京市昌平区百沙路197号中国石化科学技术研究中心,邮政编码:102206。