

# 水平井压后各段产能定量长期监测量子新技术

许建华<sup>1, 2</sup>

(Geosplit LLC)

**摘要:**多级水力压裂是目前国内页岩油开发的主流应用技术,但对于水平井各段的产量测量一直是一个难题,传统的生产测井和化学示踪方法存在施工风险和定性测量的缺陷,制约了国内页岩油气的效益开发。量子示踪生产监测技术以纳米级量子点为基础,合成聚合物微球,作为油气监测的基本单元“代码”,以聚合物涂层的形式附着在支撑剂表面。随着压裂施工将量子监测代码部署到地层中,永久保存。随着地层产液通过支撑剂表面,量子监测码以与流速成正比的速度释放,并随不同相态进入井筒,之后在井口采集产液,实验室分析即可得到各段油、水的产出贡献。该技术的主要优点是实现了定量、长期水平井各段油、水两相产量监测,无需关井,几年内连续获得井下生产数据。在国内致密油藏成功实施了10口井,取得了较好的效果。在中国陆相页岩油规模效益开发中具有很大的应用前景。

**关键词:**量子技术 生产监测 水平井 页岩油 压后评估

## 0 引言

水平井多级压裂是目前非常规油气藏勘探开发的主流应用技术,为了提高经济效益,近年来,地质工程一体化综合研究被广泛应用于非常规油气勘探中[1,2,3,4](张福祥等,2016;杨向同等,2017;许建华等,2014,2019)。在一体化研究中,最终的检验目标为产量,目前大多以井口产量作为评价一体化效果的主要依据。对于水平井各段的产量贡献比一直是一个难题。传统的生产测井使用电缆或连续油管,可以测量流速,但不能区分气、水两相,在水平井段存在卡堵等施工风险。同时,结果仅为测量期间的“瞬时产量”,如果要获得不同时期的产量数据,需要多次关井作业,影响正常生产。而化学示踪剂仅提供定性的数据,受温度、酸碱度等因素影响较大[5]。因此,如何获取不同时期水平井各段产能数据,对于页岩储层质量再认识和压裂设计优化都具有重要的意义。

改变传统研发思路,根据页岩油气的特点,从微观(纳米级)的角度研发新技术,从而实现水平井监测技术的新突破[6]。量子技术与油气监测技术的有机结合,产生了一种新型量子示踪监测技术,该技术克服了传统示踪技术的缺点,提高了监测的精度、简化了分析的流程,同时将监测周期从几个月提高到几年,实现了非常规油气藏全生命周期的监测需求 [7,8,9]。

## 1 技术原理

### 1.1 量子点

量子点(quantum dot)是在把激子在三个空间方向上束缚住的半导体纳米结构。有时被称为“人造原子”、“超晶格”、“超原子”或“量子点原子”,是20世纪90年代提出来的一个新概念。其为人造的纳米级的微颗粒,一般为球形或类球形,其直径常在2-20 nm之间(图1)。

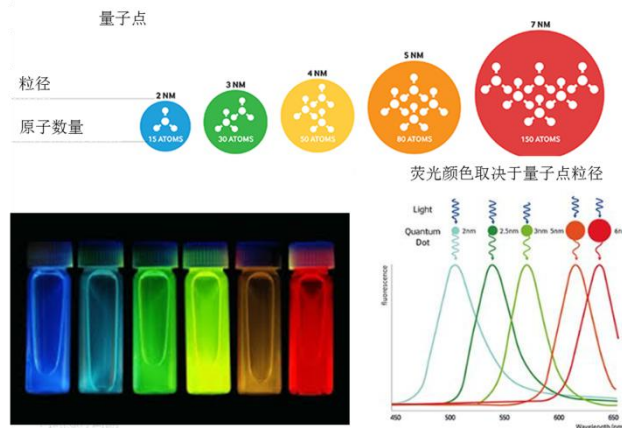


图1 量子点及其荧光性

第一作者简介:许建华,男,山东东营人,博士学位,2008年毕业于中国科学院地质与地区物理研究所,现就职于 GeoSplit 公司,任中国区业务发展总监,主要从事非常规油气地质工程一体化研究与工程服务。通讯地址:北京市海淀区西直门北大街32号院6号楼1605。E-mail: [13811371872@139.com](mailto:13811371872@139.com)

通过对这种纳米半导体材料施加一定的电场或光压，吸收光谱后，它们便会发出特定频率的光，而发出的光的频率会随着这种半导体的尺寸的改变而变化。其显色强度，是普通荧光类物质的 20 倍以上，具有宽吸收光谱和窄的发射光谱，易于识别和分析，从而避免了实验室分析的失误。化学组成决定了其比自然荧光粉具有更好稳定性，较传统的有机染色剂，光漂白效应减弱，同时耐受酸和高温。

## 1.2 量子支撑剂

量子示踪监测技术正是利用量子点的这一特征，使用聚合物材料将多个量子点制作成一个微球，该微球粒径为几百纳米，内含不同种类和数量的量子点（图 2）。6 种不同类型量子点的组合可以形成大量独特且可追踪识别的示踪标记物，总数可高达 63 种，可以满足目前国内最大水平段数量的监测需求。

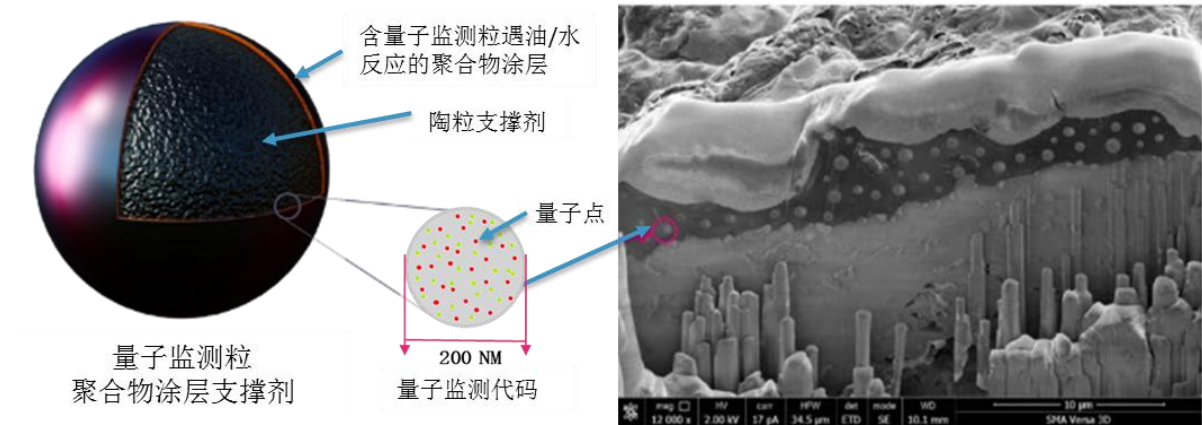


图 2 量子监测支撑剂及其结构

量子监测代码为几百纳米的微球，需要特殊载体才能注入地层。不同于化学示踪剂的液体载体，量子监测技术以压裂施工过程中的支撑剂（陶粒或石英砂）为载体，使用聚合物材料将量子代码附着在支撑剂表面。针对油水不同相态，聚合物材料分为亲水和亲油两种。由于量子监测代码为纳米级微颗粒，因此在支撑剂涂层内的数量巨大，根据实验室数据，一公斤支撑剂覆膜中大约包含千亿个量子监测代码。

支撑剂涂层的厚度非常小，对于支撑剂本身的性能影响很小（图 3）。在 300 标准大气压下，涂层前后支撑剂的渗透率差小于 50 达西，至 550，二者渗透率相同。因此在正常的地层压力下，涂层对于支撑剂本身的渗透性影响可以忽略不计。同时，涂层的强度不低于支撑剂本身的抗压强度。简言之，量子监测支撑剂能保证支撑剂本身性能和功能。

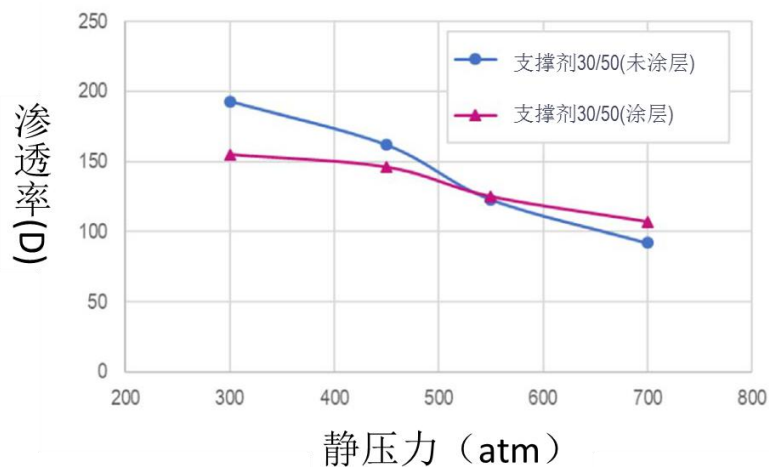





图 3 涂层前后支撑剂渗透率变化

### 1.3 量子监测微粒释放机理

支撑剂涂层的结构包括三部分，首先为功能性填料，这是示踪量子代码赋存的基质，遇油或水膨胀，产生量子点扩散通道，使示踪量子微粒由聚合物内部运移至其表面；其次为不可溶聚合物网络，为保护性骨架，用于维持涂层强度，避免破坏或改变聚合物颗粒的几何尺寸；量子示踪代码保存在基质种，为油、水不同相态的高精度指示标志[10]。随着压裂施工将量子监测支撑剂部署到井下地层中。针对不同的压裂层段和油、水不同相态，分别泵入不同代码的量子监测粒加以区分。在地层中不同类型量子监测支撑剂遇水或油，其表面涂层会发生膨胀，产生释放通道，量子监测粒会从中运移出来，吸附在支撑剂表面。随着流体或气体的流动，吸附在支撑剂表面的量子监测粒会随着液相或气相进入井筒，之后涂层内的量子监测粒会持续运移出来，吸附在表面，实现了一个与流速成正比的缓释过程（图4）。由于其为纳米级的颗粒，故不具有足够的能量由一相向另一相转换。故此，每一种相态的地层流体具有其独特的示踪代码。

#### 内含量子特征码的聚合物涂层材料

-  不可溶聚合物网络 保护性骨架，用于维持强度，避免破坏或改变聚合物颗粒的几何尺寸
-  功能性填料 遇油或水反应，产生亲油和亲水扩散通道，使量子特征码由聚合物内部运移至其表面
-  量子特征码 油、气、水相的高精度指示标志

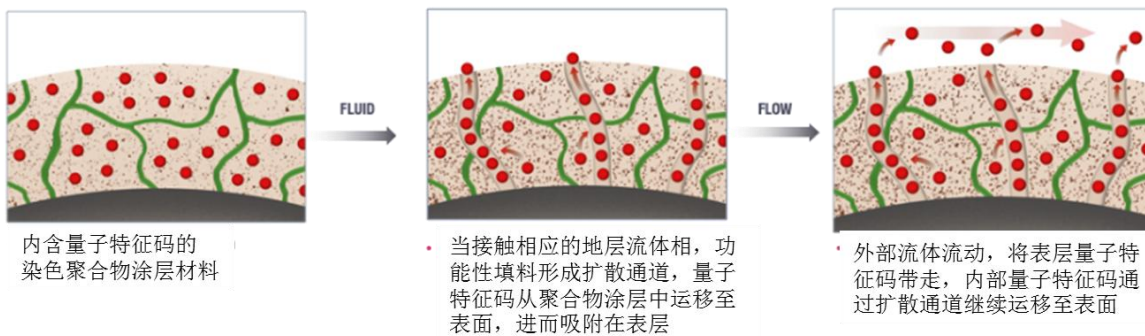


图4 涂层结构及量子监测特征码释放机理示意图

### 1.4 释放速度和监测周期

实验室试验证实了量子监测代码的释放与流速为成正比，成线性关系（图5）。为了证实量子监测技术长期有效性，2019年8-9月开展了为期24天的实验，使用300克量子支撑剂放入测试柱中，在90度的温度下，连续用水冲刷，线速度为0.2米/秒，相当于通过水力裂缝的体积流量为1000方/天。实验结果表明，24天内共释放了8千万个量子微粒，相当于300克量子支撑剂涂层中总量的1.6%。据此类推，支撑剂涂层的总量子微粒可以释放1500天，相当于4年的井下监测周期。实际井产量较实验日产量低的话，监测的时间会更长。

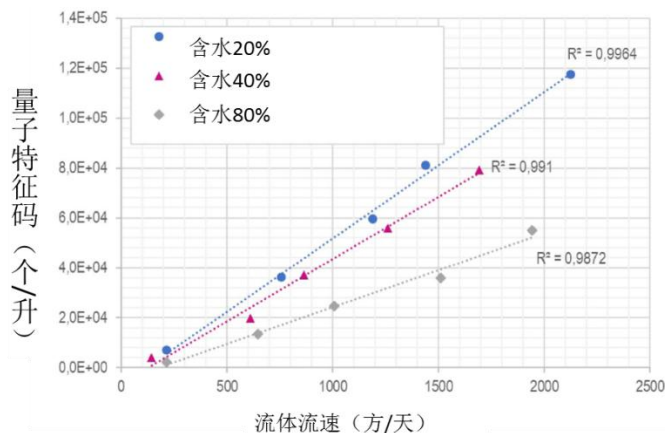


图5 流速与量子特征码释放相关图

## 2 应用方式

### 2.1 总体工作流程

量子监测技术实施过程包括三个部分，首先是根据实际水平井的段数和监测相态，在工厂为每段/相合成相应代码的量子特征码，然后制备亲水、亲油的量子支撑剂。在现场实施时，需要更新现有的压裂设计方案，替代部分常规支撑剂。原则为每段泵入的量子特征码不同，但加入量和施工方式一致，即在倒数第二段加，保证量子监测支撑剂保留在近井筒位置，且不被返排出来（图6）。在返排及之后的生产过程中，从井口取样，送至实验室进行处理，上流式细胞仪进行分析，计算出每种代码的百分比，与水平井各段相对应，从而得到每段地层的产出比例。



图6 量子监测技术总体技术流程图

### 2.2 典型监测剖面展示

井口采集的产液，混合了多种代码的量子示踪微颗粒，实验室分析可以将其分离出来。通过统计不同代码量子示踪微颗粒的百分比，可得到不同压裂层段流速百分比（图7），然后根据井口总产量，最终得到水平井各段油、水产量。

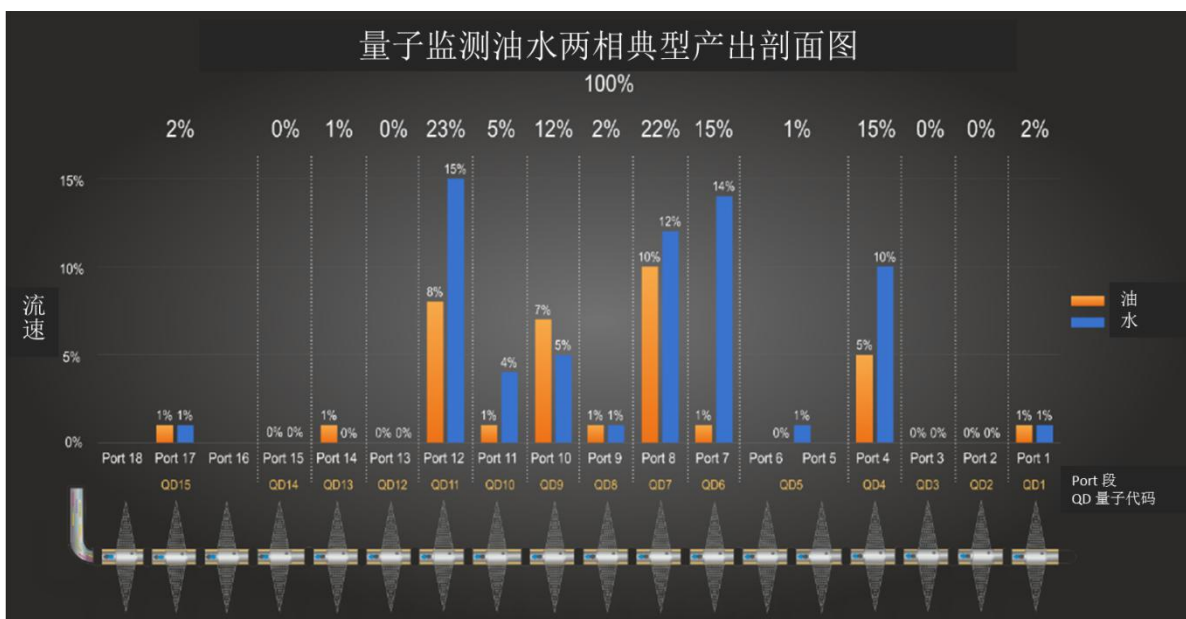


图7 量子监测典型油水剖面

### 3 结论

对于国内非常规开发,在借鉴美国页岩气的经验基础上,经过不同探索与创新,实现了致密油气、页岩油气的单井产量目标。在降本方面,通过钻井提速、工厂化作业,部分油田实现了吨油经济成本目标。为了进一步在降本的基础上增产,水平井压后单段产能监测显得越来越重要。产量是非常规地质工程一体化成功与否的唯一目标,而水平井各段产量,是储层质量(油藏静态要素)和工程质量(压裂施工效果)双重因素的结果。从动态长期的角度监测产能变化是评价非常规油气藏的必要手段。目前的产量监测手段对于水平井来讲,存在施工风险高、成本大,影响正常生产以及单次、短期的缺陷,仅对压后短期进行监测,会导致对于储层认识和压裂方案优化的误解。

量子产能监测技术是使用纳米级的量子特征码作为统计手段,以量子监测粒(支撑剂涂层)的方式,随着压裂施工将量子特征码部署到地层中。针对水平井不同压裂段和油、气、水不同相态,分别泵入不同代码的量子监测粒。在地层中遇油水,量子特征码微粒从支撑剂涂层中释放,吸附在支撑剂表面。随着流体的流动,吸附在表层的量子特征码会随着液相进入井筒。在井口取样后,实验室分析可以将其分离出来。通过统计不同代码量子微粒的百分比,可得到取样时间段水平井不同段流速百分比,作为各段产能评价的依据。

该技术主要优点是随着压裂将材料带至地层,无需专门施工作业,之后仅需在井口取样,无需关井,实现了定量、长期水平井各段、油水两相产能监测,可连续获得3年以上井下生产数据。国内非常规页岩油应用取得了很好的效果,在致密油气藏多级压裂水平井产能长期动态监测具有很大的应用前景,对于非常规油气藏地质工程一体化效果验证、储层再认识、压裂设计方案优化、实现对水平井整个生命周期进行连续监测具有重要应用价值。

### 参考文献:

- [1] 许建华, 2014. 斯伦贝谢页岩气勘探技术. 石油装备: 86-88 页。
- [2] Yang, X.T., Xu, J.H., Zhang, Y., Wang, H., Li, W., Wang, L.P., Fan, W.T. SPE-181830-MS. Decipher Productivity Secret to Optimise Well Stimulation for Keshen Tight Gas Reservoir. SPE Asia Pacific Hydraulic Fracturing Conference 2016.
- [3] Yang, X.T., Xu, J.H., Zhang, Y., Abbott, W.E., Teng, Q., Zhao, M., Fan, W.T., Li, W., Gu, X., SPE-186897-MS. Evaluating Natural Fracture Effectiveness to Optimize Well Stimulation Method for HTHP Tight Gas Reservoir. SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition held in Bali, Indonesia, 17-19 October 2017
- [4] Xu, J.H., Yue, J.P., Wang, H., Bjorn, W. IPTC-19282-MS. Innovative Reservoir Classification with Natural Fracture Geometry to Guide Well Stimulation for Unconventional Tight Gas Field. International Petroleum Technology Conference held in Beijing, China, 26-28 March 2019. <https://doi.org/10.2523/iptc-19282-ms>.
- [5] Xu Jianhua. Comparing results of different tracer technologies application in one well. 2020 国际石油石化技术会议暨展览会会议论文集(IPPTC20205113)。2020年8月25-28, 上海。
- [6] Morozovsky N.A., Krichevsky V.M., Gulyaev D.N., Bikkulov M.M. Approaches to the quantitative interpretation of dynamic well test during long-term monitoring of development under conditions of low information content of traditional technologies // Engineering Practice - 2015. - No. 11
- [7] Gurianov, R. Gazizov, E. Medvedev, K. Ovchinnikov, P. Buzin, A. Katashov, Application of Fluorescent Markers to Determine the Formation Fluid Inflow After MFrac, SPE-196776-MS, 2019.
- [8] Ovchinnikov K.N., Buzin P.V., Saprykina K.M., A new approach to well research: marker diagnostics of inflow profiles in horizontal wells // Engineering Practice - 2017. - No. 12
- [9] Ovchinnikov K.N., Saprykina K.M., Dulkarnaev M.R., Malyavko E.A. Marker diagnostic and monitoring systems for effective management of field development // Engineering Practice - 2018. - No. 11
- [10] 许建华, 安娜白洛娃, 赵宇新等. 致密气藏压后各段产能定量长期检测技术及应用. 第32届全国天然气学术年会论文集, 重庆, 2020年11月。
- [11] Kirill, Anna, Nadir, Xu Jianhua, etc. Using Markers for Production Logging in Horizontal Gas Wells with Multistage Hydraulic Fracturing. 2020 国际石油石化技术会议暨展览会会议论文集(IPPTC20205111)。2020年8月25-28, 上海。