

一种新型的微颗粒示踪剂及其在致密油藏中的应用

吕立爽, 朱玉景, 朱洪亮

(濮阳市踪水科力石油技术服务有限公司, 河南 濮阳 457001)

摘要:目前应用于油气田的示踪剂为水溶性示踪剂或者是气体示踪剂。经过多年的研究,开发了一种新类型的微颗粒固体示踪剂,并在长庆油田致密油藏中成功施工,标志着从实验成功走向了矿场。固体示踪剂在油气田开发中的应用前景广阔,尤其对致密油藏井间裂缝开度的定量描述具有指导意义。

关键词:微颗粒示踪剂;致密油藏;裂缝

中图分类号:TE35 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2021)01-0235-05

在静态资料和动态关系难以确定注水来源、评价驱油效果,或者是目前所掌握的资料之间相互印证性差的区域,油田期望选择示踪剂监测来解决以上问题^[1-12]。当工程师拿到经过严格的示踪剂施工的监测结果后,还是不能将示踪剂监测结果作为首要的资料,力排众议地作为注水来源等证据让工程师信服,不但没有解决问题,而往往又增加了争论。部分原因是目前的示踪剂为化学示踪剂、放射性示踪剂、微量物质示踪剂、荧光示踪剂、气体示踪剂^[1-12],它们都是水溶性示踪剂,或者呈气体状态,不具有肉眼可见性。为了眼见为实,前人就想研发一种颗粒示踪剂用于解决上述问题,由于颗粒具有沉降作用^[13],目前通常作为堵剂^[14],而不是作为示踪剂。在油田颗粒示踪剂监测应用方面仅用于监测井筒中仪器是否工作正常领域和单井压裂是否压开储层^[15-16]。基于以上原因,在矿场中作为示踪剂属性的应用,目前仅处在实验研究模拟阶段^[17-20]。在经过多年的研究,开发了一种新型的微颗粒示踪剂,并在致密油藏中成功进行矿场应用,标志着从实验成功走向了矿场。

1 理论基础^[21]

在固体-液体混合体系中,重力、水动力、布朗扩散力、排斥力、范德华力、波恩短程斥力等力控制了微颗粒示踪剂的沉积、分散、运移。微颗粒进入储层后主要有三种运移模式,即堵塞、通过、沉降三种。对于颗粒以哪种模式运移的解释有两

种,一种是以 Sahimi 为代表的确定性的方法,另外一种是以 Todd 与 Rege 为代表的颗粒沉降概率模型法。

Sahimi 假定:微观上看,微颗粒进入储层后,就像进入了一个毛细管,若是计算的运移距离大于该毛细管长度,则微颗粒通过该毛细管而进入下一个毛细管。为此 Sahimi 根据微颗粒在孔隙内受到的各种力(包括水动力、重力及 Landon 力等)建立了以下微颗粒运动的轨迹方程:

$$\frac{dy}{dz} = \frac{N_0 \sin \alpha + N_{g1} (N_{g2} - e^{-N_{DLS}^+}) \frac{e^{-N_{DLS}^-}}{1 - e^{-N_{DLS}^+}} - \frac{N_L a_p}{(\delta^+)^2 (2 + \delta^+)}}{G_1 B_Y + G_2 D y^2 + G_3 N_0 \cos \alpha}$$

式中, $y = R - r$, R 为毛细管半径, r 为坐标半径; N_0, N_{g1}, N_{g2} 及 N_{DL} 为与因群; G_1, G_2 及 G_3 是流函数。

毛细管为圆柱体,若储层中毛细管半径是变化的,那么以上轨迹方程不再是一个解析式。当然也可以无限的劈分毛细管,直到呈现圆柱体后再计算。从理论上讲,该方法是可求解的,但计算量将是非常惊人的。

Todd 与 Rege 提出的概率模型算法指出,如果颗粒在大于其半径的毛细管内运移,则以下算式成立:

$$p = 4[(\theta_a/R_0)^2 - (\theta_a/R_0)^3] + (\theta_a/R_0)^4 \quad (1)$$

式中, a 为颗粒半径, R_0 为毛细管半径; θ 为参数。

如图 1 所示, θ 是微颗粒在储层中多个力作用

收稿日期:2020-08-20

作者简介:吕立爽(1985—),女,河北衡水人,濮阳市踪水科力石油技术服务有限公司,研发部主任,高级工程师,本科,研究方向:油气田示踪剂监测。

的结果,用一个参数 θ 集中表示, θ 越小则微颗粒越容易运移通过。然而影响微颗粒沉降因素非常复杂,通常情况下有流体的速度、离子的强度、pH 值及流体性质等,为此,Rege 进一步提出了如下关系式:

$$\theta = \theta_0 \exp(-v/v^0) \tag{2}$$

式中, θ_0 为依赖于离子强度的参数; v 是毛细管内流体平均速度; v^0 为临界速度。

除流速控制外, θ 还要受到 v^0 与 θ_0 的影响。 v^0 可以由实验得出,也可以根据 Spielman 等的方法计算。当流速非常低的情况下, $v/v^0 \approx 0$, 此时可忽略流速的影响,即 $\exp(-v/v^0) = 1$, $\theta \approx \theta_0$ 。而当流速较高时,流速增加导致了 θ 的减小,颗粒易运移。

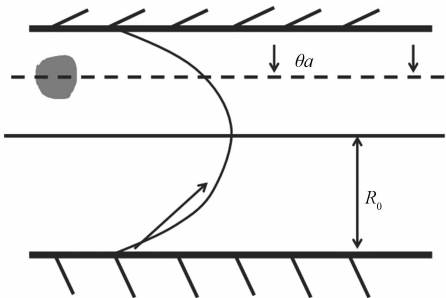


图 1 颗粒沉降率、运移率示意图

2 微颗粒示踪剂的基本特点

该微颗粒示踪剂为微米级的固态荧光物质,具有大小不同的粒径,不同品种的微颗粒具有不同的粒径范围,不溶于弱酸弱碱,密度接近 1.0 g/cm³,抗干扰性强,成本低。选择一种微颗粒,制备成 10ppm(10⁻⁶)、1ppm 浓度的样品进行极限检测试验(图 2),用 1ppm 样品进行抗干扰性试验。

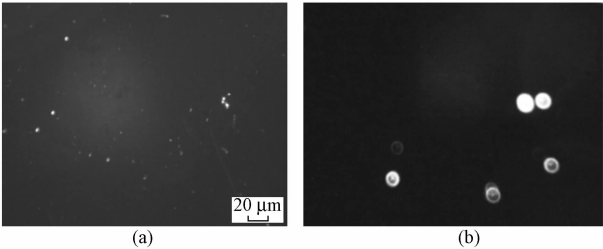


图 2 (a)为浓度为 10ppm,10 倍目镜显微镜观察结果;
(b)为浓度为 1ppm,40 倍目镜显微镜观察结果

2.1 极限检测试验

用高倍显微镜进行不同浓度条件下微颗粒示

踪剂检测,10 ppm 浓度的样品中,低倍数下就能看见大量微颗粒分散相示踪剂,微颗粒呈分散状态,部分微颗粒存在颗粒间的重叠[图 2(a)],随着浓度逐渐减小到 1 ppm,镜下发现的颗粒数量减小,由于显微镜放大倍数增大,在镜下发现微颗粒图像变得清晰[图 2(b)]。浓度越大,鉴定出的颗粒数量越多,浓度越小,鉴定出的颗粒数量越少。检测极限主要与采用显微镜的性能及浓度有关。

2.2 抗干扰性试验

高浓度条件下,抗干扰性较强。低浓度条件下,抗干扰性相对弱。抗干扰性试验主要是检测抗其他类型示踪剂的干扰及检测在油田水条件下的适用性。为此选择在 1 ppm 条件下,选用添加三种示踪剂(硝酸铵、硫氰酸铵、溴化钠工业尿素)和油田地层水,并在 95 ℃ 条件下(模拟地层温度)放置 1 个月后测试微颗粒物质,主要监测该微颗粒在以上条件下,微颗粒形态是否发生改变,是否存在检测精度下降的情况。经过检测,微颗粒在以上添加物的液体中,并无产生改变,并未被硝酸铵、硫氰酸铵、溴化钠工业尿素、油田地层水所干扰(表 1)。

表 1 微颗粒示踪剂抗干扰性试验

序号	添加物质	长轴/ μm	短轴/ μm	直径范围/ μm	颗粒数 量/个
1	硝酸铵	1.57	1.41	1.21~8.32	35
2	硫氰酸铵	1.57	1.41	1.21~8.32	35
3	溴化钠	1.57	1.40	1.21~8.32	35
4	工业尿素	1.57	1.41	1.21~8.32	35
5	油田地层水	1.56	1.41	1.21~8.32	35

2.3 热稳定性试验

示踪剂适应油田开发中的应用中,最为重要的指标为热稳定性试验,也就是微颗粒示踪剂要在地层温度条件下不发生改变。对样品进行热重试验(图 3),温度低于 225 ℃ 时,微颗粒的质量变化-0.04%(减少了 0.04%),重量几乎未发生变化;当温度为 338.7 ℃ 时,质量变化率开始增大,在 364.5 ℃ 时,质量变化了-67.1%,质量主要是在 338.7~364.5 ℃ 区间丧失。表明该类型的微颗粒适用于温度低于 225 ℃ 的环境。目前中国的油气田开采深度较大的给塔河油田 5 450 m 油藏温度为 125 ℃^[5],微颗粒示踪剂适应温度远高于油藏温度。

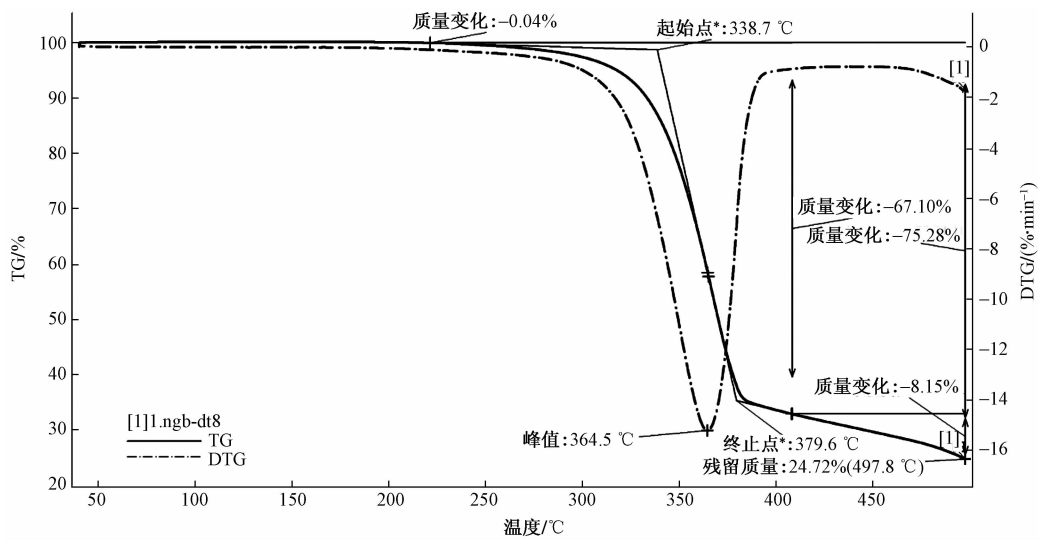


图3 微颗粒热重实验

3 在特低渗油藏中的应用

3.1 地质概况

监测井 S50—9 位于长庆油田,层位为长 4+5,井段 1 784~1 862 m,日注水 30 m³,累计注水 3 350 m³,平均孔隙度为 9.43%,平均渗透率 0.60×10⁻³ μm,平均含油饱和度 42.6%,监测井为周围的 8 口油井(图 4)。表 2 测试储层压汞参数显示,该区为致密油藏储层,最大孔喉半径为 2.875 1 μm。监测油井 S52-10 井投产 1 个月后,含水从 26%上升到 99.2%,S48-8 井含水达 91%。其他监测井的含水低于 50%。

3.2 示踪剂注入

长庆姬源油田每年产 2 000 多吨污泥^[22],说明颗粒类物质可以从致密油藏储层中运移到油井井筒。示踪剂注入之前采样进行背景化验,检测未发现样中含有干扰微颗粒示踪剂监测的物质。根据该井组的井距、储层物性参数,调研了长庆油田的微观孔喉特征^[23]、工区的压汞测试数据(表 2)及示踪剂配伍性,注入一种粒径范围在 1.10~10.24 μm 的微颗粒示踪剂,配置成浓度为 0.35% 的 5.3 m³ 溶液,利用泵车注入 S50-9 井。

表 2 测试工区储层参数

样品数	排驱压力/MPa	中值压力/MPa	最大孔喉半径/μm	中值半径/μm	孔隙度/%	渗透率/10 ⁻³ μm
1	0.554 2	3.960 9	1.388 1	0.185 8	9.62	0.82
2	0.459 9	6.586 5	1.598 1	0.125 5	9.64	0.67
3	0.496 7	4.191 8	2.875 1	0.250 4	9.69	0.72
4	0.644 1	5.901 9	/	0.126	9.74	0.72
5	2.605 3	31.614 5	0.366 8	0.026 9	7.9	0.07

3.3 监测结果

经过监测,S50-9 井组在 S52-10、S48-8 共两口油井监测到微颗粒示踪剂,其余井未监测到微颗粒示踪剂。其中 S52-10 井示踪剂突破速度最快,微颗粒达到 27 颗,S48-8 井示踪剂突破速度较慢,监测到微颗粒数量为 2 颗(图 4、表 3)。从示踪剂推进速度和示踪剂监测数量看,S50-9 井注水主要流向了 S52-10、S48-8 井,是主要受效井,说明该方位是裂缝发育方位,三口井之间的距离为裂缝展布的范围,该监测结果与油井日产油、日产水相互印证。

表 3 监测结果

井号	井距/m	突破时间/d	速度/(m·d ⁻¹)	颗粒数/颗	颗粒直径范围/μm
S52-10	349.2	2.5	139.7	27	1.10~8.62
S48-8	305.3	3.5	87.2	2	1.10~8.41

4 结论

1)在长庆油田致密油藏储层中,微颗粒示踪剂成功实施监测,这样的监测案例超出了笔者的想象,该结果也让人振奋,说明该项技术成功从实验走向了矿场。

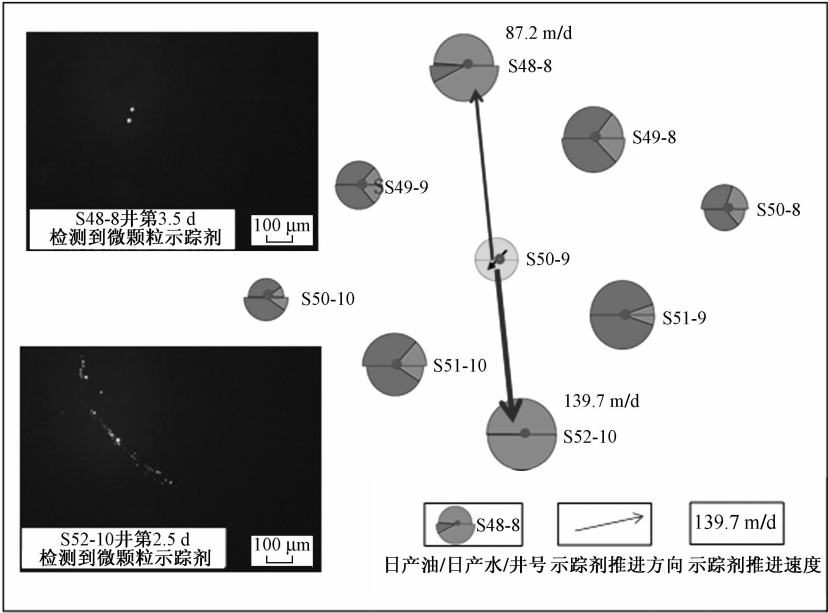


图 4 监测井组井位图及监测响应图

2)致密油藏中孔喉小,注入的微颗粒示踪剂的粒径明显大于致密油藏中储层的孔喉,在监测的油井中能成功的监测到微颗粒示踪剂,说明储层中存在一种大孔喉(或者大开度)的通道,使得微颗粒示踪剂能在其中通过。这个通道不可能是致密储层的大孔喉,也不可能是注水侵蚀形成的大孔道(注水时间短及累计注水量低),只可能是发育的天然裂缝或者是压裂的人工裂缝。

3)S50-9 井示踪剂突破速度快,在第 2.5 天已经突破,在致密油藏中示踪剂如此快的突破速度,是笔者未料到的,也表明了致密油藏中裂缝发育情况对注水开发的影响很大。但在致密油藏中,微颗粒示踪剂突破速度如此之快的原因和机理,需要进一步的研究。

参考文献

[1] 朱志香. 大庆长垣南部示踪剂监测评价化学剂驱油效果分析[J]. 长江大学学报:自然科学版, 2016, 13(3): 19—21.

[2] 敬晓锋, 苗福全, 韩应龙, 等. 多种示踪剂监测技术在鸭 513 井组的应用[J]. 国外测井技术, 2012(2): 56—59.

[3] 李金宜, 姜汉桥, 李俊健. 非分配性示踪剂在多孔介质中运移扩散规律研究[J]. 油气田地面工程, 2010, 29(6): 15—17.

[4] 吴振东, 邓广耀, 宋子军, 等. 井间示踪剂监测技术在复杂小断块油藏中的应用[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2007, 29(3): 237—239.

[5] 夏平, 王震, 马宝军. 微量元素示踪监测技术在火烧山油田 H3 油藏的应用[J]. 新疆石油天然气, 2019, 15(2): 73—79.

[6] 王志龙, 樊萍, 徐静, 等. 荧光分光光度法测定水中示踪剂荧

光素钠示踪剂[J]. 世界核地质科学, 2019, 36(4): 232—237.

[7] 孙建华, 唐长久, 刘鹏程, 等. 应用示踪剂监测方法跟踪评价聚合物驱效果[J]. 大庆石油地质与开发, 2004, 23(3): 83—84.

[8] 李腾芳, 覃小群, 黄奇波, 等. 岩溶区地下水示踪试验及曲线特征[J]. 中国矿业, 2019, 38(2): 497—501.

[9] 尹尚先, 徐斌, 徐慧, 等. 化学示踪连通试验在矿井充水条件探查中的应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 129—134.

[10] 刘人太, 李术才, 张庆松, 等. 示踪试验分析方法在地下工程水害治理中的应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 814—821.

[11] 付宏学, 冯念念. 示踪试验在南方岩溶地区污染调查中的应用[J]. 煤炭与化工, 2019, 42(12): 6—9.

[12] 贾俊山. 优势流场表征技术[J]. 断块油气田, 2011, 18(5): 626—629.

[13] 郑邦民, 夏军强. 固体颗粒的群体沉降速度分析[J]. 泥沙研究, 2004(6): 40—45.

[14] 赵修太, 陈泽华, 陈文雪, 马汉卿, 翟东启, 任增雷. 颗粒类调剖堵水剂的研究现状与发展趋势[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(4): 105—112.

[15] JOHN CLARK, JAMES GEORGE OAG. Method and apparatus for a tubing conveyed perforating guns fire identification system using enhanced marker material: US2002079098A1[P]. 2002—06—27.

[16] IAN D ROBB, ROBERT E HANES JR, BILLY F SLA-BAUGH, et al. Methods and compositions for determining the sources of fluids or particulates from subterranean formations: US20050109087A1[P]. 2005—03—26.

[17] 张新宝, 李留仁. 碳酸盐岩缝洞型油藏井间连通性的示踪剂监测—以塔河油田 T402 注采井组为例[J]. 西安石油大学学报:自然科学版, 2019, 34(6): 55—59.

[18] 姚传进,雷光伦,薛世峰,等. 一种识别储层非均质性的双示踪剂方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2016,40(1):108—115.

[19] 李好婷. 多孔介质微通道内颗粒流动特性数值模拟研究[D]. 大庆:东北石油大学,2019.

[20] 刘同敬,姜宝益,刘睿,等多孔介质中示踪剂微观可视化实验研究[J]. 断块油气田,2013,20(4):530—534.

[21] 蒲春生. 液—固体系微粒表面沉积分散运移微观动力学[M]. 北京:石油工业出版社,2008.

[22] 闫怀荣,蒲三龙,魏江伟,等. 姬源油田含油污泥调剖工艺技术研究[J]. 石油化工应用,2017,36(3):50—55.

[23] 王瑞飞,沈平平,宋子齐,等. 特低渗透砂岩油藏储层微观孔喉特征[J]. 石油学报,2009,30(4):560—563.

A New Type of Microparticle Tracer and Its Application in Tight Sandstone Oil Reservoir

LV Li-shuang, ZHU Yu-jing, ZHU Hong-liang

(Puyang Zong Shui Ke Li Petroleum Technology Service Corporation, Puyang Henan 457001, China)

Abstract: At present, the tracers used in oil and gas fields are water-soluble tracers or gas tracers. After years of research, a new type of microparticle solid tracer has been developed and it has been managed to construct in tight sandstone oil reservoir of Changqing Oilfield. It marks the successful move from experiment to mine. The application of solid tracer in the development of oil and gas fields has a further prospect, especially for the quantitative description of the fracture opening between wells in in tight sandstone oil reservoir.

Key words: microparticle tracer; tight sandstone oil reservoir; crack