

# 微量元素井间示踪剂实验研究\*

李 坤, 杨晓勇

(中国科学技术大学石油天然气研究中心, 安徽 合肥 230026)

示踪剂是指为观察、研究和测量某物质在指定过程中的行为或性质而加入的一种标记物。目前国内外开采油田的主要方式是注水开发, 一些能随流体运移的固体颗粒或化学药剂等被广泛应用于油田开发过程中。即将一定量的示踪剂加入到注入流体中, 令其通过注入井进入含油地层中, 最后在采油井产出, 通过检测示踪剂在采油井产出流体中的浓度变化, 获得注入井与采油井之间的油藏信息。

井间示踪剂的主要用途包括: ① 结合测井资料, 判断出水层位; ② 评价油藏非均质性, 包括井间连通性、平面及纵向非均质性及大孔道等; ③ 确定多项指标: 井网的体积波及系数、水淹层的厚度及渗透率的大小、平均孔道半径、堵剂类型、用量、地层剩余油饱和度及注入水对周围油井的体积分配; ④ 分析评价堵水、调剖效果, 最终评价水驱效果, 预测油藏采收率; ⑤ 识别大孔道, 验证断层的封闭性及判断油水井管外窜槽; ⑥ 通过对油藏的再认识, 指导调堵方案的编制, 从而提高调剖堵水效果, 为油田今后注水工作提供指导意见。理想的示踪剂必须能沿着流体流动路径, 随着总流方向一起向前移动。

用于油层的示踪剂应满足以下条件: ① 在注入流体和储层流体中的含量低, 以接近零为最佳, 这样可以准确鉴别示踪剂和降低成本; ② 化学稳定性、物理稳定性和生物稳定性好, 与注入流体有良好的相容性且与储层流体不发生化学反应; ③ 分析操作简单、可靠、灵敏度高; ④ 在地层表明吸附量小, 在油水间的配分系数小; ⑤ 货源广、价廉、无毒、安全、对环境无污染; ⑥ 同时使用的示踪剂彼此无干扰。

## 1 油田示踪剂的分类

将示踪剂应用于测井已有 60 多年的历史, 这项技术经历了由浅入深, 由定性到半定量、定量的发展历程。期间随着科研手段的进步并通过室内和油田现场的实践, 人们找到了一系列用于不同测试项目的示踪剂产品。

### 1.1 化学示踪剂

化学示踪剂又被称为第一代示踪剂(20 世纪 50 年代技术), 主要以含硝酸根、氯离子和溴离子等的易溶无机盐, 胭脂红等阴离子型荧光染料, 三氯乙烯等卤代烃和甲醇、乙醇等低相对分子质量的醇为代表, 检测工具主要包括分光光度计和气相色谱仪, 检测精度达到  $10^{-4}$ ~ $10^{-6}$  级别。

化学示踪剂是油藏研究的重要手段之一, 它在研究油层连通性、储层物性、断层封闭性、注水对应关系以及注入水推进速度等方面有着重要的作用。1992 年以来, 在河南稀油田进行了多次化学示踪剂现场应用, 在判断油层连通性, 注水对应关系等方面取得了一定效果, 对油藏研究、动态调整起到了一定的积极作用。但化学示踪剂适用性和选择性差、用量大、成本高、测试精度低、对原油加工存在影响, 呈现逐级淘汰的趋势。

### 1.2 放射性同位素示踪剂

放射性同位素示踪剂又被称为第二代示踪剂(20 世纪 70 年代技术), 主要以氚水、氟化烷烃和氟化醇等为代表, 可以在生产井或观察井中实现分层测试, 利用自然  $\gamma$  射线, 可以实现不取样检测, 检测工具包

\*本文得到中科院知识创新重大项目“石油开采中关键科学问题及技术应用示范(KJ CX1-YW-21)”的资助  
通讯作者 杨晓勇, 男, 博士, 教授, 博士生导师, 岩石学与矿床地球化学专业。

括液相闪烁仪等，检测精度可达到  $10^{-9}$  的级别。放射性同位素示踪剂具有用量少，易检测的优点。但由于具有放射性，对环境和人体都有不利影响，所以投放和检测都需要专业部门操作，使它的应用受到限制。

### 1.3 稳定性同位素示踪剂

稳定性同位素示踪剂又被称为第三代示踪剂（20 世纪 90 年代技术），它使用那些存在于各类药剂中，可以活化的没有放射性的同位素（如  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ）进行示踪，精度可达  $10^{-11}$  的级别。

以氘及其化合物为代表的稳定性同位素示踪剂克服了放射性同位素在使用过程中带来的环境和安全问题。但由于稳定性同位素示踪剂品种更少，而且在使用时不能让其于在矿场显示出放射性，取样后仍需通过室内的原子反应堆激活，用中子活化法测量其放射性活度，只能由原子能机构进行室内检测操作，其分析测试手段繁杂，费用昂贵，限制了其应用。

### 1.4 微量物质示踪剂

微量物质示踪剂又被称为第四代示踪剂，是在 20 世纪 90 年代被提出的一项新型示踪剂。“微量物质”是指在投放区域的地层中没有或含量极低的物质，包括荧光物质和稀土元素等。使用它作为示踪剂既有以上几种示踪剂的优点，又能克服它们存在的不足，其特点包括：① 用量少，成本低；② 分析精度高，能获得其他类型示踪剂捕捉不到的信息；③ 无放射性，操作简便，不需要专业人员指导；④ 实现分层示踪测试和井间实时动态监测。

在现场操作时，先将一定配比的微量物质投入井中，然后按照取样规定取样，并采用电感耦合等离子体质谱仪分析样品，绘制各个井的产出曲线。根据各个井的特征进行拟合处理，从而研究分析储层的地层参数，最后通过数学模型及综合分析解释，研究储层非均质性和剩余油分布规律。

微量物质示踪技术实现了从定性到定量的转变，能有效地反映地下流体的分布状况和运动规律，同时可以取得相关的地层参数，从而定量地评价储层的非均质状况。

## 2 微量元素示踪剂的实验室研究

根据大庆油田地层水中各个元素的含量，选择含量低的元素作为实验用元素，配制成为示踪剂溶液，作为吸附质。选择天然河沙和市售高岭土，配制成不同沙土比的混合物样品，作为吸附剂。进行静态吸附实验和动态滞留实验。

### 2.1 静态吸附实验

静态吸附的吸附量测定方法较多，主要有将固体吸附剂加入一定量已知浓度的溶液中达到吸附平衡的浸泡法；在密闭系统中使溶液循环通过固体吸附剂达到平衡的循环法；以吸附剂为固定相测定流入和流出溶液浓度的色谱法等。本实验采用浸泡法测定示踪剂在河沙和高岭土上的静态吸附量。

取不同成分配比的沙土等量，放入不同容器中，并加入等量的配置好的示踪剂溶液，使体系处于恒温，温度控制在油田地层温度附近。每天搅动沙土和示踪剂溶液，使其充分接触。每隔几天取上层清液，测定其中的示踪剂含量。

### 2.2 动态滞留实验

任何示踪剂进入地层后都会不同程度地滞留于地层物质中，当地层所吸附的示踪剂与流体中的示踪剂含量达到一定浓度的平衡以后，地层不再吸附示踪剂，此时的示踪剂滞留量保持不变。同样取不同成分配比的沙土等量，放入淋滤装置中。每天以一定的出水速率使示踪剂溶液从装置上方流入沙土中，每隔几天取一次渗出液，测定其中的示踪剂含量。

## 3 初步结论

实验数据显示，过渡元素中的 Zn，稀土元素中的 Ce 等元素适宜作为示踪剂，其他多元素示踪剂物质正在试验和研发中。