第 22 卷 第 1 期
2009 年 2 月

同 位 素
Journal of Isotopes

Vol. 22 No. 1
Feb. 2009

大庆油田注入剖面测井技术研究进展

郑 华，李 军，刘兴斌，蔡 兵
（大庆油田有限责任公司 测试技术服务分公司，黑龙江 大庆 163453）

摘要：针对大庆油田持续开发给注水剖面测井带来的新问题，采用新工艺制造了适用于低注入量井的注入剖面测井；开发了 5 参数组合测井仪，用管内流量、静态井温、流动井温与放射性同位素示踪资料综合解释，提高了资料的准确性和可靠性；新研制的高可靠性脉冲氧活化测井仪和新开发的示踪相关流量测井技术能基本满足对注聚合物井进行注入剖面测井的需要。大庆油田现已规模应用了注入剖面测井新技术，并总结出了优选应用方法。

关键词：注入剖面测井；放射性同位素；示踪；活化；组合测井
中图分类号：TE132 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-7512(2009)01-0048-06

Progress of Injection Profiling Technology in Daqing Oilfield

ZHENG Hua, LI Jun, LIU Xing-bin, CAI Bing
(*Logging & Testing Services of Daqing Oilfield Co. Ltd, Daqing* 163453, *China*)

Abstract: Radioisotope microball tracer which was produced by new process is applicable to injection profiling in low injection rate wells. Five-parameter combo logging tools were developed, which enhance accuracy and reliability of log by integrating interpreting flowrates inside tubing, shut-in and flowing well temperatures and tracing results. Reliable impulse oxygen-activation logging tools and a tracer logging method with correlation arithmetic were developed to meet the need of profiling polymer injectors. These new techniques are widely used in injection profile logging at Daqing oilfield.

Key words: injection profile logging; radioactive isotope; tracing; activation; combo log

大庆油田是非均质多层砂岩油田，具有油层多、层段长、层间物性差异大的特点，一直使用分层开采技术。在分层注水井中，有多个封隔器密封套管与油管之间的空间，把射孔小层分隔成若干层段。注入水从油管向下流动，通过每个层段的配水器流入油管与套管之间的环形空间，再流入各射孔小层。为获得层段和小层的注水状况信息，大庆油田广泛应用放射性同位素载体示踪法测井（俗称同位素测井）来测量注水井的注入剖面。该方法在释放示踪剂前后分别沿深度方向测量伽马曲线，用 2 条曲线叠合面积解释各小层的注水量[1]。

2001 年以来，大庆油田开发了大量低渗透率油藏，相应注水井注入量低，老区块普遍进入

收稿日期：2007-10-30；**修回日期**：2008-09-18
作者简介：郑华（1967～），男（汉族），黑龙江大庆人，高级工程师（理学博士），从事测井技术研究工作

高含水和特高含水开发阶段,小层间物性差异更大。规模应用注聚丙烯酰胺聚合物水溶液(简称聚合物)等三次采油技术后,注入流体黏度增加。这些变化给注入剖面测井带来困难,受示踪剂在注入管柱上沾污、大孔道地层示踪剂失踪等影响,同位素载体示踪法注入剖面测井资料的准确性变差。聚合物驱油技术工业化应用后,原有的基于涡轮流量计和同位素载体示踪法的注入剖面测井技术已不适于对高黏度聚合物的测量。2003 年后大庆油田大量聚合物笼统注入井转成分层注入井,注入剖面测井的难度进一步增大。

针对大庆油田持续开发给注入剖面测井带来的新问题,重点开展了新型同位素载体示踪剂、5 参数组合测井、高可靠脉冲中子氧活化测井仪、示踪相关流量测井等技术研究,形成了基本适应于低注入量注水井、分层注水井和注聚合物井的注入剖面测井技术系列。

1　新型同位素载体示踪剂

三次加密注水井与低渗透率油藏注水井的注入量较低,在 73 mm 外径油管与 125 mm 内径套管间水流速度一般低于 40 mm/s,应用放射性同位素载体示踪法测井时,对示踪剂微球的密度、在静水中下沉速度等指标要求较高。原示踪剂密度大(实测 1.2～1.8 g/cm^3)、在静水中下沉速度较快(实测 15～25 mm/s),测井资料表现出在油管接箍、配水器和封隔器位置示踪剂沾污严重、大部分射孔小层无注水指示的现象,不能反映小层实际注水状况。

原示踪剂微球的制作工艺是,用密度约为 2.0 g/cm^3 的一定粒径的硅胶颗粒吸附放射性同位素化合物,通过把松香和蔗糖粘附在硅胶颗粒表面后炭化来调整微球密度,用漆粘附在炭化后的硅胶微球表面来封堵颗粒微孔。主要依靠炭化剂与硅胶颗粒的混合比例来控制示踪剂微球密度。

研制新型示踪剂微球时尝试了多种技术方案,力求既把微球密度控制在预定范围内又避免制造工艺过于复杂、成本过高。由于吸附放射性同位素化合物与防脱附工序对微球密度影响很小(如 1 000 cm^3、1×10^9 Bq 活度的微球只需吸附 0.5 g 放射性 $BaCl_2$),最终确定的技术路线是:在制造不含放射性的冷球时就使其密度和粒径达到规定的技术指标,避免吸附放射性同位素后再调整微球密度。先用密度 1.5 g/cm^3、粒径 1 μm 的活性炭微粒与低密度胶等化合物混合成型制出冷球,严格分选出密度、粒径适合的冷球,成品率约为 30%;冷球吸附放射性同位素化合物后,再吸附少量的非放射性化合物封堵微孔;最后在载体表面封以薄漆。新示踪剂微球具有如下技术指标:密度 1.03～1.06 g/cm^3,在静水中平均下沉速度小于 8 mm/s,脱附率小于 10%,在 100～900 μm 范围内可选择多种粒径。

应用新示踪剂后,测井资料重复性和准确性得以提高,在低注入量井中放射性沾污现象有所减少,测井曲线在注水小层分层清晰[2]。此外,选用粒径大于 600 μm 的新型示踪剂进行时间推移测井,还能识别出大孔道地层。

2　5 参数组合测井及综合解释

注入剖面 5 参数组合测井记录的是磁性定位、压力、井温、油管内流量、同位素载体示踪等 5 个参数。测井曲线示于图 1。井温曲线包括开井流动井温曲线和关井恢复井温曲线。同位素载体示踪结果就是自然伽马基线与释放同位素载体示踪剂后伽马曲线的叠合,图中没有显示用存储式电子压力计测得的压力曲线。

同时使用几种测量方法来获得一口注水井注入剖面信息的原因是这些方法都有其局限性。在分层注水井中,流量计短接测得的流量曲线能指示油管内水流量及通过配水器进入各层段的水流量,但不能指示油管外各小层的注水量;在封隔器失效或套管外存在窜槽时,它甚至不能正确反映各层段真实的小层注水总量。同位素载体示踪测井受示踪剂微球沾污管柱及大孔道地层示踪剂失踪等影响,有时也不能反映小层真实注水情况。关井与开井的井温曲线通常只能用于定性判断主要注水层。多参数组合测量和综合解释可提高测井资料的准确性和可信性[3]。此外,作为质量控制曲线的压力曲线可用于监督测井施工过程,磁定位曲线被用于测量油管接箍、封隔器和分层配水器的位置。

为了推进注入剖面 5 参数组合测井技术的大规模应用,先后改进完善了注入剖面 5 参数组合测井仪[4]和注入剖面 4 参数组合测井仪[5]。由于压力曲线主要用于监督测井施工过程,2004 年以来重点推广应用了注入剖面 4 参数组合测井仪挂接存储式电子压力计的施工工艺,并且在

释放同位素载体示踪剂后随时间推移多次记录测井曲线。采用这种工艺后，现场操作员不能读取压力测井数据，有利于资料解释员监督测井全过程。测井仪一次下井可以同时录取多个测量参数，技术指标一般为外径 38 mm、耐压 80 MPa、耐温 125 ℃、流量测量范围 1～500 m^3/d、流量测量误差 5%、井温测量范围 0～125 ℃、井温测量误差 1 ℃、井温测量分辨率 0.1 ℃、压力测量误差 0.2%、同位素释放器容量 200 mL、伽马计数范围 0～2 500/s、伽马计数误差 5%。测井仪采用积木式结构，功能短接包括：通用短接（含数字传输电路、磁性定位、井温/压力、伽马探头）、扶正器、流量计短接、同位素释放器等。可根据井况选配涡轮流量计、电磁流量计或超声流量计短接[6]。涡轮流量计短接可定点测井也可沿深度方向连续测井，采用连续测井方式可降低启动排量，涡轮是转动部件，对井内流体的洁净程度有一定要求。电磁流量计短接利用电磁感应原理，可测量导电流体的流量，具有测量精度高、测量范围宽和可靠性高的优点。实验和应用证明电磁流量计不仅可测量水流量，还可测量聚合物或三元复合液（碱、表面活性剂、聚合物水溶液）流量[7-8]，电磁流量计在水和聚合物中都对流量具有线性响应规律但仪表常数不同。至今尚未完全解决电磁流量计短接连续测井问题，在注入层段没有油管的笼统注聚合物井中可用加密点测的方法对厚油层的注入剖面进行细分测量。2004 年开发的超声流量计短接[9]也无可动部件，测井成功率高、仪器成本低，对水质要求不高，比电磁流量计更适用于污水回注井。

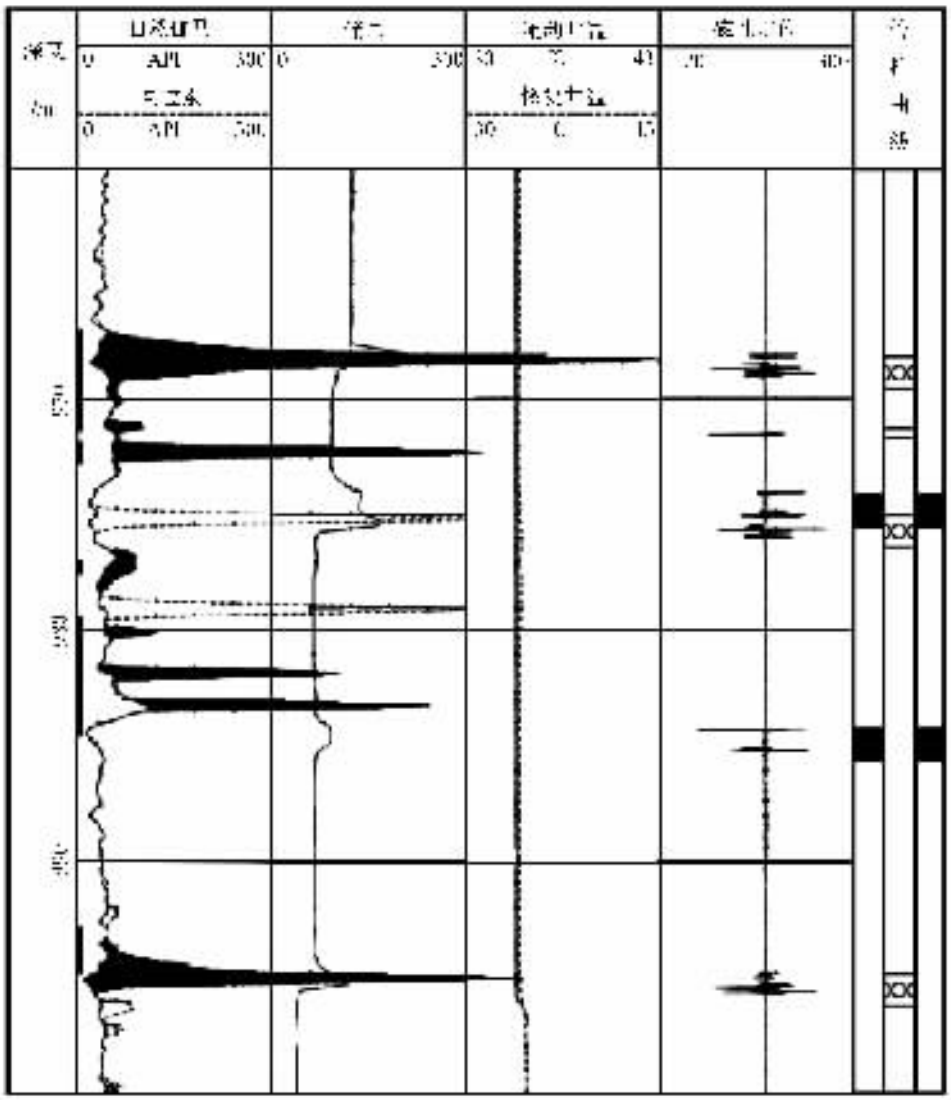

图 1 注入剖面 5 参数组合测井曲线

综合解释就是充分利用组合测井仪录取的丰富的多参数信息,发挥各个参数的优势,取长补短与互相印证,使解释结果能够客观反映井下情况。在 5 参数综合解释过程中,井温测井资料常用于辅助判断主要注水小层与注水级别,验证封隔器是否密封[10]。综合分析井温、流量以及随时间推移的多次同位素载体示踪资料,能识别地层大孔道和套管外窜槽,判断是否存在封隔器失效等井身结构不完整的问题[11]。在井身结构完整的情况下,先用管内流量曲线确定分层段流量,再以层段为单位结合同位素载体示踪资料确定层段内各小层的相对注水量,可部分消除同位素载体示踪剂沾污、失踪等影响,提高了小层注水量的测量准确性。注水压力的变化直接影响各小层的相对注水量,测井时应保持与正常注水时相同的井口压力,用压力测井曲线分析和评价测井施工过程。

3　脉冲中子氧活化测井

三次采油注入流体黏度增加,给 5 参数注入剖面测井技术的应用又带来新的难题:同位素载体示踪剂在高黏度聚合物中抱团,不在聚合物中均匀扩散,不按注入比例分配到小层,不能很好地起到示踪作用。为解决这个问题,大庆石油管理局测井公司和大庆油田测试分公司开发与应用了脉冲中子氧活化测井技术[12-14]。

脉冲中子氧活化测井也是一种示踪测井。测井仪中的中子发生器先爆发一段时间(1～15 s)中子活化周围的水,在水流动方向上设置伽马射线探测器,随着活化水流的到达,探测器计数率增大。通过多次重复爆发中子和记录伽马射线计数,可降低统计涨落,获得某个探测器计数随时间变化的时间谱(见图 2)。利用时间谱计算出水流从中子源流到探测器的时间 t_m:

$$t_m=\sum_{1=T_1}^{T_2} y_i t_i \Big/ \sum_{1=T_1}^{T_2} y_i - \frac{L}{2} t_a \tag{1}$$

(1)式中,t_a 是中子脉冲时间宽度,T_1 和 T_2 分别为计算峰位的起始时间和终止时间,t_i 和 y_i 分别为时间和计数。用中子源到探测器之间的距离 L 除以水流到达时间 t_m,就能计算出水流速度 v。由于利用了高能中子和高能伽马射线,这种方法可以测量油管内、油管外甚至套管外水流的速度,适应于在笼统注入井和分层注入井中测量注入剖面(注入介质为水或聚合物),还可用于检测封隔器漏失和套管外水泥环中的窜流[15-16]。

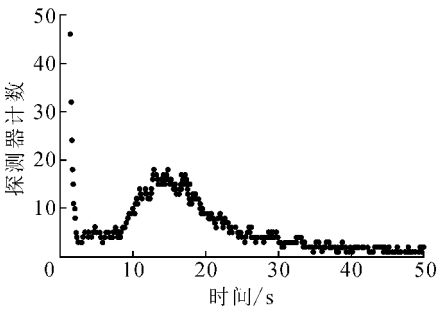

图 2　脉冲中子氧活化的时间谱

“十五”期间大庆油田脉冲中子氧活化测井技术得到进一步完善:采用中子发生器充气绝缘工艺替代充油绝缘工艺,提高了测井仪的可靠性;通过调整仪器内中子发生器源到探测器之间的距离,扩大了流量测量范围,在 125 mm 内径套管中流量测量范围达到 7～900 m^3/d;优化了仪器工作模式,把中子爆发与伽马射线测量时序由固定周期改为可根据具体流量进行选择的周期,缩短了施工时间,测井实效提高了近 1 倍;采用遥测传输技术,使测井仪器配接的电缆由 3 芯电缆改为直径更细的单芯电缆[17],有利于密闭测井施工;测井软件升级为 Windows 版[18],实现了地面显示和控制中子发生器靶压、灯丝电压[17],增加了现场快速直观解释功能;采用拟合算法,提高了时间谱上峰位定时的精度,进而提高了流速测量精度[19];开发与应用了能同时测量双向水流的测井仪,进一步提高了测井施工效率[20]。

目前大庆油田应用多种型号的脉冲中子氧活化测井仪。仪器一般由磁性定位器、中子发生器、伽马探测器组等部件与相关电路构成。仪器外径 42 mm,能通过通常具有最小内径 46 mm 通道的分层注入管柱;仪器耐温和耐压指标多为 125 ℃和 60 MPa。

4　示踪相关流量测井

脉冲中子氧活化测井利用水中 ^{16}O 核素活化成的放射性 ^{16}N 核素作为流速示踪剂,优点是示踪剂与被测流体之间没有滑脱速度。然而,^{16}N 核 7.13 s 的半衰期对于低注入量井而言有些过短,在水流速度低于 7 mm/s 的情况下,当

活化水流到达探测器时，其中的示踪剂已经衰变到难以测量的程度。针对这一问题，利用半衰期较长的放射性^{131}Ba 同位素作为流速示踪剂，于 2002 年开发出了示踪相关流量测井技术[21-22]。该技术用电机式释放器向井内释放具有一定聚合性的放射性示踪剂段塞，把带有两个以上伽马射线探测器的测井仪迅速下放到需测量示踪剂流速的深度位置。当油套空间的示踪剂流经这两个探测器时，探测器输出的计数率产生相应的变化，示踪相关测井的原理示于图 3。示踪剂需具有很好的聚合特性且密度与被测流体的密度接近，保证示踪剂与被测流体同步流动。若示踪剂在水中不扩散，可观测到两个探测器计数率峰值之间的时间差 τ_0，根据已知的探测器之间的距离 L，计算出示踪剂的流动速度 $v=L/\tau_0$，再根据水流截面积计算出流量。

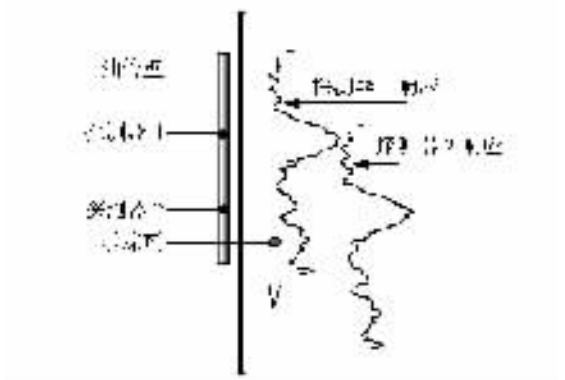

图 3 示踪相关测井的原理

实际测井中，示踪剂在水中会扩散，加之流动影响，以及伽马射线计数率有统计涨落，要准确测量 τ_0，需采用相关算法。上、下游探测器的计数率是时间 t 的函数，设为 $x(t)$ 和 $y(t)$，它们的互相关函数为

$$R_{xy}(\tau)=\frac{1}{T}\int_0^T x(t)y(t+\tau)\mathrm{d}t \qquad (2)$$

若 $\tau=\tau_0$ 时 $R_{xy}(\tau)$ 出现最大值，则 τ_0 就是要确定的时间差。

示踪相关流量测井仪主要由遥测-磁性定位器短接、示踪剂释放器、探测器短接、扶正器等部分组成[21,23]。仪器外径 38 mm，耐温、耐压指标一般是 125 ℃、60 MPa。2 个伽马射线探测器由过渡短接相连，可根据井况选用不同长度的过渡短接，调节 2 个探头之间的距离。示踪剂释放器可在操作工程师的控制下多次释放示踪剂，每次释放示踪剂的体积也是可控的，所携带的示踪剂最多可分 60 次被释放。在 125 mm 内径套管内流量测量范围是 2～200 m^3/d，其中 20 m^3/d 以下测量误差 10%，20 m^3/d 以上测量误差 5%。

与脉冲中子氧活化测井技术类似，示踪相关流量测井技术可以测量油管内、油管外甚至套管外水流的速度，用于在笼统注入井和分层注入井中测量注入剖面（注入介质为水或聚合物），还可检测封隔器漏失和套管外水泥环中的窜流[24-25]。

5 新技术应用情况

大庆油田测试分公司 2002～2006 年在大庆油田完成注入剖面测井数列于表 1。5 年中共实施同位素载体示踪法测井 33 475 井次，其中 5 参数组合测井 15 429 井次。从 2002 年开始使用新型同位素载体示踪剂，从 2003 年以后全面应用新型同位素载体示踪剂，提高了低注入量井的测井质量，测井资料合格率达 95%以上，此后每年同位素载体示踪法测井数保持在 7 000 井次以上。5 参数组合测井与综合解释技术解决了以往单一测井资料的多解性问题，资料更全面、真实地反映注入剖面，能更有效地识别大孔道地层、封隔器漏失、水泥环窜槽，5 年中测井数逐年大幅度增加。针对聚合物笼统注入井，5 年中单用电磁流量计实施注入剖面测井 2 371 井次，每年测井数变化不大。脉冲中子氧活化测井和示踪相关流量测井可以测量油管内和油套环形空间中流体速度，不受大孔道层和深穿透射孔影响，可检测管外窜槽位置、检查封隔器密封效果，5 年中实施脉冲中子氧活化测井 915 井次、示踪相关流量测井 372 井次，这两种测井方法的测井数也有逐年增加的趋势。

目前大庆油田在制定注水井注入剖面测井方案时，首选 5 参数组合测井综合解释技术，对怀疑地层存在大孔道、同位素载体示踪剂沾污严重或封隔器失效的井选用脉冲中子氧活化测井方法（中高流量）和示踪相关流量测井方法（中低流量）。在制定注聚合物井注入剖面测井方案时，对喇叭口在油层以上的笼统注入井主要采用电磁流量计测井，对笼统正注上返井和分层注入井选用脉冲中子氧活化测井技术和示踪相关流量测井技术。

表 1　几种注入剖面测井技术在大庆油田应用数量统计

年度	同位素载体示踪法测井数	5 参数组合测井数	电磁流量计测井数	脉冲中子氧活化测井数	示踪相关流量测井数
2002	4 272	938	478	29	3
2003	6 250	1 965	550	82	57
2004	7 253	3 269	452	214	26
2005	7 897	4 319	372	204	146
2006	7 803	4 938	519	386	140

6　结　论

(1) 研制并规模应用了 1.03～1.06 g/cm^3 密度、在 100～900 μm 范围内有多种粒径可供选择的新型同位素微球示踪剂,基本满足了低注入量井注入剖面测井需要。

(2) 针对单一测井方法的局限性,研制了 5 参数注入剖面组合测井仪,研究了多参数测井资料综合解释方法,提高了分层注水井注入剖面测井资料的准确性和可靠性。

(3) 针对大孔道地层和聚合物分层注入井的测井需要,完善和研究了基于速度示踪测量法的脉冲中子氧活化测井仪和示踪相关流量测井技术,实现了定量解释。

致谢:本文撰写中得到龚杰、李凯锋、唐海涛、刘慧东、俞庆文、金山、夏慧玲的帮助,在此表示感谢。

参考文献:

[1] 姜文达. 放射性同位素示踪注水剖面测井[M]. 石油工业出版社, 1997.

[2] 王金钟. 新型 Ba-GTP 微球示踪剂的应用及资料效果评价[J]. 测井技术, 2004,28(S1):42-47.

[3] 吴世旗,金山,郑华. 核技术在大庆油田生产测井中的应用[J]. 同位素, 2003, 16(1):10-18.

[4] 张永福,唐海涛,朱忠海,等. 注入剖面 5 参数组合测井仪的改进[J]. 石油仪器, 2003(5):44-45.

[5] 张国军,徐海涛. 一种新型注入剖面组合测井仪及其应用[J]. 石油仪器, 2006,20(6):45-47.

[6] 唐海涛,李金凤,高立敏,等. 用于注入剖面测井的几种流量计的对比分析[J]. 石油仪器, 2005(1):47-49.

[7] 吕殿龙,魏云飞,韦旺. 电磁流量计及其在聚驱测井中的应用[J]. 石油仪器, 2001,15(3):34-36.

[8] 吕殿龙,魏云飞,韦旺. 三元复合驱注入剖面测井初探[J]. 测井技术, 2002,26(3):225-228.

[9] 俞庆文,刘月萍,石善勇,等. 生产测井超声流量计研制[J]. 测井技术, 2004,28(6):563-565.

[10] 白秀云,石善勇. 井温在注产剖面解释中的应用实例[J]. 测井技术, 2003, 27(2):147-150.

[11] 付爽,赵万娟. 注入剖面 5 参数组合测井资料在油田开发中的应用[J]. 石油仪器, 2004,18(4):57-59.

[12] 王建民,姜亦忠,严青伍,等. 氧活化测井技术在聚合物注入剖面中的应用[J]. 测井技术, 1999,23(3):214-217.

[13] 龚杰,李凤. MZY-DD1 脉冲中子氧活化测井仪[J]. 石油仪器,2002,16(2):24-26.

[14] 韩玉堂,林梁,李婧. 能谱水流测井技术的研究和推广[J]. 测井技术, 2002,26(4):306-310.

[15] 陆海英,董丽华,兰艳. 脉冲中子氧活化测井技术在油田开发中的应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2004,23(2):64-65.

[16] 钟兴福,李婧,朴玉琴. 中子氧活化测井技术在油田开发中的应用[J]. 测井技术, 2004,28(S1):53-56.

[17] 郑权. 单芯脉冲中子氧活化测井仪[J]. 石油仪器, 2005,19(5):13-15.

[18] 侯勇慧,李莉,高秀梅,等. LabWindows/CVI 在氧活化测井软件开发中的应用[J]. 测井技术, 2005,29(1):72-73.

[19] 刘国良,刘宪伟. 脉冲氧活化测井水流速度计算方法研究[J]. 测井技术, 2006,30(6):548-550.

[20] 孙秀梅,严青伍,王佳平. 脉冲中子氧活化测井仪的改进及应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(3):99-100.

[21] 张耀文,王金钟,夏慧玲,等. 注入剖面放射性相关测量方法研究[J]. 测井技术,2004(S1):57-60.

[22] 晏德森,张耀文,夏慧玲,等. 注入剖面相关测量方法[J]. 油气田地面工程. 2004,23(6):53.

[23] 张永福,刘慧东,唐海涛,等. 配注井注水剖面示踪相关测井仪的改进[J]. 石油仪器, 2005,19(4):85-86.

[24] 陈庆波,陈庆新. 放射性示踪相关测井资料的应用[J]. 油气田地面工程, 2005,24(8):61.

[25] 任华. 油田验窜测试技术应用及封窜方式优选[J]. 大庆石油地质与开发, 2006,25(S1):64-65,72.