

[引著格式] 赵俊堂. 脉冲中子氧活化测井在双管分层注水井中的应用 [J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2015, 37 (5+6): 25~29.

脉冲中子氧活化测井在双管分层注水井中的应用

赵俊堂 (中国石油集团长城钻探工程有限公司测井公司, 辽宁 盘锦 124011)
(东北石油大学石油工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

[摘要] 由于储层非均质性的特点, 往往造成吸水剖面不均衡, 需要采取分层注水的方式进行注水开发, 同心双管分层注水技术可满足不同层系之间差异较大的注水井精确分注, 而脉冲中子氧活化测井技术既可在油管内确定内层油管、油管环空和油套环空的水流速度, 还可同时确定流体向上、向下的流动状态。详细介绍了脉冲中子氧活化测井技术及双管分层注水工艺, 通过对脉冲中子氧活化测井测试方法和解释方法的研究, 实现了其在双管分层注水井中的有效应用。

[关键词] 脉冲中子氧活化测井; 分层注水; 双管

[中图分类号] P631.84 [文献标志码] A [文章编号] 1000-9752 (2015) 05+06-0025-05

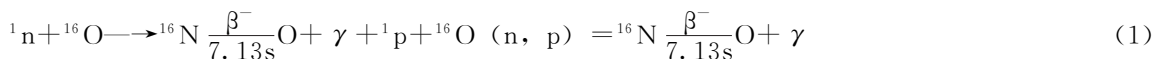
油田开发中后期, 通过注水、注聚等来提高采收率已成为主要的开采方式。由于储层非均质性的特点, 造成吸水剖面不均衡, 需要采取分层注水的方式进行注水开发^[1]。偏心配水器或同心配水器的单管柱结构, 虽然能对多个层位同时进行注水, 但其作业复杂, 配注量靠节流嘴控制, 无法实现精细配置, 配注合格率低。同心双管分层注水管柱把井内分为3个注水通道, 即通过内层油管、油管环空和油套环空为井内上、中、下3段层位进行分层注水。该技术可满足不同层系之间差异较大的注水井精确分注, 各层系注水量可以在井口控制, 测配精确, 已成为油田主要的注水方式之一。

在注入剖面测井方面, 放射性同位素示踪技术的影响因素较多, 如载体相对密度过大, 地层由于长年注水冲刷形成大孔道以及沾污等, 使所测资料存在局限性^[2]。涡轮流量、超声波流量、电磁流量等测井技术虽然广泛应用于注入剖面测井, 但这些测量方式都是接触式测量, 传感器只有接触到被测流体才能确定流体流速信息, 因此无法在双管分层注水井中应用。脉冲中子氧活化测井技术是一种核测井技术, 不需要接触流体即可测量流体的流速, 它既可在油管内确定内层油管、油管环空和油套环空的水流速度, 还可同时确定流体向上、向下的流动状态, 在双管分层注水井中发挥不可替代的作用。为此, 笔者详细介绍了脉冲中子氧活化测井技术及双管分层注水工艺, 通过对氧活化测井测试方法和解释方法的研究, 实现其在双管分层注水井中的应用。

1 脉冲中子氧活化测井技术及双管分层注水工艺

1.1 脉冲中子氧活化测井技术

脉冲中子氧活化测井技术是一种核测井技术。中子发生器发射 14MeV 的快中子, 与水中的氧原子发生反应, 反应中¹⁶O 转化成¹⁶N, 放射性氮同位素¹⁶N 发生 β 衰变, 半衰期是 7.13s。β 衰变之后转换为激发态的氧元素, 氧元素在回到基态过程中发射高能 γ 射线, 其中主要是能量为 6.13MeV 的射线, ¹⁶O 反应的阈能是 10.2MeV, 所以用 14MeV 的中子发生器很合适。由于能量高, 6.13MeV 的伽马射线能穿透几十厘米厚的井眼物质, 如井内流体, 油管、套管、水泥等。氧活化的反应过程如下^[3]。



式中： 1_0n 为中子； ${}^{16}_8O$ 为氧原子； ${}^{16}_7N$ 为氮原子的同位素； β^- 为 β 射线； γ 为伽马射线； 1_1p 为质子。

测井时，仪器上多个 γ 探测器测量流经仪器的水中的 γ 射线，就可以得到水流流过探头的时间，再根据探头与发射器之间的距离，即可以计算出流体的流速。由于井内套管和油管直径已知，便可以根据流体的横截面积和流速得到流体流量：

$$Q = v \times S = \frac{L}{t} \times S \tag{2}$$

式中： Q 为流量， m^3/d ； v 为流体的速度， m/s ； S 为流体流经通道的横截面积， m^2 ； L 为仪器源距， m ； t 为流体从中子管流至探头的时间， s 。

该次研究介绍的脉冲中子氧活化测井仪器是国内最新研制的一种新型仪器，该仪器集温度、压力、伽马、磁定位 4 参数测井仪与单发双收氧活化测井仪为一体。仪器采用了 9 个 γ 探测器，源距覆盖范围大，提高了所测流量的范围。采用超短中子发生器，保证了上、下水流时间谱的采样源距，中子发生器位于仪器中心，伽马探测器分布在上、下两边，测井仪使用一只中子发生器，就能完成上水流和下水流的流量结果。一个测量点同时可得到 4 个探测器的上水流时间谱和 5 个探测器的下水流时间谱，即一次测量可同时得到上、下水流方向 9 个时间谱，测井时从中选择效果最好的作为最终结果，极大地简化了操作步骤，大大减少了测量次数。在一个测量点可同时测量出上、下水流的流量，更加有利于现场操作和解释人员进行流量状态的分析。仪器参数可以任意改变，谱周期有 4 种选择（10、20、40、60s），活化时间有 8 种选择（0.8、1、1.6、2、4、6、8、10s），中子脉冲占空比有 4 种选择（10%、20%、25%、30%），可以满足现场各种复杂情况。该仪器由遥传短节、上采集短节、中子发生器短节、下采集短节、加长采集短节等组成。

1.2 双管分层注水工艺

偏心配水器或同心配水器的单管柱结构，能对多个层位同时进行注水，但其通过钢丝作业进行测试和投捞水嘴调配注水量，需要多次钢丝作业进行测试和投捞水嘴，易出现卡、掉事故，作业强度大，钢丝投捞成功率低，调配周期长；配注量靠节流嘴控制，但是水嘴控制注水量的大小还受到注水压力的稳定程度、水质好坏等因素影响，特别是层间差异大（注水压力相差 15MPa 以上）的注水井，通过水嘴无法实现同时满足各层配注，配注合格率低；因投捞测配不成功造成管柱寿命短，需要频繁进行水换作业；无法应用于深井、大斜度井、水平井。

同心双管分层注水工艺在注水井中下入双油管，把井内分为 3 个注水通道，可通过内层油管、油管环空和油套环空为井内上、中、下 3 段层位进行分层注水。该技术可满足不同层系之间差异较大的注水井精确分注要求，各层系注水量可以在井口控制，测配精确，免去投捞测配作业，减少了作业强度，提高了配注合格率和管柱寿命。

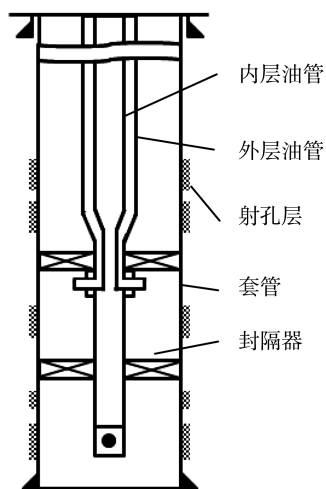


图 1 注水管柱结构示意图

2 测试方法研究

双管分层注水方式井下结构如图 1 所示，套管中有 2 层油管和多个封隔器。该注水方式下要确定的流量有油管总流量、油管环空总流量、油套空间总流量、各层吸入量、封隔器上下流量（用于验封）、油管下端零流量（验证丝堵漏失）等。若要分别进行测量，工作量大，且由于时间推移导致测量不准，因此要进行测试方法优化。利用脉冲中子氧活化测井仪器具有同时测量管内外上、下水流的特点，确定准确合理的测试方法。

把测量井段分为 3 段，最上方封隔器以上层位为上段，最下方封隔器以下层位为下段，其余层位为中段。测量过程自上而下进行，具体如下。

1) 上段测量 确定油套空间下水流。在所有层上方测量油套环空下水流为油套环空总注入量，在

各层之间测量油套环空下水流确定各层吸水量，在封隔器上方测量下水流确定零流量及验证封隔器封隔情况。

2) 中段测量 确定双层油管环空下水流及油套空间下水流。在双层油管上方测量油管环空下水流确定中段总注入量，在中段各层中间测量油套环空下水流确定各层吸水量，在下封隔器上方测量下水流确定零流量及验证封隔器封隔情况。

3) 下段测量 确定内层油管下水流和油套空间上、下水流。首先测量油管内下水流确定下段总注入量，其次在封隔器下测量下水流验证分割器封隔情况，最后在各层之间测量油套空间上、下水流确定各层吸水量，根据油管下深位置判断上、下水流。

3 解释方法研究

3.1 谱峰识别

在双油管分层注水井中，内层油管、油管环空和油套环空中都存在流动水流。在解释中只有判断清楚时间谱中出现的峰对应什么位置的水流，才能根据谱峰时间计算出对应的水流流速，从而确定绝对注入量。

1) 可通过流量、流速与时间关系确定谱峰。如图 2 所示，不同流量在不同管柱结构中的流速是不一样的。也可将中子管到探测器之间的距离（源距）转换成时间，根据流量与时间的关系可以判断谱峰（表 1）。该方法一般用来判断总注入量的谱峰位置，在双管分层注入井中，可判断内层油管、油管环空和油套环空中总水流的谱峰位置，为下一步确定各层流量谱峰提供参考。

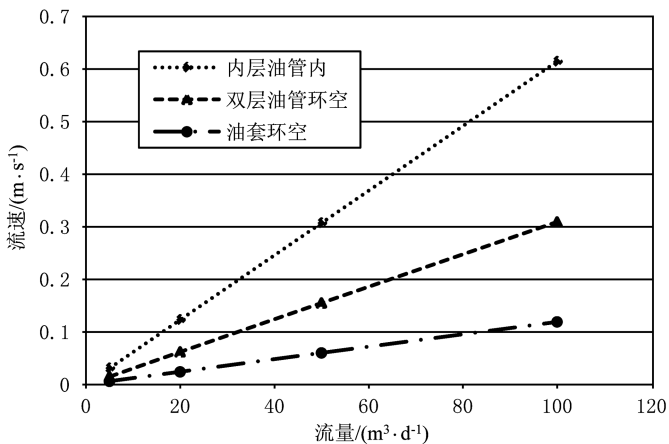


图 2 流量与流速的关系图

表 1 3 个注水通道中流量、流速与时间关系

流量 / (m³·d⁻¹)	内层油管		油管环空		油套环空	
	流速 / (m·s⁻¹)	时间/s	流速 / (m·s⁻¹)	时间/s	流速 / (m·s⁻¹)	时间/s
5	0.031	32.57	0.015	64.71	0.006	167.61
20	0.123	8.14	0.062	16.18	0.024	41.90
50	0.307	3.26	0.155	6.47	0.060	16.76
100	0.614	1.63	0.309	3.24	0.119	8.38

注：仪器外径 38mm；套管外径 177.8mm，套管内径 159.42mm；外层油管外径 114.3mm，外层油管内径 100.5 mm；内层油管外径 73.02mm，内层油管内径 62.0mm；源距 1000mm。

2) 根据形态判断谱峰。氧活化时间谱谱峰形态具有连续性，不同源距探头测量的谱峰形态是不同的，同一探头测量不同位置水流的谱峰形态也是不同的。通过与总流量谱峰对比，可以确定某个探头谱峰来源于哪个位置的流体；也可根据谱峰形态判断水流大小，从而确定水流位置。一般流速快的谱峰窄且左右对称，流速慢的谱峰宽且不对称。

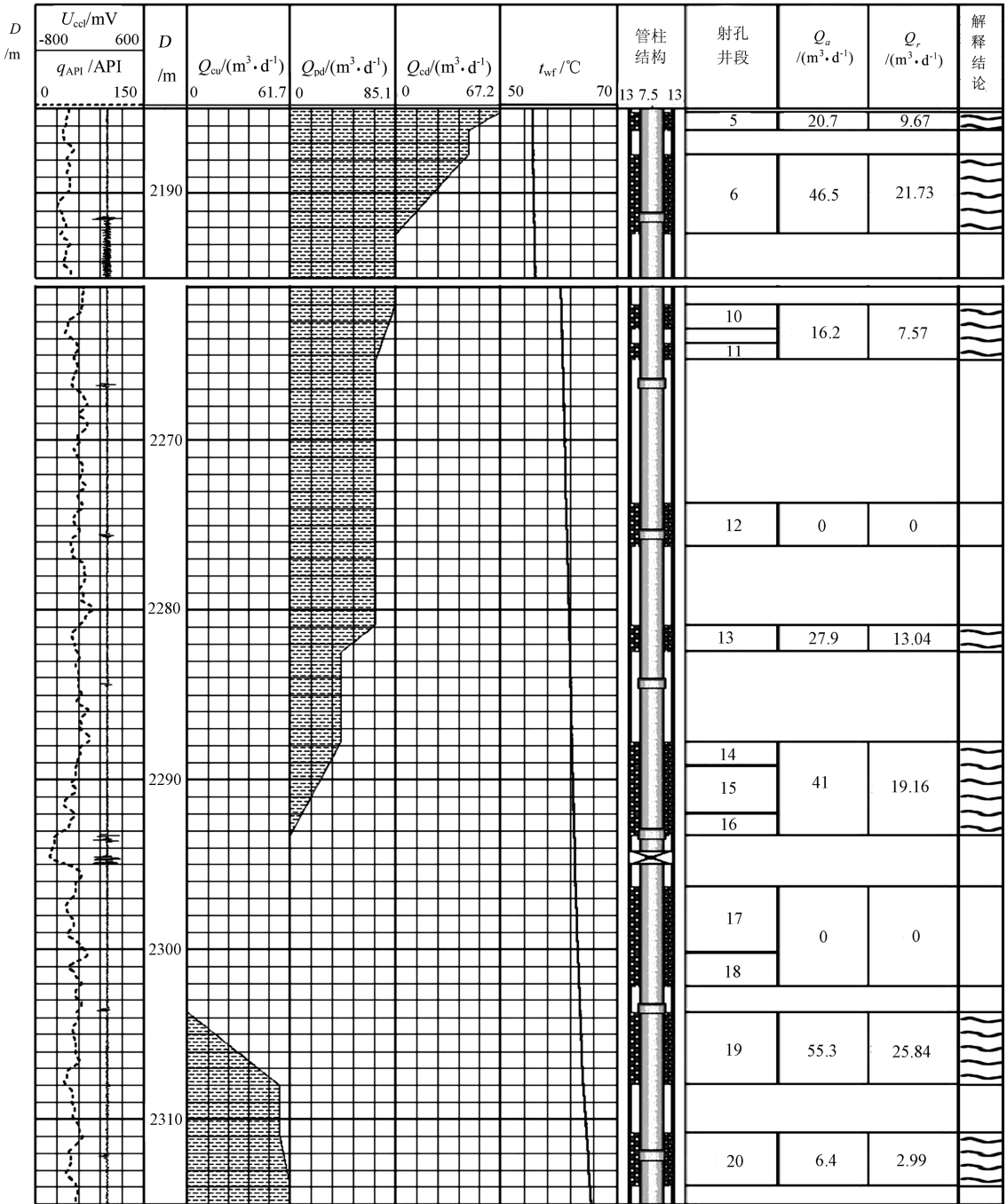
3.2 解释软件实现

双管分层注水方式管柱复杂，使得井下水流形式也比较复杂，为了使解释成果更加直观，一般以多道剖面的形式形成解释成果图。解释成果图流量剖面采用 3 道，分别表示内层油管水流、油管环空水流和油套环空水流。解释过程中，输入管柱数据和各层绝对吸水量，软件可自动生成剖面数据，并通过绘

图软件显示出来。

4 应用实例

A井套管外径177.8mm,外层油管外径114.3mm,内层油管外径73.02mm,采用同心双管增压地面配水注水方式。内层油管注水压力25MPa,油管环空注水压力12.7MPa,油套环空注水压力14.5MPa。全井段16个层注水层,上段共5层,2185.2~2211.3m;中段共7层,2262.0~2293.3m;下段共4层,2296.3~2314.0m(图3)。



注: U_{cdl} 为磁定位; q_{API} 为自然伽马; D 为井深; Q_a 为油套空间上水流流量; Q_d 为油管空间下水流流量; Q_{cd} 为油套空间下水流流量; t_{wf} 为井筒流体温度; Q_a 为绝对注入量; Q_r 为相对注入量。

图3 A井测井解释成果图

通过脉冲中子氧活化测井，确定了 3 个注水通道的总注入量及各层吸水量：内层油管总注入量为 $81.7\text{m}^3/\text{d}$ ，油管环空总注入量为 $85.1\text{m}^3/\text{d}$ ，油套环空总注入量为 $67.2\text{m}^3/\text{d}$ ，各层吸水量见表 2。

表 2 A 井脉冲中子氧活化测井解释成果表

层号	射孔井段 /m	吸水部位 /m	吸水厚度 /m	相对吸水量 /%	绝对吸水量 / $(\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1})$	吸水强度 / $(\text{m}^3 \cdot (\text{d} \cdot \text{m})^{-1})$	水流 方向
5	2185.2~2186.3	2185.2~2186.3	1.1	9.67	20.70	18.82	油套向下
6	2187.7~2192.4	2187.7~2192.4	4.7	21.73	46.50	9.89	油套向下
7	2202.8~2203.4	—	—	—	不吸	—	—
8	2204.2~2205.3	—	—	—	不吸	—	—
9	2210.5~2211.3	—	—	—	不吸	—	—
10	2262.0~2263.5	2262.0~2265.3	3.3	7.57	16.20	4.91	油油向下
11	2264.3~2265.3	—	—	—	—	—	—
12	2273.7~2276.3	—	—	—	不吸	—	—
13	2280.9~2282.5	2280.9~2282.5	1.6	13.04	27.90	17.44	油油向下
14	2287.8~2289.2	2287.8~2293.3	5.5	19.16	41.00	7.45	油油向下
15	2289.2~2292.0	—	—	—	—	—	—
16	2292.0~2293.3	—	—	—	—	—	—
17	2296.3~2300.2	—	—	—	不吸	—	—
18	2300.2~2302.2	—	—	—	—	—	—
19	2303.7~2308.0	2303.7~2308.0	4.3	25.84	55.30	12.86	油套向上
20	2310.8~2314.0	2310.8~2314.0	3.2	2.99	6.40	2.00	油套向上

注：表中“—”表示没有吸水层。油套向下是指该层吸水来自外层油管和套管之间的环空下水流；油油向下是指该层吸水来自内层油管和外层油管之间的环空下水流；油套向上是指该层吸水来自外层油管和套管之间的环空上水流。

5 结论与建议

1) 脉冲中子氧活化测井是一种核测井技术，可通过非接触方式对流体进行测量。它具有同时确定管内和管外上、下水流的优势，因此，在测试方法设计合理的情况下，能在复杂的注水管柱环境下得到很好的应用。

2) 该方法可以推广应用到平行（并列）双管注水管柱井中。

[参考文献]

- [1] 王少君, 吴永剑, 佟国章, 等. 脉冲中子氧活化测井技术在新疆油田的应用 [J]. 石油仪器, 2008, 22 (4): 66~71.
 [2] 李超. 脉冲中子氧活化测井图谱的峰位识别方法与应用 [J]. 长江大学学报 (自科版), 2014, 11 (14): 28~30.
 [3] 郭海敏. 生产测井导论 [M]. 第 2 版. 北京: 石油工业出版社, 2010.

[编辑] 龚丹