

脉冲中子氧活化测井在注二氧化碳井中的应用

张晶宇^{1,*}, 林艳波², 刘平¹, 师哲³, 阎娜², 白玉胜¹, 王威¹

(1. 中国石油集团测井有限公司长庆分公司, 西安 710201; 2. 中国石油长庆油田分公司第五采油厂, 西安 710200; 3. 西安长立油气工程技术有限公司, 西安 710061)

摘要: 注二氧化碳提高采收率是开展碳捕集、利用和封存(CCUS)中的重要环节和三次采油的重要手段。在注入井中开展注气剖面测井, 可以反映注气井层间、层内吸气差异, 揭示注产矛盾, 为堵气调剖提供依据; 井筒完整性的好坏是 CCUS 中存储阶段中的重要一环, 直接决定埋存效果, 井筒窜漏又会直接影响注气驱油效果; 吸气指数测试可以对地层吸气能力进行评价, 给出地层现阶段合理的注入压力。由于二氧化碳气体在井筒内通常以超临界流体状态存在, 传统测井技术具有一定的局限性, 本文围绕脉冲中子氧活化测井原理和施工工艺开展适应性研究, 结合长庆油田黄 3 区 CCUS 区块中注气井应用实例, 阐明脉冲中子氧活化测井在二氧化碳注入井中可以开展吸气剖面刻画、吸气指数测试以及井筒完整性评价, 具备良好的应用效果。

关键词: 脉冲中子氧活化; 二氧化碳; CCUS; 井筒完整性; 吸气剖面; 吸气指数

DOI: 10.48014/cpng.20230520001

引用格式: 张晶宇, 林艳波, 刘平, 等. 脉冲中子氧活化测井在注二氧化碳井中的应用[J]. 中国石油天然气研究, 2023, 2(3): 25-32.

0 引言

注二氧化碳驱油是三次采油的重要手段^[1-3], 也是目前国内外广泛开展的碳捕集、利用和封存(CCUS)项目中的重要研究内容, 是“碳达峰、碳中和”目标下的重要途径^[4]。随着诸多油气田开展二氧化碳驱先导试验, 包括二氧化碳吞吐控水增油以及二氧化碳封存安全性在内的研究, 因此, 对于井下注入状况、吸气能力、井筒完整性等监测的需求日益迫切, 但二氧化碳的超临界流体等特性对于测试方法具有较大限制。传统注水测试方法因同位素密度不匹配, 超声、电磁流量原理不适用等情况, 无法对注二氧化碳介质开展有效的流量监测。长庆油田黄 3 区 CCUS 国家示范工程自 2016 年注气驱油以来, 目前已建成“9 注 38 采”的示范工程, 累

计注气 20 余万吨, 试验区呈逐年扩大趋势^[5-6]。本文围绕脉冲中子氧活化测井方法开展适应性研究, 并结合黄 3 区应用实例, 结论表明该测井方法在二氧化碳注入井中可以开展注入剖面刻画、吸气指数测试以及井筒完整性评价, 验证了其良好的适用性。

1 二氧化碳的特性

随着井筒压力和温度的变化, 二氧化碳的密度、黏度也随之变化, 与压力成正比, 与温度成反比。压缩系数也随之变化。地质封存和促进油气开采条件下二氧化碳的密度大体在 $200 \sim 800 \text{ kg/m}^3$ 之间, 小于地下水的密度, 所以把二氧化碳注入地下含水层以后, 二氧化碳在浮力的作用下会向上迁移而聚集于构造高点。当温度高于 31.06°C , 压力高于 7.38 MPa 时, 二氧化碳便进入到了超临界状

* 通讯作者 Corresponding author: 张晶宇, zhangjysccj@cnpc.com.cn

收稿日期: 2023-05-20; 录用日期: 2023-09-01; 发表日期: 2023-09-28

基金项目: 中国石油集团测井有限公司科研项目“长庆油田 CCUS 测试技术研究及应用”(编号: FD60122K109)

态,见图 1^[14]。二氧化碳地质储存环境中,二氧化碳通常是以超临界状态储存于地质体中,因为绝大多数储层的温度和压力均达到了临界点以上^[7]。超临界二氧化碳是一种高密度流体,兼具了气相和液体的双重特性,密度是气体的几百倍,近于液体,这也让二氧化碳具备了很强的分解重排能力,具有常规液态溶剂的强度。

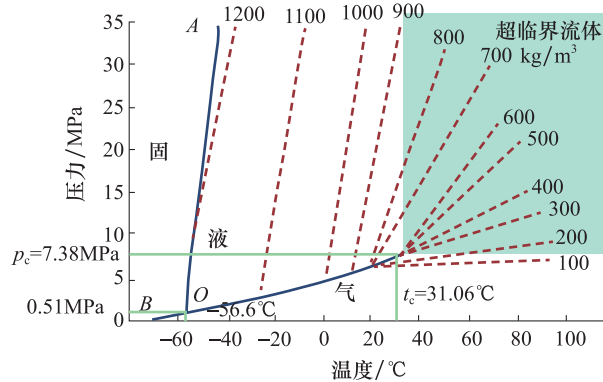


图 1 纯二氧化碳相态、密度参数特征示意图

Fig.1 Schematic diagram of the characteristics of phase and density parameters of pure carbon dioxide

二氧化碳气体与地层水混合溶解后生成具有腐蚀性碳酸溶液,注入地下后,这种酸性溶液会对埋存空间内井筒的水泥环造成腐蚀,发生一系列的化学反应,造成水泥环强度下降、渗透率增大。固井水泥一旦被腐蚀渗透,溶解了二氧化碳的大量酸性液体将流至金属套管附近,降低金属套管附近 pH 值,形成高渗通道加速套管腐蚀速率^[8,9]。因此,在二氧化碳注入井中,井筒完整性易受到破坏,极易发生漏、窜。

2 脉冲中子氧活化测井技术

2.1 适用性分析

二氧化碳存在气密封笼统注气和分层注气两种方式,对于分层注气管柱结构和喇叭口位置高于注入层位置两种情况,开展流量解析必须采用非接触的测量方法^[10-13]。同时,二氧化碳在注入层位通常以超临界流体的形式注入,这对测试方法也产生一定的局限。实施注入剖面测井时,管柱结构限制了涡轮流量计等接触式测量方法;二氧化碳流体不导电限制电磁流量计使用;示踪载体颗粒或胶状同

位素由于密度差异较大极易产生沉降,无法均匀混配导致吸入层形态失真,二氧化碳注入井中流量测井方法的适用性分析见表 1。脉冲中子氧活化测井方法不受储层物性(孔隙度、渗透率)、注入介质性质、管柱结构等因素的影响,在二氧化碳注入井中通过脉冲中子与氧元素的相互作用解析流量,可测量油套管内、油套环空之间、套管外水泥环间及地层中的介质流动方向和速度,且不存在同位素测井的沾污、沉降等问题,在二氧化碳注入井中具备良好的适用性。

表 1 二氧化碳注入井流量测井方法适用性分析对比表

Table 1 Comparative analysis of the applicability of flow logging methods for carbon dioxide injection wells

测量方法	原理适应性	可行性
涡轮流量计	接触测量,可测管内流,但无法实现管外流测量	✓
同位素载体示踪	因二氧化碳密度变化,难以实现固体示踪剂的密度匹配	×
电磁流量测井	二氧化碳流体不导电,电磁流量测量原理不适应	×
示踪相关流量	因二氧化碳密度变化,难以实现液体示踪的密度匹配	×
脉冲中子氧活化	二氧化碳含有氧原子,可探测管内、外流	✓

2.2 测井原理

氧活化测井仪器目前存在多种类型,常用的类型通常由伽马—磁定位短节、压力—温度短节、中子发生器及探测接收器短节组成(图 2)。其中,通常在中子发生器两端分布上 4 下 3 个 γ 探测器,可同时获取上下水流及多层管柱水流信息,适应较为复杂的井下管柱情况,且目前中子管性能的不断发展,中子脉冲占空比已经可调,使中子产额成数倍提高,测井效率和分辨能力不断优化。

脉冲中子氧活化仪器下入地层目的层段后,地面控制中子发生器向井筒内发射 14MeV 的快中子,与发生器周围的氧原子发生一系列反应,并释放出伽马射线,伽马射线能穿透地层岩石及油套管,最终到达探测器被仪器接收,其相关原理示意图见图 2。

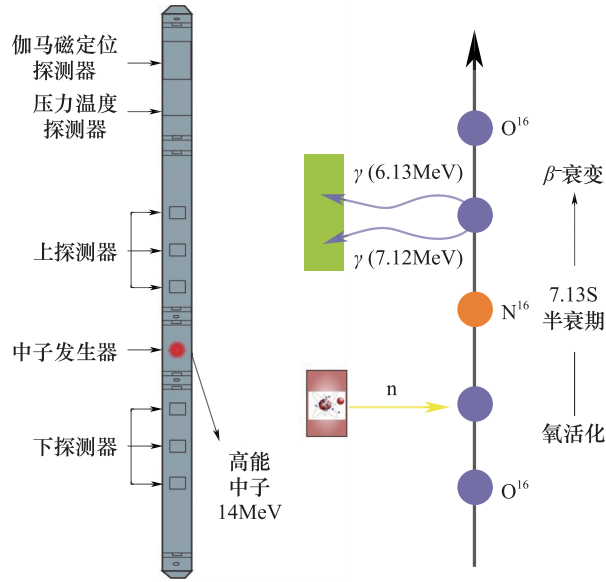


图2 脉冲中子氧活化仪器结构和测井原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pulsed neutron oxygen activation instrument structure and logging principle

2.3 解释方法

在测量过程中,中子不断活化周围的介质中的氧原子,流动中的被活化的介质在一段时间后先后流经各探测器并被接收,同时在各探测器的时间谱上会出现到达峰,分析到达峰在时间谱上的位置可以计算得到到达时间 T 。被活化介质在该时间内流经的距离就是中子发生器到该接收探头的零长 L ,那么根据公式 $V=L/T$ 可以得到介质流动的速度,同时油、套管的直井 D 已经,就可以计算出油管、油套环空、套管等流动介质流经的截面积 S ,则二氧化碳注入流量 $Q=VS$ 。

二氧化碳气体分子由氧原子和碳原子构成,因此脉冲中子氧活化测井对于二氧化碳流体和水流体一样具备良好的技术原理适应性。每克二氧化碳中所包含的氧原子个数 n_o 表示为:

$$n_o = \rho_{\text{CO}_2} \frac{N}{M} C_i \quad (1)$$

式中, n_o 为每 g/m^3 二氧化碳中所包含的氧原子个数; ρ_{CO_2} 为二氧化碳的密度, g/m^3 ; N 为阿伏伽德罗常数, 6.02486×10^{23} ; M 为二氧化碳的摩尔质量; C_i 为每个分子中第 i 种元素的个数。

2.4 施工工艺

脉冲中子氧活化测井仪器通常是在油管内下入,测试时通过注入管柱和工具类型、深度初步判断介质流动路径和方向,利用连续曲线的伽马和磁定位及各探头零长来确定点测位置。根据水流方向及流速从大到小的原则依次点测,直至到零流量为止。测量示意图如图3所示。如果有明显流量增加,须重复测量来证实,发射器和接收器要尽量避开油管接箍。

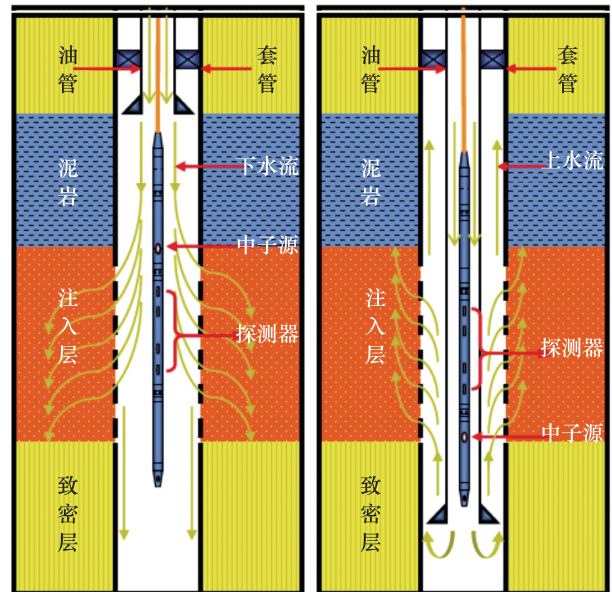


图3 氧活化测井施工工艺示意图

Fig. 3 Schematic diagram of oxygen activation logging construction technology

在二氧化碳注入井中进行测井施工时,特别需要注意以下两点:

(1)低温伤害:二氧化碳以液态形式注入井下,井口温度小于 -15°C ,对设备以及人员均有形成伤害的潜在风险,另外低温会降低金属强度,如阀门因低温开裂、测井仪器密封圈因低温失去橡胶塑性等;

(2)二氧化碳相态变化引起的风险:防喷管泄压时,管内二氧化碳迅速气化吸热,泄压管线温度骤降,二氧化碳在泄压管线附近形成干冰、石蜡等杂质冷凝生成硬块,干冰和杂质堵塞泄压管线,导致剩余固态二氧化碳(干冰)无法泄出防喷管,此时防喷管压力表已显示为0,但实际防喷管内仍有压力。

3 应用实例

3.1 注入剖面测井应用实例

Y1 井为长庆油田黄 3 区一口 CO₂ 注气井,采用笼统注入的方式,注入层位为长 8,日注入量为 30m³/d,共有两个射孔段,射孔段深度为 2668~2680m 和 2689~2697m,为了解二氧化碳驱与水驱

纵向波及高度变化及了解各层吸气量,首先采用了七参数(PLT)注入剖面测井方法,即使用伽马、磁定位、温度、压力、持水率、密度、涡轮流量计组合下井,解释成果图见图 5,其解释成果显示下部射孔段比上部射孔段注入强度大,相对注气量占比 70.32%。由于注入量解析主要依靠涡轮流量转速交计算,在层内无法做到进一步细分。后采用了脉冲中子氧活化测井,其解释成果见图 4,与七参数

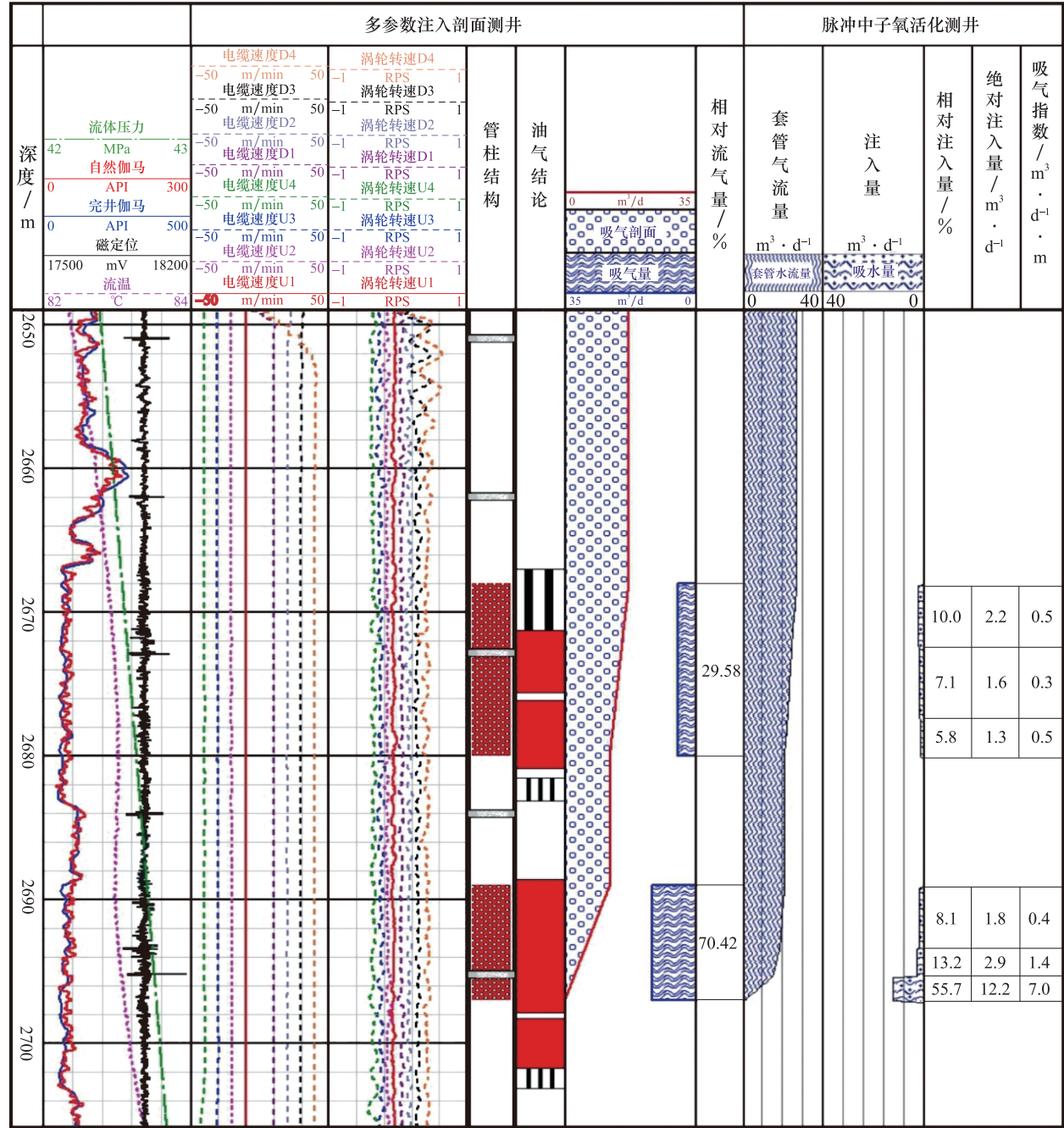


图 4 Y1 井七参数注气剖面 and 脉冲中子氧活化测井解释成果图
Fig. 4 Y1 well seven-parameter gas injection profile and pulsed-neutron oxygen activation logging interpretation results

注入剖面测井方法对比的解释成果表见表 2。可以发现,两种测试方法结果基本一致,均为第二个射孔段主吸,第一个射孔段次吸,但脉冲中子氧活化在层内细分能力较强,具备较好的适用性。此外,经过在黄 3 区的长期实践发现,脉冲中子氧活化测井在进行注入剖面测试时,对于末端流量要求较高,通常要求在油管中末端流量 $>10\text{m}^3/\text{d}$ 、环套空间末端流量 $>5\text{m}^3/\text{d}$ 时具备细分层能力。

3.2 找漏测井应用实例

Y2 井为一口二氧化碳注入井,自 2018 年开始投注,2019 年 4 月停注一段时间后复注,复注后油压上涨至 19.5MPa,当前注入压力 6.9MPa,怀疑井下漏失。经综合分析采用氧活化、多参数、噪声测井方式,检测该井可疑漏点,为下一步措施提供资料支持。

表 2 Y1 井七参数与氧活化解释成果对比表
Table 2 Comparison of seven-parameter and oxygen activation logging results of Y1 well

七参数(PLT)解释计算结果			氧活化解释计算结果				
射孔段/m	相对注气量/%	绝对注气量/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	起始深度/m	结束深度/m	厚度/m	相对注气量/%	绝对注气量/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$
2668~2680	29.58	5.03	2668	2672.1	4.1	1.36	0.24
			2672.1	2676.1	4	2.78	0.49
			2676.1	2680	3.9	20.89	3.68
2689~2697	70.42	11.98	2689	2693.1	4.1	7.95	1.4
			2693.1	2697	3.9	67.03	11.81

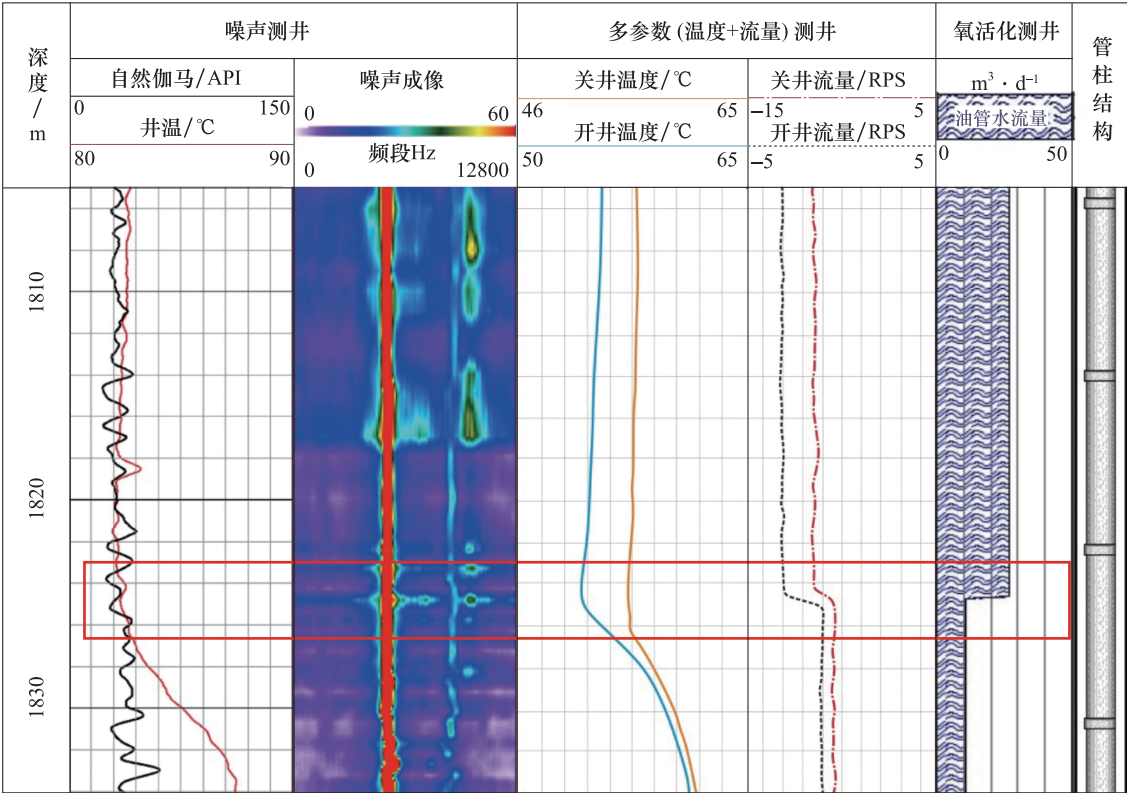


图 5 Y2 井氧活化、多参数与噪声测井解释成果图
Fig. 5 Well Y2 oxygen activation, multi-parameter and noise logging results

通过噪声资料分析,噪声频谱图在 1823.18~1824.80m 处存在异常,怀疑存在漏失。通过氧活化资料分析,在 1823.00m 处井温出现异常,流量显示该处存在漏失。综上所述分析,该井在 1823.00m 附近处存在漏点。

3.3 吸气指数测试应用实例

Y3 井为黄 3 区一口二氧化碳注入井,射孔段位于 2663.0~2667.0m,为获取井底压力与流量数据、确定注气压力和流量变化关系、计算注气井吸气指数和启动压力以及分析评价注气井吸气状况,采用了脉冲中子氧活化测试方法开展了吸气指数测试。测试时将仪器下放到预定深度 2665.00m,通过控制配气间的阀门,调节注气压力和注入气量。利用氧活化仪实际测试获取压力及流量数据,并对数据进行分析处理以评价该井吸气能力,成果见图 6,其中吸气能力强弱与斜率成反比。

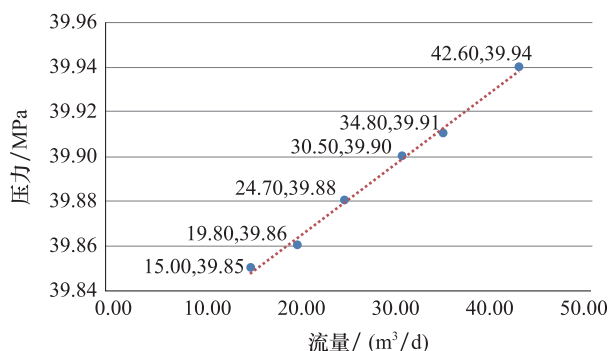


图 6 Y3 井注气压力与注入量拟合趋势图

Fig. 6 Trend of gas injection pressure and injection volume of well Y3

通过线性回归法,确定该井吸气指数方程为: $y=0.0033x+39.798$,式中, y 为测试压力(MPa); x 为距井口 2665.00m 所测注入量(m³/d)。计算结果表明:该井理论启动压力(2665m 处)39.798MPa,吸气指数 $303.03\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{MPa})$ 。

4 结论与建议

(1)脉冲中子氧活化测井方法在二氧化碳注入井中可以用于吸气剖面刻画、吸气指数测试以及找漏测井,具有良好的原理适用性;其测试成果反映的井下信息更加丰富精细,为二氧化碳驱的研究提供了丰富的动态监测数据。

(2)脉冲中子氧活化测井方法在笼统注入管柱、分层注入管柱具有良好的工艺适用性,可对二氧化碳流体进行直接或无接触测量。

(3)脉冲中子氧活化测井方法在二氧化碳注入井中对末端流量下限有一定要求,细分层需要结合其他方法进一步研究;另外,二氧化碳注入井在进行测井施工时,对设备和人员有潜在的高压及低温风险,需要进行风险识别与制定全面的风险防控措施。

利益冲突:作者声明无利益冲突。

参考文献(References)

- [1] 胡永乐,郝明强,陈国利,等. 中国 CO₂ 驱油与埋存技术及实践[J]. 石油勘探与开发,2019,46(04):716-727.
<https://doi.org/10.11698/PED.2019.04.10>
- [2] 胡永乐,郝明强,陈国利,等. 注二氧化碳提高石油采收率技术[M]. 北京:石油工业出版社,2018.
- [3] 廖广志,何东博,王高峰,等. 终极埋存情景下二氧化碳驱油极限采收率探讨[J]. 石油勘探与开发,2022(06):1-7.
<https://doi.org/10.11698/PED.20220487>
- [4] 王高峰,祝孝华,潘若生,等. CCUS-EOR 实用技术[M]. 北京:石油工业出版社,2022.
- [5] 李坤全,黎平,魏敏章,等. 长庆油田黄 3 区长 8 特低渗油藏二氧化碳驱油与埋存先导试验[J]. 工程地质学报,2021,29(05):1488-1496.
<https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2020-053>
- [6] 李曼平,李玉杰,杨金峰,等. 黄 3 区 CO₂ 驱技术研究在现场试验[J]. 石油化工应用,2020,39(05):71-75.
- [7] 郑希潭,李实,陈钢. CO₂ 驱油混相条件和驱替特征研究[R]. 北京:中国石油勘探开发研究院,2009.
- [8] 孙冲,孙建波,王勇. 碳捕集利用与封存过程中的超临界 CO₂ 流体腐蚀问题与挑战[C]. 第十一届全国腐蚀与防护大会论文摘要集.
- [9] 张昆,孙悦,王池嘉,等. 碳捕集、利用与封存中 CO₂ 腐蚀与防护研究[J]. 表面技术,2022,51(09):43-52.
<https://doi.org/10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.09.004>
- [10] 徐海涛,肖勇,刘兴斌. 氧活化测井技术在二氧化碳吸气剖面中的新应用[J]. 石油仪器,2011,25(05):42-45+48+103.
- [11] 齐占奎. 二氧化碳注入井脉冲中子氧活化解释方法研究[J]. 内蒙古石油化工,2014,40(24):27-29.
- [12] 汤金奎,高伟,祝志敏,等. CO₂ 驱吸气剖面测井技术优

- 选[J]. 测井技术, 2016, 40(03): 352-355.
<https://doi.org/10.16489/j.issn.1004-1338.2016.03.019>
- [13] 齐占奎. 二氧化碳驱注入剖面氧活化测试技术和现场试验[J]. 石油管材与仪器, 2016, 2(06): 63-66.
<https://doi.org/10.19459/j.cnki.61-1500/te.2016.06.018>
- [14] 高云丛, 李相方, 等. 普光气田高含硫气井溢流压井期间井筒超临界相态特征[J]. 天然气工业, 2010, 30(03): 63-66+132-133.
<https://doi.org/10.3787/j.issn.1000-0976.2010.03.016>

Application of Pulse Neutron Oxygen Activation Logging in Carbon Dioxide Injection Wells

ZHANG Jingyu^{1,*}, LIN Yanbo², LIU Ping¹, SHI Zhe³,
YAN Na², BAI Yusheng¹, WANG Wei¹

(1. Changqing Branch, China National Logging Corporation, Xi'an 710201, China;

2. No. 5 Oil Production Plant of Changqing Oilfield Company, Xi'an 710200, China;

3. Xi'an Changli petroleum gas engineering technology service co., ltd, Xi'an 710061, China)

Abstract: Carbon dioxide injection to improve oil recovery is an important link in carbon capture, utilization, and storage (CCUS) and an important means of tertiary oil recovery. Conducting gas injection profile logging in injection wells can reflect the inter- and intra-layer suction differences in gas injection wells, reveal the contradictions between injection and production, and provide a basis for gas plugging and profile control; The integrity of the wellbore is an important part of the storage stage of CCUS, which directly determines the burial and storage effect, and wellbore leakage directly affects the gas injection and oil displacement effect; The inspiratory index test can evaluate the formation's gas absorption capacity and provide a reasonable injection pressure of the formation at this stage. Since carbon dioxide gas usually exists in a supercritical fluid state in the wellbore, traditional logging techniques have certain limitations. This paper focuses on the adaptability research of pulse neutron oxygen activation logging principle and construction technology, and combined with the application example of gas injection wells in CCUS block of Huang3 District in Changqing Oilfield, it is clarified that the pulse neutron oxygen activation logging can be used to carry out suction profiling, suction index testing and wellbore integrity evaluation in carbon dioxide injection wells, and it has good application effects.

Keywords: Pulse neutron oxygen activation; carbon dioxide; CCUS; wellbore integrity; suction profiling; inspiratory index

DOI: 10.48014/cpngr.20230520001

Citation: ZHANG Jingyu, LIN Yanbo, LIU Ping, et al. Application of pulse neutron oxygen activation logging in carbon dioxide injection wells [J]. Chinese Petroleum and Natural Gas Research, 2023, 2(3): 25-32.

Copyright © 2023 by author(s) and Science Footprint Press Co., Limited. This article is open accessed under the CC-BY License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

