

# 脉冲中子全谱饱和度测试技术

庞磊

中国石油大庆油田分公司测试技术服务分公司 黑龙江大庆 163000

通讯作者: Email: 626983829@qq.com

引用: 庞磊. 脉冲中子全谱饱和度测试技术[J]. 油气井测试, 2022, 31(4): 37-41.

Cite: PANG Lei. Pulsed neutron full spectrum saturation logging technology[J]. Well Testing, 2022, 31(4): 37-41.

**摘要** 老油田进入开发中后期, 依靠常规测井资料和生产动态资料进行剩余油监测难以满足生产实际的需要。脉冲中子全谱饱和度测试技术集碳氧比能谱、氯能谱、中子寿命、氧活化测试技术于一体, 一次下井能录取多条曲线, 多种测试资料相互印证, 能够满足套后测试要求。将脉冲中子全谱饱和度测试资料与常规测井资料、生产动态资料有机结合, 针对 A 区块制作了解释图版、制定了解释标准, 提高了解释符合率, 有效反映了储层剩余油饱和度的变化情况, 为挖潜增储提供了可靠依据。

**关键词** 动态监测; 剩余油监测; 脉冲中子; 饱和度测试; 解释图版; 解释标准; 解释符合率

**中图分类号:** TE32      **文献标识码:** B      **DOI:** 10.19680/j.cnki.1004-4388.2022.04.007

## Pulsed neutron full spectrum saturation logging technology

PANG Lei

Logging and Testing Service Company, Daqing Oilfield Co. Ltd., Daqing, Heilongjiang 163000, China

**Abstract:** For old oilfields at the middle and late development stages, it is not effective to detect remaining oil based on conventional logging data and production performance data. The pulsed neutron full spectrum saturation logging (PSSL) technology integrates carbon-oxygen ratio energy spectrum, chlorine energy spectrum, neutron lifetime, and oxygen activation testing technology. It can acquire multiple logs in one trip and adopts various testing data for cross-validation, allowing it to be qualified for post-casing testing. Combining the PSSL data with conventional logging data and production performance data, the interpretation chart and interpretation standard were made for Block A, which help improve the interpretation coincidence rate and effectively reflect the changes in remaining oil saturation of the reservoir. The PSSL technology provides a reliable basis for tapping potential and increasing reserves.

**Keywords:** dynamic monitoring; remaining oil detection; pulsed neutron; saturation logging; interpretation chart; interpretation standard; interpretation coincidence rate

油田进入开发中后期, 由于很多油田采用注水开发, 不少储层已经水淹, 不论新井或老井都涉及到剩余油确定的问题, 其实质是储层目前的油水性质识别。通常是根据完井测井资料和生产动态资料确定剩余油<sup>[1-2]</sup>, 但这种方法存在以下问题: 一是水淹层的解释难度增大。通过自然电位曲线基线偏移等特征判断水淹的效果在污水回注情况下变差; 二是早期老井常规测井系列单一, 对某些储层流体性质响应特征不明显, 岩性、物性、水性等因素淹没了含油性的影响, 解释评价结论存在偏高、偏低或遗漏潜力层的现象; 三是很多老井的完井测井资料是多年前录取的, 即使当时的解释结论是正确的, 多次措施调整导致目前的地下油水状况已经发生很大变化, 仅依靠以往的完井测井资料判断当前

的油水性质显然不合适; 四是动态监测资料多数是合层测试, 由于层间干扰, 不能完全反映单个油层的动用情况, 而且有的井无生产动态资料。

套后剩余油饱和度监测技术是研究剩余油的重要监测方法<sup>[3]</sup>, 过套管电阻率测井方法<sup>[4]</sup>的仪器分辨率低, 对测试环境要求严格, 费用也高, 导致其应用受限。因套后不能进行常规电阻率测井, 而放射性方法能穿透套管、水泥环等介质, 故多数套后饱和度测井采用放射性方法。中子寿命<sup>[5]</sup>方法是较早采用的套后饱和度测井方法, 但通常在地层水矿化度很高的情况下效果好; 为了改善中子寿命法在地层水矿化度较低储层中的应用效果, 推出了硼中子寿命法<sup>[6-8]</sup>, 但硼中子寿命法不能反映未射孔层的剩余油饱和度。碳氧比方法也是较早采用的

剩余油监测方法,前人对碳氧比测试的理论、解释方法进行了研究<sup>[9-12]</sup>,碳氧比方法在不同区块储层的应用过程中,因地制宜地对测试工艺、解释方法采取了相应的改进措施<sup>[13-15]</sup>,但普通碳氧比方法在孔隙度较低的储层中应用效果较差,解释符合率有待提高。脉冲中子全谱饱和度测试技术集成了碳氧比能谱、中子寿命、碳氢比能谱、氯能谱、钆能谱、示踪能谱多种方法于一体,多种方法的测试资料相互印证,使测量精度和解释符合率明显提高。

1 脉冲中子全谱饱和度测试仪

脉冲中子全谱饱和度测试仪的组成示意图见图 1,在遥测短节中组合了井温、磁定位、伽玛等参数测量部件,磁定位是选配件,同时配备便携式网络化测井地面系统。



图 1 测试仪器组成示意图

Fig. 1 Composition diagram of test instrument

脉冲中子全谱饱和度测试仪通过中子发生器向地层发射能量为 14 Mev 的中子流,这些中子将与地层中各种元素的原子核发生非弹性散射、弹性散射、原子核的活化、辐射俘获核反应,这些反应多数会放出伽马射线,通过将中子与地层物质原子核反应产生的多种伽马射线和剩余中子谱记录下来,能够全面地获取地层信息,实现碳氧比、氯能谱、氧活化、中子寿命测井等功能,从而评价地层岩性、物性、水性和含油性(见表 1)。

表 1 脉冲中子全谱饱和度测试的模式	
Table 1 mode of pulse neutron full spectrum saturation test	
测量模式	适用条件及作用
碳氧比-中子寿命组合模式	碳氧比-中子寿命组合测试
中子寿命-俘获谱组合模式	中子寿命-俘获谱组合测试
纯俘获模式	测-注-测,求取地层水矿化度
纯中子寿命模式	适合于中高地层水矿化度储层
纯碳氧比模式	适合于地层水矿化度低或矿化度变化大、未知储层
水流模式	主要用于找准出水或漏失位置
自然伽马能谱、示踪能谱模式	划分岩性、计算泥质含量、地层对比

脉冲中子全谱饱和度测试的主要技术指标见表 2。

表 2 主要技术指标						
Table 2 Main technical indicators						
项目	耐压/ MPa	耐温/ ℃	外径/ mm	测速/ ( m/h)	探测深 度/mm	中子管 寿命
指标	80	150	90	50	300	≥200 h

脉冲中子全谱饱和度测试仪一次下井就能获

得碳氧比、碳氢比、俘获截面等多种地层参数,且这些参数的测试精度接近单独的碳氧比模式或者中子寿命模式的测试精度,从而使多参数交互解释成为可能,多种数据融合产生一个可综合反映含油饱和度变化的曲线,提高剩余油饱和度测量精度,为油田二次、三次开发提供科学依据。

脉冲中子全谱饱和度测试不但集成了碳氧比能谱、碳氢比能谱、氯能谱、钆能谱、示踪能谱、中子寿命等多种测试方法,而且性能也有很大提高或改善。

2 资料解释

脉冲中子全谱饱和度测试资料的解释包括静态解释、动态解释、动态验证和综合分析。在解释模型的基础上,给出了相应的解释图版和解释标准。

2.1 解释模型

脉冲中子全谱饱和度测试资料的解释有通用的解释模型,但那是理论模型,针对 A 区块的实际情况,建立了 A 区块的解释模型。对于资料解释的泥质含量、孔隙度和含油饱和度等关键参数,采用常规裸眼测井资料和脉冲中子全谱饱和度测试资料(自然伽马、俘获计数率比、碳氧比曲线)相结合的方法进行定量解释。

①泥质含量计算:利用自然伽马曲线、俘获截面曲线,相对值法计算泥质含量。

②孔隙度计算:利用计数率比值,拟合含氢指数曲线,刻度后进行孔隙度定量计算。

③含油性计算:假定孔隙度和岩性不变时,含油饱和度的计算公式为

$$S_o = \frac{(C/O) - (C/O)_{\min}}{(C/O)_{\max} - (C/O)_{\min}} \quad (1)$$

式中:  $S_o$  是含油饱和度,小数;  $(C/O)$  是测试得到的碳氧比值,小数;  $(C/O)_{\max}$  是油层的碳氧比值,小数;  $(C/O)_{\min}$  是水层的碳氧比值,小数。

但实际上储层孔隙度及岩性都可能是变化的,应考虑利用测量得到的  $(Si/Ca)$  曲线进行校正。利用碳氧比曲线,结合孔隙度和泥质含量,定量计算含油饱和度。为了直观反映地层的含油性,计算了油线和水线,通常实测的  $(C/O)$  值越靠近油线,含油性越好。

含油饱和度计算公式为

$$S_o^n = \frac{(C/O) - L \times (Si/Ca) - p_w}{m \times \phi^n} \quad (2)$$

令公式(2)的  $S_o = 0$ , 得到碳氧比水线

$$(C/O)_w = L \times (Si/Ca) + p_w \quad (3)$$

令公式(3)的  $S_o = 1$ , 得到碳氧比油线

$(C/O)_o = m \times \phi^n + p_w + L \times (Si/Ca)$  (4)

式中:  $(C/O)_w$  为碳氧比水线, 小数;  $(C/O)_o$  为碳氧比油线, 小数;  $\phi$  为孔隙度, 小数;  $(C/O)$  是测试得到的碳氧比值, 小数;  $(Si/Ca)$  为测量得到的硅钙比值, 小数;  $m, n$  是校正系数, 无量纲;  $L, p_w$  是校正系数, 无量纲, 其确定方法是在脉冲中子全谱饱和度测试的井段内选纯水层(如果没有纯水层, 未动用

或动用程度较低的储层亦可) 的资料点进行  $(C/O)$  和  $(Si/Ca)$  交会,  $L$  是水线的斜率,  $p_w$  是当  $(Si/Ca)$  的理论值为零时, 水线在  $(C/O)$  轴上的截距。

2.2 解释图版及解释标准

根据大量的试油投产资料和脉冲中子全谱饱和度测试资料制作了多种解释参数的交会图(见图 2)。

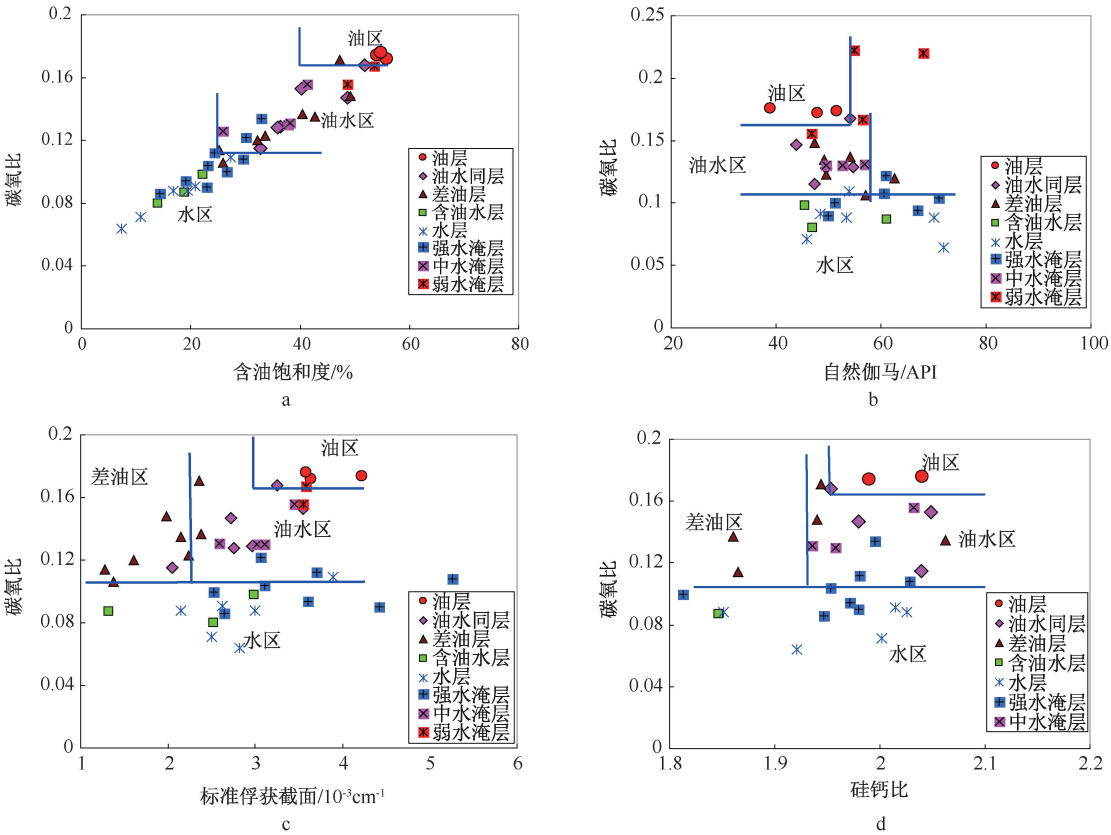


图 2 多种解释参数的交会图

Fig. 2 Crossplot of multiple interpretation parameters

图 2a 是碳氧比-含油饱和度交会图, 该图实际上表示在其他条件近似的情况下, 含油越多, 碳氧比值越高; 图 2b 是碳氧比-自然伽马交会图, 从该图可以看出油层的特征是自然伽马较低(岩性较纯)、碳氧比值较高; 图 2c 是碳氧比-标准俘获截面交会图, 标准俘获截面是俘获截面与孔隙度之积, 可以把碳氧比和中子寿命两种方式结合判断含油

性; 图 2d 是碳氧比-硅钙比交会图, 从该图可以看出油层的特征是碳氧比较高、硅钙比较高, 碳氧比高是显而易见的, 硅钙比值高则说明岩性纯, 钙质少, 说明碳氧比较高是由于含油性的影响, 而不是钙质导致的。

根据试油、投产资料和脉冲全谱测试资料、完井测井资料建立了 A 区块的解释评价标准(见表 3)。

表 3 A 区块解释评价标准

Table 3 Interpretation and evaluation criteria of Block A

储层	硅钙比	碳氧比	标准俘获截面 $\Sigma \times \phi$	含油饱和度/%	自然伽马/API
弱水淹层油层	$\geq 1.97$	$\geq 0.18$	$\geq 3.4$	$\geq 50$	$< 53$
中水淹层油水同层	$\geq 1.89$	0.13~0.18	$\geq 2.4$	29~50	$< 58$
强水淹层水层	$\geq 1.93$	0.08~0.13	$\geq 2.4$	$< 29$	$< 70$
差油层	$< 1.9$	0.11~0.16	$< 2.4$	29~50	$< 60$



3 应用实例

L 井是 A 区块的一口生产井,该井在脉冲中子全谱饱和度测试之前,射孔生产层号为 19、20、22、24、31、33、35、36 号层,井口日产液 23.6 t,日产油 0.84 t,含水 96.4%。L 井脉冲中子全谱饱和度测试资料解释成果显示(见图 3),20 号层上部物性最好,为主要出液位置,抑制层内低渗透部位和其余

产层产出。地质研究表明注水井 A1 井的 18 号层对应 A 井 20 号层,注入剖面测试资料显示 18 号层相对吸水量为 56.39%,有单层突进现象,脉冲中子全谱饱和度测试资料和注入剖面资料相互印证。因此,在 2014 年 1 月卡 19、20 号层,补孔 15 号层,井口日产液 13.87 t,日产油 0.47 t,含水 96.6%,油量变化不大,但日产水量减少 10 t,表明 20 号层确实是高含水且产水量很高。

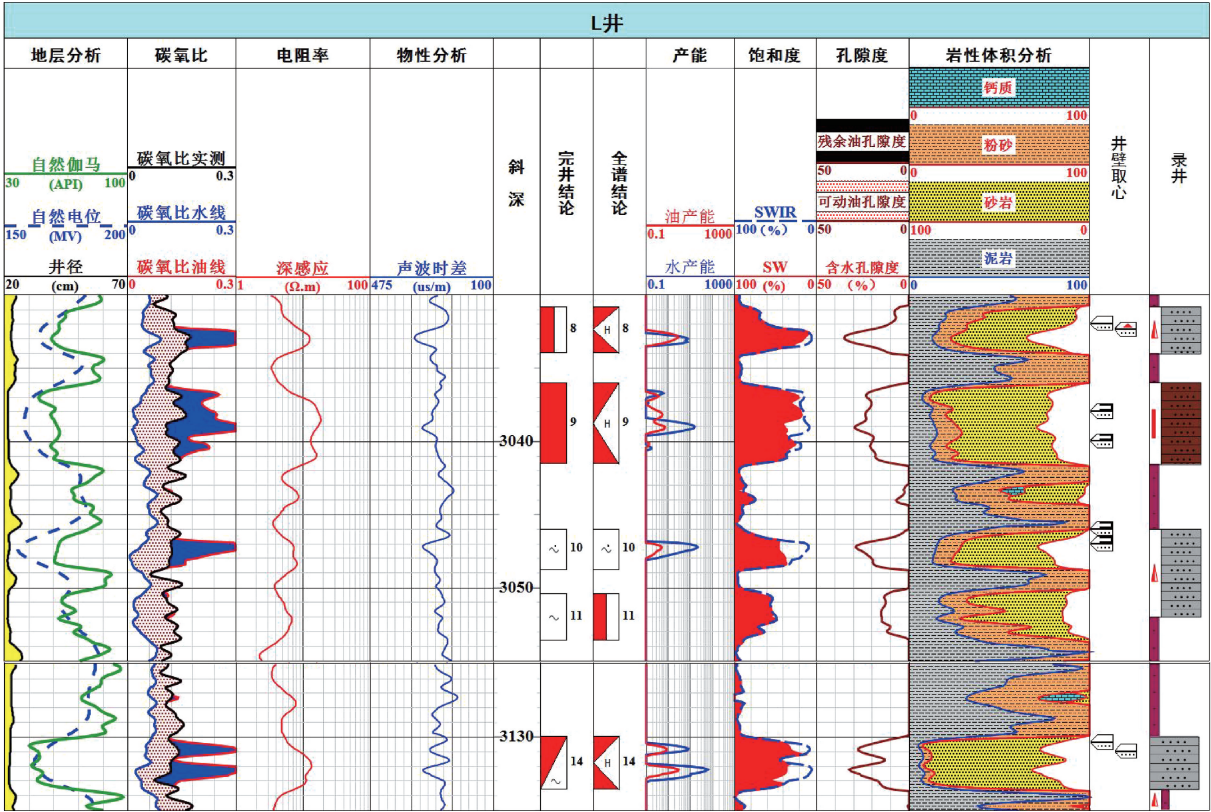


图 3 L 井脉冲中子全谱饱和度测试解释成果图

Fig. 3 Interpretation results of pulse neutron full spectrum saturation test in well L

完井解释 8 号层为差油层、9 号层为油层、14 号层为油水同层;但根据脉冲中子全谱饱和度测试资料,8、9、14 号层碳氧比值都较低,明显低于碳氧比水线,且水的产能明显高于油的产能,综合其他资料,认为 8、9、14 号层已经强水淹。根据全谱资料结合其他研究,补孔 8、9、14 号层后,井口日产液 25.2 t,日产油 1.23 t,含水 95.1%,与此措施前的产液量、产油量、含水率相比,说明 8、9、14 号层确实已经强水淹。

4 工艺要求

因为脉冲中子全谱测试的探测深度仅有 300 mm,所以在施工前的准备、施工进行中特别要注意尽量不要把井筒周围可能存在的可动油驱走。

(1)压井通井。在确保人员、仪器和井的安全前提下,不建议压井、通井等作业,以免把射孔层的可动油推走而导致把油层测成水层。对于高压井建议采用适当的防喷措施,如防喷管作业。

(2)洗井和刮蜡。测量井段在未射孔层和稠油井中,为确保仪器正常下放到目的层段,也为了确保仪器的测量效果,建议对待测井进行洗井及刮蜡作业,洗井时注意压力不要太高,以免把可动油推走;对于为了确定已射孔的稀油井水淹等级的测井任务,建议最好不要洗井,可进行刮蜡作业,保证仪器能下放到目的层。

5 结论

(1)脉冲中子全谱饱和度测试仪综合多种能谱



和时间谱测量模式,适用范围宽,一次下井取得多条测井曲线,实现全谱全过程测量,取得多种信息,多种测试方法相互印证,能在油井下入套管后对剩余油饱和度做出较为准确的评价;

(2)针对A区块储层特点,制作制定了脉冲中子全谱饱和度测试资料解释图版、解释标准,将脉冲中子全谱饱和度测试资料与常规测井资料、生产动态资料相结合,在判别水淹层、识别未动用油气层和剩余油评价等方面取得了较好的效果。

致谢:感谢西安奥华电子仪器有限责任公司提供有关资料。

#### 参考文献

- [1] 王立新,张兰江,白云台,等.利用生产测井资料确定剩余油饱和度[J].断块油气田,2002,9(4):86-88.  
WANG Lixin, ZHANG Lanjiang, BAI Yuntai, et al. Producing logging data to calculating remaining oil saturation [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2002, 9(4): 86-88.
- [2] 谢进庄,吴锡令.用生产测井资料求储层剩余油饱和度的新方法[J].大庆石油地质与开发,2002,21(2):71-73.  
XIE Jinzhuang, WU Xiling. A new method to determine residual oil saturation in reservoir from production well-logging data [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2002, 21(2): 71-73.
- [3] 杨莹.中低渗油藏剩余油饱和度监测技术系列优化与应用[J].地球物理学进展,2012,27(1):312-319.  
YANG Xuan. Monitoring series optimization and application for remaining oil saturation monitoring in low-median permeability reservoirs [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(1): 312-319.
- [4] 刘胜建,张明锋.过套管电阻率测井应用探讨[J].油气井测试,2003,12(4):23-25.  
LIU Shengjian, ZHANG Mingfeng. The discuss of application of resistance rate for over-thimble [J]. Well Testing, 2003, 12(4): 23-25.
- [5] 邹泽举,王勇,姚美兰,等.中子寿命测井在塔河油田的应用[J].石油仪器,2013,27(4):54-57.  
ZOU Zeju, WANG Yong, YAO Meilan, et al. Application of the neutron lifetime logging to Toha oilfield [J]. Petroleum Instruments, 2013, 27(4): 54-57.
- [6] 谭圣军,陈营.硼中子寿命测井确定剩余油分布[J].油气地质与采收率,2001,8(2):76-78.  
TAN Shengjun, CHEN Ying. Determining distribution of remaining oil using boron neutron lifetime log [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2001, 8(2): 76-78.
- [7] 张传超,陶婧,刘中兴,等.硼-中子寿命测井技术在中原油田的应用研究[J].油气井测试,2001,10(3):61-63.  
ZHANG Chuanchao, TAO Jing, LIU Zhongxing, et al. Application research of B-neutron-lifetime logging technology in Zhongyuan oilfield [J]. Well Testing, 2001, 10(3): 61-63.
- [8] 郑亚斌,刘相海,李建新,等.硼中子测井在岔河集油田的应用[J].油气井测试,2003,12(3):40-43.  
ZHENG Yabin, LIU Xianghai, LI Jianxin, et al. The application of Boron neutron logging in Chaheji Oilfield [J]. Well Testing, 2003, 12(3): 40-43.
- [9] 韩清忠,徐金武,李厚裕,等.碳氧比测井解释的理论模型及应用[J].测井技术,1997,21(4):272-275.  
HAN Qingzhong, XU Jinwu, LI Houyu, et al. Theoretical model of C/O log interpretation and its application [J]. Well Logging Technology, 1997, 21(4): 272-275.
- [10] 郑华,刘宪伟,董建华.双源距碳氧比测井技术研究[J].测井技术,2005,29(2):159-163.  
ZHENG Hua, LIU Xianwei, DONG Jianhua. On dual detector Carbon/Oxygen logging [J]. Well Logging Technology, 2005, 29(2): 159-163.
- [11] 吉朋松,庄人遴,林谦,等.双BGO晶体能谱测井[J].核电子学与探测技术,1997,17(2):116-119.  
JI Pengsong, ZHUANG Renlin, LIN Qian, et al. Dual BGO detector spectrum logging [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 1997, 17(2): 116-119.
- [12] 姜占西,王祝文.碳氧比能谱测井的特点及实际应用[J].物探与化探,2005,29(1):47-49.  
JIANG Zhanxi, WANG Zhuwen. Characteristics and application of C/O spectral logging technique [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2005, 29(1): 47-49.
- [13] 崔杰,赵小青,付晨东.碳氧比能谱测井在南六区西块的应用[J].测井技术,2004,28(5):430-432.  
CUI Jie, ZHAO Xiaoqing, FU Chendong. The application of carbon-oxygen spectrometry log in the western Nanliu region [J]. Well Logging Technology, 2004, 28(5): 430-432.
- [14] 胡中桂.碳氧比能谱测井在八面河油田的应用.江汉石油职工大学学报[J].2009,22(2):51-53.  
HU Zhonggui. Application of carbon-oxygen spectral logging in bamianhe oilfield [J]. Journal of Jianghan Petroleum University of Staff and Workers, 2009, 22(2): 51-53.
- [15] 李光军.高精度碳氧比测井在泌阳凹陷的应用[J].测井技术,2015,39(2):217-220.  
LI Guangjun. Application of high precision Carbon-Oxygen spectral logging in Biyang sag [J]. Well Logging Technology, 2015, 39(2): 217-220.

编辑 吴志力

第一作者简介:庞磊,女,1988年9月生,助理工程师,学士,2015年毕业于东北石油大学勘查技术与工程专业,现主要从事测试技术工作。电话:13089045454,邮箱:490472739@qq.com。通信地址:黑龙江省大庆市大庆油田测试技术服务分公司,邮政编码:163000。