doi: 10.11720/wtyht.2026.2411
周悦, 王猛, 刘海波, 等. 补偿中子测井含氢指数测量地层影响因素分析[J]. 物探与化探, 2026, 50(1): 99-104. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.2411
Zhou Y, Wang M, Liu H B, et al. Analysis of formation influence factors on hydrogen index measurement in compensated neutron logging[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(1): 99-104. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.2411

补偿中子测井含氢指数测量地层影响因素分析

周悦, 王猛, 刘海波, 吴晓龙, 张传举
(中海油田服务股份有限公司油田技术事业部, 河北 廊坊 065201)

摘 要: 补偿中子测井通过测量含氢指数来表征地层孔隙度, 由于岩石含氢量不完全分布于孔隙流体中且流体类型多样, 在一定程度上限制了其反映地层孔隙度的准确性。为了明确含氢指数测量结果与地层孔隙度间存在差异的主要原因、深化地层认识, 本文通过蒙特卡罗数值模拟, 针对含氢指数测量涉及的多重因素开展分析工作。首先根据补偿中子测井仪含水灰岩的刻度响应, 获取含氢指数与近远热中子计数比间的关系, 然后开展分析工作并得到造成含氢指数与地层孔隙度存在差别的多种因素。研究结果表明: 岩性、矿物组成、黏土、流体相态、地层水矿化度等因素均会对含氢指数测量产生影响, 使其不同程度偏离地层孔隙度, 尤其高密度、重泥质、含气量及高矿化度是影响含氢指数测量的主要因素。本研究为今后利用中子数据确定地层孔隙度及识别油气提供了一定参考。

关键词: 补偿中子测井; 热中子减速; 含氢指数; 地层孔隙度
中图分类号: P631; P31 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2026)01-0099-06

0 引言

补偿中子测井是石油勘探中通过采集地层信息进而确定有效储层的常规测井方式, 对于计算岩石孔隙度、评价储层含油气性及识别岩性等方面发挥着重要作用[1-3]。在含氢指数测量方面, 王新光等[4]通过分析欠平衡钻井条件下不同密度钻井液的补偿中子测井响应, 认为井眼流体密度越小, 含氢指数越大; 于华伟等[5]研究了斜井和水平井中补偿中子测井的响应特征, 认为其纵向分辨率随着井斜角的增加而增加, 且含氢指数结果对于薄层的响应更加真实; 田立立等[6]研究了在不同气压下 He-3 探测器的中子探测效率, 认为 He-3 探测器的气压增大有利于提高其探测效率及含氢指数测量精度; Badruzzaman 等[7]研究了中子源的替换使用在中子测量响应上表现出的差别。前人研究内容更加集中于井眼环境、测井作业方式以及仪器结构设计硬件配置对含氢指数测量所产生的影响, 针对地层自身不同程度复杂性下含氢指数测量结果的分析相对较少。地层的岩性、岩石矿物组成及流体类型因受到沉积、构造等作用复杂多变[8-9], 岩石含氢量不完全分布于孔隙流体中, 导致含氢指数与地层孔隙度存在一定程度上的差异。

梳理含氢指数与地层孔隙度两者间的关系, 有利于在测井解释过程中结合中子响应曲线进行流体类型识别、储层物性判断等, 因此需要围绕补偿中子测井含氢指数测量开展综合分析。本文通过蒙特卡罗方法构建补偿中子测井仪仿真模型, 综合不同条件下的地层情况, 分析含氢指数与地层孔隙度间存在的差异变化以及主要影响因素, 为后续提高补偿中子测井含氢指数测量的地层特征认识及储层评价提供一定理论依据。

1 补偿中子测井原理

补偿中子测井通常在贴井壁的滑板上安装 Am-Be 中子源和远/近不同位置的两个热中子探测器, 源释放出快中子经过地层的减速慢化散射回井眼并被探测器接收, 通过近/远两个探测器测得计数率的比值确定地层含氢指数[10-11], 对应的热中子计数比为:

收稿日期: 2024-10-10; **修回日期**: 2025-06-29
基金项目: 中国海洋石油集团科技项目(CNOOC-KJ GJHXJSGGYF 2022-01)
第一作者: 周悦 (1994-), 男, 工程师, 硕士, 从事测井解释评价、核测井方法及数值模拟工作。Email: zylgzero@163.com

$$R=\frac{N_t(r_1)}{N_t(r_2)}=\frac{r_2\left(\mathrm{e}^{-r_1/L_e}-\mathrm{e}^{-r_1/L_t}\right)}{r_1\left(\mathrm{e}^{-r_2/L_e}-\mathrm{e}^{-r_2/L_t}\right)},\qquad(1)$$

式中：R对应热中子计数比；r_1和r_2分别为近、远源距；N_t对应探测器接收计数；L_e与L_t分别为快中子的减速长度和扩散长度。

通常认为地层的快中子减速长度L_e远大于扩散长度L_t，当源距r足够大时，式(1)中含有扩散长度L_t的第二个指数项可以忽略，故式(1)可简写为：

$$R=\frac{r_2}{r_1}\mathrm{e}^{-(r_1-r_2)/L_e}。\qquad(2)$$

当源距确定以后，此比值仅取决于减速长度L_e，而地层对快中子的减速作用主要决定于其含氢量[11-13]，因此可将该比值转化为含氢指数。一般情况下，将补偿中子测井测量的地层含氢指数H记为φ_N，也称为中子孔隙度，其单位是石灰岩孔隙度单位，则能够得到：

$$H=\varphi_N=f(R)=a_0R^2+a_1R+a_2。\qquad(3)$$

2　计算模型构建

基于某一款双源距补偿中子测井仪，结合含氢指数的测量问题，构建裸眼井环境下仪器、井眼、地层的三维计算模型，如图 1 所示。地层设置为筒状且对应不同类型多孔流体地层，高度 1 500 mm，井眼直径 215.9 mm、内充淡水钻井液，仪器采取贴井壁偏心放置；中子源类型对应 Am-Be 放射源，释放的快中子平均能量对应 4.5 MeV；双探测器结构设计，长、短源距(LSP、SSP)探头分别重点采集地层与井况信息，探测器对应参数见表 1；进行数值模拟时，为趋近仪器真实测量响应及保证计算结果精度，设置中子数目 2×10^9。

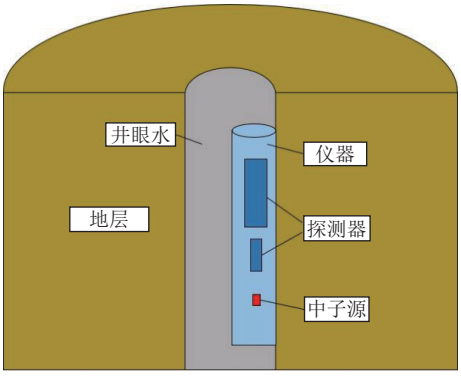


图 1　补偿中子测井计算模型示意

Fig. 1　Schematic of compensated neutron logging calculation model

表 1　补偿中子测井探测器参数

Table 1　Detector parameters of compensated neutron logging

中子探测器	源距/mm	氦气气压/(1.013×10^5Pa)	类型
SSP	300	10	He-3
LSP	625	4	He-3

3　含氢指数

根据上述构建的补偿中子测井三维计算模型，对含氢指数测量问题开展分析。含氢指数，也称作中子孔隙度，本文以饱含淡水的多孔石灰岩为标准，模拟不同孔隙含水灰岩环境，通过获取双源距处粒子计数得到热中子计数比R，结合式(3)绘制地层孔隙度与热中子计数比R的关系以确定含氢指数关系表达式。

由图 2 可得，地层孔隙度越大处，近远比也越大，说明高孔含水地层热中子密度下降的更快；同时，确定含氢指数可表示为：

$$H=\varphi_N=-0.0008R^2+1.0183R-8.7788。\qquad(4)$$

基于当前对地层评价的认识，针对岩性、矿物、黏土、流体、地层水矿化度及油气饱和度这 6 个方面分别对比含氢指数与地层孔隙度两者间的关系，其中含氢指数值由式(4)计算得到，不同情况具体分析如下。

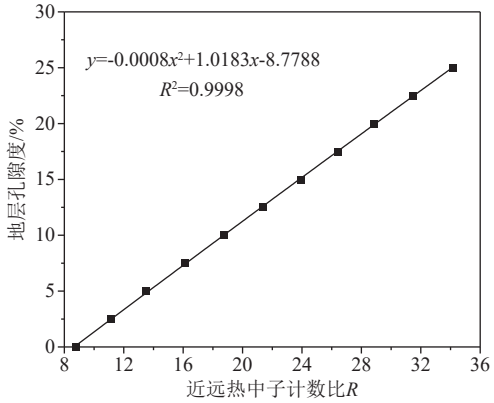


图 2　地层孔隙度关于近/远热中子计数比的变化

Fig. 2　Changes of formation porosity with near/far detector ratio

3.1　岩性

岩性对于有效储层的明确极为关键，本文在探究地层含氢指数测量问题时，首先从岩性因素开展分析，通过模拟，获取了不同孔隙含水地层条件下，如 0.2%、2.5%、5%、7.5%、10%、12.5%、15%、17.5% 以及 20% 的热中子探测结果，得到灰岩、白云岩与砂岩中含氢指数与地层孔隙度的关系，如图 3 所示。

经观察可知，补偿中子测井仪在饱含淡水的石灰岩中进行刻度，故在多孔灰岩含水环境下测量得

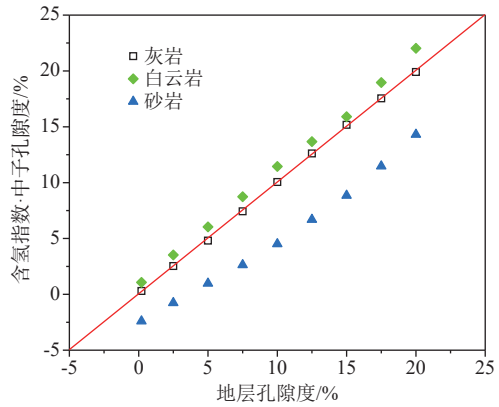


图 3　不同岩性含氢指数对比地层孔隙度

Fig. 3　Hydrogen index vs formation porosity of lithology

到的含氢指数等于地层孔隙度; 白云岩、砂岩响应呈现出不等于地层孔隙度的含氢指数, 存在附加孔隙度的情况, 且在相同地层条件下, 白云岩的含氢指数大于地层孔隙度, 砂岩的含氢指数小于地层孔隙度。分析认为: 白云岩可由 $CaMg(CO_3)_2$ 表征, 砂岩可由 SiO_2 表征, 两者元素组成中均不含氢, 故白云岩与砂岩关于含氢指数上的响应差异, 此时由岩石元素组成主导, 因此含氢指数测量受到岩性影响, 进一步观察可得, 三者的中子减速能力由强到弱依次表现为: 白云岩、灰岩、砂岩。

3.2　矿物

不同地质环境、构造作用下的岩石矿物组成多样, 本文以石膏、硬石膏、岩盐以及赤铁矿 4 种常见矿物为例, 模拟得到其多孔地层下含氢指数与地层孔隙度之间的关系。由图 4 可见, 硬石膏、岩盐的含氢指数与地层孔隙度吻合良好, 即此时氢对中子的减速发挥主导作用, 矿物本身并未对含氢指数测量产生明显影响; 石膏的含氢指数整体处于较高的状态, 呈现出“低孔高氢”现象, 石膏为 $CaSO_4{\cdot}2(H_2O)$, 认为其组成中水的存在造成含氢指数测量为高值;

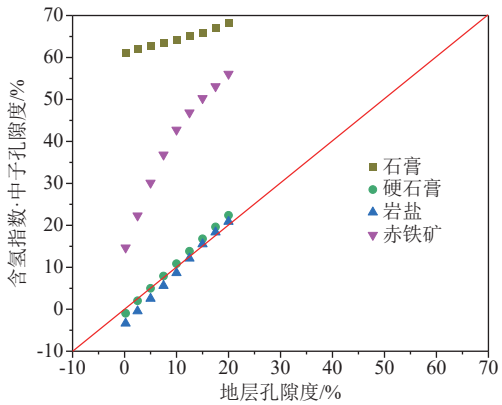


图 4　常见矿物含氢指数对比地层孔隙度

Fig. 4　Hydrogen index vs formation porosity of common minerals

赤铁矿的含氢指数也高于地层孔隙度, 且随着地层孔隙度的增大而不断增大, 但增大变化率逐渐降低, 分析认为: 赤铁矿的密度高达 5.1 g/cm^3, 在低孔情况下, 密度相比于孔隙中氢含量占主导作用, 对中子运移产生了明显的减速作用, 伴随地层孔隙不断增大, 氢对中子的减速作用趋于明显, 一定程度上削弱了密度的影响, 故产生上述现象。

3.3　黏土

在勘探过程中, 钻遇到的优质储层通常也含有少量泥质, 其中泥质主要成分为黏土矿物。为了解在黏土矿物存在时的含氢指数测量响应与地层孔隙度之间的关系, 本文选取高岭石作为参考, 通过模拟不同高岭石含量下孔隙含水灰岩地层的热中子探测, 得到其含氢指数与地层孔隙度之间的关系, 相关模拟结果如图 5 所示。

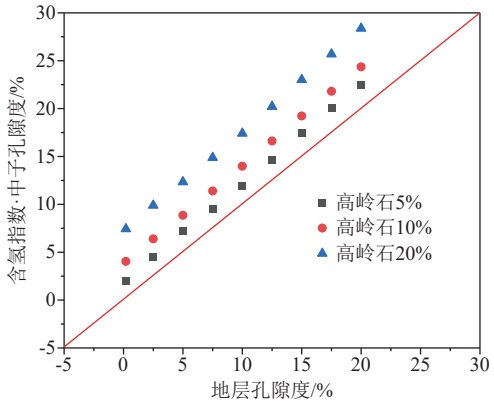


图 5　不同黏土含氢指数对比地层孔隙度

Fig. 5　Hydrogen index vs formation porosity of clay

由图 5 可知, 当灰岩中含有高岭石等黏土矿物时, 在多种孔隙条件下获取的含氢指数均高于地层真实孔隙度; 另外, 在相同孔隙条件下, 随着高岭石含量由 5% 递增至 20%, 其含氢指数与地层真实孔隙度的偏差也相应增大, 分析认为: 高岭石等黏土矿物中含有结晶水等含氢物质; 同时在黏土吸附作用下产生束缚水, 而黏土含量的增多通常会导致束缚水含量的增多。由于黏土矿物水分的影响, 对中子产生额外的减速作用, 故获取的地层含氢指数大于地层孔隙度。就模拟结果整体而言, 储层中泥质的存在会造成含氢指数偏大, 储层岩性越纯, 泥质含量越低, 含氢指数表征地层孔隙度大小的准确度越高。

3.4　流体

地层孔隙中的流体一般可分为油、气、水 3 种类型, 为考察孔隙中充填油气时的含氢指数测量结果是否区别于孔隙含水, 针对该问题进行了分析。

由于地层中除了分布天然气等烃气以外，同时存在二氧化碳等非烃气体，模拟对象选定为油、烃气（甲烷）与非烃气（二氧化碳），最终得到如图 6 所示灰岩含有不同流体下含氢指数与地层孔隙度之间的关系。

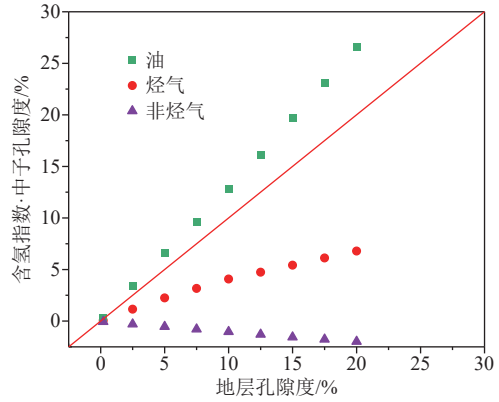


图 6　不同流体含氢指数对比地层孔隙度

Fig. 6　Hydrogen index vs formation porosity of fluid

由图 6 可见，当孔隙含油时，低孔情况下的含氢指数与地层孔隙度较为接近，随着地层孔隙度的增大，两者产生偏离，含氢指数逐渐大于地层孔隙度，即油和水组成上的差异随着地层孔隙度的增加逐渐凸显，油对中子的减速效果不同于水；当孔隙含烃气时，含氢指数小于地层孔隙度，伴随地层孔隙度不断增大，负的含氢指数附加值也相应增大，因此认为烃气中的氢浓度太低，无法有效减速中子；而对于二氧化碳等非烃气，即岩石孔隙中并不存在氢，基本由岩石骨架对中子进行减速，故能够见到在相同地层孔隙度情况下，它的含氢指数值更低于烃气，可认为含氢指数测量受到流体影响。

3.5　地层水矿化度

相同层系中，地层水矿化度的高低通常与深度存在联系，地层越深时，地层水矿化度越高[14-15]。因此，对于同一口井的不同深度水层，其含氢指数测量响应也可能存在差异。为了验证前述假设、判断地层水矿化度对含氢指数测量产生的影响，本文模拟了多种孔隙地层在不同矿化度下的含氢指数测量响应。

根据图 7 显示的含氢指数与地层孔隙度之间的关系，对于相同孔隙的地层，随着地层水矿化度由 0 kppm 增加至 250 kppm 时，其含氢指数呈现出逐渐增大的趋势，分析认为：地层水矿化度越高时，其中的氯离子浓度越大，而氯元素对热中子表现为较大的俘获截面，吸收作用明显，远源距对应的热中子计数率相比于近源距受到更大的影响，且近远比值升高导致含氢指数测量结果变大。另外，当地层水矿化度一定时，地层孔隙度越大，含氢指数受到影响越明显，分析认为该现象与流体中氯离子占比升高有关。基于地层水矿化度的影响分析，可得当同一口井不同深度的水层具有不同矿化度时，其含氢指数测量响应将出现差异。

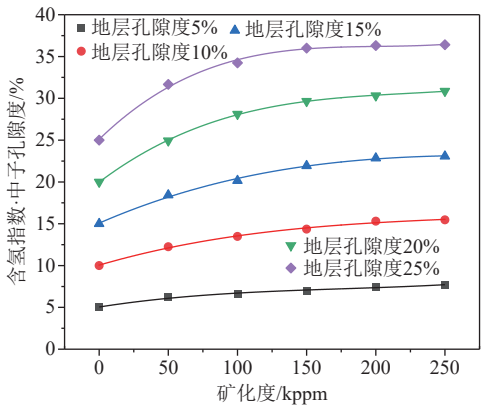


图 7　不同矿化度含氢指数对比地层孔隙度

Fig. 7　Hydrogen index vs formation porosity of salinity

3.6　油气饱和度

储层岩石孔隙中能够满足多种流体同时存在，油气饱和度则用于描述储层岩石孔隙中某种流体充满的程度大小。为了考察不同油气饱和度下的含氢指数测量结果是否产生变化，此处以油水两相、气水两相为研究对象，模拟得到了两者在地层孔隙 20% 情况下的不同饱和度对应含氢指数与地层孔隙度之间的关系，结果如图 8 所示。

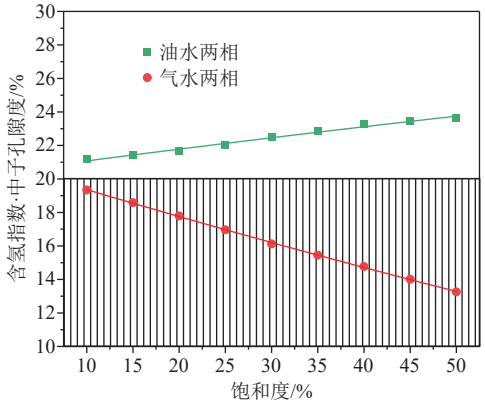


图 8　不同饱和度含氢指数对比地层孔隙度 20%

Fig. 8　Hydrogen index vs formation porosity 20% of saturation

根据图 8 的变化关系，可得到油气饱和度的改变对含氢指数测量产生影响。随着油气饱和度的不断增加，油水两相的含氢指数呈现上升趋势，气水两相的含氢指数呈现下降趋势，且气水两相的含氢指数对饱和度变化更加敏感，分析认为：基于前述流体影响的分析，相比气体而言，油与水响应相近，中子

减速作用明显且产生一个正向含氢指数, 而气中的氢浓度过低, 最终产生一个负向含氢指数, 油气饱和度变化的实质是油水比例、气水比例的改变, 故饱和度越高时, 其含氢指数响应规律越趋近于单相流体, 与前述流体影响分析认识相契合。

4　结论

本研究基于补偿中子测井仪模型, 对比分析了不同地层条件下含氢指数与地层孔隙度之间的关系。受岩性和骨架矿物影响, 含水白云岩地层、石膏层、赤铁矿、泥岩层含氢指数测量值高于地层孔隙度, 而含水砂岩地层含氢指数测量值低于地层孔隙度; 受孔隙流体影响, 地层水矿化度变大或地层中/高孔含油时, 其含氢指数测量值高于地层孔隙度, 而地层含气时的含氢指数测量值低于地层孔隙度。综合岩性、矿物、黏土、流体、地层水矿化度、油气饱合度等因素研究, 认为高密度、重泥质、高含气量及高矿化度会显著降低含氢指数表征地层孔隙度的准确性, 然而这种测量响应差异为岩性判断、油气识别创造了有利条件, 本文的相关研究为今后利用中子数据进行地层评价提供了一定参考。

参考文献(References):

[1] Fricke S, Madio D, Adolph B, et al. Thermal neutron porosity using pulsed neutron measurements[C]//Society of Petroleum Well Log Analysts, The SPWLA 49th Annual Logging Symposium, 2008.

[2] Chen A X, Antolak A J, Leung K N. Electronic neutron sources for compensated porosity well logging[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2012, 684: 52−56.

[3] Badruzzaman A, Schmidt A, Antolak A. An assessment of fundamentals of neutron porosity interpretation: americium-beryllium source versus neutron generatorbased alternatives[C]//Transactions of the SPWLA, The SPWLA 58th Annual Logging Symposium, 2017.

[4] 王新光, 张锋. 欠平衡钻井条件下钻井液的密度对中子孔隙度测井的影响 [J]. 测井技术, 2009, 33(3): 293−298.
Wang X G, Zhang F. Effect of drilling fluid density on neutron porosity in under balanced drilling[J]. Well Logging Technlogy, 2009, 33(3): 293−298.

[5] 于华伟, 孙建孟, 王敏, 等. 斜井和水平井中补偿中子测井探测特性 [J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(6): 71−75.
Yu H W, Sun J M, Wang M, et al. Investigation characteristics of compensated neutron log in deviated and horizontal well[J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 2008, 32(6): 71−75.

[6] 田立立, 张锋, 王新光, 等. 中子孔隙度测井探测器气压响应数值模拟 [J]. 同位素, 2016, 29(2): 98−102.
Tian L L, Zhang F, Wang X G, et al. Monte Carlo study on gas pressure response of He-3 tube in neutron porosity logging[J]. Journal of Isotopes, 2016, 29(2): 98−102.

[7] Badruzzaman A, Schmidt A, Antolak A. An assessment of fundamentals of neutron porosity interpretation: americium-beryllium source versus neutron generatorbased alternatives[C]//Transactions of the SPWLA, The SPWLA 58th Annual Logging Symposium, Oklahoma, 2017.

[8] Sadooni F N, Alsharhan A S. Stratigraphy, microfacies, and petroleum potential of the mauddud formation(Albian-Cenomanian) in the Arabian Gulf Basin[J]. AAPG Bulletin, 2003, 87(10): 1653−1680.

[9] 刘红岐, 李博, 王拥军, 等. 川中大安寨段致密油储层储集特征研究 [J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2018, 40(6): 47−56.
Liu H Q, Li B, Wang Y J, et al. Reaervoir characteristics of the tight oil reservoir of the Da'anzhai Member in Central Sichuan Basin, SW China[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2018, 40(6): 47−56.

[10] 黄隆基. 核测井原理 [M]. 东营: 石油大学出版社, 2000.
Huang L J. Nuclear logging principle[M]. Dongying: University of Petroleum Press, 2000.

[11] Yu H W, Wang Z, Xue Z B, et al. Corrections of fast neutron inelastic scattering effects on D-T neutron porosity logging[J]. Applied Radiation Isotopes, 2022, 190: 110486.

[12] 楚泽涵. 地球物理测井方法与原理 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.
Chu Z H. Geophysical logging methods and principles[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.

[13] 于华伟, 周悦, 陈翔鸿, 等. 中子孔隙度测井灵敏度影响因素分析 [J]. 核技术, 2018, 41(2): 49−54.
Yu H W, Zhou Y, Chen X H, et al. Analysis of factors affecting the sensitivity of neutron porosity logging[J]. Nuclear Technologies, 2018, 41(2): 49−54.

[14] 高锡兴. 中国含油气盆地油田水 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.
Gao X X. Oil field water in oil-gas-bearing basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994.

[15] 李鹏春, 刘春晓, 张渊, 等. 塔中奥陶系地层水化学特征及其成因与演化 [J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(6): 802−808.
Li P C, Liu C X, Zhang Y, et al. Geochemical behaviors of the Ordovician formation water in the Tazhong area and its origin and evolution[J]. Nuclear Technologies, 2007, 28(6): 802−808.

Analysis of formation influence factors on hydrogen index measurement in compensated neutron logging

ZHOU Yue, WANG Meng, LIU Hai-Bo, WU Xiao-Long, ZHANG Chuan-Ju

（*Well-Tech Department, China Oilfield Services Limited, Langfang* 065201, *China*）

Abstract: The compensated neutron log (CNL) characterizes porosity by measuring hydrogen index (HI). However, its accuracy is not high due to the rock hydrogen content is not completely distributed in the pore fluid and fluid's types are complex. This study aims to determine the main reason for the difference between the measured HI and the formation porosity, thereby deepening the understanding of formation. Using Monte Carlo numerical simulation, multiple factors involved in the HI measurement are analyzed. First, the relationship between the HI and the near-to-far ratio of thermal neutron counting is obtained according to the calibration response of the compensated neutron tool in water-bearing limestone. Second, various factors that cause the difference between HI and formation porosity are obtained on the basis of a comprehensive analysis. The results show that lithology, mineral composition, clay, fluid state, formation water salinity will affect the measurement of HI and make it different from formation porosity. Particularly, high density, high shale content, gas content, and high salinity are the main factors affecting the HI measurement. Overall, this study provides a reference for determining formation porosity and identifying oil and gas through neutron data in the future.

Key words: compensated neutron log (CNL)**;** thermal neutrondeceleration**;** hydrogen index (HI)**;** formation porosity

（本文编辑：王萌）