doi: 10.11720/wtyht.2026.1431
王勃淞, 岳崇旺, 柴嘉, 等. 储氢地层套管井补偿中子测井响应特征研究[J]. 物探与化探, 2026, 50(4): 776-782. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1431
Wang B S, Yue C W, Chai J, et al. Compensated neutron log responses of cased holes in hydrogen storage strata[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(4): 776-782. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1431

储氢地层套管井补偿中子测井响应特征研究

王勃淞, 岳崇旺, 柴嘉, 陈旭
(长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 本文针对储氢地层套管井补偿中子测井的响应特征开展研究, 旨在量化套管对中子孔隙度测量的影响, 并着重研究含氢气地层的情况。研究采用蒙特卡罗数值模拟方法, 构建裸眼井与套管井模型, 模拟不同孔隙度和含氢气饱和度条件下的中子测井响应, 并分析长短源距计数比与地层含氢指数的关系。分析结果表明, 套管及水泥环会导致套管井测得的视地层含氢指数偏低, 且偏移量随地层孔隙度和氢气饱和度的增加呈非线性增长。在此基础上, 建立了地层孔隙度、含氢气饱和度和含氢指数偏移量的拟合模型, 拟合精度达到 0.993 6, 可有效量化不同孔隙度和氢气饱和度情况下套管引起的含氢指数偏移。该研究结果可为套管井储氢地层中子测井数据解释提供理论依据。

关键词: 补偿中子测井; 蒙特卡洛模拟; 中子孔隙度; 含氢指数
中图分类号: P631.81; P31 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2026)04-0776-07

0 引言

在全球碳中和目标背景下, 可再生能源的大规模开发与利用已成为能源结构转型的重要方向, 这其中, 风能和太阳能等能源形式具有显著的间歇性和波动性特征, 对电力系统的稳定运行提出了更高要求[1-2]。而地下储氢(underground hydrogen storage, UHS)作为一种兼具大规模与长周期特征的储能方式, 能够将富余的可再生电能转化为氢能并实现跨季节存储, 同时为交通运输、化工等难以直接电气化的行业提供清洁能源支撑, 其工程可行性与运行安全性直接关系到氢能产业的发展前景[3-4]。近年来, 我国在地下储氢领域的工程实践不断推进, 湖北大冶岩洞储氢库、河南平顶山盐穴储氢库等示范项目相继启动[5-7]。与短期运行的储气工程不同, 地下储氢库通常需要在数十年的周期内反复经历注采过程, 储层内部的压力状态、氢气纯度以及与残余流体的混合比例均会随时间发生变化[8-9]。一旦储层密封性失效引发氢气泄漏, 不仅会造成巨额经济损失, 还可能因氢气的易燃易爆特性引发严重安全事故。因此, 对储氢库运行状态进行长期、原位且高精度的动态监测, 是保障其安全运行的关键技术环节[10]。

在现有的体系中, 测井方法因具备较高的垂向分辨率以及对地层流体性质的敏感响应, 被认为是实现地下储氢库动态监测的重要手段之一[11-13]。补偿中子测井基于氢原子对快中子的强减速作用, 可有效反映地层含氢量变化, 在流体识别和孔隙度评价方面具有明显优势, 因而在注入气体空间分布监测中具有良好的应用潜力[14-15]。然而, 地下储氢库的监测井多为套管井, 套管及其外侧的水泥环会对中子产生额外的吸收与散射作用, 显著改变中子场分布, 进而影响探测器记录的计数率响应[16]。若直接采用裸眼井条件下建立的解释模型, 往往会导致地层孔隙度被系统性低估, 进而导致计算误差[15]。

相较于水、甲烷等常规流体, 氢气对快中子的慢化能力明显更弱[17]。在套管井条件下, 这一特性会进一步放大, 使传统针对常规流体建立的校正方法难以适用于含氢气地层[18]。针对地下储氢监测需求, 国内外已有研究从不同角度对中子测井响应特

收稿日期: 2025-12-19; **修回日期**: 2026-02-09
基金项目: 国家自然科学基金项目“未固结砂岩中的井孔声场传播特征研究”(41504090)
第一作者: 王勃淞(2000-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为测井方法的正演模拟和储层评价。Email: wangbosong1@outlook.com
通讯作者: 岳崇旺 (1981-), 男, 副教授, 硕士生导师, 现从事地球物理测井方面的教学和科研工作。 Email: ycw1981@163.com

征进行了探索。最近几年, Zhang 等[19] 基于中子测井方法对含气地层的孔隙度和含气饱和度进行了模拟分析, Han 等[20] 针对补偿中子测井方法进行了数值模拟, 并分析了环境影响规律; 但以上研究主要是以含水或含油气地层为研究对象, 尚未针对含氢气地层建立相关模型。Song 等[21] 基于蒙特卡洛模拟研究分析了地下储氢监测的一种中子测井方法, Wu 等[22] 针对套管井中子测井研究了砂岩氢气藏的响应规律, 但是均未对地层孔隙度和氢气饱和度对含氢指数偏移量的耦合影响进行定量刻画。

基于上述问题, 本文以含氢气地层为研究对象, 针对套管井条件下补偿中子测井的响应特征开展了系统研究, 在此基础上研究套管引起的孔隙度偏移规律, 并建立了地层孔隙度、氢气饱和度和含氢指数偏移量的关系。研究结果能够为地下储氢条件下补偿中子测井资料的定量解释与分析提供一定的理论依据。

1　补偿中子测井方法原理

补偿中子测井是通过设置不同源距的双探测器, 对地层含氢特征进行测量, 从而实现孔隙度评价[23]。中子源发射的快中子进入地层后, 主要与氢原子发生弹性碰撞并迅速慢化, 随后被地层原子核俘获[24-25]。该方法是通过对比计算近、远探测器接收到的信号, 来有效削弱井眼环境和岩性变化的影响, 使测井结果更能反映孔隙流体的含氢特征。

典型的补偿中子测井仪器由一个中子源和 2 个探测器组成。探测器分为近探测器(source-to-short-spaced detector, SSD)与远探测器(source-to-long-spaced detector, LSD), 分别位于不同源距, 可以有效削弱井径和井眼介质对测量结果的影响, 从而提高对地层真实孔隙度和含氢量的敏感性。近探测器的响应对井眼环境(泥浆、套管等)较为敏感, 而远探测器更能反映地层深部的中子场分布[26], 通过近、远两个探测器测得的计数率比值来确定地层含氢指数, 对应的热中子计数比(R)为长短源距的计数率比值:

$$R=\frac{N_{r_1}}{N_{r_2}}=\frac{r_1(\mathrm{e}^{-r_1/L_e}-\mathrm{e}^{-r_1/L_t})}{r_2(\mathrm{e}^{-r_2/L_e}-\mathrm{e}^{-r_2/L_t})}, \tag{1}$$

式中: N 为探测器的接收计数; r_1 和 r_2 分别为近、远源距; L_e、L_t 分别为快中子的减速长度和扩散长度。由于 $L_e \gg L_t$, 当源距足够大时, 式中含有 L_t 的第二个指数项可以忽略, 故式(1)可简写为:

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

比值 R 与减速长度 L_e 有关, 而减速长度取决于含氢指数, 即地层对快中子的减速作用主要决定于它的含氢指数。因此, 一般情况下可将该比值转化为含氢指数。

2　数值模拟方法

2.1　蒙特卡洛数值模拟方法

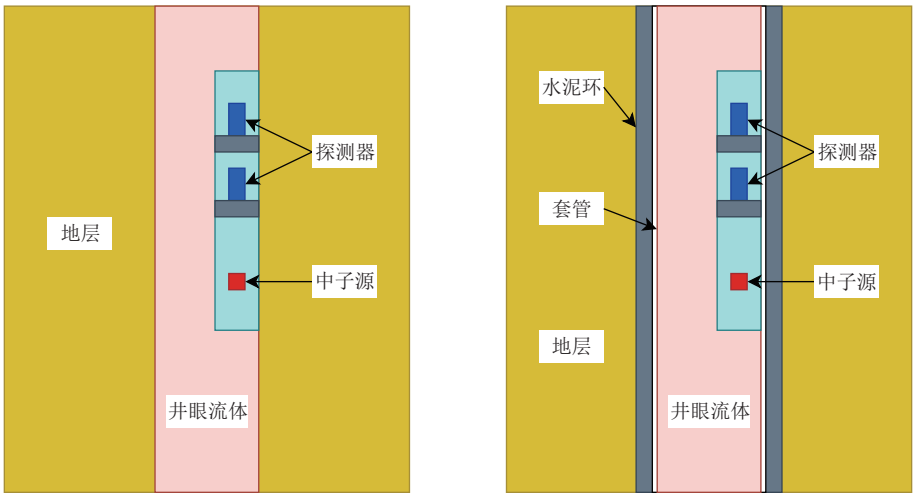
本文采用蒙特卡洛数值模拟方法对补偿中子测井过程进行计算分析。在该方法中, 中子的输运行为不再通过解析公式近似描述, 而是基于概率统计规律, 对中子在地层介质中的运动过程进行随机抽样模拟。通过大量中子历史的累积统计, 可以重建中子在地层中的整体分布特征及其对探测器响应的影响[27]。在具体模拟过程中, 对每一粒中子的传播路径进行逐步追踪, 记录其在传播过程中发生的各类物理相互作用, 包括与不同原子核之间的弹性散射、非弹性散射以及最终被俘获等过程。中子在不同相互作用中的能量变化和空间位移均按照相应的物理截面进行随机采样, 从而保证模拟结果在统计意义上的物理合理性。通过上述过程, 可以较为真实地反映中子在地层介质中的慢化、扩散及衰减行为。

该方法能够同时考虑多种地层元素及流体成分对中子输运过程的影响, 例如氢、氧等元素在中子慢化中的主导作用, 以及不同物质组合对中子场分布的综合效应。由于不依赖于对几何结构或介质性质的过度简化, 蒙特卡洛方法在处理不规则地层结构、多孔介质以及多相流体共存等复杂条件时表现出较强的适用性。相比传统解析模型, 该方法能够在保持物理过程完整性的前提下, 获得更接近实际工况的数值结果。基于上述优势, 蒙特卡洛数值模拟已被广泛应用于核测井相关研究中, 尤其适用于补偿中子测井响应特征的分析与解释。通过对中子输运过程的统计模拟, 可以为后续不同井眼结构和流体条件下的测井响应对比分析提供可靠的数值基础。

2.2　计算模型

为准确模拟套管井与裸眼井环境下的补偿中子测井响应, 基于上述蒙特卡洛数值模拟方法, 结合一般井眼结构和仪器特征, 构建了如图 1 所示的 2 个井筒—地层模型。

2 个模型分别为裸眼井和套管井模型, 地层纵向深度为 250 cm、地层径向深度为 75 cm。在半径为 16 cm 的裸眼井井眼中注入淡水, 仪器采取贴井壁偏心放置, 近探测器源距为 30 cm, 远探测器源距为



(a) 裸眼井模型　　(b) 套管井模型

图 1　井筒–地层模型

Fig. 1　Borehole-formation model

60 cm。套管为 0.7 cm 厚的不锈钢材料，套管与地层之间充填厚度为 3 cm 的水泥环。地层压力和温度分别为 35 MPa 和 363.15 K。为了保证计算结果精度，设置中子数目为 1×10^9。

3　结果与分析

3.1　饱和水砂岩长短源距计数比与含氢指数的标定关系

为了建立补偿中子测井在饱和水砂岩的情况下仪器长短源距计数比与地层含氢指数之间的标定关系，本小节基于裸眼井模型，构建饱和水砂岩储层，将地层孔隙度设置为 0~100%，模拟计算不同地层孔隙度情况下的长短源距计数比，最后得到地层孔隙度ϕ与长短源距计数比R的关系。一般情况下，此时补偿中子测井测量的地层孔隙度等效于含氢指数，所以将其记为地层含氢指数ϕ_N；而在其他地层条件下测量的孔隙度由于受到一定的影响，会与地层真实孔隙度存在差异，被记为视地层含氢指数。

图 2 直观展示了长短源距计数比R与地层含氢指数ϕ_N的标定关系，可见随着地层含氢指数的增加，长短源距计数比呈明显上升趋势。这是由于地层含氢指数增加，对应的地层含氢量升高，快中子慢化效率增强，热中子密度衰减速率加快，最终计数比上升。基于数据拟合得到地层孔隙度，即裸眼井地层含氢指数的刻度公式：

$$\phi_N = \phi = 2.396\,4R^2 - 11.283R - 6.990\,8。\qquad (3)$$

该公式反映了裸眼井条件下计数比与含氢指数的定量转换关系，同时也为后续套管井条件下的响应分析提供基准。

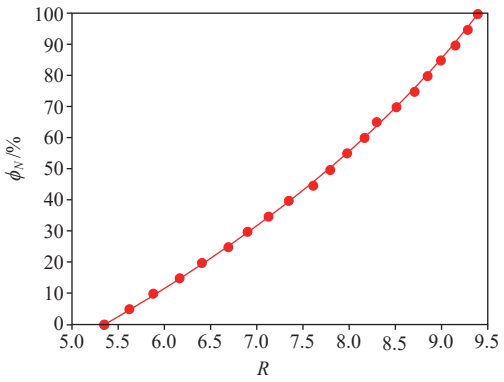


图 2　长短源距计数比与含氢指数的标定关系

Fig. 2　Calibration relationship between long-short source distance count ratio and hydrogen index

3.2　套管井饱和水条件下视地层含氢指数

本小节基于套管井模型构建饱和水砂岩储层，地层孔隙度设置为 0~100%，模拟计算不同地层孔隙度情况下的长短源距计数比。

将获得的计数比代入式 (3)，可进一步得到套管井的视地层含氢指数随地层孔隙度变化的关系，将其与裸眼井的标定关系进行对比，结果见图 3。可以看出，在相同地层孔隙度下，套管井视地层含氢指数相比裸眼井的始终偏低，且随着地层孔隙度增大，两者差值呈逐渐放大趋势。这是由两方面因素导致的结果：一方面，套管和水泥环中含有钙、硅、铁等重核元素，对快中子具有较强吸收截面，会直接捕获部分快中子，使到达地层的中子通量降低；另一方面，套管和水泥环会阻碍热中子向地层深部扩散，使更多热中子集中于井眼附近并被损耗，导致远探测器接收的地层热中子信号衰减更明显。两种因素共同作用导致远探测器接收的地层热中子信号减弱，最

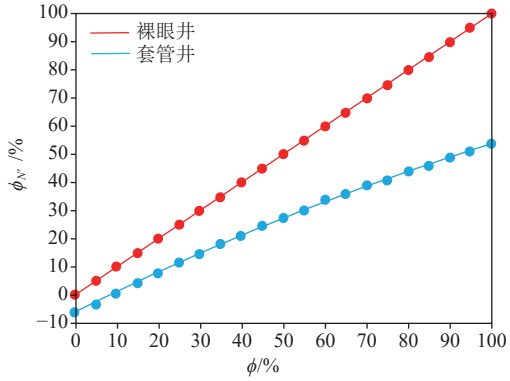


图 3　视地层含氢指数和地层孔隙度的关系

Fig. 3　Relationship between apparent hydrogen index and porosity of formations

终使长短源距计数比降低, 从而得到的套管井的中子测井计数比显著低于裸眼井。

为了进一步量化套管对中子测井响应的影响, 计算了 2 种情况下的含氢指数差值, 得到含氢指数偏移量$\Delta\phi$随地层孔隙度ϕ变化的关系曲线(图 4)。

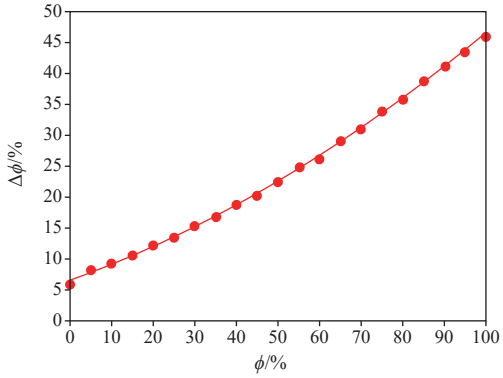


图 4　含氢指数偏移量和地层孔隙度的关系

Fig. 4　Relationship between hydrogen index offset and formation porosity

拟合结果表明, 套管井引起的含氢指数偏移量可用以下二次多项式描述:

$$\Delta\phi = \phi_N - \phi_{N'} = 0.001\,5\phi^2 + 0.245\,9\phi + 6.549\,3, \quad (4)$$

式中: $\phi_{N'}$为视地层含氢指数。该函数能够较好地刻画套管对含氢指数的影响规律。当地层孔隙度较低时, 偏差主要由套管吸收主导; 随着孔隙度的增加, 地层中氢含量增加使得中子减速效率提高, 放大了套管吸收的相对影响, 从而表现为二次项主导的非线性偏移增长趋势。

3.3　裸眼井与套管井含氢气储层中子测井响应

3.3.1　孔隙度响应特征

在考虑孔隙中同时含有水与氢气的情形下, 氢气的热中子减速能力明显弱于水。因此, 在相同孔隙度下, 随着含氢气饱和度S_{H_2}的增加, 地层的有效含氢量降低, 从而影响补偿中子测井的计数比响应。为研究套管井条件下含氢气储层的响应规律, 本节分别对裸眼井与套管井模型进行数值模拟, 构建饱和水砂岩储层。将地层孔隙度设置为 0~100%, 氢气饱和度分别设置为 10%、20%、30%、40% 与 50%, 通过模拟得到视地层含氢指数与地层孔隙度的关系(图 5)。

在裸眼井中(图 5a), 随着地层孔隙度的增加, 视地层含氢指数持续升高, 但斜率随含氢气饱和度的增加而显著减弱。这表明孔隙中氢气比例越高、中子减速效率越弱, 热中子向地层深部扩散的范围更广、衰减速率更慢, 导致远探测器接收到的计数率越大、计数比越低, 从而得到的视地层含氢指数就相对更低。

而相对于裸眼井, 套管井的视地层含氢指数整体明显偏低, 并随地层孔隙度提高呈现更强的下压趋势(图 5b)。其原因主要有二点: 首先, 套管与水泥环在中子源与井壁之间形成额外吸收屏障, 中子在进入地层前已显著衰减, 导致可在地层中参与慢化的快中子数量减少; 其次, 氢气相比于水具有更低的含

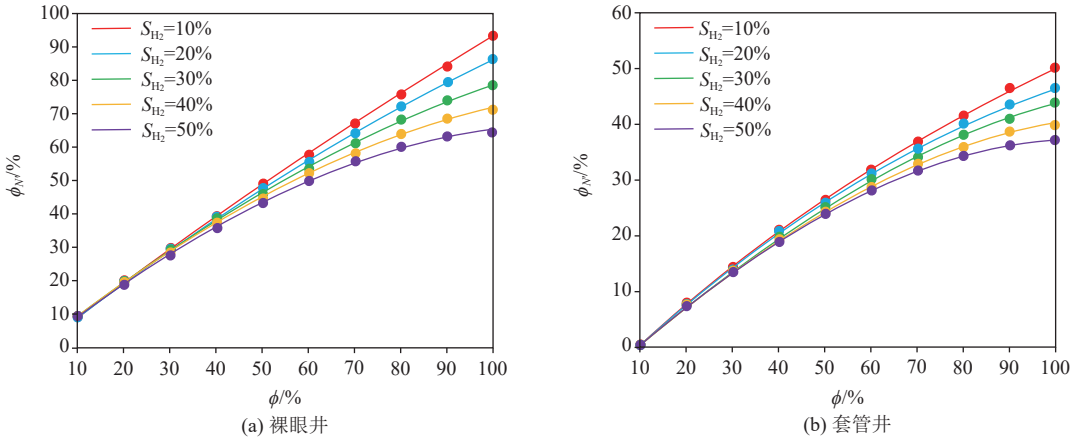


图 5　不同含气饱和度下视地层含氢指数与地层孔隙度的关系

Fig. 5　Relationship between apparent hydrogen index and formation porosity under different gas saturation conditions

氢量，同时在套管井中进一步放大，当含氢气饱和度S_{H_2}越高、地层孔隙度ϕ越大时，地层整体对中子的慢化效率越低，使套管提前吸收中子的效果更加显著。

总之，模拟结果表明，裸眼井的视地层含氢指数大于套管井的视地层含氢指数，且差异随地层孔隙度的增大而显著增强。

3.3.2　孔隙度的偏移特征

为了定量描述裸眼井与套管井之间的系统性差异，本小节计算了同一孔隙度、同一含氢气饱和度下二者的含氢指数差值（即含氢指数偏移量$\Delta\phi$），得到不同含氢气饱和度S_{H_2}条件下，$\Delta\phi$随地层孔隙度ϕ的变化规律（图 6）。

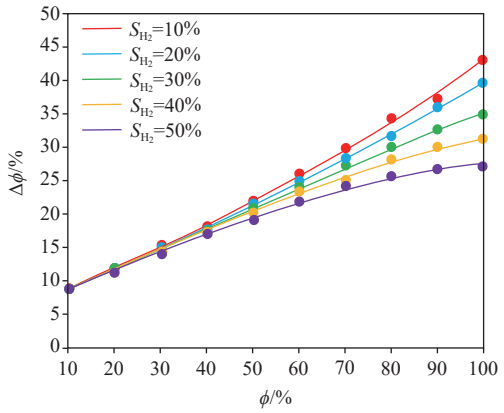


图 6　不同含气饱和度情况下含氢指数偏移量和地层孔隙度的关系

Fig. 6　Relationship between hydrogen index offset and formation porosity under different gas saturation conditions

从图 6 中可以看出，含氢指数偏移量$\Delta\phi$随地层孔隙度ϕ的增加呈现明显的非线性增长趋势，且增长速率受含氢气饱和度S_{H_2}的影响显著。具体表现为，在相同孔隙度下，含氢气饱和度越高，含氢指数偏移量越大；同时，随着地层孔隙度的增加，不同含氢饱和度条件下的含氢指数偏移量曲线逐渐发散，表明套管的影响在含氢气的流体环境中更加显著。

为进一步建立$\Delta\phi$与ϕ、S_{H_2}之间的定量关系，采用二元二次曲面模型进行拟合：

$$\Delta\phi = c_{00} + c_{10}\phi + c_{01}S_{H_2} + c_{20}\phi^2 + c_{11}\phi S_{H_2} + c_{02}S_{H_2}^2, \quad (5)$$

式中：c_{00}、c_{01}、c_{10}、c_{02}、c_{20}、c_{11}为拟合系数。

基于数值模拟得到的 50 个数据点，通过最小二乘法拟合得到含氢气饱和度S_{H_2}、地层孔隙度ϕ与含氢指数偏移量$\Delta\phi$关系（图 7）。可以看出：$\Delta\phi$随ϕ和S_{H_2}的变化呈现明显的非线性特征，整体上，$\Delta\phi$值随ϕ和S_{H_2}两者的增大而单调增加，说明在地层孔隙度较高、含氢气饱和度较大的条件下，套管对补偿中子测井的影响更加显著。曲面在ϕ方向呈现明显的上

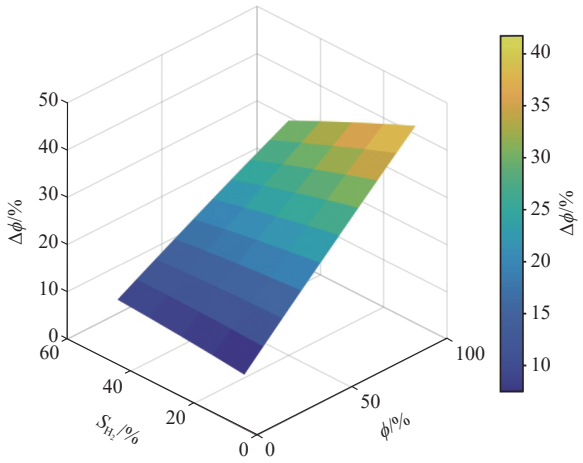


图 7　含氢气饱和度、地层孔隙度与含氢指数偏移量的关系

Fig. 7　Relationship between hydrogen saturation, formation porosity and hydrogen index offset

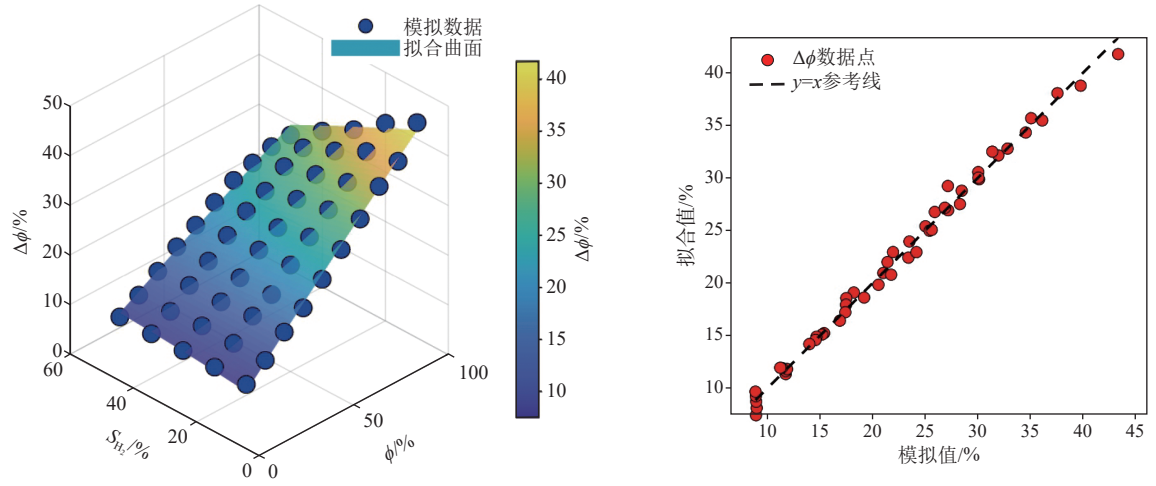
凸形态，说明$\Delta\phi$随地层孔隙度增加呈加速增长趋势。相比之下，在ϕ-S_{H_2}平面内，曲面梯度方向主要沿ϕ轴方向，说明地层孔隙度对$\Delta\phi$的影响大于含氢气饱和度的影响。

为了验证评估本节拟合模型的精度，得到了拟合精度分析结果（图 8）。可以看出：50 个数据点均匀分布在拟合曲面附近，无明显系统性偏离，初步验证了模型的适用性（图 8a）；$\Delta\phi$的拟合值与模拟值的 1 : 1 对比，其系数R^2 = 0.993 6，表明模型拟合值与模拟值之间高度吻合（图 8b），同时图中绝大多数数据点紧密分布在$y = x$参考线两侧，与图 8a 中数据点均匀分布在拟合曲面附近的现象相互印证，共同验证了模型的准确性。

4　结论与展望

本文围绕储氢地层条件下套管井补偿中子测井的响应特征开展研究，基于蒙特卡罗数值模拟与定量建模，研究分析了含氢气条件下套管井与裸眼井的测井响应差异，并建立了含氢气条件下的含氢指数偏移量模型。

研究结果表明，套管及其水泥环会显著改变中子在井周介质中的输运过程，套管井条件下补偿中子测井测得的视地层含氢指数，低于裸眼井条件下测得的视地层含氢指数。在此基础上，基于不同孔隙度与含氢气饱和度条件下的模拟数据，采用二元二次曲面拟合方法，建立了含氢指数偏移量与地层孔隙度、含氢气饱和度之间的定量关系模型。该模型采用二元二次曲面形式，拟合精度较高（R^2 = 0.993 6），能够有效描述含氢指数偏移量随关键参数变化的非



(a) 拟合曲面与数值模拟数据点分布对比　　(b) 模型拟合值与数值模拟值的关系

图 8　含氢指数偏移量拟合精度分析结果

Fig. 8　Analysis results of fitting accuracy of hydrogen index offset

线性规律, 并为储氢地层条件下套管井补偿中子测井资料的分析处理提供了一定可行的理论依据。

需要指出的是, 本文研究主要针对理想化的均质砂岩地层及特定井眼结构, 尚未系统考虑复杂岩性条件、地层水矿化度变化以及不同套管材质等因素对中子测井响应的影响, 其作用机制仍有待深入研究。后续工作可结合现场资料, 对模型的适用性进行验证与拓展, 以提升其在复杂地质条件下的应用能力。

参考文献(References):

[1] 王强, 党牛, 蒋子龙, 等. 碳中和背景下能源转型研究综述与展望 [J]. 地理学报, 2025, 80(3): 586−604.
Wang Q, Dang N, Jiang Z L, et al. A review and outlook on energy transition research in the context of carbon neutrality[J]. Acta Geographica Sinica, 2025, 80(3): 586−604.

[2] 刘玮, 万燕鸣, 熊亚林, 等. “双碳”目标下我国低碳清洁氢能进展与展望 [J]. 储能科学与技术, 2022, 11(2): 635−642.
Liu W, Wan Y M, Xiong Y L, et al. Outlook of low carbon and clean hydrogen in China under the goal of “carbon peak and neutrality”[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(2): 635−642.

[3] 杨春和, 王同涛. 我国深地储能机遇、挑战与发展建议 [J]. 科学通报, 2023, 68(36): 4887−4894.
Yang C H, Wang T T. Opportunities, challenges, and development suggestions for deep underground energy storage in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(36): 4887−4894.

[4] Zeng L P, Sander R, Chen Y Q, et al. Hydrogen storage performance during underground hydrogen storage in depleted gas reservoirs: A review[J]. Engineering, 2024, 40: 211−225.

[5] Qiu Y, Zhou S Y, Wang J H, et al. Feasibility analysis of utilising underground hydrogen storage facilities in integrated energy system: Case studies in China[J]. Applied Energy, 2020, 269: 115140.

[6] Bai W Z, Shi X L, Zhu S J, et al. Opportunities and challenges of large-scale salt cavern hydrogen storage in China coupled with renewable energy sources[J]. Clean Energy, 2025, 9(1): 179−196.

[7] Liu W, Zhang Z X, Chen J, et al. Feasibility evaluation of large-scale underground hydrogen storage in bedded salt rocks of China: A case study in Jiangsu Province[J]. Energy, 2020, 198: 117348.

[8] 周庆凡, 张俊法. 地下储氢技术研究综述 [J]. 油气与新能源, 2022, 34(4): 1−6.
Zhou Q F, Zhang J F. Review of underground hydrogen storage technology[J]. Petroleum Planning & Engineering, 2022, 34(4): 1−6.

[9] Kalam S, Abu-Khamsin S A, Kamal M S, et al. A mini-review on underground hydrogen storage: Production to field studies[J]. Energy & Fuels, 2023, 37(12): 8128−8141.

[10] 安金彪, 王文权, 辛传奇. “双碳” 驱动的地质储氢技术: 潜力、瓶颈与创新 [J]. 油气储运, 2025, 44(11): 1208−1220.
An J B, Wang W Q, Xin C Q. A review of geological hydrogen storage driven by “carbon peaking and carbon neutrality”: Potential, bottlenecks, and innovation[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2025, 44(11): 1208−1220.

[11] Rubesova M. Application of production well logging for the monitoring of tightness underground gas storage[C]// 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM2017. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, 2017.

[12] Merey Ş, Aydın H. Simulating hydrogen adsorption-driven thermal variations for improved well integrity monitoring in underground hydrogen storage[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 143: 1226−1242.

[13] Miocic J M, Alcalde J, Heinemann N, et al. Toward energy-independence and net-zero: The inevitability of subsurface storage in Europe[J]. ACS Energy Letters, 2022, 7(8): 2486−2489.

[14] Pirrone M, Machicote S, De Lisio S. Pulsed neutron logging for underground hydrogen storage monitoring in depleted reservoirs[C]// SPE Europe Energy Conference and Exhibition. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2024.

[15] TotalEnergies, Varignier G, Chuilon P, et al. Laboratory experimental validation of sensitivity functions for a neutron porosity logging tool in casedhole environments[J]. Petrophysics—the SPWLA Journal of Formation Evaluation and Reservoir Description, 2025, 66(2): 294−316.

[16] Köhli M, Schmoldt J P. Feasibility of UXO detection *via* pulsed neutron–neutron logging[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2022, 188: 110403.

[17] Xi X L, Chen Q, Zhang F. Modeling the pulsed neutron response for natural hydrogen detection[J]. Frontiers in Earth Science, 2025, 13: 1611038.

[18] Chen G Y, Dang L X, Cai W Y, et al. Study on monitoring reservoir gas density by pulsed neutron logging[J]. International Journal of Energy Research, 2023: 1363145.

[19] Zhang H R, Tan W, Hu D S, et al. Calculation of porosity and CO_2 content in CO_2-bearing gas formations based on density and neutron logging forward and inverse methods[J]. ACS Omega, 2024, 9(36): 37678−37686.

[20] Han I H, Kim G. Simulations of absolute porosity measurements by compensated neutron logging tools mounted with stilbene or CLYC scintillators[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2024, 1064: 169397.

[21] Song X Y, Wu W S, Zhang H Y, et al. A differential-ratio neutron logging method for high-precision monitoring of hydrogen storage in depleted gas reservoirs[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2026, 197: 152697.

[22] Wu P, Zhao X Y, Ling H S, et al. Simulation of gas-water identification in sandstone hydrogen reservoirs based on pulsed neutron logging[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 62: 835−848.

[23] 童茂松, 张炳军, 张加举, 等. 补偿中子测井的孔隙度灵敏度理论分析 [C]//2024 油气田勘探与开发国际会议论文集Ⅰ. 西安: 西安石油大学, 2024: 828-836.
Tong M S, Zhang B J, Zhang J J, et al. Porosity sensitivity study of the compensated neutron logging tool[G]//Proceedings of the 2024 International Conference on Oil and Gas Field Exploration and Development(Ⅰ). Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2024: 828-836.

[24] 李鹏举, 李勇勇, 徐茂河, 等. 地层水矿化度对补偿中子测井影响的自动校正方法研究 [J]. 物探与化探, 2019, 43(4): 815−821.
Li P J, Li Y Y, Xu M H, et al. A study of automatic correction method for the influence of formation water salinity on compensating neutron logging[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(4): 815−821.

[25] 张雪昂, 杨志超, 魏雄. 水层多角度裂缝介质中子测井响应数值模拟 [J]. 物探与化探, 2018, 42(6): 1221−1227.
Zhang X A, Yang Z C, Wei X. Water layer neutron logging in multi-angle crack environment[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(6): 1221−1227.

[26] Abid M, Ba J, Markus U I, et al. Modified approach to estimate effective porosity using density and neutron logging data in conventional and unconventional reservoirs[J]. Journal of Applied Geophysics, 2025, 233: 105571.

[27] Raffuzzi V, Cosgrove P, Kowalski M A. Status of the SCONE Monte Carlo neutron transport code[J]. Annals of Nuclear Energy, 2026, 227: 112015.

Compensated neutron log responses of cased holes in hydrogen storage strata

WANG Bo-Song, YUE Chong-Wang, CHAI Jia, CHEN Xu

(*School of Geological Engineering and Geomatics*, *Chang'an University*, *Xi'an* 710054, *China*)

Abstract: This study investigated the compensated neutron log (CNL) responses of cased holes placed in hydrogen storage strata, aiming to quantify the impacts of casing on neutron porosity measurements, with emphasis placed on hydrogen-bearing strata. Using the Monte Carlo numerical simulation method, the models of open and cased holes were constructed to simulate the CNL responses under varying porosity and hydrogen saturation conditions. Furthermore, the relationship between the neutron count ratio from long- to short-distance detectors and the formation hydrogen index (HI) was analyzed. The analytical results indicate that the application of the casing and cement sheath may lead to an underestimation of the apparent HI in the cased hole, with the offset showing a non-linear increase with formation porosity and hydrogen saturation. Based on this, a fitting model incorporating formation porosity, hydrogen saturation, and HI offset was established, yielding a fitting accuracy of 0.9936. Therefore, this model enables effective quantification of the HI offset induced by casing under the condition of varying porosity and hydrogen saturation. Overall, the results of this study can provide a theoretical basis for interpreting the CNL data from cased holes placed in hydrogen storage strata.

Key words: compensated neutron log (CNL); Monte Carlo simulation; neutron porosity; hydrogen index (HI)

(本文编辑: 叶佩, 沈效群)