doi: 10.11720/wtyht.2023.0018

张雪昂,杨志超,李小燕,等.多孔隙度变化倾角裂缝型砂岩铀矿超热中子运移模拟[J].物探与化探,2023,47(6):1547-1554. http://doi.org/ 10.11720/wtyht.2023.0018

Zhang X A, Yang Z C, Li X Y, et al. Simulation of epithermal neutron migration in fractured sandstone-hosted uranium deposits with variable porosities and dip angles [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(6):1547-1554. http://doi.org/10.11720/wtyht. 2023.0018

多孔隙度变化倾角裂缝型砂岩铀矿超热中子运移模拟

张雪昂1,杨志超2,李小燕1,董丽媛1

(1. 东华理工大学 核科学与工程学院,江西 南昌 330013;2. 东华理工大学 地球物理与测控技术 学院,江西 南昌 330013)

摘要:铀矿作为重要的清洁能源一直备受地质勘探领域的关注,然而,其中的裂缝型砂岩铀矿(孔、裂隙型铀矿)因 其结构复杂一直是勘查工作的难点。因此,为了对此类型铀矿进行定量分析,有必要对铀矿赋存状态、含量与地质 结构(孔、裂隙)参数的响应关系进行研究。通过瞬发中子测井技术和指向概率模拟算法可以对孔、裂缝型砂岩铀 矿中的中子运移情况进行模拟,基于理想模型将研究重点集中于裂缝结构对中子测井结果的影响,包括:裂隙孔隙 度对超热中子运移的影响作用随着孔隙度的升高而显著提高,同时使测井响应敏感度大幅提升;近似垂直裂隙环 境下,超热中子聚集峰呈现多点分布状态;高裂缝倾角环境对中子能量和时间谱峰值的衰减作用最为严重,并且中 子时间谱峰值存在随孔隙度增大向低裂缝倾角度区间移动的现象;不同裂缝倾角环境下,孔隙度与超热中子计数 比存在一定的特征线性关系,可以辅助修正特定角度裂隙环境中的铀含量范围。以上结论可以为裂缝砂岩铀矿、 复杂环境铀矿勘探工作提供理论参考依据并提高铀矿定量准确性。

关键词:孔、裂隙结构;中子测井;铀矿;数值模拟;多倾角裂缝

中图分类号: P631 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2023)06-1547-08

0 引言

铀矿勘探工作中,铀矿中子测井是探测铀矿赋 存状态及储量的主要方法之一。就中子测井方法而 言,其主要包括脉冲中子测井、快中子非弹性散射γ 射线能谱测井、中子俘获射线能谱测井等^[1-5]。中 子铀矿测井领域,瞬发、缓发中子测井方法得到应 用,其中,瞬发裂变中子测井法被用来分析铀的赋存 性状及矿化程度^[6-12];缓发中子测井法主要用来确 定铀矿石的品位^[13]。20世纪 60年代,地浸采铀法 在美国被创立,此技术可探测低品位及大储量的砂 岩型铀矿^[14-16],但地侵砂岩铀矿赋存深度大、地质 环境复杂,使铀镭平衡被破坏,这加大了探测难度。 之后,直接瞬发裂变中子测井法被用于直接测 铀^[17-18],这使得砂岩铀矿定量探测效率显著提升, 其测铀灵敏度达到 10⁻⁴ g/g。国内核工业地质局组 织相关单位进行裂变中子测井研发、实验,并对裂变 中子测井技术进行深入研究^[19-21]。新疆核工业某 厂于 2004 年引进并应用俄罗斯裂变中子测井仪 (ANHK-60 型)进行大量研究工作。随着中子测井 技术在铀资源矿产勘查领域中的发展,各类铀矿被 探测、分析^[22-25]。

裂隙型铀矿是铀矿常见赋存状态之一,而裂隙 结构复杂导致其探测难度较大。因此目前针对裂隙 型砂岩铀矿的探测研究及数值模拟建立工作较 少^[26],尤其针对孔、裂隙的孔隙度及倾角参数与铀 含量相互影响规律的研究存在空白。本项目拟通过 数值模拟瞬发脉冲中子测井法探测裂缝型砂岩铀 矿,通过理想模型的建模,将研究重点集中于裂缝参 数对测井结果的影响,得到针对各种裂缝、铀矿参数 的相关性定量分析结果,为实地铀资源勘查工作提 供可靠参考依据。

收稿日期: 2023-01-30; 修回日期: 2023-07-11

基金项目:国家自然科学基金项目(41761090);江西省教育厅基金(GJJ180370)

第一作者:张雪昂(1986-),女,副教授,研究方向为非常规储层放射性地质勘探。Email:625014321@qq.com

裂隙砂岩型铀矿井孔环境模拟 1

井孔环境数值模型基于裂隙型砂岩铀矿环境。 中子源设置于竖直圆柱井孔轴线处,周围围岩主要 成分为砂岩,同时将裂隙系统镶嵌于围岩环境中,裂 缝群倾角一致,此倾角为裂缝结构主体的法向与井 轴间的角度,变化范围 0°~90°(图1)。





Fig. 1 Schematic diagram of borehole environment

井孔环境外围部分存在低渗透泥岩结构,裂隙 结构中主要含有铀矿,以及少量黄铁矿连接(图1), 井孔环境主要物质成分见表1.验证实验中裂缝角 度分布比例见表 2,模拟环境中稀土元素含量列表 (表3)。

数值建模的测井仪器为脉冲中子测井仪,中子 源是脉冲宽度为 10 μs 的氘--氚(D-T)中子源。测 井仪直径6cm,设立两个中子探测器,分别为热中

Table 1 Main m	aterial composition	of borehole environment
序号	成分	含量占比/%
1	SiO ₂	54.963
2	CaO	16.711
3	Al_2O_3	9.434
4	CaCO ₃	8.335
5	K ₂ O	5.438
6	${\rm TiO}_2$	2.264
7	FeO	1.640
8	MgO	1.215

表 2 实验采样环境中的裂缝倾角

Table 2 Fracture angle in experimental sampling environment

角度/(°)	占比/%
70°~90°	12.3
$40^{\circ} \sim 70^{\circ}$	44.7
$0^{\circ} \sim 40^{\circ}$	43.0

表 3 并孔环境稀土元素 Table 3 Rare earth elements list

元素	含量/10-6
La	24.36
Ce	48.13
Pr	6.25
Nd	18.89
Sm	4.04
Eu	0.69
Gd	3.22
Tb	0.96
Dy	3.72
Ho	0.51
Er	1.92
Tm	0.23
Yb	1.09
Lu	0 47

子探测器和超热中子探测器,两个探测器的源距分 别为15 cm 和 30 cm。中子源通过核反应公式(式 (1))释放快中子进入地层。

$$H_1^3 + H_1^2 \rightarrow He_2^4 + n_0^1 + 17.588 \text{MeV}$$
 , (1)

其中:n¹ 是释放出的快中子,其在地层中随着输运 过程与地层物质发生减速反应,最后被俘获吸收。 减速过程中会产生超热中子及热中子,其中的热中 子会引起地层中铀矿物质发生裂变,从而可以对裂 **鋒砂岩铀矿进行定量研究(式(2))**。

$$U_{92}^{235} + n_0^1 \to X_{Z1}^{A1} + Y_{Z2}^{A1} + m \cdot n_0^1 \quad , \qquad (2)$$

式中:n₀¹为中子,其与 U₉₂²³⁵ 发生反应并释放出 X_{Z1}、 $Y_{r_2}^{A1}$, $m \cdot n_0^1$; Y, X 是放射碎片; $m \cdot n_0^1$ 为通过对 U_{ac}^{235} 激发反应产生的中子。

通过式(2)可知,铀矿含量与激发出的快中子 数量呈比例关系,因此在理想情况下可以通过此方 法对铀矿进行定量。然而,在实际测井工作中,裂缝 砂岩铀矿因为其含有大量裂隙结构,且裂隙倾角往 往不同,这都对铀矿定量工作产生巨大的干扰。因 此,对裂隙环境影响因素的校正非常必要,又因为裂 缝倾角、孔隙度差异性较大,对探测结果影响明显, 本文针对裂隙结构对快中子运移的影响规律进行测 井研究,进而为裂缝砂岩铀矿储层定量提供有价值 的参考依据。

中子源发射出的中子进入地层后与地层中各种 结构的岩石矿物原子核发生若干次反应,最终中子 的能量会耗尽并被地层元素吸收。不同的地层元素 及结构对中子的衰减作用不同,因此通过地层中不 同能量中子的分布情况可以判断矿层状态并提供地 层环境校正曲线。

中子运移的方向、角度往往受到自身能量以及 碰撞物质原子质量的影响,当裂隙与井孔呈不同角

表1 井孔环境主要物质成分

度时,与中子发生碰撞、反应的原子核种类及相应数 量具有明显差异性,进而导致中子能量分布的差异 性(式(3))。

$$E_{i} = \frac{E_{i-1}}{(A+1)^{2}} \begin{bmatrix} 1 + 2A^{2}\cos^{2}\theta + 2A\cos\theta + A^{4} + \\ 2A^{3}\cos\theta + 2\frac{M}{N} \cdot \sqrt{A^{2} - 1 + \frac{M^{2}}{N^{2}}} \end{bmatrix},$$

$$E_{i} = \frac{E_{i-1}}{2} \left\{ 1 + \left(\frac{1-A}{1+A}\right)^{2} + \cos\theta \left[1 - \left(\frac{1-A}{1+A}\right)^{2} \right] \right\},$$
 (3)

 $M = 1 + A \cos\theta,$

 $N = \sqrt{1 + A^2 + 2A \cos\theta},$

式中: *E* 为中子能量; *A* 为与中子发生反应的地层元 素的原子量; θ 为中子反应后的运移角度; *M* 和 *N* 为 转换系数。

对两次碰撞位置关系的确定,可通过式(4)实现:

$$r_{i+1} = r_i + L\Omega_i \quad , \tag{4}$$

式中:r为中子发生反应的位置;L为两次反应发生 点的距离;Ω为运移方向余弦。

对于直角坐标系而言:

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + L \cdot u_i, \\ y_{i+1} = y_i + L \cdot v_i, \\ z_{i+1} = z_i + L \cdot \omega_{i0} \end{cases}$$
(5)

式中: u_i 、 v_i 、 ω_i 为 Ω 在直角坐标系中3个方向的余弦值。L的分布密度函数为:

$$f(L) = \begin{cases} \sum_{i} (r_{i-1}, E_i) \cdot \{-\int_{0}^{L} \sum_{i} (r_i + l\Omega_i, E_i) dl\}, L \ge 0\\ 0, & \text{ 其他} \end{cases}$$
(6)

通过以上方法[27],中子的运移计算得以完成。

同时,为了更直观体现裂缝参数对超热中子的 影响状态,本文通过敏感度 Sen(式7)^[27]参数对超 热中子的密度分布进行了分析(图3)。

$$\begin{cases} Sen = \frac{(a+b)_i}{\sum_{i=1}^{n} (a+b)_i} \times 100\% + \frac{A_i}{\sum_{i=1}^{n}} \times 100\%, 1 \le i \le n \\ A_i = A_{i1} + A_{i2} + \dots + A_{ia}, & 1 \le a \end{cases}$$

式中:a为超热中子密度分布聚集峰的个数;b为超 热中子密度分布极小值个数;A_i为聚集峰总个数; A_{ia}为单个聚集峰峰值;n为进行实验的总次数。

2 不同裂隙参数条件下的砂岩铀矿测井响应

为了分析裂隙结构参数对砂岩铀矿的测井响应 影响情况,设定裂缝倾角变化范围为0°~90°,裂隙 孔隙度变化范围为0.1~0.4。由图2可知,对于裂 缝砂岩铀矿,超热中子的密度分布呈角度特征性。

在裂隙孔隙度为 0.1 的铀矿环境下,无论裂缝 倾角如何变化,超热中子密度分布几乎没有显著的 区别,并且在中子分部范围内也没有极小值(图 2 中深色区域)出现。然而,随着裂隙孔隙度的逐渐 增大,超热中子密度分布的极小值点愈发增多,并且 在近似垂直角度范围内出现了峰值更大的超热中子 聚集峰(图中橘黄色区域)。同时,伴随裂隙孔隙度 增大的过程,超热中子聚集峰峰值增大,在高裂缝倾 角环境下,峰数量增多且呈分散状态。这种现象说 明,孔隙度高且高角度裂隙环境对超热中子的运移 作用影响较大,即超热中子对此种环境具有较大的 敏感度 Sen。

由式(7)可知,敏感度可以直观地体现砂岩铀 矿中裂隙参数对超热中子运移作用的影响情况(图 3)。由图3可知,随着裂隙孔隙度的增长,超热中 子敏感度总体呈上升趋势。在低孔隙度环境下(孔 隙度0.1),裂缝倾角的变化对敏感度几乎没有影 响,此种环境下的超热中子敏感度平均值为2.1%。 随着裂隙孔隙度的增加,由图可知中等角度(30°~ 60°)环境中的超热中子敏感度普遍较低,即使在敏 感度最大的环境下(孔隙度0.4),中等角度条件下 的敏感度也只有8.2%(平均值),这只有最大敏感 度(12%)的68%。在高角度(60°~90°)环境下,超 热中子敏感度是最高的(孔隙度0.4条件下敏感度 12%),相当于最低敏感度1.9%(孔隙度0.1环境) 的6.3倍。

综上所述,裂隙孔隙度是对超热中子敏感度影 响最显著的因素之一。对于含铀砂岩矿层,裂隙孔 隙是铀矿赋存的主要空间之一,因此孔隙度的大小 往往与铀矿含量呈正相关关系,这也正是高孔隙度 裂隙型砂岩铀矿对超热中子影响显著的原因之一。 同时,超热中子测井响应敏感度在近似垂直(80°~ 90°)裂隙环境下最高,近似水平倾角(0°~30°)裂隙 环境次之,中等角度(40°~50°)裂隙环境灵敏度最 低。即超热中子在高裂缝倾角环境中聚集峰会出现 在离源距离更远的区域,更加分散,且吸收作用在裂 隙环境的不同位置差异化更加明显。







图 3 不同倾角、孔隙度裂隙环境下超热中子运移敏感度

Fig. 3 Epithermal neutron density transport sensitivity in variably parameters fractured sandstone uranium ore

图4是中子能量峰值在不同裂缝倾角、孔隙度 条件下的变化情况。由图可知,随着裂缝倾角增加, 中子能量峰值逐渐下降,但下降拐点随着裂隙孔隙 度的增加而显著左移,即峰值下降拐点向低角度区 域移动(孔隙度 0.1,下降拐点位于 55°;孔隙度 0.2,下降拐点位于 36°;孔隙度 0.3,下降拐点位于 27°;孔隙度 0.4,下降拐点位于 18°)。同时,最大峰 值随着孔隙度增大而下降显著,孔隙度 0.4 环境下 的能量峰值相对于孔隙度 0.1 环境下的能量峰值下 降了 45.9%。

总体而言,高角度(70°~90°)裂隙环境对中子 能量的衰减作用最强,与近似水平角度环境相比,最 大衰减落差可达到总量的81.8%。

为了多方面对超热中子的裂隙响应进行研究, 本文还对超热中子时间峰值谱进行了分析。超热中 子时间峰值谱是通过将不同裂缝倾角及孔隙度条件 下的时间谱峰值提取出来,重组形成的谱图。通过 计算发现,不同裂缝倾角条件下,时间谱峰值存在显 著差异,此种差异可以直观反应裂缝参数对超热中 子计数的影响规律。因此,通过变化不同的裂隙结 构参数,得到了距离源发射中子一段时间的超热中 子时间峰值谱,这是地层结构对超热中子影响时间 分析的必要部分(图5)。





在裂缝孔隙度为 0.1~0.3 的铀矿环境中,超热 中子时间谱峰值在中等角度(53°~60°)裂隙环境中 存在计数最大值 1.8×10⁻⁶(平均值),在高角度(75° ~90°)裂隙环境中计数显著减少,最大衰减量可达 最大值的 91.7%。但是,在裂隙孔隙度为 0.4 的环 境中,时间谱峰值最大值大幅向低角度裂隙区间移 动,并于近似水平(0°~10°)裂隙环境取得最大值。 同时,相较于低孔隙度裂缝环境,此环境中的时间计 数峰值衰减程度最严重,仅相当于孔隙度为 0.1 时 的 26.9%。由此可见,裂缝孔隙度较大时,超热中 子时间谱峰值最大值产生于近似水平角度裂缝环 境。

超热中子计数与地层铀矿含量呈正相关,与地 层孔隙度是负相关,又因为在裂隙型铀矿储层中,裂 隙结构是铀矿的主要藏储结构,因此,裂缝孔隙度是 对铀矿含量判定的主要影响因素。图6是超热中子 计数以及裂隙孔隙度之间的相关性趋势。由图可 知,随着裂隙孔隙度增加,超热中子计数比值呈线性





下降,同时,此下降趋势与裂缝倾角存在特定相关 性:高角度(80°~90°)裂隙环境中,关系曲线斜率最 大(0.55),即超热中子计数随裂隙孔隙度增加而迅 速下降,可见此环境中的超热中子运移机制对铀矿 赋存状态敏感性较强。对中等角度(45°~65°)裂隙 环境而言,关系曲线的斜率最低(0.38),说明此种 裂隙铀矿环境中,超热中子运移峰值计数少,整体呈 不敏感状态。

总体而言,含铀裂隙孔隙度与超热中子计数比

值呈负相关,且因为裂缝倾角的不同呈现不同的变 化趋势,这与铀矿储量存在一定的趋势预判意义,可 以为裂缝砂岩铀矿储量的孔隙度修正提供理论参考 依据。

3 验证与分析

为了对计算数据进行有效性验证,有必要对实 验条件及环境进行讨论阐述。

通过与理想模型对比,发现实际环境中存在一 定的限制影响因素:①裂隙结构因成形年代及应力 作用的不同,同一环境下的裂隙倾角不能达到完全 严格一致,因此只能选择角度范围近似一致的裂隙 群组作为数据采样环境;②地层中孔隙度不仅为裂 隙孔隙度,还包含地层基质孔隙,且孔隙结构中存在 非矿藏包裹体;③实际情况下的裂隙存在密度不均 以及走向交叉的情况,同时裂隙纵横比不能完全一 致;④实地作业中,测井仪器相对井孔位置多数为偏 心状态,但是在本数值模拟中,为了使模拟环境除裂 隙结构外,尽量与井孔对称,因此选择了仪器完全居 中的井孔结构,这样可以使计算结果更加突出裂缝 结构的影响。以上影响因素会在一定程度上对实验 结果产生干扰。







考虑到上述因素,可以发现实地采样数据计算的结果中,超热中子的输运距离以及吸收时间都更短。图7b中,体现为存在大面积的阴影区域(无计数区域)。但通过对比实际数据(图7b)和计算数据(图7a)结果,发现在整体上,两者的超热中子计数峰数量在不同裂缝倾角环境中,都为在低角度(0°~40°)环境中普遍低于高角度(70°~90°)裂隙环境,且在高角度环境下峰数量增多且呈分散状态(图7中红色圈起部分)。这种现象说明,孔隙度高且高角度裂缝环境对超热中子的运移作用影响较大,即超热中子对此种环境具有较大的敏感度。通过以上对比可知,多角度裂缝脉冲中子测井模拟计算结果与实际结果总体一致,计算结论具有可参考价值。

4 结论

1) 当裂缝环境的孔隙度较高(孔隙度 0.4) 且裂 缝倾角较大(80°~90°)时,超热中子的密度分布体 现出对裂缝结构的高敏感度,即此时中子更多地与 地层铀矿发生反应,产生大量超热中子,并快速被俘 获吸收。

2)中子能量峰值在近似垂直(80°~90°)裂隙环 境下最低,与近似水平倾角环境相比,最大衰减落差 可达到总量的81.8%,说明高裂缝倾角结构对源中 子能量的衰减作用最强。

3)与能量峰值谱变化规律类似,超热中子时间 计数峰值谱同样随着裂缝倾角及孔隙度的增加而严 重衰减,同时,谱的极大值对应倾角区间随着孔隙度 增加而向低角度区间移动,(53°~60°)→(0°~ 10°)。

4)超热中子计数与裂缝孔隙度存在一定的线 性负向关系,且高倾角环境下的相对比值最大,中等 角度环境下比值最小。这种不同裂缝倾角条件下的 特征对应关系可以为裂缝砂岩铀矿储量的孔隙度修 正提供理论参考依据。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] Wood D A. Gamma-ray log derivative and volatility attributes assist facies characterization in clastic sedimentary sequences for formulaic and machine learning analysis[J]. Advances in Geo-Energy Research, 2022, 6(1):69–85.

- [3] 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.
- [4] Sun Q F, Li N, Duan Y X, et al. Logging-while-drilling formation dip interpretation based on long short-term memory[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(4):978-986.
- [5] Gama J, Schwark L. Lithofacies of early Jurassic successions derived from spectral gamma ray logging in the Mandawa Basin, SE Tanzania[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022, 15 (16): 1373.
- [6] Han R Y, Wang Z W. Monte Carlo simulation of scintillation crystal detector for formation element logging[J]. Global Geology, 2019, 22(2):128-132.
- [7] 张雪昂,杨志超,魏雄. 裂缝型铀矿环境中子测井数值模拟
 [J].东华理工大学学报:自然科学版,2019,42(1):68-73.
 Zhang X A, Yang Z C, Wei X. Numerical simulation of neutron logging in fracture uranium environment[J]. Journal of East China University of Technology:Natural Science,2019,42(1):68-73.
- [8] Kang D J, Xie Y F, Lu J G, et al. Assessment of natural gas hydrate reservoirs at Site GMGS3-W19 in the Shenhu area, South China Sea based on various well logs [J]. China Geology, 2022, 5 (3): 383-392.
- [9] 宋非,刘志锋,罗建彪,等. 铀裂变瞬发中子测井套管影响 MC 模拟修正[J]. 核电子学与探测技术,2020,40(6):927-931.
 Song F,Liu Z F,Luo J B, et al. Casing influences in uranium fission prompt neutron logging based on MC simulation correction
 [J]. Nuclear Electronics and Detection Technology,2020,40(6): 927-931.
- [10] 赖毅辉,王海涛,陈锐. 瞬发中子测井的铀矿井眼实时校正方 法研究[J]. 核技术,2021,44(6):55-59.
 Lai Y H, Wang H T, Chen R. Real-time correction method of uranium mine caliper based on prompt neutron well logging[J]. Nuclear Techniques,2021,44(6):55-59.
 [11] Zhang L, Yu H W, Li Y, et al. Improved formation density measure-
- [11] Zhang L, Tu H W, Li T, et al. Improved formation density measurement using controllable D-D neutron source and its lithological correction for porosity prediction [J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, 33(1):26–36.
- [12] Zhang F, Chen S Q, Liu T, et al. A quantitative calculation method for fracture density using the neutron self-shielding modification and neutron-induced gamma logging[J]. Geophysics: Journal of the Society of Exploration Geophysicists, 2022, 87(3):D91-D100.
- [13] 肖才锦,张贵英,袁国军,等.缓发中子标准衰减曲线法用于铀 的定量研究[J].核技术,2015,38(12):24-28.
 Xiao C J, Zhang G Y, Yuan G J, et al. Study on standard decay curve method in uranium determination by delayed neutron counting[J]. Nuclear Techniques,2015,38(12):24-28.
- [14] Darmovzalova J, Boghi A, Otten W, et al. Uranium diffusion and time-dependent adsorption-desorption in soil: A model and experimental testing of the model[J]. European Journal of Soil Science, 2020,71(2):215-225.
- [15] 李坡,杨立志,赵利信,等.非均匀地应力条件下新疆某铀矿地 浸井套管稳定性研究[J].铀矿冶,2022,41(4):368-376.
 Li P, Yang L Z, Zhao L X, et al. Study on casing stability under non-uniform ground stress for in-situ leaching well of a uranium deposit in Xinjiang [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2022, 41

(4):368-376.

- [16] Malik P P, Maity J. Synthesis and leaching behaviour of borosilicate glasses containing uranium as radioactive waste[J]. Journal of the Indian Chemical Society, 2020, 97(12c) : 2909-2913.
- [17] Buckner M Q, Wu C Y, Henderson R A, et al. Measurement of the ^{242m} Am neutron-induced reaction cross sections [J]. Physical Review C, 2017, 95(2):024610.
- [18] Zhang S X, Zou C C, Peng C, et al. Abnormally high natural radioactivity zones in the main borehole of the continental scientific drilling project of cretaceous songliao basin: Geophysical log responses and genesis analysis [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018,61(11):4712-4728.
- [19] 梁永顺,管少斌,李峰林. 瞬发裂变中子测井与 γ 测井在砂岩型铀矿钻孔的对比[J]. 宇航计测技术,2016,36(3):68-73.
 Liang Y S, Guang S B, Feng L L I. Comparisons of prompt fission neutron logging and gamma logging applied in sandstone-type uranium ore drill holes [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement,2016,36(3):68-73.
- [20] 谢新宇,许文军,何昌鸿. 瞬发裂变中子测井中水层厚度影响的研究[J].西部探矿工程,2019,31(4):121-122.
 Xie X Y,Xu W J,He C H. Study of the effect of water layer thickness in transient fission neutron logging[J]. West China Exploration Engineering,2019,31(4):121-122.
- [21] Wang D, Zhang C F, Li B J, et al. Simulation of suppression of gamma sensitivity of fission electron-collection ' neutron detector [J]. Chinese Physics Letters, 2016, 33(5):30-33.
- [22] 张龙,陈振宇,李胜荣,等.粤北棉花坑(302)铀矿床围岩蚀变 分带的铀矿物研究[J].岩石学报,2018,34(9):2657-2670.

Zhang L, Chen Z Y, Li S R, et al. Characteristics of uranium minerals in wall-rock alteration zones of the Mianhuakeng (No. 302) uranium deposit, northern Guangdong, South China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(9):2657–2670.

- [23] 李英宾,李毅,魏滨,等. CSAMT 和浅层地震在松辽盆地西南部 铀矿勘查中的应用[J]. 地质与勘探,2019,55(6):1442-1451.
 Li Y B,Li Y,Wei B, et al. Application of CSAMT and shallow seismic reflection to uranium exploration in south western Songliao Basin[J]. Geology and Exploration,2019,55(6):1442-1451.
- [24] 郑欣,汪永宏. 我国沉积盆地中油气藏与砂岩型铀矿"同盆共存"关系研究[J]. 地下水,2019,41(5):107-109,176.
 Zheng X, Wang Y H. The relationship study between oil and gas reservoirs and sandstone-type uranium deposits in the same sedimentary basin in China [J]. Ground Water, 2019,41(5):107-109,176.
- [25] 喻翔,汪硕,胡英才,等. 二连盆地北部玄武岩覆盖区电性结构 与铀成矿环境研究[J]. 物探与化探,2022,46(5):1157-1166. Yu X, Wang S, Hu Y C, et al. Study on electrical structure and uranium metallogenic environment of basalt-covered area in the northern Erlian Basin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022,46(5):1157-1166.
- [26] Zhang X A, Yang Z C, Tang B, et al. Distinguishing oil and water layers in a cracked porous medium using pulsed neutron logging data based on Hudson's crack theory[J]. Geophysical Journal International, 2018, 213(3):1345-1359.
- [27] Zhang X A, Yang Z C, Li X Y. Simulation of multi-angle fractured uranium deposits by neutron logging [J]. Geophysical Journal International, 2020, 223(3):2027-2037.

Simulation of epithermal neutron migration in fractured sandstone-hosted uranium deposits with variable porosities and dip angles

ZHANG Xue-Ang¹, YANG Zhi-Chao², LI Xiao-Yan¹, DONG Li-Yuan¹

(1. School of Nuclear Science and Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. School of Geophysics and Measurement-control Technology, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: Uranium ores, as a significant clean energy source, have been highly anticipated in the field of geological exploration. However, fractured sandstone-hosted uranium deposits (pore-fissure type uranium deposits) face challenges in exploration because of their complex structures. Therefore, to quantify such uranium deposits, it is necessary to investigate the response relationships between the occurrence state and content of uranium and the parameters of geological structures (pores and fissures). This study simulated the neutron migration in the pore-fissure type sandstone-hosted uranium deposits using the prompt neutron log technology and the directive probability simulation algorithm. Through an ideal model, this study focused on the effects of fracture structures on neutron logs. The results are as follows: (1) The effects of fissure porosity on epithermal neutron migration intensified significantly with an increase in porosity, accompanied by substantially enhanced log response sensitivity; (2) The epithermal neutron accumulation peaks exhibit a multi-point distribution in a nearly vertical fissure environment; (3) The fracture environment with high dip angles manifested the most significant attenuation effect on the neutron energy and time spectrum peaks, and the neutron time spectrum peaks tended to move to the low-dip-angle interval with an increase in porosity; (4) In the fracture environment with variable dip angles, there was a linear relationship between the porosity and the epithermal neutron count ratio, which can assist in correcting the uranium content range in fracture environments at specific angles. The above results can provide a theoretical reference for the exploration of fractured sandstone-hosted uranium deposits and other uranium deposits in a complex environment and improve the quantitative accuracy of uranium deposits. **Key words**: pore-fissure structure; neutron log; uranium deposit; numerical simulation; fracture with variable dip angles