

https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.521



# 井周压裂裂缝 Gd 示踪的热中子探测方法研究

张 锋<sup>1,2</sup>, 陈 前<sup>1</sup>, 刘军涛<sup>1,2</sup>, 张泉滢<sup>1,2</sup>, 李向辉<sup>3</sup>, 迪永周<sup>3</sup>

1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580  
2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东青岛 266071  
3. 河南省科学院同位素研究所有限责任公司, 河南郑州 450000

**摘要:**水力压裂是提高非常规油气开采的重要手段, 支撑剂位置及裂缝参数是评价压裂效果的重要因素. 提出了以 Gd 作为示踪剂探测热中子来评价井周裂缝方法, 将热中子双组扩散理论与数值模拟方法相结合, 定义热中子变化参数  $W_{TN}$  来指示裂缝宽度, 并分析了岩性、井眼尺寸、地层孔隙度、地层水矿化度及含油饱和度对  $W_{TN}$  的影响. 模拟结果表明: 随着裂缝宽度的增加,  $W_{TN}$  先呈指数增加后趋于平缓; 而地层孔隙度越大、地层水矿化度越小,  $W_{TN}$  越大; 井眼尺寸和地层含油饱和度的变化对  $W_{TN}$  影响较小. 利用蒙特卡罗方法建立了地层孔隙度、矿化度石灰岩地层压裂前后的数值计算模型, 模拟研究了不同深度地层的热中子分布, 得到了近远探测器热中子计数 FAR、NEAR 和  $W_{TN}$  的响应曲线, 最终处理裂缝参数结果与设定模型相吻合, 验证了利用 Gd 示踪热中子探测方法可以来评价井周裂缝.

**关键词:**水力压裂; 裂缝宽度; 钆示踪; 热中子; 蒙特卡罗模拟程序; 地球物理.

中图分类号: P631.8

文章编号: 1000-2383(2018)10-3799-10

收稿日期: 2017-04-23

## Study of a Method to Evaluate Hydraulic Fracturing near Wellbore Using Thermal Neutron Detection Based on Gd Tracer

Zhang Feng<sup>1,2</sup>, Chen Qian<sup>1</sup>, Liu Juntao<sup>1,2</sup>, Zhang Quanying<sup>1,2</sup>, Li Xianghui<sup>3</sup>, Di Yongzhou<sup>3</sup>

1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China  
2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China  
3. Isotope Research Institute of Henan Academy of Sciences Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China

**Abstract:** The proppant placement and fracture geometric parameters evaluation in hydraulic fractures are essential to optimize the stimulation strategy in unconventional oil and gas production. A new method adopting Gd as a tracer to detect hydraulic fracture near wellbore is proposed in this paper. Based on the numerical simulation and thermal neutron diffusion theory, the induced fracture width evaluation parameter  $W_{TN}$  is defined. Then, the effect of lithology, porosity, borehole diameter, salinity and oil saturation to determination of fracture width is analyzed. The results indicate that  $W_{TN}$  exponentially increases before leveling off with the increases of induced fracture width. The larger the porosity, and the smaller the formation water salinity, the smaller the  $W_{TN}$  is. The dimension of hole and oil saturation have little effect on  $W_{TN}$ . Monte Carlo method is employed to build formation model before and after hydraulic fracturing and thermal neutron distribution in strata of different depths is simulated. Also, the response curves of thermal neutron count NEAR, FAR and  $W_{TN}$  are obtained. It is found that the fracture parameter results are consistent with the setting model, showing that the thermal neutron detection method based on Gd tracing

**基金项目:**国家自然科学基金项目(Nos.41374125,41574119);国家重大油气专项(No.2011ZX0520-002);中央高校基本科研业务费专项(No.15CX06008A).

**作者简介:**张锋(1970-),男,教授,博士,从事核测井方法、核测井数据处理及蒙特卡罗模拟研究. ORCID: 0000-0003-2101-1545.  
E-mail: zhfy\_cn@upc.edu.cn

**引用格式:**张锋, 陈前, 刘军涛, 等, 2018. 井周压裂裂缝 Gd 示踪的热中子探测方法研究. 地球科学, 43(10): 3799-3808.

can be used to evaluate the fracture of near wellbore.

**Key words:** hydraulic fracturing; fracture width; gadolinium tracer; thermal neutron; Monte Carlo N-Particle(MCNP); geophysics.

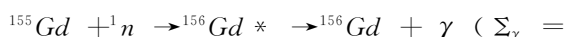
## 0 引言

水力压裂相关技术(康永尚等, 2016; 张亮等, 2016)是非常规油气开采的重要手段, 微地震井间监测、电成像及声波测井技术在压裂评价方面发挥了重要作用(易新明等, 2009; 聂昕等, 2012; 刘振武等, 2013; 王翠丽等, 2014). 同时放射性示踪探测技术也被应用于裂缝评价. 利用不同的物质作为放射性示踪剂, 通过探测伽马射线变化来确定裂缝高度、支撑剂分布及地层压裂的有效性, 但示踪剂放射性问题限制了技术的推广应用(Silber *et al.*, 2003; Espino *et al.*, 2012; Torres *et al.*, 2012; Salman *et al.*, 2014). 近年来, 有学者将 Gd 氧化物作为示踪剂与石英砂支撑剂烧结在一起, 通过监测压裂前后补偿中子测井的热中子计数率曲线重叠来定性评价裂缝的高度及压裂效果(McDaniel *et al.*, 2007, 2009; Duenckel *et al.*, 2014). 另外以  $Gd_2O_3$ 、 $Sm_2O_3$  和  $B_4C$  作为示踪剂, 利用脉冲中子俘获(PNC)测井的宏观俘获截面来定性评价裂缝宽度和高度(Han *et al.*, 2014; Saldungaray *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2015; Bhatia and Pande, 2016; Ortiz *et al.*, 2016).

以 Gd 等非放射性核素作为示踪剂通过中子活化方法来评价井周压裂效果, 有效解决了操作工艺和环境安全问题, 具有较好的前景. 现有中子监测方法仅通过对比压裂前、后热中子计数变化来定性判断裂缝, 而压裂前后热中子分布与裂缝几何尺寸、示踪剂含量以及孔隙度、地层水矿化度、井眼尺寸等因素关系未进行深入研究. 本文从中子双组扩散理论入手, 得到了压裂前后热中子分布与地层属性及压裂参数的关系, 利用蒙特卡罗方法模拟研究了不同井眼和地层条件下热中子对裂缝参数变化的响应规律, 建立定量确定裂缝宽度的评价模型, 为钆示踪热中子探测进行井周压裂评价提供研究基础.

## 1 钆示踪热中子探测原理

根据核素中子属性,  $^{155}Gd$  和  $^{157}Gd$  核素具有较高的热中子俘获截面, 同时放出不同能量的伽马射线.



60 900b,  $E_\gamma = 199.213 \text{ keV}$ ),

$$^{157}Gd + ^1_0n \rightarrow ^{158}Gd^* \rightarrow ^{158}Gd + \gamma (\Sigma_\gamma = 2.54 \times 10^5 \text{ b}, E_\gamma = 1.186, 7.94 \text{ MeV}).$$

利用 Gd 为示踪剂, 通过与石英砂混合烧结合成支撑剂, 在水力压裂后填充到裂缝中以防裂缝闭合. 利用  $^{241}Am$ -Be 中子源产生的快中子进入地层, 经慢化变成热中子, 然后与地层元素原子核发生俘获反应, 显然通过探测热中子变化就可以反映井周裂缝及支撑剂分布.

根据公式:  $L_d^2 = D/\Sigma$ , 且在源距  $r$  较大时,  $L_f > L_d$ , 忽略后面俘获项(黄隆基, 1985), 则有

$$\varphi(r) = \frac{QL_d^2}{4\pi Dr(L_f^2 - L_d^2)} \cdot e^{-\frac{r}{L_f}} = \frac{Q}{4\pi \Sigma r(L_f^2 - L_d^2)} \cdot e^{-\frac{r}{L_f}}, \quad (1)$$

式中  $L_d$  表示地层热中子扩散长度,  $L_f$  表示快中子的减速长度,  $Q$  为中子源强,  $D$  为热中子扩散系数,  $\Sigma$  为地层宏观俘获截面.

在测井仪器中一般采用  $^3He$  热中子探测器, 则热中子计数可以利用反应率近似表示, 即与热中子通量转化关系表示为:

$$N(r) = \varphi(r) \cdot \Sigma_{He}, \quad (2)$$

式中  $\Sigma_{He}$  表示热中子与探测器中  $^3He$  的宏观反应截面.

压裂前后同一探测器的热中子计数分别为:

$$N_0(r) = \frac{Q\Sigma_{He}}{4\pi \Sigma_0 r(L_f^2 - L_{d0}^2)} \cdot e^{-r/L_f}, \quad (3)$$

$$N(r) = \frac{Q\Sigma_{He}}{4\pi \Sigma r(L_f^2 - L_d^2)} \cdot e^{-r/L_f}, \quad (4)$$

式中  $\Sigma_0$ ,  $\Sigma$  和  $L_{d0}$ ,  $L_d$  分别表示压裂前后地层宏观俘获截面和热中子扩散长度.

定义参数  $W_{TN}$  为压裂前后热中子计数差值与压裂前热中子计数的比, 即

$$W_{TN} = \frac{N_0(r) - N(r)}{N_0(r)} \times 100\% = [1 - \frac{\Sigma_0(L_f^2 - L_{d0}^2)}{\Sigma(L_f^2 - L_d^2)}] \times 100\%. \quad (5)$$

当地层被压裂后形成裂缝并充填含有 Gd 的压裂砂时, 裂缝宽度  $d$  的大小决定了地层中 Gd 的含量, 裂缝越宽, Gd 的含量越大, 进而使地层宏观俘获截面  $\Sigma$  增大, 扩散长度  $L_d$  减小, 因此裂缝宽度的变化可以用参数  $W_{TN}$  来表征.

此外,  $\Sigma$ ,  $\Sigma_0$  和  $L_f$  大小决定于地层孔隙度  $\varphi$ , 而扩散长度  $L_{d0}$  和  $L_d$  与地层水矿化度  $C_w$ 、含油饱和度  $S_o$  及地层岩性(Lithology)有关, 井眼尺寸  $B_d$  会对  $L_f$  产生影响, 因此  $W_{TN}$  还会受地层孔隙度  $\varphi$ 、地层水矿化度  $C_w$ 、井眼直径  $B_d$ 、地层岩性 Lith 和地层含油饱和度  $S_o$  的影响。裂缝热中子宽度指示参数  $W_{TN}$  是裂缝宽度  $d$ 、地层的孔隙度  $\varphi$ 、地层水矿化度  $C_w$ 、井眼直径  $B_d$ 、地层岩性及地层含油饱和度  $S_o$  的函数, 表示为:

$$W_{TN} = f(d, \varphi, C_w, B_d, \text{Lith}, S_o). \quad (6)$$

显然要定量确定裂缝宽度  $d$ , 需要开展  $W_{TN}$  与裂缝宽度  $d$ 、地层孔隙度  $\varphi$ 、地层水矿化度  $C_w$ 、井眼直径  $B_d$ 、地层岩性 Lith 及地层含油饱和度  $S_o$  的函数响应关系研究。

## 2 蒙特卡罗模拟

蒙特卡罗数值模拟方法已经在中子孔隙度、元素测井仪器设计及数据处理等方面得到广泛应用(张锋等, 2013; Liu *et al.*, 2014, 2015; 袁超等, 2014)。利用蒙特卡罗数值模拟方法建立不同孔隙度、地层水矿化度及井眼尺寸条件的裂缝地层模型, 模拟了压裂前、后地层热中子的分布, 研究了热中子计数的响应规律, 建立了利用热中子计数差及校正的裂缝宽度评价模型。

### 2.1 计算模型

建立地层压裂模型, 如图 1 所示, 地层为致密低孔的碳酸岩及压裂裂缝组成, 井眼中包括水泥环、套管及水, 中子测井仪器贴井壁测量。本次研究中只考虑压裂垂直裂缝, 裂缝中充填含 Gd 的支撑剂, 保持

裂缝不闭合形成油气导流通道。

具体参数如下: 地层径向半径为 10~70 cm, 高 140 cm, 地层骨架为碳酸钙, 密度为 2.71 g/cm<sup>3</sup>; 井眼直径为 20 cm, 井眼中装有套管, 套管与地层之间有水泥环进行胶结, 采用补偿中子仪器模型, 仪器直径为 49 mm, 源为 Am-Be 中子源, 长短源距分别为 55 和 32 cm; 裂缝中充填含 Gd 的支撑剂, Gd 的含量为 0.4%。假设裂缝支撑剂充填度为 100%, 仪器正对裂缝方向。

### 2.2 压裂前后热中子分布谱模拟

建立上述计算模型, 裂缝中充填含有 Gd 的支撑剂, 地层孔隙度为 5%, 压裂后裂缝宽度为 0.8 cm 分别模拟地层压裂前、后的热中子分布, 得到近探测器处热中子分布结果如图 2 所示。

地层在压裂前, 热中子分布在径向上呈同心圆状对称分布; 而压裂地层由于裂缝中填充带有高热中子俘获 Gd 同位素的支撑剂, 在裂缝处热中子的俘获截面增加, 热中子吸收能力增强, 裂缝附近的热中子被强烈吸收, 导致裂缝处的热中子数量减小, 热中子分布  $y=0$  处出现凹陷, 结合公式(5)分析, 压裂后地层中 Gd 的增加会使热中子计数相对变化量增加, 导致压裂地层热中子分布与未压裂地层明显不同。因此当支撑剂中含有高热俘获截面的 Gd 时, 热中子的信息可以反映地层裂缝信息。

## 3 热中子变化参数 $W_{TN}$ 响应模拟

### 3.1 热中子变化参数 $W_{TN}$ 与裂缝宽度的关系

研究裂缝宽度对热中子的响应规律, 在图 1 计算模型的基础上, 地层孔隙度为 3%, 地层水矿化度

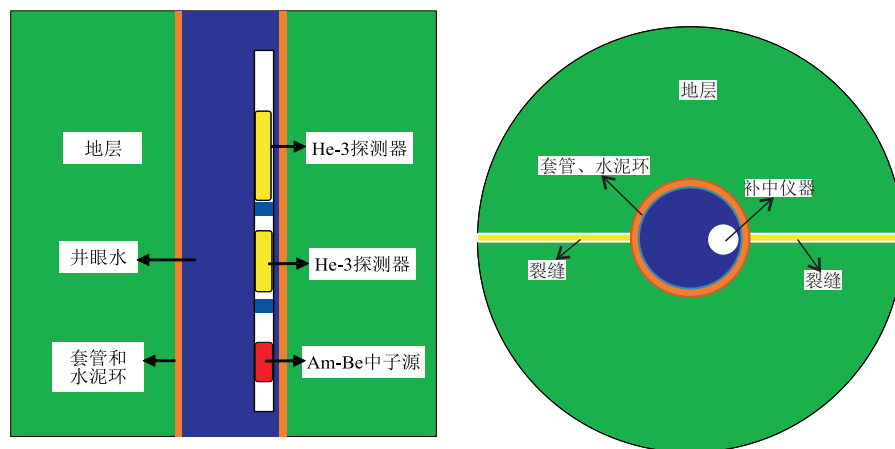


图 1 计算模型

Fig.1 Schematic diagram of Monte Carlo simulation model

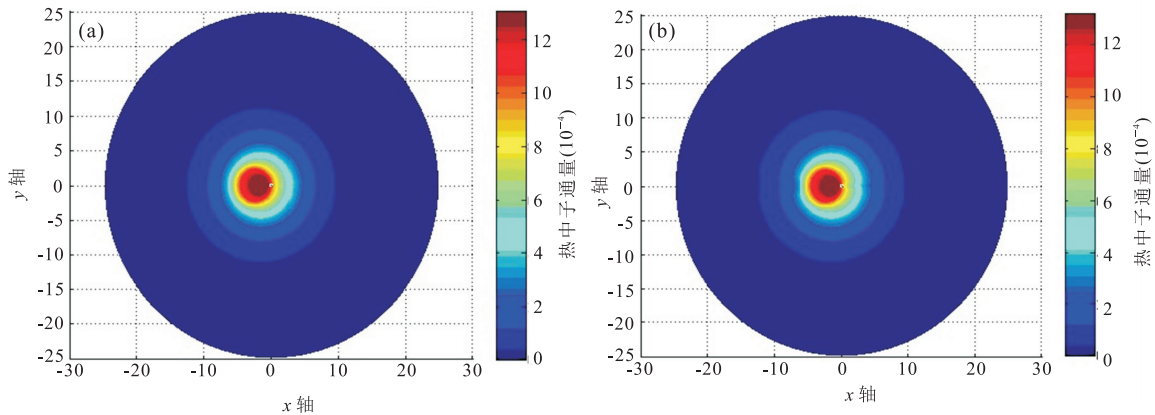


图 2 热中子径向分布

Fig.2 Thermal neutron radial distribution

a.未压裂地层;b.裂缝宽度为 0.8 cm 地层

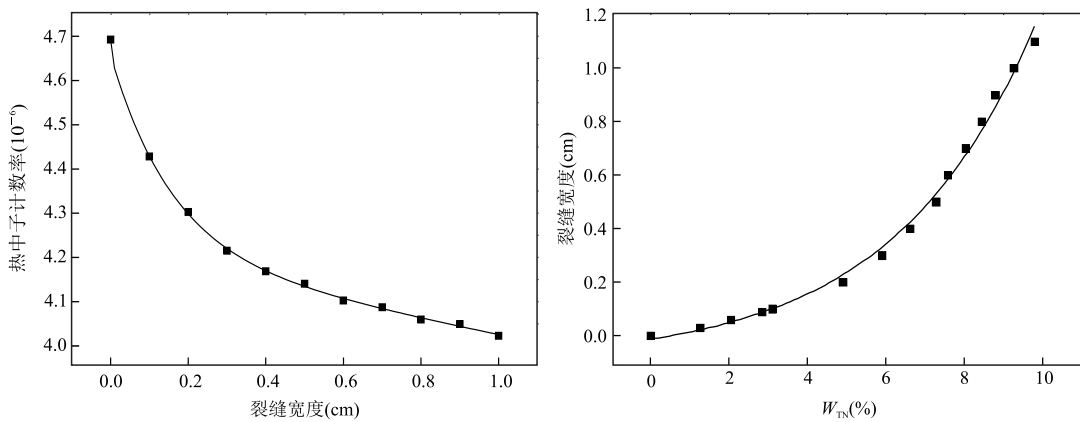


图 3 不同裂缝宽度条件下探测器热中子及  $W_{TN}$  的响应关系

Fig.3 Response curves of thermal neutron and  $W_{TN}$  under different fracture width

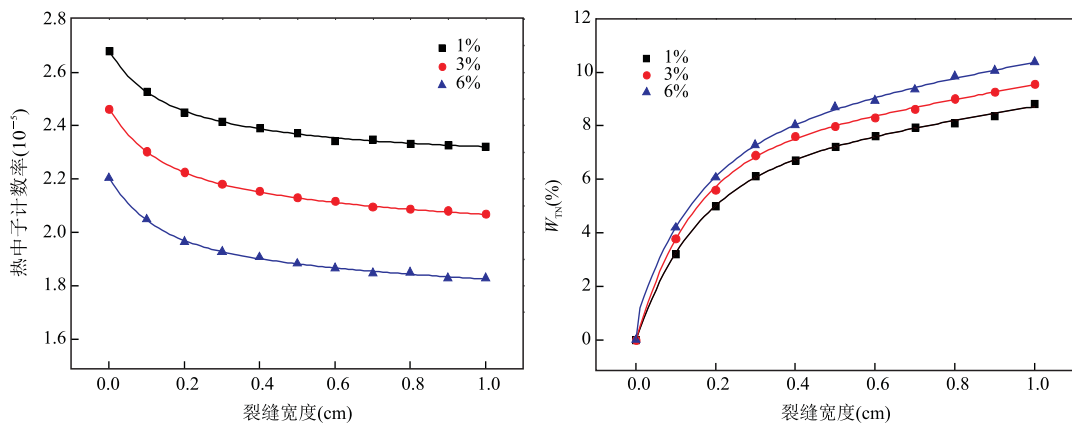


图 4 不同孔隙度条件下热中子计数率及  $W_{TN}$  对裂缝宽度的响应

Fig.4 The response curves of the thermal neutron count rate and the  $W_{TN}$  to fracture width under different porosity

$5\ 000 \times 10^{-6}$ , 改变裂缝宽度, 宽度变化范围为 0 ~ 1.0 cm, 变化间隔为 0.1 cm, 记录探测器热中子计数, 得到探测器热中子计数率及压裂裂缝热中子宽度评

价参数  $W_{TN}$  与裂缝宽度的响应关系结果如图 3 所示。

由图 3 可知, 随着裂缝宽度的增加, 探测器热中子计数率降低, 这是因为裂缝宽度增加, 在 Gd 的含

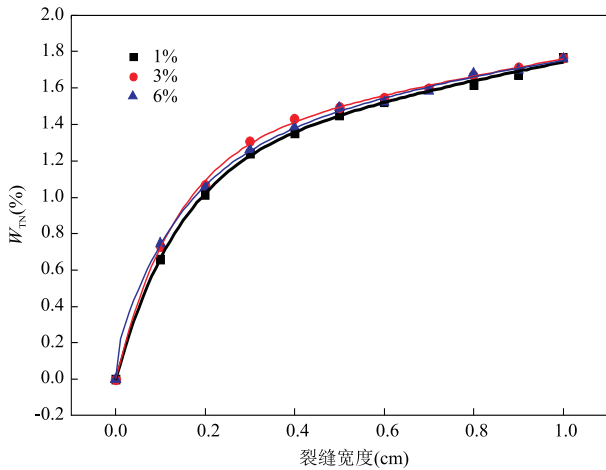


图 5 不同孔隙度的  $W_{TN}$  校正后与裂缝宽度的关系

Fig.5 The relationship between the corrected  $W_{TN}$  of different porosity and the fracture width

量不变条件下,裂缝中 Gd 的数量增加,裂缝中支撑剂对热中子的俘获增强,地层中的热中子数量减少,探测到的热中子减少,随裂缝宽度的增加,裂缝热中子宽度评价参数  $W_{TN}$  增大.

利用图 3 数据可以得到裂缝热中子宽度评价参数  $W_{TN}$  和裂缝宽度  $d$  的关系为:

$$d = 0.0836 \cdot e^{W_{TN}/0.03618} - 0.09655. \quad (7)$$

由此可知,裂缝宽度  $d$  和裂缝热中子宽度评价参数  $W_{TN}$  近似呈指数函数变化,公式中常数与地层孔隙度进而地层水矿化度有关.

### 3.2 地层孔隙度对热中子变化参数 $W_{TN}$ 的影响

地层孔隙中含有的水或油气这些物质中的 H 元素对快中子有显著的减速效果,使快中子减速形成热中子,孔隙度对地层中的热中子数量变化有影响.建立图 1 所示的仪器地层模型,选取 3 种地层孔

隙度分别为 1%、3% 和 6%,在此基础上改变裂缝的宽度,宽度变化范围为 0~1 cm,间隔 0.1 cm,记录探测器热中子计数率,得到探测器热中子计数率及压裂裂缝热中子宽度评价参数  $W_{TN}$  随裂缝宽度变化的关系,结果如图 4 所示.

由图 4 可知,横向上随裂缝宽度的增加探测器热中子计数率降低,纵向上,相同裂缝宽度的条件下,孔隙度越大,计数率越低,这是因为孔隙度增加,地层中的热中子计数降低,导致图 4 中的压裂裂缝热中子宽度评价参数  $W_{TN}$  增加,再利用  $W_{TN}$  确定裂缝宽度时,孔隙度的影响不能忽略,必须进行校正.

利用补偿中子近远探测器计数率比值来对孔隙度进行校正,则校正后的值  $W_{TNC}$  表示为:

$$W_{TNC} = \frac{W_{TN}}{N_S/N_I}. \quad (8)$$

利用公式(8)对图 4 中数据进行校正,结果如图 5 所示.从图中看出,校正后不同孔隙度地层热中子宽度评价参数  $W_{TN}$  曲线基本重合,消除了地层孔隙度的影响.

### 3.3 地层矿化度对热中子变化参数 $W_{TN}$ 的影响

孔隙中地层水的矿化度不同导致地层水中的氯离子的数量不同,而氯离子对热中子具有很强的俘获作用,进而会影响地层中热中子的数量变化.在图 1 模型的基础上,地层孔隙度设为 10%,选取 4 种地层水矿化度,分别为  $0$ 、 $50\,000 \times 10^{-6}$ 、 $100\,000 \times 10^{-6}$  和  $150\,000 \times 10^{-6}$ ,改变地层裂缝宽度为 0~1.0 cm,变化间隔为 0.2 cm,记录探测器热中子计数率,得到探测器热中子计数率及裂缝热中子宽度评价参数  $W_{TN}$  随裂缝宽度变化的关系,结果如图 6 所示.

由图 6 可知,当地层孔隙度及裂缝宽度一定时矿化度越高,热中子计数率越低,当地层孔隙度及裂

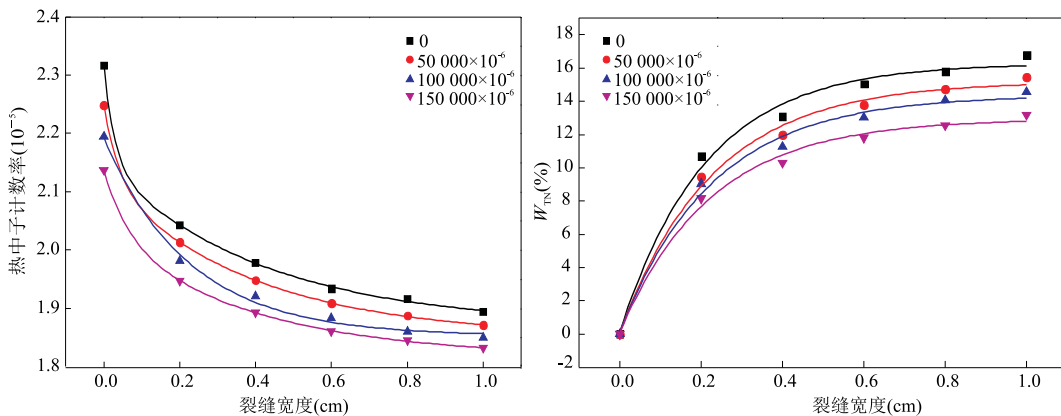


图 6 不同矿化度条件下热中子及  $W_{TN}$  对裂缝宽度的响应

Fig.6 The response of thermal neutron and  $W_{TN}$  to fracture width under different salinity

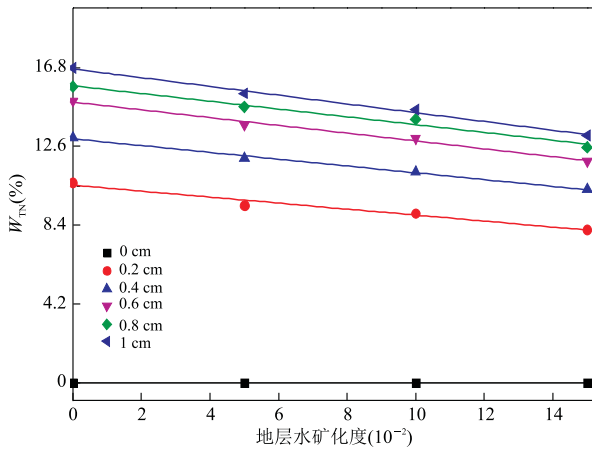


图 7 不同裂缝宽度条件下  $W_{TN}$  对地层水矿化度的响应关系  
Fig.7 The  $W_{TN}$  of salinity correction chart

缝宽度一定时矿化度越高,  $W_{TN}$  越小. 地层水矿化度的增加, 会引起地层对热中子的俘获增加, 地层中的热中子计数减小, 导致压裂前后热中子的差值减小进而影响到  $W_{TN}$  的大小. 在利用  $W_{TN}$  确定裂缝宽度时, 需要对地层水矿化度进行校正. 不同裂缝宽度条件下  $W_{TN}$  随地层水矿化度的响应关系如图 7 所示.

由图 7 可知不同裂缝宽度条件下, 地层水矿化度的响应公式近似平行, 利用数值拟合可以得到的地层水矿化度校正公式为:

$$W_{TNC} = (1 - 72.26 \cdot C_w) \cdot \exp(C_w) [W_{TN} + (d - a \cdot C_w + b \cdot C_w^2 - c \cdot C_w^3)], \quad (9)$$

公式(9)中  $a$ 、 $b$ 、 $c$  和  $d$  为常数, 其中  $a = -1.93 \times 10^{-4}$ 、 $b = 2.2126 \times 10^{-5}$ 、 $c = 6.30113 \times 10^{-7}$ 、 $d = -0.00144$ , 在公式中地层水矿化度  $C_w$  的单位为  $10^{-1}$ .

### 3.4 井眼尺寸对热中子变化参数 $W_{TN}$ 的影响

地层孔隙度设为 10%, 选取 3 种井眼直径分别

为 18、20 和 24 cm, 改变地层裂缝宽度为 0~1.0 cm, 变化间隔为 0.2 cm, 记录探测器热中子计数率, 得到探测器热中子计数率及裂缝热中子宽度评价参数  $W_{TN}$  随裂缝宽度变化的关系.

由图 8 可知, 裂缝宽度一定时, 井眼直径增大, 热中子计数降低, 这是井眼直径增大, 井眼中的水增加, 导致热中子减少, 不同的井眼直径,  $W_{TN}$  随裂缝宽度的增加而增加且曲线基本重合, 说明井眼直径的变化对地层裂缝宽度的确定没有影响, 在考虑裂缝宽度确定时不用考虑井眼直径变化的影响.

### 3.5 地层岩性对热中子变化参数 $W_{TN}$ 的影响

地层孔隙度设为 10%, 选取三种岩性分别为砂岩、石灰岩和白云岩, 改变地层裂缝宽度为 0~1.0 cm, 变化间隔为 0.2 cm, 记录探测器热中子计数率, 得到探测器热中子计数率及裂缝热中子宽度评价参数  $W_{TN}$  随裂缝宽度变化的关系.

由图 9 可知, 裂缝宽度相同时, 不同岩性条件下近探测器记录的热中子计数率不同, 其中砂岩计数率最高, 白云岩次之, 石灰岩最低. 随裂缝宽度的增加, 岩性对裂缝热中子评价参数  $W_{TN}$  的影响变大.

### 3.6 含油饱和度对热中子变化参数 $W_{TN}$ 的影响

地层孔隙度设为 10%, 岩性选取碳酸岩, 选取 3 种裂缝宽度分别为 0.2、0.4 和 0.8 cm, 改变地层含油饱和度, 油的密度为  $0.82 \text{ g/cm}^3$ , C : H 比为 0.8567 : 0.134, 变化范围为 0~50%, 变化间隔为 5%, 记录探测器热中子计数率, 得到探测器热中子计数率及裂缝热中子宽度评价参数  $W_{TN}$  随含油饱和度变化的关系.

由图 10 可知, 当裂缝宽度一定时, 热中子计数随含油饱和度的增加而减小, 裂缝评价参数在小范围内波动近似不变, 因此含油饱和度对裂缝宽度确

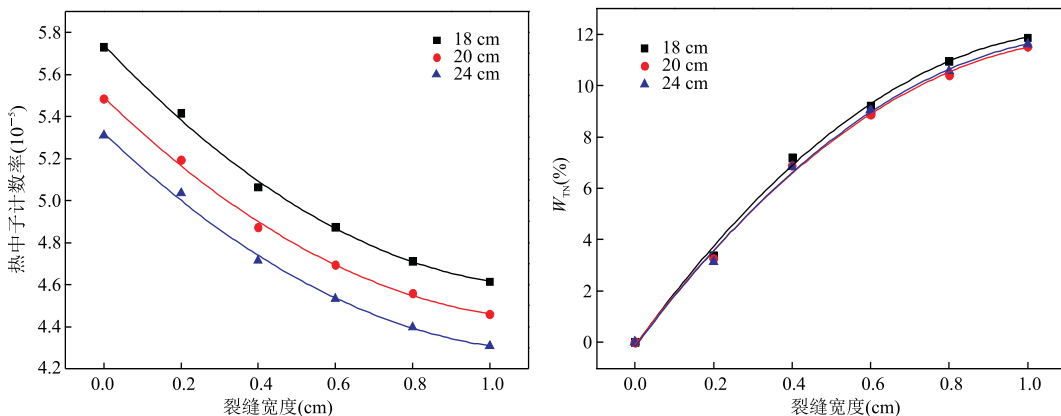


图 8 不同井眼尺寸条件下热中子计数率及  $W_{TN}$  对裂缝宽度的响应曲线

Fig.8 The response curves of thermal neutron count rate and  $W_{TN}$  to fracture width under different borehole size

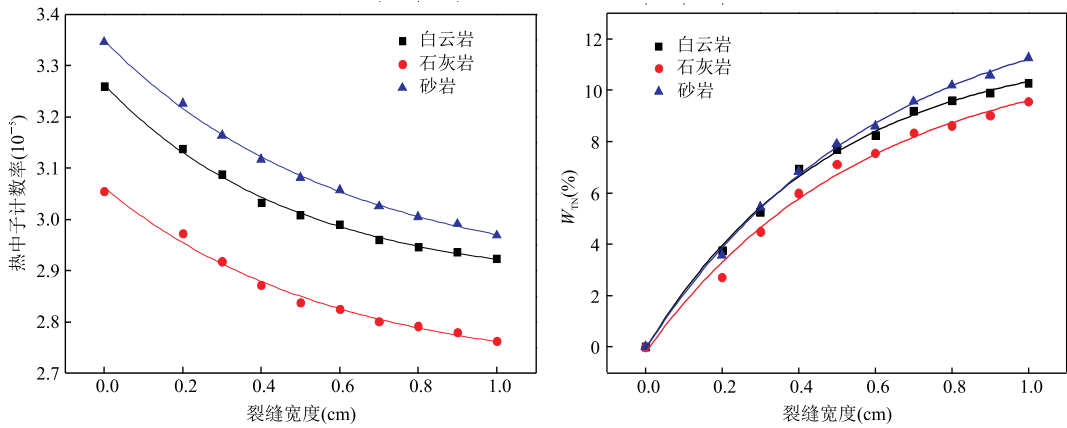


图 9 不同地层岩性条件下热中子计数率及  $W_{TN}$  对裂缝宽度的响应曲线

Fig.9 The response curves of thermal neutron count rate and  $W_{TN}$  to fracture width under different Lithology

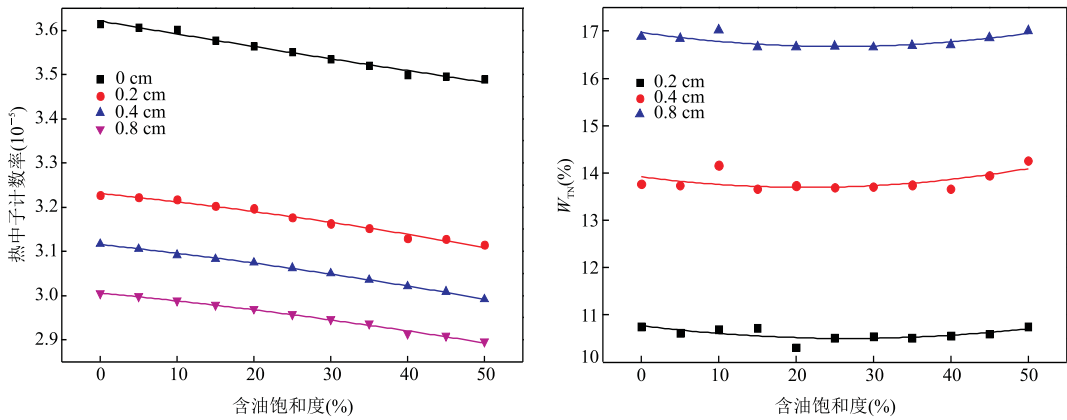


图 10 不同裂缝宽度条件下热中子计数率及  $W_{TN}$  对含油饱和度的响应曲线

Fig.10 The response curves of thermal neutron count rate and  $W_{TN}$  to oil saturation under different fracture width

定的影响可以忽略不计。

综合以上因素对裂缝的响应,孔隙度、地层水矿化度对裂缝宽度的确定有较大的影响,最终确定地层裂缝宽度时,需要考虑孔隙度和地层水矿化度的影响,以石灰岩为例,利用模拟公式(7)结合孔隙度校正公式(8)及地层水矿化度校正公式(9)分别对孔隙度及地层水矿化度校正进而确定裂缝的宽度.最终裂缝宽度确定的表达式为:

$$D = 0.0836 \cdot e^{(1-72.26 \cdot C_w) \cdot \exp(C_w)} \cdot \left[ \frac{W_{TN} \cdot N_f}{0.03618 \cdot N_s} + (d - a \cdot C_w + b \cdot C_w^2 - c \cdot C_w^3) \right] - 0.09655, \quad (10)$$

式中 a, b, c, d 值和公式 9 中相同。

### 4 模拟实例验证

建立补偿中子测井仪器模型,采用 Am-Be 中子源和两个 He-3 探测器在压裂前、后的井中进行测

量.图 11 第一道为地层的组成,模拟全井段长 3.6 m,地层骨架主要成分为碳酸盐,地层设置 4 种不同孔隙度分别为 20%,3%,8%和 5%,地层压裂以后裂缝孔隙度统一设置为 20%,第一个压裂井段位置为 50~100 cm,压裂宽度为 0.4 cm,压裂前地层孔隙度为 3%,矿化度为  $5000 \times 10^{-6}$ ;第二段压裂位置为 160~210 cm,压裂宽度为 0.8 cm,压裂前地层孔隙度为 8%,矿化度为  $5000 \times 10^{-6}$ ;第三段压裂位置为 240~280 cm,压裂宽度为 0.4 cm,压裂前地层孔隙度为 5%,矿化度为  $50000 \times 10^{-6}$ ;第四段压裂位置为 310~350 cm,压裂宽度为 0.8 cm,压裂前地层孔隙度为 5%,矿化度为  $50000 \times 10^{-6}$ .

仪器测量时由井底向井口提升,记录近远探测器热中子计数,得到的结果如图 11 所示.图 11 中, Near\_B、FAR\_B 和 RATIO\_B 表示压裂前近远探测器热中子的计数及比值, Near\_A、FAR\_A 和 RATIO\_A 表示压裂后近远探测器热中子的计数及

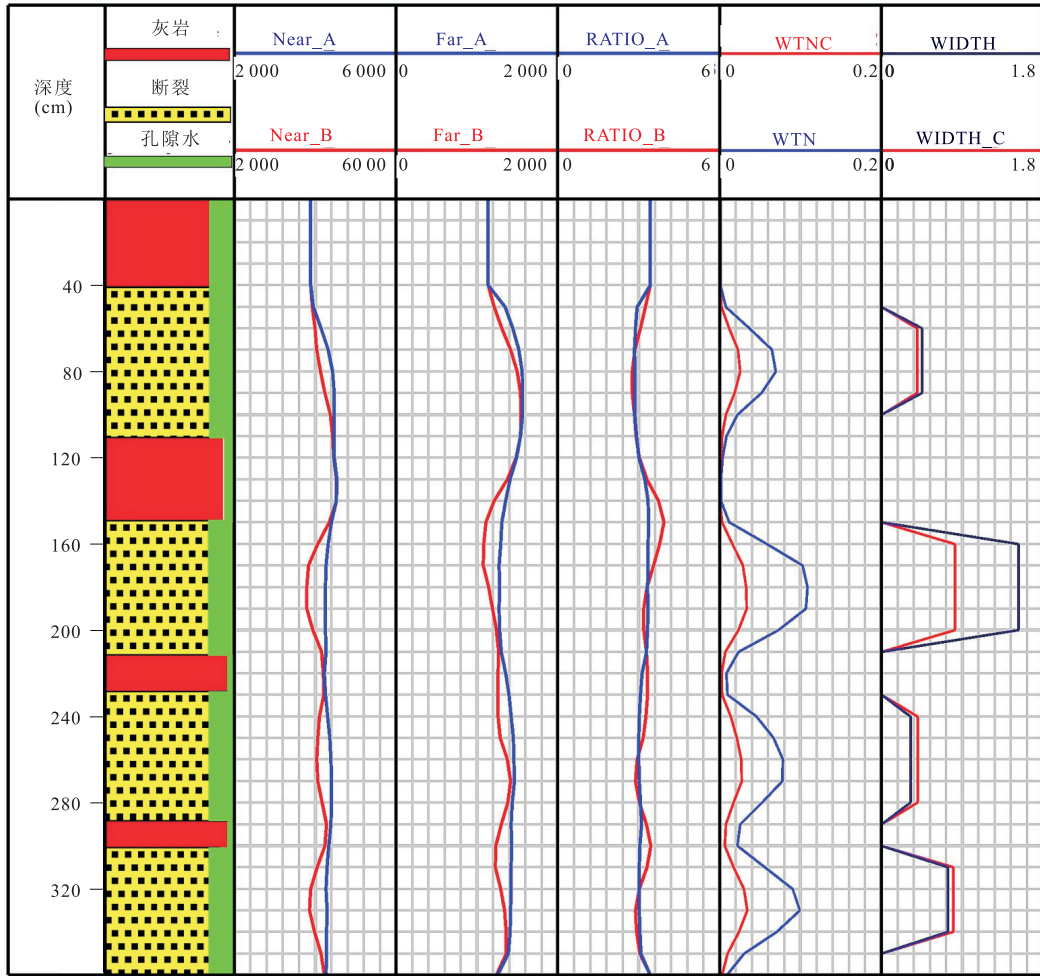


图 11 实例模拟曲线

Fig.11 The simulation of measured curve

比值,  $W_{TN}$  和  $WTNC$  表示  $W_{TN}$  校正前后的值,  $WIDTH$  和  $WIDTH\_C$  表示裂缝宽度校正前后的值. 压裂前后, 近远探测器热中子计数存在明显的幅度差, 这是由于裂缝中含有 Gd, 地层对热中子的俘获能力增强, 导致热中子计数减小, 出现负幅度差; 近远探测器比值会很大程度上削弱俘获作用的影响, 而利用 Gd 示踪评价裂缝时, 利用的恰是 Gd 对热中子超强俘获作用, 在裂缝的一些地方, 压裂前后近远探测器计数比没有明显的差异或者差异很小.  $W_{TN}$  为影响校正前压裂裂缝热中子指示参数,  $WTNC$  为  $WTN$  经过孔隙度及矿化度校正之后的值, 利用校正前后的  $W_{TN}$  计算压裂裂缝宽度, 可以从图 11 看出, 蓝色曲线为没有经过孔隙度、矿化度校正计算的到的裂缝宽度, 红色为校正之后计算得到的裂缝宽度, 结合之前的模拟分析, 孔隙度的增大会导致计算的裂缝宽度偏大, 矿化度的增大会导致计算的裂缝宽度偏小, 符合分析结果. 裂缝 1 和裂缝

2 的对比显示出孔隙度对裂缝宽度的确定有较大影响, 裂缝 3 和裂缝 4 则反映了地层水矿化度的影响, 在计算裂缝宽度时孔隙度和地层水矿化度的校正是必要的, 利用校正之后的  $WTNC$  结合公式(10)计算得到裂缝的宽度和模型设置的裂缝宽度具有很好的吻合性.

## 5 结论

(1) 从中子扩散方程出发, 推导压裂前后裂缝热中子宽度评价参数  $W_{TN}$  的表达式结合热中子分布图可以分析可知, 裂缝宽度  $d$  的大小决定了地层中 Gd 的含量, 裂缝越宽, Gd 的含量越大, 进而使地层热中子宏观俘获截面  $\Sigma$  增大、扩散长度  $L_d$  减小, 可以利用  $W_{TN}$  来确定裂缝宽度, 此外,  $W_{TN}$  还受到地层的孔隙度、地层水矿化度、井眼直径、地层岩性及



含油饱和度  $S_o$  的影响。

(2) 利用蒙特卡罗方法建立了压裂地层模型,模拟了不同地层孔隙度、地层水矿化度和井眼直径等条件下的热中子分布,得到裂缝宽度参数  $W_{TN}$  随着地层孔隙度增加,热中子计数减小,裂缝热中子宽度评价参数  $W_{TN}$  增加;随着地层水矿化度的增加,地层对热中子的俘获增强,掩盖了 Gd 的影响,导致裂缝热中子宽度评价参数  $W_{TN}$  减小。不同的地层岩性对热中子的俘获能力有差异,进而影响裂缝热中子宽度评价参数  $W_{TN}$ ;井眼直径和含油饱和度  $S_o$  对裂缝热中子宽度评价参数  $W_{TN}$  的影响可以忽略。

(3) 数值算例分析结果表明,热中子探测方法能够有效识别及确定压裂裂缝宽度;计算结果受地层孔隙度、井眼尺寸、地层水矿化度等因素影响,通过影响因素校正提高了裂缝宽度识别的准确度。针对裂缝的方位,支撑剂填充度、提高裂缝宽度确定的灵敏度得等方面的问题将继续进行深入的研究。

## References

- Bhatia, K., Pande, K., 2016. First Application of Nonradioactive Tracer Technology in CSG Unconventional Basin in Central India: Optimization and Evaluation of Fracturing Treatment. SPE Asia Pacific Hydraulic Fracturing Conference, Beijing. <https://doi.org/10.2118/181782-ms>
- Duenckel, R. J., Palisch, T. T., Han Xiaogang, et al., 2014. Environmental Stewardship: Global Applications of a Nonradioactive Method to Identify Proppant Placement and Propped-Fracture Height. SPE Production & Operations, 29(4): 231–242. <https://doi.org/10.2118/166251-pa>
- Espino, R. C. O., Narcizo, O. M., Gutierrez, J. V. U., et al., 2012. Mechanical Divertor in Stimulation Treatments with CT: Evaluated with Radioactive Tracers in Carbonate Reservoirs. SPE/ICoTA Coiled Tubing & Well Intervention Conference and Exhibition, The Woodlands. <https://doi.org/10.2118/152943-ms>
- Han, X., Duenckel, R., Smith, H., et al., 2014. An Environmentally Friendly Method to Evaluate Gravel and Frac Packed Intervals Using a New Non-Radioactive Tracer Technology. Offshore Technology Conference, Houston. <https://doi.org/10.4043/25166-ms>
- Huang, L. J., 1985. Theory of Radioactive Well Logging. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Kang, Y. S., Deng, Z., Wang, H. Y., et al., 2016. Fluid-Solid Coupling Physical Experiments and Their Implications for Fracturing Stimulations of Shale Gas Reservoirs. Earth Science, 41(8): 1376–1383 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.522>
- Liu, J. T., Zhang, F., Gardner, R. P., et al., 2015. A Method to Evaluate Hydraulic Fracture Using Proppant Detection. Applied Radiation and Isotopes, 105: 139–143. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2015.08.003>
- Liu, J. T., Zhang, F., Wang, X. G., et al., 2014. Numerical Study on Determining Formation Porosity Using a Boron Capture Gamma Ray Technique and MCNP. Applied Radiation and Isotopes, 94: 266–271. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2014.08.013>
- Liu, Z. W., Sa, L. M., Wu, F. R., et al., 2013. Micro Seismic Monitor Technology Status for Unconventional Resource E & P and Its Future Development in CNPC. Oil Geophysical Prospecting, 48(5): 843–853 (in Chinese with English abstract).
- McDaniel, R. R., Borges, J., Dakshindas, S. S., 2007. A New Environmentally Acceptable Technique for Determination of Fracture Height and Width. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Anaheim. <https://doi.org/10.2118/109969-ms>
- McDaniel, R. R., Holmes, D. V., Borges, J., et al., 2009. Determining Propped Fracture Width from a New Tracer Technology. SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, Woodlands. <https://doi.org/10.2118/119545-ms>
- Nie, X., Zou, C. C., Yang, Y. Q., et al., 2012. Application of Well Logging to the Evaluation of the Rock Mechanical Properties. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 9(4): 432–437 (in Chinese with English abstract).
- Ortiz, A. C., Hryb, D. E., Martínez, J. R., et al., 2016. Hydraulic Fracture Height Estimation in an Unconventional Vertical Well in the Vaca Muerta Formation, Neuquen Basin, Argentina. SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, The Woodlands. <https://doi.org/10.2118/179145-ms>
- Saldungaray, P., Duenckel, R. J., Palisch, T. T., 2014. Reducing Hydraulic Fracturing HSE Footprint through the Application of a Non-Radioactive Method for Proppant Placement and Propped Fracture Height Assessment. SPE Middle East Health, Safety, Environment & Sustainable Development Conference and Exhibition, Doha. <https://doi.org/10.2118/170333-ms>
- Salman, A., Kurtoglu, B., Kazemi, H., 2014. Analysis of Chemical Tracer Flowback in Unconventional Reservoirs. SPE/CSUR Unconventional Resources Conference, Calgary. <https://doi.org/10.2118/171656-ms>
- Silber, R., Martin, J., Willis, S., et al., 2003. Comparing Fracture Simulation Design to Radioactive Tracer Field Results: A Case History. SPE Eastern Regional Meeting, Pittsburgh. <https://doi.org/10.2118/84842-ms>
- Torres, F., Reinoso, W., Chapman, M., et al., 2012. Traceable

- Proppant Eliminates Need for Radioactive Detection Material. *Journal of Petroleum Technology*, 64 (6): 33–39. <https://doi.org/10.2118/0612-0033-jpt>
- Wang, C. L., Zhou, W., Li, H. B., 2014. Status and Key Technologies of Shale Oil and Gas Exploration and Development. *Journal of Oil and Gas Technology*, 36(4): 51–55 (in Chinese with English abstract).
- Yi, X. M., Tang, X. P., Liang, T., et al., 2009. Prediction and Assessment of Fracture Height of Hydraulic Fracturing with Logging Data. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 31(5): 21–24 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, C., Li, C. L., Zhou, C. C., et al., 2014. Numerical Simulation of Response Characteristic of Neutron Porosity Logging While Drilling. *Earth Science*, 39(2): 1896–1902 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2014.174>
- Zhang, F., Yuan, C., Liu, J. T., et al., 2013. Numerical Simulation on Pulsed Neutron-Gamma Ray Density Logging Response in Logging while Drilling. *Earth Science*, 38(5): 1116–1120 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2013.110>
- Zhang, L., Luo, J., Cui, G. D., et al., 2016. Mechanisms of Cold Shock during Coalbed Fracturing Assisted with Cryogenic Gases. *Earth Science*, 41(4): 664–674 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.055>
- ### 附中文参考文献
- 黄隆基, 1985. 放射性测井原理. 北京: 石油工业出版社.
- 康永尚, 邓泽, 王红岩, 等, 2016. 流-固耦合物理模拟实验及其对页岩压裂改造的启示. *地球科学*, 41(8): 1376–1383. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.522>
- 刘振武, 撒利明, 巫芙蓉, 等, 2013. 中国石油集团非常规油气微地震监测技术现状及发展方向. *石油地球物理勘探*, 48(5): 843–853.
- 聂昕, 邹长春, 杨玉卿, 等, 2012. 测井技术在页岩气储层力学性质评价中的应用. *工程地球物理学报*, 9(4): 432–437.
- 王翠丽, 周文, 李红波, 2014. 页岩油气勘探开发现状及关键技术. *石油天然气学报*, 36(4): 51–55.
- 易新民, 唐雪萍, 梁涛, 等, 2009. 利用测井资料预测判断水力压裂裂缝高度. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 31(5): 21–24.
- 袁超, 李潮流, 周灿灿, 等, 2014. 随钻中子孔隙度测井响应特性数值模拟. *地球科学*, 39(12): 1896–1902. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2014.174>
- 张锋, 袁超, 刘军涛, 等, 2013. 随钻脉冲中子——伽马密度测井响应数值模拟. *地球科学*, 38(5): 1116–1120. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2013.110>
- 张亮, 罗炯, 崔国栋, 等, 2016. 低温气体辅助煤层气压裂中的冷冲击机理. *地球科学*, 41(4): 664–674. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.055>