

D-D 次生源计数对密度测量的影响

张 丽¹ 于华伟²

1 (山东科技大学 资源与土木工程系 泰安 271019)

2 (中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院 青岛 266580)

摘要 为研究 D-D 源密度测量过程中俘获 γ 计数对密度测量的影响, 本文首先分析 D-D 源密度测量的原理, 其次研究 D-D 源与地层反应产生的 γ 射线类型, 并采用蒙特卡罗模拟方法对比分析了 D-D 源和 D-T 源密度测量过程中次生 γ 强度高低。结果表明, D-D 源密度测量过程中次生 γ 以俘获 γ 为主; 尽管 D-D 源的中子产额远低于 D-T 源, 但在源距大于 50 cm 后低孔隙地层中 D-D 源俘获 γ 计数高于 D-T 源非弹 γ 计数; 此外, 高孔隙地层中 D-D 源俘获 γ 计数也可以通过调整源距大小满足密度测量的要求。因此, 使用 D-D 源测量的次生 γ 计数能够满足密度测量的统计精度要求。

关键词 D-D 源, 俘获 γ , 密度测量, 蒙特卡罗模拟

中图分类号 TL99, TE19

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.030502

Effect of density measurement on D-D induced gamma counting

ZHANG Li¹ YU Huawei²

1(Department of Resources and Civil Engineering, Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271019, China)

2(College of Geo-Resources and Information, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract Background: The controllable neutron source is used to replace the chemical gamma source to measure the formation density in oil exploration. **Purpose:** The effect of capture gamma counting on density is studied in the process of D-D source density measurement. **Methods:** Firstly, the principle of D-D source density measurement is analyzed, and the type of gamma-ray source in the process of D-D source and the formation is studied. In addition, the intensity of induced gamma between D-D and D-T source density measurement is compared using Monte Carlo simulation method. **Results & Conclusion:** The capture gamma takes a large proportion on D-D induced gamma density measurement. Although neutron yield of D-D source is far lower than that of D-T source, the capture gamma counting of D-D source is higher than inelastic gamma counting of D-T source with the distance from the source more than 50 cm in the low porosity formation. In addition, the capture gamma counting can be obtained by adjusting the source size to meet the requirements of density measurement in high porosity formation. Therefore, the counting of D-D induced gamma can meet the statistical accuracy of the density measurement.

Key words D-D source, Capture gamma, Density measurement, Monte Carlo simulation

山东科技大学人才引进科研启动基金(No.2014RCJJ040)、国家自然科学基金(No.41304095)、山东省自然科学基金(No.ZR2013DQ012)、青岛市科技计划(No.14-2-4-65-jch)、中国石油大学教学改革项目(No.SY-A201405)资助

第一作者: 张丽, 女, 1984 年出生, 2013 年于中国石油大学(华东)获博士学位, 讲师, 主要研究方向为核测井蒙特卡罗模拟研究

通信作者: 于华伟, E-mail: yhwlog@163.com

Supported by Talent Introduction and Scientific Research Initiating Fund of Shandong University of Science and Technology (No.2014RCJJ040), National Natural Science Foundation of China (No.41304095), Shandong Provincial Natural Science Fund (No.ZR2013DQ012), Qingdao City Science and Technology Program (No.14-2-4-65-jch), Teaching Reform Project of China University of Petroleum (No.SY-A201405)

First author: ZHANG Li, female, born in 1984, graduated from China University of Petroleum (East China) with a doctor's degree in 2013, lecturer, focusing on the simulation of Monte Carlo and nuclear logging

Corresponding author: YU Huawei, E-mail: yhwlog@163.com

收稿日期: 2016-01-11, 修回日期: 2016-02-15

可控中子源替代传统的化学放射源进行密度测井成为核测井发展的必然趋势^[1-3]。它克服了传统密度测井中放射源辐射大、操作困难等缺点,成为当前密度测井的关键技术^[4-5]。1995年,国外油服公司(如斯伦贝谢)开始研究使用D-T可控中子源的密度测井方法及仪器,并在随后的几十年里将该项技术应用于实际油田作业。但是D-T源寿命短(国内产品大约几十到300 h)、成本高、使用的放射性氚靶存在潜在危险^[6-8]。与D-T源相比,D-D可控中子源具有寿命长(超过1 000 h)、成本低,而且由于不使用放射性氚气、安全性更高等优点^[9]。为此,Badrizzaman等^[10-12]提出应用D-D源进行密度测量的方法,但是他们认为由于D-D源的能量较低且中子产额较D-T源低一个量级,而使中子在地层中次生的 γ 射线强度太低,以致于测量 γ 射线的统计误差较大,不足以满足测井仪器的计数精度要求,因此没有对D-D源次生 γ 在地层中的强度分布做进一步的研究。

本文着重论证D-D源测量地层的可行性问题。在分析D-D源与地层相互作用机理、明确D-D源密度测量过程中次生 γ 类型的基础上,对比D-D源与D-T源在不同地层中次生 γ 强度的高低,通过探讨基于D-D次生源开展密度测量的可行性,在此过程中对次生 γ 源的影响因素进行归纳,为开展下一步方法研究提供依据。

1 可控中子源密度测量原理

在可控源密度测量过程中,脉冲中子发生器发出的快中子与地层原子发生反应,其反应过程有弹性散射、非弹性散射、热中子俘获,而在反应时产生 γ 射线的过程只有非弹性散射和热中子俘获。该 γ 射线在输运中发生衰减,衰减规律与传统 γ - γ 密度测井机理相同。因此,可以选用快中子与地层元素原子核发生俘获反应产生的 γ 射线作为次生 γ 源来测量地层密度^[13-15]。

γ 射线从产生之后就会发生衰减,最后在探测器处测量未被吸收的 γ 射线的响应为^[16]:

$$GR = \sum_{i=1}^m \iint \phi(E_n, \vec{r}) \cdot N_i \cdot \sigma_i(E_n) \cdot N_\gamma(E_\gamma) \cdot f(\mu(E_\gamma), \vec{r}) \otimes DRF(E_\gamma) dE_n d\vec{r} \quad (1)$$

式中: $\phi(E_n, \vec{r})$ 是中子通量; N_i 表示地层中第*i*种元素的原子密度; $\sigma_i(E)$ 是第*i*种元素的非弹性散射截面; $N_\gamma(E_\gamma)$ 表示中子与第*i*种元素发生非弹性散射之后释放出的 γ 射线数; $f(\mu(E_\gamma), \vec{r})$ 是 γ 扩散函数,此函数与地层的密度相关; μ 是 γ 扩散因子,并且 $DRF(E_\gamma)$ 是 γ 射线探测器响应函数。

由式(1)可知,测量的 γ 强度不仅由 γ 射线的衰减(衰减函数与地层密度相关)决定,同时还受到了中子空间分布的影响。可控源密度测量中应用较多的是D-T源,D-D源的性能在一定程度上也满足密度测量的要求,但两者在性能上有一定差别,具体区别如表1所示^[17]。

表1 D-D和D-T源性能对比图
Table 1 The comparison chart of D-D and D-T source performance.

可控源 Controllable source	中子产额 Neutron yield / n·s ⁻¹	能量 Energy / MeV	使用寿命 The service life / h	放射源氚靶 Radioactive tritium target
D-D源 D-D source	2×10 ⁷	2.5	1 000	否 No
D-T源 D-T source	1×10 ⁹	14	几十-几百 Dozens to hundreds	是 Yes

从表1可以看出,在应用上述两种中子源进行密度测量时,由于其性能有一定的区别,与地层元素的反应也有区别。目前商用的D-D中子源产额大部分为10⁶、D-T源是10⁸。但最近国外文献显示:现在的D-D中子源甚至可以具备10⁸产额了,斯伦贝谢公司最近将测井用的D-T源提高到了10⁹产额^[18-19]。在应用可控中子源进行密度测量时, γ 射线主要来自于中子与原子核发生非弹性散射和热中子俘获反应。

1.1 D-T源密度测量

氘-氚(D-T)中子发生器发射的能量为14 MeV的高能中子射入地层后,依次与地层中的元素发生非弹性、弹性散射以及俘获作用,其中快中子的非弹性散射和热中子的俘获都会释放出 γ 射线。这些次生的 γ 射线可以用来替代传统密度测井中的¹³⁷Cs放射源来测量地层密度,其中很多研究表明^[20-23],非弹性散射产生的 γ 射线与地层密度相关性更高一些,因此可以优选快中子与地层元素作用产生的非弹性散射 γ 射线作为一个“次生的” γ 源来测量地层的密度值。

其中,地层快中子非弹性散射 γ 射线计数,主要来自碳、氧、硅、钙的贡献^[24]。表 2 为以上几种元素的非弹反应阈能。

表 2 地层常见元素非弹性散射的阈能
Table 2 Inelastic scattering threshold value of common formation elements.

核素 Nuclide	第一激发能 The first excitation energy / MeV	非弹阈能 Inelastic scattering threshold / MeV
^{12}C	4.43	4.78
^{16}O	6.13	6.51
^{28}Si	1.78	1.84
^{40}Ca	3.73	3.82

由表 2 可见, D-T 源密度测井中, 14 MeV 的中子与地层主要元素即 ^{12}C 、 ^{16}O 、 ^{28}Si 、 ^{40}Ca 反生非弹散射产生的 γ 射线的能量分别为 4.78 MeV、6.51 MeV、1.84 MeV、3.82 MeV。

1.2 D-D 源密度测量

在应用 D-D 源进行密度测量时, 脉冲源释放出的能量为 2.5 MeV 的快中子与地层反应, 产生 γ 射线的过程有非弹性散射、热中子俘获。由表 2 可以看出, 当使用 D-D 中子源进行密度测量, 可以发生非弹性散射的主要是 Si 元素, 而 C、O、Ca 元素的主要非弹反应阈能都要大于 2.5 MeV, 因此不以非弹性散射为主。

为验证 D-D 源密度测量过程中非弹 γ 和俘获 γ 的贡献, 采用蒙特卡罗的方法模拟得到孔隙度分别为 0%、10%、20% 的饱和淡水砂岩(SiO_2)地层中不同源距(6 cm、18 cm、30 cm、45 cm、60 cm)处非弹 γ 占总 γ 贡献的比例, 如表 3 所示。

表 3 砂岩地层非弹 γ 比例
Table 3 The inelastic gamma ratio of sandstone formation.

源距 Source spacing / cm	孔隙度 0% Porosity 0%	孔隙度 10% Porosity 10%	孔隙度 20% Porosity 20%
6	80.72	47.48	30.83
18	47.69	17.85	10.55
30	21.60	7.53	4.90
45	7.16	2.66	2.43
60	3.55	1.35	1.41

从表 3 可以看出, 纯砂岩地层中距 D-D 源 18 cm 处, 总 γ 射线以非弹 γ 为主, 其计数占总 γ 计数的 47%; 而在 60 cm 处以俘获 γ 为主, 非弹 γ 贡献减弱, 只占 3%; 在高孔隙地层中, 非弹 γ 比例分别

降为 10% 和 1%。

产生该结果的原因是纯砂岩地层只有 Si 元素发生非弹性散射和热中子俘获, O 元素基本不参与反应; 而在高孔隙砂岩地层, H 元素的加入影响俘获 γ 的空间分布。由于其它元素不发生非弹性散射, 因此当地层不是砂岩或石英含量很少时, 这 3% 的砂岩误差不会对结果产生较大影响, 但如果是低孔隙的纯砂岩地层, 3% 的误差已经超过了仪器的允许误差, 必须进行校正。同样, 纯灰岩(CaCO_3)地层中非弹和俘获 γ 随源距的变化规律如表 4 所示。

表 4 灰岩地层非弹 γ 比例
Table 4 The inelastic gamma ratio of limestone formation.

源距 Source spacing / cm	孔隙度 0% Porosity 0%	孔隙度 10% Porosity 10%	孔隙度 20% Porosity 20%
6	2.04	1.87	0.92
18	1.19	0.56	0.29
30	0.67	0.26	0.15
45	0.31	0.12	0.08
60	0.15	0.07	0.06

由表 4, 在 18 cm 处非弹 γ 的计数仅占 1%, 总 γ 射线以俘获 γ 为主, 而到了离源距离更大的 60 cm 处, 非弹 γ 的比例仅有 0.1%, 因此使用 D-D 源在灰岩地层产生的 γ 射线主要是俘获 γ 的贡献。

综上所述, D-D 中子源与地层反应进行密度测量, 产生的 γ 射线主要是俘获 γ , 该 γ 射线在运输中发生衰减, 衰减规律与传统 γ - γ 密度测井机理相同。因此, 可以选用快中子与地层元素原子核发生反应产生的俘获 γ 射线作为次生 γ 源来测量地层密度。其中, 地层中热中子俘获截面大, 对热中子俘获 γ 计数贡献较大的核素主要有: ^1H 、 ^{28}Si 、 ^{35}Cl 、 ^{40}Ca 、 ^{56}Fe , 它们的特征峰对应的能量分别为 2.23 MeV、3.54 MeV、4.93 MeV、6.11 MeV、6.64 MeV、7.42 MeV、6.42 MeV、7.64 MeV。

2 模型的建立

为考察应用 D-D 源进行密度测量过程中次生俘获 γ 计数的影响, 采用蒙特卡罗模拟程序建立三维地层模型, 模拟不同条件下 D-D 和 D-T 源发射的快中子经地层减速到达探测器的计数。模型的具体条件为: 井眼直径为 7.9 cm, 地层径向半径为 150 cm、高为 250 cm, 把整个地层划分成环距为 5 cm、厚度 10 cm 的相邻栅元; 测井仪器外径为 7.9 cm, 脉冲中子源处于仪器前端 5–15 cm 处, 脉冲宽度为 40 μs ; 探测器采用 5 cm $\times$ 10 cm 的 NaI 晶体。在中子源和探测器之间放置理想屏蔽体。通过

记录不同源距处的 γ 射线通量, 对比分析应用 D-T 源和 D-D 源进行密度测量的次生 γ 源的分布情况。

3 D-D 与 D-T 源次生 γ 对比

本文设置 D-T 发生器的产额为 $1 \times 10^8 \text{ n} \cdot \text{s}^{-1}$ 、D-D

发生器的产额为 $2 \times 10^7 \text{ n} \cdot \text{s}^{-1}$, 则得到的纯灰岩和纯砂岩地层中次生 γ 射线随不同源距的分布, 结果如图 1 所示。

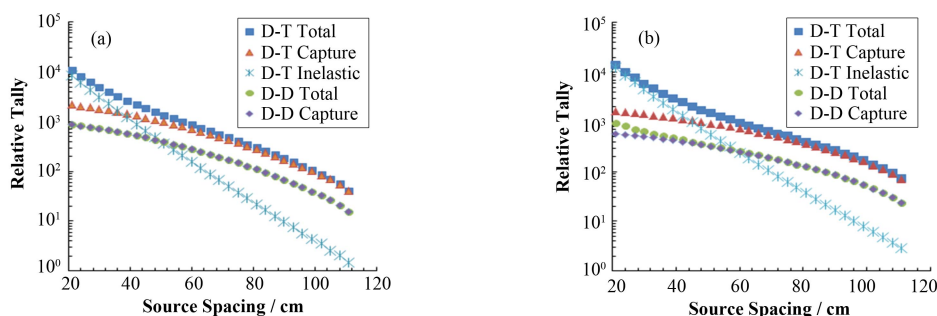


图 1 纯灰岩(a)和纯砂岩(b)地层次生 γ 源随源距分布
Fig.1 Distribution of the induced gamma change with spacing in pure limestone formation (a) and pure sandstone formation (b).

从图 1 可以看出, 对于 D-T 源, 当源距小于 50 cm 时, 非弹 γ 占主要贡献; 50 cm 左右时非弹 γ 和俘获 γ 对次生 γ 源的贡献相当, 之后俘获 γ 贡献占优。而对于 D-D 源, 在源距大于 40 cm 之后, 总 γ 射线以俘获 γ 为主。并且 D-D 源与 D-T 源相比, 源距大于 50 cm 后, D-D 源产生的俘获 γ 的强度要大于 D-T 源的非弹 γ 。国外某厂家使用 D-T 源的随钻密度测井仪器的 γ 源距约为 90 cm, 在此距离处

的 D-D 俘获 γ 计数要远高于 D-T 非弹 γ 计数。因此, 在纯灰岩和纯砂岩地层的 D-D 次生 γ 不会由于计数偏低而造成较大的统计误差。

除了纯岩石骨架地层, 俘获 γ 还对地层中的流体比较敏感, 因此还分析了不同孔隙度的砂岩地层情况, 图 2(a)、(b)分别是孔隙度 20%和 40%、饱含淡水的砂岩地层中次生 γ 射线通量随源距的分布。

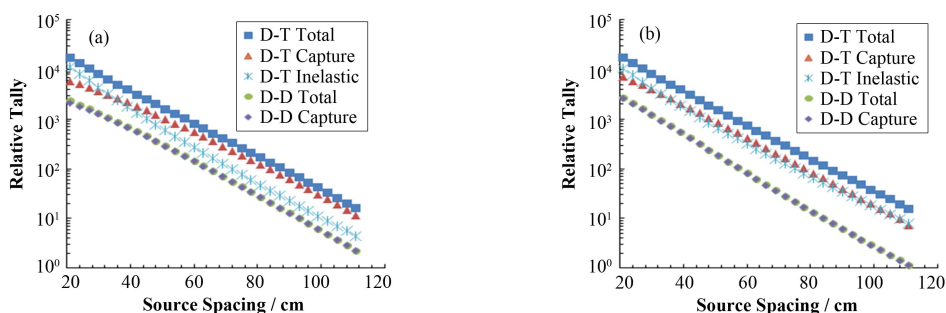


图 2 孔隙度不同的砂岩地层次生 γ 源随源距分布
(a) 孔隙度为 20%的砂岩地层, (b) 孔隙度为 40%的砂岩地层
Fig.2 Distribution of the induced gamma change with spacing in different porosity sandstone formation.
(a) Porosity 20% sandstone formation, (b) Porosity 40% sandstone formation

对比图 1(b)、图 2(a)、(b), 虽然砂岩的孔隙度增加了, 但对于 D-T 源, 其非弹 γ 的贡献基本不变, 而对于 D-D 源, 俘获 γ 的计数变化率增大了。当源距大于 50 cm 后, D-D 俘获 γ 的变化率和 D-T 非弹 γ 的变化率基本一致, 但是 D-D 俘获 γ 的计数略低。分析原因主要是由于地层中氢元素的影响, 不仅影响俘获 γ 的空间分布, 对其强度大小也有一定影响。

但是由于距 D-D 源 80 cm 处的俘获 γ 计数与距 D-T 源 90 cm 处的非弹 γ 计数基本相当, 所以即使在孔隙度或岩性不同的地层中, 也可以通过调整源距的大小, 使 D-D 源次生 γ 计数达到 D-T 源密度测井的计数量级。因此, 如果使用 D-D 源进行密度测量, 并不会存在次生 γ 计数偏低而引起统计精度差的问题。

4 结语

本文通过分析 D-D 源与地层相互作用过程, 明确了 D-D 源密度测量过程中次生 γ 类型, 以及次生 γ 强度高低对密度测量可行性的影响, 得到了以下结论, 并提出下一步研究计划。

1) D-D 源密度测量时, 应用的次生 γ 主要为俘获 γ , 特别是当源距大于 40 cm 时, 非弹 γ 的贡献很小, 可忽略。

2) 虽然 D-D 源的中子产额较 D-T 源低一个数量级, 但当地层含氢量较低且源距大于 50 cm 时, D-D 俘获 γ 计数高于 D-T 非弹 γ 计数; 即使地层含氢量增加时, D-D 俘获 γ 计数略低, 但也满足密度测量的统计精度要求, 因此 D-D 源的俘获 γ 计数的高低不会对密度测量产生较大影响。

3) D-D 源密度测量中俘获 γ 作为次生 γ 源, 影响因素多且复杂, 如地层含氢量、元素种类和含量等, 要想提高密度测量的精度, 需要进一步分析其变化规律, 针对其影响因素提出合理的校正方案。

参考文献

- 1 彭璇. 2000–2008 年放射性测井技术进展述评[J]. 测井技术, 2009, **33**(1): 1–8
PENG Hu. Review on progress of radioactive well logging technology in 2000–2008[J]. Well Logging Technology, 2009, **33**(1): 1–8
- 2 Quirein J, Smith J H, Chen D D, *et al.* Formation density prediction using pulsed neutron capture tools[A]. SPWLA 46th annual logging symposium[C]. New Orleans, June 26–29, 2005, Paper QQ
- 3 Rodriguez R, Weller G, Evans M. A new approach for identifying gas response using multiple LWD density measurements[A]. SPWLA 50th annual logging symposium[C]. Woodlands, Texas, June 21–24, 2009, Paper YY
- 4 张锋, 袁超, 刘军涛. 基于可控中子源的多探测器随钻中子测井方法数值模拟研究[A]. 第十七届测井年会论文集[C]. 2011: 75–84
ZHANG Feng, YUAN Chao, LIU Juntao. Numerical simulation of neutron logging-while-drilling method based on multi-detector controllable neutron source[A]. 17th logging symposium[C]. 2011: 75–84
- 5 于华伟, Gardner R, 李勇华. 随钻脉冲中子伽马密度测井的数值模拟研究[A]. 第一届随钻测井技术发展研讨会论文集[C]. 2012
YU Huawei, Gardner R, LI Yonghua. Numerical simulation of pulsed-neutron density logging while drilling[A]. The first drilling control technology development symposium[C]. 2012
- 6 Nicole R, Evans M, Alloli F, *et al.* Neutron-gamma density (NGD): principles, field test results and log quality control of a radioisotope-free bulk density measurement[A]. SPWLA 53th annual logging symposium[C]. Cartagena, Colombia, June 16–20, 2012
- 7 于华伟, 张丽, 侯博然. 电子对效应对 D-T 次生 γ 密度测量的影响[J]. 核技术, 2015, **38**(8): 080502. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.080502
YU Huawei, ZHANG Li, HOU Boran. Effect of pair production on D-T induced gamma density measurement[J]. Nuclear Techniques, 2015, **38**(8): 080502. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.080502
- 8 潘保芝, 张瑞, 刘坤, 等. 脉冲中子源密度测井俘获伽马射线强度的数值模拟[J]. 石油物探, 2014, **53**(6): 642–648
PAN Baozhi, ZHANG Rui, LIU Kun, *et al.* Numerical simulation of pulsed neutron source density logging's secondary captured gamma ray strength[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2014, **53**(6): 642–648
- 9 严岩, 李炳营, 郑世平, 等. D-D 中子源孔隙度测井的蒙特卡罗模拟[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2012, **3**(48): 123–127
YAN Yan, LI Bingying, ZHENG Shiping, *et al.* Monte Carlo simulation of the neutron porosity logging using D-D neutron generator[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2012, **3**(48): 123–127
- 10 Badruzzaman A, Bames S, Bair F, *et al.* Radioactive sources in petroleum industry: applications, concerns and alternatives[C]. SPE123593, 2009. DOI: 10.2118/123593-ms
- 11 Bond L J, Denslow K M, Griffin J W, *et al.* Evaluation of non-nuclear techniques for well logging technology evaluation[R]. Washington: PNNL, 2010. DOI: 10.2172/1006309
- 12 Griffin J W, Moran T L, Bond L J. Radiation source replacement workshop[R]. Washington: The Pacific Northwest National Laboratory, 2010. DOI: 10.2172/1062523
- 13 于华伟. 随钻环境下脉冲中子测量地层密度的理论基础研究[D]. 山东: 中国石油大学, 2011
YU Huawei. The fundamental research of the pulsed-neutron density logging while drilling[D]. Shandong: China University of Petroleum (East China), 2011

- 14 Yu H W, Sun J M, Gardner R P. Accuracy and borehole influences in pulsed neutron gamma density logging while drilling[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2011, **69**(9): 1313–1317. DOI: 10.1016/j.apradiso.2011.04.023
- 15 张丽. 随钻方位密度成像测井基础研究[D]. 山东: 中国石油大学, 2013
ZHANG Li. The fundamental research of azimuthal density imaging logging while drilling[D]. Shandong: China University of Petroleum (East China), 2013
- 16 Han X G, Pemper R, Tutt T, *et al.* Environmental corrections and system calibration for a new pulsed-neutron mineralogy instrument[A]. SPWLA 50th annual logging symposium[C]. June 21–24, 2009
- 17 Committee on Radiation Source and Replacement. Radiation source use and replacement abbreviated version[M]. Washington: National Academies Press, 2008: 147–158. DOI: 10.17226/11976
- 18 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. DOI: 10.1016/j.nima.2012.04.053
- 19 Stoller C. Thermal neutron porosity measurements using a pulsed D-T generator in LWD and Wireline[C]. USA: Pacific Northwest National Laboratory, 2012
- 20 Wilson R D. Bulk density logging with high-energy gammas produced by fast neutron reactions with formation oxygen atoms[A]. Nuclear science symposium and medical imaging conference[C]. USA, 1995: 209–213. DOI: 10.1109/nssmic.1995.504211
- 21 Badruzzaman A, Calif A. Multidetector pulsed-neutron through-tubing cased-hole density measurement sonde[P]. US: 5825024, October 20, 1998
- 22 Badruzzaman A, Badruzzaman T, Zalan T A, *et al.* Multi-sensor through-casing density and saturation measurement concepts with a pulsed neutron source: a modeling assessment[A]. SPE international petroleum conference in Mexico[C]. SPE89884, Puebla, Mexico, November 8–9, 2004. DOI: 10.2523/89884-ms
- 23 Odom R O, Bailey S M, Wilson R D, *et al.* Pulsed neutron density measurements: modeling the depth of investigation and cased-hole wellbore uncertainties[A]. SPWLA 40th annual logging symposium[C]. May 30–June 3, 1999, Paper JJ
- 24 黄隆基. 核测井原理[M]. 东营: 石油大学出版社, 2000: 89–90
HUANG Longji. Principle of nuclear logging[M]. Dongying: University of Petroleum Press, 2000: 89–90