

引用格式:杨涛,谢俊,周巨标,等.低孔-特低渗砂岩储层可动流体核磁共振特征及成因:以王龙庄油田 T89 断块阜宁组二亚段为例[J].山东科技大学学报(自然科学版),2018,37(1):119-126.

YANG Tao, XIE Jun, ZHOU Jubiao, et al. NMR features and contributing factors of movable fluid in low porosity and ultra-low permeability sandstone reservoir: Taking the 2nd member of Funing formation in T89 Block of Wanglongzhuang oilfield as an example[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2018, 37(1): 119-126.

低孔-特低渗砂岩储层可动流体核磁共振特征及成因

——以王龙庄油田 T89 断块阜宁组二亚段为例

杨涛¹, 谢俊¹, 周巨标², 王金凯¹, 王梦琪¹

(1. 山东科技大学地球科学与工程学院, 山东青岛 266590;

2. 中国石油化工股份有限公司江苏油田分公司采油三厂, 安徽天长 239300)

摘要:通过核磁共振技术,利用可动流体百分数和可动流体孔隙度等指标评价了王龙庄油田 T89 断块阜宁组二亚段低孔-特低渗透储层特征。结果显示,T89 断块阜宁组二亚段核磁共振 T_2 截止值偏低,可动流体占比低;103 块核磁共振样品分析显示,可动流体百分数与孔隙度不存在相关性,而与渗透率之间的相关性较好,可动流体孔隙度与渗透率相关性要好于与孔隙度的相关性。结合铸体薄片及扫描电镜实验结果,确定影响可动流体赋存的主要因素为:储层水平微裂缝、粘土矿物充填、碳酸盐岩胶结作用、上覆岩石压实作用等。该认识可对低渗透油田开发潜力评价提供重要地质依据。

关键词:T89 断块;核磁共振技术;低孔-特低渗透储层;可动流体

中图分类号:TE348

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2018)01-0119-08

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2018.01.012

NMR Features and Contributing Factors of Movable Fluid in Low Porosity and Ultra-low Permeability Sandstone Reservoir:

Taking the 2nd Member of Funing Formation in T89 Block of Wanglongzhuang Oilfield as an Example

YANG Tao¹, XIE Jun¹, ZHOU Jubiao², WANG Jinkai¹, WANG Mengqi¹

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. The Third Oil Production Plant of Jiangsu Oilfield Company, SINOPEC, Tianchang, Anhui 239300, China)

Abstract: This paper studied the low porosity and ultra-low permeability reservoir characteristics of the 2nd member of Funing formation in the T89 block of Wanglongzhuang oilfield by using the nuclear magnetic resonance (NMR) technology and evaluation indexes such as the percentage and porosity of movable fluid. Test results show that both the amplitude of T_2 spectrum and the percentage of movable fluid are relatively low. The NMR analysis of 103 samples suggests that there is no correlation between the percentage and the porosity of movable fluid, while there is a better correlation between the percentage and permeability. The correlation between the porosity and permeability is better than that of the porosity. With the help of cast thins and results of electron microscope scanning images, the

收稿日期:2016-10-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51674156,51504143)

作者简介:杨涛(1990—),男,吉林白山人,硕士研究生,主要研究方向为石油地质. E-mail: 15953209694@163.com

谢俊(1968—),男,湖北京山人,教授,博士生导师,主要从事油气田开发地质方面的研究. 本文通信作者.

E-mail: xiejun0532@163.com

main factors affecting the percentage of movable fluid were determined, including the development of horizontal micro cracks, the filling of clay mineral, the cementation of carbonate rock, and the compaction of overlying rock. This understanding provides an important geological basis for the development potential evaluation of oilfield with low permeability.

Key words: T89 block; nuclear magnetic resonance(NMR); low porosity and ultra-low permeability reservoir; movable fluid

近年来,我国新发现的低渗透油藏储量逐渐增加,低渗透油藏的原油产量所占比例逐年升高。但由于低渗透油藏孔隙结构复杂,储层流体流动过程中,存在典型的启动压力梯度,并受到毛管压力及其他作用力的束缚。孔隙中赋存的流体按照流动状态分为可动流体与束缚流体,束缚流体的存在使得孔隙中流体流动的阻力增加,导致低渗透油藏的开发难度增大。因此,如何有效评价储层可动流体,进而评价油藏开发潜力尤为重要,核磁共振技术(nuclear magnetic resonance, NMR)作为典型的储层评价技术已经在石油勘探领域得到广泛应用。王为民等^[1]认为可动流体百分数是评价低渗透油藏开发潜力的关键,指出裂缝、粘土充填及次生孔隙程度等都会影响储层的可动流体百分数;杨正明等^[2]分析了可动流体与渗透率、驱油效率之间的关系,认为可动流体百分数能更好地预测低渗透油藏开发效果;王瑞飞等^[3]认为可动流体孔隙度更能反映储层储集能力与流体赋存特征。

但前人研究没有将铸体薄片、扫描电镜照片与核磁共振曲线中的可动流体百分数相结合,不能直观看出不同因素对于孔隙结构的影响程度。本研究以王龙庄油田 T89 断块阜宁组二亚段储层为例,通过核磁共振技术对可动流体进行定量评价,对影响可动流体百分数的常规因素进行分析,通过回归方程分析可动流体百分数、可动流体孔隙度以及孔隙度与渗透率的相关性。将核磁共振曲线与岩心照片、扫描电镜图像、铸体薄片相结合,通过核磁共振曲线可动流体百分数对水平微裂缝发育程度、粘土矿物充填程度、碳酸盐岩胶结程度及上覆岩石压实作用等影响流体赋存状态的主要因素进行直观分析。

1 核磁共振测试可动流体的原理

核磁共振技术根据氢核(H^1)的弛豫率与孔隙大小的关系定量描述储层流体。在特定磁场条件下,流体中的氢核(H^1)会发生自由振动;当撤去磁场之后,氢核(H^1)的振动会逐渐减弱,直至停止。氢核(H^1)的数量与振幅信息间的相关性强,在氢核(H^1)振动衰竭过程中,可通过测量共振幅度随时间衰减的函数关系,用纵向弛豫时间(T_1)和横向弛豫时间(T_2)来描述^[4]。但由于纵向弛豫时间(T_1)不稳定,多采用横向弛豫时间(T_2)进行描述:

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_v} + \rho \frac{S}{V} \quad (1)$$

式中: T_2 ,横向弛豫时间,ms; T_v ,自由流体体积弛豫时间分量,ms; ρ ,岩石颗粒表面弛豫强度常数,m/ms; S/V ,孔隙的比表面积, m^{-1} 。

通过振动幅度的大小即可得到储层孔隙度信息。在岩心饱和水、离心状况下分别进行实验,得到核磁共振 T_2 谱曲线^[5]。岩心孔隙内流体的弛豫时间主要受岩心的表面性质、孔喉特征以及流体自身性质的影响。根据不同流体弛豫时间界限不同,将核磁共振曲线的下包面积又分为可动流体与束缚流体。

可动流体孔隙度(ϕ_m),即孔径大于截止孔径的孔隙体积占岩样总体积的百分数。可动流体孔隙度定量描述了单位体积岩样的可动流体体积,可更确切描述特低渗透储层的储集能力、流体赋存状态^[6]。可动流体孔隙度(ϕ_m)等于可动流体百分数(S_m)与岩样孔隙度(ϕ)的乘积^[3],即:

$$\phi_m = S_m \times \phi \quad (2)$$

式中: ϕ_m ,可动流体孔隙度,%; S_m ,可动流体百分数,%; ϕ ,岩样孔隙度,%。

2 可动流体核磁共振测试结果及特征

对王龙庄油田 T89 断块阜宁组二亚段 103 块岩心样品进行了核磁共振可动流体百分数测试,见表 1。

测试结果表明,阜宁组二亚段储层可动流体百分数较高,但渗透率偏低,这与沉积过程中上覆岩石的压实作用及成岩过程中碳酸盐岩的胶结作用等密切相关^[7]。

表 1 T89 断块核磁共振可动流体测试结果

Tab. 1 Nuclear magnetic resonance test results of movable fluid in T89 block

序号	井号	孔隙度/%	渗透率/mD	可动流体百分数/%	可动流体孔隙度/%
1	T89-1	9.0	0.065	25.6	2.31
2	T89	10.6	1.021	58.7	6.55
3	T89-2	11.9	0.742	44.6	5.31
4	T89-5	12.6	1.532	54.6	6.87
5	T89-8	11.7	1.972	61.6	7.21

通过 T89 断块核磁共振可动流体测试结果分析,认为研究区阜宁组二亚段储层可动流体具有以下特征:

1) 研究区阜宁组二亚段储层岩心饱和水状态下的核磁共振 T_2 谱呈双峰态, T_2 谱截止值的范围为 8.03~13.89 ms,与常规砂岩 T_2 谱截止值 10~40 ms 相比^[8],研究区砂岩储层 T_2 截止值偏低(图 1)。

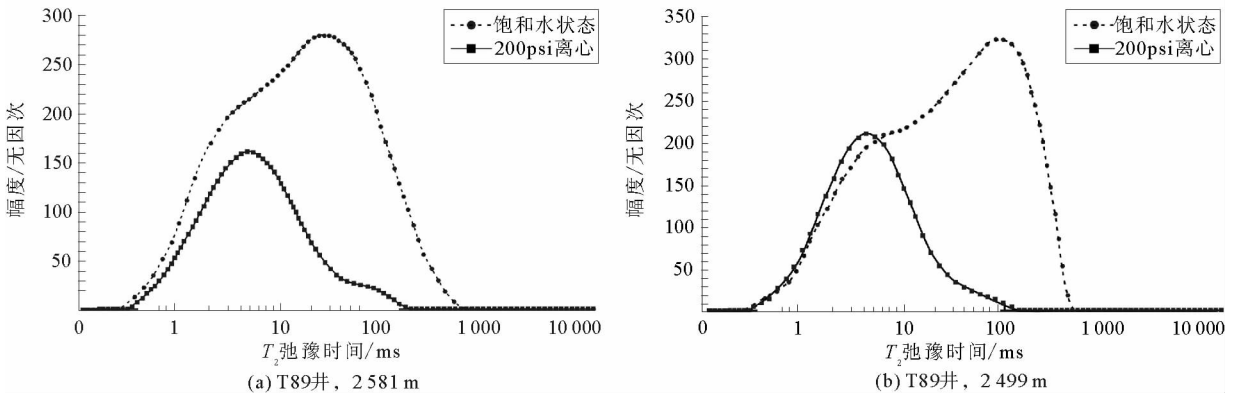


图 1 T89 井核磁共振 T_2 曲线图

Fig. 1 Nuclear magnetic resonance T_2 curve of well T89

2) 研究区岩心核磁共振可动流体百分数 25.6%~61.8%,可动流体孔隙度 9.03%~12.6%,说明研究区阜宁组二亚段储层可动流体差别较大,反映了储层非均质性较强的特征(表 1)。

3) 对研究区样品进行可动流体百分数与物性相关性进行分析,探寻可动流体百分数与物性差异性的相关性^[9]。研究表明(图 2),可动流体百分数与孔隙度之间无相关性,而可动流体百分数与渗透率之间有一定相关性,但相关性较差。岩心样品渗透率较低时,可动流体百分数分布范围较宽,说明渗透率并不是影响可动流体百分数的主要控制因素;当渗透率值越低时,可动流体百分数衰减越快,相关性也相应减弱。

图 3 表明,可动流体孔隙度与岩心样品孔隙度、渗透率之间表现出较强的相关性,且与渗透率的相关性要高于与孔隙度的相关性。与可动流体百分数与渗透率之间的关系相同,可动流体孔隙度与渗透率间均呈对数关系。当岩心样品渗透率值较低时,可动流体孔隙度分布范围较宽,且渗透率越低,可动流体百分数衰减越快,相关性也相应减弱。但当岩心样品渗透率大于 3 mD 时,可动流体孔隙度变化幅度较小。

4) 影响低孔-特低渗储层中可动流体百分比的因素较多,即使是同一口井不同深度的可动流体百分比变化也有差异^[10]。研究区的水平微裂缝发育程度、粘土矿物的充填、碳酸盐岩的胶结作用、上覆岩石的压实作用等因素均会影响可动流体百分比。

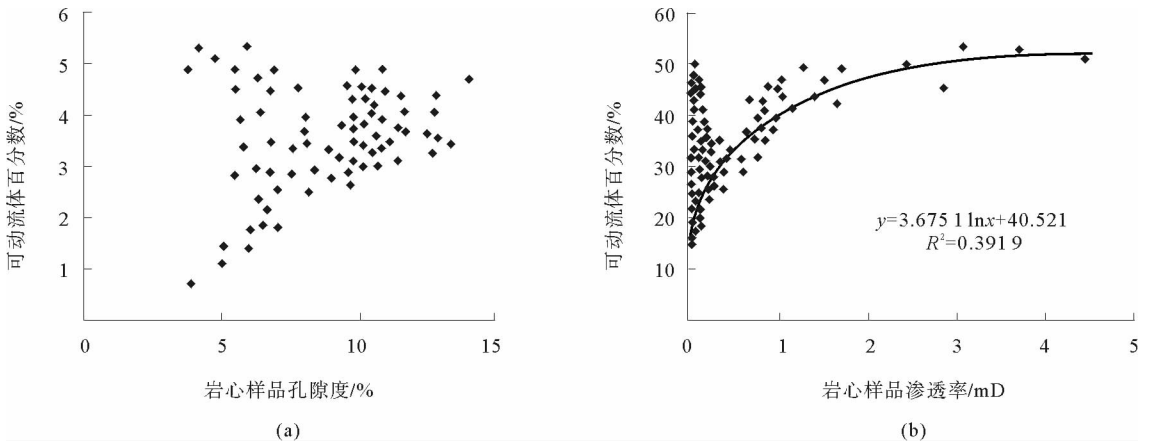


图 2 T89 断块可动流体百分数与孔隙度、渗透率的关系

Fig. 2 Relation between the movable fluid percent and the porosity, the permeability of T89 block

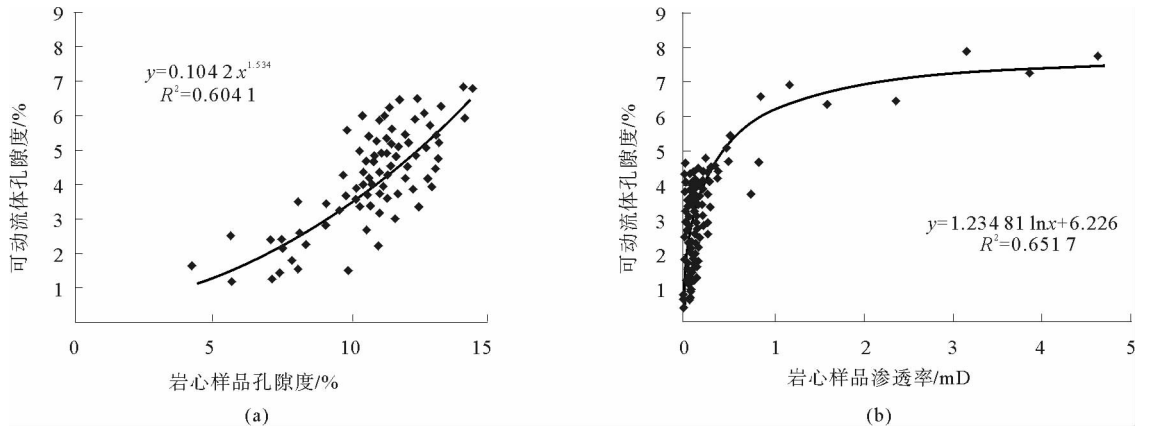


图 3 T89 断块可动流体孔隙度与孔隙度、渗透率的关系

Fig. 3 Relation between the movable fluid porosity and the porosity, the permeability of T89 block

3 可动流体参数影响因素

王龙庄油田 T89 断块阜宁组二亚段低孔-特低渗储层喉道以弯片状为主,储层孔隙结构较单一,孔隙连通性较差,微细孔较发育(图 4)。流体在低孔-特低渗透储层中的流动具有非达西渗流特征,其中最主要的就是启动压力梯度的影响,导致这类油藏开发效果较差^[11]。

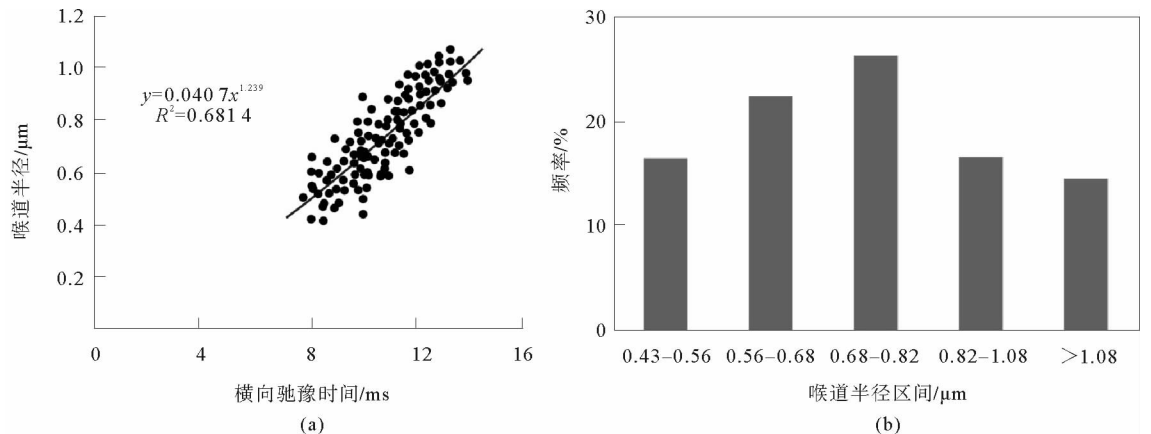


图 4 T89 断块横向弛豫时间 T_2 与喉道半径的关系,岩心样品喉道半径的区间分布

Fig. 4 The relation between nuclear magnetic resonance T_2 and throat radius, throat radius distribution of samples of T89 block

影响低孔-特低渗透储层可动流体的因素较多,如储层微裂隙的发育程度、碳酸盐胶结作用、次生孔隙发育程度以及粘土矿物充填程度等。图 5 表明研究区储层发育微裂缝,微裂缝的存在增加了孔隙之间的连通性,增大了基质的渗透率,进而增加了储层中的可动流体百分数。图 6(a)核磁共振曲线呈单峰偏左分布,属于常规的低渗透储层,可动流体百分数 34.4%;图 6(b)曲线成双峰分布,右峰高,属于中渗储层,可动流体百分数 57.3%。因此,微裂隙的发育程度影响可动流体的百分比。

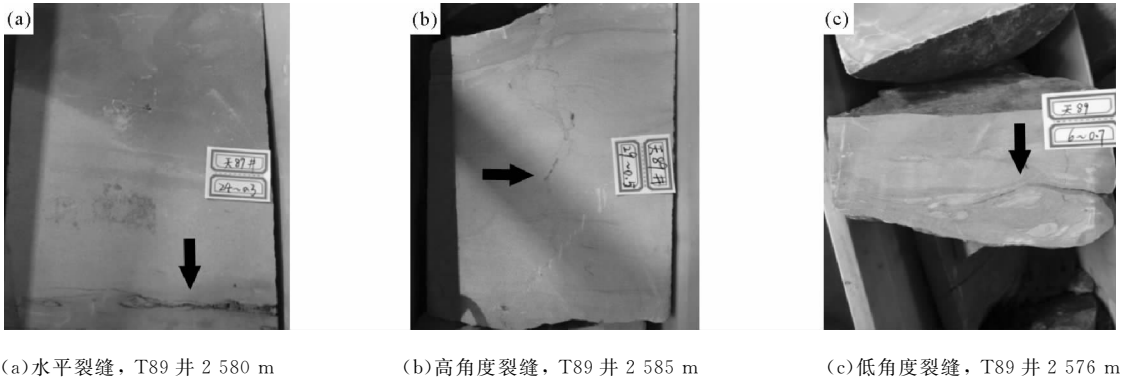
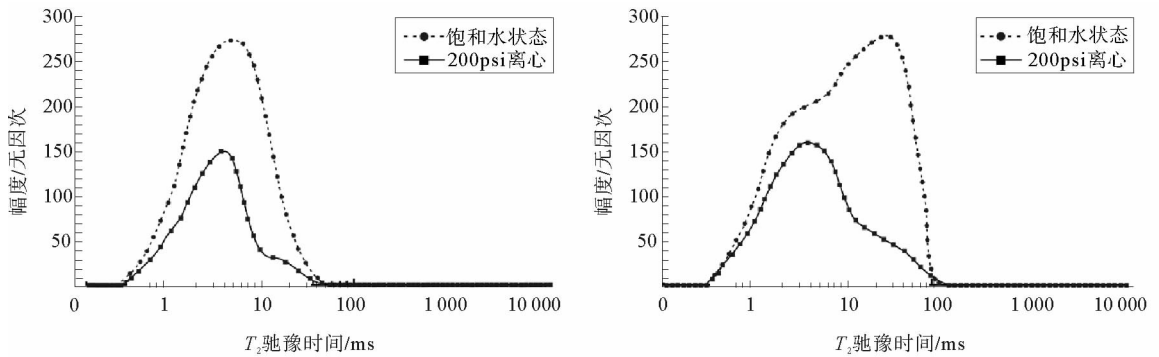


图 5 T89 井岩心裂缝发育情况

Fig. 5 Core crack development situation of well T89-8



(a) T89 井核磁共振曲线图, 2585 m

(b) T89 井核磁共振曲线图, 2580 m

图 6 T89-8 井核磁共振 T₂ 曲线图

Fig. 6 Nuclear magnetic resonance T₂ curve of well T89-8

如果储层发生重结晶,晶间孔较发育,导致储层中可动流体减少,束缚流体增多(图 7(a))。此外,若外来液体与储层岩石发生反应,如粘土矿物遇水膨胀,外来液体与储层中的流体反应生成沉淀等,都会大大减小孔喉体积,甚至堵塞喉道。

孔隙中填隙物成分、填隙程度对可动流体百分数的影响较大^[12]。储层中粘土矿物孔隙中的流体一般属束缚流体,若储层中粘土矿物含量较多,流体在渗流过程中就会受到影响,从而大大减少了可动流体。最常见的就是石英晶体的充填导致可动流体百分比降低(图 7(b))。

储层成岩过程中若发生碳酸盐的胶结作用,则会大大减小可动流体的百分比。胶结物充填了储层的孔喉空间,改变了孔喉结构,减小了孔喉半径,使得原本一些可动流体变为束缚流体(图 8)。比较图 8(a)与图 8(c),两者均存在碳酸盐胶结现象,核磁共振曲线成单峰分布,且峰值偏低。与图 8(a)相比,图 8(c)的胶结作用更强。图 8(b)的可动流体百分数为 29.1%,而图 8(d)中核磁共振曲线下包面积更小,可动流体百分数仅为 22.7%。因此可以看出方解石胶结,大大减少了可动流体百分数。

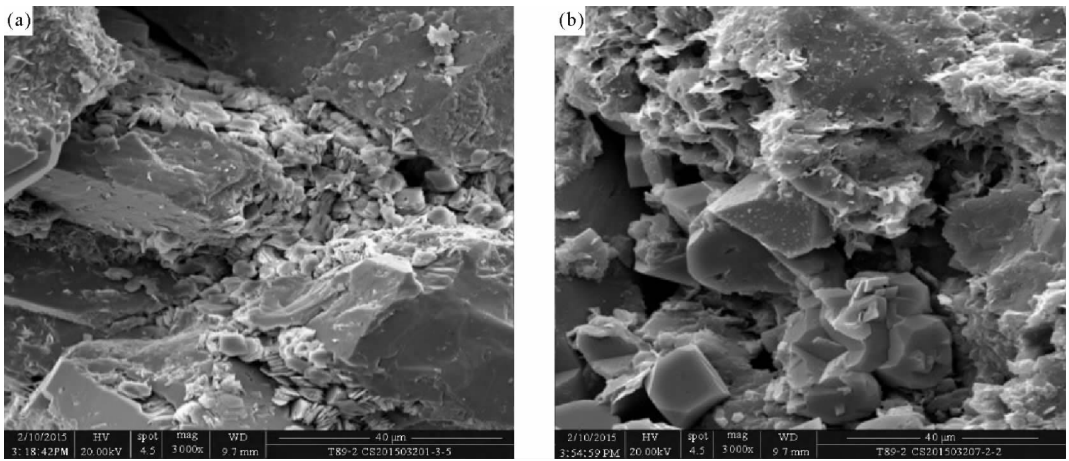
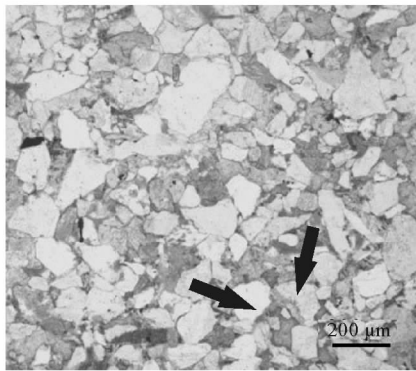
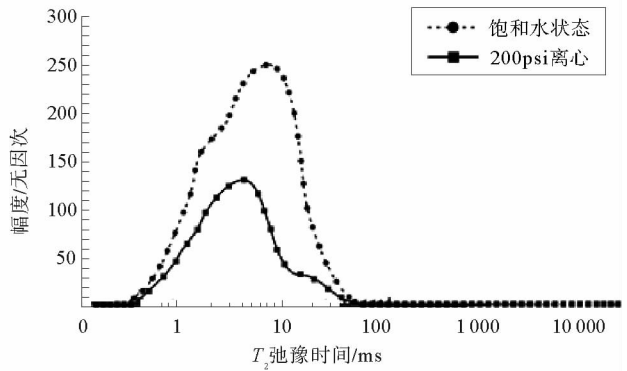


图 7 T89-2 井岩样电镜扫描图像

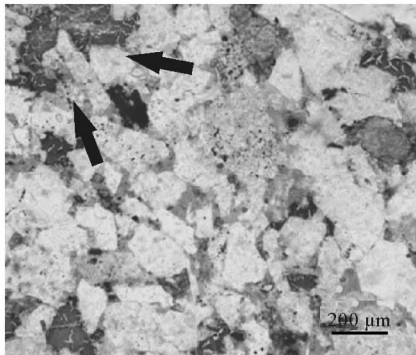
Fig. 7 Electron microscope scanning images of rock samples from well T89-2



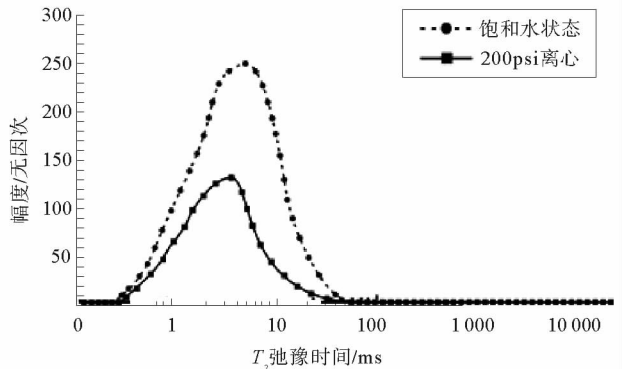
(a) T89-1井, 2 563 m, 碳酸盐胶结铸体薄片观察



(b) T89-1井, 2 563 m, 核磁共振曲线图



(c) T89-1井, 2 577 m, 碳酸盐胶结铸体薄片观察

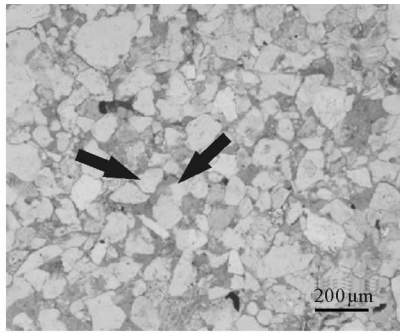


(d) T89-1井, 2 577 m, 核磁共振曲线图

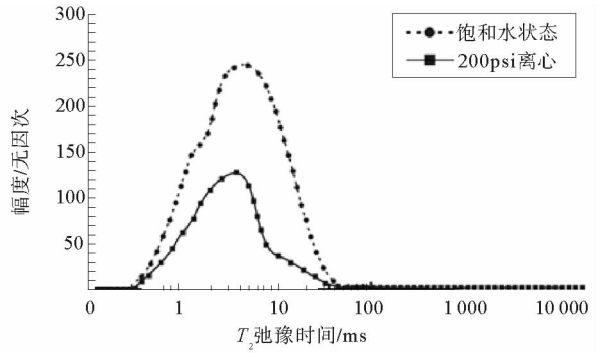
图 8 T89-1 井岩样碳酸盐胶结铸体薄片、核磁共振 T_2 曲线图

Fig. 8 Rock samples observation of cast thin section of carbonate cement and nuclear magnetic resonance T_2 curve of well T89-1

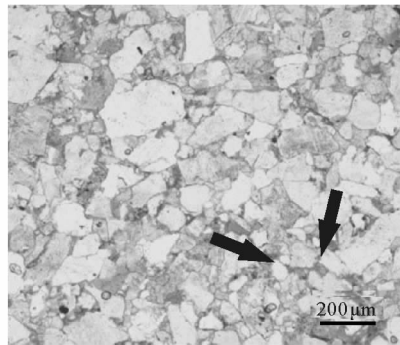
沉积物成岩过程中,上覆沉积物不断增加,在重荷作用下发生岩石的压实作用。压实作用的发生使得储层体积缩小,密度增大,孔隙度、渗透率降低^[13]。储层中的颗粒紧缩排列,孔喉体积缩小,可动流体减少,一部分可动流体变为束缚流体,不再参与渗流过程(图 9)。比较图 9(a)与图 9(c),两者均存在压实作用,核磁共振曲线成单峰分布,且峰值偏低,两者的曲线下包面积均较小,图 9(b)与图 9(d)核磁共振曲线中可动流体分别为 32.1%、29.3%,可动流体值偏低。



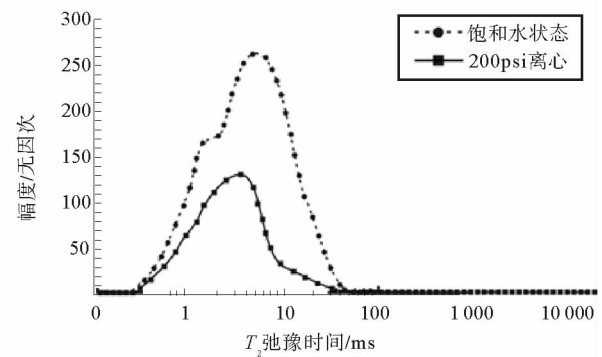
(a) T89-5井, 2 536 m, 压实作用铸体薄片观察



(b) T89-5井, 2 536 m, 核磁共振曲线图



(c) T89-5井, 2 538 m, 压实作用铸体薄片观察



(d) T89-5井, 2 538 m, 核磁共振曲线图

图 9 T89-5 井岩样压实作用铸体薄片、核磁共振 T₂ 曲线图

Fig. 9 Rock samples observation of cast thin section with compaction and nuclear magnetic resonance T₂ curve of well T89-5

王龙庄 T89 断块岩心的可动流体百分数平均值为 41.65%，在特低渗透砂岩储层中属于中等偏下水平^[14]，与 T89 断块较差的储层物性及较差的开发效果相符。

4 结论

1) 研究区阜宁组二亚段储层核磁共振曲线 T₂ 谱截止值 8.03~13.89 ms,较常规值偏低,可动流体占比较低,孔隙结构复杂,是研究区开发效果较差的主要因素。

2) 103 块核磁共振样品分析表明,可动流体百分数与孔隙度之间不存在相关关系,可动流体百分数与渗透率之间的相关性较好;可动流体孔隙度与渗透率的相关性要好于与孔隙度的相关性。

3) 铸体薄片及扫描电镜实验结果表明:影响 T89 断块低孔-特低渗透阜宁组二亚段储层可动流体赋存状态的主要因素有水平微裂缝发育程度、粘土矿物的充填程度、碳酸盐岩胶结程度、上覆岩石的压实作用等,其中水平微裂缝发育程度是储层中可动流体百分数增加的主控因素。

参考文献:

[1] 王为民,郭和坤,叶朝辉.利用核磁共振可动流体评价低渗透油田开发潜力[J].石油学报,2001,22(6):40-44.
WANG Weimin, GUO Hekun, YE Chaohui. The evaluation of development potential of low permeability oil field by the aid of NMR movable fluid detecting technology[J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 22(6): 40-44.

[2] 杨正明,苗盛,刘先贵,等.特低渗透油藏可动流体百分数参数及其应用[J].西安石油大学学报(自然科学版),2007,22(2): 96-99.
YANG Zhengming, MIAO Sheng, LIU Xiangui, et al. Percentage parameter of the movable fluid in ultra-low permeability reservoir and its application[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2007, 22(2): 96-99.

[3] 王瑞飞,陈明强.特低渗透砂岩储层可动流体赋存特征及影响因素[J].石油学报,2008,29(4):558-561.
WANG Ruifei, CHEN Mingqiang. Characteristics and influencing factors of movable fluid in ultra-low permeability sand-

- stone reservoir[J]. *Acta Geologica Sinica* 2008,29(4):558-561.
- [4] 王为民,赵刚,谷长春,等.核磁共振岩屑分析技术的实验及应用研究[J].*石油勘探与开发*,2005,32(1):56-59.
WANG Weimin,ZHAO Gang, GU Changchun, et al. Experiment and application of NMR technology on cuttings[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(1): 56-59.
- [5] 姚凤英.低渗透储层压裂液伤害核磁共振评价方法[J].*油气地质与采收率*,2011,18(2):102-104.
YAO Fengying. NMR evaluation of reservoir damage caused by fracturing liquid on low permeable reservoir[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2011, 18(2): 102-104.
- [6] 郑可,徐怀民,陈建文,等.低渗储层可动流体核磁共振研究[J].*现代地质*,2013,27(3):710-718.
ZHENG Ke, XU Huaimin, CHEN Jianwen, et al. Movable fluid study of low permeability reservoir with nuclear magnetic resonance technology[J]. *Geoscience*, 2013, 27(3): 710-718.
- [7] 周巨标.基于核磁共振技术的储层微观特征分类评价:以王龙庄油田阜宁组为例[J].*山东科技大学学报(自然科学版)*, 2016,35(2):8-15.
ZHOU Jubiao. Reservoir characteristics and classification evaluation based on NMR technology: An example of Funing formation in Wanglongzhuang oil field[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2016, 35(2): 8-15.
- [8] 谢然红,肖立志.储层流体及其在岩石孔隙中的核磁共振弛豫温度特性[J].*地质学报*,2007,81(2):280-283.
XIE Ranhong, XIAO Lizhi. Temperate effect on NMR relaxation time for bulk fluids and fluids in rocks[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(2): 280-283.
- [9] 肖开华,冯动军,李秀鹏.川西新场须四段致密砂岩储层微观孔喉与可动流体变化特征[J].*石油实验地质*,2014(1):77-82.
XIAO Kaihua, FENG Dongjun, LI Xiupeng. Micro pore and throat characteristics and moveable fluid variation of tight sandstone in 4th member of Xujiahe formation, Xinchang gas field, Western Sichuan basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014(1): 77-82.
- [10] 苗盛,张发强,李铁军,等.核磁共振成像技术在油气运移路径观察与分析中的应用[J].*石油学报*,2004,25(3):44-47.
MIAO Sheng, ZHANG Faqiang, LI Tiejun, et al. Application of NMR imaging technique to quantitative observation and analysis on hydrocarbon migration pathway[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, 25(3): 44-47.
- [11] 高辉,孙卫.特低渗透砂岩储层可动流体变化特征与差异性成因:以鄂尔多斯盆地延长组为例[J].*地质学报*,2010,84(8):1223-1230.
GAO Hui, SUN Wei. Movable fluid changing characteristics and diversity origin of ultra-low permeability sandstone reservoir: Take the Yanchang formation in Ordos basin as an example[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(8): 1223-1230.
- [12] 周波,罗晓容,王毅.核磁共振成像技术定量分析粘土矿物对油气二次运移过程的影响[J].*地质论评*,2007,53(5):704-707.
ZHOU Bo, LUO Xiaorong, WANG Yi. The quantitative analysis of the effect of clay matters on secondary oil migration in nuclear magnet resonance technology[J]. *Geological Review*, 2007, 53(5): 704-707.
- [13] 杨满平,李治平,李允,等.油气储层多孔介质的变形理论及实验研究[J].*天然气工业*,2003,23(6):110-113.
YANG Manping, LI Zhiping, LI Yun, et al. Theory and experiment studies for porous media's deformation of oil and gas reservoirs[J]. *Natural Gas Industry*, 2003, 23(6): 110-113.
- [14] 廖作才,孙军昌,杨正明,等.低渗火山岩气藏可动流体百分数及其影响因素[J].*西南石油大学学报(自然科学版)*,2014,36(1):113-120.
LIAO Zuocai, SUN Junchang, YANG Zhengming, et al. Study on the movable fluid saturation and its influencing factors of low permeability volcanic gas reservoir[J]. *Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition)*, 2014, 36(1): 113-120.

(责任编辑:吕海亮)