

吸附水膜厚度确定致密油储层物性下限新方法 ——以辽河油田大民屯凹陷为例

王伟明¹, 卢双舫¹, 田伟超¹, 周能武¹, 李吉君¹, 单俊峰², 胡英杰², 袁红旗³

[1. 中国石油大学(华东)非常规油气与新能源研究院, 山东 青岛 266580; 2. 辽河油田勘探开发研究院, 辽宁 盘锦 124000; 3. 东北石油大学地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318]

摘要:伴随着致密油开采工艺技术的提高,其储层的可采物性下限也正逐渐降低,开采极限越来越接近致密油的成藏物性下限。引用水膜厚度理论,采用实验分析和理论计算相结合的方法,确定了辽河油田大民屯凹陷致密油储层物性下限。研究表明:大民屯凹陷沙河街组四段致密储层以油页岩为主,在相同地质条件下颗粒表面吸附的一层水膜(由强结合水和弱结合水组成)与储层喉道同处纳米级别。当喉道半径小于水膜厚度,相应孔喉及其所控制的微小孔隙则被束缚水所饱和;当喉道半径大于水膜厚度,喉道才能成为致密油有效的充注通道。通过对水膜厚度的受力分析,根据力平衡关系,可建立不同地层压力下水膜厚度与喉道半径的关系,进而求取致密油充注的临界喉道半径。通过借鉴土壤中水膜厚度与孔隙度、比表面积及束缚水饱和度关系,又可将临界喉道半径下限值转化为适用范围更广的孔隙度下限值。该方法不仅理论依据强,又有实验数据支撑,具有一定的推广性。

关键词:吸附水膜;物性下限;孔喉分布;致密油;大民屯凹陷;辽河油田

中图分类号:122.2 文献标识码:A

A new method to determine porosity and permeability cutoffs of tight oil reservoirs by using thickness of adsorption water film: A case study from the Damintun Sag, Liaohe oilfield

Wang Weiming¹, Lu Shuangfang¹, Tian Weichao¹, Zhou Nengwu¹, Li Jijun¹,
Shan Junfeng², Hu Yingjie², Yuan Hongqi³

[1. Research Institute of Unconventional Petroleum and Renewable Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China; 2. Petroleum Exploration and Development Research Institute, Liaohe Oilfield Co., Ltd., Panjin, Liaoning 124000, China; 3. College of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China]

Abstract: With the advancement of exploitation technologies of tight oil, the porosity and permeability cutoffs of tight oil exploitation have been greatly reduced, and are approaching to that of tight oil accumulation. In combination with experimental analysis and theoretical computation, this paper introduced the water film theory to determine the porosity and permeability cutoffs of the Damintun Sag. The results show that tight reservoirs mainly consist of oil shale in the 4th Member of the Shahejie Formation in the Damintun Sag. Under the same geological conditions, there are water films (composed of strong bound water and weak bond water) adsorbed on the surface of tight sand particles. The minimum throat radius is equal to the thickness of water film which is so small that they can only be measured with nanometers. When the throat radius is smaller than water film thickness, the pore is filled with bound water. Only throats whose radius are larger than the film thickness can be valid oil charging pathways. Based on equilibrium of forces, relationship between water film thickness and throat radius is established, and the minimum throat radius valid for oil charging is calculated. The relationship of water film thickness with porosity, specific area and bound water saturation can be used to turn the critical value of throat radius into the critical porosity. This method not only has strong theoretical basis, but also the support of experimental data.

Key words: adsorbed water film, physical property cutoff, pore distribution, tight oil, Damintun Sag, Liaohe oilfield

收稿日期:2015-05-11;修订日期:2015-08-23。

第一作者简介:王伟明(1981—),男,博士、硕士生导师,油气成藏。E-mail: wangweiming6686@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41302103, 41330313, 41472105);中国石油科技创新基金项目(2014D-5006-0107);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(15CX05008A, 14CX02224A);黑龙江省教育厅面上项目(12531067)。

致密油是继页岩气之后全球非常规油气勘探与开发的又一新热点^[1-2],是指以吸附或者游离状态赋存于生油岩中,或与生油岩互层、紧邻的致密砂岩、致密碳酸盐岩等储集岩中,未经过大规模长距离运移的石油聚集^[3-5]。借鉴美国致密油勘探的成功经验,辽河油田首次运用了体积压裂和 HIWAY 技术,在大民屯凹陷致密油领域获得勘探突破。尽管目前已在安 95、胜 14 和沈 238 等多口井获得工业油流,但该区块致密油资源的开发动用还处于初期阶段,到底孔隙度小于多少的致密储层不能有效被动用,还没有形成定论。因此,致密油有效开采的物性下限问题对大民屯凹陷寻找勘探新层系、扩展找油新领域具有重大意义。

常规储层的物性下限求取方法已经非常成熟,如经验统计、相渗曲线、测试和渗透率应力敏感性等多种方法^[6-10]。尽管方法的原理不同,但所得到的物性下限值均是指常规储层的工业储能物性下限,通常用孔隙度或渗透率来表示。而致密油的有效开采,早已利用井网加密、大型压裂和多层完井等先进技术实现了对纳米级孔隙中油气的高效动用^[11-17]。因此,致密储层的开采物性下限也应随着工艺技术的提高而逐渐降低,而逐渐趋向于地质条件下油气充注的成藏物性下限,即只要原油能充注到孔隙中,致密油就可能被采出。致密油充注的有效通道就是纳米级的喉道,喉道过小时会被岩石颗粒强吸附的水所充填,这层束缚水就是早在 1963 年苏联学者基廖金提出的水膜。因此,本文引入水膜理论,从其受力分析入手,测试分析和理论计算相结合的方法确定水膜厚度,建立不同地层压力下水膜厚度与最小喉道半径关系,确定致密油的充注物性下限,为致密油的有效开发提供科学依据。

1 吸附水膜厚度与致密储层孔喉半径关系

1.1 岩石颗粒表面吸附水膜

致密储层具有复杂的孔喉配置关系,流体的渗流能力极差。因此,同常规储层相比致密储层的微观孔隙中含有较高比例的束缚流体,这些束缚流体需在一定的驱动力下才可流动。在这些束缚水当中,有一部分是在岩石颗粒表面由于粘土的吸附而形成的水膜。该层水膜充填了喉道,直接影响着油气的有效充注。

水膜的形成与水分子在颗粒表面的分布形式有关。致密油储层的显著特点就是粘土含量高,粘土表面又均带有一定量负电荷,而水分子又具有很强的极

性,就会在岩石颗粒表面形成一个静电场,形成水分子的定向排列^[18](图 1)。其中距颗粒表面最近的水分子,静电场最强,受到的吸附力最大,紧密包围在岩石颗粒表面,且不受重力影响,密度大,没有溶解能力,不传导静水压力,厚度在几个水分子左右,这部分水叫做强结合水;在强结合水周围分布一部分定向排列较差的水分子,也是由静电引力和分子力支撑的,虽不受重力的影响,但可以由薄膜较厚的方向薄膜较薄的地方移动,直到各处的薄膜厚度相等为止,这部分水叫做弱结合水;颗粒的最外层,由于电场强度减弱及水分子的吸引力下降,分布着在重力作用下能自由流动的地下水,这部分水叫做重力水。由此可见,强结合水和弱结合水呈吸附状态存在岩石颗粒表面,共同组成吸附水膜。该水膜的厚度在几个水分子到几百个水分子之间,按水分子直径 4×10^{-10} m 计算,水膜厚度处于纳米级别。

1.2 致密油储层孔径分布特征

孔径的大小可利用低温氮气吸附实验求取^[19-20]。该实验的分析范围是小于 200 nm 的孔径,不包括致密储层中相对较大的微米级孔隙(微米级孔隙中气体呈游离状态,不在吸附法测定范围)。因此,低温氮气吸附法是表征喉道附近微小孔隙的有效手段。

大民屯凹陷致密油储层以油页岩为主,纳米级孔隙分布的非均质性非常强。图 2a 和图 2b 是大民屯凹陷油页岩低温氮气吸附实验所得到的等温吸附曲线,二者的曲线形态差别较大。从图 2a 来看,吸附曲线和脱附曲线的“滞后现象”很明显。当相对压力为 0 时,吸附曲线和脱附曲线对应的氮气吸附体积分别为 1 mL/g 和 3 mL/g,说明对样品孔隙中滞留了 2 mL/g 比例的氮气,微小的纳米级孔隙较多,严重影响了流体在孔隙中的渗流能力。从图 2b 来看,尽管该样品的吸附

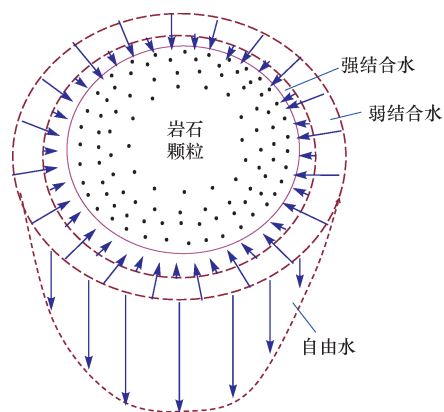


图 1 岩石颗粒与水分子接触示意图

Fig. 1 Schematic diagram showing the contact between sand particle and water

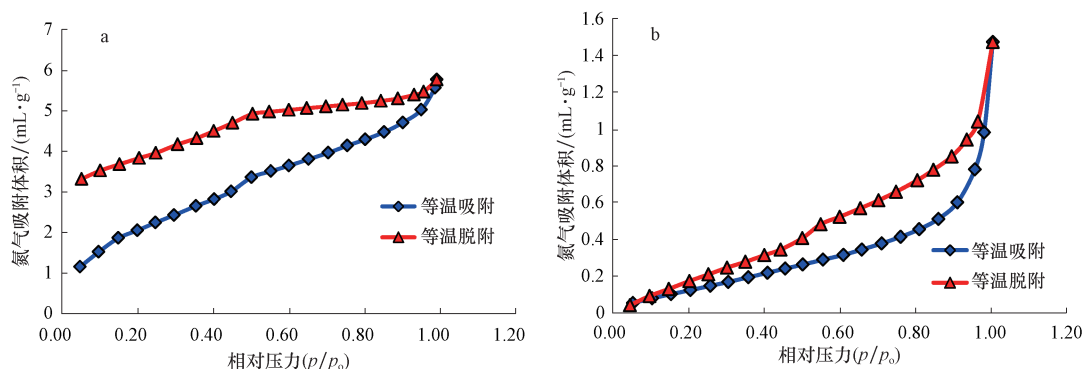


图2 大民屯凹陷沈352井等温吸附曲线

Fig. 2 Adsorption isothermal curves of Well Shen352 in the Damintun Sag

a. 沈352井,埋深3 234.24 m; b. 沈352井,埋深3 287.11 m

曲线和脱附曲线之间也存在一定的“滞后现象”,但当相对压力为0时,吸附曲线和脱附曲线重合。说明孔隙中滞留的气体很少,可忽略不计;而当相对压力接近1时,吸附体积急剧增加,说明岩石表面吸附的氮气开始饱和,而出现游离状态。由此说明,该样品的纳米级孔隙相对较大,对流体有较好的渗流能力。因此,纳米级孔径越小时,储层中流体的渗流能力越弱。但具体孔径小到多少的时候,流体才不能流动,还要看孔径与同处纳米级的水膜厚度之间的关系。

1.3 吸附水膜厚度与致密油充注关系

通过上述对吸附水膜和喉道孔径的分析,二者的厚度同处纳米级别。因此,吸附水膜的存在,可以有效封堵致密储层的喉道,为致密油的充注提供阻力^[21-23]。

大民屯凹陷致密储层以油页岩为主,属于远源沉积,岩石颗粒细、磨圆和分选好,可以把微小岩石颗粒假设为单个球体。因此,可以把致密油临界充注状态简化为圆形岩石颗粒紧密排列时,水膜对接封堵喉道而起到有效封堵致密油对孔隙的充注,此时的水膜厚度就是临界喉道半径的厚度。如果喉道半径小于水膜厚度,相应孔喉及其所控制的微小孔隙则被束缚水所饱和。只有喉道半径大于水膜厚度,才能成为致密油有效的充注通道(图3)。

2 吸附水膜厚度确定

2.1 吸附水膜受力分析

对吸附水膜的受力分析,要从其形成理论出发。吸附水膜的存在是固液相互作用的结果,水分子紧密吸附在固体表面,当极性分子相互接近时,它们的固有

偶极将同极相斥异极相吸,定向排列。当固体表面水膜在外力作用下变薄时,水膜顶底界面相互接近而产生斥力,这种斥力被称为分离压力(p_d)^[21];除此之外,还受到垂直指向管壁的地层压力(p_i)和与地层压力方向相反的毛管压力(p_c)。在忽略水膜重力的情况下,水膜的受力分析见图4。

由水膜的受力分析可知,当水膜厚度稳定不再变化时,地层压力(p_i)、分离压力(p_d)和毛管压力(p_c)之间存在以下的平衡关系:

$$p_i = p_d + p_c \quad (1)$$

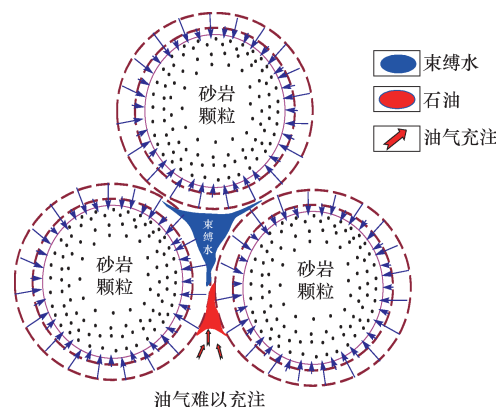


图3 水膜厚度与临界孔喉关系

Fig. 3 Relation between water film thickness and critical throat radius

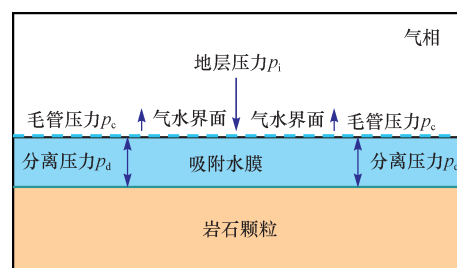


图4 水膜受力示意图

Fig. 4 Schematic diagram showing the forces on water film

理论上分离压力 p_d 由静电引力、范德华力和结构成分3部分组成,结构成分又包括基质吸力和渗透吸力两部分^[21],因此,分离压力的理论计算具有涉及参数多、计算误差大等特点。针对分离压力理论计算难的问题,1990年,Gee等用光的椭圆偏振技术测定了不同分离压下亲水石英表面的水膜厚度,根据实测点得到相应的关系式:

$$p_d = 2200/h^3 + 150/h^2 + 12/h \quad (2)$$

式中: p_d 为分离压力,MPa; h 为水膜厚度, μm 。

水膜两侧气相和水相之间的压力之差为毛管压力 p_c ,其大小取决于气水两项流体间的界面张力、毛细管孔径和介质的润湿性,表达式如下:

$$p_c = 2\sigma\cos\theta/r \quad (3)$$

式中: p_c 为毛管压力,MPa; r 为喉道半径, μm ; θ 为润湿角, $(^\circ)$; σ 为气水界面张力,N/m。

联立公式(1)、公式(2)和公式(3)可得到如下关系式:

$$p_i = 2200/h^3 + 150/h^2 + 12/h + 2\sigma\cos\theta/r \quad (4)$$

从公式(4)中可以看到,建立不同地层压力下水膜厚度与喉道半径之间的关系,关键是油水界面张力 σ 和致密储层对水的润湿角 θ 两个关键参数。

2.2 吸附水膜厚度确定

1) 关键参数选取

润湿角是利用 LT/Y2009-005 接触角测量仪,采用 QB/T 悬滴法对靶区 38 个油页岩样品进行测定。从测定结果来看(图5),致密储层润湿角的分布范围广,但集中分布于 $32^\circ \sim 40^\circ$,表现为较强的亲水性,本次取其平均值 34.55° 。油水界面张力随着温度和压力的升高而逐渐减小,地温为 80°C (压力 20 MPa) 时,油水界面张力为 0.0145 N/m ;地温为 95°C (压力 25 MPa) 时,油水界面张力为 0.012 N/m ;地温为 110°C (压力 30 MPa) 时,油水界面张力为 0.009 N/m ;地温为 140°C (压力 40 MPa) 时,油水界面张力为 0.0035 N/m ^[24]。

2) 建立图版确定水膜厚度

结合润湿角和油水界面张力两个参数的取值,利用公式(4),分别建立了地层压力 p_i 为 25, 30, 35, 40 MPa

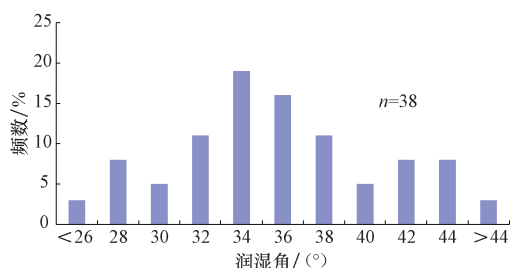


图5 润湿角分布

Fig. 5 Distribution of wetting angles

的不同地质情况下喉道半径 r 与水膜厚度 h 之间的关系(图6)。在图6中,根据水膜厚度与喉道半径厚度相等的直线 C ,把致密油聚集划分为无效充注 A 和有效充注 B 两个区域。区域 A 代表的是在不同的地层压力下,当喉道半径小于水膜厚度时,致密油无效充注;区域 B 代表的是在不同的地层压力下,当喉道半径大于水膜厚度时,致密油有效充注;直线 C 代表的是不同地层压力下,喉道半径与水膜厚度相等时,对应的致密油充注物性下限临界值,从直线 C 与不同地层压力线的交点可以看出,从 25 MPa 到 40 MPa 水膜厚度从 8.25 nm 减小到 4.76 nm,相应的致密油最小充注喉道半径也逐渐减小。因此,水膜厚度的大小受地层压力的影响,地层压力越大,水膜厚度越小。实际上,水膜厚度除与地层压力有关外,还有岩石的矿物成分有关,矿物成分不同,形成的静电场强度不同,吸附水膜的厚度也不同。但本次理论计算选取的润湿角为均值 34.55° ,也就相当于是假定岩石矿物成分一定的前提下,探讨不同地层压力下的致密油充注的临界物性下限。

3 充注物性下限孔隙度确定

尽管利用图6图版,可通过水膜厚度得到储层的临界喉道半径大小,但喉道半径是一个相对较难获取的参数,缺乏实用性。事实上,基于孔隙度的物性下限更有广泛的应用价值。借鉴土壤学计算颗粒表面水膜厚度的理论公式,可以建立孔隙度与水膜厚度之间的关系,具体关系式如下^[25-26]:

$$\Phi = hAp/(7142S_{wi}) \quad (5)$$

式中: Φ 为岩石孔隙度,%; h 为束缚水膜厚度,0.10 nm; A 为岩石比表面积, m^2/g ; S_{wi} 为束缚水饱和度,%;

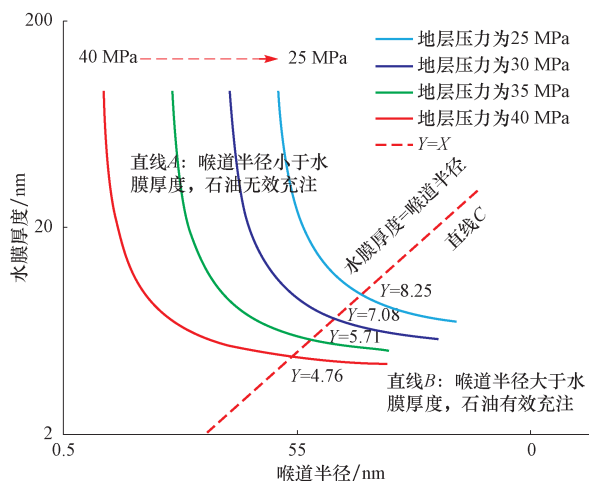


图6 不同地层压力下水膜厚度与喉道半径关系

Fig. 6 Relation between water film thickness and throat radius under different formation pressure

表 1 大民屯凹陷致密储层孔隙度下限求取相关实验数据统计

Table 1 Statistics of experiments for calculating the lower limits of porosity of tight reservoirs in the Damintun Sag

井号	深度/m	BET 比表面/($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	束缚水饱和度/%	水膜厚度/nm	岩石密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	孔隙度下限值/%
沈 352	3 169. 57	9. 55	57. 94	6. 75	2. 48	3. 86
沈 352	3 192. 33	2. 36	28. 75	6. 65	2. 19	1. 67
沈 352	3 197. 03	4. 69	35. 82	6. 63	2. 16	2. 62
沈 352	3 234. 24	8. 20	35. 82	6. 55	2. 42	5. 08
沈 352	3 240. 38	1. 02	16. 08	6. 52	2. 57	1. 49
沈 352	3 314. 39	0. 54	7. 41	6. 17	2. 33	1. 47
沈 352	3 342. 58	3. 29	16. 75	6. 07	2. 41	4. 02
平均值		4. 23	28. 37	6. 48	2. 37	2. 89

ρ 为岩石骨架密度, g/m^3 。

从公式 5 可以看出,孔隙度下限的理论计算,除水膜厚度外,还与岩石比表面积、岩心密度、束缚水饱和度有关。为了准确求取以上关键参数,选取靶区沈 352 重点探井目的层段的 7 块岩心样品,开展了低温氮气吸附、岩心密度测定和核磁实验,相应分析结果见表 1。根据表 1 实测分析数据,利用公式(5)计算致密储层的临界充注的物性下限,孔隙度下限平均值为 2.89%,以此作为大民屯凹陷油页岩的致密油充注的物性下限。

4 结论

1) 岩石颗粒表面吸附一层不可动的水膜(强结合水和弱结合水),与致密储层的喉道半径同处纳米级别。吸附水膜的存在,可以有效封堵致密储层喉道,增加流体流动阻力。只有喉道半径大于水膜厚度,才能成为有效的致密油充注通道。

2) 在不考虑重力的情况下,吸附水膜受力可简化为地层压力、分离压力和毛管压力 3 部分。根据三者之间的平衡关系,可建立不同地层压力下水膜厚度与喉道半径之间的关系,继而可以求取致密油充注的喉道半径下限。

3) 通过水膜厚度与孔隙度、束缚水饱和度等参数之间的关系,可把由临界水膜厚度求取的喉道半径下限值转化为适用范围更广的孔隙度物性指标上。

参 考 文 献

[1] 邹才能,朱如凯,吴松涛,等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 2012,33(2):174-187.
Zou Caineng, Zhu rukai, Wu songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: Taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012,33(2):173-187.

[2] 孙赞东,贾承造,李相方,等. 非常规油气勘探与开发(上册)[M]. 北京:石油工业出版社,2011:1-150.
Sun Zandong, Jia Chengzao, Li Xiangfang, et al. Unconventional oil & gas exploration and development (upper volumes) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011:1-150.
[3] 贾承造,邹才能,李建忠,等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J]. 石油学报, 2012,33(3):343-350.
Jia Chengzao, Zou Caineng, Li Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012,33(3):343-350.
[4] Feng Z, Yin C, Lu J, et al. Formation and accumulation of tight sandy conglomerate gas: A case from the Lower Cretaceous Yingcheng Formation of Xujiaweizi fault depression, Songliao Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013,40(6):696-703.
[5] Shanley K, Cluff R M, Robinson J W. Factors controlling prolific gas production from low-permeability sandstone reservoirs: implications for resource assessment, prospect development and risk analysis[J]. AAPG Bulletin, 2004, (8):100-102.
[6] 操应长,王艳忠,徐涛玉,等. 东营凹陷西部沙四上亚段滩坝砂体有效储层的物性下限及控制因素[J]. 沉积学报, 2009,27(2):230-237.
Cao Yingchang, Wang Yanzhong, Xu Taoyu, et al. The petrophysical parameter cutoff and controlling factors of the effective reservoir of beach and bar sandbodies of the upper part of the fourth member of the shahejie formation in west part of Dongying Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009,27(2):230-237.
[7] 郭睿. 储集层物性下限值确定方法及其补充[J]. 石油勘探与开发, 2004,31(5):140-144.
Guo Rui. Supplement to determining method of cut-off value of net pay [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(5):140-144.
[8] 焦翠华,夏冬冬,王军,等. 特低渗砂岩储层物性下限确定方法——以永进油田西山窑组储集层为例[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(3):379-383.
Jiao Cuihua, Xia Dongdong, Wang Jun, et al. Methods for determining the petrophysical property cutoffs of extra low porosity and permeability sandstone reservoirs—An example from the xishanyao Formation reservoirs in yongjin oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2009,30(3):379-383.
[9] 王磊,李克文,赵楠,等. 致密油储层孔隙度测定方法[J]. 油气地

- 质与采收率,2015,22(4):49-53.
- Wang Lei, Li Kewen, Zhao Nan, et al. Methods research of porosity determination for tight oil reservoir [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(4): 49-53.
- [10] 黎箐, 赵峰, 刘鹏. 苏里格气田东区致密砂岩气藏储层物性下限值的确定[J]. *天然气工业*, 2012, 32(6): 31-35.
- Li Qing, Zhao Feng, Liu Peng. Determination of lower limits of porosity and permeability of tight sand gas reservoirs in the eastern block of the sulige gas field[J]. *Natural Gas Industry*, 2012, 32(6): 31-35.
- [11] 邹才能, 朱如凯, 白斌, 等. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J]. *岩石学报*, 2011, 27(6): 1857-1864.
- Zou Caineng, Zhu rukai, Bai Bin, et al. First discovery of nanopore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 27(6): 1857-1864.
- [12] 任战利, 李文厚, 梁宇, 等. 鄂尔多斯盆地东南部延长组致密油成藏条件及主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(2): 190-198.
- Ren Zhanli, Li Wenhui, Liang Yu, et al. Tight oil reservoir formation conditions and main controlling factors of Yanchang Formation in southeastern Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(2): 190-198.
- [13] 马洪, 李建忠, 杨涛, 等. 中国陆相湖盆致密油成藏主控因素综述[J]. *石油实验地质*, 2014, 36(6): 668-677.
- Ma Hong, Li Jianzhong, Yang Tao, et al. Main controlling factors for tight oil accumulation in continental lacustrine basins in China[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(6): 668-677.
- [14] 杨华, 付金华, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界致密气成藏条件与勘探开发[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 27(6): 295-303.
- Yang Hua, Fu Jinhua, Liu Xinshe, et al. Accumulation conditions and exploration and development of tight gas in the upper paleozoic of the Ordos Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 27(6): 295-303.
- [15] 冉新权, 何光怀. 关键技术突破、集成技术创新实现苏里格气田规模有效开发[J]. *天然气工业*, 2007, 27(12): 1-5.
- Ran Xinquan, He Guanghuai. Key Technologies broken through and integrated techniques innovated to realize efficient and large-scaled development in the sulige gas field[J]. *Natural Gas Industry*, 2007, 27(12): 1-5.
- [16] 王飞宇, 孟晓辉, 冯伟平, 等. 湖相致密油资源量和可采性评价技术[J]. *大庆石油地质与开发*, 2013, 32(3): 144-149.
- Wang Feiyu, Meng Xiaohui, Feng Weiping, et al. Evaluating techniques for the resource extent and its recoverability of lacustrine-facies tight oil[J]. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 2013, 32(3): 144-149.
- [17] 张国印, 王志章, 郭旭光, 等. 准噶尔盆地乌夏地区风城组云质岩致密油特征及“甜点”预测[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(2): 219-229.
- Zhang Guoyin, Wang Zhizhang, Guo Xuguang, et al. Characteristics and ‘sweet spot’ prediction of dolomitic tight oil reservoirs of the Fengcheng Formation in Wuxia area, Junggar Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(2): 219-229.
- [18] 王大纯, 张人权, 史毅虹, 等. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 19-21.
- Wang Dachun, Zhang Renquan, Shi Yihong, et al. The basis of hydrogeology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 19-21.
- [19] 杨峰, 宁正福, 张世栋, 等. 基于氮气吸附试验的页岩孔隙结构表征[J]. *天然气工业*, 2013, 33(4): 135-140.
- Yang Feng, Ning Zhengfu, Zhang Shidong, et al. Characterization of pore structures in shales through nitrogen adsorption experiment[J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(4): 135-140.
- [20] 杨峰, 宁正福, 孔德涛等. 高压压汞法和氮气吸附法分析页岩孔隙结构[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(3): 450-455.
- Yang Feng, Ning Fuzheng, Kong Detao, et al. Pore structure of shales from high pressure mercury injection and nitrogen adsorption method[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(3): 450-455.
- [21] 赵明华, 刘小平, 彭文祥. 水膜理论在非饱和土中吸力的应用研究[J]. *岩石力学*, 2007, 28(7): 1323-1327.
- Zhao Minghua, Liu Xiaoping, Peng Wenxiang. Application of aqueous film theory to study of unsaturated soils suction[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(7): 1323-1327.
- [22] 刘德新, 岳湘安, 侯吉瑞, 等. 固体颗粒表面吸附水层厚度实验研究[J]. *矿物学报*, 2005, 25(1): 15-19.
- Liu Dexin, Yue Xiang'an, Hou Jirui, et al. Experimental study of adsorbed water layer on solid particle surface[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2005, 25(1): 15-19.
- [23] 张学庆, 戴宗, 刘林, 等. 水膜理论在致密低渗透砂岩储层改造中的应用[J]. *矿物岩石*, 1998, 18(增刊): 161-163.
- Zhang Xueqing, Dai Zong, Liu Lin, et al. Application of theory of water film to reform the reservoir in tight and low permeability sandstone[J]. *Journal of Mineral Petrology*, 1998, 18(Suppl): 161-163.
- [24] 庞雄奇, 金之钧, 姜振学, 等. 深盆气成藏门限及其物理模拟实验[J]. *天然气地球科学*, 2003, 14(3): 207-214.
- Pang Xiongqi, Jin Zhijun, Jiang Zhenxue, et al. Critical condition for gas accumulation in the deep basin trap and physical modeling[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2003, 14(3): 207-214.
- [25] 韩永林, 刘军锋, 余永进, 等. 致密油藏储层驱替特征及开发效果——以鄂尔多斯盆地上里源地区延长组长7油层组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(2): 207-211.
- Han Yonglin, Liu Junfeng, Yu Yongjin, et al. Displacement characteristics and development effect of tight oil reservoir: a case from Chang 7 oil layer of the Yanchang Formation in Shangliyuan area, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(2): 207-211.
- [26] 向阳, 向丹, 羊裔常, 等. 致密砂岩气藏水驱动态采收率及水膜厚度研究[J]. *成都理工学院学报*, 1999, 26(4): 389-391.
- Xiang Yang, Xiang Dan, Yang Yichang, et al. Study of gas recovery and water film thickness in water drive for tight sandstone gas reservoir[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 1999, 26(4): 389-391.

(编辑 张玉银)