

致密油储层孔喉微观结构表征技术研究进展

杨正明^{1,3}, 赵新礼^{2,3}, 熊生春^{1,3}, 骆雨田^{1,2,3}, 张亚蒲^{1,3}, 何英^{1,3}, 林伟^{2,3}, 陈挺^{2,3}, 张安顺¹, 夏德斌^{2,3}, 蔺丽君⁴, 周思宾⁵, 吴锦伟⁵

1. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083
2. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049
3. 中国科学院渗流流体力学研究所, 廊坊 065007
4. 山东农业工程学院, 济南 250100
5. 中国石化华北油气分公司勘探开发研究院, 郑州 450006

摘要 致密油储层中孔隙是储集油气的空间与渗流发生的主要场所, 且其孔隙分布呈现多种尺度, 储层微观孔隙结构精确表征是非常规油气研究的重点与难点。对目前致密油储层孔隙结构表征技术进行了分类, 总结了实验数据分析技术、图像分析技术与数字岩心技术的内涵及发展, 并指出了其测试孔隙大小范围和优缺点; 展望了致密油储层微观孔隙结构表征技术的发展趋势。

关键词 致密储层; 孔隙结构; 表征技术

致密油是继页岩气之后全球非常规油气勘探开发的又一新热点^[1-2], 一直被石油工业界誉为“黑金”^[3]。中国目前对致密油的定义是指夹在或紧邻优质生油层系的致密碎屑岩或碳酸盐岩储层中, 未经过大规模长距离运移而形成的石油聚集, 一般无自然产能, 需经过大规模压裂技术才能形成工业产能^[4]。致密油储层物性界限确定为地面空气渗透率小于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 地下覆压渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右, 孔隙度小于 10%, 其渗流规律不遵从经典的达西渗流定律, 而是非线性渗流^[5-6]。储层微观孔喉结构一般情况下是指孔隙和喉道的几何形状、大小、分布及相互连通等关系, 是影响油

气储层物性的主要因素^[7]。同时, 孔喉结构特征也与油气的分布及聚集机理等关系密切, 在沉积、埋藏、成岩等地质因素的影响下, 致密油储层具有孔喉细小、结构复杂、非均质性强等独特的微观孔喉结构特征^[8-13]。

在致密油储层中纳米级孔隙的发现, 说明储层孔隙结构的研究重点与难点已从常规的微米-毫米级转移到纳米级孔隙中, 这也意味着一些传统的常规储层孔隙结构表征技术在非常规储层中应用会受到很大的局限^[14]。受到分析仪器精度的限制, 传统的方法无法识别孔径大小在 $1 \mu\text{m}$ 以下的纳米级孔隙^[15], 因此致密油储层中纳米级孔隙结构的表征, 纳米级孔隙的发育规

收稿日期: 2018-09-17; 修回日期: 2018-12-24

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX05013-001, 2016ZX05048); 山东省自然科学基金博士基金项目(ZR2018BA024)

作者简介: 杨正明, 教授级高级工程师, 研究方向为低渗/致密油气田物理模拟、渗流理论和三次采油, 电子信箱: yzhm69@petrochina.com.cn

引用格式: 杨正明, 赵新礼, 熊生春, 等. 致密油储层孔喉微观结构表征技术研究进展[J]. 科技导报, 2019, 37(5): 89-98; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.05.012

律以及纳米级孔隙对油气聚集的影响等将是研究中的热点,其对致密油气资源的勘探与开发都具有重要的现实意义。

1 致密油储层孔喉结构研究方法

致密油储层具有低孔、低渗的特点。其孔隙结构极其复杂,孔隙半径大小在微米-亚微米-纳米间连续

分布。对致密油储层微观孔隙结构的表征方法不同于常规储层,这使得一些常规储层中的毫米级表征技术无法在致密油储层中应用^[16-20]。近年来,石油工业界在研究致密油储层微观孔隙结构时,除了延续应用常规的测试技术以外,同时积极采用一些高新技术。目前,致密油储层微观孔隙结构的研究方法概括起来主要有3种:实验数据分析技术、图像分析技术与数字岩心技术(表1)。

表1 主要的致密油储层微观孔隙结构表征技术

Table 1 Microscopic pore structure characterization of tight oil reservoirs

技术方法	样品尺度	测试范围	研究内容
实验数据分析技术	恒速压汞技术	cm	$\geq 0.12 \mu\text{m}$
	高压压汞技术	cm	nm~ μm
	核磁共振技术	mm	nm
	低温氮气吸附技术	mm	8 nm~ μm
图像分析技术	铸体薄片	mm	μm
	微纳米CT扫描	mm	nm~ μm
	环境扫描电镜	mm	nm
	聚焦离子束扫描电子显微镜	mm	μm
数字岩心技术	物理实验法	μm ~mm	nm~mm
	数值重建法	μm ~mm	nm~mm

实验数据分析技术通过所获得的实验数据对微观孔喉进行定量表征,主要包括恒速压汞、高压压汞、低温氮吸附、核磁共振技术等,其优点是可以通过实验数据对致密油储层微观孔隙结构进行准确定量的表征,但缺点是每一种技术测试的孔隙范围有限。图像分析技术通过扫描获取二维或三维图像,从而对微观孔喉特征进行定性直观描述及定量表征,主要包括铸体薄片、微纳米CT扫描、聚焦离子束扫描电子显微镜等。数字岩心技术是近年来国内迅速发展的一项技术,它通过计算机模拟岩心内部的孔隙结构。相比于以上两种技术,数字岩心技术具有独特的优点,可以无损、高效地进行致密油储层孔隙结构表征,但数字岩心技术的建模前期需要使用图像分析技术进行岩样扫描。

1.1 实验数据分析技术

恒速压汞、高压压汞、核磁共振技术和低温氮吸附等可定量表征致密油储层微观孔径分布、比表面积等数据信息。恒速压汞技术是在维持界面张力和接触角不变的情况下,以非常低的进汞速度(进汞速度通常为0.00005 mL/min)将汞注入岩样中的孔隙体积之中,此过程保证了准静态进汞过程的发生,可通过进汞压力

的升降来获取岩样的微观孔喉结构参数信息,能够直接获取孔隙(图1(a)^[22])和喉道(图1(b)^[22])的半径分布曲线,也可以分别提供孔隙与喉道的毛细管压力曲线,给出孔隙、喉道半径和孔喉半径分布等岩石微观孔隙结构特征参数,提供反映孔隙、喉道发育程度及孔隙、喉道之间的配套发育程度(孔喉半径比)等信息^[21-24]。但应用此方法测试孔喉半径范围有限,不能够测试0.12 μm 以下的孔喉^[25-26]。高压压汞技术在常规压汞的基础上增大进汞压力,实际测试的是岩石中喉道的分布。但此技术由于进汞压力过高(最高进汞压力可达414 MPa),在实验过程中可能会造成人工裂隙,且其在大孔隙的测量中存在信息丢失现象^[27-30]。核磁共振是通过检测饱和油或者水的岩样中富含氢核且具有核磁矩,而核磁矩在一定的外加静磁场中会发生能级的分裂,此时如果施加一定频率的外加射频磁场,则核磁矩就能够产生吸收跃迁,进而发生核磁共振现象^[31-32]。通过测试岩心中饱和油或水的 T_2 (横向弛豫时间)来反演致密油储层孔隙结构^[33],一般情况下致密油储层 T_2 谱是双峰结构(图2(a)^[33])。设想有一个依据 T_2 截止值可将储层流体划分为难动用流体(左峰)与易动用流体(右

峰),且致密油储层核磁共振图谱左峰与右峰不是截然分开的,表明易动用流体的性质与难动用流体的性质是相似的^[34]。此技术虽然可以进行致密油储层微观孔隙结构的无损检测,但是容易受到岩心中磁性物质以及温度等的影响^[35-36]。

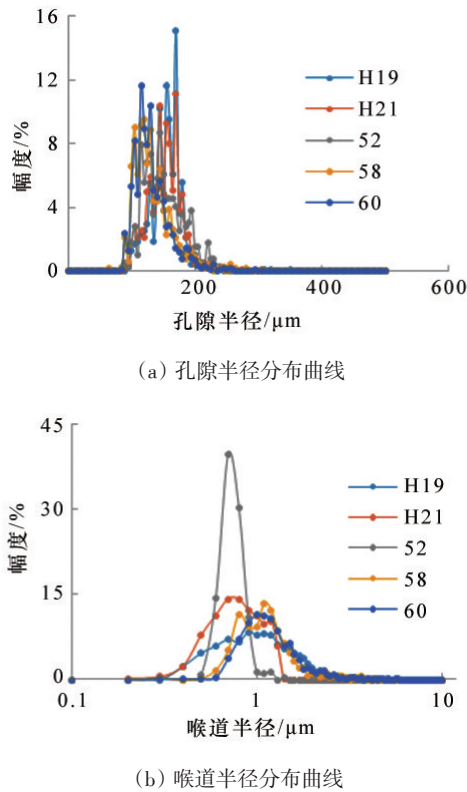


图1 利用恒速压汞法表征四川盆地致密砂岩储层孔喉结构特征

Fig. 1 Characterization of the pore-throat structure of tight sandstone reservoirs in the Sichuan Basin by rate-controlled mercury intrusion

低温氮气吸附技术测试孔隙的有效半径范围为1~50 nm,其测试时间较长,测试点较少;而且对孔隙的表征依赖于计算模型的选择^[37-39]。一般选择由Brunauer、Emmett和Telle提出的多分子层吸附模型(BET)方程计算比表面积^[40],Barret、Joyner和Halenda提出的BJH方程计算孔径分布^[41](图2(b)^[33]),通过等温吸附与脱附曲线预测孔隙形状特征^[42-44]。低温氮气吸附利用BET方程建立单层饱和吸附量与多层吸附量之间的关系,从而求得样品的比表面积。BET方程如下:

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{C - 1}{V_m C} \frac{P}{P_0} \quad (1)$$

式中, V 为样品实际的吸附量; V_m 为单层饱和吸附量; P 为吸附质分压; P_0 为吸附剂饱和蒸气压; C 定义为与样品吸附能力有关的常数。

孔径分布计算使用BJH模型,此方程是在Kelvin方程在圆筒模型中的应用,Kelvin计算公式如下:

$$r_k = \frac{-2CV_m}{RT \ln(P/P_0)} \quad (2)$$

式中, r_k 为孔的Kelvin半径; C 为 N_2 在沸点时的表面张力; V_m 为液氮时的摩尔体积; R 为气体常数; T 为 N_2 的沸点77.4 K; P/P_0 为相对压力。把计算出的 r_k 代入BJH方程,可以得出致密砂岩的孔径分布(图2(b))。

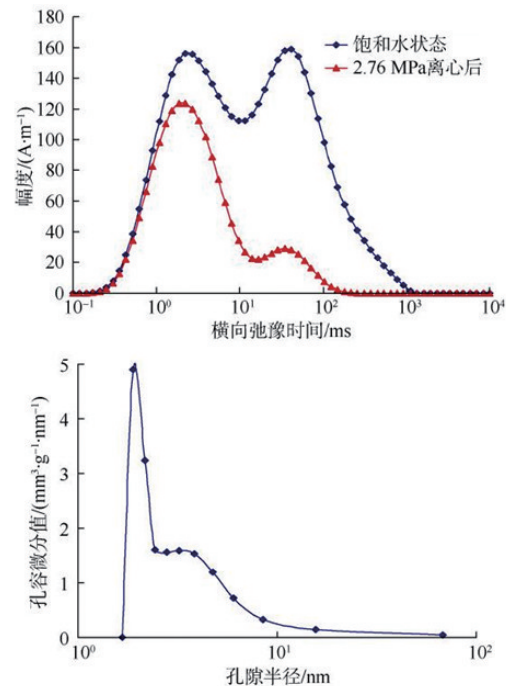


图2 利用核磁共振与低温氮气吸附表征鄂尔多斯盆地陕北地区三叠系长7致密砂岩孔径分布

Fig. 2 Characterization of the pore volume distribution of the Triassic Chang 7 tight sandstone in the northern Shaanxi area of the Ordos Basin by nuclear magnetic resonance and low temperature nitrogen adsorption

以上几种技术在致密油储层微观孔喉定量表征中得到了非常广泛的应用,成为致密油储层孔喉研究必不可少的手段。但是针对致密油储层从纳米级孔隙到微米级孔隙多尺度分布的特征,至今没有一种技术可以精准地测试全尺度的孔隙结构。这是致密油储层孔喉结构表征技术研究的重点,同时也是一大难点。

1.2 图像分析技术

对致密砂岩、碳酸盐岩和灰岩微纳米级孔隙的几何形态、大小以及连通性的定性可视化观察主要是利用铸体薄片、聚集离子束显微镜(FIB-SEM)、Nano-CT等。铸体薄片法是将有色(红色或蓝色)液态胶在真空

状态或者加压下注入岩石的孔隙内部,待液态胶凝固后磨制成岩石薄片。由于岩石中的孔隙被有色胶填充,故在显微镜下容易识别,可直接观察岩心薄片中的孔隙与分布状态、孔隙类型与发育程度、几何形体等信息^[45-48](图3^[48])。这种方法的优点是简洁直观,缺点是人为因素较大,不同观察者对孔喉的表征存在差别。Nano-CT三维成像技术可以快速、无损、清晰、直观地获得岩石的三维图像,从而观察其内部结构、流体分布,并对特征参数进行定量计算^[49]。邹才能等利用场发射扫描电子显微镜与Nano-CT技术对四川盆地上三叠统须家河组致密砂岩进行了研究,并提出纳米孔隙是致密油储层的主要储集空间^[50-51](图4^[51])。但此技术对样品的要求非常严格,视野在1 μm 左右。

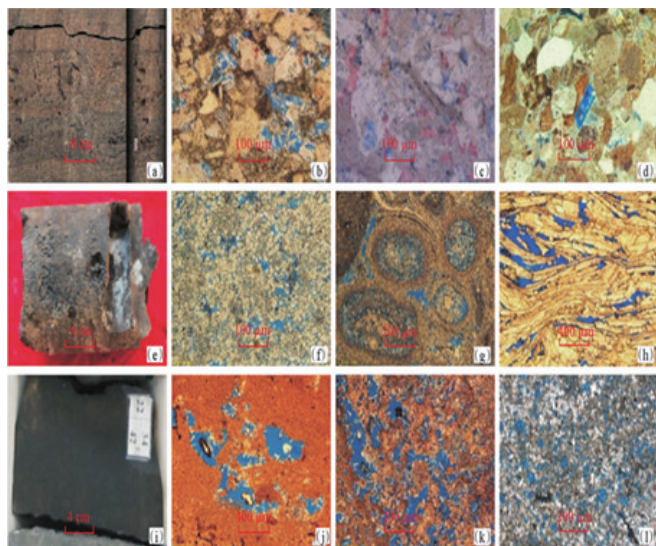


图3 利用铸体薄片观察吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油储层不同类型溶蚀孔隙

Fig. 3 Observation of different types of dissolved pores in tight oil reservoirs of Lucaogou Formation in Jimsar Sag by using casting thin sections

环境扫描电镜将多级真空系统与气体二次电子探测器等技术结合,可在一些特定的环境下,模拟不同的试验条件,对致密岩样微观孔隙结构进行观测。由于环境扫描电镜的分辨率较高,可以将油或水在自然状态下成像,能够观察和记录真实、动态的过程,并使用环境扫描电镜结合X射线能谱仪可测量孔隙半径与喉道半径等信息^[52-53],因此在致密油储层微观孔隙结构的研究中经常用到^[54-55]。

FIB-SEM通过计算机重构可获得高分辨率二维和

三维图像,可研究孔隙类型、连通性等^[56],主要是在页岩气的研究中起到了关键的作用^[57-59]。此技术在样品制作时会损坏样品表面,且成像范围小。环境扫描电镜与FIB-SEM在对岩样观察前,需要对岩样进行预处理,即使用氩离子抛光技术代替传统的机械抛光技术进行预先处理,这样有利于样品观察。

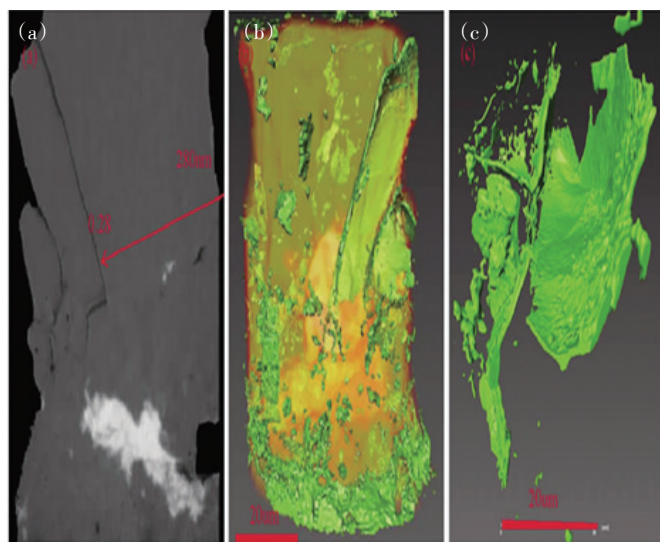


图4 利用Nano-CT技术重构四川盆地上三叠统须家河组致密砂岩复杂孔隙图像

Fig. 4 Reconstruction of complex pore images of the tight sandstone of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the Sichuan Basin using Nano-CT technique

1.3 数字岩心技术

数字岩心技术是指通过计算机模拟岩心内部孔隙结构的技术,可以在不破坏真实岩心的情况下,对岩石的孔隙结构进行构建与模拟。弥补了岩石物理实验的不足,在分析同一块岩心的某一特定性质时,数字岩心可保证其他性质不产生影响^[60]。依靠数字岩心技术进行孔隙结构的三维重构时,一般通过两种方法。第一种是物理实验的方法,利用扫描电镜或者CT成像仪等高精度的仪器获取岩心的二维图像,再对二维图像进行三维重构即可获得数字岩心(图5(a))^[61]。第二种是数值重建的方法,通过岩心扫描图像等资料,经过图像分析提取出孔喉结构信息,再利用数值算法建立数字岩心(图5(b))^[61]。由以上数字岩心的建立方法可以看出,建立数字岩心的基础是图像分析技术。Olumide等利用微-纳米CT扫描技术所获取的二维灰度图像提取出三维孔隙网络模型,并使用孔隙网络模型进行了多

相流动的特征研究,从而丰富了数字岩心现有的分析研究技术^[62]。白斌等针对鄂尔多斯盆地上三叠统延长组致密砂岩微观储层样品进行了微纳米CT扫描实验,通过在微米与纳米尺度上研究了致密砂岩样品的孔喉、形态和连通性,在一定程度上推动了国内数字岩心技术的发展^[49]。也有学者通过Avizo与Comsol等软件的结合应用,使得对数字岩心技术的处理效率得到了较

大的发展与提升^[63]。值得注意的是,中国科学院渗流流体力学研究所经过多年攻关,形成了数字岩心代表性岩样/图像选取方法^[64]、岩石CT扫描图像处理方法和技术^[61]、双孔隙三维数字岩心构建方法^[65]等一批重要成果,为致密储层数字岩心精确建模和多尺度数字岩心构建提供经验和方法,极大地推动了数字岩心技术在非常规油气领域的应用和发展。

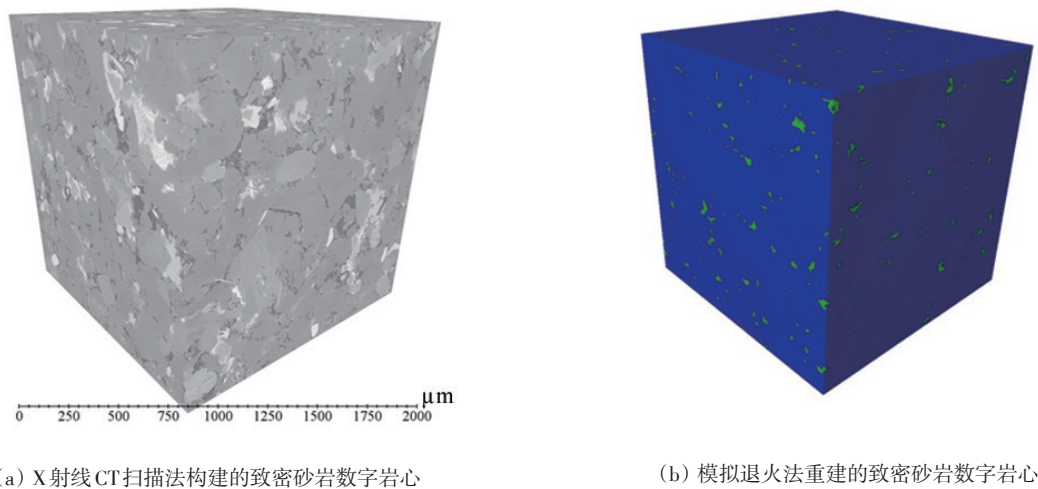


图5 利用数字岩心技术建立致密砂岩岩心

Fig. 5 Establishing tight sandstone cores using digital core technology

2 致密油储层孔径分布与全尺度研究

2.1 致密油储层孔径分布

国内外致密油储层的孔喉半径大小分布各有差异(表2)。北美典型的致密油区东得克萨斯盆地上白垩统Travis Peak致密砂岩孔喉半径为45~220 nm;Piceance盆地上白垩统Mesaverde致密砂岩的孔喉半径为40~180 nm;绿河盆地上白垩统Lance致密砂岩孔喉半径为105~900 nm;中国典型致密油区四川盆地侏罗系致密砂岩孔喉半径为2~1000 nm;鄂尔多斯盆地延长组致密砂岩孔喉半径为60~900 nm。对比国内外典型致密油

储层孔喉半径分布可以得出,致密油储层的孔喉半径普遍小于1000 nm。致密油藏广泛发育的纳米级孔喉系统是大面积连续型或准连续型油气聚集的根本特征,决定了油气呈连续型或准连续型分布^[66-67]。同时,纳米级孔喉系统对储层评价的技术要求也相对较大。

2.2 孔隙大小全尺度分布图谱

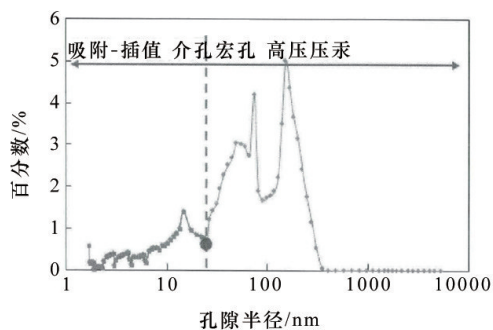
致密油储层孔隙大小分布从几纳米到几百微米之间分布,单一的表征技术难以有效全面地表征其分布特征。在此基础上提出全尺度分布的概念:指致密岩样内部所有孔隙的半径以及该半径孔隙所对应孔隙体积分量的分布图谱。肖前华利用高压压汞、恒速压

表2 国内外典型致密油区块孔喉分布特征

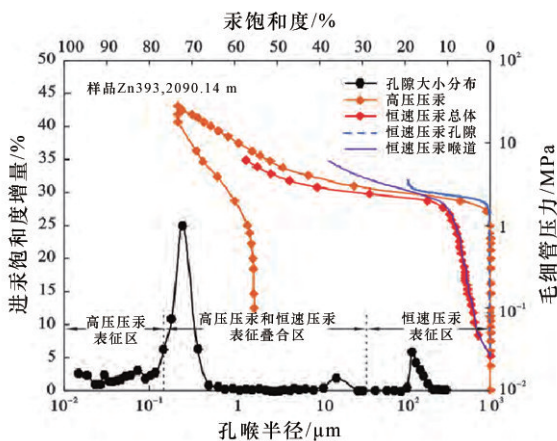
Table 2 Pore throat radius distribution of typical tight oil blocks in China and abroad

国家	区块	储层岩性	表征技术	孔喉分布区间
中国	鄂尔多斯盆地 ^[26]	砂岩	高压压汞、恒速压汞	0.0148~350 μm
	四川盆地 ^[39]	砂岩	低温氮气吸附、高压压汞、恒速压汞	2~900 nm
		灰岩	汞、恒速压汞	2~900 nm
美国	东德克萨斯盆地 ^[66-67]			45~220 nm
	Piceance盆地	砂岩	—	40~180 nm
	绿河盆地			105~900 nm

汞、气体吸附、离心核磁几大测试技术来联合建立致密岩样孔径全尺度分布测试方法^[39](图6(a)^[39])。研究得到国内典型致密油区(大庆、长庆、四川、大港)的储层孔隙全尺度图谱,并指出致密砂岩样品100 nm左右孔隙居多,峰值较高,分布比较集中,在油田开发过程中需要特别关注此类孔隙。Zhao与吴浩等(图6(b)^[26])分别利用高压压汞与恒速压汞技术结合表征致密油储层孔隙大小全尺度分布,其中全尺度图谱上的两个峰分别反映孔隙和喉道,左峰反映的是喉道分布特征,右峰反映的是孔隙分布特征^[25-26]。从以上学者所建立的全尺度图谱中可以得出,致密油储层中发育大量1 nm~1 μm的孔隙,一般占总孔隙的40%~90%,对储层渗透率的贡献微小。



(a) 利用氮气吸附、高压压汞与离心核磁建立的全尺度图谱



(b) 利用高压压汞与恒速压汞建立的全尺度图谱

图6 致密砂岩孔隙大小分布全尺度图谱

Fig. 6 Full-scale map of pore size distribution of tight sandstone

3 结论

致密油储层所具有的纳米孔隙结构,与常规中高渗储层相比很大程度上增加了储层评价难度。尽管关于致密油储层孔隙结构表征技术的研究很多,但是鉴

于实验仪器本身分辨率与精度的限制及研究方法的局限性,目前仍未形成一套成熟的研究方法精准表征致密油储层孔隙结构。在未来关于致密油储层孔隙结构表征技术方面应该着重关注以下2点:1)积极探索致密油储层孔隙结构表征多技术一体化研究,即将实验数据分析技术、图像分析技术和数字岩心技术有机结合有效表征致密油储层孔隙结构;2)大力开展数字岩心技术数据库研究与建设,即如何合理建设致密油储层三维岩心数据库,全面准确地获取孔隙结构微纳米尺度的信息。

参考文献(References)

- [1] 孙赞东. 非常规油气勘探与开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.
Sun Zandong. Unconventional oil and gas exploration and development[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [2] 邹才能, 陶士振, 侯连华, 等. 非常规油气地质[M]. 北京: 地质出版社, 2011.
Zou Caineng, Tao Shizheng, Hou Lianhua, et al. Unconventional oil and gas geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011.
- [3] Bruce J. Bakken black gold[N]. Leader-Post, 2007-12-10(6).
- [4] 闫林, 冉启全, 高阳, 等. 新疆芦草沟组致密油赋存形式及可动性评价[J]. 油气藏评价与开发, 2017, 7(6): 20-25.
Yan Lin, Ran Qiquan, Gao Yang, et al. Evaluation of the form and mobility of tight oil in Lucaogou Formation in Xinjiang[J]. Oil & Gas Reservoir Evaluation and Development, 2017, 7(6): 20-25.
- [5] 邹才能, 朱如凯, 白斌, 等. 致密油与页岩油内涵、特征、潜力及挑战[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(1): 3-17.
Zou Caineng, Zhu Rukai, Bai Bin, et al. Concentration, characteristics, potential and challenges of tight oil and shale oil[J]. Mineral Rock Geochemistry Bulletin, 2015; 34(1): 3-17.
- [6] 邹才能, 杨智, 朱如凯, 等. 中国非常规油气勘探开发与理论技术进展[J]. 地质学报, 2015, 89(6): 979-1007.
Zou Caineng, Yang Zhi, Zhu Rukai, et al. Progress in China's unconventional oil and gas exploration and development and theoretical techniques[J]. Chinese Journal of Geology, 2015, 89(6): 979-1005.
- [7] 杨胜来, 魏俊之. 油层物理学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2015.
Yang Shenglai, Wei Junzhi. Reservoir physics[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015.
- [8] 蔺丽君. 孔隙尺度渗流及其与变形耦合的微观数值模拟研究

- [D]. 成都: 西南石油大学, 2012.
- Lin Lijun. Microscopic numerical simulation of pore-scale seepage and its coupling with deformation[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2012.
- [9] 毕明威, 陈世悦, 周兆华, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田苏6区块盒8段致密砂岩储层微观孔隙结构特征及其意义[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(10): 1851-1861.
- Bi Mingwei, Chen Shiyue, Zhou Zhaohua, et al. Microscopic pore structure and its significance of tight sandstone reservoirs in Block 8 of Su 6 block, Sulige gas field, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(10): 1851-1861.
- [10] 蔺丽君, 杨正明, 王学武, 等. 致密油藏CO₂驱综合效益评价[J]. 科技导报, 2015, 33(15): 38-42.
- Lin Lijun, Yang Zhengming, Wang Xuewu, et al. Comprehensive evaluation of CO₂ flooding in tight reservoirs[J]. Science and Technology Review, 2015, 33(15): 38-42.
- [11] 李登华, 李建忠, 张斌, 等. 四川盆地侏罗系致密油形成条件、资源潜力与甜点区预测[J]. 石油学报, 2017, 38(7): 740-752.
- Li Denghua, Li Jianzhong, Zhang Bin, et al. Formation conditions, resource potential and dessert area prediction of Jurassic tight oil in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(7): 740-752.
- [12] 李博, 刘红岐, 王拥军, 等. 川中自流井组大安寨段致密油储层微观孔隙特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2018(2): 211-220.
- Li Bo, Liu Hongwei, Wang Yongjun, et al. Microscopic pore characteristics of tight oil reservoirs in the Da'anzhai section of the Ziliujing Formation in central Sichuan[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition), 2018(2): 211-220.
- [13] 孙维凤, 宋岩, 公言杰, 等. 青西凹陷下白垩统下沟组泥云岩致密油储层特征[J]. 地质科学, 2015, 50(1): 315-329.
- Sun Weifeng, Song Yan, Gong Yanjie, et al. Characteristics of tight reservoirs of mudstones in the Lower Cretaceous Xigou Formation, Qingxi Sag[J]. Chinese Journal of Geology, 2015, 50(1): 315-329.
- [14] 张盼盼, 刘小平, 王雅杰, 等. 页岩纳米孔隙研究新进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(11): 1242-1249.
- Zhang Panpan, Liu Xiaoping, Wang Yajie, et al. New progress in the study of shale nanopores[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(11): 1242-1249.
- [15] 邹才能, 陶士振, 杨智, 等. 中国非常规油气勘探与研究新进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2012, 31(4): 312-322.
- Zou Caineng, Tao Shizhen, Yang Zhi, et al. New progress in unconventional oil and gas exploration and research in China [J]. Bulletin of Mineralogy, Geochemistry, 2012, 31(4): 312-322.
- [16] Nelson P H. Pore-throat sizes in sandstones, siltstones and shales: Reply[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(8): 1448-1453.
- [17] 朱如凯, 吴松涛, 苏玲, 等. 中国致密储层孔隙结构表征需注意的问题及未来发展方向[J]. 石油学报, 2016, 37(11): 1323-1336.
- Zhu Rukai, Wu Songtao, Su Ling, et al. Problems needing attention in the pore structure characterization of tight reservoirs in China and their future development direction[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(11): 1323-1336.
- [18] 蒋裕强, 陈林, 蒋婵, 等. 致密储层孔隙结构表征技术及发展趋势[J]. 地质科技情报, 2014, 33(3): 63-70.
- Jiang Yuqiang, Chen Lin, Jiang Chan, et al. Characterization technology and development trend of pore structure in tight reservoirs[J]. Geological Science and Technology Information, 2014, 33(3): 63-70.
- [19] Shen W J, Wan J M, Tokunaga T K, et al. Porosity calculation, pore size distribution and mineral analysis within shale rocks: Application of scanning electron microscopy[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 20: 11477-11490.
- [20] 李熙喆, 郭振华, 万玉金, 等. 安岳气田龙王庙组气藏地质特征与开发技术政策[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(3): 398-406.
- Li Xizhe, Guo Zhenhua, Wan Yujin, et al. Geological characteristics and development strategies for Cambrian Longwangmiao Formation gas reservoir in Anyue gas field, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(3): 398-406.
- [21] 杨正明, 蒋帅, 张亚蒲, 等. 低渗碳酸盐岩油藏储层综合评价方法[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2016, 38(1): 68-75.
- Yang Zhengming, Jiang Shuai, Zhang Yapu, et al. Comprehensive evaluation method for reservoirs of low permeability carbonate reservoirs[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science Edition), 2016, 38(1): 68-75.
- [22] Zhao X, Yang Z M, Lin W, et al. Characteristics of microscopic pore-throat structure of tight oil reservoirs in Sichuan Basin measured by rate-controlled mercury injection[J]. Open Physics, 2018, 16: 675-684.
- [23] 李易霖, 张云峰, 丛琳, 等. X-CT扫描成像技术在致密砂岩微观孔隙结构表征中的应用——以大安油田扶余油层为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(2): 379-387.
- Li Yilin, Zhang Yunfeng, Cong Lin, et al. Application of X-CT scanning imaging technique in microscopic pore structure characterization of tight sandstone: Taking Fuyu oil layer in Da'an Oilfield as an Example[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, 46(2): 379-387.
- [24] 杨正明. 特低-超低渗透油气藏特色实验技术[M]. 北京: 石

- 油工业出版社, 2012: 25–98.
- Yang Zhengming. Experimental characteristics of ultra-low-permeability reservoirs[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [25] Zhao H, Ning Z, Wang Q, et al. Petrophysical characterization of tight oil reservoirs using pressure-controlled porosimetry combined with rate-controlled porosimetry[J]. *Fuel*, 2015, 154: 233–242.
- [26] 吴浩, 张春林, 纪友亮, 等. 致密砂岩孔喉大小表征及对储层物性的控制——以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组为例[J]. *石油学报*, 2017, 38(8): 876–887.
- Wu Hao, Zhang Chunlin, Ji Youliang, et al. Characterization of pore throat size and control of reservoir physical properties in a tight sandstone: A case study of the Yanchang Formation in the eastern part of the Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(8): 876–887.
- [27] Pittman E D. Relationship of porosity and permeability to various parameters derived from mercury injection capillary pressure curves for sandstones[J]. *AAPG Bulletin*, 1992, 76(2): 191–198.
- [28] Yao Y, Liu D. Comparison of low-field NMR and mercury intrusion porosimetry in characterizing pore size distributions of coals[J]. *Fuel*, 2012, 95(1): 152–158.
- [29] Clarkson, C. R, Solano, et al. Pore structure characterization of North American shale gas reservoirs: Using USANS/SANS, gas adsorption, and mercury intrusion[J]. *Fuel*, 2013, 103(1): 606–616.
- [30] Xi K, Cao Y, Haile B G, et al. How does the pore-throat size control the reservoir quality and oiliness of tight sandstones? The case of the Lower Cretaceous Quantou Formation in the southern Songliao Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 76: 1–15.
- [31] 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 Zhaohui. Evaluation of low-permeability oilfield development potential using nuclear magnetic resonance fluid[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, 22(6): 40–44.
- [32] Yang Z M, Ma Z Z, Luo Y T, et al. A measured method for in situ viscosity of fluid in porous media by nuclear magnetic resonance[J]. *Geofluids*, 2018, 2018: 9542152.
- [33] Li H B, Guo H K, Yang Z M, et al. Tight oil occurrence space of Triassic Chang 7 Member in Northern Shanxi area, Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration & Development*, 2015, 42(3): 434–438.
- [34] 杨正明, 张亚蒲, 李海波, 等. 核磁共振技术在非常规油气藏的应用基础[J]. *地球科学*, 2017, 42(8): 1333–1339.
- Yang Zhengming, Zhang Yapu, Li Haibo, et al. Application basis of nuclear magnetic resonance technology in unconventional oil and gas reservoirs[J]. *Journal of Earth Sciences*, 2017, 42(8): 1333–1339.
- [35] 刘标, 姚素平, 胡文璋, 等. 核磁共振冻融法表征非常规油气储层孔隙的适用性[J]. *石油学报*, 2017, 38(12): 1401–1410.
- Liu Biao, Yao Suping, Hu Wenbiao, et al. Applicability of NMR freeze-thaw method for characterizing pores in unconventional oil and gas reservoirs[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(12): 1401–1410.
- [36] Chen T, Yang Z M, Ding Y H, et al. Waterflooding huff-n-puff in tight oil cores using online nuclear magnetic resonance [J]. *Energies*. 2018, 11(6): 15–24.
- [37] Shen W J, Li X Z, Lu X B, et al. Experimental study and isotherm models of water vapor adsorption in shale rocks[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 52: 484–491.
- [38] Kuila U, Prasad M. Specific surface area and pore-size distribution in clays and shales[J]. *Geophysical Prospecting*, 2013, 61(2): 341–362.
- [39] 肖前华. 典型致密油区储层评价及渗流机理研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- Xiao Qianhua. Reservoir evaluation and seepage mechanism in typical tight oil areas [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [40] Tokunaga T K, Shen W J, Wan J M, et al. Water saturation relations and their diffusion-limited equilibration in gas shale: Implications for gas flow in unconventional reservoirs[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53: 1–14.
- [41] 沈伟军, 郭伟, 李熙喆, 等. 水蒸气吸附法和氮气吸附法在表征页岩孔隙结构中的对比分析[J]. *天然气工业*, 2017, 37(增刊1): 78–84.
- Shen Weijun, Guo Wei, Li Xiwei, et al. Comparative analysis of water vapor adsorption and nitrogen adsorption in characterizing shale pore structure[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(Suppl 1): 78–84.
- [42] 陈萍, 唐修义. 低温氮吸附法与煤中微孔隙特征的研究[J]. *煤炭学报*, 2001, 26(5): 552–556.
- Chen Ping, Tang Xiuyi. Low temperature nitrogen adsorption method and characteristics of micropores in coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2001, 26(5): 552–556.
- [43] Sing K S W. Reporting physisorption data for gas/solid systems—with special reference to the determination of surface area and porosity[J]. *Pure and Applied Chemistry*, 1985, 57(4): 603–619.
- [44] 肖前华, 张尧, 杨正明, 等. 中国典型致密油区低温氮气吸附实验[J]. *特种油气藏*, 2015, 22(4): 82–85.
- Xiao Qianhua, Zhang Yao, Yang Zhengming, et al. Low tem-

- perature nitrogen adsorption experiment in typical tight oil regions of China[J]. *Special Oil and Gas Reservoir*, 2015, 22(4): 82-85.
- [45] Yang Y, Yang J, Yang G, et al. New research progress of Jurassic tight oil in central Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(6): 954-964.
- [46] Sun Y, Deng M, Shizhong M A, et al. Distribution and controlling factors of tight sandstone oil in Fuyu oil layers of Da'an area, Songliao Basin, NE China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(5): 646-655.
- [47] 王力娜, 朱玉双, 党洲涛, 等. 吴堡地区7致密砂岩成岩作用及成岩相划分[J]. *地下水*, 2017, 39(3): 201-204.
Wang Lina, Zhu Yushuang, Dang Zhoutao, et al. Diagenesis and diagenetic facies division of 7 tight sandstones in Wubao area[J]. *Groundwater*, 2017, 39(3): 201-204.
- [48] 闫林, 冉启全, 高阳, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油储层溶蚀孔隙特征及成因机理[J]. *岩性油气藏*, 2017, 29(3): 27-33.
Yan Lin, Ran Qiquan, Gao Yang, et al. Corrosion pore characteristics and genesis mechanism of tight oil reservoirs in Lucaogou Formation, Jimsar Sag[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2017, 29(3): 27-33.
- [49] 白斌, 朱如凯, 吴松涛, 等. 利用多尺度CT成像表征致密砂岩微观孔喉结构[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(3): 329-333.
Bai Bin, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Characterization of microscopic pore throat structure of tight sandstone by multi-scale CT imaging[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(3): 329-333.
- [50] 邹才能, 杨智, 陶士振, 等. 纳米油气与源储共生型油气聚集[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(1): 13-26.
Zou Caineng, Yang Zhi, Tao Shizhen, et al. Nano-oil and gas reservoirs with symbiotic hydrocarbon accumulation[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(1): 13-26.
- [51] 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. The first discovery of nanopores in China's oil and gas reservoirs and its scientific value[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(6): 1857-186.
- [52] 严启团, 马成华, 单秀琴, 等. 环境扫描电镜在我国油气工业中的应用研究[J]. *电子显微学报*, 2001, 20(3): 224-231.
Yan Qituan, Ma Chenghua, Shan Xiubin, et al. Application of environmental scanning electron microscopy in china's oil and gas industry[J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2001, 20(3): 224-231.
- [53] 于丽芳, 杨志军, 周永章, 等. 扫描电镜和环境扫描电镜在地学领域的应用综述[J]. *中山大学研究生学刊(自然科学, 医学版)*, 2008(1): 54-61.
Yu Lifang, Yang Zhijun, Zhou Yongzhang, et al. Review of the application of scanning electron microscopy and environmental scanning electron microscopy in the field of geosciences[J]. *Sun Yat-sen University Graduate Science (Natural Science, Medical Edition)*, 2008(1): 54-61.
- [54] 公言杰, 柳少波, 朱如凯, 等. 松辽盆地南部白垩系致密油微观赋存特征[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(3): 294-299.
Gong Yanjie, Liu Shaobo, Zhu Rukai, et al. Microscopic occurrence characteristics of Cretaceous tight oil in southern Songliao Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(3): 294-299.
- [55] 李易霖. 致密砂岩储层微观孔喉结构精细表征[D]. 大庆: 东北石油大学, 2017.
Li Yilin. Fine characterization of microscopic pore throat structure in tight sandstone reservoirs[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2017.
- [56] Curtis M E, Sondergeld C H, Ambrose R J, et al. Microstructural investigation of gas shales in two and three dimensions using nanometer-scale resolution imaging[J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(4): 665-677.
- [57] Ambrose R J, Hartman R C, Campos M D, et al. New pore-scale considerations for shale gas in place calculations[C]// *SPE Unconventional Gas Conference*. New York: Society of Petroleum Engineers, 2010: 219-229.
- [58] 马勇, 钟宁宁, 黄小艳, 等. 聚集离子束扫描电镜(FIB-SEM)在页岩纳米级孔隙结构研究中的应用[J]. *电子显微学报*, 2014, 33(3): 251-256.
Ma Yong, Zhong Ningning, Huang Xiaoyan, et al. Application of aggregated ion beam scanning electron microscopy (FIB-SEM) in the study of nanoscale pore structure of shale[J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy*, 2014, 33(3): 251-256.
- [59] 李熙喆, 郭振华, 胡勇, 等. 中国超深层构造型大气田高效开发策略[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(1): 111-118.
Li Xizhe, Guo Zhenhua, Hu Yong, et al. Efficient development strategies for large ultra-deep structural gas fields in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(1): 111-118.
- [60] 赵秀才. 数字岩心及孔隙网络模型重构方法研究[D]. 东营: 中国石油大学, 2009.
Zhao Xiucui. Research on digital core and pore network model reconstruction method [D]. Dongying: China University of Petroleum, 2009.
- [61] Lin W, Li X Z, Yang Z M, et al. A new improved threshold segmentation method for scanning images of reservoir rocks considering pore fractal characteristics[J]. *Fractals*, 2018, 26(2): 1840003.
- [62] Talabi O A, Alsayari S, Blunt M J, et al. Predictive pore scale modeling: from 3D images to multiphase flow simulations[C]//

- SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New York: Society of Petroleum Engineers, 2008, doi: 10.2118/115535-MS.
- [63] 刘向君, 朱洪林, 梁利喜. 基于微CT技术的砂岩数字岩石物理实验[J]. 地球物理学报, 2014, 57(4): 1133-1140.
- Liu Xiangjun, Zhu Honglin, Liang Lixi. Digital rock physics experiment of sandstone based on micro-CT[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(4): 1133-1140.
- [64] Wei Lin, Zhengming Yang, Xizhe Li, et al. A method to select representative rock samples for digital core modeling[J]. Fractals, 2017, 25(4): 1740013.
- [65] Lin W, Li X Z, Yang Z M, et al. Construction of dual pore 3-D digital cores with a hybrid method combined with physical experiment method and numerical reconstruction method[J]. Transport in Porous Media, 2017, 120(1): 227-238.
- [66] 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): 173-187.
- Zou Caineng, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Types, characteristics, mechanisms and prospects of conventional and unconventional oil and gas accumulation: A case study of tight oil and tight gas in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.
- [67] Nelson P H. Pore-throat sizes in sandstones, tight sandstones and shales[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(3): 329-340.

Research progress on microstructure characterization of pore throat for tight oil reservoirs

YANG Zhengming^{1,3}, ZHAO Xinli^{2,3}, XIONG Shengchun^{1,3}, LUO Yutian^{1,2,3}, ZHANG Yapu^{1,3}, HE Ying^{1,3}, LIN Wei^{2,3}, CHEN Ting^{2,3}, ZHANG Anshun¹, XIA Debin^{2,3}, LIN Lijun⁴, ZHOU Sibin⁵, WU Jinwei⁵

1. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China
2. School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, China
4. Shandong Agricultural and Engineering University, Jinan 250100, China
5. Exploration and Development Research Institute of SINOPEC North China Company, Zhengzhou 450006, China

Abstract With the great success of unconventional oil and gas exploration and development in the world, more and more attention has been paid to the pore structure characteristics of tight rock reservoirs. The soul of unconventional oil and gas research is the reservoir, the goal of which is to answer how much oil and gas is stored in the reservoir. Pores in tight oil reservoirs are the main places for oil and gas storage and percolation, therefore, it is the key and difficult point for unconventional oil and gas research to accurately characterize the microscopic pore structure of reservoirs. This paper classifies the pore structure characterization technologies of tight oil reservoirs, namely experimental data analysis technology, image analysis technology and digital core technology. Each type of characterization technology is summarized, and its test range for pore size, advantage and disadvantage are pointed out. Finally, by reviewing the existing characterization technology, the development trend of microscopic pore structure characterization technology for tight oil reservoirs is further prospected.

Keywords tight reservoir; pore structure; characterization technology ●



(责任编辑 刘志远)