

doi: 10.11720/wtyht.2022.1190

陈秀娟, 刘之的, 刘宇羲, 等. 致密储层孔隙结构研究综述[J]. 物探与化探, 2022, 46(1): 22-31. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1190>

Chen X J, Liu Z D, Liu Y X, et al. Research into the pore structure of tight reservoirs: A review[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(1): 22-31. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1190>

致密储层孔隙结构研究综述

陈秀娟¹, 刘之的^{1,2}, 刘宇羲³, 柴慧强³, 王勇³

(1. 西安石油大学 地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 西安石油大学 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 陕西 西安 710065; 3. 中国石油长庆油田分公司 陇东页岩油开发项目部, 甘肃庆阳 745000)

摘要: 国家对油气资源需求日益剧增的背景下, 油气田勘探开发的主战场由常规转向非常规领域, 致密油气成为当今及未来非常规油气勘探开发的热点和重点。我国致密储层多为陆相沉积, 横向连续性差、纵向非均质性强、岩性复杂、物性变化大, 致使致密储层的孔隙结构难以有效表征。储层孔隙结构不仅影响油气赋存, 还严重制约着油气渗流和高效开采。为有针对性地分析致密储层的孔隙结构特征, 系统调研了致密储层孔隙结构评价手段的相关文献资料, 梳理了半渗透隔板等间接测定法、铸体薄片等直接观测法、数字岩心法之后, 剖析了致密储层孔隙结构测井评价方法, 并探讨了各方法的适用性和优缺点, 进而基于该领域的研究现状展望了其发展趋势。

关键词: 孔隙结构; 致密储层; 实验测试; 测井

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2022)01-0022-10

0 引言

相比北美海相盆地致密油气, 国内致密油气多为陆相沉积, 不能简单照搬北美现有的致密储层孔隙结构评价技术。陆相致密储层沉积演化复杂, 岩性和物性多变, 致使孔隙结构难以评价^[1]。油田实践表明, 孔隙结构是储层物性最重要的控制因素, 对储层评价和油气藏产能预测等均具有极其重要的作用, 极大程度影响着致密油气的采收率^[2-3]。由于致密储层孔隙结构的非均质性, 在油田实际开发过程中, 会存在着注水压力高、进水快、启动压力高等棘手问题, 致使油气田开采受到不同程度的影响^[4]。因此, 精准评价致密储层的孔隙结构, 将有助于致密油气的高效开发^[5]。

孔隙结构直接关系到油气在储层中的赋存状态及渗流特征, 明确孔隙结构参数是储层定量评价的一项重要内容^[6]。目前, 致密储层孔隙结构的研究已进入白热化阶段, 前人对致密储层孔隙结构评价

中遇到的问题有不同的见解与认识, 难以形成统一的储层孔隙系统评价标准。在此背景下, 认清各技术手段的方法原理, 明确各方法的适用性, 将有助于开展孔隙结构评价工作^[7]。据此, 从实验室测试分析和测井资料评价两方面, 系统梳理了致密储层孔隙结构的研究现状, 分析了适用性, 展望了其发展趋势。

1 实验室测试评价方法

1.1 间接测定法

间接测定法主要通过测量湿相液体被驱替出的体积大小, 建立湿相饱和度(吸附量)与毛管压力(相对压力)的关系, 获取表征储层形态、大小、喉道连通性以及储层储集和渗流能力的相关参数, 进而定性研究和定量分析储层的孔隙结构^[8]。

1.1.1 压汞法

20 世纪 70 年代以来, 相关领域的诸多专家对储层岩石毛管压力开展过大量实验研究^[9]。压汞

收稿日期: 2021-04-12; 修回日期: 2021-11-26

基金项目: 陕西省教育厅重点科学研究计划项目(20JY056); 西安石油大学研究生创新与实践能力培养计划(YCS20112015)

第一作者: 陈秀娟(1995-), 女, 在读硕士, 主要研究方向为测井地质学。Email: 1559572335@qq.com

通讯作者: 刘之的(1978-), 男, 博士, 教授, 主要从事储层测井评价研究工作。Email: liuzhidi@xsyu.edu.cn

实验能较准确地测量毛管压力,获取储层孔隙系统信息,是定量分析储层孔隙结构的一种可靠手段^[10]。相比大多数流体,水银对岩石是非湿润相。据此,业界常将水银注入岩心孔隙中,并根据进退汞饱和度和施加的排驱压力,来绘制毛管压力曲线^[11]。

随着油气田勘探开发向非常规储层进发,常规压汞难以准确评价储层的孔隙结构,而恒速压汞技术不仅能控制实验注入速度,还可以实现对喉道数量的测量,因故逐渐得到广泛应用^[12]。恒速压汞就是将水银以一个相对静态的低速注入岩样孔隙中,观察孔隙系统中毛管压力的变化过程。尽管恒速压

汞实验难度相对较高,但可以较为准确地测量孔隙和喉道的数量、大小及分布范围,故适用于小孔喉较多、孔隙结构较复杂的致密储层评价^[13]。由于高压压汞曲线能直接反映岩心喉道、孔径及孔喉发育和连通情况,也得到了广泛应用。

图 1 为岩样 JY-1 和 N78-3 的高压压汞和恒速压汞毛管压力对比^[14]。由此图可知,高压压汞和恒速压汞实验所得的毛管压力曲线大体一致,仅存在细微差别。然而,高压压汞法适用于描述相对较小的孔喉,恒速压汞表征的储层孔喉相对较大,两者各有长处且均可用于致密储层孔隙结构的研究。

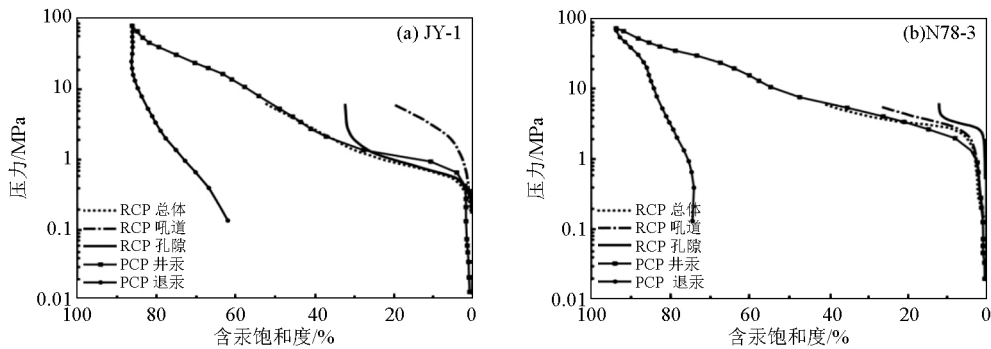


图 1 高压压汞与恒速压汞毛管压力曲线对比^[14]

Fig.1 Comparison of capillary pressure curves between high pressure mercury intrusion and constant pressure mercury intrusion^[14]

1.1.2 半渗透隔板法

在空气、水、半渗透隔板系统中,半渗透隔板是 100%水润湿;而在空气、水、岩心系统中,岩石也是 100%水润湿,所以即使没有压力差,水也可以轻松透过半渗透隔板和岩样^[15]。鉴于毛管阻力作用,必须存在压力差,空气才能穿过半渗透隔板和岩样。一般情况下,半渗透隔板的孔径会小于大多数岩样孔径,因此,空气进入半渗透隔板所需要的压力差必须大于空气进入岩心孔隙所需的压力,故需要向空气施加压力,克服岩心的毛管阻力,使其进入岩心孔隙,并将水替换出来^[16]。测定半渗透隔板毛管压力和岩样含水饱和度的参数值并建立其相互关系,便可以确定毛管压力曲线(如图 2^[17])。

1.1.3 离心机法

离心机高速旋转时,岩心孔隙中的润湿相流体将被驱替出来,随着离心机转速从低到高逐渐增加,润湿相流体驱替由中大孔逐渐转至中小孔和微小孔,同时毛管压力会不断增大^[18]。实验的过程中,通过增大离心机角速度来增大离心力。由于非润湿相会从各种渗透率的多孔介质中将湿润相驱替出来,依次记录不同压力下排出的润湿相体积,便可建

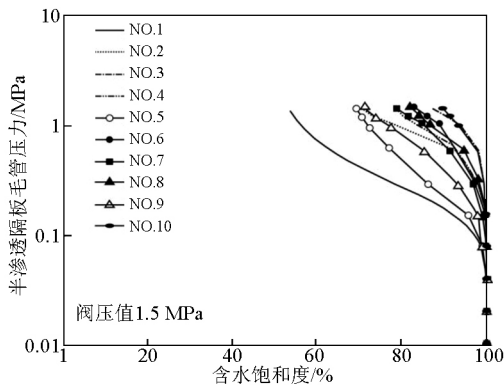


图 2 半渗透隔板毛管压力曲线^[17]

Fig.2 Capillary pressure curve of semi-permeable plate^[17]

立起润湿相饱和度与毛管压力间的关系,进而可绘制出毛管压力曲线(如图 3)。

1.1.4 N₂、CO₂ 吸附法

N₂ 和 CO₂ 低压吸附广泛应用于纳米材料的研究中,而近几年逐渐应用于岩石孔隙结构评价上。CO₂ 低压吸附主要用于孔径小于 2 nm 的微小孔隙特征描述,而 N₂ 低温吸附则适用于中大孔隙及小孔储层^[19]。

岩样预处理后,烘干并在真空条件下抽去其他

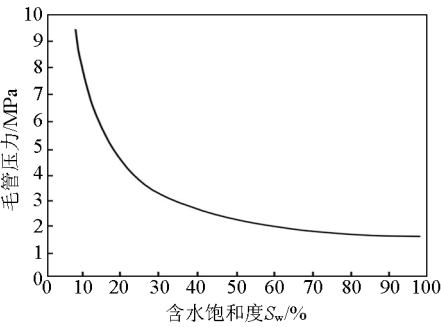


图 3 离心机法测定毛管压力曲线

Fig.3 Capillary pressure curve measured by Centrifuge method

气体,用 N_2 、 CO_2 填充岩样和仪器,保持恒温条件,测量不同压力下的吸附量和脱附量。建立气体相对压力 P/P_0 与氮气吸附量、脱附量的关系,便可绘制出吸附与脱附等温线关系(图 4^[20])。基于此关系图,结合 Kelvin 原理,便可获取孔隙体积、孔径大小及分布特征^[21-22]。

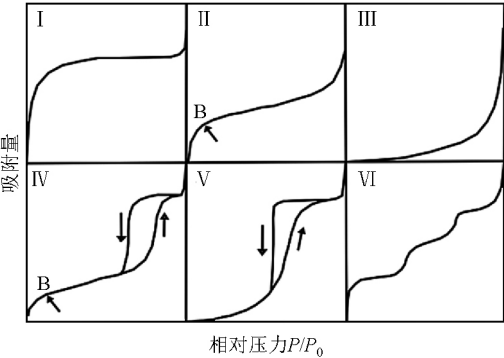


图 4 IUPAC 的 6 种等温吸附线^[20]

Fig.4 Six isothermal adsorption lines of IUPAC^[20]

1.1.5 中子散射

由于中子小角度散射(SANS)能识别大小为 3~10 nm 的孔隙结构,故在致密储层的研究中得到广泛应用。实验第一步先用晶片锯将岩样切成约 2 mm 厚的薄片,再使用精密加工的专用设备将岩心样品研磨至理想厚度,即厚度为 1 mm 的岩样。SANS 实验如图 5 所示^[23],由机械速度选择器单色化的中子束通过准直系统入射到样本上,与样品发生弹性散射后的中子被二维探测器测量记录,以此来获取散射曲线等原始数据^[24]。通过构建相应的模型,分析散射曲线与孔隙结构的内在量化关系,便可获取孔隙结构的形状、大小及分布特征等^[25-26]。

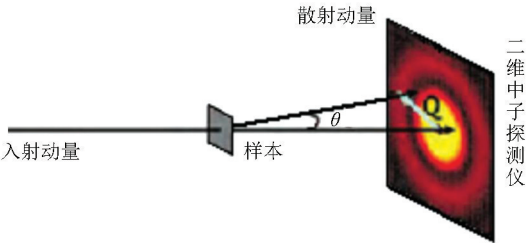


图 5 中子散射示意^[23]

Fig.5 Neutron scattering diagram^[23]

1.2 直接观测法

1.2.1 铸体薄片法

在一定的温度和压力或真空状态下,将环氧树脂与固化剂注入岩石孔隙中,形成岩石铸体(图 6^[27]);再将岩石铸体研磨成薄片,借助偏光显微镜进行岩石孔隙结构、成分等分析^[28]。铸体薄片能够清晰获取储层的孔隙类型、大小、分布及其连通性等,为研究孔隙发育程度、介质孔径、喉道、配位数及裂缝率等孔隙信息提供了一种准确有效的方法^[29]。

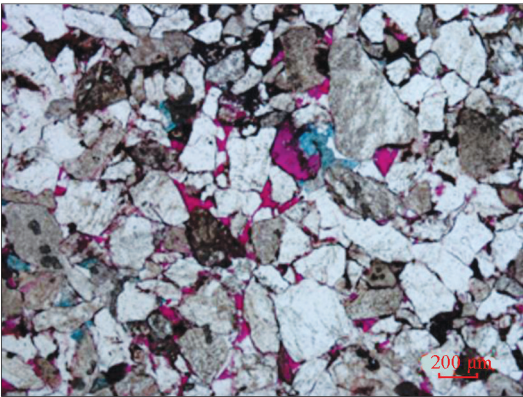


图 6 不同岩心铸体薄片^[27]

Fig.6 Casting thin sections of different cores^[27]

1.2.2 扫描电镜法

扫描电镜法是分析岩样孔隙结构特征和成分的重要研究方法,其原理是利用极细的电子束扫描岩心样品表面,并用电视原理放大成像在电子屏幕上^[30]。该法可以确定储层的孔隙类型,还能定量测定孔喉半径、孔径等参数。当电子轰击岩样表面时会产生来自样品特定发射区域的各种信号,信号随表面形状不同而发生变化,比如散射电子、二次电子和能量不同的光子等^[31]。近年来,非常规储层孔隙结构评价中,实验分析人员常用场发射扫描电镜表征样品表面的孔隙结构^[32-33]。

1.2.3 CT 扫描法

CT 扫描法是近年来新兴的利用 X 射线进行孔隙结构研究分析的电子计算机扫描技术^[34-35]。如图 7^[36]所示,使用 X 射线环绕岩心进行断面扫描,探测器可接收到透过岩心断面的 X 射线信息,将此信息用电子计算机处理后,便可获取 X 射线吸收系数^[37]。用不同灰度将 X 射线吸收系数进行图像显示,通过显示器便可清晰明了地观察到该岩心断面的孔隙结构特征。

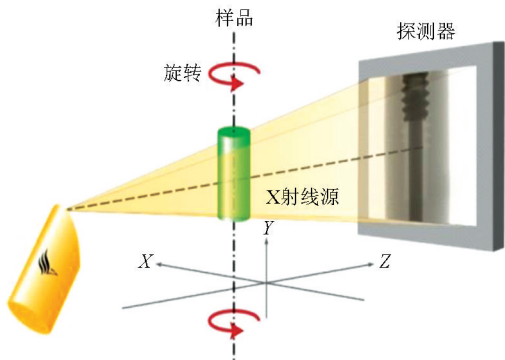


图 7 X 射线 CT 扫描示意^[36]

Fig.7 X-ray CT scanning diagram^[36]

1.2.4 阴极发光法

与普通显微镜相比,阴极发光显微镜能够快速鉴别岩石和矿物的成分^[38]。近年来,矿物岩石学家已认识到阴极发光技术在构造地质分析中的重要性,并进行了有益的探索和研究^[39]。通过对致密砂岩阴极发光的观察研究,可以获得砂岩原始孔隙率和渗透率以及储层矿物组成、产状等信息。若矿物中含有杂质或微量元素,矿物的晶格结构存在缺陷,则矿物在阴极发光显微镜下会发光(图 8^[40]),基于此,便可研究不发光部分的孔隙结构特征。

1.3 数字岩心法

目前,数字岩心法已成为研究孔隙结构的一种新手段。业界常用 X 射线法和图像重建法构建三维数字岩心,并采用数学手段重构三维孔隙网络,进而获取孔隙结构特征^[41]。X 射线成像法主要是利用 Micro-CT 设备,提供分辨率可达到孔隙级别的 3D 图像^[42]。受制于 X 射线成像技术条件,业界相关学者常采用基于薄片分析的图像重建方法^[43],该方法只需少量岩屑用于扫描图像。图像重建方法需先确定岩石断面,扫描该断面后,利用不同的数学方法结合扫描图像,模拟岩样的三维孔隙网络(图 9^[44]),进而对该岩样的孔隙特性进行研究分析^[45]。

2 测井资料评价方法

油田实践中,受制于钻井取心成本,岩心资料较为稀缺。无论采油井还是注水井,测井资料不可或缺,且具有纵向分辨率高的独特优势^[46],因此,充分利用测井资料,开展储层孔隙结构评价就显得意义非凡。

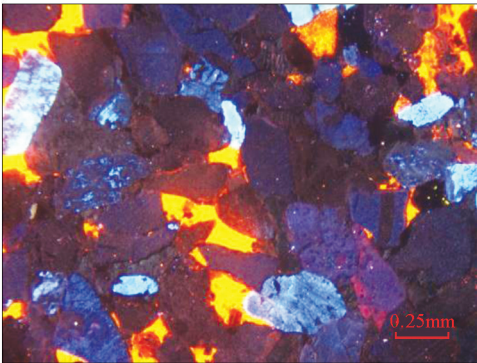
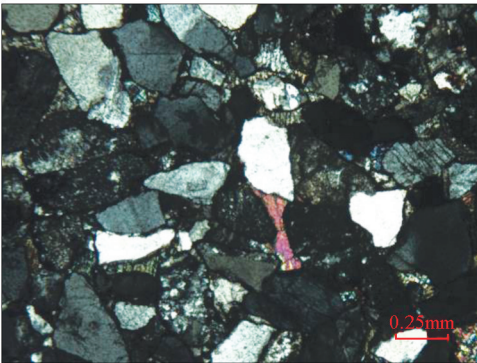
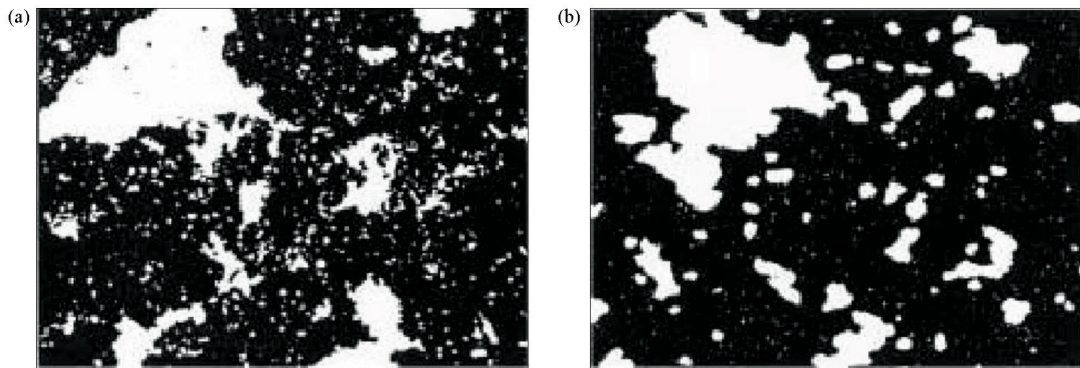


图 8 不同岩样阴极发光鉴定^[40]

Fig.8 Cathodoluminescence identification of different rock samples^[40]

图9 真实岩心(a)与数字岩心(b)对比^[44]Fig.9 Comparison chart of real core(a) and digital core(b)^[44]

2.1 电阻率法

已有研究表明^[47], 储层孔隙结构与岩石电阻率间存在一定关系。致密储层物性条件差、孔隙结构复杂, 岩石电阻率测量值会受到储层孔隙结构、孔隙表面水膜厚度等的影响。电阻率测井响应特征影响因素复杂多样, 不同岩石孔隙结构的影响程度不一, 故理论模拟研究需根据不同影响因素建立岩石导电模型, 进而开展孔隙结构理论分析。孔隙结构理论分析研究中, 常根据电阻率并联导电原理, 构建毛管半径、毛管迂回度及孔隙结构综合指数计算模型, 从而开展储层孔隙结构评价^[48]。

岩石孔隙结构特性亦可通过岩石电学特性实验来开展。通过测定不同饱和度下岩心的电阻率, 结合岩心孔隙结构与地层因素、电阻率及含水饱和度相互关系分析, 探讨储层的孔隙结构特征^[49]。

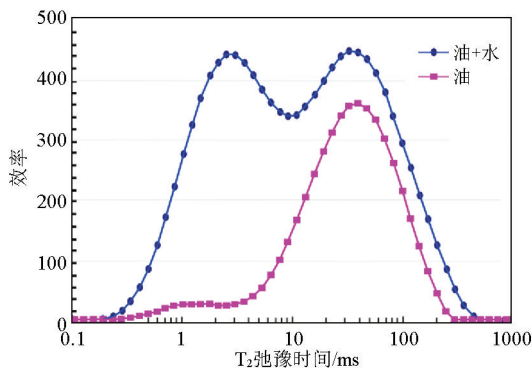
2.2 核磁共振法

核磁共振测井始于 20 世纪 90 年代, 目前已在国内油气田勘探开发中得到了广泛应用^[50]。该技术主要通过检测储层孔隙中自由流体氢原子核磁性及其与外磁场相互作用获取丰富的地层信息, 以此来评价储层的岩石孔隙结构^[51]。统计岩样孔隙内流体的横向弛豫时间分布(图 10^[52]), 便可分析储层的孔隙结构特征^[53]。

核磁共振横向弛豫时间 T_2 谱可表征孔隙类型、孔径大小等储层岩石的孔隙结构特性^[54]。近年来, 相关学者将核磁共振 T_2 谱转换为毛管压力曲线, 发现岩心的 T_2 几何均值与平均孔喉半径间具有较好的相关性^[55-60]。总之, 寻求核磁共振 T_2 谱与毛管压力曲线间的内在关系来分析储层的孔隙结构特征, 是近年来研究的热点。

2.3 声波时差法

岩石物理分析家一直重视利用声波时差测井评价储层孔隙结构的相关研究^[61]。已有研究发现, 除

图10 核磁共振 T_2 谱图^[52]Fig.10 NMR T_2 spectrum^[52]

岩性和物性外, 孔隙结构对岩石弹性波速度具有重要影响, 控制着声波在岩石中的传播特性^[62-63]; 储层的孔隙类型对岩石声波传播速度具有较大的影响, 印模孔隙及粒间孔隙的岩心比微孔隙的岩心具有更快的声波传播速度^[64]。研究孔隙裂隙致密储层声波传播特性发现, 孔隙结构对声波特性具有较大的影响, 尤其是裂缝^[65-66]。岩心声波透射实验表明, 声波波速、时域波形及频谱特征主要与岩心孔径尺寸及胶结情况有关^[67]。

3 孔隙结构评价方法适用性分析

限于实验技术手段和条件、测井能够探测的孔径范围等客观因素, 孔隙结构评价方法均具有一定的局限性和适用范围。

3.1 实验测试方法适用性

压汞法实验简单快速、准确, 可以获得相对完整的毛管压力曲线, 且仪器承受的测量压力较高, 适合不同渗透级别的岩心^[68-69]; 然而, 压汞法多用于中大孔岩心, 难以模拟油层温压条件, 且压汞实验使用的水银会对岩心造成永久性损害, 实验岩样不能二次利用。半渗透隔板法与油藏驱替实验相似, 不仅

操作简单、测量结果准确可靠,而且可以同时测量多块岩样;但半渗透隔板法实验过程长,半渗透隔板的承受力也有限,导致实验获取的毛管压力曲线并不完整;此外,该方法测试的压力范围小、周期长,对致密储层孔隙结构研究适用性不强。离心机法不仅易操作、测定速度快、精度高,且该方法测量压力高,可用于研究不同渗透率级别的岩心,实验数据准确,同时可得到相对完整的曲线;离心机法测定的结果接近模拟油藏驱替实验,但是高速离心机成本较高。气体吸附法主要用于表征孔径不超过 300 nm 的储层孔隙结构,且实验前须对岩样进行干燥处理。

铸体薄片和扫描电镜法均需要对岩样进行加工处理,且岩心的内部结构和外部形状易受到损坏,不利于岩心的循环使用,铸体薄片观测的孔隙视野较为有限^[70]。CT 扫描技术不仅测量速度快,能全面观察整个岩心的内部结构特征,而且能保证岩样不被破坏,精准测量面孔率,但缺点是成本较高、实验过程复杂。相比扫描电镜和 CT 扫描,阴极发光能更快、更准确地表征原始孔隙度和渗透率,可定量研究砂岩储层的孔隙结构特征^[71]。小角度中子散射法测量的孔径范围大,能准确提取孔隙结构信息,且对岩样不具破坏性,但实验过程相对较麻烦,目前还是一种非常规方法。数字岩心法不仅可以模拟室内实验达不到的各种情况,还可以就单因素对岩石孔隙结构进行定量分析,故近年来受到业内相关学者的高度重视^[72]。

实验测试法易操作且可以获得较多数据,表征的储层孔隙结构精度较高,但该法测量成本高、周期长,此外,由于取心尺寸和数量非常有限,很大程度上限制了对岩心孔隙结构的研究,使其难以与储层宏观参数建立关系,也很难开展区域储层预测,且该法易受人为因素及仪器精度的影响,局限较大。

3.2 测井评价方法适用性

实验室测试方法受制于岩心数量及尺寸,且成本较高,而借助测井资料表征储层孔隙结构可解决该问题。测井曲线是评价孔隙结构低成本、高效率的重要研究方法,可实现孔隙结构在储层纵向上的连续评价^[73]。

电阻率测井不仅受储层岩性、物性和孔隙结构的影响,孔隙内流体性质亦对其具有较大的影响^[74]。因此,电阻率测井评价储层孔隙结构时,需在相同岩性、物性和流体性质的前提下,才能获得较满意的评价效果。致密储层孔隙结构非常复杂,微纳米级孔隙极其发育,声波能探测的孔径和孔隙形态尚不明朗,微纳米级孔隙结构对声波时频信号的

影响机理尚未明确,这些都严重影响了声波测井评价致密储层的孔隙结构^[75]。核磁共振法对孔隙结构反应灵敏,操作简便,速度快,可以连续、定量、详细地表征储层孔隙结构^[76],且不会破坏岩样,该法的实验结果比压汞法更加精准,故在致密储层孔隙结构评价方面具有一定的优势;然而,核磁共振法由于价格昂贵,难以大面积推广应用。

测井资料纵向连续性好、分辨率强,可连续表征储层的孔隙结构,有助于区域储层岩石孔隙结构的研究,但受制于岩心归位、常规测井对储层孔隙结构的敏感性较低等客观实际,常规测井表征的储层孔隙结构精度较低。尽管核磁共振测井在表征储层孔隙结构方面优势明显,但受制于测井成本,核磁共振测井数量非常有限,难以大面积推广应用。

4 致密储层孔隙结构研究展望

基于上述致密储层孔隙结构评价方法的系统梳理和详细剖析,紧跟大型体积压裂背景下复杂孔隙结构评价需求的形势可知,现有致密储层孔隙结构评价方法正面临着新的挑战。针对致密油开发对储层孔隙结构评价提出的新需求,笔者认为尚需在如下 3 方面获得突破。

4.1 研究技术手段

1) 加强定性识别与定量评价有机结合,发挥各自的技术优势。采用高精度扫描电镜等对岩心进行定性观察,确定其孔隙类型、结构等,再结合吸附法、压汞法等手段定量研究孔隙结构分布,逐渐成为致密储层孔隙结构研究的必备技术手段。

2) 从间接到直接,从二维到三维数字岩心建模,是近年来孔隙结构可视化表征的热点。基于微纳米扫描电镜图像或三维 CT 扫描图像,应用计算机图像处理技术,通过模拟退火算法或沉积岩的过程模拟法来重建三维数字岩心,进而可视化表征岩石的内部孔隙网络结构。

3) 岩心实验测试分析与测井评价有机融合,注重岩心刻度测井,实现储层孔隙结构表征区域化。充分利用岩心测试分析的高精度性与测井信息的纵向连续性,结合多种研究手段,扬长避短,从不同视角、全方位、多尺度研究储层孔隙结构,以期表征的储层孔隙结构精度满足于油气田勘探开发实践。

4.2 孔隙结构影响特征

1) 沉积作用较大程度上控制着储层的孔隙结构。系统研究油区内的沉积相带、砂体构型,通过沉积微相与储层孔隙结构间的内在关系分析,明确储

层孔隙结构的沉积控制机理,将有助于储层有效性评价和有利区划分。

2)成岩作用是储层致密化的重要因素,严重影响着储层的孔隙结构演化。注重储层成岩演化序列和成岩相研究,解析不同成岩作用对孔隙结构的影响机制,将助推油气田优质储层预测,也可为开发政策制定提供地质理论依据。

3)构造作用形成的裂缝,能改善储层的孔隙结构,增加渗流能力。通过应力场模拟、岩心—测井—地震识别裂缝,精细刻画裂缝的发育特征,系统剖析构造对孔隙结构的影响作用,以期为油气成藏和渗流研究提供理论支持。

4.3 孔隙结构对油气成藏、渗流的影响

1)储层孔隙结构特征控制着油气运移和疏导,是油气成藏的重要影响因素。在储层孔隙结构精细表征的基础上,借助于油气成藏可视化模拟系统,开展不同孔隙结构特征下的油气成藏模拟研究,明确孔隙结构与成藏模式的关系,将有助于油气田勘探目标区优选。

2)储层孔隙结构决定了油气渗流通道,严重影响着油气田高效开发。利用大尺度或全直径岩心,在地层温压条件下,开展不同孔隙结构特征下的油气渗流实验,结合油气藏数值模拟研究,剖析孔隙结构与油气渗流的关系,进而确定油气开采的储层物性动用下限,以期为油气田开发方案制定提供支持。

参考文献 (References):

[1] 王振林,毛志强,孙中春,等.致密储层孔隙结构核磁共振测井评价方法[J].断块油气田,2017,24(6):783-787.
Wang Z L, Mao Z Q, Sun Z C, et al. Evaluation of pore structure using NMR logs for tight oil reservoirs [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2017, 24(6): 783-787.

[2] Ning C X, Jiang Z X, Gao Z Y, et al. Quantitative evaluation of pore connectivity with nuclear magnetic resonance and high pressure mercury injection: A case study of the lower section of Es³ in Zhanhua sag [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(3): 578-585.

[3] 查明,苏阳,高长海,等.致密储层储集空间特征及影响因素——以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例[J].中国矿业大学学报,2017,46(1):85-95.
Zha M, Su Y, Gao C H, et al. Tight reservoir space characteristics and controlling factors: An example from Permian Lucaogou Formation in Jimsar Sag, Junggar Basin, northwest China [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(1): 85-95.

[4] 于爽,萨中开发区储层微观孔隙结构及非均质性研究[D].大庆:东北石油大学,2016.
Yu S. Study on the micro pore structure and heterogeneity of reservoir in central Saertu area [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2016.

versity, 2016.

[5] 辛江.甘谷驿油田顾屯区延长组长6油层组储层评价及控制因素分析[D].西安:长安大学,2018.
Xin J. Study on the comprehensive reservoir evaluation and controlling factors of Chang 6 oil set, Yanchang Formation in Gutun area, Ganguyi oilfield [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.

[6] 郝乐伟,王琪,唐俊.储层岩石微观孔隙结构研究方法 with 理论综述[J].岩性油气藏,2013,25(5):124-128.
Hao L W, Wang Q, Tang J. Research progress of reservoir microscopic pore structure [J]. Lithologic Reservoirs, 2013, 25(5): 124-128.

[7] 伍鹏.致密储层的孔隙结构及渗透率表征[D].北京:中国石油大学,2017.
Wu P. Characterization of pore structure and permeability prediction in tight oil reservoir [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2017.

[8] 王超.川西蓬莱镇组致密砂岩储层孔隙结构评价及气水微观赋存机理研究[D].成都:西南石油大学,2017.
Wang C. Pore structure evaluation and gas water microscopic occurrence mechanism of tight sandstone reservoir in Penglaizhen formation, Western Sichuan [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.

[9] 车荣华.低渗透油层微观孔隙结构研究[D].大庆:东北石油大学,2016.
Che R H. Study on micro pore structure of low permeability reservoir [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2016.

[10] Christos D T, Alkiviades C P. Characterization of the pore structure of reservoir rocks with the aid of serial sectioning analysis, mercury porosimetry and network simulation [J]. Advances in Water Resources, 2000, 23(7): 773-789.

[11] Hao L, Tang J, Wang Q, et al. Fractal characteristics of tight sandstone reservoirs: A case from the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 46: 80-92.

[12] 吴松涛,朱如凯,李勋,等.致密储层孔隙结构表征技术有效性评价与应用[J].地学前缘,2018,25(2):192-203.
Wu S T, Zhu R K, Li X, et al. Evaluation and application of porous structure characterization technologies in unconventional tight reservoirs [J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(2): 191-203.

[13] Clarkson C R, Bustin R M. The effect of pore structure and gas pressure upon the transport properties of coal: A laboratory and modeling study [J]. Adsorption Rate Modeling Fuel, 1999, 78(11): 1345-1362.

[14] 赵华伟.致密储层微观孔隙结构及渗流规律研究[D].北京:中国石油大学,2017.
Zhao H W. Study on micro scale pore structure and flow mechanism of tight oil sandstones [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2017.

[15] 李鑫.致密储层孔隙结构综合评价方法研究[D].北京:中国石油大学,2017.
Li X. Study on comprehensive evaluation method of pore structure of tight oil reservoir [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2017.

[16] 张维.基于常规测井资料的储层微观孔隙结构评价方法[D].

大庆:东北石油大学,2017.

Zhang W. Microscopic pore structure evaluation method based on conventional logging data [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2017.

[17] 张冲,张超谟,张占松,等.致密气储层岩心束缚水饱和度实验对比[J].天然气地球科学,2016,27(2):352-358.

Zhang C, Zhang C M, Zhang Z S, et al. Comparative experimental study of the core irreducible water saturation of tight gas reservoir [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(2): 352-358.

[18] 李霏,陈铭谦,赵御庭,等.岩石微观孔隙结构研究方法综述[J].地下水,2019,41(6):112-114.

Li F, Chen M Q, Zhao Y T, et al. A summary of research methods on microscopic pore structure of rocks [J]. Ground Water, 2019, 41(6): 112-114.

[19] 王伟明,卢双舫,田伟超,等.利用微观孔隙结构参数对辽河大民屯凹陷页岩储层分级评价[J].中国石油大学学报:自然科学版,2016,40(4):12-19.

Wang W M, Lu S F, Tian W C, et al. Liaohe oilfield shale reservoir quality grading with micropore evaluation parameters in Damintun depression [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2016, 40(4): 12-19.

[20] 李昊远.氮气吸附法的致密砂岩孔隙结构分析[J].云南化工,2019,46(12):87-90.

Li H Y. Pore structure analysis of tight sandstone by nitrogen adsorption method [J]. Yunnan Chemical Technology, 2019, 46(12): 87-90.

[21] 戚灵灵,王兆丰,杨宏民,等.基于低温氮吸附法和压汞法的煤样孔隙研究[J].煤炭科学技术,2012,40(8):36-39.

Qi L L, Wang Z F, Yang H M, et al. Study on porosity of coal samples based on low temperature nitrogen adsorption method and mercury porosimetry [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(8): 36-39.

[22] 谢晓永,唐洪明,王春华,等.氮气吸附法和压汞法在测试泥页岩孔径分布中的对比[J].天然气工业,2006,26(12):100-102.

Xie X Y, Tang H M, Wang C H, et al. Contrast of nitrogen adsorption method and mercury porosimetry method in analysis of shale's pore size distribution [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(12): 100-102.

[23] 彭攀,宁正福,祁丽莎,等.致密储层孔隙结构研究方法概述[J].油气藏评价与开发,2014,4(1):30-31.

Peng P, Ning Z F, Qi L S, et al. Research method of pore structure in tight reservoir [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2014, 4(1): 30-31.

[24] 张林浩,徐嫣然,孙梦迪,等.利用小角中子散射表征页岩闭孔结构与演化[J].沉积学报,2021,39(2):1-22.

Zhang L H, Xu Y R, Sun M D, et al. The structure and evolution of closed pores in shale determined by small angle neutron scattering [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(2): 1-22.

[25] Ghiassi-Freerz J, Soleimanpour I, Kadkhodaie-Ilkhchi A, et al. Semi-automated porosity identification from thin section images using image analysis and intelligent discriminant classifiers [J]. Computers & Geosciences, 2012, 45: 36-45.

[26] 张天付,鲍征宇,李东,等.页岩孔隙系统研究实验方法[J].地质科技情报,2016,35(4):192-198.

Zhang T F, Bao Z Y, Li D, et al. Information experimental methods for shale pore system [J]. Geological Science and Technology, 2016, 35(4): 192-198.

[27] 宋梓语.塔里木油田克深地区砂岩酸化伤害实验研究[D].北京:中国石油大学,2018.

Song Z Y. Experimental analysis of sandstone formation damage with acidizing treatment in Keshen area (Tarim Oilfield) [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2018.

[28] 胡勇.致密砂岩气藏储层渗流机理研究[D].大庆:东北石油大学,2016.

Hu Y. Research on percolation mechanism of tight sandstone gas reservoir [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2016.

[29] 常敏.准噶尔盆地车排子地区白垩系清水河组储层特征研究[D].北京:中国石油大学,2017.

Chang M. Study on reservoir characteristics of the cretaceous Qing-shuihe Formation in Chepaizi area, Junggar Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2017.

[30] Bonnet N, Herbin M, Vautrot P. Multivariate image analysis and segmentation in microanalysis [J]. Scanning Microsc, 1997, 11(1):1-21.

[31] Zhang Y X, Ghanbarnezhad M, Rouzbeh, et al. Pore structure characterization of a shale sample using SEM images [C]//California: SPE Western Regional Meeting, 2019.

[32] Nadeau P H, Hurst A H. Application of back-scattered electron microscopy to the quantification of clay mineral microporosity in sandstones [J]. Journal of Sedimentary Research, 1991, 61(6):921-925.

[33] Adrian C, Louis H, René B. Petrophysical properties of porous medium from petrographic image analysis data [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2001: 187.

[34] 王丽,袁伟,程光华,等.基于常规测井的储层孔隙结构评价新方法[J].海洋石油,2018,38(2):58-65.

Wang L, Yuan W, Cheng G H, et al. A new method of reservoir pore structure evaluation based on conventional logging data [J]. Off-shore Oil, 2018, 38(2): 58-65.

[35] 陈超,魏彪,梁婷,等.一种基于工业CT技术的岩芯样品孔隙度测量分析方法[J].物探与化探,2013,37(3):500-507.

Chen C, Wei B, Liang T, et al. The application of industrial computation tomography (CT) to the analysis of core sample porosity [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(3): 500-507.

[36] 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 Y L, Zhang Y F, Cong L, et al. Application of X-CT scanning technique in the characterization of micro pore structure of tight sandstone reservoir: Taking the Fuyu oil layer in Daan oilfield as an example [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2016, 46(2): 379-387.

[37] Kazak A, Chugunov S, Chashkov A, et al. Integration of large-area scanning-electron-microscopy imaging and automated mineralogy petrography data for selection of nanoscale pore-space characterization sites [C]//SPE Res Eval & Eng, 2018, 21: 821-836.

- [38] 尹海生.古流向分析及储层评价技术在砂岩型铀矿床勘探中的应用[J].四川地质学报,2005(3):131-135.
Yin H S. The application of paleocurrent analysis and reservoir assessment technology to the exploration of sandstone-type uranium deposits [J]. Acta Geologica Sichuan, 2005(3):131-135.
- [39] Galaup S, Liu Y, Cerepi A. New integrated 2D-3D physical method to evaluate the porosity and microstructure of carbonate and dolomite porous system [J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2012, 154 (Special Issue: Characterization of Porous Solids IX): 175-186.
- [40] 宋梓语.塔里木油田克深地区砂岩酸化伤害实验研究[D].北京:中国石油大学,2018.
Song Z Y. Experimental analysis of sandstone formation damage with acidizing treatment in Keshen area(Tarim Oilfield) [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2018.
- [41] 姚军,赵秀才,衣艳静,等.数字岩心技术现状及展望[J].油气地质与采收率,2005,12(6):52-54.
Yao J, Zhao X C, Yi Y J, et al. The current situation and prospect on digital core technology [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2005, 12(6):52-54.
- [42] Coenen J, Tchouparova E, Jing X. Measurement parameters and resolution aspects of micro X-ray tomography for advanced core analysis [C]//Abu Dhabi: Proceedings of International Symposium of the Society of Core Analysts, 2004:256-261.
- [43] 李建胜,王东,康天合.基于显微 CT 试验的岩石孔隙结构算法研究[J].岩土工程学报,2010,32(11):1703-1708.
Li J S, Wang D, Kang T H. Algorithmic study on rock pore structure based on micro-CT experiment [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(11):1703-1708.
- [44] Wu K, Nunan N, Crawford J W, et al. An efficient Markov chain model for the simulation of heterogeneous soil structure [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2004, 68(2):346-351.
- [45] Dal F N, Delmas P, Duwig C, et al. Coupling X-ray microtomography and mercury intrusion porosimetry to quantify aggregate structures of a cambisol under different fertilisation treatments [J]. Soil and Tillage Research, 2012, 119:13-21.
- [46] Dernaika M, Efnik M S, Koronful M S, et al. Evaluation of water saturation from laboratory to logs and the effect of pore geometry on capillarity [C]//Abu Dhabi: SPWLA Middle East Regional Symposium, 2007.
- [47] 陈杰.基于电阻率测井资料研究致密砂岩孔隙结构特征[D].成都:西南石油学院,2005.
Chen J. Study on pore structure characteristics of tight sandstone based on resistivity logging data [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2005.
- [48] Carlos A, Grattoni. The effect of differences of multiphase spatial distributions on the electric properties of porous media [J]. Log Analyst, 1998, 39(4):47-57.
- [49] 况晏.致密砂砾岩储层孔隙结构及饱和度测井评价方法研究[D].成都:西南石油大学,2018.
Kuang Y. Study on the well logging evaluation method of pore structure and saturation in the tight sandy conglomerate reservoirs [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [50] Ge X, Fan Y, Cao Y, et al. Reservoir pore structure classification technology of carbonate rock based on NMR T2 spectrum decomposition [J]. Applied Magnetic Resonance, 2014, 45(2):155-167.
- [51] 王学武,杨正明,李海波,等.核磁共振研究低渗透储层孔隙结构方法[J].西南石油大学学报:自然科学版,2010,32(2):70-72.
Wang X W, Yang Z M, Li H B, et al. Experimental study on pore structure of low permeability core with NMR spectra [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2010, 32(2):70-72.
- [52] 陈国军,高明,李静,等.核磁共振测井在致密储层孔隙结构评价中的应用[J].天然气勘探与开发,2014,37(2):41-44.
Chen G J, Gao M, Li J, et al. Application of NMR well logging to evaluating porous structure of tight oil reservoir [J]. Natural Gas Exploration & Development, 2014, 37(2):41-44.
- [53] Huang X, Li A, Li X, et al. Influence of typical core minerals on tight oil recovery during CO₂ flooding using NMR technique [J]. Energy & Fuels, 2019, 33(8):7147-7154.
- [54] Yakov V. A practical approach to obtain drainage capillary pressure curves from NMR core and log data [J]. Petrophysics, 2001, 4:334-343.
- [55] 刘堂宴,王绍民,傅容珊,等.核磁共振谱的岩石孔喉结构分析[J].石油地球物理勘探,2003,38(3):328-333.
Liu T Y, Wang S M, Fu R S, et al. Analysis of rock pore throat structure with NMR spectra [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2003, 38(3):328-333.
- [56] 何雨丹,毛志强,肖立志,等.利用核磁共振 T₂ 分布构造毛管压力曲线的新方法[J].吉林大学学报:地球科学版,2005,35(2):177-181.
He Y D, Mao Z Q, Xiao L Z, et al. A new method to obtain capillary pressure curve using NMR T₂ distribution [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2005, 35(2):177-181.
- [57] 童茂松.泥质砂岩激发极化弛豫时间谱的正则化反演[J].物探与化探,2015,39(1):186-191.
Tong M S. The regularization inversion of induced polarization relaxation time spectrum of argillaceous sand [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(1):186-191.
- [58] Eslami M, Kadkhodaie A, Sharghi Y, et al. Construction of synthetic capillary pressure curves from the joint use of NMR log data and conventional well logs [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2013, 111(11):50-58.
- [59] Liang X, Zou C C, Mao Z Q, et al. An empirical approach of evaluating tight sandstone reservoir pore structure in the absence of NMR logs [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2015, 137:227-239.
- [60] 陈文祥.致密砂岩油藏孔隙特征与衰竭式开采实验研究[D].北京:中国地质大学,2019.
Chen W X. Experimental investigation of tight oil pore characteristic and depletion [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019.
- [61] 侯波,康洪全,程涛.综合成岩作用和孔隙形状的岩石物理模型及其应用[J].物探与化探,2019,43(1):161-167.
Hou B, Kang H Q, Cheng T. A new rock physics model integrating diagenesis and pore shape and its application [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(1):161-167.
- [62] Tao G, King M S. Porosity and pore structure from acoustic well log-

- ging data [J]. *Geophysical Prospecting*, 1993, 41(4): 435–451.
- [63] Sun Y F. A two-parameter model of elastic wave velocities in rocks and numerical AVO modeling [J]. *Journal of Computational Acoustics*, 2004, 12(4): 619–630.
- [64] Eberli G P, Batzle M L, Anselmetti F S, et al. Factors controlling elastic properties in carbonate sediments and rocks [J]. *The Leading Edge*, 2003, 22(1): 654–660.
- [65] 唐晓明. 含孔隙、裂隙介质弹性波动的统一理论——Biot 理论的推广[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(6): 784–795.
Tang X M. A unified theory for elastic wave propagation through porous media containing cracks—an extension of Biot's poroelastic wave theory [J]. *Science China Earth Science*, 2011, 41(6): 784–795.
- [66] 陈雪莲, 唐晓明, 钱玉萍. 含孔隙、裂隙致密介质中多极子声波的传播特征[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(9): 2961–2970.
Chen X L, Tang X M, Qian Y P. Characteristics of multipole acoustic logging in cracked porous tight formations [J]. *Chinese Journal of Geophysics Propagation*, 2014, 57(9): 2961–2970.
- [67] 张明明, 梁利喜, 蒋少龙. 不同孔隙结构碳酸盐岩对声波时频特性的影响[J]. *断块油气田*, 2016, 23(6): 825–828.
Zhang M M, Liang L X, Jiang S L. Influence of different pore structures of carbonate rock on time and frequency characteristics of acoustic wave spread [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2016, 23(6): 825–828.
- [68] 承秋泉, 陈红宇, 范明, 等. 盖层全孔隙结构测定方法[J]. *石油实验地质*, 2006, 28(6): 604–608.
Cheng Q Q, Chen H Y, Fan M, et al. Determination of the total pore texture of caprock [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2006, 28(6): 604–608.
- [69] 李宁. 火成岩储层孔隙结构表征与储层参数分类评价[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
Li N. Characterization of igneous reservoir pore structure and classified evaluation of reservoir parameter [D]. Changchun: Jilin University, 2010.
- [70] 黄婧. 多孔介质孔隙结构研究综述[J]. *内江师范学院学报*, 2016, 31(4): 13–18.
Huang J. A review of the research progress of the multi-pore media porous structure [J]. *Journal of Neijiang Normal University*, 2016, 31(4): 13–18.
- [71] Clelland W D, Fens, Koninklijke T W. Automated rock characterization with SEM image-analysis techniques [J]. *SPE Formation Evaluation*, 1991, 6(4): 437–443.
- [72] 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): 1324–1336.
Zhu R K, Wu S T, Su L, et al. Problems and future works of porous texture characterization of tight reservoirs in China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(11): 1324–1336.
- [73] 章新文, 毛海艳, 谢春安, 等. 泌阳凹陷深层致密砂岩孔隙结构测井评价方法研究[J]. *特种油气藏*, 2019, 26(4): 27–32.
Zhang X W, Mao H Y, Xie C A, et al. Logging evaluation method for the tight sandstone pore structure in Biyang depression [J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2019, 26(4): 27–32.
- [74] 夏培. 含泥质致密砂岩储层三孔隙导电模型[J]. *物探与化探*, 2017, 41(4): 748–752.
Xia P. A triple-porosity conducting model for shaly tight sandstone reservoir [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2017, 41(4): 748–752.
- [75] 范雨霏, 潘保芝, 张芳. 复杂孔隙几何形态导电理论与火山岩饱和度模型研究[J]. *物探与化探*, 2018, 42(1): 172–177.
Fan Y F, Pan B Z, Zhang F. Research on conductive mechanism and saturation model of the volcanic reservoir with complex pore structure [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42(1): 172–177.
- [76] Li C X, Liu M, Guo B C. Classification of tight sandstone reservoirs based on NMR logging [J]. *Applied Geophysics*, 2019, 16(4): 554–556.

Research into the pore structure of tight reservoirs: A review

CHEN Xiu-Juan¹, LIU Zhi-Di^{1,2}, LIU Yu-Xi³, CHAI Hui-Qiang³, WANG Yong³

(1. College of the Geoscience and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Petroleum Accumulation Geology, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 3. Longdong Department of Shale Oil Development Project in Changqing Oilfield, PetroChina, Qingyang 745000, China)

Abstract: With the increasing demand for oil and gas resources, the exploration and development of oil and gas fields have shifted from conventional to unconventional fields, and tight oil and gas reservoirs have become the current and future focus of the exploration and development of unconventional oil and gas. Most of the tight reservoirs in China are continental sediments with poor lateral continuity, strong vertical heterogeneity, complex lithology, and large changes in physical properties. All these make it difficult to effectively characterize the pore structure of tight reservoirs. The pore structure of reservoirs not only affects the occurrence of oil and gas but also seriously restricts the seepage and efficient exploitation of oil and gas. To analyze the pore structure characteristics of tight reservoirs in a targeted manner, this study systematically investigates relevant literature on the assessment methods of pore structure of tight reservoirs and organizes indirect measurement methods such as semi-permeable plate, direct observation methods such as casting thin sections, and digital core method. Moreover, it dissects the logging-based assessment methods of the pore structure of tight reservoirs, explores the applicability, advantages, and disadvantages of these methods, and further proposes the development trend of pore structure study based on the current status.

Key words: pore structure; tight reservoir; experimental test; well logging

(本文编辑: 叶佩)