

曹茜, 王兴志, 戚明辉, 等. 页岩油地质评价实验测试技术研究进展[J]. 岩矿测试, 2020, 39(3): 337 - 349.
CAO Qian, WANG Xing - zhi, QI Ming - hui, et al. Research Progress on Experimental Technologies of Shale Oil Geological Evaluation[J]. Rock and Mineral Analysis, 2020, 39(3): 337 - 349. 【DOI: 10. 15898/j. cnki. 11 - 2131/td. 2020010600005】

页岩油地质评价实验测试技术研究进展

曹茜^{1,2,3,4}, 王兴志^{1*}, 戚明辉^{2,3,4}, 黄毅^{2,3,4}, 张烨毓^{2,3,4}, 刘虎^{2,3,4}, 王代富^{2,3,4}

- (1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610091;
2. 页岩气评价与开采四川省重点实验室, 四川 成都 610091;
3. 四川省科源工程技术测试中心, 四川 成都 610091;
4. 自然资源部复杂构造区页岩气勘探开发工程技术创新中心, 四川 成都 610091)

摘要:页岩油实验测试分析在页岩油地质评价中发挥着重要作用, 目前页岩油储层矿物组成、有机质类型、丰度、物性以及岩石脆性等诸多方面的评价参数均需要通过实验测试来获取。本文评述了页岩油储层评价中烃源岩特性、储层储集性、含油性、可动性及可压性等各项实验测试技术研究现状和趋势, 重点阐述了各项实验测试技术的目的及方法。页岩油烃源岩特性要综合有机质类型, 丰度, 成熟度, 生物标志化合物, 主量、微量和稀土元素等进行全面准确的评价; 储集性与页岩矿物组成、孔隙、裂缝等储集空间分布特征密切相关, 结合页岩含油饱和度、页岩油黏度、密度等评价页岩含油性和可动性; 页岩可压性评价需综合考虑页岩的矿物组成、岩石力学特征参数等因素。同时探讨了页岩油储层地质评价实验测试技术未来发展方向, 指出多种方法联合表征页岩油储层储集空间分布特征、不同赋存状态页岩油的分布特征、天然裂缝发育分析等是页岩油储层地质评价技术的关键攻关方向。

关键词:页岩油; 烃源岩特性; 储层储集性; 含油性; 可压性

要点:

- (1) 总结了页岩油储层评价的相关实验测试技术。
(2) 阐述了烃源岩特性、储层储集性、含油性、可动性及可压性等测试方法及进展。
(3) 储集空间、不同赋存状态页岩油及天然裂缝的定量表征是页岩油储层地质评价的攻关方向。

中图分类号: TE135.4 **文献标识码:** A

页岩油是指储存于富有机质、以纳米级孔径为主页岩地层中的成熟石油资源^[1]。据国际能源署(IEA)评价预测, 全球页岩油技术可采资源总量为 4189×10^8 桶, 其中美国、俄罗斯、中国页岩油可采资源量位居全球前三位, 分别为 782×10^8 桶、 746×10^8 桶、 322×10^8 桶, 约占全球页岩油可采资源量的 19%、18%、8%^[2-3]。近几年我国在页岩油勘探开发领域相继开展了大量工作并取得重要进展, 在鄂尔多斯盆地延长组长 7 段、松辽盆地白垩系青山口组、准噶尔盆地二叠系、渤海湾盆地沙河街组、四

川盆地侏罗系自流井—凉高山组、江汉盆地古近—新近系、南襄盆地古近—新近系等均发育有页岩油储层, 预测总可采储量约 $30 \times 10^8 \sim 60 \times 10^8$ 吨。我国页岩油储层主要形成于陆相半深湖—深湖沉积, 埋深普遍在 1000 ~ 4000m, 地层压力系数一般分布在 0.9 ~ 1.1 之间, 少数为异常高压, 硅质含量较低, 一般小于 30%, 钙质含量较高, 一般大于 30%, 储集层非均质性强, 储集物性较差^[4-5]。虽然页岩油资源量非常丰富, 但是有效勘探开发评价还任重道远。

从国内外的勘探现状来看, 评价页岩油的富集

收稿日期: 2020 - 01 - 06; 修回日期: 2020 - 02 - 06; 接受日期: 2020 - 04 - 16
基金项目: 四川省科技厅科技支撑计划项目(2017GFW0175); 四川省省院省校合作项目(2018JZ0003)
作者简介: 曹茜, 博士, 工程师, 主要从事非常规油气储层评价研究。E - mail: 421664225@qq.com。
通讯作者: 王兴志, 教授, 博士生导师, 主要从事非常规油气地质研究。E - mail: wxzswpi@163.com。

规律、赋存机理、储集空间分布特征等是目前页岩油勘探开发的关键所在。张善文等^[6]分别对济阳拗陷渤海注陷古近系沙一段、沙三下和沙四上亚段页岩地化特征、矿物组成、物性以及含油饱和度等方面进行测试,进而对页岩含油气量进行评价;李士超等^[7]根据松辽盆地北部上白垩统青山口组一、二段页岩物性、电性、含油气性、烃源岩、脆性及地应力的分布特征,提出了松辽盆地北部页岩油有利区划分标准。因此,在准确评价页岩油储层有机碳含量、孔隙度、渗透率、矿物组成、裂缝发育程度以及流体属性,科学评估页岩的可开采性、储集油气能力和产油气能力的研究过程中,各项地质评价实验测试技术发挥着不可替代的重要作用^[6-9]。

本文结合文献调研和项目组测试经验,对页岩油储层评价过程中的烃源岩特性、储层储集性、含油性、可流动性及可压性等一系列相关实验测试技术的方法及进展进行了总结,以期为我国页岩油勘探开发工作提供一定的参考。

1 页岩油地质评价实验分析项目

张金川等^[10]、陈桂华等^[11]通过对比分析国内外各大页岩油气区的勘探开发现状,提出在进行页岩油资源评价时,需考虑评储层厚度、含油性、有机地球化学条件以及适当的埋深等情况。在此基础上,卢双舫等^[12]、Zou 等^[13]进一步指出页岩油储层评价研究过程中应针对页岩油的成储机理、赋存机制、可动性、可采性及可压裂改造性等系列关键科学问题进行系统研究。区别于页岩气及常规油气,页岩油储层评价内容主要包括烃源岩特性、页岩矿物组成、储集性、含油性、页岩油流体性质、可动性及页岩脆性指数等^[14],具体分析项目见表 1。其中页岩

油烃源岩特性评价包括有机地化及页岩油成分分析等,主要是为了解决页岩油物质基础、生烃潜力及资源量评估等方面的问题;储集性评价包括页岩矿物组成特征、储集空间类型及分布、孔隙度、渗透率等分布特征等;含油性及可动性评价包括原油黏度、密度、含油饱和度等;可压性评价主要是包括脆性特征和岩石力学分布特征等。

2 页岩油地质评价实验测试技术

2.1 岩心保存及实验样品制备

岩心作为油田开展油气勘探、开发研究工作最基础、最直接的首要资料,是研究者认识地层沉积环境、储层物性及油气生储机理的直接途径。岩心在保存过程中,如果不及时密封保存,裸露在空气中会发生自然风化甚至破坏,造成信息损失。北美页岩油勘探开发揭示,目前能开发出的页岩油主要是轻质油,挥发性强。因此为保证页岩油储层评价的真实性,针对页岩非均质性、油气散失性和易形变性问题,对于从岩心管中取出的岩心应按照出筒顺序整理,进行必要的观察和划线编录后运送至冷库保存。为避免轻质油的挥发损失,建议将岩心冷冻(冷冻温度为 - 50 ~ - 40℃)48h 后再进行岩心剖切。此外,在液氮温度下对岩心进行钻取,可避免页岩样品在饱和流体和高速离心的过程中发生胀裂和破碎。由于页岩油储层测试样品含有大量的沥青质,在对样品进行相关测试分析前,需对样品进行洗油和抽提处理。岩心洗油主要是对岩样进行冲刷、浸泡,直到把岩心中的原油清洗干净(达到要求)^[15]。对页岩油样品进行抽提时需先将岩石粉碎至粒径 0.18mm 以下,称取 50g 左右的岩石粉加入索氏抽提器中,以氯仿作为有机溶剂,在 80 ~ 90℃

表 1 页岩油地质评价实验分析项目

Table 1 Testing items of geological evaluation of the shale oil

测试领域	分析项目	实验目的
样品保存及制备	岩心保存、溶剂抽提法	开展其他取样制样工作
烃源岩特性	有机质类型、总有机碳含量、岩石热解、氯仿沥青“A”、镜质体反射率、族组分、色谱-质谱分析、同位素分析测试等	生烃潜力、页岩油资源量、成烃机理分析
储集性	薄片鉴定、X 射线衍射(XRD)矿物测试、X 射线荧光光谱(XRF)元素测试、扫描电镜矿物定量评价(QEMSCAN)	岩性、沉积环境分析
	氦气法测孔隙度、脉冲渗透率、基质渗透率、密度、块体密度、氩离子抛光-扫描电镜、CT 扫描、气体吸附、高压压汞测试等	储存空间、流体运移通道及可动油量评价
含油性及可动性	原油黏度、密度测试、含油饱和度、核磁共振测试等	页岩油可动性评价分析
可压性	泊松比、弹性模量、抗压强度、抗拉强度测试等	脆性及可压性评价

的温度条件下进行抽提,抽提后将滤液进行溶剂挥发得到氯仿抽提物。

2.2 烃源岩特性评价技术

2.2.1 烃源岩地球化学特征评价技术

页岩油烃源岩地球化学特征参数的分布特征(包括有机质类型,丰度及演化程度,热解参数 S_1 、 S_2 ,族组分和氯仿沥青“A”含量等)决定着页岩的物理化学性质及含油气量,是评价页岩油气储层特征的重要参数^[16]。不同类型有机质油气生成能力有一定的差异,常用的有机质类型划分方法主要有:干酪根镜检法、饱芳比法、类型指数法、氢指数法以及有机碳同位素分析法等^[17]。Li等^[18]、赵文智等^[19]通过对国外北美地区 Bakken 组、我国沧东坳陷孔店组二段、鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段以及松辽盆地白垩系嫩江组嫩一段页岩油储层有机质类型进行鉴定分析,指出页岩油储集层中有机质通常分为两类:①绝大多数的不溶于常规有机溶剂的干酪根,通常为I型或II型;②极少量溶于有机溶剂的“沥青”(图1)。干酪根是生物中有机质通过沉积成岩演化作用形成,其碳同位素与母质来源物质保持一致,通过干酪根的碳同位素比值也可以识别出不同的有机质类型。胡思义等^[20]统计总结了湖泊及陆相干酪根碳同位素值和有机质类型之间的关系,认为干酪根碳同位素较轻时,有机质多来源于菌藻类等低等水生生物,对应生烃潜力较好(表2)。

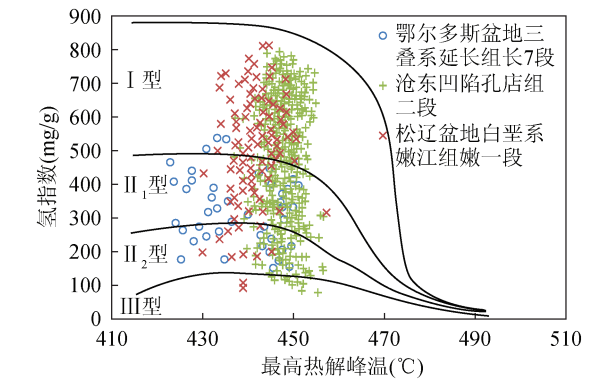


图1 页岩油储层有机质类型分布
Fig.1 Distribution of organic matter types in the shale oil reservoirs

有机质作为生成页岩油气的物质基础,其分布特征对页岩油储集层的生烃、含油性及物性等均有重要影响,是评价页岩油形成条件的重要标准之一^[21]。目前国内外常用的评价有机质分布特征的参数有:总有机碳含量(TOC)、岩石氯仿沥青“A”和

岩石热解可溶烃(S_1)、热解烃(S_2)等^[22]。其中热解参数 S_1 (游离烃含量)和氯仿沥青“A”含量分别表征残留烃与残留油含量, S_1 值和TOC的相对大小能够表征页岩层系油气聚集的差异性。卢双舫等^[23]、余志远等^[24]通过对松辽盆地、海拉尔盆地、渤海湾盆地等5个地区页岩油烃源岩地球化学指标参数分布特征进行统计分析,可知整体上烃源岩的“ S_1 ”值随着TOC的增加而增加(图2)。蒋启贵等^[25]通过对济阳坳陷页岩油探井岩心样品中页岩油的不同赋存状态进行实验分析,发现页岩吸附油含量与TOC呈正相关关系,而游离油/吸附油比值与TOC呈负相关关系(图3),表明TOC在一定程度上可以反映不同赋存状态页岩油的分布特征。

表2 湖泊及陆相干酪根的碳同位素和其类型的关系
Table 2 Relationship between carbon isotopes and kerogen types in lake and continental silences^[20]

干酪根类型	有机质碳同位素组成(‰)
腐泥型I ₁	-28.2 ~ -31.0
含腐植的腐泥型I ₂	-27.5 ~ -28.2
混合型II	-26.0 ~ -27.5
含腐泥的腐植型III ₁	-24.5 ~ -26.0
腐植型III ₂	-20.0 ~ -24.5

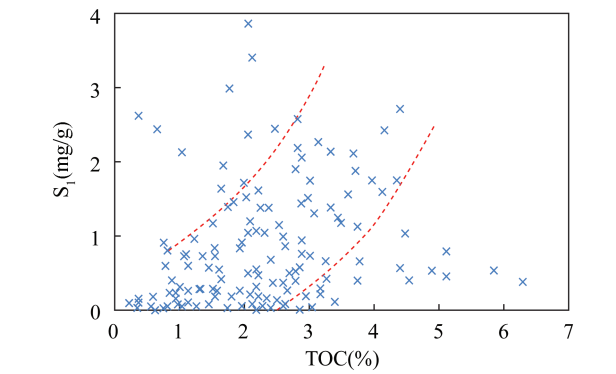


图2 总有机碳含量(TOC)与岩石热解可溶烃(S_1)关系
Fig.2 Relationship between the total organic carbon content (TOC) and the soluble hydrocarbons of rock pyrolysis (S_1)

有机质热演化成熟度(R_o)对于页岩油生烃潜力及可动性评价也具有重要作用。从理论上讲,有机质热演化成熟度(R_o)应达到生气窗范围之内才能形成一定量的油气。低成熟阶段的液态烃分子量大,具有较高的黏度及密度值,难以在页岩微-纳米孔隙间运移,页岩油产量较低;随着成熟度增加,油会发生二次裂解,将形成更多极性低、分子量

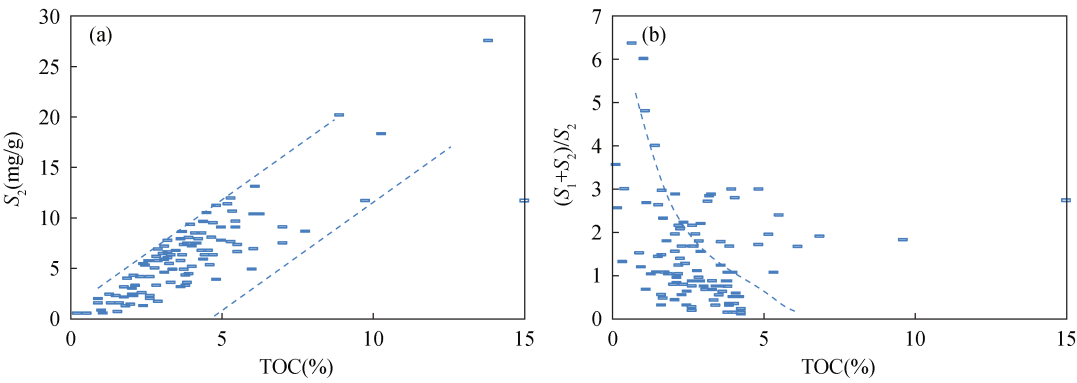


图3 济阳凹陷页岩储层(a)吸附油与总有机碳的关系;(b)游离油/吸附油与有机碳的关系

Fig.3 Relationship between (a) adsorption oil and TOC, (b) free/adsorption oil and TOC of the shale from Jiyang Depression

小、流动性好的烃类^[26]。目前 R_o 的测定主要采用显微镜、分光光度计来进行,测试过程中主要是利用光电效应原理,通过光电倍增管将反射光强度转变为电流强度,并与相同条件下已知反射率的标样产生的电流强度相比较而得出的。一般情况下,成熟度评价指标 R_o 达到 0.4% 即可生烃形成页岩油,略低于常规油 0.5% 的下限标准。

此外,生物标志化合物作为分子结构与特定天然产物之间有明确联系或与特定生物类别的分子结构之间有相关性的天然有机化合物^[27],可以用来指示烃源岩的有机质丰度、有机质母质类型和来源、有机质热演化程度和其发育保存的古氧化还原环境以及烃源岩有机地球化学特征等。

2.2.2 烃源岩元素化学特征评价技术

采用 X 射线荧光光谱 (XRF)、气相色谱 - 质谱 (GC - MS)、电感耦合等离子体质谱 (ICP - MS) 等技术可以直接测量测试岩样中的主量、微量及稀土元素含量^[28 - 29]。根据不同元素对氧化还原环境敏感性不同,可采用元素绝对含量和相对比值 (如 V、Cr、Ni、Co、U、Th、Ni/Co、Th/U 等) 来判定其原始沉积环境类型,对烃源岩类型进行划分^[30]。有学者提出,采用烃源岩与原油 (固体沥青) 的微量元素分布特征进行对比研究,可用来找出真正源岩,分析有机质含量与各微量元素之间的关系,为油藏成因及优质烃源岩的形成研究奠定基础^[31 - 32]。此外,烃源岩样品的主量、微量及稀土元素分布特征也可作为储层成岩演化作用的研究提供一定的依据。

随着页岩油领域勘探的深入,亟需进一步对烃源岩中有机质类型、来源及结构特征进行研究,而成烃生物作为页岩油原始物质来源,具有鲜明的时代特征和环境特色,烃源岩中成烃生物组合、类型和数量控制着页岩油气生烃潜力。

2.3 页岩储集性评价技术

2.3.1 矿物组成评价技术

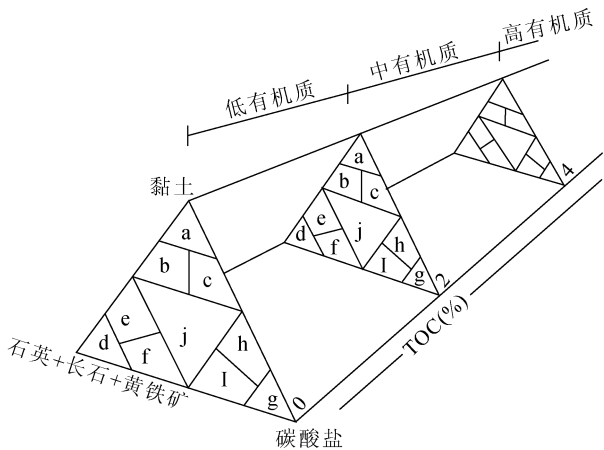
页岩的矿物组成对页岩的物性、储集空间的分布特征及岩石力学性质有重要影响,是油气勘探开发及地质评价过程中的一个重要环节。目前针对页岩矿物组成的确定已进行了大量的研究,综合利用薄片鉴定、X 射线衍射 (XRD)、X 射线荧光光谱 (XRF)、能谱分析、电子探针分析等技术,获取页岩样品中不同矿物 (包括石英、长石、碳酸盐矿物、黄铁矿、伊利石、高岭石、蒙脱石等黏土矿物) 的含量及分布特征^[33],进而为页岩岩性识别、成分分析、成岩作用研究等方面的工作奠定基础。

页岩主要由黏土矿物、脆性矿物和有机质三部分组成,通过岩石薄片鉴定可以观察岩样中的生物化石、有机质、黏土矿物、硅质及碳酸盐矿物的分布特征,但是由于页岩矿物颗粒粒径较小,在采用薄片鉴定测试技术来确定页岩矿物成分、颗粒大小、结构等方面信息时会存在一定的误差。QEMSCAN 是基于扫描电镜和能谱仪分析的一种综合的自动矿物岩石学检测方法,该方法利用加速的高能电子束通过沿预先设定的光栅扫描模式对样品表面进行扫描获取图像,结合背散射电子图像灰度与 X 射线能谱信息获得不同元素的含量,然后转化为矿物相;通过该方法可以得到矿物含量即对应矿物颗粒形态、矿物嵌布特征、孔隙度等。但其缺点是分析区域相对较小,一般在毫米级,且分析时间较长,分析费用昂贵^[34]。XRF 分析技术目前多用于现场及时获取岩石元素的地球化学参数,具有携带方便和快速测试的优点,但是在测试过程中容易受相互元素干扰和叠加峰的影响,且 XRF 分析直接得到的是元素组成而非矿物组成信息,需要利用模型换算得到主要的成岩矿物,精确度相对较低。目前对页岩不同矿物

成分含量进行测试时多采用XRD技术,即通过分析测试样品的衍射图谱从而对岩样中不同物质进行鉴定和分析。通过全岩XRD分析可检测到页岩中的石英、长石、黏土、碳酸盐、黄铁矿等矿物的组成特征。对黏土进行XRD分析则能够定量地区分伊利石、蒙脱石和高岭石等不同种类黏土矿物的相对含量。姜在兴等^[35]提出针对湖相细粒沉积岩岩石类型进行划分时,需综合考虑研究区泥页岩有机质丰度、不同矿物组成及含量、岩石微构造特征等因素(图4)。

2.3.2 孔隙结构特征评价技术

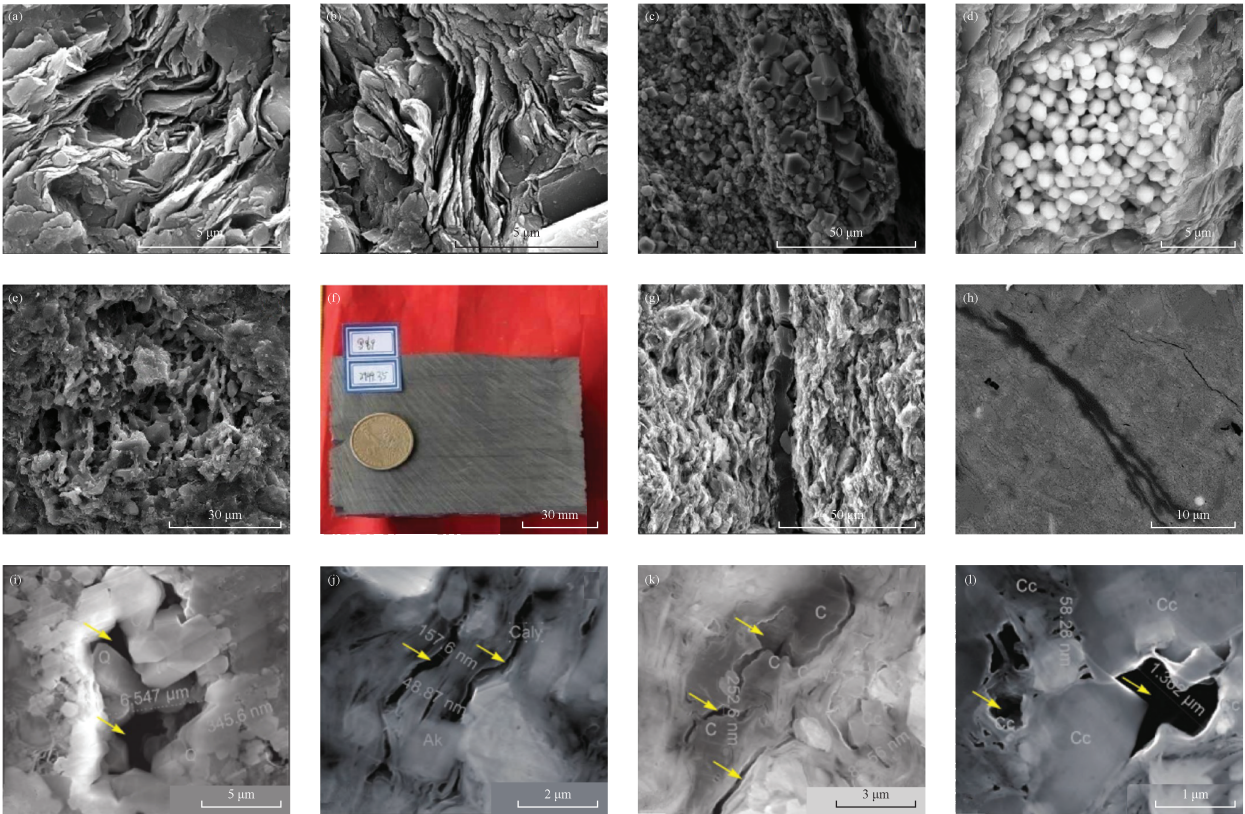
页岩油储层孔隙系统尺度分布范围广,孔隙类型多(图5),如何正确评价储集空间发育特征,是计算页岩油气资源量及储层分类评价的前提。纵观国内外针对页岩储集空间的分类研究,目前具有代表性的分类方案主要包括两种类型:①一种是针对泥页岩层系储集空间大小(孔径)的分类方案,IUPAC(国际理论和应用化学协会)根据化学材料物理吸



a—泥岩; b—粉砂质泥岩; c—灰质泥岩; d—粉砂岩; e—黏土质粉砂岩; f—钙质粉砂岩; g—灰岩; h—泥质灰岩; i—粉砂质灰岩; j—混合细粒岩。

图4 湖相细粒沉积岩岩石学类型划分方案(数据来源于姜在兴等^[35])

Fig. 4 Classification of fine-grained sedimentary rock of lake deposition (Data from Jiang, et al^[35])



a—泥质碎片粒间孔; b—泥质片理间粒间孔; c—方解石晶间孔; d—黄铁矿晶间孔; e—溶蚀孔; f—层理缝; g—层理缝充填白云石; h—层理缝, 充填油迹; i—颗粒间孔; j—黏土矿物收缩孔; k—有机质收缩孔; l—碳酸盐晶间孔。

图5 页岩油储层发育的不同类型孔隙

Fig.5 Different pores of the shale oil reservoir

附特征,提出分为微孔($\leq 2\text{nm}$)、中孔($2\sim 50\text{nm}$)和大孔($\geq 50\text{nm}$);②另一种是基于储集空间矿物基质、结构和成因的分类方案。张廷山等^[36]、刘毅等^[37]提出将页岩储层孔隙划分为孔隙和裂缝两大类,其中孔隙包括粒间孔、晶间孔、溶蚀孔和晶内孔等四种类型,裂缝包括构造裂缝、层理缝、异常超压缝和收缩缝四种类型。

不同学者采用图像定量分析、氮气等温吸附实验、高压压汞实验等方法,对页岩油储层不同类型孔隙发育特征及孔隙形态发育特征等进行表征^[37-39]。刘毅^[37]采用高分辨率背散射图像定量分析和氮气等温吸附实验方法,定量表征渤海湾盆地济阳拗陷沙河街组页岩油储层中不同类型孔隙发育数量、孔径和面孔率等参数,结果表明页岩油储层的主要储集空间为粒间孔和溶蚀孔,孔隙以纳米-微米级为主,纳米级孔隙数量占90%~98%,孔隙数量随孔径增大呈指数式急剧下降。孙中良等^[40]采用低温氮气吸附测试手段对页岩样品的孔隙结构变化特征进行研究,提出样品孔隙主要有两种类型,一种为四周开放型的平板状孔隙,多为宏孔,另一种孔隙类型多为平板状及圆柱状孔隙。曾维主等^[41]、王璟明等^[42]采取场发射扫描电镜、高压压汞、核磁共振等实验手段对松辽盆地青山口组页岩孔隙结构发育特征进行研究,结果表明测试岩样的孔隙结构是由许多孔径较小(小于10nm)的孔喉连通少数孔径较大(大于10nm)的基质孔隙组成的孔隙网络体系(图6)。由于不同观测方法的原理、分辨率不同,所表征的孔隙结构分布特征不完全一致,因此如何将不同方法得到的孔隙、喉道和裂缝分布无缝衔接起来是有待深入研究和探讨的课题。

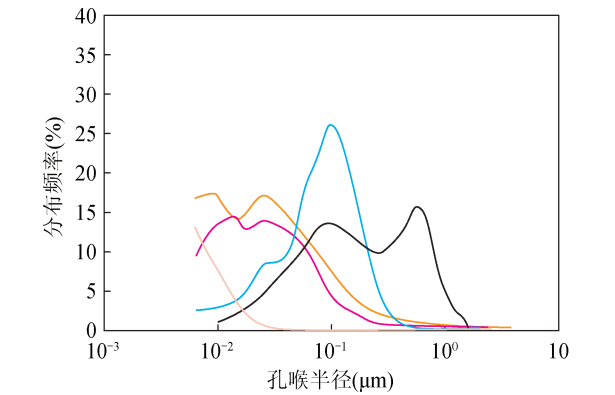


图6 松辽盆地青山口组页岩孔喉分布特征
Fig. 6 Pore – throat size distribution characteristics of the shale in Qingshankou Formation, Songliao Basin

2.3.3 物性特征评价技术

页岩油具有原位聚集、源储一体的特征,原油初次运移过程中首先会在孔隙度较发育的源内“甜点区”进行聚集,页岩油储层孔隙度、渗透率等储集空间发育特征影响着页岩油的赋存状态及流动性,是判断其是否具有经济开发价值的重要参数^[12]。

目前常用的孔隙度测试方法包括氦气法、饱和液体法和核磁共振法。由于测量原理不同,不同孔隙度测量方法的测量结果存在着差异和不确定性。李新等^[43]通过对四川宜宾地区龙马溪组与牛蹄塘组页岩分别采用饱和液体法、核磁共振法及氦气法进行孔隙度测试,可见同一个页岩样品测量结果存在明显差异(图7)。采用饱和液体法测量孔隙度时,由于页岩中含有大量的黏土矿物,遇水可能发生水敏反应,部分黏土矿物过量吸水,导致测试孔隙度偏大;核磁共振法测试结果是根据页岩样品中氢核磁共振信号特征进行换算得到,在测试过程中岩样中的束缚水也会产生一定的核磁信号,从而使得孔隙度测试结果偏大。

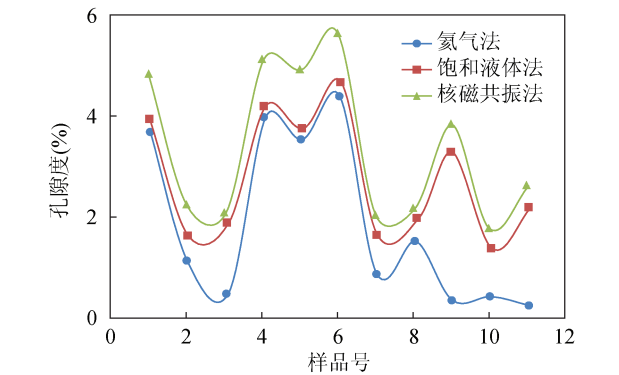


图7 不同测试方法孔隙度结果对比^[43]
Fig. 7 Comparison of measured porosity by different test methods^[43]

渗透率作为衡量储层流体通过能力的一个重要参数,常用的测试储层岩石渗透率的方法分为稳态法和非稳态法两大类,目前我国一般采取非稳态法测量岩样的渗透率。测试前对岩样入口施加一定的压力脉冲,之后连续记录该压力脉冲在岩心孔隙中的衰减过程,结合由实验仪器所给定的边界条件和初始条件对一维非稳态渗流方程进行求解,最终获得脉冲衰减法岩石渗透率值。该方法的优点在于可以对岩样施加一定的孔隙压力和围压,并且由于在脉冲渗透率测试过程中气体是在高压系统中进行渗流,这就从根本上消除了滑脱效应产生的因素。

刘毅^[37]采用脉冲法对东营坳陷古近系沙河街组沙四上亚段-沙三上亚段、沙四上亚段页岩油储层进行测试,渗透率主要分布在 1~10mD 之间(图 8)。

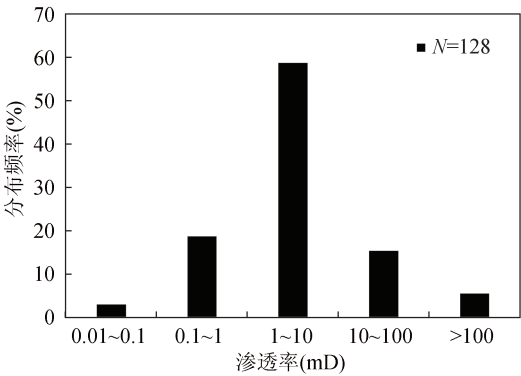


图 8 沙四上亚段-沙三下亚段渗透率分布特征
Fig. 8 Distribution characteristics of permeability in the Upper Sha 4 Formation and Lower Sha 3 Formation

2.4 页岩含油性及可动性评价技术

页岩储层孔隙度小、渗透率极低,页岩油的组成成分十分复杂,很大一部分流体在勘探开发过程中不能动用,页岩油储层的含油饱和度、页岩油的黏度值和密度值以及可动油量测试对估算资源量、制定页岩油长远勘探开发规划具有重要意义^[44-46]。冯国奇等^[47]通过对泌阳坳陷页岩油富集及可动性进行研究,指出有机质丰度、页岩的储集能力分布特征是制约页岩油富集量的主要因素,页岩油饱和烃含量较高,胶质沥青质含量较低,原油密度较低,黏度较小,可动性较好。含油饱和度是指在油层中,原油所占的孔隙的体积与岩石总孔隙体积之比。目前含油饱和度测量主要采用岩心直接测定法,包括蒸馏法、干馏法和色谱法,其中蒸馏法因测量精度较高,应用较为广泛。实验测定岩心含油饱和度时,岩心上提过程中流体压力释放导致岩样中油溶气以及部分轻烃组分挥发散失,使得实验测定的岩心含油饱和度小于对应岩样的原始含油饱和度。因此在实验测定岩心含油饱和度时,首先要对岩心采取保压取心,有效阻止岩心上提过程中压力下降,使得实验测定的岩心含油饱和度能精确反映岩样的原始含油饱和度。保压取心分析法是求取原始含油饱和度非常精确的一种实验方法,缺点在于操作成本相对较高。邢济麟^[48]对松辽盆地南部青一段页岩含油性进行评价,测量了 S_1 、含油饱和度和可动油含量,获得 S_1 为 1.0~6.5mg/g,含油饱和度为 40%~80%,平均 54%,展示了页岩储层具有良好的含油性。页

岩油储层较为致密,孔喉微观结构复杂,页岩油黏度较高,油分子尺寸较大,部分油分子吸附于有机质或矿物表面,这些原因均导致了页岩油的可动性差。

近年来,随着近代物理分析技术和仪器设备的发展,主要采用气相色谱-质谱(GC-MS)技术手段来检测页岩油成分组成和化学结构^[49]。测试过程中将沉积物与原油制备的饱和烃和芳烃组分,经过气相色谱的分离进入质谱检测,获得所需的总离子流图、质量色谱图和质谱图,进而对页岩油的组成成分进一步分析。页岩油黏度值的单位主要用 mm^2/s 来表示,在某一恒定温度下,测量一定体积的页岩油在重力下流过一个标定好的玻璃毛细管黏度计的时间,该温度下运动黏度和同一温度下油体密度之积为该温度下页岩油的运动黏度。根据北美致密油、页岩油的开发数据,页岩油的地表密度要小于 $0.87\text{g}/\text{cm}^3$ (20°C) 或黏度小于 $10\text{MPa}\cdot\text{s}$,才能实现经济有效的开采。包友书等^[50]通过对东营坳陷古近系页岩油性质及储层流体压力发育情况进行分析,指出页岩油黏度随深度增加发生明显变化,在 3500m 左右页岩油黏度值降至较低数值。

页岩油储层中可流动性及可动性的研究相对薄弱,页岩油可动性表征研究过程中需要考虑的因素很多。假定吸附态是不可动的部分,游离态是理论上具有可动性的部分,如何确定不同赋存状态页岩油的分布特征是目前研究的重点。有学者提出采用核磁共振技术测定岩石的 T_2 弛豫时间谱来表征岩石中的可动流体分布特征,即应用孔隙半径对应的 T_2 弛豫时间值将流体分为可动流体和束缚流体^[51]。泥页岩储层的微-纳米级孔隙比较发育,具有低孔、低渗和富含有机质的特点,页岩油与孔隙壁表面的相互作用以及在储集空间中的流动机制相对复杂,用常规的流体力学理论难以解释,存在很大的局限性,迄今仍缺少有效的描述和表征方法。基于此,有些学者提出采用分子动力学模拟技术来对页岩油在不同矿物上的吸附机制及流动规律进行研究,但是该技术需要在岩石组分、储集空间精细表征及固-液相互作用的研究成果的基础上,才能有效定量表征页岩油的赋存机理及可动性。

2.5 可压性评价技术

储层可压性评价地质要素包括岩石结构、矿物组成与成因、成岩作用、埋藏条件等方面。根据国内外对页岩可压性的评价经验,常采用脆性指数代替页岩脆性来表示压裂的难易程度,常用的页岩脆性指数计算方法主要包括矿物组成含量法和岩石力学

参数法^[52]。其中,矿物组成含量法是基于脆性矿物组成来计算,脆性矿物含量越高,则脆性越大。岩石力学性质含义包括两个方面:岩石变形特征和强度特征,通常采用杨氏模量和泊松比两个岩石力学参数来表征。通过开展岩石力学单轴/三轴压缩实验方能获取不同岩石力学特征参数分布值,在一定温度、一定围压条件下,施加三轴或单轴向应力直至试件破坏过程中的应力-应变,获取动态或静态下的弹性模量、泊松比、抗压强度、抗拉强度等岩石力学参数;杨氏模量越高,泊松比越低的岩石脆性更强。Jarvie 等^[53]在对 Barnett 储层产气量较高层段的岩石样品进行研究的过程中,提出利用不同矿物含量计算其脆性指数。基于岩石所受沉积环境、成岩演化等因素的影响,Cao 等^[54]、张晨晨等^[55]分别采用岩样总有机碳含量(TOC)、有机质热演化成熟度(R_o)对该方法进行了改进。也有学者提出,综合考虑页岩的矿物脆性指数、岩石力学脆性指数等因素,分析不同因素对页岩可压裂性影响所占的权重,通过线性加权得到可压裂系数数学模型^[56]。

值得注意的是,基于岩石力学单轴/三轴压缩实验获取的岩石力学参数能够反映岩石可压性的整体特征,但这些指数多利用岩样破坏之前的参数计算得到,岩石可压性评价更多的是关注岩样破碎后裂缝的展布情况,因此在岩石脆性指数进行评价时,需综合考虑弹性模量、泊松比、应变应力、强度以及天然裂缝分布特征的影响,这样既能够反映岩石在受压下的破坏情况,又能够反映岩石破裂后裂缝的扩展能力。

3 发展问题与展望

我国页岩油潜力巨大,勘探开发都还处于早期阶段,面临着一系列的问题。本文通过调研非常规油气地质评价实验测试技术现状,分别从烃源岩特性、页岩油储层储集性、含油性、可动性及可压性等方面进行阐述,进一步展示将来页岩油储层实验测试技术进展。

目前针对页岩油储层微观孔隙结构的研究相对较少,由于页岩孔隙大小在纳米至微米范围均有分布,不同表征方法其测试原理有一定的差异,单一的研究方法往往不能全面地反映页岩储集空间的分布特征,如何将不同测试方法进行结合的问题是进一步需要研究的一个领域。页岩油的可动性及其表征作为页岩油研究的一项重要内容,需要考虑的因素很多,包括页岩含油量、不同赋存状态页岩油的分布特征、储集空间分布特征等。另外,在岩石可压性评

价过程中,除了考虑岩石本身固有的力学性质外,关于岩石成岩演化过程中所受应力场的改变以及天然裂缝的发育程度的定量表征研究还需要加强,为下一步评价岩石可压性及裂缝的扩展能力奠定基础。

4 参考文献

- [1] 邹才能,杨智,崔景伟,等.页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J].石油勘探与开发,2013,40(1):14-26.
Zou C N, Yang Z, Cui J W, et al. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(1): 14-26.
- [2] International Energy Agency. World oil market report 2017[M]. Paris: OECD/IEA, 2017.
- [3] International Energy Agency. World oil market report 2018[M]. Paris: OECD/IEA, 2018.
- [4] Feng C, Yang H, Pu R, et al. Lithology and oil-bearing properties of tight sandstone reservoirs: Chang 7 member of Upper Triassic Yanchang Formation, southwestern Ordos Basin, China[J]. Geosciences Journal, 2017, 21(2): 201-211.
- [5] 王红军,马锋,童晓光,等.全球非常规油气资源评价[J].石油勘探与开发,2016,43(6):850-862.
Wang H J, Ma F, Tong X G, et al. Assessment of global unconventional oil and gas resources[J]. Petroleum Exploration & Development, 2016, 43(6): 850-862.
- [6] 张善文,王永诗,张林晔,等.济阳拗陷渤南洼陷页岩油气形成条件研究[J].中国工程科学,2012,14(6):49-55,63.
Zhang S W, Wang Y S, Zhang L Y, et al. Formation conditions of shale oil and gas in Bonan sub-sag, Jiyang Depression[J]. Chinese Science and Engineering, 2012, 14(6): 49-55, 63.
- [7] 李士超,张金友,公繁浩,等.松辽盆地北部上白垩统青山口组泥岩特征及页岩油有利区优选[J].地质通报,2017,36(4):654-663.
Li S C, Zhang J Y, Gong F H, et al. The characteristics of mudstones of Upper Cretaceous Qingshankou Formation and favorable area optimization of shale oil in the north of Songliao Basin[J]. Geological Bulletin of China, 2017, 36(4): 654-663.
- [8] Song Y, Li Z, Jiang L, et al. The concept and the accumulation characteristics of unconventional hydrocarbon resources[J]. Petroleum Science, 2015, 12(3): 563-572.
- [9] Suárez-Ruiz I, Juliao T, Suárez-García F. Porosity development and the influence of pore size on the CH_4

- adsorption capacity of a shale oil reservoir (Upper Cretaceous) from Colombia. Role of solid bitumen[J]. International Journal of Coal Geology, 2016, 159: 1–17.
- [10] 张金川,林腊梅,李玉喜,等.页岩油分类与评价[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 322–331.
Zhang J C, Lin L M, Li Y X, et al. Classification and evaluation of shale oil [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 322–331.
- [11] 陈桂华,肖钢,徐强,等.页岩油气地质评价方法和流程[J]. 天然气工业, 2012, 32(12): 1–5.
Chen G H, Xiao G, Xu Q, et al. A method and workflow for shale oil and gas geological evaluation [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(12): 1–5.
- [12] 卢双舫,薛海涛,王民,等.页岩油评价中的若干关键问题及研究趋势[J]. 石油学报, 2016, 37(10): 1309–1322.
Lu S F, Xue H T, Wang M, et al. Several key issues and research trends in evaluation of shale oil [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(10): 1309–1322.
- [13] Zou C N, Yang Z, He D B, et al. Theory, technology and prospects of conventional and unconventional natural gas [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 604–618.
- [14] Chalmers G R L, Bustin R M. Geological evaluation of Halfway—Doig—Montney hybrid gas shale – tight gas reservoir, northeastern British Columbia [J]. Marine and Petroleum Geology, 2012, 38(1): 53–72.
- [15] Khraisha Y H, Shabib I M. Thermal analysis of shale oil using thermogravimetry and differential scanning calorimetry [J]. Energy Conversion and Management, 2002, 43(2): 229–239.
- [16] 黄文彪,邓守伟,卢双舫,等.泥页岩有机非均质性评价及其在页岩油资源评价中的应用——以宋辽盆地南部青山口组为例[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(5): 704–711.
Huang W B, Deng S W, Lu S F, et al. Shale organic heterogeneity evaluation method and its application to shale oil resource evaluation—A case study from Qingshankou Formation, southern Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5): 704–711.
- [17] 涂建琪,王淑芝,费轩冬.干酪根有机质类型划分的若干问题的探讨[J]. 石油实验地质, 1998(2): 187–191, 186.
Tu J Q, Wang S Z, Fei X D. Discussion on certain problems to the division of organic matter types in kerogen [J]. Experimental Petroleum Geology, 1998(2): 187–191, 186.
- [18] Li C, Kong L. Nanoscale pore structure characterization of tight oil formation: A case study of the Bakken Formation [J]. Energy & Fuels, 2019, 33(7): 6008–6019.
- [19] 赵文智,胡素云,侯连华,等.中国陆相页岩油类型、资源潜力及与致密油的边界[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(1): 1–10.
Zhao W Z, Hu S Y, Hou L H, et al. Types and resource potential of continental shale oil in China and its boundary with tight oil [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(1): 1–10.
- [20] 胡思义,黄第藩.中国陆相石油地质理论基础[M]. 北京:石油工业出版社, 1991.
Hu S Y, Huang D F. The theoretical basis of China's terrestrial petroleum geology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press (Beijing), 1991.
- [21] 姜在兴,张文昭,梁超,等.页岩油储层基本特征及评价要素[J]. 石油学报, 2014, 35(1): 184–196.
Jiang Z X, Zhang W Z, Liang C, et al. Characteristics and evaluation elements of shale oil reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1): 184–196.
- [22] Brian J, Cardott. Thermal maturity of Woodford shale gas and oil plays, Oklahoma [J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 109: 109–119.
- [23] 卢双舫,黄文彪,陈方文,等.页岩油气资源分级评价标准探讨[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 249–256.
Lu S F, Huang W B, Chen F W, et al. Classification and evaluation criteria of shale oil and gas resources: Discussion and application [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 249–256.
- [24] 余志远,章新文,谭静娟,等.泌阳坳陷页岩油赋存特征及可动性研究[J]. 石油地质与工程, 2019, 33(1): 42–46.
Yu Z Y, Zhang X W, Tan J J, et al. Occurrence characteristics and mobility of shale oil in Biyang Sag [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2019, 33(1): 42–46.
- [25] 蒋启贵,黎茂稳,钱门辉,等.页岩油探井现场地质评价实验流程与技术进展[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 125–136.
Jiang Q G, Li M W, Qian M H, et al. Experimental procedures of well-site geological evaluation for shale oil and related technological progress [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 125–136.
- [26] 柳波,何佳,吕延防,等.页岩油资源评价指标与方法——以松辽盆地北部青山口组页岩油为例[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(11): 3846–3852.

- Liu B, He J, Lü Y F, et al. Parameters and method for shale oil assessment: Taking Qinshankou Formation shale oil of northern Songliao Basin [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45 (11): 3846 – 3852.
- [27] 彭兴芳, 李周波. 生物标志化合物在石油地质中的应用[J]. 资源环境与工程, 2006, 20(3): 73 – 77.
- Peng X F, Li Z B. The application of biomarker in the research of petroleum geology [J]. Resources Environment & Engineering, 2006, 20(3): 73 – 77.
- [28] Jones B, Manning D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. Chemical Geology, 1994, 111: 111 – 129.
- [29] Satyanarayanan M, Balaram V, Sawant S S, et al. Rapid determination of REEs, PGEs, and other trace elements in geological and environmental materials by high resolution inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Atomic Spectroscopy, 2018, 39(1): 1 – 15.
- [30] 明承栋, 侯杰杰, 赵省民, 等. 内蒙古东部索伦地区中二叠世哲斯组古环境与海平面相对升降的地球化学记录[J]. 地质学报, 2015, 89(8): 1484 – 1494.
- Ming C D, Hou D J, Zhao S M, et al. The geochemistry records of Paleoenvironment and sea – level relative movement of Middle Permian Zhesi Formation in eastern Inner Mongolia[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(8): 1484 – 1494.
- [31] 朱光有, 金强, 张水昌, 等. 东营坳陷湖相烃源岩 TOC 与 Sr 的正相关性及其原因[J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 551 – 560.
- Zhu G Y, Jin Q, Zhang S C, et al. Positive correlation between contents of TOC and Sr in source rocks of the Palaeogene Shahejie Formation in Dongying Sag, eastern China [J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(4): 551 – 560.
- [32] 金强, 田海芹, 戴俊生. 微量元素组成在固体沥青 – 源岩对比中的应用[J]. 石油实验地质, 2001, 23(3): 285 – 290.
- Jin Q, Tian H Q, Dai J S. Application of microelement composition to the correlation of solid bitumen with source rocks [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2001, 23(3): 285 – 290.
- [33] 帅琴, 黄瑞成, 高强, 等. 页岩气实验测试技术现状与研究进展[J]. 岩矿测试, 2012, 31(6): 931 – 938.
- Shuai Q, Huang R C, Gao Q, et al. Research development of analytical techniques for shale gas [J]. Rock and Mineral Analysis, 2012, 31(6): 931 – 938.
- [34] 徐旭辉, 申宝剑, 李志明, 等. 页岩气实验地质评价技术研究现状及展望[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(1): 1 – 8.
- Xu X H, Shen B J, Li Z M, et al. Status and prospect of experimental technologies of geological evaluation of shale gas [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(1): 1 – 8.
- [35] 姜在兴, 梁超, 吴靖, 等. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J]. 石油学报, 2013, 34(6): 1031 – 1039.
- Jiang Z X, Liang C, Wu J, et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon – bearing fine – grained sedimentary rocks[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 34(6): 1031 – 1039.
- [36] 张廷山, 杨洋, 龚其森, 等. 四川盆地南部早古生代海相页岩微观孔隙特征及发育控制因素[J]. 地质学报, 2014, 88(9): 1728 – 1740.
- Zhang T S, Yang Y, Gong Q S, et al. Characteristics and mechanisms of the micro – pores in the Early Palaeozoic marine shale, southern Sichuan Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(9): 1728 – 1740.
- [37] 刘毅. 渤海湾盆地济阳坳陷沙河街组页岩油储层特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
- Liu Y. Study on shale oil reservoir characteristics of Shahejie Formation in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [38] 王羽, 汪丽华, 王建强, 等. 利用纳米透射 X 射线显微成像技术研究页岩有机孔三维结构特征[J]. 岩矿测试, 2017, 36(6): 563 – 573.
- Wang Y, Wang L H, Wang J Q, et al. Investigation of organic matter pore structures of shale in three dimensions of shale using nano – X – ray microscopy [J]. Rock and Mineral Analysis, 2017, 36(6): 563 – 573.
- [39] 庞河清, 曾焱, 刘成川, 等. 基于氮气吸附 – 核磁共振 – 氩离子抛光场发射扫描电镜研究川西须五段泥质岩储层孔隙结构[J]. 岩矿测试, 2017, 36(1): 66 – 74.
- Pang H Q, Zeng Y, Liu C C, et al. Investigation of pore structure of a argillaceous rocks reservoir in the 5th Member of Xujiahe Formation in western Sichuan, using NAM, NMR and AIP – FESEM [J]. Rock and Mineral Analysis, 2017, 36(1): 66 – 74.
- [40] 孙中良, 王芙蓉, 侯宇光, 等. 潜江坳陷潜江组页岩中可溶有机质赋存空间表征及影响因素分析[J]. 地质科技情报, 2019, 38(6): 81 – 90.
- Sun Z L, Wang F R, Hou Y G, et al. Spatial characterization and influencing factors analysis of soluble organic matter in shale of Qianjiang Formation in Qianjiang Depression [J]. Geological Science and

- Technology Information, 2019, 38(6): 81–90.
- [41] 曾维主,周国议,宋之光. 松辽盆地青山口组页岩孔隙结构及其对页岩油富集的影响[J]. 地球科学, 2019, 48(6): 632–643.
- Zeng W Z, Zhou G Y, Song Z G. Influence of pore structure on the shale oil accumulation of the Qingshankou Formation in the Songliao Basin [J]. Geochimica, 2019, 48(6): 632–643.
- [42] 王璟明,肖佃师,卢双舫,等. 吉木萨尔坳陷芦草沟组页岩储层物性分级评价[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(1): 172–183.
- Wang J M, Xiao D S, Lu S F, et al. Classification evaluation of shale oil reservoir physical properties in Lucaogou Formation, Jimsar Sag [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(1): 172–183.
- [43] 李新,刘鹏,罗燕颖,等. 页岩气储层岩心孔隙度测量影响因素分析[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(5): 2181–2187.
- Li X, Liu P, Luo Y Y, et al. Analysis of influencing factors on porosity measurement of shale gas reservoir core [J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(5): 2181–2187.
- [44] Topór T, Derkowski A, Kuila U, et al. Dual liquid porosimetry: A porosity measurement technique for oil and gas bearing shales[J]. Fuel, 2016, 183: 537–549.
- [45] Liu C L, Wang Z L, Guo Z Q, et al. Enrichment and distribution of shale oil in the Cretaceous Qingshankou Formation, Songliao Basin, northeast China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 86: 751–770.
- [46] 马晓潇,黎茂稳,蒋启贵,等. 陆相页岩含油性的化学动力学定量评价方法[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(1): 141–156.
- Ma X X, Li M W, Jiang Q G, et al. Chemical kinetic model for quantitative evaluation on oil-bearing property of lacustrine shale [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(1): 141–156.
- [47] 冯国奇,李吉君,刘洁文,等. 泌阳坳陷页岩油富集及可动性探讨[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(6): 1236–1246.
- Feng G Q, Li J J, Liu J W, et al. Discussion on the enrichment and mobility of continental shale oil in Biyang Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(6): 1236–1246.
- [48] 邢济麟. 松辽盆地南部青一段页岩油甜点评价[J]. 矿产勘查, 2019, 10(9): 2286–2290.
- Xing J L. Dessert evaluation of shale oil in Qingyi Formation of southern Songliao Basin [J]. Mineral Exploration, 2019, 10(9): 2286–2290.
- [49] 龙梅,裴世桥. 超临界流体萃取技术在地质样品分析中的应用[J]. 岩矿测试, 2000, 19(4): 286–290.
- Long M, Pei S Q. Application of the analytical-scale supercritical fluid extraction techniques in the geological sample analysis [J]. Rock and Mineral Analysis, 2000, 19(4): 286–290.
- [50] 包友书,张林晔,张金功,等. 渤海湾盆地东营坳陷古近系页岩油可动性影响因素[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(3): 408–414.
- Bao Y S, Zhang L Y, Zhang J G, et al. Factors influencing mobility of Paleogene shale oil in Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(3): 408–414.
- [51] 何梦卿,吴珂. 基于核磁共振驱替技术的页岩含油性评价[J]. 石油化工应用, 2017, 36(11): 89–92.
- He M Q, Wu K. Evaluation of shale oil based on NMR displacement technology [J]. Petrochemical Industry Application, 2017, 36(11): 89–92.
- [52] 李庆辉,陈勉,金衍,等. 页岩气储层岩石力学特性及脆性评价[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(4): 17–22.
- Li Q H, Chen M, Jin Y, et al. Rock mechanical properties and brittleness evaluation of shale gas reservoir [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(4): 17–22.
- [53] Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 475–499.
- [54] Cao Q, Zhou W, Deng H C, et al. Classification and controlling factors of organic pores in continental shale gas reservoirs based on laboratory experimental results [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 27(3): 1381–1388.
- [55] 张晨晨,王玉满,董大忠,等. 四川盆地五峰组—龙马溪组页岩脆性评价与“甜点层”预测[J]. 天然气工业, 2016, 36(9): 51–60.
- Zhang C C, Wang Y M, Dong D Z, et al. Evaluation of the Wufeng—Longmaxi shale brittleness and prediction of “sweet spot layers” in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(9): 51–60.
- [56] 夏遵义,马海洋,房堃. 渤海湾盆地沾化坳陷陆相页岩储层岩石力学特征及可压裂性研究[J]. 石油实验地质, 2019, 41(1): 134–141.
- Xia Z Y, Ma H Y, Fang K. Rock mechanical properties and fracability of continental shale in Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(1): 134–141.

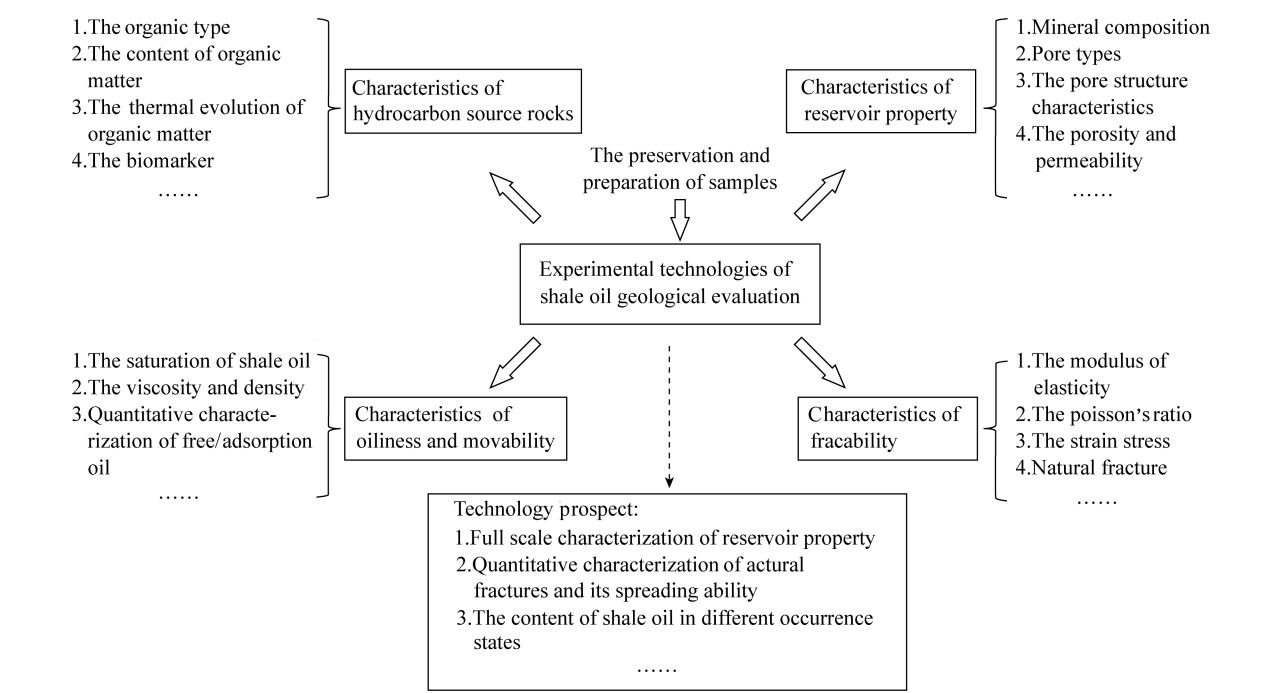
Research Progress on Experimental Technologies of Shale Oil Geological Evaluation

CAO Qian^{1,2,3,4}, WANG Xing-zhi^{1*}, QI Ming-hui^{2,3,4}, HUANG Yi^{2,3,4}, ZHANG Ye-yu^{2,3,4}, LIU Hu^{2,3,4}, WANG Dai-fu^{2,3,4}

- (1. School of Earth Science and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610091, China;
2. Sichuan Province Key Laboratory of Shale Gas Evaluation and Exploitation, Chengdu 610091, China;
3. Sichuan Keyuan Testing Center of Engineering Technology, Chengdu 610091, China;
4. Technology Innovation Center of Shale Gas Exploration and Development in Complex Structural Areas, Ministry of National Resources, Chengdu 610091, China)

HIGHLIGHTS

- (1) The relevant experimental technologies in shale oil reservoir evaluation were summarized.
- (2) The methods and progresses of experimental technologies involved in characteristics of hydrocarbon source rocks, reservoir property, oiliness, movability and compressibility were illustrated.
- (3) Quantitative characterization of reservoir space, shale oil and natural fractures in different occurrences was the key to geological evaluation of shale oil reservoir.



ABSTRACT

BACKGROUND: Experimental technologies played an important role in shale oil geological evaluation. The evaluation parameters such as mineral composition, organic matter type, organic matter content, properties and brittleness in shale oil reservoir were obtained by these technologies.

OBJECTIVES: To find the appropriate experimental methods for shale oil geological evaluation.

METHODS: The research status and trends of various experimental technologies for determination of parameters in shale oil reservoir evaluation, including characteristics of hydrocarbon source rocks, reservoir property, oiliness, movability and compressibility were reviewed. Purpose and method of the experimental testing technologies were focused.

RESULTS: Evaluation of the characteristics of hydrocarbon source rock should combine the parameters of organic matter type, organic carbon contents, organic maturity, biomarkers, major elements, trace elements and rare earth elements. The mineral composition and distributions of pores and fractures should be considered in reservoir evaluation. And the oil saturation, viscosity, density of shale oil should also be integrated in the evaluation of the oiliness and movability of shale oil reservoir. Evaluation of shale compressibility required comprehensive consideration of shale mineral composition, and rock mechanical characteristics.

CONCLUSIONS: The future development direction of shale oil reservoir geological evaluation experimental technology is discussed. It is pointed out that multiple methods to characterize the spatial distribution characteristics of shale oil reservoir, the distribution characteristics of shale oil in different occurrences, and the analysis of natural fracture development, are the key research direction of shale oil reservoir geological evaluation technology.

KEY WORDS: shale oil; characteristics of hydrocarbon source rocks; reservoir property; oiliness; compressibility

国家地质实验测试中心召开 2019 年度成果交流推介会

2020 年 5 月 29 日,自然资源部中国地质调查局国家地质实验测试中心举行 2019 年度成果交流推介会。自然资源部中国地质调查局党组副书记、副局长王研,自然资源部中国地质调查局党组成员、总工程师严光生,中国工程院院士毛景文,自然资源部有关司局处室的代表,部分地调局部室负责人及直属单位主要负责人,相关领域专家,老领导老专家,实验测试中心领导班子成员出席会议。实验测试中心副主任马岩主持会议。

会上主讲人通过视频、图文等方式,集中推介 2019 年实验测试中心在野外现场分析仪器研发与应用、生态修复技术、地质实验测试标准化体系建设、自主研发高端仪器、健康地质、行业管理引领、科技平台建设等方面支持地质调查工作成效显著的十项成果。与会专家对成果及中心近年来的工作给予了充分肯定。一致认为会上发布的成果紧密围绕部局党组工作部署,紧扣实验测试中心的专业特色和优势,立足地质实验测试工作实际,涵盖理论、技术,战略、创新等诸多领域,切实服务地质调查工作和经济社会发展。赞誉实验测试中心勇于开拓,积极探索转型升级之路,是地质实验测试工作的技术引领者、理念先行者。担当作为,带动行业发展,是地质调查工作转型升级的尽责者。坚守初心,擘画国家地质测试工作未来蓝图,是地质实验测试全局工作的谋划者。并期望实验测试中心再接再厉、坚定信念、大胆探索,发挥人才、技术优势,进一步对接需求,加强对地质实验测试工作的整体规划设计与建设实施。进一步精准发力,加强科技创新研究,提升实验测试中心在地质调查全局工作中的显示度。进一步凝练梳理,加强成果的转化及推广宣传,更加有效地服务地质调查业务和社会经济发展。

此次交流推介会是实验测试中心梳理和集成工作成果的有益尝试和探索。通过成果展讲和会议组织等工作,搭建宽广舞台,充分展示实验测试中心中青年人才队伍良好的精神面貌和工作能力。面对工作任务艰巨而不平凡的 2020 年,实验测试中心将不断探索实践支撑服务新时代地质调查工作和高质量发展的新模式和新路径,在地质调查全局工作转型升级的火热时代中书写新的辉煌。

(国家地质实验测试中心供稿)