

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2020.06.13

引用格式: 郭广山, 邢力仁, 李昊. 基于 NMR 和 X-CT 的不同煤阶煤储层物性定量表征 [J]. 中国地质调查, 2020, 7(6): 103-108.

基于 NMR 和 X-CT 的不同煤阶煤储层物性定量表征

郭广山, 邢力仁, 李昊

(中海油研究总院新能源研究中心, 北京 100028)

摘要: 随着煤层气田开发程度逐渐深入, 煤储层物性定量表征与评价对煤层气规模开发愈发重要。为解决常规煤储层物性表征技术存在的尺度局限性, 采用了核磁共振 (Nuclear Magnetic Resonance Technology, NMR) 和 X-CT (Computed Tomography, X-CT) 扫描等技术, 实现了煤储层孔隙的跨尺度、原位态及完整性表征, 为准确获取煤储层孔隙等物性参数提供新途径。研究依托神府区块中低阶煤和柿庄南区块高阶煤样品, 开展核磁共振和 CT 扫描实验, 快速、准确、定量地获得了煤储层孔隙类型、孔径分布、孔隙连通性、有效孔隙度和孔隙空间配置等煤储层物性参数, 形成了一套可应用于不同煤阶煤储层物性定量表征的分析技术。

关键词: 煤储层物性; 核磁共振; CT 扫描; 神府区块; 柿庄南区块

中图分类号: P618.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8706(2020)06-0103-06

0 引言

煤储层是一种双孔隙介质的特殊储集体, 其孔隙度、孔隙结构、孔径大小、流体特征和渗流条件等储层物性参数直接关系到煤层气富集高产, 准确评价煤储层物性参数对于煤层气田的勘探开发至关重要。对比国外商业化开发煤层气田, 我国煤层气田储层普遍具有低孔低渗的特征, 大大增加了煤储层物性量化评价难度, 也对评价技术提出了更高的挑战^[1-6]。

目前, 国内对于煤储层孔隙评价主要有 2 种: 一种是常规评价方法, 包括显微光度计法、液氮吸附法和压汞测试法, 这些传统方法存在的弊端主要是在样品制备过程中会破坏煤的原生孔隙系统, 或者产生一些人为的二次破坏, 造成较大的测试误差, 同时 3 种测试方法都存在测试尺度的局限性; 第二种是相对先进的无损表征评价技术, 主要包括核磁共振技术 (Nuclear Magnetic Resonance Technology, NMR) 和计算机断层扫描技术 (Computed Tomography, X-CT), 这 2 种技术可以对任意形状和大小的岩样进行分析检测, 而且用量少, 速度

快, 岩样无损, 准确性高, 克服了常规检测方法对样品要求高、破坏样品、特定低孔低渗样品无法测量等缺点, 可以快速、准确、定量地提供地层的孔隙度、孔隙结构、渗透率等重要物性参数, 为储层物性评价提供定量参数^[7-9]。

本文依托鄂尔多斯盆地东缘神府区块和沁水盆地南部柿庄南区块不同煤阶样品, 分别进行了核磁共振和 CT 扫描实验, 获得了煤岩孔隙类型、孔径分布、孔隙连通性、有效孔隙度及孔隙空间配置等参数, 为揭示不同煤阶煤储层非均质性特征并进行储层评价提供依据。

1 研究区地质概况

神府区块位于鄂尔多斯盆地晋西挠褶带北段, 整体呈一西倾的单斜构造, 煤层埋深总体呈东浅西深的分布特征。主力含煤地层为二叠系山西组和石炭系太原组, 其中山西组 4+5 号煤层和太原组 8+9 号煤层是区内煤层气的主要开发层位。山西组 4+5 号煤层厚度基本上大于 5 m; 太原组 8+9 号煤层厚度较大, 单层厚度一般在 8 m 以上。煤岩变质程度整体较低, 镜质组反射率主要介于 0.65% ~

1.0% ,处于长焰煤—肥煤阶段,属典型的中低阶煤层气田^[10]。

柿庄南区块位于沁水盆地南端,具有东西分带的构造格局,断层以 NE 走向为主。上石炭统太原组和下二叠统山西组是主要含煤地层。山西组 3 号煤层是主力开发煤层,埋深一般为 400 ~ 1 200 m,平均为 900 m;厚度为 5.0 ~ 8.0 m,平均 6.0 m;含气量为 5.0 ~ 20.0 m³/t,平均为 14.5 m³/t;煤类以无烟煤为主,是典型的高阶煤层气田^[11]。

2 测试原理与样品采集

2.1 测试原理

核磁共振分析技术的理论基础是岩石所含流体中的自旋氢核¹H 在均匀的静磁场及射频场的作用下发生的核磁共振弛豫行为。在岩石实验测试中一般采用核磁扫描时域时间简称 T₂ 测量法, T₂ 谱曲线主要来自于对弛豫信号的反演。根据 T₂ 弛豫时间谱的 T₂ 峰分布及信号值的大小即可以对岩石的孔隙度、孔隙结构、渗透率及流体特征等进行分析。

X-CT 对岩心分析的基本原理是:透过物体后的 X 射线的强度与该物体的密度有关,当 X 射线光子量 I₀ 通过任何一个具有线性衰减系数 μ 的体积元时光子量变为 I,其过程遵循比尔定律。通过对扫描图像的像素数或 CT 数进行分析,即可获得岩石中各种物质组成和孔裂隙的基本信息,并可开展进一步的精细描述和定量研究。

2.2 样品采集与测试

实验煤样采自鄂尔多斯盆地神府区块和沁水盆地柿庄南区块。神府区块煤样采自山西组、太原组和本溪组主力煤层,镜质组最大反射率为 0.97% ~ 1.11%,煤类以气煤、肥煤为主;柿庄南区块煤样采自山西组 3 号煤层,镜质组最大反射率为 2.48% ~ 2.78%,煤类以无烟煤为主(表 1)。实验涉及到中低阶煤到高阶煤储层物性的测试与表征。为了实现多种煤储层物性综合表征技术在不同煤阶中的应用,研究分别设计了煤岩核磁共振测试实验、煤岩 CT 扫描测试实验。

本次核磁共振技术(NMR)实验设备选用的是 MicroMR 02 型核磁共振仪。选取神府区块和柿庄南区块具有代表性的 23 块煤岩岩样进行核磁共振测试分析。实验步骤具体为:①样品抽真空饱和水;②运用核磁共振技术来确定岩心的饱和水状态 T₂ 谱线;③计算束缚水饱和度、可动流体饱和度。

煤岩 X-CT 扫描测试选用 MicroXCT-400 型扫描设备开展实验。首先将选定的样品钻取直径 25 mm、长度 25 ~ 50 mm 的圆柱煤样,并平整煤样两端面。按照 CT 机操作规程在室温下对柱状样品从 -180° ~ 180° 进行 360° 扫描,得到每个样品的 CT 数据,最后利用 CT 重建软件对扫描图像进行重构,得到二维或三维图像,对图像和 CT 值进行处理与分析。

表 1 实验采集样品基本信息

Tab. 1 List of basic information of experimental samples

盆地	煤层气 区块	样品号	地层	煤层	镜质组 反射率 R _o /%
鄂尔 尔多 斯盆 地	神府 区块	SF-04 井 2 号	本溪组	8+9 号	1.11
		SF-07 井 8 号	太原组	4+5 号	1.05
		SF-14 井 26 号	本溪组	8+9 号	1.06
		SF-04 井 50 号	本溪组	8+9 号	1.01
		SF-08 井 51 号	太原组	4+5 号	1.06
		SF-12 井 52 号	山西组	3 号	1.08
		SF-07 井 53 号	太原组	4+5 号	1.07
		SF-18 井 54 号	本溪组	8+9 号	0.98
		SF-20 井 55 号	山西组	3 号	1.05
		SF-17 井 36 号	本溪组	8+9 号	1.07
沁水 盆地	柿庄南 区块	SZN010-1	山西组	3 号	2.52
		SZN001-3	山西组	3 号	2.75
		SZN017-1	山西组	3 号	2.59
		SZN56-02-2	山西组	3 号	2.59
		SZN003-1	山西组	3 号	2.48
		SZN020-2	山西组	3 号	2.59
		SZN020-3	山西组	3 号	2.72
		SZN14-3-1	山西组	3 号	2.78
		SZN003-2	山西组	3 号	2.71
		SZN001-2	山西组	3 号	2.51
		SZN-004	山西组	3 号	2.72
		SZN005-1	山西组	3 号	2.78
		SZN16-2	山西组	3 号	2.56

3 测试结果与分析

3.1 孔径结构和连通性

核磁共振 T₂ 谱代表视弛豫时间,也就是测量得到的孔隙流体的弛豫时间,其波峰个数、分布、连续性和形态等可反映煤中各级孔裂隙的发育特征。T₂ 谱由小到大分别代表微孔—小孔—中孔—大孔—裂隙。依据研究成果,按照 T₂ 谱为 0.5 ~ 2.5 ms、20 ~ 50 ms 和大于 100 ms 所对应的 3 个谱峰分别代表了吸附孔、渗流孔和裂隙进行煤储层物性分析,谱峰越大则该峰代表的孔裂隙越发育。不同煤阶岩样 T₂ 谱特征表现出明显的差异性^[9]。中低阶

煤样品测试结果表现出具有多元化孔裂隙结构,反映出中低阶煤储层物性的强均质性和复杂性,对比测试岩样可将中低阶煤 T_2 谱大致分为 4 类:
 ① T_2 谱表现出明显的双峰结构,煤岩样品在吸附空间核磁信号较强,在渗流空间核磁信号次之,而且这两类孔隙间的连通性不好,该类样品吸附空间极为发育,渗流条件较弱(图 1(a));
 ② T_2 谱表现出明显的单峰结构,渗流空间核磁信号强度最高,吸附空间核磁信号明显减弱,且这两类孔隙间连

通性较好,说明该类型渗流条件较好,吸附能力较差(图 1(b));
 ③ T_2 谱表现出明显的双峰结构,吸附空间和渗流空间核磁信号均较强,且两类孔隙间连通性较好,说明该类型具有较好的吸附能力和渗流条件(图 1(c));
 ④该类型表现出明显的双峰结构,渗流空间核磁信号较强,具有一定的吸附空间核磁信号,两类孔隙间连通性较差,说明该类型渗流条件较好,有一定的吸附能力(图 1(d))。

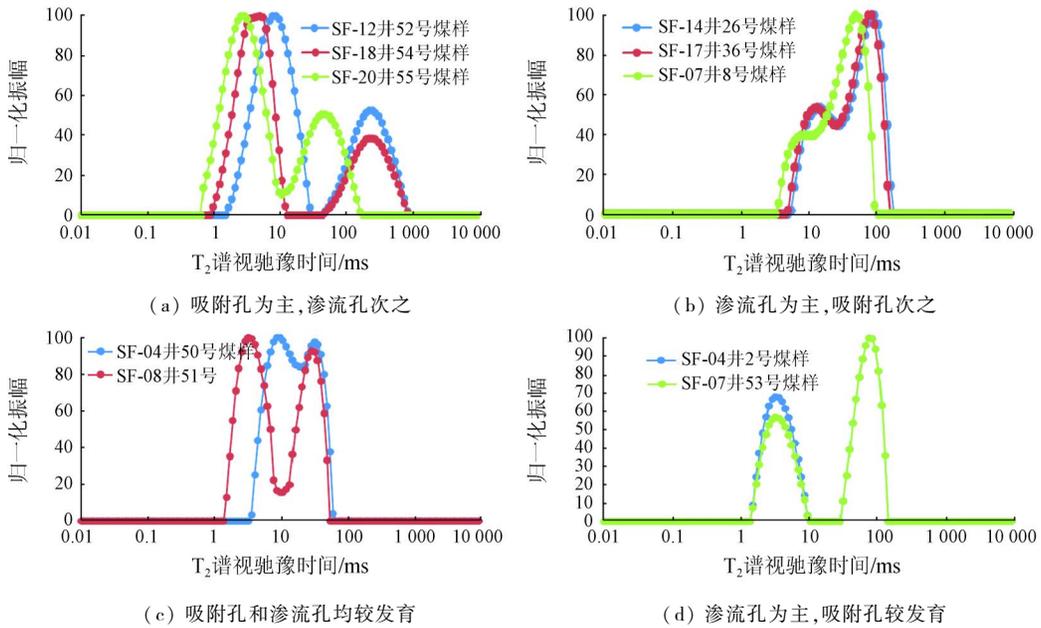


图 1 中低阶煤样品核磁共振 T_2 谱特征

Fig. 1 T_2 NMR characteristics of low and middle rank coal samples

对比中低煤阶样品核磁共振 T_2 谱特征,高阶煤样品 T_2 谱特征表现出明显的一致性。高阶煤样品吸附孔隙核磁信号远远高于中低阶煤,而渗流空间

核磁信号强度非常弱,且两类孔隙间连通性较差,说明高阶煤样品以吸附孔隙、裂隙均不发育(图 2)。

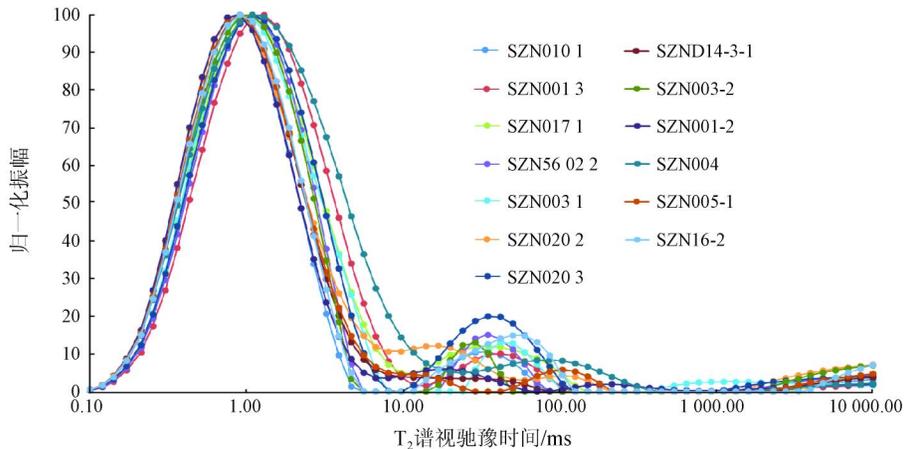


图 2 高阶煤样品核磁共振 T_2 谱特征

Fig. 2 T_2 NMR characteristics of high rank coal samples

3.2 核磁共振孔隙度

煤的有效孔隙度是指煤中有利于可动流体(包括气和水)流动的那部分连通性孔隙的孔隙度。为了获得煤样有效孔隙度值,需要对同一煤样先后进行饱和水和残余水两种状态下的 T_2 谱分析^[12-15]。

神府区块中低阶煤样品核磁共振测试结果表明:核磁测试孔隙度主要为 0.66% ~ 4.35%, 平均 2.15%; 核磁测试束缚水饱和度主要为 12.99% ~ 70.39%, 平均 47.78%; 核磁测试可动流体饱和度主要为 29.61% ~ 87.01%, 平均 52.22%。测试数据说明中低阶煤样品储层大孔喉较少,主要发育纳米级微细孔喉,饱和岩样部分流体可以被动用。

柿庄南区块高阶煤样品核磁共振测试结果表明:核磁测试孔隙度主要为 0.17% ~ 4.06%, 平均 1.05%; 核磁测试束缚水饱和度主要为 66.29% ~ 98.90%, 平均 85.20%; 核磁测试可动流体饱和度主要为 1.10% ~ 33.71%, 平均 14.80%。测试数据说明高阶煤样品主要以发育纳米级微细孔喉为主,饱和岩样中极少流体可被动用。

核磁共振测试结果显示,煤岩岩样的束缚水饱和度与孔隙度呈现负相关关系,可动流体饱和度与孔隙度呈正相关关系。中低阶煤样品孔隙度明显高于高阶煤,说明高阶煤相对中低阶煤更加致密,孔渗条件更差;由于高阶煤束缚水饱和度相对较高,在生产过程中高阶煤排水降压由于受到孔渗条件的限制更加困难。

3.3 CT 孔隙度

煤岩 CT 扫描测试分析实验的实验目的是测试煤岩的内部微观孔隙结构特征。Micro-CT 技术是一种非破坏性的 X-光射线技术。该技术可对岩石样品截面切片的内部结构成像,这种成像是借助于物质的 X-光衰减系数的再现来实现的。扫描结果每块岩样可获得二维灰度切片图,在二维灰度切片图中,黑色为孔隙,灰色为基质,高亮色代表岩石中高密度组分(如方解石、黄铁矿),由此可以换算出该岩样不同孔径的孔隙个数与频率^[16]。

神府区块中低阶煤样品 CT 测试结果显示,孔径为 0 ~ 50 μm 的孔隙占 32.95%, 孔径为 50 ~ 100 μm 的孔隙占 35.17%, 孔径为 100 ~ 150 μm 的孔隙占 17.67%, 孔径为 150 ~ 200 μm 的孔隙占 7.00%, 孔径为 200 ~ 300 μm 的孔隙占 4.40%, 孔径 > 300 μm 的孔隙占 2.82%。该测试结果说明神府区块中低阶煤煤岩储层的微米级基质孔隙以及割理系统主要集中在 0 ~ 50 μm 和 50 ~ 100 μm 的区间,其他孔隙略有发育(图 3(a))。

柿庄南区块高阶煤样品 CT 测试结果显示,孔径为 0 ~ 50 μm 的孔隙占 49.24%, 孔径为 50 ~ 100 μm 的孔隙占 35.24%, 孔径为 100 ~ 500 μm 的孔隙占 14.92%, 孔径 > 500 μm 的孔隙仅占 0.59%。该测试结果说明柿庄南区块高阶煤煤岩储层的微米级基质孔隙以及割理系统同样主要集中在 0 ~ 50 μm 和 50 ~ 100 μm 的区间,但大孔及裂隙几乎不发育(图 3(b))。

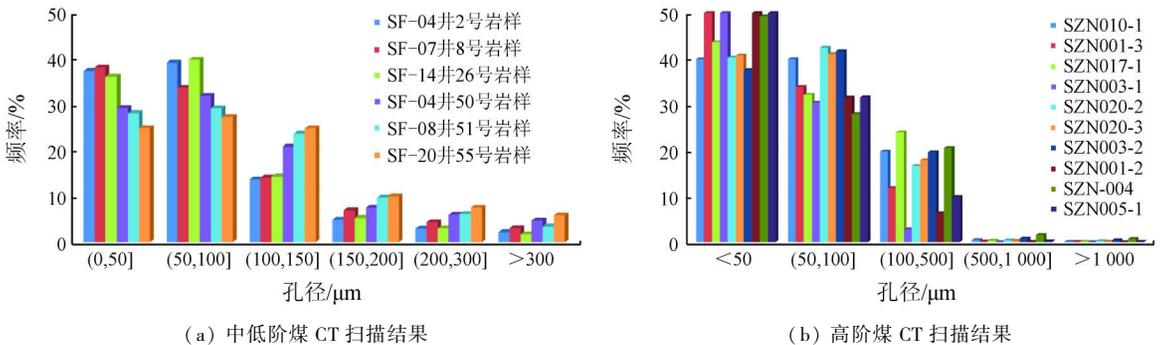


图 3 不同煤阶样品 CT 扫描结果

Fig. 3 CT scan results of different coal rank samples

3.4 煤岩体可视化与三维重构

根据矿物和孔裂隙各自的 CT 数分布空间,分别在空间建立二者独立模型,将二者结合在一个三

维坐标里,即可实现煤岩体的三维重构,清楚地识别煤岩体的孔裂隙发育形态和连通性、孔裂隙尺度、矿物形态等空间发育特征^[17-18]。

对于煤储层来讲,煤中的矿物和孔裂隙对煤层气富集高产意义较大,是煤储层物性的研究重点。模拟煤岩体的孔裂隙、煤基质和矿物等在空间的展布特征及相互接触关系,并进行了三维重构。为了易于显示,其中灰白色部分表示煤基质,红色部分表示孔裂隙,黄色为矿物。

图4为高阶煤SZN010-1样的表面模型和立体模型结果。CT成像特征显示:孔隙总体较发育,在空间上分布较均匀,呈层状或片状分布,孔隙之间多由微裂隙沟通,具有较好的连通性(图4(a),(b));发育2组近垂直的裂隙,形成不规则裂隙网络,裂隙部分被方解石填充(图4(b));矿物在空间上呈层片状分布,与孔裂隙交错发育(图4(c),(d))。

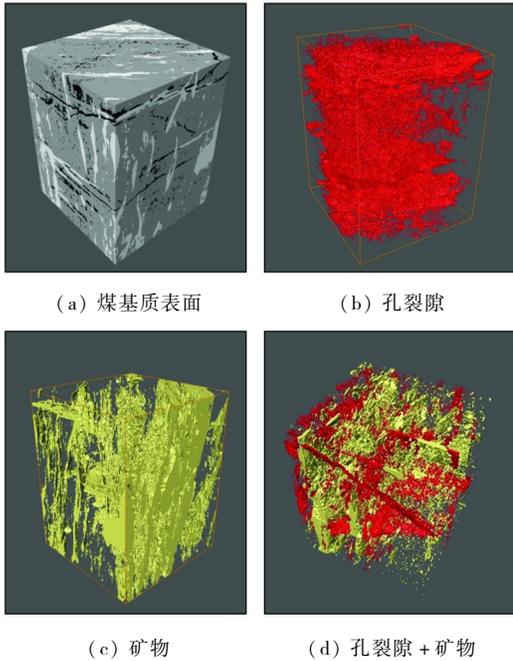


图4 SZN010-1 CT样品孔裂隙、煤基质和矿物三维重建
Fig. 4 The three-dimensional reconstruction of pore, fissure, coal matrix and minerals of CT Sample SZN010-1

图5为高阶煤SZN020-2样的表面模型和立体模型结果。CT成像特征显示:孔隙在三维空间上发育较多且分布均匀,孔隙之间连通性好,形成大的孔隙团且孔隙团之间相互连通,在垂直层理方向上发育多条裂隙,形成多个裂隙面,沟通了孔隙团,裂隙被矿物部分填充(图5(a),(b));矿物在空间主要呈条带状,少量呈层片状与条带状矿物正交,彼此之间孤立(图5(c));孔隙与矿物呈条带状交错发育,孔裂隙在空间上分布较均匀(图5(d))。

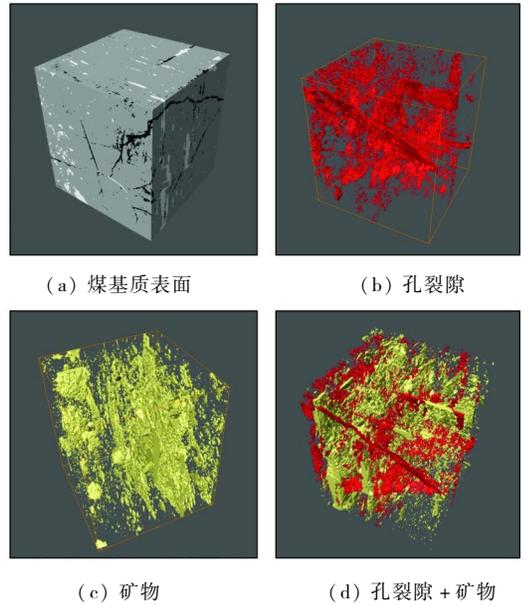


图5 SZN020-2 CT样品孔裂隙、煤基质和矿物三维重建

Fig. 5 The three-dimensional reconstruction of pore fissure, coal matrix and minerals of CT Sample SZN020-2

4 结论

(1)不同煤阶煤岩样品在核磁共振 T_2 谱和CT值等特征方面表现出较大的差异。低煤阶样表现为渗流空间较发育,吸附空间次之;高煤阶样表现出吸附空间发育而渗透空间发育较差的特征,测试结果表明对于不同的煤阶煤层气田要采取不同的开发策略。

(2)核磁共振 T_2 谱波峰个数、分布、连续性和形态可反映煤中各级孔裂隙的发育特征。中低阶煤样品测试结果具有多元化孔裂隙结构特征,反映出中低阶煤储层物性的强均质性和复杂性;高阶煤样品 T_2 谱表现出明显的一致性特征。

(3)煤岩体的三维重构能清楚地识别出煤岩体的孔裂隙发育形态和连通性、孔裂隙尺度、矿物形态等空间发育特征,模拟出煤岩体的孔裂隙、煤基质和矿物等在空间的展布特征及相互接触关系等精细煤储层的物性信息。

参考文献:

- [1] 熊波,刘坤,郭凯,等.基于X-CT技术对黔西滇东区域煤储层物性特征的研究[J].石油实验地质,2016,38(3):407-412.
- [2] 黄伟岗,郭平,姜怡伟,等.桥白气藏可动水实验研究[J].天

- 然气勘探与开发,2005,28(2):39-42.
- [3] 田亚,杜治利,张文龙,等. 木里盆地侏罗系煤层气主控因素及成藏模式[J]. 中国地质调查,2019,6(4):88-94.
- [4] 张家强,毕彩芹,李锋,等. 新能源矿产调查工程进展[J]. 中国地质调查,2018,5(4):1-16.
- [5] 陈存良,张林,唐婧,等. 苏里格气田储层渗流特征研究[J]. 石油化工应用,2015,34(9):60-64.
- [6] 张俊,庞雄奇,姜振学,等. 东营凹陷牛庄一六户洼陷沙河街组三段下亚段烃源岩排烃通道及证据[J]. 地质学报,2007,81(2):261-266.
- [7] 孙卫,史成恩,赵惊蛰,等. X-CT扫描成像技术在特低渗透储层微观孔隙结构及渗流机理研究中的应用——以西峰油田庄19井区长82储层为例[J]. 地质学报,2006,80(5):775-782.
- [8] 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.
- [9] 姚艳斌,刘大锰,蔡益栋,等. 基于NMR和X-CT的煤的孔隙裂隙精细定量表征[J]. 中国科学:地球科学,2010,40(11):1598-1607.
- [10] 郭广山. 柿庄南区块煤层气储层有利区综合评价研究[J]. 煤炭科学技术,2019,47(3):200-206.
- [11] 郭广山,陶宗普,杜希瑶. 神府区块成煤环境及对煤储层发育影响研究[J]. 洁净煤技术,2016,22(1):124-128.
- [12] 秦红璐,要慧芳,贾小宝,等. 基于NMR的深部煤储层孔隙裂隙特征[J]. 煤炭技术,2019,38(8):55-58.
- [13] 任会康,王安民,李昌峰,等. 基于核磁共振技术的低阶煤储层孔隙裂隙特征研究[J]. 煤炭科学技术,2017,45(4):143-148.
- [14] 郭平,黄伟岗,姜贻伟,等. 致密气藏束缚与可动水研究[J]. 天然气工业,2006,26(10):99-101.
- [15] 侯伟,赵天天,张雷,等. 基于低场核磁共振的煤储层束缚水饱和度应力响应研究与动态预测——以保德和韩城区块为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2020,50(2):608-616.
- [16] 刘玉龙,汤达祯,许浩,等. 基于X-CT技术不同煤岩类型煤储层非均质性表征[J]. 煤炭科学技术,2017,45(3):141-146.
- [17] 陈同刚,汤达祯,许浩,等. 基于X-CT技术的韩城示范区煤储层精细描述[J]. 高校地质学报,2012,18(3):505-510.
- [18] 唐淑玲,汤达祯,陶树,等. 基于X-CT技术的沁水盆地南部煤储层精细描述[J]. 煤炭科学技术,2016,44(12):167-172.

Quantitative characterization of different coal rank reservoirs permeability based on NMR and X-CT technology

GUO Guangshang, XING Liren, LI Hao

(New Energy Research Center, CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China)

Abstract: With the increasing development of coalbed methane (CBM) field, the quantitative characterization and evaluation of coal reservoir physical properties is becoming more and more important to CBM scale development. In order to solve the limitations of conventional methods for testing coal reservoir physical properties, the authors used the high-tech technologies such as nuclear magnetic resonance technology and CT scanning technology to effectively solve the problems of in-situ and integrity of rock samples and acquire the porosity and permeability. Nuclear magnetic resonance and CT scanning experiments of coal samples were carried out to rapidly obtain the pore type, pore size distribution and connectivity, effective porosity, spatial distribution of pore fissures and other refined coal reservoir physical parameters, based on the samples of middle and low rank coal in Shenfu block and high rank coal in Shizhuangnan block. So a set of quantitative characterization analysis technology that can be applied to coal reservoirs with different coal rank was formed.

Keywords: physical properties of coal reservoir; NMR; CT scan; Shenfu block; Shizhuangnan block

(责任编辑:常艳)