

松科二井深层沙河子组泥岩三维显微 CT 成像 及对深部油气预测的启示

杨 璠¹, 侯贺晟¹, 符 伟¹, 国 瑞¹, 潘宗栋¹, 张交东², 张慧滔³

YANG Jin¹, HOU Hesheng¹, FU Wei¹, GUO Rui¹, PAN Zongdong¹, ZHANG Jiaodong²,
ZHANG Huitao³

1. 中国地质科学院, 北京 100037;

2. 中国地质调查局油气资源调查中心, 北京 100083;

3. 首都师范大学检测成像北京高等学校工程研究中心, 北京 100048

1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. Oil and Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China;

3. Engineering Research Center of Computed Tomography, Capital Normal University, Beijing 100048, China

摘要:为深化认识松科二井深层页岩气垂向变化规律,选取沙河子组 3500~5700 m 层段开展了 X 射线三维计算机断层扫描(X-ray 3D Computed Tomography, 简称 CT)成像实验。对 19 块直径 2 cm 的柱状岩心进行 X 射线 CT 扫描,获取了无损岩心扫描数据,并将其转化为灰度值信息。灰度值信息反映了样品中不同的组分,灰度高值代表骨架和矿物,灰度低值代表孔隙和裂缝。在此基础上,建立分辨率高达 15 μm 的岩心三维图像空间结构,对重建岩心孔隙模型的孔隙形态、空间展布和配位数进行了对比,对样品孔隙度和连通性在垂向上的分布规律进行了统计分析。结果表明,等效孔隙直径大的区域孔隙度高,配位数大的区域连通性好,孔隙度和连通性的垂向分布规律与传统认识相符,与测录井信息可以相互印证。实验证明,基于三维 CT 成像的数字岩心技术具有数据分辨率高、信息丰富的优势,可作为今后深部油气预测与评价的重要辅助手段。

关键词:数字岩心;孔隙结构;CT;松科二井;孔喉网络模型;气测异常

中图分类号:P588.22 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2020)07-1006-09

Yang J, Hou H S, Fu W, Guo R, Pan Z D, Zhang J D, Zhang H T. 3D microscopic CT imaging and significance of SK-2 deep mudstone of Shahezi Group. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(7): 1006-1014

Abstract: In order to deepen the understanding of the vertical change rule of the deep shale gas in the Songke 2 Well, the authors selected the 3500~5700 m section of the Shahezi Formation to carry out the X-ray 3D Computed Tomography (CT) imaging experiment. X-ray CT scan was performed on 19 pieces of 2 cm-diameter columnar cores to obtain non-destructive core scan data, and a three-dimensional image spatial structure with a core resolution of up to 15 μm was established. The pore morphology structure and space of the reconstructed core pore model were analyzed by comparative study of spatial distribution and coordination number, statistics of the vertical distribution of sample porosity and connectivity. This experiment proves that the digital core data have high resolution and rich information. The gray value information reflects different components in the sample. The skeleton and minerals are high gray values,

收稿日期:2019-06-23; **修订日期:**2020-05-18

资助项目:中国地质调查局项目《松辽盆地深部油气基础地质调查》(编号:DD20160207)、《松嫩地块及周缘关键区带深部地质调查》(编号:DD20190010)、国家自然科学基金项目《中国东北大剖面缓化虎林段构造物理研究及意义》(批准号:41471081)、《物像几何关系难以精确测量的 CT 重建方法研究》(批准号:61671311)

作者简介:杨璠(1994-),男,硕士,从事深部结构与信息技术研究。E-mail:979816657@qq.com

通讯作者:侯贺晟(1980-),男,副研究员,从事深部探测与深部能源远景分析研究。E-mail:hesheng.hou@126.com

and the pores and cracks are low gray values. Studies have shown that areas with large equivalent pore diameters have high porosity, and areas with large coordination numbers have good connectivity. The vertical distribution of porosity and connectivity is consistent with traditional knowledge and can be verified with logging information. It is believed that the digital core can be used as an important auxiliary method for deep core research in the future.

Key words: digital core; pore structure; CT; SK-2; pore throat network model; gas measurement anomaly

2018年5月,松辽盆地大陆深部科学钻探工程——松科二井^[1-2]胜利完井,在获取完整连续的早白垩世地层岩心^[3-4]的同时,在3350 m以深的沙河子组中钻遇气测异常118层,累计厚度268 m,揭示出断陷盆地深部泥页岩层系较好的含气性,为研究松辽盆地北部深部油气资源提供了重要的信息^[2,5-7]。以往资料^[8-9]表明,松科二井所在的徐家围子断陷深部洼槽带富含有机质地层,累计厚度大,有机质丰度高,具有较好的非常规天然气勘探前景。为进一步研究松辽盆地深层页岩气的垂向分布规律,深入了解气测异常段岩心的属性特征,选取松科二井气测异常集中区段的沙河子组泥岩样品进行岩心CT扫描。

三维CT成像是实现岩心建模的关键技术。20世纪末中国学者使用CT岩心进行有关研究并在实际岩心分析及重点油气区分析应用中取得一定成就^[10-11]。同时,各国学者针对不同岩心、不同含油气区、CT扫描技术等问题^[12-17],不断完善岩心建立的方法,通过模拟和定量计算的方法开展油气储层相关的研究^[18-20]。进入21世纪,全球非常规油气勘探开发取得了一系列的突破性进展^[21-26],在其驱动下,数字岩心技术在中国四川盆地、塔里木盆地等得到广泛推广与应用,并在深层孔隙连通性、微孔隙描述等方面卓有成就^[27-29],逐渐成为非常规油气储层孔隙特征评价的重要手段^[30-31]。

分辨率是数字岩心重建过程非常重要的影响因素,一般将CT扫描分辨率分为4个级别^[32]。高精度岩心CT扫描和岩心建模获得高分辨率的孔隙结构,能够有效计算孔隙度、连通性等参数。为确保获得精细的岩心内部孔隙结构,本文依据实验岩心样品尺寸,采用15 μm的空间分辨率对19组岩心样品进行CT扫描,实现三维数字岩心建模。利用FEI公司的Avizo软件进行三维数据分析,对骨架、孔喉、连通性等有关参数进行了统计分析,认识不同岩性的数字岩心灰度特征和孔喉结构特征。本次实验依托松科二井完整全面的钻井资料,使获

得的数据能够得到快速直接的验证,提高数字岩心识别精度和准确度,并为进一步认识深部岩心孔隙特征、获取深部页岩气赋存空间信息、寻找深部能源资源提供新思路。

1 岩心数据来源

在对松科二井测、录井数据信息分析过程中,发现深部沙河子组内存在多个气测异常层段^[5]。因此,本文依据松科二井测、录井信息,选取松科二井深部沙河子组井段3500~5700 m深度的19块泥岩和砂岩样品(表1),进行15 μm分辨率的岩心CT扫描,获取了高精度的数字岩心数据及三维重构模型。

表1 取样岩心
Table 1 Sampling core

编号	深度/m	实际取样岩性
SK-CT01	3588	细砂岩
SK-CT02	3742.1	砂质泥岩
SK-CT03	3786.2	中砂岩
SK-CT04	3839.3	泥岩
SK-CT05	3899.5	泥岩
SK-CT06	4004	泥岩
SK-CT07	4288.5	粗砂岩
SK-CT08	4374.5	含砂泥岩
SK-CT09	4446.4	泥岩
SK-CT10	4561.4	细砂岩
SK-CT11	4585.13	泥岩
SK-CT12	4684.76	粉砂质泥岩
SK-CT13	4851.2	泥岩
SK-CT14	4911.8	泥岩
SK-CT15	4967.5	泥岩
SK-CT16	5045.8	细砂岩
SK-CT17	5097.4	泥岩
SK-CT18	5264.7	泥岩
SK-CT19	5688.9	泥岩

2 三维岩心 CT 扫描方法简介

三维 CT 成像技术利用 X 射线的可穿透性可以无损地观察样品内部的三维空间结构,是实现数字岩心建模的关键技术。其成像原理是,通过探测多个角度 X 射线穿过被测样品后的强度分布,重构被测样品的三维空间结构。三维 CT 扫描通过探测多个角度下 X 射线穿过被测样品后的强度分布,重构被测样品的三维空间结构。三维 CT 扫描系统主要包括 X 射线源、固定样品的载物台和 X 射线探测器(图 1)。X 射线源发出 X 射线,穿过样品后被探测器探测,载物台带动岩样精密旋转,进而探测器可以获得不同角度下岩样的透视图像,然后将采集的数据反馈回计算机系统,通过软件重建获得岩心的三维数字图像。

本次实验采用首都师范大学自主研发的高分辨显微 CT—MagicEye—MicroCT225。该设备采用 YXLON FXE225.48 微焦点射线源,Varin 2520DX 探测器,最高空间分辨率为 $5\ \mu\text{m}$ 。根据岩石样品尺寸,实验采用的空间分辨率为 $15\ \mu\text{m}$,确保获得精细的岩心内部孔隙结构。

在获得岩心 CT 数据过程中,为保证获得完整的 CT 岩心数据,岩心样品垂直放置于载物台,保证载物台在 360° 高精度旋转过程中,X 射线照射样品获得投影图并对所有细节进行记录。

3 岩心三维 CT 数据分析与处理

通过上述三维 CT 扫描过程,获得了 19 块样品

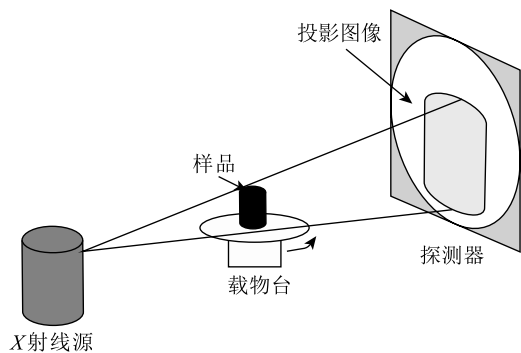


图 1 岩心 CT 扫描原理及工作流程示意图

Fig. 1 CT core scanning principle and work flow diagram

的数字岩心共计 540 GB 的数据。本文以取自 4851.2 m 深度的泥岩样品 SK-CT13 数据为代表,简要介绍该岩心的三维 CT 图像和孔隙发育特征,最后基于 19 块数字岩心数据,建立松科二井沙河子组井段 3500~5700 m 深度孔隙度、渗透率曲线,直观展示沙河子组深部非常规气的赋存空间特征。

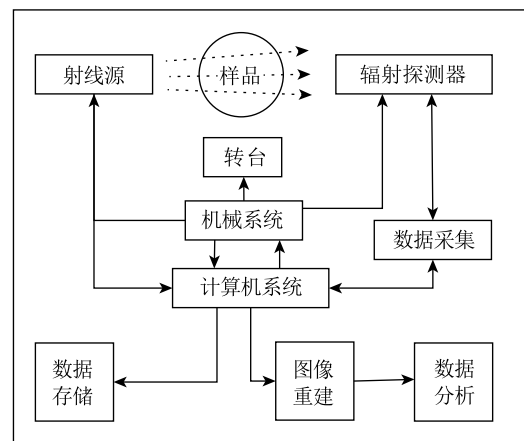
3.1 岩心的三维 CT 图像

本次样品以泥岩和砂岩为主,由于岩性差异,灰度值的整体特征值及变化趋势可以反映各自组分的不同特点。因此,可以通过不同组分的灰度特征值,对岩心进行标定和区分(图 2)。依据样品灰度值分析结果,提取骨架、孔隙、矿物等成分的特征阈值,使用美国 FEI 公司 Avizo 软件进行阈值划分和渲染,直观展示岩心中的不同组分(图 2-b)。

灰度值信息以 0~255 作为计量范围,统计样品结果中以 100~255 为主要分布范围,有少量样品的灰度值在 0~100 之间。考虑到灰度值信息统计的相对性,不同样品的灰度值不存在可对比性,仅对样品自身不同组分的灰度值信息进行对比分析。

3.2 岩心孔隙信息提取

传统孔隙信息提取采用等效直径法,提取岩心的主要参数孔隙度、孔喉比等属性,但该方法不能有效地解决孔隙连通性的问题。最大球法(图 3)能够通过数学统计的方法获得岩心孔隙结构的主要参数,如孔喉半径、孔喉体积、孔喉比、配位数、形状因子等,得到岩石孔隙发育情况的分析结果,也能够直观地展示孔隙的分布特征。因此,本次处理使用最大球法,建立孔隙模型并计算孔隙的有关参数。



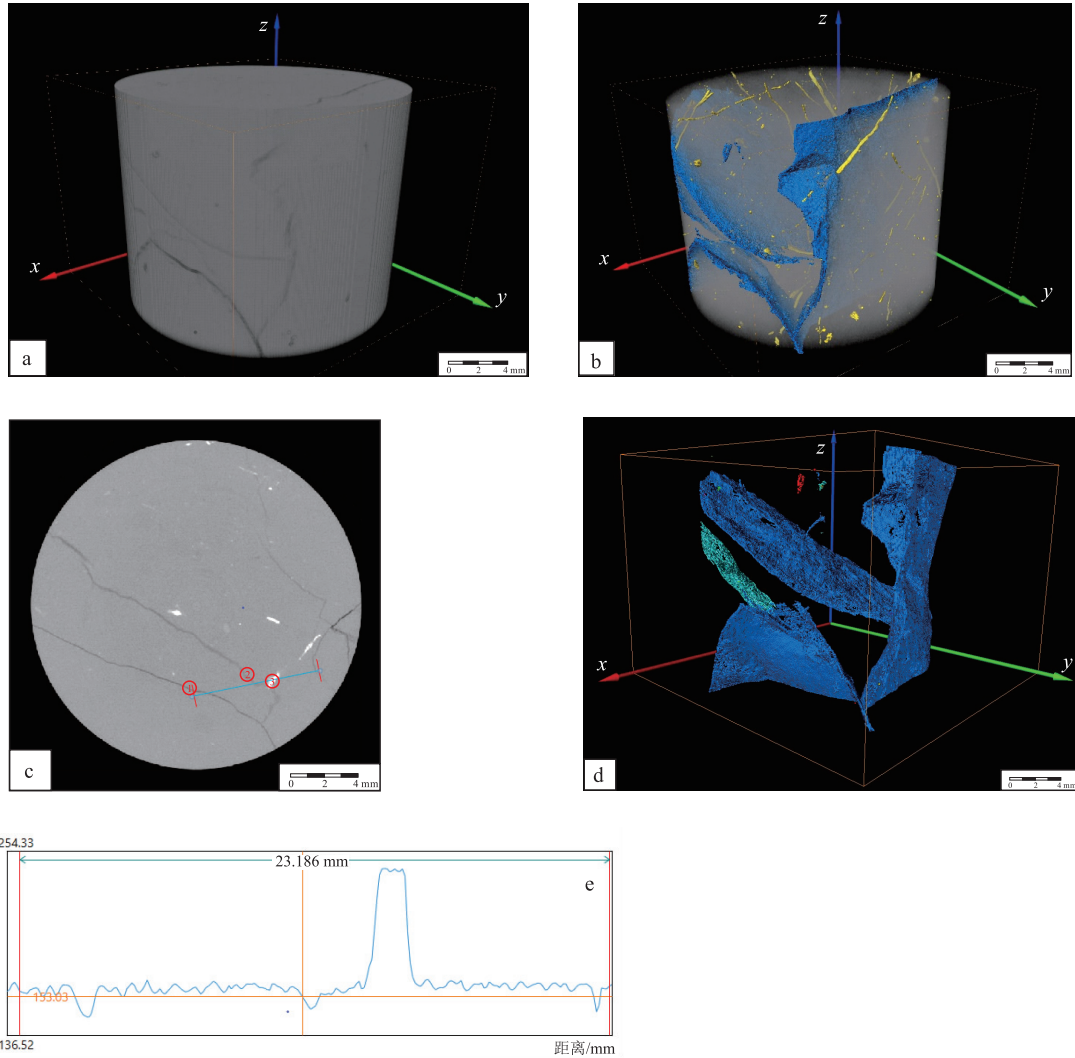


图 2 三维岩心重建与渲染结果及灰度值信息

Fig. 2 3D core reconstruction and rendering results and gray value information

a—重建出来的数字岩心;b—将主要特征渲染后与数字岩心重叠在一起的结果。c—在 XY 截面上任意抽取的一条线;d—将数字岩心中孔隙进行提取,将不连通的部分用不同颜色进行标记;e—在 XY 截面上任意抽取一条线的灰度值曲线,①位置为孔隙,灰度值曲线显示为波谷;②位置也为孔隙,灰度值也显示为波谷;③位置为岩石中包裹的矿物,灰度值显示为波峰

3.3 岩心孔隙类型划分

岩心 CT 扫描获得的孔隙结构和形态,有助于直观认识实际岩心孔隙的空间形态。本文依据国际理论和应用化学协会关于孔隙大小的划分标准(IUPAC)及石油天然气行业标准(SY/T 5579.1—2008)对样品孔隙进行识别分类。储层孔隙通常依据有机质孔隙、颗粒内孔、粒间孔隙及微裂隙进行类型划分,但由于数字岩心无法判断孔隙填充物和颗粒内孔的存在情况,结合样品空间展布形态和孔隙定量数据对本次样品进行了分类(表 2),主要依据是孔隙的裂缝张开度和有效缝的分布密度。

3.4 岩心孔喉定量参数统计

本次实验采用球棍模型重建三维 CT 岩心孔隙结构,同时依靠数据计算获得孔隙直径、喉道直径、配位数等有关定量参数,并根据平均孔喉比及配位数 2 个关键参数,判断样品孔隙连通性,根据最大球法获得的孔隙半径信息,展现出样品微孔隙的定量数值。

由于微孔隙本身数量级小,采用定量和图示相结合的方法有利于认识孔隙结构,其中配位数根据球棍模型的恢复配位关系获得,连通性通过孔喉比数值确定。本文对所有样品的有关参数进行了统计(表 3),并根据平均配位数和渗透率信息,初步对

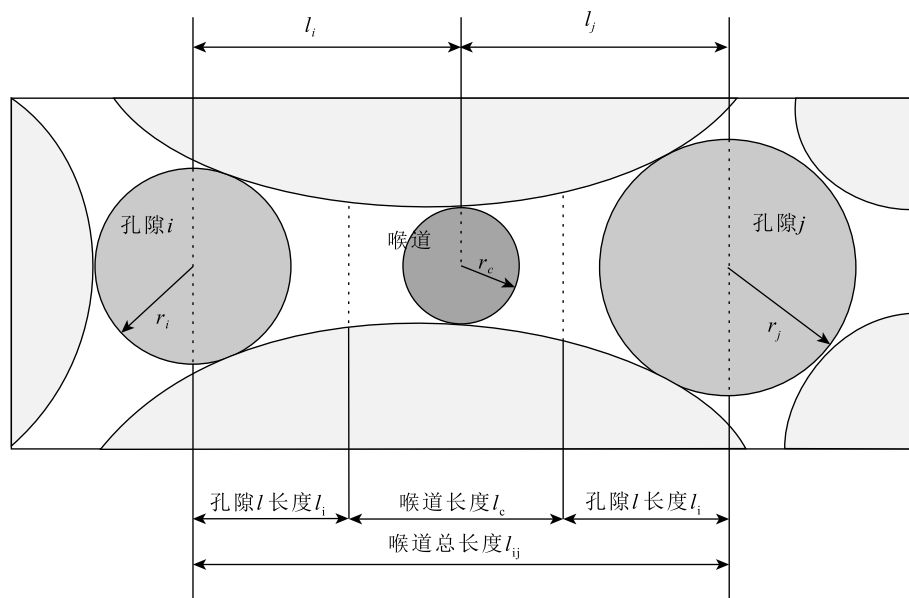


图3 最大球法原理

Fig. 3 Principle of maximum ball method

表2 数字岩心孔隙类型划分

Table 2 Pore type

编号	深度/m	实际取样岩性	孔隙类型	
SK-CT01	3588	细砂岩	微毛细管孔隙	粒间孔
SK-CT02	3742.1	砂质泥岩	毛细管孔隙	粒间孔
SK-CT03	3786.2	中砂岩	毛细管孔隙	粒间孔+微裂隙
SK-CT04	3839.3	泥岩	超毛细管孔隙	微裂隙
SK-CT05	3899.5	泥岩	超毛细管孔隙	微裂隙
SK-CT06	4004	泥岩	微毛细管孔隙	微裂隙
SK-CT07	4288.5	粗砂岩	微毛细管孔隙	粒间孔
SK-CT08	4374.5	含砂泥岩	微毛细管孔隙	粒间孔
SK-CT09	4446.4	泥岩	微毛细管孔隙	微裂隙
SK-CT10	4561.4	细砂岩	毛细管孔隙	粒间孔+微裂隙
SK-CT11	4585.13	泥岩	微毛细管孔隙	微裂隙
SK-CT12	4684.76	粉砂质泥岩	微毛细管孔隙	粒间孔
SK-CT13	4851.2	泥岩	超毛细管孔隙	微裂隙
SK-CT14	4911.8	泥岩	毛细管孔隙	微裂隙
SK-CT15	4967.5	泥岩	超毛细管孔隙	微裂隙
SK-CT16	5045.8	细砂岩	微毛细管孔隙	粒间孔
SK-CT17	5097.4	泥岩	超毛细管孔隙	微裂隙
SK-CT18	5264.7	泥岩	微毛细管孔隙	微裂隙
SK-CT19	5688.9	泥岩	微毛细管孔隙	微裂隙

样品进行了高孔低渗和低孔高渗分级,通过对分级后的孔隙信息进行分类,快速确定目标区域。

4 讨论

通过本次岩心三维 CT 成像实验,获得了样品灰度值的分布特征,区分出砂泥岩不同的组分特点,在数字岩心统计分析中发现了反映岩心孔隙及配位数的特征,以此探讨沙河子组泥岩的孔隙度、渗透率与该深度气测异常间的关系。

4.1 灰度值分析

对泥岩样品 SK-CT13 的 XY 截面的任意一条线进行灰度值提取(图 2-e)。根据灰度值分析标准 0~255,样品灰度值在 130~255 范围,在孔隙位置显示为一定宽度的灰度低值,可以显示出孔隙的微观尺度信息;包裹矿物位置显示为一定宽度的灰度高值,可以展示矿物的尺寸信息。灰度值特征曲线上,在孔隙和低密度部分显示为波谷,在矿物和高密度区域显示为波峰。

同时对 19 块样品的灰度值进行分类。统计结果表明,样品中砂岩样品灰度值曲线跳动剧烈,泥岩样品则表现较缓和,说明灰度信息可以作为初步判断岩性的参考依据。目前样品数量有限,今后需要增加测试样品的数量或对钻井现场岩心进行连续扫描成像,使实验结果更具有说服力。

表 3 孔隙结构定量特征参数
Table 3 Quantitative characteristic parameters of pore-throat structure

实验样品	最大孔隙半径 / μm	平均孔隙半径 / μm	最大喉道半径 / μm	平均喉道半径 / μm	最大喉道长度 / μm	平均喉道长度 / μm	最大孔喉比	平均孔喉比	最大孔隙体积 / μm^3	平均孔隙体积 / μm^3	最大喉道体积 / μm^3	平均喉道体积 / μm^3	最大配位数	平均配位数	孔隙率 /%	渗透率 /mD
SK-CT01	103.0	29.3	32.7	13.7	81.1	48.3	18.4	1.2	2.3×10^7	1.8×10^6	9.7×10^5	1.9×10^5	3	0	0.0134	不连通
SK-CT02	113.6	24.7	61.7	13.5	354.9	52.6	20.6	1.9	3.4×10^7	1.2×10^6	9.6×10^6	1.9×10^5	10	1	0.261	不连通
SK-CT03	166.7	37.7	71.0	21.6	286.8	69.0	22.2	1.4	1.6×10^8	4.2×10^6	8.9×10^6	7.0×10^5	4	0	0.093	不连通
SK-CT04	105.9	40.0	92.2	30.8	762.6	129.1	15.8	1.9	1.3×10^8	7.2×10^6	1.9×10^7	2.9×10^5	18	3	0.265	41.262753
SK-CT05	75.2	25.6	54.2	15.7	219.7	56.0	15.3	1.8	1.4×10^7	1.2×10^6	4.3×10^6	1.8×10^5	8	1	0.564	7.1102405
SK-CT06	87.0	29.7	68.5	17.6	349.8	75.6	15.7	2.0	2.3×10^7	1.8×10^6	4.7×10^6	5.8×10^4	16	4	0.159	22.676525
SK-CT07	130.1	28.5	85.0	15.3	364.4	55.3	15.7	2.1	1.5×10^8	3.2×10^6	4.1×10^7	3.9×10^5	13	2	0.02	不连通
SK-CT08	104.2	35.8	78.9	20.6	418.9	92.3	9.4	1.5	7.1×10^7	4.2×10^6	1.1×10^7	6.7×10^5	10	1	0.047	不连通
SK-CT09	54.0	23.8	40.9	13.0	201.8	54.2	16.0	2.2	7.4×10^6	8.8×10^5	1.2×10^6	9.8×10^4	11	2	0.159	不连通
SK-CT10	131.5	32.0	68.3	19.1	319.1	82.5	22.8	1.9	3.0×10^8	2.6×10^6	1.3×10^7	8.1×10^4	31	4	0.348	8.1356659
SK-CT11	52.3	20.3	43.4	10.1	245.7	59.0	13.7	2.2	5.8×10^6	7.2×10^5	2.7×10^6	1.6×10^5	10	2	0.104	不连通
SK-CT12	131.5	27.0	72.6	14.9	319.1	51.0	22.8	1.1	3.0×10^8	9.6×10^5	1.3×10^7	2.6×10^5	31	0	0.022	不连通
SK-CT13	128.7	47.8	101.8	30.8	1,719.1	184.9	8.1	1.7	4.6×10^8	1.5×10^7	1.7×10^8	4.9×10^5	37	6	1.96	0.059192747
SK-CT14	87.3	39.6	64.3	28.1	596.5	133.5	9.0	1.6	6.5×10^7	5.8×10^6	1.6×10^7	1.1×10^5	18	5	0.37	69.063087
SK-CT15	131.5	33.5	72.6	21.6	465.1	100.4	22.8	1.8	3.0×10^8	3.1×10^6	1.3×10^7	5.4×10^4	31	6	0.639	4.1079793
SK-CT16	128.4	27.9	74.1	15.6	267.8	56.2	20.0	1.5	7.3×10^7	1.6×10^6	8.8×10^6	3.7×10^5	6	0	0.091	不连通
SK-CT17	83.3	25.1	61.8	13.7	198.6	51.4	11.9	1.8	2.4×10^7	1.4×10^6	7.6×10^6	2.4×10^5	11	1	0.10	不连通
SK-CT18	127.7	28.5	88.6	15.3	364.4	55.1	11.9	2.1	1.5×10^8	3.2×10^6	4.1×10^7	3.9×10^5	13	2	0.11	不连通
SK-CT19	78.6	46.0	62.2	27.9	801.9	176.9	3.9	1.7	2.3×10^8	1.3×10^7	3.6×10^7	3.9×10^5	18	6	0.177	不连通

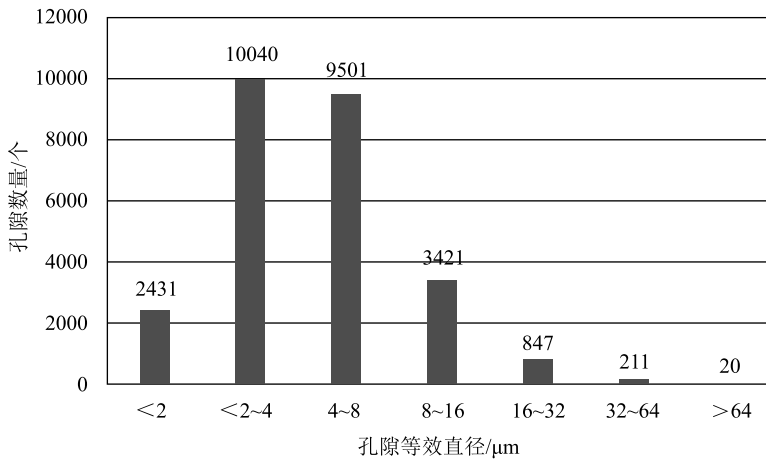


图4 孔隙等效直径统计直方图

(SK-CT13 泥岩样品等效孔隙直径集中在 2~8 μm)

Fig. 4 Statistical plot of pore equivalent diameter

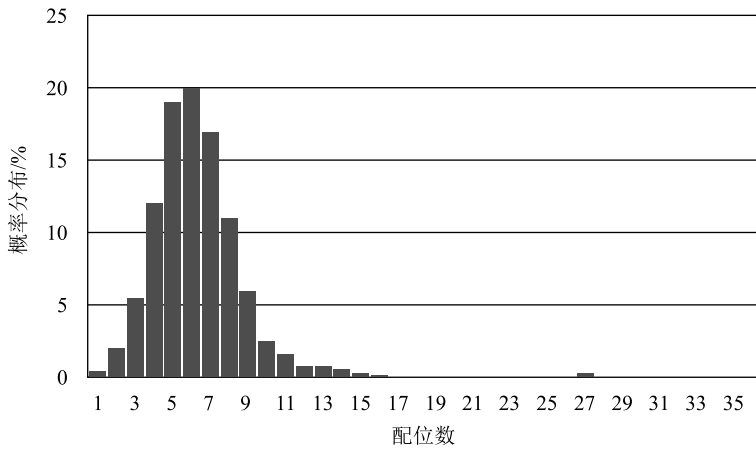


图5 配位数统计直方图

(样品 SK-CT13 配位数 6 占比最高)

Fig. 5 Coordination digit statistics histogram

数据显示在高孔隙度和高渗透率的区段对应强烈的气测异常,同时气测异常集中于高异常顶部,推测为油气运移过程中在顶部形成富集。

本次岩心三维显微 CT 成像实验表明,数字岩心技术能够反映该区段的孔隙度、渗透率特征,并通过统计分析作为圈定目标区域的辅助手段。研究发现,孔隙度与渗透率存在错位,但呈现伴生关系,在沙河组 3800~3900 m 井段,孔隙度和渗透率交替分布并在顶部附近存在气测异常,符合低孔喉比运移、高孔喉比赋存的一般规律;在 4800~5000 m 井段,孔隙度和渗透率呈现线性关系,同样在顶部存在气测异常,但此区域表现为低孔喉比赋存,推测为游离态富集。

4.2 孔隙及配位数特征

对本次样品进行了等效直径的统计。样品中砂岩样品的等效直径一般为 50~150 μm ,泥岩样品的等效直径一般小于 50 μm ,其中 SK-CT13 样品的等效直径主要分布在 2~8 μm 之间,属于孔隙等效直径特别差的样品(图 4),计算出的孔隙度基本为零。

本文对所有样品进行配位数统计,样品的配位数普遍小于 3,仅几个样品的配位数为 4~6,其中 SK-CT13 样品的平均配位数为 6(图 5)。

对孔隙等效直径和配位数的统计发现,配位数小、等效直径大的区域有较强的气测异常,配位数大但等效直径小的区域气测异常较弱,证明 2 种区域分别适合储存和运移,与苏娜等^[33]、查明等^[31]在油气储存和运移研究中发现的高孔喉比的位置适合油气储存的认识一致。

4.3 孔隙度与渗透率规律

实验中对 19 块数字岩心进行参数分析,统计并获得特征参数表(表 3),发现深层泥岩孔隙度、连通性与气测异常之间存在对应关系,选取的样品处于气测异常区和有利区段^[2]。通过对数字岩心的孔隙度、渗透率数据的定量统计,显示这个区域具有孔隙度高、连通性好的特征。并且页岩气有利区段上明显有三高的特征,即孔隙度高、渗透率高、气测异常高(图 6),

5 结 论

(1)三维岩心扫描获得的灰度值信息,完整地展示了岩心的内部结构,通过数学方法计算获得孔隙、喉道等相关参数,可用于区分岩心中孔隙、矿物等不同组分。

(2)孔隙等效直径和配位数可以反映孔隙的发育情况,结合空间模型和定量参数,能够辅助定位和分析深部非常规气的有利赋存区。

(3)研究区沙河子组层段的气测异常呈现“M”状分布,本次岩心 CT 结果获得的孔隙度、渗透率也呈现相同规律,表明岩心 CT 方法获得的参数准确可信,岩心三维显微 CT 成像可以作为辅助手段研

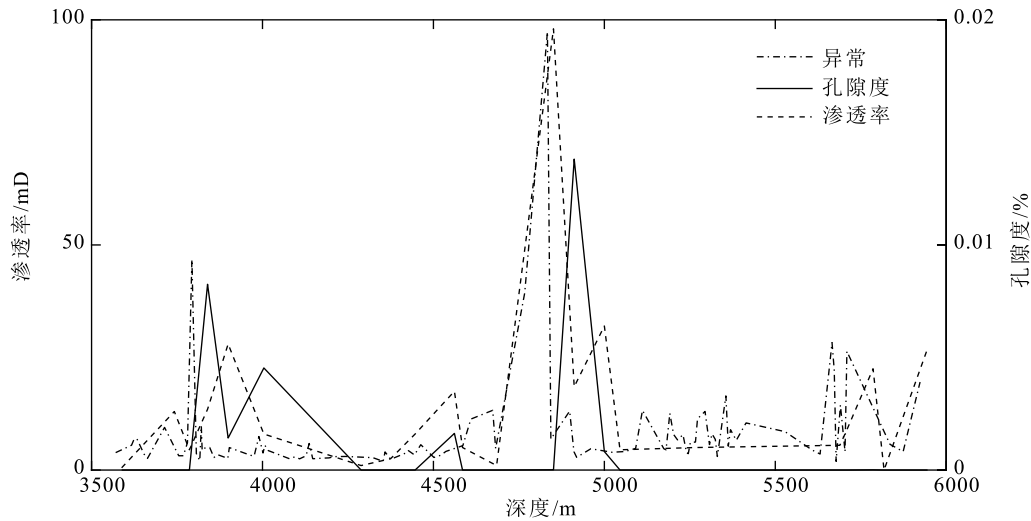


图 6 孔隙度、渗透率及异常特征图

Fig. 6 Porosity, permeability and anomaly characteristics

究气测异常段的分布规律。

(4) 随着非常规油气开发成为主流, CT 岩心扫描方法以其高精度和便于数字模拟的优势, 更好地服务于非传统贮存空间的研究和开发, 尤其是促进对深部油气赋存空间的认知。

(5) 本次研究证明, 岩心三维显微 CT 成像是一种高效获取岩心结构的重要手段, 对数字岩心参数提取和识别能够精细刻画岩心及目标区孔隙形态, 在计算分析孔隙度和渗透率的规律基础上, 可以高效准确地划分有利层段, 提升研究效率。

致谢: 为获取深部珍贵岩心资料, 松科二井工程全体人员在井场付出长达四年的辛苦, 本项研究工作在岩心取样与地层分析方面得到中国地质调查局实物中心崔立伟高级工程师、中国地质大学(北京) 高远副教授、吉林大学高有峰教授的帮助与指导, 审稿专家提出了很多建设性的意见和建议, 在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

[1] 王璞珺, 刘海波, 任延广, 等. 松辽盆地白垩系大陆科学钻探“松科 2 井”选址[J]. 地学前缘, 2017, 24(1): 216-228.

[2] 侯贺晟, 王成善, 张交东, 等. 松辽盆地大陆深部科学钻探地球科学研究进展[J]. 中国地质, 2018, 45(4): 641-657.

[3] 高有峰, 瞿雪姣, 蒋丽君, 等. 松辽盆地白垩系大陆科学钻探松科 2 井钻遇地层界面及岩性剖面预测[J]. 地学前缘, 2017, 24(1): 242-256.

[4] 李宏浩, 高有峰, 王璞珺, 等. 松辽盆地徐家围子断陷沙河子组顶界面特征研究——基于松辽盆地大陆科学钻探松科 2 井[J]. 世界地

质, 2018, 37(3): 838-849.

[5] 侯贺晟, 张金昌, 张交东, 等. 松科二井轻烃组分垂向分布特征及其对深部油气的指示[J]. 中国地质, 2019, 46(5): 943-953.

[6] 符伟, 侯贺晟, 高锐, 等. “松科二井”邻域岩石圈精细结构特征及动力学环境——深地震反射剖面的揭示[J]. 地球物理学报, 2019, 62(4): 1349-1361.

[7] 国瑞, 侯贺晟, 符伟, 等. 松科二井深地震反射数据 Q 值分析及其对含气层位的确定[J]. 中国地质, 2019, 46(5): 1137-1145.

[8] 赵泽辉, 徐淑娟, 姜晓华, 等. 松辽盆地深层地质结构及致密砂砾岩气勘探[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(1): 12-23.

[9] 刘超. 松辽盆地徐家围子地区沙河子组气源岩与致密砂砾岩气资源潜力评价[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(3): 429-438.

[10] 赵碧华. 用 CT 扫描技术观察油层岩心的孔隙结构[J]. 西南石油学院学报, 1989, (2): 57-64.

[11] 陈毅华, 赵德明. 利用 x-CT 技术计算岩心的裂缝参数[J]. 石油勘探与开发, 1990, (3): 82-86.

[12] Joshi M. A class of stochastic models for porous media [D]. PhD Thesis of Lawrence Kansas University of Kansas, 1974.

[13] Hazlett R. D. Statistical characterization and stochastic modeling of pore networks in relation to fluid flow [J]. Mathematical Geology, 1997, 29(6): 801-822.

[14] Bakke S, Øren P E. 3-D pore-scale modelling of sandstones and flow simulations in the pore networks [J]. Spe Journal, 1997, 2(2): 136-149.

[15] Rosenberg E, Lynch J, Gueroult P, et al. High resolution 3D reconstructions of rocks and composites [J]. Oil & Gas Science and Technology, 1999, 54(4): 497-511.

[16] Arns C H. The influence of morphology on physical properties of reservoir rocks [D]. PhD Thesis of University of New South Wales, 2002.

[17] Arns C H, Knackstedt M A, Pinczewski W V, et al. Virtual permeability on microtomographic images [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2004, 45(1/2): 41-46.

- [18] Youssef S, Rosenberg E, Gland N F, et al. High resolution CT and pore - network models to assess petrophysical properties of homogeneous and heterogeneous carbonates [C] // SPE/EAGE Reservoir Characterization and Simulation Conference. Society of Petroleum Engineers, 2007.
- [19] 刘向军, 朱建英, 唐存知. 义 18 井区泥页岩裂缝油藏储层改造方式优选[J]. 陕西科技大学学报(自然科学版), 2013, 31(3): 81-84.
- [20] 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.
- [21] Law B E, Curtis J B. Introduction to unconventional petroleum systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1851-1852.
- [22] Schmoker J W. Resource -assessment perspectives for unconventional gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1993-1999.
- [23] 贾承造, 赵政璋, 杜金虎, 等. 中国石油重点勘探领域——地质认识、核心技术、勘探成效及勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2008, (4): 385-396.
- [24] 邹才能, 翟光明, 张光亚, 等. 全球常规-非常规油气形成分布、资源潜力及趋势预测[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(1): 13-25.
- [25] 邹才能, 杨智, 张国生, 等. 常规-非常规油气“有序聚集”理论认识及实践意义[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 14, 27.
- [26] 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.
- [27] 张天付, 谢淑云, 王鑫, 等. 孔隙型储层的孔隙系统三维量化表征——以四川、塔里木盆地白云岩为例[J]. 海相油气地质, 2016, 21(4): 1-10.
- [28] 郑剑锋, 陈永权, 倪新锋, 等. 基于 CT 成像技术的塔里木盆地寒武系白云岩储层微观表征[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(5): 780-789.
- [29] 庞正炼, 陶士振, 张琴, 等. 四川盆地中部侏罗系大安寨段储集层微观结构及油气意义[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(1): 62-72.
- [30] 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.
- [31] 查明, 尹向烟, 姜林, 等. CT 扫描技术在石油勘探开发中的应用[J]. 地质科技情报, 2017, 36(4): 228-235.
- [32] 殷宗军, 朱茂炎, 肖体乔. 同步辐射 X 射线相衬显微 CT 在古生物学中的应用[J]. 物理, 2009, 38(7): 504-510.
- [33] 苏娜, 段永刚, 于春生. 微 CT 扫描重建低渗气藏微观孔隙结构——以新场气田上沙溪庙组储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(05): 792-796.