

鄂南致密砂岩气藏储层孔隙特征研究

黎涛*, 丁珺, 张鉴, 史恺翌, 杨林川, 任雨婷, 龚欣浩

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年6月16日; 录用日期: 2025年8月15日; 发布日期: 2025年8月25日

摘要

致密砂岩储层因其孔隙结构相对复杂、非均质性强等原因而在非常规油气开发中面临诸多挑战。为深入探究该类储层的孔隙结构特征及其非均质性规律, 本文选取鄂尔多斯盆地某区块盒一段的致密砂岩岩心, 结合X射线衍射(XRD)、低温氮气吸附(BET)等实验手段对其孔隙结构特征及矿物组成进行表征。结果表明, 研究区致密砂岩储层孔隙类型以介孔(2~50 nm)为主, 孔径分布在8.8~33.0 nm之间, 平均孔径为14.7 nm, 矿物组成中黏土矿物绝对含量较高, 矿物类型主要有伊利石、高岭石、伊/蒙混层等。基于低温氮气吸附的孔隙分形维数介于2.317~2.631之间, 平均为2.538, 反映出致密砂岩储层具有高度复杂与显著非均质的孔隙结构。本研究可为致密气藏储层评价与开发提供理论支撑。

关键词

致密砂岩, 低场核磁, 氮气吸附, 孔隙结构, 分形维数

Pore Structure Characteristics of Tight Sandstone Gas Reservoirs in the Southern Ordos Basin

Tao Li*, Jun Ding, Jian Zhang, Kaiyi Shi, Linchuan Yang, Yuting Ren, Xinhao Gong

School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Jun. 16th, 2025; accepted: Aug. 15th, 2025; published: Aug. 25th, 2025

Abstract

Tight sandstone reservoirs present numerous challenges in unconventional hydrocarbon development due to their complex pore structures and strong heterogeneity. To better understand the pore structure characteristics and heterogeneity of such reservoirs, this study investigates tight sandstone

*通讯作者。

文章引用: 黎涛, 丁珺, 张鉴, 史恺翌, 杨林川, 任雨婷, 龚欣浩. 鄂南致密砂岩气藏储层孔隙特征研究[J]. 地球科学前沿, 2025, 15(8): 1210-1217. DOI: 10.12677/ag.2025.158113

cores from the He-1 Member in a selected block of the southern Ordos Basin. A combination of X-ray diffraction (XRD) and low-temperature nitrogen adsorption (BET) techniques was employed to characterize both pore structure and mineral composition. Results indicate that mesopores (2~50 nm) dominate the pore system, with pore sizes ranging from 8.8 to 33.0 nm and an average pore diameter of 14.7 nm. The reservoir features a high clay mineral content, primarily composed of illite, kaolinite, and illite-smectite mixed layers. Fractal dimension values derived from nitrogen adsorption data range from 2.317 to 2.631, with an average of 2.538, suggesting a highly complex and significantly heterogeneous pore network. This study provides a theoretical basis for reservoir evaluation and development of tight gas reservoirs.

Keywords

Tight Sandstone, Low-Field NMR, Nitrogen Adsorption, Pore Structure, Fractal Dimension

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

致密砂岩作为非常规天然气储层的重要组成,其开发潜力近年来受到广泛关注。然而,其储层孔隙度低、渗透率差、非均质性强等特点,导致油气赋存机制及渗流行为复杂多变,制约了其高效开发。深入揭示其微纳米孔隙结构特征与非均质性分布规律,是实现储层精准表征与有效开发的关键。当前,多种实验技术被广泛应用于致密储层孔隙结构分析,如低场核磁共振(NMR)、扫描电镜(SEM)、高压压汞(MIP)及低温气体吸附(BET)等。其中,低温氮气吸附技术因其对介孔尺度的高分辨能力,在纳米孔隙表征方面具有独特优势;结合相应分形模型可进一步量化储层孔隙表面复杂程度,进而建立分形维数与孔隙异质性之间的映射关系。

本研究基于鄂尔多斯盆地富县区块典型致密砂岩岩样,系统开展 X 射线衍射与低温氮气吸附实验,获取储层孔隙结构、孔容分布及分形特征数据,探讨孔隙结构参数与矿物组成的协同变化规律,并构建 FHH 分形维数计算模型,从微观尺度揭示储层非均质性程度,为致密气藏储层评价提供理论支持与参数依据。

2. 实验材料与方法

2.1. 实验材料

选取鄂尔多斯盆地富县区块上古生界石盒子组盒 1 段的 8 块致密砂岩岩心作为研究对象。岩样孔隙度介于 5.2%~15.276%,气相渗透率介于 0.215~5.56 mD,物性差异显著,具有代表性,使用前在 105℃ 下烘干至恒重,基本物性参数见表 1,岩样实物照片如图 1 所示。

2.2. 实验方法

2.2.1. 岩石组分 X 衍射实验

将适量现场岩心样品磨粉,过 100 目筛孔,放入真空干燥箱,在 50℃、0.090 MPa 真空度下干燥 48 h,去除样品中的水分,用玛瑙研钵充分研磨至粉末状;将干燥后的粉末样品压实于样品载台上,形成均匀、光滑的测试面,避免颗粒排列方向性,采用 X 射线衍射仪(XRD, TD3000, 丹东通达)对岩屑矿物的



Figure 1. Dense sandstone core
图 1. 致密砂岩岩心

Table 1. Basic physical properties of core
表 1. 岩心基本物性

样号	层位	深度/(m)	气测渗透率/(mD)	孔隙度/(%)	长度/(mm)
1	盒一段	3741.53	0.215	5.524	40.47
2	盒一段	3909.27	0.789	8.766	45.36
3	盒一段	4029.09	0.637	9.866	62.58
4	盒一段	4028.64	1.14	13.321	52.78
5	盒一段	2964.57	0.262	15.786	37.55
6	盒一段	2774.1	0.183	10.851	59.12
7	盒一段	2831.29	5.56	14.4	60.01
8	盒一段	3096.16	0.366	15.276	52.22

物相组成进行分析[1]。测定条件为：Cu 靶($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$)、管电压 40 kV、管电流 30 mA、扫描范围 $3^\circ \sim 70^\circ$ 、扫描速率 $1.2^\circ/\text{min}$ 。

2.2.2. 岩石比表面和孔径分布测试(BET)

参照国际理论与应用化学联合会(IUPAC)与国家标准《GB/T 19587-2017》，将孔喉分为微孔[2]：<2 nm、介孔：2~50 nm、大孔：>50 nm (王文通等，2025)，破碎岩块至 1~3 mm，采用 Micromeritics ASAP 2460 型比表面及孔结构分析仪，相对压力 P/P_0 控制在 0.05~0.995，平均采样间隔 20 s，确保等温线的完整性与拟合精度，测量氮气在岩块上的吸附曲线，对其基本物性进行表征。吸附气体：N₂ (常规，77K)；测试温度：-195.85℃；平均间隔：20 s；脱气温度 150℃。

3. 实验结果与讨论

3.1. 区域地质背景

鄂尔多斯盆地是中国第二大沉积盆地，总面积约为 $37 \times 10^4 \text{ km}^2$ (孟祥振等，2015)，属于中生代时期形成的内陆拗陷型克拉通盆地[3]。富县地处盆地东南部的陕北斜坡，毗邻渭北隆起，区域地层整体展布平缓，构造形态较为简单，断裂发育较少，局部地区受差异压实影响形成低幅度鼻状构造[4]。此次实验所用岩心位于其下石盒子组盒一段，独特的地质构造导致了其孔隙发育类型多样，主要以溶蚀孔隙、高岭石晶间孔为主，少量残余粒间孔，且各层均有裂缝孔隙发育，储层较为致密物性差，图 2 为储层孔隙类型。

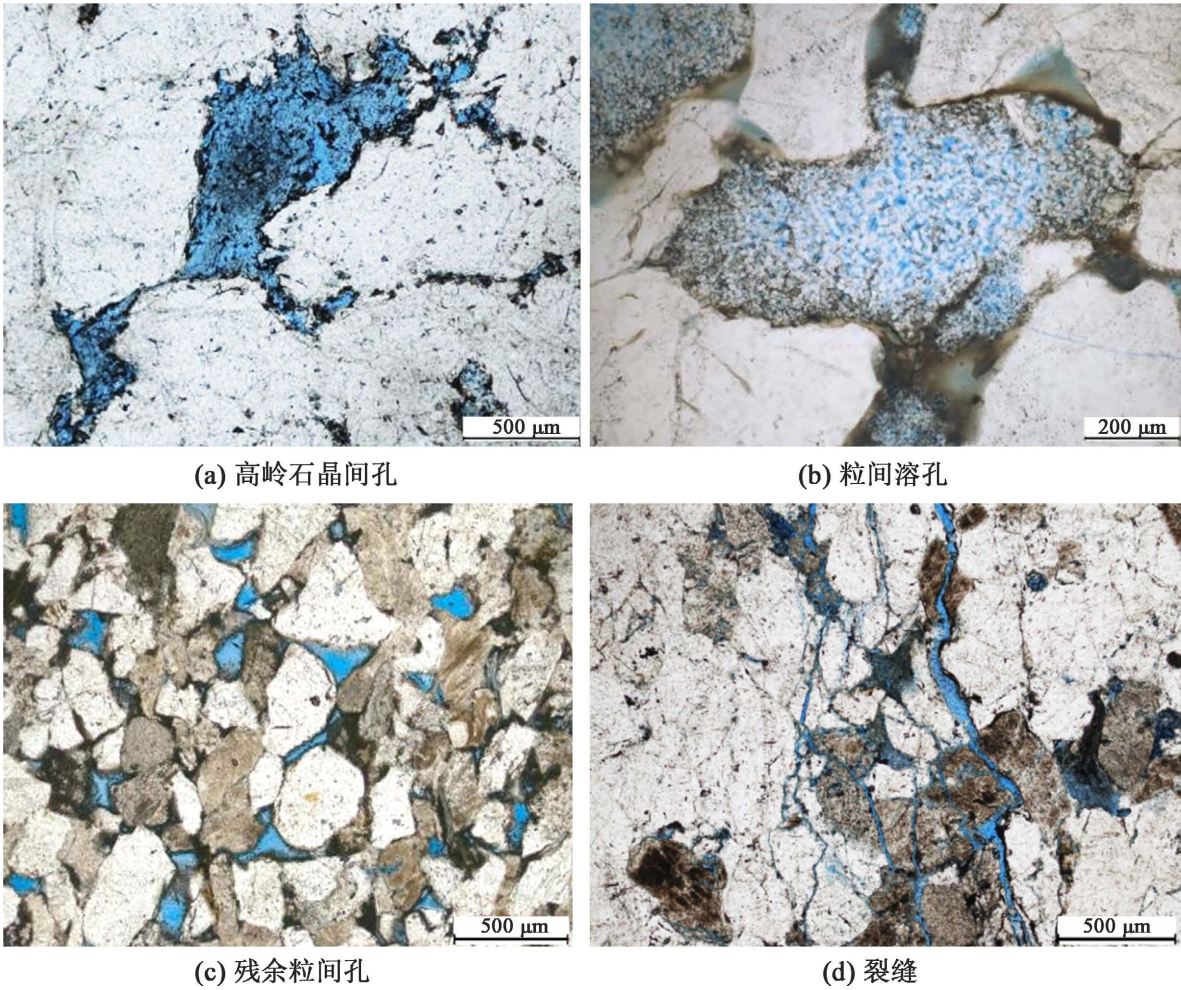


Figure 2. Shows various pore types of the core in the study block
图 2. 研究区块岩心各种孔隙类型

3.2. 储层黏土矿物含量及微观形貌

Table 2. Specific composition table of clay minerals
表 2. 粘土矿物具体组分表

样号	黏土矿物相对含量/%						绝对含量/(%)
	蒙皂石 S	伊利石 I	高岭石 K	绿泥石 C	伊/蒙混层 I/S	绿/蒙混层	
1	0	11	75	6	8	0	29.4
2	0	12	84	0	4	0	29.2
3	0	60	0	30	10	0	15.7
4	0	43	0	42	15	0	11.4
5	0	26	0	62	12	0	6.4
6	0	13	0	62	25	0	22.4
7	0	3	10	38	49	0	14.0
8	0	14	55	12	19	0	17.3

由表2可知,研究区域样品黏土矿物整体含量6.4%~29.4%,平均为18.2%;其中伊利石含量3%~60%,平均22.8%,高岭石含量0~84%,平均28%,绿泥石含量0~62%,平均31.5%,伊/蒙混层含量4%~49%,平均17.8%。

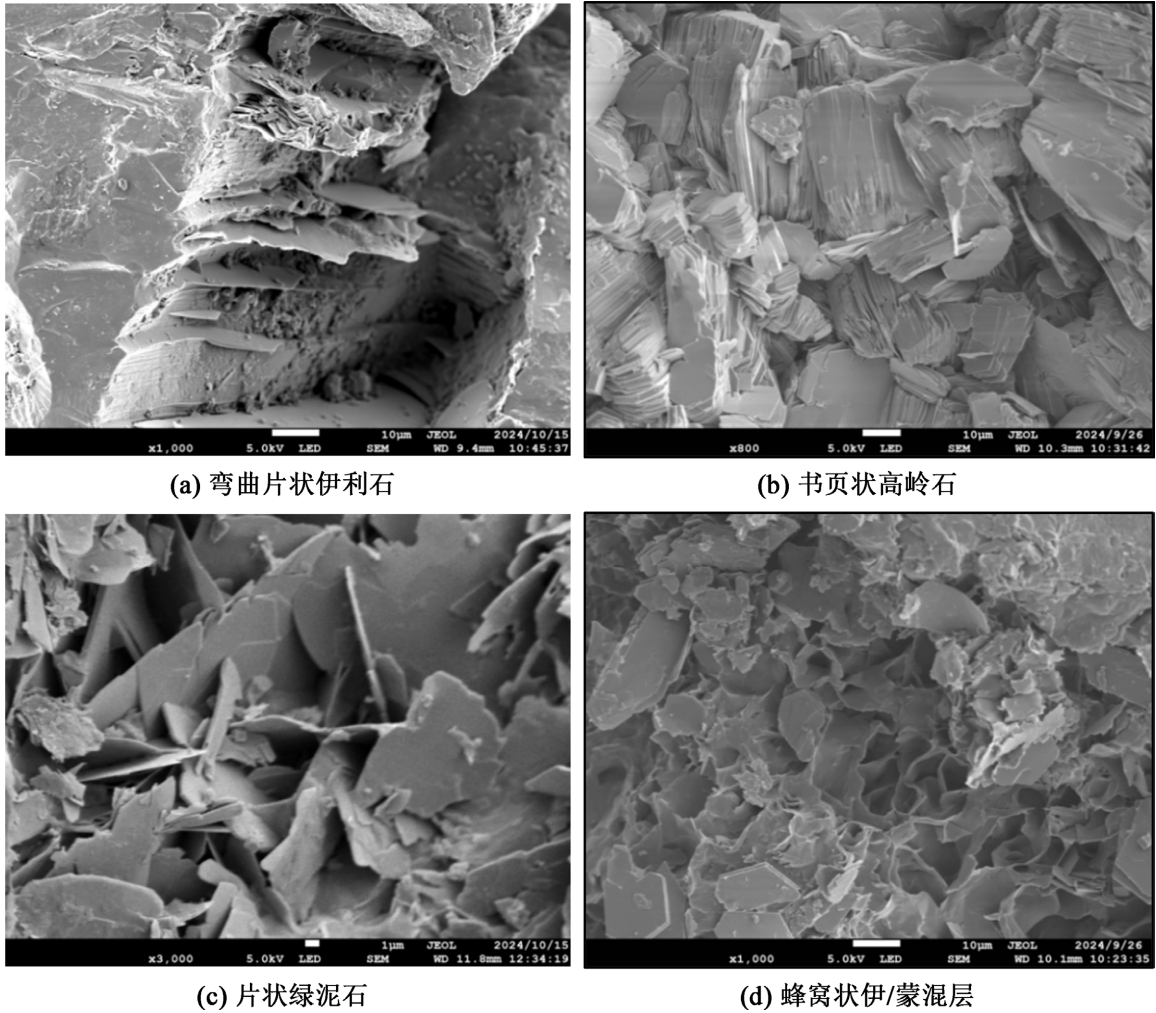


Figure 3. Shows the scanning electron microscope images of various clay minerals in the study block
图3. 研究区块各种黏土矿物扫描电镜图

同时根据实验结果见图3,其中1~5号样品岩性为碎屑岩,填隙物中的黏土矿物包括高岭石、伊/蒙混层,其中高岭石呈六方板状和书页状,伊/蒙混层为蜂巢状。6~8号样品岩性也为碎屑岩,黏土矿物主要为高岭石,局部可见极少量伊/蒙混层,黏土矿物类型单一;高岭石呈六方板状和书页状,伊/蒙混层为蜂巢状。

3.3. 储层微纳米孔隙结构特征

3.3.1. 基于氮气吸附的孔隙结构特征

基于氮气吸附的孔隙结构表征方法,是通过测量氮气在低温条件下对岩石孔隙的吸附与充填行为,从而间接推断孔隙结构特征的一种常用技术。该方法对纳米尺度孔隙具有良好的适应性,尤其在2 nm至50 nm范围内的介孔段,其测试结果具有较高的分辨率和精度,因而广泛应用于储层微观结构的定量分析中。本文共对8块致密岩心进行了低温氮气吸附实验,其对应的吸附-解吸曲线及微纳米孔隙参数如表3。

Table 3. Specific experimental results of BET
表 3. BET 具体实验结果

样号	BET 比表面积/ ($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	总孔体积 ($\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$)	孔体积比例/%			平均孔径/(nm)
			微孔/(<2 nm)	介孔/(2~50 nm)	大孔/(>50 nm)	
1	0.0322	0.001257	0	78.12	21.88	33.0259
2	0.6778	0.001995	0	68.54	31.46	18.6621
3	0.7860	0.003108	3.02	86.23	10.75	13.9430
4	0.2321	0.005915	0	90.56	9.44	13.8121
5	2.3003	0.008675	0	88.69	11.31	9.5544
6	1.8003	0.006168	0.002	95.23	4.76	8.8750
7	3.4927	0.009632	0.0003	83.99	16.00	10.8451
8	1.7579	0.005136	0	89.12	10.88	8.8219

总体来看，致密砂岩岩样总孔体积、表比面积相对较小，孔隙孔径细小且孔隙间连通性较差，平均孔径在 8.8219~33.0259 nm 之间，平均 14.7 nm，孔隙类型以介孔(2~50 nm)为主，孔隙半径较小，导致储层微观渗透性相对较低。

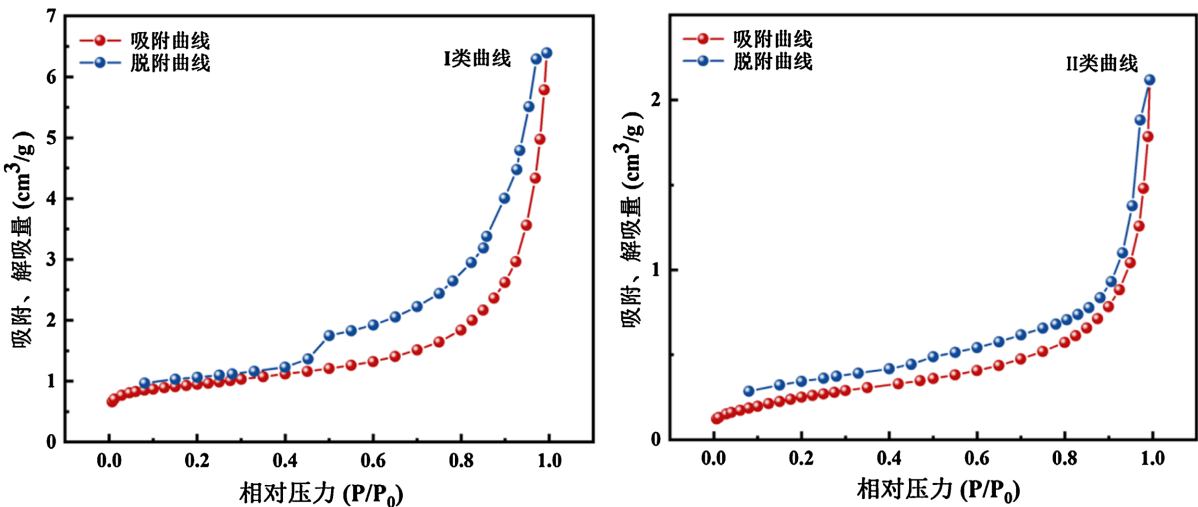


Figure 4. Nitrogen adsorption-desorption curve
图 4. 氮气吸附 - 解吸曲线

根据 IUPAC 对等温吸附线分类标准，研究区块的致密砂岩样品的吸附曲线(见图 4)在形貌上介于 II、III 型之间。岩心均出现了较为明显的回滞环，一般来说，回滞环代表着岩心孔隙内部发生了毛细管凝聚作用，说明岩样微纳米尺度的孔隙发育[5]。IUPAC 据回滞环形貌将多孔介质划分为四种类型，并关联了相应的孔喉形态，本文中实验样品测试结果曲线共呈现两种形态，文中将其分为 I 类和 II 类曲线。

I 类曲线(1~5 号岩心)：对应的是四周较为开放的平板状狭长缝形孔喉，此类孔喉在相对压力较小的时候，吸附 - 脱附曲线二者差别较小或基本重合，在相对压力较大处，会出现明显拐点[6]，表明此类岩样发育较多的细小孔喉，且占据主要的孔喉空间。

II 类曲线(6~8 号岩心)：在较长的一段时间内，吸附与脱附曲线基本平行，反映岩样中以圆锥形孔为主体，含有部分裂缝型和圆柱形孔。

3.3.2. 基于氮气吸附的孔隙分形特征

采用 BET 实验所得数据建立孔隙分形模型，能够定量表征储层中吸附孔隙的结构复杂性及非均质性特征，本研究采用 Pfeifer P 的 Frenkel-Halsey-Hill (FHH)模型[7]计算氮气吸附曲线分形维数，在该模型中气体压力与介质表面吸附气体存在以下相互关系，计算过程如图 5 所示：

$$\ln(V) = K \cdot \ln[\ln(P_0/P)] + C \tag{1}$$

式(1)中：

- V 为平衡压力 P 时的吸附量， cm^3/g ；
 - P 为平衡压力， MPa ；
 - P_0 为气体吸附饱和时的压力， MPa ；
 - C 为待定常量； K 为双对数曲线的斜率。
- 所有岩样分形维数计算如表 4 所示。

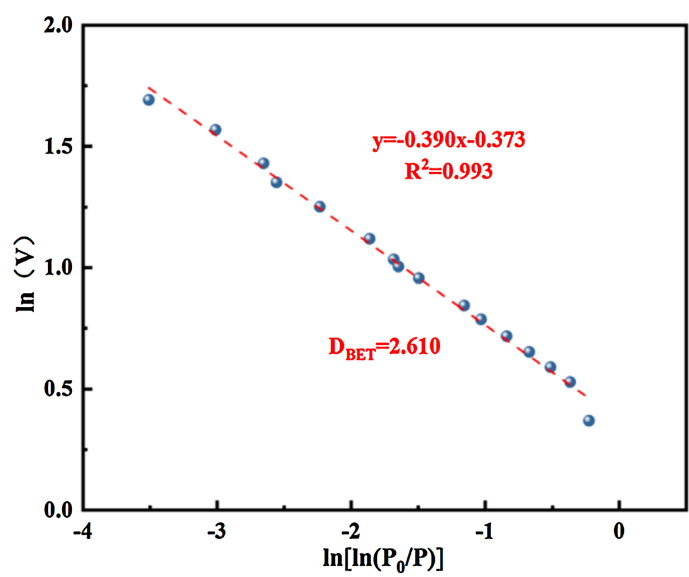


Figure 5. BET fractal characteristics
图 5. BET 分形特征

Table 4. Calculation results of fractal dimension
表 4. 分形维数计算结果

样号	K/(斜率)	DBET/(分形维数)	R ²	拟合公式
1	-0.369	2.631	0.992	$Y = -0.369x - 0.486$
2	-0.525	2.475	0.987	$Y = -0.525x - 2.137$
3	-0.394	2.606	0.997	$Y = -0.394x - 0.910$
4	-0.390	2.610	0.994	$Y = -0.390x + 0.373$
5	-0.683	2.317	0.980	$Y = -0.683x - 0.920$
6	-0.389	2.611	0.995	$Y = -0.389x + 0.008$
7	-0.448	2.552	0.990	$Y = -0.448x + 0.343$
8	-0.496	2.504	0.974	$Y = -0.496x - 0.452$

分形维数的值与孔隙结构之间存在一定的关系,一般来说,岩心的分形维数介于 2~3 之间,分形维数越接近 2,说明孔隙光滑结构较为简单;分维值越靠近 3,则孔隙越复杂,从表中可知,岩心的分形维数在 2.475~2.631 之间,平均值为 2.538,说明致密砂岩岩样的孔隙结构较复杂,非均质性较强,且分形维数主要与岩心渗透率呈负相关,即岩心越致密,孔隙也越复杂其分形维数相对也越接近 3。

4. 结论

(1) 鄂南致密气藏储层整体黏土矿物绝对含量平均为 18.2%,黏土矿物种类多样,包括蒙皂石、伊利石、高岭石、绿泥石和伊/蒙混层。

(2) 根据 BET 实验结果可知,储层平均孔径为 14.7 nm,孔隙类型以介孔(2~50 nm)为主,总孔体积及比表面积整体偏小,孔隙结构较为致密,微观渗流能力较弱。

(3) 储层结构较为复杂,岩心的分形维数在 2.475~2.631 之间,平均值为 2.538,储层整体孔隙结构复杂、非均质性强,分形维数与岩心渗透率呈负相关,在后续开发过程中,建议优先选取分形维数较小的储层实施储层改造,提高开发效率。

参考文献

- [1] 赵晓胜,周自成,王倩,等.油页岩灰基 NaX 型沸石的合成及表征[J].煤炭与化工,2022,45(7): 145-149+160.
- [2] 王文通,郭沙,李治兴,等.基于核磁共振技术的砂岩孔隙结构冻融损伤演化规律试验研究[J].黄金科学技术,2025,33(1): 114-126.
- [3] 孟祥振,刘聘,孟旺才,等.鄂尔多斯盆地西南部延长组长 7 段致密油地质“甜点”评价[J].特种油气藏,2018,25(6): 90-95.
- [4] 田媛,钟建华,王书宝,等.鄂尔多斯盆地富县探区三叠系延长组震积岩及其地质意义[J].古地理学报,2015,17(4): 541-552.
- [5] 王伟庆,王学军,李政,等.低演化陆相页岩孔缝特征及对页岩油赋存的意义:以济阳坳陷外围青南洼陷沙河街组为例[J].地质科技通报,2024,43(3): 94-107.
- [6] 赵迪斐.川东下古生界五峰组-龙马溪组页岩储层孔隙结构精细表征[D]:[博士学位论文].徐州:中国矿业大学,2020.
- [7] 李琦,陈睿倩,商斐,等.川东北地区侏罗系凉高山组页岩储层孔隙结构及分形特征[J].石油实验地质,2025,47(2): 323-335.