

川东北马路背构造带须二段储层微观孔隙结构特征分析及评价

韩月卿¹, 赵红琴², 张丽霞²

¹中国石化石油勘探开发研究院, 北京

²中国石化中原油田分公司物探研究院, 河南 濮阳

收稿日期: 2022年3月21日; 录用日期: 2022年4月20日; 发布日期: 2022年4月28日

摘要

致密砂岩储层的微观孔隙结构特征的分析及评价对勘探开发具有重要意义, 目前国内对致密砂岩储层微观孔隙结构特征的研究相对较少。本文基于高压压汞实验, 结合岩心描述和氩离子抛光扫描电镜对砂岩孔隙结构进行研究和探讨, 同时对川东北地区须二段砂岩储集层空间进行分类。研究发现, 川东北地区马路背构造带砂岩储层属于低孔、超低渗储层。同时, 高压压汞实验进汞-退汞曲线结果显示目的层段砂岩储层主要以微孔和中孔为主, 排驱压力平均值为1.33 MPa, 定量结合高压压汞孔喉结构参数与扫描电镜评价储层质量, 认为川东北地区马路背构造带砂岩类型主要为细砂岩, 发育大量的裂缝和次生孔隙, 属于裂缝-孔隙型储层, 储层质量较好。本次研究为川东北地区储层评价及进一步勘探开发提供可靠的地质基础和理论依据。

关键词

马路背构造带, 高压压汞, 微观孔隙, 储层评价

The Analysis and Evaluation of Micro Pore Structure Characteristics of Xu2 Member Reservoir in Malubei Structural Belt in Northeast Sichuan

Yueqing Han¹, Hongqin Zhao², Lixia Zhang²

¹Sinopec Petroleum Exploration and Development Research Institute, Beijing

²Institute of Geophysical Exploration, Zhongyuan Oilfield Company, Puyang Henan

Received: Mar. 21st, 2022; accepted: Apr. 20th, 2022; published: Apr. 28th, 2022

文章引用: 韩月卿, 赵红琴, 张丽霞. 川东北马路背构造带须二段储层微观孔隙结构特征分析及评价[J]. 地球科学前沿, 2022, 12(4): 545-554. DOI: 10.12677/ag.2022.124055

Abstract

The analysis and evaluation of the micro pore structure characteristics of tight sandstone reservoir are of great significance for exploration and development. At present, there is relatively little research on the micro pore structure characteristics of tight sandstone reservoir in China. Based on high-pressure mercury injection experiment, combined with core description and argon ion polishing scanning electron microscope, this paper studies and discusses the pore structure of sandstone, and classifies the reservoir space of Xu2 member sandstone in Northeast Sichuan. The results show that the sandstone reservoir in Malubei structural belt in Northeast Sichuan belongs to low porosity and ultra-low permeability reservoir. At the same time, the results of mercury inlet and outlet curve of high-pressure mercury injection experiment show that the sandstone reservoir in the target section is mainly microporous and mesoporous, and the average displacement pressure is 1.33 MPa. The reservoir quality is evaluated quantitatively combined with the structural parameters of high-pressure mercury injection pore throat and scanning electron microscope. It is considered that the sandstone type of Malubei structural belt in Northeast Sichuan is mainly fine sandstone, with a large number of fractures and secondary pores. It belongs to fracture pore reservoir with good reservoir quality. This study provides a reliable geological and theoretical basis for reservoir evaluation and further exploration and development in Northeast Sichuan.

Keywords

Malubei Structural Belt, High Pressure Mercury Injection, Micro Pore, Reservoir Evaluation

Copyright © 2022 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

川东北地区须二段砂岩储层孔隙具有孔喉细小,孔喉结构复杂的特征,属于超低孔、超低渗砂岩特征,制约了研究区砂岩储层致密气的有效开发,研究砂岩储层的微观孔隙结构特征对砂岩储层的产能评价和有效开发具有十分重要的意义。当前,国内外学者在砂岩储层微观孔隙结构表征方面展开了大量的研究,普遍认为微、纳米级孔隙是砂岩储层的重要渗流通道和赋存空间[1]。高压压汞实验是研究微观孔隙结构的有效岩石物理学方法,也是研究砂岩储层微观孔隙结构特征的重要途径,毛细管压力曲线能够提供大量的孔隙结构信息,其对微、纳米孔隙结构的表征已被广泛应用,对砂岩储层的研究及评价具有重要意义。高压压汞法测试样品速度快、准确,仪器设备测试原理相对简单,操作比较容易。但高压压汞法的测试过程是发生在两个静止状态之间,这就丢失了很多孔隙结构的信息。因此需要结合高分辨率的氩离子抛光扫描电镜实验,即可以直观地观察砂岩表面孔隙结构类型,观察纳米级孔隙,又获得精细的孔隙结构图像,描述砂岩孔隙形态以及孔隙之间的连通性。将直接观测法(氩离子抛光扫描电镜)与间接测试法(高压压汞实验)相结合对砂岩储层微观孔隙结构进行评价和分析,是准确揭示砂岩样品围孔径分布的重要途径。

根据四川盆地川东北地区多口钻井岩心及野外露头剖面的细致观察,以马路背地区须二段为例,通过高压压汞实验分析样品的孔径分布、孔喉参数结合研究区目的层段储层物性及有机地化特征,联合扫

描电镜等技术手段,对研究区目的层段取心样品展开全尺度表征[2],系统分析四川盆地川东北地区砂岩储层的微观孔隙结构特征,为川东北地区砂岩储层的评价及致密气的有效开发提供可支撑的理论依据。

2. 地质背景及实验样品

2.1. 地质概况

本论文研究中使用的样品均采自川东北构造带马路背构造西南高部位部署的评价井,目的层段为中生界三叠系须家河组须二段。工区整体位于四川盆地川北坳陷川东北背斜带东北段的马路背构造-黑池梁构造和通江、池溪向斜带,面积 1054.99 Km²,其中自然保护区面积 256.99 Km²,有效勘探面积 798 Km²。二维测网 1 × 2 km,4 块三维全覆盖;完钻井 16 口,试气井 14 口,试采井 9 口;保有天然气探明储量 191.56 亿方,控制储量 174.52 亿方。隶属于四川省通江、南江、巴中三县市。属中-低山区,海拔约 400~1300 米。工区西北部毗邻米仓山前缘构造带,东北部紧邻大巴山构造带,南部与四川盆地中部平缓构造带相邻,是古生代-早中三叠纪四川盆地地台沉积的一部分,也是中生代和新生代米仓山-大巴山的前陆盆地(图 1)。总体为一大型背斜,闭合面积大,闭合高差大。

川东北地区构造区划图

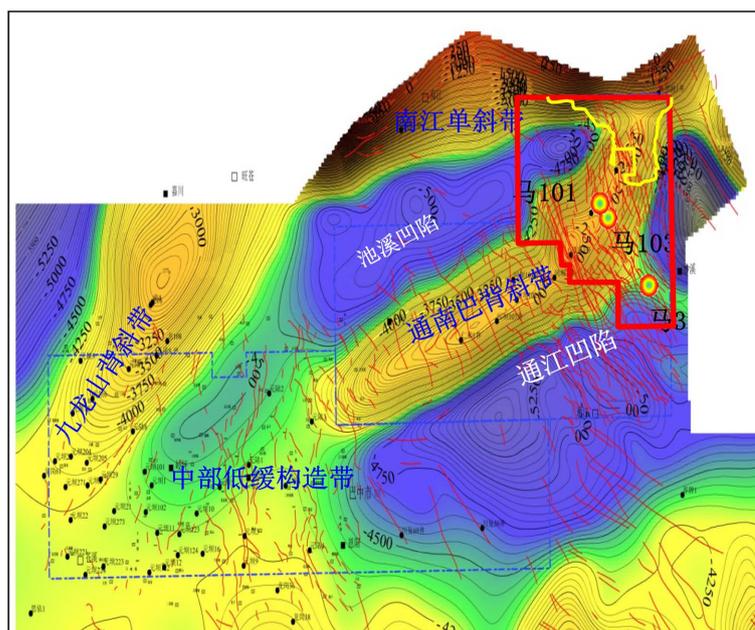


Figure 1. The location of the work area and the comprehensive columnar section of Xu2 member
图 1. 工区构造位置及须二段地层综合柱状剖面图

根据大量的岩心及野外露头观察,结合测井资料分析发现,须二段测井曲线形态多样,齿状漏斗型和漏斗型的滩坝,钟型和漏斗型的河道、河口坝,齿化箱型与钟型特征的分流河道(图 1 地层综合柱状剖面图),指示多种沉积相类型。确定研究区须二段主要发育两套储层,上段发育湖泊相,岩性主要以浅灰色细砂岩、灰色细砂岩为主,夹黑色煤,分布稳定,在地震轴上可以连续追踪,是工区区域性标志层;下段发育辫状河三角洲相,岩性主要以浅黑灰色中砂岩、灰色细砂岩和灰黑色页岩为主,夹砂泥岩薄互层及黑色碳质泥岩,与下伏须一段呈整合接触关系,具有分布范围广,沉积厚度大的特征,在马路背构造带及周边地区广泛发育。

2.2. 实验样品

本论文研究所用的岩心样品取自川东北地区马路背构造带已钻井须家河组须二段, 取样深度为 3345~3455 m, 厚度为 110 m, 共取样 30 件, 样品主要为灰色细砂岩、黑灰色中砂岩。实验开始前, 先将取心样品经研磨处理成粉末后, 采用 X 射线衍射仪对样品的矿物成分进行测定, 分析得出砂岩样品的全岩矿物成分组成图(图 2)。

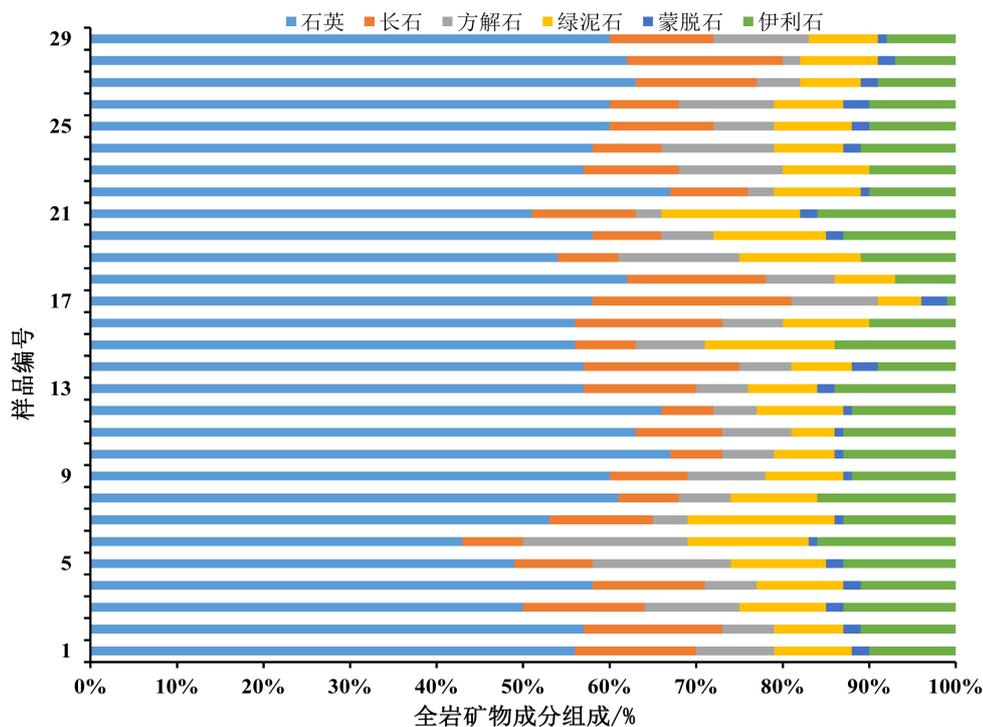


Figure 2. Mineral composition of sandstone samples from Xu2 member in northeast Sichuan
图 2. 川东北地区须二段砂岩样品矿物成分组成图

测试结果显示, 研究区目的层段储层的全岩矿物成分类型较为复杂, 样品中石英的含量相对较高, 主要在 43%~67% 之间, 平均为 57.89%; 其次为长石, 含量为 6%~29%, 平均为 11.6%。除此之外, 还有一定含量的方解石, 主要在 2%~19%, 平均为 8.17%。实验测得砂岩样品中黏土矿物主要包括绿泥石、蒙脱石和伊利石, 总含量为 9%~29%, 平均为 22.34%。其中伊利石发育稳定, 是全区陆源碎屑物质的主要来源[3]。测试结果表明, 研究区目的层段砂岩的全岩矿物成分分类较多, 类型复杂, 矿物成分非均质较强, 且砂岩样品中石英含量最高, 与致密砂岩储层的脆性具有直接关系, 除了对样品的孔隙结构和孔隙体积具有重要的影响, 还会对后期致密气勘探开发过程中的压裂造缝产生影响。黏土矿物作为砂岩样品矿物成分的重要组成部分, 对砂岩样品的孔隙结构类型和孔径大小都会产生影响, 因此测试砂岩样品成分组成为研究目的层段储层微观孔隙结构特征具有重要的意义。

3. 高压压汞孔隙结构特征

3.1. 高压压汞法实验原理

高压压汞法实验操作前将取心样品制成岩心柱后经过 24 h 真空烘干处理, 消除样品表面残留的束缚水和毛细管水分, 实验采用 Auto PoreIV9510 全自动压汞仪, 该仪器所能测量的孔径范围介于 2 nm~1000

μm ，提供的最高压力约为 414 MPa，实验测得进汞和退汞的体积精度小于 0.1 μL 。图 3 即为高压压汞实验下毛细管压力曲线形态在不同分选和歪度的特征：在最开始阶段，非润湿相流体饱和度随毛细管压力的快速增加而缓慢增加，此时的毛细管压力曲线斜率较大。当毛细管压力到了中间开始趋向缓平阶段，毛细管压力变化较小。孔喉半径主要对毛细管压力的增大而逐渐增大。到末端时，进汞饱和度随毛细管压力的迅速增而逐渐变小，且末端出现陡峭段。这种现象主要与地层中孔隙的结构类型有关，当地层中只有一小部分微孔未进入汞时，毛细管压力随微孔的大小而发生变化[4]。根据 Washburn 理论当毛管压力曲线在低毛管压力范围处，坡度越小且对应汞饱和度平缓段的范围越宽，孔喉大小分选性越好；歪度的粗细对应孔喉的粗细倾向。对储层而言，一般越偏向粗歪度越好。

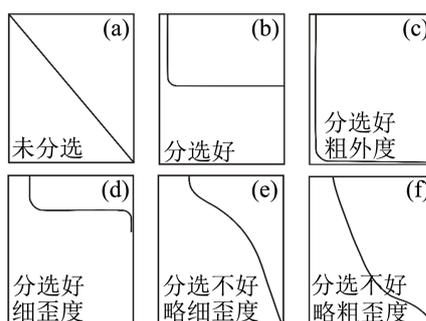


Figure 3. Schematic diagram of typical capillary pressure curve

图 3. 典型毛细管压力曲线示意图

3.2. 进汞 - 退汞曲线

图 4 为研究区砂岩样品在高压压汞实验基础上测得的进汞 - 退汞曲线，不同砂岩样品的进汞 - 退汞曲线形成的回滞曲线反映了须二段储层孔隙的发育特征及孔隙间连通性[5]。从进汞曲线可以看出，样品 1 进汞曲线前期斜率较高，平台性较差，反映了小孔的分选不好，略细歪度。进汞曲线后期斜率较缓，平台性较好，反映大孔的分选较好，细歪度好，说明页砂岩样品中存在细颈瓶孔隙，孔喉细小，连通性差，这种孔隙结构有利于气体的聚集，但不利于气体的运移。样品 2 压汞曲线孔隙滞后环宽大，进退汞体积差很大，表明压汞测试孔径范围内细颈瓶孔很多，微孔与中孔、大孔串联配置，孔喉相对较小，孔隙连通性一般。样品 3 进汞曲线表明在低压区时汞量增大明显，样品中存在孔径较大孔隙，其压汞曲线滞后环明显较窄，进退汞体积差较小，压汞测试孔径范围内开放孔较小，孔隙连通性相对较好。

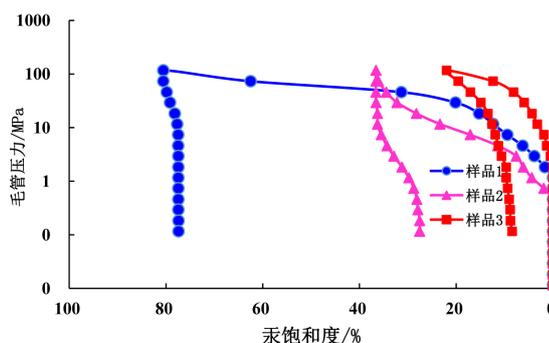


Figure 4. Mercury input-mercury withdrawal curve for the sample from the Malubei area in Xu2 member in northeast Sichuan

图 4. 川东北马路背地区须二段样品进汞 - 退汞曲线

3.3. 孔径分布特征

图 5 为基于高压压汞实验得到的致密砂岩介孔和宏孔表征分布曲线图(图 5)。从图中可以看出,致密砂岩储层孔喉表现为以介孔为主的单峰型,孔喉分布只有一个峰值,孔喉分布主要集中在 20~1000 μm 之间,表明砂岩样品的孔径分布范围广泛,粒径跨度范围广,从微孔到宏孔均有分布。实验结果呈现出明显的多尺度孔隙结构特征,单峰型致密砂岩孔喉分布范围差异较大,表明致密砂岩孔喉分布复杂,样品非均质性较强[6]。

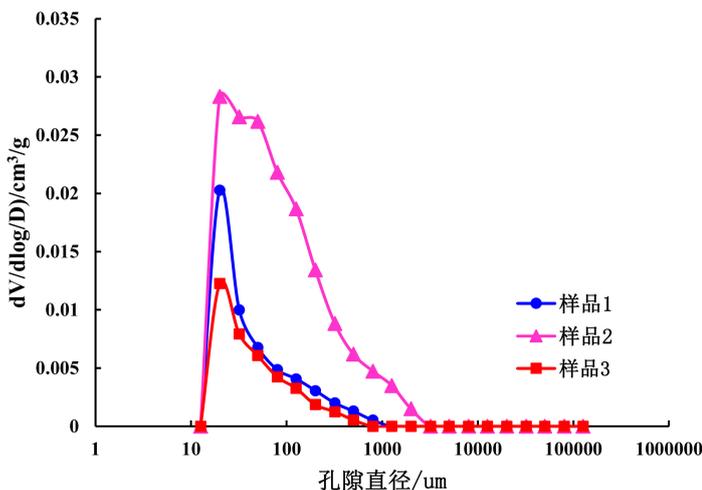


Figure 5. Aperture distribution histogram for the sample from the Malubei area in Xu2 member in northeast Sichuan

图 5. 川东北马路背地区须二段样品孔径分布直方图

表 1 为高压压汞实验测得的致密砂岩储层孔喉结构特征参数,测试结果显示样品的平均孔径分别为 0.08 μm 、0.307 μm 、0.55 μm ,最大进汞饱和度分别为 80.52%、36.6%、21.97%,排驱压力较小,分别为 1.5 MPa、0.5 Mpa、2 Mpa,退汞效率分别为 3.88%、24.76%、61.54%。实验结果显示样品 1 的进汞饱和度最高,但退汞效率最低,表明样品 1 小孔发育较少,大孔发育较多,但大孔的分选较差,孔喉连通性较差;样品 2 的进汞饱和度较少,退汞效率也少,表明样品 2 中的发育部分小孔,大孔基本不发育,孔隙连通性较差;样品 3 的进汞饱和度较低,但退汞效率最高,表明样品 3 中发育部分小孔,大孔基本不发育,但小孔分选较好,孔隙连通性相对较好[7]。

Table 1. Characteristic parameters of pore throat structure of dense sandstone reservoir

表1. 致密砂岩储层孔喉结构特征参数

编号	孔隙度	渗透率	平均孔径	退汞效率	最大进汞饱和度	排驱压力	孔喉类型
样品 1	1.66	0.001	0.08	3.88	80.52	1.5	单峰
样品 2	4	1.55	0.307	24.76	36.6	0.5	单峰
样品 3	4.44	0.003	0.55	61.54	21.97	2	单峰

4. 储层微观孔隙结构特征

4.1. 储层物性特征

为更好地反映须二段砂岩储层的特征,对目的层段的取心样品进行物性分析(图 6)。须家河组须二段

共有物性数 11 个, 多数分布在须二段上中亚段, 少数在下段[8]。从物性分析所得到的储层参数数据分析显示, 须二段孔隙度分布在 2.2%~6.8%之间, 平均为 3.81%; 渗透率介于 $0.002 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ~ $0.751 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 区间, 平均为 $0.117 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 岩心物性分析显示须二段孔隙度大于 4%的样品占样品总数的 55%, 渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品占样品总数的 82%, 渗透率最大为 $0.751 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 表明研究区须二段砂岩储层物性较好, 属于低孔、超低渗致密储层, 且发育大量裂缝。

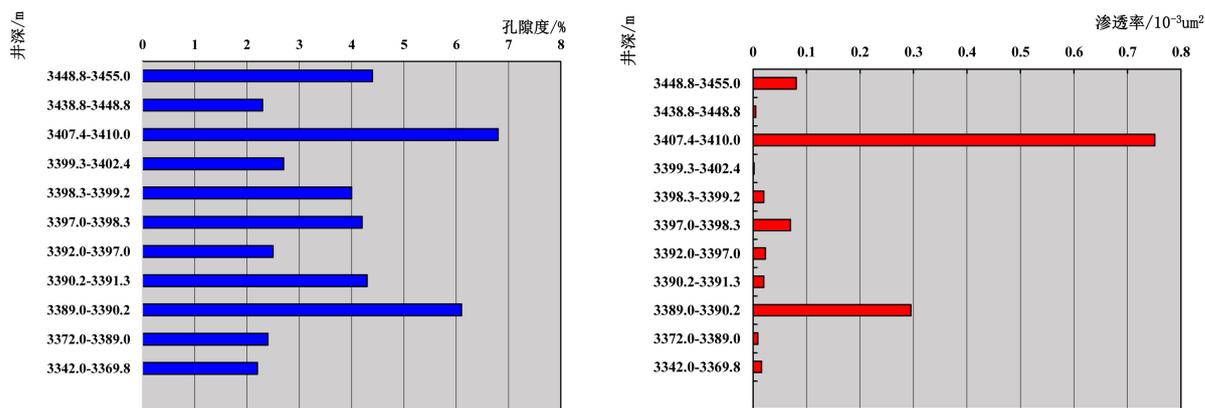


Figure 6. Measured histogram of porosity and permeability distribution in Xu2 member in northeast Sichuan Basin

图 6. 川东北地区须二段实测孔隙度、渗透率分布直方图

根据川东北地区陆相储集岩孔隙度和渗透率参数的分类标准(表 2), 能够形成有效气藏的有效孔隙度和渗透率值得下限分别为 2%和 $0.001 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 川东北马路背地区 11 个样品的物性资料分析表明, 研究区目的层段须二段砂岩储层是典型的低孔低渗超致密型储集层, 具备气成藏的形成条件[9]。

Table 2. Classification criteria for continental sandstone reservoirs in northeast Sichuan

表 2. 川东北地区陆相砂岩储集层分类标准

储集岩类型	I (好的储集岩)	II (较好的储集岩)	III (较差的储集岩)	IV (非储集岩)
孔隙度(%)	≥ 8	4~8	2~4	< 2
渗透率($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	≥ 1	0.1~1	0.02~0.1	< 0.02

4.2. 储集空间类型

四川盆地川东北地区须家河组储层空间类型具有多样性、复杂性特征, 通过对马路背构造带多口井岩心描述、薄片观察以及氩离子抛光扫描电镜观察分析。可将研究区砂岩储层储集空间类型原生孔、次生孔和裂缝三大类(表 3)。

马路背地区须二段砂岩储层中原生孔主要是指与沉积作用同时形成的孔隙[10]。根据形态特征可分为原生粒间孔和原生粒内孔。其中原生粒间孔为有效储集空间, 粒内孔由于孔隙半径较小, 为不含烃的无效孔隙, 对渗透率贡献极小。地层中原生孔隙的发育程度与岩石组分、结构和压实程度有关, 随着地层埋深增加, 压实作用不断增强, 原生孔隙也会随之下降。次生孔隙的分类较为复杂, 依据不同的成岩作用又可分为次生溶蚀孔、铸模孔和晶间孔。除原生孔隙和次生孔隙外, 裂缝也是砂岩储集层空间的一种重要孔隙类型, 研究区须二段砂岩储层主要发育构造成因裂缝。这类裂缝既可以改善储层的渗透能力, 又可以增大砂岩储集空间, 对改善致密砂岩储层的渗透性、提高单井产能具有重要的意义。

Table 3. Classification table of reservoir space types in Malubei structural belt of Xu2 member in northeast Sichuan
表 3. 川东北地区马路背构造带须二段储集空间类型划分表

孔隙类型	典型孔隙类型	形成机理	特征描述	孔隙形态	发育程度
原生孔	原生粒间孔	沉积作用	位于颗粒或晶体之间, 孔隙边缘棱角明显, 连通性差	孔隙形态差异较大, 呈不规则状	较少
	原生粒内孔		自生黏土矿物颗粒内, 多为无效孔隙, 对储层渗透率贡献极小	孔隙半径较小, 孔隙间连通性差	较少
次生孔	次生溶蚀孔	溶蚀作用	原生粒间孔经溶蚀扩大而成	形态多样、呈多角状、不规则状	发育
	铸模孔	溶蚀作用	长石等矿物或碎屑等被完全溶蚀后形成, 保留原来的孔隙形态	孔隙形态多样, 呈零星分布	较少
	晶间孔	重结晶作用	杂基内选择性溶解而成	呈斑状分布, 孔隙相对较小	发育
裂缝	构造裂缝	构造作用	构造应力变化引起的破裂, 呈高角度裂开	不规则状, 切割颗粒或沿颗粒边缘	发育

4.3. 储层微观孔隙形态特征

为进一步探讨致密砂岩储层微观孔隙结构特征, 采用氩离子抛光制作成薄片后在场发射扫描电镜下观察并结合岩心描述孔隙形态(图 7)。通过对工区取心样品观察发现, 川东北地区目的层段须二段石英砂岩整体上以细粒结构为主[11], 粒径主要为 0.1~0.25 之间, 分选较, 磨圆度较好, 为次圆状-圆状, 颗粒之间的接触方式主要为线接触[12]。其中在石英含量相对较高的砂岩储层中多存在石英次生加大, 主要表现为相互交嵌且加大边共轴生长, 在阴极发光下可看见不发光的石英加大(图 7(a))。图 7(b)和图 7(c)为扫描电镜下砂岩样品中矿物颗粒接触边缘形成的原生孔隙, 这类孔隙在砂岩储层中较为常见, 主要发育在长石岩屑砂岩或岩屑石英砂岩中, 孔隙形态多为三角状或多角状, 可与地层中的粒内孔链接, 提高砂岩储层孔隙间的连通性[13]。图 7(d)和图 7(e)为扫描电镜下砂岩样品中的次生孔, 其中次生溶蚀孔主要是在成岩作用过程中, 颗粒或充填物受到溶蚀作用而形成的孔隙(图 7(d)); 铸模孔主要是由于长石等矿物颗粒被完全溶蚀之后形成, 仍保留原来的孔隙形态, 这类孔隙较少; 晶间孔主要是在重结晶作用下, 杂基内选择性溶解而成, 这类孔隙孔径较小, 多呈斑点状分布(图 7(e))。

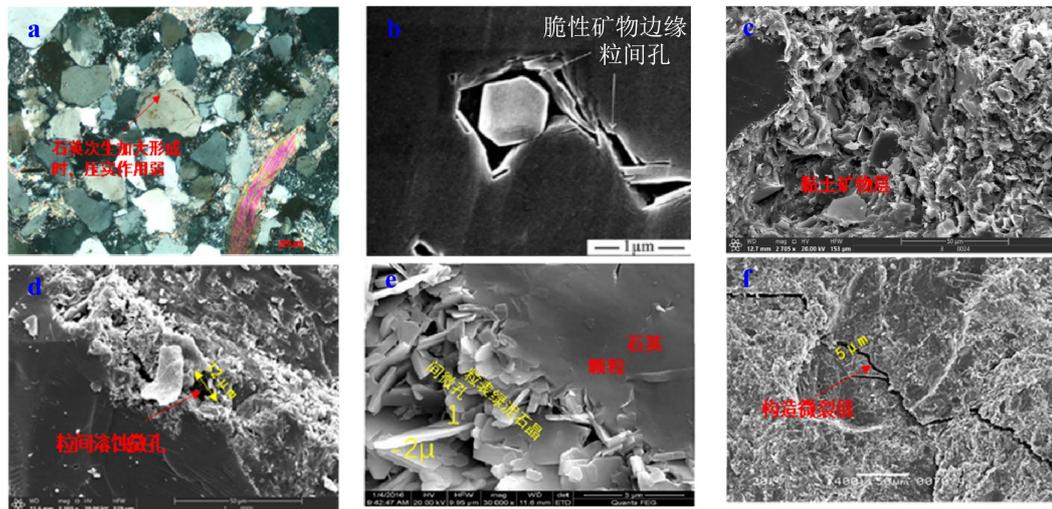


Figure 7. Pore morphology characteristics of Xu2 Formation in Malubei area in northeast Sichuan
图 7. 川东北马路背地区须二段孔隙形态特征

研究区所属的马路背构造所位于的川东北构造带, 表现为一个大型的由 NEE 转 NE 向的断鼻, 北翼相对较缓, 南翼相对较陡, 中间被大量北西向断裂平行切割, 发育大量的构造裂缝[14]。因此除原生孔隙和次生孔隙外, 裂缝也是研究区须家河组砂岩储层中最常见的孔喉形态(图 7(f))。从取心样品观察发现, 构造成因裂缝互相交织, 呈网状分布, 表现出低角度开启裂缝和高角度的褶皱张力裂缝等多种形态, 其中低角度缝多被泥质和方解石充填, 且从取心样品中肉眼可见泥质条带(图 8(a)), 而高角缝形成时间较晚, 大多未被充填(图 8(b))。部分取心样品表现出明显的网状缝, 这些裂缝多被石英、方解石等充填, 并发育晶间孔(图 8(c)~(e))。除此之外, 随埋深和构造作用的影响, 砂岩储层中的石英、高岭石和方解石由于热液作用, 会充填由断层引起的相关裂缝[15]。这些裂缝形态表明研究区目的层段致密砂岩储层中发育大量的裂缝, 研究与高压压汞实验测得的结果相似, 因此可以证实川东北马路背地区须二段为裂缝-孔隙型储层。对改善研究区目的层段砂岩储层性能, 提高单井产能具有重大意义[16]。

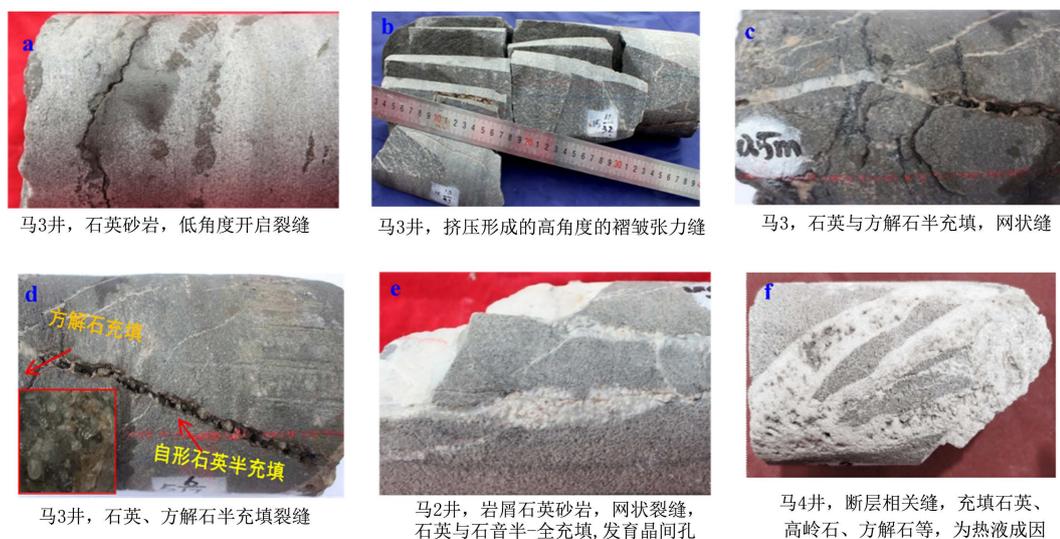


Figure 8. Fracture morphology characteristics of Xu2 Formation in Malubei area in northeast Sichuan
图 8. 川东北马路背地区须二段裂缝形态特征

5. 结论

1) 川东北地区马路背构造带砂岩样品测得孔隙度平均值为 3.81%，渗透率平均值为 $0.117 \times 100^{-3} \mu\text{m}^2$ ，属于低孔、超低渗储层，典型的低孔低渗超致密型储集层，具备气成藏的形成条件。

2) 高压压汞孔喉结构参数表明，川东北地区马路背构造带砂岩类型主要为细砂岩，发育大量的裂缝和次生孔隙，属于裂缝-孔隙型储层，储层质量较好。

3) 通过对取心样品观察发现，研究区整体上以细粒结构为主，构造成因裂缝呈网状分布；氩离子抛光扫描电镜显示，川东北地区须家河组储层空间类型具有多样性、复杂性特征，主要发育次生溶蚀孔、晶间孔和构造裂缝。

4) 采用在场发射扫描电镜下观察并结合岩心描述孔隙形态发现，川东北马路背地区须二段为裂缝-孔隙型储层。这对改善研究区目的层段砂岩储层性能，提高单井产能具有重大意义。

参考文献

- [1] 黄文明, 刘树根, 马文辛, 等. 川东南-鄂西渝东地区下古生界页岩气勘探前景[J]. 地质通报, 2011, 30(2): 364-371.
- [2] 陈尚斌, 朱炎铭, 王红岩, 等. 川南龙马溪组页岩气储层纳米孔隙结构特征及其成藏意义[J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 438-444.
- [3] 郭彤楼, 张汉荣. 四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 28-36.
- [4] 于炳松. 页岩气储层孔隙分类与表征[J]. 地学前缘, 2013, 20(4): 211-220.
- [5] 董大忠, 王玉满, 黄旭楠, 等. 中国页岩气地质特征、资源评价方法及关键参数[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(9): 1583-1601.
- [6] 冯国奇, 李吉君, 刘洁文, 等. 泌阳凹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.
- [7] 张金川, 姜生玲, 唐玄, 等. 我国页岩气富集类型及资源特点[J]. 天然气工业, 2009, 29(12): 1-6.
- [8] 赵红琴, 陈方文, 卢双舫, 等. 我国页岩气开采技术及前景展望[J]. 地球科学前沿, 2018, 8(7): 1215-1223.
<https://doi.org/10.12677/AG.2018.87132>
- [9] 李勃, 陈方文, 肖佃师, 等. 颗粒粒径对低温氮吸附实验的影响——以五峰组-龙马溪组海相含气页岩为例[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(2): 395-404.
- [10] 李传明, 薛海涛, 王民等. 脱气温度和样品粒径对致密砂岩低温氮气吸附实验结果的影响[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2019, 38(2): 308-316.
- [11] He, T.H., Li, W.H., Lu, S.F., Pan, W.Q., Ying, J.F., Zhu, P.F., Zhu, E.Q., Wang, X.Z., Zhang, B.S. and Sun, Q.Q. (2022) Mechanism and Geological Significance of Anomalous Negative $\delta^{13}\text{C}_{\text{kero}}_{\text{rogen}}$ in the Lower Cambrian, NW Tarim Basin, China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **208**, Article ID: 109384.
<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109384>
- [12] He, T.H., Lu, S.F., Li, W.H., et al. (2020) Paleoweathering, Hydrothermal Activity and Organic Matter Enrichment during the Formation of Earliest Cambrian Black Strata in the Northwest Tarim Basin, China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **189**, Article ID: 106987.
- [13] 何涛华, 李文浩, 谭昭昭, 等. 南襄盆地泌阳凹陷核桃园组页岩油富集机制[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(6): 1259-1269.
- [14] 陈方文, 赵红琴, 王淑萍, 等. 渤海湾盆地冀中坳陷饶阳凹陷沙一下亚段页岩油可动量评价[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 593-601.
- [15] 郭旭升, 李宇平, 刘若冰, 王庆波. 四川盆地焦石坝地区龙马溪组页岩微观孔隙结构特征及其控制因素[J]. 天然气工业, 2014, 34(6): 9-16.
- [16] 王顺玉, 戴鸿鸣, 王海清, 等. 四川盆地海相碳酸盐岩大型气田天然气地球化学特征与气源[J]. 天然气地球科学, 2010, 11(2): 10-17.