

吴兆徽,刘显太,杜玉山,等.碳酸盐岩微观测试技术对比与应用:以济阳坳陷乐安油田潜山为例.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(5):1519-1529. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230017.
Wu Zhaohui, Liu Xiantai, Du Yushan, et al. Comparison and Application of Carbonate Rock Microscopic Test Technologies: A Case of Buried Hill in Le'an Oilfield at Jiyang Depression. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54 (5): 1519 - 1529. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230017.

碳酸盐岩微观测试技术对比与应用 ——以济阳坳陷乐安油田潜山为例

吴兆徽¹, 刘显太², 杜玉山¹, 吴颖昊³

1. 胜利油田勘探开发研究院, 山东 东营 257000
2. 胜利油田分公司, 山东 东营 257000
3. 中国石油大学(华东)档案馆, 山东 青岛 266580

摘要: 微观测试结果能反映很多油藏信息。目前关于微孔缝的镜下测试技术不断丰富,但仍缺少对微孔缝最全面的微观分析。为了便于对比各类测试技术,以济阳坳陷乐安油田草桥潜山区域为典型代表实例,先采用不同的精细微观专项测试技术对孔缝储集空间特征进行分析,具体包括微溶孔电子探针成分分析、扫描电镜、薄片和阴极发光测试等技术,然后总结了通过各种不同的微观测试技术观察到的现象及规律。具体结果和得出认识如下:通过电子探针成分分析技术,能够分辨出灰岩微溶孔内诸如有机质、方解石、黄铁矿、白云石、石膏等成分;薄片内可见灰岩含油段砾间砾内孔洞发育,溶蚀孔洞边部有轻微方解石化;通过扫描电镜分析,能够分辨出代表区块的白云岩结晶孔比灰岩溶蚀孔大两个以上数量级,能通过晶间孔或溶蚀孔推断岩石的脆性以及是否易于压裂;通过岩样阴极发光测试,能够区分出共有几期成分不同的孔洞充填物;通过扫描电镜和压汞都可以得到孔喉大小,比较两项技术,扫描电镜得到的是局部纳米级的孔喉直径,而压汞测试得到的是单块样品微米级孔喉半径。从应用对象来看,前者适合对应到矿物的孔喉,后者更适合开发区块的孔喉对比研究。

关键词: 碳酸盐岩;微溶孔;电子探针;扫描电镜;阴极发光;薄片;乐安油田

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20230017

中图分类号:P618.13

文献标志码:A

Comparison and Application of Carbonate Rock Microscopic Test Technologies: A Case of Buried Hill in Le'an Oilfield at Jiyang Depression

Wu Zhaohui¹, Liu Xiantai², Du Yushan¹, Wu Yinghao³

1. Exploration and Development Research Institute of Shengli Oilfield, Dongying 257000, Shandong, China
2. Shengli Oilfield Branch Company, Dongying 257000, Shandong, China
3. Archives, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong, China

Abstract: The microscopic test results can reflect abundant oil reservoir information. Currently,

收稿日期:2023-02-26

作者简介:吴兆徽(1985—),男,副研究员,主要从事油藏地质方面的研究,E-mail:a668866886688@vip.qq.com

基金项目:中国博士后科学基金面上资助项目(2020M672130);胜利油田博士后课题(YKB2002)

Supported by the National Postdoctoral General Funding Project (2020M672130) and the Postdoctoral Project of Shengli Oilfield (YKB2002)

there is a growing number of microscopic testing technologies for micro-pores and fractures, but there is still a lack of the understanding of micropores. In order to compare various test techniques, Caoqiao buried hill of Le'an oilfield in Jiyang depression is taken as a typical study case, different fine microscopic specialized test techniques are used to analyze the characteristics of pore and fracture storage spaces, including the composition analysis of micro dissolved hole electron probe, scanning electron microscope, thin slice, and cathodic-luminescence tests. The microscopic characteristics and statistical laws of micro dissolution pores are specifically described. There are some new findings: organic matter, calcite, pyrite, dolomite, gypsum, and other components are found in the electron probe composition of micro dissolution pores of limestone. In thin sections, pores can be found between and inside gravels in limestone oil layers, and there is some calcite at the edges of dissolution pores. The dolomite is mainly composed of inter-granular pores. Through scanning electron microscopy (SEM) analysis, it is found that the crystalline pores of dolomite representing the block are two or more orders of magnitude larger than the dissolution pores of limestone. The brittleness of the rock and whether it is easy to fracture can be inferred through inter-granular pores or dissolution pores; By conducting cathodo-luminescence tests on rock samples, it is possible to distinguish several stages of pore filling materials, which are different in composition. Both SEM and mercury intrusion porosimetry can measure pore-throat sizes. Comparing the two techniques, SEM can measure local nanoscale pore-throat diameter, while mercury intrusion porosimetry can measure the micrometer scale pore-throat radius of a rock sample. From the perspective of application objects, the former is suitable for the pores and throats of minerals, while the latter is more suitable for the comparative research of pores and throats in oil exploitation blocks.

Key words: carbonate rock; micro-dissolved pore; electron probe; SEM; cathodic-luminescence; thin slice; Le'an oilfield

0 引言

溶蚀孔洞是潜山油气藏的重要储集空间,国内目前对潜山溶蚀孔洞的研究还不系统全面,尤其是缺乏对于非常规致密储层溶蚀孔洞的显微镜下专项分析^[1-5]。目前微观测试技术除了普通、铸体、荧光和包裹体薄片,还有电子探针成分分析、阴极发光等较新技术。其中:电子探针是通过检测微观局部点的元素质量分数,进而判断矿物和流体成分的新技术^[6],其能够判断出具体点位是否存在方解石、黄铁矿、盐水、白云石^[7]、石膏和有机质等成分^[8];阴极发光则通过对矿物表面电子束轰击产生发光物质^[9],如根据方解石是否发光、成分是否存在差异,区分出多期暗晶方解石和亮晶方解石^[10],或根据切割充填关系,判断出孔缝充填的期次^[11];普通薄片可以观察到溶孔或胶结现象^[12];铸体薄片主要是通过向岩石孔隙内充填有色胶,使孔隙更醒目^[13],从而研究孔隙的体积分数、类型及分布^[14],分析非常规油藏的烃源岩^[15]或储层孔隙发育特征^[16];盐水包裹体薄片的均一温度可用于判断潜山的古岩溶形成期次^[17-18],油水包裹体均一温度可用于判断成藏期

次^[19];荧光薄片内,荧光颜色和强度可用于推断有机质的组成和丰度^[20]。

从国内外诸多碳酸盐岩油藏的研究实例上看,将微观实验测试结果与宏观孔隙情况对比,能够得到不少新认识。例如:采用恒速压汞孔喉参数统计和CT孔隙分析的方法,能得出中东某低渗孔隙型储层“孔隙大数量少、喉道多类型全”的特征,剩余油主要赋存在粗孔和巨孔内^[21];通过岩心薄片鉴定、包体测温等方法,可将奥陶系储集空间分为孔隙型和裂缝型两类,其中多期次半充填缝是最主要储集空间,半充填溶洞是有效油气运移和储集空间^[22];对比研究镜下的白云岩化现象及常规实验,则能发现国外一些碳酸盐岩油藏不符合孔隙度-埋深变化情况的原因^[23];对比黄骅拗陷大区域镜下溶蚀情况,可知下古生界残丘山储层内以孔洞为主,间断侵蚀断块山同时存在大气淡水溶孔和高温热液结晶孔^[24];通过镜下和泥质含量资料对比来看,渤海西南海域泥质较重的寒武系内也能发育以溶蚀孔隙为主的内幕型岩溶储层^[25];通过多种镜下资料^[26]对比可知,苏里格气田马家沟组“膏模”孔主要发育于泥粉晶白云岩中,可见未充填一半充填型、全充填型

两类,“膏模”孔充填残余孔、渗流粉砂间微孔、基岩晶间溶蚀微孔3类空间。通过在全直径岩心图像增强算法,可以重构全直径缝洞型碳酸盐岩岩心三维孔隙空间,从而解决缝洞型碳酸盐岩强非均质性及难以表征真实岩心孔洞缝结构特征的问题^[27]。

济阳拗陷乐安油田草桥潜山对于微孔缝的各种测试已不断丰富,因而对微孔缝进行了最全面的微观测试分析,其中包括致密灰岩微溶孔的电子探针成分分析等特殊测试,描述了微溶孔的特征并统计其规律。通过各种微观测试技术对比,明确了各种微观测试技术方法的作用。

1 微溶孔化学成分电子探针鉴定

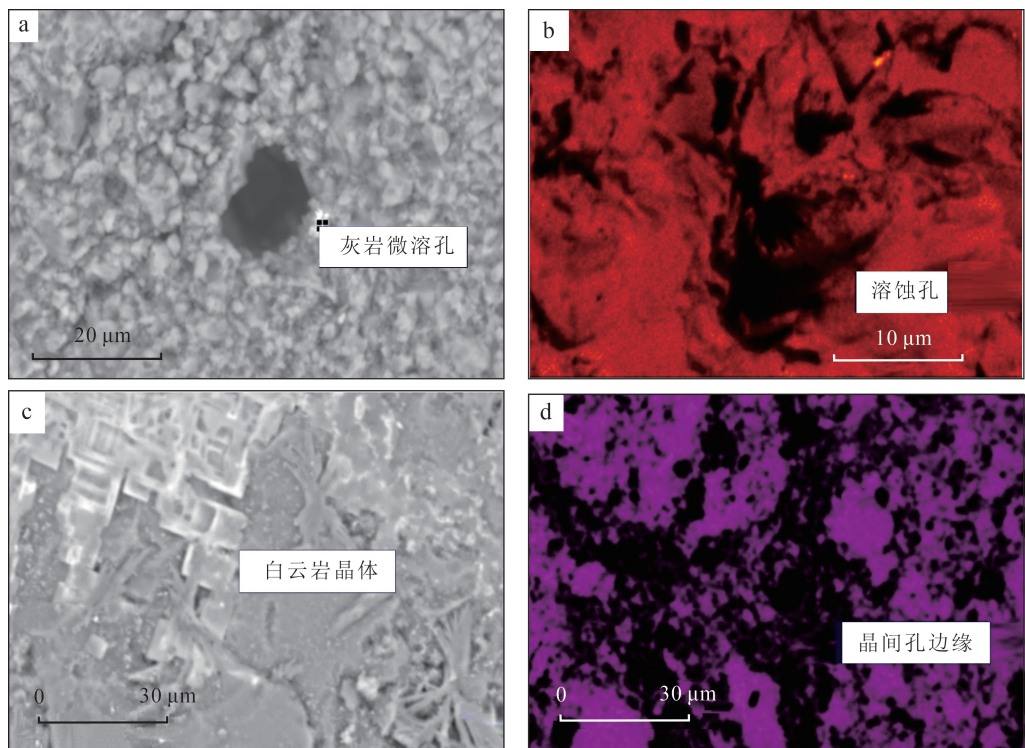
此次对草古100井主力层中奥陶统马家沟组(O₂m)灰岩微溶孔、白云岩晶间孔成分进行测试分析,得到油藏上部(图1a、b)和油藏下部(图1c、d)微溶孔和晶间孔的电子探针照片。

通过分析油藏上部、下部的主元素成分分析结果可知:在油藏上部的灰岩溶蚀孔内,低倍电子探针测试鉴定存在有机质、白云石、石英等成分(图2a)。

油藏下部晶间孔的石盐和石膏质量分数高(图2b)。石膏与准同生白云石化作用有关,在图像上可见明显的结晶成分。从形成环境来看,由于古气候相对干旱,蒸发作用较强,使得平面上局部含有湖相碳酸盐矿物和石膏、石盐的地层。

在碳酸盐岩潜山样品的溶蚀孔洞附近,光谱图检测出石英(SiO₂)这种碎屑岩的常见成分,是过去未预料到的。进一步分析认为,潜山顶深度是663.0 m,因此667.8 m井深的样品取自于潜山最顶部;推测是由于潜山顶之上的泥岩盖层中有石英(SiO₂)成分,混入了之下的灰岩潜山储层,从而出现碳酸盐岩混入少量石英碎屑的情况。这在后面的扫描电镜中也得到了进一步证实。

此次还对微溶孔进行了高倍和低倍补充测试。通过对局部点元素光谱及化学成分鉴定,鉴定出方解石和黄铁矿(图3)。方解石是根据电子探针检测结果Ca、C、O元素质量分数约等于CaCO₃质量分数鉴定出的。在热液矿床中,黄铁矿与其他氧化物、硫化物共生;在沉积岩中,黄铁矿常呈团块、结核或透镜体产出,其是油藏储层孔缝内的常见成分。



a. 潜山油藏上部微溶孔;b. 硅特征谱线K α 1波长谱图中溶蚀孔图像,即该谱图是硅元素电子跃迁所产生的K α 1辐射;c. 潜山油藏下部白云岩晶体;d. 钙特征谱线K α 1波长谱图中晶间孔边缘的孔隙图像,即该谱图是钙元素电子跃迁所产生的K α 1辐射,黑色为孔隙,紫色基本对应各种不同形态的钙质结晶物。

图1 乐安油田草古100井微孔电子探针图像

Fig.1 Micro-pore electron probe image of Well CG100 in Le'an oilfield

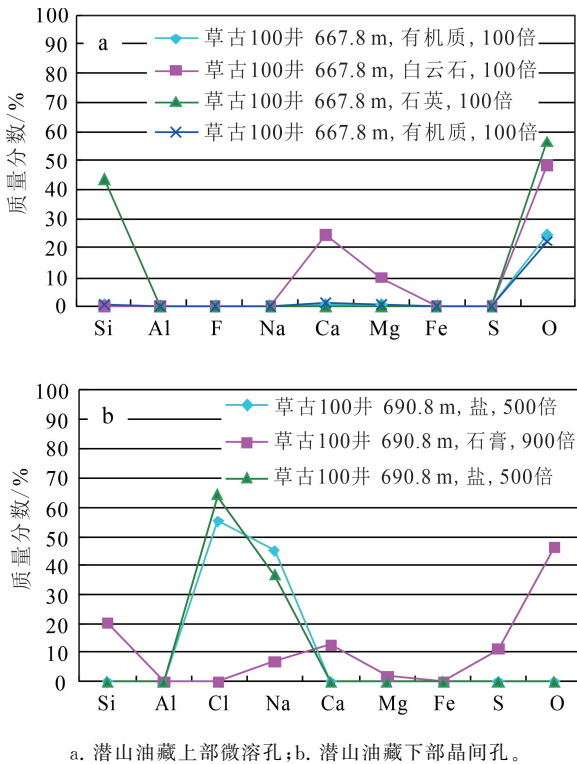


图 2 乐安油田草古 100 井 O_2m 微溶孔和晶间孔低倍电子探针主成分分析结果
 Fig.2 Composition analysis of O_2m micro-dissolved pores and intercrystalline pores under electron probe of Well CG100 in Le'an oilfield

结合前面的分析结果可知,黄铁矿、氧化物、硫化物、石英共生,这与热液矿床的常见共存矿物一致。这也说明了该潜山油藏是热液岩溶、大气淡水岩溶共存的部位。

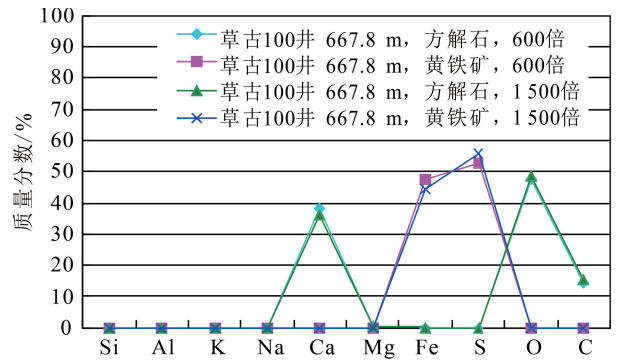
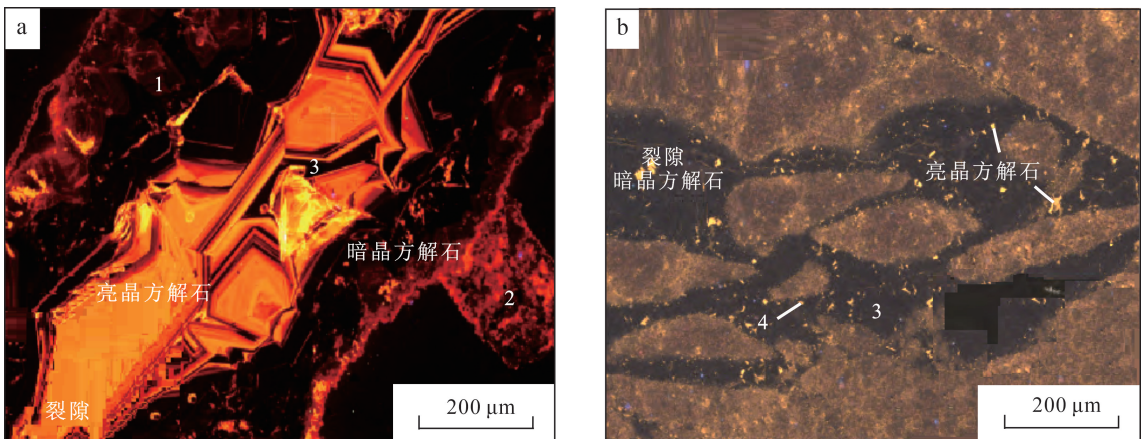


图 3 乐安油田草古 100 井 O_2m 微溶孔高倍和低倍对比补充测试
 Fig.3 High and low magnification comparison test of O_2m dissolved micro-pore of Well CG100 in Le'an oilfield

2 微孔缝阴极发光特征及充填物期次

孔缝填充物存在镜下切割、充填的先后关系,可将缝洞内方解石填充物分为 4 期。根据构造背景,结合镜下胶结物情况来看,主要是加里东时期的岩溶作用改造了致密地层,后期胶结充填;之后印支期、燕山期上古生界剥蚀,下古生界遭受岩溶作用,是继承性岩溶。

从阴极发光测试结果(图 4)可知:草古 113 井 870.4 m 深的岩样内,第 1 期被第 2 期切割,孔隙进一步填充第 3 期方解石(图 4a);705.3 m 岩样内的第 2 期方解石裂隙内,填充了第 3、第 4 期方解石;694.8 m 岩样内,微孔内第 3 期暗晶方解石内散布着第 4 期亮晶方解石(图 4b)。



a. 裂缝内第 3 期方解石充填物;b. 微孔内第 3 期暗晶方解石内散布第 4 期亮晶。1、2、3、4 代表期次。

图 4 安乐油田草古 100 井四期孔缝充填物镜下阴极发光照片

Fig.4 Cathodo-luminescence photos of 4 phased pore-fracture fillings of Well CG100 in Le'an oilfield

3 传统微孔薄片与电镜溶孔

3.1 镜下微观溶孔

从相应反映岩溶情况的普通和铸体薄片的微观特征来看,灰岩含油段角砾的砾间、砾内孔洞发育(图 5a)。均一的灰岩基质内存在溶蚀孔洞,在溶蚀孔洞边部有轻微方解石化(图 5b);含油白云岩的储集空间以晶间孔为主,但基质内也可以见到个别溶蚀孔洞,对应油斑灰岩储层。这类溶蚀孔洞由于数量多,在镜下很常见,可作为较好的储集空间。

3.2 扫描电镜内溶孔

3.2.1 电镜下的溶孔

此次通过对油浸样品采样,可以见到灰岩表面被溶蚀(图 6a),放大后在方解石边部可以见到被溶蚀的边缘(图 6b)。可见大量白云石结晶颗粒(图 6c),白云石内含高岭石,储集空间以晶间孔为主(图 6d),也存在一定程度的溶蚀。总体上,方解石溶蚀孔直径和白云石晶间孔直径相差多个数量级,灰岩更易溶蚀,是更好的储层。

在扫描电镜下发现了碳酸盐岩潜山样品微溶孔附近的石英成分(图 7a),石英边缘还存在溶蚀现象(图 7b)。石英在碳酸盐岩中罕见,而在研究区是存在的,由于潜山之上的砂泥岩中存在石英,这与前面电子探针谱图检测出 SiO_2 成分能相互印证。考虑到采样位置在潜山最顶部,推测这是由于混入上覆地层石英碎屑所产生的现象。

3.2.2 面孔率

将孔隙的 2D 扫描电镜图像转化为 3D 信息,可

以通过几何理论与 Matlab 程序来实现参数统计。

首先把草古 100 井图 6c 的 SEM 扫描电镜转化成灰度图像(图 8a),所有像素点有对应的灰度数据。灰度数值更大时图像会更白、更接近矿物颗粒,灰度数值越小则图像更暗、更接近孔隙。

然后用二值化算法,提取孔隙结构信息:

$$g(i, j) = \begin{cases} 1, & f(i, j) > W; \\ 0, & f(i, j) \leq W. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $g(i, j)$ 为二值化以后的灰度值; $f(i, j)$ 为像素点 (i, j) 的初始灰度值; W 为阈值。 $f(i, j) > W$ 时灰度取 1, $f(i, j) \leq W$ 时取 0, 从而得到草古 100 井 O_2m 样品的二值化图像(图 8b)。

孔隙图像大小可由像素点数量(即黑色点数量)来确定,通过编程对孔隙像素点个数进行统计,得到不同大小孔隙及对应的面孔率。占 i 个像素孔隙的面孔率 P_i 计算公式为

$$P_i = \frac{iN_i}{N} \times 100\%, \quad 1 \leq i \leq k. \quad (2)$$

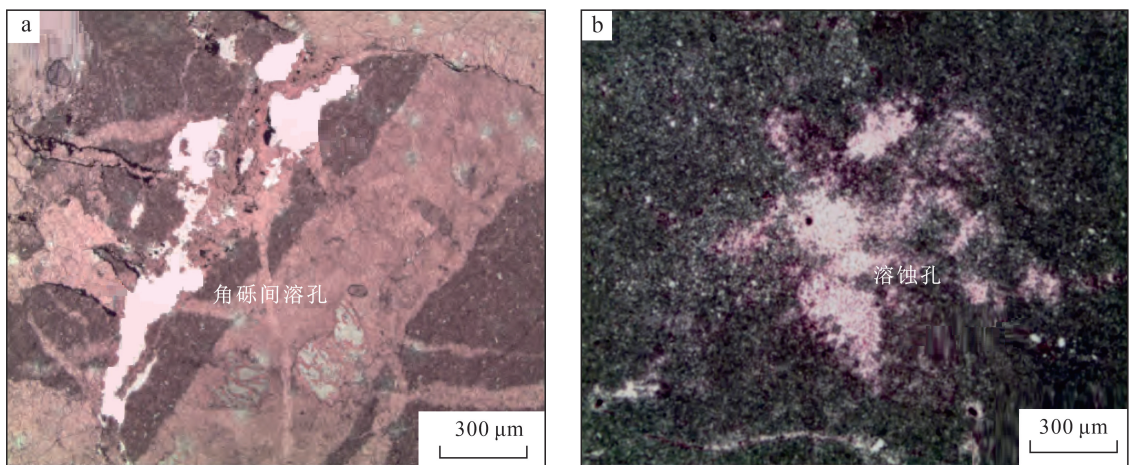
式中: i 为孔隙所占点数; k 为最大的孔隙所占点数; N_i 为孔隙数; N 为像素数。

用该方式在样品上拍摄电镜图像,各图像随机选 10 个部位得 60 组数据。统计不同大小孔隙面孔率的平均值,间隔采样拟合,得到面孔率曲线如图 9 所示。

3.2.3 定量表征孔隙结构

将上面研究区的面孔率函数 $P_i(i)$ 代入阿贝尔积分方程:

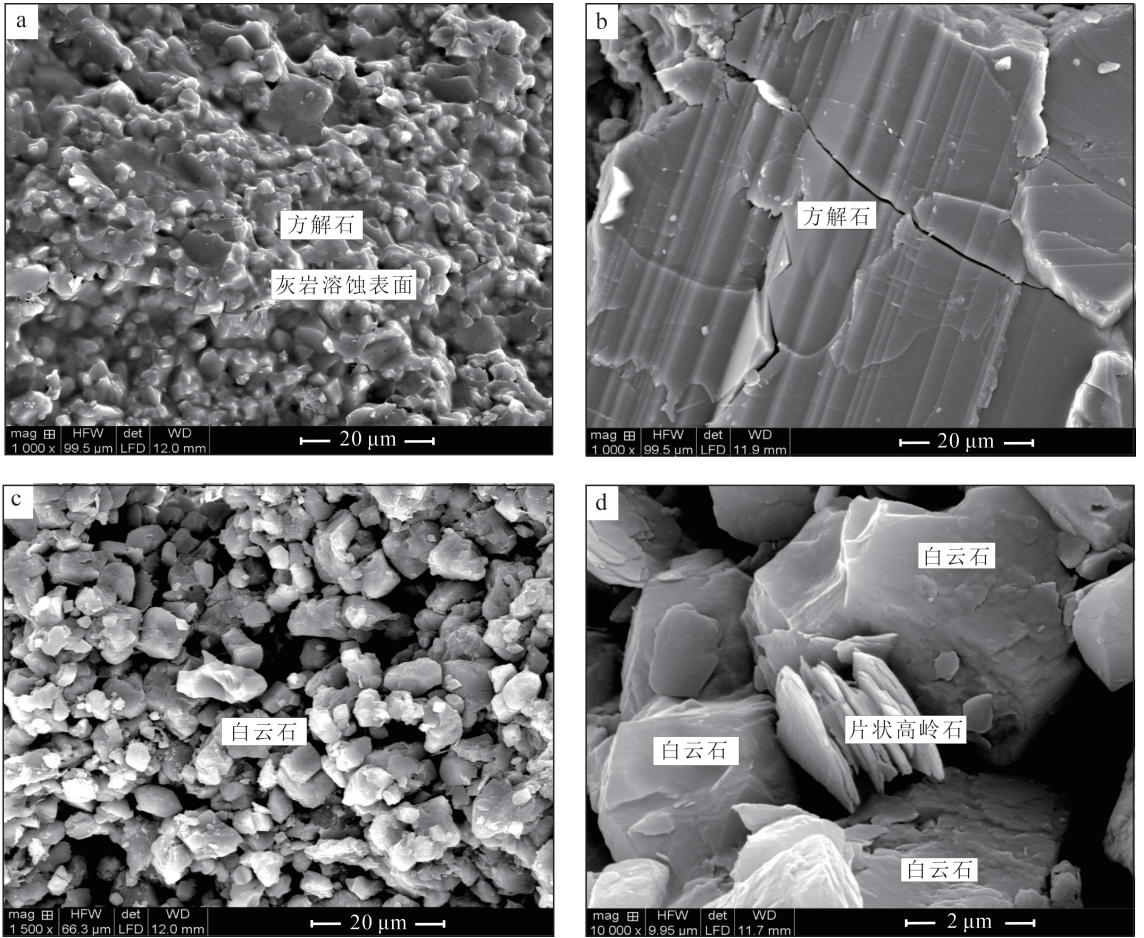
$$H(\lambda) = 2\pi\lambda \int_{\pi\lambda}^{+\infty} \frac{h'(\sigma)}{\sqrt{\sigma - \pi\lambda^2}} d\sigma. \quad (3)$$



a. 角砾间溶孔,草古 100 井,692.6 m,距顶 29.6 m, O_2m ; b. 基质内溶蚀孔隙,草古 124 井,590.6 m,距顶 5.7 m, O_2m 。

图 5 传统普通和传统铸体薄片内的微溶孔

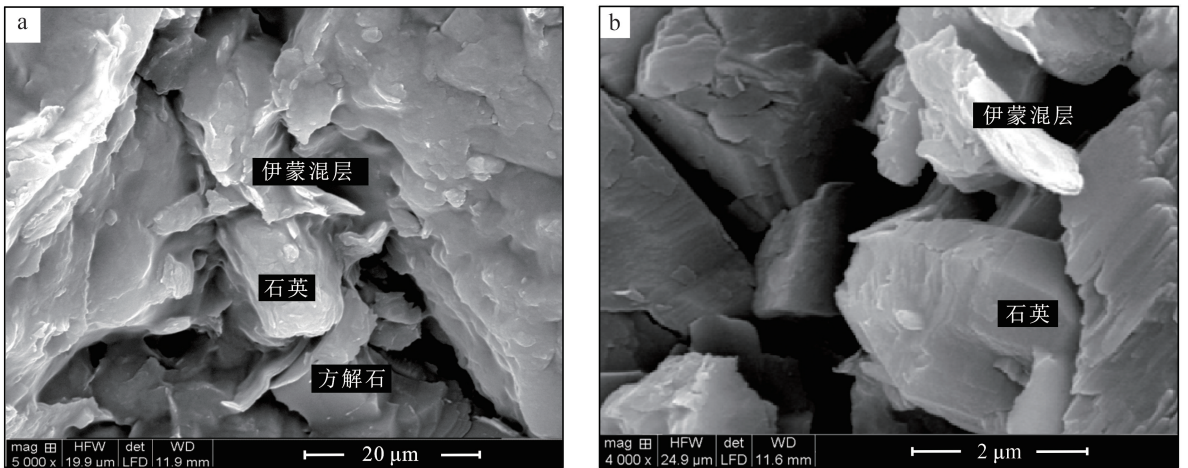
Fig.5 Slightly dissolved micro-pores in traditional ordinary slices and cast thin slices



a. 草古 100 井, 668.6 m, O_2m 油浸灰岩溶蚀; b. 草古 100 井, 668.6 m, 放大后的灰岩边缘溶蚀现象及晶内缝; c. 草古 100 井, 676.9 m, O_2m 含油白云岩, 结晶白云石; d. 草古 100 井, 676.9 m, 放大后的白云石及内含高岭石, 储集空间以晶间孔为主。

图 6 乐安油田草古 100 井扫描电镜下灰岩、白云岩及储集空间

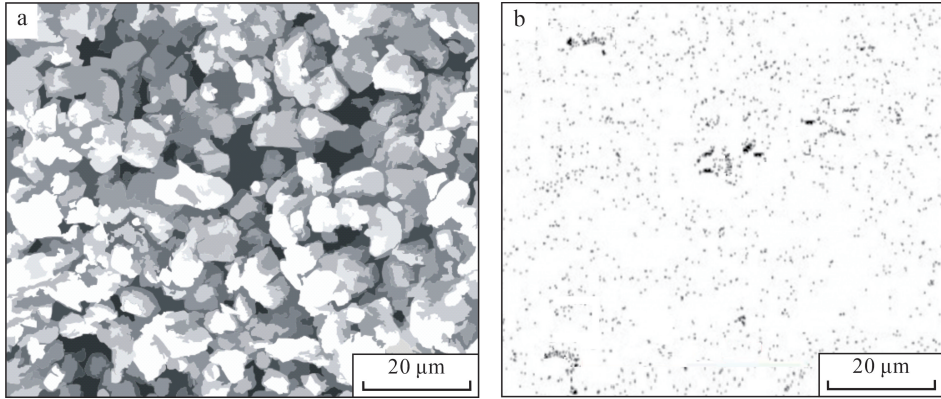
Fig.6 Limestone, dolomite and reservoir space of Well CG100 in Le'an oilfield under SEM



a. 草古 100 井溶孔附近的石英; b. 草古 100 井石英边缘溶蚀现象。

图 7 乐安油田潜山顶部草古 100 井溶孔边缘石英

Fig.7 Quartz at dissolution hole edge in Well CG100 in Le'an oilfield at the top of buried hill



黑色点代表孔隙,白色代表颗粒。

图 8 草古 100 井样品 SEM 的灰度图像(a)与二值化算法图像(b)

Fig.8 SEM grayscale image (a) and binary algorithm image (b) of a Well CG100 sample

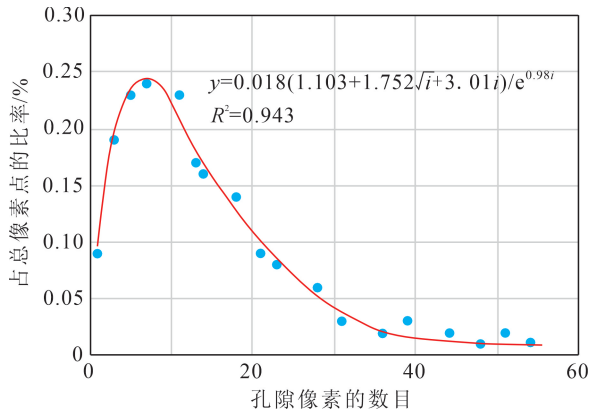


图 9 乐安油田草古 100 井样品面孔率分布曲线

Fig.9 Distribution curve of face rate of Well CG100 samples in Le'an oilfield

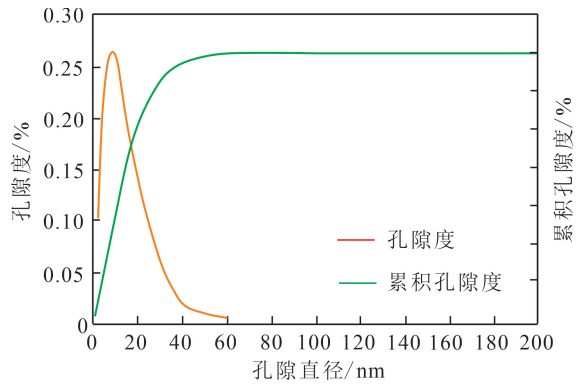


图 10 乐安油田草古 100 井孔隙度-孔隙直径关系曲线

Fig.10 Porosity and pore diameter relationship curve of Well CG100 in Le'an oilfield

致密灰岩储层孔隙度随孔径大小变化的表达式为

$$H(\lambda) = 0.0732\lambda e^{-0.98\lambda} \quad (4)$$

式中: $H(\lambda)$ 为累积孔隙度; λ 为孔隙度直径; $h'(\sigma)$ 为切面的面孔率导函数; σ 为孔隙面积。

进而由 $H(\lambda)$ 表达式得到孔隙度直径与累积孔隙度关系曲线(图 10)。可见孔隙度曲线呈正态分布,孔径主体在 5~40 nm 之间,峰值为 15 nm。从孔隙度累积曲线上看,孔径<40 nm 前的孔隙度变化较陡,孔径>40 nm 后的孔隙度变化幅度大幅减缓。

按国际标准可将孔隙分为大、中、微孔^[28]。通过式(3)求得 3 种不同孔隙的孔隙度贡献、占总孔隙比例和总孔隙度(表 1),结合镜下资料可知,乐安油田草古 1 潜山 O_2m 的岩样普遍发育微孔和中孔,大孔较少,中孔是孔隙的主体,孔隙分布较集中。

表 1 乐安油田草古 1 潜山储层不同孔隙与对总孔隙度贡献

Table 1 Different pores and their contribution to total porosity of reservoir in CG1 buried hill at Le'an oilfield

孔隙大小	孔径/nm	对总孔隙度贡献/%	占总孔隙度比例/%	总孔隙度/%
微孔	<2	0.16	2.8	
中孔	2~50	6.59	95.7	7.35
大孔	>50	0.56	1.5	

3.3 电镜孔喉大小与压汞孔喉大小对比

通过扫描电镜和压汞都能得到孔喉大小,可以对孔喉进行更宏观和深入的统计分析。对两者进行比较后认为,扫描电镜测的是局部纳米级孔喉,而压

汞测的是单块样品的微米级孔喉,两者都是测试孔喉的大小。压汞测试的结果可以用来分析扫描电镜观察研究结果的准确性。从应用对象来看,前者适合对不同的矿物进行研究,后者更适合研究具体工区的情况。

3.3.1 扫描电镜孔喉直径

通过扫描电镜孔喉测试比较白云岩和灰岩镜下孔隙大小可知,白云岩晶间孔大小为 0.5~200.0 μm ,而灰岩晶间孔大小为 0.3~15.0 μm 。虽然灰岩的晶间孔远小于白云岩的晶间孔,但灰岩的储集空间主要依赖于溶蚀孔,溶蚀孔的大小可达到数米,因此,此次研究的重点储集空间是灰岩的溶蚀孔洞缝。

此次还首次采用扫描电镜资料对草古 100 井孔喉直径进行分析,发现灰岩基质岩样的孔喉直径 50~100、100~150 nm 范围分别对应于孔隙度 45%、25%以上(图 11),即 50~150 nm 的孔喉直径是储集和驱替的主力范围。

3.3.2 压汞孔喉半径

由于碳酸盐岩不呈颗粒状,与砂砾岩储层相比,胜利油区碳酸盐岩潜山极少开展压汞曲线实验,例如坳陷南部的草桥广饶潜山带和北部的 CB30 潜山

都极少开展压汞测试。该处展示的是仅有的压汞实验结果。草古 105 井压汞曲线、孔喉半径测试结果反映了大孔少微孔多,含油性越好,退汞饱和度越高(图 12)。草古 105 井富含稠油灰岩润湿性呈亲水性。

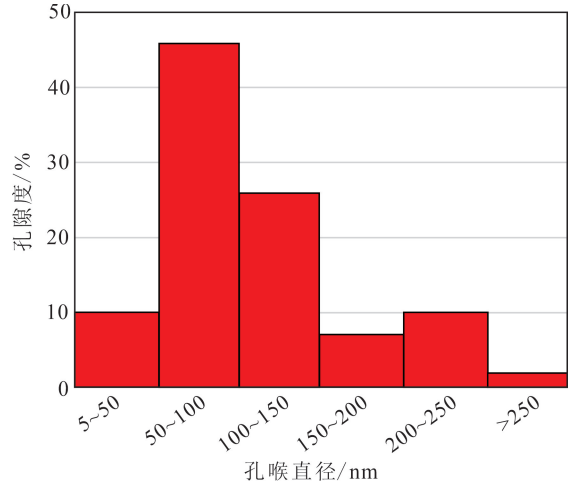
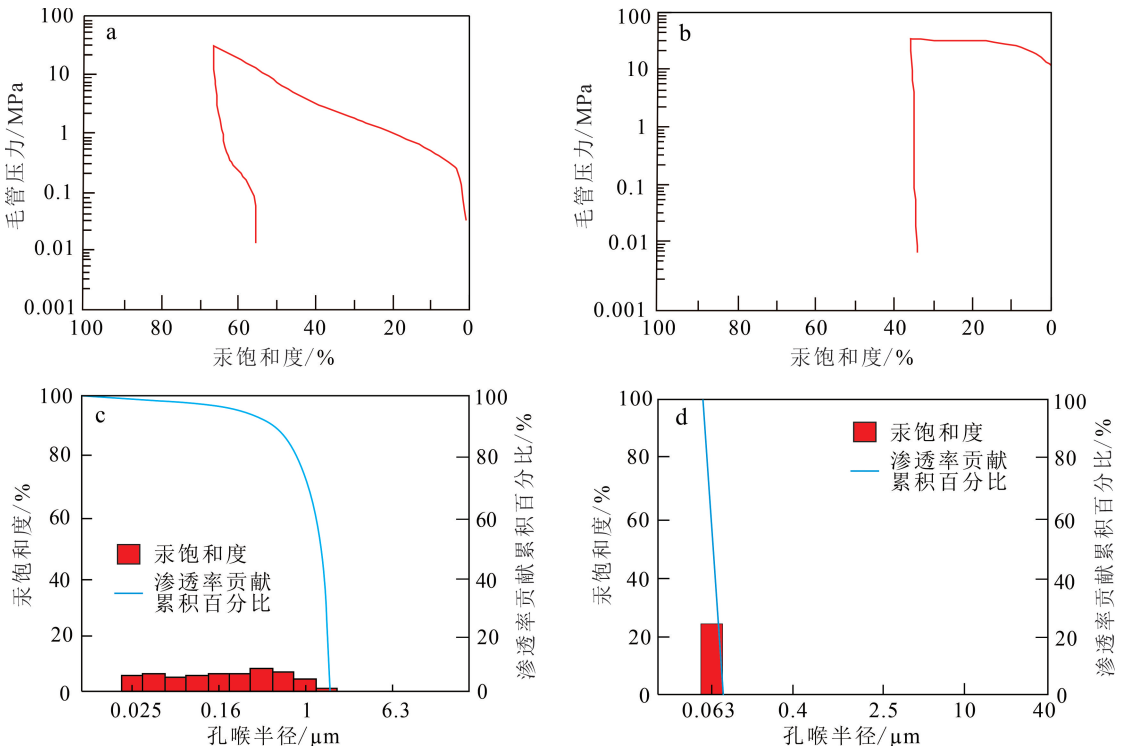


图 11 草古 100 井致密灰岩扫描电镜孔喉直径的最新测试结果

Fig.11 Latest test result of pore throat sizes of compact limestone in Well CG100 under SEM



a. 22 号样,740.7 m,富含稠油灰岩毛管压力曲线;b. 27 号样,742.0 m,油斑灰岩毛管压力曲线;c. 22 号样,740.7 m,富含稠油灰岩孔喉半径频率直方图及渗透率贡献累积曲线;d. 27 号样,742.0 m,油斑灰岩孔喉半径频率直方图及渗透率贡献累积曲线。

图 12 乐安油田草古 105 井岩样压汞曲线和孔喉半径

Fig.12 Mercury injection curve and pore throat radius of Well CG105 samples in Le'an oilfield

4 结论

1)此次从微观镜下角度,对乐安油田潜山同一区域的溶蚀孔洞采用了不同的新型镜下测试技术,包括微溶孔电子探针成分分析、扫描电镜、薄片及阴极发光等,主要有以下4点发现:灰岩微溶孔的电子探针成分中发现有机质、方解石、黄铁矿、白云石、石英、石膏等;白云岩的结晶孔比灰岩溶蚀孔大多个数量级,使得白云岩脆性大更易碎;通过残丘山岩样阴极发光测试,发现4期成分不同的孔洞充填物; O_2m 灰岩溶蚀程度更大,白云岩弱溶蚀,依赖于较大晶间孔储集油气。

2)乐安油田草桥潜山岩样采用的各类微孔隙测试技术比较而言,电子探针成分分析是最准确的确定微溶孔化学成分的测试技术;相比以往包裹体测试技术,新的微孔缝充填物阴极发光测试是分辨率更高的、区分充填物期次的测试技术。

3)通过扫描电镜和压汞都可以得到孔喉大小,比较两项技术,扫描电镜得到的是局部纳米级的孔喉直径,而压汞测试得到的是单块样品微米级孔喉半径。从应用对象来看,前者适合对应到矿物的孔喉,后者更适合开发区块的孔喉对比研究。

参考文献(References):

- [1] 黄芸,杨德相,李玉帮,等.冀中拗陷杨税务奥陶系深潜山储层特征及主控因素[J].岩性油气藏,2021,33(2):70-80.
Huang Yun, Yang Dexiang, Li Yubang, et al. Reservoir Characteristics and Main Controlling Factors of Ordovician Yangshuiwu Deep Buried Hill in Jizhong Depression[J]. Lithologic Reservoir, 2021, 33(2): 70-80.
- [2] 冀昆,郭少斌,李新.溶孔发育的含沥青质碳酸盐岩核磁共振特征分析[J].天然气地球科学,2017,28(8):1257-1263.
Ji Kun, Guo Shaobin, Li Xin. The Nuclear Magnetic Resonance (NMR) Characteristics of the Carbonate Rock Reservoir Which Has Dissolved Pores and Asphalt[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(8): 1257-1263.
- [3] 杨怀宇.东营凹陷南坡东段潜山地层划分与残留地层展布[J].现代地质,2019,33(4):811-819.
Yang Huaiyu. Stratigraphic Division of Buried Hill and Residual Strata Distribution in Eastern Section of Dongying Depression Southern Slope[J]. Geoscience,

- 2019, 33(4): 811-819.
- [4] 靳子濠,周立宏,操应长,等.渤海湾盆地黄骅拗陷二叠系砂岩储层储集特征及成岩作用[J].天然气地球科学,2018,29(11):1595-1607.
Jin Zihao, Zhou Lihong, Cao Yingchang, et al. Reservoir Properties and Diagenesis of Permian Sandstones in Huanghua Depression, Bohai Bay Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(11): 1595-1607.
- [5] 焦小芹.柴西北缘阿尔金山前基岩储层特征及成藏条件研究[D].北京:中国石油大学(北京),2020.
Jiao Xiaoqin. Study on the Characteristics and Reservoir-Forming Conditions of the Bedrock Reservoir in the Front of the Altun Mountains in the Northwestern Margin of Qaidam Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020.
- [6] 秦玉娟,张天付,胡圆圆,等.电子探针背散射电子图像在碳酸盐岩微区分析中的意义[J].电子显微学报,2013,32(6):479-484.
Qin Yujuan, Zhang Tianfu, Hu Yuanyuan, et al. The Significance of a Back Scattered Electron Image (of EPMA) in Micro-Area Analyses of Carbonate Rocks [J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2013, 32(6): 479-484.
- [7] 肖凯,时志强,吴冰,等.川东南地区林1井震旦系灯影组电子探针分析:热液白云岩化过程中的元素变化[J].矿物岩石地球化学通报,2017,36(2):289-298.
Xiao Kai, Shi Zhiqiang, Wu Bing, et al. Electron Microprobe Analysis of the Permian Sinian Dengying Formation in Well Lin-1, Southeastern Sichuan: Element Concentration Changing During the Hydrothermal Dolomitization [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2017, 36(2): 289-298.
- [8] 郑庆华,刘行军,刘乔,等.利用偏光显微镜反射光系统观察黑色生油岩电子探针薄片中的生烃母质特征[J].岩矿测试,2020,39(3):442-450.
Zheng Qinghua, Liu Xingjun, Liu Qiao, et al. A Method for Observation of Characteristics of Hydrocarbon Generation Materials in Electron Probe Thin Sections of Black Source Rock by the Reflected Light Viewing System of a Polarized Optical Microscope [J]. Rock and Mineral Analysis, 2020, 39(3): 442-450.
- [9] 郑荣才,赵灿,刘合年,等.阿姆河盆地卡洛夫牛津阶碳酸盐岩阴极发光性及其研究意义[J].成都理工大学学报(自然科学版),2010,37(4):377-385.

- Zheng Rongcai, Zhao Can, Liu Henian, et al. Cathodoluminescence and Its Significance of the Callovian-Oxfordian Carbonate Rocks in Amu Darya Basin, Turkmenistan[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2010, 37(4): 377-385.
- [10] 程鑫, 操应长, 远光辉, 等. 东营凹陷草桥潜山岩溶储层胶结物特征及其储层成因[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(1): 1-11.
- Cheng Xin, Cao Yingchang, Yuan Guanghui, et al. Characteristics of Cements and Origin of Karsted Reservoirs in Caoqiao Buried Hill in Dongying Sag [J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2021, 45(1): 1-11.
- [11] 孙伟, 陈明, 万友利, 等. 西藏南羌塘坳陷昂达尔错地区侏罗系布曲组碳酸盐岩阴极发光特征与成岩阶段划分[J]. 沉积与特提斯地质, 2018, 38(2): 45-54.
- Sun Wei, Chen Ming, Wan Youli, et al. Cathodoluminescence Features and Diagenetic Stage Division of the Carbonate Rocks in Buqu Formation of Jurassic, Southern Qiangtang Depression, Tibet[J]. Sedimentary and Tethyan Geology, 2018, 38(2): 45-54.
- [12] 杨文艺. 基于深度学习的岩石薄片图像智能识别与分类[D]. 郑州: 河南理工大学, 2021.
- Yang Wenyi. Intelligent Recognition and Classification of Rock Thin Section Images Based on Deep Learning[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2021.
- [13] 杜相仪, 董少群, 曾联波, 等. 碳酸盐岩铸体薄片面孔自动提取研究[J]. 地质论评, 2021, 67(6): 1910-1921.
- Du Xiangyi, Dong Shaoqun, Zeng Lianbo, et al. Study of Automatic Extraction Porosity Using Cast Thin Sections for Carbonates[J]. Geological Review, 2021, 67(6): 1910-1921.
- [14] 唐为东. 岩石铸体薄片图像的孔隙提取及颗粒分割研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2022.
- Tang Weidong. Research on Pore Extraction and Particle Segmentation of Thin Slice Images of Rock Castings [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2022.
- [15] 韦成杰. 塔北哈拉哈塘地区富源跃满区块致密碳酸盐岩盖层评价[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- Wei Chengjie. Evaluation of Tight Carbonate Rock Cap Rocks in the Fuyuan Yueman Block of the Halahatang Area in Northern Tarim[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.
- [16] 王珊, 曹颖辉, 张亚金, 等. 塔里木盆地古城地区上寒武统碳酸盐岩储层发育特征及主控因素[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(10): 1389-1403.
- Wang Shan, Cao Yinghui, Zhang Yajin, et al. Characteristics and Main Controlling Factors of Upper Cambrian Carbonate Reservoir in Gucheng Area, Tarim Basin, NW China [J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(10): 1389-1403.
- [17] 淡永, 梁彬, 曹建文, 等. 基于缝洞方解石包裹体测试分析塔北轮南地区奥陶系古岩溶期次及环境[J]. 新疆地质, 2015, 33(1): 95-100.
- Dan Yong, Liang Bin, Cao Jianwen, et al. Analysis of Palaeokarst Periods and Its Environmental in Lunnan Ordovician of Tarim Basin : From Fluid Inclusion Test of Calcite in Fracture or Vug [J]. Xinjiang Geology, 2015, 33(1): 95-100.
- [18] 张庆玉, 李景瑞, 梁彬, 等. 塔里木盆地塔中地区奥陶系古岩溶包裹体特征及古环境意义[J]. 中国岩溶, 2020, 39(6): 894-899.
- Zhang Qingyu, Li Jingrui, Liang Bin, et al. Characteristics and Paleoenvironmental Significance of Ordovician Karst Inclusions in the Tazhong Area, Tarim Basin [J]. Karst China, 2020, 39(6): 894-899.
- [19] 杨德平, 舒磊, 熊玉新, 等. 扫描电镜能谱与冷冻传输装置联用测试矿物中流体包裹体固液相成分的方法研究[J]. 岩矿测试, 2015, 34(5): 550-557.
- Yang Deping, Shu Lei, Xiong Yuxin, et al. Determination of Solid-Liquid Phase Composition of Fluid Inclusions in Minerals by SEM-EDS Coupled with Cryotransfer [J]. Rock and Mineral Analysis, 2015, 34(5): 550-557.
- [20] 成科璋, 崔军平, 孟张勇, 等. 鄂尔多斯盆地吴起地区延安组储层流体包裹体特征与油气成藏期次分析[J]. 中国地质, 2022, 28(4): 47-50.
- Cheng Kezhang, Cui Junping, Meng Zhangyong, et al. Characteristics of Fluid Inclusions and Analysis of Hydrocarbon Accumulation Stages of Yan'an Formation in Wuqi Area, Ordos Basin [J]. Geology of China, 2022, 28(4): 47-50.
- [21] 张亚蒲, 杨正明, 黄延章, 等. 低渗孔隙型碳酸盐岩油藏储层特征及剩余油分布规律[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(3): 659-668.
- Zhang Yapu, Yang Zhengming, Huang Yanzhang, et al. Study on Reservoir Characteristics and Remaining Oil Distribution of Low Permeability Pore Type

- Carbonate Rock[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(3): 659 - 668.
- [22] 韩学雨,李玉海,楼达,等. 黄骅拗陷孔西斜坡区奥陶系原生气藏成藏过程及模式[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2023, 53(2): 356 - 370.
- Han Xueyu, Li Yuhai, Lou Da, et al. Accumulation Process and Model of the Primary Ordovician Oil and Gas Reservoirs in Kongxi Slope Area, Huanghua Depression [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(2): 356 - 370.
- [23] 卢雪梅. 碳酸盐岩孔隙度影响因素研究进展[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 521 - 522.
- Lu Xuemei. Research Progress on Factors Affecting the Porosity of Carbonate Rocks [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 521 - 522.
- [24] 程鑫,周立宏,操应长,等. 黄骅拗陷大港探区下古生界碳酸盐岩潜山差异演化及优质储层成因[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 673 - 689.
- Cheng Xin, Zhou Lihong, Cao Yingchang, et al. Differential Evolution of Lower Paleozoic Carbonate Buried Hills and Genesis of High Quality Reservoirs in Dagang Exploration Area of Huanghua Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 673 - 689.
- [25] 叶涛,王清斌,黄志,等. 碳酸盐岩层序地层格架对岩溶储层的控制作用:以渤海西南海域下古生界为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(4): 991 - 1005.
- Ye Tao, Wang Qingbin, Huang Zhi, et al. Control of Carbonate Sequence Stratigraphic Framework on Karst Reservoirs: A Case Study of the Lower Paleozoic in the Southwestern Bohai Sea [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(4): 991 - 1005.
- [26] 余浩杰,钟寿康,李浮萍,等. 苏里格气田马家沟组膏模孔型储层特征及成因[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2021, 43(3): 71 - 80.
- Yu Haojie, Zhong Shoukang, Li Fuping, et al. Characteristics and Genesis of Gypsum-Mold Type Reservoirs of the Majiagou Formation in Sulige Gas Field [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2021, 43(3): 71 - 80.
- [27] 张忆南,梁利喜,刘向君,等. 全直径碳酸盐岩岩心孔隙空间重构方法[J]. 断块油气田, 2021, 28(3): 346 - 351.
- Zhang Yinan, Liang Lixi, Liu Xiangjun, et al. Method for Reconstructing Pore Space in Full Diameter Carbonate Rock Cores [J]. Block Oil and Gas Field, 2021, 28(3): 346 - 351.
- [28] Mays T J. A New Classification of Pore Sizes [J]. Studies in Surface Science & Catalysis, 2007, 160(7): 57 - 62.