

碳酸盐岩孔洞型储层分层次储集空间表征

——以鄂尔多斯盆地大牛地中奥陶统马家沟组马五₇为例

丁晓琪¹, 刘鑫¹, 祁壮壮¹, 张威², 刘四洪²

(1. 成都理工大学 能源学院, 成都 610059;

2. 中国石化 华北油气分公司, 郑州 450006)

摘要: 碳酸盐岩具有多尺度、多成因的储集空间, 储集空间和储集物性的表征是难点。鄂尔多斯盆地大牛地奥陶系马家沟组马五₇储层发育毫米—微米—纳米级储集空间, 为研究其储集空间和储集物性, 分层次、多尺度对该储集空间进行了表征, 并结合测井曲线, 建立了孔、洞的计算模型。研究表明: ①对于发育多尺度储集空间的碳酸盐岩储层, 采用岩心拓片提取溶蚀孔洞 (>1 mm)、铸体薄片提取晶间孔 (>2 μm)、氩离子抛光—扫描电镜进行亚微米—纳米孔 (<2 μm) 研究相结合, 可以较准确地表征其储集空间; ②在多尺度储集空间表征的基础上, 对声波孔隙度和中子—密度孔隙度进行约束, 可以建立对应的晶间孔孔隙度计算模型和溶蚀孔洞孔隙度计算模型, 该模型具有更高的计算精度。

关键词: 孔洞型储层; 储集空间; 碳酸盐岩; 马家沟组; 奥陶系; 大牛地气田; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE122.24

文献标识码: A

Reservoir space characterization of vuggy carbonate reservoirs with multiple scales:

a case study of Ma 5-7 interval, Middle Ordovician Majiagou Formation, Daniudi area, Ordos Basin

DING Xiaoqi¹, LIU Xin¹, QI Zhuangzhuang¹, ZHANG Wei², LIU Sihong²

(1. Energy College, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China;

2. North China Company, SINOPEC, Zhengzhou, Henan 450006, China)

Abstract: The reservoir space of carbonate rocks is of multiple scales and genesis mechanisms, and it is difficult to accurately demonstrate the reservoir space as well as physical properties. Millimeter-, micro- and nano-scale reservoir spaces were all developed in the Ma 5-7 interval (the 7th sub-member of the 5th member) of the Ordovician Majiagou Formation in Daniudi area, Ordos Basin. In order to study the storage space and physical properties, the storage space was characterized in layers at multiple scales, and combined with the approach of logging curves, a calculation model was established for the description of pores and caves. Several conclusions were made as follow. (1) For carbonate rock reservoirs with storage space of multiple scales, we can accurately describe their storage space by the means of core rubbing for dissolved pores (>1 mm), case thin section for intercrystalline pores (>2 μm), and argon ion polishing-scanning electron microscope for submicron and nano pores (<2 μm). (2) On the basis of multi-scale reservoir space characterization, the acoustic porosity and neutron-density porosity can be constrained, and the corresponding intercrystalline pore porosity calculation model and dissolved pore porosity calculation model can be established, which have higher calculation accuracy.

Key words: vuggy reservoir; reservoir space; carbonate rock; Majiagou Formation; Daniudi gasfield; Ordos Basin

随着勘探开发工作的逐渐深入, 发现深层碳酸盐岩仍发育优质储量, 它是今后油气勘探的重点^[1-2], 如塔里木盆地塔深 1 井在 8 000 余米深的碳酸盐岩中, 仍见到宏观的溶洞发育^[3]。碳酸盐岩由于组分的不稳定性, 孔隙、洞穴、裂缝多尺度储集空

间发育, 采用单一方法进行储集空间和储层物性的研究存在局限性和不准确性。李易霖等^[4]利用纳米与微米 CT、自动矿物识别系统 (QEMSCAN)、MAPS 图像拼接技术以及环境扫描电镜 (ESEM) 等非常规测试新技术, 从宏观和微观 2 个尺度对齐家

收稿日期: 2020-09-01; 修订日期: 2021-06-28。

作者简介: 丁晓琪 (1981—), 男, 博士, 副教授, 从事碳酸盐岩储层地质学研究。E-mail: xiaqingding@qq.com。

基金项目: 国家油气重大专项 (2017ZX05005-001-010)、中国石化科技部攻关项目 (P20043-2) 和高等教育人才培养质量和教学改革重点项目 (JG182017) 资助。

地区高台子油层致密储层空间进行了表征;LI 等^[5]运用 CT 扫描技术进行碳酸盐岩裂缝和孔洞的研究,采取图像提取、分割、计算,进行不同类型孔隙的研究;王璐等^[6]应用铸体薄片、扫描电镜、高压压汞实验和 CT 扫描方法,对四川盆地高石梯—磨溪地区灯四段储层样品进行了研究与分析,定量表征了缝洞型碳酸盐岩储层孔隙结构特征;CORBETT 等^[7]综合露头照片、图像分析、CT 描述和计算机模拟研究微生物岩储层的孔隙类型和结构,较好地解决了微生物岩的多尺度储集空间表征问题。

鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组马五₇小层是近年新发现的一个含气层系。该小层为一套致密微晶白云岩夹 2~3 层含石膏结核粉晶白云岩,单层厚度在 2 m 左右。石膏结核在加里东期被淡水淋滤形成铸模孔,同时,含石膏结核的白云石晶粒要粗于微晶白云石。粉晶白云岩中的晶间孔 20~30 μm;而微晶白云岩中的晶间孔一般小于 10 μm。石膏铸模孔大小在数毫米至 1~2 cm 之间,呈圆形、卵形,较均匀分布在粉晶白云岩中。该套含铸模孔粉晶白云岩物性和含气性好。由于铸体薄片很难包括整个石膏铸模孔,所以在薄片很难准确估算铸模孔的百分含量。同时大量的铸模孔存在,导致小圆柱的取心困难,实测的孔隙度往往是基质

白云岩的孔隙度和部分铸模孔孔隙度,很难准确反映储层物性的实际情况;在利用测井资料进行储层物性参数计算过程中,常用的声波资料由于孤立铸模孔的存在,并不能准确反映储层的真实物性。这给马五₇小层含气性评价和储量计算带来困难。

本文运用 JMicroVision 软件,提取鄂尔多斯盆地大牛地马五₇小层铸体薄片中的晶间孔,分析微米级晶间孔的孔径大小分布和面孔率;对钻井取心样品进行拍照、拓片,同样用 JMicroVision 软件提取拓片中的铸模孔,进行毫米—厘米级铸模孔的孔径大小和百分比研究;将样品进行氩离子抛光后利用扫描电镜观察,研究数十纳米以上晶间微孔的大小及其面孔率;在晶间孔面孔率(包括纳米级晶间孔)约束下,建立了基于声波基质孔隙度的计算模型;在总面孔率约束下,建立了基于中子—密度总孔隙度的计算模型,最后讨论了该研究方法在进行碳酸盐岩多尺度储集空间表征中的适用性和局限性。

1 区域地质特征

奥陶纪鄂尔多斯地区属于华北地台的一部分,为陆表海沉积^[8]。大牛地气田位于伊陕斜坡北部,面积 2 000 km²(图 1)。前期的勘探以上古生界

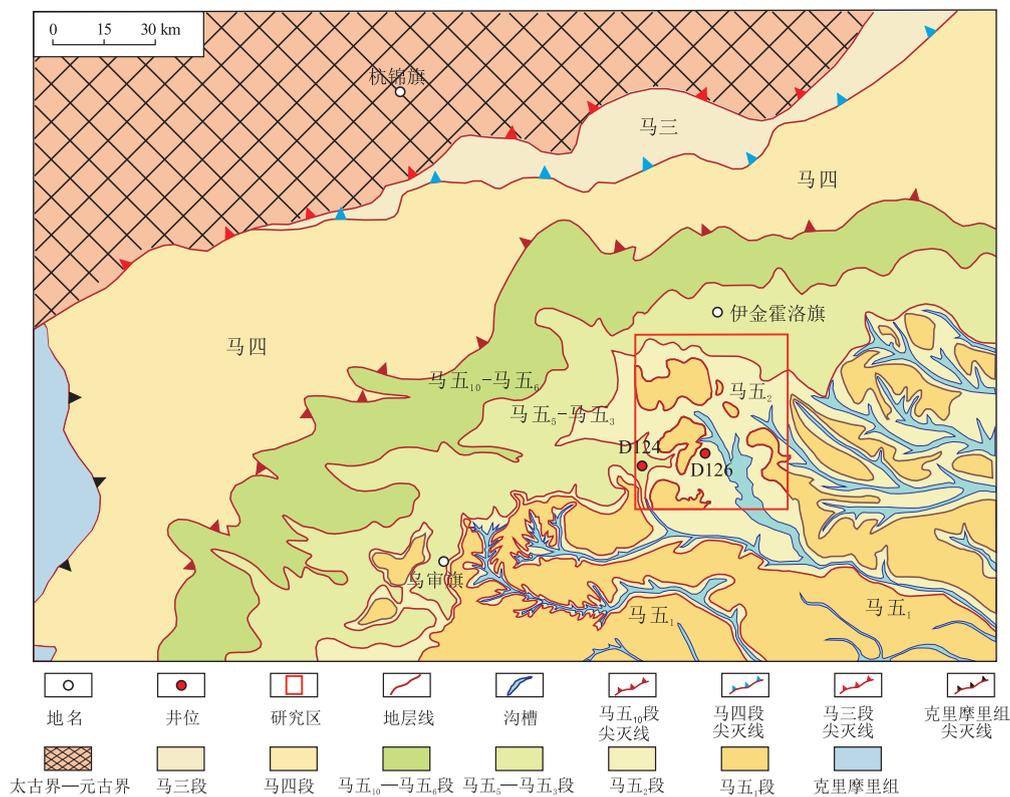


图 1 鄂尔多斯盆地大牛地位置及前石炭纪古地质图

Fig.1 Location of Daniudigas field and paleogeologic map of pre-Carboniferous, Ordos Basin

致密砂岩气为主^[9];近年来在下古生界奥陶系的勘探中,发现了以马五₁₊₂为主的风化壳气藏^[10-11]和以马五₅为主的白云岩气藏^[12];随着勘探的不断深入,在马五₇中钻遇了优质白云岩储层,多口井获得工业气流,展示出良好的天然气勘探潜力。

鄂尔多斯盆地缺失下奥陶统治理组和亮甲山组,中奥陶统马家沟组不整合覆盖于寒武系之上^[7]。根据岩性组合特征,盆地内马家沟组自下而上分为六段。马一段、马三段和马五段形成于海退阶段,以白云岩为主,夹厚度不等的石膏和石盐,黏土含量偏高;马二段、马四段和马六段形成于海侵阶段,以灰岩为主,含数量不等的白云岩,由于古陆出露面积小,能够提供的碎屑物质有限,基本不含黏土^[13]。马五段自下而上又被划分为10个小层,马五₉、马五₇、马五₅和马五₁₊₂以厚层—块状灰岩、白云岩为主,含少量石膏结核,代表海退背景下的短暂海侵;而马五₁₀、马五₈、马五₆和马五₃₊₄则以纹层—薄层—中层黏土质白云岩、膏质白云岩为主,局部夹石膏和石盐,代表大规模的海退。本文研究的主要层位是马五₇,马五₇在研究区分布稳定,厚度13~20 m,为一套准同生成因的白云岩。

由于早古生代晚期的加里东期运动,马五段以上接受大气淡水的淋滤,形成喀斯特储层,研究区马六段和部分马五段被剥蚀殆尽,不整合面下出露地层主要为马五₂—马五₃(图1)。加里东期由于大牛地所处古地貌位置高,淡水淋滤深度大^[10-11],溶蚀深度已经达马五₇以下,石膏结核被淡水溶蚀后形成铸模孔(图2,图3)。所以马五₇中含铸模孔粉晶白云岩物性好,是马五₇的主要含气层;而马五₇中的微晶白云岩,由于为非平面它形晶,晶间孔不发育,后期的淡水溶蚀也不明显。马五₇的储层类型与马五₁和马五₄具有相似的特点^[14]。

2 储集空间

马五₇含铸模孔粉晶白云岩中白云石晶粒普遍在50~100 μm,白云石以平面半自形晶为主;储集空间包括白云石晶间孔(微米级)、白云石晶内孔(纳米级)和石膏结核被溶蚀之后形成的铸模孔(毫米—厘米级)(图3,图4),裂缝不明显。晶间孔主要出现在白云石自形晶发育的区域;而铸模孔的发育具有随机性,但层位相对稳定。

2.1 铸模孔表征

根据岩心照片(图3),采用拓片法提取铸模孔。由于该方法一般只能拓取1 mm以上的铸模

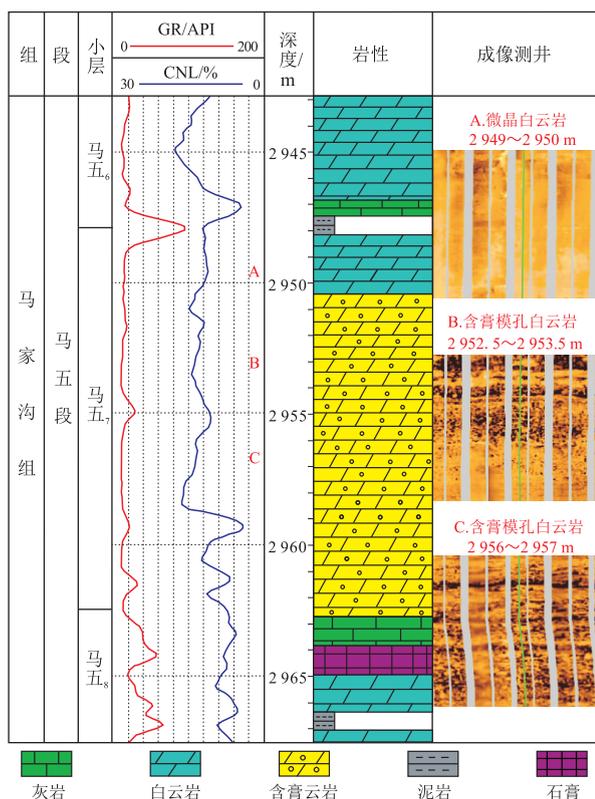


图2 鄂尔多斯盆地大牛地大126井中奥陶统马家沟组马五₇地层柱状图

Fig.2 Stratigraphic column of Ma 5-7 interval of Middle Ordovician Majiagou Formation, well Da 126, Daniudi gas field, Ordos Basin

孔,所以其分辨率为1 mm。拓片后用JMicroVision软件提取铸模孔,分析铸模孔的孔径分布和面孔率。从图3可以看出:(1)铸模孔分布广泛,但大小分布不均匀;(2)铸模孔孔径以2~8 mm分布最多,孔径大于1 cm的铸模孔个数较少,但面积占比较大;(3)铸模孔面孔率在4%~7%之间,平均为5.87%。

2.2 晶间孔

利用JMicroVision软件,提取铸体薄片中的孔隙,并利用该软件进行晶间孔大小的分布和晶间孔面孔率的计算(图4)。由图4可以看出:(1)该方法能提取的最小孔径为2 μm,对于小于2 μm的晶间孔,受铸体照片分辨率的限制无法提取;(2)晶间孔孔径主要分布在6 μm以上,且集中在20~30 μm;(3)面孔率在2%~4%之间,晶间孔分布较均匀,呈正态分布。

2.3 晶内—晶间纳米—亚微米孔

对于小于2 μm的纳米—亚微米孔,成因可能与晶体生长过程中的晶格缺陷或晶体的结合面有关(图5)。本文运用氩离子抛光—扫描电镜进行研究,通过对5个样品的纳米—亚微米孔

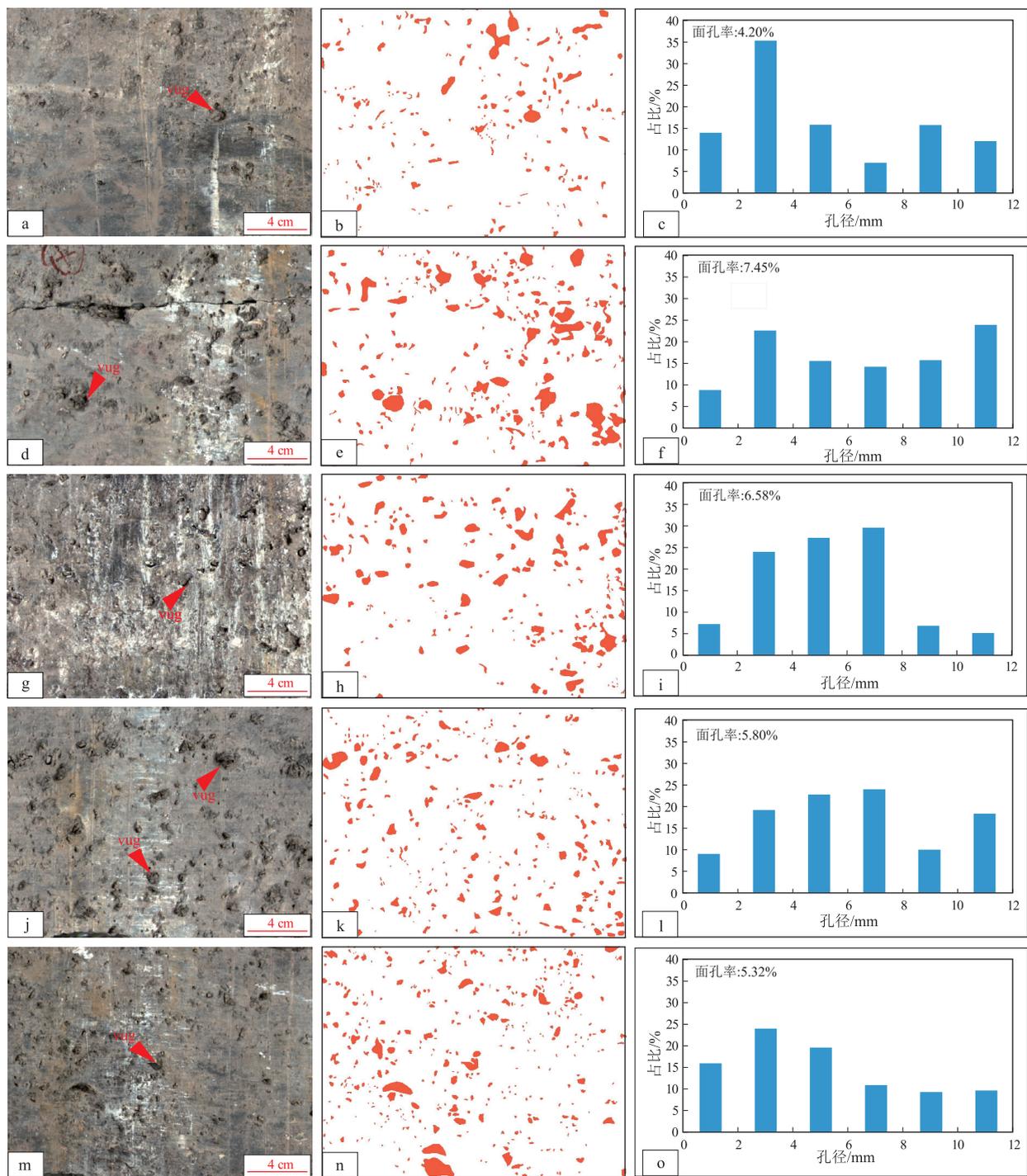


图3 鄂尔多斯盆地大牛地大124井中奥陶统马家沟组马5₇小层含铸模孔岩心照片、拓片图及孔径分布
vug为铸模孔

a.粉晶白云岩,3 150.15 m;b.图a的孔隙分布图;c.图a的铸模孔分布直方图;d.粉晶白云岩,3 152.8 m;e.图d的孔隙分布图;f.图d的铸模孔分布直方图;g.粉晶白云岩,3 153.1 m;h.图g的孔隙分布图;i.图g的铸模孔分布直方图;j.粉晶白云岩,3 153.28 m;k.图j的孔隙分布图;l.图j的铸模孔分布直方图;m.粉晶白云岩,3 153.9 m;n.图m的孔隙分布图;o.图m的铸模孔分布直方图

Fig.3 Core photographs, rubbing moldic pore and vuggy radii distribution of Ma 5-7 interval of Middle Ordovician Majiagou Formation, well Da 124, Daniudi gas field, Ordos Basin

(小于2 μm)与晶间孔(大于2 μm)的统计,发现纳米—亚微米孔孔隙度平均为0.9%。因此,就孔隙度而言,纳米—亚微米孔孔隙度较小,可以通过公式(1)进行估算(图6a)。

$$\varphi_{in} = 0.27\varphi_{lin} + 0.14 \quad (1)$$

式中:φ_{in}为纳米—亚微米孔孔隙度;φ_{lin}为晶间孔孔隙度。

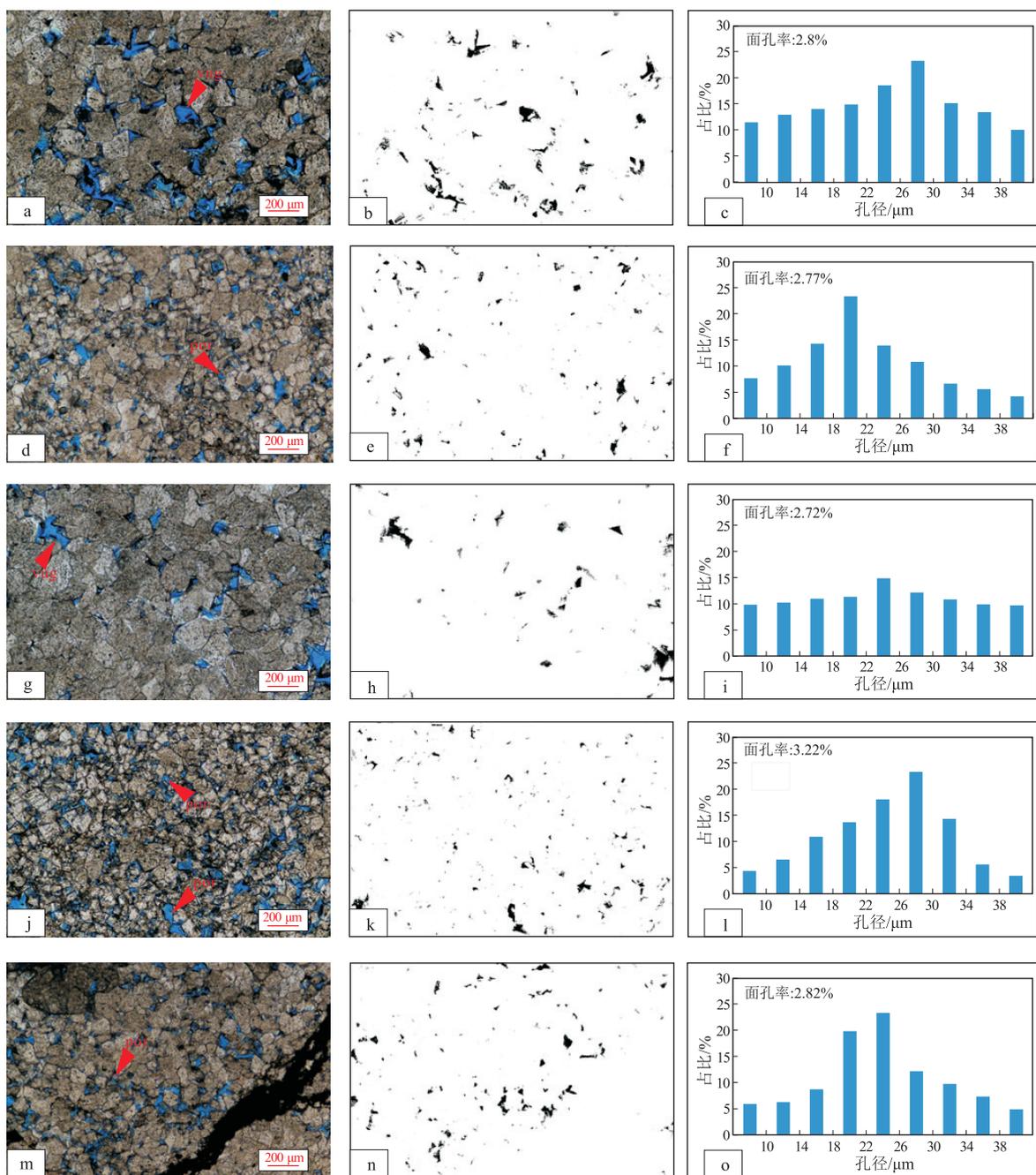


图 4 鄂尔多斯盆地大牛地大 124 井中奥陶统马家沟组马五₇小层白云岩显微照片、孔隙分布和孔径分布
vug 为铸模孔;por 为晶间孔

a.粉晶白云岩,3 150.15 m;单偏光;b.图 a 的孔隙分布图;c.图 a 的晶间孔分布直方图;d.粉晶白云岩,3 152.80 m,单偏光;
e.图 d 的孔隙分布图;f.图 d 的晶间孔分布直方图;g.粉晶白云岩,3 153.10 m,单偏光;h.图 g 的孔隙分布图;i.图 g 的晶间孔
分布直方图;j.粉晶白云岩,3 153.28 m,单偏光;k.图 j 的孔隙分布图;l.图 j 的晶间孔分布直方图;m.粉晶白云岩,3 153.90 m,
单偏光;n.图 m 的孔隙分布;o.图 m 的晶间孔分布直方图

Fig.4 Photomicrographs of crystalline dolomites, distribution of pores and pore radii of Ma 5-7 interval of Middle Ordovician Majiagou Formation, well Da 124, Daniudi gas field, Ordos Basin

因此,储层的总孔隙度应该是铸模孔孔隙度、晶间孔孔隙度和纳米—亚微米孔孔隙度之和。

3 储层孔隙度表征

3.1 总孔隙度表征

由于中子反映含氢量,水中的氢含量最高,但

天然气中的氢含量较低,因此气层中的中子孔隙度将变小,造成“挖掘效应”^[15]。马五₇小层中的白云岩较纯,黏土含量低,几乎不存在黏土间微孔和结构水,因此中子孔隙度可不作泥质校正。马五₇小层岩性致密,井壁规则,密度较为可靠。当储层中存在天然气时,密度将降低,运用密度计算的孔隙

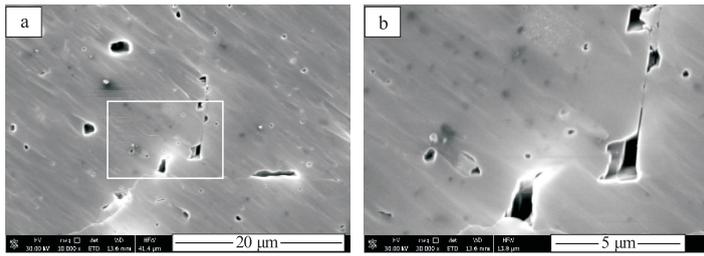


图5 鄂尔多斯盆地大牛地中奥陶统马家沟组马五₇小层白云岩中纳米—亚微米级孔隙扫描电镜照片

b 图为 a 图白色框内的放大(大 124 井, 3 152.47 m)

Fig.5 SEM photomicrographs of nanometer- and sub-micrometer-pores in dolomites, Ma 5-7 interval of Middle Ordovician Majiagou Formation, Daniudi gas field, Ordos Basin

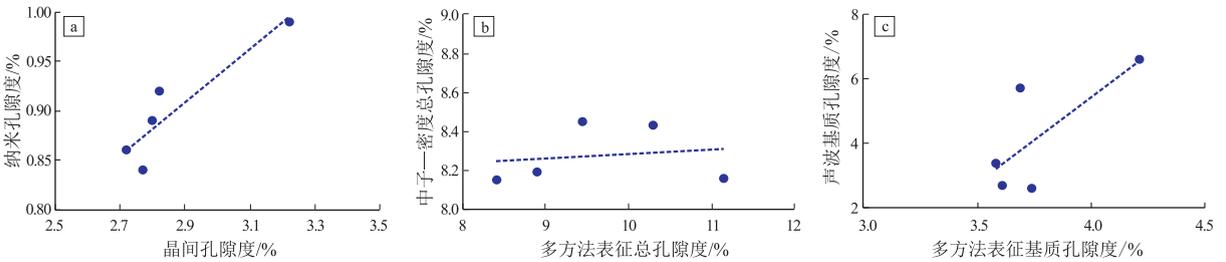


图6 鄂尔多斯盆地大牛地中奥陶统马家沟组马五₇小层白云岩孔隙度交会图版

Fig.6 Crossplots of dolomite porosities of Ma 5-7 interval of Middle Ordovician Majiagou Formation, Daniudi gas field, Ordos Basin

度将增大。因此中子—密度计算的总孔隙度可以很大程度上消除天然气的影响,与分层次多尺度表征的总孔隙度对比来看(图 6b,图 7),两者具有较好的相关性,可通过公式(2)和公式(3)进行总孔隙度的计算。

$$\varphi_p = (\rho_m - \rho) / (\rho_m - \rho_f) \quad (3)$$

式中: φ_t 为总孔隙度,%; φ_p 为密度孔隙度,%; φ_{Cnl} 为补偿中子孔隙度,%; ρ_m 为白云岩骨架密度,2.87 g/cm³; ρ_f 为流体密度,1.0 g/cm³; ρ 为岩石密度,g/cm³。

3.2 基质孔隙度表征

声波在不同介质中的传播速度不同,但声波测

$$\varphi_t = 0.02 \times \sqrt{(\varphi_p^2 + \varphi_{Cnl}^2) / 2} + 8.05 \quad (2)$$

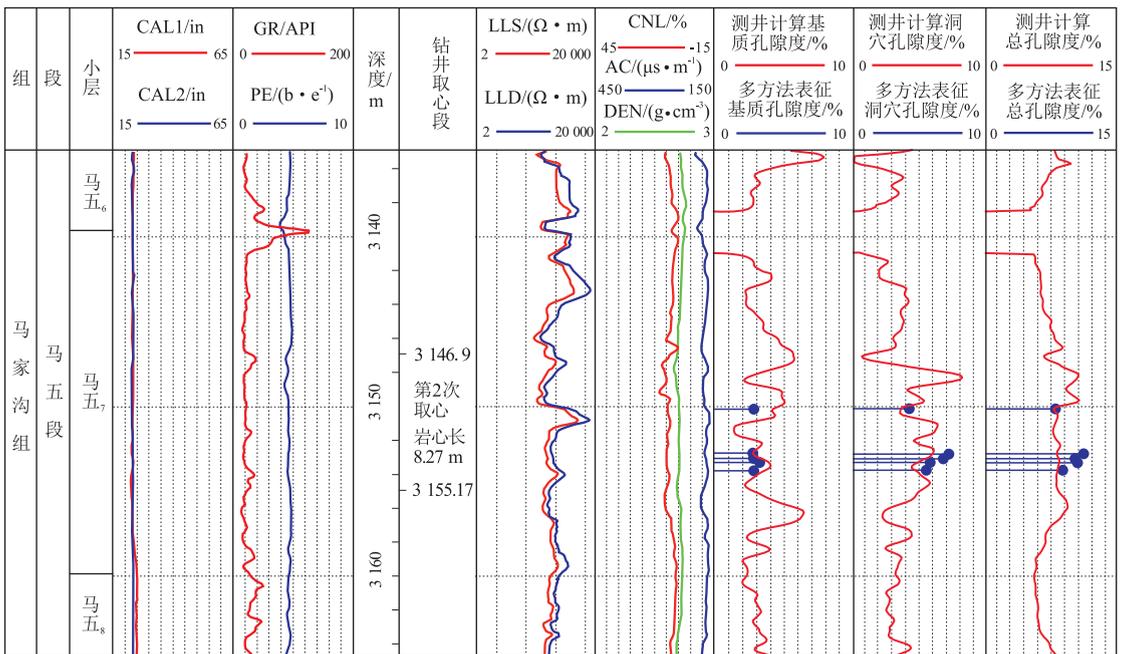


图7 鄂尔多斯盆地大牛地大 124 井测井解释孔隙度与实测孔隙度对比

Fig.7 Comparison of interpreted porosity of well logging and measured porosity of well Da 124, Daniudi gas field, Ordos Basin

井测量的是沿传播时间最短的纵波首波的速度,一般认为声波时差不受洞穴和高角度裂缝的影响,只受骨架和粒间孔隙的影响^[15]。声波反映的是连通孔隙度和骨架信息,孤立的孔洞在声波测井曲线上是没有任何反应的。因此,利用声波测井计算的孔隙度往往是基质孔隙度。通过与表征的基质孔隙度回归(图6c),白云岩中声波(基质)孔隙度计算公式如(4)所示。

$$\varphi_{ac} = 5.26(AC - AC_{ma}) / (AC_{nd} - AC_{ma}) - 15.59 \quad (4)$$

式中: φ_{ac} 为声波孔隙度,%; AC 为声波时差, $\mu\text{m/s}$; AC_{ma} 为白云岩骨架声波时差, $145 \mu\text{m/s}$; AC_{nd} 为流体骨架声波时差, $620 \mu\text{m/s}$ 。

从声波曲线计算的孔隙度和多方法表征的晶间、晶内孔隙度对比来看(图7),两者具有较好的相关性。因此,可以通过声波曲线进行白云岩基质孔隙度的计算。

3.3 铸模孔孔隙度的表征

中子—密度计算的总孔隙度扣除声波时差计算的基质孔孔隙度为铸模孔孔隙度。从图7可以看出,铸模孔的孔隙度在4%~6%之间,平均为5.1%,与5个样品拓片表征的铸模孔孔隙度(平均5.87%)基本一致。

4 讨论

4.1 分层次多尺度储集空间表征的可行性和局限性

马五₇小层中的铸模孔孔径分布于1~20 mm,平均面孔率为5.87%;晶间孔孔径分布于20~30 μm ,平均面孔率为2.87%,还有约0.9%的小于2 μm 的亚微米—纳米孔。在铸体薄片晶间孔分析过程中,即使白云岩晶间孔的分布相对比较均匀,但仍存在一定的非均质性,不能放大倍数过高,否则一方面会成倍增加工作量,另一方面会造成非均质性引起的差别,也就是视域的代表性变差^[7]。本文研究的铸体薄片放大倍数为100倍,可观察到的最小孔直径为1~2 μm 。然而,在氩离子抛光—扫描电镜下仍可以观察到大量的小于2 μm 的晶内—晶间纳米—亚微米孔。也就是说,通过JMicroVision软件计算的晶间孔只是宏观的(>2 μm)。结合氩离子抛光—扫描电镜,通过回归法求取校正系数,可以近似代表晶间(内)孔孔隙度。

在岩心拓片过程中,可以识别的最小孔隙直径一般在1 mm以上。所以对于孔径在1 mm以上的铸模孔,如果样本足够多,是可以准确表征的。由于目的层段的取心一般为数米,拓片长度并不受限

制。拓片可以通过岩心切片完成,也可以通过岩心环扫完成,两种方法并没有实质性的差别,只是前者的铸模孔更为清楚。目前,大部分油田的岩心都进行了数字化扫描,给大尺度孔洞的研究带来了便利。将岩心平展图进行拓片后,把拓片导入JMicroVision软件中,设置好比例尺,提取孔洞并进行孔洞百分比和直径的分布研究。对于岩心拓片,一般要求溶蚀孔洞小于半个岩心直径,对于更大尺度的孔洞,只能通过露头来确定百分含量。

因此,分层次(岩心拓片的毫米级、铸体薄片的微米级和氩离子抛光—扫描电镜的亚微米—纳米级)对马五₇小层白云岩储集空间进行表征,可以较准确地刻画该套白云岩的多尺度储集空间。

4.2 三孔隙度测井进行非连通铸模孔计算的可行性

一般认为声波时差只反映连通孔隙度,并不反映孤立的溶蚀孔洞,因此声波孔隙度一般小于中子—密度计算的总孔隙度。马五₇中的声波孔隙度接近晶间孔(包括纳米孔)孔隙度,从图7可以看出,声波孔隙度与表征的晶间孔孔隙度绝对误差为1.31%。

中子—密度结合进行总孔隙度的计算,可以很大程度上抵消天然气的挖掘效应和天然气导致的密度孔隙度偏大的影响。中子—密度孔隙度计算公式并不具有实际意义,只有通过分层次表征的总孔隙度进行校正,得到总孔隙度,此时的孔隙度才具有实际意义。扣除声波时差计算的晶间孔孔隙度,则为孤立的铸模孔孔隙度。这样计算的铸模孔和拓片表征的铸模孔较为接近,绝对误差为0.88%,可以满足要求。非连通孔隙度的计算对碳酸盐岩储层类型的定量识别具有重要的意义。

5 结论

(1)对于发育多尺度储集空间的碳酸盐岩储层,用单一方法进行储集空间的表征存在不确定性,不能准确、客观地表征储集空间的大小、分布、数量和空间分布。通过岩心拓片提取溶蚀孔洞(>1 mm)、铸体薄片提取晶间孔(>2 μm)、氩离子抛光—扫描电镜进行亚微米—纳米孔(<2 μm)研究相结合,可以较准确地表征碳酸盐岩多尺度储集空间。

(2)在多尺度储集空间表征的基础上,对声波孔隙度和中子—密度孔隙度进行约束,可以建立对应的晶间孔孔隙度计算模型和溶蚀孔洞孔隙度计算模型,该模型具有更高的计算精度。

(3)碳酸盐岩分层次多尺度储集空间的表征

要求目的层段样品具有代表性,也就是中等尺度的非均质性相对较弱(晶间孔和铸模孔分布较均匀)。如果非均质性过强,裂缝发育,将很难对声波孔隙度和中子—密度总孔隙度进行约束。

参考文献:

- [1] 王大鹏,白国平,徐艳,等.全球古生界海相碳酸盐岩大油气田特征及油气分布[J].古地理学报,2016,18(1):80-92.
WANG Dapeng, BAI Guoping, XU Yan, et al. Characteristics and hydrocarbon distribution of the Paleozoic giant marine carbonate rock oil-gas fields in the world[J]. Journal of Palaeogeography, 2016, 18(1): 80-92.
- [2] 马永生,蔡勋育,赵培荣.深层、超深层碳酸盐岩油气储层形成机理研究综述[J].地学前缘,2011,18(4):181-192.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong. The research status and advances in porosity evolution and diagenesis of deep carbonate reservoir[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(4): 181-192.
- [3] 云露,翟晓先.塔里木盆地塔深1井寒武系储层与成藏特征探讨[J].石油与天然气地质,2008,29(6):726-732.
YUN Lu, ZHAI Xiaoxian. Discussion on characteristics of the Cambrian reservoirs and hydrocarbon accumulation in well Tashen-1, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(6): 726-732.
- [4] 李易霖,张云峰,尹淑丽,等.致密砂岩储集空间多尺度表征:以松辽盆地齐家地区高台子油层为例[J].石油与天然气地质,2016,37(6):915-922.
LI Yilin, ZHANG Yunfeng, YIN Shuli, et al. Characterization of the pore space in tight sandstone reservoirs from macroscopic and microscopic perspectives: a case study of Gaotaizi reservoir in Qijia area, the Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(6): 915-922.
- [5] LI Binhui, TAN Xuequn, WANG Fuyong, et al. Fracture and vug characterization and carbonate rock type automatic classification using X-ray CT images[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 153: 88-96.
- [6] 王璐,杨胜来,彭先,等.缝洞型碳酸盐岩气藏多类型储集层孔隙结构特征及储渗能力:以四川盆地高石梯—磨溪地区灯四段为例[J].吉林大学学报(地球科学版),2019,49(4):947-958.
WANG Lu, YANG Shenglai, PENG Xian, et al. Pore structure characteristics and storage-seepage capability of multi-type reservoirs in fracture-cavity carbonate gas reservoirs: a case study of Deng-4 member in Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49(4): 947-958.
- [7] CORBETT P, HAYASHI F Y, ALVES M S, et al. Microbial carbonates: a sampling and measurement challenge for petrophysics addressed by capturing the bioarchitectural components[M]. London: Geological Society, 2015.
- [8] 冯增昭.华北地台早古生代岩相古地理[M].北京:地质出版社,1990.
FENG Zengzhao. Lithofacies paleogeography of Early Paleozoic of North China platform[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990.
- [9] 丁晓琪,张哨楠,周文,等.鄂尔多斯盆地北部上古生界致密砂岩储层特征及其成因探讨[J].石油与天然气地质,2007,28(4):491-496.
DING Xiaoqi, ZHANG Shaonan, ZHOU Wen, et al. Characteristics and genesis of the Upper Paleozoic tight sandstone reservoirs in the northern Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(4): 491-496.
- [10] 贾会冲,丁晓琪.鄂尔多斯盆地大牛地气田马五₁₊₂段白云岩喀斯特储层特征[J].成都理工大学学报(自然科学版),2016,43(4):415-422.
JIA Huichong, DING Xiaoqi. Characteristics of dolomite karst reservoirs in the M_{5₁₊₂} Member of Majiagou Formation, Daniudi gas field, Ordos Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2016, 43(4): 415-422.
- [11] 丁晓琪,张哨楠,潘怀孝,等.鄂尔多斯盆地大牛地气田奥陶系“垮塌”型岩溶储层发育规律[J].石油与天然气地质,2016,37(2):210-217.
DING Xiaoqi, ZHANG Shaonan, PAN Huaixiao, et al. Development patterns of collapse-type karst reservoirs in the Ordovician of Daniudi gasfield, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 210-217.
- [12] 刘梅,丁晓琪,万友利,等.鄂尔多斯盆地大牛地气田奥陶系风化壳储层特征及分布[J].海相油气地质,2014,19(1):35-42.
LIU Mei, DING Xiaoqi, WAN Youli, et al. Characteristics and distribution of Ordovician weathering crust reservoirs in Daniudi gasfield, Ordos Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2014, 19(1): 35-42.
- [13] 王琳霖,呼响,方诗杰.鄂尔多斯盆地东缘马家沟组元素地球化学特征及古沉积环境[J].石油实验地质,2018,40(4):519-525.
WANG Linlin, FU Yun, FANG Shijie. Elemental geochemical characteristics and geological significance of Majiagou Formation, eastern Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(4): 519-525.
- [14] 何江,冯春强,马岚,等.风化壳古岩溶型碳酸盐岩储层成岩作用与成岩相[J].石油实验地质,2015,37(1):8-16.
HE Jiang, FENG Chunqiang, MA Lan, et al. Diagenesis and diagenetic facies of crust-weathered ancient karst carbonate reservoirs[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(1): 8-16.
- [15] LUCIA F J. Carbonate reservoir characterization[M]. New York: Springer, 2007.

(编辑 徐文明)