

基于伍德合金多级压力注入实验的致密砂岩储层孔缝充注序列研究

刘冀蓬^{1,2}, 萧汉敏³, 姜振学^{1,2*}, 唐相路^{1,2}, 徐明帅^{1,2}

1 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院, 北京 102249

3 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

* 通信作者, jiangzhenxuecup@126.com

收稿日期: 2024-01-15; 修回日期: 2024-04-10

国家自然科学基金(42272137)、中国石油天然气股份有限公司“十四五”科技专项(2021DJ2201)联合资助

摘要 松辽盆地北部白垩系泉头组扶余致密砂岩储层发育微纳米级孔隙、微裂缝, 且孔缝结构复杂, 导致成藏期致密油气在不同类型储集空间中的充注顺序不清, 增加了致密油气的勘探开发难度。本文针对致密砂岩储层中不同充注压力条件下致密油的充注特征开展定量研究, 结合大视域拼接扫描电镜与矿物面扫技术, 提出了一种基于孔隙-微裂缝组合的致密油充注规律微观评价方法。研究表明, 区内泉头组扶余致密砂岩储层主要发育3种孔缝组合类型: 粒间孔-黏土矿物收缩缝、粒间孔-脆性矿物粒间缝及黏土矿物晶间孔-收缩缝组合。通过将具有高温流变性质的伍德合金在不同压力下注入岩心, 可以观察到合金在不同孔缝组合类型中的注入随注入压力提升而表现出有序性, 粒间孔、缝的充注优先级明显高于黏土矿物相关孔缝, 伍德合金的注入效率呈明显的先快速增大后缓慢增大最终趋于稳定的抛物线形态。依据伍德合金与原油的性质特征, 将注入压力进行了等效转化, 还原了地层条件下致密油的微观充注过程, 据此建立了致密储层孔缝序列充注模式。在高源储压差条件下, 致密油能够充注至纳米级的黏土矿物晶间孔-收缩缝中, 随源储压差降低, 致密油逐渐难以充注至纳米级孔缝中。当源储压差降至最低时, 致密油仅能通过渗吸的方式通过宽大的孔间连通喉道进入微米级粒间孔及连通性较好的铸模孔中。本研究将流体注入与可视化技术相结合进行致密储层的储集空间多尺度评价, 为致密储层微观甜点评价及高效开发提供参考。

关键词 孔缝组合; 伍德合金; 多级压力注入; 充注序列; 致密储层

中图分类号: P618.13; P613.4

Study of pore-fracture filling sequences in tight reservoirs based on multi-stage pressure injection experiments with Wood's alloy

LIU Jipeng^{1,2}, XIAO Hanmin³, JIANG Zhenxue^{1,2}, TANG Xianglu^{1,2}, XU Mingshuai^{1,2}

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

引用格式: 刘冀蓬, 萧汉敏, 姜振学, 唐相路, 徐明帅. 基于伍德合金多级压力注入实验的致密砂岩储层孔缝充注序列研究. 石油科学通报, 2024, 03: 383-393

LIU Jipeng, XIAO Hanmin, JIANG Zhenxue, TANG Xianglu, XU Mingshuai. Study of pore-fracture filling sequences in tight reservoirs based on multi-stage pressure injection experiments with Wood's alloy. Petroleum Science Bulletin, 2024, 03: 383-393. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.03.028

2 Unconventional Petroleum Research Institute, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

3 Research Institute of Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

Received: 2024-01-15; Revised: 2024-04-10

Abstract The development of micro-nano-scale pores and microfractures in the Fuyu tight sandstone reservoirs of the Cretaceous Quantou Formation in the northern part of the Songliao Basin, as well as the complex structure of the pores and fractures, leads to the unclear sequence of tight oil and gas filling in different types of reservoir spaces during the formation period, which increases the difficulty of exploration and development of tight oil and gas. In this paper, a quantitative study is conducted on the filling characteristics of tight oil under different filling pressures in tight sandstone reservoirs, and a microscopic evaluation method of tight oil filling patterns based on pore-microfracture combinations is proposed by combining large field-of-view splicing swept electron microscopy and mineral surface scanning technology. The study shows that the Fuyu tight sandstone reservoirs of the Quantou Formation in the area can be classified into three main types of pore-fracture combinations: intergranular pore-clay mineral shrink fractures, intergranular pore-brittle mineral intergranular fractures and clay mineral intergranular pore-shrink fractures combinations. By injecting Wood's alloy with high-temperature rheological properties into the core at different pressures, it can be observed that the injection of the Wood's alloy in the different pore-fracture combinations shows orderliness with the increase of injection pressure, and the filling priority of the intergranular pores and fractures is obviously higher than that of the clay mineral-related pores and fractures, and the injection efficiency of Wood's alloy shows an obvious parabolic pattern of rapid increase first, followed by a slow increase that tends to be stable eventually. Based on the properties of Wood's alloy and crude oil, the injection pressure was equivalently transformed to simulate the microscopic filling process of tight oil under stratigraphic conditions, and accordingly the pore and fracture sequence filling model of a tight reservoir was established. Under the condition of high source storage pressure difference, the tight oil can be filled into the nanoscale intergranular pore-shrink fractures of clay minerals, and with the decrease of source storage pressure difference, the tight oil is gradually difficult to be filled into the nanoscale pore and fractures. When the source storage pressure difference is reduced to the lowest, the tight oil can only enter the micron-sized intergranular pores and the well-connected mould pores through the wide intergranular connecting throat by means of osmosis. This study combines the fluid injection and visualization techniques for the multi-scale evaluation of reservoir space in tight reservoirs, which is of great significance for the evaluation of microscopic sweet spots and efficient development of tight reservoirs.

Keywords pore-fracture combination; Wood's alloy; multi-stage pressure injection; filling sequence; tight reservoir

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.03.028

0 引言

随着全球经济的飞速发展, 常规油气已无法满足当前能源需求, 非常规油气成为了勘探开发的主要目标^[1-3]。与常规储层相比, 非常规储层发育微纳米级孔隙和微裂缝, 具有孔隙结构复杂, 孔喉尺度小, 储层非均质性强, 连通性差等特点, 传统的实验技术及分析方法存在明显的不适用性, 制约了资源的高效开发^[4-11]。

储层的孔喉是油气储集和运移的主要介质, 近年来随着非常规油气实验技术的进步, 微纳米级孔喉结构成为研究的热点。前人已经从定性到定量提出了多种储层孔喉结构的研究方法, 推进完善了非常规储层孔喉结构研究的技术与理论体系^[12]。定性方法主要通过薄片观察、扫描电镜观察等图像观察技术对储层孔喉类型进行描述, 是较为直观的研究方法。定量方法则以流体注入方法为主, 采用高压压汞、核磁共振、氮气吸附等实验手段, 通过测量不同条件下流体的注入特征间接表征储层孔喉结构特征^[13-19]。除此之外,

近年来兴起的数字岩心技术可以重建岩心三维模型, 进行数据提取, 从定性和定量角度同时对样品进行特征分析。无论是定性还是定量方法目前均存在较多局限性, 薄片及扫描电镜观察分辨率有限, 难以细致观察致密储层孔喉结构^[20-23]; 流体注入法均需要采用既定数学模型处理实验原始数据, 一定程度上将储层进行了理想化处理, 忽略了储层非均质性带来的影响, 且难以有效区分孔隙和微裂缝^[24-26]。数字岩心技术则存在分辨率与研究视域不可兼得的问题, 对非均质性较强的致密储层来说存在二者的选择矛盾。伍德合金注入结合扫描电镜技术可以直观观察流体在样品中的注入情况, 前人通过观察伍德合金在样品中的注入情况, 明确了不同类型孔隙的连通性特征^[13,20]。但目前学者们关注的重点仅在于通过观察合金注入与否判别孔隙是否连通, 尚未关注不同注入阶段合金的充注特征, 也就难以查明合金在各类孔隙、微裂缝中的充注顺序, 制约了致密油成藏机理的研究。

本次选取松辽盆地北部N272井白垩系泉头组三段扶余油层样品, 采用大视域图像拼接与矿物面扫描

技术相结合, 首先通过大视域下的定性观察明确了样品发育的主要孔缝组合类型, 进而创新性地采用伍德合金多级压力注入实验, 对从柱塞样品上均匀切割的小块样品分别进行不同压力条件下的伍德合金注入, 再进行扫描电镜观察, 根据扫描电镜图像特征和伍德合金注入量的变化情况, 分别从定性和定量角度明确了随注入压力增加, 合金在各类孔缝组合中的充注顺序, 通过 Washburn 公式将注入压力等效换算为致密油的充注压力, 据此建立了致密砂岩储层孔缝充注序列。

1 实验方法

1.1 样品选择及基本信息

本次选取松辽盆地北部 N272 井泉头组三段扶余油层 4 块致密砂岩样品作为研究对象。样品为三角洲前缘亚相分流河道微相的深灰色粉砂岩, 矿物组成以石英为主, 平均含量为 54.4%; 其次为长石, 平均含量为 29.7%。样品孔隙度介于 10.2%~13.3%, 平均为 11.5%; 渗透率介于 0.06~0.66 mD, 平均为 0.25 mD。样品具体信息如表 1 所示。

1.2 高温高压伍德合金多级压力注入方法

岩石中的孔隙是油气主要的赋存空间, 微裂缝是

油气运移、渗流的重要通道, 通过扫描电镜观察可以在二维尺度下由定性到定量的分析储层孔隙结构及微裂缝的发育特征^[26-27]。但通过扫描电镜只能观察到孔隙、微裂缝的发育情况, 难以表征其连通性与有效性, 并且当孔隙内部存在矿物填充时, 通过图像识别技术难以提取完整的孔隙形貌, 进而影响了孔隙结构定量表征的精度。伍德合金是一种由多种金属元素组成的高密度合金, 在 70 °C 条件下即可由固态转化为液态, 且合金对岩石具有非润湿性, 因此在高温高压条件下, 伍德合金将会以液态形式注入到岩心孔缝中, 与高压压汞实验具有类似原理。注入过程结束后, 当温度降低到 70 °C 以下时, 合金会凝固在岩石孔缝中, 在电镜下呈现明显的亮白色。由此可以看出, 合金所能够注入的孔/缝则是在当前注入压力下相互连通的储集空间; 合金注入的量越大, 样品的孔缝连通性越好。根据 Washburn 毛管压力计算公式, 通过调节注入压力大小可以将合金注入到一定孔径大小的孔缝空间中。本次采用的实验仪器为自主研制的高温高压合金注入装置, 罐体采用 GH4169 高强度合金钢, 最大可承受工作压力为 450 MPa, 对应的理论最小注入孔喉半径为 3 nm, 工作容积 60 mL, 工作温度最高为 250 °C(图 1)。装置包括手动泵、真空泵、样品罐和控制器 4 个部分, 其中真空泵用于在实验前将系统内抽至真空,

表 1 样品基础信息

Table 1 Basic information about the samples

样品编号	取样深度/m	孔隙度/%	渗透率/mD	石英含量/%	钾长石含量/%	钠长石含量/%	方解石含量/%	黏土矿物含量/%
S1	1782.9	10.29	0.0698	58.8	1.8	21.6	2.4	15.4
S2	1814.8	9.84	0.2230	40.8	3.1	29.9	1.1	25.1
S3	1782.7	13.25	0.6644	61.2	0.7	30.6	0	7.5
S4	1859.7	11.53	0.4014	56.7	3.2	27.7	2.4	10.0

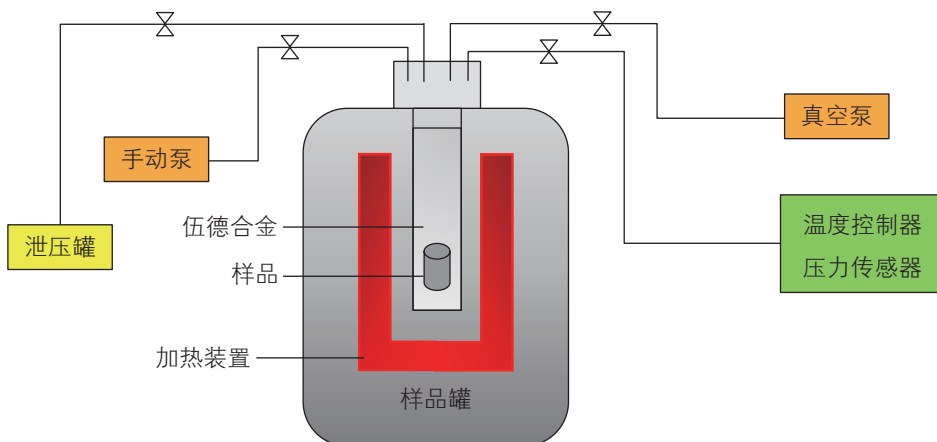


图 1 伍德合金注入装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Wood's alloy injection device

手动泵用于增加样品罐内的压力,控制器可以显示当前样品罐内的压力并控制样品罐温度。为明确致密储层孔缝充注序列,本次采用多级压力注入合金的方式,选取物性相对较好的样品S3,更容易观察到合金注入过程的差异。将样品平均分为4块,每块样品体积为 2 cm^3 ,分别以常压、25 MPa、75 MPa、100 MPa的压力进行合金注入,实验温度保持在 $120\text{ }^\circ\text{C}$,每个样品注入时间设置为24 h。注入结束并待样品罐温度恢复至室温后,取出样品并将样品表面的合金去除,进行后续切割、液氮冷却下的抛光等处理工作,样品注入合金前后均进行称重记录。

1.3 大视域图像拼接与矿物识别方法

致密储层中的孔隙与微裂缝以微纳米级别为主,因此采用扫描电镜观察需要将视域缩小,观察倍数放大。但由于致密储层非均质性强,在小视域下只能观察到局部的孔缝特征,无法对样品整体特征进行有效表征,观察视域和精度不可兼得。为了解决表征精度与尺度的问题,本次采用中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室的ZEISS Crossbeam 540对4块样品进行扫描,获得连续的高精度小视域图像,再采用ATLAS软件对图像进行自动拼接,获得完整的大视域高精度扫描电镜图像,分辨率 30 nm ,视域范围 $6\text{ mm}\times 6\text{ mm}$,在此图像中可以观察任意区域的高精度孔缝发育特征。同时,应用扫描电镜矿物定量评价技术(Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning electron microscopy, Qemscan)在同一区域采用扫描电镜配套的X射线能谱分析仪对样品表面进行扫描,将图像灰度与扫描得到的X射线强度结合得出各元素含量,根据元素信息与已有数据库进行对比,判断单点矿物类型,进而获得整个平面上的矿物分布特征。本次矿物扫描所得到的图像分辨率为 $10\text{ }\mu\text{m}$,视域范围与大面积拼接扫描电镜图像相同,为 $6\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 。

1.4 图像定量识别方法

通过图像识别技术定量提取储层中的孔喉信息,是一种储层孔隙结构研究的有效手段。未被填充的孔喉在扫描电镜下一般呈现灰度极低的黑色,由于伍德合金的密度明显大于样品中的各类矿物,因此在扫描电镜下有合金注入的孔喉会呈现灰度极大的亮白色,与周围矿物具有明显差异,此类孔喉为有效孔喉。由于每张扫描电镜图像都是不同时间拍摄的,受到显微镜状态等多种客观因素影响,不同图像的相同组分的灰度值存在差异,因此需要对图像进行逐张分析。基于分水岭算法对

扫描电镜图像进行灰度分割,其中伍德合金的灰度值大于117,未被合金注入的孔隙灰度值小于50,岩石中各类矿物基质的灰度值介于 $50\sim 117$ 之间(图2)。需要注意的是由于各类导电矿物的密度接近,因此单纯依靠扫描电镜难以逐一区分,本次研究主要的目标为低密度孔隙、微裂缝和高密度合金,矿物类型的区分主要采用了前文所述的Qemscan技术。通过对多级压力合金注入后每个样品的扫描电镜图像进行定量提取,可以得到各样品中的合金注入孔隙、合金未注入孔隙在平面上的相对占比,评价不同压力条件下合金的注入效率,表征各类孔隙、微裂缝的连通性。

2 结果与讨论

2.1 孔缝组合类型及发育特征

区内泉头组三段扶余致密砂岩储层发育多种类型的孔隙和微裂缝,且存在多种孔缝组合类型^[28]。根据成因可将区内致密储层孔隙划分为粒间孔、溶蚀孔、晶间孔3种类型,将致密储层微裂缝划分为粒间微裂缝、粒内破裂缝、黏土矿物收缩缝3种类型,理论上存在9种主要的孔缝组合类型。在大面积拼接扫描电镜图像中统计发现,研究区主要发育粒间孔-黏土矿物收缩缝组合、粒间孔-脆性矿物粒间缝/粒内缝组合、晶间孔-黏土矿物收缩缝组合3种类型的孔

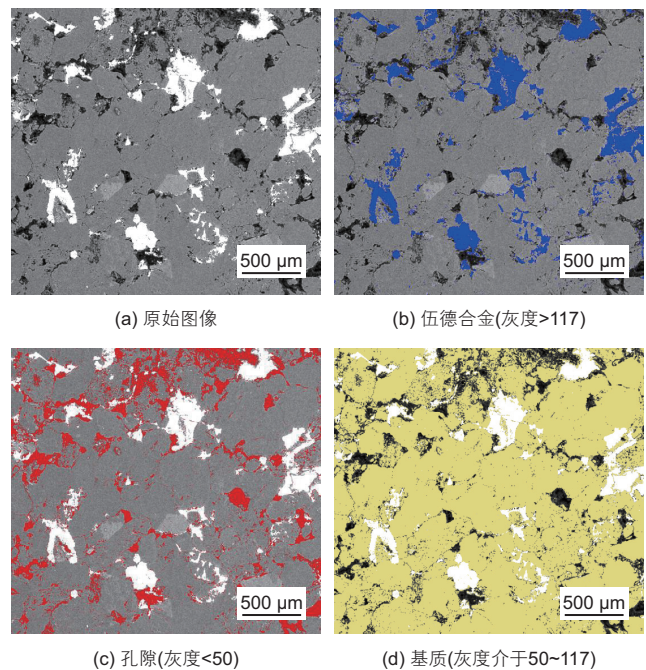


图2 基于图像灰度对不同组分进行阈值分割的结果
Fig. 2 The results of threshold segmentation of different components based on image grayscale

缝组合。

(1) 粒间孔-黏土矿物收缩缝组合

粒间孔是岩石矿物颗粒与颗粒之间的孔隙，是压实过程中形成的，有时脆性矿物颗粒发生破碎后，在颗粒内部也可见到少量次生的粒内孔。此类孔隙形态多为三角形或多边形，具有不规则形态。脆性矿物的存在对残余粒间孔起到了建设性作用，脆性矿物的支撑作用使得残余粒间孔得以保存。黏土矿物收缩缝形成于黏土失水之后，由于黏土矿物塑性较强，因此其失水会导致体积减小，当与其相邻的矿物体积不变时就会在二者之间形成收缩缝。由于失水对石英、长石

等脆性矿物影响不明显，因此其体积相对变化较小。通过观察发现黏土矿物收缩缝多发育在黏土矿物与脆性颗粒之间，开度以微米级为主。粒间孔、黏土矿物收缩缝均发育于矿物颗粒之间，多相互连通形成粒间孔-黏土矿物收缩缝组合；由于黏土矿物收缩缝开度较大，因此此类孔缝组合具有大孔粗缝特征，是研究区主要的孔缝组合类型(图 3a、d、g)。

(2) 粒间孔-脆性矿物粒内缝/粒内缝组合

致密储层岩性多以长石质石英砂岩、岩屑质石英砂岩为主，因此可见到平直的、规则发育的脆性矿物粒内缝，该类粒内缝主要发育于石英与长石矿物之间、

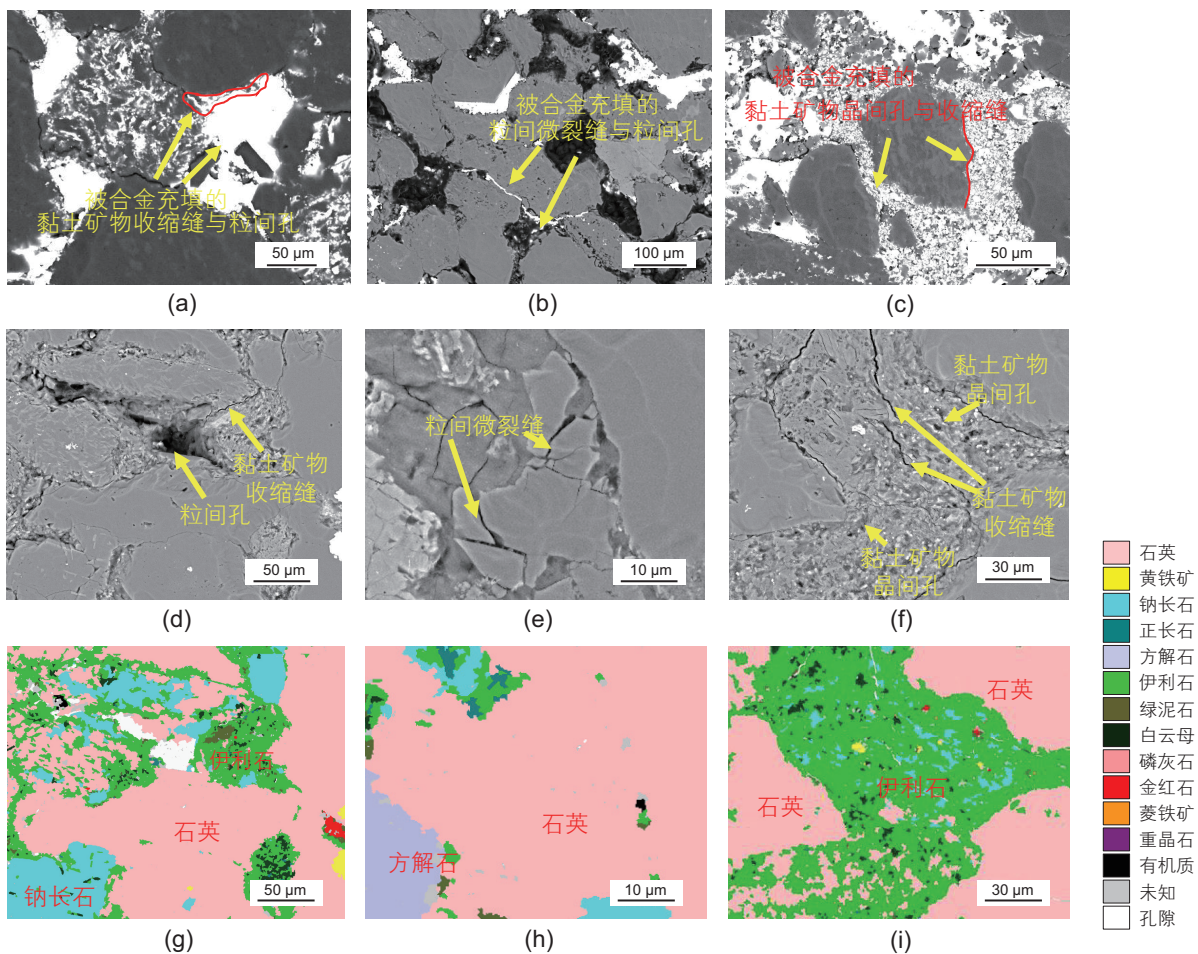


图 3 松辽盆地扶余油层主要孔缝组合类型 (a)、(d)、(g) 分别为黏土矿物收缩缝与粒间孔组合充填合金后的图像、扫描电镜图像、Qemscan 图像, N272 井, 1782.7 m, 粉砂岩; (b)、(e)、(h) 分别为粒间微裂缝与粒间孔组合充填合金后的图像、扫描电镜图像、Qemscan 图像, N272 井, 1782.7 m, 粉砂岩; (c)、(f)、(i) 分别为黏土矿物晶间孔与收缩缝组合充填合金后的图像、扫描电镜图像、Qemscan 图像, N272 井, 1814.8 m, 粉砂岩

Fig. 3 The pore and fracture combination types in the Fuyu Formation of the Songliao Basin. (a), (d), and (g) are images of clay mineral shrinkage fractures and intergranular pores combination after alloy filling, scanning electron microscope images, and Qemscan images, respectively, well N272, 1782.7 m, siltstone; (b), (e), and (h) are images of intergranular microcracks and intergranular pores combination after alloy filling, scanning electron microscope images, and Qemscan images, respectively, well N272, 1782.7 m, siltstone; (c), (f), and (i) are images of intergranular pores and shrinkage fractures combination in clay minerals after alloy filling, scanning electron microscope images, and Qemscan images, respectively, well N272, 1814.8 m, siltstone

石英颗粒之间、长石矿物之间，是压实过程中脆性矿物颗粒之间未被完全压实的空间。粒内破裂缝则是由于压实作用导致矿物颗粒发生破碎产生的。值得注意的是，由于矿物破碎产生的粒内破裂缝与粒间微裂缝特征相似，因此本次把粒内破裂缝和粒间微裂缝统称为粒间微裂缝。当粒间微裂缝与粒间孔相互连通时，形成粒间孔-脆性矿物粒间缝/粒内缝组合，该类组合发育微米级粒间孔与开度较小的微纳米级粒间微裂缝，具有大孔细缝特征，在研究区发育也较为普遍(图 3b、e、h)。

(3) 晶间孔-黏土矿物收缩缝组合

黏土矿物晶间孔发育于黏土矿物内部，主要以伊蒙混层、绿泥石和伊利石晶间孔为主，且其孔隙和面孔率大小依次降低^[29]。区内致密储层的黏土矿物类型主要为伊利石，多以针状充填于石英、长石之间，形成形态复杂的微纳米级黏土矿物晶间孔。从扫描电镜图像中可以发现，黏土矿物晶间孔具有孔径小、连通性差的特点，且与黏土矿物内的收缩缝交错发育。此外，针状伊利石、片状蒙脱石矿物的内部易形成平行板状的层间缝，由于该类层间缝发育于黏土矿物内部，因此难以与粒间孔等孔隙形成孔缝组合，多见黏土矿物收缩缝与黏土矿物晶间孔组合形成局部连通的黏土矿物内部孔缝组合，连通性较差(图 3c、f、i)。

2.2 伍德合金与原油注入压力的等效转化

伍德合金是一种高密度金属，与原油的性质存在较大差异，因此伍德合金注入实验中对应的注入压力与孔喉半径需根据合金性质与原油性质进行转化，才能得到注入原油时对应的压力与孔喉半径。资料显示伍德合金的表面张力为 295 mN/m，而原油表面张力仅为 40 mN/m。研究区样品以水润湿为主，伍德合金对岩石样品具有非润湿性，采用加热喷枪将伍德合金熔融并滴于样品的光滑表面，测定得到伍德合金的润湿角平均为 125°(图 4)，而原油的润湿角为 130°，二者差异不大。采用 Washburn 方程将本次伍德合金的注入压力等效为原油的注入压力，Washburn 方程为：

$$p_c = \frac{2\sigma \cos\theta}{r} \quad (1)$$

式中， p_c 为孔喉对应的毛细管压力，MPa； σ 为注入流体与空气的界面张力，N/m； θ 为流体与岩石的接触角，°； r 为孔隙半径， μm 。

当所注入的孔喉半径相同时，联立合金与原油所对应的 Washburn 公式，可得到原油注入压力的等效公式为：

$$p_{co} = \frac{\sigma_w \cos\theta_w}{\sigma_o \cos\theta_o} \cdot p_{cw} \quad (2)$$

式中， p_{co} 为注入原油时孔喉对应的毛细管压力，MPa； p_{cw} 为注入伍德合金时孔喉对应的毛细管压力，MPa； σ_w 为伍德合金表面张力，取 0.295 N/m； θ_w 为伍德合金与样品的接触角，取 125°； σ_o 为原油的表面张力，取 0.04 N/m； θ_o 为原油与样品的接触角，取 130°。

根据上述公式换算后，得到合金注入压力 25 MPa、75 MPa、100 MPa 分别等效于原油注入压力 3.5 MPa、10.7 MPa、14.3 MPa。

2.3 伍德合金多级压力注入结果

源储压差是油气充注的主要动力，不同压差条件下油气突破毛细管压力所能进入的储集空间不同，因此明确不同充注压力下油气的充注特征，对于在勘探开发中结合地层压力寻找油气成藏微观甜点具有重要意义^[30]。通过对样品进行伍德合金多级压力注入，可以观察不同压力条件下合金在各类孔缝组合中的充注顺序及不同阶段的充注特征，进而明确不同类型孔缝组合在油气充注过程中的优先级，以及不同地层压力条件下，致密储层中油气的有效储集空间分布特征。

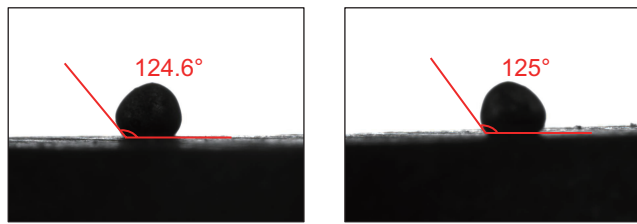
定义伍德合金的注入效率为合金注入量与注入前样品重量之比，用于表示当前注入压力下合金的注入情况。可见随注入压力提升，注入效率呈现先快速增大再缓慢增大、最后趋于不变的趋势——与高压压汞实验的进汞曲线具有相似性，表明在孔缝空间有限的条件下，随注入压力的提升，合金逐渐注入达到饱和。根据曲线变化趋势来看，100 MPa 的注入压力能够将合金几乎注满所有孔隙和微裂缝中，此时对应的原油注入压力为 14.3 MPa(图 5)。需要注意的是，本次扫描电镜采用的分辨率为 0.3 μm ，主要研究对象为孔喉半径大于 0.3 μm 的孔隙和微裂缝。

对不同注入压力注入合金后的样品进行扫描电镜观察，并利用图像处理技术计算二维尺度下注入合金与未注入合金的孔喉直径分布曲线。在常压条件下，合金主要以渗吸的方式进入样品中，在平面上呈点状分布于微米级粒间孔中(图 6)，有合金注入的有效孔喉直径分布于 20~100 μm 之间，占比为 2.8%，小于 20 μm 的孔隙无法注入合金，占比达 97.2%(图 8)。由于粒间微裂缝与黏土矿物收缩缝中均未见有合金注入，故此时合金仅通过孔隙之间的孔隙缩小型喉道充注至储集空间中，喉道为主要的渗流通道。

当注入压力提升至 25 MPa 时，对应的原油注入压力为 3.5 MPa，合金开始向 2~20 μm 的孔喉中注入，

有效孔喉占比 24.4 %，尚未注入合金的无效孔喉比常压注入时明显减少，占比为 75.6 %，粒间孔、粒缘缝及黏土矿物收缩缝中开始出现合金，表明合金通过微米级粒缘缝、黏土矿物收缩缝向与其相连通的粒间孔中充注(图 7)。有效孔喉直径均匀分布于 2~80 μm 之间。此时除缩颈状喉道外，10 μm 左右的粒缘缝、黏土矿物收缩缝也是有效的渗流通道。

注入压力为 75 MPa 时，对应的原油注入压力为 10.7 MPa，此时合金大量注入样品，在压力作用下通



(a) 第一次测量 (b) 第二次测量

图 4 松辽盆地扶余油层伍德合金与样品之间的接触角
Fig. 4 The contact angle between the Fuyu Formation and samples in the Songliao Basin

过微米级粒缘缝、黏土矿物收缩缝充注至具有纳米级储集空间的黏土矿物中，因此除粒间孔、粒缘缝外，可见黏土矿物内部的纳米级黏土矿物收缩缝、晶间孔

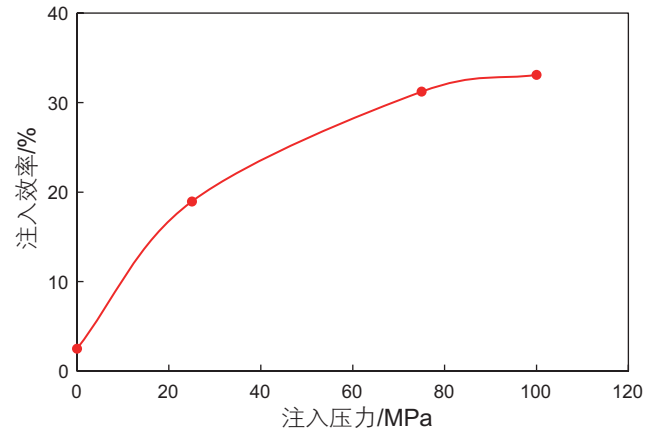
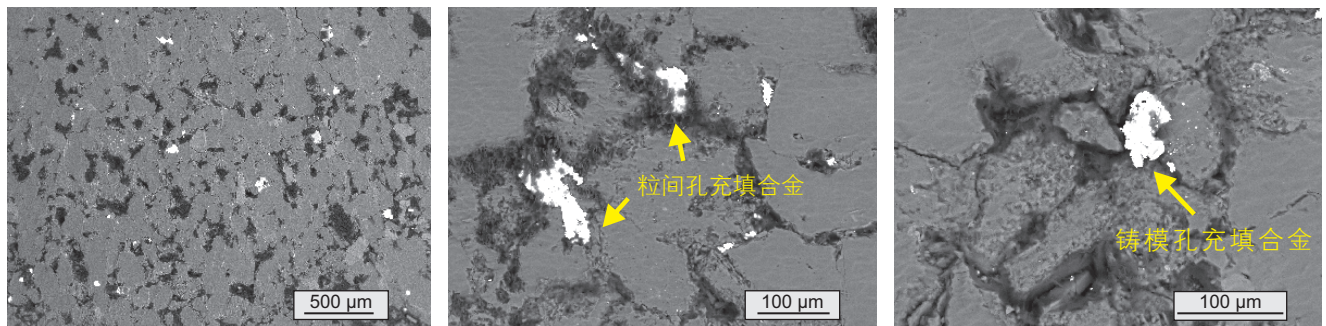


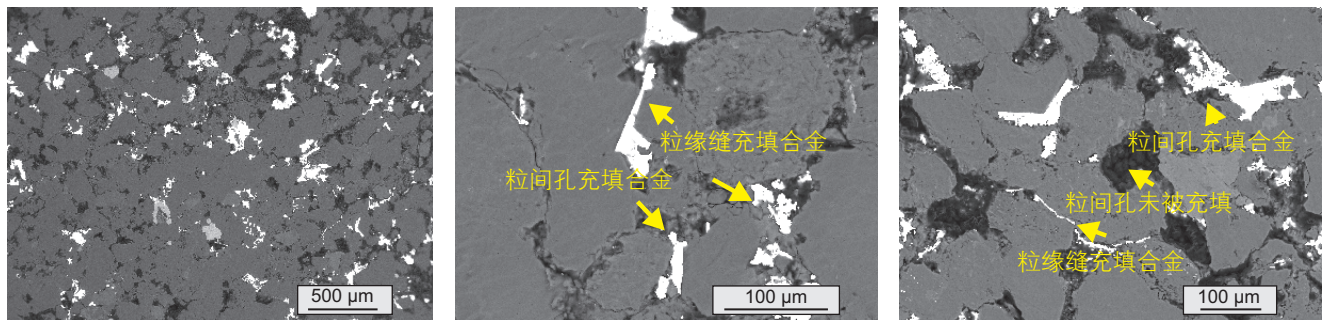
图 5 松辽盆地扶余油层不同注入压力条件下样品的伍德合金注入效率

Fig. 5 Injection efficiency of Wood's alloy in samples from the Fuyu reservoir in the Songliao Basin under different injection pressure conditions



(a) 常压合金注入的大视域图像 (b) 合金注入粒间孔 (c) 合金注入铸模孔

图 6 松辽盆地扶余油层常压伍德合金注入后样品扫描电镜图像，N272 井，1782.7 m，粉砂岩
Fig. 6 Scanning electron microscopy images of samples from the Fuyu reservoir in the Songliao Basin after injection with Wood's alloy at atmospheric pressure, well N272, 1782.7 m, siltstone



(a) 25 MPa合金注入的大视域图像 (b) 合金注入粒间孔、粒缘缝 (c) 部分粒间孔未被充填

图 7 松辽盆地扶余油层 25 MPa 注入压力下伍德合金注入后样品扫描电镜图像，N272 井，1782.7 m，粉砂岩
Fig. 7 Scanning electron microscopy images of samples from the Fuyu reservoir in the Songliao Basin after injection with Wood's alloy at 25 MPa injection pressure, well N272, 1782.7 m, siltstone

中有合金充填, 仅有粒内溶蚀孔、部分纳米级粒缘缝、粒内破裂缝未被充填, 有效孔喉占比 99.8%, 注入合金的有效孔喉直径分布频率峰值位于 5 μm 左右, 纳米级粒缘缝、黏土矿物内部的收缩缝成为有效的渗流通道(图 8)。

注入压力达 100 MPa 时, 对应的原油注入压力为 14.3 MPa, 此注入压力条件下, 样品扫描电镜图像与注入压力为 75 MPa 时的差异较小, 特征较为相似, 可观察到部分纳米级粒间微裂缝开始出现合金充填, 粒内溶孔始终未被合金充填(图 9), 因此认为当注入压力为 75 MPa 时, 几乎所有连通的孔隙、微裂缝均已被动用, 对应的致密油源储压差为 10.7 MPa, 是研究区致密油储层的有效驱替压差。

通过对合金充注前后的样品扫描电镜图像进行定量分析, 可以发现常压合金注入后, 合金所注入的孔隙孔径分布在 20~100 μm , 随着注入压力增大, 合金所注入孔隙的孔径分布峰值逐渐变小, 直至注入压力达 75 MPa 时, 合金所注入孔隙的孔径分布曲线形态与样品所有孔隙的孔径分布曲线趋于一致, 表明几乎所有孔隙空间均被合金注入(图 10)。

2.4 致密储层孔缝充注序列

扶余油层为上生下储的致密油储层, 油气来源于上覆青山口组泥页岩, 在超压条件下油气向下运移成藏, 主要有上生下储和侧向运聚两种成藏模式^[31-32]。在仅考虑油气垂向运移的前提下, 扶余油层顶部由于埋深较浅, 地层压力较低, 为高源储压差条件下的致密油充注, 随埋深增大, 地层压力逐渐增大, 源储压差逐渐减小, 致密油充注动力减小。据此建立了基于孔缝组合类型的致密砂岩储层序列充注模式(图 11), 即在高源储压差条件下, 致密油能够充注至纳米级的黏土矿物晶间孔-收缩缝中, 随源储压差降低, 致密油逐渐难以充注至纳米级孔缝中。当源储压差降至最低时, 致密油仅能通过渗吸的方式通过宽大的孔间连通喉道进入微米级粒间孔及连通性较好的铸模孔中, 此时致密油充注效率最低。从不同深度含油样品的环境扫描电镜图像中可以观察到, 高源储压差下致密油以膜状赋存在黏土矿物晶间孔中, 随源储压差降低, 可见致密油以滴状赋存在粒间孔中, 且源储压差越大, 越能在更微小的粒间孔中见到油滴。根据不同源储压差选择对应的油气有效充注空间作为致密油微观甜点, 有利于寻找致密储层微观甜点

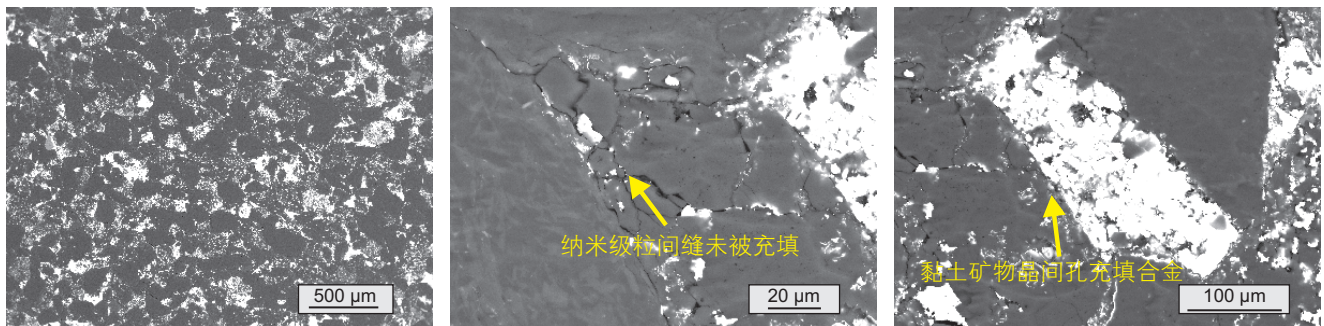


图 8 松辽盆地扶余油层 75 MPa 注入压力下伍德合金注入后样品扫描电镜图像, N272 井, 1782.7 m, 粉砂岩

Fig. 8 Scanning electron microscopy images of samples from the Fuyu reservoir in the Songliao Basin after injection with Wood's alloy at 75 MPa injection pressure, well N272, 1782.7 m, siltstone

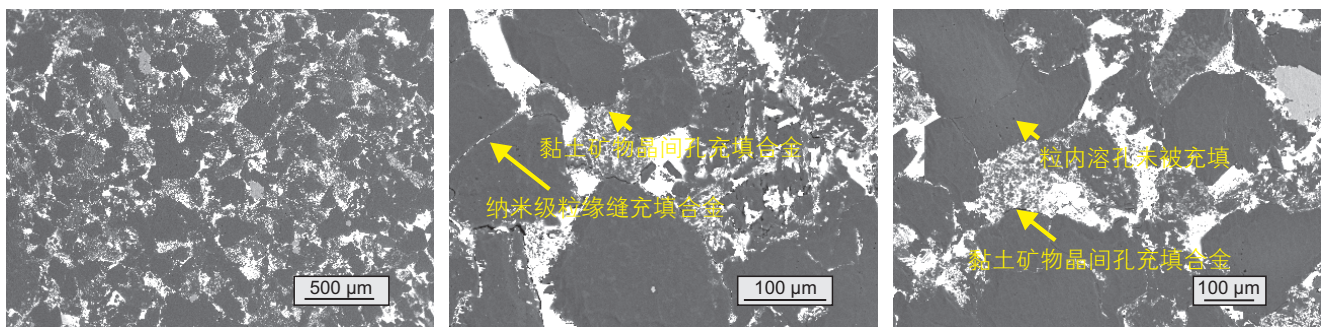


图 9 松辽盆地扶余油层 100 MPa 注入压力下伍德合金注入后样品扫描电镜图像, N272 井, 1782.7 m, 粉砂岩

Fig. 9 Scanning electron microscopy images of samples from the Fuyu reservoir in the Songliao Basin after injection with Wood's alloy at 100 MPa injection pressure, well N272, 1782.7 m, siltstone

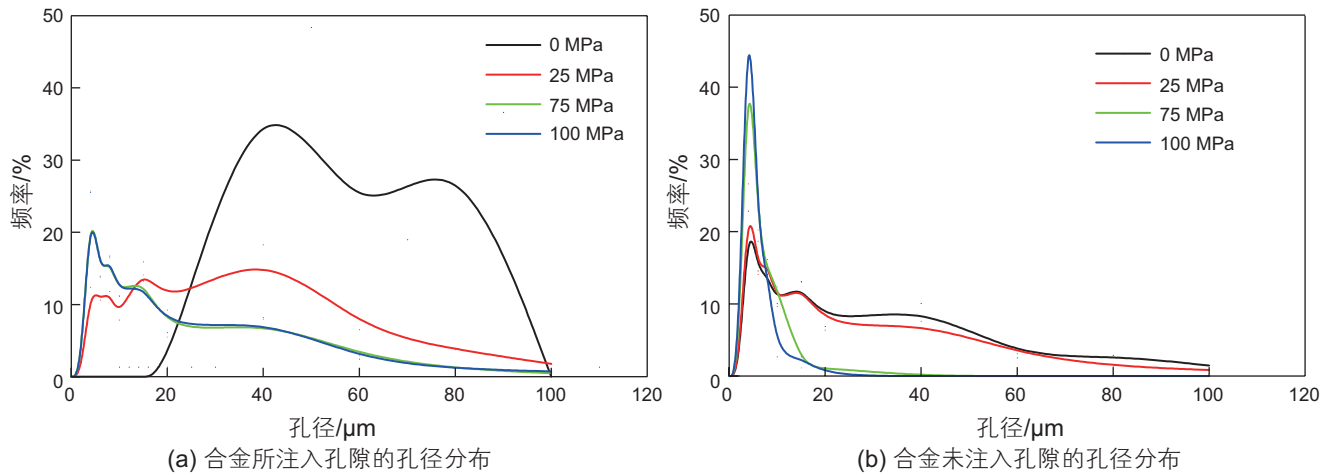


图 10 松辽盆地扶余油层合金注入与未注入孔隙的孔径分布特征
 Fig. 10 Pore size distribution characteristics of with alloy injection and uninjected pores in the Fuyu Reservoir of the Songliao Basin

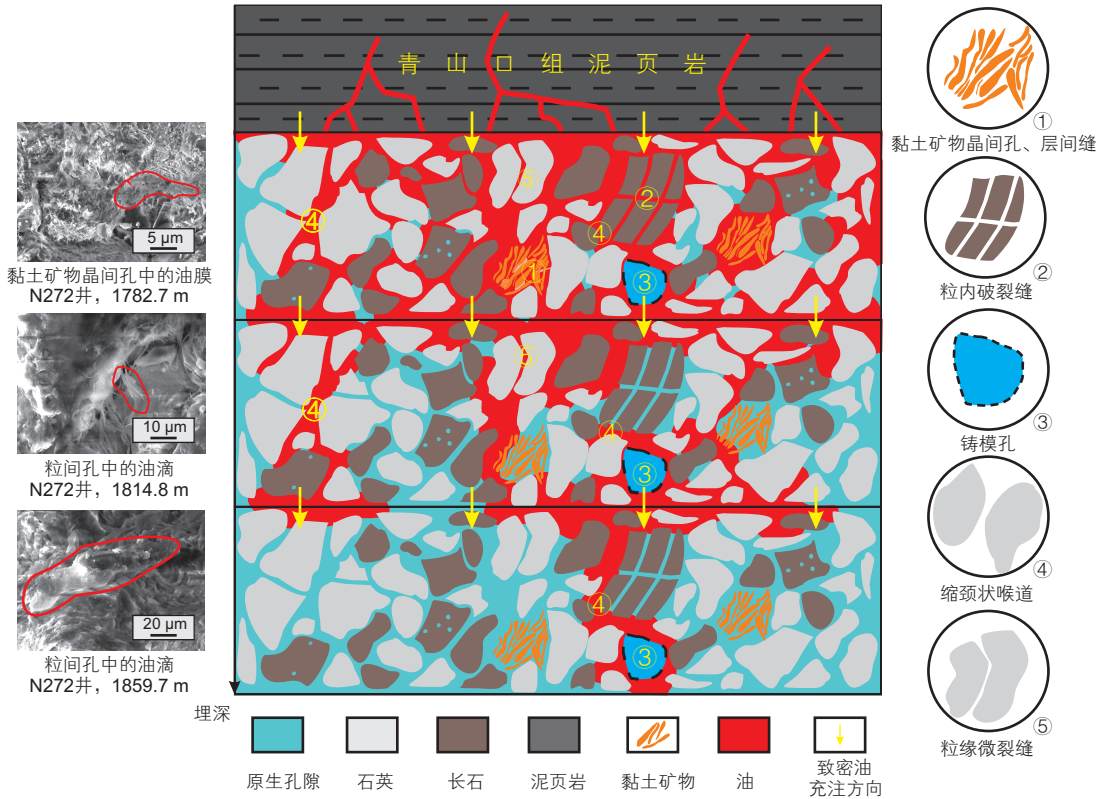


图 11 松辽盆地扶余油层孔缝序列充注模式图
 Fig. 11 Pore-fracture filling sequences model diagram for the Fuyu Reservoir in the Songliao Basin

区，降低致密储层勘探开发成本。

3 结论

(1) 松辽盆地北部扶余油层白垩系泉头组致密砂岩储层发育 3 种类型的孔缝组合：粒间孔-黏土矿物收缩缝组合、粒间孔-脆性矿物粒间缝/粒内缝组合、晶

间孔-黏土矿物收缩缝组合。

(2) 基于伍德合金多级压力注入实验，模拟了真实地层条件下的致密油充注情况。研究区扶余油层有效驱替压差为 10.7 MPa，在此压差下致密油在几乎所有连通的孔隙、微裂缝能够有效充注。

(3) 源储压差决定了致密油在微观孔缝空间种的充注顺序，高源储压差条件下，致密油主要充注至纳米

级黏土矿物晶间孔-收缩缝;随着压差减小,充注至纳米级孔隙的难度增加,最终在压差趋于零时,致密油仅能通过渗吸进入微米级粒间孔、铸模孔,充注效率降低,据此建立了考虑源储压差的致密砂岩储层孔

缝序列充注模式。目前所建立的致密砂岩储层孔缝充注模式仍需进一步完善,未来的研究将在源储压差对孔缝充注顺序的影响机制方面继续深入,结合实际地质条件揭示源储压差对致密油成藏的控制作用。

参考文献

- [1] 贾承造, 邹才能, 李建忠, 等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J]. 石油学报, 2012, 33(03): 343-350. [JIA C Z, ZOU C N, LI J Z, et al. Assessment criteria, main types, basic features and resource prospects of the tight oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(03): 343-350.]
- [2] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 2012, 33(02): 173-187. [ZOU C N, ZHU R K, WU S T, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(02): 173-187.]
- [3] 邹才能, 杨智, 朱如凯, 等. 中国非常规油气勘探开发与理论技术进展[J]. 地质学报, 2015, 89(06): 979-1007. [ZOU C N, YANG Z, ZHU R K, et al. Progress in China's unconventional oil & gas exploration and development and theoretical technologies[J]. Acta Geologica Sinica, 2015, 89(06): 979-1007.]
- [4] 蒋裕强, 陈林, 蒋婵, 等. 致密储层孔隙结构表征技术及发展趋势[J]. 地质科技情报, 2014, 33(03): 63-70. [JIANG Y Q, CHEN L, JIANG C, et al. Characterization techniques and trends of the pore structure of tight reservoirs[J]. Geological Science and Technology Information, 2014, 33(03): 63-70.]
- [5] 朱如凯, 吴松涛, 苏玲, 等. 中国致密储层孔隙结构表征需注意的问题及未来发展方向[J]. 石油学报, 2016, 37(11): 1323-1336. [ZHU R K, WU S T, SU L, et al. Problems and future works of porous texture characterization of tight reservoirs in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(11): 1323-1336.]
- [6] 罗蛰潭, 王允诚, 邓小康, 等. 我国主要碳酸盐岩油气田储层孔隙结构的研究及进展[J]. 石油勘探与开发, 1981(5): 40-51. [LUO Z T, WANG Y C, DENG X K, et al. Study on pore structure of main carbonate oil and gas fields in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 1981(5): 40-51.]
- [7] 贺承祖, 华明琪. 储层孔隙结构的分形几何描述[J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(1): 15-23. [HE C Z, HUA M Q. Fractal geometry description of reservoir pore structure[J]. Oil & Gas Geology, 1998, 19(1): 15-23.]
- [8] 邹才能, 朱如凯, 白斌, 等. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值[J]. 岩石学报, 2011, 27(6): 1857-1864. [ZOU C N, ZHU R K, BAI B, et al. First discovery of Nano-pore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(6): 1857-1864.]
- [9] 王伟, 陈朝兵, 许爽, 等. 鄂尔多斯盆地延长组致密砂岩不同尺度孔喉分形特征及其控制因素[J]. 石油实验地质, 2022, 44(1): 33-40. [WANG W, CHEN Z B, XU S, et al. Fractal characteristics and its controlling factors of pore-throat with different scales in tight sandstones of the Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(1): 33-40.]
- [10] 贾承造, 姜林, 赵文. 页岩油气革命与页岩油气、致密油气基础地质理论问题[J]. 石油科学通报, 2023, 8(06): 695-706. [JIA C Z, JIANG L, ZHAO W. The shale revolution and basic geological theory problems of shale and tight oil and gas[J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8(06): 695-706.]
- [11] 何宗杭, 陆子杰, 李玉, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长₇油层组陆相页岩纹层及裂缝分布特征的量化表征[J]. 石油科学通报, 2024, 9(01): 21-34. [HE Z H, LU Z J, LI Y, et al. Quantitative characterization of the distribution characteristics of continental shale laminae and cracks in the Chang₇ Oil Group of Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 9(01): 21-34.]
- [12] TANG X L, JIANG Z X, JIANG S, et al. Heterogeneous nanoporosity of the Silurian Longmaxi Formation shale gas reservoir in the Sichuan Basin using the QEMSCAN, FIB-SEM, and nano-CT methods[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 78: 99-109.
- [13] 唐相路, 萧汉敏, 姜振学, 等. 基于合金注入与大视域图像技术的致密储层孔隙与喉道表征[J]. 石油实验地质, 2023, 45(01): 185-192. [TANG X L, XIAO H M, JIANG Z X, et al. Pore and throat characterization of tight reservoirs based on the methods of alloy injection and large-field image stitching[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(01): 185-192.]
- [14] 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. [ZOU C N, YANG Z, TAO S Z, et al. Nano-hydrocarbon and the accumulation in coexisting source and reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 13-26.]
- [15] CHALMERS G R, BUSTIN R M, POWER I M. Characterization of gas shale pore systems by porosimetry pycnometry surface area and field emission scanning electron microscopy/transmission electron microscopy image analyses: examples from the Barnett Woodford Haynesville Marcellus and Doig units[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1099-1119.

- [16] CURTIS M E, SONDERGELD C H, AMBROSE R J, et al. Microstructural investigation of gas shales in two and three dimensions using nanometer-scale resolution imaging[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(4): 665–677.
- [17] LOUCKS R G, REED R M, RUPPEL S C, et al. Spectrum of pore types and networks in mudrocks and a descriptive classification for matrix-related mudrock pores[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(6): 1071–1098.
- [18] 朱如凯, 白斌, 崔景伟, 等. 非常规油气致密储集层微观结构研究进展[J]. 古地理学报, 2013, 15(5): 615–623. [ZHU R K, BAI B, CUI J W, et al. Research advances of microstructure in unconventional tight oil and gas reservoirs[J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(5): 615–623.]
- [19] LEI Y, LUO X, WANG X Et al. Characteristics of silty laminae in Zhangjiatan Shale of southeastern Ordos Basin, China: Implications for shale gas formation[J]. AAPG Bulletin, 2015, 99(4): 661–687.
- [20] 秦洋. 致密储层微观孔隙结构与连通性研究—以鄂尔多斯盆地长7储层为例[D]. 南京大学, 2022. [QIN Y. A study on micro pore structure and pore-throat connectivity in tight sandstone reservoir: A case of the Chang 7 Reservoir in Ordos Basin[D]. Nanjing University, 2022.]
- [21] 马天寿, 陈平. 随钻地层测试压力响应数学模型及物理实验考察[J]. 地球物理学报, 2014, 57(7): 2321–2333. [MA T S, CHEN P. Mathematical model and physical experimental research for pressure response of formation testing while drilling[J]. Chinese Journal of Geophysic, 2014, 57(7): 2321–2333.]
- [22] 刘向君, 朱洪林, 梁利喜. 基于微CT技术的砂岩数字岩石物理实验[J]. 地球物理学报, 2014, 57(4): 1133–1140. [LIU X J, ZHU H L, LIANG L X. Digital rock physics of sandstone based on micro-CT technology[J]. Chinese Journal of Geophysic, 2014, 57(4): 1133–1140.]
- [23] CURTIS M E, AMBROSE R J, SONDERGELD C H, et al. Structural characterization of gas shales on the micro-and nano-scales[C]. Society of Petroleum Engineers. Society of Petroleum Engineers, 2010.
- [24] 孔星星, 肖佃师, 蒋恕, 等. 联合高压压汞和核磁共振分类评价致密砂岩储层: 以鄂尔多斯盆地临兴区块为例[J]. 天然气工业, 2020, 40(3): 38–47. [KONG X X, XIAO D S, JIANG S, et al. Application of the combination of high pressure mercury injection and nuclear magnetic resonance to the classification and evaluation of tight sandstone reservoirs: a case study of the Linxing block in the Ordos Basin[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(3): 38–47.]
- [25] 王琨, 周航宇, 赖杰, 等. 核磁共振技术在岩石物理与孔隙结构表征中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(2): 101–114. [WANG K, ZHOU H Y, LAI J, et al. Application of NMR technology in characterization of petrophysics and pore structure [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(2): 101–114.]
- [26] 尤源, 牛小兵, 辛红刚, 等. 国外致密油储层微观孔隙结构研究及其对鄂尔多斯盆地的启示[J]. 石油科技论坛, 2013, 32(1): 12–18. [YOU Y, NIU X B, XIN H G, et al. Research on micro pore structure of overseas tight oil reservoir and its influence on Ordos Basin[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2013, 32(1): 12–18.]
- [27] 黄兴, 倪军, 李响, 等. 致密油藏不同微观孔隙结构储层CO₂驱动用特征及影响因素[J]. 石油学报, 2020, 41(7): 853–864. [HUANG X, NI J, LI X, et al. Characteristics and influencing factors of CO₂ flooding in different microscopic pore structures in tight reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(7): 853–864.]
- [28] 耳闯, 赵靖舟, 姚泾利, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长7油层组页岩-致密砂岩储层孔缝特征[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(03): 341–353. [ER C, ZHAO J Z, YAO J L, et al. Characterization of pores and fracture networks in organic-rich shale and tight sandstone of the Chang-7 member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin. Oil & Gas Geology, 2016, 37(03): 341–353.]
- [29] 汪贺, 师永民, 张志强, 等. 致密砂岩储层黏土矿物晶间孔隙特征及其对物性影响的研究——以鄂尔多斯盆地延长组长6油层组为例[J]. 北京大学学报自然科学版, 2020, 56(4): 659–666. [WANG H, SHI Y M, ZHANG Z Q, et al. Characteristics of nano-pores of clay minerals in tight reservoirs and their effects on reservoir properties: A Case study of Yanchang-6 oil formation in Ordos Basin[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2020, 56(4): 659–666.]
- [30] 马中良, 郑伦举, 秦建中, 等. 盆地沉降、抬升过程中源储压差的生排烃效应[J]. 石油实验地质, 2011, 33(04): 402–407. [MA Z L, ZHENG L J, QIN J Z, et al. Hydrocarbon generation and expulsion caused by pressure difference between source rock and reservoir during basin subsiding and uplifting[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(04): 402–407.]
- [31] 蒙启安, 赵波, 陈树民, 等. 致密油层沉积富集模式与勘探开发成效分析——以松辽盆地北部扶余油层为例[J]. 沉积学报, 2021, 39(01): 112–125. [MENG Q A, ZHAO B, CHEN S M, et al. Sedimentary Enrichment Mode and Effect Analysis of Exploration and Development: A case study of Fuyu reservoir tight oil in northern Songliao Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(01): 112–125.]
- [32] 郭艳平. 朝长地区扶扬油层油气成藏模式及控制因素[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(05): 171–175+407. [GUO Y P. Hydrocarbon accumulation pattern and controlling factors of Fuyu reservoir in Chaohang area of Songliao Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technol-ogy, 2010, 32(05): 171–175+407.]