

# 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

唐相路<sup>1</sup>, 萧汉敏<sup>2</sup>, 姜振学<sup>1</sup>, 刘学伟<sup>2</sup>, 杨再权<sup>1</sup>, 刘格<sup>1</sup>, 张帆<sup>1</sup>

1. 中国石油大学(北京) 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;

2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

**摘要:**致密油气是我国油气资源的重要组成部分,对其孔喉结构的研究有利于推进致密油气地质理论的丰富和完善。以鄂尔多斯盆地三叠系延长组致密储层为例,通过高温高压合金注入装置,结合大视域图像拼接技术与图像孔隙提取方法,建立了致密储层孔隙结构表征新方法。结果表明,将合金注入致密储层孔隙中可以较好地反映孔隙连通性特征,使孔隙形貌和结构更加容易辨别。大视域图像拼接方法解决了孔隙分布非均质性强、小视域观察代表性差的问题。鄂尔多斯盆地延长组致密储层主要发育粒间孔、粒内孔和粒间—粒内混合孔,其中粒间孔最为发育。孔隙缩小型喉道、缩颈型喉道、管束型喉道、片状喉道和弯片状喉道是其发育的 5 种喉道类型,其中弯片状喉道最为发育。石英和长石的孔隙明显大于其他矿物孔隙,对致密储层面孔率的贡献率达 74%,是致密油气重要的赋存空间。

**关键词:**孔喉结构;合金注入;大视域图像;孔喉提取;致密储层

中图分类号:TE135

文献标识码:A

## Pore and throat characterization of tight reservoirs based on the methods of alloy injection and large-field image stitching

TANG Xianglu<sup>1</sup>, XIAO Hanmin<sup>2</sup>, JIANG Zhenxue<sup>1</sup>, LIU Xuewei<sup>2</sup>, YANG Zaiquan<sup>1</sup>, LIU Ge<sup>1</sup>, ZHANG Fan<sup>1</sup>

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

2. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

**Abstract:** Tight oil and gas is an important part of China's oil and gas resources, and the study of related pore-throat structure is conducive to the enrichment and improvement of tight oil and gas geological theory. Taking the tight reservoir of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin as an example, combined with large-field image stitching method and image pore extraction method, this paper established a new method for pore-throat structure characterization of tight reservoir with high-temperature and high-pressure alloy injection. Results show that the alloy injected into the pores of tight reservoirs can reflect the characteristics of pore connectivity better, and the pore morphology and structure are easier to be identified. The large-field image stitching method solves the problem of strong heterogeneity of pore distribution and poor representativeness of small-field observation. The tight reservoirs of the Yanchang Formation in the Ordos Basin are mainly composed of intergranular pores, intra-granular pores, and intergranular-intragranular mixed pores, among which the intergranular pores are mostly developed. There are five types of throats, including pore shrinkage throat, neck constricted throat, bundle throat, sheet throat and curved sheet throat, among which the curved sheet throat is mostly developed. The porosity of quartz and feldspar is significantly larger than that of other minerals, contributing 74% to the surface porosity of tight reservoir, and is an important occurring space for tight oil and gas.

**Key words:** pore-throat structure; alloy injection; large-field image; pore-throat extraction; tight reservoir

储层孔喉结构是油气地质理论的重要组成部分,自油气发现以来,一直是地质研究的重点和难点<sup>[1-4]</sup>。特别是非常规油气发展起来之后,微米—纳米级的孔喉结构已成为近年来研究的热点<sup>[5-13]</sup>。

针对储层孔喉结构研究,前人提出了很多方法,比如岩石薄片光学显微镜观察、扫描电镜观察、高压压汞测试、氮气吸附测试、孔隙度和渗透率测试、核磁共振测试等<sup>[14]</sup>。前人从定性到定量提出了一系列技术方法和理论,促进了对储层孔喉结构的认识。但是高压压汞、核磁共振等测试手段只能得到孔喉的“盲盒”数据,需要基于一定的数学模型去解释储层的孔喉结构特征,而储层的孔喉非均质性强,单一的数学模型具有一定的局限性<sup>[15-16]</sup>。光学显微镜和扫描电镜等观察手段可以直观地看到储层孔喉的形貌特征。光学显微镜可以通过观察铸体薄片分析储层孔隙大小、连通性等特征,但是分辨率有限,对致密储层效果不好。扫描电镜可以解决分辨率问题,但是在孔喉连通性和定量表征方面存在不足<sup>[17-18]</sup>。因此,选取鄂尔多斯盆地 YJ422 井延长组长 6 段致密储层样品,通过自主研发的一套高温高压合金注入装置,将致密储层中的孔喉注入合金,结合图像孔喉提取方法,解决了孔喉连通性和定量表征的问题。通过大视域图像拼接的方法,解决了储层孔喉结构代表性的问题。

## 1 实验方法

### 1.1 样品选择及基本信息

本次实验选取了鄂尔多斯盆地西南部 YJ422 井三叠系延长组长 6 段致密储层样品,共计选择 6 块样品进行实验。所选样品深度介于 1 790~1 795 m。样品为三角洲前缘亚相深灰色粉砂岩。矿物组成以石英为主,平均含量为 66.2%。长石含量平均为 13.3%,岩屑含量平均为 20.5%。样品的孔隙度介于 1.3%~5.8%,平均为 4.3%。样品的渗透率介于  $(0.019\sim 0.426)\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均为  $0.186\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

### 1.2 高温高压合金注入方法

岩石中孔喉结构是油气赋存的主要空间,对致密储层的孔喉结构研究通常采用扫描电镜观察分析<sup>[19-20]</sup>。但是通过扫描电镜只能观察到孔隙的形态、大小等信息,无法区分连通孔隙和不连通孔隙,并且孔隙和矿物边缘识别效果较差,进而制约了对油气成藏机理和渗流机理的深入认识。通过高温高压合金注入装置将合金注入岩心之中,岩心中的高密度合金在扫描电镜下形态清晰,因此可以用来确定储层有效孔喉分布特征<sup>[21-22]</sup>。高温高压合金注入装置的基本原理是合金在高温下变为液态,在加压条件下会以液态形式注入样品孔喉。温度降低后,合金凝固在孔喉中(图 1)。由于合金具有高密度,在扫描电镜下可以更容易地区别,合金存在

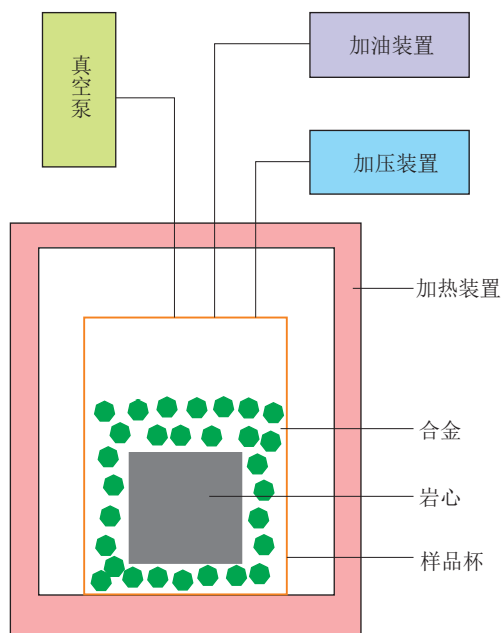


图 1 高温高压合金注入装置工作原理

Fig.1 Working principle of alloy injection device with high temperature and pressure

的地方代表了连通孔喉发育的地方。高温高压合金注入装置采用 GH4169 高温高强度合金钢,最大工作压力可达 450 MPa,工作容积 60 mL,工作温度 250 ℃,加热功率 1.5 kW,理论最小可注入 3 nm 孔喉。综合考虑致密储层的孔隙发育特征,本次实验采用的温度为 100 ℃,压力为 150 MPa,注入时间为 1 h,样品尺寸为 2 cm<sup>3</sup>。实验过程中首先将合金和岩心样品放入高温熔融金属加热杯中,密封后连接真空泵抽真空。设定好加热温度,使合金完全包裹在岩心样品上。待冷却后,注入高温液压油,使反应釜中的压力达到一定的压力。关闭供油阀门,开启加热到设定的温度,观察反应釜中压力的变化,压力的数值取决于加温时反应釜的升高压力值。实验结束,待釜体温度降至室温时将样品取出,进行后续切割、抛光等样品处理工作。

### 1.3 大视域图像拼接方法

致密储层的孔隙通常以微—纳米尺度为主,为了清晰地观察孔喉结构特征,需要将扫描电镜的倍数放到足够大<sup>[23]</sup>。但同时带来了一个问题,倍数放大之后只能观察到局部的孔喉结构,而无法观察储层整体的孔喉特征。因此,通常得到的图像效果是大倍数图像看得清但看不全,小倍数图像看得全但看不清,并且致密储层非均质性强,孔隙变化快,制约了对致密储层孔喉结构的准确全面的认识<sup>[24]</sup>。为了解决致密储层孔喉结构准确表征的问题,采用大视域图像拼接方法,其基本原理是首先通过扫

描电镜获得连续的大倍数小视域成像照片,然后将所获得的连续的小视域高精度照片进行拼接,最终得到大视域高精度图像,既解决了非均质性问题,又解决了看不清和看不全的问题。图像拼接方法是首先将参考图像和待拼接图像通过 SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) 算法进行图像预处理,找到图像的特征点,然后通过 KNN (K-Nearest Neighbor Classification) 算法对图像进行匹配,最后用 RANSAC (Random Sample Consensus) 算法对图像进行融合与边界平滑处理,最终获得完整的拼接图像。根据需求,继续进行一系列图像的拼接,形成一张无缝的、高清晰的图像(图 2)。拼接的图像为 100 张×100 张的平面图,形成 4 mm×4 mm 的视域范围,它具有比任何单张图像都要大的视域和更高的分辨率。

### 1.4 图像孔喉提取方法

通过对图像中的孔喉进行识别与提取,获得孔喉的定量信息,是重要的储层研究内容。对于常规储层,由于孔喉尺寸大,在光学显微镜下便清晰可见<sup>[25]</sup>。通过偏光显微镜的观察,可以识别不同的矿物,结合图像识别软件,可以把孔喉较好地识别出来。但是对于扫描电镜而言,岩石的灰度图像只能通过灰度值来判定矿物,对孔喉的提取更加困难<sup>[26-27]</sup>。采用先矿物后孔喉的识别方法,首先基于能谱分析鉴定大视域图像中的各种矿物,然后进行灰度值判别,定义各种矿物的灰度值区间。在大视域图像中,随机选取的各类矿物颗粒均不少于 50 个。根据灰度值区间分别提取出各种矿物,然后对各矿物进行孔喉提取。将孔喉和矿物进行二值化处理,定量分析各矿物的孔喉结构特征。粒内

孔全部归为所承载的单一矿物中,粒间孔因其由若干个矿物共同构成,其含量根据与矿物接触面的大小分摊到各接触矿物中。结合各矿物含量,可以计算出样品整体的孔隙分布特征(图 3)。通过逐级分解、先矿物后孔喉的方法可以避免因不同孔喉、不同矿物灰度值有差异而无法全部识别孔喉的问题。主要对石英、长石、碳酸盐矿物、黏土矿物等矿物类型进行了识别,计算得到各矿物中孔隙的孔径分布,结合样品中各矿物含量,计算得到各矿物的孔隙度贡献率。

## 2 结果与讨论

### 2.1 合金对图像孔喉识别的影响

在扫描电镜下,岩石样品中矿物和孔喉均是以灰度图像的形式展示。电子束接触的样品表面物质密度越大,灰度值越大。因此,在致密储层样品中,孔喉没有密度,灰度值最小。石英、长石、碳酸盐矿物的密度依次增加,它们的灰度值也依次增加,表现在图像中为颜色越来越亮。黏土矿物的密度变化范围大,因此其灰度值变化范围也大。结合能谱分析,可以分辨出各矿物成分<sup>[28]</sup>。在同一张图像中,每种矿物的灰度值是近似不变的。因此,在一张大视域拼接图像中,只需要选取几个点来确定各矿物的灰度值,便可以根据灰度值来确认图像中全部矿物的分布。通过对注入合金样品和未注入合金样品的扫描电镜观察可以明显地看到两类样品图像的差异。由于合金密度远高于样品中的各类矿物,因此在图像中合金显示为亮白色(灰度值接近 255),合金所在的地方即代表了连通孔喉发育的地方。对于未注入合金的样品图像,黑色部

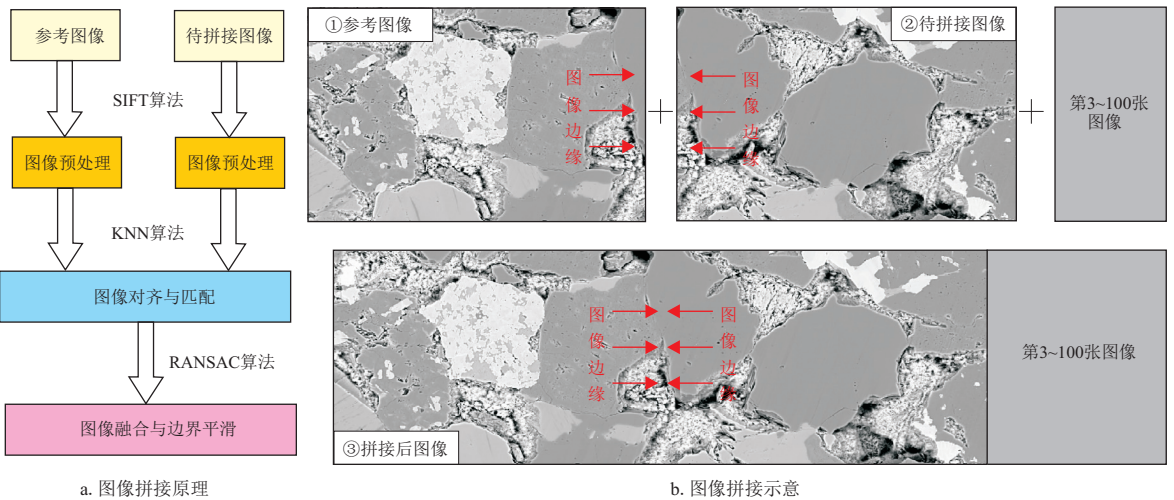


图 2 大视域图像拼接原理及方法

Fig.2 Schematic diagram of large-field image stitching method



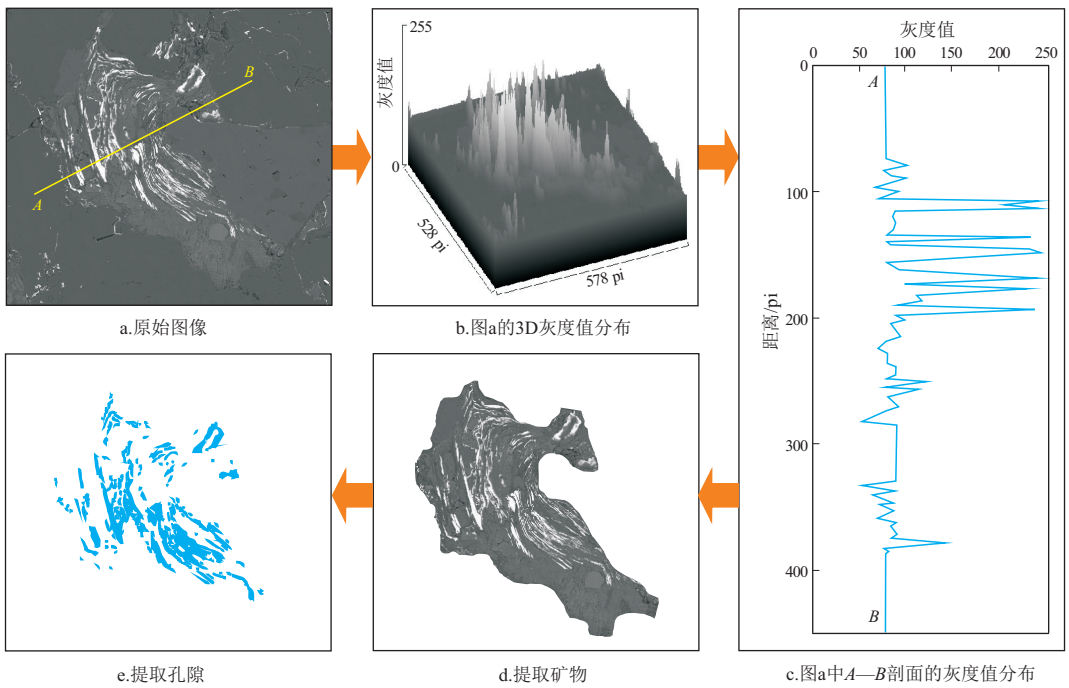


图 3 孔喉提取方法示意图

Fig.3 Schematic diagram of pore-throat extraction method

分(灰度值接近0)代表孔喉发育的地方,但是无法区分是连通孔隙还是死孔,且孔喉边缘受矿物影响灰度值会增加,导致识别孔喉边缘难度增大(图4)。因此,通过合金注入的方法识别致密储层孔喉结构特征具有显著优势,是未来重要的发展方向。

### 2.2 孔隙发育类型及特征

致密储层孔隙十分发育,不同类型孔隙形态差

异显著。通过扫描电镜观察可知,致密储层主要发育粒间孔、粒内孔和粒间—粒内混合孔三种类型。粒间孔是最为发育的孔隙类型,也是连通性最好的孔隙,孔径通常在几微米到几十微米。在大视域拼接图像中的粒间孔几乎全部被合金充填,表明粒间孔均是连通的孔隙。在脆性矿物颗粒之间的粒间孔形态规则,棱角分明(图5a)。此外,当部分黏土矿物等碎屑附着在脆性矿物边缘时,粒间孔形态受

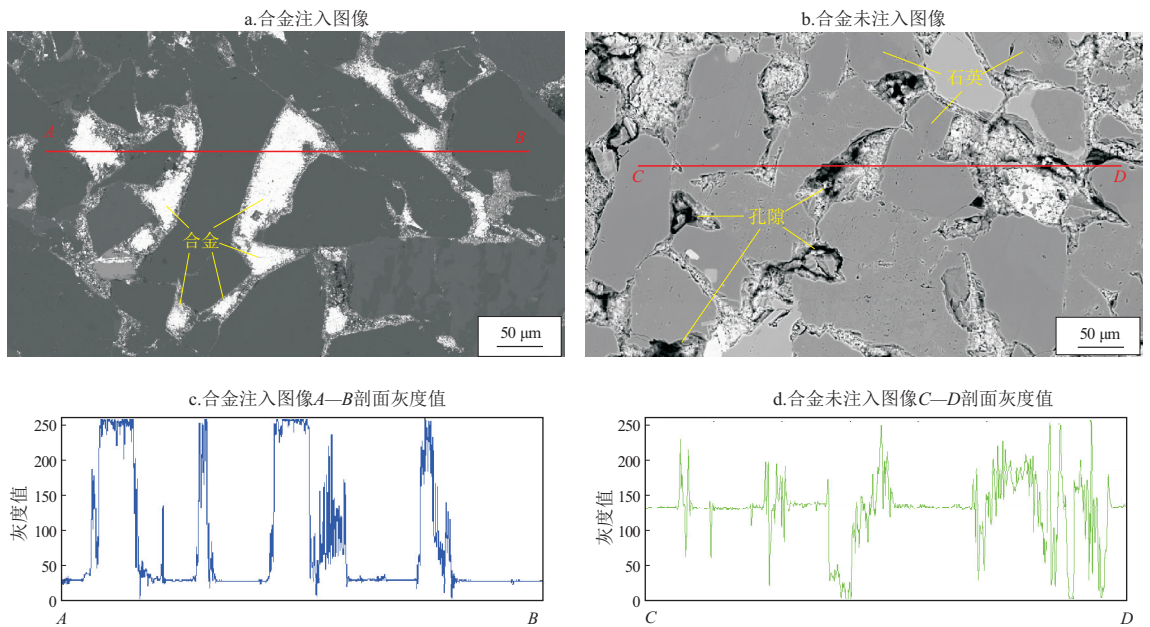


图 4 有无合金注入图像差异

Fig.4 Image difference before and after alloyed injection

到黏土矿物影响,呈毛边状,且在黏土矿物等碎屑之间存在大量的小孔隙(图5b)。粒内孔主要发育在脆性矿物颗粒内部,连通性极差,仅在部分粒内孔中观察到合金,且同一矿物中的粒内孔也呈现部分连通、部分不连通的特征(图5c,d)。粒内孔孔径较小,通常小于 $10\ \mu\text{m}$ ,形态以椭圆形为主,也呈现部分的管束型。粒间—粒内混合孔也十分常见,主要发育在溶蚀矿物和黏土矿物的边缘(图5e,f)。此类孔隙连通性较好,在大视域拼接图像中基本都可以看到充填合金。溶蚀矿物的粒间—粒内混合孔的孔径通常大于 $5\ \mu\text{m}$ ,形态依残留溶蚀矿物边缘展布。而黏土矿物粒间—粒内混合孔一般小于 $5\ \mu\text{m}$ ,形态一般呈狭缝型,主要原因为黏土矿物晶体一般为片状,片与片之间形成狭缝型孔隙。

### 2.3 喉道发育类型及特征

致密储层主要发育孔隙缩小型喉道、缩颈型喉道、管束型喉道、片状喉道和弯片状喉道5种类型(图6)。孔隙缩小型喉道主要为孔隙被矿物颗粒挤压导致孔隙局部缩小形成的,喉道一般较粗,喉道半径与孔隙半径差异不大,主要发育在较大的粒间孔之间。缩颈型喉道主要发育在两个矿物颗粒呈点接触附近,喉道半径较小,且长度有限,两侧孔隙通过极短的狭窄喉道连通,主要由弱压实的脆性矿物支撑形成。管束型喉道的喉道半径一般大于缩颈型喉道半径,长度较长,如同水管。这类喉道

延续性好,抗破坏能力强,是一种优质的长距离连通通道。片状喉道是致密储层中十分常见的一种喉道类型,喉道半径小,形状平直,呈片状。这类喉道在岩石中整体是连通的,但在扫描电镜二维平面中呈现时断时续特征,表明其连通性是非均质的。弯片状喉道是片状喉道的延伸,当片状喉道呈弯形状时称为弯片状喉道。这类喉道半径小,长度大,与粒间孔连通性好,是致密储层中最常见的一种喉道类型。此外,致密储层中还发育少量的未连通喉道,孤立地发育在矿物颗粒之间,是矿物颗粒接触面在压实作用下残留下来的喉道,主要由于矿物颗粒以强压实状态阻断了这类喉道与外界连通的路径。

### 2.4 孔喉分布特征

孔隙和喉道分布是致密储层油气运移和富集的关键<sup>[29-30]</sup>。通过对致密储层中各矿物孔隙的识别与提取,获得了石英、长石、碳酸盐矿物、黏土矿物的孔径分布特征。石英和长石的孔径峰值在 $25\sim 30\ \mu\text{m}$ 。碳酸盐矿物的孔径峰值在 $20\sim 25\ \mu\text{m}$ ,但整体上在 $5\sim 50\ \mu\text{m}$ 区间孔隙均比较发育。黏土矿物的孔径峰值在 $10\sim 15\ \mu\text{m}$ ,以小于 $25\ \mu\text{m}$ 的孔隙为主,明显小于石英、长石和碳酸盐矿物的孔径峰值,表明其储集性能较差(图7)。致密储层中石英、长石含量高(石英体积含量41.7%,长石体积含量22.5%),它们的面孔率也高(石英面孔率9.5%,

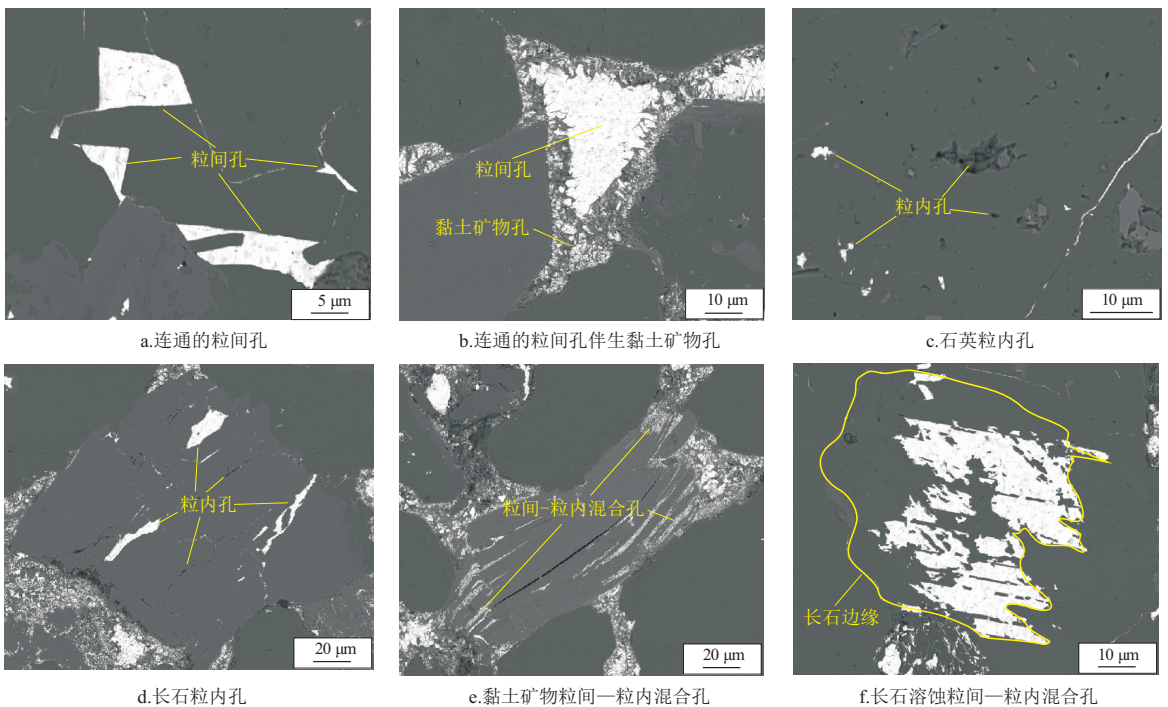


图5 致密储层孔隙发育类型及特征

Fig.5 Types and characteristics of pores in tight reservoirs

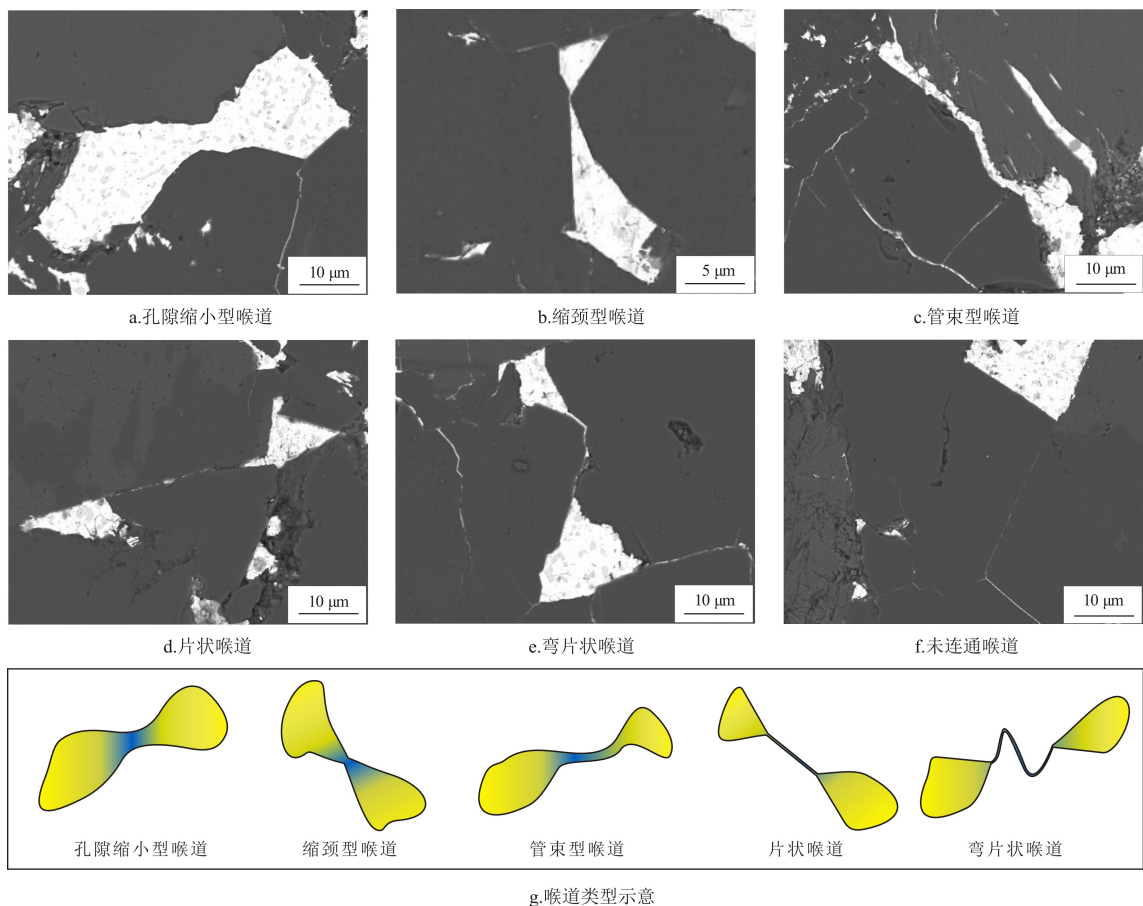


图 6 致密储层喉道发育类型及特征

Fig.6 Types and characteristics of throats in tight reservoirs

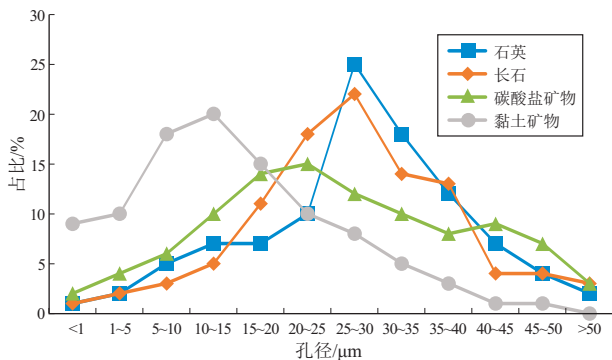


图 7 致密储层孔隙分布特征

Fig.7 Distribution characteristics of pores in tight reservoirs

长石面孔率 8.2%)。综合石英、长石的面孔率和矿物含量,可以计算出石英、长石对致密储层面孔率( $\varphi=7.8\%$ )的贡献率达 74%,而黏土矿物的贡献率仅有 11%。通过统计大视域拼接图像中喉道的数量,结果表明致密储层中弯片状喉道是最主要的喉道类型,其占比超过 40%,明显高于其他喉道类型(图 8)。但弯片状喉道连通性是最差的,是导致致密储层低渗透率( $K=0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )的主要原因。其次是片状喉道,占比超过 20%。

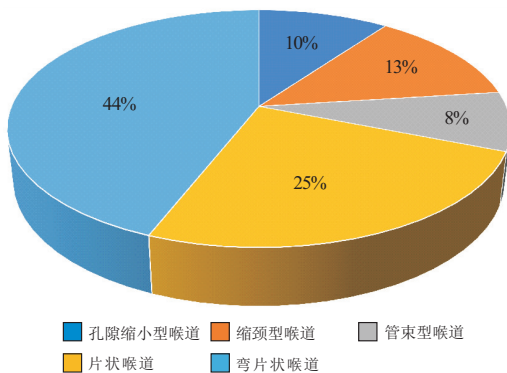


图 8 致密储层喉道分布特征

Fig.8 Distribution characteristics of throats in tight reservoirs

孔隙缩小型喉道、缩颈型喉道和管束型喉道的占比均较低,但它们的连通性相对较好,是有利的喉道类型,对致密储层渗透率具有一定的促进作用。

### 3 结论

(1)采用高温高压合金注入装置对岩心进行合金注入,在扫描电镜下可以确定储层有效孔隙分布特征,理论最小可注入 3 nm 孔隙。大视域图像拼接方法将连续的小视域高精度照片进行拼接,最



终得到大视域高精度图像,具有比任何单张图像都更大的视域和更高的分辨率,既解决了非均质性问题,又解决了看不清和看不全的问题。采用先矿物后孔喉的识别方法定量分析各矿物的孔喉结构特征,可以避免因不同孔喉、不同矿物灰度值有差异而无法全部识别孔隙的难题。

(2)致密储层中孔喉灰度值最小,石英、长石、碳酸盐矿物的灰度值依次增加,表现为图像越来越亮。在图像中合金所在的地方即代表了连通孔喉发育的地方,致密储层主要发育粒间孔、粒内孔和粒间—粒内混合孔 3 种孔隙类型,孔隙缩小型喉道、缩颈型喉道、管束型喉道、片状喉道和弯片状喉道 5 种喉道类型。致密储层发育多种类型的孔隙和喉道,显示出油气藏复杂的孔喉网络体系。粒间孔是最为发育的孔隙类型,也是连通性最好的孔隙,对致密储层成藏十分重要。石英和长石对致密储层面孔率的贡献率达 74%,为油气赋存提供了可观的储集空间。致密储层中弯片状喉道数量占比超过 40%,是导致致密储层低渗透率的主要原因。

#### 参考文献:

- [1] 罗叠潭,王允诚,邓恂康,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 Zhetan,WANG Yuncheng,DENG Xunkang, et al.Study on pore structure of main carbonate oil and gas fields in China[J].Petroleum Exploration and Development,1981(5):40-51.
- [2] 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 Chengzu,HUA Mingqi.Fractal geometry description of reservoir pore structure[J].Oil & Gas Geology,1998,19(1):15-23.
- [3] 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 Caineng,ZHU Rukai,BAI Bin, et al.First discovery of Nanopore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value[J].Acta Petrologica Sinica,2011,27(6):1857-1864.
- [4] 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 Wei,CHEN Zhaobing,XU Shuang, 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.
- [5] 胡渤,蒲军,苟斐斐.基于数字岩心的致密砂岩微观孔喉结构定量表征[J].油气地质与采收率,2022,29(3):102-112.  
HU Bo,PU Jun,GOU Feifei.Quantitative characterization of pore throat microstructure of tight sandstone based on digital core technology[J].Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2022,29(3):102-112.
- [6] 刘金,王剑,张宝真,等.准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组微—纳米孔隙页岩油原位赋存特征[J].石油实验地质,2022,44(2):270-278.  
LIU Jin,WANG Jian,ZHANG Baozhen, et al.In situ occurrence of shale oil in micro-nano pores in Permian Lucaogou Formation in Jimsar Sag, Junggar Basin[J].Petroleum Geology & Experiment,2022,44(2):270-278.
- [7] 王剑,周路,靳军,等.准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油储层孔隙结构、烃类赋存及其与可动性关系[J].石油实验地质,2021,43(6):941-948.  
WANG Jian,ZHOU Lu,JIN Jun, et al.Pore structure, hydrocarbon occurrence and their relationship with shale oil production in Lucaogou Formation of Jimsar Sag, Junggar Basin[J].Petroleum Geology & Experiment,2021,43(6):941-948.
- [8] 黄奕铭, COLLIER Richard.致密砂岩储集层微观孔喉结构及其分形特征:以西加拿大盆地 A 区块 Upper Montney 段为例[J].新疆石油地质,2021,42(4):506-513.  
HUANG Yiming, COLLIER Richard.Pore throat structure and fractal characteristics of tight sandstone reservoirs: a case study of Upper Montney Formation in block A in western Canada sedimentary basin[J].Xinjiang Petroleum Geology,2021,42(4):506-513.
- [9] 钟红利,张凤奇,赵振宇,等.致密砂岩储层微观孔喉分布特征及对可动流体的控制作用[J].石油实验地质,2021,43(1):77-85.  
ZHONG Hongli,ZHANG Fengqi,ZHAO Zhenyu, et al.Micro-scale pore-throat distributions in tight sandstone reservoirs and its constrain to movable fluid[J].Petroleum Geology & Experiment,2021,43(1):77-85.
- [10] 张文凯,施泽进,田亚铭,等.联合高压压汞和恒速压汞实验表征致密砂岩孔喉特征[J].断块油气田,2021,(1):14-20,32.  
ZHANG Wenkai,SHI Zejin,TIAN Yaming, et al.The combination of high-pressure mercury injection and rate-controlled mercury injection to characterize the pore-throat structure in tight sandstone reservoirs [J].Fault-Block Oil and Gas Field,2021,(1):14-20,32.
- [11] 钟红利,吴雨风,张凤奇,等.陕北斜坡东南部致密砂岩孔喉分布及其对含油性的影响[J].断块油气田,2021,28(1):21-27.  
ZHONG Hongli,WU Yufeng,ZHANG Fengqi, et al.Pore throat distribution of tight sandstone in the southeast of the Northern Shaanxi Slope and its influence on oil-bearing property [J].Fault-Block Oil and Gas Field,2021,(1):21-27.
- [12] 姜振学,唐相路,李卓,等.川东南地区龙马溪组页岩孔隙结构全孔径表征及其对含气性的控制[J].地学前缘,2016,23(2):126-134.  
JIANG Zhenxue,TANG Xianglu,LI Zhuo, et al.The whole-aperture pore structure characteristics and its effect on gas content of the Longmaxi Formation shale in the southeastern Sichuan Basin[J].Earth Science Frontiers,2016,23(2):126-134.
- [13] 俞雨溪,王宗秀,张凯逊,等.流体注入法定量表征页岩孔隙结构测试方法研究进展[J].地质力学学报,2020,26(2):201-210.  
YU Yuxi,WANG Zongxiu,ZHANG Kaixun, et al.Advances in quantitative characterization of shale pore structure by using fluid injection

- tion methods [J]. *Journal of Geomechanics*, 2020, 26 (2): 201-210.
- [14] TANG Xianglu, JIANG Zhenxue, JIANG Shu, 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.
- [15] 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 Xingxing, XIAO Dianshi, JIANG Shu, 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.
- [16] 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 Kun, ZHOU Hangyu, LAI Jie, et al. Application of NMR technology in characterization of petrophysics and pore structure [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(2): 101-114.
- [17] 焦淑静, 韩辉, 翁庆萍, 等. 页岩孔隙结构扫描电镜分析方法研究 [J]. *电子显微学报*, 2012, 31(5): 432-436.
- JIAO Shujing, HAN Hui, WENG Qingping, et al. Scanning electron microscope analysis of porosity in shale [J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2012, 31(5): 432-436.
- [18] WANG Y Z, SUN S Y. Multiscale pore structure characterization based on SEM images [J]. *Fuel*, 2021, 289: 119915.
- [19] 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 Yuan, NIU Xiaobing, XIN Honggang, 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.
- [20] 黄兴, 倪军, 李响, 等. 致密油藏不同微观孔隙结构储层 CO<sub>2</sub> 驱动用特征及影响因素 [J]. *石油学报*, 2020, 41(7): 853-864.
- HUANG Xing, NI Jun, LI Xiang, et al. Characteristics and influencing factors of CO<sub>2</sub> flooding in different microscopic pore structures in tight reservoirs [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(7): 853-864.
- [21] 俞凌杰. 中国石化无锡石油地质研究所实验地质技术之基于熔融合金注入的孔隙连通性分析技术 [J]. *石油实验地质*, 2020, 42(2): F0002.
- YU Lingjie. Pore connectivity analysis based on molten alloy injection, experimental geology technology of Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(2): F0002.
- [22] QIN Yang, YAO Suping, XIAO Hanmin, et al. Pore structure and connectivity of tight sandstone reservoirs in petroleum basins: a review and application of new methodologies to the Late Triassic Ordos Basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 129: 105084.
- [23] 汪贺, 师永民, 徐大卫, 等. 非常规储层孔隙结构表征技术及进展 [J]. *油气地质与采收率*, 2019, 26(5): 21-30.
- WANG He, SHI Yongmin, XU Dawei, et al. Unconventional reservoir pore structure characterization techniques and progress [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019, 26(5): 21-30.
- [24] 田伟, 刘慧卿, 何顺利, 等. 吉木萨尔凹陷芦草沟组致密油储层岩石微观孔隙结构表征 [J]. *油气地质与采收率*, 2019, 26(4): 24-32.
- TIAN Wei, LIU Huiqing, HE Shunli, et al. Characterization of microscopic pore structure of tight oil reservoirs in Lucaogou Formation, Jimusaer Sag [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019, 26(4): 24-32.
- [25] 范鹏, 董兆雄, 李君, 等. 孔隙铸模法在碳酸盐岩孔隙结构微观实验研究中的应用 [J]. *海相油气地质*, 2009, 14(2): 67-70.
- FAN Peng, DONG Zhaoxiong, LI Jun, et al. Application of pore mold method in microcosmic experiment of porosity microtexture of carbonate rocks from southern Sichuan-northern Guizhou area [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2009, 14(2): 67-70.
- [26] 张鹏飞, 卢双舫, 李俊乾, 等. 基于扫描电镜的页岩微观孔隙结构定量表征 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2018, 42(2): 19-28.
- ZHANG Pengfei, LU Shuangfang, LI Junqian, et al. Quantitative characterization of microscopic pore structure for shales using scanning electron microscopy [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2018, 42(2): 19-28.
- [27] 赵日新, 卢双舫, 薛海涛, 等. 扫描电镜分析参数对定量评价页岩微观孔隙的影响 [J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(5): 1141-1154.
- ZHAO Rixin, LU Shuangfang, XUE Haitao, et al. Effect of SEM parameters on quantitative evaluation of shale micropores [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(5): 1141-1154.
- [28] 王坤阳, 杜谷, 杨玉杰, 等. 应用扫描电镜与 X 射线能谱仪研究黔北黑色页岩储层孔隙及矿物特征 [J]. *岩矿测试*, 2014, 33(5): 634-639.
- WANG Kunyang, DU Gu, YANG Yujie, et al. Characteristics study of reservoirs pores and mineral compositions for black shale, northern Guizhou, by using SEM and X-ray EDS [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2014, 33(5): 634-639.
- [29] 李传亮, 朱苏阳, 刘东华. 盖层封堵油气的机理研究 [J]. *岩性油气藏*, 2019, 31(1): 12-19.
- LI Chuanliang, ZHU Suyang, LIU Donghua. Mechanism of sealing oil and gas with cap-rocks [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2019, 31(1): 12-19.
- [30] 夏青松, 黄成刚, 陆江. 沉积盆地中油气充注与储集层成岩作用的响应关系 [J]. *地球科学与环境学报*, 2019, 41(2): 185-196.
- XIA Qingsong, HUANG Chenggang, LU Jiang. Response relationship between hydrocarbon charging and diagenesis of reservoirs in sedimentary basin [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2019, 41(2): 185-196.