

# 基于纳米尺度的碎屑岩骨架矿物结构研究

杨少春<sup>1</sup>, 王惠娟<sup>1,2</sup>

(1. 中国石油大学 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266555;

2. 中国石油化工集团公司胜利石油管理局 地质科学研究院, 山东 东营 257000)

**摘要:** 对胜利油田胜坨地区碎屑岩储层岩芯样品和岩石薄片分别采用场发射扫描电镜、透射电镜进行镜下观察与能谱测试分析。结果表明:碎屑岩中骨架矿物石英和长石中存在纳米尺度的结构特征;石英镜下可见类蚀像凹坑、雏晶单晶、平行脊线、晶体位错、类包裹体晶内核等 5 种纳米尺度的结构;长石镜下可见晶面平行凹痕、溶蚀针、纳米级薄层断阶、长石高岭石化、晶体位错和超微包裹体等 6 种纳米尺度的结构;这些结构大多在几百纳米的尺度范围内,有的甚至只有几十纳米;矿物在纳米尺度上表现出的结构特征与其本身的硬度变化、晶体晶格缺陷、晶体生长过程以及成岩作用的显微表现和显微构造应力改造作用有关。对碎屑岩骨架矿物中纳米尺度结构特征的进一步研究有望为岩石显微变形的应力作用机制和方式以及溶解作用等成岩作用模式做出有效分析,进而为油气勘探开发提供新的探索方式。

**关键词:** 碎屑岩;骨架矿物;石英;长石;纳米尺度;结构特征;扫描电镜;透射电镜

中图分类号: P575.2; P585.2 文献标志码: A 文章编号: 1672-6561(2011)04-0331-06

## Study on Clastic Rock Framework Mineral Structure Based on Nanoscale

YANG Shao-chun<sup>1</sup>, WANG Hui-juan<sup>1,2</sup>

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266555, Shandong, China;

2. Institute of Geological Sciences, Shengli Petroleum Administration, China Petroleum and Chemical Group, Dongying 257000, Shandong, China)

**Abstract:** The core samples of clastic reservoir and thin crystalloids in Shengtuo Area of Shengli Oilfield were observed and measured by scanning electron microscopy(SEM) and transmission electron microscopy(TEM). The results showed that there were the nanoscale structure characteristic in framework mineral quartz and feldspar of clastic rock; characteristics of the main nanoscale structures developed in quartz were pits similar as erosion, young single crystal, parallel ridge, crystal dislocation and grain kernal inclusion; characteristics of the nanoscale structures in feldspar were parallel dent on the crystal plane, dissolution needle, nanoscale thin layer of broken band, kaolinization of feldspar, crystal dislocation and micro-inclusion; most of them were in several hundred nanometers, and some were even just tens of nanometers; characteristics of the nanoscale structure of mineral were related to the hardness, crystal lattice defects, crystal growth, microscopic manifestation of diagenesis and transformation of microscopic tectonic stress. The further study on the nanoscale clastic rock framework mineral structure could help to find the mechanism and modality of microscopic deformation stress and the diagenesis pattern such as dissolution, and thereby could provide new view for the petroleum exploration.

**Key words:** clastic rock; framework mineral; quartz; feldspar; nanoscale; structure characteristic; scanning electron microscopy; transmission electron microscopy

## 0 引言

在以往的石油地质研究中,尤其是针对进入开

发中后期的老油田开展的储层岩矿特征分析中,大多为适应油田开发需要进行储层岩石骨架矿物和孔隙物以及孔隙结构的微米级观测与分析<sup>[1-5]</sup>,只有少

收稿日期: 2011-05-18

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(09CX04011A); 国家科技重大专项研究项目(2011ZX05009-003)

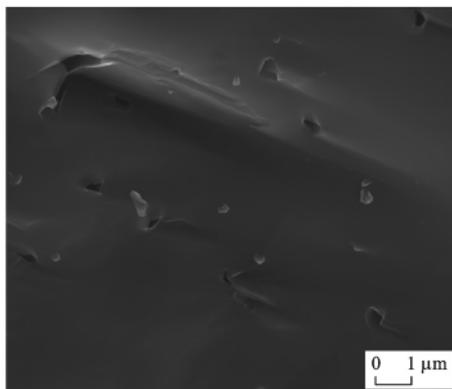
作者简介: 杨少春(1962-),男,广西桂林人,教授,博士研究生导师,理学博士,从事油气地质及油藏描述研究。E-mail:scyang@upc.edu.cn

数有关黏土矿物和局部孔隙结构的分析中会出现纳米尺度的图像分析与结构特征说明<sup>[6-9]</sup>,但对于岩石的主要组分——骨架矿物,则很少涉及纳米尺度的结构特征分析。伴随着近年来油气勘探开发程度的日益加深,煤层气、页岩气等新兴油气资源的发现,迫切需要对储层进行更加细微层面的解剖,从而阐明储层纳米尺度的有关结构特征与非均质性,为油气资源勘探开发提供更为精确的指导。

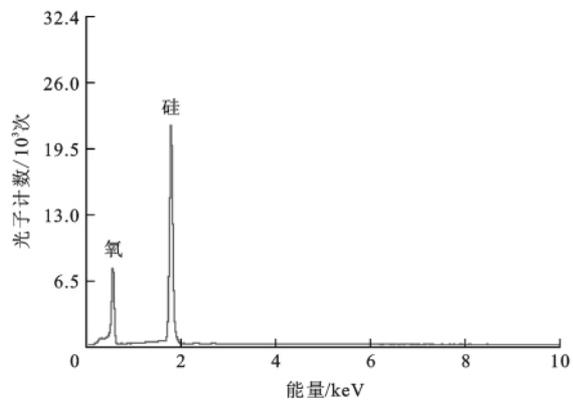
笔者以胜利油田胜坨地区主力含油层段的岩芯样品为例,分别采用场发射扫描电镜和透射电镜进行镜下观察与能谱测试分析,总结骨架矿物石英和长石的纳米级结构特征。

## 1 石英纳米级结构特征

因研究区岩石类型以长石砂岩为主,岩石骨架矿物相应的则为石英和长石。其中石英相对于长石而言,仍保持其微观尺度上的稳定性,镜下可见以下



a 扫描电镜图像



b 能谱曲线

图 1 坨 128 井 2 625.5 m 深处石英表面类蚀像凹坑扫描电镜图像及能谱曲线

Fig. 1 Scanning Electron Microscopy Image and Spectrum Curve of Pits Similar as Erosion on Quartz Surface in the Depth of 2 625.5 m of Well Tuo128

透射电镜下能够看到石英晶体内部同样存在规则的三角形晶内孔,且孔的周围过渡带颜色深度大,过渡带的外缘是同样的三角形结构,与内部小孔呈平行状,这有别于一般的晶内孔,恰好与扫描电镜下特征形成良好的对应,证明具纵向延伸性的晶面类蚀像凹坑的存在(图 2)。

### 1.2 雏晶单晶

岩石的胶结作用中,矿物的自生加大占有很大比例,尤以石英的自生加大现象最明显。作为骨架矿物的石英颗粒粒径较大,而次生加大边和自生石英晶芽用高倍扫描电镜观察时,均能看到石英单晶纳米级的六方柱状完整晶形,透射电镜下石英晶体截面的六边形形态也有大致体现(图 3),单晶截

5 种纳米级的结构特征。

### 1.1 类蚀像凹坑

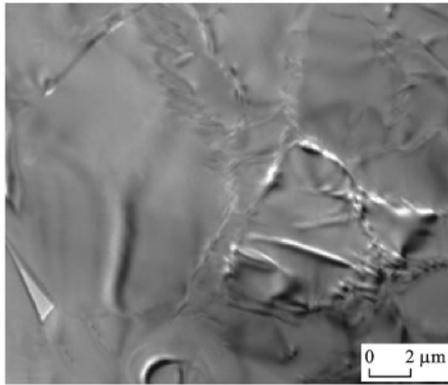
晶体受溶蚀后,晶体表面会产生凹坑,被称为蚀像。蚀像的形态和分布一般受控于晶体内部质点的排列方式,因此不同类型的矿物或者同一矿物不同晶面的蚀像具有不同的形状和位向<sup>[10]</sup>,据此可以鉴别矿物类型。当放大到 20 000 倍时,石英晶体表面可见 100~300 nm 的晶面凹坑,凹坑形状不如蚀像规则,以三角形为主,但朝向并不一致。

整体来看,凹坑一般沿直线排列且每个三角形凹坑都有沿其中一条直角边的拖曳痕,这反映出石英晶体沿某一特定方向具有相对的弱硬度特征。同时,从拖曳痕的延伸长度和形态来看,越接近凹坑处拖曳痕下切深度越大,从凹坑顶点向外深度逐渐均匀减小直至消失,说明凹坑的存在改变了晶体本身的固有特性,在此表现为弱化了晶体原有硬度特征(图 1)。

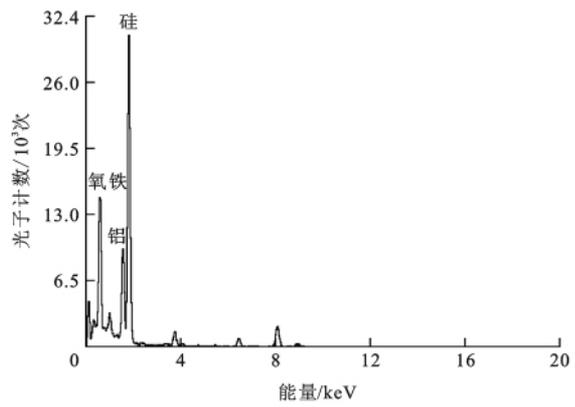
面边长为 100~300 nm,生长方向一致,晶体在填充原生孔隙的生长过程中,各次生晶体之间仍残留有几十纳米的晶间缝和 100 nm 左右的小孔隙,局部缝隙连通性好。

在晶间缝与孔隙连通的部位,其形态类似于微观尺度下的孔喉关系,因此若能证实油气在该类空间可以储集和开采,即此类纳米尺度的孔隙对油气来说属于有效储集空间,就可为今后的油气开采提供新的研究方向(图 4)。

透射电镜照片中,石英各六方柱晶体间并不呈完全规则排列,而呈紧密与疏松的杂乱产状。微观尺度下,观察岩石成岩作用中石英的次生加大边有明显的溶蚀现象,该透射电镜观察结果恰好与此一



a 透射电镜图像



b 能谱曲线

图 2 坨 128 井 2 625.5 m 深度规则的三角形晶内孔透射电镜图像及能谱曲线  
 Fig. 2 Transmission Electron Microscopy Image and Spectrum Curve of Triangular Intracrystal Pores in the Depth of 2 625.5 m of Well Tuo128

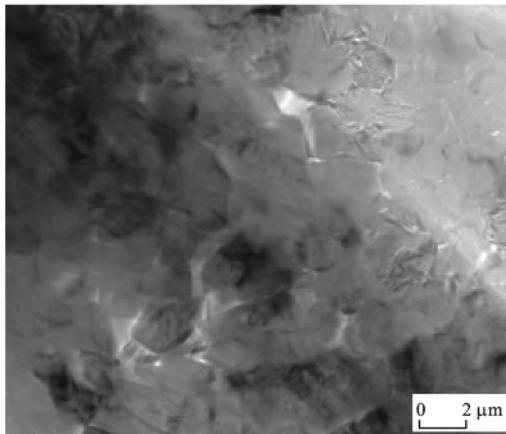


图 3 坨 128 井 2 625.5 m 深处石英单晶截面形态  
 Fig. 3 Section Pattern of Single Quartz Crystal in the Depth of 2 625.5 m of Well Tuo128

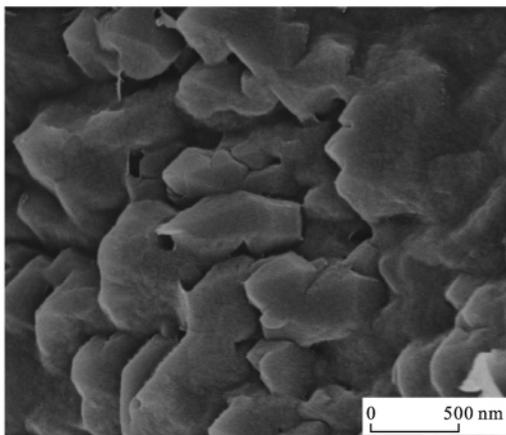


图 4 1-4J17 井 2 007.5 m 深处石英雏晶单晶  
 Fig. 4 Quartz Young Single Crystal in the Depth of 2 007.5 m of Well 1-4J17

致,因此推断出研究石英雏晶单晶的生长和排列方式,对于岩石成岩环境和成岩过程中晶体堆积方式

和晶体结构缺陷以及晶内孔隙演化特征和溶蚀作用研究都具有重要的参考价值。

### 1.3 平行脊线

在扫描电镜下用 30 000 倍的放大倍率可见石英晶体截面上呈平行状产出的一条条类似屋脊的线状结构,在此称为平行脊线。脊线宽度只有 30 nm 左右,同时,每条脊线并非单一线状结构,而是由一个个纳米粒子规则排列组成的,微粒直径即脊线宽度,该处纳米粒子并非规则圆球状(图 5)。

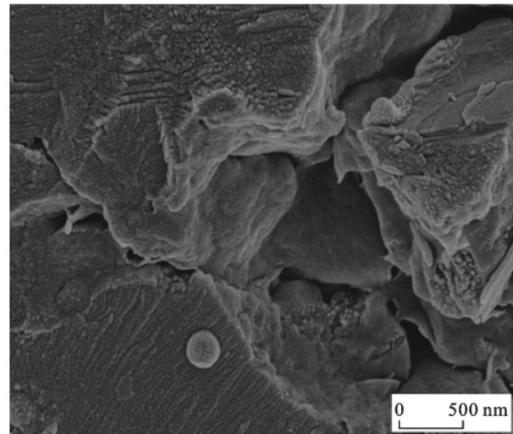


图 5 坨 21 井 2 196.5 m 深处晶面平行脊线  
 Fig. 5 Parallel Ridge on Crystal Plane in the Depth of 2 196.5 m of Well Tuo21

孙岩等曾先后提出韧性剪切带中岩石剪切面上存在纳米粒子层,层上纳米级的单体磨粒显示一定的定向排列特征,形成纳米线<sup>[11-12]</sup>,其上的纳米粒子有被拉长的现象。各纳米线表现出相互扭结的特征,应力矿物在纳米尺度上也很发育。组成韧性剪切带的纳米层相互交叠,并在剪切滑移作用下形成定向组构,与微观尺度下观察到的面理和线理的平

行产状吻合。由此可以认为,本研究观察到的纳米级平行脊线特征可能同样是构造作用形成的,但应力性质与作用方向及大小对其作用结果的影响还有待进一步探究。

#### 1.4 晶体位错

晶体位错的形成分多种情况,既可以是晶体生长过程中因原子偏离产生缺陷而造成的,又可以是后期应力作用的结果<sup>[13]</sup>。透射电镜下观察石英晶体中发育位错环(图 6),形态稍显扁圆状,沿两个方向呈线形排列,直径大于 200 nm,以及由位错紊乱形成位错壁。

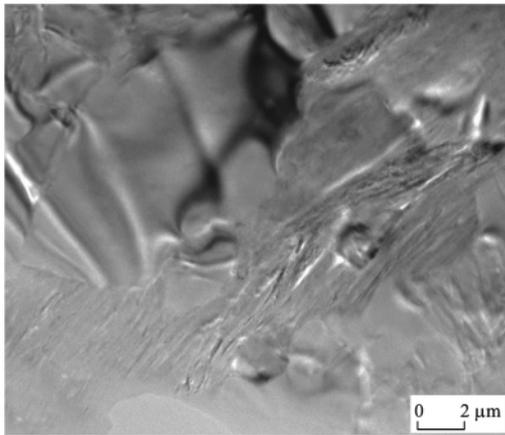


图 6 L38-8 井 2 669.0 m 深处晶体位错环  
Fig. 6 Crystal Dislocation Loops in the Depth of 2 669.0 m of Well L38-8

#### 1.5 类包裹体晶内核

在偏光显微镜下观察会发现长石颗粒中存在圆形、椭圆形等不同形态的流体包裹体,包裹体大小一般为几微米。通过透射电镜观察,还发现当放大倍数足够大时,晶体内部存在形态和结构上都与包裹体类似的核状物,且该组织内部还有一个与外部形态类似但个体只有 100 nm 左右的包体。该核状物内部有晶体位错,外部的位错纹止于其边部(图 7)。

## 2 长石纳米级结构特征

长石因其本身具有较易受溶蚀的特征,镜下观察可见纳米尺度上也大多表现为与溶蚀作用相关的结构特征,溶蚀程度各不相同,主要表现为 6 种形式。

#### 2.1 晶面平行凹痕

与石英晶体不同,长石颗粒表面具有细长条状的规则凹痕,凹痕宽度小于 100 nm,延伸长度差别较大,最短的只有 100 nm,最长的几乎沿长石晶体

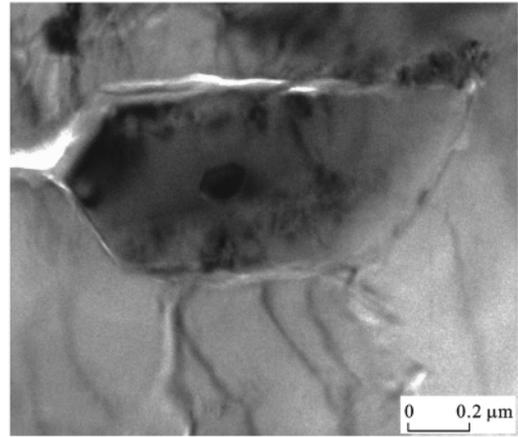


图 7 1-4J17 井 2 021.8 m 深处类包裹体晶内核  
Fig. 7 Grain Kernel Inclusions in the Depth of 2 021.8 m of Well 1-4J17

的长轴方向贯穿于整个颗粒。多条凹痕密集平行排列,延伸方向始终与长石晶体长轴方向一致。从凹痕形态来看,其成因应为应力作用,但扫描电镜观察时一般选取岩芯敲开的新鲜断面,因此这种凹痕应该是岩芯断开过程中由长石内部各质点间相互作用力的差异所导致(图 8)。

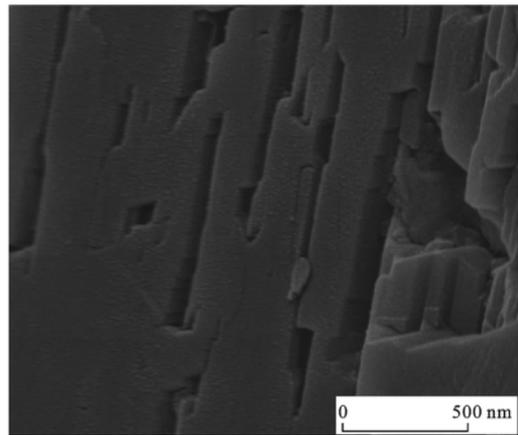


图 8 坨 87 井 2 097.8 m 深处晶面平行凹痕  
Fig. 8 Parallel Dent on the Crystal Plane in the Depth of 2 097.8 m of Well Tu087

#### 2.2 溶蚀针

在高倍扫描电镜下观察,当长石溶蚀程度非常强烈时就会出现溶蚀针(图 9)。溶蚀针是比筛状颗粒溶蚀程度更高的溶蚀作用表现形式,在视域下发现长石颗粒已完全失去原有晶形,只在颗粒端部保留垂直的相互之间呈平行状态的针状溶蚀残余,溶蚀针直径小于 400 nm 且分布不均匀。溶蚀针是较强成岩作用的反映,根据其形态和分布特征可以对溶蚀作用机理和矿物颗粒遭受溶蚀后形态变化过程有较为完整的把握。

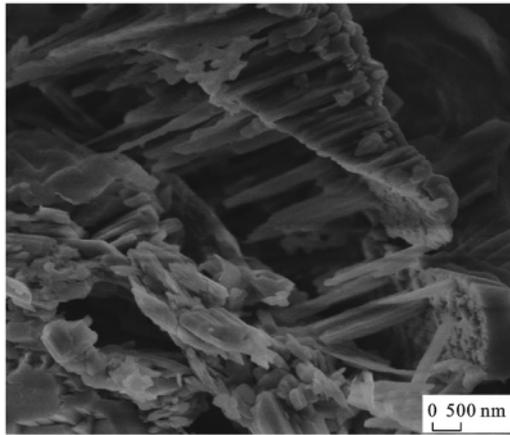


图 9 坨 87 井 2 097.8 m 深处长石溶蚀针  
Fig. 9 Feldspar Dissolution Needle in the Depth of  
2 097.8 m of Well Tuo87

### 2.3 纳米级薄层断阶

岩石发生破裂时,在外力作用下其断面上的骨架矿物原始形貌会遭受破坏,外力作用改变了矿物原有的完整晶形,并在断面上留下痕迹。通过高倍扫描电镜观察分析,可以发现长石因本身硬度比石英要小,在岩芯断口处往往会留下应力作用的证据。由图 10 可见,长石颗粒断面上可见两组斜交的断阶。经测量,其中一组断阶的宽度间隔为 150 nm,断阶高度约 50 nm,另一组断阶的宽度较大,接近 1  $\mu\text{m}$ ,宽度约 100 nm。两组断阶呈 X 型交叉,断阶高度越大表明应力作用越大,从切割顺序上可判断应力作用的先后次序。

### 2.4 长石高岭石化

微观分析表明,高岭石由长石蚀变而来,常与溶蚀长石残骸或残余物同时出现,完全交代时呈交代假象。在偏光显微镜下只能看到转化的概貌,并不

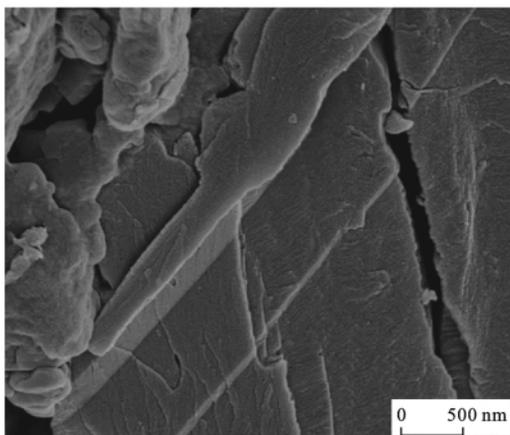


图 10 坨 21 井 2 196.5 m 深处钾长石纳米级薄层断阶  
Fig. 10 Nanoscale Thin Layer of Broken Band of  
K-feldspar in the Depth of 2 196.5 m of Well Tuo21

能分清转化的程度和阶段。通过扫描电镜观察,可以明显看出高岭石化后长石的形态特征变化。由图 11 可见,长石颗粒由边缘开始向高岭石转化,晶粒表面开始出现条带结构,边缘则为层片结构,层片单层厚度和条带宽度都不足 100 nm。对这一溶解再沉淀作用的纳米尺度研究有利于揭示该作用机理与其转化时晶体形貌的变化过程。

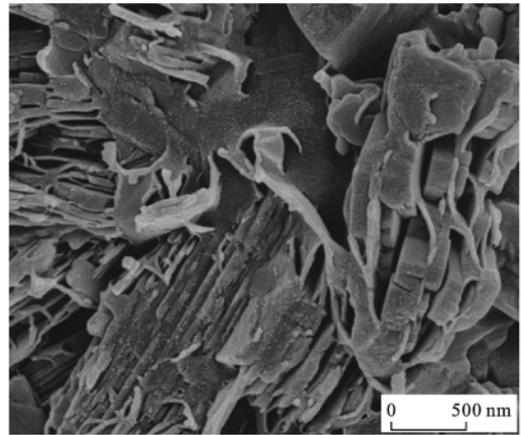


图 11 坨 21 井 2 172.1 m 深处长石的高岭石化  
Fig. 11 Kaolinization of Feldspar in the Depth of  
2 172.1 m of Well Tuo21

### 2.5 晶体位错

通过观察发现,长石晶体中的位错纹形式多样,既有等间距近平行的弯曲位错纹和其间的堆积缺陷,又有毫无规律可循的极不规则散乱状位错纹,也有“Z”字形的位错纹组合和台阶状位错纹,分布范围很小,并且该类现象相对少见(图 12、13)。

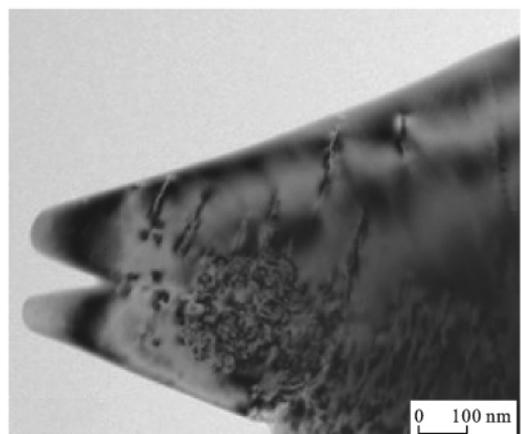


图 12 坨 32 井 2 257.4 m 深处弯曲位错纹  
Fig. 12 Curved Dislocation Pattern in the Depth of  
2 257.4 m of Well Tuo32

### 2.6 超微包裹体

与前述石英晶体中发育的类包裹体晶内核有相似之处,长石中见有呈台阶状规则排列的超微包裹

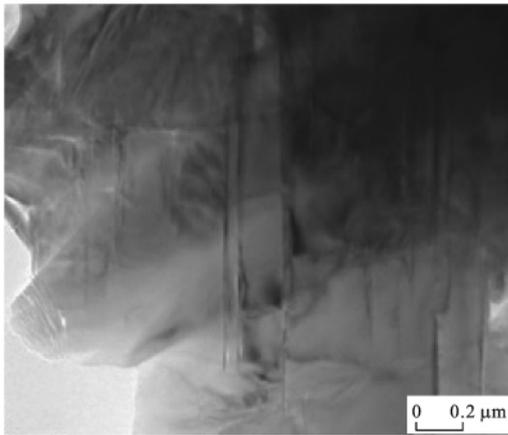


图 13 坨 87 井 2 064.5 m 深处台阶状位错纹  
Fig. 13 Step-like Dislocation Pattern in the Depth of  
2 064.5 m of Well Tuo87

体(图 14)。虽然无法进行测温等分析,但从其形态、组成和结构来看,应为偏光显微镜下无法辨识的超微包裹体,大小为 60~100 nm。包裹体内部可见一个或两个气泡,有的包裹体中气泡在磨片和过程中破裂,现为空洞,但保留了其原始形态,可见属气液两相包裹体。

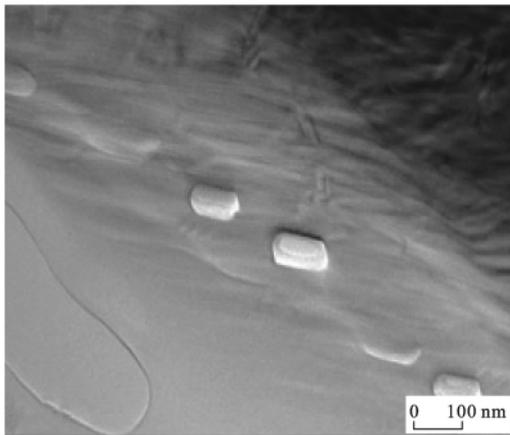


图 14 坨 128 井 2 625.5 m 深处超微包裹体  
Fig. 14 Micro-inclusion in the Depth of  
2 625.5 m of Well Tuo128

### 3 结语

碎屑岩中的骨架矿物石英和长石存在多种类型

的纳米级尺度结构特征。石英中发育纳米级的类蚀像凹坑、雏晶单晶、平行脊线、晶体位错、类包裹体晶内核 5 种结构现象,雏晶单晶反映成岩环境、晶体孔隙结构和溶蚀作用的变化,平行脊线能够侧面表现出构造应力性质与作用大小和方向。长石中发育晶面平行凹痕、溶蚀针、纳米级薄层断阶、长石的高岭石化、晶体位错和超微包裹体 6 种纳米尺度的结构,溶蚀针是强烈溶蚀作用产物,纳米级薄层断阶反映显微应力作用大小和先后次序,长石高岭石化纳米尺度特征是对其微观尺度下表现特征的补充和再证实。上述研究发现为该领域研究的深入开展提供了良好的先期工作基础,并对今后油气田的精细描述做出铺垫。

#### 参考文献:

- [1] 李德勇,戴祉平. 沙埕油田沙 23 断块阜三 1 亚段油层非均质性评价[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(3): 36-41.
- [2] 杨 柏,杨少春,姜海波,等. 胜坨油田储层非均质性及与剩余油分布的关系[J]. 特种油气藏, 2009, 16(4): 67-70.
- [3] 陈宁宁,杨少春,黄建廷. 胜坨油田沙河街组二段复杂断块油藏水淹层测井解释研究[J]. 地球科学与环境学报, 2010, 32(4): 355-362.
- [4] 杨县超,张 林,李 江,等. 鄂尔多斯盆地苏里格气田储层微观孔隙结构特征[J]. 地质科技情报, 2009, 28(3): 73-76.
- [5] 宋广寿,高 辉,高静乐,等. 西峰油田长 8 储层微观孔隙结构非均质性与渗流机理实验[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2009, 39(1): 53-59.
- [6] 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.
- [7] 陈 涛,王河锦. 天津蓟县长城系串岭沟组混层黏土矿物[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2008, 33(5): 716-722.
- [8] 张 雁. 储层岩石微观孔隙结构的实验和理论研究[J]. 科教信息, 2008(27): 42-43.
- [9] 王惠娟. 基于纳米尺度的储层非均质性研究[D]. 山东青岛: 中国石油大学, 2011.
- [10] 陈世悦. 矿物岩石学[M]. 山东东营: 石油大学出版社, 2002.
- [11] 孙 岩,舒良树,陆现彩,等. 岩石剪切面纳米粒子层的近期研究进展[J]. 自然科学进展, 2007, 17(10): 1331-1337.
- [12] 刘 浩,孙 岩,舒良树,等. 华南武功山地区韧性剪切带的纳米尺度测量研究[J]. 地质学报, 2009, 83(5): 609-616.
- [13] 许志琴. 地壳变形与显微构造[M]. 北京: 地质出版社, 1984.