

文章编号: 0253-2697(2018)05-0554-10 DOI:10.7623/syxb201805006

高孔隙性砂岩内变形带特征及对流体流动的影响

——以柴达木盆地西缘油砂山背斜为例

王海学^{1,2} 刘志达^{1,2} 沙威³ 付晓飞^{1,2} 孙永河^{1,2} 赵政权⁴ 卢明旭⁵ 吴桐^{1,2}

(1. 东北石油大学地球科学学院 CNPC 断裂控藏研究室 黑龙江大庆 163318;

2. 东北石油大学非常规油气成藏与开发省部共建国家重点实验室培育基地 黑龙江大庆 163318;

3. 中国石油青海油田公司勘探开发研究院 甘肃敦煌 736202; 4. 中国石油华北油田公司第五采油厂 河北辛集 052360;

5. 大庆油田有限责任公司第四采油厂 黑龙江大庆 163511)

摘要:传统观点认为岩石受力变形发生破裂作用形成裂缝,对流体流动起到输导作用。实际上,高孔隙性岩石受力变形,发生颗粒的旋转、滚动、重排和(或)破碎,应变集中形成与裂缝特征截然不同的变形带,降低了储层的孔隙度和渗透率,影响流体的流动。基于野外观察描述和室内分析测试资料,以柴达木盆地西缘油砂山背斜下油砂山组地层为研究对象,从变形带形成机制出发,系统描述了高孔隙性砂岩中变形带的宏观、微观特征,剖析了变形带和未变形母岩的物性特征,明确了变形带形成时期和油气成藏期的耦合关系,探讨了变形带对流体流动的影响。研究表明:油砂山背斜带转折端处下油砂山组高孔隙性砂岩受力变形发生了碎裂作用,形成了典型的碎裂型变形带。碎裂型变形带的颜色发白,比母岩浅;呈正风化地形特征,以“肋状”凸出的形态发育;极少单条发育,多呈“簇状”等组合特征发育。微观上,碎裂型变形带表现为颗粒发生旋转、滚动,沿着颗粒接触边界摩擦导致颗粒破碎,颗粒尺寸明显减小、分选变差,带内颜色相对变深和孔隙坍塌、孔隙空间明显降低的特征。与母岩相比,变形带的孔隙度平均降低约 17.4%。应用母岩与变形带渗透率比值与流体流动效率的定量图版分析,当变形带渗透率较母岩降低 3 个数量级以上时,对流体流动起到阻碍作用,油砂山背斜带变形带渗透率降低 1~2 个数量级,对流体流动基本无明显阻滞作用。

关键词:高孔隙性砂岩;变形带;碎裂作用;油砂山背斜;柴达木盆地

中图分类号:TE32

文献标识码:A

Characteristics of deformation bands in high-porosity sandstone and their influence on fluid flow: a case study of Youshashan anticline at the western margin of Qaidam Basin

Wang Haixue^{1,2} Liu Zhida^{1,2} Sha Wei³ Fu Xiaofei^{1,2} Sun Yonghe^{1,2} Zhao Zhengquan⁴ Lu Mingxu⁴ Wu Tong^{1,2}

(1. College of Earth Science, CNPC Fault Controlling Reservoir Research Laboratory, Northeast Petroleum University, Heilongjiang

Daqing 163318, China; 2. Accumulation and Development of Unconventional Oil and Gas, State Key Laboratory Cultivation

Base Jointly-constructed by Heilongjiang Province and the Ministry of Science and Technology, Northeast Petroleum University,

Heilongjiang Daqing 163318, China; 3. Exploration and Development Institute of PetroChina Qinghai Oilfield Company,

Gansu Dunhuang 736202, China; 4. NO.5 Production Plant, PetroChina Huabei Oilfield Company, Hebei Xinji 052360, China;

5. No.4 Oil Recovery Plant, Daqing Oilfield Limited Company, Heilongjiang Daqing 163511, China)

Abstract: It is traditionally considered that the rocks are deformed by force to induce fracturing, and thus form the fractures playing a role of conduction in fluid flow. In fact, the deformation of high-porosity rocks by force leads to the rotation, sliding, disaggregation and/or rupture of particles. The strain concentration results in the deformation bands with characteristics obviously different from fracture, reducing the reservoir porosity and permeability as well as influencing fluid flow. Based on field observation and description and laboratory analysis test data, the Lower Youshashan Formation strata of Youshashan anticline at the western margin of Qaidam Basin is taken as the research object to systematically describe the macro and micro characteristics of deformation bands in high-porosity sandstones in term of deformation-band formation mechanism. Meanwhile, this paper analyzes the petrophysical properties of deformation bands and un-deformed parent rocks, makes clear the coupling relationship between the forming period of deformation band and hydrocarbon accumulation period, and discusses the influence of deformation bands on fluid flow. Research results indicate that the high-porosity sandstones in Youshashan Formation at the hinge zone of Youshashan anticline are deformed by force to induce cataclasis, thus forming the typical cataclastic deformation band. The cataclastic deformation band is white, lighter than parent rock, characterized by positive weathering landform and rib protruding morphology. It rarely

基金项目:国家自然科学基金(No. 41602129)、国家自然科学基金重点联合基金(No. U1562214)、东北石油大学优秀科研人才培育基金黑龙江省创新后备人才项目(2017-KYYWF-0063)和国家科技重大专项(2016ZX05054-009, 2016ZX05003-002)资助。

第一作者:王海学,男,1987年1月生,2009年获大庆石油学院学士学位,2016年获东北石油大学博士学位,现为东北石油大学讲师,主要从事断层生长机制及控藏作用研究。Email:wanghaixue116@163.com

通信作者:刘志达,女,1994年1月生,2014年获东北石油大学学士学位,现为东北石油大学博士研究生,主要从事高孔隙性岩石变形伴生构造方面的研究工作。Email:lzd6536@163.com

shows singular development, dominated by "clustered" assemblage development. On a microscopic level, the cataclastic deformation bands are characterized by rotation and sliding of particles; the frictions along grain contact boundaries lead to the fractured particles, obviously decreased grain size, poor sorting, darkening band color, pore collapse, and significant decline of pore space. Compared with parent rock, the porosity of deformation band is reduced by about 17.4% on average. Through applying the quantitative chart of flow efficiency versus the permeability ratio of parent rock and deformation band for analysis, it is found that when the permeability of deformation band is reduced by three orders of magnitude over parent rock, fluid flow is hindered. When the permeability of deformation band in Youshashan Anticline is reduced by 1-2 orders of magnitude, there is basically no obvious hindering effect on fluid flow.

Key words: high-porosity sandstone; deformation band; cataclasis; Youshashan anticline; Qaidam Basin

引用:王海学,刘志达,沙威,付晓飞,孙永河,赵政权,卢明旭,吴桐.高孔隙性砂岩内变形带特征及对流体流动的影响——以柴达木盆地西缘油砂山背斜为例[J].石油学报,2018,39(5):554-563.

Cite: WANG Haixue, LIU Zhida, SHA Wei, FU Xiaofei, SUN Yonghe, ZHAO Zhengquan, LU Mingxu, WU Tong. Characteristics of deformation bands in high-porosity sandstone and their influence on fluid flow: a case study of Youshashan anticline at the western margin of Qaidam Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(5): 554-563.

断裂在不同孔隙性、不同岩性地层中形成的亚地震构造(裂缝和变形带等)存在明显差异^[1-3]。目前,普遍认为高孔隙性岩石和低一非孔隙性岩石的临界孔隙度为15%^[2],低一非孔隙性岩石受力后主要发生破裂作用(fracturing),即颗粒或颗粒间胶结物发生破碎,形成微裂缝,宏观上形成具有明显间断性的裂缝、节理等^[4]。微裂缝连接和宏观裂缝再活动导致断层形成和传播^[5]。高孔隙性岩石变形不再产生裂缝,主要发生碎裂作用(cataclasis),应变集中导致变形带(deformation bands)的形成^[1,6-9]。变形带是岩石受力超过极限强度时产生的与裂缝相对应的一种板状不连续性构造,是指发育在高孔隙岩石中,在局部压实、膨胀或剪切的作用下,由颗粒滑动、旋转以及破碎形成的带状亚地震构造^[1-3,6,10]。同母岩相比,变形带具有硬度大、剪切强度大且物性差的特征^[2,10-11]。构造变动主要导致两种变形方式:一是发生断裂,二是形成褶皱(背斜构造)。变形带可发育在挤压或拉张环境下的多种构造背景中,断裂边部普遍发育变形带,但对于背斜枢纽带或最大弯曲点发育变形带现象极为罕见,由于背斜形成过程中,枢纽带处是应变集中的位置,岩石变形形成变形带,从而降低储层的孔隙度和渗透率,影响流体流动规律。笔者以柴达木盆地西缘油砂山背斜为研究背景,以下油砂山组地层中高孔隙性砂岩中发育的变形带为研究对象,以野外观察和室内分析测试等手段为基础,分析油砂山背斜枢纽带高孔隙砂岩的变形机制及变形带发育特征,初步探讨变形带对流体运移的影响。

1 地质背景

柴达木盆地位于青海高原的西北部,是青藏高原内部最大的山间盆地[图1(a)]。柴达木盆地为中生代、新生代时期在印支运动后,由板块碰撞而形成的陆相含油气盆地^[12-17]。盆地三面环山,分别为东北部的祁连山脉、西北部的阿尔金山脉和南部的昆仑山脉,平均海拔

约2800 m,周围山脉海拔约4000~5000 m,盆地长850 km,南北宽约200 km,面积约 $12.1 \times 10^4 \text{ km}^2$,呈形态不规则的菱形状[图1(a)]。前人根据其沉积特征、构造格局和实际油气勘探需要,将柴达木盆地划分为4个一级构造单元(图1):柴西隆起、一里坪坳陷、三湖坳陷和柴北缘隆起^[12]。柴达木盆地西部地区(柴西地区)位于昆仑山与阿尔金山两大构造带之间,为盆地内变形最为强烈的区域^[18],是重要的含油气构造单元,具有很大的勘探潜力。目前,柴西地区已发现了英东、油砂山、开特米里克、狮子沟等10余个含油气构造^[19]。柴达木盆地发育在被动板块边缘之上,形成演化由多条构造带联合控制,自中生代以来,经历2次拉张和挤压作用,致使盆地内部构造复杂^[20],盆地演化经历4期构造演化(图2):①早一中侏罗世伸展断陷阶段^[20-23];②晚侏罗世—晚白垩世挤压隆升变形阶段^[24];③古新世—中新世早期“拆离伸展—拉分盆地”变形阶段^[23,25-26];④中新世晚期—第四纪挤压走滑—再生前陆盆地阶段^[27]。

油砂山构造带位于柴达木盆地西缘的柴西隆起构造带上,紧邻英东构造带,为狮子沟—英东构造带中重要的含油气构造之一^[28]。柴达木盆地西缘由于受到挤压作用,形成一系列逆冲断层。油砂山构造带为受逆冲断层(油砂山断层)控制的短轴状断层相关背斜,背斜长轴为NW走向,产状稳定,北翼较平缓,南翼陡倾甚至倒转[图1(b)]。油砂山构造带主要发育渐新统一更新统[图1(c)],分别为上干柴沟组(N_1g)、下油砂山组(N_2^1y)、上油砂山组(N_2^2y)、狮子沟组(N_2^3s)和七个泉组(Q_{1-2})。油砂山构造带地表主要出露下油砂山组(N_2^1y)地层,岩性以灰黄色、土红色、棕黄色、暗紫色砂质泥岩为主,夹灰绿色砂岩、棕黄色砂岩、灰白色砂岩、砾岩、紫色泥岩、蓝灰色泥岩、灰黄色泥岩,整体具有砂泥互层的层序特征[图1(c)]。下油砂山组的砂岩层岩性细、单层薄,厚度为1.7 m,抗风化能力较上覆和下伏泥岩层强,以“凸出”的正风化地形特征出现[图3(a)]。

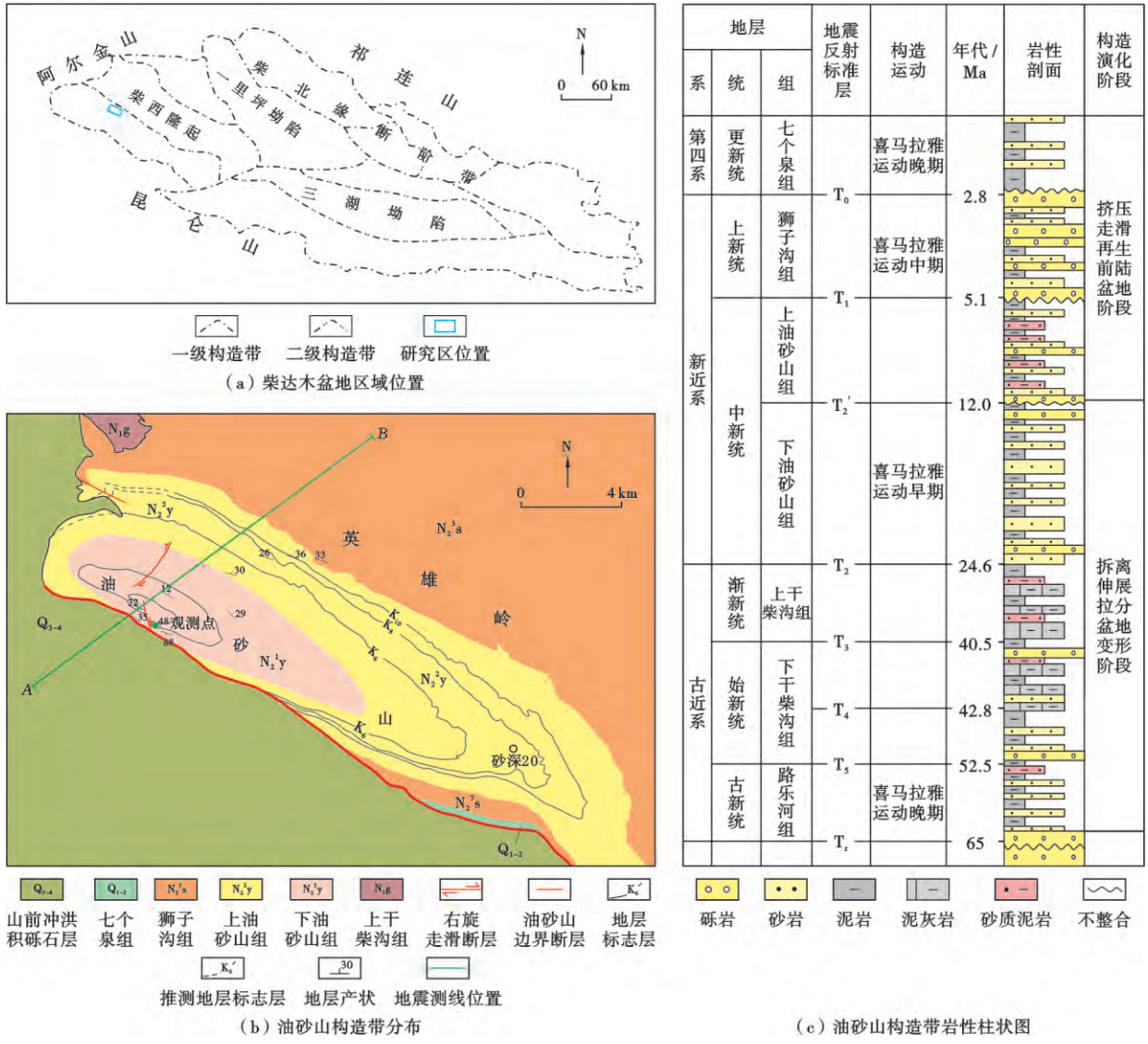


图 1 柴达木盆地区域位置、油砂山构造带地质及岩性柱状(据文献[24,28]修改)

Fig. 1 Location of Qaidam Basin and geological and lithological of Youshashan structural belt

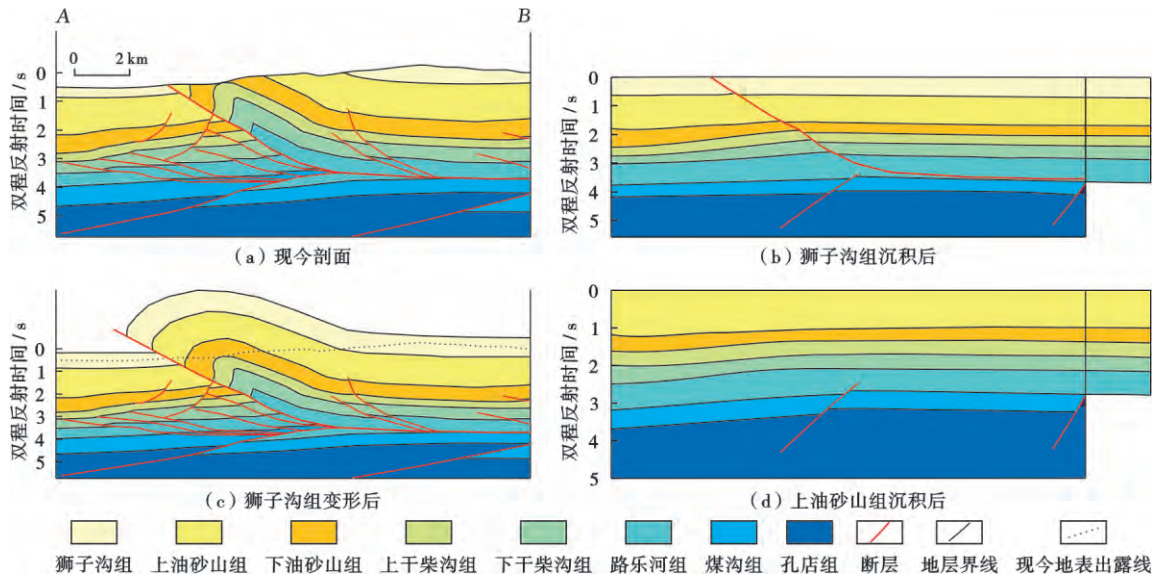
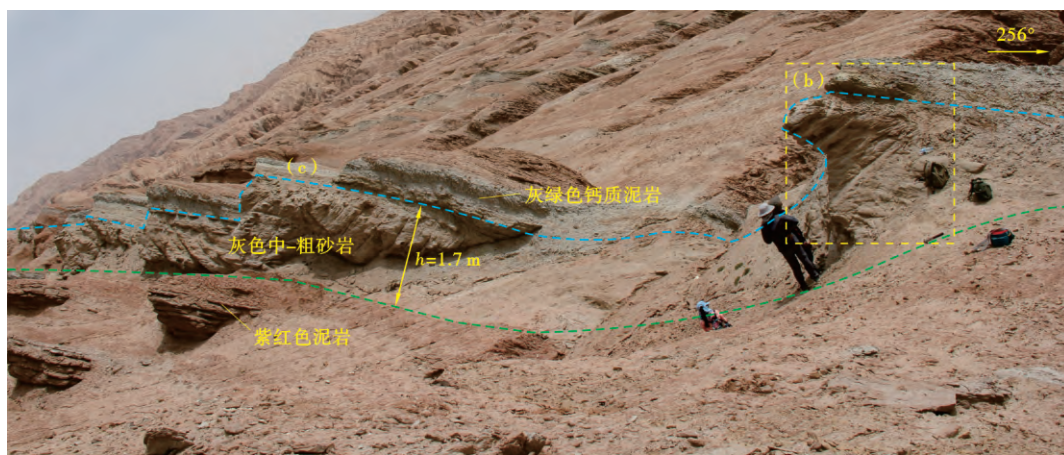
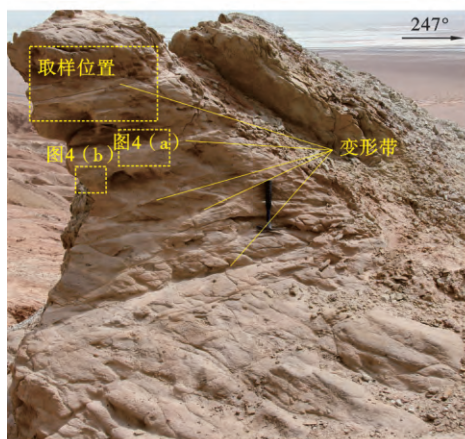


图 2 柴达木盆地油砂山构造带构造演化规律[剖面位置见图 1(b)]

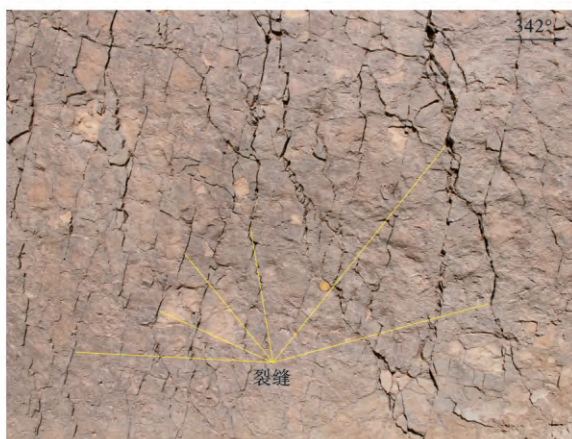
Fig. 2 Structure evolution of Youshashan structural belt in Qaidam Basin



(a) 柴达木盆地地下油砂山组



(b) 油砂山背斜带高孔隙砂岩中的变形带



(c) 油砂山背斜带低孔泥岩中的裂缝

图 3 油砂山构造带地层特征及伴生的亚地震构造

Fig. 3 Characteristics of formation and sub-seismic structure of Youshashan structural belt

砂岩层的含油性较好,油砂山组气藏具有单油(气)层厚度薄、单井在纵向油(气)层数多的特征,属于典型构造油气藏^[29],具有高丰度、长井段以及多油气水单元的层状特征^[29]。

2 变形带的类型及发育特征

考虑影响岩石变形的因素,利用孔隙度和泥质含量大小可对岩石进行分类。根据孔隙度可将岩石划分为高孔隙性岩石(孔隙度大于 15%)和低—非孔隙性岩石(孔隙度小于 15%),变形带主要发育在高孔隙性岩石中^[1-3,6-7,9]。根据泥质含量,可将砂岩分为纯净砂岩(泥质含量小于 15%)和不纯净砂岩(泥质含量介于 15%~40%)^[2,9,30]。若岩石受力发生变形,高孔隙性纯净砂岩处于未固结—半固结成岩阶段时,微观上颗粒发生旋转、滚动导致颗粒重排,形成解聚型变形带(disaggregation bands)^[1-3];当埋深增加,岩石固结程度增大,高孔纯净砂岩处于固结成岩阶段时,微观上颗粒旋转、滚动且沿着接触边界发生摩擦滑动,导致颗粒发生不同程度的破碎,形成碎裂型变形带(cataclastic

bands)^[1-3,7,9];高孔隙性不纯净砂岩由于泥质含量较高,受力后黏土矿物起到“润滑剂”的作用,促使颗粒重排且保护颗粒不发生破碎,形成变形带的类型为层状硅酸盐带(phyllsilicate bands)^[1-2]。

油砂山构造带逆冲断层活动,使得断层上盘形成断层相关褶皱,褶皱的转折端的最大弯曲点部位应变集中,在下油砂山组砂岩层和泥岩层中形成了大量的亚地震构造。通过取心和测井资料表明:油砂山背斜下油砂山组储层孔隙度变化范围为 11.23%~44.6%,平均约为 22.3%^[29],渗透率变化范围为 1~400 mD^[31],最大可达 1000 mD^[32]。储层泥质含量普遍小于 15%,属于纯净砂岩,因此,该套储层为高孔隙性、高渗透率性纯净砂岩。下油砂山组储层埋深整体普遍低于 3000 m,处于固结中等围压条件^[1-2]。当应变速率较低时,高孔隙性纯净砂岩受力后分选磨圆较好的矿物结晶时形成的解理促使颗粒接触点应力增加,导致颗粒破碎、颗粒尺寸减小和孔隙坍塌^[6],称之为碎裂作用^[1-2,33-35],伴生了自然界发育最为广泛的一种变形带,即为碎裂型变形带。下油砂山组整体具有砂-泥互层的特征[图 3(a)],变形带

仅发育在下油砂山组的高孔隙性砂岩层内[图 3(b)]。砂岩层上部为灰绿色钙质泥岩,下部为紫红色泥岩,泥岩层孔隙性较砂岩层差,颗粒之间紧密堆积,没有足够的孔隙空间,受力后颗粒无法发生旋转、滚动,而是沿多个颗粒接触点发生破裂作用(fracturing)^[2],在两套泥岩层内形成裂缝[图 3(c)]。因此,油砂山背斜高孔隙性的下油砂山组砂岩在构造应力的作用下,发生了碎裂作用,形成典型的碎裂型变形带(图 3)。

2.1 变形带的宏观特征

油砂山构造带露头区的新鲜观察面上,与母岩(含油)相比,变形带的颜色比母岩浅,整体表现为发白的特征[图 3(b)、图 4]。由于碎裂型变形带形成过程中,微观上发生孔隙坍塌和颗粒破碎,形成碎屑和基质填充在孔隙中,导致变形带的强度明显强于两侧未发生变形的高孔隙性围岩^[2]。当受到风化剥蚀时,变形带的抗风化能力好于围岩,因此,大部分碎裂型表现为正风化地形,以似肋骨状凸出的形态发育^[1-3,9](图 4)。

一般来说,单条变形带的厚度较小,普遍为毫米级,尺度在 0.1~6 mm 范围内变化(图 4),绝大部分约为 2 mm。沿变形带的延伸方向,厚度表现为不均一性。若构造应力再次作用于碎裂型变形带,由于其内聚力强度较大,因此,在先存的碎裂型变形带旁的围岩中会形成新的变形带,这个过程称之为应变硬化作用(strain harden)^[2,8,35],导致形成了多条性质一致的单条变形带。这种性质相似、近平行发育的多条变形带的组合也可称为“簇状”变形带[图 4(a)]^[1-2,6-7]。“簇状”变形带的厚度为厘米级^[1],油砂山背斜中发育的“簇状”变形带厚度为 4.5 cm[图 4(a)]。变形带的延伸长度受到露头出露情况的限制无法准确测量。碎裂型变形带的位移一般为毫米级,根据两条变形带的组合关系可以看出晚期变形带的位移约为 0.8 cm[图 4(b)]。碎裂型变形带发育多种组合模式(图 4),如共轭、交叉、叠覆、平行等^[36-38]。研究区主要发育有“簇状”[图 4(a)]、交切型[图 4(b)]、放射状[图 3(b)]和网状变形带[图 4(c)]。

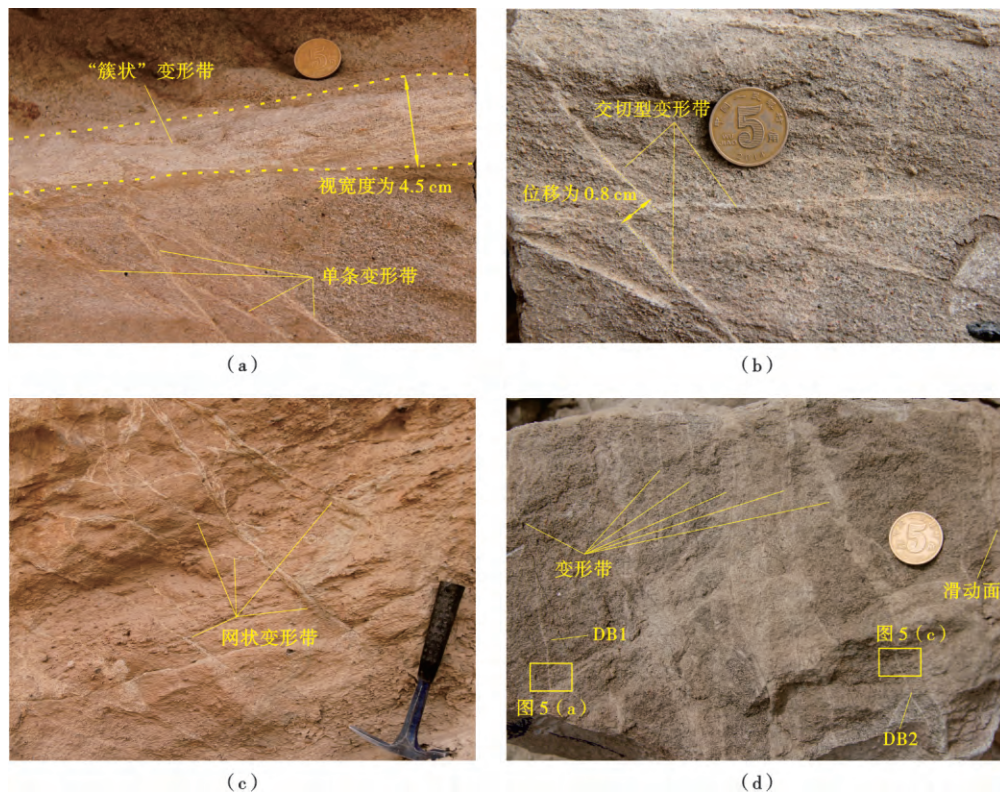


图 4 柴达木盆地油砂山构造带变形带宏观特征

Fig. 4 Macro-characteristics of deformation bands in Youshashan structural belt of Qaidam Basin

2.2 变形带的微观特征

微观上,变形带与未变形母岩具有截然不同的特征(图 5)。未变形母岩颗粒间存在明显的孔隙,孔隙性较好,颗粒尺寸较大,一般为 200~400 μm ,分选较好。部分颗粒虽发生轻微的破裂,但保存完整[图 5(c)、图 5(f)]。岩石受力后,颗粒接触点应力集中,导致发

生碎裂作用,带内大部分颗粒发生了剥落和破碎,形成碎屑和基质(碎屑颗粒直径小于母岩颗粒直径的十分之一)。颗粒尺寸明显减小,分选较未变形母岩变差[图 5(b)、图 5(d)]。由于压实作用导致孔隙发生了坍塌,粒度较小的碎屑和基质填充在孔隙中,成分与围岩一致,未发生变化,但孔隙性变差,这是碎裂变形的直

接证据(图 5)。变形带与两侧未变形母岩过渡处,颗粒之间紧密接触,孔隙性变差,颗粒发生了轻微的破碎,出现粒内缝,完整性好于变形带带内,颗粒尺寸同母岩比变化不大,但微裂缝的数量明显增加[图 5(b)、

图 5(d)]。微观上也可观察到变形带的多种组合模式,即多条变形带可呈“簇状”,也可呈“放射状”发育。宏观上厚度较大的变形带,可能由间距极小的多条变形带的组成,微观上可对其进行识别。

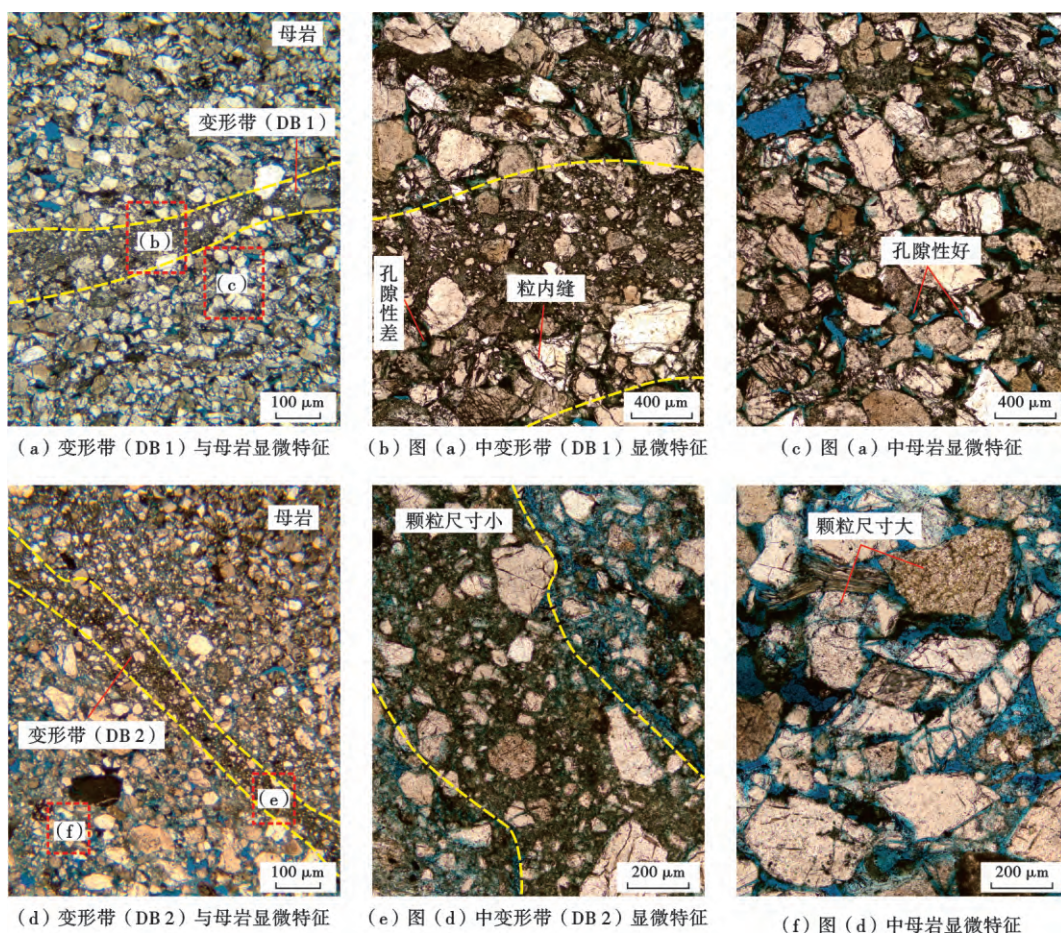


图 5 柴达木盆地油砂山构造带变形带微观特征

Fig. 5 Micro-structure of deformation bands in Youshashan structural belt of Qaidam Basin

2.3 变形带的物性特征

变形带带内颗粒发生的变形,导致其物性同未变形母岩相比发生变化。选取了油砂山背斜中走向与背斜长轴方向近平行的变形带和其附近未发生变形的母岩进行孔隙度和渗透率的测量[图 3(b)]。同时,由于变形带的渗透率具有明显的各向异性,垂直于变形带的渗透率与平行于变形带的渗透率差异明显。国内外研究表明,平行于变形带的渗透率同未变形母岩相比变化不大,垂直于变形带的渗透率同未变形母岩相比发生不同程度的变化,更具有研究意义^[1-2,39]。因

此,测试了垂直于变形带走向的渗透率,由于测试的岩样由厚度较小的变形带和未变形的围岩共同组成,利用常规方法对岩样进行渗透率测试得出的结果无法真实反映变形带的渗透率。因此,需要利用达西定律对测试结果进行校正,通过样品长度、变形带厚度、未变形母岩长度及渗透率测试数据,计算出变形带的渗透率 k_{db} ^[40-42]:

$$K_{db} = l_{db} / (l_t/k_t - l_{br}/k_{br}) \quad (1)$$

通过式(1)计算出变形带的渗透率,测试结果如表 1 所示。

表 1 油砂山构造带变形带与母岩的渗透率

Table 1 Permeability of deformation bands and host rock in Youshashan structural belt

样品号	岩样总长度/mm	样品渗透率/mD	未变形母岩渗透率/mD	变形带条数	变形带厚度/mm	变形带渗透率/mD
YSS-1	50	537	952.00	1	5	109.31
YSS-2	50	728	700.00	1	3	156.19
YSS-3	50	145	1306.00	1	2	11.27

通过实验测试和计算的结果表明:未变形母岩和变形带的孔隙度差异明显。未变形母岩孔隙度普遍大于16.8%,最大约为25.6%,而相对应的变形带的孔隙度仅为4.58%,与母岩比降低了21.02%。变形带的孔隙度介于1.86%~4.58%,平均孔隙度为2.96%。因此,同母岩相比,变形带的孔隙度发生了明显的降低,平均降低约17.4%[图6(a)]。变形带的低孔隙性特征证明了变形带形成过程中颗粒的破碎和孔隙的坍塌,从而导致颗粒的

紧密排列,降低了岩石的孔隙度。变形带的渗透率同未变形母岩相比也发生了不同程度的降低。未变形母岩的渗透率介于952~1306 mD。变形带的渗透率介于11.27~156.19 mD,同母岩相比降低程度较小,普遍降低1~2个数量级[图6(b)]。变形带的物性特征与其微观特征具有一致性,变形带的发育降低了砂岩层的物性,增加了储层的非均质性,这与Fossen等观察和测试得出的变形带特征一致^[40,43-44]。

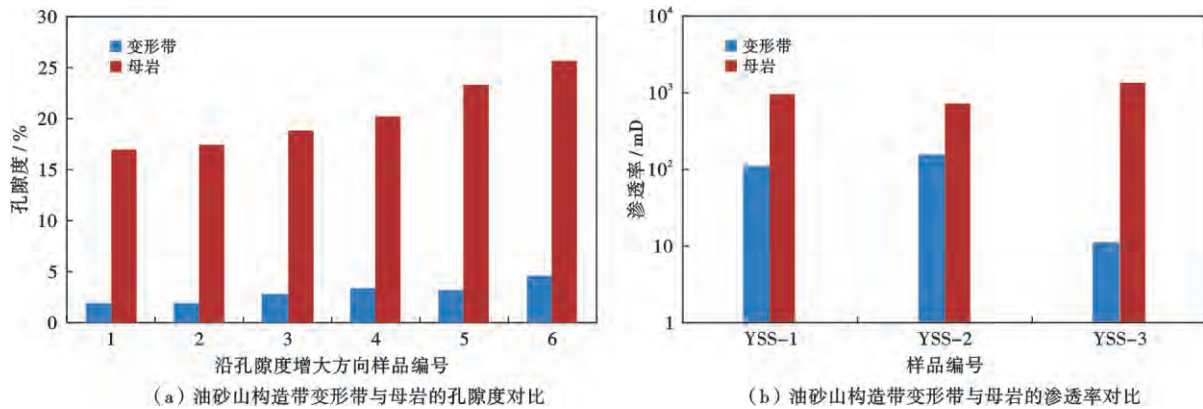


图6 油砂山构造带变形带与母岩孔隙度和渗透率对比

Fig. 6 Porosity and permeability of deformation bands and host rock in Youshashan structural belt

3 变形带对流体流动的影响

3.1 变形带的形成时期与油气成藏期的关系

变形带是高孔隙性岩石应变集中作用的产物^[1-3,43-45],断裂边部(断层带的破碎带中)和褶皱的转折端处是常见的发育变形带的部位。油砂山断层为典型盖层滑脱型断层,形成于逆冲走滑—再生前陆盆地阶段,因此,该断裂属于晚期走滑逆冲作用的产物,控制着油砂山背斜的形成。变形带发育在油砂山逆冲断层控制的背斜枢纽带上(图3),因此,变形带的形成时期受控于油砂山断裂的形成演化过程,即开始形成期为上油砂山组沉积时期,终止于第四纪(图2)。通过对紧邻油砂山构造带的英东构造英东107井的埋藏史进行模拟,结合包裹体均一温度测试结果研究(图7),认为油砂山构造带主要有两期油气充注,充注时间分别约为12 Ma和6 Ma^[29]。第一成藏期对应地质时期为下油砂山组(N₂¹y)沉积末期,第二成藏期对应地质时期为狮子沟组沉积末期(N₂³s)—第四纪。从油砂山背斜带中变形带的形成时期与成藏期匹配关系来看,油砂山背斜带中变形带的形成时期明显晚于第一成藏期,但与第二成藏期基本一致。因此,在第二成藏期时,变形带可能对流体运移具有一定影响。

3.2 变形带对流体流动的影响

目前,国际上对变形带对流体流动影响的探讨已

有十几年^[1,7,38,40-41],尽管变形带对油气聚集是否起到封闭作用仍很难确定,但研究表明变形带的发育造成了储层渗透率的各向异性,各向异性对流体流动的影响取决于变形带渗透率的降低程度、走向和数量^[44]。变形带渗透率的降低程度取决于颗粒的碎裂程度,颗粒破碎的越严重,渗透率降低的程度越大,对流体流动的影响越为显著^[38,40,44]。变形带的方向对流体流动也有一定的影响,若流体平行于变形带流动,由于变形带的厚度较小,不会阻碍流体的流动,流体往往沿着变形带的延伸方向流动。若流体流动方向垂直于变形带,由于变形带渗透率的变化,导致变形带对流体的流动造成影响。变形带的数量越多,“簇状”变形带累积厚度越大,当流体垂直于变形带流动时,受到的阻碍作用越大。因此,为了探索变形带对流体流动的影响,Fossen和Bale^[40]提出一个理想化的数值计算模拟模型,模拟高孔隙性砂岩内变形带对流体流动的影响。假设流体垂直于变形带流动,通过设定不同的变形带的渗透率值和条数,计算储层中发育变形带时的流体流动效率。基于变形带和母岩渗透率以及变形带条数三者关系,建立了变形带对流体流动效率影响的定量评价图版^[40,46]。模拟结果表明:变形带的条数越多,对流体流动效率的影响越为明显,但渗透率降低程度对流体流动效率起决定性作用,与母岩相比,当变形带渗透率降低约3个数量级时,储层内流体流动效率明显降低,变

形带对流体流动具有阻碍作用,变形带的渗透率降低的程度越大,流动效率降低的越为显著,对流体流动起到越为明显的阻碍作用^[40,46](图 8)。根据油砂山构造带中变形带和未变形母岩的发育特征及渗透率数据进行模拟(图 6),结果表明:当油砂山构造带中变形带的渗透率同母岩相比降低不到 1 个数量级时,对流动效率几乎

无影响;当变形带渗透率比母岩降低约 2 个数量级时,流动效率略有降低,最大仅降低 16%(图 8)。因此,油砂山构造带中变形带的发育对流动效率几乎无影响或仅使流动效率略有降低(图 8),这与露头中观察到变形带两侧含油性无差异的特征完全吻合(图 4),说明变形带对流体流动基本无阻滞作用。

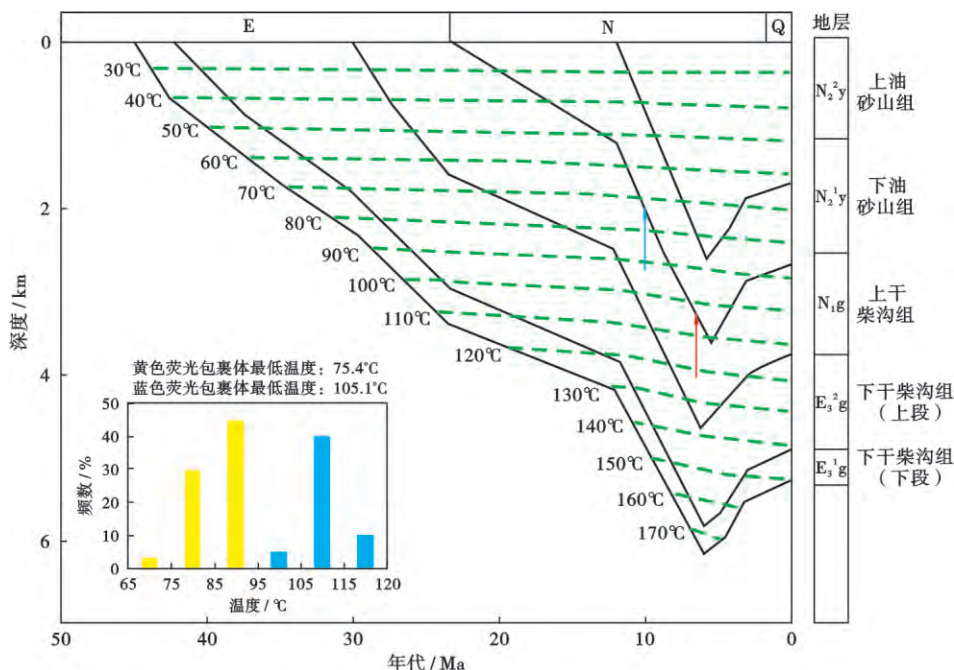


图 7 油砂山构造带埋藏史(据文献[29]修改)

Fig. 7 Buried history of Youshashan structural belt

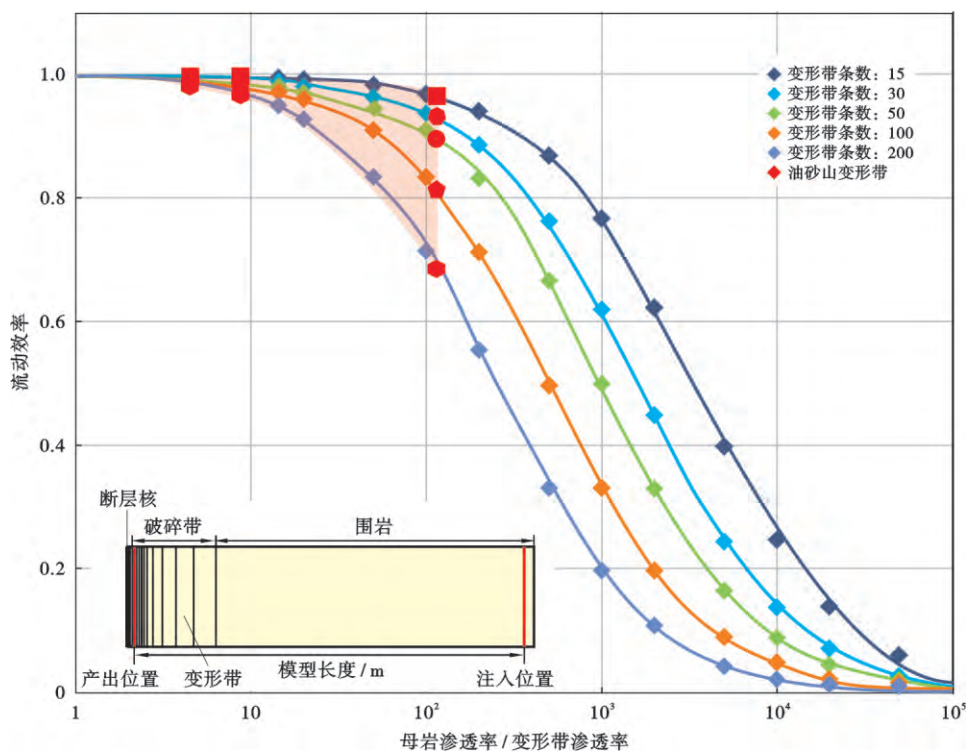


图 8 母岩与变形带渗透率比值与流体流动效率的关系(据文献[40,46]修改)

Fig. 8 Flow efficiency versus host rock and deformation band permeability ratio

4 结论

(1) 柴达木盆地西缘油砂山构造带是古近纪以来受青藏高原持续挤压隆升作用的结果,下油砂山组低孔隙性泥岩形成裂缝,高孔隙性砂岩以碎裂变形机制为主,形成典型的碎裂型变形带。宏观上,变形带主要具有3个典型特征:①颜色比母岩浅,表现为发白特征;②“肋状”凸出的正风化地形特征;③“簇状”分布特征较为普遍。微观上,变形带表现出颗粒破碎、颗粒尺寸明显减小、颜色相对变深、分选变差和孔隙空间明显降低特征。同时,与母岩相比,变形带的孔隙度平均降低的约17.1%,渗透率降低1~2个数量级,即变形带的形成导致储层孔隙度和渗透率降低,增加了储层的非均质性。

(2) 根据油气成藏期和变形带形成时期的耦合关系,表明油砂山背斜带中变形带形成时期与第二成藏期基本一致。在此基础上,应用母岩与变形带渗透率比值与流体流动效率的定量图版表征变形带对流体流动的影响程度,模拟结果表明:当变形带低于母岩渗透率3个数量级时,变形带开始对流体流动起到重要的阻滞作用;当变形带渗透率降低约5个数量级时,流动效率趋近于零,变形带可能对流体流动起到阻止作用。而油砂山构造带中变形带渗透率较母岩最大降低仅为2个数量级,因此,变形带对流体流动影响较小,基本无明显的阻滞作用。

符号注释: K_{db} —变形带渗透率,mD; l_{db} —变形带厚度,mm; l_t —岩样总长度,mm; K_t —样品渗透率,mD; l_{hr} —未变形母岩长度,mm; K_{hr} —未变形母岩渗透率,mD。

参考文献

- [1] FOSSEN H, SCHULTZ R A, SHIPTON Z K, et al. Deformation bands in sandstone: a review[J]. *Journal of the Geological Society*, 2007, 164(4): 755-769.
- [2] FOSSEN H. *Structural geology*[M]. New York: Cambridge University Press, 2010: 119-185.
- [3] 付晓飞, 肖建华, 孟令东. 断裂在纯净砂岩中的变形机制及断裂带内部结构[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2014, 44(1): 25-37. FU Xiaofei, XIAO Jianhua, MENG Lingdong. Fault deformation mechanisms and internal structure characteristics of fault zone in pure sandstone[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2014, 44(1): 25-37.
- [4] 黄小娟, 李治平, 周光亮, 等. 裂缝性致密砂岩储层裂缝孔隙度建模——以四川盆地平落坝构造须家河组二段储层为例[J]. *石油学报*, 2017, 38(5): 570-577. HUANG Xiaojuan, LI Zhiping, ZHOU Guangliang, et al. Fracture porosity modeling of fractured tight sandstone reservoir: a case study of the reservoir in Member 2 of Xujiahe Formation, Pingluoba structure, Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(5): 570-577.
- [5] POLLARD D D, FLETCHER R C. *Fundamentals of structural geology*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005: 512.
- [6] AYDIN A, JOHNSON A M. Development of faults as zones of deformation bands and as slip surfaces in sandstone[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1978, 116(4/5): 931-942.
- [7] ANTONELLINI M, AYDIN A, ORR L. Outcrop-Aided characterization of a faulted hydrocarbon reservoir: arroyo Grande oil field, California, USA[M]// HANEBERG W C, MOZLEY P S, MOORE J C, et al. *Faults and Subsurface Fluid Flow in the Shallow Crust*. California, USA: American Geophysical Union, 1999: 7-26.
- [8] HESTHAMMER J, FOSSEN H. Uncertainties associated with fault sealing analysis[J]. *Petroleum Geoscience*, 2000, 6(1): 37-45.
- [9] FISHER Q J, KNIPE R J. The permeability of faults within siliclastic petroleum reservoirs of the North Sea and Norwegian Continental Shelf[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2001, 18(10): 1063-1081.
- [10] SCHUELLER S, BRAATHEN A, FOSSEN H, et al. Spatial distribution of deformation bands in damage zones of extensional faults in porous sandstones: statistical analysis of field data[J]. *Journal of Structural Geology*, 2013, 52: 148-162.
- [11] SCHULTZ R A, FOSSEN H. Terminology for structural discontinuities[J]. *AAPG Bulletin*, 2008, 92(7): 853-867.
- [12] 吴婵, 阎存凤, 李海兵, 等. 柴达木盆地西部新生代构造演化及其对青藏高原北部生长过程的制约[J]. *岩石学报*, 2013, 29(6): 2211-2222. WU Chan, YAN Cunfeng, LI Haibing, et al. Cenozoic tectonic evolution of the western Qaidam Basin and its constrain on the growth of the northern Tibetan Plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(6): 2211-2222.
- [13] 付锁堂, 张道伟, 薛建勤, 等. 柴达木盆地致密油形成的地质条件及勘探潜力分析[J]. *沉积学报*, 2013, 31(4): 672-682. FU Suotang, ZHANG Daowei, XUE Jianqin, et al. Exploration potential and geological conditions of tight oil in the Qaidam Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(4): 672-682.
- [14] 夏志远, 刘占国, 李森明, 等. 岩盐成因与发育模式——以柴达木盆地英西地区古近系下干柴沟组为例[J]. *石油学报*, 2017, 38(1): 55-66. XIA Zhiyuan, LIU Zhanguo, LI Senming, et al. Origin and developing model of rock salt: a case study of Lower Ganchaigou Formation of Paleogene in the west of Yingxiong ridge, Qaidam Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(1): 55-66.
- [15] 张斌, 何媛媛, 陈琰, 等. 柴达木盆地西部咸化湖相优质烃源岩地球化学特征及成藏意义[J]. *石油学报*, 2017, 38(10): 1158-1167. ZHANG Bin, HE Yuanyuan, CHEN Yan, et al. Geochemical characteristics and oil accumulation significance of the high quality saline lacustrine source rocks in the western Qaidam Basin, NW China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(10): 1158-1167.
- [16] 管树巍, 张水昌, 张永庶, 等. 柴达木盆地西部古近系生烃凹陷的边界效应与油气聚集模式[J]. *石油学报*, 2017, 38(11): 1217-1229. GUAN Shuwei, ZHANG Shuichang, ZHANG Yongshu, et al. Boundary effect and hydrocarbon accumulation pattern of Paleogene hydrocarbon-generation depression in the western Qaidam Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(11): 1217-1229.
- [17] 黄成刚, 常海燕, 崔俊, 等. 柴达木盆地西部地区渐新世沉积特征与油气成藏模式[J]. *石油学报*, 2017, 38(11): 1230-1243. HUANG Chenggang, CHANG Haiyan, CUI Jun, et al. Oligocene sedimentary characteristics and hydrocarbon accumulation model in the western Qaidam Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(11): 1230-1243.
- [18] 王亚东, 张涛, 迟云平, 等. 柴达木盆地西部地区新生代演化特征与青藏高原隆升[J]. *地学前缘*, 2011, 18(3): 141-150. WANG Yadong, ZHANG Tao, CHI Yunping, et al. Cenozoic uplift of the Tibetan Plateau: evidence from tectonic-sedimentary evolution of the Western Qaidam Basin[J]. *Earth Science Front-*

- tiers, 2011, 18(3): 141-150.
- [19] 郭泽清, 马寅生, 易士威, 等. 柴西地区古近系—新近系含气系统模拟及勘探方向[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(1): 82-92.
GUO Zeqing, MA Yinsheng, YI Shiwei, et al. Simulation and exploration direction of Paleogene-Neogene gas system in the western Qaidam Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(1): 82-92.
- [20] 赵凡, 孙德强, 闫存凤, 等. 柴达木盆地中新生代构造演化及其与油气成藏关系[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(5): 940-947.
ZHAO Fan, SUN Deqiang, YAN Cunfeng, et al. Meso-cenozoic tectonic evolution of Qaidam Basin and its relationship with oil and gas accumulation[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(5): 940-947.
- [21] 何登发, 李德生, 吕修祥. 中国西北地区含油气盆地构造类型[J]. 石油学报, 1996, 17(4): 8-18.
HE Dengfa, LI Desheng, LYU Xiuxiang. Tectonic types of petroliferous basins in NW China[J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, 17(4): 8-18.
- [22] 郭召杰, 张志诚. 阿尔金盆地群构造类型与演化[J]. 地质论评, 1998, 44(4): 357-364.
GUO Zhaojie, ZHANG Zhicheng. Structural style and tectonic evolution of the basins in the Altun Region[J]. Geological Review, 1998, 44(4): 357-364.
- [23] 李相博, 袁剑英, 陈启林, 等. 柴达木盆地新生代成盆动力学模式[J]. 石油学报, 2006, 27(3): 6-10.
LI Xiangbo, YUAN Jianying, CHEN Qilin, et al. Patterns of Cenozoic sedimentary basin-forming dynamics in Qaidam Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(3): 6-10.
- [24] 肖安成, 陈志勇, 杨树锋, 等. 柴达木盆地北缘晚白垩世古构造活动的特征研究[J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 451-457.
XIAO Ancheng, CHEN Zhiyong, YANG Shufeng, et al. The study of Late Cretaceous paleostructural characteristics in northern Qaidam Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(4): 451-457.
- [25] 杨藩, 叶素娟, 曹春潮, 等. 新生代阿尔金断层中、东段右行走滑特征[J]. 地质科学, 1994, 29(4): 346-354.
YANG Fan, YE Sujuan, CAO Chunchao, et al. Right lateral characteristics of the middle eastern segment of Altun fault in Cenozoic Era[J]. Science Geologica Sinica, 1994, 29(4): 346-354.
- [26] 陈正乐, 张岳桥, 陈宣华, 等. 阿尔金断裂中段晚新生代走滑过程的沉积响应[J]. 中国科学(D辑), 2001, 31(S1): 90-96.
CHEN Zhengle, ZHANG Yueqiao, CHEN Xuanhua, et al. Late Cenozoic sedimentary process and its response to the slip history of the central Altyn Tagh fault, NW China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2001, 44(S1): 103-111.
- [27] 魏国齐, 贾承造, 李本亮. 我国中西部前陆盆地的特殊性和多样性及其天然气勘探[J]. 高校地质学报, 2005, 11(4): 552-557.
WEI Guoqi, JIA Chengzao, LI Benliang. Particularity and diversity of the foreland basins in the central and western China and the natural gas exploration in the foreland basins[J]. Geological Journal of China Universities, 2005, 11(4): 552-557.
- [28] 付玲, 关平, 赵为永, 等. 柴达木盆地古近系路乐河组重矿物特征与物源分析[J]. 岩石学报, 2013, 29(8): 2867-2875.
FU Ling, GUAN Ping, ZHAO Weiyong, et al. Heavy mineral feature and provenance analysis of paleogene Lulehe formation in Qaidam Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(8): 2867-2875.
- [29] 隋立伟, 方世虎, 孙永河, 等. 柴达木盆地西部狮子沟—英东构造带构造演化及控藏特征[J]. 地学前缘, 2014, 21(1): 261-270.
SUI Liwei, FANG Shihu, SUN Yonghe, et al. The tectonic evolution and accumulation controlling characteristics of Shizigou-Yingdong structural belt of western Qaidam Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(1): 261-270.
- [30] 高树生, 胡志明, 刘华勋, 等. 不同岩性储层的微观孔隙特征[J]. 石油学报, 2016, 37(2): 248-256.
GAO Shusheng, HU Zhiming, LIU Huaxun, et al. Microscopic pore characteristics of different lithological reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(2): 248-256.
- [31] 杨凯峰. 英东地区油砂山组储层成岩作用研究[D]. 西安: 西北大学, 2016.
YANG Kaifeng. Research on diagenesis of the Youshashan formation in Yingdong Areas, Qaidam Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2016.
- [32] 黄叶秋. 英东地区沉积储层特征及主控因素分析[D]. 青岛: 中国石油大学, 2015.
HUANG Yequiu. Sedimentary reservoir characteristics and main control factors analysis in Ying Dong Area[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2015.
- [33] SIBSON R H. Fault rocks and fault mechanisms[J]. Journal of the Geological Society, 1977, 133(3): 191-213.
- [34] PITTMAN E D. Effect of fault-related granulation on porosity and permeability of quartz sandstones, Simpson Group(Ordovician), Oklahoma[J]. AAPG Bulletin, 1981, 65(11): 2381-2387.
- [35] KNIFE R J. Faulting processes and fault seal[M]// LARSEN R M, BREKKE H, LARSEN B T, et al. Structural and Tectonic Modelling and Its Application to Petroleum Geology. Stavanger, Norway: Elsevier, 1992: 325-342.
- [36] CHEMENDA A I, BALLAS G, SOLIVA R. Impact of a multi-layer structure on initiation and evolution of strain localization in porous rocks: field observations and numerical modeling[J]. Tectonophysics, 2014, 631: 29-36.
- [37] CASHMAN S, CASHMAN K. Cataclasis and deformation-band formation in unconsolidated marine terrace sand, Humboldt County, California[J]. Geology, 2000, 28(2): 111-114.
- [38] BALLAS G, FOSSEN H, SOLIVA R. Factors controlling permeability of cataclastic deformation bands and faults in porous sandstone reservoirs[J]. Journal of Structural Geology, 2015, 76: 1-21.
- [39] ANTONELLINI M A, AYDIN A, POLLARD D D. Microstructure of deformation bands in porous sandstones at Arches National Park, Utah[J]. Journal of Structural Geology, 1994, 16(7): 941-959.
- [40] FOSSEN H, BALE A. Deformation bands and their influence on fluid flow[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(12): 1685-1700.
- [41] ROTEVATN A, FOSSMARK H S, BASTENSEN E, et al. Do deformation bands matter for flow? Insights from permeability measurements and flow simulations in porous carbonate rocks[J]. Petroleum Geoscience, 2017, 23(1): 104-119.
- [42] 刘志达. 高孔隙性岩石中变形带成因机制及对流体流动的影响[D]. 大庆: 东北石油大学, 2017.
LIU Zhida. The Mechanisms and the influence on fluid flow of deformation bands[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2017.
- [43] FOSSEN H, ZULUAGA L F, BALLAS G, et al. Contractional deformation of porous sandstone: insights from the Aztec Sandstone, SE Nevada, USA[J]. Journal of Structural Geology, 2015, 74: 172-184.
- [44] FOSSEN H, SOLIVA R, BALLAS G, et al. A review of deformation bands in reservoir sandstones: geometries, mechanisms and distribution[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2017, 459: 25.
- [45] FOSSEN H, SCHULTZ R A, TORABI A. Conditions and implications for compaction band formation in the Navajo Sandstone, Utah[J]. Journal of Structural Geology, 2011, 33(10): 1477-1490.
- [46] 贾茹, 付晓飞, 孟令东, 等. 断裂及其伴生微构造对不同类型储层的改造机理[J]. 石油学报, 2017, 38(3): 286-296.
JIA Ru, FU Xiaofei, MENG Lingdong, et al. Transformation mechanism of fault and its associated microstructures for different kinds of reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(3): 286-296.

(收稿日期 2017-11-29 改回日期 2018-04-08 编辑 宋宁)