

Sinjar 隆起西翼储层裂缝发育特征及形成机制

宁飞¹, 何娟¹, 赵亮东², 常洪卫³

1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083
2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083
3. 中国石化中原油田分公司勘探开发研究院, 濮阳 457001

摘要 裂缝发育程度是影响裂缝性油气藏产能的决定因素。为了更好地揭示裂缝性油藏的发育特征, 根据三维地震资料解释成果结合 FMI 成像测井资料, 利用构造要素相关性分析及构造解析方法, 探讨了 Sinjar 隆起西部倾末端裂缝发育特征及形成机制。研究表明: Sinjar 隆起西部裂缝发育特征在纵向上存在分层性, 从深层向浅层裂缝走向呈现逆时针旋转的特征, 认为裂缝的发育和早期张性大断裂在后期的走滑再活动有关。走滑断裂从深层到浅层逐渐偏离原断层走向, 剪破裂方向从深层向浅层逐渐分叉, 越往上破裂方向越远离主断层, 同样影响了裂缝的走向。由于深层大断裂和浅层裂缝发育存在一定相关性, 受深层断裂的影响, 裂缝发育强度由 Jaddala 组向 Chilou 组逐渐变弱, 而裂缝又是碳酸盐岩储集层的关键元素, 因此深层走滑断裂带发育的区域是寻找优质储层的有力目标。

关键词 碳酸盐岩储层; 裂缝; Sinjar 隆起; 叙利亚

碳酸盐岩是重要的油气储集岩, 占沉积岩总量 20% 的碳酸盐岩储藏了世界探明储量 50% 以上的油气^[1]; 裂缝是碳酸盐岩储集层中至关重要的因素, 影响了包括储层的改造、油气运移以及油气藏开发的全过程, 碳酸盐岩储层裂缝的发育程度是评价储层介质好坏的一个重要指标, 是决定能否成为有效储层的关键因素。

Sinjar 隆起位于西特提斯构造域, 是世界重要的油气产区, 其西部倾末端位于叙利亚境内, 在该区域的多口钻井都见到油气显示, 部分井取得工业性油气流, 说明该区具有极大开发潜力。在过去的 20 年中, 许多学者对叙利亚境内的综合地质概况进行了详细的研究, 包括叙利亚东北部的构造演化^[2-4], 叙利亚东部的幼发拉底地槽的含油气系统^[5], 以及叙利亚中部的帕尔米拉褶皱冲断带^[6,7], 并发现了许多重要的油气田, 但是对 Sinjar 隆起却没有太多的关注, 特别是 Sinjar 油气区的裂缝成因、类型及分布规律等特征的研究, 目前并没有一个系统性的认识。裂缝作为碳酸盐岩油气储集空间和油气渗流通道, 直接影响油气的产出量^[8], 对该区裂缝性储层的研究具有一定的实践意义。本研究通过对研究区三维地震资料精细解释、FMI 成像测井数据统计, 结合区域构造演化事件, 分析 Sinjar 隆起西部裂缝发育特征及其分布规律。

1 地质背景

Sinjar 隆起坐落在阿拉伯板块西北缘, 主体部分位于伊拉克境内, 是一个大的地表背斜, 长轴走向近东西向, 与 Jebel Abd Al Aziz 隆起呈侧列展布 (图 1), 是一个新生代形成的隆起。其演化过程和阿拉伯板块与欧亚板块的碰撞事件息息相关, 并且受控于新特提斯洋的俯冲消减^[9]。研究区位

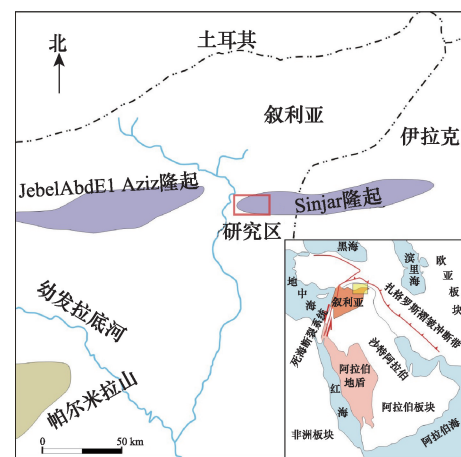


图 1 Sinjar 隆起构造位置示意

Fig. 1 Sketch map of structural location of Sinjar uplift

收稿日期: 2015-06-01; 修回日期: 2015-08-24

基金项目: 国家科技重大专项 (2011-05005-01-03)

作者简介: 宁飞, 博士, 研究方向为含油气盆地分析, 电子信箱: ningfei037@aliyun.com

引用格式: 宁飞, 何娟, 赵亮东, 等. Sinjar 隆起西翼储层裂缝发育特征及形成机制[J]. 科技导报, 2016, 34(13): 88-92; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.13.014

于Sinjar隆起西部倾末端,地处叙利亚境内。由于阿拉伯板块北部在前新生代受到了多次裂谷作用的影响^[9],新生代时期新特提斯洋的关闭使阿拉伯板块与欧亚板块碰撞,因此研究区后期经历了较为强烈的压扭作用,具有明显的反转构造的特征^[9]。反转构造形成的构造圈闭为油气聚集提供了良好的场所^[10,11],由于应力场的转换导致的断裂再活动极大地影响了裂缝的发育,进而影响了储层质量,在盆地内已发现的多个油气藏中,大多数与反转构造关系密切,优质的碳酸盐岩裂缝性储层是油气成藏的最关键因素^[12]。

Jaddala组-Chilou组岩性主要为含生屑泥晶灰岩和生屑泥晶灰岩,颗粒灰岩不发育,厚度约550~900 m,始新统一渐新统岩性和沉积环境类似,根据电测曲线和录井资料,将Jaddala组-Chilou组划分为9个小层,其中Chilou组上部A和B1小层被一套稳定分布、厚约10 m的硬石膏层分隔(图2)。

地层				深度 /m	岩性描述	沉积环境
系	统	组	段			
古近系	渐新统	Chilou	A	700	硬石膏	局限台地
			Anhydrite			蒸发台地
			B1			局限台地
			B2			浅水盆地
	始新统	Jaddala	B3	800	泥晶灰岩	深水盆地
			B4			
			A-B			
			C			
			D			
始新统	Jaddala	E	1300	泥晶灰岩与薄层燧石条带互层	深水盆地	
		1400				

图2 Sinjar隆起区Jaddala组-Chilou组地层柱状图
Fig. 2 Synthesis histogram of Jaddala and Chilou formation in Sinjar uplift

2 裂缝发育特征

裂缝发育程度受构造、岩性及成岩作用等多重因素影响控制。在Sinjar隆起西部,裂缝性储层主要分布在渐新统

Chilou组和始新统Jaddala组,此时沉积环境以低能缓坡为主,岩性相对单一,主要为泥灰岩、灰泥岩,局部沉积粒泥灰岩,因此成岩作用对区内裂缝形成的贡献很小,主要是受构造作用影响的次生裂缝,以剪切缝为主。

2.1 裂缝和断层的关系

裂缝和断层存在着不可分割的联系^[13-15],从研究区新的三维地震资料解释成果看(图3),由于早期裂陷作用的影响,北阿拉伯板块主要发育一系列垒、堑构造,表现在Sinjar隆起西部,主要为在前新生界发育大型断裂,后期由于应力场的反转,部分断裂复活,还有一些张性断裂由于倾角较陡,在挤压状态下,断裂不容易沿着原来的断面继续活动,因此早期的断裂在后期挤压应力场的表现为断层周边地层严重褶曲,或者发育伴生断裂。从剖面上看,隆起整体表现为受早期大断裂的控制。受深层断裂的影响,在始新统Jaddala组和渐新统Chilou组主要发育小规模断层或大尺度裂缝,浅层断裂或裂缝的发育受控于深层断裂的后期活动。

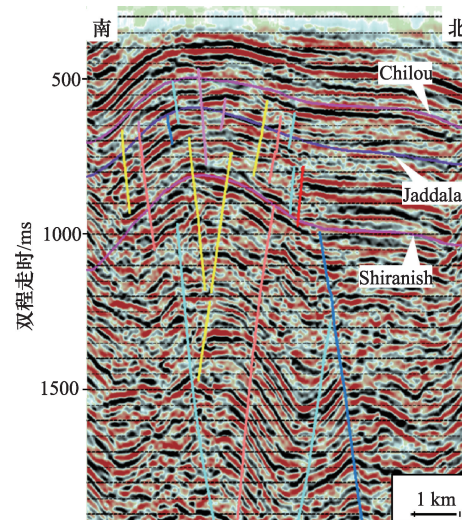


图3 过Sinjar西翼南北向典型地震剖面
Fig. 3 NS typical seismic profile in the west tip of Sinjar uplift

从地震剖面上可以看出,Jaddala组和Chilou组都可以解释出几乎没有断距的小断裂,或者称之为大尺度裂缝;并且裂缝的发育和深层断裂发育具有一定的继承性,浅层裂缝大多在深层断裂附近发育。

2.2 裂缝纵向分布特征

通过对研究区100余口井的FMI成像测井资料所反映出的超过1万余条裂缝进行统计,将裂缝走向数据反映到玫瑰花图上可以看出,浅层始新统Jaddala组至渐新统Chilou组裂缝较为发育,多以大尺度剪切裂缝为主,裂缝发育在纵向上存在明显的分层性,过Sinjar隆起的南北向曲率属性剖面图上反映出曲率异常由Jaddala组到Chilou组逐渐增加(图4),可以判断裂缝发育强度由深层向浅层逐渐变弱。裂缝走向主要为NNE方向,为了更清晰地分析裂缝的走向在纵向上的变化规律,依据旋回对比、分级控制的原则,从岩心、测井进

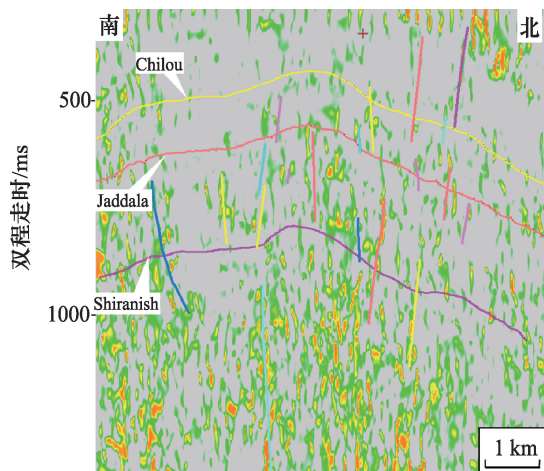


图4 过Sinjar隆起西翼南北向典型曲率剖面
Fig. 4 NS typical curvature attribute profile in the west tip of Sinjar uplift

行了小层划分,将 Chilou 组从上往下分为 Chilou A、Chilou B1、Chilou B2、Chilou B3 和 Chilou B4, Jaddala 组从上往下分为 Jaddala A-B、Jaddala C、Jaddala D 和 Jaddala E,并将裂缝在各小层的发育规律进行分别统计。

从分层统计的玫瑰花图上可以看出(图5),在 Chilou A、Chilou B1 层裂缝走向主要有 NNE 向和 NNW 向两组,其中 NNE 向裂缝占主导地位,NNW 向裂缝数量次之,NW 向裂缝发育较少;Chilou B2、Chilou B3 层裂缝发育方向比较杂乱,各个方向裂缝都有发育,其中 Chilou B2 以 NNE 向为主导,其他方向裂缝均有发育;和上面3层不同的是,Chilou B3 层裂缝主体走向除了 NNE 向和 NNW 向,还有相当一部分裂缝走向 NWW。Chilou B4 组裂缝走向主要以 NNE 向为主,有少量 NW 向裂缝发育。Jaddala 组裂缝走向和 Chilou 组裂缝走向有明显差异,除了 Jaddala A-B 层有少量 NNW 向裂缝发育外, Jaddala C、Jaddala D 和 Jaddala E 组裂缝主要以 NNE 向,伴随有少量 NE 向裂缝。

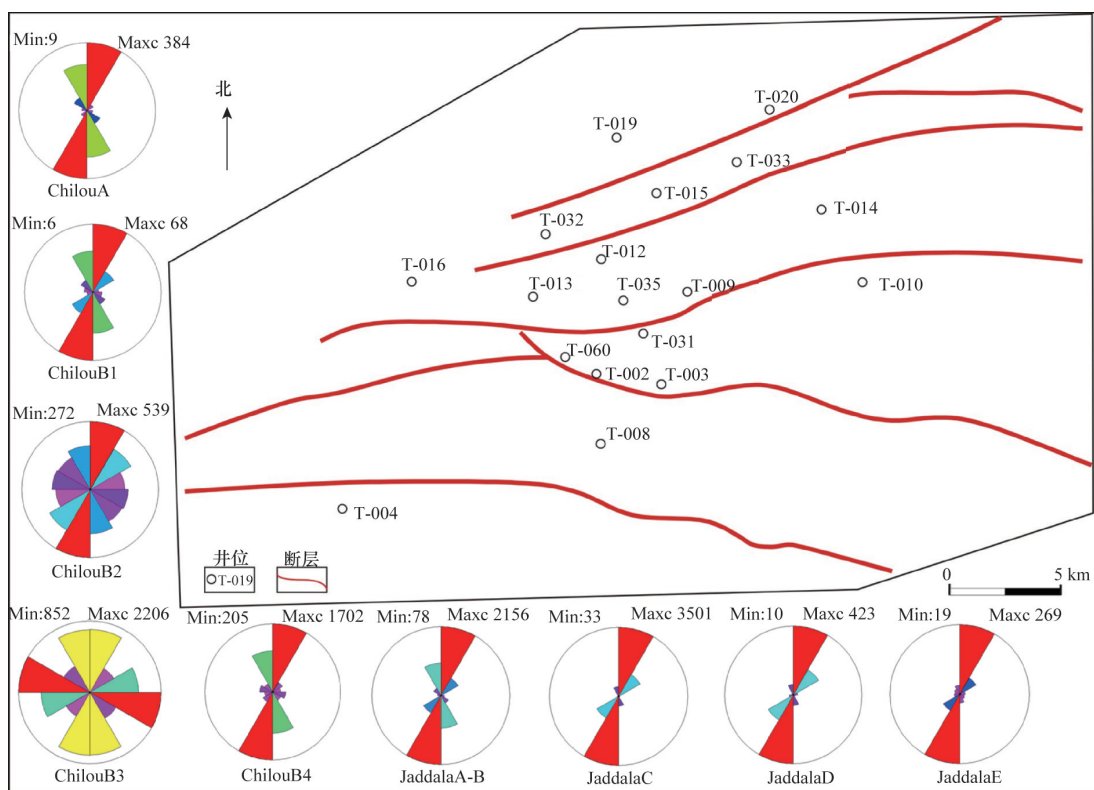


图5 分层统计的裂缝走向玫瑰花图
Fig. 5 Trend rose diagram of layered statistical fractures

从玫瑰花图反应的各个层裂缝走向叠合图可以看出(图6),NW 向裂缝在深层几乎不发育,直到 Jaddala A-B,才有少数走向 NNW 向的裂缝发育。往上到 Chilou 组,NW 向裂缝数量逐渐增多,但裂缝主体走向仍未 NNE 方向,只是在浅层 NW

方向裂缝占的比例逐渐增大。总体上看,从 Jaddala E 到 Chilou A,裂缝的走向呈现逆时针旋转的趋势,可能和后期的应力场转换过程中,深层断裂复活有关,深层断裂的活动影响了浅层裂缝的发育和分布。

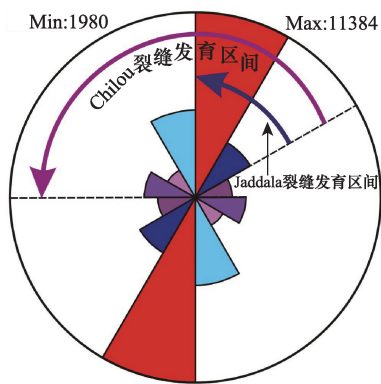


图6 Jaddala组和Chilou组裂缝走向叠合图
Fig. 6 Overlay map of fracture trend in Jaddala and Chilou formation

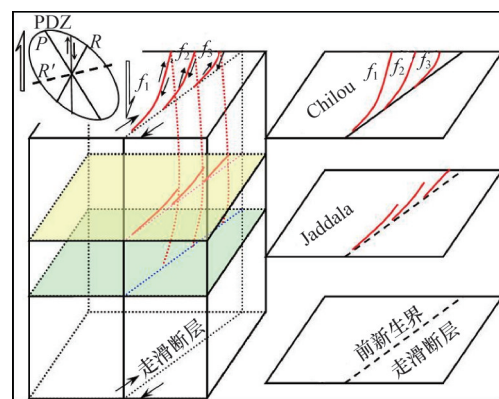
3 裂缝形成机制

分析裂缝的成因机理应该和区域构造运动相关联。Sinjar隆起自中生代以来的构造演化主要取决于阿拉伯板块北部边界反复的开合历史以及新特提斯洋的俯冲消减作用^[2]。由于板块边界不规则性的影响,板块之间的相互作用会形成复杂的构造应力场,反映到研究区表现为断裂系统及裂缝发育规律的复杂性。阿拉伯板块北缘受到了多次裂谷作用的影响,在白垩纪期间,至少有两次裂谷事件发生在叙利亚东北部^[3]。因此研究区深层多发育大型张性断裂,延伸较长,这些大的张性断裂控制着Sinjar地槽的演化。新特提斯洋在早白垩世开始向北俯冲,晚白垩世时,阿拉伯板块已经开始与伊朗地块碰撞,阿曼地区巨大的洋壳岩片被仰冲到阿拉伯大陆被动陆缘之上, Sinjar隆起此时已经经历了微弱的挤压应力场的作用。渐新世时,新特提斯洋几乎完全关闭,阿拉伯板块与欧亚大陆碰撞拼贴,使得阿拉伯板块北缘经历持续的挤压应力场的作用,挤压应力使部分深层断裂复活,表现为典型的反转构造的特征,还有一些早期发育的正断层由于倾角较陡,后期的挤压应力不足以使其继续活动,但可以看到其附近地层发生严重褶皱,或者断层之间地层严重破碎现象,说明应力场极性的反转使地层通过褶皱来吸收挤压应力,反转构造通过地层弯曲来表现出来。碰撞过程中由于板块边界的影响,叙利亚东北缘主要经历了NNE向挤压应力场,深层断裂受到压扭作用而重新复活,并影响了浅层裂缝的发育。

构造耦合作用是地质学中的普遍现象^[6],它可以解释深、浅层构造形成的相互关联性。由于小断裂或大尺度裂缝主要发育在始新统Jaddala组和渐新统Chilou组,断距较小,前新生界主要发育大型断裂,断距明显,因此研究区剖面构造样式呈现明显的双层结构。由于早期正断层在后期反转时具有很强的选择性,高陡的正断层不利于进一步反转,因此压扭应力有可能使正断层两盘产生水平位移,在走滑过程中,深层断裂的位移向上逐渐被地层吸收,破裂方向从深层

向浅层逐渐分叉,破裂方向越往上越远离主断层。这种双层结构剖面构造样式在伸展区尤为明显^[7]。此外,深部断层在后期活动过程中会在浅部地层内尖灭,引起上覆地层褶皱或产生新的破裂行为,距离断层上部尖灭点近的部位会产生应力集中,并且应力向上逐渐释放。浅部地层裂缝的发育和深层断裂的再活动息息相关,由于研究区内大多数深层断裂向上在Shiranish组地层顶部尖灭,Chilou组地层所受的应力比与Shiranish组地层直接接触的Jaddala组弱,因此裂缝发育强度从Jaddala组向上到Chilou组也逐渐变弱。

图7即为裂缝发育规律的空间模式。从图7可以看出,走滑断裂在后期活动时,破裂行为由深层到浅层存在差异。深层为NNE向的右旋走滑断层,浅层断裂发生分叉,随着地层变浅,分支断裂离主断层偏离角度逐渐变大,其走向呈现逆时针旋转的特征,每条分支断层都呈现右行走滑性质。走滑断层相当于位移矢量近水平的剪切破裂,右行力偶产生的应变椭圆上反映出两组破裂方向,即压剪性破裂面(P)和里德尔剪切面(R),随着分支断层走向向上逐渐逆时针偏转,主变形区(PDZ)走向也会向同方向偏转,两组剪破裂(P 剪切和 R 剪切)产生的裂缝其走向也呈现逆时针旋转的特征,这种空间模式可以解释研究区自Jaddala至Chilou组裂缝方向呈现逆时针旋转的原因。



据文献[17]修改

图7 裂缝发育空间模式

Fig. 7 Spatial model of fracture development

4 结论

1) Sinjar隆起西部裂缝的发育在纵向上具有明显的分层性特征,裂缝的走向从深层向浅层呈现逆时针旋转的特征。

2) 裂缝的发育受到深层张性断裂的在后期的再活动控制,主要受深层断裂在后期走滑作用影响,裂缝发育强度从深层Jaddala组至浅层Chilou组逐渐变弱。

3) Sinjar隆起多发育裂缝性储层,裂缝是决定储层质量好坏的关键因素,根据裂缝形成机制,浅层裂缝多发育于深层走滑断裂的发育位置,因此有利储层区域应分布在大型走滑断裂带上方。

参考文献 (References)

- [1] 黄捍东, 魏修成, 叶连池, 等. 碳酸盐岩裂缝性储层研究的地球物理基础[J]. 石油地球物理勘探, 2001, 36(5): 591-596.
Huang Handong, Wei Xiucheng, Ye Lianchi, et al. Geology-physical bases of studying carbonate-fractured reservoir[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2001, 36(5): 591-596.
- [2] Brew G, Litak R, Barazangi M, et al. Tectonic evolution of northeast Syria: Regional implications and hydrocarbon prospects[J]. GeoArabia, 1999, 4(3): 289-318.
- [3] Kent W N, Hickman R G. Structural development of Jebel Abd Al Aziz, northeast Syria [J]. GeoArabia, 1997, 2(3): 307-330.
- [4] Brew G, Barazangi M. Tectonic and geologic evolution of Syria [J]. GeoArabia, 2001, 6 (4): 573-616.
- [5] Litak R K, Barazangi M G, Brew G, et al. Structure and evolution of the petroliferous Euphrates Graben system, Southeast Syria[J]. AAPG Bulletin, 1998, 82(6): 1173-1190.
- [6] McBride J H, Barazangi M, Best J, et al. Seismic reflection structure of Intracratonic Palmyride fold-thrust belt and surrounding Arabian platform, Syria[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(3): 238-259.
- [7] Best J A, Barazangi M, Al-Saad D, et al. Continental margin evolution of the northern Arabian platform in Syria[J]. AAPG Bulletin, 1993, 77 (2): 173-193.
- [8] 邓模, 瞿国英, 蔡忠贤. 常规测井方法识别碳酸盐岩储层裂缝[J]. 地质学刊, 2009, 33(1): 75-78.
Deng Mo, Qu Guoying, Cai Zhongxian. Fracture identification for carbonate reservoir by conventional well logging[J]. Journal of Geology, 2009, 33(1): 75-78.
- [9] 李楠, 李巍然, 龙海燕. 南黄海盆地北部坳陷正反转构造[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(3): 95-100.
Li Nan, Li Weiran, Long Haiyan. Study of positive inversion structures in the north depression of the south Yellow Sea Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2013, 33(3): 95-100.
- [10] Mitra S. Geometry and kinematic evolution of inversion structures[J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(7): 1159-1191.
- [11] Zanchi A, Berra F, Mattei M, et al. Inversion tectonics in central Alborz, Iran[J]. Journal of Structural Geology, 2006, 28(11): 2023-2037.
- [12] 赵中平, 邓宏文, 刘慧峰. 肯尼亚克油田石炭纪孤立碳酸盐台地边缘的储层特征及分类评价[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, 31(2): 111-119.
Zhao Zhongping, Deng Hongwen, Liu Huifeng. The characteristics, classification and appraisal of the reservoirs at carboniferous isolated carbonate platform margin in Kenjiyak oil field[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2011, 31(2): 111-119.
- [13] Peacock D C P. The temporal relationship between joints and faults[J]. Journal of Structural Geology, 2001, 23(2-3): 329-341.
- [14] Whitaker A E, Engelder T. Characterizing stress fields in the upper crust using joint orientation distributions[J]. Journal of Structural Geology, 2005, 27(10): 1778-1787.
- [15] Eyal. Stress field fluctuations along the Dead sea rift since the middle Miocene[J]. Tectonics, 1996, 15(1): 157-170.
- [16] 郭令智, 朱文斌, 马瑞士, 等. 论构造耦合作用[J]. 大地构造与成矿学, 2003, 27(3): 197-205.
Guo Lingzhi, Zhu Wenbin, Ma Ruishi, et al. Discussion on the structural coupling[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2003, 27(3): 197-205.
- [17] 陶涛, 季建清, 周立宏, 等. 逆序断裂的发育特征与地震反射识别[J]. 地质科学, 2010, 45(2): 380-394.
Tao Tao, Ji Jianqing, Zhou Lihong, et al. Development characteristics and identification from the seismic reflection profiles of the reverse grading faults[J]. Chinese Journal of Geology, 2003, 27(3): 197-205.

Characteristics and formation mechanism of reservoir fractures in the west tip of Sinjar uplift

NING Fei¹, HE Juan¹, ZHAO Liangdong², CHANG Hongwei³

1. Exploration & Production Research Institute, Sinopec, Beijing 100083, China
2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China
3. Exploration & Development Research Institute of Zhongyuan Oil Field Company, Sinopec, Puyang 457001, China

Abstract The development extent of fractures is a decisive factor that affects the productivity of a fractured reservoir. In order to better understand and reveal the development characteristic of a fractured reservoir, the characteristics and the formation mechanism of fractures in the west tip of Sinjar uplift are studied using the methods of structural analysis and correlation of structural elements based on 3D seismic and FMI data. The fractures are vertically stratified with anticlockwise-rotating strikes from lower to upper formations. The development of the fractures sees a close relationship with the reactivation of large faults developed in the underlying layers. The reactivated deep faults in the later stage are the strike-slip faults, and the strikes rotate anticlockwise while developing upward, which affects the orientation of new fractures developed on the top layer of the strike-slip faults. Due to the importance of fractures to carbonate reservoirs, and the close relationship between the shallow fractures and the deep-burying strike-slip faults, the intensity of fractures is decreasing upward from Jaddala formation to Chilou formation, and the areas with deep faults being developed shall be good prospecting places.

Keywords carbonate reservoir; fractures; Sinjar uplift; Syria

(责任编辑 刘志远)