

准噶尔盆地夏红北断裂带结构及其封闭差异性评价

吴孔友¹,李思远¹,裴仰文¹,郭文建²,刘寅¹

[1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东 青岛 266580; 2. 中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院,新疆 克拉玛依 834000]

摘要:断裂不仅是一个面,有时能形成具有复杂结构的体,可划分为多个单元,不同结构单元封闭机理不同,评价方法也应存在差异。在大量岩心观察基础上,结合地震资料解释,将准噶尔盆地西北缘夏红北断裂在平面上划分为东、西两段,剖面上划分为滑动破碎带与诱导裂缝带两个结构单元。滑动破碎带受挤压、扭动、研磨强烈,岩石碎裂化、岩粉化严重,故采用断面应力、涂抹作用、充填作用定量评价其封闭性;诱导裂缝带岩石破碎较弱,裂缝发育,致密性差,孔渗性好,易受后期流体作用,故利用薄片与扫描电镜分析技术,采用成岩胶结作用或原油稠化作用评价其封闭性。结果表明:夏红北断裂滑动破碎带封闭性西段好于东段;诱导裂缝带西段为矿物胶结封闭,而东段为原油稠化充填,封闭较晚。镜下鉴定及流体包裹体测试分析表明:夏红北断裂至少发生3期大规模的流体活动,其中第一期为地层水活动,第二期、第三期流体活动伴随油气运移作用。故断裂带的封闭性是多期流体作用的结果。

关键词:滑动破碎带;诱导裂缝带;断层封闭性;夏红北断裂;准噶尔盆地

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

Fault zone architecture of Xiahong North Fault zone in Junggar Basin and its sealing properties

Wu Kongyou¹, Li Siyuan¹, Pei Yangwen¹, Guo Wenjian², Liu Yin¹

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China;

2. Research Institute of Exploration and Development, Xinjiang Oil Field Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China)

Abstract: A fault is not only a planar surface, but a 3D geologic body with complex internal structures some time, which can be divided into several units. Each unit has a different sealing mechanism, thus should be evaluated with different methods. Through integration of core observation with seismic interpretation, the Xiahong North Fault is divided into two segments, an east and a west segment, in plain view, two units, a slip fractured zone and a induced fracture zone, in sectional view. The slip fractured zone experienced strong compression, twisting and abrasion, resulting in strong cataclasis, thus can be quantitatively evaluated by the indices of 'Fault Surface Stress', 'Shale Gouge Ratio' and 'Fault Zone Filling'. The induced fracture zone experienced relatively weak cataclasis and had highly-developed fractures, better poro-perm properties, thus can be analyzed according to diagenetic cementation and oil thickening by using thin section and SEM technologies. For the slip fractured zone of Xiahong North Fault, the west segment presents better sealing properties than the east segment, while for the fractured zone, the west segment is sealed by cementation and the east segment is filled by thickened oil. The SEM and fluid inclusion analyses suggest that there are at least three periods of fluid migration affecting the properties of the Xiahong North Fault, of which the 1st fluid migration is dominated by formation water and the 2nd - 3rd fluid migration is accompanied by hydrocarbon migration. Therefore, the sealing properties of the Xiahong North Fault zone are the result of the multiple fluid activities in geologic history.

Key words: slip fractured zone, induced fracture zone, fault sealing capacity, Xiahong North Fault, Junggar Basin

不同性质断裂形成过程中,受力机制、应力载荷、变形程度差异较大,压性断裂带两盘岩层挤压研磨程度高,岩石破碎强烈^[1]。由错动带至两侧原岩,因应力

释放程度的递减,岩石碎裂化程度及裂缝发育情况渐变,可分为中心部位滑动破碎带和两侧区域诱导裂缝带,即具有明显的内部结构特征^[2-4]。断裂带内部结

收稿日期:2015-02-24;修订日期:2015-10-20。

第一作者简介:吴孔友(1971—),男,教授,油区构造解析。E-mail: wukongyou@163.com。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2014CB239005);国家自然科学基金项目(41272142);国家科技重大专项(2011ZX05001);山东省自然科学基金项目(ZR2012DM011)。

构特征差异决定了对断裂封闭性评价时,将其看成一个简单的“面”状构造而采用笼统的、常规的封闭机理评价方法并不适用^[5-6]。因此,在断裂封闭性评价方法选取上,针对断裂带内部不同结构单元,应采取相应的评价手段和方法来进行定性、定量分析^[7-8]。本文对处于受力中心、岩石碎裂严重、细粒化与致密化明显^[3-5]的滑动破碎带采用断面应力、泥质充填、泥岩涂抹等方法评价;对断裂滑动带两侧的诱导裂缝带则通过成岩胶结作用来研究其封闭性。研究成果对指导油气勘探及完善断裂封闭性评价方法均具有重要意义。

1 夏红北断裂带结构特征

断裂带位于准噶尔盆地西北缘哈拉阿拉特山山前,属于乌夏前陆冲断带(乌夏地区),是受 NE-SW 向挤压形成的一条大型逆冲断裂^[9],属于盆地一级断裂,控制早期盆地边界及沉积体系发育,主要活动期为石炭纪晚期至三叠纪末期^[10]。该断裂以夏8井为界,可划分为东、西两段,西段走向 NEE 向,东段走向近 NE 向,平面上延伸长度超过 25 km;剖面上呈上陡、下缓的“铲状”,上部倾角处于 45°~55°,下部变缓,约为 35°~45°,并与夏21井断裂、夏10井断裂等构成前陆叠瓦冲断体系。地震解释与岩心观察均显示该断裂具“带”状结构特征(图1),结合早期对准噶尔盆地西北缘压性断裂的研究^[4],进一步将夏红北断裂带划分为

两侧的诱导裂缝带和中间的滑动破碎带。地震剖面上,夏红北等断裂反射具有一定宽度的杂乱、空白带,经时深转换,厚度大约在 150~200 m。钻遇夏红北断裂带并取心井(风古7井、风5井、夏8井和夏18井等)的岩心观察表明断裂带内部岩石破碎程度存在明显的差异性。处于滑动破碎带的岩石碎裂严重,多呈岩粉状断层泥,部分具有流变特征,致密性强,通过对夏8井岩心取样测试,突破压力达 24.099 MPa(仅取到1个样,由无锡地质所测试)。处于滑动破碎带两侧的岩石,裂缝发育,能够判断其母岩,多为原地岩,位移不明显,且裂缝中多充填胶结物和沥青质。该特征也进一步佐证了压性断裂带具有的“三元结构”属性(图1)。

2 滑动破碎带封闭性评价

滑动破碎带位于断裂带中心部位,尽管较薄,厚度小于 50 m,却是应力释放的主要区域。此带岩石受挤压、剪切和研磨强烈,致使岩石碎裂化和岩粉化严重^[4](图1)。断层岩的致密性主要取决于断裂所受应力的大小及泥质物的相对含量,而泥质物的来源:一是脆性岩层或岩块研磨细化形成;二是塑性岩错动过程中拖拽、涂抹和充填作用造成^[2]。非渗透物质的大量充填断裂岩孔、喉、缝空间,致使排替压力剧增,对油气形成封闭作用。前人通过模拟实验揭示,滑动破碎带相对围岩孔隙度降低 1 个数量级,渗透率降低 3 个数量

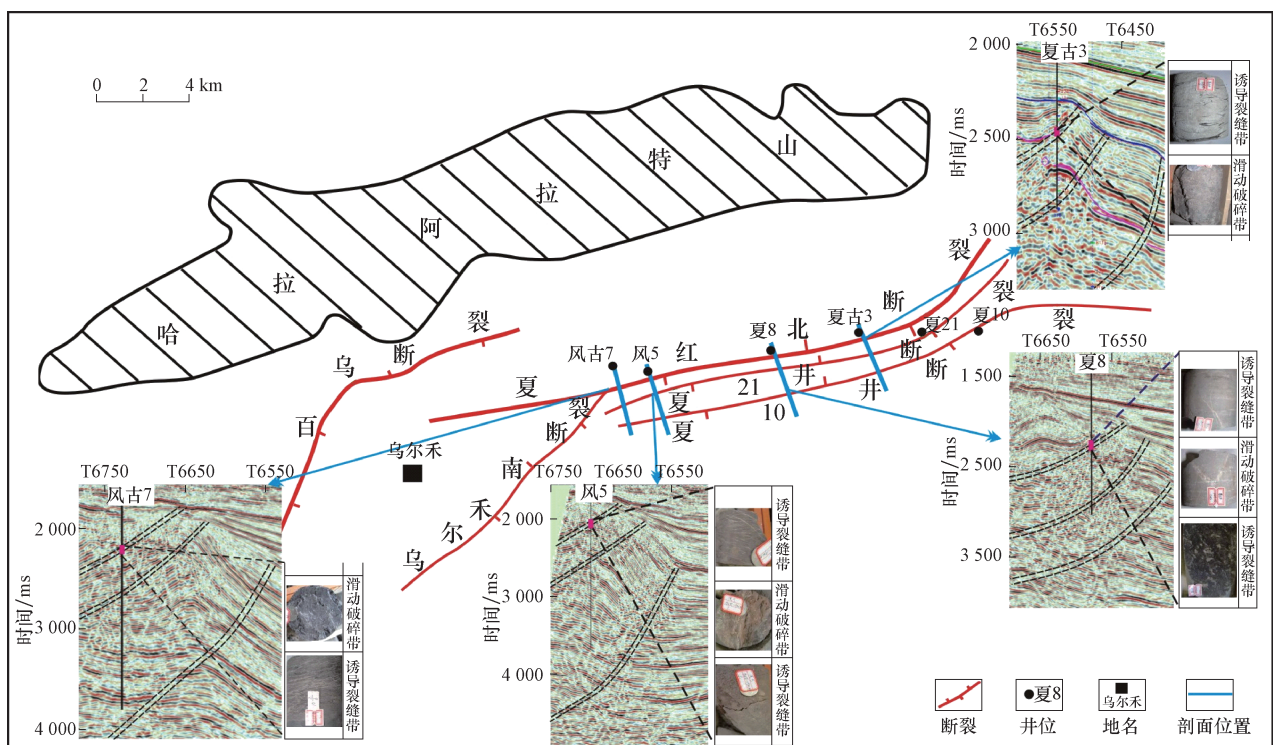


图1 准噶尔盆地夏红北断裂带结构特征

Fig. 1 Structural characteristics of Xiaohong North Fault in the Junggar Basin

级^[11]。鉴于滑动破碎带致密性的影响因素,本文采用压实作用(断面应力)、泥岩涂抹作用及泥质充填作用来评价其封闭性。

2.1 压实作用

压性断裂产状较缓,断裂面(带)在空间上常为一倾斜的面(带),上覆地层对其产生重力分量,同时,区域挤压应力也对其致密性产生重要影响,通常采用以下公式计算其所受的断面正应力^[5]:

$$p = H(\rho_r - \rho_w)g\cos\theta + \sigma\sin\theta\sin\beta \quad (1)$$

式中: p 为断面所承受的正压力,MPa; H 为断面埋深,m; ρ_r 为上覆地层平均密度, g/cm^3 ; ρ_w 为地层水密度, g/cm^3 ; g 为重力加速度, N/kg ; σ 为水平地应力,MPa; θ 为断面倾角, $(^\circ)$; β 为地应力与断层走向之间的夹角, $(^\circ)$ 。

夏红北断裂走向与区域应力场方向夹角较小,近于 30° ,倾角 45° 左右,成藏期以来,长期处于挤压状态,应力大小45 MPa左右^[12],经公式(1)计算,断裂带所受压应力受深度控制,介于40~50 MPa,滑动破碎带所受压实作用强。

2.2 涂抹作用

准噶尔盆地二叠系以上地层多为砂泥互层^[10],在断裂活动过程中,断面易形成涂抹层。泥岩的涂抹效果可通过泥岩涂抹指数——泥岩削刮比(SGR)定量评价^[13],计算公式如下:

$$SGR = \frac{\sum \text{泥岩厚度}}{\text{断距}} \quad (2)$$

夏红北断裂滑动破碎带泥岩削刮比值在断裂西段较高,处于0.40~0.75,均值0.56;而东段稍低,为0.22~0.55,均值0.38,泥岩涂抹效果中等偏好,且随深度增加,泥岩涂抹效果有降低趋势(图2)。

2.3 充填作用

压性断裂受力作用强,剪切错动过程中易产生强烈的碎裂作用,使岩石细粒化,形成大量断层泥充填在断裂带之中,将会造成断裂带物性急剧降低^[14]。其充填效果可以通过以下公式计算^[14-15]:

$$R_m = \frac{h}{H+L} = \frac{1}{2(H+L)} \left(\sum_{i=1}^{n_1} h_{1i} + \sum_{j=1}^{n_2} h_{2j} \right) \quad (3)$$

式中: R_m 为泥质充填指数; L 为垂直断距,m; h_{1i} 和 h_{2j} 分别为断层上、下两盘第 i,j 层泥岩的厚度,m; n_1, n_2 分别为断层上、下两盘被错断的泥岩层数; h 为断层上、下两盘目的层之间的泥岩累积平均厚度,统计时可取断层上、下两盘不同井泥岩累积厚度的平均值,m; H 为断移地层厚度,m。

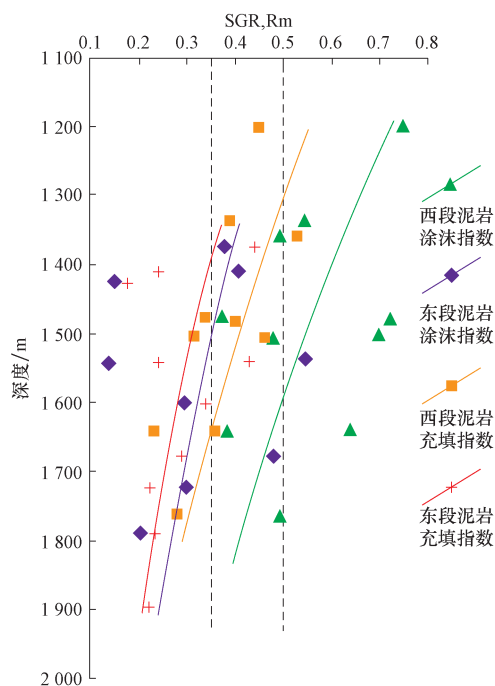


图2 准噶尔盆地夏红北断裂带泥岩涂抹与充填效果随深度变化趋势

Fig. 2 SGR and R_m vs. depth of Xiaohong North Fault in the Junggar Basin

经公式(3)计算,夏红北断裂带西段泥质充填指数 R_m 值在0.23~0.53,均值0.45,充填效果较好;而东段泥质充填指数 R_m 为0.17~0.44,均值0.28,充填效果较差,且东、西两段随深度增加,泥质充填变差(图2)。总体来看,夏红北断裂滑动破碎带封闭性较强,且西段好于东段。

3 诱导裂缝带封闭性评价

诱导裂缝带位于断裂剪切中心两侧,受构造应力影响,岩石裂缝发育,但没发生明显错动,泥质充填、岩性对接和泥岩涂抹作用弱^[4]。流体进入诱导裂缝带中压力和温度降低,必然产生水岩反应,导致热液矿物的沉淀结晶,而愈合裂缝,久而久之,渗透率逐渐变小直至不渗透^[15-16]。通过对钻遇夏红北断裂带并取心井的观察,诱导裂缝带中裂缝充填普遍,但东、西段充填物差异明显(图3)。

3.1 成岩胶结作用

成岩胶结作用多用来表征储层物性影响因素,而在流体活动最为活跃的断裂带输导体中胶结作用更为突出,对断裂物性的改变也比储层物性更广^[11]。岩心及镜下观察,夏红北断裂诱导裂缝带成岩胶结作用显著,取心段呈现出距离滑动破碎带越近,构造裂缝发育越密集,矿物充填现象越明显的特征。目视观察断裂

带西段裂缝充填物多为乳白色碳酸盐类矿物,且岩石破碎严重、排列致密(图3a,b)。断裂带东段岩石较为疏松,裂缝充填程度低,充填物多为黑褐色沥青质(图3g,h)。镜下观察,流体成岩胶结矿物成分多样,包括碳酸盐类矿物如方解石、铁方解石、白云石和铁白云石,硅质矿物,粘土矿物如伊利石、高岭石和伊/蒙混层矿物等,以及稠化原油和少量碳质碎屑。

3.1.1 碳酸盐矿物

镜下观察夏红北断裂西段碳酸盐胶结物发育广泛、类型多样,具有多期次胶结特征,同一视域中数条微裂缝充填不同种类、不同期次胶结矿物。图3c早期硅质矿物充填缝与后期形成白云质矿物充填张开裂缝伴生。图3d同为中-晚期碳酸盐矿物,铁方解石充填缝错开铁白云石充填缝,表明了夏红北断裂至少存在两期次以上流体运移活动。镜下分析,断裂西段碳酸盐矿物类型以晚期含铁方解石和白云石为主,早-中期细粒白云石和微晶方解石次之(图3e,f)。东段含量较低,仅有部分样品中观察到微裂缝充填白

云质矿物(图3j)。胶结物充填空间多为构造破裂缝、溶蚀扩大缝、晶间孔及少量晶内溶孔,矿物胶结程度均为致密。

3.1.2 粘土矿物

镜下观察粘土矿物在夏红北断裂东段发育(图3k,l),并与其他类型胶结矿物伴生。矿物类型主要为伊利石、伊/蒙混层、高岭石及少量蒙脱石。伊利石含量最高,电镜下多呈弯曲片状充填于粒表及粒间,伊/蒙混层矿物含量次之,为不规则状及似蜂巢状充填于孔缝之间,高岭石相对含量较低,镜下为蠕虫状、书页状分布于颗粒间裂隙中或粒表(图3l)。粘土矿物来源广泛,一部分来自断裂活动的研磨作用,致使碎屑矿物颗粒细化,也有地下水与基岩反应,在富含 K^+ 和 Al^{3+} 等离子环境下形成高岭石和伊/蒙混层矿物,并在成岩环境酸碱性条件不断变换背景下,逐渐向晚期伊利石等矿物转化。粘土矿物的普遍发育也是导致诱导裂缝带内物性降低的主要因素之一,可造成断裂带垂向封闭。

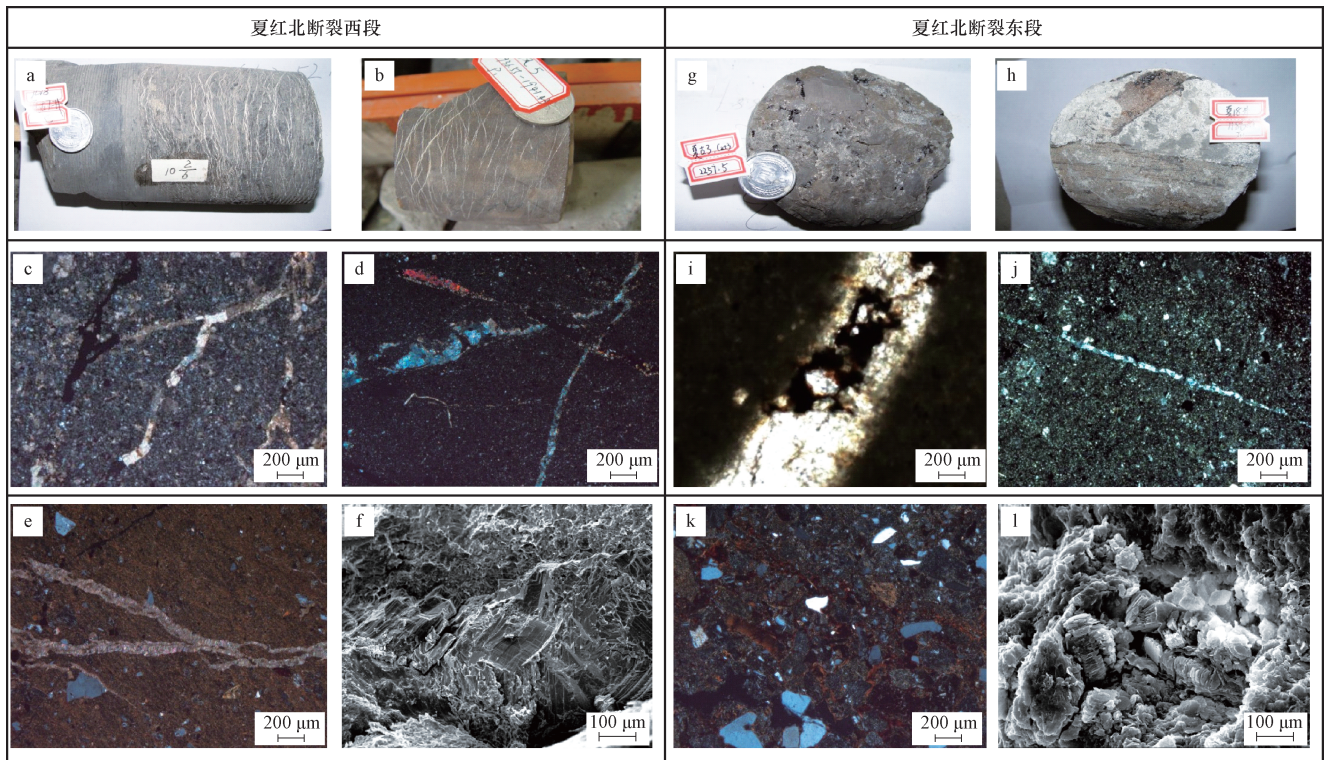


图3 准噶尔盆地夏红北断裂诱导裂缝带胶结作用类型

Fig. 3 Cementation types of the induced fracture zone of Xiaohong North Fault in Junggar Basin

a. 风古7井,埋深1 018 m,裂缝充填碳酸盐胶结物;b. 风5井,埋深1 936.5 m,裂缝充填致密碳酸盐胶结物;c. 风古7井,埋深738 m,裂缝被多期铁白云石、白云石充填;d. 风古7井,埋深1 018 m,裂缝被多期铁白云石、铁方解石及少量沥青质充填;e. 风5井,埋深1 936 m,微裂缝被方解石胶结物充填,滴酸反应剧烈,胶结程度致密;f. 风5井,埋深2 837 m,碳酸盐胶结物,孔隙连通性差;g. 夏古3井,埋深2 257 m,孔隙空间被沥青质充填;h. 夏18井,埋深1 186 m,断面见碳质及少量黑色沥青质;i. 夏8井,埋深1 404 m,早期裂缝中方解石脉遭溶蚀被后期沥青质充填;j. 夏古3井,埋深2 257 m,铁白云石胶结物充填破裂缝;k. 夏古3井,埋深2 600 m,颗粒晶间孔普遍被泥质及沥青质充填,胶结程度致密;l. 夏18井,埋深1 249 m,粒间孔隙被蠕虫状高岭石矿物充填,样品连通性、孔隙性差

3.2 原油稠化作用

通过钻遇夏红北断裂带并取心井的岩心观察,诱导裂缝带裂缝中稠油或沥青充填明显,且主要分布在夏红北断裂东段(图3g—i),西段仅在浅层分支断裂处见。靠近断裂剪切中心,受断裂错动摩擦生热影响,沥青质增多,且质地坚硬,诱导裂缝带边缘区域,主要是稠油充填。原油稠化充填常与泥质充填共同堵塞断裂带渗流空间。压实作用(断面应力)、泥岩涂抹作用及泥质充填作用分析表明,夏红北断裂东段封闭性较弱,构成流体由生烃凹陷向聚集区运移的有利通道。油、气和水沿断裂长期运移,并接受水洗、生物降解、氧化及扩散作用等影响,原油轻质组分散失,最终转化为粘度较高的稠油和沥青质^[17-18]。经样品测试,稠油中高粘度的胶质和沥青质含量分别超过28.82%和32.94%,饱和烃含量低于11.76%,造成断裂排替压力增大,达到封闭—半封闭状态。

3.3 诱导裂缝带物性分析

通过对夏红北断裂诱导裂缝带中的样品普通薄片和铸体薄片观察,裂缝中胶结矿物、胶结程度在东、西段具有显著差异,对断裂封闭性影响程度不同。西段封闭性较好,碳酸盐、硅质、泥质等矿物裂缝胶结致密,胶结物含量最低1.24%,最高41.94%,平均15.05%。岩石物性测试分析其孔隙度为0.1%~8.5%,平均值

为4.662%,渗透率为 $(0.01 \sim 2) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,均值为 $0.57 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图4a)。根据孔、渗散点图分布特征可得出断裂封闭性具有随深度增加而增大的变化趋势。东段物性指数相对西段高,孔隙度为7%~15%,均值为10.69%,渗透率均值为 $5.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图4b)。按储层物性等级,虽为低孔低渗储层,但仍达到渗流条件,断裂封闭性相对较差,开启期长,油气沿断裂流动并接受长期生物降解、氧化等作用^[19],这也是在东段观察到大量稠油及沥青的主要原因。粘度较高的稠油又在一定程度上降低了断裂带的孔渗性能,最终将导致断裂完全封闭。

3.4 成岩胶结期次分析

代表构造热事件的流体包裹体常被捕获在自生成岩矿物结晶晶体中,记录着流体活动史^[20]。通过流体包裹体形态、种类和分布等显微学特征,结合包裹体均一温度分析,可以得到流体成岩史及油气运聚史方面的相关信息^[21]。曹剑等通过流体包裹体地球化学特征分析认为,准噶尔盆地西北缘有3期油气充注^[22]。作者曾以二叠系、三叠系含油储层流体包裹体分析为基础,明确了乌夏地区至少有3期流体活动^[23]。本次研究,专门选取夏红北断裂带内成岩胶结物,分析流体包裹体,已确定沿断裂带的流体活动期次。

夏红北断裂诱导裂缝带中充填、胶结着多种矿物类型,是其封闭性的关键影响因素。对24块取自于断

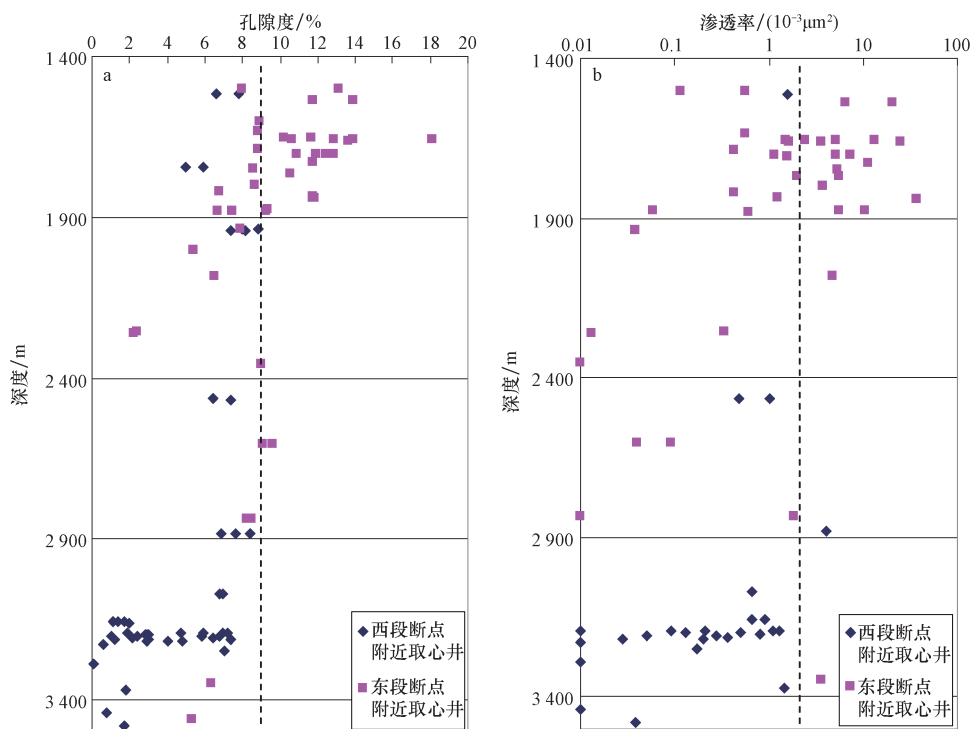


图4 准噶尔盆地夏红北断裂诱导裂缝带物性特征

Fig. 4 Poroperm characteristics of the induced fracture zone of Xiaohong North Fault in the Junggar Basin

a. 孔隙度与深度关系; b. 渗透率与深度关系

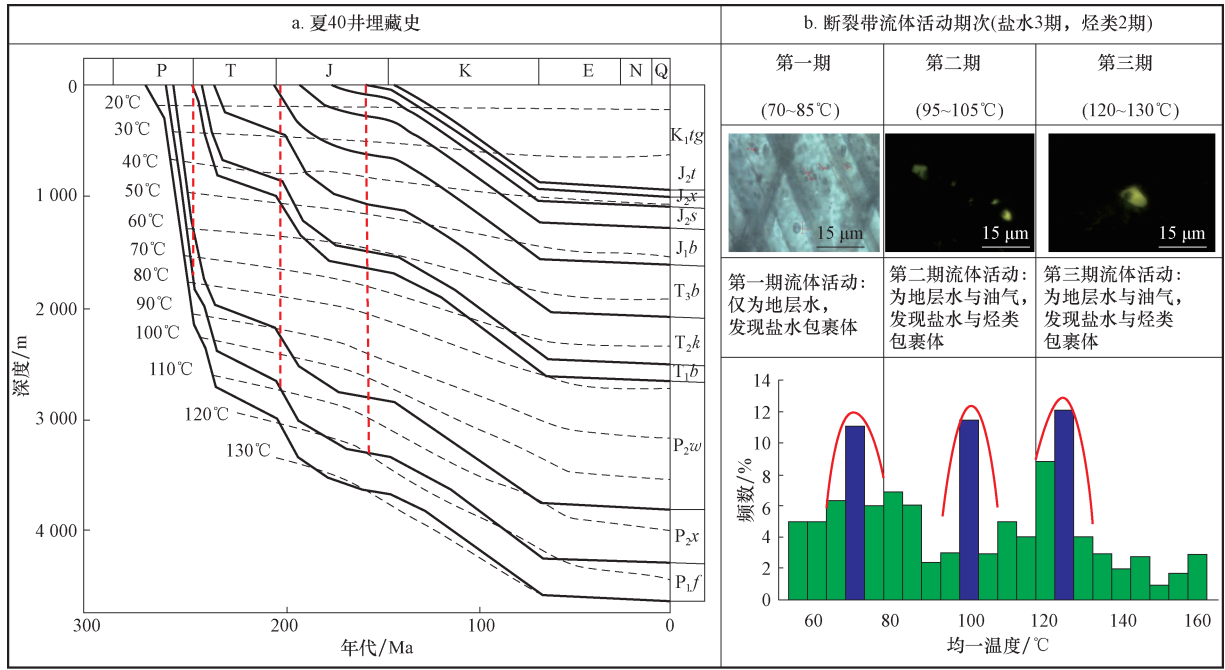


图5 准噶尔盆地夏红北断裂流体活动史

Fig. 5 Fluid activity history of Xiaohong North Fault in the Junggar Basin

裂带的样品磨制薄片,并镜下鉴定,裂缝中充填的方解石脉中含有大量次生盐水包裹体及少量烃类包裹体。包裹体呈线状、孤立状和片状分布,形态以椭圆形、似三角形为主,大小介于 $3 \sim 15 \mu\text{m}$,总数近160余个。用于测温的盐水包裹体类型为气液两相体,气液比在 $5\% \sim 20\%$,均一化至液相,少数气液比大于 60% ,均一化处理可至气相。烃类包裹体偏光下呈黄褐色至黑褐色,荧光下具有特殊反射色,前人研究认为不同的荧光反射色可代表不同期次形成的物化条件,通常反射色随烃类成熟度的增加从黄褐色、黄色向蓝色和蓝白色转化^[24]。夏红北断裂带流体包裹体荧光镜下,烃类包裹体主要呈现出黄褐色与亮黄色两种(图5)。利用英制 Linkam THMSG600 型冷热台测温分析,夏红北断裂带盐水包裹体均一温度分布在 $55 \sim 165^\circ\text{C}$,主要有 $75 \sim 85^\circ\text{C}$, $95 \sim 105^\circ\text{C}$, $120 \sim 130^\circ\text{C}$ 3个主频温度区间,结合夏40井埋藏史图,分别对应二叠纪末期、三叠纪末期和侏罗纪晚期3次流体活动(图5)。二叠纪末期发生的第一次流体活动,烃源岩尚未大量排烃^[25],且夏红北断裂距生烃中心远,主要以地层水活动为主,发生了矿物胶结作用,仅捕获了盐水包裹体。后两次流体活动期间烃源岩已大量排烃^[22],矿物结晶作用捕获了有机包裹体和同期的盐水包裹体,是油气的主要运移期,盐水包裹体均一温度与有机包裹体荧光颜色相对应。也说明夏红北断裂历史时期主要经历三期构造运动及大规模流体活动,诱导裂缝带的封闭是多期流体活动形成的矿物结晶、充填的结果。

4 结论

- 1) 夏红北断裂平面上可分为东、西两段;剖面上“带”状结构明显,根据变形特征,进一步分为滑动破碎带和诱导裂缝带,其中滑动破碎带厚度 $35 \sim 45 \text{ m}$,诱导裂缝带厚度 $55 \sim 85 \text{ m}$,断裂带宽度达 $150 \sim 200 \text{ m}$ 。
- 2) 断裂滑动破碎带和诱导裂缝带对流体的封闭机理存在明显差异,评价其封闭性需要采取不同的方法。根据变形特征,采用压实作用、泥岩涂抹作用和泥质充填作用对夏红北断裂滑动破碎带封闭性评价表明,其西段封闭性好于东段。
- 3) 诱导裂缝带岩石裂缝发育,位移不明显,缺乏断层泥充填,常构成流体运移的通道,其封闭性决定于后期的胶结和原油稠化作用。夏红北断裂西段胶结矿物类型多为碳酸盐、硅质及粘土矿物,致密程度高;而东段缺乏成岩胶结物,裂缝中多被稠油、沥青质充填,依靠原油稠化,逐渐形成封闭。
- 4) 盐水包裹体均一温度分析及有机包裹体荧光测试表明,夏红北断裂带至少有3期流体活动,第一期为地层水运移,后两期为地层水活动伴随烃类充注。断裂带的封闭是在压实、充填作用基础上,多期热液矿物结晶胶结和原油稠化的结果。

参 考 文 献

[1] Caine. Fault zone architecture and permeability structure[J]. Geology, 1996, 24: 1025 - 1028.
[2] 付晓飞,方德庆,吕延防,等. 从断裂带内部结构出发评价断层垂

- 向封闭性的方法[J]. 中国地质大学学报, 2005, 30(3): 328 - 335.
- Fu Xiaofei, Fang Deqing, Lü Yanfang, et al. Method of evaluating vertical sealing of faults in terms of the internal structure of fault zones [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2005, 30(3): 328 - 335.
- [3] 吴智平, 陈伟, 薛雁, 等. 断裂带的结构特征及其对油气的输导和封堵性[J]. 地质学报, 2010, 84(4): 571 - 576.
- Wu Zhiping, Chen Wei, Xue Yan, et al. Structure characteristics of faulting zone and its ability in transporting and sealing oil and gas [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(4): 571 - 576.
- [4] 吴孔友, 王绪龙, 崔殿. 南白碱滩断裂带结构特征及流体作用[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(4): 6 - 11.
- Wu Kongyou, Wang Xulong, Cui Dian. Structural characteristics and fluid effects of Nanbaijiantan fault zone [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2012, 40(4): 6 - 11.
- [5] 吕延防, 李国会, 王跃文, 等. 断层封闭性的定量研究方法[J]. 石油学报, 1996, 17(3): 39 - 45.
- Lu Yanfang, Li Guohui, Wang Yuewen, et al. Quantitative analyses in fault sealing properties [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1996, 17(3): 39 - 45.
- [6] 童亨茂. 断层开启与封闭的定量分析[J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(3): 215 - 220.
- Tong Hengmao. Quantitative analysis of fault opening and sealing [J]. *Oil & Gas Geology*, 1998, 19(3): 215 - 220.
- [7] 吕延防, 付广, 张云峰, 等. 断层封闭性研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- Lu Yanfang, Fu Guang, Zhang Yunfeng, et al. Research on fault sealing [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.
- [8] 付广, 孟庆芬. 断层封闭性影响因素的理论分析[J]. 天然气地球科学, 2002, 13(3-4): 40 - 44.
- Fu Guang, Meng Qingfen. Theoretical analysis about influencing factors of fault sealing [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2002, 13(3-4): 40 - 44.
- [9] 何登发, 尹成, 杜社宽, 等. 前陆冲断带构造分段特征—以准噶尔盆地西北缘断裂构造带为例[J]. 地质前缘, 2004, 11(3): 91 - 101.
- He Dengfa, Yin Cheng, Du Shekuan, et al. Characteristics of structural segmentation of foreland thrust belts—A case study of the fault belts in the northwestern margin of Junggar Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(3): 91 - 101.
- [10] 冯建伟, 戴俊生, 鄢继华, 等. 准噶尔盆地乌夏前陆冲断带构造活动—沉积响应[J]. 沉积学报, 2009, 27(3): 494 - 502.
- Feng Jianwei, Dai Junsheng, Yan Jihua. Sedimentary response to Permian structural movements in Wuxia foreland thrust belt of Junggar Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(3): 494 - 502.
- [11] Antonellini M, Aydin A. Effect of faulting on fluid flow in porous sandstones: Geometry and spatial distribution [J]. *AAPG Bulletin*, 1995, 79(5): 642 - 671.
- [12] 杨伟利, 王毅, 李亚辉, 等. 准噶尔盆地燕山运动期构造应力场模拟[J]. 新疆石油地质, 2003, 24(2): 124 - 126.
- Yang Weili, Wang Yi, Li Yahui, et al. Simulation of structural stress field during Yanshan Movement in Junggar Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2003, 24(2): 124 - 126.
- [13] Yielding G, Freeman B T, Needham D. Quantitative fault seal prediction [J]. *AAPG Bulletin*, 1997, 81: 897 - 917.
- [14] Fulljames, Zijerveld J R L J, Franssen R C M W. Fault seal process: systematic analysis of fault seals over geological and production times scales [M]. Elsevier: Oxford, 1997.
- [15] Downey M W. Evaluating seals for hydrocarbon accumulations [J]. *AAPG Bulletin*, 1984, 68: 1752 - 1763.
- [16] 焦大庆, 梁志刚, 王长青, 等. 含油气盆地流体演化研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
- Jiao Daqing, Liang Zhigang, Wang Changqing, et al. Research on fluid evolution in petroliferous basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.
- [17] 李建新, 杨斌, 何丽普, 等. 准噶尔盆地西北缘稠油成因和原油早期成烃机制的探讨[J]. 新疆石油地质, 1993, 14(3): 239 - 248.
- Li Jianxin, Yang Bin, He Liqing, et al. An approach of origin of heavy oil in Northwestern Margin of Junggar Basin and its early formed hydrocarbon mechanism [J]. *Xin Jiang Petroleum Geology*, 1993, 14(3): 239 - 248.
- [18] 王屿涛. 准噶尔盆地西北缘稠油特性及蚀变作用类型[J]. 石油实验地质, 1993, 16(1): 10 - 19.
- Wang Yutao. Properties and alteration of viscous oil in the Northwest Margin of The Junggar Basin [J]. *Petroleum Geology & Experimental*, 1993, 16(1): 10 - 19.
- [19] 李梅, 金爱民, 楼章华, 等. 准噶尔盆地地层流体特征与油气运聚成藏[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(4): 607 - 615.
- Li Mei, Jin Aimin, Lou Zhanghua, et al. Formation fluid characteristics and hydrocarbon migration and accumulation in Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology* 2012, 33(4): 607 - 615.
- [20] 白国平. 包裹体技术在油气勘探中的应用研究现状及发展趋势[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2003, 27(4): 136 - 140.
- Bai Guoping. State of research on fluid inclusion techniques applied to oil and gas exploration [J]. *Journal of the University of Petroleum*, 2003, 27(4): 136 - 140.
- [21] 刘德汉, 肖贤明, 田辉, 等. 含油气盆地中流体包裹体类型及其地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(4): 491 - 500.
- Liu Dehan, Xiao Xianming, Tian Hui, et al. Fluid inclusion types and their geological significance in Petroliferous basins [J]. *Oil & Gas geology*, 2008, 29(4): 491 - 500.
- [22] 曹剑, 胡文瑄, 姚素平, 等. 准噶尔盆地西北缘油气成藏演化的包裹体地球化学研究[J]. 地质论评, 2006, 52(5): 700 - 706.
- Cao Jian, Hu Wenxuan, Yao Suping, et al. Evolution of petroleum migration and accumulation in the northwestern margin of the Junggar Basin: fluid inclusion Geochemistry [J]. *Geological Review*, 2006, 52(5): 700 - 706.
- [23] 吴孔友. 准噶尔盆地乌—夏地区油气成藏期次分析[J]. 石油天然气学报, 2009, 31(3): 18 - 23.
- Wu Kongyou. Research on the Stages of Reservoir Formation in Wuerhe-Xiazijie Area in Junggar Basin [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2009, 31(3): 18 - 23.
- [24] 邹海峰, 徐学纯, 高福红, 等. 大港探区中区油气显微迹象和有机包裹体的荧光显微分析及其应用[J]. 石油实验地质, 2002, 24(1): 80 - 84.
- Zou Haifeng, Xu Xuechun, Gao Fuhong, et al. Micro-fluorescence analysis of microtrace and organic inclusions and its application to exploration in central Dagang Oilfield [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2002, 24(1): 80 - 84.
- [25] 张义杰, 向书政, 王绪龙, 等. 准噶尔盆地含油气系统特点与油气成藏组合模式[J]. 中国石油勘探, 2002, 7(4): 25 - 35.
- Zhang Yijie, Xiang Shuzheng, Wang Xulong, et al. Characteristics of petroleum system and pattern of oil and gas formation reservoir assemblage in Junggar basin [J]. *Chinese Petroleum Exploration*, 2002, 7(4): 25 - 35.