

川东北元坝中部地区须家河组致密储层 裂缝特征及成因探讨

李 虎^{1,2,3}, 范存辉^{1,2}, 秦启荣^{1,2}, 张 玮³, 吴全鹤³

(1. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500;
2. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610500; 3. 中国石油塔里木油田分公司, 新疆 库尔勒 841000)

摘要:川东北元坝中部地区须家河组致密气藏近年来取得油气勘探的重大突破, 裂缝对天然气的运移、富集成藏及产能具有重要影响。综合运用野外露头、岩心、成像测井、包裹体分析以及声发射实验资料, 对该区裂缝特征及成因进行研究。研究区主要发育构造成因的低角度剪切缝和高角度剪切缝, 具有裂缝延伸中等、宽度小、多闭合、密度较小、充填程度较低的特征, 高角度缝和直立缝有效性最好; 构造裂缝主要形成期次有三期。第一期为燕山运动晚期, 受近SN向构造应力场挤压, 形成了NW—SE和NE—SW两组平面“X”型共轭剪切裂缝和近SN向低角度剖面剪切缝, 古地应力的最大有效主应力为18.8 MPa; 第二期为喜马拉雅早—中期构造运动, 在NE的挤压力作用下形成近SN向、近EW向平面“X”型共轭剪切缝, 古地应力的最大有效主应力为27.9 MPa; 第三期为喜马拉雅运动晚期, 构造应力方向仍为NE, 主要形成NW向剖面“X”型剪切缝, 古地应力的最大有效主应力为38.6 MPa。

关键词:致密储层; 裂缝特征; 形成期次; 成因模式; 须家河组; 元坝中部

中图分类号:TE121 **文献标识码:**A

Fracture characteristics and its genesis of tight reservoir in Xujiahe formation of central Yuanba area in Sichuan basin

Li Hu^{1,2,3}, Fan Cunhui^{1,2}, Qin Qirong^{1,2}, Zhang Wei³ and Wu Quanhe³

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 3. Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla 841000, China)

Abstract: The tight gas reservoir in the central Yuanba area of Sichuan basin is one of the major breakthrough in oil and gas survey in recent years. The fractures have important influence on the migration, enrichment and production capacity of the natural gas. Based on the outcrop, core, imaging log, inclusion analysis and acoustic emission experiment data, we studied the fracture characteristics and its genesis of structural fractures in this area. The low-angle shear and high-angle shear fractures lead to the tectonic origin. The fractures have the characteristic of middle scale, minor width (sealed), high thickness, lower density and less filled degree. The high-angle and vertical fractures have better validity. It shows that there are three fracture generations in central Yuanba area: the first stage fractures are formed in late-Yanshanian tectonic movement, NW—SE and NE—SE of plane "X" conjugate shear fractures and low section shear fractures are formed under the compression of SN tectonic stress. The maximum effective principal stress of the paleostructural stress is 18.8 MPa. The fractures in the second stage are formed in middle Himalaya tectonic movement, SN and EW of plane "X" conjugate shear fractures are formed under the compression of NE tectonic stress. The maximum effective principal stress of the paleostructural stress is 27.9 MPa. The third stage are formed in late Himalaya tectonic movement. The structural stress direction is still NE, which mainly forms NW angle section shear fractures and the maximum effective principal stress of the paleostructural stress is 38.6 MPa.

Key words: tight reservoir, fractures characteristics, formation stage, genetic pattern, Xujiahe Formation, central Yuanba area

收稿日期: 2017-02-06。

第一作者简介: 李虎(1986—), 男, 在读博士研究生, 构造地质、地质工程研究。

基金项目: 四川省应用基础研究项目“冲断带前缘地腹高陡逆断裂形成机理及裂缝发育量化预测”(2017JY0176)。

裂缝(构造裂缝)是致密砂岩储层油气运移、聚集成藏的关键因素,其发育程度与油气井的高产、稳产关系密切。多年来,国内外学者对裂缝开展了系统的研究并取得了丰硕的成果,其中对构造裂缝的形成、发育和演化是研究的关键^[1,2]。川东北位于扬子准地台北部边缘,属扬子准地台与秦岭地槽褶皱系之间的过渡带,元坝中部地区位于川中平缓构造带,受米仓山、大巴山和龙门山三个构造带共同控制和影响,自晚三叠世以来受到多期构造运动的复合叠加和改造,断裂、裂缝特征及成因复杂^[3]。近年来,元坝地区在陆相须家河组取得了重大的油气突破,勘探前景广阔。然而,完井试油结果显示该区单井产量差距较大($0.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d} \sim 120 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$),表现出典型的低孔低渗裂缝性储层特征,裂缝的发育直接控制着产能的大小,掌握裂缝的特征及演化对该区油气勘探具有重要意义。但是,目前对该区须家河组储层裂缝尚未形成系统的认识,因此,该文拟利用野外露头、岩心裂缝、成像测井、实验分析等资料,结合区域构造解析,对裂缝特征开展系统研究,明确须家河组裂缝的成因模式,进一步指导该区油气的勘探开发。

1 地质概况

元坝地区构造上位于米仓山前缘褶皱带与川中平缓褶皱带的过渡带,北邻米仓—大巴前陆冲断带,西北侧接龙门山造山带^[4-6](图1)。元坝中部靠近元坝地区腹部,北接九龙山,东北与通南巴相邻。该区

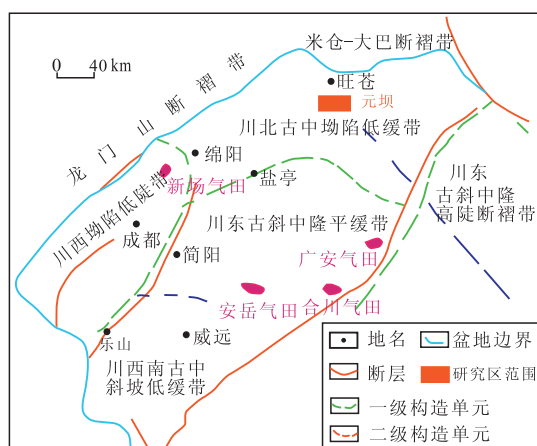


图1 川东北元坝构造位置

Fig. 1 Construction location of Yuanba area in the Northeast Sichuan

构造特征与周边区域构造有密切的成因联系,周边的龙门山构造带、大巴山断裂带及米仓山构造带对该区的构造形成与演化有不同程度的影响。研究区自印支运动开始受到多期构造运动的叠加和改造,在燕山期—喜马拉雅构造运动期,该区与南秦岭受到由北而南的强烈挤压作用,喜马拉雅构造运动继承并持续向南逆冲推覆,最终定型于喜马拉雅运动晚期。

研究区主要构造单元可以划分为低缓断褶带及构造向斜带。其中褶皱程度发育弱,与邻区九龙山构造、通南巴构造带相比构造高点不明显;断裂主要发育近SN向逆冲断层和NW、NE向压扭性断层,以中浅层断裂为主,多为中、小型断裂,延伸范围小,大部分断层仅断穿须家河组,向上消失于自流井组珍珠冲段,向下消失在雷口坡组。须家河组储层岩性主要为中—细粒岩屑砂岩、石英砂岩及粉砂岩,沉积环境以湖泊—三角洲沉积体系为主,储层厚度270~700 m。储集空间主要为残余粒间孔、粒间溶孔、粒内溶孔以及裂缝。裂缝对储层物性有重要的改造作用,与裂缝连通的各类孔隙储层物性较好。

2 裂缝发育特征

2.1 相似露头区裂缝特征

研究区内未出露须家河组地层,而在邻区的南江—旺苍地区与研究区内构造的形成演化一致,该区地表须家河组主要发育平面剪切缝、剖面剪切缝及区域性直立剪切缝。

平面剪切缝在立溪岩、金溪、后坝和流坝剖面中的大部分层位中均普遍发育,表现为与岩层面垂直或高角度相交,其形成时间早,分布广泛,裂缝面平直,擦痕明显,产状稳定,可切穿砾石(图2a、图2b)。通过野外系统测量及甄别,平面剪切缝共发育有四组,每两组配对形成平面“X”型共轭剪切缝;剖面剪切缝发育较少,主要特征表现为与岩层面斜交,角度较低,裂缝面平直,擦痕明显,为剖面“X”型共轭剪切缝(图2c),形成于岩层褶皱变形之后,形成时间晚于平面剪切缝;区域性直立剪切缝在立溪岩、金溪、后坝和流坝剖面中的大部分层位中均有发育,表现为与现今水平面(地表)垂直,缝面平直、光滑,单条裂缝规模大,延伸长(常切穿整个露头),裂缝多闭合,

形成时间最晚,为主要构造形成后的区域性剪切形成(图2d)。

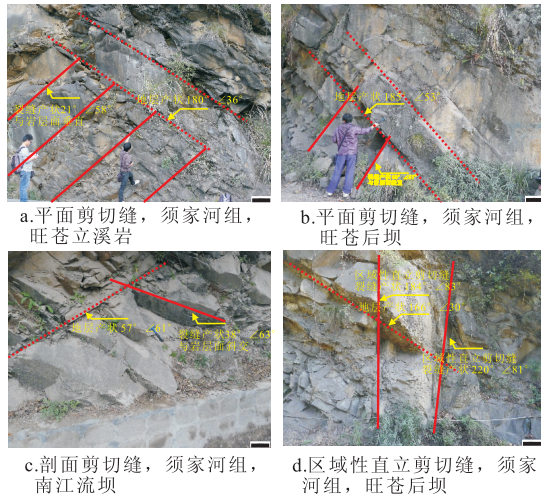


图2 野外露头须家河组裂缝类型

Fig. 2 Fracture types of natural outcrop of Xujiahe formation

研究区外围地表裂缝调查表明:地表须家河组裂缝以高角度缝和直立缝为主,分别占43.6%、42.6%,次为低角度缝,占13.8%,水平缝鲜有发育;裂缝延伸长度分布各异,延伸长度小于1.0 m占27.7%,1.0~2.0 m占33%,2.0~4.0 m占13.8%,4.0~8.0 m占6.4%,大于8.0 m占19.1%;裂缝间距以小于1.0 m为主,占77%,主要发育于泥岩和薄层砂岩中,其次是1.0~3.0 m,占21.1%;裂缝线密度以2~7条/m的中等密度为主,占50.6%,其中砂岩内裂缝密度主要位于该区间;其次密度小于2条/m,占47.2%,主要为厚层到块状砂岩中发育的切层裂缝;密度大于10条/m的较少,仅占2.2%。

2.2 岩心裂缝特征

研究区须家河组岩心裂缝普遍发育,类型复杂。按照裂缝成因,将其分为构造缝、成岩缝、钻井诱导缝^[7],其中构造缝占绝对优势。

构造缝广泛分布在各种岩性中,常成组出现,切穿深度较大,发育的充填矿物定向性及缝面特征明显,主要包括高角度和低角度剪切缝、低角度张性缝等(图3a~图3c);成岩缝主要发育在岩性界面上,尤其在泥质岩类界面,通常顺层发育,主要由于成岩过程中收缩形成,产状不稳定,呈网状并表现出弯曲、尖灭、分枝等分布特点(图3d);诱导缝是钻

井过程由于钻井液与地应力不平衡及钻具负荷、扭转等原因产生的人工裂缝,其最大特点是沿井壁对称方向出现,诱导缝的走向为现今最大水平应力的方向。



图3 岩心裂缝类型及特征

Fig. 3 Core fracture types

通过对研究区16口重点井岩心观测统计可知,须家河组岩心裂缝长度以10~20 cm为主,占65%,其次是5~10 cm,占18%;裂缝宽度主要集中在0.1~1 mm,所占比例达60%以上,其次是1~1.5 mm裂缝,超过30%,其它宽度裂缝相对较少,整体上裂缝宽度小且闭合,以小宽度裂缝为主;岩心裂缝密度普遍偏小,集中在0.2~0.4条/m和0.4~0.6条/m,分别占比40%和占25%,其次是密度为0.1~0.2条/m和0.6~0.8条/m,分别占12%和11%;从充填程度看,未充填裂缝占33%,半充填缝占27%,全充填缝占40%。这些未充填缝和半充填缝对油气渗流有比较重要的作用,通过对YL1、YL2、YL4等典型井的岩心、薄片鉴定资料分析,裂缝充填物主要为方解石、沥青、炭质及泥质等,其中半充填和充填缝主要以方解石充填为主,约占40%左右,其次是沥青充填,约占35%,炭质及泥质充填所占比例较小,沥青充填充分说明了裂缝在油气运移和沟通储集空间方面起到了重要的作用。此外,通过统计不同类型裂缝的充填程度,研究区直立缝和高角度裂缝充填程度较低,尤其是高角度缝约有60%以上几乎未充填,低角度缝充填程度较高,约有80%左右的低角度缝被全充填。因此,研究区未充填的高角度缝及直立缝有效性较好,对油气在地下的渗流具有重要作用。

3 裂缝形成期次

3.1 地表裂缝期次

通过对研究区地表砂岩裂缝定向观测、甄别及分析配套,平面剪切缝方位有四组(图4a):①北西向($305^{\circ}\pm 5^{\circ}$)、②近南北向($355^{\circ}\pm 5^{\circ}$)、③北东向($40^{\circ}\pm 5^{\circ}$)和④北东东向($70^{\circ}\pm 5^{\circ}$)。野外裂缝分期与配套结果表明,①北西向($305^{\circ}\pm 5^{\circ}$)裂缝与③北东向($40^{\circ}\pm 5^{\circ}$)裂缝均为高角度缝且均与岩层面垂直,可配套为平面“X”型共轭剪切缝,而另外两组④北东东向($70^{\circ}\pm 5^{\circ}$)裂缝和②近南北向($355^{\circ}\pm 5^{\circ}$)裂缝亦可配套形成平面“X”型共轭剪切缝;剖面剪切缝方位有两组(图4b),分别是⑤近东西向($275^{\circ}\pm 5^{\circ}$)和⑥北西向($300^{\circ}\pm 5^{\circ}$)裂缝,可分别进行组合构成剖面“X”型共轭剪切缝。

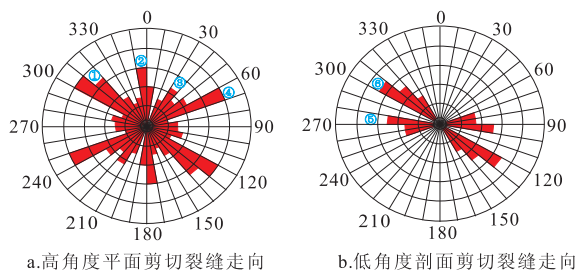


图4 地表裂缝走向玫瑰花图

Fig. 4 Rose diagram of earth surface crack

结合区域构造演化解析,认为研究区地表六组裂缝可组合成两套,分别对应两期构造运动,其中①北西向($305^{\circ}\pm 5^{\circ}$)裂缝和③北东向($40^{\circ}\pm 5^{\circ}$)裂缝为早期构造运动形成的平面“X”型共轭剪切缝,形成时间最早,⑤近东西向($275^{\circ}\pm 5^{\circ}$)剖面剪切缝形成时间稍晚于①和③裂缝,①、③和⑤裂缝对应的是早期构造运动,即燕山构造运动晚期,其构造应力主要来源于米仓山由南向北的推覆挤压,构造主应力方位为近南北向;②近南北向($355^{\circ}\pm 5^{\circ}$)和④北东东向($70^{\circ}\pm 5^{\circ}$)裂缝为晚期构造运动形成的平面“X”型共轭剪切缝,⑥北西向($300^{\circ}\pm 5^{\circ}$)裂缝该期构造运动产生的剖面“X”型共轭剪切缝,形成时间最晚,②、④和⑥裂缝对应的是晚期构造运动,即喜马拉雅构造运动期,其构造应力主要来源于大巴山构造带的推覆挤压,构造主应力方位为北东向。

3.2 井下裂缝期次

根据岩心裂缝充填矿物成分分析表明,研究区须家河组储层主要存在四期填充裂缝。第一期充填物主要为碳质或泥质,发育于水平缝中,为须家河组沉积后成岩阶段的产物,呈网状并表现出弯曲、尖灭、分枝等特征;第二期裂缝充填物为方解石,多为全充填或半充填;第三期充填物为颗粒较粗的方解石,多半充填或未充填;第四期裂缝多数未充填,缝面光滑,少量缝见沥青及油气侵染。这四期裂缝第一期为成岩缝,不属于构造裂缝,因此,可以判断构造缝至少有三期。

岩心观测划分出的四期裂缝由于岩心并非定向取心,因此,该四期裂缝的具体产状还不清晰,根据微电阻率成像测井解释的结果,研究区构造裂缝发育的方位有四组,其中NWW($290^{\circ}\pm 10^{\circ}$)向、NEE($75^{\circ}\pm 10^{\circ}$)向裂缝最为发育,其次是NW向($315^{\circ}\pm 5^{\circ}$)和NE($30^{\circ}\pm 5^{\circ}$)以及近SN($0^{\circ}\pm 5^{\circ}$),其他方位裂缝发育程度相对较差。将岩心观测及成像测井综合分析,除第一期成岩缝之外,后三期裂缝与成像测井及地表露头调查结果一致性较强,其中NE($30^{\circ}\pm 5^{\circ}$)、NW($315^{\circ}\pm 5^{\circ}$)裂缝为第二期平面“X”型剪切缝,NEE($75^{\circ}\pm 10^{\circ}$)、SN($0^{\circ}\pm 5^{\circ}$)为第三期平面“X”型剪切缝。

3.3 实验方法确定裂缝期次

3.3.1 裂缝充填物包裹体分析

裂缝充填物包裹体分析技术是近年来裂缝期次研究中的一种成熟技术,主要通过测定与裂缝充填物同时形成的原生包裹体的温度来推断裂缝形成时期^[8,9]。

选取研究区须家河组不同切割期次的裂缝充填物中的9个样品48个测试点进行均一温度测试,根据不同期次裂缝充填物温度分布,结合构造演化特征,将该区构造裂缝发育期次分为三期(表1):第一期构造缝中充填物主要为次生方解石,其裂缝充填物的包裹体为气液两相,气液比15%,均一温度主要为75~85℃;第二期构造裂缝充填的粗粒方解石包裹体,其包裹体主要为群体分布无色椭圆液态与无色气态烃类包裹体,包裹体个体较大,均一温度主要为150~175℃;第三期构造缝中基本未发现充填物,但切割早期构造缝现象明显,形成时间最晚。不同期次构造缝的充填情况及充填物包裹体均一温度存在

表1 须家河组构造裂缝充填物中包裹体特征及测温数据
Table 1 Inclusion features and temperature measurement data of structural fracture fillings of Xujiahe formation

井号	井深/m	赋存矿物	类型	均一温度/°C
YL1	4 345.12	细粒方解石	次生	76°
YL1	4 461.23	粗粒方解石	次生	150°
YL2	4 914.61	细粒方解石	次生	82°
YL6	4 182.50	粗粒方解石	次生	162°
YL6	4 138.64	粗粒方解石	次生	175°

明显差异,认为至少存在三期构造缝。

3.3.2 声发射实验研究裂缝期次

对研究区须家河组三组 32 块岩心样品进行声发射 Kaise 效应和岩石力学参数测试,通过 AE 曲线上出现的 Kaise 效应点个数,判断岩石形成至今所经历的最少应力期次^[10,11]。

研究区岩心样品声发射实验结果表明,80% 的样品具有四期 Kaise 效应点,根据每个明显的 Kaise 效应点对应岩石在地质过程中的一次应力场作用结果的原理,不考虑现今构造运动的影响,其余三期 Kaise 效应点表明须家河组形成至今至少遭受了三期构造破裂作用(图 5)。结合前述地表及岩心裂缝产状分析、裂缝充填物包裹体分析以及区域构造演化史分析,可将实验测试获得的三期 Kaise 效应点划分为三期构造裂缝发育期。其中,第一期裂缝发育期相当于 Kaise 效应点 3,为燕山构造运动晚期的产物,最大有效古应力值平均为 18.8 MPa,该期裂缝充填物为充填程度较高的次生方解石;第二期裂缝发育期相当于 Kaise 效应点 2,为喜马拉雅早—中期构造运动的产物,最大有效古应力值平均为 27.9 MPa,

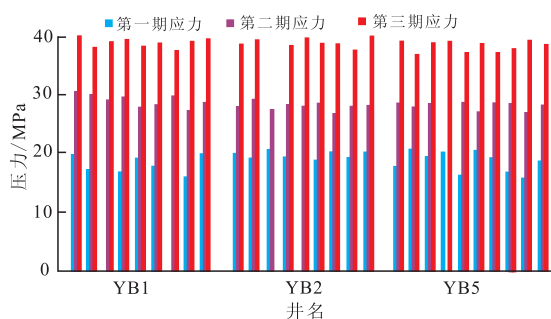


图5 须家河组最大有效古应力分布(Kaise 效应见遇率大于 65% 的有效 Kaise 点)

Fig. 5 Paleostructural stress distribution of Xujiahe formation (Effective Kaise point with incidence rate greater than 65%)

该期裂缝充填物主要为半充填或未充填的粗粒方解石;第三期裂缝发育期相当于 Kaise 效应点 1,为喜马拉雅晚期构造运动的产物,最大有效古应力值平均为 38.6 MPa,该期裂缝几乎无充填。

4 裂缝成因模式

根据研究区地表裂缝调查、岩心裂缝特征、实验测试数据,结合区域构造解析,综合判断研究区须家河组自晚三叠世以来至少经历了三期构造运动的影响^[12,13],其对应的裂缝发育期次至少有三期,分别对应燕山构造运动晚期和喜马拉雅构造运动早—中期、喜马拉雅构造运动晚期。

1) 燕山构造运动晚期,研究区与南秦岭受到由北而南的强烈挤压作用,川东北元坝中部区域应力场方向为近 SN 向,受近 SN 向挤压构造应力场的影响,研究区须家河组地层首先发育平面“X”型剪切缝,该期裂缝与层面高角度相交,倾角在 75°以上,裂缝方向主要为 NW—SE 和 NE—SW,两组裂缝在平面上形成“X”型共轭剪切裂缝。这组裂缝与地表裂缝调查发现的①北西向(305°±5°)、③北东向(40°±5°)裂缝和岩心观测发现的①NW(300°±10°)向、③NE(30°±5°)向裂缝一致,早期 NW—SE 和 NE—SW 平面“X”型共轭剪切裂缝形成之后,在近 SN 向构造挤压下进一步产生少量近 SN 向剖面剪切缝(图 6)。

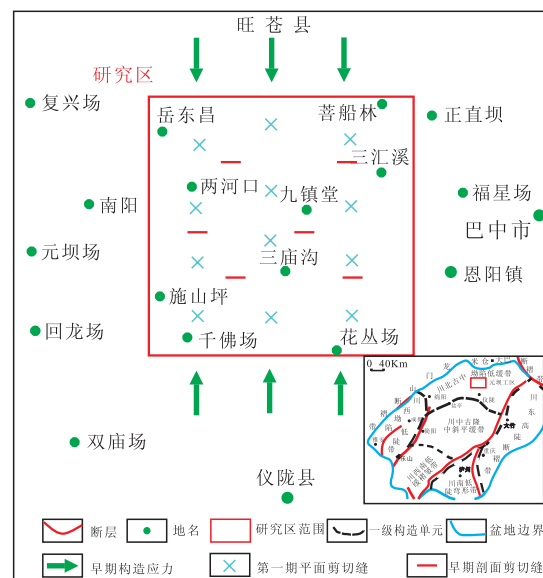


图6 燕山构造运动晚期裂缝发育模式

Fig. 6 Fracture development pattern in the later Yanshanian tectonic movement

2) 喜马拉雅运动期,四川盆地持续受到南北向的挤压应力作用。由南秦岭传导过来的挤压力在到达大巴山后,形成了向南凸的大巴山弧形构造带。与此同时,由于汉南刚性基底的影响,由南秦岭传来的南北向挤压力在大巴山弧形构造带处发生偏转,形成了NE的挤压。该NE的挤压力作用于元坝中部地区,在该期北东向构造挤压作用下,形成近SN向、近EW向平面“X”型共轭剪切缝,与地表裂缝调查发现的④北东向($70^{\circ}\pm 5^{\circ}$)、②近南北向($355^{\circ}\pm 5^{\circ}$)裂缝和岩心观测发现的②近SN向($0^{\circ}\pm 5^{\circ}$)、④NEE向($70^{\circ}\pm 10^{\circ}$)裂缝一致(图7)。喜马拉雅运动晚期,随着NE向构造力的继续作用,在已经褶皱变形的岩层中产生了主应力方向垂直的NW向剖面“X”型剪切缝(图7)。

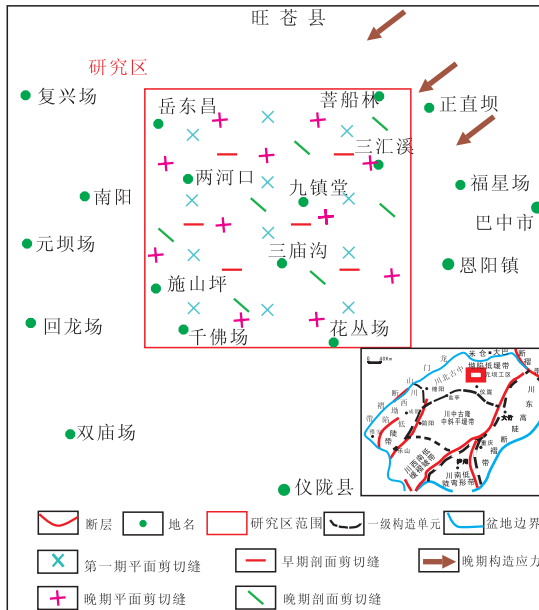


图7 喜马拉雅构造运动期裂缝发育模式
Fig. 7 Fracture development pattern of Himalayan tectonic movement

5 结论

1) 研究区须家河组裂缝较发育,以构造成因的低角度剪切缝和高角度剪切缝为主;裂缝延伸中等,宽度小,多闭合,密度较小;岩心裂缝充填物包括方解石、泥质、炭质等,充填程度不高,裂缝有效性较好,尤其高角度缝和直立缝充填程度更低,有效性最好;裂缝相互交织形成连通良好的裂缝网络系统,对天然气的富集和运移具有重要作用。

2) 研究区须家河组裂缝发育方位主要为NW($290^{\circ}\pm 10^{\circ}$)向、NEE($75^{\circ}\pm 10^{\circ}$)、NW向($315^{\circ}\pm 5^{\circ}$)、NE($30^{\circ}\pm 5^{\circ}$)、近SN($0^{\circ}\pm 5^{\circ}$),其中NW($290^{\circ}\pm 10^{\circ}$)向、NEE($75^{\circ}\pm 10^{\circ}$)向裂缝最为发育,其次是NW向($315^{\circ}\pm 5^{\circ}$)、NE($30^{\circ}\pm 5^{\circ}$)向裂缝;须家河组自晚三叠世以来至少经历了三期构造运动的影响,其对应的裂缝发育期次也至少有三期(不考虑成岩期裂缝)。第一期构造裂缝形成于燕山运动晚期,方位为NE($30^{\circ}\pm 5^{\circ}$)、NW向($315^{\circ}\pm 5^{\circ}$);第二期裂缝形成于喜马拉雅构造运动中期,方位为NEE($75^{\circ}\pm 10^{\circ}$)、SN($0^{\circ}\pm 5^{\circ}$)向;第三期裂缝形成于喜山构造运动晚期,方位为NW($290^{\circ}\pm 10^{\circ}$)向。

参考文献

- [1] Nelson R A. Geologic analysis of naturally fractured reservoirs [M]. Boston: Gulf Professional Publishing, 2001.
- [2] Larsen B, Grunnaleite I, Gudmundsson A. How fracture systems affect permeability development in shallow-water carbonate rocks; an example from the Gargano Peninsula, Italy[J]. Journal of Structural Geology, 2010, 32(9): 1212-1230.
- [3] 郭彤楼. 元坝气田长兴组储层特征与形成主控因素研究[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2381-2391.
- [4] 胡明, 邓绍强, 陈蓉, 等. 川东北地区构造应力场及与油气运移关系研究[J]. 特种油气藏, 2008, 15(3): 14-19.
- [5] 巩磊, 曾联波, 裴森奇, 等. 九龙山构造须二段致密砂岩储层裂缝特征及成因[J]. 地质科学, 2013, 48(1): 217-226.
- [6] 盘昌林, 刘树根, 马永生, 等. 川东北地区须家河组天然气成藏主控因素分析[J]. 断块油气田, 2011, 18(4): 418-422.
- [7] 周进松, 童小兰, 冯永宏. 柴窝堡背斜储层构造裂缝发育特征及控制因素[J]. 石油学报, 2006, 27(3): 53-56.
- [8] 邓虎成, 周文, 姜文利, 等. 鄂尔多斯盆地麻黄山西区块延长、延安组裂缝成因及期次[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2009, 39(5): 811-817.
- [9] 周文, 张银德, 王洪辉, 等. 楚雄盆地北部T₃地层天然裂缝形成期次确定[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2008, 35(2): 21-126.
- [10] 孙宝珊, 丁原辰, 邵兆刚, 等. 辽北张强地区燕山期以来主要构造运动期最大主应力的测定[J]. 地质论评, 2000, 44(1): 92-98.
- [11] 丁原辰, 张大伦. 声发射抹录不尽现象在地应力测量中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1991, 10(4): 313-326.
- [12] 胡明. 四川盆地东北部构造成因探讨及未来天然气勘探方向[J]. 特种油气藏, 2005, 12(6): 11-14.
- [13] 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉. 四川盆地形成与演化[M]. 北京: 地质出版社, 1994.

(编辑 常燕)