

川西彭州地区雷口坡组碳酸盐岩储层 裂缝特征及主控因素

赵向原,胡向阳,肖开华,贾跃玮

(中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:川西彭州地区雷口坡组碳酸盐岩储层中发育多类天然裂缝且主控因素复杂。利用地质、地球物理及分析测试等资料,阐明了天然裂缝的成因类型及发育特征,并对控制不同类型构造裂缝发育的各地质因素进行了分析。彭州地区雷口坡组储层主要发育构造裂缝,其次为成岩裂缝;构造裂缝可分为高角度缝、斜交缝和低角度缝,各类裂缝具有各不相同的优势产状,表明在多期构造运动下形成。裂缝总体有效性较好,其中高角度缝均为有效缝,无效缝主要分布在低角度缝和斜交缝中。裂缝在白云岩类中最为发育,而在灰岩类中发育程度相对较弱。由于受裂缝成因机制差异性、裂缝形成期次与储层成岩演化阶段匹配关系的影响,高角度缝及斜交缝的发育主要受断层及其扰动应力场、岩石力学层厚度及储层物性控制,而低角度缝的发育主要受局部构造地层产状及沉积因素控制。

关键词:裂缝特征;潮坪相;碳酸盐岩;雷口坡组;彭州地区;四川盆地

中图分类号:122.2 **文献标识码:**A

Characteristics and major control factors of natural fractures in carbonate reservoirs of Leikoupo Formation in Pengzhou area, western Sichuan Basin

Zhao Xiangyuan, Hu Xiangyang, Xiao Kaihua, Jia Yuewei

(Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: Several types of natural fractures occur in the reservoir of the Leikoupo Formation in Pengzhou area, western Sichuan Basin, and their major controlling factors are very complex. Geological, geophysical and experimental data are integrated to study the genetic types and characteristics of these fractures, and analyze the geologic factors controlling the formation of tectonic fractures. In the reservoir of the Leikoupo Formation, the predominant fracture type is tectonic fracture, followed by diagenetic fracture. The tectonic fractures can be classified into three types: high angle fractures, oblique fractures and low angle fractures. Each type of fracture has its own specific dominant orientation, indicating that they are resulted from multiple stages of tectonic movement. The fractures are effective in general. High angle fractures are all effective, while some low angle fractures and oblique fractures are ineffective. Fractures are highly developed in dolomite, but are poorly developed in limestone. Due to the impacts of differences of fracture genetic mechanisms and the timing of fracture formation and reservoir diagenetic evolution, the development of high angle fractures and oblique fractures are mainly controlled by faults and their disturbed stress field, thickness of rock mechanics layer and physical properties of reservoirs, while that of the low angle fractures are mainly controlled by occurrences of local strata and structures and sedimentation.

Key words: fracture characteristics, tidal-flat facies, carbonate rock, Leikoupo Formation, Pengzhou area, Sichuan Basin

我国碳酸盐岩气藏主要分布在四川、鄂尔多斯和塔里木等盆地,在中国整个石油产业中占有重要地位^[1-3]。川西彭州地区中三叠统雷口坡组气藏是在四川盆地内继普光、元坝气田之后又一碳酸盐岩气

藏,是中国石化西南油气分公司“十三五”增储上产的主要目标区之一,实现气藏高效开发意义重大^[4]。开发实践表明,雷口坡组气藏沉积相-岩相复杂,发育多类、多尺度天然裂缝,裂缝的存在对储层性质、

收稿日期:2017-03-14;修订日期:2018-01-03。

第一作者简介:赵向原(1983—),男,博士,油气储层裂缝表征与建模。E-mail:auxus@sina.com。

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA14010204);中国石化科技攻关项目(P16111)。

油气富集及气藏开发等均具有重要影响^[5-6]。目前,该区并未对天然裂缝展开系统研究,制约着下一步的开发决策。为此,本文充分利用地质、地球物理及分析测试等资料,对雷口坡组天然裂缝特征展开研究并阐明裂缝发育的主控因素。该成果对进一步研究裂缝分布规律、优选开发有利区等具有重要意义。

1 地质概况

川西彭州地区位于龙门山前构造带南部,分布在关口断裂与彭县断裂两条规模较大的逆断层之间,其主体部位发育金马-鸭子河、石羊场两个完整的次级构造^[4](图1)。其中,金马-鸭子河构造为一北东向展布的断背斜构造;石羊场构造为一北东向展布的短轴背斜。彭州地区雷口坡组主要含气层位为雷口坡组四段(雷四段)(T_2t^4)。雷四段从上至下可进一步划分为3个亚段(分别为上、中、下亚段),有利储层主要分布在雷四上亚段下部。

彭州雷口坡组为一套台缘障壁-(蒸发)潟湖-潮坪相碳酸盐沉积体系,可进一步分为潮上带、潮间带和潮下带,其中潮上带包括潮上云膏坪、膏云坪、泥云坪/云坪、潮上滩等微相类型,潮间带包括含膏云坪、(藻)云坪、灰云坪、云灰坪等微相类型,潮下带包括灰云坪、云灰坪、灰坪、(藻)砂屑滩等微相类型。该区优势储层主要以潮间带的云坪、含灰云坪、藻云坪为主,岩石类型主要为晶粒白云岩、其次为晶粒颗粒白云岩

及晶粒颗粒(含)灰质白云岩等,储集空间主要为晶间孔、不规则溶孔及裂缝,平均孔隙度3.57%,平均渗透率 $6.88 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。目前该区部署3口探井(分别为P1井、Y1井、YS1井),产能测试显示气产量为 $(48.5 \sim 121.05) \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 。

2 天然裂缝特征

2.1 裂缝成因类型

根据对研究区3口井累计97.5 m岩心裂缝描述及成像测井裂缝解释结果可知,雷四上亚段储层裂缝较为发育,其中发育裂缝的岩性段厚度占岩心观察总厚度的60%以上。按照裂缝成因分类,该区裂缝类型主要分为构造裂缝和成岩裂缝两大类,其中构造裂缝包括剪切裂缝和张性裂缝,成岩裂缝包括溶蚀缝、构造-溶蚀缝以及缝合线等类型(图2,图3)。

构造裂缝是彭州雷口坡组储层中最重要的裂缝类型之一,主要为构造剪切缝。岩心观察这类裂缝缝面平直光滑、分布规则、产状稳定且成组出现,缝宽均匀,偶见雁列式排列及共轭剪切现象,有些裂缝缝面上还可见擦痕和微小陡坎。镜下观察剪切裂缝分布较为规则,常见两组或两组以上不同产状裂缝相互切割和限制,不同组裂缝之间常表现出充填差异性。岩心及薄片观察该区张性裂缝数量较少,且与剪切裂缝特征明显不同,张性裂缝一般延伸较短,缝面弯曲、粗糙且多开口,缝宽不均匀,缝面上无擦痕及陡坎现象,镜下可见这类裂缝常绕过较大的矿物颗粒,缝面表现出不规则的形态。

溶蚀缝规模相对较小,岩心观察数量较少,薄片上可有效识别,薄片显示溶蚀缝形态不规则,常呈漏斗状、蛇曲状、港湾状、树枝状等形态,缝面粗糙,部分溶蚀缝存在顺层面发育的现象(图3e)。构造-溶蚀缝是在已有的构造裂缝基础上,由于酸性水介质的作用,使裂缝面发生溶蚀,改造了构造裂缝使其加长、加宽或加深,致使缝面不平整,虽然这类裂缝经过溶蚀作用后改变了作为溶道的原有构造缝的形态,但仍可辨别原构造缝的形状和分布(图3c,d)。缝合线在该区并不十分发育,岩心显示缝合线一般呈不规则波状或锯齿状,大部分与岩心层面平行或近平行,也有一些呈小角度斜交,平面上一般贯穿整个岩心(图2i,图3f),纵向起伏较小,一般小于6 cm。

2.2 裂缝发育特征

彭州雷四上亚段中主要以发育构造裂缝为主,构

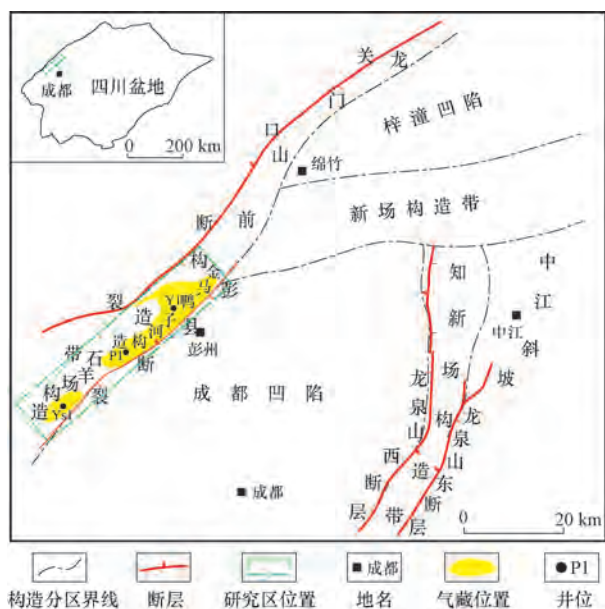


图1 川西地区构造划分及研究区位置

Fig. 1 Structural units division and location of the study area in western Sichuan Basin



图2 彭州地区雷口坡组储层岩心裂缝特征

Fig. 2 Characteristics of fractures in cores from the reservoir of Leikoupo Formation, Pengzhou area

a. YS1 井,埋深 6169.6 m,一条缝面规则的高角度剪切裂缝;b. Y1 井,埋深 5761.1 m,两组斜交缝相互切割和限制;c. P1 井,埋深 5823.9 m,一条缝面规则的高角度剪切缝;d. P1 井,埋深 5764.0 m,岩心裂缝发育,破碎严重;e. P1 井,埋深 5813.1 m,缝面规则的斜交缝;f. YS1 井,埋深 6225.3 m,可见若干条相互平行且近等间距的水平裂缝;g. YS1 井,埋深 6175.4 m,岩心发育水平裂缝且缝面上可见擦痕;h. P1 井,埋深 5812.1 m,岩心发育多组构造裂缝,相互交织构成网状裂缝;i. P1 井,埋深 5766.6 m,可见一条缝合线构造;j. Y1 井,埋深 5780.2 m,可见溶蚀裂缝

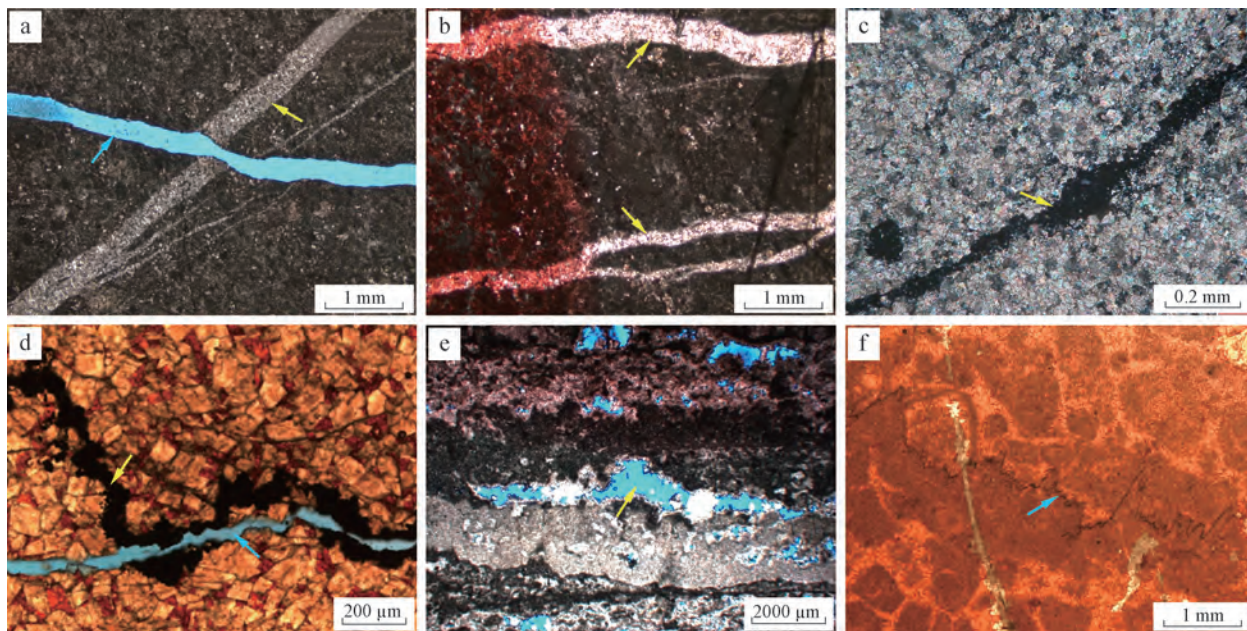


图3 彭州地区雷口坡组储层薄片裂缝特征

Fig. 3 Characteristics of the fractures in thin sections from the reservoir of Leikoupo Formation, Pengzhou area

a. Y1 井,埋深 5735.0 m,两组构造缝,一组被充填(黄色箭头),另一组无充填(蓝色箭头);b. Y1 井,埋深 5734.7 m,一组近平行的构造裂缝,裂缝被矿物充填;c. P1 井,埋深 5842.0 m,构造溶蚀缝,被黑色有机质充填;d. YS1 井,埋深 6180.8 m,可见两条裂缝,其中一条为无充填的构造溶蚀缝(蓝色箭头),另一条为被有机质充填的溶蚀缝(黄色箭头),构造溶蚀缝切割溶蚀缝;e. Y1 井,埋深 5782.5 m,与早期溶蚀作用有关的溶蚀缝,裂缝局部被白云石充填;f. YS1 井,埋深 6123.0 m,可见充填有机质的缝合线

造裂缝在规模及有效性方面均明显好于成岩裂缝,且在改善储层连通情况方面所起到的作用也要远大于成岩裂缝。成岩裂缝总体上规模较小,有效性相对较差,对改善局部储层物性能够起到积极作用,总体上对储层的影响不如构造裂缝,对开发的影响也不及构造裂缝明显。下面主要对构造裂缝的发育特征及主控因素展开研究。

雷四上亚段储层构造裂缝分为高角度缝(裂缝倾角 $>60^{\circ}$)、斜交缝($30^{\circ}<\text{裂缝倾角}\leq 60^{\circ}$)和低角度缝(裂缝倾角 $\leq 30^{\circ}$),不同井筒附近裂缝倾角的分布特征具有一定的一致性,3口井总体上均表现出以发育低角度缝为主,其次为斜交缝,高角度缝发育程度相对

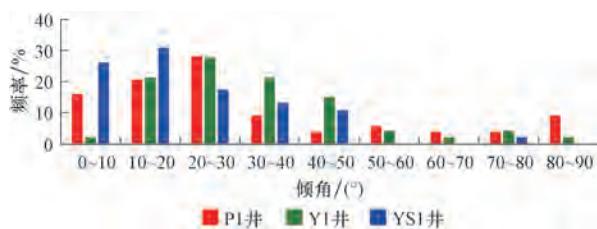


图4 彭州地区雷口坡组储层构造裂缝倾角分布频率

Fig.4 Frequency chart of tectonic fracture dip-angle distributions in the reservoir of the Leikoupo Formation, Pengzhou area

较差的特征(图4)。研究发现,低角度缝、斜交缝和高角度缝在走向和倾向上分别表现出了各自较为独立的特征,如低角度缝走向和倾向分布较为杂乱,不具有明显的优势方位(图5a,d),而斜交缝和高角度缝则表现出了明显的规律性。其中斜交缝走向以NE-SW向为主,其次为近S-N向,裂缝倾向主要为NW向(图5b,e);高角度缝的走向主要有3组,按其发育程度依次为近E-W向、NE-SW向和NW-SE向,其倾向主要以N-NNW倾为主(图5c,f)。上述结论从侧面上也反映出不同产状裂缝可能分别对应着不同的古构造应力场背景,是在多期构造应力场作用下形成,因此表现出了各自的产状特征。裂缝分布形式上,岩心显示低角度缝主要沿地层层面分布或与地层层面呈小角度相交的特征;而大多数小尺度斜交缝和高角度缝主要在单岩层内发育,受地层层面控制,与层面呈大角度相交或垂直;露头显示存在规模较大的斜交缝和高角度缝,同时穿过多个岩层,纵向规模可达数十米,长度规模可达百米以上。

裂缝的充填特征反映裂缝的有效性情况,决定其能否起储集空间或渗流通道的作用^[7-9]。通过成像测井资料可对天然裂缝的有效性进行评价。FMI或EMI

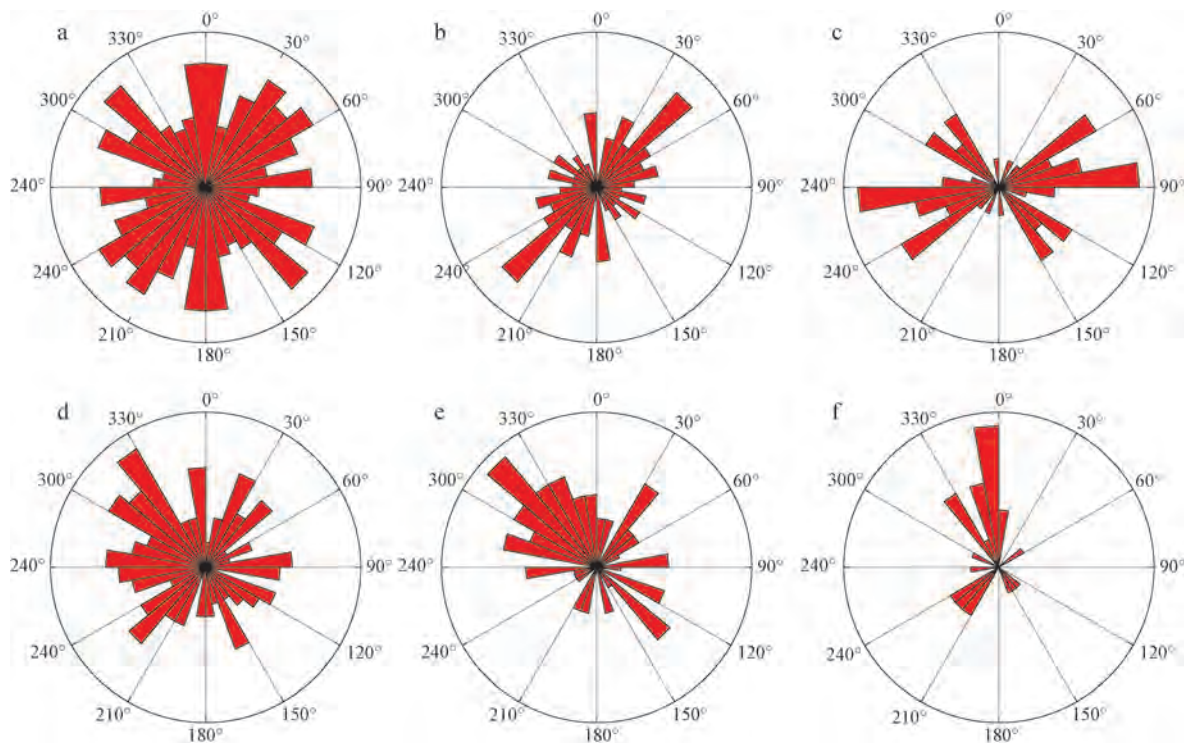


图5 彭州地区雷口坡组储层低角度缝、斜交缝及高角度缝走向及倾向玫瑰花图

Fig.5 Strike and dip rose diagrams of low angle fractures, oblique fractures and high angle fractures in the reservoir of the Leikoupo Formation, Pengzhou area

- a. 低角度缝走向玫瑰花图; b. 斜交缝走向玫瑰花图; c. 高角度缝走向玫瑰花图;
d. 低角度缝倾向玫瑰花图; e. 斜交缝倾向玫瑰花图; f. 高角度缝倾向玫瑰花图

成像测井动态图像上亮色表示高阻,暗色表示低阻,当井壁裂缝中充填流体或矿物时,会引起局部电阻率发生变化而与骨架电阻率之间产生差别,使得斜交缝或低角度缝在动态图像上显示为正弦或余弦曲线,直立缝则表现为近平行的条带^[10-12]。裂缝颜色则进一步反映了其充填特征和有效性,如当裂缝无充填或被流体充填时,EMI 图像上为深色条纹或条带,为高导缝,是有效裂缝;若裂缝被钙质或方解石充填,EMI 图像上为亮色条带,为高阻缝,是无效裂缝^[13-14]。结合该区 EMI 成像测井资料依据上述方法对构造裂缝有效性进行研究可知:①总体来看,3 口井绝大多数构造裂缝为有效裂缝(占 88.8%),无效裂缝比例较少(占 11.2%);②各井裂缝充填程度具有一定差异性,其中 Y1 井无效裂缝占比例较大(为 24.4%),其次为 P1 井(占 10.3%),YS1 井无效裂缝所占比例最少(占 3.6%)(图 6);③从各井不同类型裂缝的充填情况来看,所有无效裂缝均分布在低角度缝和斜交缝中,高角度缝均为有效裂缝(图 7),这主要与不同类型裂缝形成期次与储层成岩演化阶段之间的匹配关系有关。

通过岩心可以直观的对裂缝开度进行测量,一般测量精度为 0.05 mm 左右^[15]。由于裂缝在地下受到静岩围压、地层流体压力、现今地应力等综合作用,张开度较小,当岩心自地下取至地面时经历了压力释放,

裂缝开度有所增大,岩心上实测裂缝开度和裂缝充填脉宽度不能代表裂缝地下保存状态下的真实开度,但仍能从一定程度上反映裂缝地下张开度的相对大小^[16-17]。通过岩心裂缝描述,测量了构造裂缝的地表开度并进行统计可知:①总体上,构造裂缝地表开度主要分布在小于 0.5 mm 的范围内(占 68.1%),开度大于 0.5 mm 的裂缝占 21.9%;②不同类型裂缝开度分布存在一定差异,其中低角度缝中开度小于 0.2 mm 的裂缝占 32.4%,开度在 0.2~0.5 mm 的裂缝占 32.8%,开度大于 0.5 mm 的裂缝占 34.8%;斜交缝中开度小于 0.2 mm 的裂缝占 34.3%,开度在 0.2~0.5 mm 的裂缝占 36.2%,开度大于 0.5 mm 的裂缝占 29.6%;高角度缝中开度小于 0.2 mm 的裂缝占 47.9%,开度在 0.2~0.5 mm 的裂缝占 41.1%,开度大于 0.5 mm 的裂缝占 11%(图 8),总体上表现为低角度缝开度较大,斜交缝开度其次,而高角度缝开度相对较小的特征。造成低角度缝地表开度较大的原因可能包括如下两方面,一是由于目的层段埋深较深,发育有低角度缝的岩心取至地面后由于重力应力卸载作用较强,导致低角度缝地表张开度相对较大;二是据裂缝成因机理分析表明,与斜交缝和高角度缝相比低角度缝形成时间早,后期溶蚀改造作用强,使得部分低角度缝缝宽发生了变化,导致低角度缝开度较大。

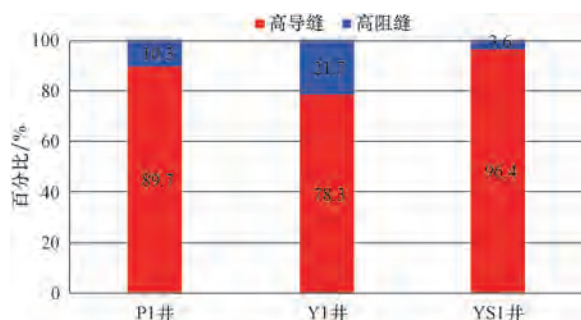


图 6 彭州地区各井高导缝和高阻缝分布情况

Fig. 6 Distribution of highly conductive fractures and high resistivity fractures in each well in Pengzhou area

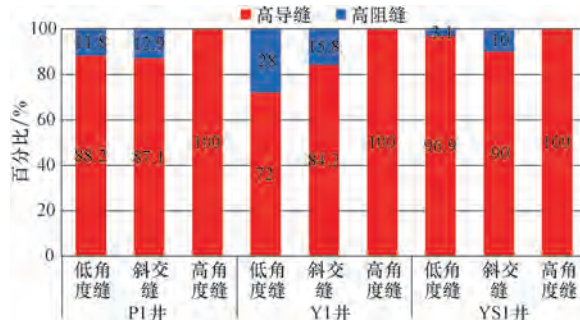


图 7 彭州地区各井不同类型裂缝中高导缝和高阻缝分布情况

Fig. 7 Distribution of highly conductive fractures and high resistivity fractures in different types of fractures in each well in Pengzhou area

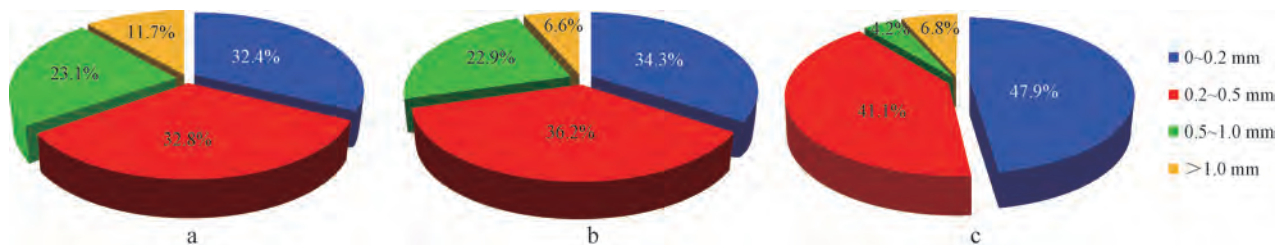


图 8 彭州地区雷口坡组储层不同类型裂缝开度分布情况

Fig. 8 Aperture distribution characteristics of different types of fractures in the reservoir of the Leikoupo Formation, Pengzhou area

a. 低角度缝; b. 斜交缝; c. 高角度缝

3 裂缝发育主控因素

彭州雷口坡组岩心裂缝观察及成像测井资料裂缝解释显示裂缝的发育具有较强的非均质性,不同部位裂缝的发育特征存在较大差别,即使是同一口井,不同层位上裂缝的发育程度也存在较大差异性,主要受裂缝发育的主控因素控制。研究表明,研究区天然裂缝的发育主要受局部构造、岩性、岩层厚度及储层物性等因素影响,但不同类型裂缝的主控因素有所差别。

3.1 局部构造

雷四上亚段储层构造裂缝按照倾角可分为低角度缝、斜交缝和高角度缝,总结影响不同类型裂缝发育的局部构造因素主要包括地层产状和断层两个方面,但由于不同类型裂缝具有不同的成因机制,因此受局部构造的影响不同。研究发现,低角度缝总体上产状分布较为杂乱,但各井低角度缝的分布能够表现出一定的优势产状,其发育明显受到局部构造地层产状的控制,表现出裂缝产状与地层产状保持一致或裂缝面与地层层面呈小角度相交的特征。此外,岩心观察低角度缝缝面存在划痕等现象(图2g),这也进一步反映出低角度缝的形成是地层在推覆挤压构造应力作用下顺层剪切破裂作用下的结果。如YS1井处在石羊场构造(北东向展布的短轴背斜)西北翼上,该处地层为NW倾向,成像测井解释该井低角度构造裂缝的倾向与地层倾向具有较好的一致性,其发育明显的受到地层产状控制(图9)。

高角度缝与斜交缝的发育特征明显的受古构造应力场及断层综合控制。Y1井、P1井及YS1井均分布在彭县断裂带西侧,彭县断裂带为NE-SW走向、NW倾向的规模较大的逆断层断裂带,该断裂主要在印支晚期第三幕至燕山早、中期开始形成,随后在燕山中晚期不断向南西南方向发展,断裂延伸长度60.2 km,断开层位为震旦系-新近系^[18-20]。川西龙门山前雷口坡组储层中斜交缝和高角度缝的分布受该断裂控制明显,主要表现在:①斜交缝和部分高角度缝的走向和倾向与彭县逆断层产状基本一致,可判断该类型裂缝多为断层伴生裂缝(图9);②斜交缝和高角度缝中有一定比例裂缝的走向与断层走向呈小角度相交,这些裂缝的形成主要与断层形成以后冲断推覆及右行走滑作用有关,在该应力条件下形成了两组共轭剪切裂缝,其中一组裂缝与断层呈小角度相交,另一组表现出与断层大角度相交,但后一组裂缝发育程度相对较弱;③距

离断层的远近也决定了裂缝的发育程度,研究区P1井与Y1井和YS1井相比与彭县断裂带的距离最小(图9),且该井所在部位附近发育多条逆断层,与其他两口井相比P1井裂缝更为发育,尤其是高角度缝的发育程度远远大于另两口井。可见,构造裂缝发育特征明显受控于断层及其控制下的扰动应力场,使得各井裂缝的发育特征具有相似性的同时又具有一定的差异性。

3.2 岩性

雷四上亚段储层岩性-岩相极其复杂,岩心观察97.5m岩心中识别出各类岩性多达20余种,以“岩石薄片鉴定SY/T5368—2000行业标准”为岩石分类基础,依据“矿物成分+组构”的复合分类方法可将不同岩性归纳为白云岩类和灰岩类两大类,其中白云岩类可进一步分为纯白云岩亚类(白云石 $\geq 90\%$,方解石 $\leq 10\%$)、(含)灰质白云岩亚类(白云石50%~90%,方解石10%~50%),灰岩类可进一步分为纯灰岩亚类(方解石 $\geq 90\%$,白云石 $\leq 10\%$)和(含)白云质灰岩亚类(方解石50%~90%,白云石10%~50%),在此基础上评价岩性对裂缝的控制作用。

岩心观察雷四段储层不同部位构造裂缝的发育存在两种情况,一是在某些储层段中仅发育一组或多组裂缝,这些裂缝分布较为规则,可以较为准确的被测量和描述(图2a-c,f);二是某些储层段天然裂缝极其发育,多组裂缝相互交织,导致岩心破碎严重,难以对每条裂缝进行测量和描述,可称之为破碎带,估算破碎带裂缝线密度均在100条/m以上(图2d)。由于3口井岩心均不同程度发育破碎带,为了研究岩性对裂缝的控制作用,首先研究破碎带的分布与岩性之间的关系,再研究非破碎带不同岩性储层内裂缝的发育情况。

统计分析表明,破碎带在不同岩性内均有发育,总体上破碎带厚度比例占岩心观察总厚度的30.3%,但各岩性内破碎带的发育程度具有较大差异。在纯白云岩亚类和纯灰岩亚类中破碎带最为发育,其厚度比例分别占49.3%和29.6%,而在(含)灰质白云岩和(含)白云质灰岩亚类中所占的比例较小,分别占23.8%和18.5%(图10)。在非破碎带内,不同岩性内裂缝的发育程度也表现出了相似的特征,纯白云岩亚类和纯灰岩亚类中天然裂缝最为发育,平均裂缝视密度分别为43.4条/m和25.2条/m,而在(含)灰质白云岩和(含)白云质灰岩中平均裂缝视密度较小,分别为23.5条/m和15.3条/m(图11)。

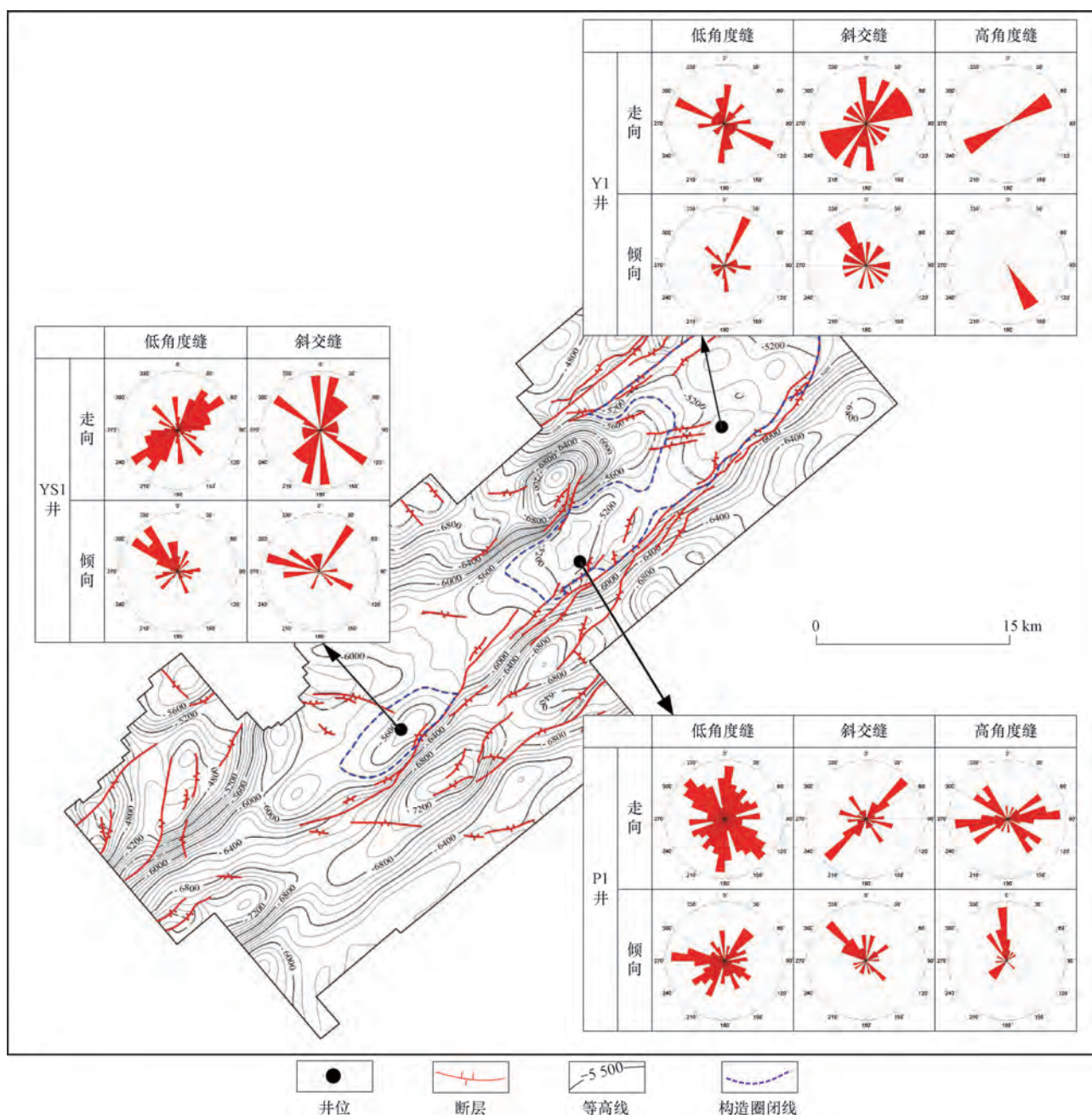


图 9 彭州地区雷口坡组储层不同构造部位裂缝发育特征

Fig. 9 Fracture development characteristics at different structural positions in the reservoir of the Leikoupo Formation, Pengzhou area

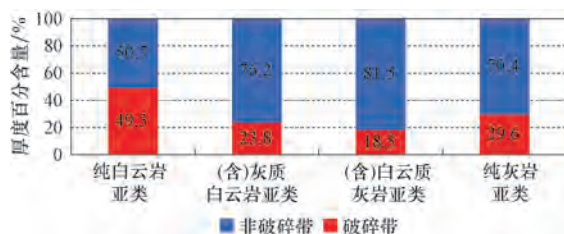


图 10 彭州地区雷口坡组储层不同岩性内破碎带分布情况

Fig. 10 Distribution of fracture zone in different types of lithology in the reservoir of the Leikoupo Formation, Pengzhou area

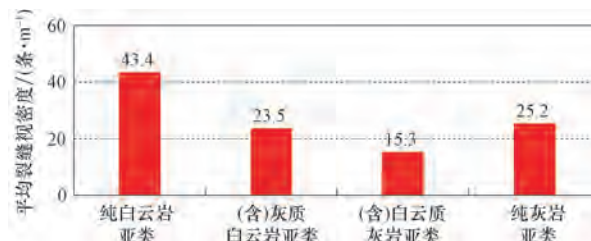


图 11 彭州地区雷口坡组储层不同岩性裂缝发育程度比较

Fig. 11 Comparison of fracture development degrees in different types of lithology in the reservoir of the Leikoupo Formation, Pengzhou area

岩性对裂缝发育的控制,从本质上讲是由于岩性通过岩石成分、颗粒大小、颗粒排列方式等方面影响了岩石力学性质,进而控制了不同岩性在构造应力作用下的裂缝发育特征^[21-23]。在碳酸盐矿物中,白云石和方解石均属于脆性矿物,但不同类型的碳酸盐岩却表现出了不同的岩石力学行为,导致天然裂缝发育程度存在较大差别,这除了与不同岩石的粒屑、填隙物等结构组分有关外,还可能与构成不同岩类的脆性矿物组分比例有关。在石灰岩向白云岩转化过程中,由于晶粒变粗,脆性增加,因此总体上白云岩类比灰岩类更易发育裂缝。但就白云岩类和灰岩类内各亚类岩性来说,可能又具有不同的情况,如对白云岩类来说,纯白云岩亚类中裂缝要比(含)灰质白云岩中更为发育;而对于灰岩类来说,该区表现出纯灰岩亚类中裂缝要比(含)白云质灰岩中更为发育,这与传统认识存在差异,这是否属于采样统计原因,还需要在以后的研究中进一步加以论证。

3.3 层厚

关于构造成因裂缝的分布与岩石力学层之间的关系,国内外许多学者均进行过较为详细的研究和论述^[24-27]。学者们普遍认为,天然裂缝的形成与分布除受构造应力控制外,主要受岩石力学层控制,岩石力学层指一套岩石力学行为相近或岩石力学性质相一致的岩层,是控制裂缝起始和终止的一系列岩石力学性质相似的一个或多个地层单元^[28]。岩石力学层一般但不总是岩性均一层,即与通常所说的岩性层不完全一致,通常见到的一些裂缝同时穿过不同岩层的现象,被切穿的由不同岩性组成的岩层就可能是相同的岩石力学层。岩石力学层对裂缝的控制主要表现在两个方面:①裂缝主要在岩石力学层内发育,切穿整个岩石力学层并终止在岩石力学层上下的界面上;②岩石力学层的厚度控制了裂缝的发育程度和裂缝的规模,在一

定的厚度范围内,随着层厚增大,裂缝密度减小,裂缝规模越大;而层厚越小,裂缝密度越大,但裂缝规模会随之减小。

通过对雷四上亚段储层岩心进行观察和描述,主要根据岩性差异对岩石力学层进行了识别,在此基础上对岩石力学层内各类构造裂缝的发育情况进行描述,统计分析了不同类型构造裂缝发育程度与岩石力学层层厚之间的关系(图12)。结果发现,高角度缝与斜交缝的发育程度与岩石力学层层厚之间表现出了较好的幂函数关系(图12a,b),即在小于5 m的岩石力学层厚度范围内,随着层厚增大,裂缝视密度呈幂函数(指数为负数)减小的特征,说明岩层厚度越大,裂缝发育密度越小;其中高角度缝发育程度与岩石力学层厚度之间的相关性要略好于斜交缝。低角度缝发育程度与岩石力学层厚度之间不具有明显的类似上述的相关性特征(图12c),可能与以下两方面的问题认识不清有关:①低角度缝与岩石力学层之间的关系问题。如前所述,低角度缝多成组出现且缝面可见划痕等现象,为地层在推覆挤压构造应力作用下顺层剪切破裂(或滑动)作用的结果,其形成时的应力背景明显与高角度缝和斜交缝不同,但在其形成过程中是否同高角度缝和斜交缝一样受岩石力学层控制,其发育程度是否与岩石力学层厚度具有一定的关系,目前尚未认识清楚,需要进一步开展研究。②低角度缝岩石力学单元层的划分问题。若低角度缝的发育也受岩石力学层控制,因其成因机制与高角度缝和斜交缝不同,那么上述针对高角度缝和低角度缝所划分的岩石力学单元层可能并不完全适用于低角度缝,需要在深入研究低角度缝特征及成因机制的基础上继续深入研究。

3.4 储层物性

主要讨论储层孔隙度对不同类型天然裂缝的控制作用。由于不同岩性内构造裂缝的发育程度具有较大

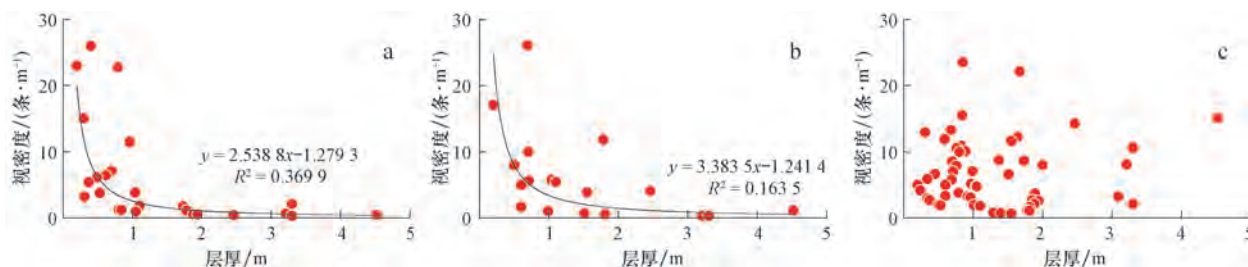


图12 彭州地区雷口坡组储层不同类型裂缝发育程度与岩层厚度之间的关系

Fig. 12 Development degrees of different fracture types vs. layer thickness for the reservoir of the Leikoupo Formation, Pengzhou area
a. 低角度缝; b. 斜交缝; c. 高角度缝

差异,在研究储层物性对构造裂缝的控制作用过程中为了消除岩性因素的影响,在此主要针对白云岩类储层展开讨论。根据白云岩类储层岩心样品实测孔隙度与取样岩心段构造裂缝线密度进行交会分析表明,绝大多数裂缝主要发育在孔隙度小于10%的储层中(Ⅱ类和Ⅲ类储层),且高角度缝与斜交缝的发育程度与储层孔隙度之间具有一定的相关性,表现出随着储层孔隙度越大,裂缝密度具有呈幂函数(指数为负数)减小的趋势,表明随着储层物性变好,裂缝发育程度越差。其中高角度缝与储层孔隙度之间的相关性仍略好于斜交缝(图13a,b),低角度缝与储层孔隙度之间并不具有明显的相关性(图13c)。

分析造成上述低角度缝与储层孔隙度之间相关性的较差、而高角度缝及斜交缝与孔隙度之间的相关性相对较好的原因主要有下面两个方面。

1) 各类构造裂缝成因机制及主控因素的差异性。雷四上亚段储层中高角度缝、斜交缝和低角度缝均属于地层在构造挤压应力场作用下发生剪切破裂而形成,但存在一定区别。高角度缝和斜交缝形成时主要沿着与最大主压应力方向(σ_1)呈一定夹角(α)的最大剪应力面分布,该夹角与最大主应力(σ_1)之间的关系为 $\alpha = 45^\circ - \varphi/2$ (其中 φ 为岩石内摩擦角),其形成和分布受岩石力学性质、岩层非均质性等因素控制,对于岩性相同的储层来说,孔隙度不同,其岩石力学性质就会存在较大差异,进而影响高角度缝和斜交缝的发育程度。对于低角度缝来说,主要是在构造挤压作用下顺层发生剪切破裂(或滑动)而形成的,破裂面主要受岩层的层理面或软弱层面分布的控制,某些低角度滑脱缝与最大主应力(σ_1)之间的夹角甚至不服从于上述岩石剪切破裂准则中的剪裂角分布规则,因此低角度缝的形成和分布更多的是受沉积构造因素控制,而直接与储层物性及其影响下的岩石力学性质等可能不具有明显关系。

2) 不同类型构造裂缝形成期次与储层成岩演化

阶段的匹配关系。主要是指裂缝形成期次与碳酸盐储层成岩作用(在此主要指溶蚀作用)发生的先后以及对彼此的影响。对某一种岩性来说,若溶蚀作用发生时间较早,造成储层孔隙发育,岩层变得疏松,强度降低,会对后期构造裂缝的发育程度产生制约作用,导致孔隙越发育的储层中构造裂缝的发育程度就会越差;若构造裂缝形成时间较早,而储层溶蚀作用发生较晚,那么先期形成的裂缝就会为溶蚀流体提供渗流通道,对后期溶蚀的发生起到促进作用,造成裂缝越发育的储层其物性可能就会越好。而研究区的情况明显属于前者,即较早的溶蚀作用制约了后期构造应力场作用下储层裂缝的发育。

4 结论

1) 川西彭州地区雷口坡组潮坪相碳酸盐岩储层主要发育构造裂缝,包括张性裂缝和剪切裂缝,以剪切缝为主;其次为成岩裂缝,包括溶蚀缝、构造-溶蚀缝以及缝合线。储层中构造裂缝发育程度高,且具有较强的非均质性。按照倾角可将构造缝分为高角度缝、斜交缝和低角度缝,不同类型裂缝具有各不相同的优势产状,反映出在多期构造应力场下形成。绝大多数构造裂缝为有效裂缝,无效裂缝所占比例较少,其中无效裂缝主要分布在低角度缝和斜交缝中,而高角度缝均为有效裂缝。

2) 雷口坡组储层构造缝的发育受多种因素综合控制,包括局部构造、岩性、岩层厚度及储层物性等几个方面,但不同类型裂缝的主控因素有所差别。构造方面,高角度缝与斜交缝主要受断层及其扰动应力场综合控制,低角度缝主要受局部构造地层产状控制。岩性方面,白云岩类中裂缝最为发育,灰岩类中发育程度相对较差。层厚方面,高角度缝与斜交缝的发育受层厚控制明显,而低角度缝受层厚控制不明显。物性方面,大多数裂缝主要发育在孔隙度小于10%的储层

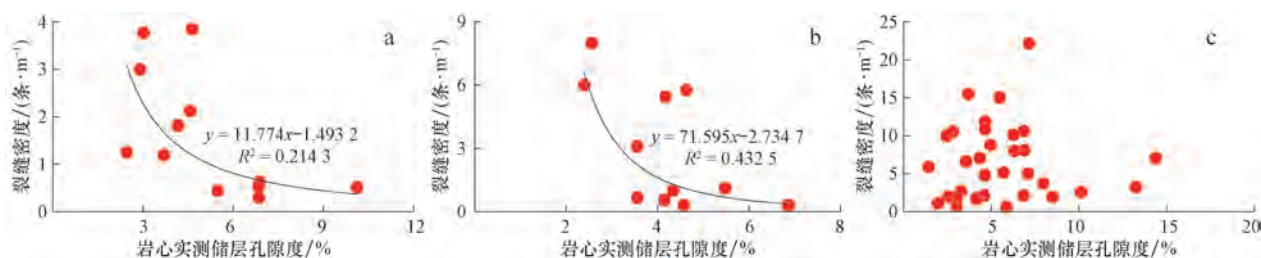


图13 彭州地区雷口坡组白云岩类储层不同类型裂缝发育程度与储层孔隙度之间的关系

Fig. 13 Development degrees of different fracture types vs. reservoir porosity for the reservoir of the Leikoupo Formation, Pengzhou area

a. 低角度缝; b. 斜交缝; c. 高角度缝

中,其中高角度缝与斜交缝的发育程度受储层孔隙度控制明显,表现出随着基质孔隙度增大呈幂函数减小,而低角度缝与储层孔隙度之间不具有明显的相关性。

参 考 文 献

- [1] 贾爱林,闫海军,郭建林,等. 不同类型碳酸盐岩气藏开发特征[J]. 石油学报,2013,34(5):914-923.
Jia Ailin, Yan Haijun, Guo Jianlin, et al. Development characteristics for different types of carbonate gas reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(5): 914-923.
- [2] 王卫红,刘传喜,穆林,等. 高含硫碳酸盐岩气藏开发技术政策优化[J]. 石油与天然气地质,2011,32(2):302-310.
Wang Weihong, Liu Chuanxi, Mu Lin, et al. Technical policy optimization for the development of carbonate sour gas reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(2): 302-310.
- [3] 朱光有,张水昌,梁英波. 中国海相碳酸盐岩气藏硫化氢形成的控制因素和分布预测[J]. 科学通报,2007,52(S1):115-125.
Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo. The controlling factors and distribution prediction of H₂S formation in marine carbonate gas reservoir[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(S1): 115-125.
- [4] 李书兵,许国明,宋晓波. 川西龙门山前构造带彭州雷口坡组大型气田的形成条件[J]. 中国石油勘探,2016,21(3):74-82.
Li Shubing, Xu Guoming, Song Xiaobo. Forming conditions of Pengzhou large gas field of Leikoupo Formation in Longmenshan piedmont tectonic belt, western Sichuan Basin[J]. China petroleum exploration, 2016, 21(3): 74-82.
- [5] 谢刚平. 川西坳陷中三叠统雷口坡组四段气藏气源分析[J]. 石油实验地质,2015,37(4):418-422.
Xie Gangping. Source of gas reservoirs in the fourth member of the Middle Triassic Leikoupo Formation in Western Sichuan Depression[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(4): 418-422.
- [6] 许国明,宋晓波,冯霞,等. 川西地区中三叠统雷口坡组天然气勘探潜力[J]. 天然气工业,2013,33(8):8-14.
Xu Guoming, Song Xiaobo, Feng Xia, et al. Gas potential of the Middle Triassic Leikoupo Fm in the western Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(8): 8-14.
- [7] 曾联波,巩磊,祖克威,等. 柴达木盆地西部古近系储层裂缝有效性的影响因素[J]. 地质学报,2012,86(11):1809-1814.
Zeng Lianbo, Gong Lei, Zu Kewei, et al. Influence factors on fracture validity of the Paleogene, reservoir Western Qaidam Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(11): 1809-1814.
- [8] 赵向原,胡向阳,曾联波,等. 四川盆地元坝地区长兴组礁滩相储层天然裂缝有效性评价[J]. 天然气工业,2017,37(2):52-61.
Zhao Xiangyuan, Hu Xiangyang, Zeng Lianbo, et al. Evaluation on the effectiveness of natural fractures in reef-flat facies reservoirs of Changxing Fm in Yuanba area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(2): 52-61.
- [9] Prioul R, Jocker J. Fracture characterization at multiple scales using borehole images, sonic logs, and walkaround vertical seismic profile[J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(11): 1503-1516.
- [10] 牛虎林,胡欣,徐志强,等. 基岩油气藏裂缝性储层的成像测井评价及裂缝预测[J]. 石油学报,2010,31(2):264-269.
Niu Hulin, Hu Xin, Xu Zhiqiang, et al. Evaluation of imaging logging and fracture prediction in fractured basement reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(2): 264-269.
- [11] 李阳兵,张筠,徐炳高,等. 川西地区须家河组裂缝成因类型及形成期次的成像测井分析[J]. 测井技术,2010,34(4):348-351.
Li Yangbing, Zhang Yun, Xu Binggao, et al. On the origin types and formation periods of fractures in Xujiahe Formation in West Sichuan Region[J]. Well logging technology, 2010, 34(4): 348-351.
- [12] 童亨茂. 成像测井资料在构造裂缝预测和评价中的应用[J]. 天然气工业,2006,26(9):58-61.
Tong Hengmao. Application of imaging well logging data in prediction of structural fracture[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(9): 58-61.
- [13] 赵俊峰,纪友亮,陈汉林,等. 电成像测井在东濮凹陷裂缝性砂岩储层评价中的应用[J]. 石油与天然气地质,2008,29(3):383-390.
Zhao Junfeng, Ji Youliang, Chen Hanlin, et al. Application of EMI in evaluation of fractured sandstone reservoirs in the Dongpu Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(3): 383-390.
- [14] 黄继新,彭仕宓,王小军,等. 成像测井资料在裂缝和地应力研究中的应用[J]. 石油学报,2006,27(6):65-69.
Huang Jixin, Peng Shimi, Wang Xiaojun, et al. Applications of imaging logging data in the research of fracture and ground stress[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(6): 65-69.
- [15] 邓虎成,周文,周秋娟,等. 新场气田须二气藏天然裂缝有效性定量表征方法及应用[J]. 岩石学报,2013,29(3):1087-1097.
Deng Hucheng, Zhou Wen, Zhou Qiumei, et al. Quantification characterization of the valid natural fractures in the 2nd Xu Member, Xinchang gas field[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(3): 1087-1097.
- [16] Bordet E, Malo M, Kirkwood D. A structural study of western Anticosti Island, St. Lawrence platform, Québec: A fracture analysis that integrates surface and subsurface structural data[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2010, 58(1): 36-55.
- [17] 童亨茂,钱祥麟. 储层裂缝的研究和分析方法[J]. 石油大学学报(自然科学版),1994,18(6):14-20.
Tong Hengmao, Qian Xianglin. Research and analysis on natural fracture[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1994, 18(6): 14-20.
- [18] 陈冬霞,王雷,庞雄奇,等. 断裂对川西坳陷致密砂岩气藏天然气运聚的控制作用[J]. 现代地质,2013,27(5):1137-1146.
Chen Dongxia, Wang Lei, Pang Xiongqi, et al. The controlling of fault on the tight sandstone gas migration and accumulation in West Sichuan Depression[J]. Geoscience, 2013, 27(5): 1137-1146.
- [19] 罗啸泉,郭东晓. 川西断裂分布特征与油气的关系[J]. 西南石油学院学报,2004,26(6):17-20.
Luo Xiaquan, Guo Dongxiao. Relationship between distribution characteristic of faults fractures and oil-gas reservoirs in west Sichuan[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2004, 26(6): 17-20.

- [J]. Marine and Petroleum Geology, 1997, 14(2): 125–138.
- [44] Ratzov G, Collet J, Sosson M, et al. Mass-transport deposits in the northern Ecuador subduction trench: result of frontal erosion over multiple seismic cycles [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2010, 296(1–2): 89–102.
- [45] Denne R, Scott E, Eickhoff D, et al. Massive Cretaceous-Paleocene boundary deposit, deep-water Gulf of Mexico: new evidence for wide-spread Chicxulub-induced slope failure [J]. Geology, 2013, 41(9): 983–986.
- [46] Alves T, Kurtev K, Moore G, et al. Assessing the internal character, reservoir potential, and seal competence of mass-transport deposits using seismic texture: a geophysical and petrophysical approach [J]. AAPG Bulletin, 2014, 98(4): 793–824.
- [47] Nardin T, Hein F, Gorsline D, et al. A review of mass movement processes, sediment and acoustic characteristics, and contrasts in slope and base-of-slope systems versus canyon-fan-basin systems [C] // Doyle L, Pilkey O. Geology of continental slopes, Tulsa; SEPM Special Publication, 1979: 61–73.
- [48] Posamentier H, Kolla V. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings [J]. Journal of Sedimentary Research, 2003, 73(3): 367–388.
- [49] Mulder T, Alexander J. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits [J]. Sedimentology, 2001, 48(2): 269–299.
- [50] Woodcock N. Sizes of submarine slides and their significance [J]. Journal of Structural Geology, 1979, 1(2): 137–142.
- [51] Mohrig D, Whipple K, Hondzo M, et al. Hydroplaning of subaqueous debris flows [J]. Geological Society of America Bulletin, 1998, 110(3): 387–394.
- [52] Posamentier H, Walker R. Deep-water turbidites and submarine fans [C] // Posamentier H, Walker R. Facies models Revisited. Tulsa; SEPM Special Publication, 2006: 399–520.
- [53] King P, Ilg B, Strachan L, et al. Outcrop and seismic examples of mass-transport deposits from a late Miocene deep-water succession, taranaki basin, New Zealand [C] // Shipp R, Weimer P, Posamentier H. Mass-transport deposits in deepwater settings. Tulsa; SEPM Special Publication, 2009: 311–348.
- [54] Tripanas E, Piper D, Jenner K, et al. Submarine mass-transport facies: new perspectives on flow processes from cores on the eastern North American margin [J]. Sedimentology, 2008, 55(1): 97–136.
- [55] Jenner K, Piper D, Campbell D, et al. Lithofacies and origin of late Quaternary mass transport deposits in submarine canyons, central Scotian slope, Canada [J]. Sedimentology, 2007, 54(1): 19–38.
- [56] Mutti E, Ricci Lucchi F. Turbidites of the Northern Apennines introduction to facies analysis [J]. International Geology Review, 1978, 20(2): 125–166.
- [57] Mutti E. Turbidite sandstones [M]. Parma: Agip and Università di Parma, 1992: 1–275.
- [58] Ghibaudo G. Subaqueous sediment gravity flow deposits: practical criteria for their field description and classification [J]. Sedimentology, 1992, 39(3): 423–454.
- [59] Pickering K, Hiscott R, Kenyon N, et al. Atlas of deep water environments: architectural style in turbidite systems [M]. London: Chapman & Hall, 1995: 1–333.
- [60] Weimer P, Slatt R. Introduction to the petroleum geology of deepwater settings [M]. Tulsa: AAPG Studies in Geology, 2007: 1–816.

(编辑 张亚雄)

(上接第39页)

- [20] 刘保金, 张先康, 鄞少英, 等. 龙门山山前彭州隐伏断裂高分辨率地震反射剖面 [J]. 地球物理学报, 2009, 52(2): 538–546.
- Liu Baojin, Zhang Xiankang, Feng Shaoying, et al. High-resolution seismic reflection profile across Pengzhou buried fault in the frontal areas of Longmen Shan [J]. China Journal of geophysics, 2009, 52(2): 538–546.
- [21] 赵向原, 曾联波, 刘忠群, 等. 致密砂岩储层中钙质夹层特征及与天然裂缝分布的关系 [J]. 地质论评, 2015, 61(1): 163–171.
- Zhao Xiangyuan, Zeng Lianbo, Liu Zhongqun, et al. Characteristics of calcareous interbeds and their impact on the distribution of natural fractures in tight sandstone reservoirs [J]. Geology Review, 2015, 61(1): 163–171.
- [22] 曾联波, 赵继勇, 朱圣举, 等. 岩层非均质性对裂缝发育的影响研究 [J]. 自然科学进展, 2008, 18(2): 216–220.
- Zeng Lianbo, Zhao Jiyong, Zhu Shengju, et al. Impact of rock anisotropy on fracture development [J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(2): 216–220.
- [23] 赵明, 樊太亮, 于炳松, 等. 塔中地区奥陶系碳酸盐岩储层裂缝发育特征及主控因素 [J]. 现代地质, 2009, 23(4): 709–718.
- Zhao Ming, Fan Taiyang, Yu Bingsong, et al. Ordovician carbonate reservoir fracture characteristics in Tazhong area of Tarim Basin [J]. Geoscience, 2009, 23(4): 709–718.
- [24] 赵向原, 曾联波, 王晓东, 等. 鄂尔多斯盆地宁县-合水地区长6、长7、长8储层裂缝差异性及其开发意义 [J]. 地质科学, 2015, 50(1): 274–285.
- Zhao Xiangyuan, Zeng Lianbo, Wang Xiaodong, et al. Differences of natural fracture characteristics and their development significance in Chang 6, Chang 7 and Chang 8 reservoir, Ningxian-Heshui area, Ordos Basin [J]. Chinese Journal of geology, 2015, 50(1): 274–285.
- [25] Laderia F L, Price N. J. Relationship between fracture spacing and bed thickness [J]. Journal of Structural Geology, 1981, 3(2): 179–183.
- [26] Huang Q, Angelier J. Fracture spacing and its relation to bed thickness [J]. Geological Magazine, 1989, 126(4): 355–362.
- [27] Narr W. Fracture density in the deep subsurface: techniques with application to Point Arguello oil field [J]. AAPG Bulletin, 1991, 75(8): 1300–1323.
- [28] 曾联波. 低渗透砂岩储层裂缝的形成与分布 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- Zeng Lianbo. Formation and distribution of fractures in low-permeability sandstone reservoir [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.

(编辑 张亚雄)