

川西南部须二段低渗透砂岩储层 裂缝类型及其形成序列

曾联波^{1,2}, 李跃纲³, 王正国², 李梅³

1. 中国石油大学石油天然气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102249
2. 中国石油大学资源与信息学院, 北京 102249
3. 中国石油西南油气田分公司川西北气矿, 四川江油 621709

摘要: 裂缝是川西坳陷须二段低渗透砂岩天然气藏分布的重要控制因素。利用地表露头、岩心、薄片和成像测井等资料, 对该区裂缝的成因类型、分布特征及其形成序列进行了分析。须二段低渗透砂岩储层主要发育有构造裂缝、成岩裂缝以及与异常高压有关的裂缝等 3 种裂缝类型, 其中以构造剪切裂缝为主, 主要有近南北向、北东向、近东西向和北西向 4 组, 它们的发育程度依次由强变弱。但在现今应力场作用下, 北西向裂缝表现为主渗流裂缝。此外, 该区还发育有大量被沥青或碳质充填的裂缝扩张脉群, 结合岩石的声发射等实验结果, 表明该区在白垩纪中晚期曾经经历过异常高压作用, 其最大压力系数可达 1.6~2.1, 在新近纪中晚期释放以后的压力系数为 1.2~1.3。在中粗粒砂岩中, 还发育大量在构造挤压作用下由于断层的逆冲作用或层间滑动造成的剪切作用有关的近水平剪切裂缝。构造裂缝主要在三叠纪末、白垩纪末和新近纪末—早更新世末形成。

关键词: 裂缝; 成因类型; 形成序列; 须二段; 川西南部。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2007)02-0194-07

收稿日期: 2006-03-02

Type and Sequence of Fractures in the Second Member of Xujiahe Formation at the South of Western Sichuan Depression

ZENG Lian bo^{1,2}, LI Yue gang³, WANG Zheng guo², LI Mei³

1. Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation, Ministry of Education, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
2. Faculty of Resources and Information Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
3. Northwest Sichuan Gas Field, Southwest Oil and Gas Field Branch, PCL, Jiangyou 621709, China

Abstract: Fracture is an important controlling factor for the distribution of natural gas reservoirs in the second member of Xujiahe Formation at the south of western Sichuan depression. Using the data of outcrops, cores, thin sections and image logs, we analyzed the fracture origin types, distribution characteristics and formation sequences. There are three types of fractures, i. e. tectonic fractures, diagenetic fractures and fractures related to overpressure in the low permeability sandstone reservoirs. Among them, the tectonic fractures are the main. They are mostly shears with four sets of S-N, NE-SW, E-W and NW-SE orientations. Their development degree dies down in turn. But influenced by modern stress field, the fracture of NW-SE orientation is the primary seepage one. Moreover, there are many tension veins filled with asphaltum in the study area. Combined with the analysis of rocky memorial information measured by acoustic emission, it shows there were overpressures in the reservoir rocks in the Middle and Late Cretaceous where the maximum coefficient of formation pressure could reach 1.6-2.1. After the pressure was released in the Middle and Late Neogene, the pressure coefficient decreased to 1.2-1.3. In the basal part of medium granular sandstone and grit, there developed many approximately horizontal shear

基金项目: CNPC 石油科技中青年创新基金项目(No. 05E7026)。

作者简介: 曾联波(1967-), 男, 博士, 教授, 主要从事裂缝的形成、分布及定量预测、应力场分析与应用、油气构造地质学等方面的科研与教学工作。E-mail: lbzeng@sina.com

fractures related to the thrusting of faults and interlayer sliding under tectonic compression. The tectonic fractures mainly formed in the end of Triassic, Cretaceous and Neogene Early Pleistocene.

Key words: fracture; origin type; formation sequence; the second member of Xujiahe Formation; south of western Sichuan depression.

近年来大量油气勘探证明,川西坳陷深层的上三叠统须家河组二段(简称须二段)具有巨大的天然气资源潜力,是21世纪四川盆地天然气资源勘探的重要接替领域,具有广阔的勘探开发前景和良好的经济社会效益(杨克明,2003;乐绍东,2004)。现有研究表明,该气层具有低孔、低渗和高含水饱和度的特点,储层的孔隙度一般小于8%,基质渗透率一般低于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,裂缝系统是控制天然气富集与高产的关键因素,并提出了“无缝不成藏”的认识(吴世祥等,2002;唐立章等,2004)。因此,裂缝的形成与分布研究对该区天然气勘探具有十分重要的意义。

川西南部地区须二段是川西坳陷深层天然气的有利勘探区,目前在邛西、平落坝、白马庙、大兴西等构造获得了较好的工业气流。受龙门山逆冲推覆构造带的分段性影响,该区具有与川西北部地区不同的地质条件和构造演化特征(黄泽光等,2003),因而具有其独特的裂缝分布系统。对川西南地区须二段储层的裂缝研究,前人从地质、测井和地震的角度对局部构造的裂缝识别、参数描述与分布进行过探讨(于红枫和周文,2001;廖曦等,2002;刘翠荣,2002;张筠,2003;徐言岗等,2004;张守仁等,2004)。但对岩石的破裂序列及裂缝的成因等方面缺乏深入的研究,这是深入认识该区裂缝分布与进行裂缝预测的基础。本文将综合地表露头、岩心、薄片、测井和实验等资料,分析该区须二段储层裂缝的成因类型及其形成序列。

1 地质背景

川西南部地区是指四川盆地川西坳陷的南部,位于四川省成都市的西南,在成都-灌县一带以南,龙门山以东,龙泉山以西,名山-丹棱-眉山一线以北。其西部为龙门山逆冲推覆构造带,东以龙泉山构造带与川中隆起相邻,南与峨眉-瓦山断褶山前构造带相邻,为一呈北东向展布的菱形块体。该区主要发育有北东向和南北向两组断裂及其相关的褶皱构造,断层落差较大,延伸较长。大部分断层断穿上侏罗统至上三叠统,向上消失在上侏罗统的蓬莱镇组,

向下消失在中三叠统雷口坡组,部分断层切割新生界。须二段储层岩性以三角洲沉积环境的厚层细-中粒长石石英砂岩、岩屑长石砂岩为主,其次为岩屑长石石英砂岩、岩屑石英砂岩、长石岩屑砂岩和长石砂岩夹少量薄层黑色泥页岩,砂岩厚度占地层总厚度的70%以上。储层厚度200~400m,分布稳定,物性差。其储集空间主要为次生粒间孔、粒内溶孔和微裂缝,属裂缝-孔隙型储层。宏观裂缝系统是储层的主要渗流通道,因而裂缝的发育程度对天然气产能具有十分重要的控制作用。

2 裂缝的成因类型

根据岩心、薄片、测井及地表露头的裂缝分析,该区须二段低渗透砂岩储层裂缝可分为构造裂缝、成岩裂缝以及与异常高压有关的裂缝3种类型。

2.1 构造裂缝

构造裂缝是该区须二段低渗透砂岩储层的主要裂缝类型,包括与断层相关裂缝以及与褶皱相关的裂缝,它们广泛分布在各种岩性中,常成组出现,切穿深度较大,方向性明显,分布比较规则,并常有矿物充填及相应的缝面特征。构造裂缝的走向随构造线方向的变化而改变。从岩心和薄片裂缝统计看,构造裂缝主要为剪切裂缝,裂缝产状稳定,缝面平直光滑,大多数呈雁列式排列,常切割砾石,裂缝尾端通常表现出折尾或菱形结环,在裂缝面上具有擦痕甚至阶步等特征。而张裂缝主要分布在断垒带中的构造高部位,表现为岩层弯曲形成的纵张裂缝,其裂缝面粗糙不平,延伸较短,常被矿物充填。在泥质岩类中,还发育构造挤压形成的低角度滑脱裂缝,在裂缝面上具有十分明显的倾向擦痕及镜面特征。

2.2 成岩裂缝

成岩裂缝主要发育在砂泥岩的岩性界面上,尤其在泥质岩类中发育,它们通常顺微层面发育,并且具有随微层面弯曲以及断续、尖灭、分支等分布特点。成岩裂缝虽然分布较广,但发育程度有限,而且由于埋藏很深,它们在上覆地层的静岩压力作用下呈闭合状态,因而所起的作用较小。

2.3 与异常高压有关的裂缝

与异常高压有关的裂缝通常表现为被沥青或碳质充填的裂缝脉群,以近水平裂缝脉群为主,此外还有呈垂直或斜交的裂缝脉体。单条裂缝脉大多数呈宽而短的透镜状,少数呈薄板状。单条裂缝脉体的宽度一般为 0.2~2 mm,最大可达 5 mm,延伸长度为数毫米至数厘米。裂缝脉群的分布与岩性和层面有关,它们主要在岩石颗粒相对较粗、岩石强度相对较低的中砂岩和粗砂岩中发育,多数脉体与层理面近平行。根据这些裂缝脉群的几何形态,它们属于典型的扩张脉,是岩石受到拉张应力作用的产物,脉体与最小主应力方向垂直。根据该区构造环境,其特定应力状态主要是由于异常流体高压形成的,反映该区曾经经历过异常高压的作用,对认识该区油气成藏过程与成藏规律具有重要意义。

该区曾经存在过异常高压现象也可以从岩石的声发射测试得到佐证。岩石的声发射测试可以恢复其曾经受到的古构造期次及其最大有效古应力值(丁原辰和邵兆刚, 2001; Zeng *et al.*, 2004a)。根据该区岩心的声发射测试,各测点岩石记忆的最大有效应力值仅略高于岩石抗压强度的 50%,最大为岩石抗压强度的 60%左右,比正常压力地层岩石记忆的最大有效应力值与岩石抗压强度的比例明显偏低,这也是该区在地质历史时期中曾经存在过高孔隙流体压力的表现。岩石受到的总应力(S)可以分解为由岩石骨架承担的有效应力(δ)和孔隙流体压力(P),即 $S = \delta + P$ 。在总应力一定的情况下,由于高孔隙流体压力的存在,使得其最大有效应力值低于在正常孔隙流体压力系统时的最大有效应力值。根据大量岩石声发射测试,在正常孔隙流体压力地层中,岩石的最大有效应力值一般在岩石抗压强度的 70%以上。例如,在塔里木盆地库车坳陷新近系正常压力系统的砂岩和古近系致密泥岩的声发射测试中,岩石记忆的最大有效应力值为岩石抗压强度的 79.8%~82.0%;而古近系异常高压系统中的砂岩记忆的最大有效应力值为岩石抗压强度的 55.6%~62.3%,其比值明显偏低 20%左右,它们主要由流体来承担(曾联波等, 2004b)。研究区砂岩声发射测试的岩石最大有效应力值为岩石抗压强度的 49%~62%,平均 55.6%,同样反映该区在地质历史时期存在过异常高压作用。

根据川西异常高压的形成机理以及埋藏史和油气生成史综合分析(汪时成等, 2004; 王震亮等,

2004),异常高压的存在时间为白垩纪中晚期,达到的最大压力系数大致为 1.6~2.1,即异常流体高压曾经达到其上覆静岩压力的 70%~90%。当孔隙流体压力下降到上覆静岩压力的 60%时,裂缝闭合而形成新的封闭系统或被方解石脉充填(Hunt, 1990; Roberts and Nunn, 1995; 解习农等, 1997; 郝芳和董伟良, 2001)。在该区此类裂缝中同样见有方解石脉体充填,并且切割沥青脉。根据包裹体分析,方解石脉体的均一温度为 150~160 °C,结合古地温梯度和埋藏史分析,反映其充填时间为新近纪中晚期,表明异常高压主要在古近纪—新近纪早期释放,在新近纪中晚期释放以后的压力系数为 1.2~1.3。异常高压的释放与该时期强烈构造作用下的断层活动及构造抬升有关。

根据裂缝倾角统计,构造裂缝的倾角主要有 2 类:一类为倾角大于 70°的高角度裂缝,另一类为倾角 10°~30°的近水平裂缝。近水平裂缝包括近水平成岩裂缝和近水平饼裂缝 2 类。近水平饼裂缝主要发育在岩石颗粒较粗的中粗砂岩中,与微层面有一定的交角,具有较好的等间距性。在显微镜下观察,有些裂缝面上具有方解石或石英矿物、沥青或碳质充填,有的还具有溶蚀现象。在有的部位可以见到与高角度构造裂缝之间的相互切割关系。该类裂缝在川西地区岩心和地表露头普遍发育。对于这类近水平饼裂缝的成因,目前主要有卸载、取心过程中岩心的剪张作用以及构造剪切破裂等几种认识,前人认为该区的近水平饼裂缝主要是由于卸载造成的一种非天然裂缝(于红枫和周文, 2001)。根据上述近水平饼裂缝的特点,本文认为它们不应该是在后期卸载过程中形成的人工裂缝,而是在地质历史时期形成的天然剪切裂缝,其形成主要与构造挤压作用下断层的逆冲作用或层间滑动造成的剪切作用有关。

3 裂缝的分布特征

通过野外地表露头、岩心的地磁和微层面定向、成像测井及裂缝识别测井资料分析,川西南部地区须二段发育有近南北向、北东向、近东西向和北西向 4 组裂缝(图 1, 图 2)。根据邛西构造地磁岩心定向以后的裂缝间距指数法计算(Narr, 1991),这 4 组裂缝的平均裂缝间距指数 I 值分别为 1.21、1.05、0.94 和 0.90,方差为 0.05,反映它们的发育程度依次由强变弱。裂缝的形成和分布与局部构造带关系

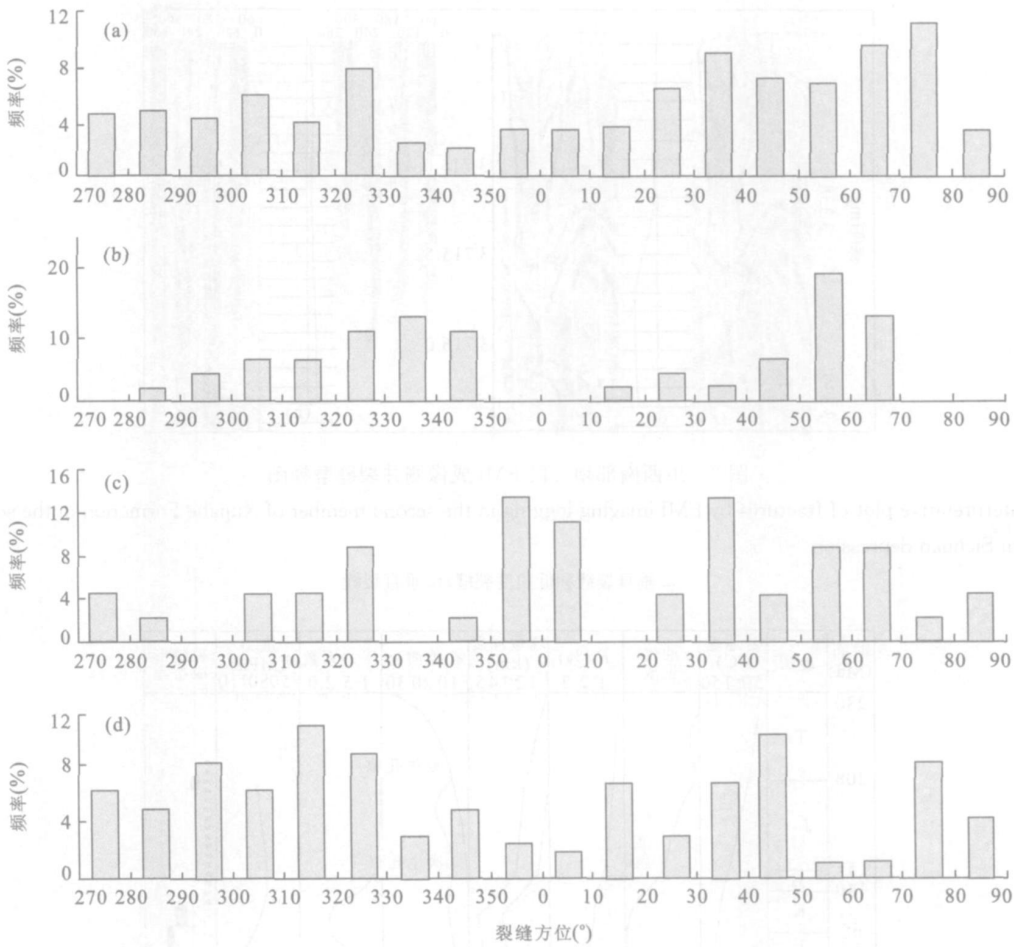


图 1 川西南部须二段裂缝方位图

Fig.1 Orientation of fractures in the second member of Xujiache Formation in the southwestern Sichuan depression
a. 据平落坝构造定向取心井裂缝统计; b. 据白马庙构造 FMI 和裂缝识别测井解释结果统计; c. 据邛西构造地磁定向以后的岩心裂缝统计; d. 据花水湾上三叠统地表露头区的裂缝统计

密切(付晓飞, 2005), 受断层影响, 该区裂缝主要沿南北向和北东-南西向构造带发育。

不同组系裂缝的渗透性与现今应力场有关, 现今应力场通过影响不同组系裂缝的地下张开度和连通性来影响其渗透率(Finkbeiner *et al.*, 1997; Peter and John, 1999; 曾联波, 2004)。北西向裂缝的渗透率为 $30.5 \times 10^{-3} \sim 55.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均 $43.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 北东向裂缝的渗透率为 $9.5 \times 10^{-3} \sim 23.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均 $15.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 东西向裂缝的渗透率为 $8.7 \times 10^{-3} \sim 19.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均 $11.6 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 南北向裂缝的渗透率为 $5.3 \times 10^{-3} \sim 18.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均 $10.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 反映与现今应力场最大主应力方向近平行的北西向裂缝的渗透率最大, 是该区的主流裂缝方向。

4 裂缝的形成序列

裂缝中的矿物充填, 使裂缝的孔隙体积变小, 有效性变差。根据裂缝中矿物的充填程度, 一般可分为全充填、半充填和局部充填 3 种类型, 反映其充填程度由强变弱, 有效性由差变好。根据岩心和薄片裂缝统计, 该区岩心裂缝见矿物充填者仅占 5.0%, 薄片裂缝见矿物充填者小于 10.0%, 且被充填裂缝主要为半充填或局部充填, 全充填甚少, 反映该区裂缝充填程度较弱, 绝大多数裂缝都是有效裂缝。

裂缝的充填矿物包括方解石、石英、沥青、碳质和泥质。根据岩心、薄片和露头区裂缝充填物的切割关系观察, 主要有石英切割方解石、方解石切割石英、沥青或碳质切割方解石以及方解石切割沥青或

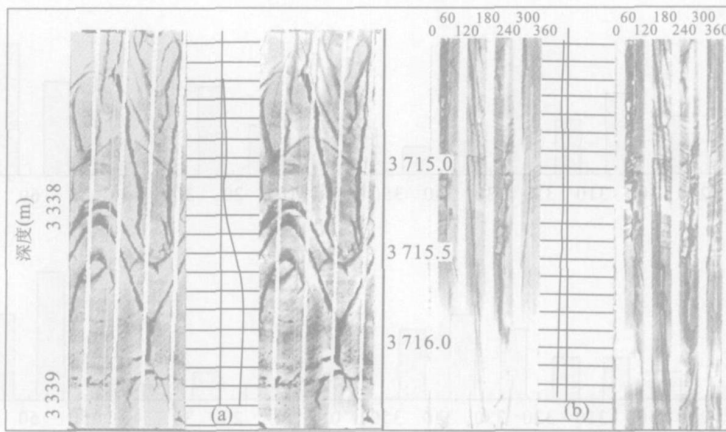


图 2 川西南部须二段 FMI 成像测井裂缝解释图

Fig. 2 Interpretative plot of fractures by FMI imaging logging in the second member of Xujiahe Formation in the southwestern Sichuan depression

a. 垂直裂缝和低角度裂缝; b. 垂直裂缝

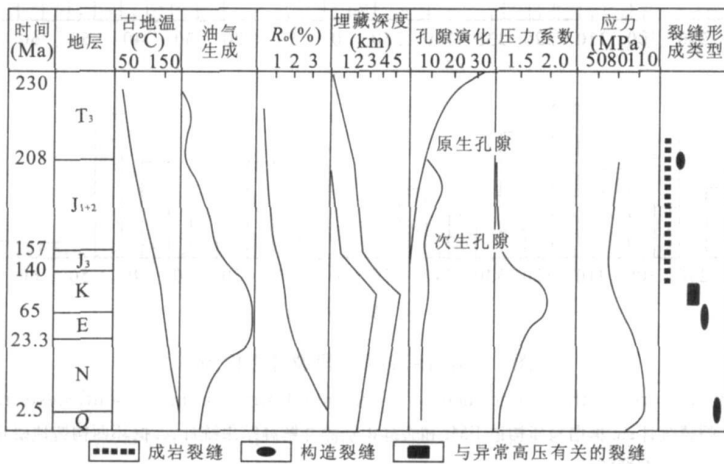


图 3 川西南地区须二段岩石破裂序列图

Fig. 3 Sequence of fractures in the second member of Xujiahe Formation in the southwestern Sichuan depression

碳质等现象,可以筛分 5 次裂缝充填事件:第 1 期主要为碳质或泥质充填在近水平成岩裂缝中,第 2 期主要为方解石充填在高角度构造裂缝中,第 3 期主要为沥青或碳质充填在与异常高压相关的裂缝中,第 4 期和第 5 期主要为石英或方解石充填在高角度构造裂缝中。

根据被石英和方解石充填的扩张裂缝脉的包裹体分析,并结合岩石的声发射实验,该区构造裂缝主要在 3 次构造事件中形成。三叠纪末期是第 1 次破裂期,并常见方解石充填,其裂缝充填物的包裹体均一温度主要为 120~140 °C;白垩纪末期是第 2 次破裂期,其形成的裂缝常见有石英充填,裂缝充填物的包裹体均一温度主要为 90~120 °C;新近纪末期

早更新世末是第 3 次破裂期,其形成的裂缝常见有方解石充填,明显切割前 2 期充填裂缝,其包裹体均一温度主要为 150~160 °C。该结果与裂缝充填物的碳氧稳定同位素分析以及石英电子自旋共振测年分析结果基本一致(周文,1998)。

因此,该区的岩石破裂序列可以划分为:最早在强烈的成岩作用下形成近水平的成岩裂缝,压溶作用中难以溶解的碳屑物质充填其中,根据成岩作用分析,成岩裂缝发育时期为三叠纪晚期—白垩纪早期;三叠纪末期的印支运动形成了第 1 期构造裂缝,部分裂缝中见有方解石充填;白垩纪该区达到最大埋藏深度,并在地层中产生有异常流体高压,形成了被沥青或碳质充填的裂缝脉群;白垩纪末期在构造挤压和异

常高压作用下,形成了该区第2期构造裂缝,裂缝中常见有石英充填;新近纪末期—早更新世末在强烈构造作用和抬升剥蚀造成的应力作用下,形成了第3期构造裂缝(图3),该时期形成的少数裂缝中见有方解石充填,但整体充填程度明显较前几期弱。

5 结论

(1)该区主要发育有构造裂缝、成岩裂缝以及与异常高压有关的裂缝等3种裂缝类型,其中以构造裂缝为主。在中粗粒砂岩中发育的近水平裂缝,主要为在构造挤压作用下由于断层逆冲作用或层间滑动造成的剪切作用有关的水平剪切裂缝。根据该区发育的大量被沥青或碳质充填的裂缝扩张脉群,并结合岩石声发射实验,该区在白垩纪中晚期曾经经历过异常流体高压作用,其最大压力系数可达1.6~2.1,在新近纪中晚期释放以后的压力系数为1.2~1.3,对深入认识该区的油气成藏机制具有十分重要意义。

(2)宏观裂缝主要起渗流通道的作用,微观裂缝主要起储集作用。该区主要有近南北向、北东向、近东西向和北西向4组构造裂缝,它们的发育程度依次由强变弱。在现今应力场作用下,北西向裂缝表现为主渗流裂缝。

(3)该区上三叠统沉积以后至白垩纪早期,在强烈的成岩作用下形成了近水平成岩裂缝;三叠纪末期的印支运动形成了第1期构造裂缝,常见有方解石充填;白垩纪随着地层异常流体高压的形成,发育有与异常高压相关的裂缝脉群;白垩纪末期的构造挤压形成了该区第2期构造裂缝,常见有石英充填;新近纪末期—早更新世末在强烈构造作用和抬升剥蚀造成的应力作用下,形成了第3期构造裂缝,并常见有方解石充填。

References

Ding Y. C., Shao, Z. G., 2001. An experimental research into determination of highest paleotectonic stress state experienced by rock through geological ages. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 26 (1): 99–104 (in Chinese with English abstract).

Finkbeiner, T., Barton, C. A., Zoback, M. D., 1997. Relationships among in situ stress, fractures and faults, and fluid flow; Monterey Formation, Santa Maria basin, California. *AAPG Bulletin*, 81(12): 1975–1999.

Fu, X. F., Fang, D. Q., Liu, Y. F., et al., 2005. Method of evaluating vertical sealing of faults in terms of the internal structure of fault zones. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(3): 328–336 (in Chinese with English abstract).

Hao, F., Dong, W. L., 2001. Evolution of fluid flow and petroleum accumulation in overpressured systems in sedimentary basins. *Advance in Earth Sciences*, 16(1): 79–84 (in Chinese with English abstract).

Huang Z. G., Liu, G. X., Pan, W. L, et al., 2003. Deformation characteristics and petroleum geological significances of compress shear stress fields in the West Sichuan depression. *Petroleum Geology & Experiment*, 25(6): 701–707 (in Chinese with English abstract).

Hunt, J. M., 1990. Generation and migration of petroleum from abnormally pressure fluid compartments. *AAPG Bulletin*, 74(1): 1–12.

Liao, X., He, X. Q., Shen, H., et al., 2002. Fracture distribution and prediction of low permeability gas reservoirs in some typical structures in Sichuan basin. *Natural Gas Industry*, 22 (Suppl.): 45–50 (in Chinese with English abstract).

Liu C. R., 2002. Numerical simulation of Himalayan epoch tectonic stress field in West Sichuan depression and its fracture prediction. *Natural Gas Industry*, 22(3): 10–13 (in Chinese with English abstract).

Narr, W., 1991. Fracture density in the deep subsurface; Techiques with application to point Arguello oilfield. *AAPG Bulletin*, 66: 1231–1247.

Peter, C., John, C., 1999. Prediction of fracture induced permeability and fluid flow in the crust using experimental stress data. *AAPG Bulletin*, 83(5): 757–777.

Roberts S. J., Numm, J. A., 1995. Episodic fluid expulsion from geopressed sediments. *Marine and Petroleum Geology*, 12(2): 195–204.

Tang, L. Z., Zhang G. S., Zhang X. P., et al., 2004. Main control factors of forming the tight sandstone gas reservoirs in Xujiahe Formation in West Sichuan depression. *Natural Gas Industry*, 24(9): 5–7 (in Chinese with English abstract).

Wang S. C., Zhang, J. C., Jia, Q. S., 2004. Formation mechanism of abnormal formation pressures in West Sichuan depression and its relation to the distribution of natural gas. *Natural Gas Industry*, 24(3): 5–8 (in Chinese with English abstract).

Wang Z. L., Sun, M. L., Zhang L. K., et al., 2004. Evolution of abnormal pressure and model of gas accumulation in Xujiahe Formation, western Sichuan basin. *Earth*

- Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(4): 433–439 (in Chinese with English abstract).
- Wu, S. X., Wang, Z. C., Zhang, L., et al., 2002. Analysis of pool forming factors and promising exploration belts of Upper Triassic in western Sichuan basin. *Journal of China University of Mining & Technology*, 31(1): 75–79 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. N., Wang, Q. Y., Li, S. T., 1997. Hydrofracturing and pulse compaction of argillaceous rock in sedimentary basin. *Chinese Science Bulletin*, 42(20): 2193–2195 (in Chinese).
- Xu, Y. G., Xu, H. J., Yu, X. H., 2004. Identification and prediction of fractures in the median deep burial strata in West Sichuan depression. *Natural Gas Industry*, 24(3): 9–11 (in Chinese with English abstract).
- Yang, K. M., 2003. Characteristics of gas distribution and reservoiring in Upper Triassic Xujiahe Formation in western Sichuan depression. *Oil & Gas Geology*, 24(4): 322–326 (in Chinese with English abstract).
- Yu, H. F., Zhou, W., 2001. A research on distribution law of fracture in Xujiahe Formation in Songhua Baima region. *Journal of Chengdu University of Technology*, 28(2): 174–178 (in Chinese with English abstract).
- Yue, S. D., 2004. Prospects and countemeasure against deep natural gas exploration in West Sichuan depression. *Natural Gas Industry*, 24(6): 1–3 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, L. B., 2004. Fissure and its seepage characteristics in low permeability sandstone reservoir. *Chinese Journal of Geology*, 39(1): 11–17 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, L. B., Tan, C. X., Zhang, M. L., 2004a. Tectonic stress field and its effect on hydrocarbon migration and accumulation in Mesozoic and Cenozoic in Kuqa depression, Tarim basin. *Science in China (Ser. D)*, 47(Suppl. II): 114–124.
- Zeng, L. B., Zhou, T. W., Lü, X. X., 2004b. Influence of tectonic compression on the anormal formation pressure in the Kuqa depression. *Geological Review*, 50(5): 471–475 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. R., Wan, T. F., Chen, J. P., 2004. Tectonic stress field modeling and fracture prediction in T_3x_{2-4} strata in Xiaoquan Xinchang area, western Sichuan depression. *Oil & Gas Geology*, 25(1): 70–74 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., 2003. Fracture log evaluation techniques of the fractured reservoirs in West Sichuan depression. *Natural Gas Industry*, 23(Suppl.): 43–45 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, W., 1998. The evaluation method of fractured reservoir. Sichuan Science and Technology Press Chengdu (in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 丁辰原, 邵兆刚, 2001. 测定岩石经历的最高古应力状态实验研究. *地球科学——中国地质大学学报*, 26(1): 99–104.
- 付晓飞, 方德庆, 吕延防, 等, 2005. 从断裂带内部结构出发评价断层垂向封闭性的方法. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(3): 328–336.
- 郝芳, 董伟良, 2001. 沉积盆地超压系统演化、流体流动与成藏机理. *地球科学进展*, 16(1): 79–84.
- 黄泽光, 刘光祥, 潘文蕾, 等, 2003. 川西坳陷压扭应力场的形变特征及油气地质意义. *石油实验地质*, 25(6): 701–707.
- 廖曦, 何绪全, 沈浩, 等, 2002. 四川盆地典型构造低渗气藏储层裂缝分布及预测. *天然气工业*, 22(增刊): 45–50.
- 刘翠荣, 2002. 川西坳陷喜山期构造应力场数值模拟及裂缝预测. *天然气工业*, 22(3): 10–13.
- 唐立章, 张贵生, 张晓鹏, 等, 2004. 川西须家河组致密砂岩成藏主控因素. *天然气工业*, 24(9): 5–7.
- 汪时成, 张金川, 贾庆素, 2004. 川西坳陷异常高压形成机理与天然气分布关系研究. *天然气工业*, 24(3): 5–8.
- 王震亮, 孙明亮, 张立宽, 等, 2004. 川西地区须家河组异常压力演化与天然气成藏模式. *地球科学——中国地质大学学报*, 29(4): 433–439.
- 吴世祥, 汪泽成, 张林, 等, 2002. 川西坳陷 T_3 成藏主控因素与有利勘探区带分析. *中国矿业大学学报*, 31(1): 75–79.
- 解习农, 王其允, 李思田, 1997. 沉积盆地泥质岩石的水力破裂和幕式压实作用. *科学通报*, 42(20): 2193–2195.
- 徐言岗, 徐宏节, 虞显和, 2004. 川西坳陷中深层裂缝的识别与预测. *天然气工业*, 24(3): 9–11.
- 杨克明, 2003. 川西坳陷油气资源现状及勘探潜力. *石油与天然气地质*, 24(4): 322–326.
- 于红枫, 周文, 2001. 松华镇——白马庙地区须二段储层裂缝分布规律. *成都理工学院学报*, 28(2): 174–178.
- 乐绍东, 2004. 川西坳陷深层天然气勘探前景与对策. *天然气工业*, 24(6): 1–3.
- 曾联波, 2004. 低渗透砂岩油气储层裂缝及其渗流特征. *地质科学*, 39(1): 11–17.
- 曾联波, 周天伟, 吕修祥, 2004b. 构造挤压对库车前陆逆冲带异常地层压力的影响. *地质论评*, 50(5): 471–475.
- 张守仁, 万天丰, 陈建平, 2004. 川西坳陷孝泉——新场地区须家河组二——四段构造应力场模拟及裂缝发育区带预测. *石油与天然气地质*, 25(1): 70–74.
- 张筠, 2003. 川西坳陷裂缝型储层的裂缝测井评价技术. *天然气工业*, 23(增刊): 43–45.
- 周文, 1998. 裂缝性油气储集层评价方法. 成都: 四川科技出版社.