

川西南部上三叠统须二段低渗透砂岩储层 裂缝分布的控制因素

曾联波^{1,2} 李跃纲³ 张贵斌² 陈古明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:川西坳陷南部上三叠统须家河组二段低渗透砂岩储层发育有构造裂缝、成岩裂缝以及与异常高压有关的裂缝共 3 种类型, 其中以构造裂缝为主。受印支期、燕山期和喜马拉雅期多期水平构造挤压、白垩纪深埋藏形成的异常流体压力以及新近纪以来的构造抬升剥蚀等造成的应力作用, 该区主要形成有 4 组裂缝, 其发育程度受岩性、层厚、构造部位、应力及流体压力等因素的控制。裂缝发育带主要沿南北向和北东—南西向构造带分布, 在南北向构造带, 近南北向裂缝和近东西向裂缝较其他两组裂缝更发育; 而在北东向构造带, 北东向裂缝和北西向裂缝较其他两组裂缝更发育。裂缝发育带控制了该区天然气的富集规律。

关键词:裂缝; 控制因素; 须二段; 川西南部

中图分类号: P588.21⁺2.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2007)04-0622-06

1 地质背景

研究区位于四川省成都市的西南部, 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(图 1)。川西坳陷南部上三叠统须家河组二段以及侏罗系沙溪庙组和蓬莱镇组是四川盆地天然气勘探的有利区域^[1-3], 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。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, 断层规模较大, 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。须家河组二段储层岩性以三角洲沉积的厚层中细长石石英砂岩、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。储层厚度 200~400 m, 分布稳定, 但物性较差, 为典型的低孔低渗透砂岩储层。储集空间为次生粒间孔、粒内溶孔和裂缝, 储层孔隙度一般小于 8%, 基质渗透率一般小于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。由于储层岩石致密, 脆性较大, 因而在强烈的构造作用下裂缝发育, 使该区储层

表现为裂缝—孔隙型储层。裂缝是储层的主要渗流通道和重要的储集空间, 控制了该区天然气的富集与高产^[4]。因此, 裂缝分布规律研究对该区天然气勘探开发具有十分重要的指导作用。

2 裂缝的类型与特征

根据岩心、薄片及测井资料综合分析, 川西南部地区须二段低渗透砂岩储层发育构造裂缝、成岩裂缝以及与异常高压有关的 3 种裂缝类型。构造裂缝是该区的主要裂缝类型^[4-6], 它们成组出现, 方向性明显, 切穿深度较大, 有时见矿物充填(图 2-a)。构造裂缝主要为剪切裂缝, 裂缝产状稳定, 缝面平直光滑, 常呈雁列式排列, 在裂缝面上常具有擦痕甚至阶步, 其尾端通常表现出折尾或菱形结环特征。通过露头、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, 该区主要有近南北向、北东向、近东西向和北西向 4 组裂缝。根据 QX 构造的裂缝间距指数计算^[7], 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。

成岩裂缝通常顺层面具有弯曲、断续、尖灭、分枝等特点, 并常有粘土、炭质充填(图 2-b), 因而所起的作用较小。

收稿日期: 2006-12-12; 改回日期: 2007-01-30

基金项目: 石油科技中青年创新基金项目(05E7026)资助。

作者简介: 曾联波, 男, 1967 年生, 教授, 主要研究方向为裂缝形成、分布及预测、构造应力场分析与应用; E-mail: lbzeng@sina.com。

与异常高压有关的裂缝通常表现为被沥青或炭质充填的裂缝脉群,其产状变化较大,规律性较差,它们主要发育在岩石强度相对较低的中粗砂岩中。单条裂缝脉大多数呈中间宽两端窄的透镜状(图 2-c),属于典型的拉张脉,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。根据这类裂缝形成的应力状态,并结合岩石的声发射测试结果,该类裂缝的形成主要与异常流体高压有关。异常流体高压使应力莫尔圆向左移动,使最小主应力由挤压变成拉张(负值),从而

形成拉张裂缝。喜马拉雅晚期的构造抬升和断层活动,使流体压力释放,从而使该区由异常高压系统变为目前的接近正常的压力系统(压力系数为 1.3 左右),并在沥青充填脉中又充填有方解石脉体。该区曾经经历过的异常流体高压作用,对油气成藏具有重要意义。

根据裂缝的空间几何关系修正后统计,裂缝的平均间距为 1.1~1.2 m,裂缝的高度一般小于 2.0 m,裂缝主要在岩层内发育。根据裂缝长度与其间距或高度关系,估算裂缝在平面上的延伸长度主要为 4~12 m,裂缝的规模表明不同组系的裂缝之间可以构成良好的裂缝网络系统,而独立的裂缝网络体系控制了该区低渗透砂岩储层天然气藏的分布。

3 裂缝发育的控制因素

3.1 裂缝与岩性关系

影响裂缝发育的岩性因素包括岩石成分、颗粒大小及其物性等^[11-13]。根据不同岩性裂缝密度统计,该区砂岩中高角度构造裂缝比泥岩发育,而低角度裂缝在泥岩和含炭质砂岩中密度更大(表 1)。在砂岩中,细砂岩中的构造裂缝密度比中砂岩更大,反映了相同组分的岩石,颗粒越细,越有利于构造裂缝的发育。泥岩中由于近水平成岩裂缝和滑脱裂缝发育,因而低角度裂缝密度最大。细砂岩和含炭质砂岩中的低角度裂缝主要为顺微层面分布的近水平成岩裂缝;中砂岩中的低角度裂缝主要为近水平剪切裂缝(图 2-d),其发育不均匀,一般在逆断层附近(尤其上盘)和软弱滑脱面附近的砂岩段发育。在近水平剪切裂缝发育的局部岩心段,其裂缝密度可达 20 条/m 以上。

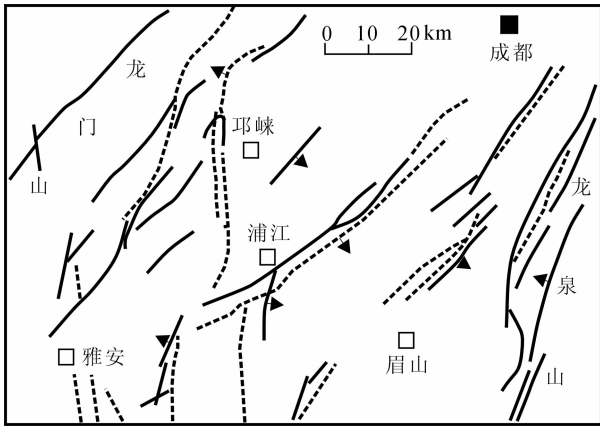


图 1 研究区构造位置简图(据西南油气田分公司资料改编)
 实线表示实测断层,虚线表示隐伏断层,箭头表示断层倾向
 Fig.1 Simplified map showing the tectonic location of the study area (modified from the data of the Southwest Oil and Gas Field Branch, PetroChina)
 The solid lines represent measured faults, the broken lines hidden faults, and the arrowheads the dip of faults

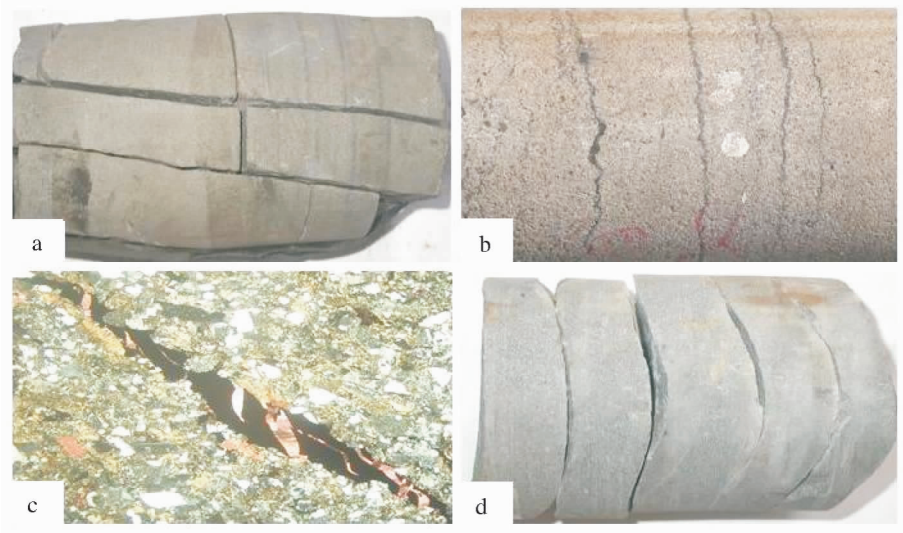


图 2 裂缝的类型
 a—岩心上一组平行的直立构造裂缝;b—与层理面近平行的成岩裂缝;c—与异常高压相关的裂缝;
 d—近水平剪切裂缝,具有较好的等间距性
 Fig.2 Fracture types
 a—A set of parallel upright tectonic fractures in core;b— Diagenetic fractures subparallel to bedding planes;
 c— Fracture related to overpressures;d—Subhorizontal shear fractures with good equal spacing

3.2 裂缝与层厚的关系

裂缝的发育受岩石力学层控制^[11-21]。在砂泥岩互层的低渗透碎屑岩储层,由于砂岩和泥岩的岩石力学性质差别明显,因而岩石力学层通常表现为岩性层。根据不同层厚裂缝间距统计,在一定的层厚范围内,随着裂隙化岩层厚度的增大,裂缝的平均间距呈线性增大,密度减小(图3),这也是利

表1 不同岩性中的裂缝线密度(单位:条/m)
Table 1 Fracture density in different lithologies
(unit: fractures/m)

岩性	中砂岩	细砂岩	含炭质砂岩	泥岩
高角度裂缝	0.73	0.94	0.83	0.48
低角度裂缝	0.66	0.85	1.35	2.08

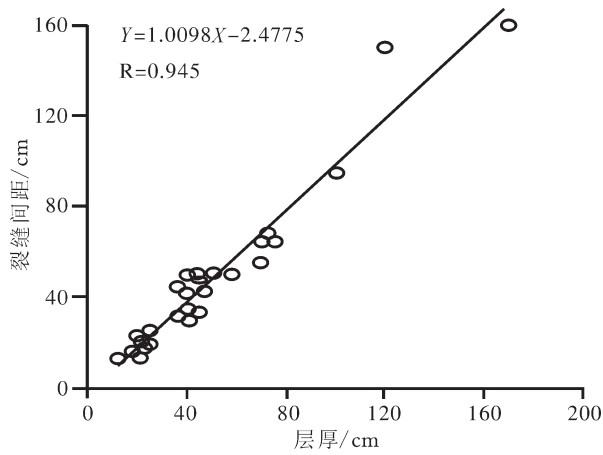


图3 裂缝平均间距与岩层厚度关系

Fig.3 Relationship between the mean fracture spacing and layer thickness

用裂缝间距指数法计算地下岩心裂缝密度的理论依据^[10]。

3.3 裂缝与构造的关系

构造是控制该区构造裂缝形成与发育的重要因素,它通过控制不同构造部位的局部应力分布来控制其裂缝发育程度^[11,13,22,23]。在断层附近,由于断层活动造成的应力扰动作用,使断层附近的裂缝分布具有分带性。通过野外、岩心裂缝的对比分析和数值模拟计算,在逆冲断层附近2倍的断距范围内,存在明显的应力集中,因而控制了其裂缝密集带的分布。逆断层上盘的裂缝一般较下盘发育。在逆断层上盘,随着与断层断面距离的增大,裂缝的发育程度具有依次递减的趋势(图4)。因此,在由逆(冲)断层组成的断块中,通常是冲起构造中裂缝最发育,其次为叠瓦状构造,而三角带构造中裂缝发育相对较弱。

根据QX构造利用岩心、测井和构造应力场数值模拟等资料得到的裂缝综合评价结果,并结合白马庙和平落坝构造的裂缝发育规律^[5-9],该区裂缝发育带主要沿北东向和南北向构造带分布,反映了构造带对裂缝发育的控制作用。尤其是在断垒带中的构造高部位以及南北向与北东向构造带的交叉部位,受岩层弯曲变形和断层双重因素控制的张性裂缝和剪切裂缝交织发育,构成了良好的有效裂缝网络系统,是该区天然气富集的最有利区域。受断层构造的控制作用,在南北向构造带,近南北向裂缝和近东西向裂缝较其他两组裂缝更发育;而在北东向构造带,北东向裂缝和北西向裂缝较其他两组裂缝更发育。

3.4 裂缝与应力及流体压力的关系

岩石中裂缝的形成与所受到的应力状态密切相关^[24-29]。盆地中地下岩石的应力状态可表示为^[28]:

$$\Delta z = \rho \cdot g \cdot z - p$$

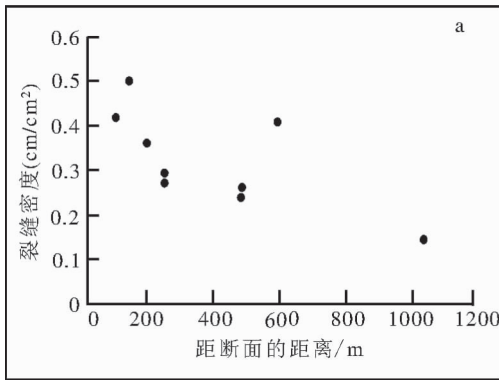


图4 裂缝与逆断层关系图

a—QX构造岩心裂缝面密度与断面距离的关系图;b—浦江剖面逆断层附近裂缝分布图,断层上盘比下盘裂缝发育,离断面距离越大,裂缝发育程度降低

Fig.4 Relation of fractures and the reverse fault

a—Relationship between the fracture density and the distance from the fault surface in the core from the Qiongxu structure; b—Fracture distribution near the reverse fault in the Pujiang section. The fractures are better developed in the hanging wall of the fault than those in the footwall. The degree of development of fractures decreases with increasing distance from the fault surface

表 2 裂缝密度与应力关系数据

Table 2 Data of relationship between fracture density and stress

井号	深度(m)	样品数量(块)	岩石抗压强度 (MPa)	最大有效应力 (MPa)	微观裂缝面密度 (cm/cm ²)	宏观裂缝线密度 (条/m)
Q2	3766.5~3767.5	8	157.0	97.3	0.35	2.50
Q3	3771.0~3772.0	8	160.2	88.5	0.26	2.32
Q1	4259.4~4260.4	9	165.3	82.2	0.12	0.76

注:(1)样品数量为岩石声发射实验的柱状样品数量,最大有效应力根据岩石的声发射方法测量,在国土资源部地质力学开放实验室声发射实验装置上完成;(2)岩石的抗压强度为单轴抗压强度;(3)微观裂缝面密度根据相应井段的薄片统计求得,3口井的薄片数量分别为13块、9块和18块;(4)宏观裂缝线密度根据相应井段岩心进行几何校正后统计求得。

$$\Delta y = \frac{v}{1-v} \cdot \rho \cdot g \cdot z + \frac{E}{1-v^2} (e_x - v e_y) - \frac{\alpha E}{1-v} (T - T_0) - P$$

$$\Delta x = \frac{v}{1-v} \cdot \rho \cdot g \cdot z + \frac{E}{1-v^2} (e_x - v e_y) - \frac{\alpha E}{1-v} (T - T_0) - P$$

式中, Δx 、 Δy 、 Δz 分别是 x 、 y 、 z 3个方向的有效应力; ρ 是上覆地层的岩石平均密度; g 是重力加速度; T_0 和 T 分别是地表和地下 z 深度的温度; P 是流体压力; E 、 v 和 α 分别是岩石的弹性模量、泊松比和热膨胀系数; e_x 和 e_y 分别是 x 和 y 方向上的应变。上式反映了盆地应力状态可以通过减少重力、增加构造作用、温度和流体压力等方式来实现^[26-27]。因此,印支期、燕山期和喜马拉雅期的水平构造挤压、白垩纪深埋藏造成的异常流体压力以及新近纪以来的构造抬升剥蚀作用都是形成该区低渗透砂岩储层裂缝的应力来源。该区地层中异常流体压力的存在引起岩石内部的有效正应力下降,导致岩石剪破裂强度下降,容易产生裂缝。同时,异常流体高压的存在还使应力莫尔圆向左移动,其最小主应力(σ_3)容易变成负值,使岩石容易发生拉张破裂,常被沥青等充填形成拉张裂缝脉群。

从QX构造3口井在不同深度用岩石声发射方法测量的最大有效应力与相应井段宏观和微观裂缝密度关系看,随着深度的增加,岩石的抗压强度增大,其实测的最大有效应力减小,相应的微观裂缝面密度和宏观裂缝线密度降低(表2),反映了该区低渗透砂岩储层裂缝的发育程度受构造应力的控制。

4 结论

川西南部地区主要为致密低渗透砂岩储层,其天然气的分布及其产能与裂缝系统密切相关。裂缝的形成与分布受该区地质条件的控制,因而影响裂缝分布的控制因素分析是深入认识该区裂缝发育规律的基础,并对其他地区裂缝分布规律的认识具有借鉴作用。该区主要发育构造裂缝、成岩裂缝以及与异常高压有关的裂缝3种类型,其中以构造剪切裂缝为主。区内主要分布有近南北向、北东向、近东西向和北西向4组构造裂缝,其发育程度依次由强变弱。裂缝的发育程度受岩性、层厚、构造、应力及流体压力等因素的控制。受构造及其应力分布的影响,该区裂缝发育带主要沿南北向和北东向构造带分布,其中,在南北向构造带,近南北向裂缝和近

东西向裂缝较其他两组裂缝更发育;而在北东向构造带,北东向裂缝和北西向裂缝较其他两组裂缝更发育。在南北向和北东向两个构造带的交叉部位,是该区裂缝发育的有利区域,同时也是天然气富集的有利场所。

参考文献(References):

- [1] 杨克明. 川西坳陷油气资源现状及勘探潜力 [J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(4):322-326.
Yang Keming. Characteristics of gas distribution and reservoiring in Upper Triassic Xujiahe Formation in Western Sichuan depression [J]. Oil & Gas Geology, 2003. 24(4):322-326(in Chinese with English abstract).
- [2] 赵永刚, 陈景山, 雷卞军, 等. 川西邛崃县白马庙气田上侏罗统蓬莱镇组高分辨率层序地层分析 [J]. 中国地质, 2005, 32(4):674-681.
Zhao Yonggang, Chen Jingshan, Lei Bianjun, et al. Analysis of high-resolution sequence stratigraphy of the Upper Jurassic Penglaizhen Formation in the Baimamiao gas field, Qionglai County, western Sichuan [J]. Geology in China, 2005,32(4):674-681(in Chinese with English abstract).
- [3] 赵永刚, 雷卞军, 杨跃明, 等. 川西邛崃县白马庙气田上侏罗统蓬莱镇组沉积相及砂体展布研究 [J]. 中国地质, 2004, 31(3):284-288.
Zhao Yonggang, Lei Bianjun, Yang Yueming, et al. Sedimentary facies and sandbody distribution of the Upper Jurassic Penglaizhen Formation in the Baimamiao gas field, Qionglai County, western Sichuan [J]. Geology in China, 2004, 31 (3):284-288 (in Chinese with English abstract).
- [4] 唐立章, 张贵生, 张晓鹏. 川西须家河组致密砂岩成藏主控因素 [J]. 天然气工业, 2004, 24(9):5-7.
Tang Lizhang, Zhang Guisheng, Zhang Xiaopeng, et al. Main control factors of forming the tight sandstone gas reservoirs in Xujiahe Formation in west Sichuan depression [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(9):5-7(in Chinese with English abstract).
- [5] 于红枫, 周文. 松华镇—白马庙地区须二段储层裂缝分布规律 [J]. 都理工学院学报, 2001, 28(2):174-178.
Yu Hongfeng, Zhou Wen. A research on distribution law of fracture in Xujiahe Formation in Songhua-Baima region [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001. 28 (2):174-178(in Chinese with English abstract).
- [6] 廖曦, 何绪全, 沈浩, 等. 四川盆地典型构造低渗气藏储层裂缝分

- 布及预测[J]. 天然气工业, 2002, 22(增刊):45-50.
- Liao Xi, He Xuquan, Shen Hao, et al. Fracture distribution and prediction of low permeability gas reservoirs in some typical structures in Sichuan basin [J]. Natural Gas Industry, 2002, 22 (Supp.):45-50(in Chinese with English abstract).
- [7] 刘翠荣. 川西坳陷喜山期构造应力场数值模拟及裂缝预测 [J]. 天然气工业, 2002, 22(3):10-13.
- Liu Cuirong. Numerical simulation of Himalayan epoch tectonic stress field in west Sichuan depression and its fracture prediction[J]. Natural Gas Industry, 2002, 22 (3):10-13 (in Chinese with English abstract).
- [8] 张筠. 川西坳陷裂缝性储层的裂缝测井评价技术[J]. 天然气工业, 2003, 23(增刊):43-45.
- Zhang Yun. Fracture log evaluation techniques of the fractured reservoirs in west Sichuan depression [J]. Natural Gas Industry, 2003, 23(Supp.):43-45(in Chinese with English abstract).
- [9] 张守仁, 万天丰, 陈建平. 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 [J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(1):70-74.
- Zhang Souren, Wan Tianfeng, Chen Jianping. Tectonic stress field modeling and fracture prediction in T3X2-4 strata in Xiaoquan-Xinchang area, western Sichuan depression [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(1):70-74(in Chinese with English abstract).
- [10] Narr W. Fracture density in the deep subsurface: Techniques with application to point Arguello oil field[J]. AAPG Bulletin, 1991, 66: 1231-1247.
- [11] 曾联波. 低渗透砂岩油气储层裂缝及其渗流特征[J]. 地质科学, 2004, 39(1):11-17.
- Zeng Lianbo. Fissure and its seepage characteristics in low - permeability sandstone reservoir [J]. Chinese Journal of Geology, 2004, 39(1):11-17(in Chinese with English abstract).
- [12] Nelson R A. Geologic analysis of naturally fractured reservoirs[M]. Houston: Gulf Publishing Company, 1985.
- [13] Catherine L H, Lorenz J, Lawrence T I, et al. Lithological and structural controls on natural fracture distribution and behavior in the Lisburne Group, northeastern Brooks Range and north slope subsurface, Alaska[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(10):1700-1720.
- [14] Huang Q, Angelier J. Fracture spacing and its relation to bed thickness[J]. Tectonophysis, 1989, 126(4):355-362.
- [15] Narr W, Suppe J. Joint spacing in sedimentary rocks [J]. J.Struct. Geol., 1991, 13(9):1037-1048.
- [16] Wu H, Pollard D D. An experimental study of the relationship between joint spacing and layer thickness[J]. J.Struct.Geol. 1995, 17 (6):887-905.
- [17] Ji S, Zhu Z, Wang Z. Relationship between joint spacing and bed thickness in sedimentary rocks; effect of interbed slip [J]. Geol. Mag., 1998, 135(5):637-655.
- [18] Bahat D. Single-layer burial joints vs. single-layer uplift joints in Eocene chalk from the Beer Sheva syncline in Israel [J]. J.Struct. Geol., 1999, 21(3):293-303.
- [19] Bai T, Pollard, David D. Fracture spacing in layered rocks: a new explanation based on the stress transition [J]. Journal of Structural Geology, 2000, 22(1):43-57.
- [20] Rijken P, Cooke M L. Role of shale thickness on vertical connectivity of fractures; application of crack-bridging theory to the Austin Chalk, Texas[J]. Tectonophysics, 2001, 337(1/2):117-133.
- [21] Rives T M, Razack J P. Petit, et al. Joint spacing: analogue and numerical simulations[J]. J.Struct. Geol., 1992, 14(8/9):925-937.
- [22] Groshong R H. Forced folds and fractures; Geological Society Special Publication[J]. Tectonophysics, 2001, 334(5):57-59.
- [23] Volland S, Kruhl J H. Anisotropy quantification: the application of fractal geometry methods on tectonic fracture patterns of a Hercynian fault zone in NW Sardinia [J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26(8):1499-1510.
- [24] Mckinnon S D, Barra I G. Fracture initiation, growth and effect on stress field: a numerical investigation[J]. J.Struct.Geol. 1998, 20(12): 1663-1672.
- [25] Alber M, Heiland J. Stress history and application of fracture mechanics approach [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2001, 34(3):187-199.
- [26] Tuckwell G W, Lonergan L, Jolly R J H. The control of stress history and flaw distribution on the evolution of polygonal fracture networks[J]. Journal of Structural Geology, 2003, 25(8):1241-1250.
- [27] Turcotte D I, Newman W I, Shcherbakov R. Micro and macroscopic models of rock fracture [J]. Geophysical Journal International, 2003, 152(3):718-728.
- [28] Bahat D, Bankwitz P, Bankwitz E. Preuplift joints in granites: evidence for subcritical and postcritical fracture growth [J]. Geological Society of America Bulletin, 2003, 115(2):148-165.
- [29] Narr W, Currie J B. Origin of fracture porosity - example from Altament Field[J]. AAPG Bull., 1982, 66:1231-1247.

Controlling factors for fracture distribution in the low-permeability sandstone reservoir of the Second Member of the Upper Triassic Xujiahe Formation in the south of western Sichuan

ZENG Lian-bo^{1,2}, LI Yue-gang³, ZHANG Gui-bin², CHEN Gu-ming³

(1. Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation of China Petroleum University, Ministry of Education, Beijing 102249, China;

2. School of Resources and Information, China Petroleum University, Beijing 102249, China;

3. Northwest Sichuan Gas Field, Southwest Oil and Gas Field Branch, PetroChina, Jiangyou 621709, Sichuan, China)

Abstract: There are tectonic fractures, diagenetic fractures and fractures related to overpressures in the low-permeability sandstone reservoir in the Second Member of the Upper Permian Xujiahe Formation in the south of the western Sichuan depression. Among them, tectonic fractures are dominant. Under the stresses resulting from horizontal tectonic compressions in the Indosinian, Yanshanian and Himalayan periods, overpressures formed by deep burial in the Cretaceous and tectonic uplift and erosion since the Neogene, four sets of fractures formed in the study area. The development degree of these fractures was controlled by the lithology, layer thickness, structural locations, stresses and fluid pressures. The zones of fractures are mainly distributed along the N-S and NE-SW-trending structural belts. In the N-S-trending structural belt, nearly N-S and nearly E-W sets of fractures are better developed than the other two sets of fractures; whereas in the NE-SW-trending structural belt, the NE-SW and NW-SE sets of fractures are better developed than the other two sets. The fracture development zones control the concentration of natural gas in the study area.

Key words: fracture; controlling factor; Second Member of the Xujiahe Formation; southern part of western Sichuan

About the first author: ZENG Lian-bo, male, born in 1967, professor at China Petroleum University, his major research interests cover fracture formation, distribution and prediction and stress field analysis and application; E-mail: lbzeng@sina.com.