

文章编号:0253-9985(2012)04-0526-10

四川盆地九龙山构造须二段致密砂岩储层裂缝特征、形成时期与主控因素

白斌^{1,2}, 邹才能¹, 朱如凯¹, 张健³, 张本健⁴, 毕丽娜¹, 苏玲¹

(1. 中国石油勘探开发研究院 提高石油采收率国家重点实验室, 北京 100083; 2. 西北大学, 陕西 西安, 710069;
3. 中国石油西南油气田勘探处, 四川 成都 610051; 4. 中国石油西南油气田公司川西北气矿, 四川 江油 621700)

摘要:四川盆地西北部须家河组二段致密砂岩储集性能受到不同期次构造裂缝控制, 研究构造裂缝特征、期次以及控制因素将为有效评价与预测有利储层提供依据。根据露头、钻井岩心及薄片构造裂缝观察, 划分构造裂缝切割关系, 认为构造裂缝走向主要为北东向、北北西向、近东西向和南东东向, 其中优势方位为北西-南东方向。利用不同切割关系裂缝充填物包裹体均一温度、ESR 测年数据, 结合岩石古应力值将研究区构造裂缝至少划分为4期: 第一期构造裂缝形成于晚印支期, 方解石呈紧挨裂缝壁充填, 包裹体均一温度为84~120℃; 第二期为晚燕山期, 裂缝主要充填石英, 均一温度为72~137℃; 喜马拉雅早-中期是第三次破裂期, 其裂缝充填石英, 明显切割前两期裂缝, 均一温度为153~179℃; 喜马拉雅晚期是第四次破裂期, 其形成的裂缝充填物为较粗大的方解石, 少量白云石, 均一温度高达165~190℃。其中印支晚期与喜马拉雅晚期构造活动最为强烈, 裂缝发育。同时, 研究区构造裂缝的发育和分布受构造应力和岩石自身物理参数共同控制, 高孔隙度、细粒级、薄层的岩屑砂岩是形成构造裂缝的有利条件。

关键词: 裂缝期次; 致密砂岩; 须家河组; 九龙山构造; 四川盆地

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Characteristics, timing and controlling factors of structural fractures in tight sandstones of the 2nd member of Xujiahe Formation in Jiulong Mountain structure, Sichuan Basin

Bai Bin^{1,2}, Zou Caineng¹, Zhu Rukai¹, Zhang Jian³, Zhang Benjian⁴, Bi Lina¹ and Su Ling¹

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China;

2. Northwest University, Xian, Shaanxi 710069, China;

3. PetroChina Exploration Department of Southwest Oilfield, Chengdu, Sichuan 610051, China;

4. Northwest Sichuan Gas Mine of Southwest Oilfield, PetroChina, Jiangyou, Sichuan 621700, China)

Abstract: Physical properties of tight sands in the 2nd member of Xujiahe Formation in northwestern Sichuan Basin are controlled by structural fractures (SF) formed at different stages. The study on characteristics, timing and controlling factors of the structural fractures can provide useful information for reservoir evaluation and prediction. Identification of cutting relations of the SF on the basis of fracture observation on outcrops, cores and thin sections reveals that the SF can be grouped into NW-SE-trending, NE-trending, NNW-trending, near EW-trending and SEE-trending, of them NW-SE-trending is predominant. At least four stages of SF were identified based on the analysis of the fluid inclusion homogenization temperature of fillings in fractures with different cutting relation and ESR, as well as palaeo-stress data. The first stage is the Late Indosinian, and the SF formed at this stage feature in calcite filling and fluid inclusion homogenization temperature (FIHT) of 84–120 °C. The second

收稿日期: 2012-06-12; 修订日期: 2012-07-11。

第一作者简介: 白斌(1981—), 男, 工程师, 矿产普查与勘探。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41002034); 国家科技重大专项(2011ZX05001-002); 中国石油勘探开发研究院青年基金项目(2010-A-26-08)。

stage is the Late Yanshanian, and the SF formed at this stage are characterized by quartz filling and FIHT of 72 – 137 °C. The third stage is the Early-middle Himalayan Period and the SF formed at this stage feature in quartz filling, cutting relations with the SF of previous two stags, and FIHT of 153 – 179 °C. The fourth stage is the Late Himalayan Period, and the SF formed in this stage are characterized by coarser calcite fillings with some dolomites and FIHT of 165 – 190 °C. Because of the active tectonic movement during the Indosinian and Himalayan Period, the SF are well developed. The formation and distribution of SF are jointly controlled by tectonic stress and the mechanical property of rocks. Lithic sandstone with high porosity, fine particle and thin layer are favorable for SF development.

Key words: formation timing of structural fracture, tight sandstone, Xujiahe Formation, Jiulong Mountain area, Sichuan Basin

四川盆地西部地区自晚三叠世以来,处于龙门山前陆冲断带的前缘地区,整体处于龙门山逆冲推覆构造带与米仓山隆起挤压的双重应力场之中,自晚印支期以来受到多期构造运动的复合叠加和改造^[1-3],致使研究区大量发育不同期次的构造裂缝。研究区主要勘探生产目的层为晚三叠世须家河组二段(须二段)冲积扇三角洲沉积体系,储层平均孔隙度为4%,地面空气渗透率一般小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于致密砂岩储层^[4-5]。不同期次构造裂缝的发育对于改善致密砂岩储层储集性能起着重要作用,控制着有利储层分布。因此,开展研究区目的层段构造裂缝特征、期次及主控因

素研究将为有效评价与预测有利储层提供依据。

1 构造裂缝基本特征

1.1 构造裂缝优势方位

根据四川盆地西北部地区及邻区目的层露头区上三叠统砂岩构造裂缝定向观测和统计结果表明(表1),须二段储层构造裂缝走向共有4组,分别为:北东向(40 ~ 60°)、北北西向(350 ~ 360°)、近东西向(80 ~ 90°)和南东东向(108 ~ 130°),其中优势方位为北西-南东方向。

表 1 川西地区野外构造裂缝特征统计
Table 1 Features of structural fractures on outcrops in western Sichuan Basin

地点		层位	走向 A/(°)	走向 B/(°)	裂缝密度/ (条·m ⁻¹)	岩性	野外裂缝走向
川西地区	广元工农镇	T ₃ x ¹	240	55	—	中-厚层细砂岩	
	什邡红白镇		230	130	—	薄层泥质粉砂岩	
	广元工农镇	T ₃ x ²	288	36	5	中-粗砂岩	
	什邡红白镇		310	45	21	薄层泥质粉砂岩	
			340	130	18	薄层泥质粉砂岩	
			240	220	—	中-厚层细砂岩	
	彭州狮子山		350	110	3	薄层泥质粉砂岩	
			0	90	8	中-厚层状深棕色粉砂岩	
	峨眉杨城堡		220	—	—	辫状河道白色中-细砂岩	
	广元工农镇	T ₃ x ³	300	255	2	细-中砂岩	
	广元工农镇	T ₃ x ⁴	260	270	2	中砂岩	
	什邡红白镇		110	250	—	中层状深灰色岩屑粉砂岩	
峨眉杨城堡	330		—	—	细砂岩		

注: A 和 B 为该点发育的裂缝走向。

同时对四川盆地西北部九龙山构造带须二段砂岩岩心裂缝走向经古地磁剩余粘滞磁与磁组构参数校正后,也表明研究区构造裂缝优势方位为北西-南东方向(表 2)。

1.2 构造裂缝类型

构造裂缝根据裂缝倾角可划分为:水平裂缝(0~5°)、低角度裂缝(5~45°)、高角度裂缝(45~85°)及垂直裂缝(85~90°)。研究区裂缝在数量上以水平裂缝和高角度构造缝为主,分别占裂缝总量的 52%和 27%,垂直构造裂缝为 14%。但近水平缝延伸厚度小,发育密集,属于局部范围水平构造挤压作用形成,而高角度裂缝和垂直裂缝延伸厚度较大,充填石英或方解石脉(图 1),属于本区主要裂缝类型。

1.3 裂缝宽度与间距

川西北地区在强烈挤压构造应力作用下,地表露头中高角度张性裂缝较为发育,产状近于垂直,缝宽 2~5 cm 不等(表 1;图 2)。其中须二段储层构造裂缝不同走向对应裂缝宽度与间距不同:裂缝走向北东向(40~60°),裂缝宽度为 0.5~1 mm,密度为 5~21 条/m,裂缝间距为 0.4~2 m,

缝面平直;裂缝走向北北西向(350~360°),宽度为 1~2 mm,密度为 5~188 条/m,裂缝间距为 0.5~2 m,多发育于中-薄层粉砂岩;裂缝走向近东西向(80~90°),裂缝密度 3~8 条/m;裂缝走向南东东向(108~130°),宽度为 2~4 mm。就裂缝宽度而言,川西北地区裂缝宽度最大,最宽可达 4 cm,是川中地区裂缝平均宽度(仅为 0.05 cm)的 80 倍。

钻井岩心裂缝统计表明(表 3),川西北九龙山地区钻井岩心裂缝线密度平均为 0.93 条/m,最高为龙 17 井(4.69 条/m),最低为龙 9 井(0.01 条/m)。裂缝发育程度整体表现自西向东依次减弱,受控于周缘龙门山与米仓山构造带演化控制。

1.4 裂缝显微特征

构造应力不仅产生了宏观构造裂缝,而且在岩石颗粒上产生一系列微观裂缝^[6]。研究区微裂缝,宽度一般小于 0.1 cm,以长石、石英颗粒中的晶间缝、节理缝为主,宽度多小于 0.03 mm,但多数连通性较好,呈网状、平行密集状分布,沿微裂缝及裂缝溶蚀形成的不规则状溶蚀孔(图 2)。

1.5 裂缝充填特征

从岩心和露头裂缝面形态实际观察结果表

表 2 川西北地区钻井岩心构造裂缝古地磁分析数据

Table 2 Palaeomagnetism analysis of structural fractures in cores in northwestern Sichuan Basin							
井号	层位	钻井深度/m	岩性	裂缝描述	样品数量/块	D 平均值/(°)	裂缝产状
龙 12-1	须二段	3 563.4~3 567.7	灰白色中粒石英砂岩	方解石充填垂直缝,缝宽 5~10 mm,缝长 2 m	5	186.1	裂缝走向 136.0°~186.1° 裂缝产状 136.0°∠85.0°
龙 13-1	须二段	3 541.9~3 547.7	灰白色细粒石英长石砂岩	无充填垂直缝和低角度缝,缝宽 0.5~2 mm	5	218.1	裂缝产状 218.1°∠90.0°
龙 7-1	须二段	3 377.3~3 384.6	浅灰色细砂岩	方解石充填垂直缝及低角度方解石充填缝	4	18.5	裂缝走向 18.5°∠40.0°

注:D 为岩心上标志线的现代地磁场粘滞剩磁偏角。

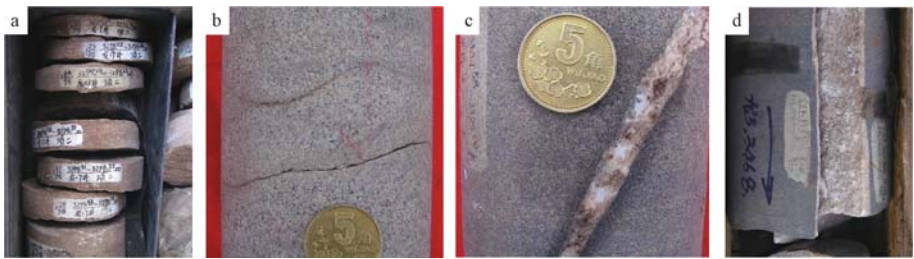


图 1 研究区不同类型构造裂缝

Fig. 1 Different types of structural fractures in the study area

a. 龙 17 井,3 298 m,水平构造缝;b. 龙 13 井,3 510.3 m,低角度无充填构造缝;c. 龙 7 井,3 384~3 393 m,石英和方解石充填高角度构造缝;d. 龙 5 井,3 468 m,方解石充填垂直构造缝

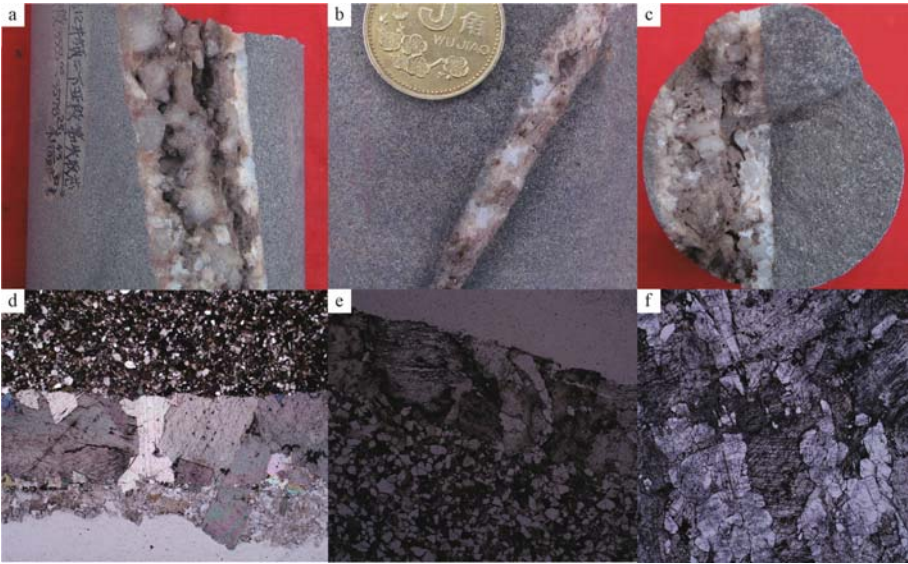


图2 九龙山构造钻井岩心宏观与微观裂缝充填物特征及期次

Fig. 2 Characteristics and stages of fillings in micro-and macro-fractures in the cores from Jiulong Mountain structure

- a. 龙12井,3 565 m,方解石早期充填,石英后期充填构造缝;b,c. 龙7井,3 384.58~3 393 m,方解石、石英充填;
d. 龙12-2井,3 581.7 m,单偏光,方解石脉;e. 龙7-1井,3 394 m,单偏光,方解石脉中的后期石英脉;
f. 龙5-2井,3 468 m,单偏光,方解石脉中的后期石英脉

表3 研究区钻井岩心裂缝分布特征统计

Table 3 Statistics of core fracture distribution in the study area

井号	岩心长度/m	水平裂缝		低角度裂缝		高角度裂缝		垂直裂缝		总裂缝	
		数量/条	密度/ (条·m ⁻¹)	数量/条	密度/ (条·m ⁻¹)	数量/条	密度/ (条·m ⁻¹)	数量/条	密度/ (条·m ⁻¹)	数量/条	密度/ (条·m ⁻¹)
龙12井	66.16	0	0	3	0.05	1	0.02	18	0.27	22	0.33
龙13井	68.54	67	0.98	6	0.09	6	0.09	2	0.03	81	1.18
龙5井	30.80	8	0.26	0	0.00	0	0.00	8	0.26	16	0.52
龙7井	99.96	0	0	4	0.04	30	0.30	0	0	34	0.34
龙9井	157.73	0	0	0	0.00	2	0.01	0	0	2	0.01
龙8井	125.55	0	0	0	0.00	3	0.02	0	0	3	0.02
龙10井	46.39	0	0	4	0.00	10	0.22	0	0	14	0.30
龙17井	8.95	36	4.02	0	0.00	5	0.56	1	0.11	42	4.69

明,研究区多数充填缝为高角度与低角度构造裂缝,充填矿物为方解石、石英等(图1,图2),充填形式为全充填或不完全充填。

水平构造缝在研究区一般无充填,少量具有方解石充填,多呈密集层状分布,厚度较小,俗称“饼状”构造裂缝^[7]。龙17井(3 298 m)均表现为明显的水平构造缝(图1)。高角度构造裂缝主要由于构造剪切应力作用形成,在川西北九龙山地区较为常见,多见方解石充填,部分为石英充填。在龙5井(3 468 m)和龙12井(3 578.4~3 580 m)均见方解石充填,缝壁平直规则,具明显擦痕,缝

长最长达3~5 m,缝宽0.2~0.5 cm(图1)。

2 裂缝发育期次分析

确定油气储层构造裂缝形成时期,对于油气运聚和成藏分析十分重要。目前,确定裂缝形成期的主要方法有:①地质构造方法,包括构造变形特征分析,裂缝的切割关系和分期配套等;②实验室方法,主要测定裂缝充填物中的矿物和包裹体的年龄^[8-10]。

本次研究以大量构造裂缝观察为基础,明确

划分不同切割关系构造裂缝,结合裂缝充填物中矿物结晶顺序与特征,对划分不同切割关系裂缝充填物进行包裹体测温和石英 ESR 测年分析,并辅助分析岩石声发射实验资料,综合反演研究区构造裂缝发育期次。

2.1 构造裂缝切割关系

对研究区构造裂缝充填矿物成分及裂缝切割关系分析表明,构造裂缝主要有 3 期矿物充填。第一期充填物主要为方解石。第二期充填物为石英。川西北部地区龙 12 井(3 565 m)岩心构造裂缝(缝宽 2.5 ~ 3.5 mm,缝长 0.63 m)中前期方解石矿物紧挨裂缝壁生长,后期石英进一步充填高角度构造缝(图 2a, d)。龙 7 井(3 384.58 ~ 3 393.00 m)岩心垂直裂缝中(缝宽 4 mm,缝长 0.21 m)也可看到方解石早期充填高角度构造缝,石英脉体晚期充填构造裂缝(图 2b, e, f)。第三期主要为较粗大的方解石,少量白云石充填张裂缝,多见切穿或沿前期充填裂缝发育,改造前期裂缝。

2.2 石英 ESR 测年

裂缝中方解石充填具有两期特征,而两期方解石充填期之间的石英样品在不同期次溶蚀和充填的作用具有 ESR 年龄差值的原理,通过石英颗粒电子自旋共振法来划分裂缝期次^[8-9]。

根据川西钻井岩心石英颗粒 ESR 实测结果与石英成因特征,可划分出燕山晚期与喜马拉雅早-中期两期裂缝期次。其中,龙 12 井石英 ESR 信号强烈,顺磁中心浓度 0.141×10^{-15} Sp/g,铈当量含量为 $0.869 \mu\text{g/g}$,测年数据显示属于燕山晚期($66 \text{ Ma} \pm 3.4 \text{ Ma}$),石英呈浅棕色自形晶为主;龙 5 井顺磁中心浓度 0.07×10^{-15} Sp/g,铈当量含量为 $0.573 \mu\text{g/g}$,ESR 实测年龄为 $24.5 \text{ Ma} \pm 2.4 \text{ Ma}$,属于喜马拉雅中期。

2.3 裂缝充填物包裹体

不同期次的裂缝充填物中含有不同均一温度的包裹体,因此可以通过测定裂缝充填物中包裹体均一温度来推测裂缝形成最晚时期^[9-10]。

本次对川西北九龙山地区不同切割期次构造裂缝充填物包裹体分别进行均一温度测试,根据实测包裹体均一温度分布及其形态、大小,综合前人古地温曲线和埋藏史恢复资料,至少划分出 3

期构造破裂期次(表 4)^[11-14],即晚印支期第一次破裂期,常见方解石充填,其裂缝充填物的包裹体为气液两相,气液比 20%,包裹体以零星分布的矩形、不规则形黑色气、液烃类包裹体为主,大小 $1.5 \mu\text{m} \times 2.5 \mu\text{m}$,均一温度主要为 $84 \sim 120 \text{ }^{\circ}\text{C}$;燕山晚期为第二次破裂期,其形成的裂缝常见有石英充填,裂缝充填物中的包裹体多为群体分布椭圆水质与烃类包裹体,气液比 5% ~ 20%,大小为 $2 \mu\text{m} \times 2.4 \mu\text{m}$,均一温度为 $72 \sim 137 \text{ }^{\circ}\text{C}$,石英 ESR 测年为 $66 \text{ Ma} \pm 3.4 \text{ Ma}$;喜马拉雅期是第三次破裂期,其形成的裂缝充填物为石英,明显切割前两期充填裂缝,该期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为主,包裹体个体较大,最大为 $5 \mu\text{m} \times 4.1 \mu\text{m}$,均一温度主要为 $153 \sim 179 \text{ }^{\circ}\text{C}$,ESR 实测年龄为 $24.5 \text{ Ma} \pm 2.4 \text{ Ma}$;另存在切割喜马拉雅期构造裂缝,充填物为方解石,少量白云石。其中方解石中包裹体为零星分布不规则黑色气态烃类包裹体与无色液态烃类包裹体,气液比为 5% ~ 20%,均一温度高达 $165 \sim 190 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据构造裂缝切割关系,结合古构造应力期次(图 3),推测该类裂缝可能形成不晚于 24.5 Ma ,属于喜马拉雅构造中-晚期。

2.4 岩石声发射试验反映裂缝形成期次

将岩石处于古应力场加载环境时,当岩石在承受应力值大于或等于岩石微裂纹形成时所受应力强度时,微裂纹就会形成凯瑟效应点^[15-16]。如果不断施加载荷力,不同期次的微裂缝就会相继扩展而产生不同凯瑟效应点。

故本次研究对川西地区六组 62 块样品进行声发射 Kaise 效应测试与岩石物理参数实验,通过声发射实验 AE 曲线上出现的凯瑟效应点的个数反演岩石所受的最小应力期次(只统计凯瑟效应出现率大于 60%的所有样品)。

根据研究区 62 块须二段砂岩岩石样品凯瑟实验结果分析,75%的样品具有 5 期凯瑟效应点,剔除现今构造运动以外,其余 4 次表明研究区须二段储层至少遭受了晚三叠世至今的 4 期构造破裂作用(图 3)。结合上述裂缝充填物次生石英、包裹体均一温度、裂缝切割关系以及区域构造演化史分析,可以将岩石 4 期凯瑟效应点划分为 4 期裂缝发育期。其中,第一期裂缝发育期相当于凯瑟效应点 4,为晚印支期构造运动的产物,古构

表 4 九龙山构造裂缝充填物中包裹体特征

Table 4 Characteristics of fluid inclusions in structural fractures in Jiulong Mountain structure

井号	裂缝发育期	层位	赋存矿物	大小/($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	气液比/%	均一温度/ $^{\circ}\text{C}$	ESR 实测年龄/Ma
龙 12-2	印支晚期	须二段	方解石	2.4×2.4	10	84.4	—
龙 7-1	印支晚期	须二段	方解石	2.1×0.8	20	86.4	沥青干扰
龙 7-1	印支晚期	须二段	方解石	2.3×0.8	20	103.9	沥青干扰
龙 9	印支晚期	须二段	方解石	—	—	105.8	—
龙 12-1	印支晚期	须二段	方解石	2.5×1.4	20	115.0	—
龙 7-1	印支晚期	须二段	方解石	1.8×1.1	20	118.5	沥青干扰
龙 12-3	燕山晚期	须二段	石英	5.7×1.0	5	72.1	66 ± 3.4
龙 12-3	燕山晚期	须二段	石英	1.8×0.5	10	72.4	66 ± 3.4
龙 12-3	燕山晚期	须二段	石英	2.6×1.0	10	81.4	66 ± 3.4
龙 12-3	燕山晚期	须二段	石英	2.8×1.7	10	89.5	66 ± 3.4
龙 12-3	燕山晚期	须二段	石英	4.0×2.0	10	92.4	66 ± 3.4
龙 12-3	燕山晚期	须二段	石英	2.4×2.0	12	96.1	66 ± 3.4
龙 12-3	燕山晚期	须二段	石英	2.6×1.0	10	98.6	66 ± 3.4
龙 12-3	燕山晚期	须二段	石英	2.4×1.4	8	102.3	66 ± 3.4
龙 5-2	燕山晚期	须二段	石英	3.3×2.0	15	104.7	沥青干扰
龙 12-3	燕山晚期	须二段	石英	3.9×0.8	8	105.2	66 ± 3.4
龙 12-3	燕山晚期	须二段	石英	2.0×1.4	13	110.7	66 ± 3.4
龙 5-1	燕山晚期	须二段	石英	1.6×1.0	13	114.5	沥青干扰
龙 5-1	燕山晚期	须二段	石英	2.6×1.1	15	120.6	沥青干扰
龙 5-2	燕山晚期	须二段	石英	1.7×0.6	10	126.8	沥青干扰
龙 5-1	燕山晚期	须二段	石英	3.3×2.3	15	129.3	沥青干扰
龙 5-2	燕山晚期	须二段	石英	1.7×0.6	18	130.2	沥青干扰
龙 5-1	燕山晚期	须二段	石英	4.1×2.0	10	136.5	沥青干扰
龙 5-2	燕山晚期	须二段	石英	1.6×1.7	20	137.9	沥青干扰
龙 5-3	喜马拉雅期	须二段	石英	3.6×3.2	10	153.3	24.5 ± 2.4
龙 5-3	喜马拉雅期	须二段	石英	5.0×1.3	10	154.8	24.5 ± 2.4
龙 5-3	喜马拉雅期	须二段	石英	2.8×2.9	15	155.3	24.5 ± 2.4
龙 5-3	喜马拉雅期	须二段	石英	4.0×2.0	13	159.7	24.5 ± 2.4
龙 5-2	喜马拉雅期	须二段	石英	3.0×2.0	15	167	沥青干扰
龙 5-2	喜马拉雅期	须二段	石英	2.7×2.3	13	170.1	沥青干扰
龙 5-3	喜马拉雅期	须二段	石英	4.0×1.9	18	179.1	24.5 ± 2.4
龙 5-3	喜马拉雅期	须二段	石英	2.9×2.6	18	—	24.5 ± 2.4
龙 5-3	喜马拉雅期	须二段	石英	4.0×2.4	15	—	24.5 ± 2.4
龙 12-1	喜马拉雅期	须二段	方解石	2.5×1.4	20	165.0	沥青干扰
龙 12-2	喜马拉雅期	须二段	方解石	14.0×7.0	5	174.5	沥青干扰
龙 12-2	喜马拉雅期	须二段	方解石	14.0×8.0	6	190.1	沥青干扰

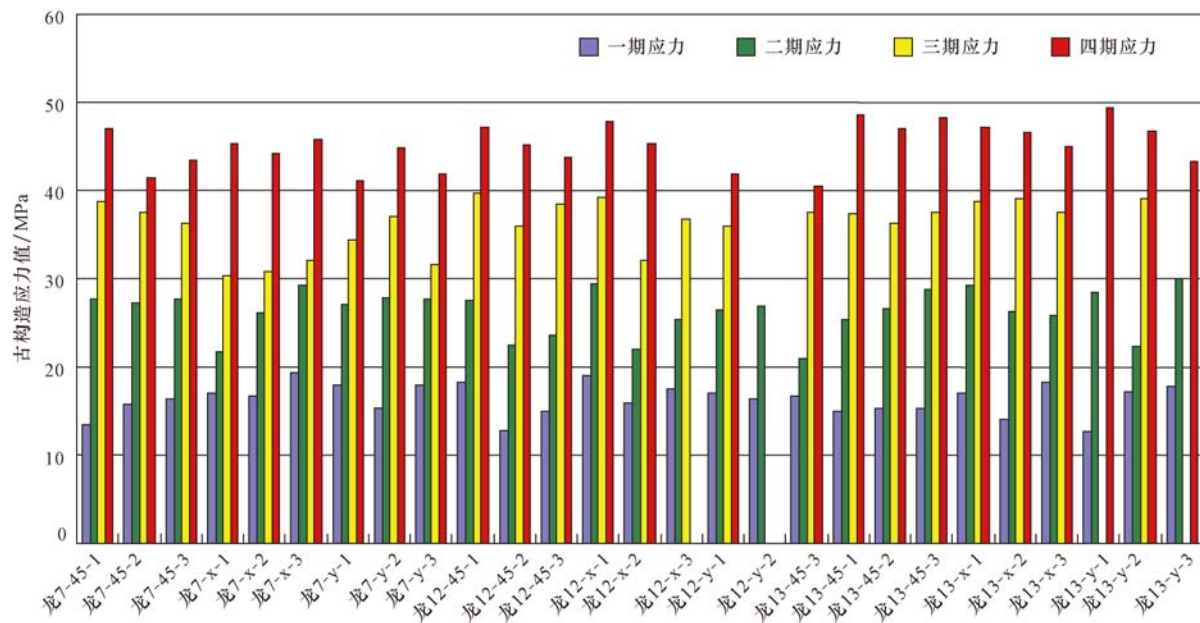


图3 九龙山构造岩石古构造应力分布直方图(凯瑟效应见遇率大于60%的有效凯瑟点)

Fig. 3 Histogram of the palaeo-structure stress distribution in Jiulong Mountain structure

造应力值为14.6 MPa;第二期裂缝发育期相当于凯瑟效应点3,为燕山晚期构造运动的产物,古构造应力值为27.4 MPa;第三期裂缝发育期相当于凯瑟效应点2,为喜马拉雅早-中期构造运动的产物,古构造应力值为37.7 MPa;第四期裂缝发育期相当于凯瑟效应点1,为喜马拉雅晚期构造运动的产物,古构造应力值46.9 MPa。

3 裂缝发育的主控因素

前人对于构造应力的大小决定裂缝的发育程度的结论已经有很多^[16-19],构造应力强度大容易导致岩层弯曲率较大,容易形成裂缝的结论在本次研究中也得到验证。川西北地区晚三叠世以

来,不同构造期次的裂缝具有明显的不均一性,其分布规律主要受到古构造应力大小和储层岩石力学特征的影响,同时也跟裂缝发育段的岩性特征和岩层厚度有关。

3.1 岩石力学性质

研究区岩石力学物理参数与孔渗实测数据表明,岩石孔隙度与岩石抗压强度、风干密度、弹性模量具有明显的负相关性(图4)。岩石孔隙度越小,风干密度越高,岩石抗压强度越高,弹性模量越高,说明研究区上三叠统砂岩孔隙度越小,岩石越坚硬时,岩石抗压强度越高,越不易形成裂缝。因此,假设外界条件相同的情况下,高孔隙度砂岩更易形成裂缝。

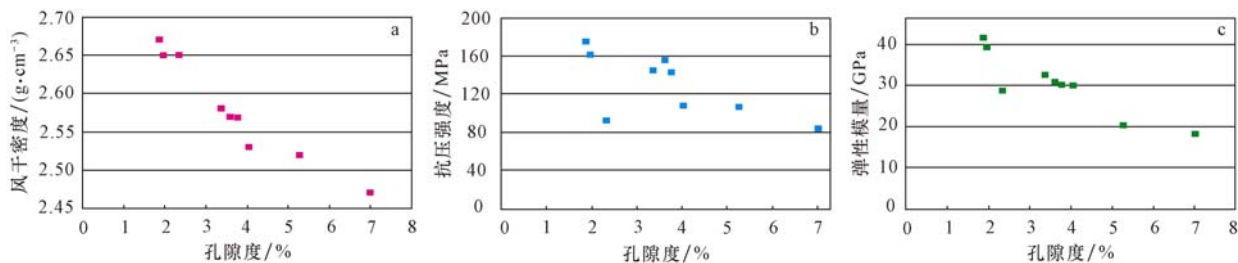


图4 九龙山构造岩石力学参数与孔隙度关系

Fig. 4 Relation between petrophysical parameters and porosity in Jiulong Mountain structure

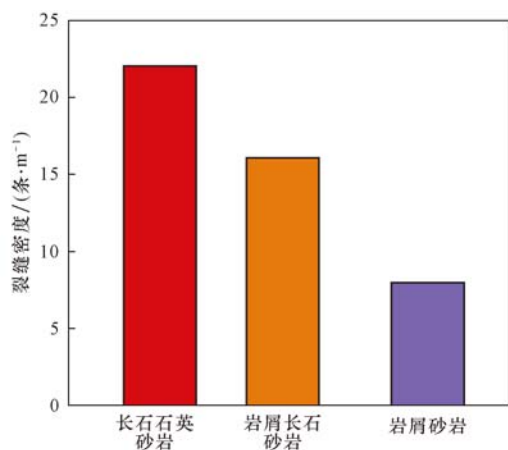


图5 不同岩性中的裂缝密度

Fig. 5 Fracture density in different lithologies

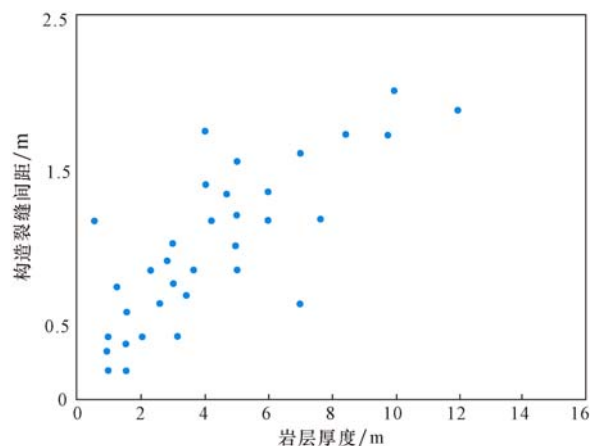


图6 川西北地区岩层厚度与裂缝间距关系

Fig. 6 Relation between the fracture spacing and layer thickness in northwestern Sichuan Basin

3.2 岩性

研究区须二段岩层岩性包括有细-中粒长石英砂岩、岩屑长石砂岩、岩屑砂岩以及少量砾岩与云岩。不同岩性与不同粒级的岩石样品抗压强度存在明显差异,导致裂缝的发育程度^[20-21]。广元须家河组剖面构造裂缝统计统计结果显示长石英砂岩裂缝密度为22条/m,其次为岩屑长石砂岩16条/m,岩屑砂岩裂缝密度最低为8条/m,表明由于不同矿物成分具有不同的抗压强度,造成岩石矿物成分影响裂缝发育的程度(图5)。同样岩石粒级也影响裂缝的形成,根据岩石力学物理实验结果显示,随着岩石粒级的增加,岩石抗压强度总体呈现增加的趋势,表明岩石粒级较低,越容易形成裂缝。

3.3 岩层厚度

前人对裂缝间距与岩层厚度之间存在线性关系做过一些研究^[22-27]。本次研究通过露头区和岩心裂缝统计,发现研究区构造裂缝多发育于薄层砂岩,厚层块状砂岩裂缝相对发育较差,砂岩越厚,裂缝(井下)和节理(野外)越不发育。裂缝的发育分布在岩层内,与岩层相交,截止于单套岩性界面上。在一定层厚范围内,裂缝的平均间距与具有裂隙的岩层厚度呈现较好正相关性(图6),即随着岩层厚度增大,裂缝间距相应增大,裂缝密度减小。

4 结论

1) 研究区构造裂缝发育程度整体表现为自

西向东依次减弱,明显受控于周缘龙门山与米仓山构造带挤压控制。构造裂缝以高角度、垂直构造裂缝延伸厚度较大,发育较好。裂缝方向主要为北东向、北北西向、近东西向和南东东向,其中北西-南东方向为优势方向。

2) 将研究区构造裂缝至少划分为4期,第一期构造裂缝形成于晚印支期,方解石呈紧挨裂缝壁充填裂缝,包裹体均一温度为84~120℃;第二期为晚燕山期,石英为主要充填物,均一温度为72~137℃;喜马拉雅早-中期是第三次破裂期,其裂缝充填石英,明显切割前两期充填裂缝,均一温度为153~179℃;喜马拉雅晚期是第四次破裂期,其形成的裂缝充填物主要为较粗大的方解石,少量白云石充填张裂缝,多见切穿或沿前期充填裂缝发育,改造前期裂缝,均一温度高达165~190℃。

3) 研究区构造裂缝发育程度不仅与构造应力大小、岩石自身力学性质有关,而且还受到岩性特征、岩层厚度的影响。其中高孔隙度、细粒级、薄层的岩屑砂岩是形成构造裂缝有利条件。

参 考 文 献

- [1] 郭正吾,邓康玲,韩永辉,等. 四川盆地形成与演化[M]. 北京:地质出版社,1996:15-89.
Guo Zhengwu, Deng Kangling, Han Yonghui, et al. The formation and development of Sichuan Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 15-89.
- [2] 翟光明. 中国石油地质志:四川石油地质志[M]. 北京:石油工业出版社,1997:88-111.

- Zhai Guangming. Petroleum geology of china: petroleum geology of sichuan province [M]. Beijing: Petroleum Industry Press. 1997: 88–111.
- [3] 四川省地质矿产局. 四川区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1991: 60–120.
- Sichuan geological mineral bureau. Regional geology in Sichuan province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991: 60–120.
- [4] 国家能源局. SY/T6832–2011 致密砂岩气地质评价方法 [S]//中华人民共和国石油天然气行业标准. 北京: 石油工业出版社. 2011: 1–5.
- National Energy Administration. SY/T6832-2011 geological evaluating methods for tight sandstone gas [S]//Petroleum and natural gas industry standard of the Peoples Republic of China. Beijing: Petroleum Industry Press. 2011: 1–5.
- [5] 戴朝成, 郑荣才, 朱如凯, 等. 四川类前陆盆地中西部须家河组储层特征 [J]. 天然气地球科学, 2011, 22(1): 47–55.
- Dai Chaoheng, Zheng Rongcai, Zhu Rukai, et al. Reservoir characteristics of Xujiahe Formation in Central West Sichuan Analogous Foreland Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(1): 47–55.
- [6] 廖群山, 胡华, 林建平, 等. 四川盆地川中侏罗系致密储层石油勘探前景 [J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(6): 85–822.
- Liao Qunshan, Hu Hua, Lin Jianping, et al. Petroleum exploration prospect of the Jurassic tight reservoirs in central Sicuan Basin [J]. Oil & Gas Geology. 2011, 32(6): 815–822.
- [7] 叶泰然, 庸建明, 文雪康, 等. 三维三分量地震资料在川西深层致密砂岩气藏预测中的应用 [J]. 石油物探, 2011 50(6): 558–564.
- Ye Tairan, Tang Jianming, Wen Xuekang, et al. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2011 50(6): 558–564.
- [8] 郑荣才. ESR 测年在石油地质研究中的应用 [J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(2): 235–240.
- Zheng Rongcai. Application of ESR dating to petroleum geology [J]. Oil & Gas Geology, 1998, 19(3): 235–240.
- [9] 任丽华, 林承焰. 构造裂缝发育期次划分方法研究与应用—以海拉尔盆地布达特群为例 [J]. 沉积学报, 2007, 25(2): 253–260.
- Ren Lihua, Lin Chengyan. Classification methods for development period of fractures and its application: a case study from Budate Group of Hailaer Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(2): 253–260.
- [10] 赖生华, 余谦, 周文, 等. 楚雄盆地北部上三叠统—侏罗系裂缝发育期次 [J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(5): 25–29.
- Lai Shenghua, Yu Qian, Zhou Wen, et al. Development periods of fractures in the Late Triassic-Jurassic in the north Chuxiong Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, 31(5): 25–29.
- [11] 王正和, 郭彤楼, 谭钦银, 等. 四川盆地东北部长兴组—飞仙关组各沉积相带储层特征 [J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(1): 56–63.
- Wang Zhenghe, Guo Tonglou, Tan Qinyin, et al. Reservoir characteristics of different sedimentary facies in the Changxing and Feixianguan Formations, northeast of the Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(1): 75–82.
- [12] 罗文军, 彭军, 杜敬安, 等. 川西坳陷须家河组二段致密砂岩储层成岩作用与孔隙演化 [J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(2): 287–295.
- Luo Wenjun, Peng Jun, Du Jingan, et al. Diagenesis and porosity evolution of tight sand reservoirs in the 2nd member of Xujiahe Formation, western Sichuan Depression: an example from Dayi region [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(2): 287–295.
- [13] 王勇, 施泽进, 刘亚伟, 等. 鄂西渝东地区石柱复向斜志留系小河坝组致密砂岩成岩作用 [J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(1): 75–82.
- Wang Yong, Shi Zejin, Liu Yawei, et al. Diagenesis of tight sandstone in the Silurian Xiaohaba Formation of the Shizhu Synclinalium, western Hubei eastern Chongqing Ara [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(1): 75–82.
- [14] 伍大茂, 吴乃琴, 郜建军. 四川盆地古地温研究及其地质意义 [J]. 石油学报, 1998, 19(1): 18–23.
- Wu Damao, Wu Nailiang, Gao Jianjun. Paleogeot emperature in Sichuan Basin and its geological significance [J]. Acta Petrolei Sinica, 1998, 19(1): 18–23.
- [15] 郑荣才. 储层裂缝研究的新方法—声发射试验 [J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(3): 186–189.
- Zheng Rongcai. A New Method of studying reservoir fractures: acoustic emission experiment [J]. Oil & Gas Geology, 1998, 19(3): 186–189.
- [16] 张大伦. 声发射技术在国外岩石工程中的应用 [J]. 岩石力学与工程学报, 1985, 4(1): 77–83.
- Zhang Dalun. Applications of acoustic emission techniques to geotechnical engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1985, 4(1): 77–83.
- [17] 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.
- Zhou Jinsong, Tong Xiaolan, Feng Yonghong. Development characteristics and control factors for reservoir fracture in Chaiwopu anticline of Junggar Basin [J]. Acta Petroli Sinica, 2006, 27(3): 53–56.
- [18] 周新桂, 张林炎, 范昆. 吴旗探区长 6¹ 储层构造裂缝特征及分布规律 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2008, 38(1): 43–49.
- Zhou Xingui, Zhang Linyan, Fan Kun. Characteristics and distribution of tectonic fractures in Chang 61 low-permeable reservoir in Wuqi Area in Ordos Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2008, 38(1): 43–49.
- [19] 周新桂, 张林炎, 屈雪峰, 等. 沿河湾探区低渗透储层构造裂缝特征及分布规律定量预测 [J]. 石油学报, 2009, 30(2): 195–200.

- Zhou Xingui, Zhang Linyan, Qu Xuefeng, et al. Characteristics and quantitative prediction of distribution laws of tectonic fractures of low-permeability reservoirs in Yanhewan area[J]. Acta Petrol Sinica, 2009, 30(2): 195–200.
- [20] 张月华. 川东地区褶皱和裂缝发育期次[J]. 四川地质学报, 1990, 10(1): 7–12.
- Zhang Yuehua. Development period of fractures and thrust of the eastern Sichuan[J]. Acta Geologica Sichuan, 1990, 10(1): 7–12.
- [21] 曹宏, 宋新民, 张爱卿. 冲积扇砾岩油藏裂缝预测新技术[J]. 石油学报, 2000, 21(6): 117–121.
- Cao Hong, Song Xinmin, Zhang Aiqing. A new technique to Predict Fractures of alluvial fan conglomerate reservoir acta[J]. Acta Petrol Sinica, 2000, 21(6): 117–121.
- [22] 王光奇, 岳云福, 漆家福, 等. 黄骅坳陷白唐马地区下第三系深层碎屑岩储层裂缝分析[J]. 中国海上油气地质, 2002, 16(6): 384–388.
- Wang Guangqi, Yue Yunfu, Qi Jiafu, et al. A fracture analysis of paleogene deep clastic reservoir rock in battangma area, Huanghua depression[J]. China Offshore Oil and Gas, 2002, 16(6): 384–388.
- [23] 黄保纲, 汪利兵, 赵春明, 等. JZS 油田潜山裂缝储层形成机制及分布预测[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(5): 710–717.
- Huang Baogang, Wang Libing, Zhao Chunming, et al. Formation mechanism and distribution of fractured buried hill reservoir in JZS oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(5): 710–717.
- [24] 涂彬, 丁祖鹏, 刘月田. 火烧山油田 H3 层裂缝发育特征与剩余油分布关系[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(2): 229–235.
- Tu Bin, Ding Zupeng, Liu Yuetian. Correlation of remaining oil distribution and fracture development in H-3 reservoir of Huoshaoshan oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(2): 229–235.
- [25] Qin Huang, Angelier J. Fracture spacing and its relation to bed thickness[J]. Tectonophysics, 1989, 126(4): 355–362.
- [26] 何发岐, 朱彤. 陆相岩页岩气突破和建产的有利目标——以川盆地地下侏罗统为例[J]. 石油实验地质, 2012, 34(3): 246–251.
- He Faqi, Zhu Tong. Favorable targets of breakthrough and buile-up of shale gasin continental facies in Lower Jurassic, Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2012, 34(3): 246–251.
- [27] Rives T, Razack M. Joint spacing: analogue and numerical simulations[J]. Journal of Structural Geology, 1992, 14(8/9): 925–937.

(编辑 张亚雄)

(上接第 510 页)

- [12] 陈伟, 李鹏, 彭承文, 等. 大庆油田肇 35 区块葡萄花油层储层特征及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 802–809.
- Chen Wei, Li Peng, Peng Chengwen, et al. Characteristics and controlling factors of pore features in the Putaohua oil reservoir in the Block Zhao-35, Daqing oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 802–809.
- [13] 孙海宁, 万念明, 徐涛玉. 渤海湾盆地东营凹陷广利地区沙四上亚段物源体系及其对沉积的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(5): 583–593.
- Sun Haining, Wan Nianming, Xu Taoyu. Provenance systems and their control on the sedimentation of the upper Es⁴ in Guangli area of the Dongying Sag, the Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(5): 583–593.
- [14] 张顺, 崔坤宁, 张晨晨, 等. 松辽盆地泉头组三、四段河流相储层岩性油藏控制因素及分布规律[J]. 石油与天然气地质, 2011, 31(3): 411–419, 429.
- Zhang Shun, Cui Kunning, Zhang Chencheng, et al. Controlling factors and distribution patterns of lithologic pools in the fluvial facies of the 3rd and 4th members of the Quantou Formation in the Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 31(3): 411–419, 429.
- [15] 刘志刚, 周心怀, 李建平, 等. 渤海海域石臼坨凸起东段 36–3 构造古近系沙二段储集层特征及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(6): 832–838.
- Liu Zhigang, Zhou Xinhui, Li Jianping, et al. Reservoir characteristics and controlling factors of the Paleogene Sha-2 member in 36-3 structure, Eastern Shijutuo uplift, Bohai Sea[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(6): 832–838.

(编辑 李 军)