

刘国平, 曾联波, 雷茂盛, 等. 徐家围子断陷火山岩储层裂缝发育特征及主控因素[J]. 中国地质, 2016, 43(1): 329-337.

Liu Guoping, Zeng Lianbo, Lei Maosheng, et al. Fracture development characteristics and main controlling factors of the volcanic reservoir in Xujiaweizi fault depression[J]. *Geology in China*, 2016, 43(1): 329-337(in Chinese with English abstract).

## 徐家围子断陷火山岩储层裂缝发育特征及主控因素

刘国平<sup>1</sup> 曾联波<sup>1,2</sup> 雷茂盛<sup>3</sup> 祖克威<sup>1</sup> 王 菲<sup>1</sup> 刘 奇<sup>1</sup> 李文芳<sup>4</sup>

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 昌平 102249; 2. 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 昌平 102249;  
3. 大庆油田有限责任公司勘探分公司, 黑龙江 大庆 163712; 4. 长庆油田勘探开发研究院, 陕西 西安 710018)

**摘要:**徐家围子断陷火山岩储集物性明显受裂缝发育程度的影响。根据相似露头区野外调查、岩心观测以及铸体薄片和成像测井分析等资料,并结合应力场数值模拟技术,对该区火山岩储层裂缝的类型、走向、倾角、长度、密度、充填性以及影响裂缝发育程度的主控因素进行了分析。结果表明,研究区火山岩裂缝主要以构造剪切裂缝为主,其次为成岩裂缝;主要发育近东西向、近南北向、近北东向和近北西向 4 组裂缝;裂缝多为有效裂缝,很少被充填;以高角度和斜交裂缝为主,长度和密度变化较大。影响该火山岩储层裂缝发育程度的主控因素包括古构造应力、岩性、火山机构和断层等,其中古构造应力的高值区与裂缝较发育部位具有良好的匹配关系;在多种火山岩中,粗面岩、集块岩和流纹岩裂缝较发育;裂缝多发育在火山口和近火山口相组;在应力扰动作用明显的断层上盘裂缝较发育,且随着与断层距离的增大,裂缝发育程度不断降低。

**关键词:**火山岩储层;裂缝特征;主控因素;徐家围子断陷

中图分类号:P542.3<sup>6</sup> 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2016)01-0329-09

## Fracture development characteristics and main controlling factors of the volcanic reservoir in Xujiaweizi fault depression

LIU Guo-ping<sup>1</sup>, ZENG Lian-bo<sup>1,2</sup>, LEI Mao-sheng<sup>3</sup>, ZU Ke-wei<sup>1</sup>,

WANG Fei<sup>1</sup>, LIU Qi<sup>1</sup>, Li Wen-fang<sup>4</sup>

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Research Institute of Exploration, Daqing Oilfield, Daqing, 163712 Heilongjiang, China; 4. Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield, Xi'an 710018, Shaanxi, China)

**Abstract:** Reservoir physical properties of volcanic rocks in Xujiaweizi fault depression are influenced obviously by the fracture

收稿日期:2014-11-17; 改回日期:2015-01-28

基金项目: 中国石油大庆油田有限责任公司重点研究课题(DQYT02150032012JS1161)资助。

作者简介: 刘国平,男,1989年生,硕士生,地质工程专业,主要从事储层裂缝形成、分布及预测方面的研究工作;E-mail: liugp11228@sina.com。

通讯作者: 曾联波,男,1967年生,长江学者特聘教授,博士生导师,长期从事储层裂缝形成、分布和预测技术,应力场分析与应用,以及低/特低渗透油田开发地质等相关方面的科研和教学工作;E-mail: lbzeng@sina.com。

developing extent. According to the survey of similar outcrops, the core observation, casting thin slice and imaging logging analysis data, in combination with stress field numerical simulation technology, the authors analyzed fracture types, trends, dip angles, lengths, densities, fillings and the factors influencing the fracture development of the volcanic reservoir. The result shows that fractures in the study area are mainly tectonic shear fractures, followed by diagenetic fractures. Four nearly WE-, NS-, NE- and NW-trending fracture groups are developed, mainly high angle fractures and inclined fractures, and the lengths and densities of these fractures change significantly. The main factors influencing the development of the volcanic rock fractures include ancient tectonic stress, lithology, volcanic edifice and fault. Therefore, the high value area of the ancient tectonic stress has good relationship with fracture developed area. In a variety of volcanic rocks, fractures in trachyte, agglomerate and rhyolite are relatively well developed. Fractures are mainly developed in the facies of volcanic crater and near-crater. Fractures are also developed on the upper wall of the fault with obvious stress disturbance and, with the increase of the distance from the fault, the extent of the fracture development decreases.

**Key words:** volcanic reservoir; fracture characteristics; main controlling factors; Xujiaweizi fault depression

**About the first author:** LIU Guo-ping, male, born in 1989, master candidate, currently engages in the study of the formation, distribution and prediction of reservoir fracture. E-mail: liugply228@sina.com.

**About the corresponding author:** ZENG Lian-bo, male, born in 1967, supervisor of doctor candidates, engages in study and teaching of tectonic stress fields, natural fracture systems, and low-permeability reservoir characterization; E-mail: lbzeng@sina.com.

**Fund support:** Supported by Key Research Topics of Daqing Oilfield Limited Corporation, CNPC (No.DQYT02150032012JS1161).

## 1 引 言

大量的油气勘探实践表明,火山岩储层是大庆徐家围子断陷重要的储层类型。这类储层原生孔隙不易发育且连通性较差,因此裂缝便成为其重要的储集空间和主要的渗流通道,不仅控制了优质储层的展布,而且控制了油气的富集规律和单井产能<sup>[1-2]</sup>。近年来,许多学者对渤海湾盆地、黄骅坳陷、塔里木盆地、准噶尔盆地等典型火山岩储层进行了研究,充分证实了裂缝的分布规律对指导火山岩油气勘探和开发具有重要意义。

大庆徐家围子断陷一直是地质工作者们潜心研究的热点地区,目前已发现了升平—汪家屯、升平—兴城、昌德、昌德东等油气藏,而深层的天然气仍具有很好的勘探开发前景。徐家围子断陷为松辽盆地北部深层勘探开发程度最高的断陷,目前已完成深探井160多口,提交天然气探明储量二千多亿方。综合地质研究表明,该地区的储层岩性主要为火山岩,而裂缝是改善火山岩储集性能的关键因素,对于改善储层渗流能力和增加储集空间具有重大作用<sup>[3-8]</sup>。阐明裂缝的发育特征及主控因素,对深层油气的勘探与开发具有重要的指导作用。

## 2 地质背景

松辽盆地是在前中生代基底之上发育起来的

晚中生代裂陷盆地。该盆地很重要的一个地质特征就是具有盆地“二元地层建造”<sup>[9]</sup>,即火山岩与沉积岩共成一个盆地,组成盆地完整的“火”、“水”沉积充填序列<sup>[10]</sup>。徐家围子断陷中生代火山岩是中、晚侏罗世—白垩世期间火山喷发作用形成的,为松辽盆地形成早期裂谷作用的产物。徐家围子断陷是松辽盆地内最大的中生代陆相火山—沉积盆地,并且是其中规模最大的含气断陷之一。在构造位置上,断陷横跨两个深层一级构造单元即中央断陷区和东南断陷区,西邻中央古隆起,东接朝阳沟凸起,北部以鞍部与林甸断陷相沟通,南与王府断陷相连<sup>[11]</sup>。断陷为近南北向展布,南北长135 km,中部最宽80 km,面积约为5300 km<sup>2</sup>,是一个南北狭窄、埋深较浅,中间宽、埋深大,由两条断裂控制的复式箕状地堑<sup>[12]</sup>(图1)。

徐家围子断陷的构造演化可分为5个阶段,初始断陷期(火石岭期)、强烈断陷期(沙河子期)、挤压反转期(沙河子期末)、断拗转化期(营城期)和拗陷期(登娄库期)。深层由下而上依次发育火石岭组、沙河子组、营城组(营二段发生了区域缺失)、登娄库组、泉头组地层,其中有三套火山岩气藏储集层,即营城组一段、营城组三段和火石岭组。火山岩在断陷时期的地层中发育有溢流相、爆发相、火山通道相等,而断陷内碎屑岩的沉积相类型包括河流相、冲积扇相、三角洲相、湖泊相等。火石岭组的



表1 徐家围子断陷火山岩储层裂缝成因类型

Table 1 Fracture genetic types of volcanic reservoir in Xujiaweizi fault depression

裂缝类型		成因机理	
天然裂缝	构造剪切裂缝	构造应力作用形成的剪裂缝	
	成岩裂缝	冷凝收缩裂缝	岩石在冷却过程中发生热收缩而形成的裂缝
		溶蚀裂缝	溶蚀作用形成的裂缝
		风化裂缝	风化作用形成的裂缝
隐爆裂缝	在火山通道伴生隐爆角砾岩形成而产生的裂缝		
钻井伴生裂缝	钻井诱导裂缝	钻井过程中钻具诱导形成的羽列状张裂缝	
	应力释放裂缝	钻井过程中应力释放形成的直立裂缝	

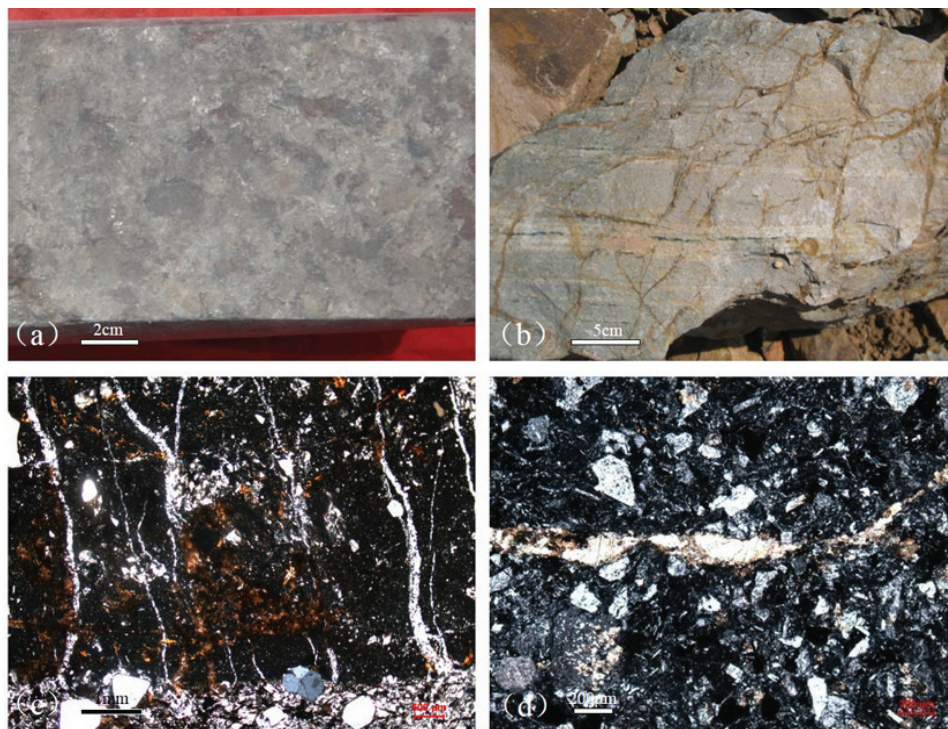


图2 徐家围子断陷火山岩储层主要裂缝类型

a—构造裂缝, 徐深9井, 3763.45 m; b—五台大屯收缩裂缝; c—角砾岩, 隐爆裂缝, 徐深902井, 3754.13 m;  
d—凝灰岩, 溶蚀裂缝, 肇深15井, 4202.86 m

Fig. 2 Main fracture types of volcanic reservoir in Xujiaweizi fault depression

a—Structural fractures, Well Xushen 9, 3763.45 m; b—Shrinkage fractures in Wutai Datun; c—Breccia, cryptoexplosive fractures, Well Xushen902, 3754.13m; d—Tuff corrosion fractures, Well Zhaoshen15, 4202.86m

### 3.4 裂缝充填特征

裂缝的充填程度反映了裂缝的有效性,其充填程度可以分为局部充填、半充填和全充填,反映了裂缝有效性依次变差<sup>[19-21]</sup>。从岩心、露头裂缝面形态实际观察以及成像测井资料分析结果表明,研究区裂缝多为无充填的有效裂缝,只有少量构造缝被

方解石、石英等部分充填或全充填,并且充填裂缝主要分布在营一段和营三段,火石岭组裂缝没有发现被充填。全井壁微电阻率成像测井FMI显示:高导缝深色(低电阻)正弦曲线,充填泥浆滤液或低阻矿物造成,为有效裂缝;高阻缝浅色或白色(相对高阻)正弦曲线,裂缝中充填的如方解石、石英等高阻

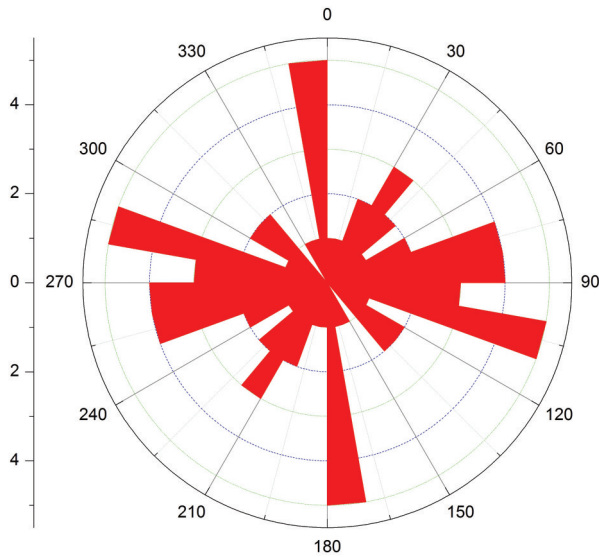


图3 徐深212井营三段裂缝走向玫瑰花图

Fig.3 Fracture strike rose diagram of the third number of Yingcheng formation of Well Xushen 212

矿物引起,为无效裂缝,发育极不规则;微裂缝对应着成岩裂缝和次生裂缝中的成岩裂缝(包括缝合线、冷凝收缩缝、隐爆裂缝、溶蚀裂缝、风化裂缝等),黑色呈树枝状且极不规则,还会有一些表现为水平层状,一般不具有正弦波状特征(图6)。统计分析可得,构造充填裂缝的发育特征总体较复杂,但营一段、营三段构造裂缝充填方向主要为北北东向,倾角主要分布在 $50^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 。根据充填裂缝的统计结果,计算了单井充填裂缝的平均线密度,分析表明大部分充填裂缝密度小于0.5条/m,其中仅营一段X601井和营三段D3井附近充填裂缝密度较大,可达2条/m。

## 4 裂缝形成与分布的主控因素

综合储层特征分析,徐家围子断陷中生代火山岩储层是中、晚侏罗世—白垩世期间火山喷发作用形成的,为松辽盆地形成早期裂谷作用产物。形成时间较早,后期经历了复杂的地质作用,裂缝类型多样,非均质性强。结合井点裂缝的发育情况以及相关分析,认为徐家围子断陷火山岩储层裂缝发育程度主要受古构造应力、岩性、火山机构和断层的控制<sup>[22-23]</sup>。

### 4.1 古构造应力对裂缝发育的影响

岩石中裂缝的形成与所受到的应力状态密切

相关,古构造应力对裂缝发育的影响是指:通常地层中天然裂缝主要在古应力下形成,并且应力值越高,裂缝越发育。而在古构造应力中,最大剪应力的大小是影响构造剪切裂缝发育程度的关键因素。根据对徐家围子断陷营城组火山岩构造演化的分析,认为其裂缝的形成和演化是在晚白垩世早期的青山口组沉积后<sup>[24]</sup>。为了定量地反映研究区火山岩储层裂缝发育程度与构造应力场的关系,在建立地质模型、力学模型和数学模型的基础上,在北东东向施加水平最大主应力38 MPa,对侧施加南西西向的约束,在北北西向施加最小主应力7 MPa,对侧施加南南东向约束,对研究区营一段晚白垩世古构造应力场进行模拟,并利用最大剪应力大小分布与研究区构造剪切裂缝的发育程度进行比较。模拟结果表明,研究区营一段火山岩在晚白垩世最大剪应力分布特征同构造裂缝的发育强度基本一致,在古应力分布的高值区裂缝密度也较大,并且有良好的对应关系,充分证明研究区火山岩储层裂缝的发育程度受古构造应力的影响。

### 4.2 岩性对裂缝发育的影响

岩性对储层裂缝发育程度的影响主要表现在岩石的性质决定了徐家围子断陷火山岩储层裂缝的类型及发育程度。根据测井资料解释、岩心和薄片资料的统计观察,该区火山岩发育的类型主要包括流纹岩、凝灰岩、火山角砾岩、集块岩、安山岩、英安岩和粗面岩等。岩心观察中发现断陷期地层不同岩性裂缝的发育程度有明显的差异,裂缝发育密度受岩性控制表现在:粗面岩、集块岩和流纹岩中裂缝密度较大,分别为1.28条/m、1.33条/m和0.93条/m,而在安山玄武岩和玄武安山岩裂缝密度较小;统计不同岩性中裂缝频率分布发现,在流纹岩中裂缝发育最多,占到42%以上,在安山岩、粗面岩、火山角砾岩、凝灰岩以及玄武岩中裂缝发育频率都达到10%左右(图7)。另外,不同岩性中构造裂缝和成岩裂缝发育差异较大,粗面岩和流纹岩中构造裂缝较为发育,而集块岩中成岩裂缝较发育。同时,野外露头观测表明,不同的岩性中,裂缝发育的优势方位也有所不同。

### 4.3 火山机构对裂缝发育的影响

徐家围子断陷的火山岩具有多期、多旋回、多喷发中心、大面积叠合连片分布的特点,根据火山

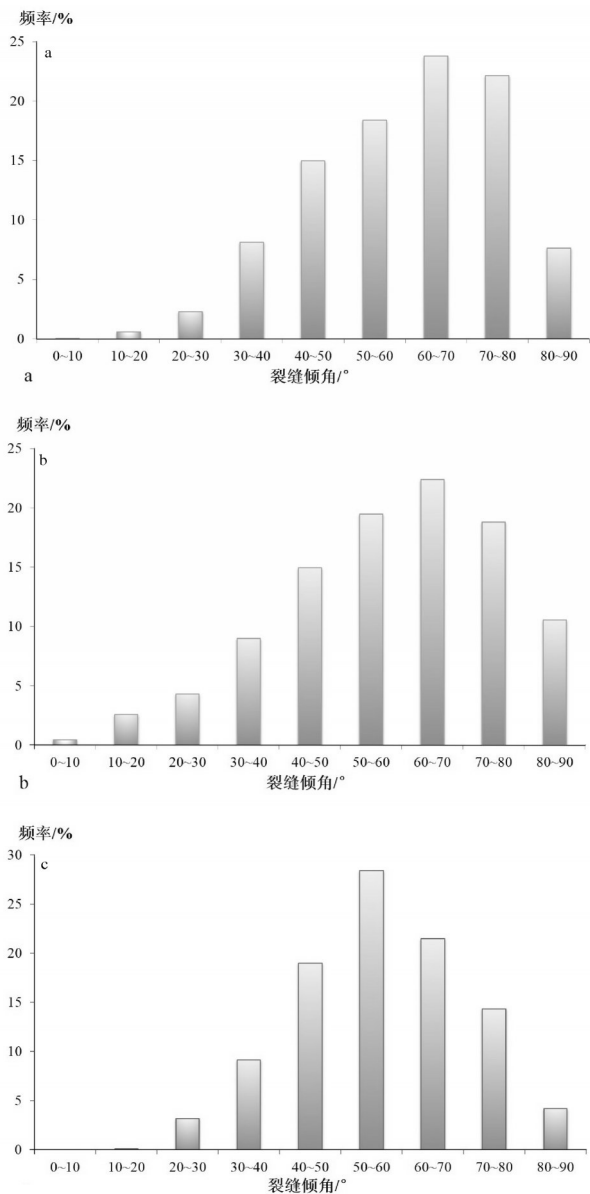


图4 徐家围子断陷火山岩储层裂缝倾角分布直方图  
a—营一段裂缝倾角分布直方图;b—营三段裂缝倾角分布直方图;  
c—火石岭组裂缝倾角分布直方图

Fig. 4 Fracture dip angle distribution histograms of volcanic reservoir in Xujiaweizi fault depression  
a—Fracture dip angle distribution histograms of the first member of Yingcheng Formation;b—Fracture dip angle distribution histograms of the third member of Yingcheng Formation;c—Fracture dip angle distribution histograms of Huoshiling Formation

岩分布及与火山口的相对位置,研究区的火山岩储层岩相大致可以分为三个相组:火山口和近火山口相组(主要为火山通道相和侵出相)、近源相组(喷溢相)和远源相组(爆发相)<sup>[25-26]</sup>。统计研究区裂缝

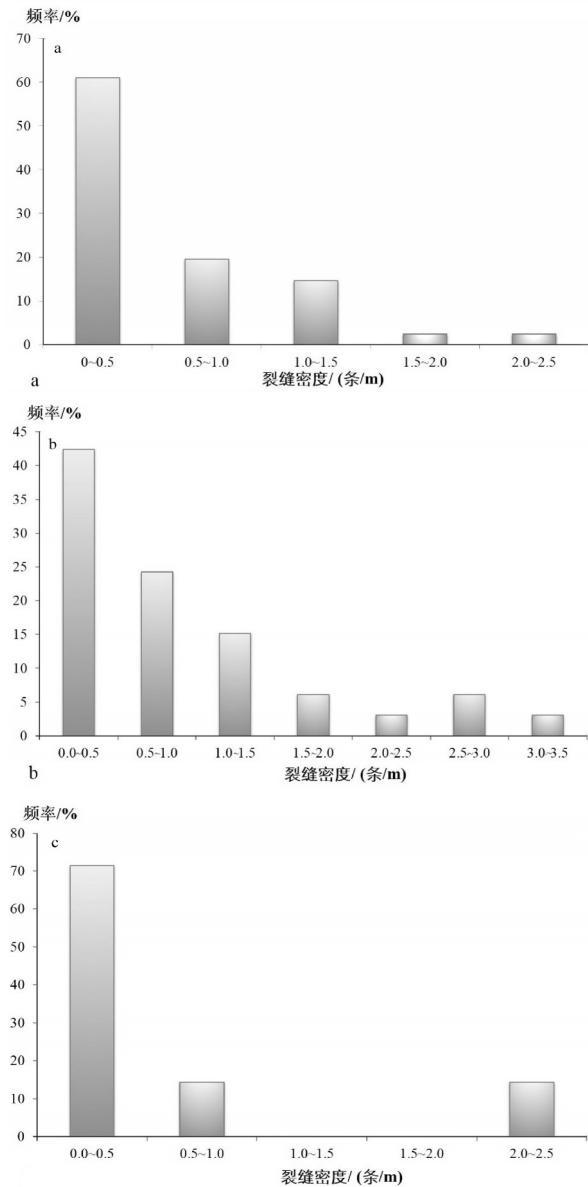


图5 徐家围子断陷火山岩储层裂缝密度分布直方图  
a—营一段裂缝密度分布直方图;b—营三段裂缝密度分布直方图;  
c—火石岭组裂缝密度分布直方图

Fig. 5 Fracture density distribution histograms of volcanic reservoir in Xujiaweizi fault depression  
a—Fracture density frequency distribution histograms of the first member of Yingcheng Formation;b—Fracture density frequency distribution histograms of the third member of Yingcheng Formation;c—Fracture density frequency distribution histograms of Huoshiling Formation

与火山机构相带之间的关系(图8),可以发现:断陷期地层总体裂缝发育受火山机构控制,火山口和近火山口相组岩石脆性较强,往往成致密块状,裂缝较为发育,裂缝密度达到0.62条/m;而近源相组和

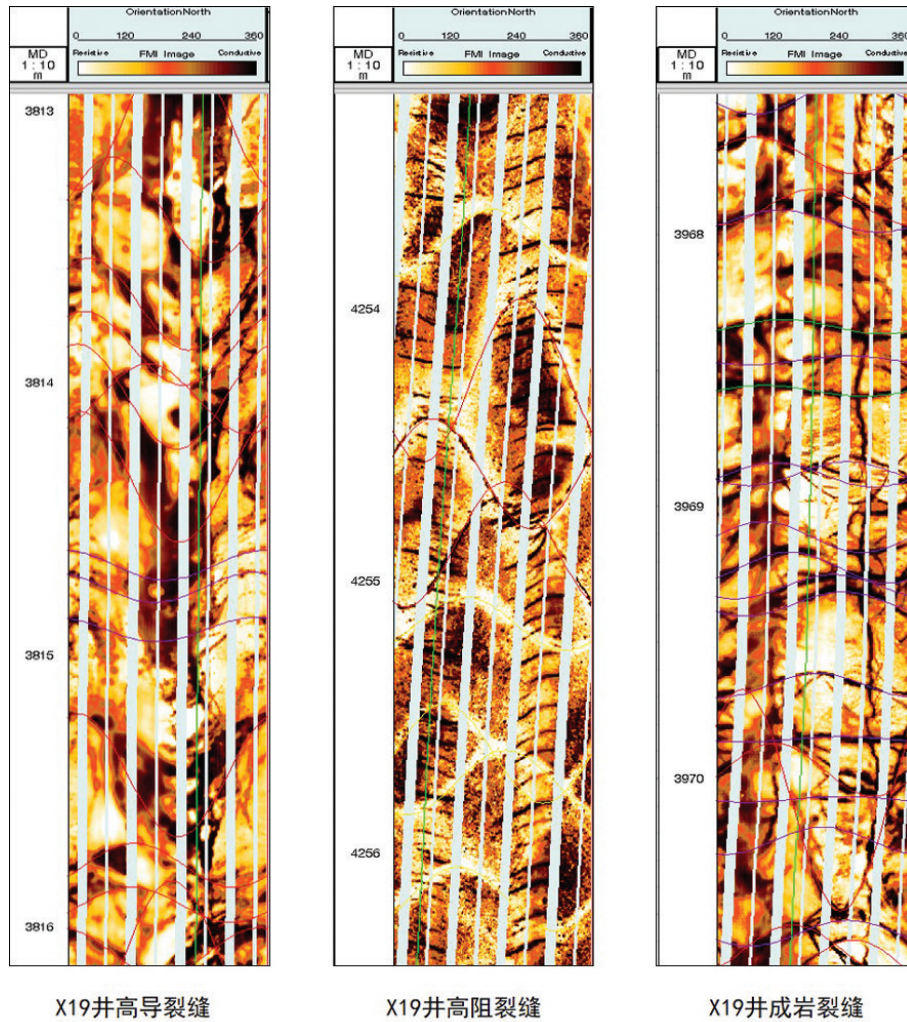


图6 X19井成像测井识别火山岩裂缝充填类型图

Fig.6 Fracture filling type identified by imaging logging in Xujiaweizi fault depression

远源相组岩石脆性弱,裂缝发育相对较差,裂缝密度分别为0.29条/m和0.24条/m。此外,不论在哪个相组,构造裂缝都较成岩裂缝发育。

#### 4.4 断层对裂缝发育的影响

构造是控制断层发育的重要因素,它通过控制不同构造部分的局部应力分布来控制断层周围裂缝的发育程度。在断层附近,由于断层活动造成的应力扰动作用,沿断裂带一般具有明显的应力集中现象,从而使其裂缝明显发育。在断层附近的扰动应力带,通常形成与断层平行的一组张裂缝和与断层斜交的两组剪切裂缝。徐家围子断陷深层主要发育以正断层为主的3组不同走向的断裂,分别为NNW-NW向、NE向和SN向<sup>[12]</sup>,所以正断层是控

制该区裂缝形成与分布的重要构造因素之一。在断层的端部等部位,通常是应力的集中区,它们也是裂缝的发育区。根据统计还发现,虽然在断层的上盘和下盘均具有随着与断层距离的增大,裂缝的线密度明显降低的趋势,但是在断层两侧,裂缝发育程度也有明显差别。整体来说,断层上盘裂缝的发育程度要明显大于下盘,这是因为断层上盘往往是活动盘,应力扰动作用更明显。

## 5 结论

(1)徐家围子断陷中生代火山岩储层主要发育构造剪切裂缝,其次为成岩裂缝,包括冷凝收缩裂缝、溶蚀裂缝、风化裂缝以及隐爆裂缝。此外,岩心

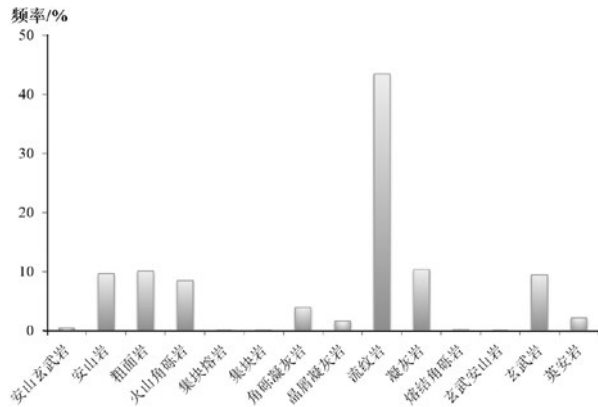


图7 徐家围子断陷火山岩储层不同岩性裂缝频率分布直方图

Fig.7 Fracture density distribution histograms with different lithologies of volcanic reservoir in Xujiaweizi fault depression

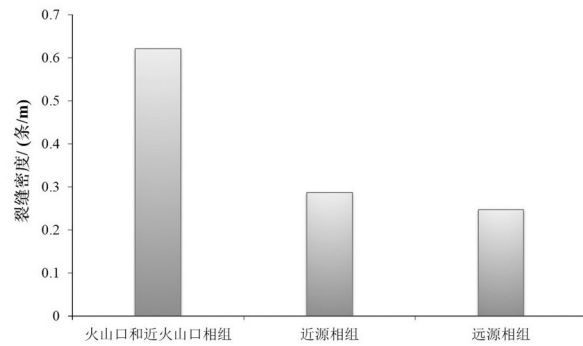


图8 徐家围子断陷火山岩储层不同火山机构裂缝密度分布直方图

Fig.8 Fracture density distribution histogram with different volcanic edifices of volcanic reservoir in Xujiaweizi fault depression

观察中发现井壁周围发育一定数量的钻井伴生裂缝,主要包括钻井诱导裂缝和应力释放裂缝。

(2)研究区经历了多期构造演化,主要形成了近东西向、近南北向、近北东向和近北西向4组裂缝,倾角均以高角度和倾斜裂缝为主;裂缝长度分布不均,多小于2.5 m,营一段和营三段裂缝线密度集中分布在1.5条/m,而火石岭组多在1.0条/m以下;研究区裂缝多为无充填的有效裂缝,只有少量构造缝被方解石、石英等部分充填或全充填。

(3)影响研究区裂缝发育程度的主要因素包括古构造应力、岩性、火山机构以及断层。其中,古构造应力的高值区与裂缝较发育部位具有良好的匹配关系;在多种火山岩中,粗面岩、集块岩和流纹岩裂缝较发育;裂缝多发育在火山口和近火山口相组;在应力扰动作用明显的断层上盘裂缝较发育,且随着与断层距离的增大,裂缝发育程度不断降低。

**致谢:**感谢审稿专家和编辑部李亚萍老师对本文提出的宝贵修改意见!

#### 参考文献(References):

- [1] 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 (in Chinese with English abstract).
- [2] 戴亚权, 罗静兰, 林潼, 等. 松辽盆地北部升平气田营城组火山岩储层特征与成岩演化[J]. 中国地质, 2007, 34(3): 528-535.

Dai Yaquan, Luo Jinglan, Lin Tong, et al. Reservoir characteristics and petrogenesis of volcanic rocks in the Yingcheng Formation of the Shengping gas field, northern Songliao basin[J]. Geology in China, 2007, 34(3): 528-535 (in Chinese with English abstract).

- [3] Dragana T M, Glenn L, David G, et al. Identifying vertical productive fractures in the Naraway gas field using the envelope of seismic anisotropy [C]//SEG Int' l Exposition and 74th Annual Meeting, 2004: 135-138.
- [4] Wang Shangxu, Li Xiangyang. Fracture detection using 3D seismic data: A physical modeling study[C]. SEG Int' l Exposition and 73th Annual Meeting, 2003: 2303-2306.
- [5] 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-permeable sandstone reservoir[J]. Chinese Journal of Geology, 2004, 39(1): 11-17 (in Chinese with English abstract).
- [6] 曾联波. 低渗透砂岩储层裂缝的形成与分布[M]. 北京: 科学出版社, 2008.  
Zeng Lianbo. Formation and Distribution of Fractures in Low Permeability Sandstone Reservoirs[M]. Beijing: Science Press, 2008 (in Chinese with English abstract).
- [7] 章凤奇, 陈汉林, 董传万, 等. 松辽盆地北部存在前寒武纪基底的证据[J]. 中国地质, 2008, 35(3): 421-428.  
Zhang Fengqi, Chen Hanlin, Dong Chuanwan, et al. Evidence for the existence of Precambrian basement under the northern Songliao basin[J]. Geology in China, 2008, 35(3): 421-428 (in Chinese with English abstract).
- [8] 陈欢庆, 胡永乐, 靳久强, 等. 松辽盆地徐东地区下白垩统火山岩储层流动单元研究[J]. 中国地质, 2011, 38(6): 1430-1439.  
Chen Huanqing, Hu Yongle, Jin Jiuqiang, et al. Researches on flow unit of the volcanic reservoir in 1st Member of lower Cretaceous Yingcheng Formation, Xudong area, Songliao Basin[J]. Geology in China, 2011, 38(6): 1430-1439 (in Chinese with English abstract).
- [9] Guo Zhanqian, Wang Xianbin, Liu Wenlong. Reservoir-forming



- features of abiogenic origin gas in Songliao Basin[J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 1997, 40(6): 621–626.
- [10] 任德生. 松辽盆地火山岩裂缝形成机理及预测研究——以徐家围子断陷芳深9井区为例[D]. 长春: 吉林大学, 2003.
- Ren Desheng. Research on Fracture Formation Mechanism and Forecasting in Volcanic Rock of Songliao Basin——Fangshen 9 Well Area of Xujiaweizi Fault Depression as an Example[D]. Changchun: Jilin University, 2003 (in Chinese with English abstract).
- [11] 齐井顺. 松辽盆地北部深层火山岩天然气勘探实践[J]. *石油与天然气地质*, 2007, 28(5): 590–596.
- Qi Jingshun. Natural gas exploration in deep volcanic rocks in the northern Songliao Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2007, 28(5): 590–596 (in Chinese with English abstract).
- [12] 刘维亮, 夏斌, 蔡周荣, 等. 徐家围子火山岩分布特征与控陷断裂关系[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(3): 420–425.
- Liu Weiliang, Xia Bin, Cai Zhouong, et al. Relationship between Huoshiling volcanic distribution and Sag-controlling fault in Xujiaweizi rift sag[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(3): 420–425 (in Chinese with English abstract).
- [13] 张学娟. 松辽盆地北部徐家围子断陷营城组火山岩天然气成藏规律研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2013.
- Zhang Xuejuan. Research on the Natural Gas Accumulation Mechanism of Volcanic Rock in the Yingcheng Formation of the Xujiaweizi Fault Depression, the North Songliao Basin[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013 (in Chinese with English abstract).
- [14] 贺电, 李江海, 刘守偈, 等. 松辽盆地北部徐家围子断陷营城组大型破火山口的发现[J]. *中国地质*, 2008, 35(3): 463–471.
- He Dian, Li Jianghai, Liu Shoujie, et al. Discovery of a giant caldera in the Yingcheng Formation in the Xujiaweizi fault depression, northern Songliao basin[J]. *Geology in China*, 2008, 35(3): 463–471 (in Chinese with English abstract).
- [15] 范存辉, 秦启荣, 支东明, 等. 准噶尔盆地西北缘中拐凸起石炭系火山岩储层裂缝发育特征及主控因素[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(1): 81–87.
- Fan Cunhui, Qin Qirong, Zhi Dongming, et al. Controlling factors and characteristic of Carboniferous volcanic reservoir fractures of Zhongguai uplift in northwestern margin of Junggar Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(1): 81–87 (in Chinese with English abstract).
- [16] 李瑞磊, 冯晓辉, 李增玉, 等. 松辽盆地南部营城组火山岩裂缝的叠前地震识别[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 39(6): 611–616.
- Li Ruilei, Feng Xiaohui, Li Zengyu, et al. Recognition of pre-stack earthquake of volcanic fractures of Yingcheng Formation in Songliao Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2012, 39(6): 611–616 (in Chinese with English abstract).
- [17] 舒萍, 曲延明, 王国军, 等. 松辽盆地火山岩储层裂缝地质特征与地球物理识别[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2007, 37(4): 726–733.
- Shu Ping, Qu Yanming, Wang Guojun, et al. Geological features of the volcanic reservoirs of the Songliao basin and their geophysical detection[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2007, 37(4): 726–733 (in Chinese with English abstract).
- [18] 张震, 鲍志东. 松辽盆地朝阳沟油田储层裂缝发育特征及控制因素[J]. *地质前缘*, 2009, 16(4): 166–172.
- Zhang Zhen, Bao Zhidong. Development characteristics and controlling factors of reservoir fractures in Chaoyanggou oilfield, Songliao basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(4): 166–172 (in Chinese with English abstract).
- [19] Gale J F, Lander R H, Reed R M, et al. Modeling fracture porosity evolution in dolostone[J]. *Journal of Structural Geology*, 2010, 32(9): 1201–1211.
- [20] Hood S D, Nelson C S, Kamp P J J. Modification of fracture porosity by multiphase vein mineralization in an Oligocene nontropical carbonate reservoir, Taranaki Basin, New Zealand[J]. *AAPG Bulletin*, 2003, 87: 1575–1597.
- [21] Laubach S E, Reed R M, Olson J E. Coevolution of crackseal texture and fracture porosity in sedimentary rocks: Cathodoluminescence observations of regional fractures[J]. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26(5): 967–982.
- [22] 李军, 薛培华, 张爱卿, 等. 准噶尔盆地西北缘中段石炭系火山岩油藏储层特征及其控制因素[J]. *石油学报*, 2008, 29(3): 329–335.
- Li Jun, Xue Peihua, Zhang Aiqing, et al. Characteristics and controlling factors of Carboniferous volcanic reservoir in the middle section of the northwestern margin of Junggar Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(3): 329–335 (in Chinese with English abstract).
- [23] 阮宝涛, 张菊红, 王志文, 等. 影响火山岩裂缝发育因素分析[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(2): 287–292.
- Ruan Baotao, Zhang Juhong, Wang Zhiwen, et al. The affecting factor for volcanic fracture development[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(2): 287–292 (in Chinese with English abstract).
- [24] 魏春光, 雷茂盛, 万天丰, 等. 古龙—徐家围子地区营城组古构造应力场数值模拟[J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27(1): 78–84.
- Wei Chunguang, Lei Maosheng, Wan Tianfeng, et al. Numerical simulation of palaeotectonic stress field of Yingcheng Fm in Gulong—Xujiaweizi area[J]. *Oil & Gas Geology*, 2006, 27(1): 78–84 (in Chinese with English abstract).
- [25] 唐华风, 庞彦明, 边伟华, 等. 松辽盆地白垩系营城组火山机构储层定量分析[J]. *石油学报*, 2008, 29(6): 841–845.
- Tang Huafeng, Pang Yanming, Bian Weihua, et al. Quantitative analysis on reservoirs in volcanic edifice of Early Cretaceous Yingcheng Formation in Songliao Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(6): 841–845 (in Chinese with English abstract).
- [26] 蒙启安, 门广田, 张正和. 松辽盆地深层火山岩体、岩相预测方法及应用[J]. *大庆石油地质与开发*, 2001, 20(3): 21–24.
- Meng Qi'an, Meng Guangtian, Zhang Zhenghe. Prediction method and its application of deep volcanic rock body and facies in Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2001, 20(3): 21–24 (in Chinese with English abstract).