

松辽盆地北部深层致密火山岩气藏天然裂缝分布特征及控制因素

高 帅^{1,2}, 巩 磊^{1,2}, 刘小波³, 柳 波⁴, 高 昂⁵, 宿晓岑², 王 杰², 李 晶⁶

(1. 东北石油大学 环渤海能源研究院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 东北石油大学 地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318; 3. 中国石油 大庆榆树林油田开发有限责任公司, 黑龙江 大庆 163453; 4. 东北石油大学 非常规油气研究院, 黑龙江 大庆 163318; 5. 中国石油 大庆油田国际勘探开发公司, 黑龙江 大庆 163000; 6. 中国石油 测井有限公司 新疆分公司, 新疆 克拉玛依 834000)

摘要:天然裂缝系统控制了松辽盆地北部徐家围子断陷深层致密火山岩储层天然气的运移、聚集和成藏。明确致密火山岩储层天然裂缝主控因素是准确预测裂缝分布规律的基础。通过野外露头区裂缝描述、岩心和微观薄片裂缝分析,结合成像测井裂缝解释,对松辽盆地北部深层致密火山岩气藏中天然裂缝的发育特征进行了精细表征,并深入分析了裂缝分布特征及控制因素。研究结果表明,研究区致密火山岩中发育有原生和次生两大裂缝类型,其中次生构造裂缝最为发育,其线密度主要分布在1.0~5.0条/m,平均为2.45条/m。裂缝发育强度主要受岩石类型、岩石力学性质、岩石脆性和构造部位等因素控制。天然裂缝方位复杂多变,是受古构造应力、断层和岩石非均质性(面理)共同作用的结果。

关键词:天然裂缝;断层;岩石非均质性;火山岩;松辽盆地

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Distribution and controlling factors of natural fractures in deep tight volcanic gas reservoirs in Xujiaweizi area, Northern Songliao Basin

Gao Shuai^{1,2}, Gong Lei^{1,2}, Liu Xiaobo³, Liu Bo⁴, Gao Ang⁵, Su Xiaocen², Wang Jie², Li Jing⁶

[1. Bohai-Rim Energy Research Institute, Northeast Petroleum University (Qinhuangdao), Qinhuangdao, Hebei 066004, China; 2. School of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 3. Daqing Yushulin Oilfield Development Co. Ltd., PetroChina, Daqing, Heilongjiang 163453, China; 4. Institute of Unconventional Oil & Gas, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 5. Daqing International Exploration and Development Company, PetroChina, Daqing, Heilongjiang 163000, China; 6. PetroChina Logging Company Ltd. Xinjiang Branch, Karamay, Xinjiang 834000, China]

Abstract: The natural fracture system controls the hydrocarbon migration, accumulation and enrichment in the tight volcanic reservoirs, Northern Songliao Basin. It is of fundamental significance to illuminating the factors controlling natural fracture development in tight volcanic reservoirs for an accurate prediction of fracture distribution pattern. Using data from outcrop, core and thin section observation, as well as fracture interpretation with image logging, we finely characterize the development features of natural fractures in the tight volcanic reservoirs of the study area, and make a systematic research on the fracture distribution and its controlling factors. The results show that the fractures developed therein can be grouped into two types, including primary and secondary fractures. Among others, the secondary tectonic fractures are dominant, with a linear density ranging from 1.0 m⁻¹ to 5.0 m⁻¹, averaging at 2.45 m⁻¹. The fracture intensity varies greatly, mainly controlled by rock type, mechanical property, brittleness and tectonic position. The natural fracture orientation is complex and variable, a result of the combined action of paleotectonic stress, fault and rock heterogeneity (foliation).

Key words: natural fracture, fault, rock heterogeneity, volcanic rock, Songliao Basin

收稿日期:2019-05-20;修订日期:2020-03-19。

第一作者简介:高帅(1987—),女,博士、讲师,沉积岩石学。E-mail:349684871@qq.com。

通讯作者简介:刘小波(1982—),男,博士、高级工程师,构造地质学。E-mail:liuxiaobokm@126.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41902150);黑龙江省自然科学基金项目(QC2018043);黑龙江省普通本科高等学校青年创新人才培养计划项目(UNPYSCT-2018043);中国博士后基金项目(2018M631908);东北石油大学“国家基金”培育基金项目(2017PYQZL-14);优秀科研人才培育基金项目(SCXHB201705);青年科学基金项目(2018QNL-12)。

松辽盆地北部徐家围子断陷深层发育有多套火山岩地层,目前已经在 50 多口探井中试气并获得高产^[1-2]。近年研究表明^[3-13],研究区徐家围子断陷深层下白垩统营城组和火石岭组为裂缝-孔隙型致

密火山岩储层,天然裂缝系统的存在对这种致密储层起到了积极的改造作用,断层和天然裂缝的分布控制了天然气运移、聚集和成藏(图 1)^[14-20]。学者们对研究区裂缝分布特征做过一些研究,如任德生^[21]、陈树民

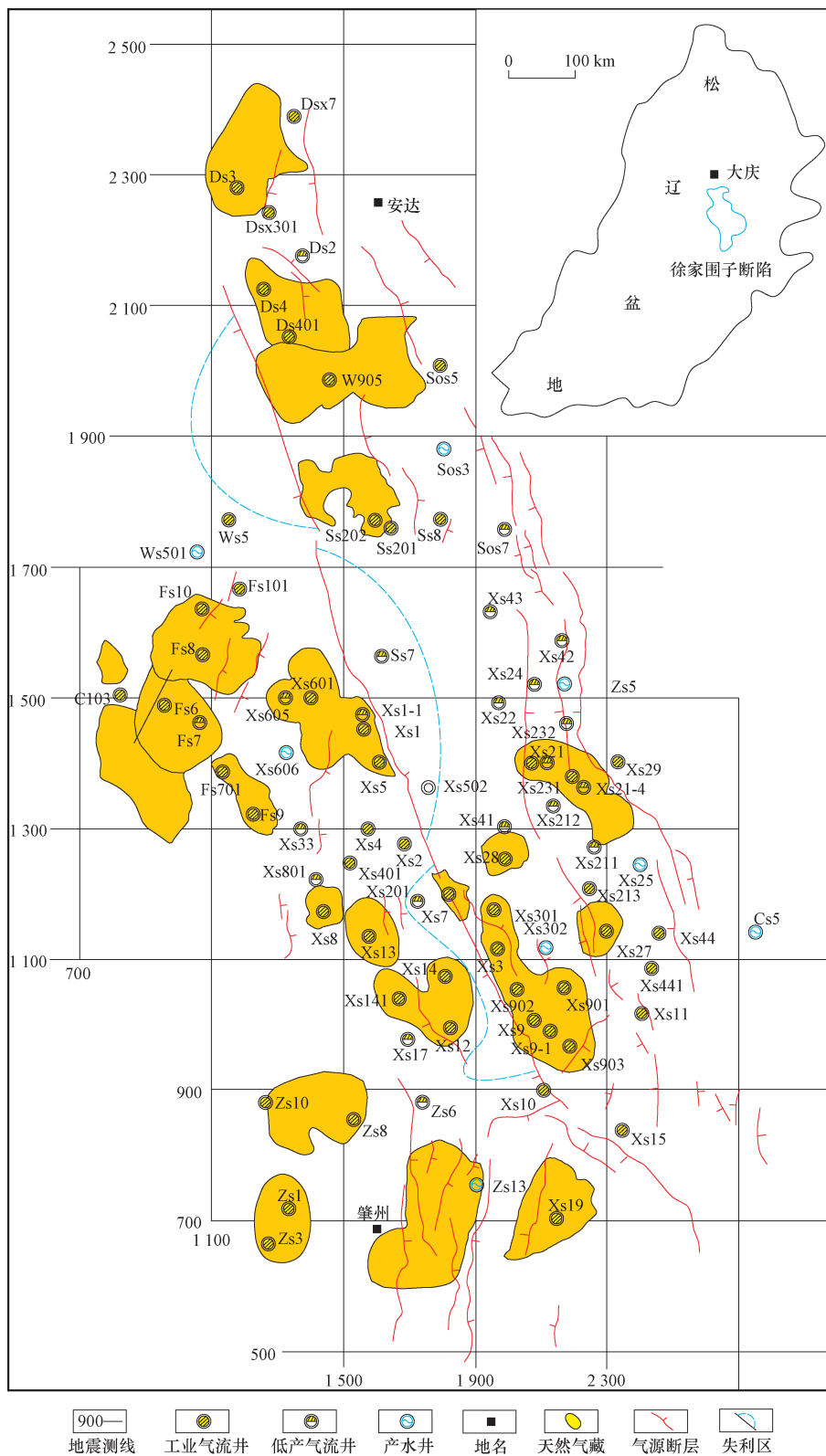


图 1 松辽盆地北部徐家围子地区深层火山岩断层与气藏分布(据 Gong 等^[26]修改)

Fig. 1 The distribution of faults and gas reservoirs in Xujiaweizi area, Northern Songliao Basin (modified after reference[26])

等^[22]对营城组火山岩裂缝形成机理进行过研究,雷茂盛等^[23]、白雪峰^[24]对营城组宏观裂缝的发育规律和形成时期进行过研究,刘国平等^[25]、Gong等^[26]和巩磊等^[27]探讨了营城组火山岩储层裂缝发育特征及与油气成藏的关系,但是由于研究区天然裂缝方位复杂多变、发育强度非均质性极强,其控制因素仍不明确。近年来,随着勘探程度的不断进行,获得了大量的岩心和成像测井资料,本文通过系统表征裂缝发育特征,明确了研究区深层火山岩天然裂缝复杂分布的主控因素。

1 天然裂缝发育特征

1.1 裂缝类型及特征

松辽盆地北部深层致密火山岩主要发育有原生裂缝和次生裂缝。原生裂缝包括冷凝收缩裂缝(如柱状节理)和隐爆裂缝。其中,柱状节理主要在野外露头区观察到(图2a),裂缝高度大、连通性好,但是在岩心上很少发现。隐爆裂缝呈网状分布(图2b),多被方解石、绿泥石等矿物充填。次生构造裂缝是研究区致密火山岩储层的主要裂缝类型(图2c,图2e,图3),它们在各种火山岩性和岩相中均有发育,其高度和延伸长度均较大,绝大部分未被充填,裂缝有效性好。早期被矿物充填的原生裂缝或构造裂缝受后期热液作用、溶

蚀作用等改造形成溶蚀裂缝,它们是重新开启的有效裂缝(图2g)。风化裂缝主要发育在不同旋回火山岩风化壳的上部,大部分风化裂缝被紫红色铁质或黑色泥质充填或半充填,有效程度差(图2f)。

1.2 裂缝的组系与方位

任德生^[21]、白雪峰^[24]、温博华^[28]根据野外露头测量或岩心古地磁定向等方法,认为研究区营城组火山岩储层主要发育有四组裂缝,其中,NE-SW向和NW-SE向裂缝最发育,而近EW向和近SN向裂缝发育程度较差(图4a)。雷茂盛等^[16]通过十余口井的成像测井分析,认为ENE-WSW向和WNW-ESE向为研究区优势裂缝方位,其次为NNE-SSW和近NS向(图4b)。而我们通过对研究区营城组89口成像测井资料裂缝解释发现,火山岩储层各层系裂缝方位均十分复杂(图3,图4c-f),尤其是在断层附近,几乎各个方向均有裂缝发育,这种裂缝方位的复杂性是受古构造应力方位、断层和岩石非均质性共同作用的结果(详见2.2和3.3)。

1.3 裂缝参数定量表征

松辽盆地北部深层致密火山岩储层宏观裂缝开度主要分布在50~150 μm ,平均为94.64 μm 。通过微观薄片裂缝开度测量,微观裂缝开度一般小于100 μm ,主

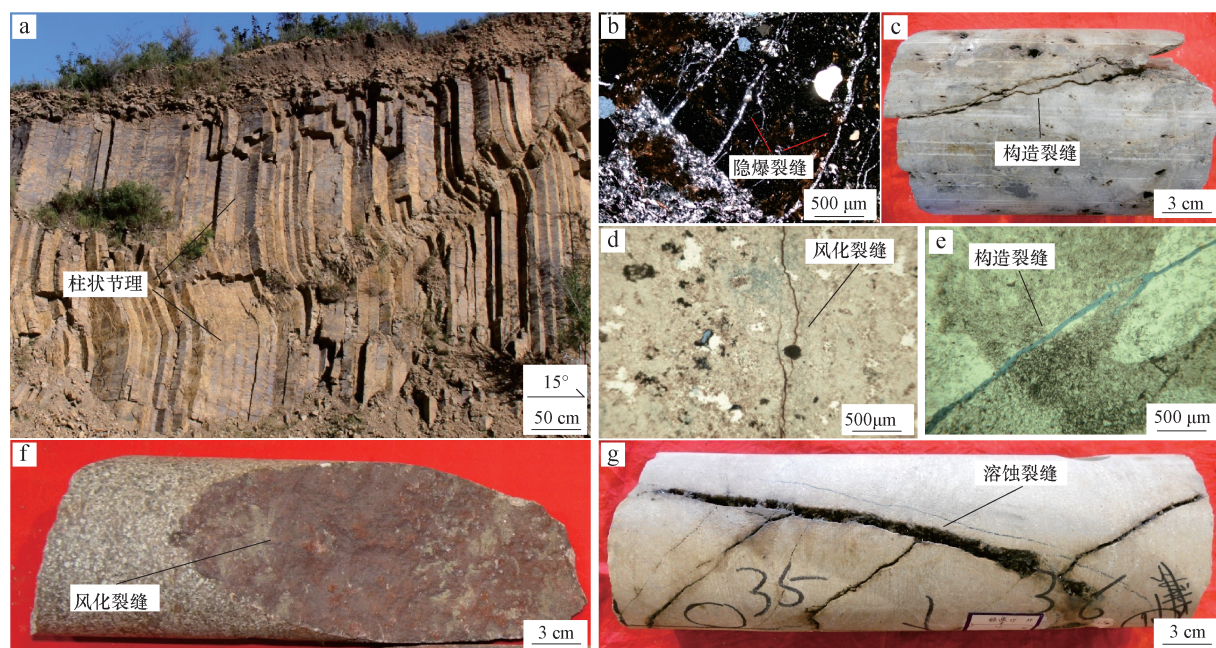


图2 松辽盆地北部深层致密火山岩储层天然裂缝类型

Fig. 2 Natural fracture types in the deep tight volcanic reservoirs in Northern Songliao Basin

- a. 柱状节理;b. 隐爆裂缝,XS902井,埋深3 754.13 m;c. 构造裂缝,XS13井,埋深3 957.07 m;d. 风化裂缝,SSG2井,埋深2 929.22 m;
e. 构造裂缝,XS1-2井,埋深3 565.16 m;f. 风化裂缝,SS2井,埋深3 527.41 m;g. 溶蚀裂缝,XS15井,埋深3 681.14 m

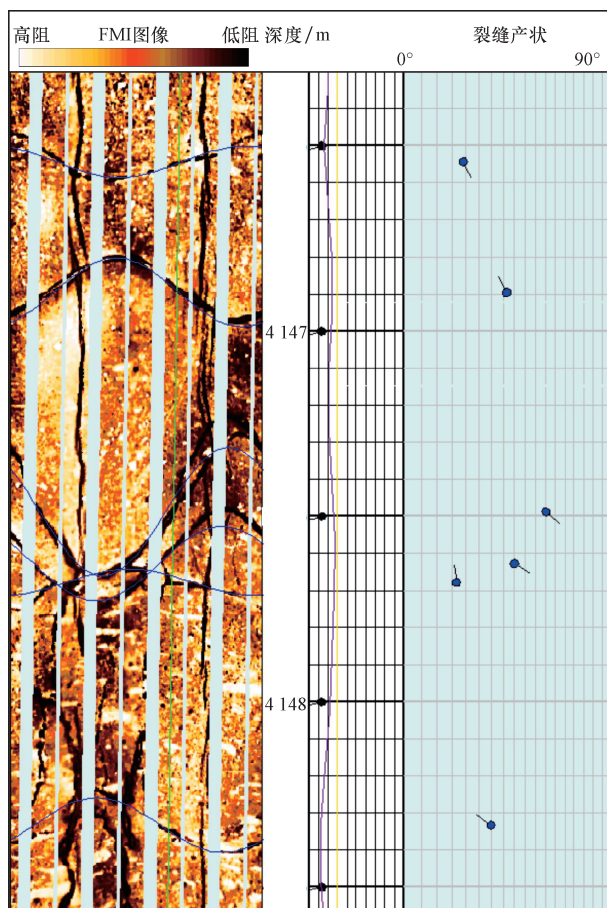


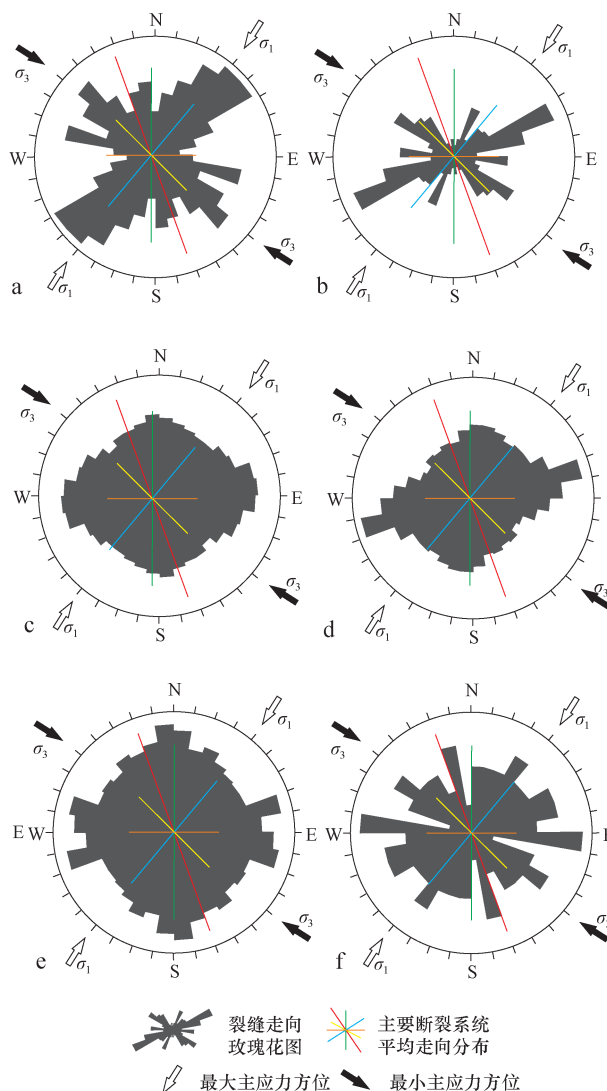
图3 成像测井上的构造裂缝(XS1-2井)

Fig. 3 Structural fractures seen from image logging
(in Well XS1-2)

要分布在 $10 \sim 40 \mu\text{m}$, 平均为 $29.5 \mu\text{m}$ 。根据 Monte Carlo 逼近法^[22,23] 计算和统计, 松辽盆地北部深层致密火山岩宏观裂缝的孔隙度一般小于 0.05% , 主要分布在 $0.002\% \sim 0.01\%$, 而微观裂缝孔隙度则明显较大, 主要分布在 $0.2\% \sim 0.6\%$, 平均可达 0.41% , 约占火山岩储层总孔隙度的 16.0% 左右, 由此说明宏观裂缝对研究区致密火山岩储层孔隙度的贡献相对较小, 而微观裂缝是松辽盆地北部深层致密火山岩储层的重要储集空间。

1.4 裂缝发育程度

根据研究区岩心裂缝空间分布特征, 对其线密度进行几何校正后发现, 松辽盆地北部深层致密火山岩储层天然裂缝十分发育, 岩心宏观裂缝线密度为 $0 \sim 12$ 条/m, 峰值为 $2.0 \sim 6.0$ 条/m, 平均为 3.45 条/m, 不同取心井的裂缝密度差异很大, 反映了致密火山岩储层天然裂缝发育程度存在的非均质性强的特点。试井资料解释同样显示, 研究区地层系数 kh ($0.637 \sim 320.68 \text{ mD} \cdot \text{m}$) 和有效渗透率 ($0.08 \times 10^{-3} \sim 26.72 \times$

图4 松辽盆地北部裂缝走向和主要断层系统平均走向分布
Fig. 4 Rose diagrams of fracture and fault strikes in
Northern Songliao Basin

a. 营城组, 据野外露头 and 岩心古地磁定向 (数据据任德生^[14]、白雪峰^[17]、温博华^[21]), $N=546$ 条; b. 营城组, 据成像测井 (数据据雷茂盛等^[16]), $N=127$ 条; c. 营城组, 据成像测井, $N=8\,511$ 条; d. 营一段, 据成像测井, $N=4\,895$ 条; e. 营三段, 据成像测井, $N=2\,640$ 条; f. 营四段, 据成像测井, $N=976$ 条

$10^{-3} \mu\text{m}$) 变化很大, 各层解释的储能比 ω 主要分布在 $0.05 \sim 0.30$, 窜流系数 λ 主要为 $0.001 \sim 0.03$, 说明天然裂缝起到主要渗流通道的作用。通过对比单井日产气量和裂缝线密度发现, 单井日产气量与裂缝线密度整体呈正相关性, 随着裂缝线密度增加, 单井日产气量增大 (图 5), 说明构造裂缝主要起到了输导连通的作用。成像测井解释的裂缝面密度主要分布在 $1.0 \sim 5.0 \text{ m/m}^2$, 最大可达 29.0 m/m^2 , 平均为 2.32 m/m^2 。微裂缝面密度较大, 主要分布区间为 $5.0 \sim 15.0 \text{ m/m}^2$, 平均为 13.0 m/m^2 , 反映微观裂缝十分发育。

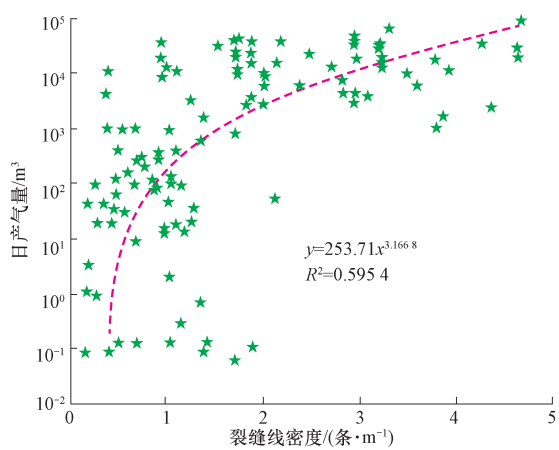


图 5 单井日产能与裂缝发育强度关系
Fig. 5 Relationship between daily gas production and fracture intensity

2 裂缝发育的主控因素

2.1 岩石类型及其力学性质

根据不同火山岩岩石类型和岩相裂缝发育强度统计,构造裂缝主要发育在流纹岩和安山岩,平均裂缝线密度为 15.6 条/m,其次是粗面岩和玄武岩,平均裂缝线密度为 11.4 条/m,凝灰岩和火山角砾岩中裂缝发育程度较差。从火山岩相来看,溢流相和侵出相最有利于裂缝形成,其裂缝线密度可达 17.8 条/m,然后是爆发相,平均裂缝线密度为 12.7 条/m,火山沉积相中裂缝很少发育。不同岩相发育裂缝类型也有所差异,在爆发相中主要发育与爆发作用相关的隐爆裂缝以及与后期风化淋滤和溶蚀作用相关的风化裂缝和溶蚀裂缝。柱状节理主要发育在溢流相和侵出相中。构造裂缝在各类火山岩相中均有发育。

通过对比不同岩性的裂缝发育程度与岩石力学参

数发现,裂缝发育程度与抗压强度和泊松比呈镜像关系(反比)(图 6a,b),而与岩石的杨氏模量呈正比(图 6c),即当应力状态相同时,岩石的弹性模量越大、抗压强度或泊松比越小,岩石越容易发生脆性破裂,即越有利于裂缝形成,裂缝发育程度越高(表 1)。岩石力学参数影响着岩石的脆性,可以用岩石脆性指数来表示,其计算方法如下^[31]:

$$B = (E + \nu) / 2 \tag{1}$$

式中: B 为脆性指数, E 和 ν 分别为归一化后的弹性模量和泊松比。

利用上式对研究区 9 口井的岩石脆性指数进行了计算(表 1),并与其岩心裂缝的统计资料进行了匹配对照,结果表明(图 6d),裂缝发育强度与计算的脆性指数的相关性,比单独弹性模量或泊松比的相关性更好,说明岩石脆性指数的大小控制着裂缝的发育程度,在对裂缝进行预测时,岩石脆性指数可以作为一项约束条件。

2.2 断层

断层是控制松辽盆地北部深层致密火山岩储层天然裂缝发育的重要因素,它主要是通过断层作用过程中形成的扰动应力场来影响不同构造部位的局部应力分布,进而控制天然裂缝的产状和发育程度^[17,32-35]。

2.2.1 断层对裂缝产状的影响

根据不同构造部位天然裂缝产状测量与统计,在断层附近,裂缝发育程度高,虽然具有几组优势裂缝方位,但整体裂缝方位仍十分复杂,几乎在各个方向均有大量裂缝发育。随着远离断层,裂缝发育程度降低,裂缝优势方位却更加明显,说明断层的存在影响了天然裂缝方位的复杂性。这种控制作用在徐中断层系统最为明显。徐中断层系统为控制徐家围子断陷形成的大

表 1 不同岩石类型力学参数及脆性指数
Table 1 Mechanical parameters and brittleness indexes of different rock types

井号	岩相	岩性	抗压强度/ MPa	弹性模量/ GPa	泊松比	体积模量/ GPa	脆性指数	裂缝线密度/ (条·m ⁻¹)
DS1	侵出相	玄武岩	0.77	0.48	0.36	0.57	0.42	6.02
DS4	侵出相	玄武安山岩	0.76	0.57	0.33	0.57	0.45	9.14
SS5	侵出相	英安岩	0.77	0.47	0.38	0.64	0.43	7.49
SS12	侵出相	安山岩	0.72	0.58	0.31	0.51	0.45	11.56
DS6	次火山岩相	隐爆角砾岩	0.86	0.49	0.34	0.52	0.42	3.94
DS5	溢流相	流纹岩	0.85	0.61	0.31	0.53	0.46	11.05
DS41	火山沉积相	火山角砾岩	0.73	0.54	0.29	0.43	0.42	2.74
DS32	爆发相	凝灰岩	0.75	0.61	0.29	0.49	0.45	4.20
DS3	侵出相	粗面岩	0.74	0.55	0.34	0.57	0.44	10.09

型右旋走滑断层,根据右旋走滑断层应变椭圆可知^[36](图7a),与右旋走滑断层相伴生的裂缝系统主要包括R剪切裂缝、R'剪切裂缝、P剪切裂缝和T裂缝。通过对比单井裂缝走向和徐中走滑断层理论上所伴生裂缝系统走向发现,在徐中断层附近,裂缝走向的优势方位与右旋走滑断层伴生裂缝系统的方位具有很好的一致性(图7b,c),远离徐中断层,这种控制作用减弱,说明徐中断层对裂缝方位具有重要影响。断层不仅控制了裂缝的走向,对裂缝的倾角也有重要影响,远离断层,以中、高角度裂缝为主,断层附近,还发育低角度裂缝。

2.2.2 断层对裂缝发育程度的影响

根据断层附近裂缝发育强度统计(岩心和成像测井),断层核附近裂缝最发育,随着距断层核距离增大,天然裂缝发育强度迅速降低,并趋于一个平均值,标志着断层破碎带的结束。根据成像测井解释的单井裂缝线密度与距断层距离统计关系还发现,不同类型断层系统对裂缝发育程度的控制程度有所差异(图8),其中徐中断层系统破碎带范围最大,破碎带宽度分布在90~150 m,平均为135 m左右,其次是徐东断层系统

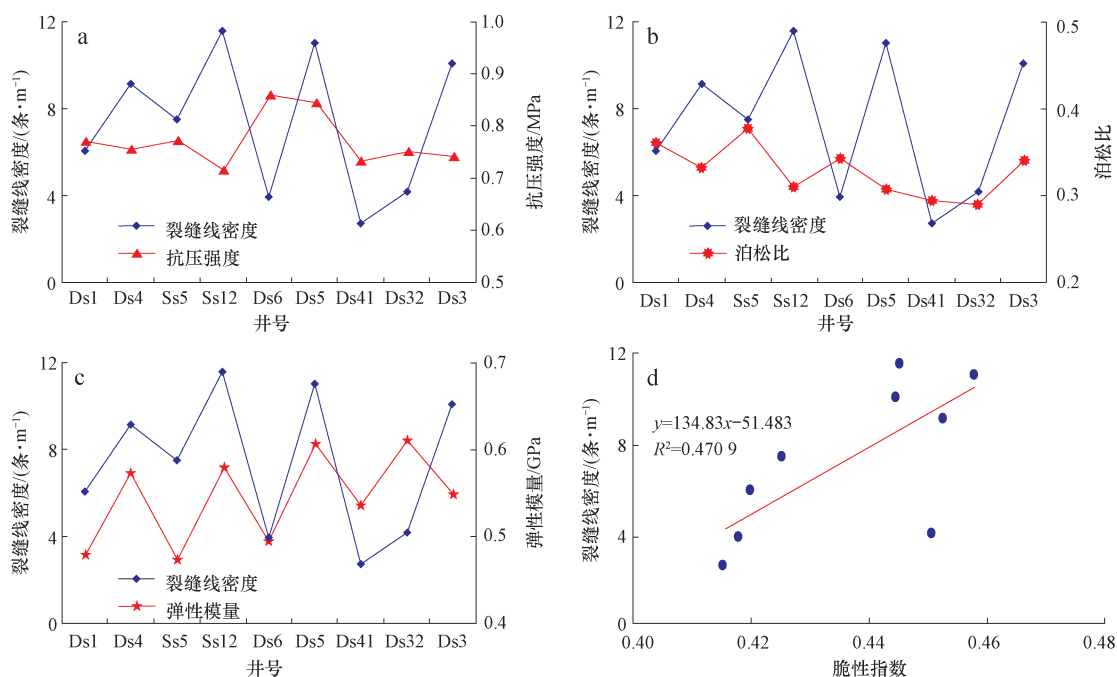


图6 岩石岩石力学性质与裂缝密度关系

Fig. 6 Relationship between rock mechanical properties and fracture density

a. 裂缝密度与抗压强度关系; b. 裂缝密度与泊松比关系; c. 裂缝密度与弹性模量关系; d. 裂缝密度与脆性指数关系

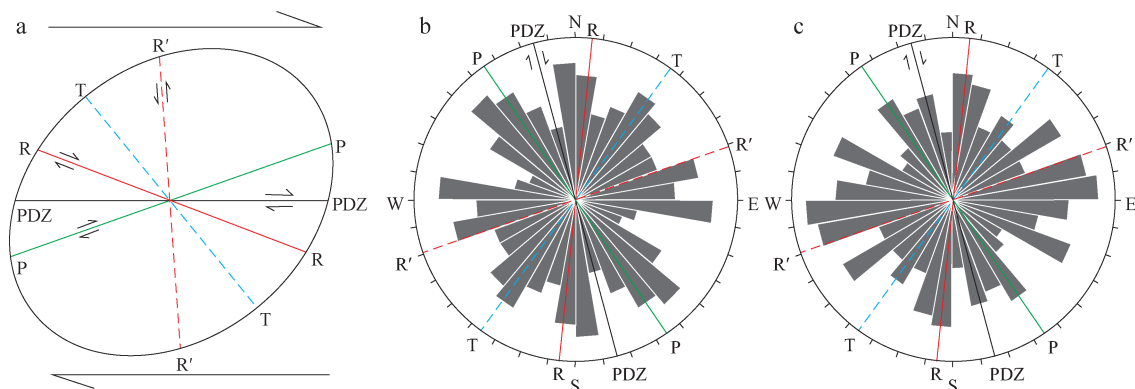


图7 走滑断层对其伴生裂缝方位的控制作用

Fig. 7 The controlling effect of strike-slip faults on its associated fracture orientation

a. 右行走滑断层伴生破裂构造^[29]; b. XS1-304井裂缝走向与徐中断层伴生构造走向匹配关系; c. XS1-2井裂缝走向与徐中断层伴生构造走向匹配关系
PDZ. 主位移带,即主走滑断层; R. R剪切裂缝; R'. R'剪切裂缝; P. P剪切裂缝; T. T裂缝

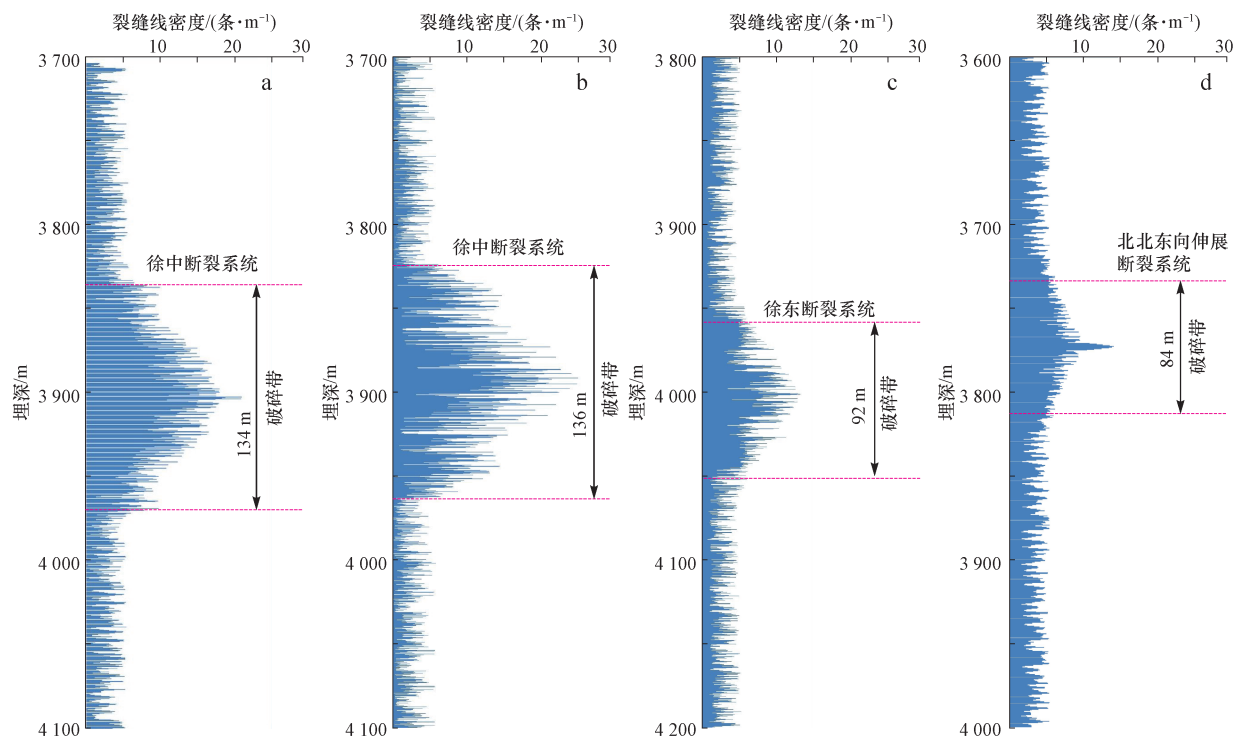


图8 不同断层系统附近裂缝分布规律

Fig. 8 Fracture distribution pattern in the vicinity of different fault systems

a. XS1 井裂缝垂向分布规律; b. XS9 井裂缝垂向分布规律; c. XS21 井裂缝垂向分布规律; d. FS10 井裂缝垂向分布规律

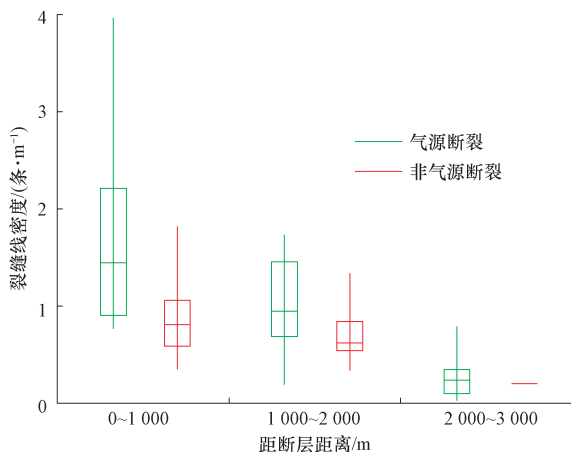


图9 不同尺度断层附近裂缝分布

Fig. 9 Fracture distribution around faults of different scales

和 NNE - SSW 向伸展断层系统,它们伴生破碎带平均宽度分别为 92 和 84 m,而东西向调节断层控制的破碎带范围不明显。另外,通过对比不同尺度气源断层与非气源断层附近裂缝发育程度发现,在气源断层附近裂缝密度明显大于非气源断层(图 9),这与气源断层后期再次活动有关。

2.3 岩石非均质性对裂缝的影响

岩石非均匀性是指由于岩石成分、结构和构造的不均匀分布而造成其岩石力学性质在各不同方向上具

有明显差异的岩石物理力学性质^[37-38]。松辽盆地北部深层致密火山岩储层裂缝方位具有十分复杂的特点,一方面是受断层影响造成的,但是,在剔除了断层对裂缝方位的影响之后,裂缝组系仍然不明显,尤其是在流纹岩等非均质性强的岩石中,说明裂缝产状还受其它因素影响。面理构造也是控制徐家围子断陷火山岩储层裂缝方位的主要因素。当岩石中存在面理、劈理或先存裂缝等面状不连续构造时,岩石表现出很强的非均质性特征。在后期构造应力作用下,破裂就可能沿着这些早期软弱的面状不连续发育,也有可能切穿这些面状不连续,形成新裂缝,这取决于这些面状构造与后期构造主应力之间的空间几何关系。这样,在莫尔空间中就存在两条破裂包络线(图 10)^[37],上部包络线(即形成新裂缝)和下部包络线(即沿先存面状不连续发生破裂)。

如果面状不连续与最大主应力 σ_1 垂直,那么在面状不连续上就没有剪切应力分量,此时上部包络线适用(图 10a,e),就会形成新的切穿面状不连续的剪切裂缝。当面状不连续与最大主应力 σ_1 高角度相交时,面状不连续上的剪切应力分量仍然达不到面理破裂强度,此时仍然是形成切穿面状不连续的剪切裂缝(图 10b)。而随着面状不连续与最大主应力 σ_1 夹角逐渐减小,由于沿面状不连续发生破裂所需的剪应力较小

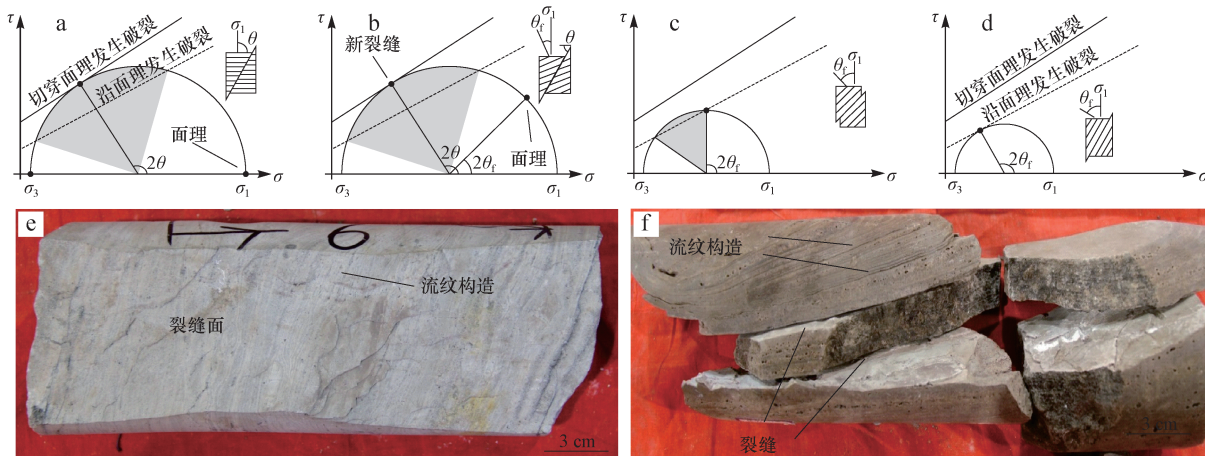


图10 面理构造对裂缝产状的影响

Fig. 10 Effects of foliation on fracture occurrence

a. 最大主应力与面理垂直时岩石破裂模式^[30]; b. 最大主应力与面理高角度相交时岩石破裂模式^[30]; c. 最大主应力与面理低角度相交时岩石破裂模式^[30]; d. 沿面理发生破裂时最大主应力与面理角度^[30]; e. 最大主应力与面理垂直或高角度相交, 切穿面理形成新裂缝; f. 最大主应力与面理低角度相交, 沿面理发生破裂

(图10c, f), 此时, 是产生新裂缝还是沿先存面状不连续发生剪切破裂, 取决于面状不连续的方位和强度。其最小强度可以从图10d中下部破裂包络线与莫尔圆相切的点所代表的面状不连续方向来获得。

在松辽盆地北部深层致密火山岩中发育有大量流纹岩, 受当时地形等因素影响, 其流纹构造产状复杂多变, 使得发育在其中的天然裂缝方位更加复杂。当流纹构造近水平时($0^{\circ} \sim 30^{\circ}$), 水平最大主应力与流纹构造呈高角度($60^{\circ} \sim 90^{\circ}$)相交, 则形成切穿流纹构造的新的剪切裂缝(图10e)。当流纹构造倾斜时($30^{\circ} \sim 60^{\circ}$), 水平最大主应力与流纹构造呈中角度相交($30^{\circ} \sim 60^{\circ}$), 沿流纹构造发生破裂。当流纹构造近直立时($60^{\circ} \sim 90^{\circ}$), 是否产生新裂缝受流纹构造与水平最大主应力夹角控制, 若流纹构造与水平最大主应力呈 45° 左右, 沿流纹构造发生破裂(图10f), 若流纹构造与水平最大主应力近垂直或平行, 则形成新的切穿流纹构造的剪裂裂缝。

3 有效裂缝与油气关系

根据裂缝切割关系、充填矿物流体包裹体分析及研究区构造演化分析, 巩磊等^[27]指出, 研究区深层火山岩构造裂缝主要是在营城组沉积末期、青山口组沉积早期和嫩江组沉积末期构造应力作用下形成。第一期构造裂缝延伸至地表发育, 主要是起到了沟通地表流体的作用, 促进了致密火山岩风化淋滤作用的发生, 在一定程度上改善了储层质量, 但绝大多数被后期矿物充填, 成为无效裂缝。第二期构造裂缝形成于青山

口组沉积早期, 它们很少被矿物充填, 而且沟通了原生气孔, 有效改善了致密火山岩储层的孔隙连通性, 它们带来的 CO_2 和有机酸等酸性物质, 促使储层进一步发生溶蚀作用, 从而形成大量次生溶蚀孔隙, 使储层质量得到进一步改善。此外, 该期构造裂缝形成时间与研究区烃源岩生烃高峰期相吻合, 是天然气发生侧向运移的重要通道^[8]。第三期构造裂缝切割早期裂缝形成连通的裂缝网络, 进一步改善储层连通性, 此时下伏沙河子组烃源岩进入裂解气生成阶段, 裂解气沿断层和裂缝系统向火山岩储层运移聚集。此后, 研究区构造活动减弱, 火山岩气藏得到保存。

4 结论

1) 松辽盆地北部深层致密火山岩储层发育有原生裂缝和次生裂缝两种类型, 其中以次生构造裂缝为主。宏观裂缝开度平均为 $94.64 \mu\text{m}$, 孔隙度一般小于 0.05% , 主要是起渗流通道作用。微观裂缝开度平均为 $29.5 \mu\text{m}$, 平均孔隙度为 0.41% , 约占火山岩储层总孔隙度的 16% 左右, 是火山岩储层的重要储集空间。裂缝线密度平均为 2.45 条/m, 单井天然气日产能与裂缝发育强度正相关。

2) 不同岩石类型和岩相的力学性质不同, 造成其天然裂缝发育程度差异明显, 可以用脆性指数来定量表征不同岩石类型和岩相产生裂缝的难易程度。走滑断层对研究区致密火山岩储层裂缝的控制作用主要体现在对裂缝产状和发育程度的影响。走滑断层性质控制了其伴生裂缝系统的优势方位。断层附近, 尤其是

在走滑断层的叠覆区和交叉点,裂缝最发育,有效改善储层。岩石非均质性使得裂缝方位与理论值有所差异,造成裂缝方位复杂多变。

参 考 文 献

- [1] 蔡东梅,孙立东,齐景顺,等. 徐家围子断陷火山岩储层特征及演化规律[J]. 石油学报,2010,31(03):400-407.
Cai Dongmei, Sun Lidong, Qi Jingshun, et al. Reservoir characteristics and evolution of volcanic rocks in Xujiaweizi fault depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(03):400-407.
- [2] Wang W G, Wang M, Lu S F, et al. Basin modelling of gas migration and accumulation in volcanic reservoirs in the Xujiaweizi Fault-depression, Songliao Basin[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(2):166-189.
- [3] Zhang G L, Lan Z X, Liu P. Fracturing control method for deep volcanic rock gas reservoirs in Daqing exploration area[J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(4):529-534.
- [4] Meng L D, Fu X F, Wang Y C, et al. Internal structure and sealing properties of the volcanic fault zones in Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(2):165-174.
- [5] Mao Z G, Zhu R K, Luo J L, et al. Reservoir characteristics, formation mechanisms and petroleum exploration potential of volcanic rocks in China[J]. Petroleum Science, 2015, 12(1):54-66.
- [6] Gong L, Su X C, Gao S, et al. Characteristics and formation mechanism of natural fractures in the tight gas sandstones of Jiulongshan Gas Field, China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 175(1):1112-1121.
- [7] 张莹. 控陷断裂断面结构与盆地建造和改造作用的关系——以徐家围子断陷为例[J]. 石油地质与工程, 2018, 32(2):1-5.
Zhang Ying. Relationship between the depression-controlling fault plane structure and the construction and reformation of the basin[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2018, 32(2):1-5.
- [8] 张学娟,荣鹏飞,卢双舫,等. 火山岩定容充注物理模拟实验研究:以松辽盆地徐家围子断陷营城组火山岩为例[J]. 石油实验地质, 2018, 40(6):864-870.
Zhang Xuejuan, RONG Pengfei, LU Shuangfang, et al. Physical simulation of volumetric charging of volcanic rock: case study of volcanic rock in Yingcheng Formation of Xujiaweizi Fault Depression in Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(6):864-870.
- [9] 邵翌一,吴朝东,张大智,杨步增. 松辽盆地徐家围子断陷沙河子组储层特征及控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(1):101-108.
Shao Zhaoyi, Wu Chaodong, Zhang Dazhi, Yang Buzeng. Reservoir characteristics and controlling factors of Shahezi Formation in Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(1):101-108.
- [10] 张玉银. 溶蚀作用对火山岩有效储层形成的控制作用——以松辽盆地徐家围子断陷营城组为例[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(3):587-593.
Zhang Yuyin. Controlling effect of dissolution on valid volcanic reservoir formation: A case study of the Yingcheng Formation in the Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(3):587-593.
- [11] 刘传平,覃豪,杨清山,等. 松辽盆地徐家围子断陷沙河子组致密气储层参数解释方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(5):213-221.
Liu Chuanping, Qin Hao, Yang Qingshan, et al. Interpreting method of Shahezi-Formation tight gas reservoir parameters in Xujiaweizi Fault Depression of Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(5):213-221.
- [12] 牛文. 徐家围子断陷控陷断裂活动特征及其对断陷的控制作用[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(4):38-44.
Niu Wen. Activity characteristics of the depression-controlling faults and their controlling actions on Xujiaweizi Fault Depression[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019, 38(4):38-44.
- [13] 李钰玮,陈均亮,张莹,等. 徐家围子断陷徐中断裂特征及形成机制[J]. 大庆石油地质与开发, 2018, 37(2):34-39.
Li Yuwei, Chen Junliang, Zhang Ying, et al. Characteristics and generating mechanism of Xuzhong Fault in Xujiaweizi Fault Depression[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2018, 37(2):34-39.
- [14] Hennings P, Allwardt P, Paul P, et al. Relationship between fractures, fault zones, stress, and reservoir productivity in the Suban gas field, Sumatra, Indonesia[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(4):753-772.
- [15] Gudmundsson A, Lotveit I F. Sills as fractured hydrocarbon reservoirs: examples and models[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2012, 374(1):251-271.
- [16] Wang P J, Chen S M. Cretaceous volcanic reservoirs and their exploration in the Songliao Basin, northeast China[J]. AAPG Bulletin, 2015, 99(03):499-523.
- [17] 王京红,邹才能,靳久强,等. 火成岩储集层裂缝特征及成缝控制因素[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(06):708-715.
Wang Jinghong, Zou Caineng, Jin Jiuqiang, et al. Characteristics and controlling factors of fractures in igneous rock reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(06):708-715.
- [18] 侯连华,王京红,邹才能,等. 火山岩风化体储层控制因素研究——以三塘湖盆地石炭系卡拉岗组为例[J]. 地质学报, 2011, 85(04):557-568.
Hou Lianhua, Wang Jinghong, Zou Caineng, et al. Controlling factors of weathering volcanic reservoir: An example from the carboniferous Kalagang Formation in Santanghu Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(04):557-568.
- [19] Cai Z R, Huang Q T, Xia B, et al. Development features of volcanic rocks of the Yingcheng Formation and their relationship with fault structure in the Xujiaweizi Fault Depression, Songliao Basin, China[J]. Petroleum Science, 2012, 9(4):436-443.
- [20] Okumura S, Sasaki O. Permeability reduction of fractured rhyolite in volcanic conduits and its control on eruption cyclicity[J]. Geology, 2014, 42(10):843-846.
- [21] 任德生. 松辽盆地火山岩裂缝形成机理及预测研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004.

- Ren De Sheng. Research on fracture formation mechanism and forecasting in volcanic rock of Songliao Basin[D]. Changchun: Jilin University, 2004.
- [22] 陈树民, 姜传金, 刘立, 等. 松辽盆地徐家围子断陷火山岩裂缝形成机理[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(6): 1816 – 1826.
- Chen Shumin, Jiang Chuanjin, Liu Li, et al. Fracture formation mechanism of volcanic rocks in Xujiaweizi Fault Depression of Songliao Basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2014, 44(6): 1816 – 1826.
- [23] 雷茂盛, 张超谟, 李军, 等. 徐家围子断陷营城组火山岩宏观裂缝分布规律研究[J]. 石油天然气学报, 2005, 27(4): 57 – 59.
- Lei Maosheng, Zhang Chaomo, Li Jun, et al. Study on macro-fracture distribution of volcanic rock in Yingcheng Formation of Xujiaweizi fault depression[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2005, 27(4): 57 – 59.
- [24] 白雪峰. 松辽盆地营城组火山岩储层裂缝特征[J]. 世界地质, 2009, 28(3): 318 – 325.
- Bai Xuefeng. Fracture characteristics of volcanic reservoir in Yingcheng Formation, Songliao Basin[J]. Global Geology, 2009, 28(3): 318 – 325.
- [25] 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.
- [26] Gong L, Gao S, Fu X F, et al. Fracture characteristics and their effects on hydrocarbon migration and accumulation in tight volcanic reservoirs: A case study of the Xujiaweizi fault depression, Songliao Basin, China[J]. Interpretation, 2017, 5(4): 57 – 70.
- [27] 巩磊, 高帅, 吴佳朋, 等. 徐家围子断陷营城组火山岩裂缝与天然气成藏[J]. 大地构造与成矿学, 2017, 41(2): 283 – 290.
- Gong Lei, Gao Shuai, Wu Jiapeng, et al. Natural gas accumulation and fractures in volcanic rocks of Yingcheng Formation in Xujiaweizi fault depression[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2017, 41(2): 283 – 290.
- [28] 温博华. 古地磁在大庆徐家围子火山岩裂缝定向中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- Wen Bohua. The application of paleomagnetic method on fracture orientation of volcanic rocks, Xujiaweizi in Daqing[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [29] Zeng L B, Su H, Tang X M, et al. Fractured tight sandstone oil and gas reservoirs: A new play type in the Dongpu depression, Bohai Bay Basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(3): 363 – 377.
- [30] 曾联波, 柯式镇, 刘洋. 低渗透储层裂缝研究方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
- Zeng Lianbo, Ke Shizhen, Liu Yang. Low permeability reservoir fracture study method[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [31] 李庆辉, 陈勉, 金衍, 等. 页岩脆性的室内评价方法及改进[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(8): 1680 – 1685.
- Li Qinghui, Chen Mian, Jin Yan, et al. Indoor evolution method for shale brittleness and improvement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(8): 1680 – 1685.
- [32] 侯连华, 罗霞, 王京红, 等. 火山岩风化壳及油气地质意义——以新疆北部石炭系火山岩风化壳为例[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(3): 257 – 265.
- Hou Lianhua, Luo Xia, Wang Jinghong, et al. Weathered volcanic crust and its petroleum geologic significance: A case study of the Carboniferous volcanic crust in northern Xinjiang[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(3): 257 – 265.
- [33] 侯连华, 邹才能, 刘磊, 等. 新疆北部石炭系火山岩风化壳油气地质条件[J]. 石油学报, 2012, 33(4): 533 – 540.
- Hou Lianhua, Zou Caineng, Liu Lei, et al. Geologic essential elements for hydrocarbon accumulation within carboniferous volcanic weathered crusts in northern Xinjiang, China[J]. Acta Petrolei sinica, 2012, 33(4): 533 – 540.
- [34] 邹才能, 侯连华, 陶士振, 等. 新疆北部石炭系大型火山岩风化体结构与地层油气成藏机制[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(11): 1613 – 1626.
- Zou Caineng, Hou Lianhua, Tao Shizhen, et al. Hydrocarbon accumulation mechanism and structure of large-scale volcanic weathering crust of the Carboniferous in northern Xinjiang, China[J]. Science China: Earth Science, 2011, 41(11): 1613 – 1626.
- [35] Gong L, Liu B, Fu X F, et al. Quantitative prediction of sub-seismic faults and their impact on waterflood performance: Bozhong 34 oilfield case study[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 172(1): 60 – 69.
- [36] 漆家福, 夏义平, 杨桥. 油区构造解析[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 161.
- Qi Jiafu, Xia Yiping, Yang Qiao. Structural analysis of oilfield[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [37] Fossen H. Structural Geology[M]. New York: Cambridge University Press, 2010.
- [38] Gong L, Fu X F, Wang Z S, et al. A new approach for characterization and prediction of natural fracture occurrence in tight-oil sandstones with intense anisotropy[J]. AAPG Bulletin, 2019, 103(6): 1383 – 1400.

(编辑 董立)