

文章编号:1673-5005(2017)05-0001-08

doi:10.3969/j. issn. 1673-5005. 2017. 05. 001

车排子地区石炭系挤压逆冲构造区断层 共生裂缝发育程度定量表征

杨少春^{1,2}, 牛海瑞^{1,3}, 宋明水⁴, 赵永福^{1,4}, 汪 勇^{1,4}

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室,
山东青岛 266071; 3. 中石化新星山东新能源有限公司, 山东东营 257000;
4. 中国石化胜利油田分公司油气勘探管理中心, 山东东营 257017)

摘要:在准噶尔盆地车排子地区多期挤压逆冲构造背景下, 石炭系火山岩断裂伴生大规模构造裂缝。综合利用岩心、薄片、成像测井和地震等资料, 对车排子地区石炭系断层共生裂缝的发育程度进行定量化表征及预测。研究结果表明: 与逆断层伴生的高角度剪切缝和扩张裂缝是石炭系发育的主要裂缝类型, 构造裂缝的走向、倾角、密度及张开度等参数与断层密切相关; 研究区断裂级别可划分为 I ~ III 级, 通过建立断层共生裂缝密度分布函数, 得出 3 类断层对裂缝发育的控制范围分别为 5.5、3.0、0.9 km。在充分考虑不同级别断层对裂缝发育控制作用的基础上, 采用统计和回归分析的方法定量分析石炭系断裂强度, 通过全区断裂信息维到裂缝信息维的转换, 最终实现对车排子地区石炭系断层共生裂缝发育程度的精细刻画和定量表征。

关键词:挤压逆冲构造; 断裂级别; 裂缝密度; 定量表征; 车排子地区

中图分类号:TE 122.2

文献标志码:A

引用格式:杨少春,牛海瑞,宋明水,等. 车排子地区石炭系挤压逆冲构造区断层共生裂缝发育程度定量表征 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2017,41(5):1-8.

YANG Shaochun, NIU Hairui, SONG Mingshui, et al. Quantitative characterization of development degree of fault-related fracture in compressional thrust structure block of the Carboniferous in Chepaizi area[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(5):1-8.

Quantitative characterization of development degree of fault-related fracture in compressional thrust structure block of the Carboniferous in Chepaizi area

YANG Shaochun^{1,2}, NIU Hairui^{1,3}, SONG Mingshui⁴, ZHAO Yongfu^{1,4}, WANG Yong^{1,4}

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology,
Qingdao 266071, China;

3. SINOPEC Star Shandong New Energy Coompany Limited, Dongying 257000, China;

4. Management Center of Oil and Gas Exploration, SINOPEC Shengli Oilfield, Dongying 257017, China)

Abstract: Under the multi-phase compressional thrust structure setting in Chepaizi area, Junggar Basin, a large amount of fractures associated with local fault systems were formed within the Carboniferous volcanic rock. Using a comprehensive analysis of core, thin sections, image logs and seismic profiles data, a quantitative characterization and prediction of fault-related fracture development in Carboniferous of Chepaizi area was performed. The results show that the high angle shearing fractures and tensional fractures are the main types in Carboniferous. The fracture parameters, such as direction, dip angle, density,

收稿日期:2016-10-08

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05009001)

作者简介:杨少春(1962-),男,教授,博士,研究方向为油气地质及油藏描述。E-mail:scyang@upc.edu.cn。

通讯作者:牛海瑞(1991-),男,硕士研究生,研究方向为火山岩储层裂缝表征及预测。E-mail: niuhairui123@163.com。

and opening width are closely correlated with the fault. Based on the derived fault-control fracture density function, the fault grades of the study area can be divided into I, II, and III, with the effective control distances as 5.5, 3.0 and 0.9 km, respectively. A quantitative analysis of fault strength was also conducted, mainly using statistical and analytic methods to transform the regional fault information into the fracture information, resulting in a detailed description and a quantitative characterization of fault-related fracture development in the Carboniferous of Chepaizi area.

Keywords: compressional thrust structure; fault grade; fracture density; quantitative characterization; Chepaizi area

中国中西部地区造山褶皱带前缘发育了一系列不同类型的逆冲断裂构造带,近年来,国内外学者对逆冲断裂带的勘探研究取得了丰硕的成果和认识^[1-4]。准噶尔盆地西北缘是一个多期不同性质断裂叠加的逆冲断裂带,它的形成主要经历了海西中期的强烈挤压、海西晚期的大规模推覆及印支运动期的扭动变形3个演化阶段^[5-6],最终形成一个断层及裂隙发育的挤压逆冲构造区。车排子地区位于准噶尔盆地西北缘,区域构造上属于准噶尔类前陆盆地斜坡带,其东部以红车断裂带为界与中拐凸起及昌吉凹陷相接,南面为南缘冲断带的四棵树凹陷,西北伸入扎伊尔山山前,北与克百断褶带相接(图1(a)),平面形态呈三角形,主体走向为北西-南东向^[7-8]。据钻井资料揭示,研究区大部分地区缺失二叠系、三叠系和侏罗系,白垩系、古近系或新近系直接超覆于石炭系基底之上,石炭系岩性以火山熔岩和火山碎屑岩为主。勘探开发实践表明,车排子地区石炭系火山岩储集层虽然具有岩石致密、物性条件差的特点,但仍富集大量的油气,油气储量主要受断层及裂隙的发育程度所控制^[9-10],这与逆冲断裂带的发育紧密相关。因此,对断层共生裂隙的定量描述及预测成为下一步火山岩油气藏高效开发的关键。国内外学者对于断层及相关裂隙的定量表征方法方面已有部分研究成果,主要包括断层距离法^[11-13]、断面率法^[14-15]、物理实验模拟法^[16-17]、分形分维法^[18-20]和断面脱空法^[21-22]等。但对于挤压逆冲构造区,不同规模断层之间差异性大、对裂隙发育的控制作用也不同。基于此,笔者以车排子地区石炭系火山岩为解剖对象,对断层系统进行分类,明确不同级别断层对裂隙发育的控制范围,通过全区断

裂信息维到裂隙信息维的转换,建立断层共生裂隙密度计算模型,实现断层共生裂隙发育程度的量化评价与预测。

1 地质概况

车排子地区石炭系火山岩历经海西、印支、燕山和喜马拉雅等多期构造运动的影响和改造作用,内部被多条断裂切割形成众多的复杂断块。通过三维地震资料断裂分析明确断层级别及期次,通过岩心、薄片及成像测井资料对裂隙参数实现定量描述。

1.1 断层分布特征

车排子地区位于准噶尔盆地西北缘冲断带前端,构造运动剧烈,断裂十分发育。平面上,根据断层走向可分为近SN、近EW、NW和NE4个优势方向(图1(b)),并且呈现出明显的分区性。剖面上,车排子推覆构造前缘带以高角度逆冲断裂为主,自西向东呈现阶梯状断层组合,或与次级断层之间呈“y”字型组合样式(图1(c))。

以三维地震资料断裂解释为基础,根据断裂规模(延伸长度、断距、倾角等)、断层切割层位及对构造演化的控制作用将石炭系断层划分为I,II,III级断裂(表1)。其中,I级断裂主要与红车断裂带近于平行近SN向展布,共发育3条,延伸长度大于10 km,使得车排子凸起行迹为自东向西抬升的断阶带;II级断裂主要为NW向,共发育9条,延伸长度在5~8 km,控制着南北断块的展布方向;III级断裂主要为NE向,共发育33条,延伸长度小于5 km,数量众多且走向多变,使研究区断层进一步复杂化,形成良好的裂隙型储集层。

表1 车排子地区石炭系断裂分级

Table 1 Fault grade elements of Carboniferous in Chepaizi area

断层分级	延伸长度/km	断开层位	断层落差/m	倾角/(°)	断层性质
I 级断裂	10~15	C~K	200~300	40~70	逆断层
II 级断裂	5~10	C~J	70~150	30~60	逆断层
III 级断裂	1~5	C~J;C	10~50	20~40	逆断层和少量正断层

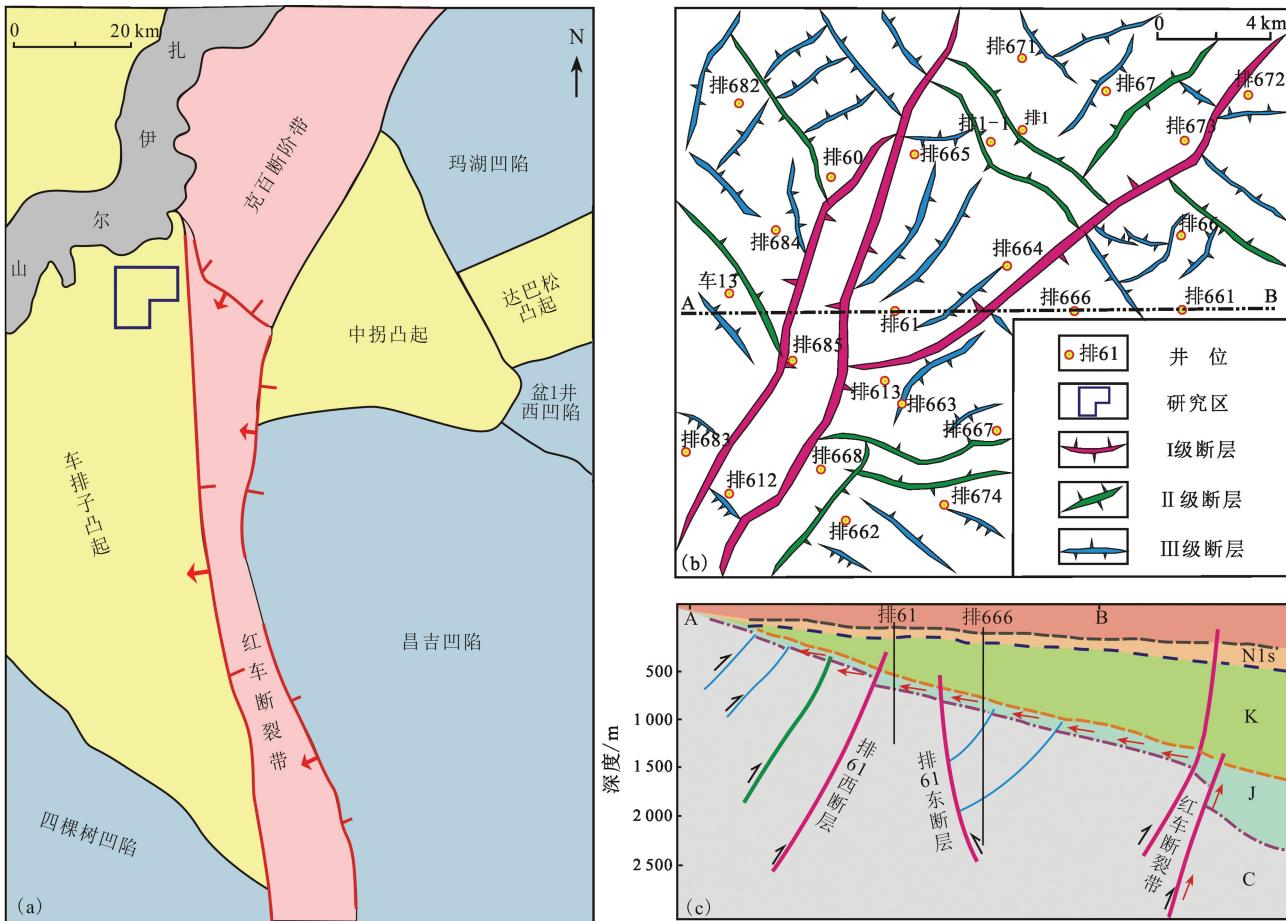


图 1 研究区构造位置及石炭系顶面断裂分布

Fig. 1 Tectonic position of study area and fault distribution of top surface of Carboniferous

1.2 裂缝参数定量描述

根据取心井岩心观察描述及成像测井解释的数据统计分析,研究区火山岩裂缝按地质成因和力学性质可分为成岩裂缝、张裂缝、构造剪切缝、风化裂缝和溶蚀裂缝等5种基本类型。其中,与逆断层伴生的扩张裂缝和剪切缝是石炭系发育的主要裂缝类型,一般成组出现且方向性明显。

1.2.1 裂缝组系与产状

统计表明,研究区裂缝走向集中分布于5个方位,分别为近NS向、NE向、NWW向、近EW向和NW向,裂缝优势发育方位以 5° 和 50° 为主(图2(a))。裂缝发育走向与其附近断层具有密切的相关性,NS和NE向的裂缝主要发育在I级断裂附近,而NWW和NW向的裂缝主要发育在次级断层附近,裂缝的优势方向与断层走向基本一致。裂缝倾角分布范围较大,但以高角度斜交缝($45^{\circ} \sim 75^{\circ}$)为主,占裂缝观测总数的58.6%,其次是低角度斜交缝($15^{\circ} \sim 45^{\circ}$),占24.2%,水平缝和垂直缝发育较少(图2(b))。

1.2.2 裂缝充填程度及形成期次

受多期挤压构造运动的影响,车排子地区火山岩裂缝具有多期次发育、充填和后期改造的显著特征。根据裂缝中矿物的充填程度,将研究区裂缝分为全充填(占46%)、半充填(占34%)、未充填(占20%)3类(图2(c))。裂缝充填矿物以方解石、硅质、石膏、绿泥石为主,局部可见黄铁矿等自生矿物。未充填和半充填裂缝对储层的储集和渗透能力有着良好的改造作用,为有效裂缝。构造裂缝与断层均为构造应力集中释放的结果,裂缝的形成和发展与断层之间存在密切关系。结合区域构造演化史分析,采用裂缝充填物碳氧稳定同位素分析测试手段确定研究区火山岩裂缝形成期次有3期,分别对应海西运动中晚期、印支运动期和燕山运动早期(图2(d))。

1.2.3 裂缝密度与张开度

裂缝密度是衡量裂缝发育程度的主要参数,在定量讨论构造裂缝发育程度时,通常采用裂缝线密度作为评价指标^[23-24],不同井的裂缝线密度差异较为明显,整体变化范围为1~10条/m,平均5条/m。

(图 2(e)), 反映了裂缝发育的非均质性。通常裂缝的开度是指在垂直裂缝面的方向上两裂缝壁之间的相对位移距离, 研究区裂缝开度主要分布在 0.05 ~ 0.1 mm, 占 51.7%, 多属于微裂缝(图 2(f))。裂缝发育密度、开度及延伸受控于断层的分布和断距, 排 664、排 665、排 61 井位于 I 级断裂附近, 裂缝密

度约 8 条/m, 开度大于 1mm; 排 682、排 674、排 661、排 662 井位于 III 级断裂附近, 裂缝密度仅为 2 ~ 3 条/m, 开度多小于 0.05 mm。因此, 断裂级别越高, 附近裂缝发育密度和宽度越大, 它们之间表现为较好的正相关关系, 可为后续断层共生裂缝的定量表征奠定基础。

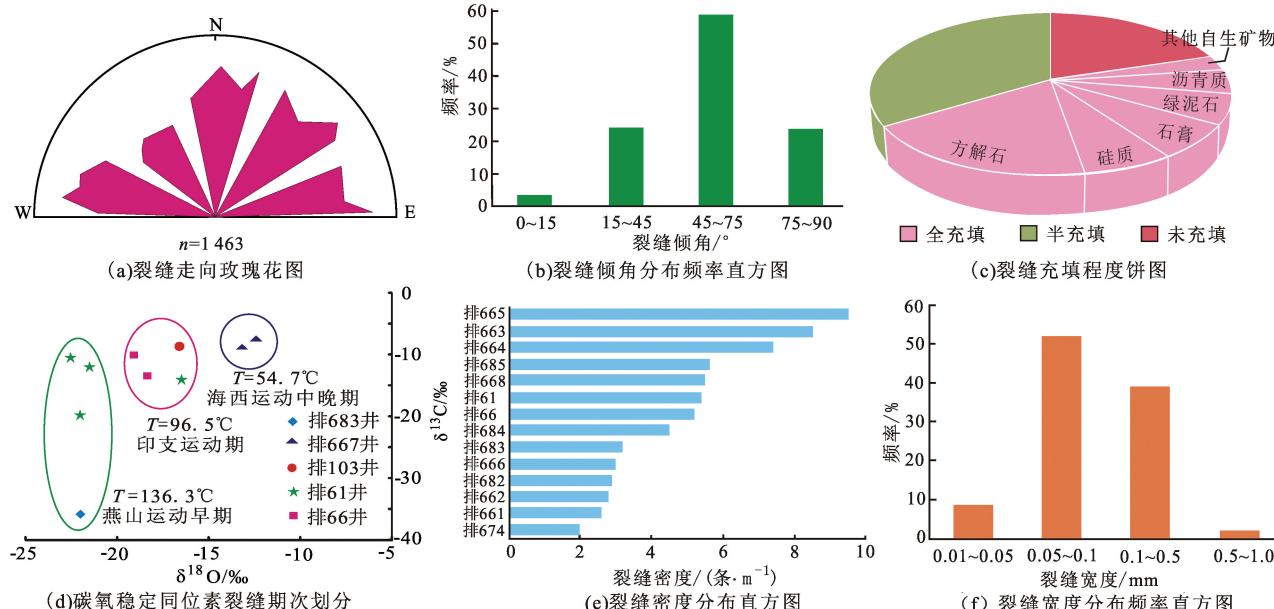


图 2 车排子地区石炭系不同裂缝参数统计

Fig. 2 Statistical graphs of different fracture parameter of Carboniferous in Chepaizi area

2 不同级别断层对裂缝发育的控制作用

在对研究区不同规模断层分级的基础上, 根据成像测井资料统计裂缝线密度, 建立各井点的裂缝密度参数与距断层的距离之间的拟合关系, 根据所拟合出的关系图, 裂缝密度与距断层距离之间相关性明显, 主要表现为: 随着与断层距离的增加, 断层共生裂缝发育的密度呈幂函数递减分布; 断层级别越大, 随断层距离的增大其附近裂缝发育密度递减率越慢。给出不同级别断层共生裂缝密度分布函数。

$$\text{I 级断层: } y = 10.329x - 0.654, r = 0.87. \quad (1)$$

$$\text{II 级断层: } y = 4.805x - 0.502, r = 0.90. \quad (2)$$

$$\text{III 级断层: } y = 1.982x - 0.904, r = 0.91. \quad (3)$$

式中, y 为裂缝发育密度, 条/m; x 为距断层的距离, km; r 为相关性系数。

在断层共生裂缝分布函数上存在裂缝密度骤降的临界点, 在临界点以内, 裂缝密度骤减为“断层控制裂缝发育带”, 而在临界距离以外, 裂缝密度缓慢减小为“区域控制裂缝发育带”。根据研究区 3 类

级别断层对裂缝控制距离的对比, I 级断层对附近裂缝控制影响距离 $C = 5.5$ km, 该带裂缝发育密度高达 10 条/m; II 级断层对附近裂缝控制影响距离 $C = 3.0$ km, 该带裂缝发育密度为 7 条/m; III 级断层对附近裂缝控制影响距离 $C = 0.9$ km, 该带裂缝发育密度为 5 条/m, 而区域控制裂缝发育带的裂缝密度普遍小于 3 条/m(图 3)。由断层共生裂缝发育模式图可以看出, 裂缝的发育具有明显的分带性, 一方面由于逆冲断层上盘变形程度比下盘大, 使得上盘裂缝发育程度更高; 另一方面随着断距和断层破碎带宽度的增大, 断控裂缝发育带的宽度和密度均增大。

3 裂缝发育程度定量预测

随着油气田勘探和开发的不断深入, 断层共生裂缝的定量描述变得尤为重要, 迫切需要一种新的且有效的方法对构造裂缝进行量化描述和预测。基于 3 类不同级别断层对构造裂缝发育的控制作用, 本文中提出利用断裂强度分析定量表征裂缝发育程度的方法。

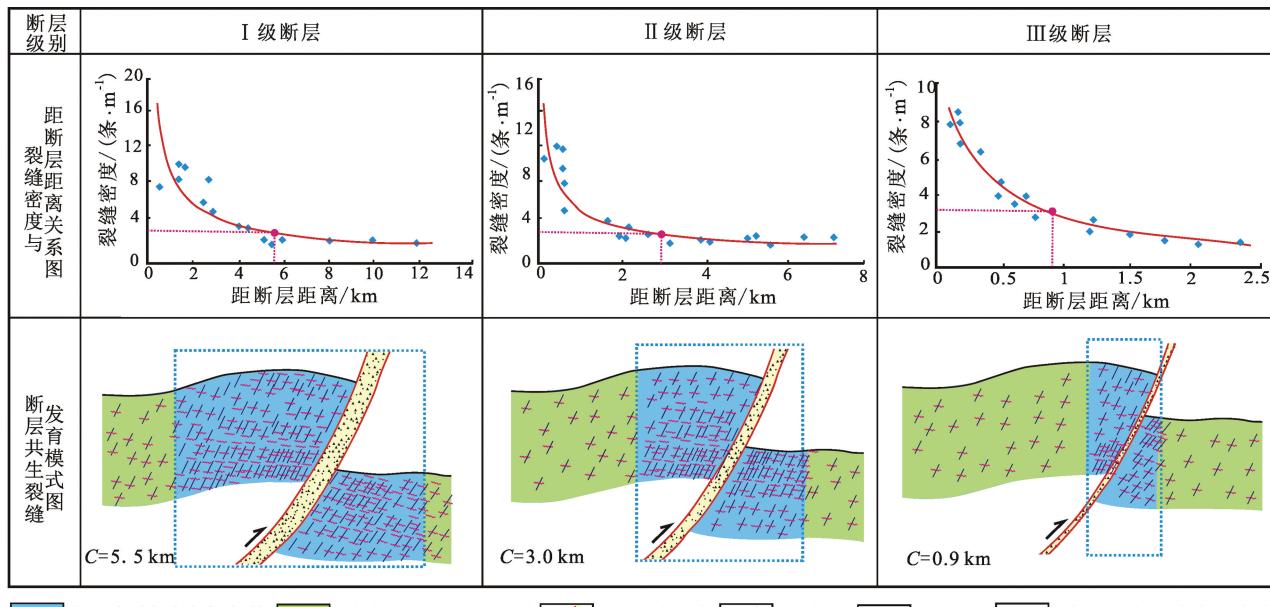


图 3 不同级别断层控制下的裂缝密度分布函数及发育模式

Fig. 3 Density function and fracture development model for different grades of fault-controlled fracture

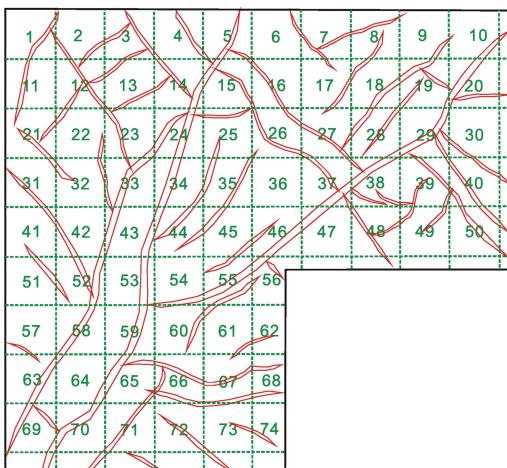
3.1 断裂强度分析

断层和裂缝都是岩石破裂的结果, 具有自相似的分形结构, 只是尺度上存在差异^[25], 这是通过断裂强度分析预测裂缝的理论依据。在车排子地区石炭系顶面构造图数字化的基础上, 根据断层分布特征, 将石炭系断层系统划分为 74 个边长为 2 km 的正方形网格(图 4(a))。每个网格作为一个计算单

元, 断裂强度的计算公式如下:

$$Q = L_1 C_1 + L_2 C_2 + L_3 C_3 \quad (4)$$

式中, Q 为断裂强度; L_1 为网格内 I 级断层的总长度, km; C_1 为 I 级断层对裂缝的控制距离, km; L_2 为网格内 II 级断层的总长度, km; C_2 为 II 级断层对裂缝的控制距离, km; L_3 为网格内 III 级断层的总长度, km; C_3 为 III 级断层对裂缝的控制距离, km。



(a) 石炭系顶面断层网格单元划分

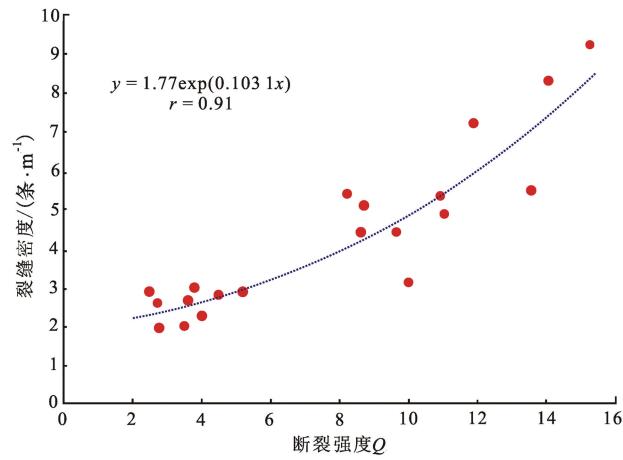


图 4 断裂强度分析

Fig. 4 Analysis of fault strength

在求取各单元网格内断裂强度后, 通过克里金插值法即可得到不同井点的断裂强度值。以成像测井解释出的裂缝发育密度刻度各井点的断裂强度值, 从相关性分析图上可以看出(图 4(b)), 车排子地区构造裂缝发育程度与断裂强度具有良好的指数

拟合关系, 相关系数达 0.91。断裂强度分析克服了简单分形方法在表征裂缝分布方面的不足, 突出了不同级别断层对裂缝发育的控制作用, 因此可实现利用断裂强度量化分析预测裂缝有利发育区的目的。

3.2 裂缝有利发育区预测

利用断层共生裂缝密度拟合公式即可实现全区断裂信息维到裂缝信息维的转换，并制作了车排子地区石炭系构造裂缝密度等值线图（图5），可定量预测裂缝的平面分布。从图5中可以看出，断层的展布方位和规模控制着裂缝的发育及分布规律。平面上，裂缝主要沿Ⅰ级和Ⅱ级断层的走向呈条带状或斑状分布，但单条断层附近没有连续的裂缝发育区，裂缝发育受断层之间组合方式的控制，具体表现为：在不同级别断层的交汇处（排673井、排665和排682井）、断层走向转弯处（排60井）以及断层端部（排668井和排612井南），均为裂缝密度高值区，可达8~12条/m，这是由于在这些部位附近构造活动强烈，地应力集中分布产生的结果。而在Ⅲ级断层附近或距离断层较远的排671井、排661井、排662井和排674井一带，为裂缝密度低值区，小于4条/m。

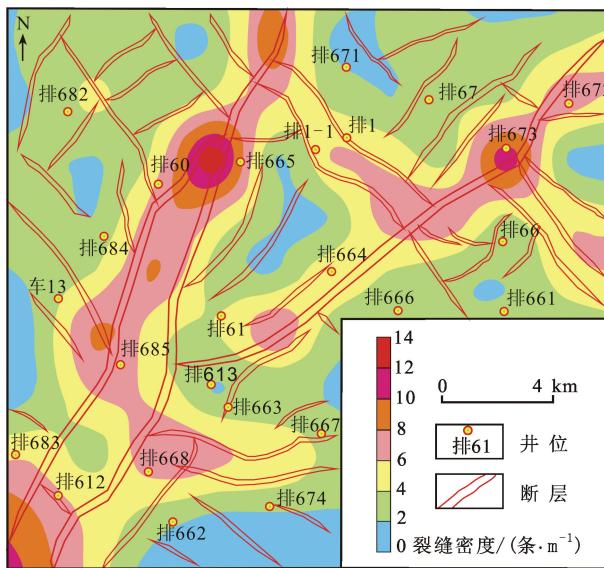


图 5 车排子地区石炭系裂缝发育密度平面预测

Fig. 5 Plane prediction charts of fracture density of Carboniferous in Chepaizi area

一般利用相对误差来反映裂缝预测的准确程度。通过对比岩心及成像测井所观测到的裂缝密度与预测得到的裂缝密度(表2)发现,其中85%的井相对误差控制在25%以内,整体上符合良好,但车13井、排671井和排683井相对误差较大,可能是由于局部构造应力作用的影响。

结合试油试采资料分析认为,已有的试油井分布与裂缝的分布密切相关。如位于裂缝较发育区的排673井、排665井、排66井和排61井的产油量高,日产油分别为34.39、36.28、18.71和11.9 t·位。

于裂缝不发育区的排 662 井、排 661 井和排 674 井的日产油量分别为 2.08、1.67 和 2.48 t。但也发现,位于裂缝发育区的排 664 井仅为油花显示,是由于其裂缝大部分被方解石、石英等矿物充填所致。因此,该裂缝定量表征方法及预测结果较可靠,可为进一步油气勘探开发提供参考。

表 2 车排子地区石炭系裂缝预测相对误差

分析及试油成果

Table 2 Error analysis of fracture prediction and well testing results of Carboniferous in Chepaizi area

井号	观测裂缝密度/(条·m ⁻¹)	预测裂缝密度/(条·m ⁻¹)	相对误差/%	日产油/t
排61	5.4	4.2	16.7	11.9
排66	5.0	3.8	24.0	18.71
排661	2.6	2.9	11.5	1.67
排662	2.8	2.3	17.8	2.08
排664	7.4	6.0	18.9	油花
排665	9.5	8.0	15.7	36.28
排666	3.0	2.7	10.0	9.06
排668	5.5	6.1	10.9	9.94
排673	8.5	10.0	17.6	34.39
排674	2.0	2.2	10.0	2.48
排682	2.9	2.4	17.2	油花
排683	3.2	5.1	59.3	油花
排684	4.5	3.8	15.6	
排685	5.6	6.4	14.3	
排67	2.3	2.7	17.4	
排672	5.0	6.3	16.0	油花
排667	2.7	3.2	18.5	5.9
车13	2.0	3.9	95.0	油花
排671	2.9	2.0	31.1	
排1-1	4.5	5.2	15.5	0.27

4 结 论

(1) 车排子地区石炭系断层走向可分为近 SN、近 EW、NW 和 NE 4 个优势方向, 断层级别可划分为 I ~ III 级。I 级断裂延伸长度大于 10 km, II 级断裂延伸长度在 5 ~ 8 km, III 级断裂延伸长度小于 5 km。

(2) 研究区裂缝走向集中分布于近 NS 向、NE 向、NWW 向、近 EW 向和 NW 向 5 个方位,与断层走向基本一致。裂缝类型以高角度剪切缝为主,充填程度较高。裂缝发育密度、开度及延伸受控于断层的分布和断距,断裂级别越高,裂缝发育密度越大。

(3) 不同级别断层对裂缝发育的控制作用也不同, 断层级别越大, 随断层距离的增大其附近裂缝发育密度递减率越慢, 裂缝的发育具有明显的分带性, I 级断层对附近裂缝控制影响距离为 5.5 km, II 级断层对附近裂缝控制影响距离为 3.0 km, III 级断层

对附近裂缝控制影响距离为 0.9 km。

(4) 断裂强度的量化分析实现了全区断裂信息维到裂缝信息维的转换,可定量预测裂缝的平面分布。裂缝主要沿 I 级和 II 级断层的走向呈条带状或斑状分布,在不同级别断层的交汇处、断层走向转弯处以及断层端部,均为裂缝密度高值区。

参考文献:

- [1] 贾承造,魏国齐,李本亮,等.中国中西部两期前陆盆地的形成及其控气作用[J].石油学报,2003,24(2):13-17.
JIA Chengzao, WEI Guoqi, LI Benliang, et al. Tectonic evolution of two-epoch foreland basins and its control for natural gas accumulation in China's mid-western areas [J]. Acta Petrolei Sinica, 2003,24(2):13-17.
- [2] 夏义平,徐礼贵,郑良合,等.鄂尔多斯盆地西缘逆冲断裂带构造特征及油气勘探方向[J].中国石油勘探,2005,10(5):13-19.
XIA Yipin, XU Ligui, ZHENG Lianghe, et al. Structural features and oil-gas prospecting targets of thrusting fault belt in western edge of Ordos Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2005,10(5):13-19.
- [3] 刘华,陈建平.准噶尔盆地乌夏逆冲断裂带三叠纪-侏罗纪构造控扇规律及时空演化[J].大地构造与成矿学,2010,34(2):204-215.
LIU Hua, CHEN Jianping. Regularities of Triassic-Jurassic structural movements controlling fans development in the Wuxia thrust belt of Junggar Basin [J]. Geotectonica Et Metallogenica, 2010,34(2):204-215.
- [4] AYDIN M G, ENGELDER T. Revisiting the Hubbert—Rubey pore pressure model for overthrust faulting: inferences from bedding-parallel detachment surfaces within Middle Devonian gas shale, the Appalachian Basin, USA [J]. Journal of Structural Geology, 2014,69:519-537.
- [5] 谭开俊,田鑫,孙东,等.准噶尔盆地西北缘断裂带油气分布特征及控制因素[J].断块油气田,2004,11(6):13-14.
TAN Kaijun, TIAN Xin, SUN Dong, et al. Controlling factors and characteristic of petroleum occurrence in fault belt in northwestern margin of Junggar Basin [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2004,11(6):13-14.
- [6] 袁云峰,才业,樊佐春,等.准噶尔盆地红车断裂带石炭系火山岩储层裂缝特征[J].岩性油气藏,2011,23(1):47-51.
YUAN Yunfeng, CAI Ye, FAN Zuochun, et al. Fracture characteristics of Carboniferous volcanic reservoirs in Hongche fault belt of Junggar Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2011,23(1):47-51.
- [7] 杨恺,董臣强,徐国盛.车排子地区新近系沙湾组物源与沉积相分析[J].中国石油大学学报(自然科学版),2012,36(3):7-13.
YANG Kai, DONG Chenqiang, XU Guosheng. Analysis of provenance and sedimentary facies of Neogene Shawan formation in Chepaizi area [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012,36(3):7-13.
- [8] 孟凡超,操应长,崔岩,等.准噶尔盆地西缘车排子凸起石炭系火山岩储层成因[J].中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(5):22-31.
MENG Fanchao, CAO Yingchang, CUI Yan, et al. Genesis of Carboniferous volcanic reservoirs in Chepaizi salient in western margin of Junggar Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016,40(5): 22-31.
- [9] 董臣强.车排子地区火成岩油气成藏条件及勘探关键技术[J].油气地质与采收率,2015,22(2):45-50.
DONG Chenqiang. Hydrocarbon accumulation conditions and key exploration technologies of igneous rock in the Chepaizi area [J]. Petroleum Geology & Recovery Efficiency, 2015,22(2):45-50.
- [10] 温雅茹,杨少春,汪勇.火山岩储集空间组合及储油模式:以准噶尔盆地西北缘车排子地区石炭系为例[J].中国矿业大学学报,2016,45(3):582-590.
WEN Yaru, YANG Shaochun, WANG Yong. Combination of volcanic reservoir spaces and hydrocarbon storage modes: a case study on the Carboniferous system in Chepaizi area, west of Junggar Basin [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016,45(3):582-590.
- [11] 高孝巧,张达.逆断层控制构造裂缝发育的力学机制模拟[J].地质力学学报,2015,21(1):47-55.
GAO Xiaoqiao, ZHANG Da. Numerical simulation of structural fractures controlled by reverse fault [J]. Journal of Geomechanics, 2015,21(1):47-55.
- [12] 鞠玮,侯贵廷,黄少英,等.断层相关褶皱对砂岩构造裂缝发育的控制约束[J].高校地质学报,2014,20(1):105-113.
JU Wei, HOU Guiting, HUANG Shaoying, et al. Constraints and controls of fault related folds on the development of tectonic fractures in sandstones [J]. Geological Journal of China Universities, 2014,20(1):105-113.
- [13] 冯建伟,昌伦杰,孙致学,等.多因素约束下的致密砂岩气藏离散裂缝特征及地质模型研究[J].中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(1):18-26.
FENG Jianwei, CHANG Lunjie, SUN Zhixue, et al.

- Geological model and characteristics of discrete fracture network in tight sandstone gas reservoir constrained by multi-factors [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(1):18-26.
- [14] 刘景新. 火成岩油气储层构造裂缝发育程度预测研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2014, 44(2): 279-284.
- LIU Jingxin. The method of forecasting the developmental characteristics of tectoclase in igneous reservoir [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2014, 44(2):279-284.
- [15] 李乐, 侯贵廷, 潘文庆, 等. 逆断层对致密岩石构造裂缝发育的约束控制[J]. 地球物理学报, 2011, 54(2): 466-473.
- LI Le, HOU Guiting, PAN Wenqing, et al. The constraints of reverse fault to the development of structural fractures in compacted rocks [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(2):466-473.
- [16] 张云峰, 刘佩佩, 齐庆鹏, 等. 海拉尔盆地贝尔凹陷基岩断层相关裂缝发育特征及模拟实验研究[J]. 地质科学, 2012, 47(4):1176-1187.
- ZHANG Yunfeng, LIU Peipei, QI Qingpeng, et al. Study on fault associated crack development characteristics and simulation experiment about the buried hill reservoir in the Beier Sag, Hailar Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2012, 47(4):1176-1187.
- [17] 张云峰, 赵旭光, 王宇, 等. 正断层伴生裂缝物理模拟实验研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(36):8975-8979.
- ZHANG Yunfeng, ZHAO Xuguang, WANG Yu, et al. Physical simulation experiment of normal faults associated fractures [J]. Science Technology & Engineering, 2010, 10(36):8975-8979.
- [18] 冯阵东, 戴俊生, 邓航, 等. 利用分形几何定量评价克拉2气田裂缝[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(6): 928-933.
- FENG Zhendong, DAI Junsheng, DENG Hang, et al. Quantitative evaluation of fractures with fractal geometry in Kela-2 gas field [J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(6):928-933.
- [19] 周廷全, 陈俊侠. 济阳坳陷桩西古潜山储层裂缝的分形特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2011, 35(5):1-5.
- ZHOU Tingquan, CHEN Junxia. Fractal characteristics of fracture in Zhuangxi buried-hill reservoir, Jiyang de-
- pression [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011, 35(5):1-5.
- [20] WATANABE K, TAKAHASHI H. Parametric study of the energy extraction from hot dry rock based on fractal fracture network model [J]. Geothermics, 1995, 24(2):223-236.
- [21] 徐国强, 刘树根, 李国蓉, 等. 断层相关裂隙的一种定量计算方法[J]. 地质学报, 2006, 80(2):192-195.
- XU Guoqiang, LIU Shugen, LI Guorong, et al. A new method for quantitative calculating of fault fractured pore space [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(2):192-195.
- [22] 李小刚, 徐国强, 韩剑发, 等. 断层裂缝定量描述技术在塔中X井区良里塔格组裂缝研究中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(2):344-352.
- LI Xiaogang, XU Guoqiang, HAN Jianfa, et al. Application of a new method for quantitative calculating of fault-related fracture:a case study from Lianglitage Formation in Tazhong X Well Area, Tarim Basin, China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(2):344-352.
- [23] 宋璠, 苏妮娜, 冯建伟, 等. 基于摩擦效应的砂岩裂缝密度定量预测[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(6):1-8.
- SONG Fan, SU Nina, FENG Jianwei, et al. Quantitative prediction of fracture density based on friction effect [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(6):1-8.
- [24] 袁静, 李春堂, 杨学君, 等. 东营凹陷盐家地区沙四段砂砾岩储层裂缝发育特征[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(5):1649-1659.
- YUAN Jing, LI Chuntang, YANG Xuejun, et al. Development characteristics of glutinite reservoir fractures of the fourth member of Shahejie Formation in Yanjia area, Dongying sag [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(5):1649-1659.
- [25] 付晓飞, 苏玉平, 吕延防, 等. 断裂和裂缝的分形特征[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2007, 32(2): 227-234.
- FU Xiaofei, SU Yuping, LÜ Yanfang, et al. Fractal characteristic and geological meaning of fault and fracture [J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2007, 32(2):227-234.

(编辑 修荣荣)