

文章编号:0253-9985(2011)06-0928-06

利用分形几何定量评价克拉2气田裂缝

冯阵东^{1,2},戴俊生¹,邓航^{3,4},肖香娇⁵,赵力彬⁵,郑广全⁵,王珂¹

(1. 中国石油大学 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266555;

2. 中国石化 中原油田分公司 勘探开发科学研究院, 河南 濮阳 470001;

3. 美国密苏里科技大学 地球科学系, 美国密苏里州 65401; 4. 中国石油大学 地球科学学院, 北京 102249;

5. 中国石油 塔里木油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 库尔勒 841000;)

摘要:根据断层与构造裂缝存在的关系,利用分形几何方法处理断裂系统,并结合测井解释结果建立分维值大小与裂缝密度的对应关系,对古近系库姆格列木群白云岩段、下白垩统巴什基奇克组第二、第三岩性段顶面断层进行分形统计,建立井点断层分维值与裂缝线密度的关系,在此基础上对井间裂缝分布进行了预测。研究认为,断层分维值随着断层密度、延伸长度的增加而增大,井点处断层分维统计值与测井解释得到的裂缝线密度呈正相关关系;平面上,裂缝发育受背斜形态影响明显,靠近背斜轴部、断层分维值大于1.25的区域最有利于裂缝发育;A3井附近,3个储层段裂缝发育密度偏大,部分裂缝可能穿透了中间的隔层,造成附近气井出水。研究结果表明,利用分形几何定量评价裂缝对勘探开发方案部署有指导意义,可以用来对油气田裂缝性储层进行评价。

关键词:定量预测;裂缝;断层;分维值;储层;克拉2气田

中图分类号:TE112

文献标识码:A

Quantitative evaluation of fractures with fractal geometry in Kela-2 gas field

Feng Zhendong^{1,2}, Dai Junsheng¹, Deng Hang^{3,4}, Xiao Xiangjiao⁵, Zhao Libin⁵, Zheng Guangquan⁵, Wang Ke¹

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266555, China;

2. Exploration and Development Research Institute, SINOPEC Zhongyuan Oilfield Company, Puyang, Henan 457001, China;

3. Geological and Earth Science, Missouri University of Science and Technology, Missouri 64501, USA;

4. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

5. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang 841000, China)

Abstract: According to the relationship between faults and structural fractures, this paper processed fault system with fractal geometry, and set up the relationship of dimension value with fracture density in combination with log interpretation, performed fractal statistics of faults on top of the dolomite interval in the Kumugeliemu Group (Paleogene), and the second and third lithologic intervals of the Bashijiqike Formation (Lower Cretaceous), built relationship between fractural dimension values of faults at well point and the fracture density, and predicted interwell fracture distribution. The fractal dimension value of faults increases with fault density and length increase. Statistical values of fractal dimension of faults at well point show positive correlation with the linear density of fractures obtained by well logging interpretation. Fracture growth is significantly influenced by the geometry of anticlines. Fractures are commonly well developed in areas close to the axis of anticline and having a fractal dimension value over 1.25. The fracture density of three reservoir intervals near the A3 well is relatively large. Furthermore, some of the fractures may penetrate through the barriers, causing the watering of gas well. The study indicates that quantitative evaluation of fractures by using fractal geometry can guide exploration and development planning, and can be used to evaluate fractured reservoirs in oil/gas fields.

收稿日期:2011-05-21。

第一作者简介:冯阵东(1983—),男,博士后,油区构造解析、裂缝预测。

基金项目:国家油气专项(2011ZX05042-001-001)。

Key words: quantitative forecast, fracture, fault, fractal dimension value, reservoir, Kela-2 gas field

克拉2气田由于储层厚度较大,物性较好^[1],开发多年以来,裂缝对气田的影响一直缺乏研究。裂缝的存在会改善气藏的孔隙度,对渗透率的影响尤为明显,裂缝带试井渗透率可以达到测井解释数值的2个数量级以上,明显的影响了气田的开发,迫切需要进行裂缝的识别、描述与预测。笔者根据断层与构造裂缝存在的关系,利用分形几何方法处理断裂系统,并结合测井解释结果建立分维值大小与裂缝密度的对应关系,在井点控制的基础上,对裂缝的平面分布进行定量预测。

1 方法介绍

分形几何作为研究无规则、混乱而复杂、但具有自相似性体系的有效方法,早在20世纪80年代便开始应用于石油地质学之中,在断裂体系描述、流体矿产预测、断面结构力学、裂缝预测等方面取得了一系列进展^[2-8]。岩层中裂缝以构造成因为主,同一期构造应力大于岩石的破裂强度时,便会形成断层、裂缝、微裂缝等不同观察尺度下的破裂构造^[9-11],这些构造成因上具有联系,空间几何形态、组合关系、交叉角度等方面具有相似性^[12]。因此构造裂缝可以看作断层在标尺缩小时的表现形式,只需要对断裂系统进行分形处理,求取断层的分维值,就可以定量评价裂缝的发育情况。断裂系统可以使用分维数、统计自相似性和幂函数等为工具来研究,以分维数 D 来度量。断裂和裂缝的分布和几何形态具有明显的分形结构。根据分形几何的原理,断裂的分布满足:

$$N(r) = Cr^{-D} \quad (1)$$

式中: D 为分维值,无量纲; r 为网格边长,m; $N(r)$ 为包含有断层的边长是 r 的方格个数,个; C 为常数。

2 克拉2气田断层的分形统计

由于克拉2气田的主力储层是巴什基奇克组砂岩,其次是库姆格列木群白云岩、底砾岩,因此裂缝的预测主要针对这些层位。由于工区地震品质较差,利用分形方法在地震数据体识别裂缝难

度较大,另外工区钻井密度较小,取心较少,分形方法虽然可以识别单井裂缝^[13-15],但井间插值准确性不高,无法达到裂缝预测的目的。由于工区多数井进行过成像测井,单井识别裂缝难度不大,只需用分形几何方法处理断裂系统,用测井解释结果刻度断层分维值,便可以用分维值为指标进行裂缝评价。巴什基奇克组厚度较大,在开发上划分出3个岩性段,对比各岩性段顶面断裂系统,发现3个层段断裂差异较大,但是白云岩顶面与巴什基奇克组第一岩性段顶面断层发育基本相同,因此,这一层段的裂缝发育情况可以使用白云岩顶面断层系统的分形数据来评价。而巴什基奇克组第二、第三岩性段断层分形特征在根据相应的顶面断层分布图来计算。

2.1 断层分维数计算

将3个层位的顶面断层分布图划分区块,每个层位断层分布地区划分为116个边长为1 099 m的正方形区块(图1),将每个区块作为一个统计对象,分别计算断层分维值,并将计算得来的数值赋予对应区块的正方形形心的大地坐标。

分别使用边长为370,296,222,148,74,37 m的正方形覆盖(将最小网格的边长37 m作为单位长度),分别统计对应边长下包含断层的网格个数 $N(r)$,将对应数值在双对数坐标系中拟合,得到断层分布的分形特征曲线(图2),同时可以得到特征曲线的表达式以及分维数 D ,每个区块分维值的大小可以反映该区断裂的发育程度。

2.2 断层分维值地质意义探讨

统计不同区块断层分维数可以发现(图1),随着区块内断层密度的增加、延伸长度的增大,分维值明显增大。白云岩顶面27区块仅一条断层,分维值仅为0.988 1。随着断层密度、累计长度增大、间距减小,断层分维值逐渐增大,白云岩段23区块为1.171 6,白云岩段78区块为1.289 4,第三岩性段65区块为1.371 4。白云岩56区块断层的累计长度为27区块的2倍左右,但是两图的分维值却同为0.988 1,这是由于56区块的断层间距大于区块分形统计的尺度(最大标尺370 m),两条断层相对孤立,等于一条断层的统计值。第二

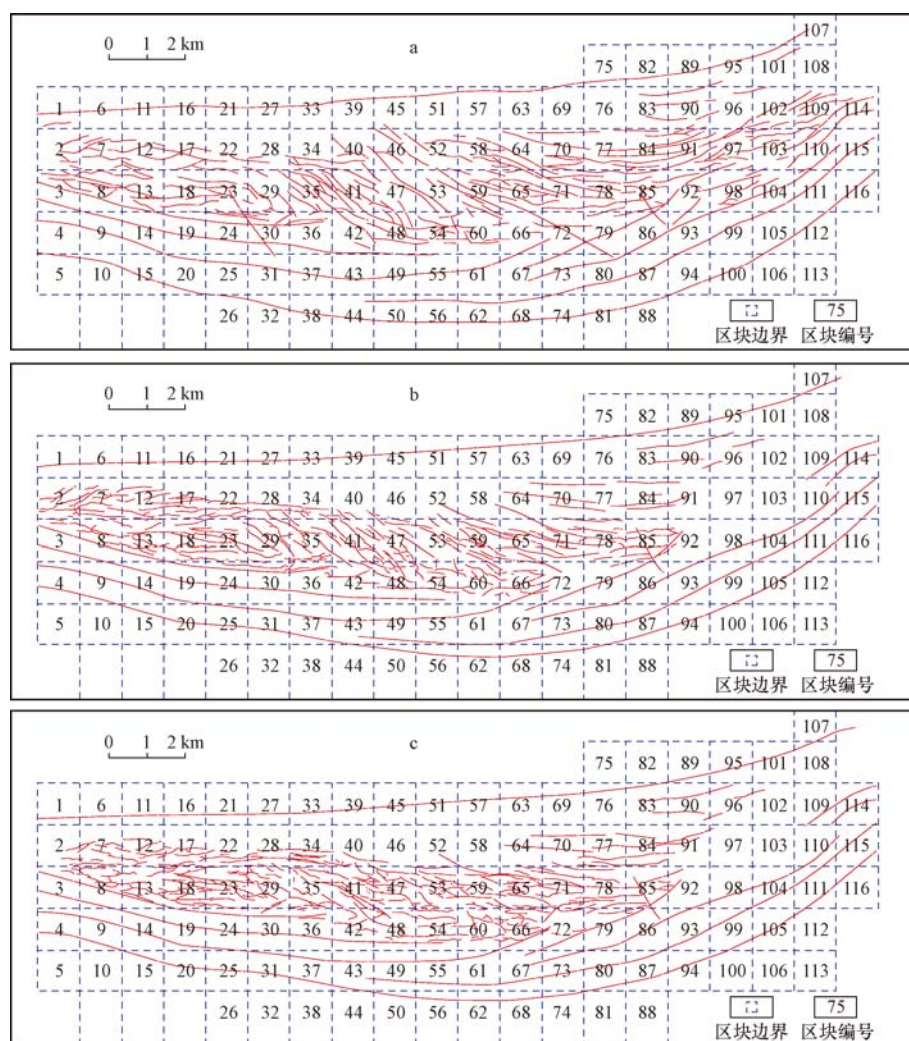


图1 克拉2气田白云岩顶面断裂系统分形统计区块划分

Fig. 1 Block division for fractal statistics of fault system on top of dolomite layer in Kela-2 gas field

a. 第一岩性段; b. 第二岩性段; c. 第三岩性段

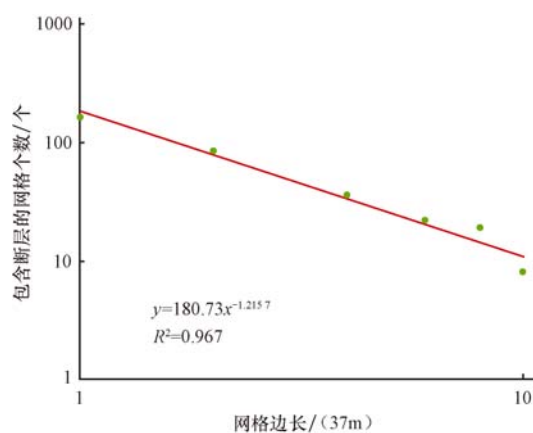


图2 克拉2气田白云岩顶面区块8断层分形特征曲线

Fig. 2 Fractal feature curve of faults on top of dolomite layer in Block 8, Kela-2 gas field

岩性段34区块的断层分维值1.2437明显大于白云岩23区块的1.1716,而断层的累计长度后者更大,说明断层的间距相对于断层累计长度,更能影响断层的分维值。第三岩性段65区块中断层间距最小、累计长度相最大,断层走向变化明显,且交叉错乱,分维值最大。

从整体上看,断层的间距对分维值贡献最大,区域内断层的累计长度次之,断层之间的交叉会增大断层分维值。对应地质模型中,规模较大的边界断层控制整个背斜,大型断层自身卸载应力速度较快,其控制的裂缝发育带宽度有限,因此分维值偏小。断层密度增大时统计分维值较大,这些断层往往规模较小、应力释放较慢,相邻断层所控制的裂缝发育带叠加,更利于裂缝的发育。

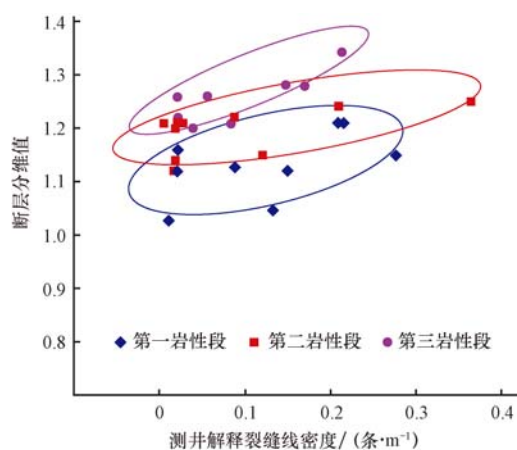


图3 克拉2气田裂缝密度与断层分维值关系

Fig. 3 Relationship between fracture density and fault fractal dimension value in Kela-2 gas field

3 断层分维值与裂缝对应关系

克拉2气田钻井密度较小(共20多口),利用成像、倾角测井资料对巴什基奇克组第一、第二、第三岩性段进行裂缝统计,识别出裂缝的井分别为9口、11口、9口。统计各井段裂缝的线密度,将计算得到的断层分维进行插值,读取每口井对应层位的分维值,并以裂缝线密度为横坐标,以断裂分维数为纵坐标,将对应数值投影到坐标系中(图3),发现每个层位裂缝的线密度与对应位置断层的分维数在整体上正相关。因此,不同层位断层分维数的平面分布可以作为裂缝预测的定量指标,分维数较大的区域对应裂缝发育区。

4 克拉2气田裂缝发育带预测

将计算得到的每层116个区块的分维值作为每个正方形形心的特征值,通过克里格插值,得到可以反应断层、裂缝密度发育特征的分维值等值线(图4)。

平面上,靠近背斜的轴部断层的分维值偏高,向两翼逐渐变小(图4,图5)。白云岩段顶面断层分维值在平面上存在东、西两个高值区,西部高值区靠近A3井,最大值为1.2934,东部高值区则分布在B1井周围,最大值为1.2894,这种分布恰好对应克拉2背斜的东、西两个高点(图4)。对比断层平面分布图(图1)与断层分维等值线图发现

(图4),西部高点附近分维值较大的35、41区块以及东部分维值较大的78、85、91三个区块全部分布在背斜的轴部,这些地区的断层分维值大于1.25,对应断层相对发育。靠近背斜的翼部,仅发育少量规模较大的断层,断层在走向上变化缓慢,且少有交叉,断层分维值多数地区小于1.0。从应力场的角度考虑,地层在受区域挤压应力作用下形成背斜,因白云岩段相对于中和面有弱伸展作用,背斜的轴部相对于两翼地层岩石弯曲强度最大,是派生张应力最集中的部位;背斜轴部埋深较浅,围压相对较小,岩石的破裂强度小于背斜两翼。因此,造成背斜轴部的小断层相对发育,断层间距较小,相邻断层所控制的裂缝带相互叠加,造成裂缝密度相对较大。通过与测井解释结果对比发现,白云岩段至巴什基奇克组第一岩性段分维值大于1.25的区域裂缝最发育,大于1.15的区域裂缝比较发育。

第二岩性段顶面断层分维的较大值依然靠近背斜的轴部,整体上比白云岩段数值略小。由于断层的分维值大小在一定程度上能反映断层的密集程度,白云岩段两边界断层限制的区域面积明显大于第二岩性段对应面积,说明白云岩段的断层明显比第二岩性段发育。在断层分维分布趋势上,西部高点附近的分维高值区仍然存在,中心略有偏移,说明该区块的断层在垂向上连续性较好,多条断层能够穿透白云岩段至第二岩性段,致使断层的分维值相差不大。沿背斜轴部至东部高点,分维高值区域呈串珠状分布,轴部走向由近东西向变化为北东向后,断层不再发育,失去断层分形的统计意义,为分维值的空白区域。

第三岩性段顶面断层分维整体偏大,沿背斜轴部分布有大面积分维值大于1.25的区域,可能是因为背斜在剖面上呈扇形展开,断层对倾并向收敛,对于持续发育的断层则在面积较小的第三岩性段顶面相对集中,造成分维值明显偏大。分维的高值区域由西部高点向东延伸,一直到东部高点附近,中间并未间断,说明在第三岩性段顶面的两高点之间的位置,相对高点断层发育已经没有了明显的劣势。沿东部高点继续向东延伸,分维分布趋势与第二岩性段顶面相似,背斜走向变化为北东走向后,轴部断层不发育。

从垂向上看,各个层位靠近背斜轴部断层相对发育,断层走向沿与背斜轴部走向近平行,断层

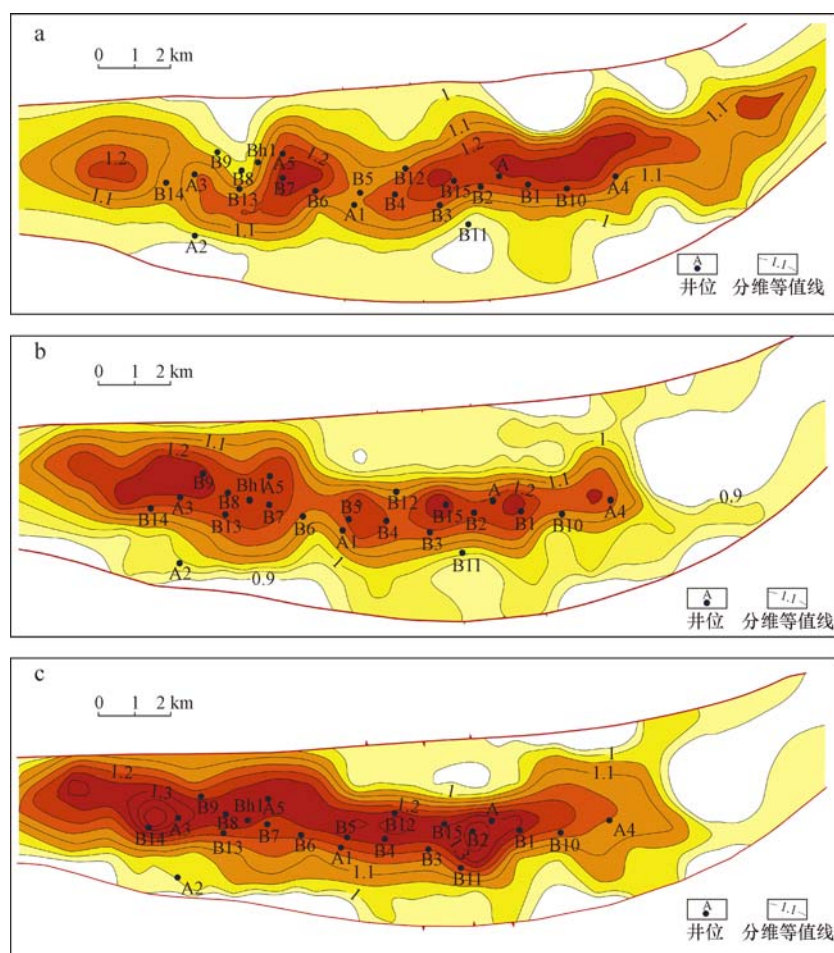


图4 克拉2气田巴什基奇克组断层分维等值线

Fig. 4 Fault fractal dimension isogram of the Bashijiqi Formation in Kela-2 gas field

a. 第一岩性段; b. 第二岩性段; c. 第三岩性段

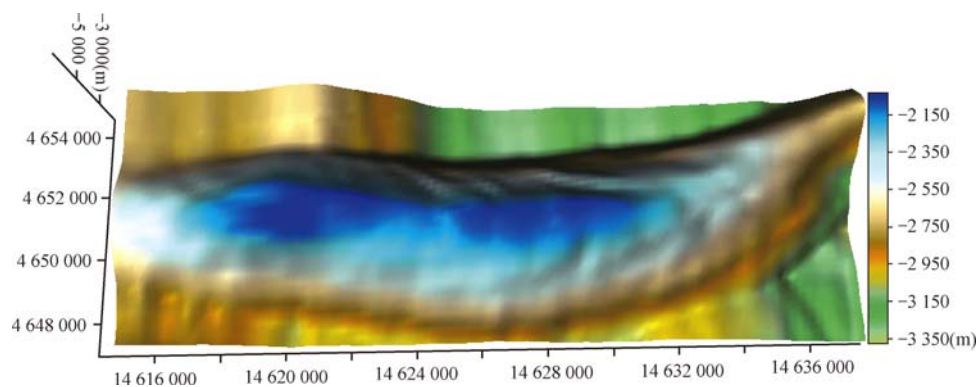


图5 克拉2气田白云岩顶面三维地貌

Fig. 5 3D geomorphological map on top of dolomite layer in Kela-2 gas field

分维值偏大,而两翼断层规模较大,但数量不多,分维值偏低。背斜轴部走向北东段,仅较浅的白云岩段断层较多,深部的第二、第三岩性段断层不发育,一方面因为白云岩自身容易脆性断裂,另一方面则因为地层靠近背斜弯曲中和面的外侧,弯

曲派生张应力较大。背斜的西部高点在3个层位断层分维值都较高,开发过程中,气井出水相对严重的A3、B14、B13井都位于该区域周围,可能是因为断层在该部位延续性较好,穿透了第二岩性段与第三岩性段之间的隔层,使隔层失去封堵能

力,底水沿断层及周围裂缝带进入第二、第一岩性段的气层内部,因此造成气井出水。

4 结论

1) 断层分维值与裂缝线密度正相关。断层对裂缝发育带的控制局限在一定范围内,断层规模越大,单条断层释放的应力越大,不利于周围小断层的产生,对断层周围裂缝带贡献也有限;应力集中,但断层规模较小的区域,应力通过多条断层释放,断层间距足够小的时候,相邻断层控制的裂缝发育带出现叠加,裂缝相对发育。

2) 克拉2气田断层分维大于1.2的区域相对发育,大于1.25的区域裂缝最发育。平面上,裂缝发育带主要分布在背斜的轴部,库姆格列木群白云岩段至巴什基奇克组第一岩性段,裂缝的相对发育区分东、西两个部分,对应背斜的两个高点;巴什基奇克组第二、第三岩性段裂缝相对发育的区域集中的东部高点的西侧,轴部走向北东的区域,裂缝相对不发育。

3) 垂向上,背斜西部的高点从库姆格列木群白云岩段至巴什基奇克组第三岩性段的巨厚地层中,一直是断层分维的高值区,该地区断层、裂缝都相对发育,断层及其控制的裂缝带上下连通,切穿第二、第三岩性段之间的隔层,可能是造成3口气井见水的原因。

参 考 文 献

- [1] 谢兴礼,朱玉新,李保柱,等.克拉2气田储层岩石的应力敏感性及其对生产动态的影响[J].大庆石油地质与开发,2005,24(1):46-48.
Xie Xingli, Zhu Yuxin, Li Baozhu, et al. Stress sensitivity of the reservoir rock in Kela 2 Gas field and its effect on the production performance[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2005, 24(1): 46-48.
- [2] 李阳,才巨宏.渤南油田三区沙三段4砂组低渗透砂岩储集层裂缝特征研究[J].石油勘探与开发,2000,27(6):39-41.
Li Yang, Cai Juhong. Characteristics of fracture systems in the 4th low permeability sandstone zone of Member S3 of Block 3, Bonan oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(6): 39-41.
- [3] 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.
- [4] 饶华,李建民,孙夕平.利用分形理论预测潜山储层裂缝的分布[J].石油地球物理勘探,2009,44(1):98-118.
Rao Hua, Li Jianmin, Sun Xiping. Using fractal theory to predict distribution of fracture in buried-hill reservoir[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2009, 44(1): 98-118.
- [5] 王香增,万永平.油气储层裂缝定量描述及其地质意义[J].地质通报,2008,27(11):1939-1943.
Wang Xiangzeng, Wan Yongping. Quantitative characterization of fracture in reservoir and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(11): 1939-1943.
- [6] 黄飞,刘惠军,张燕.辽河油田欢喜岭太古界潜山裂缝分形预测研究[J].成都理工大学学报,2004,31(1):73-76.
Huang Fei, Liu Huijun, Zhang Yan. Fractal research and prediction of Huanxiling Archean buried hill area in Liaohe oil-field, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2004, 31(1): 73-76.
- [7] 张博,李江海,吴世萍,等.大北气田储层裂缝定量描述[J].天然气地球科学,2010,21(1):42-46.
Zhang Bo, Li Jianghai, Wu Shiping, et al. The quantitative description of tight sand reservoir fissures in Dabei gas field[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(1): 42-46.
- [8] 吕国祥,张瀛,王兴明,等.分形分维求取裂缝性岩石孔隙度指数m及应用[J].新疆石油天然气,2009,5(4):6-9.
Lü Guoxiang, Zhang Ying, Wang Xingming, et al. Fractal dimension achieves fractured rock porosity index m and its application[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2009, 5(4): 6-9.
- [9] 陈冬,陈力群,魏修成,等.火成岩裂缝性储层测井评价——以准噶尔盆地石炭系火成岩油藏为例[J].石油与天然气地质,2011,32(1):83-90.
Chen Dong, Chen Liqun, Wei Xiucheng, et al. Log evaluation of fractured igneous reservoirs: a case study of the Carboniferous igneous reservoirs in the Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(1): 83-90.
- [10] 瞿子易,周文,罗鑫,等.基于粒子群和支持向量机的裂缝识别[J].石油与天然气地质,2009,30(6):786-792.
Qu Ziyi, Zhou Wen, Luo Xin, et al. PSO-SVM-based fracture identification method[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(6): 786-792.
- [11] 刘肖军.苏北盆地桥河口油田阜二段第三砂层组裂缝参数模拟计算[J].石油与天然气地质,2010,31(2):250-254,259.
Liu Xiaojun. Simulation of fracture parameters in the 3 ~ (rd) sand unit of the Paleogene Fu-2 member in the Qiaohekou oil-field[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(2): 250-254, 259.
- [12] 胡宗全,董孝华,王允诚.川中大安寨段灰岩裂缝分形特征及孔隙结构模型[J].成都理工学院院报,1999,26(1):31-33.
Hu Zongquan, Tong Xiaohua, Wang Yuncheng. Fractal characteristic of fractures and model of pore structure, Daanzai shelly limestone, Lower Jurassic, central Sichuan field[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1999, 26(1): 31-33.

(下转第939页)

- Chen Zhihai, Ren Lijun, Chen Liangyu, et al. Performance evaluation on production tests in the extra low permeability reservoirs of complex fault blocks and development strategies—examples from oil reservoirs in the Yingcheng Formation and the first member of the Shahezi Formation in Shiwu oilfield of the southern Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(1): 133–141.
- [6] 王卫红, 刘传喜, 穆林, 等. 高含硫碳酸盐岩气藏开发技术政策优化[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(2): 302–310. Wang Weihong, Liu Chuanxi, Mu Lin. Technical policy optimization for the development of carbonate sour gas reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(2): 302–310.
- [7] 李结实, 葛云凤, 张扬凡. 敖包塔油田合理注采比研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2002, 21(2): 17–20. Li Jieshi, Ge Fengyun, Zheng yangfan. Reasonable injection-production ratio in Aobaota oil field[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2002, 21(2): 17–20.
- [8] 陈凤莲. 大芦湖油田樊29块合理开发界限确定[J]. 内蒙古石油化工, 2006, (5): 174–175. Chen Fenglian. The definition of rational development boundary in Fan 29 of Daluhu oilfield[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2006, (5): 174–175.
- [9] 杨坤. 高含水期单元合理注采比确定[J]. 河南石油, 1996, 10(1): 8–11. Yang kun. The Determination of injection-production ratio in high water cut stage[J]. Henan Petroleum. 1996, 10(1): 8–11.
- [10] 姚友龙, 张汉新, 边艳梅, 等. 孤东油田注采结构调整方法及效果[J]. 内江科技, 2004, (2): 36–37. Yao youlong, Zhang hanxin, Bian mei. Adjustment of development measures and its result of production and injection in Gudong oilfield[J]. Neijiang technology, 2004, (2): 36–37.
- [11] 钱德富, 殷代印. 确定区块合理注采井数比、合理注采比的数学模型及应用[J]. 大庆石油地质与开发, 1995, 14(4): 37–41. Qian Fude, Yin Daiying. Mathematical model of determining reasonable injection-production welm ratio and injection-production rption of blocks[J]. Petroleum Geology & Oil Field Deuelopment in Daqing, 1995, 14(4): 37–41.
- [12] 李程彤, 刘性全. 萨南开发区水驱高含水后期合理注采比的确定方法研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2006, 25(4): 54–56. Li chengtong, Liuxingquan. Determination of reasonable production/injection ratio in Sanan development area at high water cut stage [J]. Petroleum Geology & Oil Field Development in Daqing, 2006, 25(4): 54–56.
- [13] 郑俊德, 姜洪福, 冯效树. 萨中地区合理注采比研究[J]. 油气地质与采收率, 2001, 8(2): 55–57. Zheng Junde, Jinag Hongfu, Fengxiaoshu. Study on reasonable injection-production ratio in Sazhong area[J]. Oil & Gas Recovery Techinology, 2001, 8(2): 55–57.
- [14] 刘学峰, 赵玉欣, 唐磊, 等. 油田开发中后期合理注采比确定方法[J]. 河南石油, 2000, 14(2): 19–21. Liu xuefeng, Zhang yuxin, Tang lei. Determination of rational production factor in medium and late development stages[J]. Henan Petroleum, 2000, 14(2): 19–21.
- [15] 钟德康. 注采比变化规律及矿场应用[J]. 石油勘探与开发, 1997, 24(6): 65–68. Zhong dekang. Change pattern of injection-production ratio and its application in oil fields[J]. Petroleum Exploration and Development, 1997, 24(6): 65–68.
- [16] 上官永亮, 赵庆东, 宋杰, 等. 注水井合理配注方法研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2003, 22(3): 40–42. Shangguan Yongliang, Zhao qingdong, Songjie. A study of reasonable match injection method of waterflood-ing well[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2003, 22(3): 40–42.
- [17] 才汝成, 李阳, 孙焕泉. 油气藏工程方法与应用[M]. 山东东营: 中国石油大学出版社, 2002: 278–280. Cai rucheng, Li Yang, Sun huanquan. The methods and application of petroleum reservoir[M]. Shandong dongying: The Press of China University of Petroleum, 2002: 278–280.

(编辑 高 岩)

(上接第933页)

- [13] 刘丽丽, 赵中平, 李亮, 等. 变尺度分形技术在裂缝预测和储层评价中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(1): 31–38. Liu Lili, Zhao Zhongping, Li Liang, et al. Application of the variable scale fractal technique in fracture prediction and reservoir evaluation[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(1): 31–38.
- [14] 周英杰, 张敬轩, 杜玉山, 等. 埕北30潜山岩心裂缝的分维数及与裂缝密度的关系[J]. 油气地质与采收率, 2004, 11(3): 19–22. Zhou Yingjie, Zhang Jingxuan, Du Yushan, et al. Fractal dimen-

sion of core fractures in Chengbei 30 buried-hill reservoir and its relation to fracture density[J]. Oil & Gas Recovery Technology, 2004, 11(3): 19–22.

- [15] 尹燕义, 柳成志, 陈洪波, 等. 裂缝型储层裂缝发育程度分形描述方法[J]. 大庆石油学院学报, 1998, 22(1): 8–10. Yin Yanyi, Liu Zhicheng, Chen Hongbo, et al. Fractal description of the fracture reservoirs[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1998, 22(1): 8–10.

(编辑 张亚雄)