

尺度数目法在潜山裂缝长度定量研究中的应用

权 勃, 吕坐彬, 闫建丽, 杨建民, 张文童

中海石油(中国)有限公司天津分公司渤海石油研究院, 天津
Email: quanbo@cnooc.com.cn

收稿日期: 2021年1月29日; 录用日期: 2021年3月16日; 发布日期: 2021年3月29日

摘 要

裂缝性储层油藏描述的难点和重点, 在于准确描述裂缝的分布规律和展布特征。JZ5油田的太古界潜山裂缝性油藏正是这样的典型。前人研究表明该油田主要为构造成因裂缝, 且直接影响开发效果。基于此, 本文提出了基于尺度数目法来研究对该油田开发具有显著影响的裂缝分布规律, 分为四步: 首先, 对与油田主力储层同时期野外露头进行地质考察, 收集裂缝分布数据; 其次基于三维地震资料, 利用蚂蚁体追踪断裂系统及较大级别的可能裂缝; 再对成像测井图像进行解释, 描述小裂缝的分布; 最终以幂定律准则, 对成像测井、野外露头、蚂蚁体数据进行综合分析, 转化至同一尺度下, 并分析不同尺度下的差异, 进而描述不同级别规模的裂缝分布规律。矿场实践表明, 利用该方法得出的裂缝规律, 建立的三维裂缝模型, 并转化为属性模型后, 有效提高了裂缝储层的三维定量化表征成果。

关键词

构造裂缝, 幂定律, 裂缝分布规律, 潜山储层, 裂缝长度

The Application of Scale-Number Method in Quantitative Study of Fracture Length in Buried Hill

Bo Quan, Zuobin Lv, Jianli Yan, Jianmin Yang, Wentong Zhang

Bohai Oilfield Research Institute, CNOOC Ltd.-Tianjin, Tianjin
Email: quanbo@cnooc.com.cn

Received: Jan. 29th, 2021; accepted: Mar. 16th, 2021; published: Mar. 29th, 2021

Abstract

The difficulty and key points of buried hill fracture reservoir description are to describe accurately the distribution rule and characteristics of fracture. JZS oil field of archean erathem fractured buried hill mutation reservoir is facing the same problems. Previous studies have shown that the distribution of the fracture which was mainly caused by tectogenesis which directly influences the reservoir development. In order to study the relationship between scale and number of the fracture, a method using the power-law function was put forward. Firstly, geological investigation was carried out on the outcrops with similar formation-time. Secondly, fracture system was automatic identified through ant body tracking technique based on high frequency 3D seismic data. Thirdly, the image logging interpretation was done in order to describe the small classes fractures. At last, the three sources of data were comprehensively analyzed by power-law method in double logarithmic coordinates to describe the quantitative length distribution of different fracture scales. Field application shows that the elaborate 3D reservoir models using this method can better reflect the actual geological information and effectively improve the history matching.

Keywords

Structural Fractures, Power Function Law, Distribution of Fracture, Buried Hill Mutation Reservoir, Fractures Length

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

裂缝性油藏的渗透性主要来源于其裂缝网络，裂缝网络的长度、密度、连通性直接影响该类油藏的开发效果。目前研究和描述裂缝及其作用的方法很多，从微观到宏观，从机理成因到规模展布，但受限于资料和方法，往往各方法较为单一，统一性不强，有时甚至存在矛盾，难以准确把握裂缝规律的本质，将这种规律性成功应用到裂缝性储层三维表征的更难[1] [2] [3]。

目前常用的裂缝性储层建模方法为采用等效密度法，即随机建立 DFN 网络，并通过 Sigma 因子转化

为裂缝系统的孔隙度和渗透率,进而完成对裂缝系统的等效表征。实际建模中往往由于岩芯、铸体薄片、成像测井及地震等资料数据的尺度不同,无法形成统一的规律认识,进而不能将之综合应用至模型表征中[4] [5] [6] [7]。

本文在进行野外地质露头观察和测量基础上,结合测井、地震等资料,进行综合分析,最终以冪定律为准则,建立对成像测井、野外露头、蚂蚁体数据的综合图板,研究适合描述对本油田单井产能具有显著影响的裂缝分布,获得能准确表征其分布经验公式,将之应用于储层三维裂缝表征,模型效果明显改善。

2. 油田概括

JZS 油田位于渤海辽东湾海域,属于辽西低凸起中北段,油田内部断层十分发育,太古宇潜山裂缝性储层是其主力产层之一,位于东高带上,其上部被古近系泥岩披覆,整体呈现为似层状的块状潜山油藏。基质岩性为混合岩化的花岗片麻岩,夹二长花岗岩和花岗伟晶岩,受区域变质和构造运动破碎,裂缝极为发育[3] [4]。储层具有孔缝并存、非均质性强等典型双重孔隙介质特征。岩芯薄片镜下观察表明:基岩中的孔隙括溶现象较为普遍,因此其具有一定孔隙性,但渗透性差,裂缝的发育极大改善了其渗透性。铸体薄片观察到的裂缝多为树枝状或网状,部分被再胶结作用充填形成无效裂缝,未被充填裂缝沟通储层形成有效通道,即分为构造缝和溶蚀缝。后者为前者受物理风化、化学淋滤、矿物再充填交互作用而形成。前人表明[8] [9],该潜山储层裂缝主要受构造成因控制。

3. 野外露头裂缝长度测量

结合区域盆地分析,通过大量调研发现在秦皇岛地区出露部分太古宇地层,与本油田存在极大的同时期成因相似性(见表 1)。

Table 1. Comparison of the similarities between outcrop with oilfield

表 1. 油田与野外露头相似性对比表

油田/区域	岩性	时代	构造背景
JZS 油田	混合花岗岩、片麻岩	太古代	构造高部位(潜山高)、断裂带
鸽子窝、老虎石	混合花岗岩	太古代	断裂带、区域节理
联峰山、鸡冠山	混合花岗岩、片麻岩	太古代	构造顶(山顶)

3.1. 露头与古潜山的似层性

理想露头为地表岩层受风化和淋滤作用,形成的完整风化壳包含土壤层、残积层、半风化壳和未风化基岩。古潜山往往受风化剥蚀和搬运作用,仅在部分顶部发育少量残积层,主要为半风化壳和未风化基岩,其具有明显的层次性而不存在明显界面。图 1 中可在野外露头中可看到风化壳的似层性。油田测井、地震资料亦均有该种特征。

3.2. 露头裂缝系统的测量

露头观测点的选择应遵循典型、均匀原则。在联峰山、鸡冠山各选择 10 个观测点,在老虎石、鸽子窝各选择 6 个观测点。整个联峰山均由太古界变质混合花岗片麻岩组成,经历了多期构造运动和风化作用,各类裂缝十分发育,与油田储层相似。实际观测中不仅观测到了开启的构造缝、风化缝、溶蚀缝,亦观测到了特殊岩性侵入体、伟晶岩脉发育的封闭缝等,更观测到了小正断层周边裂缝密度和长度与其的密切相关性,这些均丰富了潜山内幕的地质模式,对解释油田开发中的难点具有指导意义(图 2)。

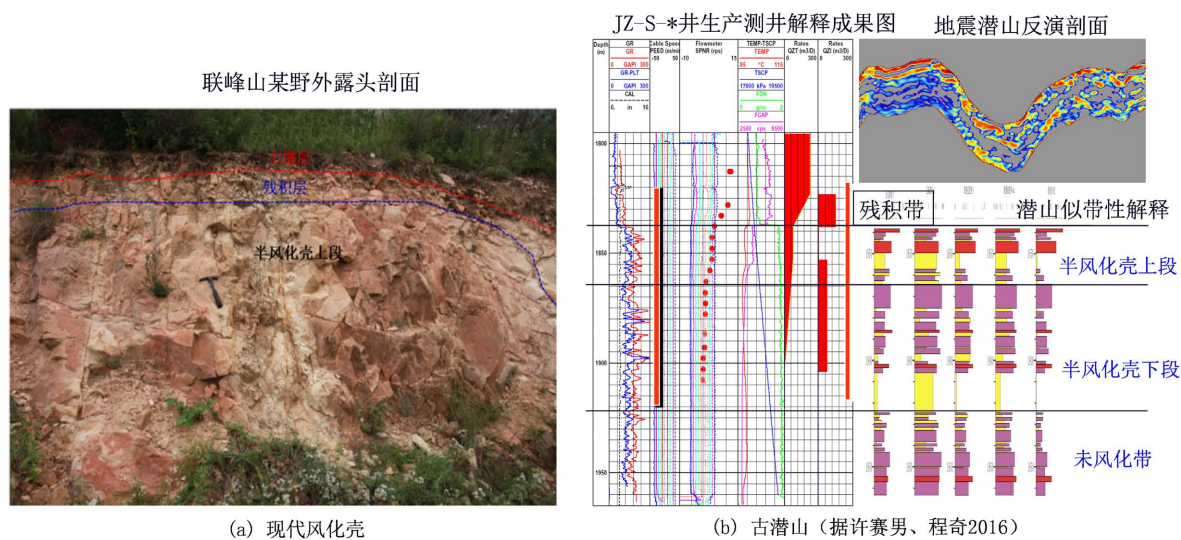


Figure 1. Reservoir space types and characteristics of the buried hill in JZS oilfield
图 1. 风化壳及古潜山的似层性特征



Figure 2. Characteristics of outcrops fracture
图 2. 野外露头裂缝特征

鸡冠山上太古界片麻岩古风化壳不同段的裂缝发育程度，主要以半风化壳裂缝最为发育，发育构造缝为主，应是潜山油藏的主要储层段。残积层风化缝比较发育，但多数被方解石充填，储层渗透性差，土壤层和基岩裂缝不发育。油田开发实践亦表明其主要储层段和贡献段为半风化壳上层；共完成四个野外露头 32 个观测点的仔细测量，有效测量裂缝长度 1000 余个(表 2)。

Table 2. Fracture measurement table of outcrops (part)
表 2. 野外露头实测表(部分)

测量范围	走向	条数					
		L < 0.5 m	0.5 m < L < 1 m	1 m < L < 2 m	2 m < L < 5 m	5 m < L < 10 m	L > 10 m
17M*12M	190~210 度	-	3	0	6	4	3
	330~350 度	-	24	15	12	0	0
8M*7M	190~210 度	-	8	8	20	4	-
	330~350 度	-	24	50	5	0	-
3M*3M	70~90 度	-	0	1	5	10	-
	10~30 度	18	4	6	1	-	-

3.3. 露头与成像测井裂缝系统方向分析

研究表明, 潜山储层中的天然裂缝的张开度与现今最大主应力方向有关, 也即是说与渤海湾盆地形成的喜山运动有关。这期运动形成了油田内的一系列 NNE、NE 向断层带, 伴生着大量受断层控制的近似方向的高角度裂缝网络。尽管仍受后期其他构造应力影响, 但对油田储集、渗流起主要作用的裂缝网络已经形成。

利用油田内成像测井对裂缝的识别, 将识别的有效裂缝走向绘制玫瑰花图, 识别出的裂缝主要以走向 $70^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 、 $330^{\circ}\sim 350^{\circ}$ 为主。同样将露头实测多种裂缝系统(包括构造缝、节理缝、风化缝、溶蚀缝等)绘制玫瑰花图, 实测走向为以 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 、 $330^{\circ}\sim 350^{\circ}$ 为主。对比分析可看出在成像测井解释中亦有 $10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 这组裂缝, 而露头中亦有 $70^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 这组裂缝, 分析认为可能是由于钻井成像测井、野外露头数据均为“单点性”, 观测点及数据量不足造成的差异。总的可认为两者同源具有近似成因, 可用于关联分析(图 3)。

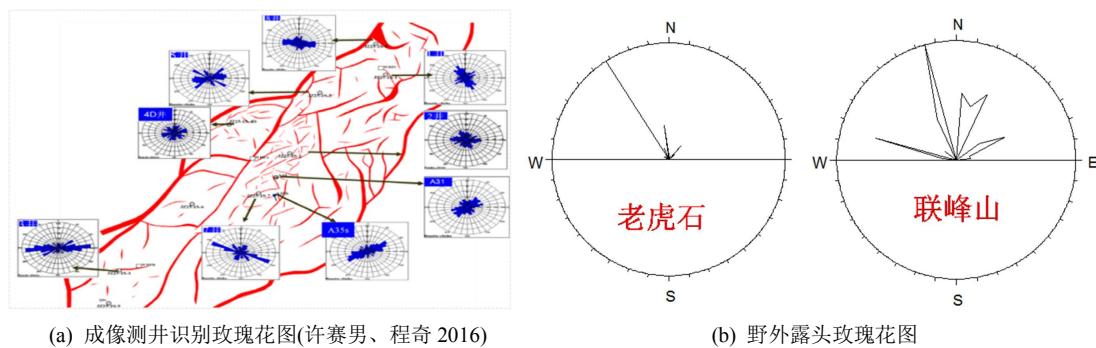


Figure 3. Fracture characteristics of the buried hill in JZS oilfield
图 3. JZS 油田的古潜山裂缝特征

4. 尺度数目法

4.1. 研究现状及进展

国外盆地级别研究表明野外露头中的断裂系统符合幂函数定律, 即同一地区相似成因的断层系统间存在一定的相关性。国内外研究表明自然形成的构造成因裂缝常以裂缝集的形式存在, 其大小与频度符合幂函数分布[10] [11] [12]。但不同学者研究得出的指数拟合公式不同, 表明在研究裂缝分布规律时, 应针对性的采用不同的拟合公式, 即要建立适合本油田区域, 并能准确反映对油田开发具有较大影响的裂缝集。

在以露头、岩芯、测井、地震等资料对裂缝研究的基础上, 对于裂缝储层裂缝分布评价及有效预测有了较大的发展。Murray (1971)、T. Rives & R. Gross (1993)等人采用构造主曲率法以及二维有限元法及随机模拟法, 依据不同构造的特征曲率与裂缝形成间的关联, 建立岩体裂缝的几何模型和力学模型分析构造与裂缝参数间的定性关系。隋少强等(2003)、张德银等(2005)、周文等(2006)、吴永平等(2011)根据岩芯、薄片裂缝观测、测井解释资料, 结合古构造应力、裂缝充填物, 应用变形尺度分形法统计裂缝相似维数。丁文龙等(2015)提出了岩芯观察统计与测井解释相结合、地震预测与钻井约束相结合、宏观尺度与微观尺度相结合、定性评价与定量表征相结合、数据统计与计算方法相结合、实验分析与数学模拟相结合的方法, 准确预测裂缝发育“甜点区” [13] [14] [15] [16] [17]。

4.2. 原理及盆地级别图版

裂缝在空间分布常常是具有一定规律性的, 并以集的形式存在。而幂函数分布是一种准确描述整个

区域裂缝分布的方式。国外学者通过对大量盆地中不同规模的断裂系统进行实测，得出对同一盆地内不同尺度大小断裂系统与数量间存在幂指数关系，并建立对应图版(图 4)。

但该图版仅描述到断裂 > 100 m 的规模，对于岩芯描述和断裂系统间广泛存在的，且对油田开发渗流起主要作用的断裂系统特征没有描述，且不同油田的该回归公式不同。

将其采用能数学方式表达即为

$$f(x) = \frac{(b-1)x_{\min}^{b-1}}{x^b}, x \geq x_{\min} > 0, b > 1 \tag{1}$$

其中， X_{\min} 指的是考虑范围内的最小裂缝尺寸或裂痕长度，小于此尺寸的裂缝都被忽略。

该分布模式的互补累积分布函数(ccdf)，即将公式 1 进行分布函数积分转换为：

$$F_c(x) = 1 - \int_{x_{\min}}^{\infty} f(x) dx = \frac{x_{\min}^{b-1}}{x^{b-1}} \tag{2}$$

该函数给出了裂缝尺寸大于或等于 x 的概率。当 $X = X_{\min}$ 时， $F_c(x) = 1$ ，表示该裂缝集的所有裂缝都大于或等于 X_{\min} 。 X 越大，大于或等于该尺寸的裂缝数就减少。

对公式 2 的两边取 \log 得到下式：

$$\log F_c(x) = (b-1)x_{\min} - (b-1)\log x \tag{3}$$

如果幂函数分布的 ccdf 函数(公式 3) 用双对数图 $\log\text{-}\log$ 绘制， X_{\min} 和指数 b 就可以根据图中的拟合直线估算得到。

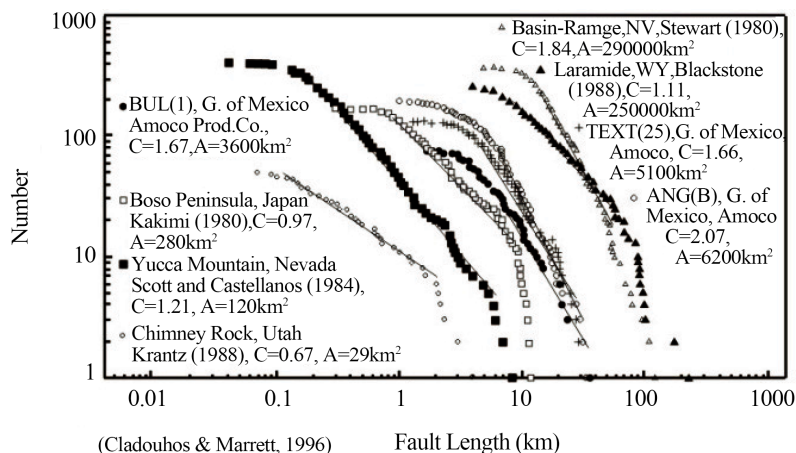


Figure 4. Scale-number method chat at basin level [18]

图 4. 盆地级别尺度数目图版[18]

4.3. 成像测井识别裂缝

研究区变质岩潜山中的裂缝亦是油田的主要储集空间，其具有组系多、分布广泛及尺寸大小差异大的特点，发育有高角度缝、网状裂缝及替他各种缝类型。在 FMI 图像上，张开缝由于充填钻井液而呈现低阻的暗色正弦线，充填缝因为充填石英、方解石等呈高阻的明亮正弦线，因此，根据显示特征，可有效识别裂(图 5)。

根据油田成像测井资料对潜山裂缝进行解释，包括裂缝的倾角、方位、密度、长度、面孔率等，按照垂向的似层性进行分段统计个参数(汇总表见表 3)。

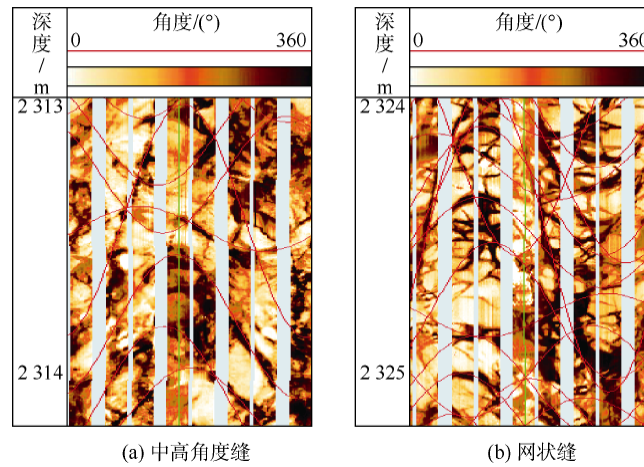


Figure 5. FMI image for fracture recognition (Kaijun Tong, 2012) [19]
 图 5. FMI 图像识别裂缝(童凯军, 2012) [19]

Table 3. Ant tracking and FMI for fracture recognition
 表 3. 蚂蚁体识别裂缝与成像测井识别裂缝

	地震蚂蚁体		成像测井	露头测量 C	
	长度/m	条数		长度/m	条数
	100	2	0.1	75	
	300	53	0.3	224	
	500	81	0.5	339	
	700	81	1	1128	
	1000	182	2	1385	
	1500	342	5	888	
	2000	276			
	2500	193			
	3000	133			
	4000	98			
	5000	37			
	6000	3			
	7000	4			
			项目	面积/m ²	面积/Km ²
				校正前	校正后
			露头测量 C	204	0.204
			成像测井	1080	0.263
			蚂蚁体	185,687,418	0.216

4.4. 蚂蚁体追踪断层及裂缝系统

蚂蚁体算法是通过模拟自然界蚂蚁的觅食行为而总结出的一种正反馈仿生学算法机制，能够实现断层和裂缝的自动追踪。核心是将地震属性体中符合预设条件的断裂系统痕迹自动识别出来，由于“人工蚂蚁”是按照一定算法而有规律地选择标注最短路径，且其具有记忆性记录已访问的数据节点，避免了重复性，因此，其可以获得一个低噪音、具有清晰断裂系统痕迹的数据体，可以在保证精度的基础上有效识别微小断裂及裂缝发育带。蚂蚁体技术已经广泛应用于断层预测，实现断层裂缝的自动追踪。

蚂蚁体在实际应用中有以下 5 个关键参数：① 初始边界范围；② 轨迹偏离度；③ 非法与合法步数；④ 停止门槛；⑤ 产状控制度，总得来说蚂蚁体参数越敏感，识别的尺度越精细的同时断裂系统越破碎，

剔除干扰能力越差, 表现为构造应力的控制的方向性越弱越杂乱; 反之, 消除噪音、干扰能力强, 则对微小断裂不敏感。采用蚂蚁体识别断裂系统是为服务于本次研究, 优化各项参数, 使得蚂蚁体产生的断裂系统主要为中 - 大级次(>100 m), 要求干扰较小, 且与油田内确定解释的断层方案一致(见表 3、图 6)。

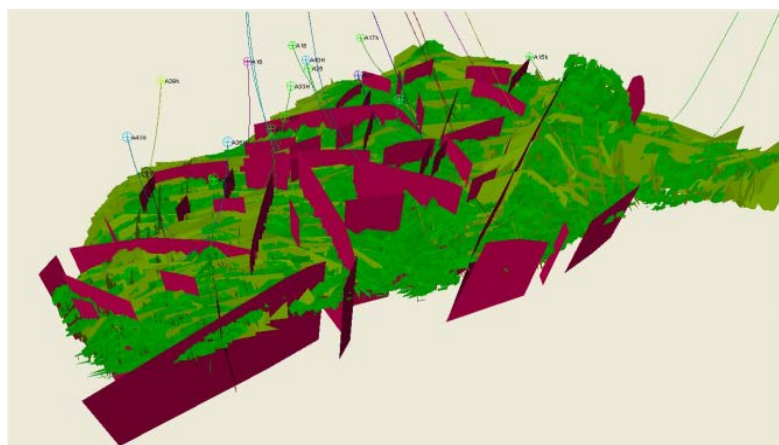


Figure 6. Ant body automatic tracking and identification of faults (fractures)
图 6. 蚂蚁体自动追踪识别断层(裂缝)

4.5. 同一性校正及油田图版

盆地级别实测图版图 4 中可看出, 尽管不同盆地中部均为接近线性, 符合理论推导的线性认识, 但斜率不同。因此对于不同盆地不同期次成因构造缝应区别分析。

三种不同来源的数据(表 3), 由于测量面积不同, 数据级次差异较大, 无规律性, 面积校正后可明显呈一定规律性。

本次研究通过综合成像测井、露头观测、蚂蚁体三种数据, 三者从裂缝尺寸与数目交汇图版上看整体是符合幂函数分布的, 拟合的直线段线性特征明显, 表明其具有同一相似性, 获得了适合本油田的幂指数规律, 同时也补充了 <100 m 裂缝(断层)的实测数据(图 7)。

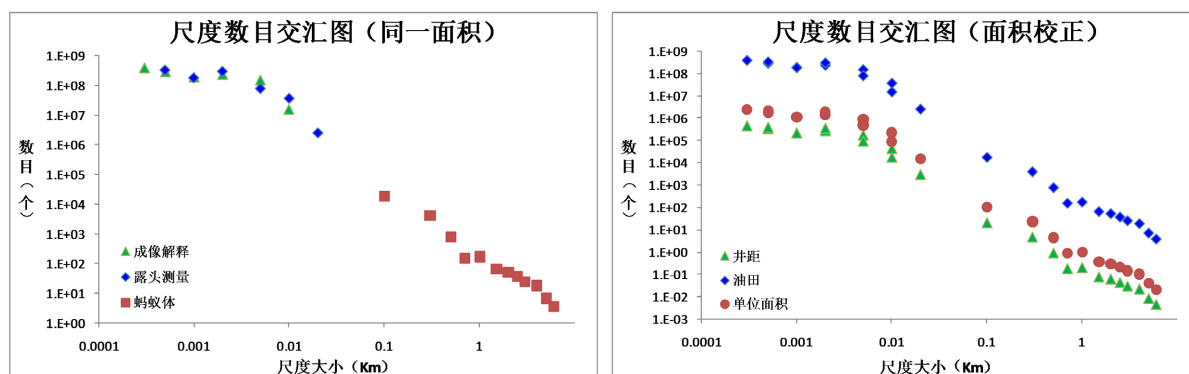


Figure 7. Type curves of data from three resources
图 7. 三种不同来源数据图版

而对于图 7 中微小端(<0.001 km)的弯曲现象, 笔者进行分析。针对三种原始数据来源可靠性进行仔细核查, 发现无论是各种成像测井解释软件程序设计, 还是解释人员的主要目标均为得到准确的面孔率, 而对于这些微小级别的裂缝都会进行光滑或变换处理使得其能更好用于储层物性及连通性评价, 因此,

认为此做法是造成统计数据微小断弯曲的主要原因。因而,在进行关系回归时不应考虑该误差较大部分。将数据结果按照对数求取,绘制到图版上,利用多项式回归可得出其回归公式(图 8)。同时可从数据图中看出,该方法的不同级次的裂缝尺度研究达到了 1 m 级,认为该尺度已经能够满足后续裂缝表征建模的需要,即按照该回归公式可进行小端(米级断层、裂缝)的规律预测。

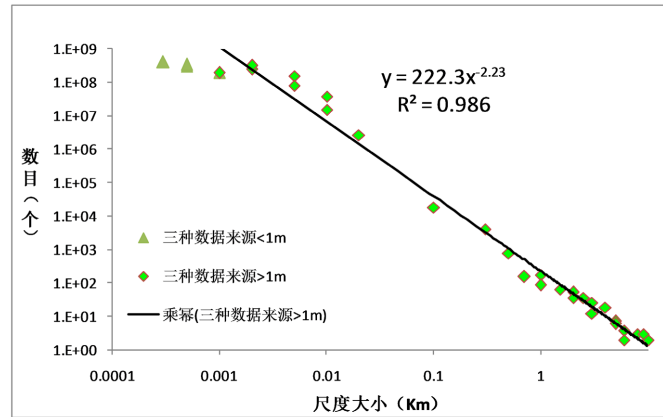


Figure 8. Regression of empirical expressions
图 8. 经验公式回归

将公式计算结果与油田实际解释断裂系统进行对比,两者在 500 m 以上时结果基本一致,300 m 及以下时分析由于潜山内幕地震反射相对较差,识别性差,实际解释断裂较公式计算低很多,也符合理论分析结果。

5. 结论

- 1) 油田潜山裂缝储层与露头的岩性、构造成因相似性高,露头数据与油田数据一致性好,可用于对比分析。
- 2) 综合利用三种不同来源数据,成功建立了适合油田的裂缝尺度数目模板,并用实际数据弥补了前人图版的不足,可描述用于对油田开发单井产能影响最大的级别(1 m~100 m)裂缝的分布规律。
- 3) 该方法的认识及成果应用至实际油田的潜山裂缝模型中,取得了良好效果,数模拟合效果及精度获得明显改善。

基金项目

国家重大专项 2016ZX05058-001“渤海油田高效开发示范工程(三期) - 渤海油田加密调整及提高采收率油藏工程技术示范”部分研究成果。

参考文献

- [1] 周心怀, 项华, 于水, 等. 渤海锦州南变质岩潜山油藏储集层特征与发育控制因素[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(6): 17-20.
- [2] 刘乐, 杨明慧, 李春霞, 等. 辽西低凸起变质岩潜山裂缝储层及成藏条件[J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(2): 188-194, 222.
- [3] 陈建波, 张占女, 郑浩, 等. 潜山裂缝型油藏井网模式优化及开发实践: 以渤海海域 JZ25-1S 油藏为例[J]. 中国海上油, 2015, 27(3): 66-72.
- [4] 吕坐彬, 赵春明, 张迎春, 等. 裂缝性潜山油藏裂缝发育规律及其对井位部署的指导[J]. 大庆石油地质与开发,

- 2011, 30(6): 75-79.
- [5] 罗宪波, 李云鹏, 葛丽珍, 等. 变质岩潜山裂缝油藏高效开发技术研究与实践[J]. 中国海上油气, 2016, 28(3): 91-96.
- [6] 王建华. DFN 模型裂缝建模新技术[J]. 断块油气田, 2008, 15(6): 55-58.
- [7] 曾联波, 张吉昌. 辽河坳陷边台变质岩潜山油藏裂缝分布特征[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1997, 21(3): 16-19.
- [8] 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.
- [9] 潘玲黎, 吕坐彬, 张迎春, 等. 裂缝性油藏三维定量表征技术在锦州南油田开发生产中的应用[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2012, 14(5): 1-5.
- [10] Hooker, J.N., Laubach, S.E. and Marrett, R. (2014) A Universal Power-Law Scaling Exponent for Fracture Apertures in Sandstones. *Geological Society of America Bulletin*, **126**, 1340-1362. <https://doi.org/10.1130/B30945.1>
- [11] Ortega, O.J., Marrett, R.A. and Laubach, S.E. (2006) A Scale-Independent Approach to Fracture Intensity and Average Spacing Measurement. *AAPG Bulletin*, **90**, 193-208. <https://doi.org/10.1306/08250505059>
- [12] Hooker, J.N., Laubach, S.E. and Gomez, L. (2011) A Scale-Independent Approach to Fracture Intensity and Average Spacing Measurement. *Scottish Journal of Geology*, **47**, 45-56.
- [13] Murray, A.R. (1988) Determination of Subsurface Distance between Vertical Parallel Natural Fractures Based on Core Data. *AAPG Bulletin*, **72**, 845-851. <https://doi.org/10.1306/703C8F42-1707-11D7-8645000102C1865D>
- [14] 隋少强, 宋丽红, 周扬新. 古潜山灰岩裂缝分布的分形特征[J]. 断块油气田, 2003, 10(6): 13-15.
- [15] 张德银, 周文, 伊向艺, 等. 川东沙罐坪飞仙关组构造裂缝分布与评价[J]. 新疆石油地质, 2005, 26(1): 65-67.
- [16] 周文, 林家善, 张银德, 等. 镇泾地区曙光油田延长组构造裂缝分布评价[J]. 石油天然气学报, 2008, 30(5): 1-4.
- [17] 丁文龙, 尹帅, 王兴, 等. 洁致密砂岩气储层裂缝评价方法与表征[J]. 地学前沿, 2015, 22(4): 173-186.
- [18] Golder Associates, Inc. (2007) FRED Workbook.
- [19] 童凯军, 赵春明, 吕坐彬, 等. 渤海变质岩潜山油藏储集层综合评价与裂缝表征[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 56-63.