

# 裂缝性碳酸盐岩油藏裂缝网络的识别方法研究

## ——以胜利油区 F 潜山油藏应用为例

张丽艳, 乌洪翠, 王敏, 王伟, 张孝珍

(中国石化胜利油田地质科学研究院)

**摘要** 提出了针对碳酸盐岩裂缝型储层的裂缝识别和类型判别方法: 在对常规测井曲线进行小波多尺度分析的基础上, 通过求取剩余曲线变化率, 以消除岩性对测井曲线的影响, 突出裂缝信号, 提高常规测井对裂缝的分辨率; 以岩心描述和成像测井所识别的裂缝类型为样本, 以多测井参数为变量, 运用主成分分析和 Fisher 判别等方法, 建立裂缝类型的判别模型。此方法应用于胜利油区 F 潜山碳酸盐岩储层的裂缝类型判别, 效果较好。

**关键词** 碳酸盐岩油气藏; 裂缝性油气藏; 裂缝网络; 裂缝识别; 测井解释

中图分类号: P631.8<sup>+</sup>1; TE122.3<sup>+</sup>3

文献标识码: A

在裂缝性碳酸盐岩地层中, 不同产状、不同宽度和不同充填程度的裂缝在空间上可构成裂缝网络系统。裂缝类型的识别对裂缝总体评价和数值模拟研究非常重要, 而仅仅划分出裂缝发育段已不能满足建立裂缝网络模型的要求。目前在识别裂缝类型的方法中, 岩心观察是最直接的手段, 它可直观地判断裂缝类型和裂缝形态, 但在裂缝发育段, 往往由于取心收获率很低, 所观察到的只有中、小裂缝, 另外取心成本也很高。成像测井为准确识别和评价裂缝提供了直观的井周图像资料, 相对常规测井而言, 它的垂向分辨率高, 可以识别大、中裂缝, 并能给出裂缝的方位、倾角、充填状态等信息, 故在识别裂缝类型方面具有很大的优势, 但是由于成本过高, 不能每口井都进行成像测井。相对而言, 常规测井(自然伽马、井径、侧向电阻率、声波时差、密度和补偿中子等)基本是每口井都必做的, 它们成本低, 信息量大, 且不同测井方法可从不同的角度反映裂缝信息, 因而具有成像测井所不可替代的作用。

现有的利用常规测井定量识别裂缝的方法主要有以下两类:

(1) 根据常规测井资料对裂缝的不同反映特征建立的交会图法<sup>[1]</sup>、裂缝指数曲线法、综合裂缝概率法<sup>[2]</sup>等;

(2) 神经网络、小波分析<sup>[3-5]</sup>以及分形几何中的变尺度分形技术<sup>[6]</sup>等非线性数学方法。

由于裂缝发育程度以及测井曲线响应特征的地区性和独特性, 使得这些方法的应用效果不尽相同, 并且其局限性还在于仅仅识别出裂缝发育带而没有进一步判别出裂缝的产状, 因而也不能满足建立三维裂缝网络地质模型和数值模拟的要求。

本文以渤海湾盆地胜利油区 F 潜山为例, 基于“提取差异、放大差异”的思想, 首先利用小波多尺度分析方法对微球聚焦电阻率、深浅侧向电阻率、声波时差等多条常规测井曲线进行处理后, 计算剩余曲线变化率, 划分出裂缝发育段, 然后用岩心和成像测井综合标定常规测井曲线, 识别出裂缝类型, 并综合应用主成分分析和 Fisher 判别, 建立多测井参数裂缝类型识别模型来识别裂缝网络。本文所用的方法利用了多种信息, 减少了依靠单条常规测井曲线识别裂缝的多解性, 为裂缝识别提供了一种新的分析方法。

收稿日期: 2012-12-11; 改回日期: 2013-11-13

本文受国家重大专项“大型油气田及煤层气开发”之“碳酸盐岩油田开发关键技术”项目(编号: 2008ZX05014-004)资助

张丽艳: 女, 1963年生, 高级工程师, 博士。1984年毕业于华东石油学院, 2005年在中国石油大学(华东)获博士学位, 主要从事测井解释评价与管理工作。通讯地址: 257015 山东省东营市; 电话: (0546)8715791; E-mail: zhangliyan.slyt@sinopec.com

## 1 基于小波多尺度分析的剩余曲线变化率方法

小波分析方法是一种窗口大小(即窗口面积)固定,形状、时间窗和频率窗都可改变的时频局部化分析方法<sup>[1]</sup>。依据小波分析理论,对信号进行小波与小波包分解<sup>[2]</sup>,把信号分解为各个频段的信号,再根据抽取的目的选取包含所需信息的频段序列,可进行深层次的信息处理以达到分析目的。进行小波分解时,可供选择的小波很多。对不同小波在测井曲线上的应用所作的对比研究表明,Dmey小波更加适用于测井曲线<sup>[1]</sup>。

在碳酸盐岩地层中,测井曲线的起伏在很大程度上会随岩性变化而变化,岩性的变化是识别裂缝性储层的干扰因素。由于岩性的变化具有一定的厚度和稳定性,而裂缝的分布具有较强的随机性,因此,将岩性因素滤掉,裂缝的影响将能得到突出。以

微球聚焦电阻率测井(MSFL)曲线为例,采用 Dmey 小波,按不同尺度(尺度 2,4,8,16,32,64,128,256)进行分解,利用门限、阈值等形式对分解得到的小波系数进行处理,则可达到对信号消噪的目的。对包含裂缝信息的常规测井曲线进行多尺度分解后,对不同尺度层次下的曲线的高频部分进行强制消噪处理,而后再将低频部分进行重构,利用原始曲线减去重构曲线,将得到反映微观因素的剩余曲线。对剩余曲线求取变化率,进一步放大裂缝特征的变化,从而达到识别裂缝发育层段的目的。这种方法相对简单,且消噪后的信号比较平滑。

对胜利油区 F 潜山 CGxx 井按上述方法进行处理,剔除由泥质引起的变化,得到一条剩余曲线变化率曲线(图 1)。从图 1 可以看出,剩余曲线变化率值越大,裂缝越发育,它与岩心描述的裂缝发育段对应性也较好。

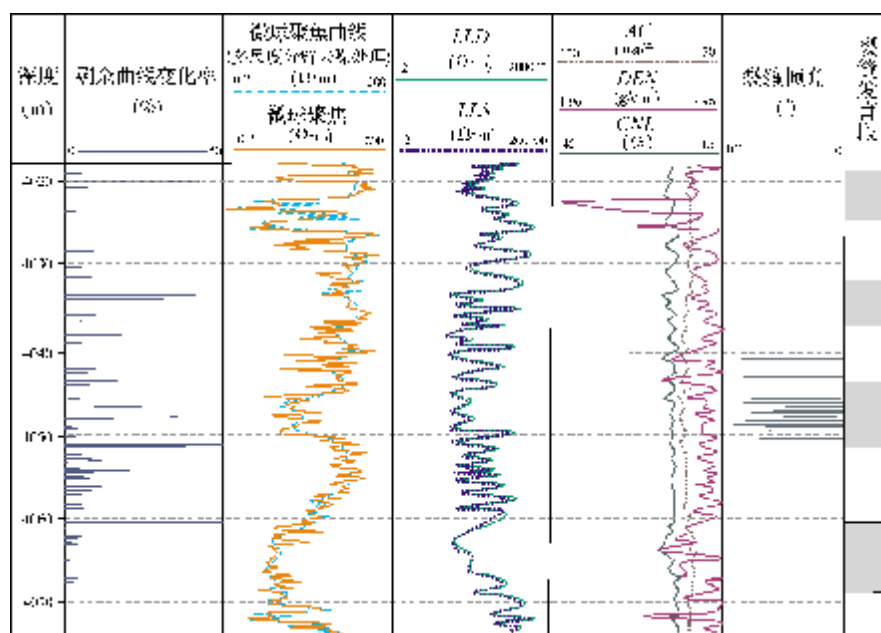


图 1 胜利油区 F 潜山 CGxx 井剩余曲线法(裂缝信息)处理成果

## 2 多参数综合识别裂缝网络方法

主要包括:选择岩心收获率较高、且有成像测井资料的典型层段,利用岩心描述裂缝类型,并对微电阻率扫描成像测井(FMI)进行刻度,建立不同状态裂缝在 FMI 图像上的显示模式;以岩心与刻度后的成像资料综合标定常规测井资料,并分析不同类型裂缝的测井响应特征;以岩心描述、

成像测井识别的裂缝类型(高角度缝、低角度缝、网状缝和充填缝)为样本,以多测井参数为变量,将方差分析、主成分分析、Fisher 逐步判别分析等多元统计分析方法有机地结合起来,建立判别模型,并对裂缝发育层段进行裂缝类型的判别。基本方法如下。

(1)选取标准样本层和测井特征曲线

综合 F 潜山 6 口井的岩心、成像资料,确定标

准样本层 47 个,它们分别是高角度缝 20 个、网状缝 9 个、低角度缝 8 个和充填缝 10 个。根据不同测井曲线对裂缝的响应,选取了声波时差 (AC)、密度 (DEN)、补偿中子 (CNL)、深侧向电阻率 (LLD)、浅侧向电阻率 (LLS)、电阻率幅度差 (Fr) 等 6 项参数 (表 1)。

(2) 测井数据归一化,统一量纲

(3) 主成分分析,提取最能反应裂缝网络特征的主成分

具有  $m$  个测井特征参数的各样本层的第  $j$  个主成分  $P_j$  为<sup>[8]</sup>:

$$P_j = a_{1j}x_1 + a_{2j}x_2 + \cdots + a_{mj}x_m = a_j^T X \quad (1)$$

式中:  $X = (x_1, x_2, \cdots, x_m)^T$ ;

$j=1, 2, \cdots, n; n \leq m$

由主成分分析提取了 4 个主成分变量,其累计贡献率已达到 93.7%。根据累计方差贡献率已超过 85% 的通常标准,故可以用这 4 个主成分作为研究的新变量。

$$\begin{aligned} P_1 &= -0.704AC - 0.6279CNL + 0.499DEN + \\ &\quad 0.9428LLD + 0.8816LLS + 0.674Fr \\ P_2 &= -0.2838AC + 0.595CNL - 0.7417DEN + \\ &\quad 0.206LLD + 0.087LLS + 0.3957Fr \\ P_3 &= 0.382AC + 0.282CNL - 0.111DEN - \\ &\quad 0.017LLD - 0.241LLS + 0.557Fr \\ P_4 &= 0.473AC - 0.08CNL - 0.7417DEN + \\ &\quad 0.243LLD + 0.39LLS - 0.24Fr \end{aligned} \quad (2)$$

式中: AC、CNL、DEN、LLD、LLS 和 Fr 为本次研究所采用的 6 项测井参数 (表 1)。

(4) Fisher 判别分析

Fisher 判别是依据方差分析原理建立起来的一种判别分析方法<sup>[9]</sup>,其基本思路是投影,将原来在  $m$  维空间的自变量组合投影到维数较低的  $n$  维空间去,然后在较低的  $n$  维空间再进行分类,投影的原则是使每一类的类内离差尽可能的小,类间离差尽可能的大。以两个总体变量的 Fisher 判别分析为例,A 类和 B 类在原坐标方向上,A 类和 B 类都有很大程度的重叠。设法找到一个新的 Y 轴,使得散点投影在 Y 轴上时,A 类和 B 类重叠程度小。

计算典则函数,提取与各类有最大可能多重相关的变量的一个线性组合。

表 1 胜利油区 F 潜山标准样本层测井特征值

序号	井号	裂缝类型	AC ( $\mu$ s/ft)	DEN (g/cm <sup>3</sup> )	CNL (%)	LLD ( $\Omega$ ·m)	LLS ( $\Omega$ ·m)	Fr ( $\Omega$ ·m)
1	CG20	高 角 度 缝	50	2.70	0.5	1134	757	377
2			47	2.60	9.0	1000	500	500
3			48	2.47	12.0	300	100	200
4	CG201		55	2.17	13.2	551	208	343
5			49	2.67	2.4	1500	1300	200
6			47	2.74	3.2	500	400	100
7			51	2.70	1.9	1500	1000	500
8			55	2.66	3.2	208	114	94
9			56	2.63	3.9	334	114	220
10			54	2.63	3.2	149	69	80
11	CG202		50	2.60	4.6	1233	417	816
12			50	2.76	4.3	796	389	407
13			47	2.74	4.5	732	207	525
14			50	2.69	0.9	1605	604	1001
15			44	2.82	2.0	1718	1369	349
16			50	2.74	2.9	796	417	379
17			48	2.65	0.9	2000	1702	298
18			50	2.68	0.2	1900	830	1070
19			50	2.71	3.2	600	400	200
20			CG203	50	2.72	6.0	734	267
21	CG20	网 状 缝	50	2.74	7.0	322	160	162
22			49	2.65	5.7	374	169	205
23			50	2.70	9.4	129	91	38
24			52	2.46	1.5	532	458	74
25	CG201		51	2.70	6.2	257	114	143
26			52	2.74	5.4	782	218	564
27			53	2.69	9.9	268	125	143
28	CG202		55	2.69	7.4	320	132	188
29			55	2.69	7.4	320	132	188
30	CG20		48	2.72	3.8	595	713	-118
31			56	2.67	4.3	156	179	-23
32	CG202		51	2.89	2.9	1279	1049	230
33			60	2.80	3.9	290	290	0
34			56	2.86	2.3	200	246	-46
35			54	2.88	1.7	909	909	0
36	CG203		53	2.84	3.0	300	300	0
37			52	2.82	3.4	240	240	0
38	CG201	充 填 缝	48	2.69	3.9	3000	1000	2000
39			44	2.90	0.9	4000	3000	1000
40	CG202		47	2.70	2.0	5353	4830	523
41			47	2.78	1.7	4000	2460	1540
42	CG203		45	2.82	3.9	3000	2600	400
43			46	2.83	2.5	3000	2500	500
44	CG204		50	2.75	2.0	3600	2600	1000
45			49	2.74	2.3	5000	4230	770
46	CG205		47	2.83	2.0	5600	5000	600
47			47	2.80	2.0	4200	2000	2200

$$F_1 = a_0 + a_1P_1 + a_2P_2 + \cdots + a_nP_n \quad (3)$$

式中:  $F$  为典则判别函数;  $P$  为参与判别的变量;  $a$  为判别系数。

不同变量的判别能力不同, 投影方向不同, 其多重相关的变量线性组合也有多组, 最多有  $m-1$  组, 即  $m-1$  个典则判别函数, 一般前 2~3 个典则函数包含了所有变量的大部分信息, 其它典则函数所包含的信息很少, 每个典则函数代表各类别在该维空间上的区分信息, 用于计算投影后的新坐标值, 然后计算出各类别在低维空间中的中心坐标。

利用新变量得到第一典则函数  $F_1$  与第二典则函数  $F_2$ , 其贡献率分别为 83.6% 与 10.8%, 累计达到 94.4%, 基本包含了大部分变量的信息, 选择第一典则函数和第二典则函数作为投影方向 (图 2), 从图中看出, 各类样品有明显的分布规律。根据各样品点距离各类别重心的远近构造出每个类别的判别函数。判别原则是哪个值最大, 该点就属于相应的那一类。

$$Y(x) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \cdots + b_nx_n \quad (4)$$

式中:  $Y$  为类别判别函数;  $b$  为判别系数;  $x$  为主成分分析后产生的新变量。

将新变量代入式 (4), 即可求出各类别的判别函数值, 最大函数值所对应的类别即为该储层段所属类别。

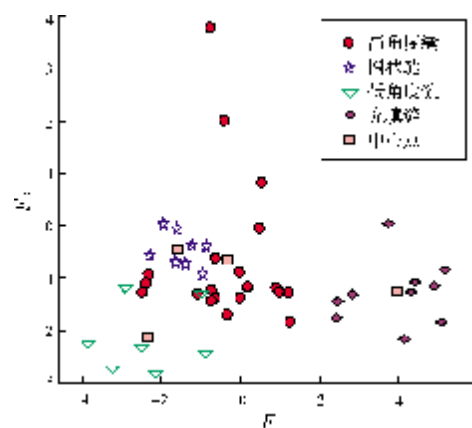
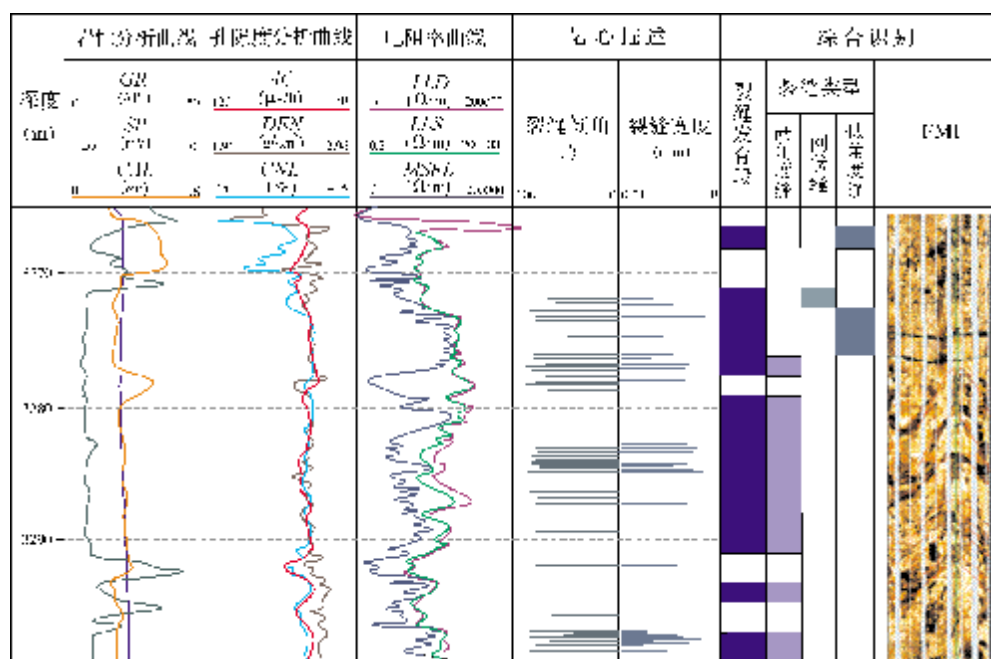


图2 F潜山裂缝类型判别结果图

### 3 应用效果

胜利油区 F 潜山下古生界油藏为复杂的裂缝性碳酸盐岩油藏, 储集空间以裂缝为主。通过对大量岩心的观察描述, 获得了裂缝倾角、裂缝宽度、充填物、溶蚀程度等裂缝网络的地质特征信息, F 潜山的裂缝有开启缝和充填缝, 开启缝发育高角度、低角度和网状缝, 以高角度裂缝为主, 倾角 70° 以上的裂缝占 70%。选择岩心收获率较高并有成像测井资料的典型层段, 将岩心描述的裂缝特征与对应井段的微电阻率扫描成像测井进行对比, 建立不同状态的裂缝





在FMI图像上的显示模式<sup>[10]</sup>。再利用岩心与刻度后的成像资料综合标定常规测井资料,分析不同类型裂缝的测井响应特征。依据前述方法,利用F潜山47个样本层(表1)建立了如下判别方程:

$$\text{高角度裂缝: } Y_1 = -0.511P_1 + 0.03P_2 - 1.506 \quad (5)$$

$$\text{低角度裂缝: } Y_2 = -2.543P_1 - 3.066P_2 - 4.692 \quad (6)$$

$$\text{网状缝: } Y_3 = -2.056P_1 - 0.806P_2 - 2.767 \quad (7)$$

图3是利用以上方法解释CG201井裂缝网络识别的成果图。从图中可以看出,井段3 273.0~3 276.0 m,解释的裂缝类型为低角度缝,对应的FMI成像图显示发育近水平缝;井段3 279.5~3 291.0 m,解释裂缝类型为高角度缝,对应的FMI成像图显示发育一组65°~80°的高角度缝,吻合较好。依此解释F潜山的其余5口井(CG207井、CG208井、CG209井、CG201-1井、CG201-7井),划分出112层裂缝发育段,其中高角度缝78层,网状缝21层,低角度缝13层,结果与岩心和成像测井资料对比,符合率达到84.7%,表明了本方法实用有效。

## 4 结 语

(1)在对常规测井曲线进行小波多尺度分析的基础上,进一步求取剩余曲线变化率的方法,能够去除岩性影响,突出裂缝信号,提高常规测井对裂缝的分辨率。

(2)以岩心描述、成像测井识别的裂缝类型为样

本,以多测井参数为变量,将方差分析、主成分分析、Fisher逐步判别分析等多元统计分析方法有机地结合起来,建立判别模型,可对裂缝发育层段进行裂缝类型的判别。实际应用表明,本方法能够充分挖掘常规测井资料中的裂缝信息,达到有效识别裂缝网络的目的,为建立裂缝网络地质模型提供依据。

## 参 考 文 献

- [1] 李瑞. 裂缝性碳酸盐岩测井储层参数研究及应用[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2003.
- [2] 卢颖忠, 黄智辉, 管志宁, 等. 储层裂缝特征测井解释方法综述[J]. 科技情报, 1998, 17(1): 85-89.
- [3] 高伟, 王允诚, 徐静, 等. 小波分析在测井裂缝识别中的应用[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2008, 30(1): 51-53.
- [4] 肖大志. 基于常规测井资料小波多尺度分析的裂缝识别方法[J]. 工程地球物理学报, 2011, 4(2): 216-221.
- [5] 张文静. 小波多尺度分析方法识别储层裂缝[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2009.
- [6] 刘莉莉, 赵中平, 李亮, 等. 变尺度分形技术在裂缝预测和储层综合评价中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(1): 31-37.
- [7] 张德丰. Matlab 小波分析与工程应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 197-204.
- [8] 杨维权, 刘兰亭, 林鸿洲. 多元统计分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- [9] 王向公, 张超谟, 刘子云. 应用地球物理常用数学方法[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1995: 155-160.
- [10] 张丽艳, 赵国欣, 乌洪翠, 等. 裂缝性碳酸盐岩储层裂缝网络测井响应特征[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(5): 34-36.

编辑: 董庸, 金顺爱

## Logging Identification Method of Fracture Network in Fractured Carbonate Reservoirs: An Application Example of F Buried Hill in Shengli Oil Field

Zhang Liyan, Wu Hongcui, Wang Min, Wang Wei, Zhang Xiaozhen

**Abstract:** Based on the application of wavelet analysis to conventional logs, through extracting the residual logging gradient, the influence of lithology to logging curves can be reduced for highlighting the fracture signs. As a result, the fracture resolution from conventional logging is improved. On the basis of core observation and description, combined with FMI information, different types of fractures are identified using geostatistics method. An identification method of fracture network is established by multi-logging parameters. The proposed identification method of fracture network has obtained good results in the application of identifying the types of fractures in carbonate reservoirs of F Buried Hill in Shengli Oil Field.

**Key words:** Carbonate reservoir; Fractured reservoir; Fracture network; Fracture identification; Logging explanation  
Zhang Liyan; female, DSc., Senior Geology Engineer. Add: Geological Sciences Institute, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong, 257015, China