

文章编号: 1001- 6112(2002) 05- 0450- 05

分砂层地质曲率分析在裂缝预测中的应用

胡宗全¹, 廖红伟², 刘人和³

(1. 中国石化 勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 西北大学 地质系, 陕西 西安 710069;
3. 中国石油 勘探开发研究院 廊坊分院, 河北 廊坊 065007)

摘要: 曲率分析是裂缝分布预测中的传统方法, 并在长期的应用过程中被逐步改进。研究中使用的地质曲率就是一种新的地质层面曲率算法, 该方法兼具数学上的严密性和地质上的实际意义。文中研究的地质对象是侏罗系某组的 3 个横向分布稳定的砂层。该地区以前的研究是运用整个组的顶面构造图来研究裂缝的分布规律, 对构造与裂缝分布之间的内在关系仅停留在简单的和定性的认识上。为了搞清构造对裂缝分布的控制作用, 作者通过三维地震精细解释各砂层顶面的构造图, 用改进的地质曲率算法计算各砂层的顶面地质曲率, 并运用地质曲率值作为裂缝预测参数。研究表明, 各砂层的地质曲率分布规律和数值高低之间均存在显著差异, 各层之间的曲率数值总体差异与各层之间的产能总体差异具有很好的匹配关系, 各砂层在各井点处的自然产能高低与曲率值高低具有较好的统计相关关系。同时, 曲率分析证实了研究区内构造复合关系的存在。研究发现, 构造的叠合部位往往是裂缝的发育区。这些结论的得出对裂缝的钻前预测是十分有意义的。

关键词: 自然产能; 地质曲率; 裂缝; 构造; 裂缝分布预测

中图分类号: P631. 4

文献标识码: A

1 研究背景

构造裂缝是裂缝性储层中常见的储渗空间类型。构造裂缝的形成和分布既受构造应力的控制^[1], 又受层厚等储层本身结构特征的影响^[2]。构造应力是形成构造裂缝的外部诱因, 所以构造分析一直是裂缝分布预测的重要手段, 它对于建立裂缝分布的地质模式具有重要的意义。构造图是裂缝分布预测的基础性图件, 其精度决定着预测的效果。构造图是以层面海拔高程为二维场参数的, 而海拔高程并非层面的特征参数, 在构造图上难以发现构造与裂缝之间的内在联系。而曲率作为表征层面弯曲程度的特征参数, 被引入裂缝预测研究领域, 并获得重大成功。曲率方法也在应用过程中不断被改进。

本文研究对象是某区侏罗系某组的 3 个砂层,

由上至下依次为砂层 A、B 和 C。该组总厚大约 200m, 3 个砂层横向分布均较稳定。裂缝的张开宽度大多小于 5mm, 但裂缝的发育程度是控制气井产能的关键因素。针对该组裂缝的分布规律, 以前的研究是运用整个组的顶界构造图来进行分析, 仅能得出一些定性的结论。考虑到地层的频繁超覆与侵蚀、砂体的迁移以及地层在构造变形过程中的流变等因素, 用一个组的构造形变来代替其内部各砂层的构造变形是不合适的, 无法体现各砂层之间塑性的差异。通过对各砂层分别作顶面精细构造图和改进的曲率分析, 有望揭示本区构造和裂缝分布之间的内在联系。

2 各井产能劈分结果

该区的 3 个砂层有相当比例的井是联合试气的, 本次研究使用 $K \cdot h$ 法将合试产能劈分到各个

表 1 各井各砂层的产能劈分结果及评价级别

Table 1 Output partition and evaluation grade of each sandlayer in various wells

砂层	各井产能级别																		
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
A	高	中	中	低	低	中	低	低	中	中	低	中	低	低	低	中	中	低	低
B	高	低	低	低	低	低	低	低	低	低	低	低	低	中	低	低	低	低	低
C	高	中	中	高	中	低	低	低	低	中	低	高	低	中	低	低	低	低	低

收稿日期: 2001- 06- 05; 修订日期: 2002- 07- 02.

作者简介: 胡宗全(1971—), 男(汉族), 河南光山人, 博士, 主要从事储层及油藏地质研究.

砂层中去。设定自然产能大于 $2 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 的为高产层, $1 \times 10^4 \sim 2 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 为中产层, 小于 $1 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$ 的为低产层。各井各砂层的自然产能见表 1, 它们被用来作为裂缝发育程度的评价标准。

3 构造分析

本次研究运用三维地震资料作出了 3 个砂层顶面的构造图(图 1)。各砂层的顶面构造总体格局相似, 不同的只是构造形变的相对强弱和局部形变存在差异。构造整体呈一东西向延伸的鼻状背斜, 北东翼平缓而南东翼较陡, 在此背景上叠加有一些次级构造。高产井并非集中在构造高部位, 构造高部位同样有大量的低产层, 如 B5 井的 A、B、C 层和 A10 井的 B 层; 而在构造低部位同样有中高产层, 如 A3 井的 A、C 层和 A4 井的 C 层及 A6 井的 A 层等。这说明无论在构造高部位还是低部位, 都有可能发育一个个规模较小的裂缝体系; 仅仅依靠分层构造图难以解释裂缝的分布规律。

4 地质曲率分析

4.1 地质曲率的计算方法

Murray(1968) 最早运用曲率进行裂缝预测并获成功^[3]。这一方法从 70 年代初被引入到国内, 已得到广泛应用并有众多成功实例。曲率对裂缝发育程度的控制可以通过统计得出^[4-6], 还可以通过应力场模拟对裂缝分布进行预测^[7,8], 还可以作为模式识别裂缝预测的建模参数^[9]。

目前对二维曲面的曲率计算, 一般采取多方向一维曲率计算方法, 同时求取这些方向上的曲率再取其中的最大值。实际上, 这样做有理论上和实际应用上的缺陷。首先计算方向不一定能与最大弯曲方向一致; 其次曲率也不能按数学上的最大值来选取, 因为那样就失去了其地质意义。

刘人和于 1998 年提出的地质曲率, 是充分考虑了数学曲率在理论上的严密性和地质背景实际意义而提出的一种曲率提取方法, 其方法如下:

先将构造图进行网格化, 对每 5×5 点作 3 次趋势的拟合分析, 这样可得到构造曲面的趋势拟合方程:

$$f = Ax^3 + By^3 + Cx^2y + Dxy^2 + Ex^2 + Fy^2 + Gxy + Hx + Iy + J$$

则主曲率为:

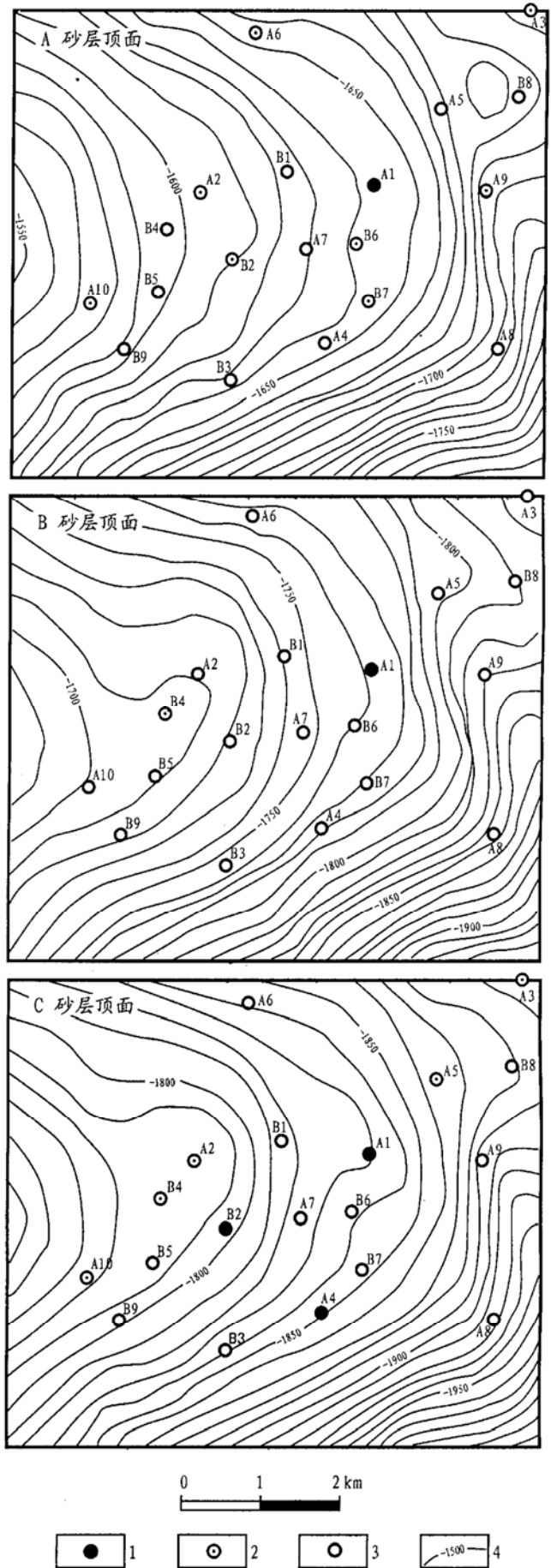


图 1 3 个砂层的顶面构造图

1. 层产能为高产(天然气自然产能 $> 2 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$);
2. 层产能为中产(天然气自然产能为 $1 \times 10^4 \sim 2 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$);
3. 层产能为低产(天然气自然产能为 $< 1 \times 10^4 \text{m}^3/\text{d}$);
4. 构造等高线及海拔(m)

Fig. 1 Supersurface structural maps of three sandlayers

$$\frac{1}{r_x} = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}, \frac{1}{r_y} = \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}, \frac{1}{r_{xy}} = \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}$$

其中:

$$\frac{1}{R_{1,2}} = \left(\frac{1}{r_x} + \frac{1}{r_y}\right) \pm \sqrt{\frac{1}{4}\left(\frac{1}{r_x} - \frac{1}{r_y}\right)^2 + \frac{1}{r_{xy}^2}}$$

1/R₁ 和 1/R₂ 分别为最大主曲率和最小主曲率, 如果 x、y、f 的单位为 m, 则其单位为 m⁻¹。

因地质上把向上凸的地层面曲率取正值, 向下凹的地层面曲率取负值, 所以对于岩层某点处的曲率均取反号, 即 k₁ = -1/R₁, k₂ = -1/R₂。地质曲率 k_g 是这样—个既充分考虑 k₁ 和 k₂ 的值, 又考虑数学曲率与岩石变形实际关系的一个参数。下面分 3 种情况讨论 k_g 的取值原则:

a) k₁•k₂ (通常称高斯曲率) 小于 0 时, 则该点曲面为双曲面。此时只有正的曲率值对破裂有贡献, k_g 取 k₁ 和 k₂ 中正值的一个。

b) k₁•k₂ 等于 0, 则该点曲面为抛物面。如 k₁、k₂ 中一个值不为 0, 则 k_g 取该值; 如果均为 0, 则 k_g 取 0。

c) k₁•k₂ 大于 0, 则该点曲面为椭球面。此时若二者均为正值, 则 k_g 取二者之较大值; 如二者均为负值, 则 k_g 取二者中较小值(即绝对值最大者)。

4.2 地质曲率分布特征及裂缝预测

利用三维地震解释的 3 个砂层的构造层面数据, 网格化后经计算得到 3 个砂层顶面的地质曲率分布图(图 2), 其分布的总体规律是: 曲率高值区沿构造主轴线部位分布。在工区的西部, 构造主轴线基本为东西方向; 在工区的东部, 构造主轴线向北东偏斜。在东西向高值区的两翼, 可见许多次级的南北向的高值区叠加(尤以 C 砂层最为明显), 这证实了研究区早期南北向挤压和晚期东西向挤压构造复合作用的存在。这种多期的构造变形容易使受力的岩石产生疲劳, 利于形成裂缝。

从 3 个砂层顶面地质曲率绝对值及高值区分布面积比较, C 砂层和 A 砂层明显大于 B 砂层; 从曲率分布的复杂程度和主高值区与次级高值区的复合关系来看, C 砂层与 A 砂层也明显高于 B 砂层; 而三层的气井产能对比也恰恰是 C 层和 A 层明显好于 B 层。这一方面证实了岩层变形强弱对裂缝发育程度的控制作用较强; 另一方面也说明构造变形较弱, 岩石变形强度处在形成裂缝的受力极限附近。

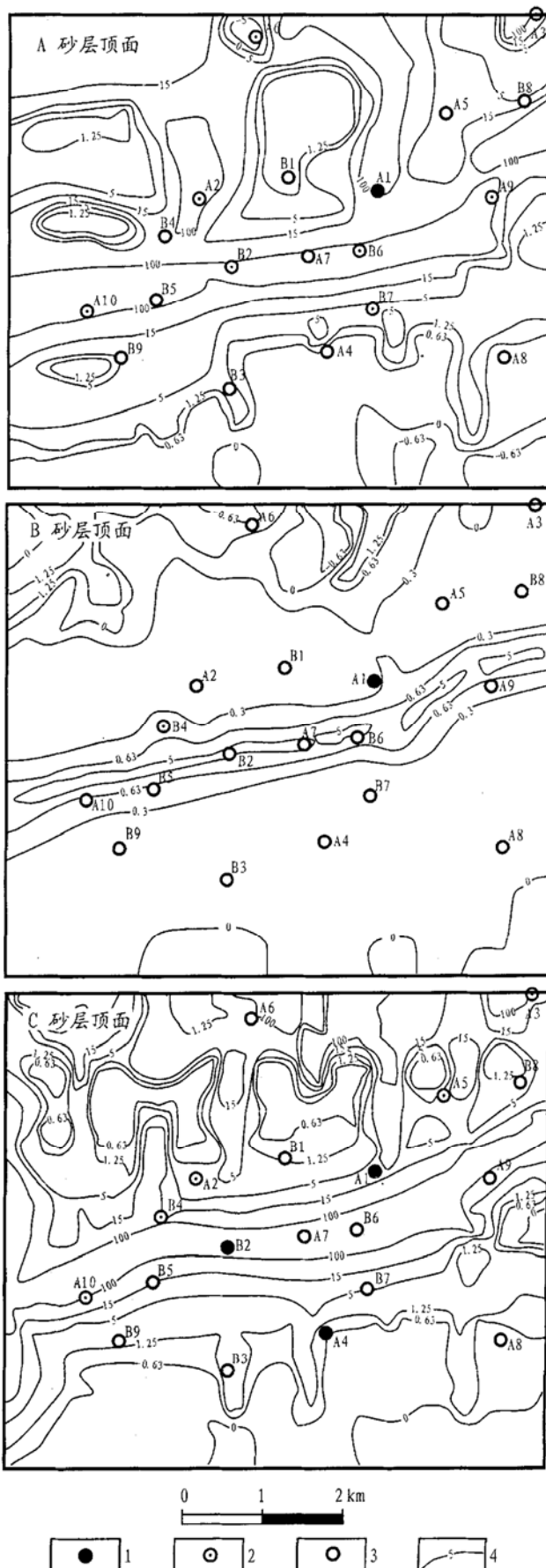


图 2 3 个砂层顶面的地质曲率等值线图

1. 层产能为高产(天然气自然产能 > 2 × 10⁴ m³/d);
2. 层产能为中产(天然气自然产能为 1 × 10⁴ ~ 2 × 10⁴ m³/d);
3. 层产能为低产(天然气自然产能 < 1 × 10⁴ m³/d);
4. 曲率等值线及曲率值

Fig. 2 Geologic curvature contour maps of three sandlayer supersurfaces

表2 A砂层和C砂层地质曲率与产能之间的统计关系

Table 2 Statistical relation between geologic curvature and production capacity in A and C sandlayers

曲率范围/ km ⁻¹	A 砂 层						C 砂 层					
	井 数 / 口			所占比例 / %			井 数 / 口			所占比例 / %		
	高产	中产	低产	高产	中产	低产	高产	中产	低产	高产	中产	低产
> 100	1	5	2	12.5	62.5	25	1	1	2	25	25	50
5~ 100	0	2	3	0	40	60	1	3	4	12.5	37.5	50
< 5	0	1	5	0	16.7	83.3	1	1	5	14.3	14.3	71.4

同一构造部位不同砂层之间的变形差异可能导致裂缝的发育与否。

通过对A砂层和C砂层(B砂层中只有一个高产层和一个中产层)各地质曲率区间内高、中、低产层的所占概率(表2)统计发现,两个砂层的地质曲率与产能之间具有很好的统计正相关关系。

进一步的研究发现,高、中产井的分布与两组构造的叠加复合有密切的关系。东西向主体鼻状构造与南北向次级鼻状构造的交叉部位,往往可以获得高产;而地质曲率分布图比构造图更能清楚地体现这两组构造形变的复合关系。

A层仅有1口高产井,即A1井,该井就处在构造主轴线与次级鼻状背斜的交叉部位;A层中产井共有8口,分别为A2、A3、A6、A9、A10、B2、B6和B7井,其中A2、A10、B6和B7共4口井是处于两组构造的复合部位,占中产井总数的50%。

B层仅有1口高产井(A1)和1口中产井(B4),其中A1井处于构造复合部位。

C层共有高产井3口,分别为A1、A4和B2井,其中A1和A4井处于构造复合部位;C层共有中产井5口,分别为A2、A3、A5、A10和B4井,其中B4和A5井处于构造复合部位。

A1井是区内唯一的一口三层均获高产的井,通过曲率分布图可以看出,三层都显示A1井处在南北向次级构造与东西向主体构造的交叉部位;A4井在C层高产而在A、B两层均为低产,在A、B两层曲率图上没有次级鼻状构造存在,但在C层A4井附近有一个较大规模的次级鼻状构造存在;A2井的A层和C层中产,而B层却为低产,曲率图上显示,在A层该井位处于次级构造较高曲率值区,C层该井位处于主体鼻状构造的较高曲率区,而唯独B层处于曲率相对低值区;B4井的B层、C层均为中产而A层为低产,曲率分布图显示,B层B4井处于主体构造高曲率值区,C层处于构造复合部位,而A层则处于曲率低值区内。

曲率值和曲率反映的构造复合关系能有效地预测裂缝分布。主体鼻状构造与次级正向构造的复合

部位是裂缝发育最有利的部位,主体鼻状构造轴线附近的曲率高值区次之,主体构造轴线外围曲率较高值区和与主体构造呈复合关系的次级构造内部曲率较高值区再次之,主体构造翼部次级构造再次之,主体构造翼部的曲率低值区和负向变形区最差。

5 结论

a) 运用改进曲率算法计算得到的地质曲率分布图具有很好的实际效果,同构造图相比,具有更高的定量化程度和更好的直观效果,使区内的构造复合关系被更清晰地体现。

b) 通过分砂层地质曲率分析发现,各砂层在具有大致相同的构造趋势的同时,在总体变形强度和构造复合关系上还存在明显的差异,这体现了分砂层作图的意义。

c) 不同砂层之间的对比分析表明,曲率值总体高低与各层天然气产能的高低具有良好的对应关系,甚至同一口井的3个砂层之间的曲率差异与各层产能之间都有较好的匹配关系。

d) 在同一砂层内部,曲率值的高低以及曲率所反映出的构造复合关系能较好地反映裂缝的分布规律,并由此建立了裂缝发育程度的预测模式。

参考文献:

- [1] 樊生利,童崇光.四川二叠系碳酸盐岩裂缝系统成因模式探讨[J].石油实验地质,1995,17(4):343-350.
- [2] 曾联波,田崇鲁.伸展构造区低渗透储层构造裂缝的分布特征[J].石油实验地质,1997,19(4):344-347.
- [3] Murray G H. Quantitative fracture study, Sanish pool, Mckenjie Co., north Dakotu[J]. AAPG, 1968, 52: 57- 65.
- [4] 魏永佩,陈会鑫,等.松辽盆地十层断陷地下裂缝预测方法[J].中国海上油气地质,1998,12(3):180-183.
- [5] 包强,刘仲宣.资阳地区震旦系裂缝特征及控制因素初探[J].天然气工业,1996,16(5):28-31.
- [6] 耿文志,崔世南.川南地区南荔桐构造阳新统裂缝发育带预测[J].成都理工学院学报,1995,22(4):86-89.
- [7] 梅廉夫,李春梅.江汉盆地王场地区泥岩储层裂缝演化及其模拟[J].地球科学,1995,20(3):256-263.

- [8] 许浚远, 彭大钧. 围压对构造裂缝孔隙度的重要影响[J]. 石油学报, 1995, 16(3): 44- 47.
- [9] 项希勇, 穆 星. 多参数油气横向检测技术[J]. 复式油气田, 1998, (2): 46- 50.

APPLICATION OF SINGLE SANDLAYER GEOLOGIC CURVATURE ANALYSIS TO FRACTURE PREDICTION

HU Zong-quan¹, LIAO Hong-wei², LIU Ren-he³

(1. *Research Institute of Exploration and Production, SINOPEC, Beijing 100083, China;*

2. Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069, China;

3. Langfang Branch, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC, Langfang, Hebei 065007, China)

Abstract: As a traditional fracture predicting method, curvature analysis was gradually improved in the long period of application. The geologic curvature used in this paper is a new kind of curvature calculating method for geologic layers, which processes strictness in mathematics and practical significance in geology. The geologic targets of this research are three sandlayers with stable distribution laterally in a certain Jurassic formation. The previous research of this area investigated fracture distribution rules by the supersurface structural map of the overall formation; only a series of simple and qualitative conclusions were obtained about the relation between structure and fracture distribution. To reveal the controlling effect of structure upon fracture distribution, the structural map of each sandlayer supersurface was interpreted accurately with three-dimensional seismic data, the supersurface geologic curvature of each sandlayer was calculated with the new improved geologic curvature calculating method, and the geologic curvature values were used as fracture predicting parameters. Research outputs indicate that there are apparent differences between the distribution rules and values of geologic curvature for each sandlayer, the overall difference among the curvature values of each sandlayer has a very good matching relation with the overall difference among the production capacity of each sandlayer, and fine statistical relation exists between the natural production capacity and geologic curvature value of each well point in each sandlayer. Curvature analysis proved the existence of compound structures in the study area, and revealed that fractures often develop in the superimposed of structures. All this conclusions are of significance for fracture prediction before drilling.

Key words: natural production capacity; geologic curvature; fracture; structure; prediction of fracture distribution