

构造裂缝定量预测的一种新方法——二元法*

申 一 钱祥麟 霍 红

(北京大学地质学系, 北京 100871)

杨友卿

(国家地震局地质研究所, 北京 100029)

构造裂缝定量预测技术是目前裂缝性油藏在勘探和开发中迫切需要解决的一个问题。以吐哈盆地中的丘陵油田作为研究实例, 分别采用岩石破裂法和能量法, 对油田储集层中构造裂缝的发育情况进行了数值模拟。研究表明, 岩石破裂法的结果与能量法的结果可互为补充。在此基础上提出了由破裂值及能量值共同决定构造裂缝发育程度的新方法, 称之为二元法。按此方法给出了破裂值、能量值与裂缝密度值之间关系的拟合公式。将此公式计算出的裂缝密度预测值与该地区 16 个井段的裂缝密度观测值进行对比, 其中 12 个井段处的相对误差不超过 25%。根据拟合公式, 可将数值模拟得出的破裂值分布图及能量值分布图转化成该地区裂缝密度分布的预测图。

关键词 构造裂缝 裂缝密度 定量预测 破裂法 能量法 二元法

第一作者简介 申 一 男 62 岁 教授 地球动力学

对于新开发的裂缝性油藏, 必须首先弄清楚油藏内部的裂缝分布。要对裂缝进行预测则必须知道裂缝的成因。Nelson^[1]把与局部构造事件相联系而产生的裂缝归属为构造裂缝。此类裂缝的发育状况往往与构造位置有关, 它是由局部构造应力场产生的, 例如褶皱产生的裂缝和断层作用产生的裂缝。另一类裂缝的大小、方向与构造位置无关, 这里称之为非构造裂缝, 例如, 区域性发育的节理, 它们的成因有多种可能^[2~3]。本文将只研究构造裂缝。

模拟构造裂缝发育情况, 常用的有下列几种方法。

第一种方法可简称为岩石破裂法^[4]。这种方法通过解析地解边值问题或用有限元法确定地质模型中的应力分布, 由岩石脆性破裂准则求出发生脆性破裂的地方。将它们与地震资料得到的构造形态及岩芯中得到的裂缝密度数据相结合, 以预测远离钻井的裂缝密度。

第二种方法可简称为主曲率法^[5~7]。这种方法假设, 与挠曲有关的裂缝将发生在构造面主曲率或倾角变化率极大处。

第三种方法可简称为能量法^[8]。这种方法认为, 具有相对较高应变能的岩石比同样厚度但较低应变能的岩石有更多的裂缝。

除了上述三法外, 还有一种统计学的方法, 被 Narr 和 Lerche^[9]及 Narr^[10]所采用。他们通

* 中国石油天然气总公司“八五”攻关项目成果(85-103-02-02)

收稿日期: 1997-07-18

过统计学方法推出地下不同厚度岩层中裂缝间距的大小。此法对构造裂缝和非构造裂缝均适用。

应当指出的是,虽然目前模拟构造裂缝的发育已有多种方法,但由于问题本身的复杂性,现有的方法基本上还处于探索性阶段,至今还缺乏一种完善的、能全面解决构造裂缝定量预测问题的数值模拟方法。因此迫切需要开展这一领域中的研究工作。

本文以吐鲁番-哈密盆地中台北坳陷区的丘陵油田为例,分别使用岩石破裂法及能量法,对该油田储集层中的裂缝发育情况进行研究,并在此基础上提出了一种定量预测构造裂缝的新方法——二元法。

1 用破裂法研究丘陵油田的构造裂缝

1.1 三维构造应力场的数值模拟

丘陵油田东西向长约10 km,南北宽约5 km。它的含油气储层主要为中侏罗统七克台组(J_2q)、三间房组(J_2s)、西山窑组(J_2x)。这里将使用有限元方法对丘陵油田的构造应力场进行三维数值模拟,为此,取一略大于丘陵油田的块体作为研究对象,东西长15.4 km,南北宽7.7 km,沿垂直方向分为6层,自下而上分别代表:基底、西山窑组、三间房下组、三间房上组、七克台组、沉积盖层。通过对丘陵油田地质背景的分析,我们将着重计算中侏罗世末及第三纪末两期构造应力场,前者简称为早期应力场,后者简称为晚期应力场。各层的材料常数参照岩石样品的岩石力学实验结果来选取,采用线弹性体的SAP5有限元程序,分别计算得出了早期和晚期的三维构造应力场。对于本文的目的,这里不列出具体的构造应力场,而是将它们用来研究岩石的破裂。

1.2 岩石破裂准则和破裂值

根据对丘陵油田的岩芯中裂缝的观察,它们主要是剪裂缝。因而,下面将只研究应力场作用下的岩石什么情况下发生剪破裂。判断岩石在应力场的作用下是否发生剪破裂往往采用库伦剪破裂准则^[1]。按库伦准则,破裂包络线为直线。实际情形中,破裂包络线可以通过岩石力学实验来确定。若破裂包络线为二次抛物线的形式,它所代表的破裂准则通常称为莫尔准则。这里在计算中采用了由丘陵油田的岩石样品经实验得出的破裂包络线,它是一条二次抛物线。

然而,按剪破裂准则只能判断出是否发生了剪破裂,而不能判断剪破裂发育的程度。为了说明某处的应力状态离破裂状态有多远,这里采用与王仁等^[12]类似的做法,引进破裂值的概念。破裂值 I 的定义是(图1)

$$I = |\tau_n / [\tau]|$$

式中 τ_n 是剪裂面上的剪应力; $[\tau]$ 为抗剪能力。显然,若某处的 $I < 1$, 则未发生剪破裂; 若 $I \geq 1$, 则发生了剪破裂。但是,若 $I \gg 1$, 可以认为早已发生了剪破裂,而 $I \ll 1$, 意味着离发生剪破裂还差很远。这样一来,便可将破裂值 I 的大小与剪裂缝发育程度的大小定性地联系起来,并认为破裂值 I 大的区域比破裂值 I 小的区域裂缝相对地要更发育一些。

1.3 破裂值与裂缝发育程度的关系

表1给出了丘陵油田储集层中观测到的裂缝密度 β_0 。与按破裂值定义计算得到的破裂值

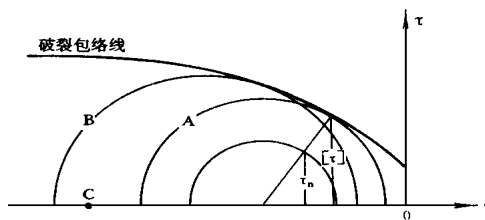


图1 岩石剪破裂准则示意图

I 的对照表。表中裂缝密度观测值 β_0 是从各钻井岩芯在不同层位观测到的裂缝频率^{*}, 即线密度, 简称之为裂缝密度。 I_L 及 I_E 分别代表由晚期及早期构造应力场算出的破裂值。表 1 中的 L23 及 L25 两井处将三间房组数据分为上、下两组列出(上行数据对三间房上组, 下行数据对三间房下组), 而对其他井因缺乏分为上、下组的 β_0 数据, 均未分上、下组。从表 1 看到, 裂缝密度观测值 β_0 大的地方, 破裂值 I 往也大, 这说明破裂值与裂缝密度之间大体上有良好的对应关系。例如, L9 及 L22 两井处, β_0 大, 而它们均在 I 的高值区。又如 L4 井, 它在三间房组中的 β_0 较大, 但其 I_L 不大而 I_E 大, 则可认为此处裂缝主要是在早期产生的。同样道理可认为, L25 井在三间房上组中的裂缝是在晚期产生的。类似的特点不一一列举了。应该说明的是, 表中也有一些地方对应关系并不怎么好。例如, L22 井在三间房组的 β_0 比 L9 井高, 但 L22 井的 I 值却比 L9 井低。又如 L5 井, 它在七克台组的 β_0 比较低, 但 I 值却相当高。造成这一情况的原因是很复杂的, 其中一个很可能的原因是岩石破裂法的模拟结果并不能完全反映岩层中构造裂缝的实际发育情况。在下面将看到, 这里的某些符合得不好的结果, 可以由能量法的模拟结果来弥补。

表 1 各井段的破裂值 I 与裂缝密度观测值 β_0 对照表

井号	七克台组			三间房组			西山窑组		
	$\beta_0/\text{条}\cdot\text{m}^{-1}$	I_L	I_E	$\beta_0/\text{条}\cdot\text{m}^{-1}$	I_L	I_E	$\beta_0/\text{条}\cdot\text{m}^{-1}$	I_L	I_E
L2	—	—	—	0.57	0.84	0.66	—	—	—
L4	—	—	—	1.14	0.73	1.01	0.15	0.75	0.80
L5	0.49	0.98	0.75	0.49	0.84	0.62	1.93	0.90	0.60
L8	—	—	—	—	—	—	0.48	0.91	0.70
L9	2.20	1.14	0.97	2.20	1.11	1.08	—	—	—
L10	—	—	—	0.53	0.86	0.65	0.46	0.75	0.50
L22	—	—	—	5.73	0.95	0.87	2.14	0.93	1.00
L23	—	—	—	0.51	0.97	0.80	—	—	—
L23	—	—	—	1.45	1.03	0.85	—	—	—
L24	—	—	—	—	—	—	0.51	0.83	0.60
L25	—	—	—	2.39	0.96	0.73	—	—	—
L25	—	—	—	1.28	0.92	0.68	—	—	—

2 用能量法研究丘陵油田的构造裂缝

根据 Price^[8] 的思想, 现在来研究地层中单位体积应变能与裂缝发育程度的关系。

2.1 计算单位体积应变能

地层中单位体积的应变能 u 由下式给出

$$u = [\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2 - 2\nu(\sigma_X \sigma_Y + \sigma_Y \sigma_Z + \sigma_Z \sigma_X) + 2(1 + \nu)(\tau_{XY}^2 + \tau_{YZ}^2 + \tau_{ZX}^2)] / 2E$$

式中 E 为杨氏模量; ν 为泊松比; σ_X, τ_{XY} 等为应力分量。这些应力分量可以是上一节用有限单元法所得到的; 也可以直接由各地层的构造形态算出各处的主曲率, 在薄板理论的假定下,

* 穆龙新, 贾爱林, 谭光天. 丘陵油田岩芯裂缝初步研究. 吐哈油田综合研究大队, 1991

求出各点的应力分量。这里我们直接从地层的构造形态求出应力分量, 然后按上面的公式求出了丘陵油田储集层中各处的单位体积应变能(以下简称能量值, 并以 A 表示)。

2 2 能量值与裂缝发育程度的关系

表 2 列出了丘陵油田储集层中各井段的能量值 A 与岩芯中的裂缝密度观测值 β_0 的对照表。从表 2 看出, 在相当多的地方, 裂缝密度观测值 β_0 大处, 能量值 A 相对地也较大, 这是符合能量法的基本期望的。特别是在 L22 井及 L9 井两处, 裂缝密度观测值 β_0 值较高, 而能量值 A 也很大, 且 L22 井的 A 比 L9 井的 A 大, 这弥补了上面用岩石破裂法所得模拟结果之不足。还有, 对 L5 井, 在七克台组中, β_0 较小, 现算出之 A 也较小, 这也弥补了前面结果的不足。但是, 能量法的结果也并非处处符合得很好, 例如, 在 L2 井 J_2s 组, L10 井及 L24 井的 J_{2x} 组等三处, β_0 均较小, 而计算得出的 A 均较大。然而, 在这三处, 前面给出的破裂值 I 均较低(见表 1), 这说明岩石破裂法也弥补了能量法之不足。

表 2 各井段的能量值 A 与裂缝密度观测值 β_0 对照表

井号	七克台组		三间房组		西山窑组	
	$A / \text{kg} \cdot \text{cm}$	$\beta_0 / \text{条} \cdot \text{m}^{-1}$	$A / \text{kg} \cdot \text{cm}$	$\beta_0 / \text{条} \cdot \text{m}^{-1}$	$A / \text{kg} \cdot \text{cm}$	$\beta_0 / \text{条} \cdot \text{m}^{-1}$
L2	—	—	522	0. 57	—	—
L4	—	—	342	1. 14	552	0. 15
L5	49	0. 49	142	0. 49	22	1. 93
L8	—	—	—	—	176	0. 48
L9	1 865	2. 20	1 373	2. 20	—	—
L10	—	—	392	0. 53	532	0. 46
L22	—	—	5 299	5. 73	1 466	2. 14
L23	—	—	1 044	0. 98	—	—
L24	—	—	—	—	555	0. 51
L25	—	—	1 508	1. 84	—	—

3 二元法及其对构造裂缝密度的定量预测

3 1 二元法的基本思想

上面看到, 单独用破裂值 I 或单独用能量值 A 来对应裂缝密度观测值 β_0 都有一定的局限性, 而这两种方法的模拟结果却可互相补充。从物理本质上来看, 破裂值 I 的大小不能完全反映构造裂缝发育程度的高低。例如, 图 1 中所示两个与破裂包络线相切的圆 A, B, 它们对应的破裂值 I 均为 1, 但它们所包含的应变能是显然不同的。能量值大者有可能发育更多的裂缝^[8], 因此, 单靠破裂值来决定裂缝的发育程度是不够的, 还必须考虑到能量值的影响。另一方面, 能量值 A 大也不一定能发育裂缝, 例如, 考虑岩石受静岩应力作用这种特殊情形, 这时, 它在图 1 中的应力圆成为坐标横轴上的一个点 C。它的能量值 A 可以很大, 但其破裂值 I 始终为零, 而实际上这时岩石也不会发生剪破裂。可见, 单由能量值 A 来确定裂缝发育程度也不行, 还须考虑是否发生了剪破裂, 即还须考虑破裂值 I 之大小。由此, 我们提出定量预测构造裂缝的一种新思想: 构造裂缝的发育程度由破裂值 I 及能量值 A 两者共同来决定, 破裂值代表了裂缝发育的可能性, 能量值代表了发育能力的大小; 当破裂值 I 较低, 没有达到使岩石

发生宏观上明显剪破裂的某个临界值 I_c 时, 裂缝发育程度主要由破裂值 I 决定, 但当 I 达到 I_c 之后, 岩石已发生宏观上明显的剪破裂, 此时裂缝发育程度主要由能量值 A 决定。按这样一种基本思想来进行构造裂缝定量预测的方法, 这里称之为二元法。

3.2 二元法预测裂缝密度的拟合公式

要用二元法对构造裂缝的发育情况进行定量预测, 必须给出破裂值 I 、能量值 A 与裂缝发育程度之间的定量关系。这里, 按二元法的基本思想, 结合前面对裂缝密度的研究, 给出定量预测裂缝密度的一种可能的二元拟合公式如下

$$\beta = a_1 I^2 + a_2 \qquad I < I_c \text{ 时}$$
$$\beta = a_1 I_c^2 + a_2 + a_3 A + a_4 \qquad I \geq I_c \text{ 时}$$

式中 β 为裂缝密度预测值; I 为按岩石破裂法计算所得破裂值(取 I 为 I_L 和 I_E 的平均值); A 为按能量法计算所得能量值(单位体积的应变能)。 a_1, a_2, a_3 和 a_4 为四个待定常数, 由已有井段中裂缝密度的观测值 β_0 通过最小二乘法拟合确定。 I_c 是破裂值 I 的临界值, 当 I 达到 I_c 时, 岩石发生了宏观上明显的剪破裂。 根据岩石力学实验的结果, 当施加的应力达到使岩石完全破坏的应力峰值的 80% 时, 明显的宏观破裂就已出现, 再根据拟合公式的试算情况, 这里取 $I_c = 0.805$ 。 以上给出的只是拟合公式的一种可能的形式, 通过更深入的理论分析与实际情况的对比, 有可能得到能更好地模拟裂缝密度 β 与破裂值 I 、能量值 A 关系的公式。

3.3 丘陵油田储集层中裂缝密度定量预测的结果

对于上面给出的拟合公式, 根据丘陵油田某些井段岩芯中观测到的裂缝密度值 β_0 (表 1), 用最小二乘法进行拟合, 得出了公式中的待定常数为

$$a_1 = 0.466\ 3, a_2 = 0.272\ 6, a_3 = 0.000\ 981\ 5, a_4 = 0.018\ 98$$

一旦确定了这几个待定常数, 便可由前面计算中得到的 I, A 值代入公式中求出油田储集层中各处的裂缝密度预测值。 为了具体说明这里预测的精确度, 表 3 对油田已有的 17 口钻井列出

表 3 二元法对各井段裂缝密度的预测值 β

井号	七克台组					三间房组					西山窑组				
	$\frac{A}{\text{kg} \cdot \text{cm}}$	I	$\frac{\beta_0}{\text{条} \cdot \text{m}^{-1}}$	β	$r/\%$	$\frac{A}{\text{kg} \cdot \text{cm}}$	I	$\frac{\beta_0}{\text{条} \cdot \text{m}^{-1}}$	β	$r/\%$	$\frac{A}{\text{kg} \cdot \text{cm}}$	I	$\frac{\beta_0}{\text{条} \cdot \text{m}^{-1}}$	β	$r/\%$
L2	45	0.78	—	0.54	—	522	0.75	0.57	0.53	6.16	106	0.71	—	0.51	—
L3	4 045	0.71	—	0.49	—	18 493	0.78	—	0.55	—	5 619	0.91	—	6.07	—
L4	1 056	0.91	—	1.59	—	342	0.87	1.14	0.89	21.81	552	0.78	0.15	0.55	268.45
L5	49	0.87	0.49	0.60	23.24	142	0.73	0.49	0.52	6.35	22	0.75	1.93	0.58	70.13
L7	157	0.81	—	0.71	—	522	0.81	—	1.07	—	251	0.71	—	0.47	—
L8	359	0.80	—	0.91	—	6 626	0.80	—	0.57	—	175	0.81	0.48	0.73	51.63
L9	1 865	1.06	2.20	2.39	8.43	1 373	1.10	2.20	1.90	13.49	140	1.07	—	0.69	—
L10	289	0.73	—	0.51	—	392	0.76	0.53	0.54	1.59	532	0.63	0.46	0.45	1.14
L11	387	0.74	—	0.56	—	5 957	0.74	—	0.54	—	536	0.79	—	0.55	—
L12	196	0.88	—	0.75	—	191	0.85	—	0.74	—	206	0.58	—	0.42	—
L13	141	0.91	—	0.69	—	47	0.93	—	0.60	—	147	0.96	—	0.70	—
L14	36	0.71	—	0.50	—	50	0.71	—	0.50	—	10	0.53	—	0.38	—
L22	748	0.91	—	1.29	—	5 299	0.91	5.73	5.76	0.46	1 466	0.97	2.14	1.99	6.82
L23	506	0.87	—	1.05	—	1 044	0.91	0.98	1.58	61.22	34	1.00	—	0.59	—
L24	1 138	0.81	—	1.67	—	1 852	0.77	—	0.55	—	555	0.72	0.51	0.51	0.19
L25	966	0.81	—	0.52	—	1 508	0.82	1.84	2.04	10.63	860	0.71	—	0.45	—
L26	1 533	0.70	—	0.50	—	3 087	0.72	—	0.51	—	1 505	0.75	—	0.51	—

各井段的裂缝密度预测值 β 及已知的观测值 β_0 ，并用相对误差 $r\%$ 来说明预测的精确度，其中 r 为

$$r = \frac{|\text{预测值} - \text{观测值}| \times 100}{\text{观测值}}$$

与全部 16 个已知的裂缝密度观测值 β_0 的对比表明，其中有 12 个预测值和观测值的相对误差不超过 25%，可以认为符合得较好。这比单独用 I 或单独用 A 的预测在符合率方面有很大提高。

最后，按照上述拟合公式，并根据第 2、3 节中给出的破裂值 I 、能量值 A 的等值图，计算、绘出油田在三个储集层——七克台组、三间房组及西山窑组的裂缝密度分布预测图(图 2、3、4)。

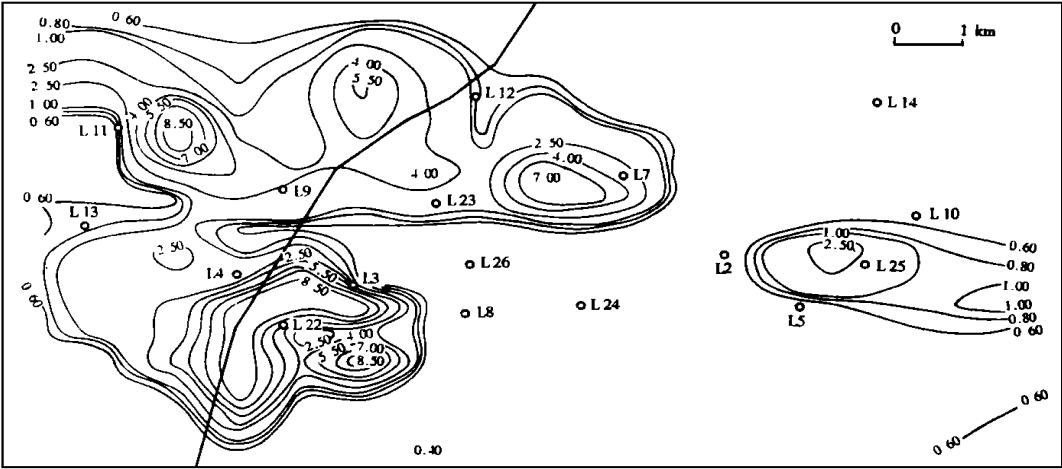


图 2 七克台组裂缝密度分布预测图(单位:条/m)

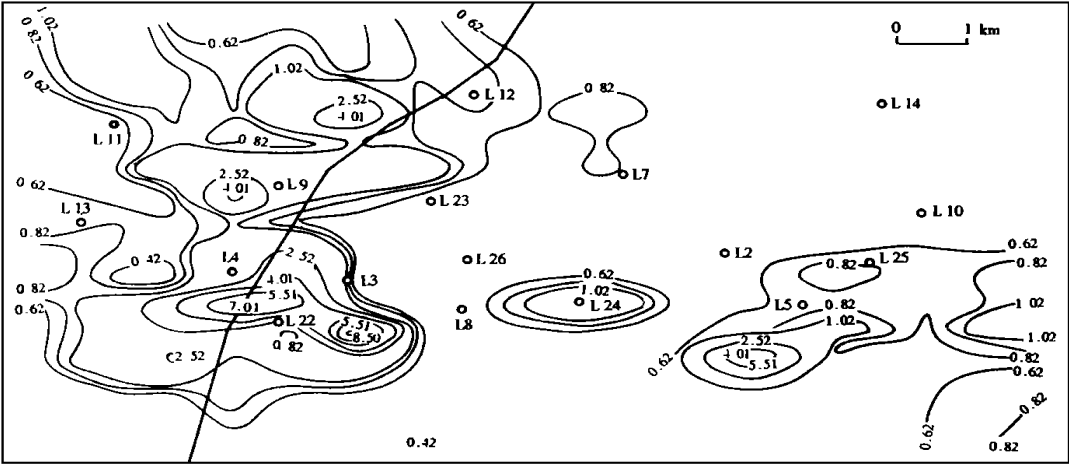


图 3 三间房组裂缝密度分布预测图(单位:条/m)

图中近 NE 向的折线标出了油田中一条主要断层的位置。从这三张图中可以看到地层中任一处的裂缝密度预测值、裂缝密度分布特征。详细的预测裂缝分布规律这里不多说了。

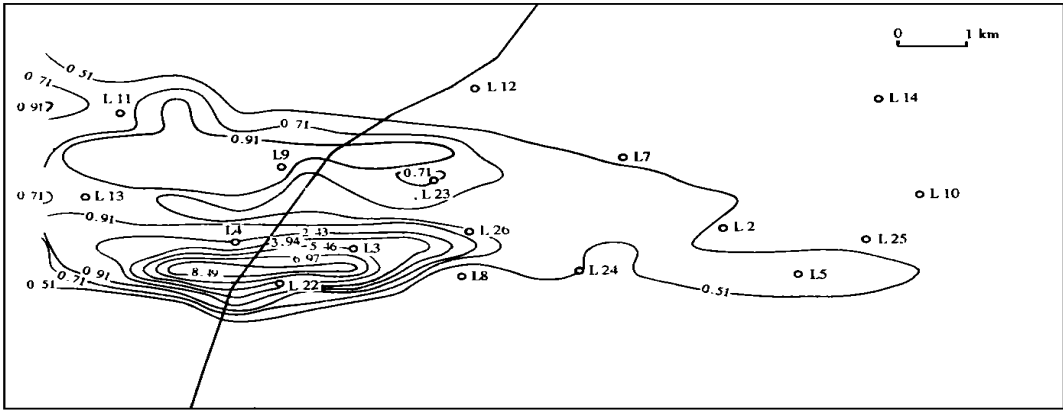


图 4 西山窑组裂缝密度分布预测图(单位: 条/m)

4 结论

本文在综述前人对构造裂缝的数值模拟方法的基础上,采用岩石破裂法和能量法,分别计算得出丘陵油田储集层破裂值 I 及能量值 A 之分布,并与已有的裂缝密度观测值 β_0 进行对比。结果表明,破裂值 I 及能量值 A 分别均能大体上与 β_0 有较好的对应关系,但也还存在着某些对应得不好的地方。根据以上两种方法的研究结果,并从破裂值 I 、能量值 A 对裂缝发育程度影响的物理本质上考虑,提出了由破裂值 I 及能量值 A 共同来定量预测裂缝发育的新方法,即二元法。按二元法的思想,对丘陵油田储集层中发育的裂缝密度与破裂值 I 、能量值 A 的关系给出了具体的拟合公式。按照这个公式,并根据破裂值 I 、能量值 A 的等值图,计算得出了油田在三个储集层中的裂缝密度分布预测图。由于拟合公式可采用不同的形式,以及受实际资料可靠性的局限,预测的效果须作进一步的实际检验,并可提出更合适的拟合公式。总之,二元法在理论上比较完善,预测效果比较好,其研究结果对裂缝性油藏的勘探、开发工作有重要的参考价值。

致谢: 作者衷心感谢吐哈石油勘探开发指挥部研究大队的有关同志及课题组的其他同志,在本文研究工作中给予的巨大帮助。

参 考 文 献

- 1 Nelson R A. Geologic analysis of naturally fractured reservoirs. Houston: Gulf Publishing Company, 1985. 12~ 17
- 2 吴海威. 累积损伤疲劳断裂——地壳构造变形的一种基本机制. 地质科学, 1991, 10(2): 101~ 110
- 3 Lorenz J C, Lawrence W T, Warpinski N R. Regional fractures I: a mechanism for the formation of regional fractures at depth in flat-lying reservoirs. AAPG Bull, 1991, 75(11): 1 714~ 1 737
- 4 范 高尔-拉特 T D. 裂缝油藏工程基础. 陈钟祥, 金铃年, 秦同洛译. 北京: 石油工业出版社, 1989. 3~ 16
- 5 Murray G H. Quantitative fracture study, Sanish pool, McKenzie County, North Dakota. AAPG Bull, 1968, 52(1): 57~ 65
- 6 McCaleb J A, Wayhan P A. ELK Basin Madison heterogeneity—its influence on performance. Jour Pet Tech, 1969, 21(1): 153 ~ 159
- 7 曾锦光, 罗元华, 陈太源. 应用构造面主曲率研究油气藏裂缝问题. 力学学报, 1982, (2): 202~ 206
- 8 Price N J. Fault and joint development in brittle and sem+brittle rock. London: Pergamon Press, 1966. 176
- 9 Nar W, Lerche L. A method for estimating subsurface fracture density in core. AAPG Bull, 1984, 68(5): 637~ 648

Afterwards there was a great leap in the process of human cognition when people differentiated the sedimentary basin from other tectonic unit in the petroliferous province, thus knowing that the basin is the only place suiting the formation of hydrocarbon. But the problems that what role would the fluidity of oil and gas play in pool formation, and what kind of principle would they follow, and how to utilize it for exploration still remain unsolved. Therefore, turning oil and gas exploration to basin merely shows that people have found the place where the oil and gas are being, but how to discover them is still remains discussing.

(上接第7页)

- 10 Nar W. Fracture density in the deep subsurface: techniques with application to Point Arguello Oil Field. AAPG Bull, 1991, 75 (8): 1 300~ 1 323
- 11 王仁, 丁中一, 殷有泉. 固体力学基础. 北京: 地质出版社, 1979. 71~ 72
- 12 王仁, 何国琦, 殷有泉等. 华北地区地震迁移规律的数学模拟. 地震学报, 1980, 2(1): 32~ 42

A NEW METHOD FOR QUANTITATIVE PREDICTION OF TECTONIC FRACTURES — TWO - FACTOR METHOD

Ding Zhongyi Qian Xianglin Huo Hong
(*Department of Geology, Beijing University, Beijing*)

Yang Youqing
(*Institute of Geology, State Seismological Bureau, Beijing*)

Abstract

The quantitative prediction technique of tectonic fractures is an urgent subject in the exploration and development of fractured reservoirs. In the present paper, rock fracture method and energy method are used to simulate tectonic fracture development in Qiuling Oilfield of Turpan-Hami Basin. The results from both the rock fracture method and the energy method are complementary each other. Thus, a new method — two factor method is proposed to simulate the development of tectonic fractures by means of fracture value and energy value together. According to this method, a fitting formula predicting the fracture density through calculating fracture value and strain energy is given. A comparison of the predicted fracture densities with the corresponding observed ones of 16 wells was made, the results show that the relative errors of 12 wells are less than 25%. On this basis, the predicted diagrams showing the density distribution of tectonic fractures within the producing formations of the Qiuling Oilfield are presented.