

# 辽河张强凹陷科尔康油田储层裂隙预测研究

周新桂 孙宝珊 李跃辉

(中国地质科学院地质力学研究所)

**摘要** 本文在岩芯裂隙观察和油田应力场模拟的基础上,利用 F 指标法对张强凹陷科尔康油田主要储层裂隙的发育程度和发育规律做了预测研究,评价了该油田各区块裂隙的发育情况,指出了有利于油气富集部位。

**关键词** 裂隙预测 储层 科尔康油田 张强凹陷

## 0 前言

覆盖区节理裂隙研究方法很多,近几年利用古地磁资料、区域构造面理、四臂测井及精细三维地震处理平面资料来进行覆盖区岩芯定向,在研究节理裂隙展布规律上取得长足进展,特别是应力场计算基础上的裂隙预测、运移势计算等给油田勘探开发注入了活力。F 指标法、差应力分析法、变形能分析等都是基于应力场计算基础上的裂隙预测方法。

科尔康油田晚侏罗统义县组和沙海组是重要产油层位。前者岩性致密(安山岩、安山玢岩、凝灰岩为主),储集条件差,只有位于高断阶、高断隆或靠近较大规模断裂部位的义县组顶段由于经历了断裂的改造以及长期风化淋滤等作用,易形成微孔或溶孔、裂缝型储层。与义县组相比,沙海组砂岩、砂砾岩、细砂岩储层胶结和压实作用较为强烈,属较差孔隙型或裂隙-孔隙型储层。沙海组储层中节理裂隙多为“X”型,以高角度裂隙为主,属张性、张扭性,且许多裂隙含油。如白 2 井和白 1 井。两者比较,白 2 井物性虽稍优于白 1 井,但白 1 井裂缝平均密度为 4.5 条/m 是白 2 井(0.45 条/m)的 10 倍,试油结果白 1 井日产 1.27t 约为白 2 井日产量的 3 倍,证明了裂隙的发育程度与油气产量(在一定范围内)呈正相关关系<sup>[1]</sup>。所以,研究沙海组储层中裂隙的分布和发育规律,可以正确认识或评价沙海组低孔、低渗储层,寻找有利的孔隙-裂缝聚油带。

## 1 科尔康油田裂隙 F 指标法预测

### 1.1 F 指标法理论依据

Miller 引进了强度系数 ( $R$ ) 研究岩石破碎。他定义岩石的强度系数为裂隙岩体中任一截面上抵抗拉伸或剪切破坏的强度 ( $f_r$ ) 与同一截面受到拉应力或剪应力 ( $f$ ) 的比值,即  $R = f_r / f$

1969年 Bird等在研究金属材料时发现,在较低温度下金属材料的位错密度与差应力,平方成正比。70年代以来,Weathers等人发现石英、橄榄石、石灰岩、大理岩等的位错密度与差应力呈明显正向线性关系<sup>[2]</sup>,并确定了差应力与晶格位错密度之间的数学关系式。晶格位错是当岩石受力变形时,晶体内沿某一晶格面网发生中断,使其附近质点排列发生错动之结果,而裂隙的形成是在位错基础上进一步发展的结果。不难理解,岩石位错密度愈大,形成微裂隙的几率就越大,因此,可以用晶格位错密度大小来度量岩石裂隙发育程度。

在综合强度系数和位错密度公式基础上,可以得出评价岩石裂隙发育程度的  $F$  指标公式<sup>[3]</sup>:

$$F = K \left( \frac{f}{f_f} \right)^n$$

式中  $f$  为岩石破裂面的剪应力;  $f_f$  为破裂面的抗剪强度;  $K$  为与岩石有关的参数 (现取 1);  $n$  为的正整数,经验值  $n=2$ 。上式的物理意义在于:当  $F < 1$  时,岩石所承受的剪应力还未达到岩石的最大抗剪强度,岩石仅部分形成隐裂隙,此时裂隙的形成处于量的积累过程;当  $F > 1$  时,岩石所受的剪应力已达到或超过它本身的抗剪强度,岩石发生破裂。

据莫尔—库仑破裂准则,某一截面上岩石的抗剪强度  $f_f$  不仅与岩石本身的力学性质有关,而且还与作用于截面上的正应力有关,由此进一步推出  $F$  指标公式为:

$$F = \left[ \frac{(c_1 - c_3) \cos \theta}{2C + (c_1 + c_3) \operatorname{tg} \theta - (c_1 - c_3) \sin \theta \operatorname{tg} \theta} \right]^2$$

式中  $F$  为评价裂隙发育指标;  $C$  为岩石粘聚力 (MPa);  $c_1$ 、 $c_3$  为点上最大、最小主应力值张应力为负,压应力为正,单位 MPa;  $\theta$  为岩石内摩擦角 ( $^\circ$ )

## 1.2 油田应力场模拟简述

根据油田断裂展布形态,储、盖层分布特点建立了油田最重要的产油层沙海组下段平面有限元地质模型和白 2 井—白 4 井—白 7 井剖面有限元地质模型。以油田白 3 井、白 4 井、白 5 井、白 7 井岩石力学参数为依据,同时参考前人资料选取不同岩性和断裂带的岩石力学参数。在详细的石油构造分析基础上,应用构造体系分析法和钻孔井壁崩落法,厘定了该区燕山期和喜马拉雅期最大水平主压应力方向分别为  $N65^\circ - 70^\circ W$  和  $N65^\circ - 70^\circ E$ ,现今应力场最大水平主压应力方向为近 EW 向,应力大小由声发射法测定,以此确立油田应力场模拟加力的边界条件。采用边界载荷试凑法,使得在所选定的边界载荷下油田区内已知点上的计算值与实际值基本一致,模拟有效真实。

## 1.3 油田裂隙预测

油田区内应力资料源于科尔康油田沙海组下段顶界成藏期 (燕山期、喜马拉雅期) 应力场模拟和白 2 井—白 4 井—白 7 井剖面现今应力场模拟计算结果<sup>①</sup>,油田各区块岩石力学参数见表 1。按  $F$  指标公式求取各节点  $F$  指标值,然后绘制成图。

### 1.3.1 平面裂隙预测

油田平面裂隙预测以沙海组下段 (主力油层) 为例,科尔康油田晚侏罗世沙海组沉积时期,西侧 NNW—近 SN 向白 5 断裂和东侧 NNE—近 SN 向嘎力得断裂持续活动,使科尔康油田东、中、西三分格局日趋完善,长期高隆的白 5 断隆区和白 4—白 10—白 12 井高断阶带极可能成为构造裂缝的发育区。科尔康油田经历了阜新组末和泉头组末两次大的构造运动后,又经历了喜马拉雅期右行扭应力作用,必然影响先存破裂面的力学性质以及新

① 王连捷,孙宝珊,等. 张强凹陷科尔康油田地应力测量及其与油气关系. 科研报告 (内刊), 1995年

表 1 科尔康油田各区块岩石力学参数

Table 1 Rock mechanical parameters of different regions in Keerkang Oilfield

| 区块           | 岩性             | 岩石内摩擦角 ( $\mu\theta$ ) | 岩石粘聚力 ( $\times 10^{-3}$ M Pa) |
|--------------|----------------|------------------------|--------------------------------|
| 白 1 块        | 泥岩与粉砂岩、含砾砂岩互层  | 0.7944                 | 320.38                         |
| 白 2 块        | 砂砾岩、含砾砂岩、细砂岩   | 0.8325                 | 534.97                         |
| 白 3 块        | 粉细砂岩、砂砾岩夹泥岩    | 0.8468                 | 488.61                         |
| 白 4 块        | 砾状砂岩、粉细砂岩夹泥岩   | 0.6983                 | 300.28                         |
| 白 5 块        | 玄武岩、含砾砂岩、细粉砂岩  | 0.9506                 | 451.03                         |
| 白 6 块        | 细砂岩、含砾砂岩、砾岩夹泥岩 | 0.6513                 | 248.3                          |
| 白 7 块        | 砂砾岩、泥岩、砂岩互层    | 0.8105                 | 524.39                         |
| 白 8 块        | 细砂岩夹砂砾岩、泥岩     | 0.9828                 | 287.56                         |
| 1062 块       | 砂岩、砾岩          | 1.0264                 | 656.28                         |
| 白 4 与 1-49 块 | 含砾砂岩为主         | 0.7333                 | 352.67                         |
| 其它 1         | 泥岩             | 0.6672                 | 320.93                         |
| 其它 2         | 细砂岩            | 0.6943                 | 227.24                         |
| 其它 3         | 安山岩            | 0.8725                 | 87.30                          |
| 其它 4         | 砾岩 ( $K_i$ )   | 1.070                  | 1025.0                         |

的破裂面的形成和分布。

通过野外地质调查和 9 口井岩芯观察、部分井岩芯定向分析,沙海组下段发育多组裂隙 (NNW、NW、近 SN、NNE) 从岩石裂隙结构面性质、充填特点、配套组合及区域应力场演化特征和 NW 含油裂隙分析,燕山期形成的裂隙在沙海组裂隙网络中占相当大的比例。燕山期构造运动是形成沙海组裂隙的主因,其现今裂隙网络特点是多期构造运动综合作用的产物。通过沙海组下段顶储层 7 口井岩芯节理裂隙的统计分析,表明不同井区(块)裂隙发育程度明显不同。白 5 井、白 1 井、白 4 井、白 4-51-49 井观察井段裂隙平均密度达 18 条  $/m$ —1.3 条  $/m$ ,而白 2 井、白 6 井、白 3 井观察井段裂隙平均密度低,为 0.18 条  $/m$ —0.45 条  $/m$ 。

科尔康油田沙海组下段顶燕山期  $F$  指标图中十分清楚地显示出  $F$  指标高值区的分布范围和规律(图 1)。在白 5—白 15 井区和白 4—白 10—白 12 井  $F$  等值线呈串珠状的近 SN 分布的两个高值区带恰与白 5 断裂带、嘎力得断裂带控制的白 5 断隆区和白 4—白 10—白 12 高断阶带位置相对应。 $F$  指标高值区于白 15 井东侧附近, $F$  值为 1.4—2.0;次高区位于白 4 井、白 4-51-49 井区、白 1 井区、白 14 井区和白 5 井东侧, $F$  值一般为 0.9—1.4;而白 7 白 8 白 12 白 3 白 2 白 6 1062 井区为  $F$  指标低值区(0.4—0.8)。 $F$  指标等值线总体走向与油田构造线走向一致。

沙海组下段顶喜马拉雅期  $F$  指标图(图 2)与燕山期  $F$  指标图相比有较大的差别。喜马拉雅期  $F$  指标高值区集中于科尔康油田东部,恰是嘎力得断裂带影响范围内,即近 SN 向展布的东部高断阶区。白 11 井区、白 4 井区、白 4-51-49 井区、白 10 井、白 12 井、白 8 井及其南侧区是  $F$  指标高值区,一般为 1.4—2.8;白 7 井区、白 1 井区、白 3 井区为  $F$  指标次高区,一般为 1—1.3;而白 5 井、白 15 井、白 6 井、白 2 井、1062 井、白 14 井等井区是  $F$  指标低值区,为 0.3—0.9。

综合沙海组下段顶燕山期和喜马拉雅期  $F$  指标图及两期构造运动对科尔康油田构造影

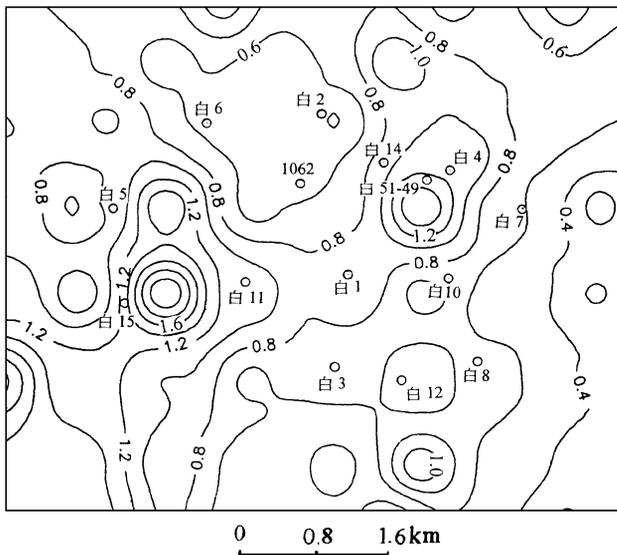


图 1 科尔康油田沙海组下段  
顶燕山期  $F$  指标等值线图

Fig. 1 Contours of  $F$  index in top surface of lower member of Shaha Formation in Keerkang Oilfield in Yanshanian stage

响,可以得出几点认识: (1)  $F$  指标高值区呈串珠状沿近 SN 向展布的高断阶或断隆带分布,反映白 5 断裂带和嘎力得断裂带控制了油田裂隙展布范围和发育规律。(2)  $F$  高值区大多位于规模大的白 5 断裂和嘎力得断裂下降盘弧弯与旁侧低级小断裂交汇或围限部位。如较为典型的白 4 井和白 4-51-49 井,其次如白 12 井区及其南部区块,反映了断裂构造对储层的改造作用。另外,弧形断裂外侧或与次级小断裂结合部位也常是有利于裂隙发育的局部应力环境,证明  $F$  指标值可以用来衡量裂隙发育程度、发育规律这一认识。(3) 油田白 1 井-白 6 井等 7 口井沙海组下段储层岩芯节理裂隙平均密度的变化趋势与相应井  $F$  指标值的变化趋势有较好的一致性。如白 4 井 (2.14 条 / m)、白 4-51-49 井 (1.3 条 / m) 都处于较高的  $F$  指标值区;白 2 井 (0.45 条 / m)、白 6 井 (0.18 条 / m) 和

1062 井 (不发育) 区始终处于低  $F$  值区。这也表明可用  $F$  指标值预测裂隙带的可行性。(4) 喜马拉雅构造运动对油田东部断阶区影响明显大于西部断隆区。(5) 对比分析表明,利用  $F$  指标法计算的燕山期构造运动所形成的裂隙分布、发育规律与现有井岩芯观察结果吻合,而计算的喜马拉雅期裂隙发育规律可能因应力场计算时边界效应影响与实际有一定偏差,但两者  $F$  指标有许多一致的低值区和高值区。(6) 因盆内构造都为燕山期构造,喜马拉雅期没有明显构造迹象 (区域上有表现),再有岩芯含油裂隙走向多为 NNW-NW 向,受燕山期应力场控制,所以科尔康油田沙海组下段储层裂隙预测主要由燕山期  $F$  指标来评价,喜马拉雅期  $F$  指标可作为参考依据。

利用上述结论对其它井区沙海组裂隙进行预测分析,白 11 井区、白 15 井区

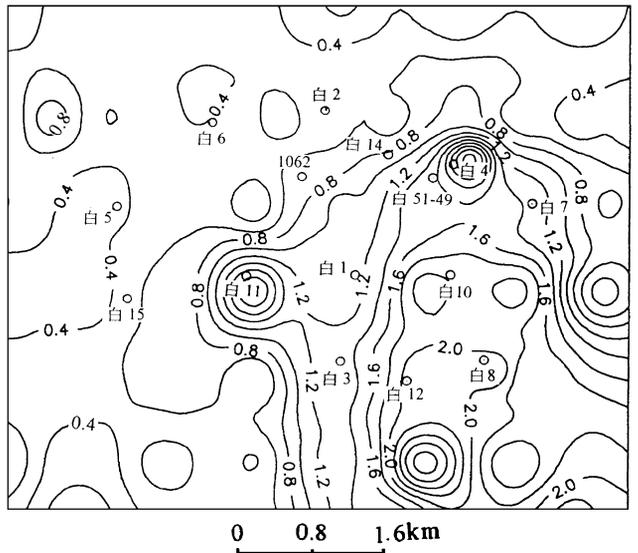


图 2 科尔康油田沙海组下段顶  
喜马拉雅期  $F$  指标等值线图

Fig. 2 Contours of  $F$  index in top surface of lower member of Shaha Formation in Keerkang Oilfield in Himalayan stage

裂隙发育程度大于白 14 井区、白 10 井区和白 12 井区,而它们又大于白 8 井区和白 7 井区。就整个油区来说,两条主干断裂的共同下降盘将是裂隙发育的有利地带,即白 14 白 11 白 1 白 3 等井区,但北部白 2 白 6 1062 井区除外。值得注意的是,白 4 白 4-51-49 井区,白 12 井南区、白 11 井区处在燕山期和喜马拉雅期  $F$  指标高值区;白 6 井、白 2 井、1062 井区处于低值区;而白 7 白 8 白 10 井、白 12 井、白 1 井、白 3 井区处于  $F$  指标低高叠合部位。考虑到油田以燕山期构造运动为主,这样,科尔康油田沙海组下段顶部构造裂隙发育程度优劣顺序为:白 4 井区、白 4-51-49 井区、白 11 井区、白 12 井区南、白 15 井区、白 5 井区、白 14 井区、白 1 井区、白 3 井区、白 10 井区、白 12 井区、白 8 井区、白 7 井区、白 2 井区、1062 井区、白 6 井区。

另外,  $F$  指标等值线呈封闭式串珠状对油气聚集十分有利。原因有二: (1) 封闭式浑圆状  $F$  高值区处于油田高部位或相对高部位,是有利的油气指向地带; (2) 裂隙带局部发育有利于油气聚集保存。

### 1.3.2 剖面裂隙预测 油田

剖面裂隙预测以过白 2-白 4-白 7 井剖面为例。 $F$  指标值的计算是在对该剖面现今应力场模拟计算基础上进行的,其结果见图 3。结合剖面的构造特征和地层展布情况,归纳以下几点认识: (1)  $F$  指标值都小于 1,从整个剖面看,  $F$  指标值呈:上大 ( $> 0.08$ ) 中小 ( $< 0.06$ ) 下大 ( $> 0.06$ )。上部岩性为砾岩、泥岩组合,中部岩性以砂岩、泥岩、砂砾岩组合为主,下部以安山岩为主,反映了不同岩性组合对  $F$  指标值的影响。中部沙海组和下部义县组各井岩芯节理裂隙密度:中部沙海组白 2 井是 2.9

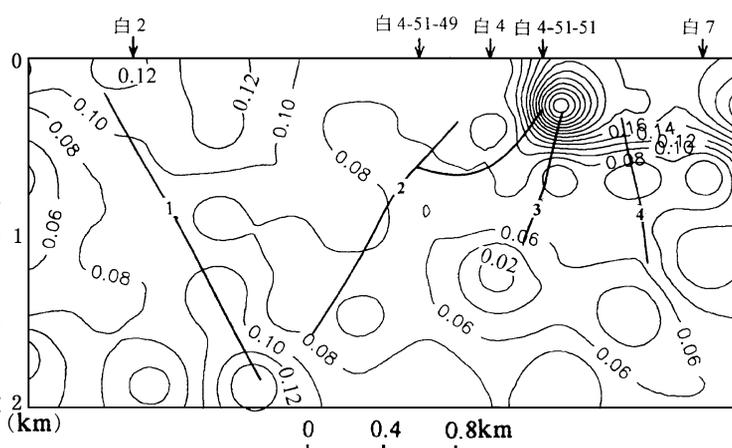


图 3 科尔康油田白 2-白 4-白 7 井剖面现今应力场  $F$  指标等值线图

Fig. 3 Contours of  $F$ -index in cross section from Bai 2 through Bai 4 to Bai 7 wells in Keerkang Oilfield in present stress field

1. 1062 断层; 2. 白 4 西断层; 3. 嘎力得断层; 4. 白 7 西断层

条 /m 白 4 井是 2.1 条 /m 白 4-51-49 则为 1.3 条 /m; 下部义县组白 7 井是 12 条 /m 白 4 井是 2.2 条 /m 这一结果与上述  $F$  指标值预测结果基本一致。 (2) 封闭形态的等值线多位于断裂端部,这与断裂端部应力释放,易形成裂隙带观点相一致。如 1062 断层和嘎力得断层的上下端部,  $F$  值大于 0.11; 另一个现象是 1062 断层与白 4 西断层所夹持的上盘  $F$  值大于下盘的  $F$  值。白 7 西断层、嘎力得断层与其旁侧低级断裂共同作用在它们上部形成一个  $F$  高值区 ( $F$  值大于 0.16), 而白 4 西断层和 1062 断层共同作用在其下部处形成  $F$  次高值区 ( $F$  值大于 0.10)。 (3) 对于安山岩,尽管有长期风化淋滤作用,但只有断裂对其改造方能形成有一定价值的裂缝型油气藏。比较下部安山岩  $F$  值,向下向西有增大的趋势。 $F$  指标值高分布区在很大程度上受断裂构造的控制,同时也与岩石组合的力学性质有关。 $F$  等值线多处呈封闭式,可能为裂隙发育区,其中白 4-51-51 井和白 4 井下的 0.06 圈闭区域,1062 断层下端 0.11 圈闭范围均处于有利于油气聚集的构造地带。另外, 0.06 圈闭区域的白 4-49-51 井和白 4 井义县

组安山岩岩芯节理裂隙发育,其中白 4井日产油一度居全油田之首,日产油约 12.18t

## 2 结论

$F$ 高值区的分布主要受油田断裂构造的制约,多位于断裂的端部、交叉部位或断裂上盘弧形弯曲的外侧并与分支断裂交汇或围限的部位。这种特定的断裂构造部位恰为应力释放区或曾经是剪应力集中区。说明利用  $F$ 指标法预测储层裂隙的发育程度和发育规律是可行的,同时  $F$ 指标值的高低与地层岩性或岩性组合有关。科尔康油田白 1—白 6等 7口井沙海组下段储层岩芯裂隙平均密度变化趋势与相应井区  $F$ 指标值大小变化趋势具一致性。

### 参 考 文 献

- 1 Mcquillan H江若霓译.伊朗西南部 Gach Saran和 Bibi Hakimeh油田渐新统一中新统 Asman组裂缝控制原油生产.中扬油气勘查,1995,(2)
- 2 万天丰.古构造应力场.北京:地质出版社,1988
- 3 夏能新,杨琦,等. $F$ 指标法在岩石裂隙分析中的应用.华东油气勘查,1995,13(3)

## FRACTURES PREDICTION OF MAIN RESERVOIR BED IN KEERKANG OILFIELD OF ZHANGQIANG DEPRESSION IN WESTERN LIAONING PROVINCE

Zhou Xingui Sun Baoshan Li Yaohui  
(*Institute of Geomechanics, CAGS*)

**Abstract** The development and distribution of fractures in the main reservoir bed—Shaha Formation—at Keerkang Oilfield of Zhangqiang Depression are studied by means of  $F$ -index method based on observations of core fractures and stress field modelling. An evaluation of the fracture development in different area of the oilfields is given, and the promising oil-bearing positions are proposed.

**Key words** fracture prediction, reservoir bed, Keerkang Oilfield, Zhangqiang Depression

### 第 一 作 者 简 介

周新桂,男,1966年生,助理研究员。1991年毕业于成都理工学院石油系,现在中国地质科学院地质力学研究所能源研究室从事石油地质构造及应力场研究工作。通讯地址:北京市海淀区民族学院南路 11号。邮政编码:100081