

鄯善油田裂缝特征及构造应力场

岳乐平 张 莉 吴诗平 朱永贤

摘 要：通过野外节理裂缝的观测，钻井岩心裂缝的古地磁定向与倾角测井裂缝解释，分析了鄯善油田构造应力场，得出鄯善油田储层构造裂缝发育方位主要为 $N30^{\circ}$ — 40° E， $N30^{\circ}$ — 50° W，为一对NE、NW向共轭断裂。高角度缝和垂直缝为主。

鄯善构造带是近南北挤压作用下形成的，侏罗纪末期燕山期构造运动为近SN向的主压应力模式，形成油田内一系列近SN向正断层，以及测量的NE、NW向共轭断裂。鄯善油田储层断裂是侏罗纪末期燕山期构造运动形成的。

通过倾角测井椭圆井径曲线分析等方法判别的鄯善油田现今最大水平主应力方向约 140° 。人工压裂的裂缝方位理论上当为 140° ，它与 320° 方位的构造缝如果匹配，可能对压裂产生影响。

关键词：鄯善油田；应力场；裂缝

分类号：TE344

文献标识码：A

THE FRACTURES PATTERNS AND TECTONIC STRESS FIELDS IN SHANSHAN OIL FIELD , XINGJIANG

YUE Leping, ZHANG Li, WU Shiping, ZHU Yongxian

1 Department of Geology, Northwest University, Xian 710069 ;

2 Department of Development, Tuha Oil Field, Shanshan 838202.

Abstract : Based on the investigation of field joints and cracks in the field paleomagnetic orientation of cracks in cores, and identification of cracks in dip logging curve, we have analyzed the tectonic stress field in Shanshan oil field. Xinjiang $N30^{\circ}$ — 40° E- and $N30^{\circ}$ — 50° W-trending conjugate shear fractures are well developed in the reservoir rocks. And high-angle, especially vertical fractures are predominant.

The structures in the Shanshan oil field were formed by a nearly N-S compression at the Yanshanian movement in Late Jurassic. The structures comprise the N-S-trending normal faults and the NE-NW conjugate fractures.

The present maximum horizontal principal stress determined from an analysis of the changes of the diameter of the drilling holes by dip logging is about 140° which is consistent with equivalent to the direction of fractures that would be artificially produced in the oil field.

Key words : Shanshan oil field; stress field; fractures

鄯善油田位于吐哈盆地台北凹陷鄯善弧形构造带近弧顶偏西部位。油田北部有一

NE向逆掩断层，与丘陵构造相隔，断距300 m左右，延伸长度约6.8 km。油田内部发现8条小正断层，走向近SN，断距约40—60 m，延伸长度约2 km。

鄯善油田侏罗系油藏是一个构造—岩性油藏，生储盖圈闭条件齐全。储层为中侏罗统七克台组，三间房组和西山窑组。三间房组油藏为主要油层。储层平均埋深3000 m左右，以中细—中粗砂岩为主，属低孔低渗油层。天然裂缝发育，如果仅从裂缝发育程度看，鄯善油田应当属裂缝性油藏。但油田注水开发已七年之久，80%以上油井含水并不高，含水仅达5—10%。三间房组生产井平均含水<20%。然而，少数井组含水较高，已有近20口生产井(占10%)的含水高达80%以上。如果进一步加大注水压力或提高压裂强度，含水量可能进一步增加。因此，详细研究鄯善油田构造应力场及构造裂缝十分重要。

我国不少油田属低渗透油藏，国内外石油工作者对低渗透油藏天然构造裂缝与水力压裂裂缝研究十分重视^[1-4]，鄯善油田属低渗透油藏，且裂缝比较发育，并对注水开发影响较大。因此，作者对鄯善油田构造应力场及构造裂缝进行了研究。

1 地表露头裂缝发育特征

连木沁剖面位于鄯善油田西南侧，剖面出露了中、晚侏罗统以上的所有地层，其中的三间房组是这次野外调研的主要地层。三间房组地层厚约220 m，主要出露的地层岩性为砂岩、粉砂岩、泥岩，并形成了多个正旋回。

对连木沁剖面19个测点作了观察和统计，剖面上发育的构造裂缝主要表现为 $N10^{\circ}-40^{\circ}E \pm 10^{\circ}$ 与 $N20^{\circ}-30^{\circ}W \pm 10^{\circ}$ 一对共轭节理。共轭节理轴垂直于层面，裂缝倾角一般是 $80^{\circ}-90^{\circ}$ 。此外，还可见到近SN向和近EW向的一对共轭节理，但远不如NE向和NW向共轭节理发育。在裂面上常可见到铁的氧化物的浸染现象及石膏晶簇垂直于脉壁生长的现象。裂缝平均线密度为2.66条/m。

2 钻井岩心裂缝测量

2.1 裂缝的产状

作者利用古地磁方法对鄯善油田岩心裂缝进行了测量，结果表明鄯善油田主要发育两组裂缝。一组 $N30^{\circ}-60^{\circ}E$ ，另一组 $N50^{\circ}W \pm 10^{\circ}$ 。其中NE向裂缝较为发育。

根据岩心裂缝与岩心中线的垂直面的夹角，可按下述标准将裂缝分为3大类别：水平缝 $0^{\circ}-10^{\circ}$ ，倾斜缝 $10^{\circ}-80^{\circ}$ ，垂直缝 $>80^{\circ}$ 。

从鄯善油田岩心裂缝倾角频率分布图中，可以看出鄯善油田主要发育的是高倾角的裂缝，尤其是垂直缝特别发育，可占到裂缝总数的54.8%。

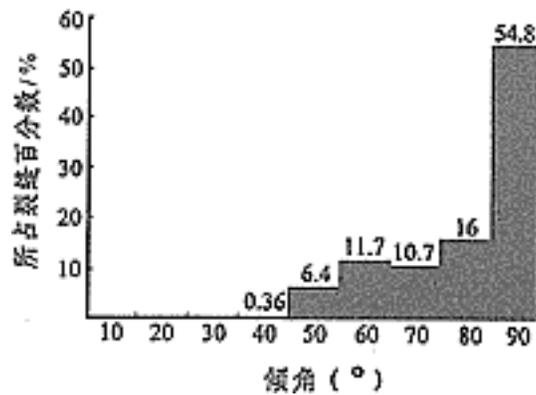


图1 鄯善油田岩心裂缝倾角频率分布图

Fig.1 Frequency of fracture inclination in Shanshan Oil Field

2.2 裂缝密度

对鄯善油田9口取心井的693.25 m的岩心作了详细的观察、描述，共发现281条裂缝，平均裂缝密度为0.41条/m。但由于岩性的不同裂缝发育程度有所差别，其中，泥质岩类岩心长为325.1 m，发育裂缝96条，频率为0.30条/m；粉砂质岩类岩心长为122.72 m发育裂缝94条，频率为0.77条/m；细中砂岩类岩心长为130.86 m发育裂缝74条，频率为0.57条/m；粗砂岩类岩心长为94.73 m，发育裂缝17条，频率为0.18条/m。

281条裂缝主要发育在49.61m长的岩心中，发育裂缝的岩心长占总取芯长的7.76%。其中发育裂缝的泥岩长度占取芯的泥岩长度的8.79%，粉砂岩类裂缝发育段长度占取芯粉砂岩长度的15.5%；中、细砂岩裂缝发育段长度占取芯中细砂岩长度的6.37%，粗砂岩裂缝发育段长度占取芯粗砂岩长度的4.26%。由此可见，裂缝是集中发育的，且频率很高，在粉砂岩和细、中砂岩中发育较集中，而粗砂岩中不十分发育。

2.3 裂缝切深

在岩心观察中，不能测量裂缝在水平方向上的延伸长度，仅能测量裂缝在岩心上的切深。裂缝切深代表了裂缝在纵向上的发育状况。虽然测量了每条裂缝的切深，但由于一些裂缝延伸到岩心以外，使得测量切深不能完全代表真实的岩心裂缝长度。尽管如此，仍可对所测数据进行统计，得出一个大致的裂缝切深的范围。

裂缝切深变化范围很大，从几厘米到几米不等，规模不大。多数裂缝集中在10—40 cm范围内，占裂缝总数的90%，而大于200 cm的裂缝和小于5 cm的裂缝在鄯善油田岩心中比较少见。

2.4 裂缝充填

岩心观察发现，鄯善油田80%以上的裂缝被CaCO₃物质充填，当完全充填时，将会破坏裂缝的有效性，使其不能成为油水运移通道；微观水驱油实验也表明，仅20%左右的裂缝可以作为油水运移通道。可见鄯善油田的裂缝密度虽大，但大部分被充填，因而限制了裂缝的作用。

3 地层倾角测井裂缝识别

本次研究选取了11口井的地层倾角测井曲线进行了裂缝识别解释，这11口井分别

是8—22井、512井、14—9井、9—9井、14—6井、9—6井、6—16井、8—10井、14—15井、16—7井、3—14井，它们分布于鄯善油田的不同区块中，因此具有一定的代表性。

(1)除个别井的个别井段有水平缝显示外，多数为垂直裂缝。

(2)由于构造应力对不同构造部位产生不同的影响，因此裂缝发育存在平面非均质性和区域性。不同构造部位的裂缝密度、强度、方向均有所不同。裂缝发育的井主要位于构造背斜轴部及其断裂的附近。

(3)受沉积环境、层厚、岩性等因素的影响，裂缝在不同砂层组具有不同的裂缝发育规律。表现出裂缝分布的纵向非均质特点。统计表明，三间房组中裂缝发育的砂层有 S_3 、 S_2 、 S_4 砂层组，而 S_1 和 S_5 砂层组裂缝相对不发育。

(4)鄯善油田三间房组各砂层组间的隔层厚度一般为10—20 m上下，隔层裂缝不发育，仅在个别隔层层段具裂缝，发育裂缝的长度约为隔层厚度的4.4%。根据岩心观察，泥岩段裂缝频率平均为0.30条/m，因此可以判断，鄯善油田隔层性质较好，裂缝的发育还不足以破坏隔层的遮挡性。

(5)鄯善油田主要发育两组裂缝：即 $N42.5^\circ E \pm 10^\circ$ 和 $N22.5^\circ W \pm 10^\circ$ 。不同构造部位裂缝发育的方位也有所不同。

4 储层裂缝特征

通过野外构造节理观测，钻井岩心描述测量，倾角测井裂缝识别，对鄯善油田构造裂缝特征有如下认识：

(1)形成于一定的组系，具有较大的延伸长度，它们常终止于岩性界面，有时可切穿不同的岩性。隔层裂缝不发育。

(2)80%以上的裂缝已被方解石等物质充填。裂缝的充填状况与储层含油级别有密切关系，充填物越多含油性则越差。当完全充填时裂缝失去其有效性。

(3)砂岩中的裂缝在原始状态一般为闭合状态，因而导流作用不很大，也不具有储集油气能力；然而这些闭合缝在达到一定压力条件时会转化为开启缝，从而影响到油田的注水开发能力，低渗透储层压裂后使部分闭合缝变为开启状态，一方面可以增加储层的导流能力，提高油井生产能力，另一方面，由于裂缝的开启，在注水开发后，若布井不当可能会引起窜水，导致局部水淹，因而应该重视砂泥岩储层中的闭合裂缝，抑制不利因素，发挥其有利方面，使其有利于油田的注水开发。

(4)裂缝方位主要为 $N30^\circ - 40^\circ E$ ， $N30^\circ - 50^\circ W$ 。高角度缝及垂直缝发育。

5 构造应力场与裂缝

吐哈盆地位于哈萨克斯坦板块南缘。哈萨克斯坦板块与塔里木板块的对接、碰撞以及由此造成的觉罗塔格构造带和博格达—哈尔里克构造带对其发展、演化影响较大。

吐哈盆地位于天山褶皱系北天山褶皱带，是在海西期回返的复向斜基础上发生、发展起来的中新生代(包括晚二叠世)的沉积盆地。在构造演化方面，多数人认为盆地在晚二叠世为残留凹陷发育阶段，三叠纪—侏罗纪中期为扭拉盆地发育阶段，侏罗纪后期—古近纪为山间盆地发育阶段，第四纪时期发展更快。

吐哈盆地基底断裂的基本特征为：南北边界为深大断裂，基底构造以EW向为主体，盆地在基底褶皱回返期后广泛发育了NE向和NW向共轭断裂。NE、NW以及EW向断裂的交接将盆地分割成大小不一的菱形块体，构成了盆地的基底构造格架。盆地的形成和演化主要表现为以断裂为边界的盆地基底的整体升降和块体的差异升降。盖层断裂构造发育，从断裂走向来看主要是NWW和NEE向两组。

5.1 古构造应力场演化与裂缝形成时期

鄯善油田位于吐哈盆地台北凹陷鄯善弧形构造带近弧顶偏西部位。属于穹窿背斜构造油田。吐哈盆地构造应力场主要是由北向南的推挤作用产生。盆地总的构造型态是近SN向挤压、断层作用及博格达山北侧的沉积加载共同造成的。

侏罗纪末期燕山期构造运动，使得早期的SN向挤压向西偏移 5° 左右。形成三间房组区域 $N5^{\circ}W$ 的主压应力作用模式。在此作用力下形成鄯善油田内部一系列近SN向正断层，及NE、NW向共轭断裂。我们测得的三间房组岩心裂缝为 $N30^{\circ}-40^{\circ}E$ ， $N40^{\circ}-60^{\circ}W$ 一对共轭。野外裂缝测量为 $N40^{\circ}E \pm 10^{\circ}$ 和 $N30^{\circ}W \pm 10^{\circ}$ 一对共轭。这组节理产状垂直于地层，走向大致为 $N30^{\circ}E$ ， $N40^{\circ}W$ 。为近SN压入象限，显然是近SN挤压产物。这与侏罗纪末期燕山期构造运动方向一致(图2)。因此，我们认为鄯善油田三间房组的 $N30^{\circ}-40^{\circ}E$ 与 $N30^{\circ}-50^{\circ}W$ 一组裂缝是侏罗纪末期燕山运动形成的。

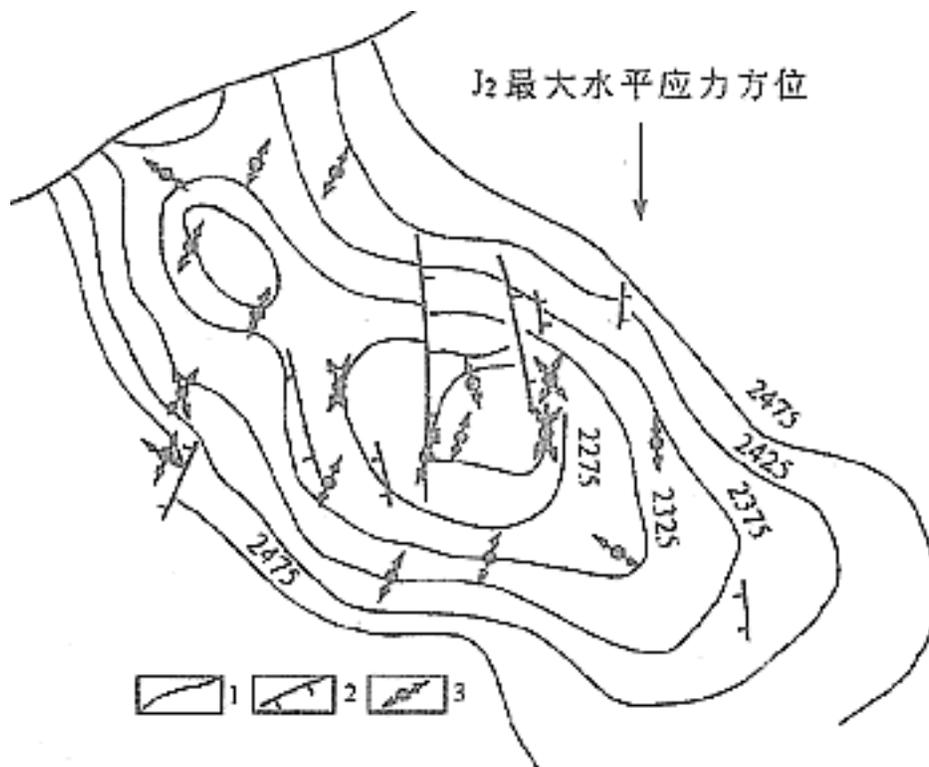


图2 鄯善油田构造应力场与断层、裂缝关系

Fig.2 The relationship between structural stress field and faults and fractures in Shanshan Oil Field
1.地质界线；2.正断层；3.张应力

在岩心或野外露头可以看到相当一部分裂缝被方解石充填，有的缝面上的方解石具明显的斜向擦痕。前者反映早期(燕山期)形成的张裂缝被方解石充填，后者反映后期有斜向剪切运动发生。部分方解石充填的裂缝被另一方向的裂缝切穿的现象也时常被观察到。这说明鄯善油田裂缝是在燕山运动产生的应力场作用下形成的。后期的构造运动不仅加强了早期破裂，而且产生了部分新的破裂。

总之，自侏罗纪以来，鄯善油田所属的台北凹陷边界主要受近SN向压应力作用，各期略有差异。西山窑组末期为近SN向，三间房组末期呈 $N5^{\circ}W$ 偏移，白垩纪末转向 $N5^{\circ}E$ 。至古近纪末期，更向东偏转，可达 $N15^{\circ}E$ 。由于构造、岩性、层厚的差异，断层及边界位移的影响，凹陷内部的应力方向与边界应力方向可能存在差异。

5.2 现今应力场分布

鄯善油田三间房组现今应力场分布对于压裂，注水起着重要的控制作用。为此，我们需要研究现今应力场的分布状况。

利用井径椭圆短轴方向可以判断地层最大水平主应力方向^[5]。地层在水平方向上受到两个水平应力 σ_x 和 σ_y 作用(如图2)，其中 σ_x 为最大水平主应力，而 σ_y 为最小水平主应力，由于水平方向上两个主应力大小不平衡，在 σ_y 方向上井壁应力集中。当 σ_x/σ_y 比值大到一定程度时，应力集中部位的剪切应力迫使岩石破裂，发生井眼崩落，形成椭圆井眼。因此，椭圆短轴方向(σ_x 方向)指示了最大水平主应力方向。

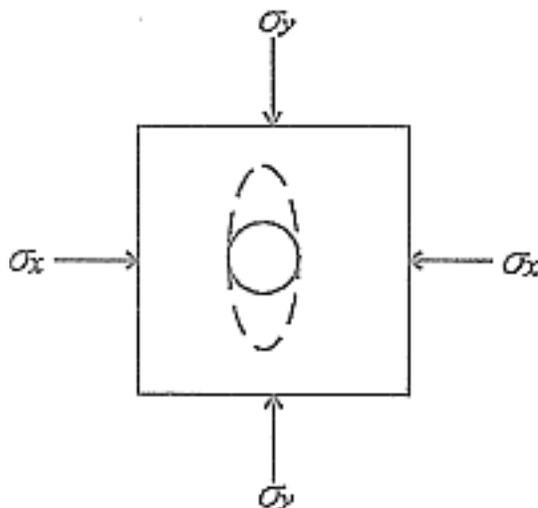


图3 井孔在水平应力作用下沿
最小水平主应力方向崩落

$$x > y$$

Fig.3 Wellhole's caving along
minimum horizontal principal stress
under horizontal stress $x > y$

作者利用地层倾角测井资料，解释了11口井的井径曲线，确定了椭圆井眼短轴方向，分析了最大水平主应力方向，其平均方位为 133.3° 。吐哈石油勘探开发会战指挥部与西北地质所也利用双井径曲线确定了14口井的椭圆井眼长轴方向，分析了现今最大水平主应力平均方位为 144.3° 。大港钻采所确定的现今最大水平主应力方位为 131.5° 。北京石油研究院确定的方位为 $156^\circ \pm 10^\circ$ 。

综上所述，我们利用椭圆井眼长、短轴方位确定的最大水平主应力方位与其它单位研究结果基本吻合。综合各方面资料，鄯善油田现今最大水平主应力方位平均为 140° 。部分井反映出的现今最大水平主应力方位与之相差甚大。

三间房组构造裂缝为 $N30^\circ - 40^\circ E$ 、 $N30^\circ - 50^\circ W$ 一对共轭剪裂隙。NW方向裂缝不如NE方向的发育。在不同构造部位裂缝方向有较大变化。三间房组现今应力场最大水平主应力方位大致为 140° 。人工压裂缝方位理论上应当为 140° 。

天然裂缝对压裂有一定影响，天然裂缝方位与最大水平主应力方位夹角越小，裂缝越容易被压开。但由于NW方向的天然裂缝与最大水平主应力方位一致，所以这一方向的裂缝容易压开。但由于NW向裂缝不如NE向的发育，所以天然裂缝方向与最大水平主应力方位一致的情况不多见。如果现今应力场出现异常区域，最大水平主应力方向转为NE向，那么，NE向裂缝将迅速被压开，形成天然裂缝与人工裂缝组成的裂缝网络。对注水开发产生重大影响。

本项研究得到吐哈油田开发事业部周波、曹克明、黄开林、王洪建、陈杨艾，西北大学曲志浩、孙卫、刘林玉、朱玉双，西安石油学院王觉民等同志的指导与帮助，在此表示感谢。

作者简介：岳乐平(1949—)，男，副教授，博士，主要从事地质学及地球物理学研究。

作者单位：岳乐平 张莉 西北大学，陕西 西安 710069；

吴诗平 朱永贤 吐哈油田开发事业部，新疆 鄯善 838202.

参考文献

- [1] 刘建中，张金珠，张雪.油田应力测量[M].北京：地震出版社，1993.
- [2] 刘翔鹏，张景和等.水力压裂裂缝形态和破裂压裂的研究[J].石油勘探与开发，1983，(3)，37—44.
- [3] R A纳尔逊.天然裂缝性储集层地质分析[M].北京：石油出版社，1988.
- [4] 王平.有天然裂缝的砂岩油藏的开发[J].石油勘探与开发，1993，14(4)：69—74.
- [5] 丁健民，梁国平.根据钻孔崩落椭圆确定地壳应力方向[J].地震学报，1987，9

(2) : 143—153.

收稿日期 : 1998-10-02