

文章编号:1001-6112(2008)02-0150-04

# 松辽盆地长岭凹陷 腰英台油田地应力及天然裂缝场研究

张奉东<sup>1,2</sup>, 马 收<sup>3</sup>

(1. 西北大学 地质学系, 西安 710069; 2. 中国石油化工股份有限公司 华东分公司, 南京 210011;  
3. 中国石油化工股份有限公司 胜利油田分公司 采油工艺研究院, 山东 东营 257000)

**摘要:**结合松辽盆地南部长岭凹陷腰英台油田裂缝油藏的开发实践,对地应力场和天然裂缝场进行了定量分析,以油层构造为研究对象,建立了平面模型模拟构造应力场,并与实测地应力值相比较,从而得出应力场的分布特征。从储层裂缝形成的古构造应力场出发,根据弹性力学理论,应用岩石的破裂准则,确定并预测储层构造裂缝的组系、方位和密度。通过应力场和天然裂缝场的发育分布研究,确定现场试验井组,指导压裂改造和油田开发井网部署的设计优化和现场实施。

**关键词:**地应力场;天然裂缝场;腰英台油田;长岭凹陷;松辽盆地

中图分类号:TE357

文献标识码:A

## STUDY OF GROUND STRESS FIELD AND NATURAL FRACTURE FIELD OF YAoyingtai OILFIELD IN THE CHANGLING SAG OF THE SONGLIAO BASIN

Zhang Fengdong<sup>1,2</sup>, Ma Shou<sup>3</sup>

(1. Geology Department of Northwestern University, Xi'an, Shaanxi 710069, China;

2. Huadong Branch Company, SINOPEC, Nanjing, Jiangsu 210011, China; 3. Oil Production Technology  
Institute of Shengli Oilfield Branch, SINOPEC, Dongying, Shandong 257000, China)

**Abstract:** Combined with the development of fractured hydrocarbon reservoir of Yaoyingtai Oilfield in the Changling Sag of the Southern Songliao Basin, the paper quantitatively analyzes the ground stress field and the natural fracture field, and sets up an areal model to simulate the tectonic stress field and compares it with the actually measured ground stress value by taking the reservoir structure as the study object so as to obtain the distribution characteristics of the stress field. Based on the palaeotectonic stress field formed in the reservoir fracture and the theory of elasticity, by using of the fracture criteria of rock, it determines and predicts the group, azimuth and density of the reservoir tectoclase. The study of the development distribution of stress field and natural fracture field determines the well groups for the field experiment and instructs the fracturing treatment and the design optimization and field application of the well pattern arrangement for the field development.

**Key words:** ground stress field; natural fracture field; Yaoyingtai Oilfield; the Changling Sag; the Songliao Basin

地质构造的形成与演化是构造应力作用及变化的结果,储层中油气运移和聚集与地应力有关,油气总是由强应力区向弱应力区运移。钻井、压裂改造、注水、采油等石油工程与地应力的状态有着密切关系;而地应力及天然裂缝的实验研究对低渗

储层的有效勘探开发至关重要<sup>[1-4]</sup>。

### 1 油田概况

腰英台油田地处松辽盆地南部长岭凹陷东北部(图1),储层岩性以粉砂岩为主,含少量泥质粉

收稿日期:2007-07-11;修订日期:2008-02-18。

作者简介:张奉东(1961—),男,教授级高级工程师,博士生,长期从事油田勘探开发工程技术及管理工作。E-mail: HDZFD@126.com。

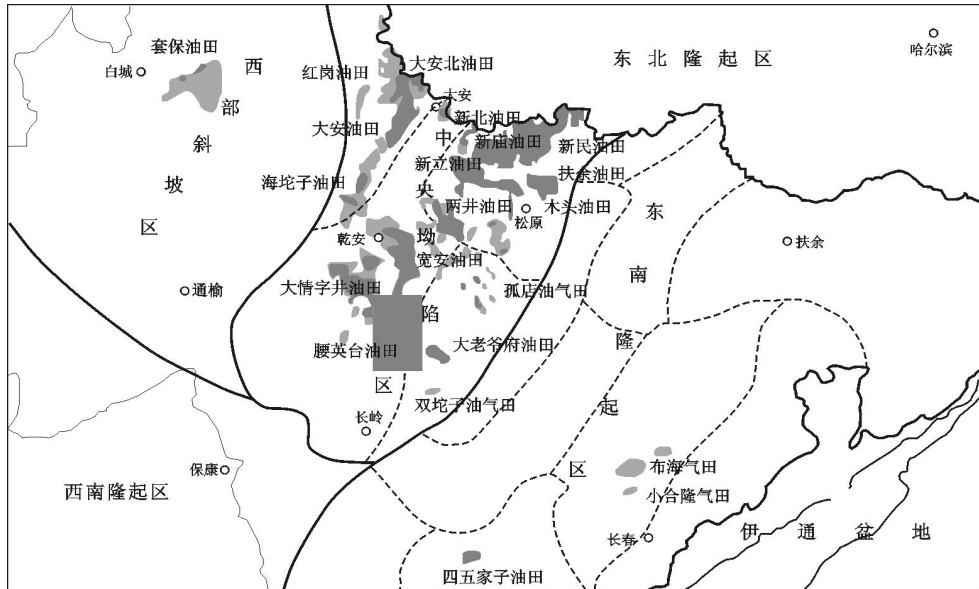


图 1 松辽盆地长岭凹陷腰英台油田区域位置

Fig. 1 Location of Yaoyingtai Oilfield in the Changling Sag of the Songliao Basin

砂岩和细砂岩,储层埋藏深度 2 000 ~ 2 300 m,油层温度 80 ~ 100 °C,单层砂岩厚 1 ~ 5 m,孔隙度 15 % ~ 19.8 %,渗透率  $(0.05 \sim 10.8) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ; 储层微裂缝极为发育,低渗透且渗透率变化非常复杂,渗流过程也有其特殊性<sup>[5]</sup>。为了提高该油田的开发效果,保持地层能量,以及评价应力场及天然裂缝场定量分析结果的正确性及注采井网的可行性,实施了 DB18 井组的先期注水试验,这为下一步大面积注水提供依据。经过两年多的试验(2004—2006 年),该试验井组取得了较好的开发效果,综合含水率保持稳定,表明了计算结果的正确性及可行性,也为同类油藏的开发提供了参考。

## 2 地应力场分析

正确认识储层地应力的特征,对优化压裂设计、确定压裂参数、提高压裂效果等至关重要<sup>[4-7]</sup>。本研究以腰英台油田青山口组一段 2 砂组油层构造为对象,建立了平面模型。该平面二维模型为东西向取 3 000 m、南北向取 3 000 m 的矩形区域,模型中考虑了 4 个断层。采用 4 节点等参矩形单元,部分区域使用三角形单元,对二维平面地质模型划分单元网格,共划分 928 个单元,930 个节点。

根据该区块地应力测量结果,计算过程中采用了表 1 和表 2 所列出的典型井作为反演条件。文中应力以拉应力为正,压应力为负;方向为从正北顺时针转动的角度。

结合前人的经验,可将反演标准归纳为:岩心

表 1 松辽盆地长岭凹陷腰英台油田反演约束井地应力数值

Table 1 Ground stress values of inversion constraint wells in Yaoyingtai Oilfield of the Changling Sag of the Songliao Basin

井号	最大水平主拉应力		最小水平主拉应力	
	数值/MPa	方向/(°)	数值/MPa	方向/(°)
DB25	48.45	66.6	33.95	156.6
DB18	53.75	174.8	37.55	86.8
DB18	53.82	169.6	37.60	84.6
DB18	52.83	28.4	36.92	118.4
DB18 - 2 - 5	55.09	113.9	38.46	26.9
DB18 - 2 - 5	56.15	147.3	39.18	57.3
DB26	52.98	63.2	37.02	151.2
DB27	49.10	139.0	34.39	47.0
DB27	51.30	21.4	35.89	120.4
DB22	53.73	126.0	37.53	34.0

注:表中方向为从正北顺时针转动的角度。

表 2 松辽盆地长岭凹陷腰英台油田反演目标约束条件

Table 2 Constraint conditions of inversion target in Yaoyingtai Oilfield of the Changling Sag of the Songliao Basin

井号	最大水平主压应力		最小水平主压应力
	数值/MPa	方向/(°)	数值/MPa
DB15	- 78.33	- 76.7	- 50.67
DB18 - 3	- 43.24	- 85.0	- 31.00
DB18 - 2 - 5	- 54.50	- 57.3	- 38.80
DB20	- 34.94	- 48.7	- 29.29
DB22	- 53.89	- 36.0	- 39.69
DB25	- 59.63	- 23.4	- 41.33
DB26	- 53.73	- 36.0	- 37.53
DB27	- 52.83	- 49.0	- 34.89

注:压应力值取负数,方向为从正北顺时针转动的角度。

实测水平主压应力与模拟结果的相对误差控制在 20 % 以内,实测主应力方向值与模拟结果的绝对误

表3 松辽盆地长岭凹陷腰英台油田 DB22 和 DB25 井应力对比分析  
 Table 3 Stress Comparative Analysis of Well DB22 and Well DB25 in Yaoyingtai Oilfield of the Changling Sag in the Songliao Basin

测试项目	DB22 井			DB25 井		
	测试值	计算值	相对误差	测试值	计算值	相对误差
最小应力/ MPa	- 39.690 0	- 41.146 4	3.67 %	- 41.330 0	- 36.459 8	11.78 %
最大应力/ MPa	- 53.890 0	- 56.100 2	4.10 %	- 59.630 0	- 56.399 8	5.42 %
最大主应力方向/ (°)	- 36.00	- 42.47	6.47	- 23.40	- 20.29	3.11
东西方向应力/ MPa	- 44.596 0	- 47.965 0	7.56 %	- 44.216 4	- 38.856 8	12.12 %
南北方向应力/ MPa	- 48.984 0	- 49.281 6	0.608 %	- 56.743 6	- 54.002 9	4.83 %

注:压应力为负数,方向为从正北顺时针转动的角度。

差控制在 10° 以内,其结果基本上是可信的。

表 3 为 DB22, DB25 井的模拟值与岩心实测值的比较,从中可以看出,最大主应力、最小主应力模拟值与实际值相差仅 1 MPa,相对误差值在 3% 左右;最大主应力方向的模拟值与实测值基本相同,说明模拟结果准确。

图 2 为采用该方案得到的最大、最小主压应力方向矢量图。从图中可以看出,断层处主压应力方向变化显著。F1 断层西侧油井周围主压应力方向主要分布在 110°~135° 的范围内,两断层之间各井最大主压应力方向为 90°~100°,近似为东西向;断层处最小水平主压应力方向变化显著,两断层之间各井最小主压应力方向近似为南北向。而在两断层的两侧东西方向,最小水平主压应力方向有突变。

### 3 天然裂缝场预测

裂缝方位是油田开发设计前必须搞清楚的第一位重要问题,直接关系到井网部署的正确与否。

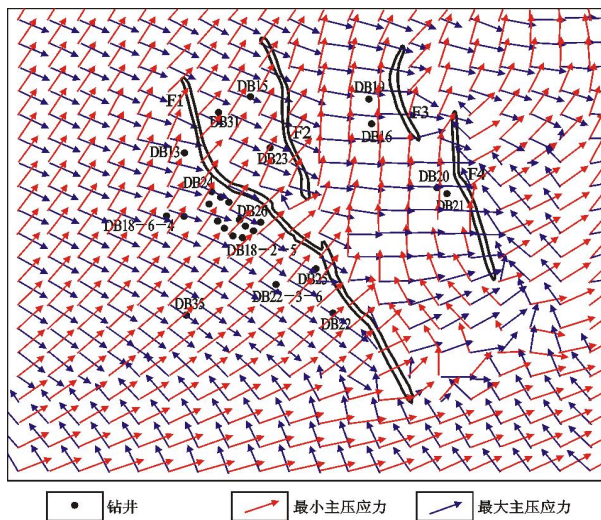


图2 松辽盆地长岭凹陷腰英台油田主压应力方向矢量图

Fig.2 Vector diagram of principal stress orientation of Yaoyingtai Oilfield in the Changling Sag of the Songliao Basin

采用二维应力场模拟反演技术可以预测应力场的分布;从储层裂缝形成的古构造应力场出发,根据弹性力学理论,应用岩石的破裂准则——格里菲斯准则可对岩石的破裂进行判断,并计算出岩石的破裂率,获得岩石的破裂密度分布,确定并预测储层构造裂缝的组系、方位和密度。

计算结果显示张裂缝方位近似为东西向(图 3)。断裂带周围裂缝方向有较明显的变化,张裂缝发育方向与最大主压应力的夹角分布在 37°~42° 之间。

### 4 现场应用

低渗透油田整体压裂改造后受水力裂缝与储层非均质性的影响,相对均质低渗透储层水力裂缝的延伸方向即最大水平主应力方向也是储层的最大渗流方向,但是受储层非均质、天然裂缝、水力裂缝的共同影响,储层的最大渗流方向与构造应力场方向、水力

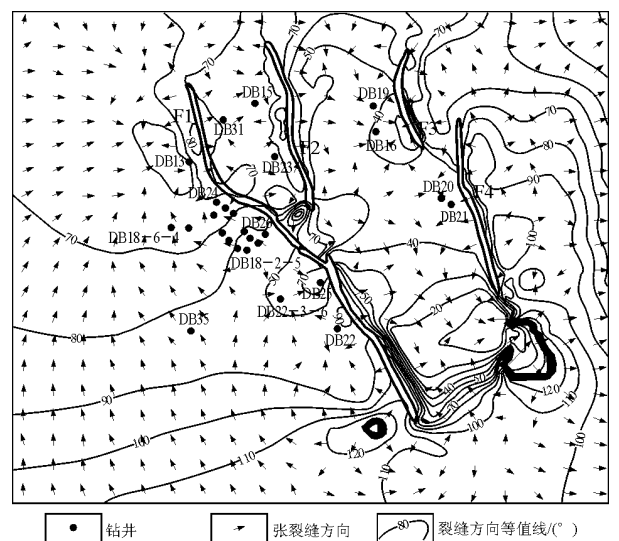


图3 松辽盆地长岭凹陷腰英台油田张裂缝方向矢量及等值线  
 岩体抗张强度为 2 MPa。

Fig.3 Vector and contour diagram in the tension crack direction of Yaoyingtai Oilfield in the Changling Sag of the Songliao Basin

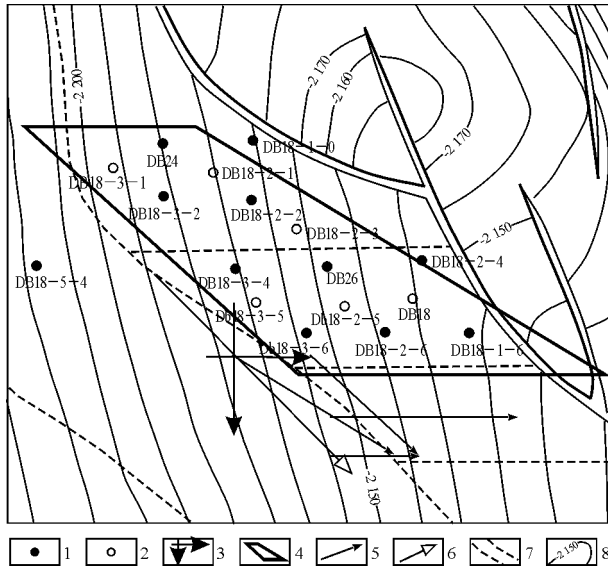


图4 松辽盆地长岭凹陷腰英台油田  
DB18井组压裂矢量注采井网

1. 采油井; 2. 注水井; 3. 构造应力场, 天然裂缝方向;
4. 井网区域; 5. 最佳驱替方向; 6. 辅助井排方向;
7. 储量边界线; 8. 构造等高线/m

Fig. 4 Vector well pattern for fracturing in  
Well Group DB18 of Yaoyingtai Oilfield in the  
Changling Sag of the Songliao Basin

裂缝方向往往并不一致。通过对储层构造应力场、天然裂缝发育分布的研究,可以搞清储层构造应力场、天然裂缝的方向,并按照两者的矢量夹角进行注采井网的优化,从而形成最佳的驱油面积。

腰英台油田为低渗—特低渗透储层,天然裂缝较为发育,在开发过程中必须研究储层地应力、裂缝状态与油藏物性、层间油水关系之间的相互影响,使压裂改造和井网布置科学合理<sup>[8~10]</sup>。通过前期研究,采用线性井排注水方式,注采井网方向介于人工裂缝与天然裂缝之间(图4)。实现了井网的最佳优化匹配,取得了很好的增油效果。

#### 参考文献:

- 1 薛永超,程林松. 微裂缝低渗岩石渗透率随围压变化实验研究[J]. 石油实验地质,2007,29(1):108~110
- 2 张厚福. 石油地质学[M]. 北京:石油工业出版社,1999.201~202
- 3 李道品. 低渗透油田高效开发决策论[M]. 北京:石油工业出版社,2003.35~47
- 4 王德胜. 现代油藏压裂酸化开采新技术实用手册[M]. 北京:石油工业出版社,2006.3~10
- 5 张义楷,周立发. 鄂尔多斯盆地中生代构造应力场与油气聚集[J]. 石油实验地质,2006,28(3):215~218
- 6 杨宇,汪三谷. 川西低渗气藏单井地应力计算方法综合研究[J]. 天然气工业,2006,26(4):32~34
- 7 杨君,郭春华. 新场气田地应力特征综合研究[J]. 天然气工业,2005,25(9):20~22
- 8 李年根,赵立强. 裂缝高度延伸机理及控缝高压压技术研究[J]. 特种油气藏,2006,13(2):61~63
- 9 王晓泉,姚飞. 水力裂缝垂向延伸影响因素分析及控制方法研究[J]. 天然气,2005,1(1):52~56
- 10 于永波. 新站低渗透油田裂缝参数优化设计[J]. 大庆石油学院学报,2005,29(4):23~25

(编辑 徐文明)

(上接第149页)

- 4 甘贵元,严晓兰,赵东升等. 柴达木盆地德令哈断陷石油地质特征及勘探前景[J]. 石油实验地质,2006,28(5):499~503
- 5 王训练,高金,张海军等. 柴达木盆地北缘石炭系顶、底界线再认识[J]. 地学前缘,2002,9(3):65~72
- 6 李守军,张洪. 柴达木盆地石炭系地层特征与分布[J]. 地质科技情报,2000,19(1):1~4
- 7 翟光明,徐凤银,李建青. 重新认识柴达木盆地力争油气勘探获得新突破[J]. 石油学报,1997,18(2):1~7
- 8 孟祥祥,房嫒,徐永昌等. 柴达木盆地石炭系烃源岩和煤岩生物标志物特征及其地球化学意义[J]. 沉积学报,2004,22(4):729~736
- 9 文志刚,王正允,何幼斌等. 柴达木盆地北缘上石炭统烃源岩评价[J]. 天然气地球科学,2004,15(2):125~127
- 10 于会娟,刘洛夫,赵磊. 柴达木盆地东部地区古生界烃源岩研究[J]. 石油大学学报,2001,25(4):24~30
- 11 段宏亮,钟建华,王志坤等. 柴达木盆地东部石炭系烃源岩评价[J]. 地质通报,2006,25(9~10):1135~1142
- 12 张君峰,王东良,秦建中等. 青藏高原地面露头样品风化校正研究[J]. 石油实验地质,2001,23(3):297~300
- 13 孟元林,肖丽华,杨俊生等. 风化作用对西宁盆地野外露头有机质性质的影响及校正[J]. 地球化学,1999,28(1):42~50
- 14 王明儒,胡文义,彭德华. 柴达木盆地北缘侏罗系油气前景[J]. 石油勘探与开发,1997,24(5):20~24
- 15 洪峰,余辉龙,宋岩等. 柴达木盆地北缘盖层地质特点及封盖性评价[J]. 石油勘探与开发,2001,28(5):8~11
- 16 邵文斌,彭立才,汪立群等. 柴达木盆地北缘井下石炭系烃源岩的发现及其地质意义[J]. 石油学报,2006,27(4):36~39
- 17 徐永昌,沈平,刘文汇等. 天然气中稀有气体地球化学[M]. 北京:科学出版社,1995.77~84
- 18 彭立才,彭小群,汪立群. 柴达木盆地北缘马北地区油源对比[J]. 新疆石油地质,2006,27(5):526~529

(编辑 韩 或)