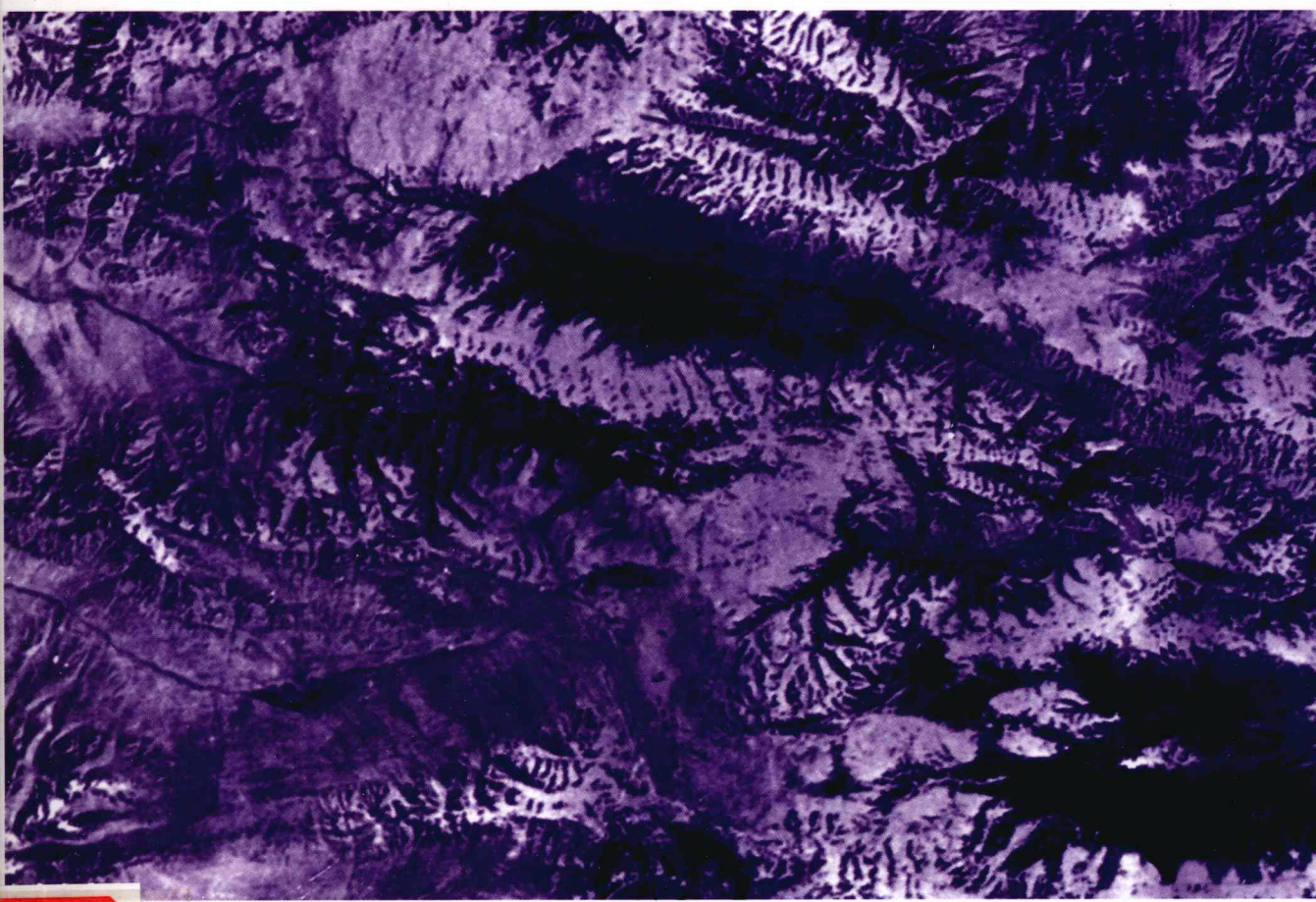


20

地壳构造与地壳应力文集

中国地震局地壳应力研究所 编



3.2

地震出版社



地壳构造与地壳应力文集

(20)

中国地震局地壳应力研究所 编

地震出版社

2008

图书在版编目 (CIP) 数据

地壳构造与地壳应力文集. 20/中国地震局地壳应力研究所编. —北京:地震出版社, 2008. 6

ISBN 978-7-5028-3084-1

I. 地… II. 中… III. ①地壳构造-文集②构造地应力-文集 IV. P313.2-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 052872 号

地震版 XT200700359

内 容 提 要

本书为中国地震局地壳应力研究所连续性学术论文集的第 20 集。全书包括地壳动力学在石油开发中的应用、地应力测量技术的新进展、应力-应变观测与地震、地震预报、地震活动性、遥感地质与地质灾害预测等方面的内容。

本书可供地球动力学研究、地应力测量理论及应用、地震监测预报、工程地质、石油地质等领域的人员及有关大专院校的师生阅读。

地壳构造与地壳应力文集 (20)

中国地震局地壳应力研究所 编

责任编辑: 张晓波

特邀编辑: 张宝红

责任校对: 孙铁磊

出版发行: 地震出版社

北京民族学院南路 9 号

发行部: 68423031 68467993

门市部: 68467991

总编室: 68462709 68423029

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

邮编: 100081

传真: 88421706

传真: 68467991

传真: 86467972

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京地大彩印厂

版(印)次: 2008 年 6 月第 1 版 2008 年 6 月第 1 次印刷

开本: 787×1092 1/16

字数: 266 千字

印张: 10.5

印数: 001-500

书号: ISBN 978-7-5028-3284-1/P·1363 (4023)

定价: 20.00 元

版权所有, 翻印必究

(图书出版印装问题, 本社负责调换)

目 录

地壳动力学在石油开发中的应用 (五)									
——构造应力场与石油开采	安	欧	(1)						
地壳动力学在石油开发中的应用 (六)									
——构造应力场与钻井稳定	安	欧	(18)						
用钻孔体应变资料检测地球球型振荡的数据处理方法	唐	磊	邱泽华	(27)					
四分量钻孔应变观测的时间滞后标定	阚	宝祥	邱泽华	(35)					
用小波方法检验强震“前驱波”	周	龙寿	邱泽华	唐	磊	(42)			
河北省邯郸—邢台断裂晚更新世以来的活动特征									
.....	侯	治华	张世民	任俊杰	赵	建荣	(51)		
北京断陷的新生代沉积与构造演化	罗	明辉	张世民	任俊杰	王	英	张英礼	(62)	
利用光学图像与雷达图像提取地质构造信息的 IHS 融合方法研究									
.....	颜	蕊	张景发	姜	文亮	(75)			
利用 ERS-1/2 数据生成西藏羊八井地区数字高程模型及其精度评价									
.....	戴	娅琼	任金卫	申旭辉	张景发	洪	顺英	罗	毅
卫星重力发展及应用	焦	孟梅	张景发	姜	文亮	颜	蕊	(95)	
Erdas 开发中对感兴趣区图像增强功能的实现									
.....	张	磊	张景发	罗	毅	陈	文凯	(102)	
天津软土地表对地震动参数的影响	张	力方	吕	悦军	兰	景岩	(108)		
基于 GIS 的三峡工程万州库区滑坡灾害信息系统	魏	学勇	周	昊	欧	阳祖熙	(117)		
DFG 型断层形变垂直分量测量仪自动化标定									
.....	范	良龙	张世中	熊	玉珍	刘	凤秋	董	建业
程控步进测控技术在 DSG 形变测量仪自动标定中的应用									
.....	孙	起伟	范	良龙	刘	凤秋	董	建业	王
地热前兆观测数据录入软件的设计与应用									
.....	王	军	赵	刚	何	案华	郭	藐西	郭
DS600 和 MAX6612 在温度传感器中的试验应用	孙	海霞	李	海亮	(144)				
台站园地									
锦州台文安 5.1 级地震前体应变变化观测报告	杨	成元	李	哲	明	成山	(151)		
泰安台日本 6.8 级地震前体应变变化观测报告	卢	双苓	李	峰	王	强	(155)		
易县台体应变仪山西震群观测报告	李	占录	杨	雅琼	王	艳	(158)		

Contents

Application of geocrustal dynamics to petroleum exploitation (V)	
—Effect of tectonic stress field on oil extraction	An Ou (1)
Application of geocrustal dynamics to petroleum exploitation (VI)	
—effect of tectonic stress field on borehole stability	An Ou (18)
The data processing method of extracting the earth's spheroidal oscillations from the data of borehole dilatometer	Tang Lei Qiu Zehua (27)
Calibration of lag times of 4 – component borehole strainmeter	Kan Baoxiang Qiu Zehua (35)
Examination of precursors before strong earthquakes by wavelet transform method	Zhou Longshou Qiu Zehua Tang Lei (42)
Activity features of the Handan – Xingtai fault since late Quaternary	Hou Zhihua Zhang Shimin Ren Junjie Zhao Jianrong (51)
Cenozoic semidimentary and tectonic evolution in beijing down – warped basin	Ruo Minghui Zhang Shimin Ren Junjie Wang Ying Zhang Yingli (62)
A research on the IHS fusion method for extracting geological structure information using spectral image and SAR image	Yan Rui Zhang Jingfa Jiang Wenliang (75)
Digital elevation model of Yangbajing area in Tibet from ERS – 1/2 data and an evaluation of its accuracy	Dai Yaqiong Ren Jinwei Shen Xuhui Zhang Jingfa Hong Shunying Luo Yi (84)
Progress and application of satellite gravity measurement techniques and theory	Jiao Mengmei Zhang Jingfa Jiang Wenliang Yan Rui (95)
Image enhancement of interested area based on ERDAS	Zhang Lei Zhang Jingfa Luo Yi Chen Wenkai (102)
Effects of soft soil condition in TianJin on ground motion parameters	Zhang Lifang Lü Yuejun Lan Jingyan (108)
A landslide hazards information system based on GIS in the Three Gorges reservoir region of Wanzhou	Wei Xueyong Zhou Hao Ouyang Zuxi (117)
Automatic calibrating method of CCD fault vertical deformation monitoring instrument	Fan Lianglong Zhang Shizhong Xiong Yüzhen Liu Fengqiu Dong Jianye (124)
The application of program – controlled step technique in automatic calibration of fault deformation measuring apparatus	Sun Qiwei Fan Lianglong Liu Fengqiu (131)
Design and application of software used to input geothermal observation data	Wang Jun Zhao Gang He Anhua Guo Miaoqi Guo Bolin Qing Jiugang (137)
Application of DS600 and MAX6612 in temperature sensor	Sun Haixia Li Hailiang (144)

Observation Reports

Abnormal strain changes prior to Wen'an M_s 5.1 earthquake observed at Jinzhou station	Yang Chengyuan Li Zhe Ming Chengshan (151)
Abnormal strain changes prior to the 2007 M_L 6.8 earthquake in Japan observed at Tai'an station	Lu Shuangling Li Feng Wang Qiang (155)
Abnormal strain changes prior to the 2006 earthquake swarm in Shanxi province observed at Yixian station	Li Zhanlu Yang Yaqiong Wang Yan (158)

地壳动力学在石油开发中的应用 (五)

——构造应力场与石油开采

安 欧

(中国地震局地壳应力研究所 北京 100085)

摘要 油田应力场有空间上的复杂性和时间上的多变性,对石油生、运、储、勘、采的作用各有时空上的特点。油田应力场在高渗油田、低渗油田和稠油油田的开采中都有重要作用,是石油开采必备的基础性资料和重要依据。

一、油田应力特征

油田应力场有其空间上的复杂性。构造、地形、岩性、钻探和开采,均影响油田应力场的空间分布。弯曲地层的顶部有垂直地层曲轴的张应力作用,而其底部则有同向的压应力作用。断层端部、锁结处、分叉处和汇而不交处应力高,而活动断面两盘的应力则较低,主应力线过活动断面改变方向。沟谷底部水平应力集中而升高,山顶水平应力则较低。同一地块中,高弹模地层内应力高,低弹模地层内应力低。大量钻孔附近的应力集中,使其横向应力升高。开采引起的孔隙压力波动,造成局部应力变异区。北海埃科菲什油田生产 20 年,造成产层孔隙压力下降 21 ~ 24 MPa,水平最小主压应力上升量是孔隙压力减小量的 0.8 倍,铅直主压应力上升量是孔隙压力减小量的 4 倍。

油田应力场有其时间上的多变性。开采过程中,重复压裂增加孔隙压力的不均匀分布,改变主应力的大小和方向,并使得重复压裂获得不同方向的新裂缝。注水,增大孔隙压力和压应力。采油、减小孔隙压力和压应力,随着开采的继续孔隙压力还反升并增大压应力。这种注采压力的变化,常达几到几十兆帕。热采,造成热应力场,温度可升至 200℃ 以上,所引起热应力可达几十兆帕。孔隙压力和流体流量的改变,易引起断层活动,造成断层周围应力的再分布。开发引起的应力场变化,可增强储层孔渗性,引起储层的破坏,甚至与孔附近集中的应力一起使油井发生损坏,而进一步改变储层和孔附近的应力场。

石油的生成、运移和储集,是在当时的应力场中进行的。石油的开采,是在残余和现今应力叠加场中完成的。叠加场的改变是开发方案调整的重要依据。油田应力场在空间分布上的复杂性,要求油田应力场测量要有足够分布密度的观测网,获得三维应力分布的立体应力场。油田应力场沿时间分布的多变性,要求了解石油生成、运移、储集时的古构造应力场和支配勘探开发过程的残余与现今应力场,并随开采过程的进展对后二场进行动态跟踪观测,以了解其叠加场随开采进程的变化,作为调整开采方案和安排下一步生产计划的重要依据。开采过程中,压裂、注水、采油和热采引起的岩石力学性质及其连续性和各向异性的时空变化,岩体中裂面摩擦强度和活动速度及活动方式的时空变化,孔隙压力场

的时空变化,都直接影响力场的时空分布,并且都是影响其时空分布的敏感量。这也要求对它们的变化进行及时跟踪,以了解其对应力场的影响。因之,建立油田应力场观测网,随开采过程进行动态跟踪观测,是油田应力场研究势在必行的发展方向。

二、高渗油田开采

在高渗油田开采中,选取最优产能、设计注采渗流、布置注采井网、确定射孔方案,都要以残余和现今应力叠加场为重要依据,按其时空分布安排生产、调整计划,以取得稳产高产。

1. 选取最优产能

储层产能,主要决定于两大因素。

首先,取决于现代并存在岩体内的残余和现今应力叠加场中球应力的大小。球压应力改变 5 MPa,岩体孔隙率可改变 5%~20% (图 1),渗透率则可改变 2~3 个数量级 (图 2)。开采时,注水增大孔隙压力而减小有效球压应力,但同时流体压力增大又对有效球压应力下降对流体压力的影响给以补偿;采油减小孔隙压力而增大有效球压应力,所引起岩石体积收缩又对孔隙压力下降给以补偿;热采升高岩体温度不仅使热应力增大,同时岩石固体格架还发生体积膨胀而压缩间

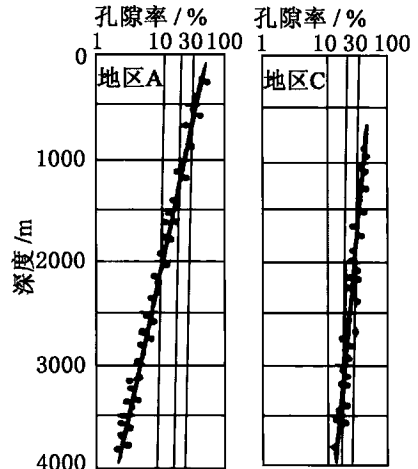
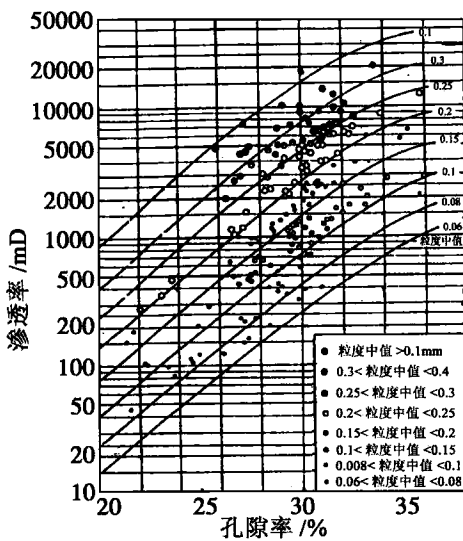
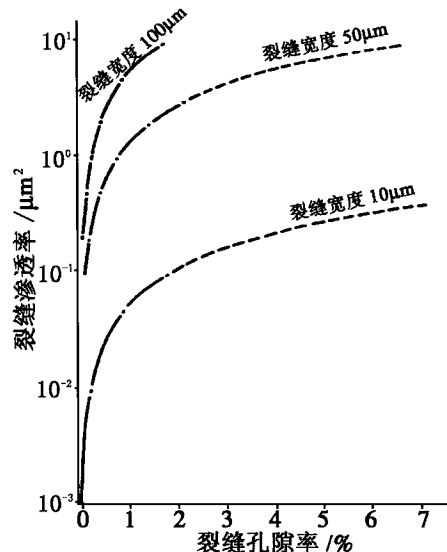


图 1 岩石孔隙率随埋深球压应力增加而减小 (洪世铎, 1985)



(a)^[1]



(b)^[2]

图 2 岩石孔隙率与渗透率的关系

隙中的流体,使得开采引起的孔隙压力下降得到部分补偿;球压应力上升减小储层渗透率,但同时又升高孔隙压力而增大裂缝支撑液压,加大裂缝张开度(图3)。

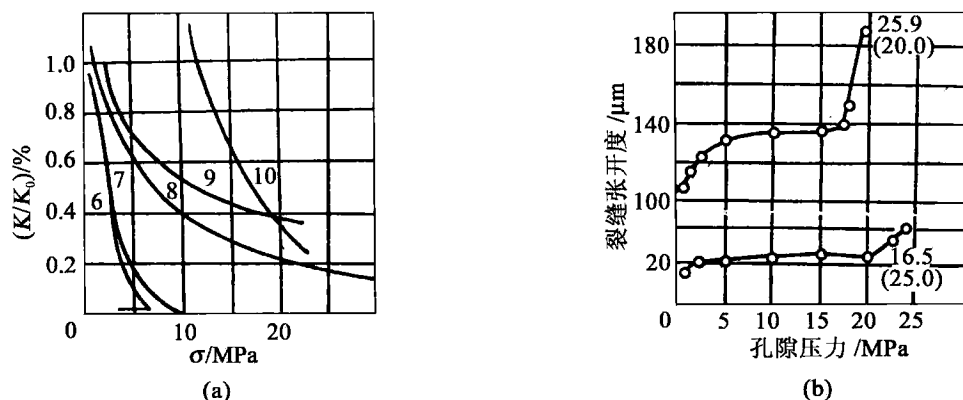


图3 石灰岩裂缝渗透率与球压应力的关系 (a) 和在球压应力下裂缝开度与孔隙压力的关系 (b)^[2]

其次,取决于储集层内储集空间的大小。裂隙发育的高孔渗储层产能比洞隙发育区高,洞隙渗透率常只是裂隙渗透率的百分之一到数千分之一,其中裂缝张开部分的产能更高。如,任丘油田雾迷山组油藏,地质储量在裂隙中占17%,在洞隙中占83%,但可采储量则在裂隙中占80%,可见裂隙不仅是通道还是重要的有效储集空间。缝宽0.5 mm部分的流量便占缝隙系统总流量的90%,缝宽1 mm时流量基本都由此部分提供。因此,开采中要减缓缝宽的减小速度,用流体压力保持一定缝宽,极利于提高缝隙驱油效率,稳定保持和提高产能,以持稳产高产。缝隙中,以走向与水平最大主压应力方向夹角小的裂缝最有利。因之,在布井中,须优选此类井位和排向。井轴沿水平最大主压应力方向或张裂带走向打定向竖井、斜井或平井,多顺沿裂缝,利于排油,应加大井距。井轴沿水平最小主压应力方向或垂直张裂带走向打定向井,多穿迂裂缝,扩大排油面积,开发效益高。铅直主压应力是最小主应力的地区,张裂缝沿水平面分布。浅层的铅直主压应力是最小主应力的可能性较大,因而在浅层出现水平张裂缝的几率也大,这使得竖井穿缝的几率较大,而平井穿缝的几率则较小。但若浅层的铅直主压应力居中,则铅直张裂缝居多,因而平井穿缝的几率较大而不宜选用竖井。深层的铅直主压应力是最小主应力的可能性较小,因而在深层出现水平张裂缝的几率也极小,而多为铅直张裂缝,故选用平井多高效益。但若深层的铅直主压应力为最小主应力时,亦应选用竖井。可见,铅直主压应力最小处宜用竖井采油,而铅直主压应力居中或最大处宜用平井采油。如,塔里木盆地塔中四油田,铅直主压应力是最大主应力,在其作用下形成的张裂缝多铅直分布,早期形成的铅直裂缝此时也易于张开,因而平井开发效益多数很高。

平井,对沙漠、沼泽、湖泊和海洋中的石油勘探,裂缝油藏和基质油藏的开采,减少水锥和气锥,都甚优宜。各种储层中,平井的最优产能方位,都须在应力场中选定。对此,可将储层分为三类,来分别选取平井的最优产能方位:第一类是裂缝发育储层。世界上多数平井都是钻在裂缝储层中,这些裂缝是储油空间和运移通道,使储层渗透率高方向

性强, 因之, 此类储层中平井最优产能方向的选择, 须考虑各时代形成裂缝的优势走向与残余和现今叠加应力场中水平最大主压应力方向的夹角要小, 而且裂缝法向压力也要足够小, 以使裂缝张开而成为有效裂缝。垂直此种有优势走向的有效裂缝的平井, 可横穿多数有效裂缝, 取得最大排油面积; 第二类是高渗基质储层。此类储层不需压裂, 大渗透率方向平行最大主压应力方向, 垂直最小主压应力方向。故使平井平行最小主压应力方向, 将垂直大渗透率方向, 利于石油大面积向井眼渗流, 扩大排油体积; 第三类是低渗基质储层。此类储层需要压裂, 水压裂缝平行水平最大主压应力方向, 故使平井平行最小主压应力方向, 可穿过多条水压裂缝, 扩大排油面积。若此类储层较薄, 还要注意使平井与储层接触段尽量长而增加产能。

2. 设计注采渗流

油藏天然压力不足时要注水开采, 用流体压力控制产能。岩体中的孔隙流体, 从孔隙压力的高值处向低值处流动。注水井为压力源, 从此高压点向外驱油, 采油井为压力汇, 采出石油。为此, 须保持注水井压力并增大扫油面积, 来提高邻近油井产量。

岩体中的流体, 从 S 点流向 O 点, 通过单位面积的流量为

$$Q = \frac{(2N-1)K}{\eta S} (B\Delta\sigma + \rho g \Delta h)$$

其中,

$$N = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n-1} \cdot e^{-n^2 \pi^2 \alpha^2 / S^2} \cdot \cos \frac{n\pi}{S}$$

$$\alpha^2 = \frac{K}{\eta \beta_b \phi}$$

$$B = \frac{\beta_{ab} - \beta'_{ab}}{\beta_a - \beta'_{ab}}$$

式中, K 是岩体渗透率; ϕ 是岩体孔隙率; η 是流体粘度; β_a 是岩石格架体体积压缩系数; β_b 是流体体积压缩系数; β_{ab} 是不排水岩石体积压缩系数; β'_{ab} 是排水岩石体积压缩系数; ρ 是流体密度; g 是重力加速度; Δh 是 S 点对 O 点的高度; $\Delta\sigma$ 是 S 到 O 点的球压应力差; S 是 S 点到 O 点的距离; B 反映 S 、 O 二点间孔隙压力差与球压应力差的比例关系, 对一般岩体小于 1, 但近于 1。

以水为载体的石油流动所在含油层高差 Δh 造成的高程水头差 $\rho g \Delta h$, 与上覆沉积厚度巨大的地层压力和水平惯性应力组成的球压应力差 $\Delta\sigma$ 相比甚小, 故可取

$$B\Delta\sigma \gg \rho g \Delta h$$

于是,

$$Q \approx \frac{(2N-1)K}{\eta S} B\Delta\sigma$$

此式说明, 石油从高 σ 区流向低 σ 区, 其流量约与岩体渗透率 K 和两处的球压应力差 $\Delta\sigma$ 成正比, 约与流体粘度 η 和两处距离 S 成反比。因此, 为维持足够的渗流量, 球压应力差高的地段, 注采井距可大些。而球压应力差小的地段, 注采井距则应小些。

由于石油从高孔隙压力处流向低孔隙压力处, 高孔隙压力处有高球压应力 σ , 低孔隙压力处有低球压应力 σ 。^[3] 张开裂缝的方向平行最大主压应力方向, 因而使最大主渗透率

方向平行最大主压应力方向，而保持岩体渗透率的各向异性。油田开采中，流体的注入和产出，不断造成应力场的改变，因而反过来也会引起孔隙压力场和最大主渗透率方向的改变，以致影响开采效果，而不得不调整开采方案。因而，在布置注采井网时，要考虑如此引起的应力场和最大主渗透率方向随开采过程的改变，以取其利避其害。

3. 布置注采井网

注采井网的分布和密度，关系到采速合理性和最终采收率高低。合理的井距，对孔隙储层主要取决于设计采速要求，对裂隙储层则与裂缝规模和方向有重要关系。

注采井网设计中，水平最大主压应力方向十分重要。注采井网是在残余和现今叠加应力场中运作，其中古构造残余应力场的水平最大主压应力方向稳定^[4]，而现今应力场的水平最大主压力方向则随地球自转状态而变^[5]，且前者的应力值多高于后者达数倍^[6]。当现今应力场的水平最大主压应力方向转到与古构造残余应力场的水平最大主压应力方向一致时，二场同向同性叠加，使叠加场的水平最大主压应力值最高。因此，在残余和现今叠加应力场中布置注采井网时，须以古构造残余应力场的水平最大主压应力方向为主要设计依据。

油水井沿水平最大主压应力方向相间排列时，由于此走向的已有各种裂缝张开，因而注水驱油易于见效。但若一旦压裂，由于压裂缝的走向也在此方向，则油井会早见水而易于发生水窜或水淹，因而此种排列的井距不宜太小。如，辽河油田交2块油水井沿水平最大主压应力方向近东西排列，多数井做了压裂，水井注水后邻井含水量迅速上升多的达100%，多数水淹井在东西方向，少数沿断层走向。又如，胜利油田油井义5-5-2与注水井义5-6-3的连线在水平最大主压应力方向呈NE85°，注水井两次压裂后二井串通，水井注水当天便从油井喷出而使油井水淹。再如，扶余油田水平最大主压应力和铅直裂缝都近东西向分布，水井注水后其东西边的油井很快见水以至水淹，而其南北边的油井则迟迟不见水。还如，大港油田枣园43区块1309井注水，NE65°水平最大主压应力方向的1308油井含水量从30%升到80%，油产量急降。另如，中原油田胡12-17井压裂时，NE110°水平最大主压应力方向相距150m的胡12-18井被压窜。这些都说明，在应力场中进行井网布局，须选好井位、井排方向和井距，才能提高开采效果。为此：首先在有利储油部位布设油井；其次选注水井的适宜井排方向；第三确定最佳油水井距。在水平应力梯度大的地区，沿水平最大主压应力方向相间排列油水井时，井距宜偏大些。在水平应力梯度小的地区，沿水平最大主压应力方向相间排列油水井时，则井距可稍小些。立新油田为防止注水沿东西水平最大主压应力方向突进，使反九点面积注采井网的井排方向与水平最大主压力方向成22.5°夹角，降低了油水井井窜，但注水和压裂规模大时经多次压裂后仍可能发生井窜。

4. 确定射孔方案

连通好的厚油层是一个压力系统，可用水泥塞和封隔器卡堵出水层，裸眼开采。多层薄层油藏，宜分层开采，下套管射孔投产。

射孔方案，包括选取射孔井段、各段隔层、射孔方向、穿透深度、射开层厚等项目，与应力场特别是井轴方向应力剖面有重要关系。

射孔井段，要与划出隔层统一考虑，才能选择合理。因为射孔井段是由隔层分隔开

的,把储层分成隔层两侧的两个独立压力系统,以减小层间干扰,提高各自开采效果。对竖井,围岩中水平最小主压应力的低应力井段最易射开,而高应力井段则难以射开。因此,在油层中选取射开的井段须选在低应力段,而用高应力段作不射开的隔挡层,并要使隔挡层的应力高于射开井段。隔挡层应力,还要满足开采时应力上升的开采方式和采油技术等更高的要求,要能承受压裂、注水、汽驱、火烧等压力,并要预测采油中可能有的最高压力反使隔挡层可能损坏的程度。为此,宜在选取射孔井段的同时,选好隔挡层,以保证压裂、注水、注汽、火烧的开采效果。隔挡层的隔开和遮挡效果不好,直接影响分层注水采油,出现水窜和汽窜,破坏层系开采,影响油田采收率,造成巨大经济损失。泥岩、泥页岩、页岩弹性模量和泊松比较大,在水平惯性应力和铅直重应力作用下,其中可有较高的水平应力,常被选作隔挡层。因此,为设计射孔井段和划出隔挡层,要有主应力大小和方向沿井轴分布的各种应力纵剖面资料,用以优选射孔井段和隔挡层,合理射开油层厚度,按水平应力沿轴向分布来进行层系开采,提高采收率。这要求进行应力分层,并可跨越地质分层。不同地层但力学性质相近可划入同一应力层;而同一地层中应力不同的深度段则须划入不同应力层(表1和表2),否则会引起剖面上的水窜。因之,为满足层系开采和采油工艺的要求,要按水平最小主压应力沿井轴的纵剖面来选取竖井射孔井段和隔挡层。

表1 美国克罗拉多匹杉斯盆地水平最小主压应力随深度的变化^[7]

岩 石	深度 D/m	水平最小主压应力 σ_h/MPa	孔隙压力 p/MPa	$(\sigma_h/D) / (\text{MPa/m})$
泥 岩	1783.4	40.9	23.4	0.0228
泥 岩	1810.8	39.6	23.9	0.0219
砂 岩	1817.5	31.7	24.0	0.0174
泥 岩	1830.9	42.7	24.1	0.0233
泥 岩	1943.1	45.1	29.6	0.0233
泥 岩	1950.4	44.4	29.9	0.0288
泥 岩	1957.1	46.9	30.3	0.0240
砂 岩	1963.8	39.4	30.3	0.0201
砂 岩	1969.3	39.1	30.3	0.0199
砂 岩	1985.2	40.3	30.3	0.0204
泥 岩	1989.7	46.0	30.3	0.0231
砂 岩	1996.1	38.9	31.0	0.0244
泥 岩	2001.3	48.1	30.3	0.0240
泥 岩	2013.8	49.2	31.0	0.0244
泥 岩	2044.3 ~ 2062.3	49.0	31.7	0.0238
砂 岩	2112.0	40.2	34.1	0.0190
砂 岩	2122.6	39.6	34.7	0.0185
泥 岩	2137.0	43.6	35.4	0.0204
泥 岩	2143.7	46.9	35.8	0.0219
煤	2148.5	49.6	36.1	0.0231
砂 岩	2154.6	39.9	36.5	0.0185
砂 岩	2158.0 ~ 2176.9	40.0	36.5	0.0185

续表 1

岩 石	深度 D/m	水平最小主压应力 σ_h/MPa	孔隙压力 p/MPa	$(\sigma_h/D) / (\text{MPa/m})$
泥 岩	2185.4	48.3	36.5	0.0222
泥 岩	2196.7	47.6	37.6	0.0217
砂 岩	2211.6 ~ 2220.2	43.4	37.9	0.0197
砂 岩	2214.1	46.6	37.9	0.0210
泥 岩	2226.3	44.3	38.3	0.0199
砂 岩	2254.0	46.3	38.6	0.0206
煤	2262.8	47.3	38.6	0.0208

表 2 地层中水平最小主压应力随深度的变化^[8]

岩 石	深度 D/m	水平最小主压应力 σ_h/MPa	$(\sigma_h/D) / (\text{MPa/m})$
石灰岩	2430.2 ~ 2430.8	39.3	0.0172
石灰岩	2437.5 ~ 2438.1	38.7	0.0169
泥砂岩	2454.9 ~ 2455.9	37.6	0.0163
砂页岩	2472.2 ~ 2472.8	36.9	0.0176
页 岩	2487.5 ~ 2494.2	41.0	0.0159
页 岩	2509.4 ~ 2510.0	38.6	0.0165
砂页岩	2519.2 ~ 2519.8	40.3	0.0156
页 岩	2531.1 ~ 2531.7	39.6	0.0167
砂页岩	2538.7 ~ 2539.3	33.4	0.0140
砂页岩	2565.2 ~ 2565.8	37.2	0.0154
页 岩	2595.7 ~ 2596.3	37.2	0.0153
砂页岩	2652.4 ~ 2653.0	36.2	0.0146
泥砂岩	2695.7 ~ 2696.3	41.8	0.0155
泥砂岩	2731.6 ~ 2732.2	39.6	0.0155
页 岩	2763.0 ~ 2763.6	42.7	0.0165
泥砂岩	2872.7 ~ 2873.3	42.7	0.0158
砂页岩	2898.0 ~ 2898.6	40.7	0.0149
页 岩	2923.0 ~ 2923.6	49.0	0.0178
页 岩	2949.2 ~ 2949.9	45.5	0.0164
泥砂岩	2973.9 ~ 2974.5	44.1	0.0158
砂页岩	2994.1 ~ 2994.7	42.5	0.0142
砂页岩	3013.6 ~ 3014.2	41.9	0.0139
砂页岩	3030.9 ~ 3031.5	42.1	0.0139
页 岩	3043.6 ~ 3044.0	47.8	0.0157
泥砂岩	3055.6 ~ 3056.2	45.4	0.0148
石灰岩	3079.1 ~ 3079.7	49.4	0.0160

射孔方向，对竖井应取在射孔井段的水平最大主压应力方向，孔壁上此方向点的周向应力是水平最小主压应力，压裂时的破裂压力低，是水压裂缝的起裂点，流体流出效率高。走向垂直此方位的天然裂缝越多的区位，射孔孔眼穿迂的天然裂缝也越多，泄油面积增大，采收率高。

三、低渗油田开采

在石油生产中,新增加的石油产量,多来自低渗油田。因之,此类油藏对石油的增产,将越来越重要。

1. 油井压裂

低渗油田储油层的渗透率低,要用人工压裂储层来排油采油。因此,低渗油田开采须先作储层改造,油井压裂便是低渗油田储层改造和高、中渗油层解堵的重要措施。

水力压裂中,井口泵压、压裂方式、水压裂缝的方位、形态、高度、长度、宽度和压裂增产效果,都与岩体应力状态有关。

1) 压裂施工

(1) 确定井口泵压。

在各向同性均质低孔渗岩体中,井轴平行主压应力 σ_v 的井内,用水力压裂孔壁。 p 是岩体孔隙压力, p' 是井底有效液压, θ 是从水平最小有效主压应力 σ'_h 方向量起的圆心角, R 是钻孔半径,为计算方便取水平最大、最小和铅直有效主压应力 σ'_H 、 σ'_h 、 σ'_v 以压性为正,则围岩中各有效应力分量

$$\begin{aligned}\sigma'_r &= p' - p + \frac{\sigma'_H + \sigma'_h}{2} \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma'_H - \sigma'_h}{2} \left(1 + \frac{3R^4}{r^4} - \frac{4R^2}{r^2}\right) \cos 2\theta \\ \sigma'_\theta &= -p' + p + \frac{\sigma'_H + \sigma'_h}{2} \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma'_H - \sigma'_h}{2} \left(1 + \frac{3R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \\ \tau'_{r\theta} &= -\frac{\sigma'_H - \sigma'_h}{2} \left(1 - \frac{3R^4}{r^4} + \frac{2R^2}{r^2}\right) \sin 2\theta\end{aligned}$$

在孔壁上, $r = R$, 则孔壁上的有效应力分量

$$\begin{aligned}\sigma'_r &= p' - p \\ \sigma'_\theta &= -p' + p + (\sigma'_H + \sigma'_h) + 2(\sigma'_H - \sigma'_h) \cos 2\theta \\ \tau'_{r\theta} &= 0\end{aligned}$$

当孔壁周向应力 σ'_θ 等于孔壁岩体周向抗张强度 σ_t 时,孔壁便在 $\theta = \pi/2$ 和 $\theta = 3\pi/2$ 方位先发生脆性张破裂,此时的孔底有效液压 p' 称为破裂压力,可由上方程组中第二式算得,并表示为

$$p_f = 3\sigma'_h - \sigma'_H + p + \sigma_t$$

孔壁初始裂缝,沿井轴并平行水平最大主压应力方向。而水平最大、最小有效主压应力

$$\begin{aligned}\sigma'_H &= \sigma_H - p \\ \sigma'_h &= \sigma_h - p\end{aligned}$$

代入前式,得

$$p_f = 3\sigma_h - \sigma_H - p + \sigma_t$$

又,井筒压裂时的井底有效破裂压力 p_f , 为井口泵压 p_0 与井内液柱压力 p_w 之和,减去孔眼摩阻 p_m 和孔隙压力 p , 而得

$$p_i = p_0 + p_w - p_m - p$$

则由此二式得

$$p_0 = 3\sigma_h - \sigma_H - p_w + p_m + \sigma_i$$

当油层的 σ_i 和井孔的 p_w 、 p_m 确定后，井口泵压 p_0 则取决于 $(3\sigma_h - \sigma_H)$ ，随 σ_h 增大而增加，随 σ_H 增大而减小。在 σ_h 和 σ_H 中， σ_h 以 3 倍值影响着 p_0 ，因而其变化对 p_0 的影响比 σ_H 更加重要。

井壁压裂后，使水压裂缝重新张开的孔底有效液压 p' 为重张压力，表示为

$$p_r = 3\sigma_h - \sigma_H - p$$

保持裂缝张开所需孔底有效液压 p' 为封闭压力，等于垂直压开裂面的水平最小主压应力 σ_h ，表示为

$$p_c = \sigma'_h$$

由破裂压力和重张压力表示式，可得孔壁岩体周向抗张强度

$$\sigma_i = p_i - p_r$$

或取岩心用实验方法测得。

(2) 选择压裂方式。

低渗储层压裂改造，有合层压裂和分层压裂两种形式。它们都要求测知破裂压力沿井轴纵剖面上的分布值。当剖面上的上下层破裂压力差不足以分隔开裂缝，其中的隔层又较薄时，宜选用合层压裂；当剖面上的上下层破裂压力差较大，其中的隔层又较厚的多层油系，宜选用分层压裂，从破裂压力较小的层段开始向破裂压力较大的层段依次压裂。可见，预算破裂压力沿纵剖面的分布，是选择压裂方式和确定先压裂井段及压裂层序的重要依据。它直关压裂缝在纵向上的高低形态和宽度，对防止裂缝穿透上下隔层，引起剖面上水窜、底水进入产层、破坏层系开采，有重要实际意义。

2) 水压裂缝

(1) 方位。

在均匀各向同性岩体中，水压裂缝方位，取决于三维主压应力的相对大小。对竖井， $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ 时，水压裂缝铅直，平行于 σ_H ； $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ 时，水压裂缝水平。水压裂缝方位，还受附近天然裂缝和岩体各向异性的影响，可能倾斜，可能裂开后改变方向。若井轴与主应力方向有一倾斜角，则井壁压裂后，裂缝也会偏离原方向而变弯和转向。

(2) 形态。

在均匀各向同性岩体中，若主应力方向不变，使主应力线呈直线分布时，则水压裂缝为平面裂缝。岩体呈各向异性或主应力线为曲线时，水压裂缝可随岩体最低强度方向而改变形态，或随最大主压应力线与中间主压应力线所在平面的弯转，而不同程度地改变形态。若岩体中有天然裂缝，则水压裂缝可与附近天然裂缝连通，而呈复杂形态或连成裂缝网。

(3) 缝高。

压裂孔周围岩的破裂压力，由主应力差 $(3\sigma_h - \sigma_H)$ 、孔隙压力 P 和孔壁岩体抗张强度 σ_i 构成。水压裂缝，起裂于地层中破裂压力最低的井段，然后向外扩展。缝高的改变，取决于井壁破裂压力沿铅直方向的分布。高压段将成为隔挡层，阻挡裂缝在轴向的延伸，把储层分隔为上下两个独立压力系统。裂缝要穿透高压段，则须先压裂低压段，

然后再向高压段扩展。因此,可用轴向压力剖面预测压裂缝高度。

(4) 缝长。

裂缝方位有利,则水压裂缝延长,扫油效率高,油产量增大。裂缝方位不利,即使缝长,也要高泵压、大排量、高耐压装置,总效益却不高。

(5) 缝宽。

水压裂缝宽度 W , 是缝内净压 Δp 、缝高 h 或缝长 l 、岩体弹性模量 E 和泊松比 ν 的函数^[9], 表示为

$$W = \frac{2(1 - \nu^2)\Delta p h}{E}$$

或

$$W = \frac{4(1 - \nu^2)\Delta p l}{E}$$

其中, 缝内净压 Δp 是井底裂缝破裂压力 p_f 和井底裂缝封闭压力 p_c 之差,

$$\Delta p = p_f - p_c$$

破裂压力, 由泵压提供, 井内泵压使井壁张应力达到抗张强度时开始破裂。封闭压力, 等于水平最小主压应力, 由岩体应力测量提供。

三式中各量的单位: W 、 h 、 l 为 m, Δp 、 p_f 、 p_c 、 E 为 MPa。前二式说明, 要裂缝张开, 缝内要有足够的液体净压, 张开度与净压、缝高或缝长成正比, 与岩体弹性模量成反比, 与泊松比成反变关系。

3) 增产效果

储层压裂时的破裂压力 p_f 、压裂后垂直裂面的水平最小主压应力与岩体同方向抗张强度之和 ($\sigma_h + \sigma_t$) 沿井轴纵剖面的分布, 决定水压裂缝的位置、高度、长度、宽度和畅通程度。这些量是决定储层压裂增产效果的主要因素。它们的综合作用有利则增产, 而综合作用不利则增产差或不增产。

压裂时, 水压裂缝从破裂压力铅直剖面中的低压力段始裂, 再向高压段扩展来增大高度, 使得裂缝高低随剖面上破裂压力的大小而变。压裂后, 继续调整缝高的量是裂缝中的液压, 其大于某层段垂直裂面的水平最小主压应力与此段同方向抗张强度之和 ($\sigma_h + \sigma_t$), 则裂缝便穿透此层段; 小于某层段的 ($\sigma_h + \sigma_t$), 则裂缝便不穿透此层段, 而使此层起隔挡层作用。于是便形成产层和隔层。若产层中的 ($\sigma_h + \sigma_t$) 低, 隔层中的高, 则裂缝正好被隔层遮挡在低 ($\sigma_h + \sigma_t$) 值的产层区段内, 利于分层采油; 但若产层中的 ($\sigma_h + \sigma_t$) 值高, 则裂缝便穿过各低 ($\sigma_h + \sigma_t$) 区段, 使得缝高难以控制, 而不利分层采油。为增加缝宽, 要增大缝高和缝长, 又要撑开裂缝并给缝内以足够的净压。($3\sigma_h - \sigma_H$) 越大, 撑开裂缝须要越大的井下液压。若井下液压低于 ($3\sigma_h - \sigma_H$), 则裂缝将不张开, 但若过大又会使裂缝穿过隔挡层而上窜。只有压裂后, 产层裂缝撑开, 而隔层不裂, 才能增产。因之, 压裂要求: 产层正好处在低破裂压力和低 ($\sigma_h + \sigma_t$) 层段, 因而裂缝高度大、延伸长、撑开宽, 同时上下高破裂压力和高 ($\sigma_h + \sigma_t$) 段隔层的限定效果又好, 液压才能使裂缝更加高长宽而畅通, 提高增产效果; 而产层若处在高破裂压力和高 ($\sigma_h + \sigma_t$) 层段, 裂缝将会穿过全部低破裂压力和低 ($\sigma_h + \sigma_t$) 层段, 即使裂缝

很高,但在产层中的开度不大,也很少增产。

4) 平井压裂

均匀各向同性岩体中,平井压裂的水压裂缝与井轴的方向关系,取决于水平最大、最小和铅直主压应力分量 σ_H 、 σ_h 、 σ_v 的相对大小和对井轴的相对方向。由于水压裂缝始终平行最大和中间主压应力,垂直最小主压应力。

则当 $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ 时,由于水压裂缝平行 σ_H 和 σ_v ,垂直 σ_h ,故井轴平行 σ_H 时裂缝平行井轴,井轴平行 σ_h 时裂缝垂直井轴,井轴在 σ_H 和 σ_h 平分角线方向时裂缝与井轴交成水平 45° 角。

$\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ 时,由于水压裂缝平行 σ_H 和 σ_h ,垂直 σ_v ,故井轴平行 σ_H 时裂缝平行井轴,井轴平行 σ_h 时裂缝也平行井轴,井轴在 σ_H 和 σ_h 平分角线方向时裂缝还平行井轴。

在正交异性岩体中,平井压裂的水压裂缝与井轴的方向关系,须做一角度改正。

平行井轴的轴向水压裂缝只有一条,而垂直井轴的垂向水压裂缝却可有多条,因而泄油面积大,但轴向裂缝的导流能力则强于垂向裂缝。

$\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ 时,井轴平行 σ_H 的平井破裂压力

$$p_f = 3\sigma_h - \sigma_v - p + \sigma_i$$

井轴平行 σ_h 的平井破裂压力

$$p_f = 3\sigma_v - \sigma_H - p + \sigma_i$$

$\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ 时,井轴平行 σ_H 的平井破裂压力

$$p_f = 3\sigma_v - \sigma_h - p + \sigma_i$$

井轴平行 σ_h 的平井破裂压力

$$p_f = 3\sigma_v - \sigma_H - p + \sigma_i$$

套管射孔时,由于孔周的应力集中,可使每次射孔诱发一个裂缝,多次射孔可诱发多个裂缝。

2. 井网布局

均匀各向同性岩体内的竖井,水压裂缝的初始裂面,沿井轴并平行水平最大主压应力方向。各时代形成的天然裂缝中经压裂而张开的有效裂缝优势分布方位,也约平行水平最大主压应力方向。因之,在低渗储层中,由这两类裂缝所构成的渗透率各向异性,均与水平最大主压应力方向有关。因而储层压裂后,从围岩沿裂缝向井筒泄油,将是由外围的径向流改为沿水压裂缝和同向张开裂缝向油井的直线流,于是随水压裂缝的延长和同向张开裂缝的增多而扩大了泄油面积,提高了产量(图4)。因而,选择油水井排方位,须以水压裂缝和压开的有效天然裂缝方位为依据,其缝高、缝长、缝宽和形态都与井距和排向的选择有关。于是,影响这种有利裂缝方位的水平最大主压应力方向,便成为布井中要考虑的重要因素。

宜沿水平最大主压应力方向布设矩形井网。在

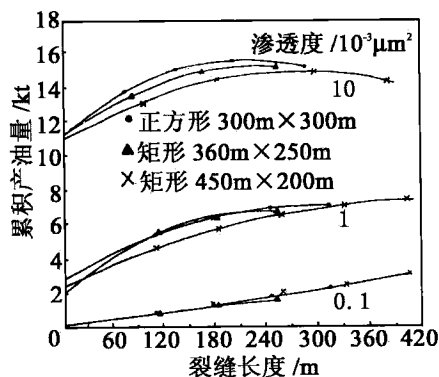


图4 各形状井网产油量与水压裂缝长度的关系^[10]

经过压裂改造的低渗储层中，油先向压开的水压裂缝和天然裂缝直线流动，继而在这种裂缝中流向井筒。这种渗透率各向异性，使流向井筒的渗流等压线成椭圆形，因而宜采用平行水平最大主压应力方向的矩形井网，其长度比应为水平最大和最小主渗透率之比，或为水平最大和最小主压应力之比。Elbel（1986）证明，对低渗油田，用方形井网，水压裂缝长为泄油半径的90%，30年可采出储量的40%；而用同井数长宽比为2:1的矩形井网，则可采出储量的70%。

沿水平最大主压应力方向布设相间油水井须用大井距。沿水平最大主压应力方向布设相间排列油水井的井距太小，则注入的水会沿水压裂缝和压开的天然裂缝快速推进，使油井见水早，而易于发生水淹，降低无水采收率。增大油水井间距，则可使油井见水晚，延长无水采油期。因而，宜在此方向加大油水井间距，并随裂缝长度增加而增大，可提高采油量（表3）。若此方向为矩形井网长边，则应增大其长宽比，仍可提高泄油面积，而且井距大、井网稀、省投资，还可稳产高产。或在此方向使油水井不相间排列而成混排，则可减慢注入水的推进速度，并使其波及的体积增大，也可提高采收率。

表3 辽河油田欢15块缝长、井距与产量关系模拟（蒋澜、单文文，1995）

裂缝半长/m	注采井距/m	单井日产油量/(t/d)	单井累计采油量/t	单井累计产水量/m ³	见水时间/a
0	300	6.73	19388	10008	6
75	300	12.60	36216	39220	6
163	350	18.00	51720	13956	6

各种井网须对水平最大主压应力取有利方向。油田注水采收率，取决于水驱效率和波及系数。五点、七点、反九点井网的注水效果，与井网取向对水平最大主压应力方向的夹角有关（表4）。井网对水平最大主压应力取有利方位，可提高水驱油效率和波及系数，因而提高采收率。

表4 各种井网对应力场取向的注水效果^[10]

井网	注采井排与水平最大主压应力方向夹角/°	日注水量/(m ³ /d)	波及系数	见水时间/a	注水效果
五点法	0	12	0.629	14.55	最佳
	22.5		0.526	12.18	中间
	45.0		0.499	11.56	最差
七点法	0	18	0.564	11.35	最佳
	22.5		0.516	10.37	最差
	45.0		0.525	10.55	中间
反九点法	0	24	0.404	9.34	最差
	22.5		0.425	9.85	中间
	45.0		0.508	11.77	最佳

注：渗透率比 $K_1:K_2=3$ ，孔隙率=0.2，油层厚=15m，流体粘度=20mPa·S，束水饱和度=0.2，余油饱和度=0.3，日产油量=3m³/d，始压=12MPa，井距=200m。