

吴起油田楼坊坪油区深层含油层系开发 井网密度研究

赵阳¹, 张小奇², 马涛², 双立娜², 赵小春², 齐博², 马全宏², 张文奕¹,
高胜利¹

¹西安石油大学, 地球科学与工程学院, 陕西 西安

²延长油田股份有限公司吴起采油厂, 陕西 延安

收稿日期: 2023年8月7日; 录用日期: 2023年9月13日; 发布日期: 2023年9月20日

摘要

为了合理、高效地开发未动用的长8、长9油层, 需要确定一套合理的井网系统, 以便积累经验, 指导吴起油田其他深层含油区域进行高效、合理开发; 将研究区长8、长9油藏水驱采收率20%以及相关参数, 依据不同流度下井网密度与采收率的关系, 得出研究区井网密度分别为6.8口/km²; 结合延长油田西部三叠系已开发油田的实际井网密度9.2~18口/km², 综合考虑新、老井网衔接, 确定出长8、长9油藏开发井网密度宜在10~15口/km²、300 m井距部署的井网密度基本适合; 在对研究区最大主应力与裂缝方位分析的基础上, 井网方案部署在原部署的300 m~300 m近正方形井网的基础上尽量继承原井网形式, 采用300 × 300正方形反九点布井, 注水采用反九点法投注; 该项研究结果对把本区乃至整个吴起油田深层油藏开发具有一定的指导价值。

关键词

井网密度, 长9油层, 楼坊坪油区, 吴起油田

Study on Development Well Pattern Density of Deep Oil-Bearing Strata in Loufangping Oil Area of Wuqi Oilfield

Yang Zhao¹, Xiaoqi Zhang², Tao Ma², Lina Shuang², Xiaochun Zhao², Bo Qi²,
Quanhong Feng², Wenyi Zhang¹, Shengli Gao¹

¹School of Earth Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an Shaanxi

²Wuqi Oil Production Plant of Yanchang Oilfield Co., Ltd., Yan'an Shaanxi

Received: Aug. 7th, 2023; accepted: Sep. 13th, 2023; published: Sep. 20th, 2023

文章引用: 赵阳, 张小奇, 马涛, 双立娜, 赵小春, 齐博, 马全宏, 张文奕, 高胜利. 吴起油田楼坊坪油区深层含油层系开发井网密度研究[J]. 地球科学前沿, 2023, 13(9): 1087-1094. DOI: 10.12677/ag.2023.139104

Abstract

In order to develop the unused Chang 8 and Chang 9 reservoirs reasonably and efficiently, it is necessary to establish a set of reasonable well pattern system to accumulate experience and guide the efficient and reasonable development of other deep oil-bearing areas in Wuqi oilfield. The water flooding recovery factor of Reservoirs 8 and 9 is studied in the research area, along with the relevant parameters. Based on the relationship between different well spacing densities and recovery rates at various flow rates, well spacing densities of 6.8 wells per kilometer are determined for the study area. Based on the actual well pattern density of 9.2~18 Wells/km² in the developed Triassic oil fields in the west of Yanchang Oilfield, considering the connection of new and old well patterns, it is determined that the development well pattern density of Chang 8 and Chang 9 reservoirs should be 10~15/km², and the well pattern density deployed at 300 m well spacing is basically suitable. On the basis of the analysis of the maximum principal stress and fracture orientation in the study area, the well pattern plan is deployed on the basis of the original 300 m~300 m square well pattern as far as possible to inherit the original pattern, using 300 × 300 square reverse nine-point well layout, and using the reverse nine-point injection method. The results of this study have a certain guiding value for the development of deep reservoir in this area and even the whole Wuqi oilfield.

Keywords

Well Pattern Density, Chang 9 Oil Formation, Loufangping Oil Area, Wuqi Oilfield

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

吴起油田位于鄂尔多斯盆地西部，楼坊坪油区位于吴起油田东南部，研究区多层系叠合，含油层系较多，开发调整方向不明确[1]，由于开发较早，区域内油、水井多以延长组上部长 6 油层为油底完钻[2]。近年来随着加大对延长组深层的勘探[3]，发现下部长 9 油层在该区域内分布较广且油藏品味较好，长 8 局部小范围含油。为了合理、高效地开发未动用的长 8、长 9 储量，需要确定一套合理的井网系统，以便积累经验，指导吴起油田其他深层含油区域进行高效、合理开发。

结合研究区现状，就目前对井网密度的认识可归纳为以下几点：① 对高渗透均质油藏井网密度对采收率的影响相对较小。② 油井干扰的水动力学理论表明，对于渗透率较高的储层，当井网密度大幅度增加时，则单井采油量相对减小。在较大井距的情况下，增大注采压差亦可获得较高的采油量。③ 适应油藏地质结构和注水系统的最佳布井方式，对采收率的影响要大于井网密度对采收率的影响。④ 岩性比较复杂的油田，井网密度对采收率有较大的影响。对非均质性严重的油藏，稀井网将有较大的储量损失。⑤ 不同油田的各不同时期所采用的井网密度应有所不同。

目前大多数油田在开发初期，往往采用较稀的井网来开发储量比较集中、产能较好的一些层位。当对储层有进一步认识时，再打加密井调整井网，进一步划分开发层系，更好地开发那些水驱效果较差的油层。总之，井网密度大可以提高采油速度和采收率，同时需耗费大量的钻井投资；井网密度过稀，虽

减少了钻井投资,但也损失掉部分可采储量,同时延长开采时间也会增加生产投资。因此,对具体油田要根据储层性质和采油速度要求确定合理的井网密度,以取得最佳的经济效果。

长期以来,井网密度是人们讨论的热点,着眼点都是提高产量和采收率,以及经济效益问题。低渗透油田开发由于特有的渗流特征,更是与井网密度密切相关[4][5][6][7]。它不仅关系到采油(气)速度,稳产年限,而且关系到油田最终采收率和经济效益。因此,井网部署应注意下列问题:①井网部署应有步骤进行,初期井网不宜过密,以利于后期加密调整;②有利于提高采油速度与延长高产稳产期;③有利于发挥工艺措施效果及注采系统的调整。如有多套井网时,要注意各套井网之间的衔接。井网密度体现了油田开发的井网部署。它是由井网形式和井距大小决定的。井网密度有两种表现形式:一种是单井控制的开发面积,定义为,对于一套固定的开发层系,当按照一定的井网形式和井距钻井投产时,开发面积除以总井数(包括生产井和注水井),得到平均一口井占有的开发面积,以“ $\text{km}^2/\text{井}$ ”表示。国外如美国等国均采用这种表示方法,它便于进行开发设计与经济分析的对比与应用。另一种是单位面积(每平方公里)上的井数,定义为,开发总井数除以开发总面积,即平均每平方公里开发面积所占有的井数,以“口/ km^2 ”表示。我国常采用这种表示方法,方便于勘探工作的部署与分析。

2. 研究区勘探开发概况

楼坊坪油田袁和庄油田发现于2002年9月,发现井为吴起钻采公司采油二厂探13井,该井钻遇长4+5及长6油组含油。经压裂试油,长 6_2^1 油层日产液 6.2 m^3 ,日产油 3.1 m^3 ,含水50%,基于对该井主要含油目的层系的认识和地质研究成果,油田采用300米井距的正方形井网及钻丛式井方式,进行滚动开发,后期陆续部署完钻探28井、探33井、探35井、探38井,逐渐发现该区域长4+5、长8、长9含油层系,为该区域大开发拉开序幕。

研究区面积约 54 km^2 ,主力含油层为长4+5、长6、长8、长9油层。本次主要研究层位为长8、长9油层。截止目前,该区域共有油水井525口,其中以长6完钻油水井237口,钻穿长8油层油水井278口(其中生产井222口,注水井56口)。

3. 开发层系

根据国内外油田开发实践,开发层系的划分与组合有以下基本原则:一是一套开发层系中的油藏类型、油水分布、压力系统和流体性质等特征应基本一致。二是一套开发层系中油层沉积条件应该大体相同,油层性质(主要是渗透率差异)不应过大,一般同一套开发层系中层间渗透率级差不宜超过5~10倍。三是一套开发层系中油层不能太多,井段不能太长。根据目前的分层调整控制技术状况,一套层系中主力油层一般2~3个左右,一口井中油层总数一般为6~9个左右。四是一套层系中要有一定的油层厚度、油井产能和单井控制储量,以保证达到较好的经济效益。五是不同开发层系之间要有比较稳定的泥岩隔层,隔层厚度一般不小于3m。

根据地质分层、电测解释及试油试采资料证实,本次研究区含油层系为长8、长9油组。长8油层主要发育长 8_1 油层组,长9油层又发育长 9_1 和长 9_3 两个油层组且井段跨度110m。故本次方案主要针对长 8_1 、长 9_1 和长 9_3 油层组采用一套井网两套层系开发。

4. 合理井网密度确定

4.1. 采用井网密度与采收率的相关经验公式

储层性质和井网密度对采收率有很大影响[8]。要得到较好的开发效果,需要根据储层性质选择适宜的井网密度。水驱控制程度与井网密度的关系密切[9],中国石油勘探开发研究院根据我国油藏实际资料,

归纳出我国不同类型油田水驱控制程度与井网密度的关系(表 1)和不同流度(k/μ)下,采收率与井网密度的关系(表 2)。可以看出,不管在何种流度下,随着井网密度的增大,采收率均呈上升趋势。尤其是流度较小的低渗透储层,随着井网密度的增大,采收率的提高更为明显。

Table 1. Relationship between water drive control degree and well pattern density of different types of oil fields in China (Li Daopin 1998)

表 1. 我国不同类型油田水驱控制程度与井网密度的关系表(引自李道品 1998)

油田类别	井网密度, 井/km ²				
	10	20	30	40	50
	水驱控制程度, %				
I	88.69	80.08	72.38	65.43	59.14
II	76.93	65.03	54.97	46.67	39.29
III	70.60	48.50	33.58	23.25	16.10
IV	52.47	29.29	16.35	9.13	5.10
V	36.69	13.34	4.85	1.76	0.64

Table 2. Relationship between well pattern density and recovery efficiency under different mobility in China (Li Daopin 1998)

表 2. 我国不同流度下井网密度与采收率的关系表(引自李道品 1998)

类别	流度 $10^{-3} \mu\text{m}^2/\text{mPa}$	油藏个数	回归相关公式
I	300~600	13	$E_R = 0.6031e^{-0.02012S}$
II	100~300	27	$E_R = 0.5508e^{-0.02354S}$
III	30~100	67	$E_R = 0.5227e^{-0.02835S}$
IV	5~30	19	$E_R = 0.4832e^{-0.05423S}$
V	5<	18	$E_R = 0.4015e^{-0.10148S}$

将研究区长 8、长 9 油藏水驱采收率 20%以及相关参数代入表 1 对应式可得井网密度分别为 6.8 口/km²。

4.2. 经济井网密度和极限井网密度

结合延长油田西部三叠系已开发油田的实际井网密度 9.2~18 口/km²,综合确定:在油价 3300 元/吨时,研究区长 8、长 9 油藏井网密度为 13~21.7 口/km²。

另外该区老的井网形式是近 260~300 m 正方形井网,即井网密度为 11~15 口/km²。

综合以上分析,并考虑新、老井网衔接,研究区长 8、长 9 油藏开发井网密度宜在 10~15 口/km²。

4.3. 合理井距计算

基于渗流机理,是合理井距的计算的依据[10]。低渗透砂岩储层非达西渗流现象和启动压力梯度概念早已得到人们的普遍认同(图 1)。主要成因系固、液相界面上的表面分子作用力达到了不可忽略程度,形成了附加渗流阻力。

正是由于低渗透油藏存在启动压力,与中高渗透油藏有着本质的不同。在中高渗透油藏中压降波及到的范围内,全为达西渗流易流状态,而低渗油藏,随着离井筒距离的不断增大,驱替压力梯度逐渐减小,会依次出现易流区、不易渗流区、非流动区三种流态。

合理的井距对于低渗透油藏更为重要,井距不宜过大,原因是低渗透油藏存在启动压力的影响往往造成油田注水和采油出现困难。主要表现为“注不进、采不出”。

通过有关低渗透油田室内实验研究和其现场试验,可反映储层特性参数的渗透率和流体特性参数的粘度与启动压力梯度的关系,用其量化数据生成的图版,指导低渗透油藏的油藏工程设计,改善低渗透油藏开发效果。

根据低渗透油田注水开发经验,井距太大,油井难以见效(图 1、图 2)。井距太小容易沿裂缝形成水串。结合上述井网密度计算结果,方案采用 300 m 井距部署的井网密度基本适合。

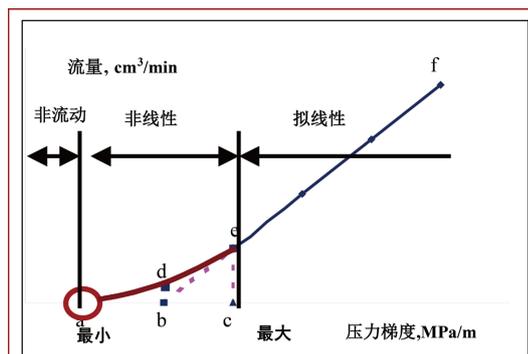


Figure 1. Schematic diagram of typical non-Darcy seepage curve
图 1. 典型非达西渗流曲线示意图

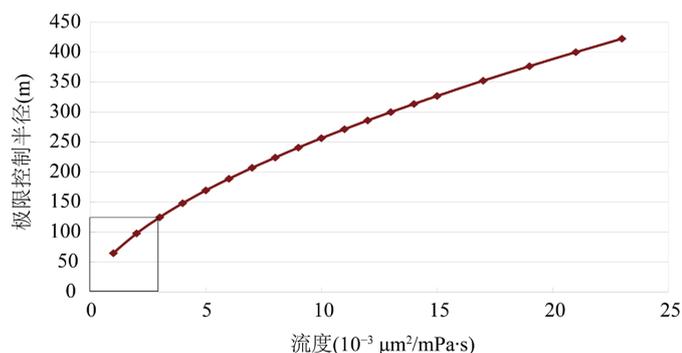


Figure 2. Relation curve between limit control radius and fluid mobility
图 2. 极限控制半径与流体流量关系曲线

5. 研究区合理井网部署

我国目前已开发的低渗透油田,有些开发效果很不错,也有一些开发效果不够理想,其原因就是因为低渗透油田开发有其特殊性,低渗透油田最大的特点是与裂缝有关,或者是有天然裂缝,或者是水力压裂造成的人工裂缝。由于裂缝的存在,低渗透油田对注水开发井网的部署就极为敏感。如果注采井网布置合理,使注水驱油时的面积扫油系统处于优化的状态,就可以取得好的开发效果。如果注采井网布置不合理,注入水就会沿裂缝系统快速推进,使油井很快见水和水淹。可以说,确定合理的井网部署是低渗透油田开发成败与否的关键。

5.1. 低渗透部署的原则

按李道品等专家所著《低渗透砂岩油田开发》中,在总结实践经验和理论研究的基础上,根据裂缝

性砂岩油田的油层结构特征和渗流机理规律，提出的注水开发井网布井方式的基本原则：“沿裂缝方向合理的井排距布井”，具体如下：

——井网方向、注水井排方向应平行于裂缝发育方向，驱油方向应垂直裂缝方向；

——注水井距可适当大于排距，为早日拉成水线，可采取间注间排方式，待水线拉成后，二注井转注；

——生产井井距初期同注水井井距，但生产井位与注水井位相错，呈三角形。到开发中期，根据情况可在生产井排打加密井，延长油田的稳产期，并扩大注水波及体积，提高原油最终采收率。

5.2. 最大主应力与裂缝方位分析

裂缝性低渗储层，如何开展井网部署是亟需解决的重要问题[11]，地应力的方向与裂缝的生长发育是密不可分的，随着对低渗透油气田的开发和注水的不断深入，裂缝的作用会越来越重要，裂缝方向与注采井排方向之间的匹配程度，不仅决定了注水效果，而且控制了层系的划分和井网布置，从而直接影响了油田开发的好坏。因此对油气田裂缝的研究，日益受到高度重视。油井经过加砂压裂后，常常形成与井贯通的垂直裂缝。裂缝的生成是在井底的压裂液压力高于地层岩石的最小应力时发生的，水力压裂的理论指出，水力压裂裂缝总是垂直于最小主应力方向的，沿着地层的最大主应力方向向外延伸。

根据吴起采油厂庙沟油区曾平 4 井层位长 9 裂缝结果，该井压裂层段 9 段，监测井为旗胜 41-12 井，各段裂缝走向集中在北偏东 $46^{\circ}\sim 98^{\circ}$ ，判断裂缝方向受井轨迹及地层因素影响，方向较为复杂(图 3，表 3)。

根据曾平 9 井裂缝监测结果表明：庙沟油田裂缝发育带与区域裂缝方向基本一致，北东 - 南西向裂缝带是主要的裂缝系统，具有断续延伸长、呈带状分布等特征。综合考虑长 8、长 9 两套油层与原井网的匹配性、最大主应力方向的协调性，将井网井排方向确定为 $NE67^{\circ}$ 左右。在后期开发过程中要及时根据新的裂缝监测确定最大主应力方向，根据监测结果及时调整井排方向与最大主应力方向相同。

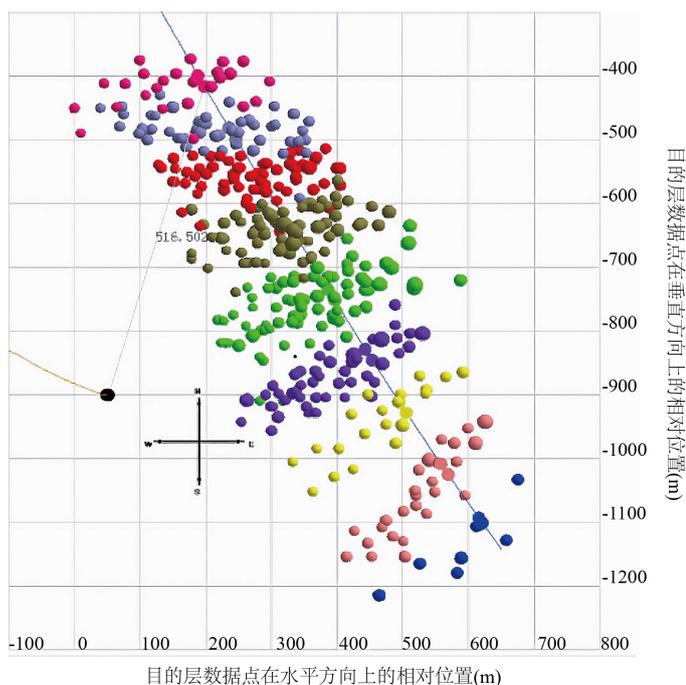


Figure 3. Fracture trend diagram of well Zengping 9

图 3. 曾平 9 井裂缝走向图

Table 3. Test results of maximum principal stress orientation in each oil field
表 3. 各油田最大主应力方位测试结果表

油田	层位	最大主应力方位
安塞油田	长 6	55.6°~78.1°
靖安油田	长 6	69°~81°
南梁油田	长 4+5	82.3°~87.8°
华池油田	长 3	79°~83.6°
西峰油田	长 8	70°~90°

5.3. 井网部署筛选

特低渗透油田的重要特征是存在裂缝，井网部署必须做到井网系统、注采系统与裂缝系统的最佳匹配。长庆特低渗透油田的开发实践表明：对于特低渗透油田，菱形反九点井网和矩形井网的采油速率及最终采收率都高于正方形反九点井网；其合理排距为 100~160 m、井距为 400~550 m；菱形长对角线与最大主应力方向平行，可以延缓角井水淹时间，增加边井受效程度；放大裂缝方向的井距，还可提高压裂改造规模，增加人工裂缝长度，有利于提高单井产量和初期采油速率。安塞油田数值模拟结果也表明，在井网密度相同条件下，菱形反九点井网和矩形井网的采油速率和最终采收率亦高于正方形反九点井网(图 4)。

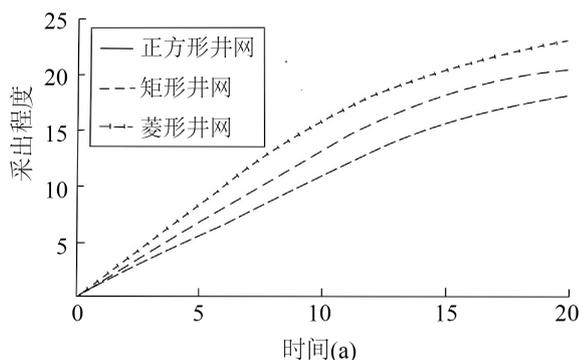


Figure 4. Curve of production degree of different well patterns with time

图 4. 不同井网采出程度随时间变化曲线

由于研究区主要为完善井油田整体井网，故方案部署在原部署的 300 m~300 m 近正方形井网的基础上尽量继承原井网形式，采用 300 × 300 正方形反九点布井，注水采用反九点法投注。

6. 结论

- 1) 依据不同流度下井网密度与采收率的关系，得出研究区井网密度分别为 6.8 口/km²；
- 2) 结合延长油田西部三叠系已开发油田的实际井网密度 9.2~18 口/km²，综合确定：在油价 3300 元/吨时，研究区长 8、长 9 油藏井网密度为 13~21.7 口/km²，综合考虑新、老井网衔接，研究区长 8、长 9 油藏开发井网密度宜在 10~15 口/km²。结合上述井网密度计算结果，方案采用 300 m 井距部署的井网密度基本适合。
- 3) 井网方案部署在原部署的 300 m~300 m 近正方形井网的基础上尽量继承原井网形式，采用 300 ×

300 正方形反九点布井, 注水采用反九点法投注。

基金项目

吴起油田北梁油区综合地质研究(ycsy2022ky-C-02); 本研究由西安石油大学研究生创新与实践能力的培养计划(YCS23141001)资助。

致谢

感谢吴起采油厂提供研究资料; 感谢张小奇高级工程师提出指导建议。

参考文献

- [1] 孟志峰, 史建国, 陈宏刚. 吴起油田楼坊坪南油藏富集研究与有利区预测[J]. 石化技术, 2021, 28(8): 144-146.
- [2] 曹卫东, 郭睿婷, 马旭晴, 等. 吴起油田楼坊坪区块北部长 6 沉积微相分析研究[J]. 云南化工, 2021, 48(4): 141-143.
- [3] 折建东, 杨娟. 吴起油田白土沟油区长 91 油藏分布规律[J]. 云南化工, 2021, 48(5): 126-127.
- [4] 耿站立, 安桂荣, 周文胜, 等. 水驱砂岩油藏开发调整全过程井网密度与采收率关系[J]. 中国海上油气, 2015, 27(6): 57-62.
- [5] 王之朕, 张松航, 唐书恒, 等. 煤层气开发井网密度和井距优化研究——以韩城北区块为例[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(3): 148-157.
- [6] 向刘洋, 邹陈蓉. 致密砂岩气藏井网加密优化研究——以新场气田沙溪庙组气藏为例[J]. 石油地质与工程, 2020, 34(3): 61-66.
- [7] 张丽双. 低渗透油藏高含水开发后期井网密度优化方法——以 X 区为例[J]. 化学工程与装备, 2020(9): 51-54.
- [8] 王树华, 高志华, 王俊魁. 低渗透油田可采储量测算方法[J]. 大庆石油地质与开发, 1997(2): 26-30+78.
- [9] 高亚军, 耿站立, 谢晓庆, 等. 一种水驱砂岩油藏采收率经验公式改进方法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(11): 4321-4326.
- [10] 焦松杰, 丁祖鹏, 李南, 等. 巨厚潜山裂缝性油藏井网部署方法研究[J]. 特种油气藏, 2018, 25(1): 112-115.
- [11] 谭先红, 范廷恩, 范洪军, 等. 渤中 19-6 气田裂缝性低渗巨厚储层立体井网部署研究[J]. 中国海上油气, 2021, 33(3): 107-113.