

Characteristics and Seepage Additive Effect of Volcanic Rock Pore-Fracture Type Reservoir

—A Case Study of Pai 66 Area in the West Edge of Junggar Basin

Xuezhong Wang

Shengli Oilfield Company, Sinopec, Dongying
Email: wzxlywlt@sina.com

Received: Jan. 4th, 2014; revised: Feb. 2nd, 2014; accepted: Feb. 10th, 2014

Copyright © 2014 Xuezhong Wang. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2014 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Xuezhong Wang. All Copyright © 2014 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: Chunfeng Oilfield was located in the West Edge of Junggar Basin, with 17 exploratory wells drilled in pore-fracture type reservoirs of Volcanic Rock, among which 4 exploratory wells obtained industrial oil flow. To expand exploration results, high yield mechanism research is developed. Research shows that, the advantages for high yield conditions of Volcanic Rock in Chunfeng Oilfield are: volcanic tuff reservoir, core oil grade with oil spot, reservoir fractures and lower underground oil viscosity. In this process, pore-fracture seepage additive effect has been discovered. Pore-fracture produced better development effect than both simple pore and fracture. Pore-fracture additive permeability is many times the log interpretation permeability, and it provides theoretical basis for horizontal well and long channel fracturing.

Keywords: Pore-Fracture Type; Reservoir Characteristics; Volcanic Rock; Seepage Additive Effect; High Yield Mechanism; The West Edge of Junggar Basin

火山岩孔隙 - 裂缝型储层特征与渗流叠加效应

—以准噶尔盆地西缘排 66 地区为例

王学忠

中国石化股份有限公司胜利油田分公司, 东营
Email: wzxlywlt@sina.com

收稿日期: 2014 年 1 月 4 日; 修回日期: 2014 年 2 月 2 日; 录用日期: 2014 年 2 月 10 日

摘要: 春风油田位于准噶尔盆地西缘, 17 口探井钻遇孔隙 - 裂缝型火山岩油藏, 其中 4 口探井获得了工业油流, 为扩大勘探成果, 开展了高产机理研究。研究发现, 春风油田石炭系火山岩高产有利条件为: 储层为火山凝灰岩, 岩心含油级别为油斑级, 储层裂缝发育, 地下原油黏度较低。在分析高产原因的过程中, 发现了孔隙 - 裂缝渗流叠加效应。即孔隙 - 裂缝沟通后, 产生了由于优于单纯孔隙型储层或单纯裂缝型储层的开发效果。孔隙 - 裂缝叠加渗透率是测井解释储层渗透率的多倍, 为采用水平井和长井段压裂提供了理论依据。

关键词: 孔隙 - 裂缝型; 储层特征; 火山岩; 渗流叠加效应; 高产机理; 准噶尔盆地西缘

1. 引言

春风油田位于准噶尔盆地西缘车排子凸起北部

胜利油区, 17 口井钻遇到石炭系火山岩储层, 4 口获工业油流井均钻遇到火山凝灰岩孔隙 - 裂缝油层, 其

中排 66 井 955~1366 m 钻遇油斑 18 m/7 层, 初期日产油 15 t/d, 含水率 10%, 50℃脱气原油黏度 154 mPa·s, 累产油 5789 t, 展示了其开发潜力。进一步研究发现该区高产有利条件为: 储层为火山凝灰岩、岩心含油级别为油斑级、储层裂缝发育、油层原油黏度较低。笔者应用试井成果更深入研究发现其中蕴含一个重要规律, 即孔隙与裂缝联合作用产生的渗流叠加效应是重要的高产要素。

2. 油藏概况

春风油田构造上位于红车断裂带上盘区, 二叠系、三叠系全部缺失, 侏罗系地层部分缺失, 白垩系直接覆盖在石炭系之上, 为由东南向西北抬升的单斜, 因而发育埋深较浅的石炭系地层^[1](图 1)。2003 年, 在二维地震基础上部署的排 1 钻遇到 50 m 石炭系地层。2010 年以来, 工区被三维地震覆盖, 地震面元 10 m × 20 m, 已有 16 口井钻遇到石炭系火山岩储层(表 1、图 2)。该区火山岩油藏属于常压偏低温油藏, 压力系

数 1.04, 油藏压力介于 7.3~14.5 MPa; 地温梯度为 2.7℃/100 m, 油藏温度 30℃~50℃。溶解气油比 23 m³/m³, 50℃脱气原油黏度 228 mPa·s。该区石炭系储层具有亲水特征。

3. 优质储层特征

3.1. 优质储层描述

基于春风油田火山岩储层现有资料和认识, 认为能够用常规技术手段获得稳定工业油流的储层为优质储层。春风油田火山岩优质储层以孔隙-裂缝型储层为主。裂缝发育, 一般缝长为 50~400 mm, 缝宽 0.5~2 mm, 最高裂缝密度可达 15 条/m; 孔隙度 10%左右, 渗透率 $9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右, 原始含油饱和度 55%左右, 地面原油黏度低于 400 mPa·s。排 66 井、排 61 井、排 661、排 665 和排 667 井获得了 6~20 t/d 工业油流, 出油段, 岩性均为火山凝灰岩(图 3), 且均在裂缝段获得了工业油流。

排 61 井 855~949 m 储层发育不好但获得了工业

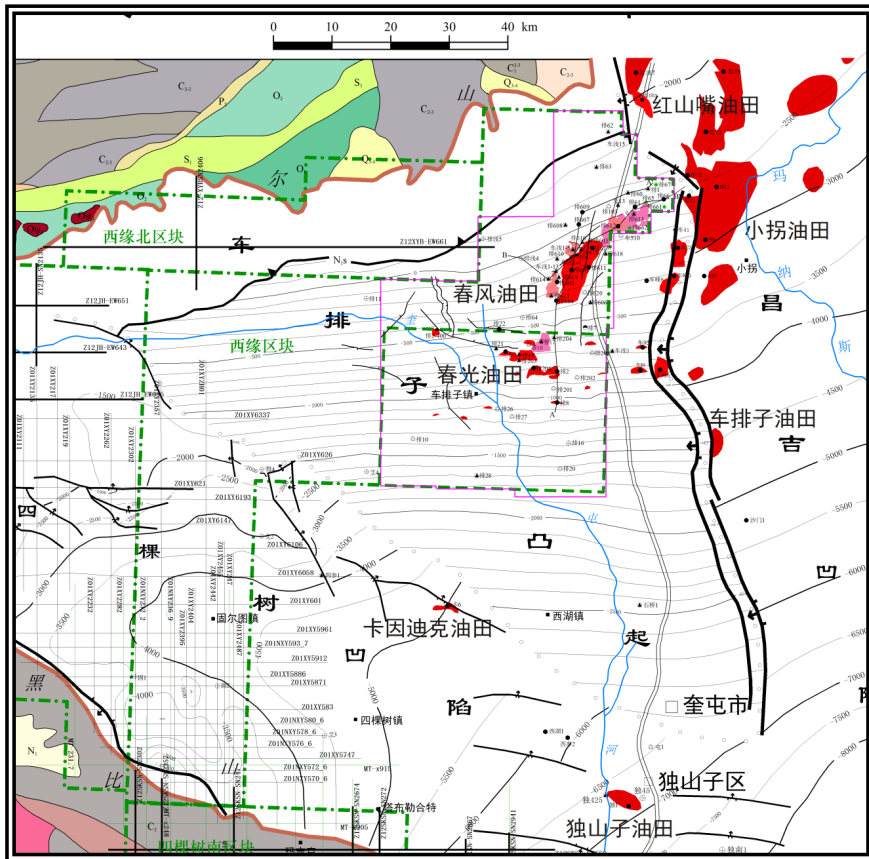


Figure 1. Exploration situation map of the west edge of Junggar Basin
图 1. 准噶尔盆地西缘勘探形势图

Table 1. The statistical table of Chunfeng Oilfield volcanic rock exploratory wells
表 1. 春风油田火山岩探井统计表

| 井号 | 完钻时间 | 石炭系火山岩井段/m | 富含油 | 油斑 | 荧光 | 测井解释油层 | 日产油/t | 含水率/% | 累产油/t | 50℃脱气原油黏度/mPa·s |
|--------|------|------------|---------|-------------|------------|-------------|-------|-------|-------|-----------------|
| 排 61 | 2011 | 879~1284 | | 22 m/3 层 | 21 m/1 层 | 39 m/5 层 | 12 | 1 | 333 | 390 |
| 排 66 | 2012 | 962~1504 | | 14 m/4 层 | 76 m/10 层 | 42 m/8 层 | 15 | 10 | 5789 | 154 |
| 排 661 | 2012 | 1060~1250 | / | 3 m/2 层 | 34 m/10 层 | | 19 | 0 | 518 | 149 |
| 排 662 | 2012 | 1158~1722 | / | 15 m/5 层 | 17 m/12 层 | | | | | |
| 排 1-1 | 2012 | 982~1254 | / | 7 m/2 层 | 10 m/5 层 | | 水 | / | / | |
| 排 701 | 2012 | 663~698 | / | / | / | | 油花 | / | / | |
| 排 67 | 2012 | 无油气显示 | / | / | / | / | / | / | / | |
| 排 663 | 2013 | 928~1031 | / | 4.8 m/2 层 | 9.8 m/5 层 | | 15 | 4 | 999 | |
| 排 664 | 2013 | 866~1096 | / | 0.4 m/1 层 | 9 m/4 层 | | 0.7 | | 3 | |
| 排 665 | 2013 | 781~999 | / | 8 m/2 层 | 22 m/10 层 | | 15 | 6 | 170 | |
| 排 666 | 2013 | 922~1030 | / | 27.6 m/14 层 | 85.5 m/9 层 | | 7 | 0 | 279 | |
| 排 667 | 2013 | 960~1143 | / | 5.9 m/2 层 | 0.25/1 层 | | 7.1 | 15.4 | 15 | |
| 排 668 | 2013 | 972~1136 | / | 4.4 m/1 层 | | | | | | |
| 排 669 | 2013 | 989~1210 | / | 3 m/1 层 | | | | | | |
| 排 66-1 | 2013 | 1033~1268 | 2 m/1 层 | 26 m/7 层 | 17 m/5 层 | 55.9 m/17 层 | 1.3 | 68 | 245 | |
| 排 66-2 | 2013 | 920~1162 | / | / | / | 33.0 m/11 层 | / | / | / | |
| 排 671 | 2013 | 866~868 | | 1.9 m/1 层 | | | | | | |

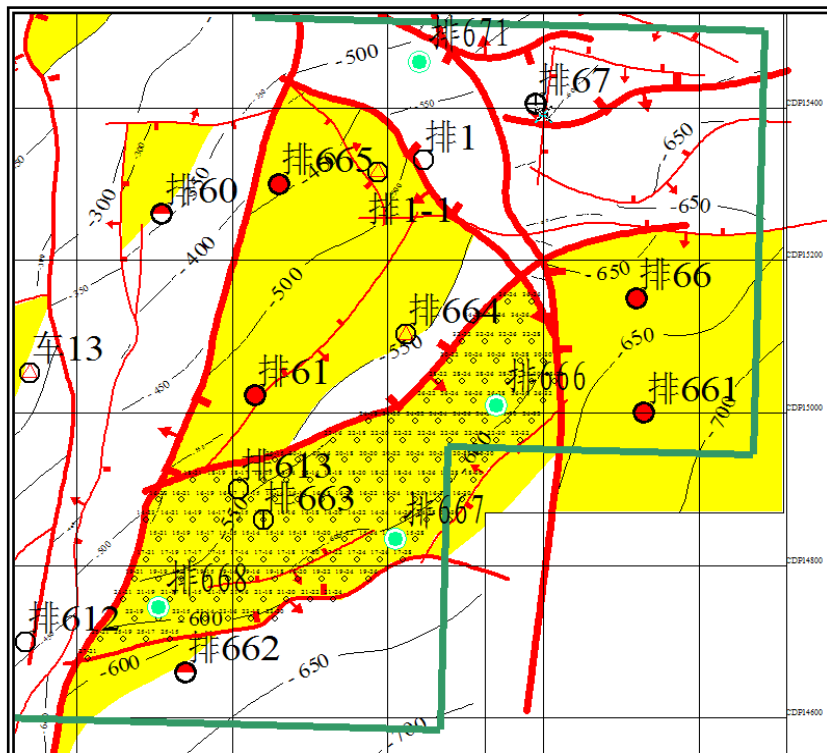


Figure 2. Structure well location graph of carboniferous of Chunfeng Oilfield
图 2. 春风油田石炭系构造井位图

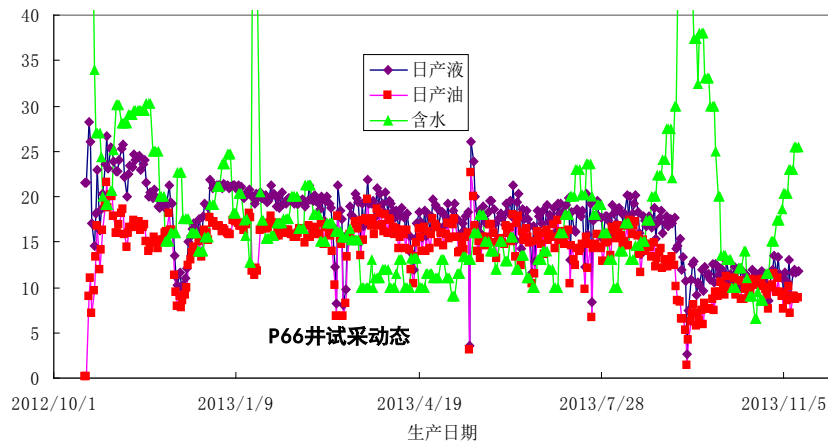


Figure 3. Production curve of Pai 66 well
图 3. 排 66 井生产曲线

油流, 检测表明该段裂缝很发育, 得到了取芯和岩心核磁共振成像验证。该井 2011 年 8 月试采 855~949 m, 日产油 12 t/d, 含水 10%, 2011 年 12 月 31 日不供液关井, 累产油 333 t。试井解释表皮系数为 0, 平均地层压力 3.7 MPa, 关井时井底流压 1.5 MPa。该井油层测井解释孔隙度 6.0%, 渗透率为 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 908.4 m 岩性为灰色油斑凝灰岩, 岩心核磁共振成像解释孔隙度 0.36%, 渗透率小于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 其出油井段岩心常规分析解释孔隙度 12.8%, 渗透率 $0.09 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。纵裂缝、斜裂缝和横裂缝的缝长为 80~200 mm, 缝宽 2~7 mm, 最高裂缝密度可达 10 条/m。

排 66 井钻遇油斑 19.8 m/3 层, 油斑段岩性为火山凝灰岩, 测井解释孔隙度 3.1%~16.2%, 平均为 6.4%; 渗透率 $(0.3\sim 19.3) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $11.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。核磁共振岩心技术纵向分辨能力较高(5 mm), 是常规测井分辨率的 100 倍^[2], 能够有效地反映火山岩的孔隙结构。从核磁共振成像解释看, 排 66 井 1208.7~1210.2 m 为灰色油斑凝灰岩, 基质孔渗性差, 但含油饱和度高达 80%(表 2)。排 66 井纵裂缝、斜裂缝和横裂缝的缝长为 100~500 mm, 缝宽 1~15 mm, 裂缝密度 20 条/m, 裂缝面被泥质、石英、方解石充填或无充填物, 裂缝面及充填物可见溶蚀孔洞, 微细裂缝发育, 原油沿裂缝面和溶蚀孔洞分布。成像测井显示, 排 66 块裂缝主要发育倾角为 20°~80°的中-高角度裂缝, 主要为半充填裂缝。

3.2. 优质储层识别标准

在岩心、录井、荧光薄片含油性显示的基础上,

通过成像测井、核磁测井、常规测井曲线特征等方面的研究, 形成了春风油田石炭系火山岩储层识别标准:

- 1) 油气显示段。①岩心剖面——含油性在油斑以上; ②录井剖面——含油性在荧光以上。
- 2) 孔隙-裂缝发育段: ①成像测井图上有裂缝等次生孔隙发育; ②核磁测井标准 T2 谱图显示有长弛豫时间的谱峰, 一般弛豫时间大于 20 ms; ③有效储层相对于致密储层常规测井曲线有“两低一高”的特征, 即低电阻率、低密度、高声波, 井径或出现扩径现象。火山凝灰岩声波时差曲线呈极低值特征, 为 50~70 $\mu\text{s}/\text{ft}$; 岩石密度为 2.6~2.7 mg/cm^3 , 补充中子为 10%~20%。
- ④测井解释孔隙度大于 9%, 渗透率大于 $4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

3.3. 优质储层描述技术

3.3.1. 地震资料小波高分辨率处理技术

针对春风油田火山凝灰岩储层地震反射杂乱, 解释难度大, 构造体系认识不清的难题, 围绕改善三维地震资料品质, 采取了地震资料小波高分辨率处理技术。方法原理是, 利用小波变换的多分辨功能和优良的“数学显微镜”特性, 将时空域中的地震记录转换到小波域。同时在小波分频域进行信噪比增强和提高分辨率的处理, 使那些在小波域观察到的隐蔽特征, 在重构后的时空域中仍能够得到较好的分辨, 提高地震记录的质量和分辨能力。实现步骤是, 一是在不同尺度因子上对地震信号进行分频处理, 二是对每个尺度作能量标定以确定最佳重构系数, 三是重构地震信号以获得更好品质。从处理效果看, 主频由 40 Hz 提高到了 50 Hz, 噪音被压制、连续性增强、同相相关

Table 2. The result table of Pai 66 well core NMR logging
表 2. 排 66 井火山岩岩心核磁共振成像解释结果

| 井深(m) | 孔隙度(%) | 渗透率($10^{-3} \mu\text{m}^2$) | 含油饱和度(%) | 可动流体饱和度(%) | 岩样描述 |
|---------|--------|--------------------------------|----------|------------|----------|
| 1209.1 | 9.53 | 0.07 | 21.07 | 3.02 | 褐红色油斑凝灰岩 |
| 1209.27 | 9.35 | 0.09 | 25.78 | 1.24 | 褐红色油斑凝灰岩 |
| 1209.43 | 11.11 | 0.14 | 23.13 | 0.7 | 褐红色油斑凝灰岩 |
| 1209.6 | 0.59 | 0 | 88.3 | 5.83 | 灰色油斑凝灰岩 |
| 1209.76 | 0.55 | 0 | 61.87 | 5.98 | 灰色油斑凝灰岩 |
| 1209.93 | 0.77 | 0 | 88.85 | 5.71 | 灰色油斑凝灰岩 |
| 1210.2 | 0.53 | 0 | 79.53 | 5.78 | 灰色油斑凝灰岩 |

系明显,弱信号得到增强、复波分离,分辨率和信噪比提高。

3.3.2. 小波分频多尺度裂缝检测技术

春风油田主要发育近南北向主断层及伴生次断层,形成区域内主要裂缝发育区。围绕精准识别裂缝,采取了小波分频多尺度裂缝检测技术。方法原理是,借用图像处理的多维边缘检测算法,对低序级断层进行识别。实现步骤是,一是构造小波函数,对三维地震属集体进行二维小波变换至小波域;二是分析小波尺度因子与边缘尺度之间的关系,通过合理选值提高边缘识别的精度;三是建立地震振幅边缘与低序级断层的非线性关系,进而实现图像边缘与低序级断层的空间映射。应用小波分频多尺度裂缝检测技术绘制了工区裂缝发育预测图。

4. 渗流叠加效应

排 66 井 2012 年 8 月采用割缝筛管完井,试采 955~1062 m,日产油 14.2 t/d,含水率 10%,50℃脱气原油黏度 154 mPa·s,2011 年 12 月 31 日不供液关井,累产油 333 t。2012 年 10 月投产,已正常生产 13 个月(表 3)。

为了解释排 66 井高产原因,学习借鉴了国内外研究成果。国内外火山岩开发方面积累了经验,美国 Monroe Uplift 盆地 Richland 油田储层埋深 3000 m,岩性为凝灰岩,已探明天然气地质储量 $399 \times 10^8 \text{ m}^3$ [3];格鲁吉亚 Samgori 油田储层岩性为凝灰岩,已探明石油地质储量 $2877 \times 10^4 \text{ t}$,日产油 411 t/d;古巴 North Cuba 盆地 Cristales 油田储层岩性为凝灰岩,日产油 3425 t/d。国内高效开发了准噶尔盆地克拉美丽大气田、

牛东油田和松辽盆地北部徐家围子大气田。克拉玛依油田古 3 井日产油 177 t/d,红 80 井火山凝灰岩日产油 70 t/d。红 116 井日产油 13 t。红车断裂带探明和控制储量 $8000 \times 10^4 \text{ t}^{[4]}$ 。中拐五八区位于石炭系火成岩裂缝发育区的 H019 井油藏埋深 2460 m,日产油 106 t/d。Richland 油田 2000 年钻探了第一口水平井投入开发,15 口井压裂改造后日产气量增加 252%;吐哈油田三塘湖盆地石炭系火成岩 F24 井生产井段 1582~1610 m,压裂施工压力 65 MPa,日产油由 0 到 25.1 t/d^[5]。可见,水平井和压裂改造油层是改善火山岩开发效果的重要手段。董家辛教授研究了火山岩气藏不同储渗模式下的非线性渗流机理^[6],建立的火山岩气藏多重介质的“接力”排供气机理概念模型,启发了笔者开展春风油田火山岩油藏渗流规律研究。笔者猜想,孔隙、裂缝沟通后,有助于形成有效压差,从而提高储层的导流能力。低渗透油藏具有特殊的渗流机理,流体由静态到动态存在启动压力梯度,即大于启动压力梯度后,才能使地层流体保持连续流动^[7-9]。

排 66 井日产油一直稳定在 15 t/d,含水 20%左右(图 3),根据试油结果,预测试采井底流压曲线,符合试井认识(图 4)。排 66 井综合压缩系数 $10 \times 10^{-4}/\text{MPa}$,试井解释试采末表皮系数为 0,解释空气渗透率为 $(60\sim 70) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,是测井解释空气渗透率的 6 倍。笔者经过认真分析,认为这不是单纯的方法不同造成的差别,而是蕴含着一条重要的驱油机理,即孔隙-裂缝沟通后,产生了远优于单纯孔隙型储层或单纯裂缝型储层的开发效果,1+1>6。

进一步研究,证实了这一观点(表 4)。由于渗透性改善,产能成倍增加。从而找到了孔隙-裂缝型火山

Table 3. The statistical table of Pai 66 well production statistical
表 3. 排 66 井生产情况统计表

| 年月 | 生产时间/d | 泵径/mm | 泵深/m | 冲程 | 冲次 | 套压/MPa | 动液面/m | 日产油/t/d | 含水率/% | 累产油/t | 累产水/m ³ |
|--------|--------|-------|------|-----|-----|--------|-------|---------|-------|-------|--------------------|
| 201210 | 14 | 70 | 877 | 3.7 | 2 | 0 | | 5.4 | 43.6 | 168 | 13 |
| 201211 | 30 | 70 | 877 | 3.7 | 2.1 | 0 | | 16.3 | 27.4 | 656 | 314 |
| 201212 | 30 | 70 | 801 | 3.7 | 2.3 | 0 | 731 | 13.8 | 17.5 | 1084 | 405 |
| 201301 | 31 | 70 | 801 | 3.8 | 2.5 | 0 | | 16 | 21.6 | 1581 | 542 |
| 201302 | 28 | 70 | 801 | 3.8 | 2.5 | 0 | | 16 | 18.1 | 2028 | 641 |
| 201303 | 30 | 70 | 801 | 3.8 | 2 | 0 | 745 | 15.2 | 13.7 | 2499 | 716 |
| 201304 | 30 | 70 | 801 | 3.8 | 2 | 0 | 704 | 15.4 | 11.5 | 2960 | 776 |
| 201305 | 30 | 70 | 801 | 3.8 | 2 | 0 | 704 | 15.4 | 13.6 | 3436 | 851 |
| 201306 | 28 | 70 | 801 | 3.5 | 2.6 | 2.3 | 509 | 15.1 | 13.2 | 3889 | 920 |
| 201307 | 30 | 70 | 801 | 3.5 | 2.6 | 1.6 | | 14.2 | 18.4 | 4328 | 1019 |
| 201308 | 30 | 70 | 801 | 4.1 | 2.6 | 1.5 | 529.9 | 14.8 | 16.1 | 4787 | 1107 |
| 201309 | 29 | 70 | 801 | 4 | 0.8 | 3.95 | 658 | 8.2 | 34.5 | 5032 | 1236 |
| 201310 | 31 | 70 | 801 | 4 | 0.8 | 4.5 | 681 | 9.9 | 12 | 5339 | 1278 |
| 201311 | 29 | 70 | 801 | 4 | 0.8 | 4.2 | 772 | 8.5 | 26.4 | 5593 | 1369 |
| 201312 | 31 | 70 | 801 | 4 | 0.8 | 3.6 | | 6.3 | 45.4 | 5789 | 1532 |

Table 4. Volcanic rock pore-fracture permeability additive of Chunfeng Oilfield
表 4. 春风油田火山岩孔隙 - 裂缝叠加渗透率

| 井号 | 井段/m | 含油级别 | 测井解释 | | 孔隙 - 裂缝 叠加渗透率 | 日产油 /t | 含水率 /% | 累产油 /t | 累产水 /m ³ |
|-------|-----------|----------|------|--------------------------------------|------------------|-----------|-----------|-----------|------------------------|
| | | | 孔隙度% | 渗透率/10 ⁻³ μm ² | | | | | |
| 排 61 | 924~931 | 油斑 3.1 m | 12.3 | 11.1 | 40 | 12 | 10 | 333 | 5 |
| 排 66 | 1054~1055 | 油斑 1.0 m | 16.2 | 35.5 | 60 | 15 | 10 | 5789 | 1532 |
| 排 661 | 1119~1125 | 油斑 0.4 m | 5.6 | 0.5 | 100 | 19.1 | 3 | 19 | 0.8 |
| 排 663 | 928~1031 | 油斑 1.4 m | | | 600 | 25 | 4 | 236 | 43 |
| 排 665 | 846~855 | 油斑 5.4 m | 6.8 | 0.8 | 350 | 21 | 58 | 44 | 63 |
| 排 666 | 1060~1068 | 油斑 6.1 m | 6.7 | 0.8 | 40 | 6.2 | 0 | 28 | 0 |

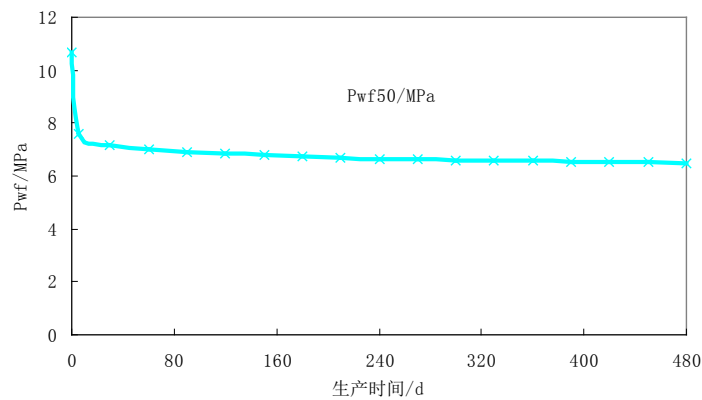


Figure 4. Flowing bottom hole pressure curve of Pai 66 well
图 4. 排 66 井井底流压曲线

岩储层改造增产的新思路,即通过有效沟通孔隙和裂缝达到增产目的,与压裂的不同之处在于,压裂主要考虑增加有效裂缝,而没有充分考虑到孔隙的价值。由此可见,酸化由于作用范围小,不是改善孔隙-裂缝型火山岩储层的有效手段,而水平井和长井段压裂是有效手段。2013年11月,排666井压裂改造后,日产油由2 t/d提高到12 t/d。笔者进一步推敲认为,排66井未进行压裂,孔隙与裂缝也实现了有效沟通,可见只要有压降漏斗或生产压差,就可能产生孔隙-裂缝渗透率放大效应。

5. 结论

1) 春风油田石炭系火山凝灰岩埋深适中,原油黏度较低,常规试采效果较好,开发优势明显。获得高产的有利条件为:储层为火山凝灰岩,岩心含油级别为油斑级,储层裂缝发育,油层原油黏度较低。

2) 在分析高产原因的过程中,发现了孔隙-裂缝渗流叠加效应。即孔隙-裂缝沟通后,产生了远优于单纯孔隙型储层或单纯裂缝型储层的开发效果。孔隙-裂缝叠加渗透率是测井解释储层渗透率的多倍。

3) 发现孔隙-裂缝渗流叠加效应的意义在于,找到了改造先天条件较弱储层的有效途径,为采用水平井和长井段压裂改造储层提供了理论依据。从而解放了大部分差油层,为规模开发春风油田火山岩油藏提供了技术支撑。

基金项目

国家科技重大专项《准噶尔盆地碎屑岩层系大中型油气田形成规律与勘探方向》(2011ZX05002-002);胜利油田科技项目:“准噶尔盆地西缘油气成藏规律及勘探目标研究”(YKK0808)。

参考文献 (References)

- [1] Wang, J.Y., Wang, X.Z. and Ma, L.Q. (2013) Petroleum exploration of marine deposit, shallow, Carboniferous and volcanic tuff reservoir in the western margin of Junggar Basin. *Engineering Science*, **11**, 13-18.
- [2] 杨正明, 郭和坤, 姜汉桥, 等 (2009) 火山岩气藏不同岩性核磁共振实验研究. *石油学报*, **3**, 400-403.
- [3] 匡立春, 薛新克, 邹才能, 侯连华 (2007) 火山岩岩性地层油藏成藏条件与富集规律——以准噶尔盆地克-百断裂带上盘石炭系为例. *石油勘探与开发*, **3**, 285-290.
- [4] 李军, 薛培华, 张爱卿, 等 (2008) 准噶尔盆地西北缘中段石炭系火山岩油藏储层特征及其控制因素. *石油学报*, **3**, 327-336.
- [5] 张泽兰, 李中林, 曾华国, 等 (2012) 吐哈油田火成岩储层压裂技术研究与应用. *中国西部科技*, **4**, 1-3.
- [6] 董家辛, 童敏, 冉博, 等 (2013) 火山岩气藏不同储渗模式下的非线性渗流机理. *石油勘探与开发*, **3**, 346-351.
- [7] Wang, X.Z., Wang, J.Y., Wang, C.F., et al. (2010) Quantitative description of characteristics of high-capacity channels in unconsolidated sandstone reservoirs using in situ production data. *Petroleum Science*, **7**, 106-111.
- [8] 贾利春, 陈勉, 孙良田, 等 (2013) 结合 CT 技术的火山岩水力裂缝延伸实验. *石油勘探与开发*, **3**, 377-380.
- [9] 袁俊平 (2009) 应用现代试井技术提高低渗透油藏开发水平. *石油化工应用*, **2**, 39-42.