

定向射孔多缝压裂工艺案例分析

唐梅荣

(长庆油田油气工艺研究院,西安 710021)

[摘要] 一种新型的压裂工艺在中国长庆油田试验成功,该工艺在层内压裂形成了2条独立裂缝,大幅增加了裂缝与油藏的接触面积,提高了产量。长庆油田开发的超低渗透油藏岩芯分析渗透率一般在0.5 mD以下,且受到储层条件、注采井网、压裂工艺等多重限制,常规压裂工艺改造难以实现该类油藏的有效开发。历经多年研究并结合自身实际,长庆油田于2006年提出了体积压裂的理念,通过在油层内造多缝扩大油藏的泄流体积以提高单井产量。室内物模试验研究射孔对压裂影响时观察到,当射孔方向与最大水平主应力方位存在夹角的情况下裂缝发生转向,即裂缝均先沿射孔孔眼方向起裂,后转向最大主应力方向。在同一油层内上下各射一排孔,两排孔方位与最大主应力方向呈一定夹角,一排偏右,一排偏左。分别对两排孔眼进行压裂,这样由于初始裂缝转向导致两条裂缝在井眼处虚拟相交,但在地层内不会重合,形成近井类似于“X”形4条裂缝,远井形成2条近于平行的裂缝。提出了一种产生多裂缝的新型压裂工艺——定向射孔多裂缝压裂。开展了大量物模试验,证实了思路的可行性,并且长庆油田在A井开展了现场压裂试验。井下微地震裂缝测试表明:形成了“X”形多裂缝;产量数据表明:定向射孔多缝压裂井相比邻井产量提高38.1%。

[关键词] 定向射孔;裂缝转向;多缝压裂;泄流体积;增产

[中图分类号] TE3 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2012)04-0105-08

1 前言

水力压裂技术为全世界低渗透油气藏改造获得经济有效的开发做出了巨大贡献,它成为了低渗透油气藏赖以开发的关键技术之一。世界上著名的低孔、低渗、低压油田以中国的长庆油田最为典型,进入21世纪长庆油田开发的三叠系油藏平均孔隙度7%~12%、渗透率0.2~2.0 mD、压力系数0.6~0.8。随着水力压裂技术的进步,长庆油田开发油藏的渗透率下限不断下降,但针对0.5 mD以下的油藏压裂改造技术没有取得突破性进展,常规的水力压裂技术表现出了明显不足。

近年来,长庆油田不断探索、尝试各种压裂工艺,主要以大规模压裂、低伤害压裂液为主攻方向,但总体上没有突破。在此背景下,提出了体积压裂理念,压裂由追求长缝转变为追求多裂缝,由扩大泄流面积转变为泄流体积。长庆油田油层水平最大主

应力与水平最小主应力之间的差值相对较小,水力裂缝发生转向的难度相对小,由此发明了定向射孔多缝压裂工艺^[1]。

2 工艺设想

实验室研究射孔方位与地层破裂压力之间的关系时发现,如果射孔方位与水平最大主应力方向之间存在夹角,压裂裂缝首先沿着射孔方向延伸,之后转向水平最大主应力方向^[2]。在此启发下,提出了通过定向射孔诱导裂缝定向起裂,迫使裂缝转向,配合分段压裂工艺,在层内形成多裂缝,多裂缝在地层内相交点位于井眼位置,理想条件下压裂形成的裂缝见图1。

3 物理模拟试验

通过理论研究,发现对裂缝转向影响较大的参数有射孔方位、水平应力差^[2]。为研究射孔方位、

[收稿日期] 2012-03-10

[作者简介] 唐梅荣(1980—),男,山东潍坊市人,工程师,主要从事压裂酸化研究与应用工作;E-mail:tmr_cq@petrochina.com.cn

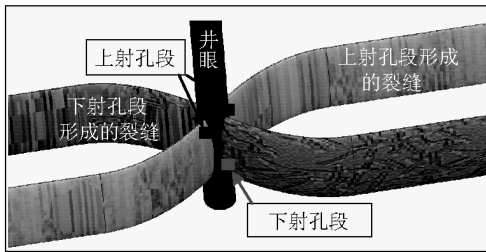


图1 定向射孔多缝压裂工艺效果立体成像图
Fig.1 Visual image of the oriented perforating technology for the multiple crack fracturing technology

性模量 1.5×10^4 MPa、泊松比 0.23、单轴抗压强度 48.5 MPa。

3.4 模拟三向地应力

水力压裂模拟实验要求模拟地层条件,其中最主要的因素之一是地层应力的大小和分布。一般情况下,地层三向主应力互不相等,而且不同层位水平地应力的大小也不同。对于水力压裂来说,三向主应力的相对大小决定着裂缝扩展的方向^[3]。在模拟实验中采用真三轴加载方式能更好地反映地层的实际应力状况。

3.5 模拟试验结果

认识一:当射孔方位与最大主应力方向呈一定夹角时,裂缝先沿射孔孔眼方向起裂,后转向最大主应力方向(见图3)。

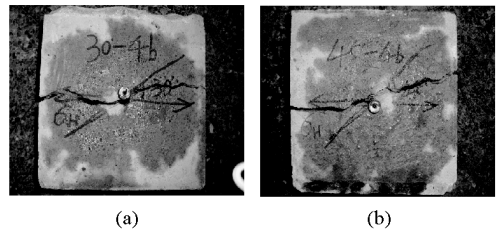


图3 定向射孔压裂试件实拍照片

Fig.3 Pictures of the oriented perforating technology for the multiple crack fracturing

认识二:射孔方位与最大主应力方向夹角越大,转向半径越大;随应力差增加,转向半径减小(见图4)。

认识三:对转向半径的影响程度,射孔方位要大于水平两向应力差。

为直观分析射孔方位和应力差对转向半径的影响,同时将射孔方位和应力差作为自变量,转向半径作为函数值,进行曲面拟合(见图5和图6)。

拟合曲面与实验曲面的吻合度较高,说明通过拟合得到的函数关系式精度可靠。

$$R = 3.14286 - 0.171786\Delta\sigma - 0.0410714\Delta\sigma^2 + 0.209\theta - 0.0015333\theta^2$$

式中, R 为转向半径,cm; $\Delta\sigma$ 为水平应力差,MPa; θ 为射孔方位,°。

分析拟合公式发现,应力差增加,转向半径减小;射孔偏转方位增加,转向半径增加。忽略方程中的平方项,对比应力差和射孔方位的系数发现,射孔方位对转向半径的影响要大一些。

水平应力差对裂缝转向半径、破裂压力等参数的影响,开展了物理模拟试验研究。

3.1 实验方案

模拟地层三向应力、水力压裂,对试件进行注入实验,研究不同射孔方位、水平应力差下裂缝起裂、转向规律。实验装置图见图2。

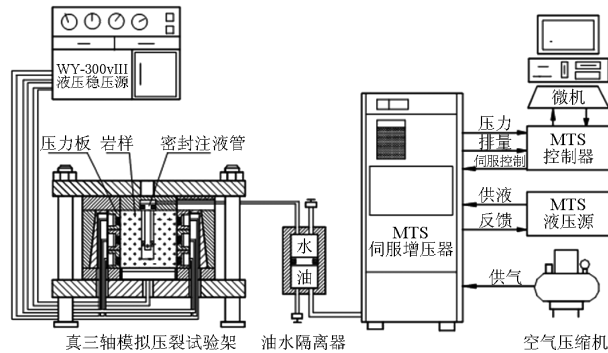


图2 水力压裂模拟实验装置示意图

Fig.2 Simulated experiment instruments of the hydraulic fracturing

3.2 模拟井筒、射孔

井筒外径:20 mm;内径:15 mm。

射孔排数:3排;孔排间距:25 mm;相位角:180°。

射孔孔径:2 mm;孔深:30 mm。

3.3 模拟压裂试件

试样采用水泥和石英砂浇铸而成,在浇铸过程中,根据需要,将外径为20 mm,内径为15 mm,长为225 mm的钢管置入在试样中,作为模拟井筒。在模拟井筒上的3排小孔中插入不同规格的细纸卷,模拟射孔孔眼,且这些小孔也是压裂模拟实验时压裂液的出口。

试件参数:孔隙度1.85%、渗透率0.5 mD、弹

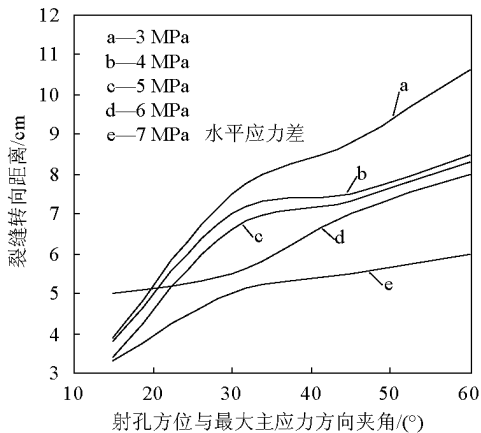


图4 转向半径与应力差、射孔方位关系图
($\sigma_z = 15 \text{ MPa}$)

Fig. 4 Relationship of turning radius, stress difference and shot direction ($\sigma_z = 15 \text{ MPa}$)

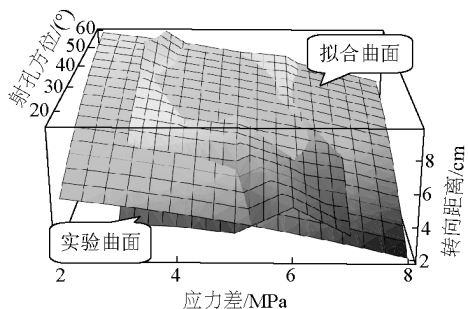


图5 实验数据曲面拟合俯视图

Fig. 5 Plan view of surface fitting of the simulation experiments data

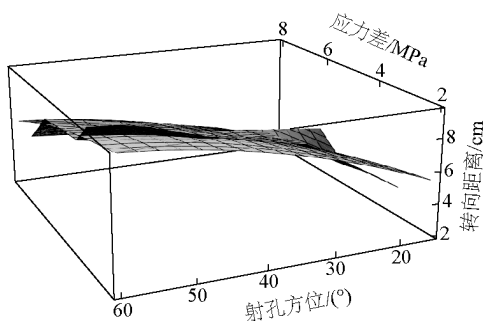


图6 实验数据曲面拟合侧视图

Fig. 6 Side view of surface fitting of the simulation experiments data

4 方案设计

4.1 试验选井

通过对油田重点层位取芯分析水平最大应力、水平最小应力、垂直应力,筛选水平两向应力差小于5 MPa。最终优选了H区块A井为试验对象,该井油层主要参数如下:油层厚度15.4 m、孔隙度8.9%、渗透率0.32 mD、水平两向应力差2.3 MPa。

4.2 裂缝方位

通过井下微地震测试获取该区压裂裂缝方位为NE75°(见图7)。

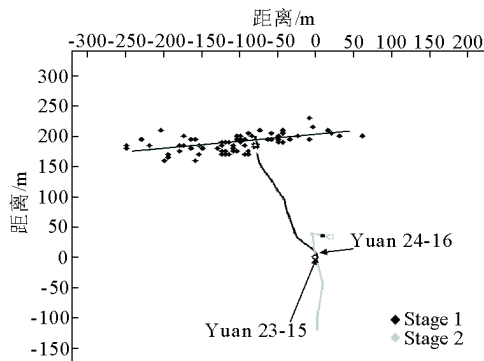


图7 Y井井下微地震监测裂缝方位图

Fig. 7 Fracture direction of the Well Y by downhole microseismic monitoring

4.3 射孔方位

根据物模试验结果,并考虑裂缝起裂破压,选择射孔方位与水平最大地应力方位夹角为45°。因此,A井设计的两个射孔段,一个在NE75°基础上右偏转45°,即NE120°。一个在NE75°基础上左偏转45°,即NE30°。

4.4 射孔参数

通过压缩射孔程度控制起裂点,因此设计射孔长度为2 m,上下射孔段深度分别是2 701 ~ 2 703 m、2 710 ~ 2 712 m。为增加射孔深度,采用超深穿透射孔弹,穿透深度1 m左右。

4.5 压裂参数

考虑A井为一口开发井,注采井网是菱形反九点井网,根据裂缝与井网适配优化结果,远离注水井的裂缝缝长140 m(NE30°射孔段)、靠近注水井的裂缝缝长130 m(NE120°射孔段)。综合考虑确定NE30°射孔段压裂规模35 m³,NE120°射孔段压裂规模30 m³。图8为油藏模拟5年后油井含水饱和度分布图。

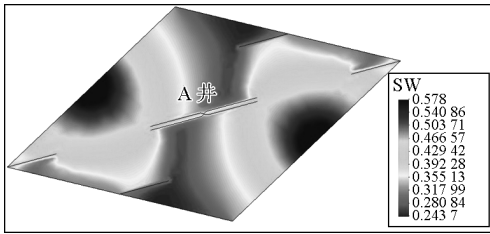


图8 油藏模拟5年后油井含水饱和度分布图

Fig.8 Water saturation distribution of the oil reservoir in 5 years by simulation

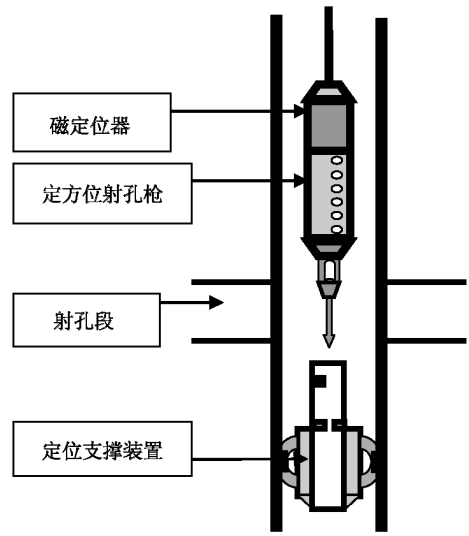


图10 定向射孔定位支撑装置、射孔枪仪图

Fig.10 Instruments of the oriented perforating

5 施工作业

5.1 电缆传输定向射孔

定向射孔定位支撑装置、方位测量仪图见图9；定向射孔定位支撑装置、射孔枪仪图见图10。

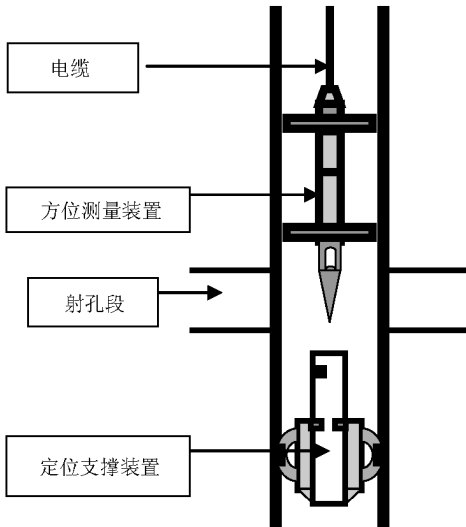


图9 定向射孔定位支撑装置、方位测量仪图

Fig.9 Instruments of the oriented perforating

1)首先采用电缆将定位器和投放工具以及定位支撑装置连接下井,用磁性定位器将深度确定为2712.16m后,点火将定位支撑装置座在预定深度,然后起出电缆。

2)采用电缆将方位测量装置连接下井,方位测量装置插入定位支撑装置后,测量定位装置内键的准确方位为NE282°,然后起出电缆。

3)地面根据定位支撑装置键的方位和射孔设计方位,调整定方位射孔枪下的导向头和射孔枪夹角。定位装置内键的准确方位为282°,下段射孔段方位120°,因此定位罗盘仪调出差值162°。罗盘仪套在导向定位头上,将射孔弹方位与导向头键槽

调162°后紧固顶丝。采用电缆将定方位射孔枪连接下井。

4)当导向头插入定位支撑装置后,射孔枪即对准射孔段,射孔弹即对准设计要求的方位。

5)通电点火射孔,地面观察电缆和绞车抖动的状况,判断射孔枪起爆。

6)上起电缆和射孔枪并解锁定位支撑装置,定位支撑装置随射孔枪体一起起出井口,完成施工。

5.2 不动管柱分段压裂

1)下射孔段2710~2712m,方位NE120°,设计缝长130m、加砂30m³。井底破裂压力47.75MPa,井底停泵压力31.63MPa。压裂初期发现施工压力在持续上升,与该区常规压裂施工特征不同,分析原因主要是裂缝在初始阶段发生转向造成的高弯曲摩阻,导致压力在地层破裂后不降反升。图11为下段压裂施工曲线图。

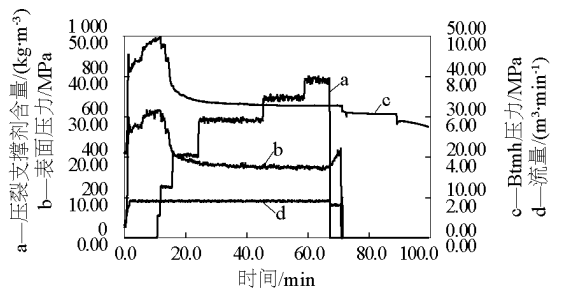


图11 下段压裂施工曲线图

Fig.11 Fracturing curve for the lower part

2) 上射孔段 2 701 ~ 2 703 m, 方位 NE30°, 设计缝长 140 m、加砂 35 m³。井底破裂压力 49.33 MPa, 井底停泵压力 31.04 MPa。该段压裂破压明显且高, 说明压裂初始阶段两条裂缝没有沟通。油层起裂后压力没有继续上升, 分析认为可能是射孔方位与最大主应力方向夹角较小, 裂缝弯曲摩阻小造成的。图 12 为上段压裂施工曲线图。

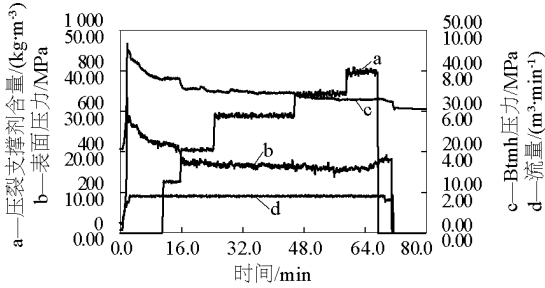


图 12 上段压裂施工曲线图

Fig. 12 Fracturing curve for the upper part

压裂射孔段 2(下段)时, 如果裂缝延伸到射孔段 1(上段), 则上压力计将显示压力急剧上升; 若未压串, 上压力计压力无变化。图 13 为下段压裂时压力计监测布放图。

测试结果见图 14, 在上射孔段处的压力计记录到的数据显示, 此处压力明显小于下射孔段(正压裂段)处压力, 说明裂缝没有在进井筒地带沟通。

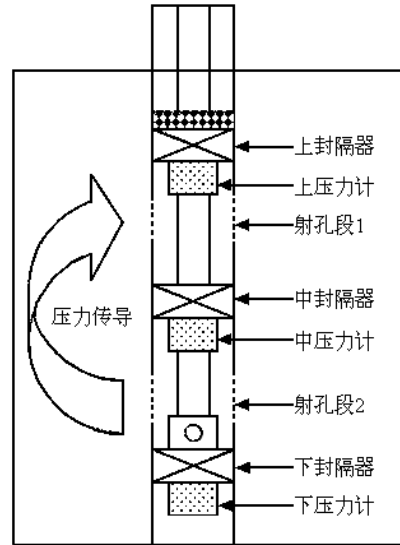


图 13 下段压裂时压力计监测布放图

Fig. 13 Downhole pressure position for the lower part fracturing

6 测试结果

6.1 压力计监测分析

通过监测射孔段位置压力变化情况, 判断是否有压力传导至此, 如果有压力传导需要识别清楚来源, 根据压力来源可判别两次压裂裂缝是否连通。

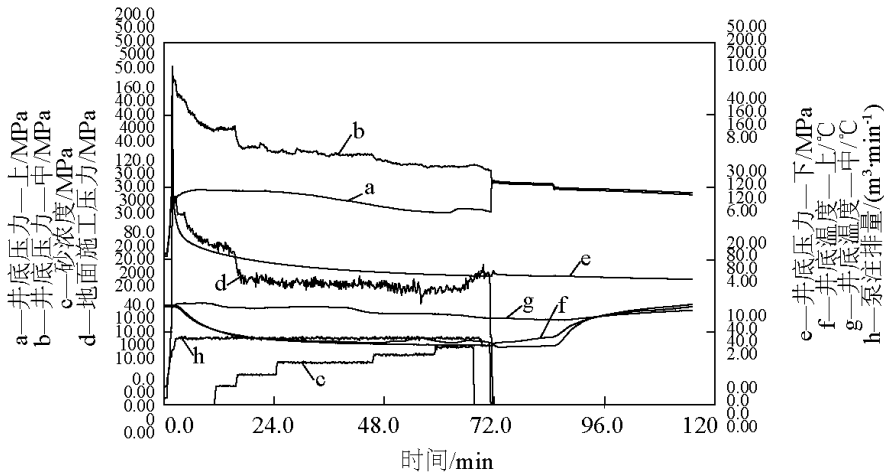


图 14 下段压裂时压力计数据图

Fig. 14 Pressure curve of the lower part fracturing

压裂射孔段 1(上段)时,如果裂缝与射孔段 2(下段)裂缝沟通,则下压力计将显示压力急剧上升;若未压串,下压力计压力无变化。图 15 为上段压裂时压力计监测布放图。

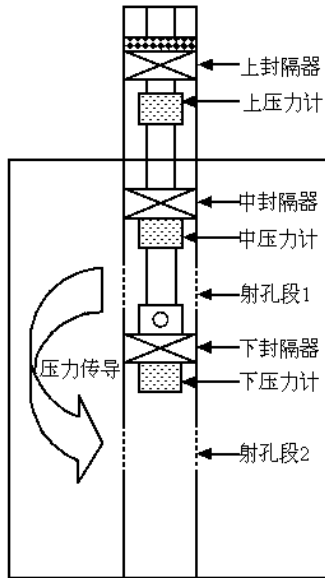


图 15 上段压裂时压力计监测布放图

Fig. 15 Downhole pressure position for the upper part fracturing

测试结果见图 16,在下射孔段处的压力计记录到的数据显示,此处压力明显小于上射孔段(正压裂段)处压力,说明裂缝没有在进井筒地带沟通。

6.2 井下微地震裂缝测试

A 井压裂采用井下微地震全程监测,发现 NE120°射孔段压裂形成的裂缝主体方位为 NE83°(见图 17);NE30°射孔段压裂形成的裂缝主体方位为 NE61°(见图 18),两条裂缝之间的夹角为 22°。两条裂缝均趋于最大水平主应力方向,发生转向^[2]。

7 增产效果

A 井生产半年后日产油 4.5 t,相比邻井产量提高了 38%(见图 19)。

8 结语

1)通过定向射孔强制初始裂缝转向,使分段压裂在层内形成多裂缝的设想变为了现实,成为多缝压裂技术发展的一个里程碑。

2)根据定向射孔多缝压裂工艺设计了物模实验装置和试验方案,取得了以下主要认识:裂缝转向半径随着射孔夹角增加而增加。裂缝转向半径随着水平应力差增加而减小。对转向半径的影响程度,射孔方位大于水平应力差。

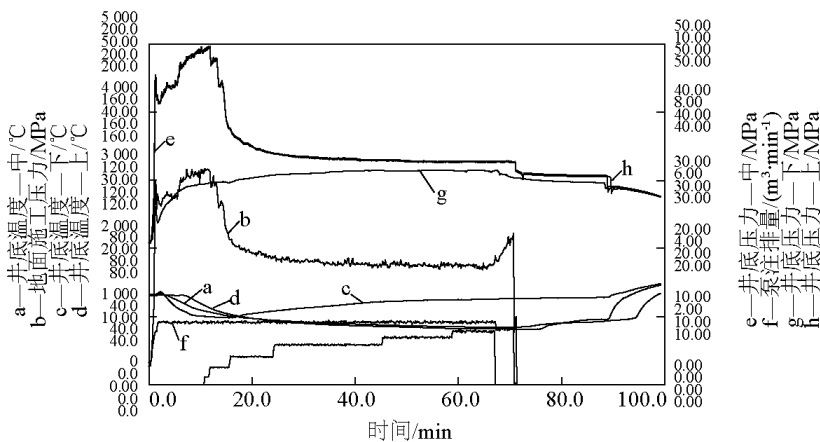


图 16 上段压裂时压力计数据图

Fig. 16 Pressure curve of the upper part fracturing

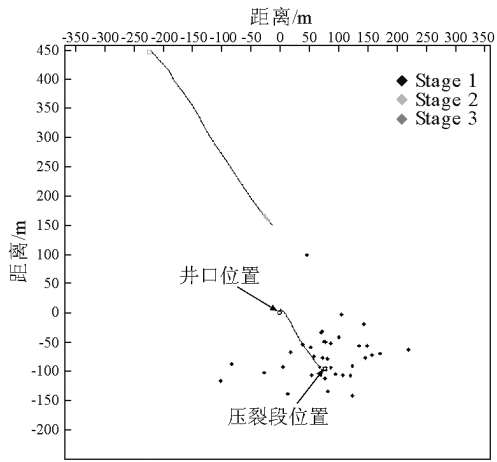


图 17 NE120°射孔段压裂裂缝监测图
Fig. 17 MS monitoring results in NE120°

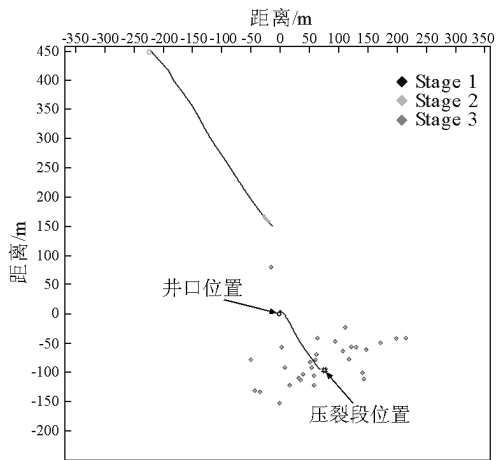


图 18 NE30°射孔段压裂裂缝监测图
Fig. 18 MS monitoring results in NE 30°

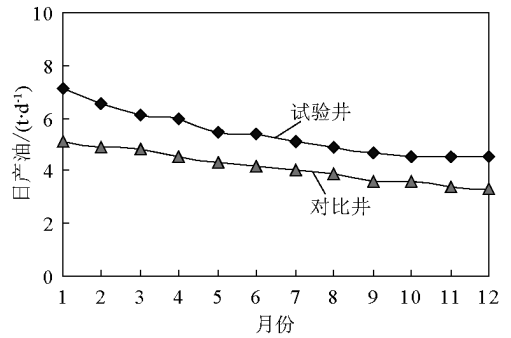


图 19 试验井与对比井产量对比图
Fig. 19 Productivity contrast between the experimented well and compared well

3)通过井下微地震裂缝监测证实,多缝压裂技术可以在层内形成多缝,达到了进一步提高泄油体积的目的。

4)多缝压裂工艺的试验成功,其作用不止是单井产量的提高,而且通过提高油藏横向动用程度可以减小井网密度,从而降低低渗透油田开发成本。

参考文献

- [1] 刘建中,王秀娟,孙玉玲,等. 人工压裂形成多裂缝的可能性研究[J]. 石油勘探与开发,2002,29(3):103-106.
- [2] 刘建中,刘继民,刘志鹏,等. 用微地震法监测压裂裂缝转向过程[J]. 石油勘探与开发,2005,32(2):75-77.
- [3] 刘建中,张金珠,张雪. 油田应力测量[M]. 北京:地震出版社,1993.

A case study of oriented perforating technology for the multiple crack fracturing

Tang Meirong

(Changqing Oil and Gas Technology Institute, Xi'an 710021, China)

[**Abstract**] It has been proved by successful experimental study and application of the new fracturing technology, which create two fracture, significantly improving contact area between fracture and low permeability reservoir, and increasing productivity as well. Normally the permeability of the low permeability block in the Changqing oil field is below 0.5 mD by low - permeable cores analysis. It is a tough task to development the oil through the general methods due to geological condition, watering well distribution and fracturing technology. Volume fracturing is proposed to increase the productivity by multiple crack fracturing since 2006 in Changqing oil field. The fracture initiated from the hole by the perforating shot, then turn the direction of the maximum level principal stress in the physical model research. Two lines of perforating shot are fired in the different depth of the oil reservoir, with an angular between the shots and the maximum level principal stress, liking letter "X", paralleling in the distance. The oriented perforating technology for the multiple crack fracturing is presented and applied in the Changqing oil field. It is proved that multiple crack created by the downhole microseismic monitoring, productivity also increased 38.1 % compared to the adjacent by oriented perforating and multiple crack fracturing, the characteristics of the reservoir has been analyzed

[**Key words**] oriented perforating; fractural diverting; multiple crack fracturing; discharge volume; increase in production