

Discussion on High Efficient Development Technology of Dense Glutenite Reservoirs

Xusheng Liang

Gas Production Branch Company of Daqing Oilfield Company Ltd., Petro China, Daqing Heilongjiang
Email: liangxusheng@petrochina.com.cn

Received: Aug. 30th, 2016; accepted: Dec. 7th, 2016; published: Apr. 15th, 2017

Abstract

There existed 2 problems during the development of glutenite reservoirs in Xushen Gas Field: the first was the big lateral change of reservoirs with reservoir density and poor physical property. The shut-in pressure was high, and production in the gas wells and the stabilized production capacity were low. The second was that the stimulation effect in the vertical and horizontal wells was not ideal in the glutenite reservoirs of Ying 4 Section after fracturing, and there existed the problems of difficult reconstruction of reservoirs caused by fractures blocking with glutenite debris and in the fracturing operation. Through technical research and development, the technology of productivity breakthrough and long-term stable production and high efficient matching techniques were established. By using the dual branch horizontal wells and optimization of BHA and well design trajectory, wall mounted suspension system design, the technologies of completion and open hole staged fracturing, chemical and mechanical plugging process are implemented for ensuring the branch hole sealing, borehole re-entry and staged fracturing requirements. The effective producing in reservoirs and high efficient development of gas fields are achieved.

Keywords

Tight Gas Reservoir, Dual Branch Horizontal Well, Staged Fracturing, Glutenite Reservoir, High Efficient Development

致密砂砾岩储层高效开采技术探讨

梁旭升

大庆油田有限责任公司采气分公司，黑龙江 大庆

作者简介：梁旭升(1983-)，男，工程师，长期从事气田开发与压裂增产技术工作。

Email: liangxusheng@petrochina.com.cn

收稿日期：2016年8月30日；录用日期：2016年12月7日；发布日期：2017年4月15日

摘要

徐深气田深层砂砾岩开发存在两个难题：一是由于储层横向变化大，储层致密、物性差，开采过程中出现关井压力高、气井产量低、稳产能力差等现象；二是营四段砂砾岩储层直井和水平井压后增产效果不理想，存在砾块碎落堵塞缝口，压裂施工困难，储层难以得到有效改造的问题。通过攻关形成产能突破和长期稳产工艺以及经济效益高的配套技术。开展双分支水平井开发，优化钻具组合和井眼轨迹设计、壁挂式悬挂系统设计，实施完井及裸眼分段压裂工艺，化学及机械暂堵工艺，保证了分支井眼接口密封、井眼重入、分段压裂的要求，成功实现了储层有效动用，实现了气田高效开发。

关键词

致密气藏，双分支水平井，分段压裂，砂砾岩储层，高效开发

Copyright © 2017 by author, Yangtze University and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 深层砾岩开发现状

采气分公司已在水平气井压裂完井方面取得了一定的认识及成果。从 2008 年开始，陆续部署了 21 口水平井。针对深层火山岩，已取得了一定经验与认识，已完成压裂试气的部分气井无阻流量达到 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 以上。但是针对砂砾岩储层，已勘探 10 年以上，一直未有突破。统计 10 余年不同井型(直井 39 口 + 水平井 5 口)营四段砂砾岩储层改造规模，对初期效果和长期稳产能力影响因素进行分析，效果较好的井增大改造规模，压后效果有增加趋势。因此，为了加快致密砂砾岩储层评价动用步伐，尝试采用双分支井完井配套大规模压裂工艺动用深层致密砂砾岩储层，提高单井产量。

2. 双分支水平井井身结构设计

为实现砂砾岩储层的有效动用，开展双分支水平井配套大规模压裂工艺。通过个性化的设计，实现发育多套薄差层的砾岩储层可进行上下分支大规模体积压裂、分层开采的分支水平井完井工艺，国内首次实现了四级双分支裸眼分段压裂完井，同时保证施工过程中的安全及储层保护工作。

2.1. 钻具组合和井眼轨迹设计

徐深平 32 井从井深 3420 m 开始用 $\varnothing 311.2$ mm 钻头造斜至井深 3691.00 m, 井斜角 36.32° , 方位角 334.50° , 平均机械钻速 0.85 m/h; 然后用 $\varnothing 215.9$ mm 钻头造斜至井深 3971.30 m 着陆, 平均机械钻速 1.26 m/h; 水平段用 $\varnothing 215.9$ mm 钻头钻至井深 4764.00 m 完钻, 平均机械钻速 1.18 m/h。

徐深平 34 井从井深 3257.11 m 开始用 $\varnothing 215.9$ mm 钻头造斜至井深 3657.00 m, 平均机械钻速 1.17 m/h; 水平段用 $\varnothing 152.4$ mm 钻头钻至井深 4586.00 m 完钻, 平均机械钻速 1.33 m/h。

以往钻头使用经验表明 PDC 钻头不适应营城组砂砾岩地层, 因此在芳深 6-平 1 井砂砾岩地层使用牙轮钻头试验。

2.1.1. 钻具组合情况

1) 以往水平气井造斜段钻具组合 徐深平 32 井、徐深平 34 井造斜段均采用螺杆 + MWD 的钻具组合, $\varnothing 215.9$ mm 钻头 $\times 0.24$ m + $\varnothing 172$ mm 螺杆 $\times 6.66$ m + $\varnothing 127$ mm 加重钻杆 $\times 9.16$ m + $\varnothing 172$ mm 浮阀 $\times 0.50$ m + $\varnothing 178$ mm 短钻铤 $\times 2.90$ m + $\varnothing 174$ mm 随钻测斜仪 $\times 10.31$ m + $\varnothing 127$ mm 加重钻杆 $\times 268.20$ m + $\varnothing 127$ mm 钻杆。

2) 水平段钻具组合 徐深平 32 井水平段采用螺杆 + 四参数无线随钻测量仪的钻具组合, $\varnothing 215.9$ mm 钻头 $\times 0.24$ m + $\varnothing 172$ mm 螺杆 $\times 7.86$ m + $\varnothing 127$ mm 无磁加重钻杆 $\times 9.25$ m + $\varnothing 172$ mm 阵列电阻率 $\times 5.9$ m + $\varnothing 174$ mm 随钻测斜仪 $\times 8.17$ m + $\varnothing 176$ mm 密度中子测量仪 $\times 6.04$ m + $\varnothing 127$ mm 钻杆 + $\varnothing 127$ mm 加重钻杆 $\times 275.12$ m + $\varnothing 127$ mm 钻杆。徐深平 34 井水平段采用螺杆 + 随钻测井仪的钻具组合, $\varnothing 152.40$ mm 钻头 $\times 0.19$ m + $\varnothing 146.00$ mm 减磨接头 $\times 2.40$ m + $\varnothing 120.00$ mm 阵列电阻率测量仪 $\times 5.97$ m + $\varnothing 127.00$ mm 浮阀 $\times 1.05$ m + $\varnothing 120.00$ mm 随钻测井仪 $\times 10.89$ m + $\varnothing 88.90$ mm 加重钻杆 $\times 349.71$ m + $\varnothing 88.90$ mm 钻杆。

徐深平 32 井、徐深平 34 井造斜段和水平段均采用螺杆定向, 随钻测斜仪或随钻测井仪监测井眼轨迹, 而在芳深 6-双平 1 井造斜段旋转导向定向施工, 水平段开展低速马达现场试验。

3) 芳深 6-平 1 井钻具组合 下分支起始造斜采用 Autotrak-Express, 该系统柔性较好, 造斜率较高, 同时该系统测量单元完全置于无磁抗压缩钻杆内部, 减少了对工具的磨损, 同时该系统的抗震性也较好。从第 1 趟钻的钻井实践看, 该工具造斜率可很轻松达到 $(6\sim 8^\circ)/30$ m, 为后面的顺利施工提供了保障。第 2 趟钻开始采用 ATK G3, 该系统在原有 Autotrak-Express 测量参数的基础上, 增加了电阻率、ECD、Gamma 成像的测量, 工程上实现了对井眼轨迹的精确控制, 同时 OTK 提供了较为全面的地质参数, 精准地反映了井下地质情况, 帮助地质人员更加精准的进行储层导向。第 5 趟钻采用了 OTK + Motor 的钻具组合进行钻进, 该马达耐温性能好, 抗温达 175°C , 该地层中含有砾岩, 故选用牙轮钻头, 采用高钻压低转速的钻井参数进行钻进。该马达在该井的钻井过程中取得了良好的效果。整个钻进过程中没有因为马达原因起钻。最后 4 趟钻仍然采用随钻测斜仪 + 伽马 + 马达的钻具组合, 顺利钻至设计井深。在预定时间内保质保量地完成下分支的钻井任务。

结合该井下分支的施工经验, 上分支起始造斜采用: PDC 钻头 + Navi 伽马 + 马达的钻具组合。 $\varnothing 9\frac{5}{8}$ in 套管开窗后下入该趟钻配合陀螺定向, 由于使用 PDC 钻头反扭矩不稳定造成马达工具面不稳, 受套管磁干扰的影响实时的马达工具面不可信, 决定起钻更换 Autotrak Express + 牙轮钻头的组合。根据地质数据, 第 4~6 趟钻开始采用 ATK G3, 该系统在原有 Autotrak Express 测量参数的基础上, 增加了电阻率、井底压力钻井液当量密度(ECD)、伽马成像的测量, 工程上实现了对井眼轨迹的精确控制, 同时 OTK 提供了较为全面的地质参数, 精准地反映了井下地质情况, 帮助地质人员更加精准地进行储层导向。上分

支开钻后，沿用了下分支钻进的经验，提高钻速。

通过钻具组合优化、钻头优选形成了造斜段旋转导向 + PDC 钻头，水平段高温低速马达 + 牙轮钻头组合钻井提速技术。通过优化，与以前相比提高了 139.7%。

2.1.2. 井眼轨迹的设计及控制

依据 2010 年重新处理解释的常规地震剖面，采用新解释的砂砾岩储层展布范围、地震属性、流体检测等分析成果，结合测井解释成果和区块地质动态认识综合确定水平井靶点及水平井轨迹，应用 Landmark、Geoframe 地震解释系统和 EPS 反演软件综合预测水平段靶点海拔深度；通过对资料的分析，实际钻井轨迹控制，该井水平段具有以下几方面特征：

- 1) 水平段处于营城组顶面较高部位，顶面海拔-3098 m，构造位置相对较高。
- 2) 沉积相上属于该区优势亚相——扇三角洲前缘亚相。
- 3) 过水平段地震反射特征相对有利，过设计井水平段营四段上部砂砾岩地震反射具有波形特征明显、同相轴连续性好、中振幅等特征；下部砂砾岩地震反射特征具有杂乱反射、同相轴连续性好，弱-中强振幅，能量相对较弱等特征。
- 4) 储层连续性较好，孔隙分布有利、裂缝较发育、含气性较好。从过设计井水平段的波阻抗反演剖面上看，设计水平段上下两段储层均较连续；从过设计水平段的孔隙度预测平面图上看，预测水平段上部砾岩孔隙度 4.0%~5.5%，下部砾岩孔隙度 3.5%~4.2%，较为有利；从过设计水平段的地震相干体和倾角属性切片来看，水平段处于裂缝相对发育带上；从过设计水平段的 AVO 含气预测平面图看，水平段上部砾岩和下部砾岩含气性均较好。
- 5) 预测水平段所处地带对应的上部砾岩砂体厚度分布范围为 21~28 m，下部砾岩砂体厚度分布范围为 50~64 m。
- 6) 靶点深度预测。在常规地震剖面上，对现有井的时深关系进行检查校正，得到较好的时深对应，然后，以地震叠加速度体、层位和井分层数据作为约束，利用井上时深关系，建立三维空间速度场[1]，将时间域的地震数据体和层位数据转换成深度域的地震数据体和层位数据，确定靶点海拔深度和对应的砾岩顶面海拔深度。应用 Landmark、Geoframe 从常规深度域地震体中读取的芳深 6-平 1 井入靶点海拔深度，并通过 EPS 反演数据形成的深度域平面图上读取水平井靶点海拔深度，误差值不超过 10 m (图 1)。

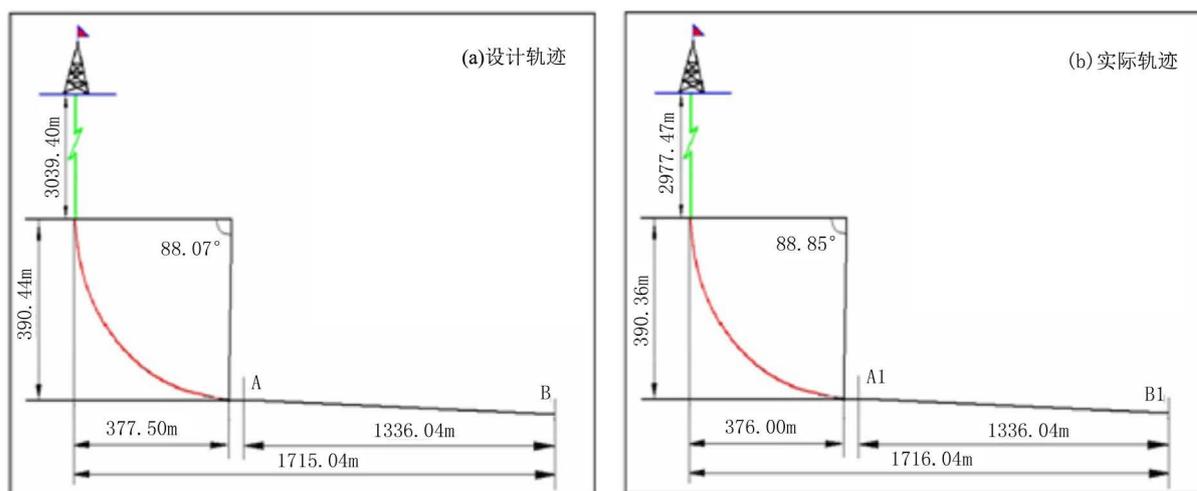


Figure 1. The schematic diagram of the upper and lower branches of Well Fangshen 6-Ping1

图 1. 芳深 6-平 1 井上、下分支井眼轨迹示意图

2.2. 壁挂式悬挂系统设计

造斜组合回收完毕后，下壁挂式悬挂器和导向弯管将固井尾管串导入上分支井眼。分支井眼导向器预先装好，上分支井眼压裂结束后回收。通过壁挂式悬挂器的设计，实现了接口处的机械支撑及任意井眼重入，满足后期各种作业需求。

壁挂式悬挂器是 4 级完井的核心工具，包含：上部和下部接头、丝扣、定位槽、导向槽和密封筒、本体、舌板、法兰、窗口作为套管开窗的接口并为窗口提供机械支撑。还有分支井眼导向器，主井眼导向器等工具(图 2)，其特点和功能如下：

1) 斜向器 用于造斜定位，进行侧钻开窗。其特点：①超过 6000 成功井次；②切割金属，而不是研磨金属；③不会形成鸟窝式的铁屑；④一趟下入，开窗和修整窗口；⑤窗口更干净，圆滑；⑥可回收。

2) 分支井眼导向器 与壁挂式悬挂器配合，实现可重入。其特点：①封闭主井眼，使其他工具可再次进入分支井眼，简单可靠，8900 N 插入、53400 N 起出；②导向器提供弯曲的刚性的套筒穿过主井窗口；③通过壁挂式悬挂器，提供窗口完整的机械密封；④封闭主井眼可再进入分支井眼，插入和起出导向器简单可靠。

3) 主井眼导向器 与壁挂式悬挂器配合，实现可重入。其特点：封闭分支井眼，可再进入主井眼。简单可靠，8900 N 插入、53400 N 起出。

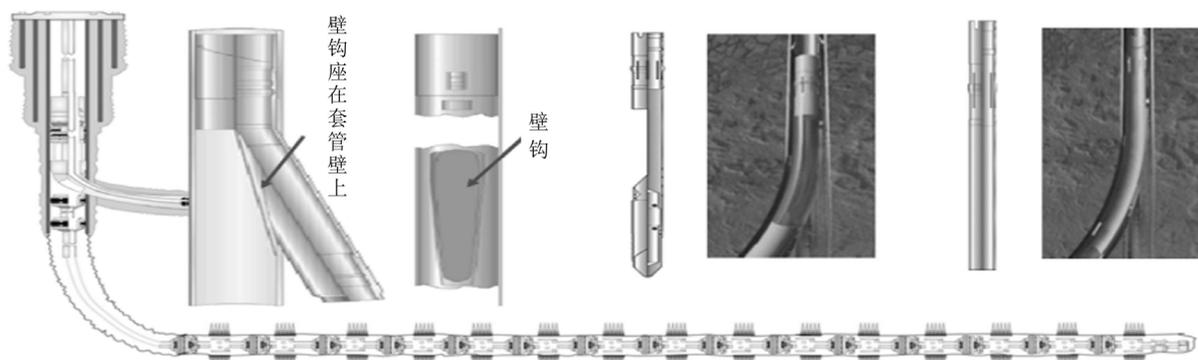


Figure 2. The working principle diagram of guide devices in the main borehole and branch hole

图 2. 主井眼导向器和分支井眼导向器工作原理图

2.3. 完井及裸眼分段压裂工艺

早期制定方案时，考虑过采用精细水泥的方式来满足窗口的密封，但是受工艺的限制，仅能承压 10 MPa 左右，无法满足施工需求。因此需要提高开窗点密封，解决开窗点密封问题主要有以下两个途径：一是提高固井质量；二是在套管上加一个遇水膨胀封隔器。另外在开窗点的选择上要注意：选择固井质量好的层位、避开套管接箍、地层稳定和避开水层。

后期采用管外封隔器的方案，但是该工艺存在等待时间长，水平段过长固井质量无法保证等问题，最重要的是窗口处仍然未实现真正意义上的密封。经过多次方案对比，采取造斜段固井，然后后期钻井可重入的方式来实现窗口的密封，并创新了固井工艺(图 3)。

- 1) 预置分支井眼导向器、内嵌尾管胶塞，保证接口处固井工艺的实施。
- 2) 导向器、回接筒和暂堵工具采取固井防护措施，保证导向器的取出及压裂和生产完井工具的重入。
- 3) 尾管悬挂器和顶部固井封隔器提高完井工具悬挂和密封的可靠性，满足安全投产要求。

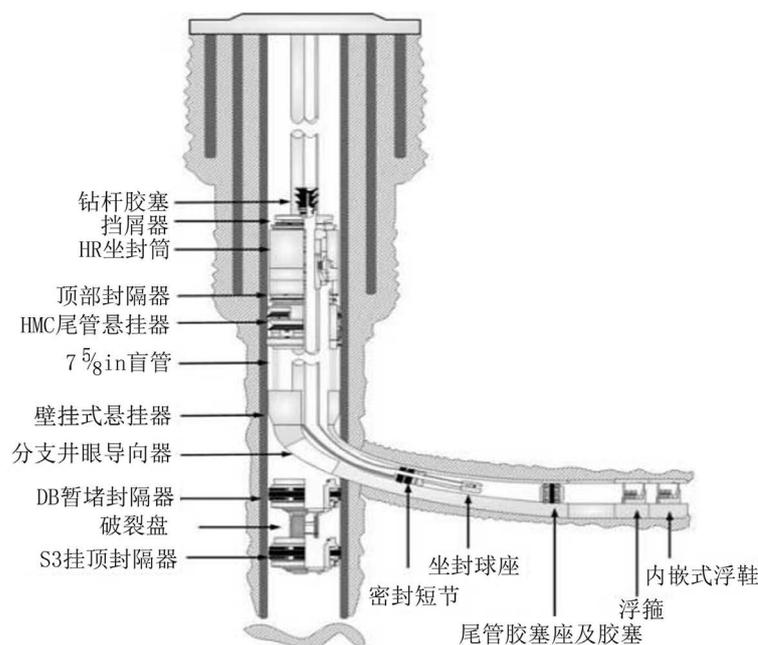


Figure 3. The structure of the upper branch window structure
图 3. 上分支开窗结构处井身结构图

2.4. 化学及机械暂堵工艺

1) 采用 PERFFLOW 暂堵液，有效保护储层的同时节省常规完井液 500 m³。针对气井大规模压裂后压井液漏失严重，导致储层二次污染的问题，在该井应用了 PERFFLOW 屏蔽暂堵技术。主要原理是压井过程中在裂缝或储层的表面形成一道渗透率极低的暂堵层，有效降低压井液的漏失，同时具有返排容易的特点。

2) 设计 DB 暂堵封隔器 + 破裂盘，暂堵下分支井眼，保证上分支完井压裂工艺的顺利实施；上分支设计并应用了压井球座：实现不压储层更换上分支压裂管柱，避免储层污染。下分支压裂试气施工结束后，在储层上部入 DB 暂堵封隔器 + 破裂盘，该破裂盘中心是陶瓷结构，实现下分支井眼的有效封堵，为上分支钻井工作提供了安全可靠的保证。在上分支完成压裂试气后，进行生产完井时利用钢丝作业的方式打碎破裂盘，实现下分支的开采。同时在上分支造斜段 3400 m 处，安装了压井球座。上分支试气结束后，投入配套球，上部灌注高密度压井液，实现下部储层的暂堵，起出压裂管柱，更换为生产完井管柱。

2.5. 生产管柱采用三重密封保护

1) 三重密封保护即为井下安全阀、生产封隔器和两道插入密封最大程度保证管柱安全可靠。为了保证后期生产的安全可靠，根据中国石油天然气股份公司勘探与生产分公司《高温高压及高含硫井完整性指南》要求，生产完井具备两道密封。为此，该井在 $\varnothing 9\frac{1}{2}$ in 套管设计应用了完井封隔器、 $\varnothing 7$ in 套管设计了插入密封，同时，加装了井下安全阀，紧急时刻实现自动关闭，保证安全。

2) 选择性合采或分采。通过开关滑套和投堵塞器，实现气井分合采。在上下分支之间，安装了坐落短节装置；在坐落短节上部，设计并应用了开关滑套装置。坐落短节处投入堵塞器，打开滑套时，实现上分支的单独生产；关闭滑套，捞出堵塞器，实现下分支的单独生产；打开滑套、捞出堵塞器，实现两分支合采。通过分、合采，实现气藏精细开发。

3. 储层改造优化及现场实施效果

目前大庆油田深层致密砂砾岩探明储量一直没有实现有效动用。营四段砂砾岩储层具有 3 个压裂难点：一是以往营四段砂砾岩储层直井和水平井压后增产效果不理想[2]，常规水平井压裂动用储量范围有限，尚无有效提高产能的开发方式。二是储层致密、横向变化快，层之间垂向距离较近，砂体平面分布较大但与断层较近，压裂设计难度大。三是微孔和粒间缝发育，裂缝易发生转向，转角处缝偏窄，加砂难度大[3]。

针对以上 3 个压裂改造难点，自主攻关形成了致密砂砾岩分支水平井优化设计方法及现场诊断、控制工艺，实现了不同层与储层物性匹配、水平井筒与断层匹配、人工裂缝上下匹配等个性化设计，形成了微孔和粒间缝发育的致密砂砾岩储层现场诊断及控制工艺技术。

通过对致密孔隙和粒间缝洞型砂砾岩大规模体积压裂方案的优化，建立了对应施工参数优化设计方法和现场诊断及控制技术，实现了营四段砂砾岩双分支井“立体式”改造。

1) 结合实钻岩性、物性变化和平面砂体预测，上下分支个性化设计实现“三个匹配”(裂缝分布与砂体匹配、人工裂缝与构造匹配、施工参数与物性匹配)，追求改造体积最大化为目标，合理优化压裂段数和改造规模。经过模拟，下分支最佳压裂段数为 15~16 段，上分支最佳压裂段数为 12~13 段。

2) 上下分支均要实现大规模体积压裂，为提高裂缝效率，降低成本，研究了立体交错式布缝的设计方法，防止上下分支裂缝窜通，确保储层得到充分体积改造。

3) 通过对比下分支与砂砾岩水平井的压裂控制砂体范围(表 1)，发现芳深 6-平 1 井下分支控制的砂体范围大于常规砂砾岩水平井 1.4 倍以上。针对下分支致密孔隙型砂砾岩储层，以扩大裂缝接触面积为目标，形成了以高密度布缝、大规模加砂为主的体积压裂设计方法。与该区块以往施工的气井相比，压裂段数增加了 4~5 倍、单段砂量提高 11.1%、单段液量提高 73.5%。根据构造和物性优化加砂程序、前置液比例等施工参数，保证压后效果长期有效，大幅度增大了砂体改造范围，实现了储层的有效动用。

Table 1. The comparative data between the lower branch and glutenite horizontal well

表 1. 下分支与砂砾岩水平井对比数据

井名	储层厚度/m	水平段长度/m	砂砾岩长度/m	压裂控制砂体范围/(km ² ·m)
徐深平 32 井	80.0	800	786.0	38.40
徐深平 34 井	45.0	843	782.0	22.76
徐深 6-C211	100.0	427	427.0	25.62
芳深 6-平 1 井下分支	107.1	1340	830.8	55.20

4) 从储层物性上分析，上分支比下分支水平段砂体连续(上下分支有效储层钻遇率分别为 87.1%和 62%)，同时上分支伽马和密度值相对低，反映上分支物性比下分支好。因此针对上分支粒间缝洞型砂砾岩储层，以有效沟通微孔和粒间缝、实现节点处长期有效支撑为目标，合理优化砂比，提高有效压裂改造体积。上分支采用高前置液比例、低砂比、多段塞加砂模式，实现转角节点处长期有效支撑，实现了上分支的有效压裂改造，无阻流量达到了 $68.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (表 2)，成功实现了致密砂砾岩大规模立体式改造。

Table 2. The statistics of the scale and effect of fracturing in double branch wells

表 2. 双分支井压裂规模及效果统计表

类别	压裂段数	砂量/m ³	实液量/m ³	压后无阻流量/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)
下分支	15	739.5	9764	37.21
上分支	9	254.0	7000	68.30
合计	24	993.5	16764	105.51

4. 结论及建议

1) 首次成功实施了分支水平井分支井眼接口施工, 该工序包括打捞主井眼斜向器、固井管串导入上分支井眼、壁挂式悬挂器坐挂到分支井眼窗口及上分支造斜段井眼固井施工等, 整个施工过程涉及下井工具 20 余种, 实现了连续施工, 工艺成功率 100%。

2) 通过钻井提速配套技术、增产改造技术及有效动用发育多套储层的分支井完井工艺, 单分支缩短钻井周期 30 d 以上, 压后试气产量 $105 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 取得了致密砂砾岩储层产量突破。

3) 完井管柱具备三重密封保护, 满足股份公司标准要求, 能够实现分合采的目的。

4) 通过芳深 6-平 1 井的成功实施, 建立了针对发育多套薄差储层致密气藏优选动用的开发模式, 为深层致密难采天然气储量的有效动用探索出有效途径。

基金项目

中国石油天然气股份公司科技攻关项目(2011B-1506)。

参考文献 (References)

- [1] 张绍槐. 多分支井钻井完井技术新进展[J]. 石油钻采工艺, 2001, 23(2): 1-3.
- [2] 谢朝阳, 冯程滨, 谢建华. 大庆油田水平井分流压裂技术[J]. 油田化学, 2007, 24(4): 310-315.
- [3] 王培义, 李宗田, 季龙华. 水平井压裂裂缝形成机理初探与应用[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2008, 30(1): 148-150.

[编辑] 帅群

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: jogt@hanspub.org