

国内低渗透油气田高效开发钻完井 关键技术的发展现状

唐波 唐志军 耿应春 唐洪林

中国石化胜利石油管理局钻井工艺研究院

唐波等.国内低渗透油气田高效开发钻完井关键技术发展现状.天然气工业,2013,33(2):65-70.

摘要 在我国剩余石油储量、探明天然气地质储量中,低渗透油气资源已成为主要勘探开发对象,高效钻完井成为最大限度获得经济效益的关键。为此,国内经过技术攻关试验,在钻完井关键技术方面取得了重要进展,形成了以下技术方法:①低渗透油气藏复杂结构井适应性评价方法、复杂结构井优化设计及产能评价技术和井身结构与井眼轨迹优化设计技术;②以五级分支井、径向钻孔、鱼骨状分支井等技术为核心的提高泄流面积钻井技术已进入现场应用阶段;③研制的以新型防水锁无黏土钻井液、防漏堵漏钻井液、新型生物完井液等为核心的钻完井液取得明显储层效果。但以提高完善程度为目的的水平井分段完井技术受制于完井装置、产品、工具缺乏,整体水平与国外相比尚有一定差距,目前仅形成了“免钻塞筛管顶部注水泥技术、水平井酸洗胀封一体化技术”水平井筛管分段完井核心技术。

关键词 中国 低渗透油气田 钻井 完井 优化设计 泄流面积 储层保护 现状 差距

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2013.02.014

Drilling and completion technologies for efficient exploitation of low-permeability oil & gas fields in China: A state-of-the-art review

Tang Bo, Tang Zhijun, Geng Yingchun, Tang Honglin

(Drilling Technology Research Institute of Sinopec Shengli Petroleum Administration, Dongying, Shandong 257017, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 33, ISSUE 2, pp.65-70, 2/25/2013. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Among the residual oil reserves and proved natural gas geological reserves, low-permeability hydrocarbon reserves have become the main target for exploration and development of fossil fuels in China. But if expecting the maximum economic benefit from that, operators will mostly depend on efficient drilling and completion. In view of this, through technical research and pilot tests, an outstanding progress has been made in the following drilling and completion technologies and methods: (1) an evaluation method for the adaptability of complex structured wells in low-permeability oil and gas reservoirs, complex structured well optimization and productivity evaluation technologies, and optimization technologies of wellbore structure and well track; (2) the drilling technology in improving the discharge area, which focuses on such techniques as level-5 multilateral wells, radial drilling, and herringbone wells, has been applied on site; and (3) the newly developed drilling and completion fluids like new water-blocking clay-free drilling fluid, lost circulation controlling fluid, and plugging drilling fluid, and new biological completion fluid, with which an obvious result has been obtained in reservoir protection. However, for lack of enough good completion devices, products and tools, the segregated horizontal well completion technology falls far behind foreign technologies in respect of improving perfection degree, so up till now, such key technologies have just been developed including plug-drilling-free screen top cementing, acid cleaning, and swell packing integration.

Key words: China, low-permeability oil & gas fields, drilling, completion, optimization design, discharge area, reservoir protection

基金项目: 国家科技重大专项“低渗透油气田高效开发钻井技术”(编号:2011ZX05022)。

作者简介: 唐波, 1973年生, 高级工程师, 博士; 主要从事钻井工艺、钻井力学等研究工作。地址: (257017) 山东省东营市北一路827号。电话: (0546) 8554131。E-mail: tangbo052.slyt@sinopec.com

在我国剩余石油储量、探明天然气地质储量中,低渗透油气资源量大于 50%,低渗透油气产能建设规模占其总量的 70%,低渗透油气资源已成为主要勘探开发对象。尽管我国低渗透油气藏的储量巨大、资源丰富,但总体来说开发效果并不理想,国外大公司低渗透油气田的采收率平均为 35.8%,国内低渗透油气田的平均采收率仅为 23.3%,比国外低 12.5%。我国低渗透油气田之所以动用程度差、采收率低,主要是由于我国低渗透油气藏普遍埋藏较深、地质条件复杂、开发难度较大,存在多项开发矛盾和问题,影响了开发效果。

低渗透油气藏的经济开发及钻井技术存在 5 个方面技术难点:①缺乏配套的储层描述和优化设计技术;②钻井技术手段相对单一,制约了整体开发效果;③井眼轨迹控制和有效钻穿储层难度大;④储层孔喉细小,压敏、水敏强,储层保护难度大;⑤完井方式单一,缺乏完井整体优化设计技术及完井系列。

国内外针对低渗透油气藏提高采收率技术进行了大量的探索和实践,但研究程度远远落后于中高渗透砂岩油气藏,主要集中在对低渗透油气藏基本地质特征的描述、增加产能和提高开发效率等基础研究方面,以及在低渗透油气田的钻井优化设计技术、增加泄流面积技术、储层保护技术及完井技术等高效开发技术方面还不成熟,急需完善配套,制约了低压低渗透油气藏的经济有效开发。

1 钻井优化设计技术

在国外,低渗透油气藏埋藏深、地应力和裂缝分布复杂、存在启动压力梯度、岩性剖面和压力剖面预测技术不成熟,致使产能预测和钻井设计难度大。如何高效开发低渗透油气藏,尤其是在复杂结构井适应性评价技术、地质优化设计及产能预测技术、井身结构与井眼轨道优化技术等方面,已经做了大量的研究工作,形成了低渗透油气藏钻井优化设计技术。

在国内,针对低渗透油气藏基本地质特征的描述、增加产能和保护储层等方面的研究比较多,重点开展了考虑低渗透油藏特征的地质优化设计和钻井优化设计相关技术的研究^[1-2]。合理高效的复杂结构井优化设计能够最大程度控制储量、增大采出量、控制投资、降低风险,实现经济效益最大化^[3-6]。针对胜利油田低渗透砂岩油藏、四川西部和鄂尔多斯大牛地低渗透致密气区等试验区块的地质特点,开展了复杂结构井适应性评价方法、产能预测技术、地质优化设计和井身结构与井眼轨道优化设计技术研究,为开发(调整)方案的确定、井型的选择、井位和定向井轨道的优化设计、

钻井方式以及钻井液流体类型的优选提供基础依据。

现已初步形成低渗透油气藏复杂结构井适应性评价方法、复杂结构井优化设计及产能评价技术和井身结构与井眼轨迹优化设计技术等 3 项配套技术,在低渗透油气藏压裂水平井地质优化设计、地层孔隙压力预测方法和三维空间多点约束条件下的轨道优化设计技术获得突破进展。同时,建立了低渗透油气藏复杂结构井筛选规范和地质优化设计规范。研发了具有自主知识产权的低渗透油气藏钻井优化设计配套软件。在胜利油田低渗透砂岩油藏、四川西部和鄂尔多斯大牛地气区的 13 个低渗透区块共设计 41 口复杂结构井,实施 28 口,覆盖低渗透油、气藏地质储量 $1\,300 \times 10^4 \text{ t}$ 和 $2\,800 \times 10^8 \text{ m}^3$,产量达到同类油气藏中直井的 2~5 倍,实现了低渗透储量的有效动用和高效开发。

2 增加泄流面积钻井技术

2.1 高级别分支井钻井技术

自 20 世纪 90 年代始,国外一些公司开始致力于分支井钻井技术的研究,相继开发出系列分支井下专用工具^[5]。最具代表性的是 Baker Hughes 和 Schlumberger 的分支井技术,已经发展到六级完井水平^[6]。

国内辽河油田、胜利油田等开展了分支井技术的研究并完成了多口井的现场试验。近年来也开展了五级分支井系统研制和现场应用,成功研制了具有完整机械支撑、液力密封和选择性再进入功能的五级分支井眼系统,形成了高级别分支井钻完井工艺技术规程。在胜利油田的坨 142-支平 1 井进行了五级分支井的现场试验,验证了高级别分支井技术方案的可行性,同时也验证了研制的五级分支井系统和开窗系统能够满足分支井现场应用的需要。河 3-支平 1 井悬挂封隔器回接密封短节压力验封成功,标志国内陆上第一口达到国际五级完井水平的分支水平井诞生,该井第一分支完井深 2 489 m,垂深 2 116.21 m,水平位移 472.26 m;第二分支完井深 2 400 m,垂深 2 067.80 m,水平位移 476.77 m。实现了分支井眼连接处机械支撑的完整性、液力密封性能和井眼的选择性再进入功能,为低渗透油气田高效开发提供了技术支持。

2.2 径向水平井钻井技术

目前钻井工程推出了用水力方法钻超短半径水平井技术,YPF S.A 公司采用 $\varnothing 19.05 \text{ mm}$ 磨铣钻头在套管上钻孔,起出钻头后再下入 $\varnothing 12.7 \text{ mm}$ 连续管喷射进入地层,应用的最大井深达到了 3 800 m,每个层位 90° 相位钻出了 4 个分支井眼,最大分支井眼长度达 100 m、孔径约 50 mm,该技术在阿根廷实施了 22 口

井,增产效果非常显著。

在国内,利用水力方法钻超短半径水平井技术在辽河、吉林、江苏、南阳等油田施工了近10口井,水平进入地层只达到20 m。近年来,针对该项技术开展了大量的研究,成功研发了一种包括转向器、柔性轴、磨铣钻头等零部件的新型径向钻孔深穿透装置,研制了适用于磨料射流和清水射流破岩的新型高效喷嘴;开展了地面联机试验,验证了该装置的可行性。在胜利油田金17-1井进行了径向水平井眼的现场应用,分别在井深864.8 m和861.5 m的2个层位钻出了1个孔深20 m和3个孔深50 m的水平井眼,为我国低渗透油气田高效开发提供了新的钻井技术。

2.3 鱼骨状分支井钻井技术

鱼骨状分支井钻井技术是一种利用分支井钻井技术提高稠油油井、致密低渗透油井单井采收率的钻井新技术,该技术可以根据油藏条件设计井眼并进行井眼的空间分布,以有效增加油层的裸露面积,提高油层的开采动用程度,最终达到提高采收率的目的,它与采用射孔完井和水力压裂增产的常规直井相比具有不可替代的优越性。国外油气开发商大力开展了相关钻探技术的研究攻关,美国及西方国家的分支井技术在20世纪90年代得到了迅速发展,其鱼骨状分支井设计技术、钻井工艺技术、完井及采油配套技术,相关配套工具、仪器的水平日臻完善,鱼骨状分支井储层累计进尺超过12 000 m。

近几年,鱼骨状分支井在国内部分油气田得到了较大范围的应用,如南海西部、冀东、渤海、大港、辽河、胜利等油气田分别进行了鱼骨状分支井的现场试验,形成了包括工程设计、井眼轨迹控制、储层保护液的鱼骨状分支井钻井配套技术。胜利油田已实施了10口井,累计产油 24×10^4 t、累计产气 $2\,693 \times 10^4$ m³,实现在低渗透区块利用鱼骨状水平井开发低渗透油气藏的重大突破,埕北326A-支平1井创造了中国石化鱼骨状分支井垂深最深(3 356.10 m)的纪录。

2.4 随钻测量技术

为了满足特殊钻井施工的需要,国外各大公司相继开发出了可进行高温高压条件下的随钻测量仪器,最高可在175 ℃的高温环境下可靠地测量定向参数,耐压高达150 MPa^[7]。近年来,国内研制了适应深层高温井钻探的抗高温高压MWD无线随钻测量仪器,其工作温度可达150 ℃,耐压可达150 MPa,填补了国内空白,并完成了新疆、四川地区等多口高温井的应用,其中新疆TP7-2CH井的定向施工作业,创下了国产MWD仪器应用最高温度148 ℃的纪录,其测量精

度与国外同类产品相当。

为保证在薄油层或有复杂褶皱、断层的油藏中井眼轨迹控制精度,国外已采用近钻头方位伽马测量技术,把井斜传感器和伽马传感器集成在钻头附近,实时得到近钻头处的地质和工程信息,指导调整井眼轨迹,保持在油藏最佳位置。近年来,国内也开展了具有自主知识产权的近钻头方位伽马测量仪系统研制,提出了旋转聚焦多扇区方位伽马测量方法^[8],将伽马传感器安装在钻铤侧面的槽中,并进行金属屏蔽层,具有方位特性,不但能够实时测量地层岩性,还能够分辨上下岩性界面特征,有效发现储层的上部盖层,捕捉进入储层的最佳时机。研制出了近钻头井斜及方位伽马仪,距钻头距离0.8 m,通过坨128-斜92、盐16-斜19井等4口井试验应用表明:该系统实现了近钻头井斜、伽马值的测量,实现了与MWD仪器的挂接,成功的将近钻头数据实时传送到地面,其测量精度与国外同类产品相当。

随着欠平衡钻井技术在低渗透油气藏开发中的应用,电磁波MWD技术也得到发展,国外已形成了较为成熟的电磁波MWD随钻测量技术,在国内2008年年底中国石化德州石油钻井研究所研制的电磁波随钻测量系统(EM-MWD)工程样机在鄂北大牛地气田D66-55井进行了现场试验并获得成功,电磁波传输深度达到了2 715 m。胜利石油管理局钻井工艺研究院也研制出电磁波随钻测量系统,并通过在胜利油田河68-斜更1井、孤东7-38-5135井等3口井的整机现场试验及应用,应用结果表明:井下仪器结构设计合理可靠,各组成部分能适应实际钻井要求;地面接收机与钻台显示器数据正常,稳定可靠,整机能适应实际钻井要求,应用垂深达到2 700 m(地层电阻率5~300 Ω·m),并与进口E-link仪器对比表明二者传输性能基本相当,电磁波MWD达到进口仪器的技术指标。

3 储层保护技术

3.1 钻完井液技术

国外早在20世纪30年代,就开始对油气层损害的机理进行了研究攻关,在此期间机理性、智能性分析、预测、评价技术以及钻井、完井、采油各个作业环节中的油层保护工作都得到了突飞猛进的发展;近年来在打开产层钻井液的开发应用方面加大投入,并取得可喜的成果,推出了甲酸盐钻井液、MMH/碳酸钙钻井液、颗粒碳酸钙/聚合物钻井液、超低渗透钻井液、全油钻井液、可循环泡沫(Trans-Foam)等^[9-14]。

国内对储层损害问题的研究起步较晚,但近年来

发展较快。特别是在“十一五”期间,国内针对低渗透油气藏开展了大量的储层伤害评价及保护技术研究。研制了伤害评价装置,能够满足渗透率低至 0.1 mD 条件下岩心流动测试;研究了低渗透砂岩储层伤害机理,确定了其水相圈闭是其主要伤害因素;明确控制致密砂岩气层水相圈闭损害控制因素,形成综合考虑工程地质参数评价相圈闭损害潜力的相圈闭损害系数法,建立毛细管自吸与液相滞留的水相圈闭损害评价方法,评价方法稳定可靠,平行误差不超过 2%;改进毛细管自吸评价仪与加载岩石微观图像分析系统,形成岩心观察、薄片分析、岩心造缝模拟应力实验法、加载裂缝图像分析、有限元模拟及井漏资料等研究工区裂缝动、静宽度,指出在正压差下,原地裂缝宽度可达 5 mm;研制出新型防水锁无黏土钻井液和新型生物完井液、新型高效抗油泡沫钻井液体系、有机盐可降解钻井完井液体系及毫米级裂缝储层保护剂系列等钻井完井液体系,在鄂尔多斯区块和胜利油田多个低渗透储层应用,并获得明显成效。

3.2 全过程欠平衡钻井技术

全过程欠平衡钻井技术是欠平衡钻井技术的完善和发展。目前国内外一般采用强行起下钻法和井下隔离法等 2 种方式实现全过程欠平衡钻井。强行起下钻技术出现较早,上世纪 20 年代,国外首先利用强行起下钻装置进行修井作业。开始是简单的机械式的,主要用于修井作业。到八九十年代,为保证欠平衡钻井钻具的顺利起下,该装置用于钻井。目前,利用强行起下钻装置进行钻井业务的国外公司有 High Arctic Well Control Inc.、Snubco Pressure Control Ltd.、Weatherford 等。这些公司都有利用强行起下钻装置进行欠平衡钻井的案例,但由于其设备庞大、复杂,需要的技术服务人员多,起下钻动作慢,占用钻机时间长等缺点,用于欠平衡钻井相对较少。

近年来,国内针对储层保护的欠平衡钻井开展了大量的研究,形成了一套适合低渗储层的欠平衡钻井方式筛选方法、欠平衡钻井设计、欠平衡钻井工艺、欠平衡钻井井控工艺、欠平衡作业窗口边界的确定原则、不压井起下管柱工艺等全过程欠平衡钻井配套技术,并研制成功了具有自主知识产权的全过程欠平衡钻井关键设备、不压井起下生产管柱用的旋转防喷导流系统、整套井下隔离系统及不压井作业的系列工具。在胜利油田和鄂尔多斯盆地大牛地气田,应用了液体、充气和泡沫等全过程欠平衡钻井技术,证明了气藏天然产能情况。

4 完井技术

为了最大限度地开发油气资源,近年来国外完井技术不断发展,相继研发了多种先进的完井技术、工具及仪器。在水平井分段压裂方面,哈里伯顿、贝克休斯、斯伦贝谢等公司处于该领域的前列,哈里伯顿多级压裂系统采用滑套技术和遇油膨胀封隔器结合,通过投球开启滑套,进行逐级压裂。贝克休斯 Frac-Point 多级压裂系统能实现压裂作业井段横向分段隔离及全井段完全压裂作业。在水平井防水控水方面,先后涌现 InCharge 智能完井系统、Smartwell 完井系统等,在水平井防水控水方面起到了积极作用。在水平井固井方面,斯伦贝谢公司研发出了低失水防窜性能优良的胶乳水泥体系,加拿大研制开发出了一种自愈合水泥材料。套管刚性旋流扶正器技术、套管漂浮技术、旋转尾管悬挂器技术则是固井工具的发展重点^[15-17]。

国内低渗透油气藏完井技术仍是一个比较薄弱的环节,整体水平与国外相比还有较大差距。但近年来也取得长足的发展,建立了低渗透油藏水平井完井模拟装置和室内定量评价技术,形成了构造—岩性低渗透油气藏水平井完井优化设计技术。采用衬管(管外封隔器)+盲管组合投产以均衡生产剖面延缓底水锥进,采用射孔完井+分段压裂以提高单井产能,研发了多种高性能水平井完井工具。高强管外封隔器性能参数超越国内同类产品接近国际先进水平,遇油遇水膨胀式封隔器实现了在胜利油田的首次现场应用,新型可固化材料有效提升了可固化介质充填管外封隔器的工作性能。形成了“免钻塞筛管顶部注水泥技术、水平井酸洗封一体化技术”为特色的水平井筛管分段完井核心技术,现场试验约 50 井次,成功率 100%。自主开发出塑性胶乳水泥浆体系,具有敏感性低、抗污染能力及稳定性高、防窜能力强、滤失量低等优点,水泥石具有塑性特性、弹性模量降低、抗折强度及抗冲击韧性高等特性,满足低渗透油气藏水平井固井要求,为后期酸化压裂增产增效措施的顺利实施提供保障。建立了低渗透油气藏水平井固井顶替效率模拟装置和实验评价方法,自主开发了旋转尾管悬挂器、液压式套管扶正器等固井工具,形成了提高低渗透油气藏水平井固井顶替效率配套技术。

5 结论及建议

通过近年来的研究,我国在低渗透油气田高效开发钻完井技术取得如下技术进展。

1) 针对低渗透油气藏储量难动用、“低孔、低渗、低

产”的地质特征,形成了低渗透油气藏水平井优化设计方法,逐渐成为低渗透油气藏“低中找高、贫中找富、难中找易”的技术策略。

2)形成的以五级分支井、径向钻孔、鱼骨状分支井等技术为核心的提高泄流面积钻井技术,为低渗透油气田“稀井高产”提供了一种有效的技术手段。

3)通过储层伤害评价,提高了低渗透油气藏储层伤害特征的认识,形成了以新型防水锁无黏土钻井液、防漏堵漏钻井液、新型生物完井液、有机盐可降解钻井完井液等为核心的储层保护技术,为低渗透油气藏高效开发提供了保障。

4)针对不同类型低渗透油气藏,研制了高强管外封隔器、顶替效率模拟装置、塑性胶乳水泥浆等完井装置、产品、工具,形成了以提高完善程度为目的的水平井分段完井及固井技术,为提高水平井技术的开发效果提供了有力支持。

但仍存在一些技术难点,主要表现在:复杂结构井地质优化设计亟待规范化,产能预测方法需进一步完善,基于地应力的井眼轨道设计需深入研究,旋转导向钻井系统稳定性、近钻头旋转聚焦伽马测量技术、电磁波 MWD 测量传输深度等有待突破,钻完井液体体系的保护效果有待提高,控压钻井技术、微流量地面控制系统尚未形成配套,水平井防水控水井筒控制技术缺乏,水平井固井长效封固效果差,自主核心完井工具缺乏等,需进一步加大攻关力度,突破关键技术瓶颈,实现经济有效提升我国低渗储量动用水平的目的。

参 考 文 献

- [1] 韩国庆,吴晓东,陈昊,等.多层非均质油藏双分支井产能影响因素分析[J].石油大学学报:自然科学版,2004,28(4):81-85.
HAN Guoqing, WU Xiaodong, CHEN Hao, et al. Influence factors for production of dual-lateral well in multilayer heterogeneous reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 2004, 28(4): 81-85.
- [2] 刘想平,张兆顺,崔桂香,等.鱼骨型多分支井向井流动态关系[J].石油学报,2000,21(6):57-60.
LIU Xiangping, ZHANG Zhaoshun, CUI Guixiang, et al. Inflow performance relationship of a herringbone multilateral well[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(6): 57-60.
- [3] 郭永峰,金晓剑.地层压力精确预测准则及其应用[J].石油钻探技术,2004,32(2):15-17.
Guo Yongfeng, Jin Xiaojian. Rules for predicting formation pressures accurately and its applications [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2004, 32(2): 15-17.
- [4] 艾池,冯福平,李洪伟.地层压力预测技术现状及发展趋势[J].石油地质与工程,2007,21(6):71-76.
AI Chi, FENG Fuping, LI Hongwei. Prediction technology status of formation pressure and its development trend[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2007, 21(6): 71-76.
- [5] 张绍槐.多分支井钻井完井技术新进展[J].石油钻采工艺,2002,23(2):1-4.
ZHANG Shaohuai. New development on multilateral drilling and completion technologies[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2002, 23(2): 1-4.
- [6] OBERKIRCHER J. Multilateral technology as a creative reservoir development strategy for new and mature fields alike[C]// paper 77826 presented at the SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, 8-10 October 2002, Melbourne, Australia. New York: SPE, 2002.
- [7] 秦永元,张洪钹,汪叔华.随钻测量技术及原理[M].东营:石油大学出版社,1998:1-10.
QIN Yongyuan, ZHANG Hongyue, WANG Shuhua. Technology and principle of measurement while drilling [M]. Dongying, Shandong: China University of Petroleum Press, 1998: 1-10.
- [8] 李建勋,王睿,柯熙政,等.随钻测量系统脉冲信号特征提取的多尺度方法[J].钻采工艺,2008,31(1):25-30.
LI Jianxun, WANG Rui, KE Xizheng, et al. Feature extraction for mud pulse of MWD system based on multi-scale method[J]. Drilling & Production Technology, 2008, 31(1): 25-30.
- [9] FITZ D E, PASSEY Q R, YIN H, et al. Overview of high angle / horizontal well formation evaluation issues, learnings and future directions [C]// paper 2005-A presented at the SPWLA 46th Annual Logging Symposium, 26-29 June 2005. New York: Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts, 2005.
- [10] 罗平亚,康毅力,孟英峰.我国储层保护技术实现跨越式发展[J].天然气工业,2006,26(1):84-87.
LUO Pingya, KANG Yili, MENG Yingfeng. China's reservoir protection technologies develop in leaps[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(1): 84-87.
- [11] 王永恒,康毅力,陈一健,等.水平井钻井完井液损害实验评价技术新进展[J].钻井液与完井液,2006,23(1):72-75.
WANG Yongheng, KANG Yili, CHEN Yijian, et al. New advances on damage evaluation technology for drilling and completion fluids in horizontal wells [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2006, 23(1): 72-75.
- [12] KANG Yili, YOU Lijun, XU Xinghua, et al. Practices of formation damage control for deep fractured tight gas reservoir in western Sichuan Basin [C]// paper 131323 presented at the International Oil and Gas Conference and Exhibition in China, 8-10 June 2010, Beijing, China. New York: SPE, 2010.
- [13] 刘洪,刘向君,孙万里,等.水平井眼轨迹对气井出砂趋势

及工作制度的影响[J].天然气工业,2006,26(12):103-105.

LIU Hong, LIU Xiangjun, SUN Wanli, et al. How horizontal well trajectory affects the sand producing tendency and working system of a gas well[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(12): 103-105.

- [14] 谭强,何辉,陈永浩,等.压力衰竭储层中定向井井壁稳定性分析[J].石油天然气学报:江汉石油学院学报,2010,32(2):316-318.

TAN Qiang, HE Hui, CHEN Yonghao, et al. Wellbore stability analysis of directional wells in pressure depleted reservoirs[J]. Journal of Oil and Gas Technology: Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2010, 32(2): 316-318.

- [15] NEUMANN L F, FERNANDS P D, ROSOLEN M, et

al. Case study of multiple hydraulic fracture completion in a subsea horizontal well, Campos Basin[J]. SPE Drilling & Completion, 2010, 25(1): 113-122.

- [16] ABBASY I, BARRY R, PITTS M, et al. Challenges in completing long horizontal wells selectively[J]. SPE Drilling & Completion, 2010, 25(2): 199-209.

- [17] 汪志明,李春艳,魏建光,等.利用模糊综合决策方法优选水平井完井方式[J].石油钻探技术,2008,36(5):3-6.

WANG Zhiming, LI Chunyan, WEI Jianguang, et al. Application of fuzzy comprehensive evaluation method in optimizing horizontal well completion[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(5): 3-6.

(修改回稿日期 2012-12-10 编辑 凌 忠)