

致密砂岩气藏钻完井关键技术研究进展

陈志学^{1,2}, 冯晓炜¹, 崔龙连², 戴巍³, 刘力², 毕文欣²

1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249
2. 中国石油集团钻井工程技术研究院, 北京 100195
3. 中国石油川庆钻探工程有限公司, 成都 610051

摘要 从 20 世纪 70 年代开始, 美国致密砂岩气藏的广泛开发受到了普遍关注, 在致密砂岩气藏钻、完井等方面形成了一系列成熟的先进技术, 井型设计从最初的单一直井发展到水平井、丛式水平井, 最长水平段超过 3000m; 布井方式也从单口井钻井转变为工厂化钻井, 提高了施工效率; 钻井提速采用欠平衡钻井、控压钻井、优质钻井液等技术, 实现了长水平段水平井安全、快速钻井; 完井技术由常规酸化发展为大型分段压裂技术, 改造级数最多超过 60 级, 单井产量提高 45% 以上, 实现了致密砂岩气藏低成本、高效益开发。根据中国致密砂岩气藏储层特征, 先后在长庆、吉林等油田进行了丛式水平井工厂化钻井和长水平段加砂分段压裂改造技术的试验应用, 钻井最长水平段为 2800m, 改造级数最多已超过 25 级, 单井成本节约 100 万元以上, 产量是直井的 3~10 倍, 取得了显著的应用效果。这些配套技术的形成推动了中国致密砂岩气藏钻完井技术的进步, 对加快中国致密砂岩气藏开发步伐具有重要的指导意义。

关键词 致密砂岩气藏; 钻井关键技术; 完井关键技术

中图分类号 TE243

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.32.012

Advances in the Key Technologies of Drilling and Completion for Tight Sand-stone Gas Reservoirs

CHEN Zhixue^{1,2}, FENG Xiaowei¹, CUI Longlian², DAI Wei³, LIU Li², BI Wenxin²

1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
2. CNPC Drilling Research Institute, Beijing 100195, China
3. Chuanqing Drilling Engineering Company Limited, CNPC, Chengdu 610051, China

Abstract Since 1970s, the wide development of American tight sandstone gas reservoirs have received the widespread attention. In the way of drilling and completion for the tight sandstone gas reservoirs, a series of mature advanced matching technologies have formed. Well design has witnessed a process of development from the initial single vertical wells to horizontal wells and cluster horizontal wells, and the longest horizontal segment is more than 3000m. The way of well spacing has been changed from single well drilling into the factory drilling to improve the operation efficiency. Many advanced technologies have been utilized for ROP improvement, such as unbalanced drilling, MPD and high quality drilling fluid to realize safe and fast drilling during the long lateral section. Well completion has a development from conventional acidizing technology to large-scale multi-stage fracturing, whose stimulation stage is more than 60, and the individual well production has increased by more than 45%, making low cost and high efficiency come true during the development of tight sandstone gas reservoirs. According to tight sandstone gas reservoir features in China, cluster horizontal wells factory drilling and long horizontal-section with staged fracturing transformative technology have been carried out in Changqing and Jilin Oilfield. The longest horizontal segment is 2800 m, and remoulding stage numbers are more than 25. Single well cost savings are about more than one million yuan, and the output is 3-10 times as the vertical wells. Finally

收稿日期: 2013-06-07; 修回日期: 2013-07-29

基金项目: 中国石油集团(股份)公司重大科技专项项目(2010E-2303)

作者简介: 陈志学, 博士后, 研究方向为钻井工艺技术, 电子信箱: chenzhixuedri@cnpc.com.cn

remarkable application results have been achieved. The formation of these supporting technologies gradually improve drilling and completion technologies of the tight sandstone gas reservoirs in China, and it has important guiding significance to accelerating the development pace of tight sandstone gas reservoirs.

Keywords tight sandstone gas reservoirs; key technologies of drilling; key technologies of completion

0 引言

致密含气砂岩的概念于 20 世纪 70 年代出现于美国^[1-8]。美国联邦能源管理委员会将致密含气砂岩定义为空气渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的砂岩。致密含气砂岩是一种必须经过大型改造措施(压裂)或采用水平井、多分支井,才能获得工业气流的砂岩储层。全球现已发现或推测发育致密砂岩气的盆地有 70 余个,主要分布在北美、欧洲和亚太地区。目前国外所开发的大型致密砂岩气藏主要以深盆气藏为主,主要集中在加拿大西部和美国西部。2009 年以致密气为主的非常规气占美国全部天然气产量的 53%,即达到其“半壁江山”,展示出了致密气藏良好的勘探前景^[9-17]。

1 致密砂岩气藏存在的钻完井技术难点

根据不同地区致密气藏的地质特点和钻探实际情况,总结归纳出了一些钻完井技术共有的难点^[18-20],主要为以下几方面:①致密砂岩上部地层复杂,起下钻阻卡等复杂事故频发;②致密砂岩胶结致密,硬度高、研磨性强、可钻性差、钻井速度慢、定向造斜率低、井眼轨迹控制困难,导致造斜速度慢、周期长;③采用常规钻井方式钻水平井,随着井斜的增大,钻具在重力作用下斜躺在下井壁上,使得钻具拖压严重影响钻井效率,也是水平段钻井速度慢的主要原因;④对裂缝比较发育的致密气藏来说,钻井过程中常规钻井液不能有效保护储层。由于钻井液完井液的侵入,破坏了储层物理化学平衡状态,使储层渗透率受到不同程度的损害导致后期开发无法获得较高产量;⑤射孔完井时环空间隙小、套管居中度差、水平段固井质量难以保证,导致部分井后期无法进行储层改造;⑥完井方式和防砂方式选择难度大。既要减少完井时对储层的伤害,又要确保完井方式针对性强,延长气井的工作寿命。

2 致密砂岩气藏钻井关键技术

国外致密砂岩气藏钻完井技术,经过几十年的不断探索和完善,目前已发展形成了一系列成熟的先进工艺技术,尤其是工厂化钻井和水平井钻井技术配合大型酸化压裂改造技术的使用,大幅度降低了该类气藏的钻完井综合成本,提高了勘探开发效益。

2.1 水平井钻井技术

致密砂岩气钻井技术先后经历了直井、单支水平井、多分支水平井、丛式井、丛式水平井钻井的发展历程。由于水平井可以增大储层泄流面积,获得更高的天然气产量,随着 2002 年 Devon 能源公司 7 口 Barnett 页岩气实验水平井取得

巨大成功,水平井已成为页岩气等致密气藏开发的主要钻井方式^[21,22]。而丛式水平井钻井是利用一个钻井平台作为钻井点钻多口水平井,可以降低成本、节约时间,便于后期开发集中管理。

对于丛式井设计,国外一般在一个丛式井组上钻 3~8 口水平井,有的甚至钻到 14 口井^[23,24],图 1 所示为一组 14 口水平井的丛式水平井组。这个丛式井组的设计主要分 2 个阶段:第一阶段设计 7 口井(红色),第二阶段设计相对应的 7 口井(绿色)。施工时表层采用小钻机批钻,下部采用带顶驱的大钻机钻进。无论是小钻机还是大钻机都可以在井间快速移动,从而避免搬迁钻机耗费时间。

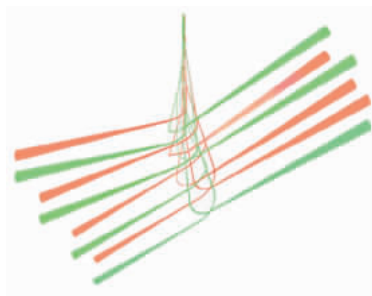


图 1 水平井丛式井组设计示意

Fig. 1 Schematic diagram of horizontal wells cluster wells

2.2 工厂化钻井技术

国外致密气钻井多数采用丛式水平井钻井技术。在钻井施工过程中,经常出现交叉作业或者重复作业的现象。因此,为了提高现场作业效率,降低钻井综合成本,产生了钻井工厂这一理念^[25-27],其核心是在钻井作业过程中实现设备以及作业流程的标准化。钻井工厂化主要具有以下特点:批量钻井、整车运输、集装箱存储、批量操作、减少钻井液体体系的更换,对同一个井场数口井采用批量作业,从而大幅度提高钻井效率。图 2 是切萨皮克公司实施的一个典型工厂化钻井并

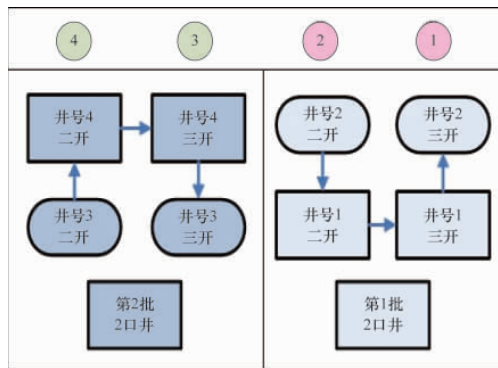
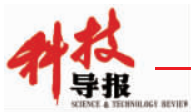


图 2 工厂化钻井示意

Fig. 2 Schematic of factory drilling



场示意图^[25,26],实施中,一口井钻直井段的同时,另一口井可以进行压裂施工,交替运行,达到运行最优化。

2.3 欠平衡钻井技术

在致密气井钻井过程中,欠平衡钻井^[27]可大幅度降低钻遇裂缝时井漏的发生和有效保护储层,减少钻井液对储层的伤害,还能及时识别常规钻井不能发现的储层;同时,能显著提高钻井速度,减少压差卡钻等事故的发生。欠平衡钻井的优点是通过钻井数据的收集和分析应用,使得气藏描述提高

了对勘探前景、地层流体流动、储层渗透率各向异性及生产能力的理解,不足之处是为确保钻井施工安全,需要增加更多的设备,导致费用较高。目前,欠平衡钻水平井在美国欠平衡钻井占总钻井数的比例达到30%^[28]。英国北海南部致密气藏20世纪80年代采用大位移井传统钻井后水力压裂,90年代初井型由大位移井改为水平井,90年代中期改用欠平衡钻水平井。表1为不同井型钻井方式的产气率。Shell自2005年开始利用欠平衡方式开发致密气^[29]。

表1 英国北海南部致密气藏不同井型产气率对比

Table 1 Comparison of gas production rate of tight gas reservoirs with different well-types in Southern North of UK Sea

区块	渗透率/mD	产气率/(10 ³ m ³ ·d ⁻¹ ·10 ⁻¹ MPa ⁻¹)			
		大位移井		水平井	
		压裂前	压裂后	传统钻井	欠平衡钻井
L	0.2~3.0	0.57	2.14	6.82	10.48
C	0.02~0.20	0.11	1.56	3.29	3.56
G	0.02~0.40	0.05	0.76	6.08	6.41

2.4 控压钻井技术

控压钻井技术^[30,31]是从欠平衡钻井技术的基础上发展出来的。控压钻井可以精确的控制整个井眼的环空压力剖面。控压钻井技术的优势是没有泥浆漏失和井筒稳定性问题,封闭系统可避免气体或液体运移到地面;缺点是费用高,需要特殊工具及对钻井人员培训。2008年,壳牌公司评价了全球在北美、北非、中东和亚洲的10个致密气藏勘探开发欠平衡钻井和控压钻井项目(图3)。评价结果显示,采用欠平衡钻井和控压钻井能大幅度提高钻井速度,缩短钻井周期,有助于保护气层,减少后期改造成本,适合致密砂岩气藏“低成本、高效益”快速开发要求。

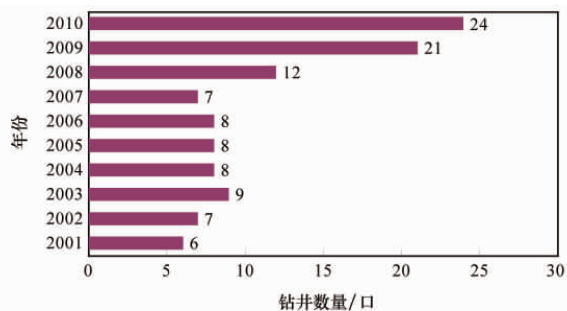


图3 壳牌致密砂岩气项目欠平衡和控压钻井数量统计
Fig. 3 Statistics of underbalanced and MPD of tight sandstone gas projects by Shell

2.5 连续油管钻井技术

致密砂岩气连续管钻井技术由BP美国和贝克休斯在2009年用于克里弗兰气藏^[32,33]。该致密气藏储层垂深2400m,厚度为6~26m,孔隙度4%~15%,渗透率0.003~0.015mD,含水饱和度30%。连续管钻井技术(图4)重点用于对老井改造及

侧钻分支井钻井等施工,累计实施20口井。连续管钻井的优点是非生产时间减小,环境影响小,能在欠平衡环境使用,较为安全;缺点是受连续油管尺寸限制,其钻井深度不够。致密砂岩气主要用来重新进入钻井和侧钻,在多层和高度衰竭致密砂岩气藏最具有应用潜力。

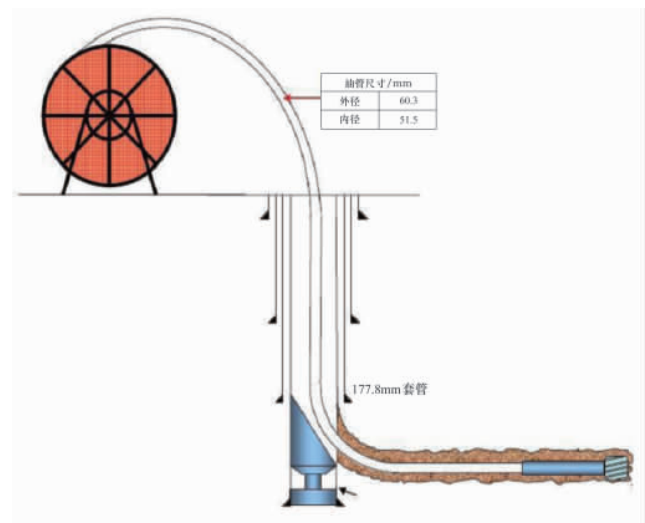


图4 连续油管钻水平井示意

Fig. 4 Schematic of coiled tubing drilling horizontal wells

2.6 优质钻井液技术

针对致密砂岩气层的水敏和液相圈闭损害难题,开发了适用于致密气藏的高品质水基钻井液技术(HPWBM)^[34,35],包含微缩形变密封聚合物、铝化学物和钻速增效剂。铝化学物可以进入孔隙喉道和微裂缝保持稳定性,减少孔隙压力传播;微缩形变密封聚合物可以机械桥接孔隙喉道和微裂缝;钻速增效剂可以油湿钻头,减小粘土对钻头的附着。应用结

果表明,该钻井液体系对环境更有利,费用更少,具有较强稳定性,有助于消除粘附卡钻,提高钻速。

3 致密砂岩气完井关键技术

国外致密砂岩气直井以裸眼或射孔完井为主,而水平井完井技术有较大的发展,已由过去单一的完井技术逐步发展成为一套保护油气层、提高水平井产能及采收率的综合工艺技术,并具有完善程度高、完井成本低、防止油层二次污染、提高产能的优点。

3.1 致密气藏早期完井方式

在致密气藏开发初期,主要采用以下几种完井方式^[36,37]:

(1) 裸眼完井,施工简单、成本低,但若完井后井壁不稳定,后期作业不顺利,可能会导致部分井无法进行后期改造。

(2) 筛管完井,避免井壁不稳定引起的安全隐患、满足自然建产、后期改造需要。但筛管完井方式下拖动管柱水力喷射分段压裂技术容易导致管柱砂卡,压裂工艺技术有待进一步优化。

(3) 尾管射孔完井,可以避免井壁不稳定的隐患、满足后期改造需要,但长水平段尾管固井难度大,水泥浆对地层造成二次伤害。衬管完井能避免固井水泥浆对储层造成的伤害,但是在压裂改造过程中存在无法顺利实施的问题。

(4) 裸眼+预置管柱完井方式,利用原钻机裸眼内下入压裂预置管柱,这种完井方式能够缩短井眼空置时间,避免出现井壁不稳定的现象,减少井下复杂情况。

3.2 致密气藏完井前沿技术

(1) 即时射孔技术(JITP)。埃克森美孚公司研发出一种即时射孔技术^[38],即在一口井中通过选择性地射开某个层段并用球封的方式实现层段之间的转换来连续地处理不同的层段。其主要目的是提高多层气藏的采收率并使生产层长期增产。技术优势为:① 使用一种向下钻进工具对多靶区域进行增产;② 有选择性地变换增产措施使其为每个层所特用,使井的生产能力达到最大值;③ 区域之间进行强制隔离,以确定对每个区域用何种措施来处理,并使先前处理过的区域不至于被干扰破坏;④ 在高流速下进行作业以便有效地增产。该技术已在美国西部低渗透气田中成功进行了600多次压裂作业。在1天之内可进行高达14次处理作业;在4天的周期中可对多达48个产层进行增产处理。

(2) 套管外射孔技术。在直井或水平井中,套管外射孔完井技术是将射孔模块精确定位到整个目的层段,实现对非连续目的井段的精确定位增产处理。在第一次注水泥过程中,将套管外射孔完井系统固结到目的井段,完成初始分层封隔。在增产处理作业过程中,整体式单向阀提供地层封隔。该技术成功应用于Fort Worth盆地Barnett页岩水平井中^[39]。现场实践证明,在高造斜水平井中,套管外射孔作业能达到最佳的增产作业覆盖范围,与常规增产处理技术相比,套管外射孔完井技术以较低的成本处理更多的层段,使完井时间减少60%~80%,费用降低20%,油井产能提高50%,效果显著。

(3) 高压注氮射孔技术^[40]。在致密砂岩储层的射孔井段内充满高压氮气,使套管内压力高于地层压力时射孔,射孔后瞬时高压气流清洗射孔井段,使气层连通性很快形成,从而提高产量。实践证明这种简单经济的完井方法,其实际效果大大优于井下核爆炸和超大型水力压裂。

(4) 连续油管传送射孔与喷砂技术^[41,42]。该技术可以使气层内的裂缝相互之间有更好的连接,是一种可以侵蚀钢衬、水泥和地层并在中间造成无应力的整洁的空间通道的方法。孔眼的有效直径可以避免支撑剂桥接,出现水力裂缝而没有出砂的现象,同时降低费用。该技术可减小射孔入口摩擦,作业过程的迂曲度以及多裂缝产生的可能性,同时,还能减少致密砂岩气层的出砂几率,优化支撑剂的放置。

4 中国相关技术的发展现状

中国致密砂岩气藏分布领域广泛,类型多样,四川、鄂尔多斯、松辽、塔里木及准噶尔等10余个盆地都具有形成致密砂岩气藏的有利地质条件^[43-47]。经过近几年对地质认识的飞跃和开发技术的快速发展,四川盆地和鄂尔多斯盆地致密砂岩气藏的开发已取得显著成效,堪称中国致密砂岩气藏开发的典范。中国致密砂岩气藏开发采用水平井技术起步较晚。水平井技术自“十一五”开始才得到快速发展,2012年,中国石油年钻水平井达到1351口,钻井工艺基本上能够实现各类水平井的自主施工。如长庆苏里格致密气田,通过开展井身结构优化、钻头类型优选、欠平衡钻井和优质钻井液等技术攻关,水平井钻井周期由最初的200d缩短到目前的60d,年钻水平井超过300口,平均水平段长1000m左右,最长为2800m。形成了以两层套管结构、高效PDC钻头、聚磺钻井液为主的提速配套技术^[48-50]。而工厂化钻井目前主要在长庆、吉林、新疆等油田进行了初步试验应用。如长庆苏里格南区块的致密气采用一个平台9口井的工厂化钻井方式(图5),其中直井1口,水平位移1000m的定向井4口,水平位移1400m的定向井4口,井口距离15m,采用2部滑轨钻机联合作业^[48-50],表层批量钻井,待所有井完钻后进行批量压裂施工,实现“工厂化”作业,分段压裂改造最大级数为25级,单井成本节约100万元以上,产量是直井的3~10倍。形成了以丛式井组加分段压裂改造为主的致密砂岩气配套开发技术^[51,52],降低了施工成本,大幅度提高了致密油气藏的开发效益。

从国内外钻探实践来看,中国水平井钻井技术与国外差距正在逐渐缩小,而工厂化作业和大型分段压裂改造技术才刚刚起步,国外分段压裂级数最多已超过60级,中国与国外相比还存在较大差距,需进一步开展技术研究才能缩小和国外的差距,满足中国致密油气高效、快速开发的要求。

5 展望

(1) 致密砂岩气藏与常规天然气藏的开发技术存在很大的差别,应借鉴国外先进技术经验,取长补短,针对国内致密砂岩气藏的具体储层特征,研究形成以工厂化钻井为主的长

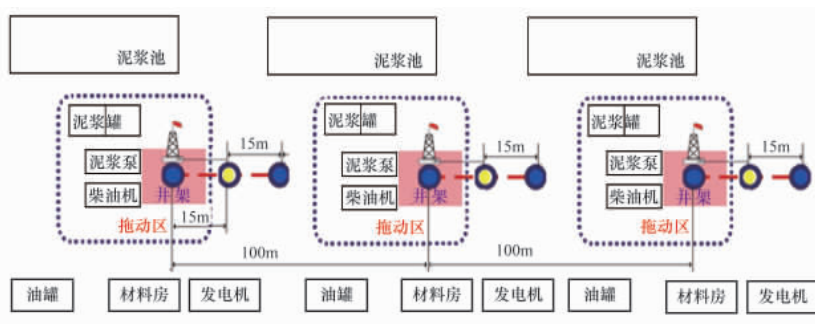


图5 致密油工厂化钻井井场布局
Fig. 5 Tight oil drilling wellsite factory layout

水平段丛式水平井加大型分段压裂改造技术一体化的综合配套开发技术,加快了国内致密砂岩气藏开发的步伐;

(2) 致密砂岩气藏的开发技术应以水平井、丛式水平井、工厂化钻井技术、欠平衡储层保护和后期完井及改造技术来加快钻井速度、提高其单井产量,达到降低钻井综合成本的目的,从而实现致密砂岩气藏的高效、快速开发;

(3) 应根据中国不同区块的致密砂岩气藏特点,研发不同类型的致密岩石分析系统、井间监测技术等技术,形成致密砂岩气藏高效开发综合的配套技术,达到提高致密砂岩气藏采收率的目的。

参考文献 (References)

[1] Office of Fossil Energy and National Energy Technology Laboratory, US Department of Energy. Modern shale gas development in the United States: A primer[R]. Oklahoma: Ground Water Protection Council, 2009.

[2] 雷群, 万玉金, 李熙喆, 等. 美国致密砂岩气藏开发与启示[J]. 天然气工业, 2010, 30(1): 45-48.
Lei Qun, Wan Yujin, Li Xizhe, et al. Natural Gas Industry, 2010, 30(1): 45-48.

[3] Stephen A, Holditch S A. Tight gas sands[J]. Journal of Petroleum Technology, 2006, 58(6): 86-92.

[4] Perry K, Lee J. Unconventional gas reservoirs[M/OL]. Texas: National Petroleum Council, 2007[2011-07-25]. http://www.npc.org/Study_Topic_Papers/29-TTG-Unconventional-Gas.pdf.

[5] Federal Energy Regulatory Commission. Natural gas policy act of 1978 [R]. Washington: Federal Energy Regulatory Commission, 1978.

[6] Elkins L E. The technology and economics of gas recovery from tight sands[R]. New Mexico: SPE Production Technology Symposium, 1978.

[7] Schmoker J W. Resource-assessment perspectives for unconventional gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 81(11): 1993-1999.

[8] Holditch S A. Tight gas sands[J]. Journal of Petroleum Technology, 2006, 58(6): 86-93.

[9] 邹才能, 张光亚, 陶士振, 等. 全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(2): 129-145.
Zou Caineng, Zhang Guangya, Tao Shizhen, et al. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2): 129-145.

[10] Master J A. Deep basin gas trap, western Canada[J]. AAPG Bulletin, 1979, 63(2): 152-181.

[11] Law B E. Basin-centered gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1891-1919.

[12] 姜振学, 林世国, 庞雄奇, 等. 两种类型致密砂岩气藏对比[J]. 石油实

验地质, 2006, 28(3): 210-214.
Jiang Zhenxue, Lin Shiguo, Pang Xiongqi, et al. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(3): 210-214.

[13] 董晓霞, 梅廉夫, 全永旺. 致密砂岩气藏的类型和勘探前景[J]. 天然气地球科学, 2007, 18(3): 351-355.
Dong Xiaoxia, Mei Lianfu, Quan Yongwang. Natural Gas Geoscience, 2007, 18(3): 351-355.

[14] Reeves J J. Advancing 3D seismic interpretation methods to find the sweet spots in tight gas reservoirs [J]. Journal of Society of Exploration Geophysicists, 2006, 25(2): 1018-1022.

[15] 邹才能, 陶士振, 侯连华, 等. 非常规油气地质[M]. 北京:地质出版社, 2011.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Hou Lianhua, et al. Unconventional Petroleum Geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011.

[16] Jarvie M D, Hill J R, Roble E M, et al. Unconventional shale gas system: The mississippian barnett shale gas of north-central Texas as one model for thermogenic shale gas assessment[J]. AAPG bulletin, 2007, 91(4): 475-499.

[17] Kim J W, Bryant W R, Watkins J S, et al. Mineralogical and fabric changes of shale during burial diagenesis and their effects on petrophysical properties[J]. Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, 1998(48): 139-150.

[18] 黄建林, 张生军, 房舟, 等. 致密高压裂缝性气藏超深水平井钻井技术难点与对策[J]. 石油勘探技术, 2008, 36(2): 22-24.
Huang Jianlin, Zhang Shengjun, Fang Zhou, et al. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(2): 22-24.

[19] Ross D J K, Bustin R M. Characterizing the shale gas resource potential of Devonian-Mississippian strata in the Western Canada sedimentary basin: application of an integrated formation evaluation [J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(1): 87-125.

[20] Jalali Y. Lessons Learnt from reservoir studies on application of multilateral wells[C]/SPE Technical Symposium of Saudi Arabia Section, Dhahran, Saudi Arabia. May 14-16, 2005.

[21] Baihy J, Grant D, Li F, et al. Horizontal wells in tight gas sands—a methodology for risk management to maximize success[C]/SPE Annual Technical Conference and Exhibition. California, USA. November 11-14, 2007.

[22] Zander D, Czehura M, Snyder D, et al. Horizontal drilling and completion optimization in a north dakota bakken oilfield[C]/SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Florence, Italy. September 19-22, 2010.

[23] Pili N, Wei Y, Holditch S A. Selecting drilling technologies and methods for tight gas sand reservoirs[C]/IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition. New Orleans, Louisiana, USA. February 2-4, 2010.

- [24] 李文魁, 刘长松, 沈治凯, 等. 致密气藏开采技术初探[J]. 特种油气藏, 2002, 9(4): 66-68.
Li Wenkui, Liu Changsong, Shen Zhikai, et al. Special Oil & Gas Reservoirs, 2002, 9(4): 66-68.
- [25] Daniel M J, Ronald J H, Tim E R, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment [J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(8): 1164-1180.
- [26] Considine T, Watson R, Entler R, et al. An emerging giant: Prospects and economic impacts of developing the Marcellus shale natural gas play[R]. Philadelphia: Department of Energy and Mineral Engineering, College of Earth & Mineral Sciences, The Pennsylvania State University, 2009.
- [27] Ramalho J, Elliott D, Francis P, et al. Tight gas reservoir exploitation with underbalanced drilling technology [C]/International Petroleum Technology Conference. Doha, Qatar. December 7-9, 2009.
- [28] Dave E. Evaluation of results from one company's global use of Underbalanced Drilling for Tight Gas exploration and appraisal reservoir characterization[R]/SPE/IADC Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference and Exhibition. Milan, Italy. March 20-21, 2012.
- [29] Veeken. Underbalanced drilling and completion of sand-prone Tight Gas Reservoirs in southern north sea [R]/European Formation Damage Conference. Scheveningen, The Netherlands. 2007.
- [30] Kenneth P, Stone C R, Medley G H, et al. Managed-pressure drilling: what it is and what it is not[C]/IADC/SPE Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference & Exhibition. Texas, USA. February 12-13, 2009.
- [31] Dietrich E, Denton S, Cadena J, et al. Coiled Tubing MPD for Tight Gas Field Re-Entry Work [C]/SPE Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference & Exhibition. 2009.
- [32] Mykityw C, Killip D, Brewin R, et al. Mature field rejuvenation of a tight gas carbonate utilizing coiled tubing underbalanced drilling techniques [C]/SPE/IADC Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference and Exhibition. Abu Dhabi, UAE. 2008.
- [33] Dietrich E, Denton S, Cadena J, et al. Coiled tubing MPD for tight gas field re-entry work [C]/IADC/SPE Managed Pressure Drilling and Underbalanced Operations Conference & Exhibition. Texas, USA. February 12-13, 2009.
- [34] Hoover E, Trener J, Mullen G, et al. New Water based fluid designed for depleted tight gas sands eliminates NPT[C]/SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. Amsterdam, The Netherlands. March 17-19, 2009.
- [35] Thuwaini J, Emad M, Ekpe J, et al. Fit-for-purpose sealant selection for zonal isolation in HPHT deep tight gas wells[C]/SPE Deepwater Drilling and Completions Conference. Texas, USA. October 5-6, 2010.
- [36] 王彦昭. 水平井完井方式优选[J]. 内蒙古石油化工, 2006, 32(8): 173-174.
Wang Yanzhao. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2006, 32(8): 173-174.
- [37] 何鲜. 国外深层气藏水平井定向完井技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
He Xian. Horizontal wells and directional wells completion technology in deep gas reservoirs abroad[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.
- [38] 冯世良. 即时射孔和环形连续管压裂增产新技术[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2007(7): 55.
Feng Shiliang. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2007(7): 55.
- [39] 邹良志, 石化国, 杨家忠, 等. 国内外主要射孔技术发展评述[J]. 石油仪器, 2012, 26(4): 34-37.
Zou Liangzhi, Shi Huaguo, Yang Jiazhong, et al. Petroleum Instrument, 2012, 26(4): 34-37.
- [40] 常仲文, 陈军. 氮气正压射孔与氮气测试技术[J]. 新疆石油学院学报, 2000, 12(3): 24-27.
Chang Zhongwen, Chen Jun. Journal of Xinjiang Petroleum Institute, 2000, 12(3): 24-27.
- [41] 钱斌, 朱炬辉, 李建忠, 等. 连续油管喷射射孔套管分段压裂新技术的现场应用[J]. 天然气工业, 2011, 31(5): 67-69.
Qian Bin, Zhu Juhui, Li Jianzhong, et al. Natural Gas Industry, 2011, 31(5): 67-69.
- [42] Fryzowicz R, Naughton-Rumbo R, Schrama E, et al. Application of Ct-Conveyed perforating with the sand jetting technology on north sea deep horizontal tight gas producer[C]/SPE Deepwater Drilling and Completions Conference. Texas, USA. October 5-6, 2010.
- [43] 宁宁, 王红岩, 雍洪, 等. 中国非常规天然气资源基础与开发技术[J]. 天然气工业, 2009, 29(9): 9-12.
Ning Ning, Wang Hongyan, Yong Hong, et al. Natural Gas Industry, 2009, 29(9): 9-12.
- [44] 马新华, 贾爱林, 谭健, 等. 中国致密砂岩气开发工程技术与实践[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(5): 572-579.
Ma Xinhua, Jia Ailin, Tan Jian, et al. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(5): 572-579.
- [45] 戴金星, 倪海燕, 吴小奇. 中国致密砂岩气及在开发上的重要意义[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 257-264.
Dai Jinxing, Ni Yunyan, Wu Xiaoqi. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 257-264.
- [46] 康毅力, 罗平亚. 中国致密砂岩气藏勘探开发关键工程技术现状与展望[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(2): 239-245.
Kang Yili, Luo Pingya. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(2): 239-245.
- [47] 何光怀, 李进步, 王继平, 等. 苏里格气田开发技术新进展及展望[J]. 天然气工业, 2011, 31(2): 12-16.
He Guanghuai, Li Jinbu, Wang Jiping, et al. Natural Gas Industry, 2011, 31(2): 12-16.
- [48] 陈志勇, 巨满成. 水平井钻井技术在苏里格气田的研究和应用[J]. 天然气工业, 2002, 22(6): 65-67.
Chen Zhiyong, Ju Mancheng. Natural Gas Industry, 2002, 22(6): 65-67.
- [49] 欧阳勇, 吴学升, 高文云, 等. 苏里格气田丛式井组快速钻井技术[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(34): 8452-8455.
Ouyang Yong, Wu Xuesheng, Gao Wenyun, et al. Science Technology and Engineering, 2011, 11(34): 8452-8455.
- [50] 甘升平, 赵茂, 吴先忠, 等. 优快钻井技术在苏里格气田的应用[J]. 天然气工业, 2007, 27(12): 71-73.
Gan Shengping, Zhao Mao, Wu Xianzhong, et al. Natural Gas Industry, 2007, 27(12): 71-73.
- [51] 朱正喜, 李永革. 苏里格气田水平井裸眼完井分段压裂技术研究[J]. 石油机械, 2012, 40(5): 74-77.
Zhu Zhengxi, Li Yongge. China Petroleum Machinery, 2012, 40(5): 74-77.
- [52] 张恒, 刘洋, 李强, 等. 水平井裸眼分段压裂完井技术在苏里格气田的应用[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(4): 77-80.
Zhang Heng, Liu Yang, Li Qiang, et al. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(4): 77-80.