

中石油非常规储层水平井压裂技术进展

陈建军¹ 翁定为^{1,2}

1. 中国石油勘探开发研究院廊坊院区 2. 国家能源致密油气研发中心储层改造部

摘 要 中国石油天然气集团公司（以下简称中石油）从 2006 年启动水平井改造专项攻关以来，水平井压裂技术实现了从无到有再到无限级段分段的跨越，2015 年实现了最高分段数 26 段。10 年间，中石油在非常规储层水平井压裂改造技术领域取得了突出进展：①自主研发了水平井双封单卡、封隔器滑套、水力喷砂和裸眼封隔器 4 套水平井压裂主体工艺技术；②自主研发了复合桥塞、套管固井滑套 2 项水平井大排量体积改造主体工艺技术，配套体积改造优化设计理论、压裂液体系、裂缝监测等技术，初步形成体积改造技术体系和水平井工厂化作业模式；③自主研发的压裂工具、液体体系等关键技术，不动管柱多级滑套水力喷砂分段压裂技术、液体胶塞分段技术等，达到了国际先进水平或同期国际领先水平。据统计，2014 年中石油水平井分别占油井和气井总数的 3.2% 和 13.1%，其对油田和气田产量的贡献率分别达到 9.9% 和 39.7%。最后，指出了新区高密度完井压裂工程试验、老区老井体积重复压裂试验等中石油新一轮水平井改造技术的攻关重点方向。

关键词 中国石油天然气集团公司 非常规储层 水平井 体积改造 技术进展 高密度完井 发展方向

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2017.09.010

CNPC's progress in horizontal well fracturing technologies for unconventional reservoirs

Chen Jianjun¹ & Weng Dingwei^{1,2}

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Langfang, Hebei 065007, China; 2. Stimulation Department of National Energy Tight Oil and Gas R&D Center, Langfang, Hebei 065007, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 37, ISSUE 9, pp.79-84, 9/25/2017. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Horizontal well fracturing technology has been developed greatly from scratch to multi-stage fracturing since China National Petroleum Corporation (CNPC for short) initiated the research on horizontal well stimulation in 2006 with 26 stages achieved in 2015. Over the past decade, CNPC has made remarkable progress in horizontal well fracturing technologies for unconventional reservoirs. First, four sets of principal processes for horizontal well fracturing are developed independently, including double-packer and single-slip, packer sliding sleeve, hydraulic jet and open hole packer. Second, two principal processes for high-rate volumetric stimulation of horizontal well are independently developed, i.e., composite bridge plugging and cementing sliding sleeve, and the support optimal design theory of volumetric stimulation, fracturing fluid system and fracture monitoring technology are also established. And thus, the volumetric stimulation technology system and the factory-like horizontal well operation mode are preliminarily formed. Third, the independently developed key technologies of fracturing tools and liquid systems reach the advanced international level or the leading international level of the same year, such as the hydraulic-jet staged fracturing technology with multi-stage sliding sleeve in fixed string and the gel plug segmentation technology. Based on the statistics, horizontal wells account for 3.2% of oil wells and 13.1% of gas wells, and their contribution ratios to oil field and gas field output are 9.9% and 39.7%, respectively. Finally, it is pointed out that CNPC should take the fracturing engineering tests of high density completion and the volumetric refracturing tests in mature fields and old wells as the new research objects of horizontal-well stimulation technologies.

Keywords: CNPC; Unconventional reservoir; horizontal well; Volumetric stimulation; Technical progress; High density completion; Development trend

基金项目：国家高科技研究发展计划（863 计划）项目“致密砂岩气藏低伤害压裂液体系研究与应用”（编号：2013AA064801）、国家科技重大专项“低渗—超低渗油藏提高储量动用关键工艺技术研究”（编号：2016ZX05013-005）

作者简介：陈建军，1963 年生，高级工程师；主要从事天然气发展战略规划、天然气开发技术研究及生产应用等工作。地址：（065007）河北省廊坊市万庄 44 号信箱。ORCID: 0000-0003-2096-6104。E-mail: chjjun@petrochina.com.cn

通信作者：翁定为，1981 年生，高级工程师，博士；从事压裂工艺方面的研究工作。地址：（065007）河北省廊坊市 44 号信箱。电话：（010）69213147。ORCID: 0000-0003-3482-449X。E-mail: wendw69@petrochina.com.cn

1 水平井改造技术取得的重大成效

随着国内新增油气探明储量品位不断下降,多井低产制约了油气开发的效益。与此同时,国内外水平井改造技术快速发展,在低渗透与非常规油气藏开发中取得了显著应用成效^[1-8]。2006年,中国石油天然气集团公司(以下简称中石油)及时启动“油气藏储层改造重大技术攻关专项”,十年来,通过技术攻关与现场试验,水平井改造技术在低渗透/特低渗透油气藏应用4 300余口,取得了重大的突破与长足的发展。

1.1 水平井分段压裂技术突破与规模应用,促进了低渗透油气藏效益开发

从2006—2010年,仅用5年攻关,实现了水平井改造技术从无到有的突破,自主研发了水平井双封单卡、封隔器滑套、水力喷砂和裸眼封隔器4套水平井改造主体工艺技术。水平井分段压裂一般3~5段,最高达15段。现场规模应用715口井,平均增产超过了直井压裂的3倍,初步解决了渗透率界限0.3 mD低渗透油藏开发动用难题,技术总体达到国际先进,局部达到领先水平,并于2012年荣获国家科技进步一等奖。目前,水平井分段压裂4项主体工艺性能指标进一步提升,一般分层压裂段数提高到了8~10段。

1.2 水平井体积改造取得突破与快速发展,成为致密油气、页岩气建产的关键技术

进入“十二五”,中石油借鉴北美利用“水平井+多段压裂”技术高效开发致密油气、页岩气的经验,水平井分段改造技术研究明显提速,自主研发了复合桥塞、套管固井滑套2项水平井体积改造主体工艺技术,配套体积改造设计理论、压裂液体系、裂缝监测等技术,初步形成体积改造技术体系和水平井工厂化作业模式,在四川盆地长宁—威远国家级页岩气示范区、云南昭通页岩气以及陇东长7致密油、吐

哈三塘湖致密油得到规模应用,截至2015年,技术指标达到单井最高分段数26段、最大液量 $4.8 \times 10^4 \text{ m}^3$,最大加砂量1 906 m^3 ,最大排量17 m^3/min 。页岩气单井产量 $5 \times 10^4 \sim 30 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,致密油单井产量达到10~40 t/d。

1.3 水平井分段压裂技术取得标志性成果

体积改造追求“打碎储层解放储层”的理念深入人心,得到广泛认可^[9-11];依托水平井改造攻关专项建成的大型物理模拟实验室,在水平井裂缝起裂及扩展机理研究方面发挥了重要作用,并已形成了国内外学术交流的平台;压裂工具、液体体系等自主研发关键技术,均达到国际先进水平,不动管柱多级滑套水力喷砂分段压裂技术、液体胶塞分段技术等,达到同期国际领先水平;井中、地面、浅井微地震裂缝监测技术,在中石油16个油气田^[12]全面应用,超过300口井。

1.4 水平井分段压裂技术在中石油油气生产中效果显著

在原油生产上,2013年水平井产油量突破千万吨(表1),2014年水平井产量继续上升到 $1\,121 \times 10^4 \text{ t/a}$,占中石油原油总产量的9.9%,而水平井占总油井的比例仅为3.2%;在天然气生产上,2008—2014年水平井从270口增加到1 648口(表2),占总气井比例由5.5%提高到13.8%,同期水平井产气量则从 $84 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 增加到 $379 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,对产量的贡献率由13.6%增加到39.7%。

2 水平井储层改造技术十年攻关的启示

水平井改造技术十年攻关取得了跨越式发展,主要有4点经验与启示。

2.1 发挥体制优势,组织强力攻关,是推动技术进步的前提

中石油高度重视储层改造,将储层改造与钻井、

表1 中石油近年来水平井在油田的应用情况表

年 度	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
油井总数量/万口	11.19	11.63	12.34	13.29	13.79	16.05	15.95
水平油井数量/口	2 470	2 647	3 037	3 102	3 633	5 235	5 746
水平井所占比例	2.0%	2.1%	2.2%	2.2%	2.5%	3.1%	3.2%
原油产量/ 10^4 t	10 825	10 313	10 541	10 754	11 033	11 260	11 338
水平井原油产量/ 10^4 t	794	781	731	767	842	1 004	1 121
水平井产油量占比例	7.3%	7.6%	6.9%	7.1%	7.6%	8.9%	9.9%

表 2 中石油近年来水平井在气田的应用情况表

年 度	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
气井总数量 / 口	4 913	6 300	7 491	8 404	9 848	11 230	12 541
水平气井数量 / 口	270	415	614	876	1 042	1 546	1 648
水平井占比例	5.5%	6.6%	8.2%	10.4%	10.6%	13.8%	13.1%
总产气量 / 10^8 m^3	617	683	725	756	798	888	955
水平井气产量 / 10^8 m^3	84	125	178	253	279	362	379
水平井产气量占比例	13.6%	18.2%	24.6%	33.5%	35.0%	40.7%	39.7%

物探并列为油气勘探开发的三大工程技术。2006 年启动“油气藏储层改造重大技术攻关专项”，由勘探与生产分公司牵头，组织勘探开发研究院与油田企业、钻探企业联合攻关，研究院支撑总部形成顶层设计，油田企业推动大规模现场试验，钻探企业负责实施，累计投入超十亿元进行技术研发、现场试验，体制优势使得水平井改造与国际先进技术差距得以快速缩小，技术能力及低品位油气开发规模达到仅次于北美地区水平。

2.2 油公司强力推进实现了规模化应用

水平井压裂技术应用初期，部分油田对技术适应性与增产效果存疑，为此中石油先后组织 3 次水平井及压裂改造推进会，交流技术经验，下达技术应用生产指标，极大推动了技术的快速应用。水平井改造井数快速增长，从 2010—2013 年，改造井数分别为 257 口、503 口、775 口和 1 068 口。

2.3 自主创新是解决核心技术的重要途径

大尺度全三维物理模拟装置深化了体积改造机理，指导了压裂工艺技术设计和优化；桥塞工具和超低浓度瓜尔胶的突破打破了国外公司技术垄断，其中快钻桥塞作业费用降低 80% 以上；研发的微地震监测技术在页岩气、致密油等压裂现场与国外大型油服公司同台竞争，这些创新技术的突破，大幅降低了体积改造成本。

2.4 水平井压裂改造技术的攻关必须工程地质紧密结合

通过攻关，大大缩小了中石油与国外改造水平的差距，但体积改造的地质工程一体化方面仍有较大差距。国外公司建立的一体化设计平台，从最初的地质研究、盆地模拟到钻井、储层评估、压裂等各个环节紧密相连，实现了体积改造的逆向设计，而我国的低渗致密油气田非均质性强、流度低、地应力差大，

需要改造工艺与油气藏更紧密的结合，提高体积改造的针对性和技术适应性。

3 国内外水平井改造技术的发展现状

针对渗透性极差的非常规储层，美国通过水平井多段压裂实现对储量的“全”可采，将“井控储量”模式转化为“缝控储量”模式，基质中的油气所需驱动压差大幅度降低，可动用储量大幅度上升。北美主要区块井间距不断缩短。从 2009 年的 400 m，到现在 100 ~ 150 m 为主，部分公司甚至试验了 76 m 的井距；缝间距也不断缩小，从初期 100 m 到现在的 15 m 左右，最短缝间距达到了 8 m。井距加密，段间距缩短，单位面积上可动用储量大幅度增加，单位成本下降，净现值大幅度提高。典型实例是 Eclipse 公司的超长水平段项目^[13]：Purple Hayes 1H 钻探目的层位为 Utica 页岩的凝析油（气）带与富（湿）气带之间，水平井间距 100 m；井深 8 244 m，水平段长 5 652 m，垂深 2 307 m。花费时间 17.6 d，一趟钻钻完整个水平段；压裂 124 段，每段 5 簇（缝间距 9 m），用时 23.5 d 完成，平均 5.3 段/d；压裂施工排量介于 11.9 ~ 12.7 m³/min，施工压力介于 51.7 ~ 62.1 MPa；压裂液采用全程滑溜水体系，总液量 112 848 m³，平均 910 m³/段；砂量 95 t/段；使用快钻桥塞分段技术，电缆泵送桥塞和射孔枪破纪录地泵入水平段 5 652 m，桥塞最高泵送速度 127 m/min，桥塞钻磨时间介于 7 ~ 10 min/个。该井压后产天然气 14.16 × 10⁴ m³/d，产凝析油 190.8 m³/d。纵向上多层或者厚度较大的储层，则采用纵向上交错叠置的多层水平井布井，提高纵向剖面储量动用率^[14]（图 1）。

国外（以美国为主）水平井体积改造技术进步的另一个重要方面体现在重复压裂技术，经现场应

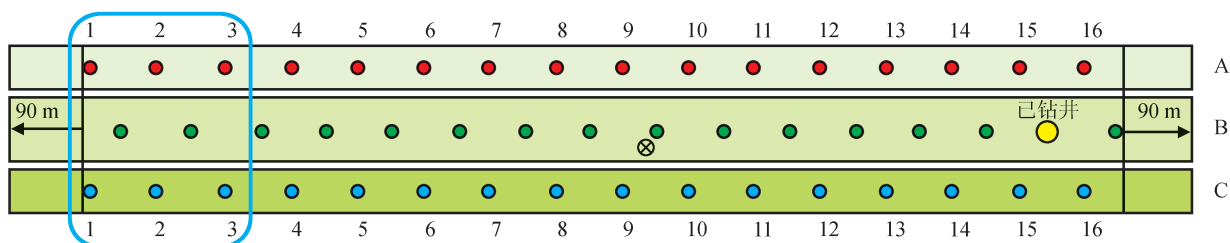


图 1 Niobrara 多层水平井布井示意图

用证实重复压裂可提高非常规油气藏的采收率^[15-16]。通过统计分析,北美致密油衰竭式开发采收率平均约 7.8% (高气油比区可达 10% 以上),而重复压裂采收率可提高 5%~8% 并最终达到 15% 以上。另外,室内模拟显示注水驱替试验提高采收率 4%~5%,达到 12%~15%; CO₂ 混相驱实验提高采收率 7%~8%,达到 15%~18%^[17-19]。为满足在原有井筒中开展体积改造技术,研发了重构井筒的压裂技术,可通过将原有水平段管柱钻磨后重新下入套管,

也可采用可膨胀尾管技术^[20]。哈里伯顿公司统计了 Bakken 和 Three Forks 储层从 1987 年至今的 10 583 口水平井压裂数据,对比发现重构井筒体积压裂井压后效果远远好于常规重复压裂井^[21] (图 2)。

近两年,国内水平井体积改造技术也在持续进步中,改造能力和水平又上新台阶。目前国内已完钻最长水平段 3 056 m,最高分压段数达到 30 段,最高施工排量 17.2 m³/min,单井最大加砂量和压裂液用量分别达到了 4 402 m³ 和 54 718 m³。

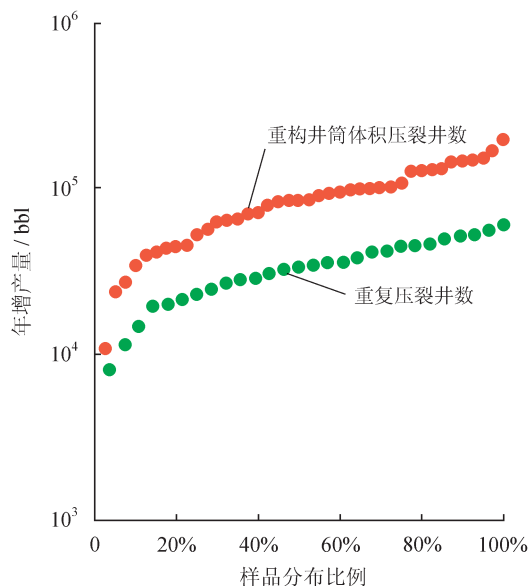
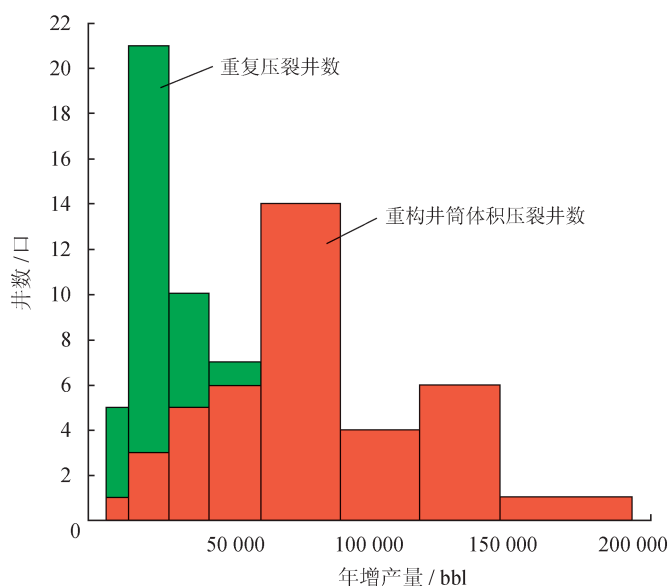


图 2 重构井筒体积压裂和常规重复压裂井效果对比图

注: 1 bbl=0.159 m³, 下同

4 水平井改造挑战及发展建议

针对未来“三低两高”(油气资源品质低、油价中低位徘徊、低渗透老油田采收率低;开发成本高、环保要求高)的勘探开发形势,水平井改造作为降本增效的重要技术,面临以下需求与挑战。

1) 资源劣质化加剧,新动用储量品质差,增储上产技术要求更高。目前中石油新投入开发的油田中,低渗透占主体,2014 年产量占比 40.3%。初步预测,

“十三五”期间低渗透(含致密油)原油探明地质储量将约占新增探明储量的 75%,另有大量低效已探明未开发地质储量待动用;低渗透、非常规天然气探明地质储量约占新增储量的 50%,另有大量低效已探明未开发地质储量待动用。将要投入开发的低品位储量巨大,对工程技术要求更高。

2) 已动用储量持续高产稳产难度大,预期国际油价一段时间内在中低位徘徊。2014 年 6 月以来,国际油价从最高 107.6 美元 /bbl 快速下滑,2016 年

一度跌破 30 美元/桶。从目前来看,“十三五”期间油价保持中低位的可能性较大。与此同时,中石油占产量近 50% 的已开发老油田进入高含水期,综合含水达到 92.4%,随着开采难度加大,中石油的单井产量持续降低。近年来,正是水平井的大规模应用才使得单井平均产量得以稳定,多井低产趋势有所减缓。特别是在低油价形势下,水平井改造技术在低渗老油气田调整挖潜、老油田的二次开发中,有较大的应用前景与技术需求。

3) 国内安全环保标准日益提高,对技术水平及实施标准要求更高。2015 年 1 月 1 日起实施的新《中华人民共和国环境保护法》,号称史上最严环保法。对压裂液、酸液“不落地”要求更为严苛,一旦发生污染,将面临“按日计罚、上不封顶”的处罚,拒不执行者可行政拘留。

针对上述挑战,提出了水平井改造技术攻关的 4 点建议:

1) 开展新区高密度完井压裂工程试验,优化压裂材料成本,实现水平井开发的提产提效。北美针对非常规储层,不断深化发展裂缝控藏的体积改造技术,实现“缝控储量”,提升了开发效果。因此,应推动开展高密度完井压裂现场试验,其核心是优化合理的布井方案和压裂段长、缝距。一方面注重布井优化,压裂改造充分和油藏相结合,缩小井间距;另一方面采用更长水平井段、更小裂缝间距、较短裂缝长度的改造主体技术思路。同时加大支撑剂用量,使用石英砂替代陶粒同时简化滑溜水组成并提高滑溜水比例甚至全程滑溜水,降本同时提高改造效果。

2) 开展老区老井水平井重复压裂试验,焕发老井青春,提高单井产量和累积产量。低渗透油气藏储层纵向非均质性强、平面连通性差,导致油气井对储量不能充分控制,这是采收率偏低的重要原因。在低油价下,应充分利用水平井改造技术进行老井挖潜,在平面连通性差、剩余油气分布规律认识清楚的油气田,重点探索并应用侧钻水平井改造技术;同时积极攻关水平井体积重复压裂技术,提高波及体积和剩余油动用程度。

3) 加大体积改造向常规低渗油气藏拓展,实施“常规提产”工程,更大力度发挥其在增产中的作用。体积改造技术在地质条件极为苛刻的非常规油气藏开发中已经取得显著应用成效。若应用到地质条件相对较好的低渗油气藏开发中,通过适度规模水平井改造,人工干预重构储层渗流场,将大幅度提高单井产量和采收率,技术已在北美得到有效应用。美国

粉河盆地(Powder River Basin)采用水平井体积改造技术开发渗透率大于 1 mD 的低渗透油藏后,产量从 2009 年 3.8×10^4 bbl/d 上升到 2014 年 7.8×10^4 bbl/d^[22];二叠系盆地的 Bone Spring 低渗透油藏(渗透率介于 0.5 ~ 7.2 mD)采用水平井体积改造技术,产量也从 2009 年 3.1×10^4 bbl/d 上升到 2014 年 17.2×10^4 bbl/d^[23]。国内部分油田已开展探索试验,今后应组织强有力攻关与推进。

4) 持续开展水平井改造技术攻关。对比国内外水平井体积改造技术的发展现状,可以看出国内与国外先进水平对比,在改造能力和水平方面仍有较大差距^[24],因此应不断学习国外最新技术和先进经验,重点开展地质工程改造一体化平台、新型环保压裂材料及工具、精细压裂优化技术、压裂裂缝测试技术以及不同类型油气藏水平井高效压裂技术、以水平井改造为核心的油气藏开发技术等研究。

综上所述,水平井体积改造技术进入了关键发展时期,需要调整技术路线,加大该技术向常规低渗油气的延伸,分别设立新区“高密度完井”、老区“重复压裂”“常规提产”等 3 大工程的大项目技术攻关和选区试验,进一步提高单井产量,破解低油价难题,实现效益发展。

参 考 文 献

- [1] Warpinski NR, Mayerhofer MJ, Vincent MC, Cipolla CL & Lolon E. Stimulating unconventional reservoirs: Maximizing network growth while optimizing fracture conductivity[C]//SPE Unconventional Reservoirs Conference, 10-12 February 2008, Keystone, Colorado, USA. DOI: <http://dx.doi.org/10.2118/114173-MS>.
- [2] McDaniel BW & Rispler KA. Horizontal wells with multistage fracs prove to be best economic completion for many low-permeability reservoirs[C]//SPE Eastern Regional Meeting, 23-25 September 2009, Charleston, West Virginia, USA. DOI: <http://dx.doi.org/10.2118/125903-MS>.
- [3] Sieminski A. International energy outlook[EB/OL]. (2014-09-18). https://www.eia.gov/pressroom/presentations/sieminski_11182014.pdf.
- [4] Dennis D. Thirty years of gas-shale fracturing: What have we learned?[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 19-22 September 2010, Florence, Italy. DOI: <http://dx.doi.org/10.2118/133459-MS>.
- [5] Mullen J, Lowry JC and Nwabuoku KC. Lessons learned developing the Eagle Ford shale tight gas[C]//SPE Completions Conference, 2-3 November 2010, San Antonio, Texas, USA. DOI: <http://dx.doi.org/10.2118/138446-MS>.
- [6] 丁庆新,侯世红,杜鑫芳,王文明.国内水平井压裂技术研究

- 进展[J]. 石油机械, 2016, 44(12): 78-82.
- Ding Qingxin, Hou Shihong, Du Xinfang & Wang Wenming. Advance of horizontal well fracturing technology in China[J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44(12): 78-82.
- [7] 石晓闪, 刘大安, 崔振东, 孙波, 唐铁吾. 页岩气开采压裂技术分析思考[J]. 天然气勘探与开发, 2015, 38(3): 62-65.
- Shi Xiaoshan, Liu Da'an, Cui Zhendong, Sun Bo & Tang Tiewu. Fracturing technology for shale gas[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2015, 38(3): 62-65.
- [8] 曹海燕, 冯波, 苏腾飞, 张余贵, 张艳勋, 董爱粉. 易钻桥塞的研制与室内试验[J]. 石油机械, 2016, 44(6): 78-82.
- Cao Haiyan, Feng Bo, Su Tengfei, Zhang Yugui, Zhang Yanxun & Dong Aifen. Development and laboratory tests of easy drillable bridge plug[J]. China Petroleum Machinery, 2016, 44(6): 78-82.
- [9] 吴奇, 胥云, 王腾飞, 王晓泉. 增产改造理念的重大变革: 体积改造技术概论[J]. 天然气工业, 2011, 31(4): 7-12.
- Wu Qi, Xu Yun, Wang Tengfei & Wang Xiaoquan. The revolution of reservoir stimulation: An introduction of volume fracturing[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(4): 7-12.
- [10] 吴奇, 胥云, 王晓泉, 王腾飞, 张守良. 非常规油气藏体积改造技术——内涵、优化设计与实现[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 252-258.
- Wu Qi, Xu Yun, Wang Xiaoquan, Wang Tengfei & Zhang Shouliang. Volume fracturing technology of unconventional reservoirs: Connotation, optimization design and implementation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 252-258.
- [11] 吴奇, 胥云, 张守良, 王腾飞, 管保山, 吴国涛, 等. 非常规油气藏体积改造技术核心理论与优化设计关键[J]. 石油学报, 2014, 35(4): 706-714.
- Wu Qi, Xu Yun, Zhang Shouliang, Wang Tengfei, Guan Baoshan, Wu Guotao, et al. The core theories and key optimization designs of volume stimulation technology for unconventional reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(4): 706-714.
- [12] 郭廷亮, 王海东, 黄明林, 马自强, 米硕, 刘江. 超深井微地震监测用声源发生装置的研制[J]. 石油机械, 2015, 43(5): 101-103.
- Guo Tingliang, Wang Haidong, Huang Minglin, Ma Ziqiang, Mi Shuo & Liu Jiang. Development of acoustic source generating device for micro-seismic monitoring of super-deep wells[J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(5): 101-103.
- [13] 田中兰, 付永强. 美国页岩气工程技术新进展考察报告[R]. 北京: 中国石油钻井工程技术研究院, 2016: 40-45.
- Tian Zhonglan & Fu Yongqiang. The latest progress report of drilling and fracturing technology in US[R]. Beijing: CNPC Drilling Technology Institute, 2016: 40-45.
- [14] Xiong Hongjie. Witness Permian basin unconventional resource play development booming[R]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [15] Oruganti Y, Mittal R, McBurney CJ & Garza AR. Re-fracturing in Eagle Ford and Bakken to increase reserves and generate incremental NPV: Field study[C]//SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, 3-5 February 2015, The Woodlands, Texas, USA. DOI: <http://dx.doi.org/10.2118/173340-MS>.
- [16] Asala HI, Ahmadi M & Taleghan AD. Why re-fracturing works and under what conditions[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 26-28 September 2016, Dubai, UAE. DOI: <http://dx.doi.org/10.2118/181516-MS>.
- [17] Todd HB & Evans JG. Improved oil recovery IOR pilot projects in the Bakken formation[C]//SPE Low Perm Symposium, 5-6 May 2016, Denver, Colorado, USA. DOI: <http://dx.doi.org/10.2118/180270-MS>.
- [18] Akinluyi O & Hazlett R. EOR potential for lean gas reinjection in zipper fracs in liquid-rich basins[C]//SPE Improved Oil Recovery Conference, 11-13 April 2016, Tulsa, Oklahoma, USA. DOI: <http://dx.doi.org/10.2118/179577-MS>.
- [19] Wang Dongmei, Dawson M, Butler R, Zhang J & Olatunji K. Optimizing water chemistry to improve oil recovery from the middle Bakken formation[C]//SPE Improved Oil Recovery Conference, 11-13 April 2016, Tulsa, Oklahoma, USA. DOI: <http://dx.doi.org/10.2118/179541-MS>.
- [20] Enventure. Enventure Global Technology and Vorp Energy Solutions announce a strategic collaboration focused on the re-frac market[EB/OL]. (2015-08-31). <http://www.enventuregt.com/en/news-resources/news/enventure-global-technology-and-vorp-energy-solutions-announce-strategic>.
- [21] Gullickson G, Ruhle W & Cook PF. The lexicon of recompletion: Empirical justification for refrac, reentry, or remediation in the Bakken/Three Forks Play[C]//SPE Western Regional Meeting, 23-26 May 2016, Anchorage, Alaska, USA. DOI: <http://dx.doi.org/10.2118/180414-MS>.
- [22] Ruhle W & Orth J. Production trends from the exploitation of horizontal completions in the Upper Cretaceous formations of the Powder River Basin: A look back on five years of development[C]//SPE/CSUR Unconventional Resources Conference, 20-22 October 2015, Calgary, Alberta, Canada. DOI: <http://dx.doi.org/10.2118/175957-MS>.
- [23] Carrasco A, DeGeare J & Hunter J. Achieving a more efficient frac network for horizontal development of the Bone Spring sandstone[C]//SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, 4-6 February 2014, The Woodlands, Texas, USA. DOI: <http://dx.doi.org/10.2118/168633-MS>.
- [24] 翁定为, 付海峰, 梁宏波. 水力压裂设计的新模型和新方法[J]. 天然气工业, 2016, 36(3): 49-54.
- Weng Dingwei, Fu Haifeng & Liang Hongbo. New models and methods for hydraulic fracturing design[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(3): 49-54.

(修改回稿日期 2017-07-05 编辑 凌忠)