

页岩气“井工厂”钻井技术现状及展望

陈 平, 刘 阳, 马天寿

(油气藏地质及开发工程国家重点实验室(西南石油大学), 四川成都 610500)

摘 要:“井工厂”技术可以缩短建井周期,降低钻井成本,大幅度提高资源及设备利用率,在页岩气等低渗透、低品位非常规油气资源开发中具有显著的技术优势,并在北美页岩气开发中获得成功应用。在国外文献调研的基础上,介绍了国内外“井工厂”钻井技术现状,详细分析了页岩气“井工厂”关键技术,总结了“井工厂”钻井技术的特点,并指出国内现有的技术储备、配套设备及工具等还不能完全满足“井工厂”作业的需求,还没有形成一套完整的“井工厂”施工及评价标准。因此,建议树立全过程成本控制理念,吸收我国海洋平台钻井技术和致密气藏“井工厂”开发模式的成功经验,针对性地开展个性化工具及配套技术的研发,尽快形成我国页岩气“井工厂”钻井技术的行业标准和钻后评价体系。

关键词:页岩气 井工厂 钻井 钻井设备 行业标准

中图分类号:TE21 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2014)03-0001-07

Status and Prospect of Multi-Well Pad Drilling Technology in Shale Gas

Chen Ping, Liu Yang, Ma Tianshou

(State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation(Southwest Petroleum University), Chengdu, Sichuan, 610500, China)

Abstract: Multi-well pad drilling can shorten well construction period, reduce drilling cost and substantially improve the utilization rate of resources and equipment. It has obvious technical advantages especially in the development of shale gas, a typical unconventional resources of low abundance and low grade, and has gained popularities in North America. In order to use multi-well pad techniques in China's shale gas development as soon as possible, this paper introduced the multi-well pad drilling status worldwide, analyzed key factors influencing multi-well pad techniques' implementation, and systematically summarized the characteristics of multi-well pad drilling. It indicates that the existing techniques, supporting facilities and downhole tools can not completely meet the demand of multi-well pad operation, and well pad operation and evaluation standards have not been defined. Therefore, it was recommended that the whole process of cost control concept should be set up, and the successful experiences in offshore drilling and tight gas reservoir factory development mode should be adapted. Meanwhile, research on specified tools and supporting techniques should be done, and well pad drilling operation standards and post drilling evaluation system should be set up.

Key words: shale gas; multi-well pad; drilling; drilling equipment; industrial standard

近年来,国内外对页岩气勘探开发力度逐步加大。北美页岩气“井工厂”开发模式表明,“井工厂”技术能够有效提高作业效率,缩短投产周期,降低开发成本。“井工厂”钻井技术作为“井工厂”技术的重要组成部分,在页岩气高效开发过程中发挥着重要作用。“井工厂”钻井是以丛式水平井组的安全、快

收稿日期:2013-11-03;**改回日期:**2014-03-14。

作者简介:陈平(1952—),男,四川成都人,1982年毕业于西南石油学院钻井工程专业,教授,博士生导师,主要从事定向井、丛式井、水平井、侧钻水平井等钻井技术研究工作。

联系方式:(028)83032707, chenping@swpu.edu.cn.

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目“页岩气水平井钻完井关键基础研究”(编号:2013CB228003)部分研究内容。

速、高效钻井为目标,采用一系列先进的钻完井技术和装备,利用可重复的井眼设计和对井下风险情况的有效控制,实现高效低成本钻井的一种作业方式。借鉴北美页岩气成功钻井经验,结合国内页岩气藏储层特征和钻井现状,开展了国内页岩气“井工厂”钻井关键技术研究,以促进我国页岩气商业化开发。

1 “井工厂”钻井技术现状

页岩气开发经历了直井、水平井、分支井、丛式井、“井工厂”开发的发展历程。2002年以前,页岩气开发主要采用直井和水力压裂技术;2002年,美国在开发 Barnett 页岩时开始试验应用水平井和水力压裂技术,显著提高了气井产量,且不明显增加开发成本。随后,为进一步降低成本,减少环境和生态影响,提高资源及设备利用率,将“井工厂”理念引入页岩气开发,提出建立标准化作业的“井工厂”开发模式,以期通过全过程精细控制实现页岩气开发规模效益化,拉开了页岩气“井工厂”开发的帷幕^[1-2]。目前,美国致密砂岩气、页岩气开发,加拿大页岩油气开发,墨西哥湾及巴西深水油田开发等均采用“井工厂”技术^[3]。美国 Marcellus 页岩气区自 2007 年采用“井工厂”技术后,垂深 2 500 m、水平段长 1 300 m 的水平井钻井周期仅为 27 d,2011 年该气区超过 78% 的井采用“井工厂”开发模式;加拿大 Ground-birch 页岩气开发中采用了“井工厂”技术,单个井场布井 24 口,钻井过程中通过运用学习曲线法则,单井钻井周期从前期的约 40.0 d 降至 9.8 d,单井平均使用钻头数量从 17 只降至 3 只,极大地缩短了钻井周期、降低了钻井成本。

我国在早期海洋石油钻井过程中,受作业平台面积限制,广泛应用了丛式井钻井技术,形成了“井工厂”钻井技术的雏形。近年来,陆上油气田在页岩气、低渗透天然气等非常规油气资源开发中,逐步探索应用“井工厂”作业模式。2011 年以来,中国石化在鄂尔多斯大牛地气田和胜利油田非常规区块、涪陵页岩气示范区等开展了“井工厂”作业模式的探索与研究,取得了阶段性成果,初步形成了适合地区特点的“井工厂”作业模式^[3]。2012 年以来,中国石油先后在苏里格南合作区、苏里格气田苏 53 区块以及威远-长宁页岩气示范区等进行了“井工厂”作业模式的探索与实践,其中,苏里格南合作区“井工厂”作业模式的应用最为成熟。

2 页岩气“井工厂”钻井关键技术

页岩气“井工厂”钻井关键技术主要包括:复杂地表环境下井场地面布局及地下立体井网的优化设计,三维丛式水平井组井眼轨道设计与井眼轨迹控制,重复风险控制,钻井液技术和长水平段固井技术等^[4]。

2.1 井场布局及井网优化

国外“井工厂”钻井普遍采用丛式水平井组的钻井方式,井场布置和井网优化是其关键问题之一^[5],直接影响着钻完井效率、储层改造效果以及投产周期。国外针对“井工厂”钻井的井场合理布局问题,提出对钻井施工(包括钻前施工、材料供给、钻机移动、电力供给等)、储层改造(包括通井、洗井、试压等)和油气井维护等进行系统优化,强调各施工环节间的连续性和可调整性^[6-7],同时利用三维地震技术对水平井进行立体化部署。Horn River 页岩气区“井工厂”钻井井场布置情况如图 1 所示,该井场采用排状井网布井,每一井排包括 12 口井,井槽间距为 8 m,圆井深度为 5 m,确保采油树总成能完全坐落于圆井中而不影响地面钻机移动。

曾保全等人利用数值模拟方法进行了布井方式研究^[8],结果表明(见图 2),排状正对井网略优于其他 2 种井网形态;同时,排状正对井网有利于实现“井工厂”钻井,且能通过学习曲线法则提高待钻井眼的钻井效率,也便于管理和后期调整,因此,“井工厂”钻井宜选用排状正对井网。

2.2 三维水平井轨道设计与井眼轨迹控制

国外丛式水平井设计经验表明,水平井组井口距离为 3~5 m,水平段间距为 150~200 m,需要设计大靶前位移三维水平井,以满足井网部署要求^[7-8]。目前国内大靶前位移三维水平井轨道设计主要存在以下难点^[9]:1)缺乏行业设计标准,相关参数设计缺乏依据,如方位变化率等;2)因扭方位引起井眼轨迹控制难度增大,井眼质量变差,井眼净化困难等;3)摩阻扭矩大,井眼轨道优化困难。

大靶前位移三维水平井井眼水平投影如图 3 所示,靶点 A 和靶点 B 与井口坐标不共线,OD 为偏移距,OA 为水平段的靶前位移,AD 为实际有效靶前位移, φ 为水平井设计方位角, φ_A 与 φ_B 分别为靶点 A 与靶点 B 的闭合方位。国外提出按生产全过

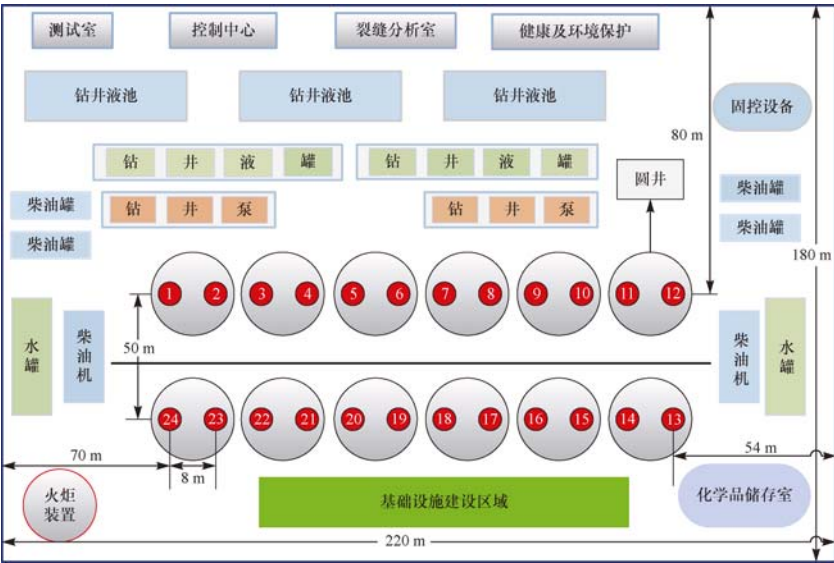


图 1 Horn River 页岩气区“井工厂”作业井场布局

Fig. 1 The diagram of a typical factory well site layout in Horn River area

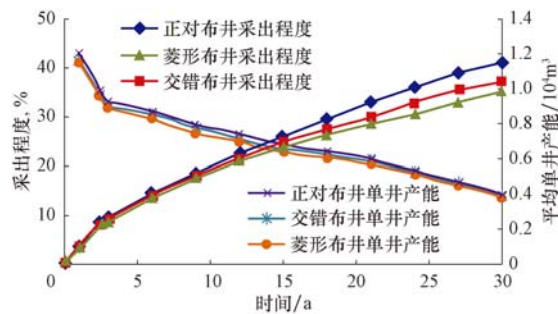


图 2 不同布井方式数值模拟结果

Fig. 2 Numeric simulation results of different well pattern

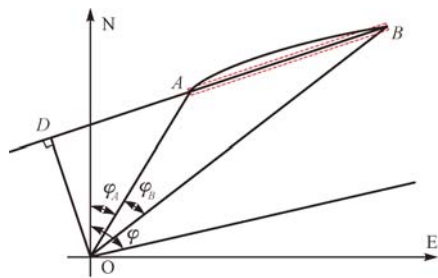


图 3 大靶前位移三维水平井井眼水平投影图

Fig. 3 The horizontal projection of large offset horizontal well

程进行一体化设计的思路,利用三维地震资料进行井眼轨道设计,并在有利甜点区内结合伽马射线和密度测井数据进行轨道优化设计。井眼轨道设计要满足钻完井工程、储层改造要求,利用高造斜率旋转导向系统和随钻测井近钻头地质导向工具实现井眼轨迹的平滑与实时控制,确保在目标区内钻

井^[10-11]。井眼轨道设计为“勺形”井眼,以使水平段长度和储层接触面积尽可能大,且水平段微微上翘,便于排水。

长宁-威远页岩气示范区也开展了丛式水平井组的设计与施工,利用测井、地震、压裂等资料获得目标区地应力特征,井眼轨道设计兼顾井壁稳定和储层改造要求,提出水平段井眼轨迹沿最小水平主应力方向延伸和与最小水平主应力方向夹角为 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 的方向延伸 2 套方案。设计造斜率为 $(5^{\circ}\sim 8^{\circ})/30\text{ m}$,采用井下动力钻具+MWD+伽马导向钻井技术,降低长水平段水平井作业成本,提高对储层地质不确定性的应对能力。同时,为避免丛式井组水平井眼相碰,在上部井段实行预造斜,使两井间距不小于安全距离,初步形成了三维井眼轨道优化设计及控制技术。

2.3 重复风险控制

风险控制的基本原理是学习曲线法则,即在一个合理的时间段内,连续进行固定模式的重复工作,工作效率会按照一定的比率递增,使单位任务量耗时呈现出明显的递减趋势^[12-13]。“井工厂”钻井技术作为标准化的作业模式,所钻井眼地质特征、井眼轨道、施工参数、工作液性能等均具有一定的相似性。因此,通过重复风险控制,既有利于提高钻井作业的熟练程度和效率,又便于利用邻井钻井资料对待钻井进行优化设计,确保钻井风险最低,有效降低单井钻井成本。

2.4 钻井液技术

目前,国内外页岩气开发主要应用油基钻井液和合成基钻井液,在防止页岩地层、尤其对软泥页岩地层^[14]井壁失稳方面具有一定的优势。其优势表现在:1)抑制性强,能防止和减少水敏性地层的水化、膨胀、分散而引起的井壁垮塌;2)在钻遇石膏层、盐层及水泥塞时,具有较强的抗 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 等离子污染的能力;3)由于以油为外相,油基钻井液润湿效果较好,能大大降低钻进及起下钻时的扭矩及阻力,减少井下故障;4)对钻井设备无腐蚀;5)具有极好的油气层保护性能;6)滤失速率较小,滤液基本不会引起黏土矿物水化膨胀;7)滤液进入亲水型硬脆性泥页岩阻力大,能较好地稳定泥页岩地层。需强调的是,对层理发育的页岩地层,可能引起塌漏共存问题,必须采取有效的封堵措施,但封堵材料可能影响MWD的信号传递。

相比油基钻井液,水基钻井液更环保且成本低,具有很好的应用前景^[15]。水基钻井液在硬脆性泥页岩地层适应性良好,其技术关键是:抑制性、封堵性、润滑性、稳定性以及井眼清洁能力。国外仿油基钻井液的水基钻井液研制已取得了阶段性成果,研发了PERFORMAX、SHALEDRIIL-H、SHALEDRIIL-B和甲基葡萄糖苷等多种水基钻井液^[16-17],并成功应用于Barnett、Haynesville等页岩区钻井。我国在长宁页岩气区钻井中也开展了水基钻井液的研究与试验应用,但钻至造斜段(井斜角为 60°)时换用油基钻井液,水基钻井液配方为:3.00%膨润土+0.40%KOH+0.20%PAC-LV+4.00%SMP-2+2.00%RSTF+2.00%KHm+3.00%封堵剂A+1.00%CaO+4.00%RH-220+7.00%KCl+650g重晶石+3.00%超细碳酸钙+3.00%封堵剂B。

2.5 长水平段固井技术

调研分析Barnett等北美页岩气区水平井固井技术资料发现,固井过程中普遍存在的技术难题为:1)油基钻井液置换及界面清洗困难;2)套管串安全下入和套管居中难度大;3)对水泥浆性能要求高;4)提高顶替效率难度大。

为了高效清除附着在井壁上的油基钻井液,国外在研制高效表面活性剂的基础上,开发了一系列性能优良的前置液^[18],如Ronald的可固化隔离液、Nilsson的冲洗用表面活性剂体系和S. L. Berr的乳化解离液等。国内适用于油基钻井液的前置液的研究

刚刚起步,目前缺乏性能优良、成熟的前置液,谭春勤等人开发的润湿反转前置液可基本满足部分地区页岩气水平井固井要求^[19]。

在水泥浆方面,国外以保证层间封隔和水泥环完整性为目标,开发了多种水泥浆^[20-21],包括泡沫水泥浆、酸溶性水泥浆、泡沫酸溶性水泥浆以及火山灰+H级水泥浆等。同时,针对地层破裂压力低引起井漏和完井后套管带压等情况,研发了低密度水泥浆、膨胀柔性水泥浆等。国内页岩气水平井固井主要应用弹韧性水泥浆^[22],其配方为:G级高抗水泥+5.00% SFP-1+0.10% DZH+1.5% DZS+6.00% FSAM+0.20% SFP-2+44.00%水。

在固井工艺方面,国内外均从套管串安全下入能力、提高套管居中度和顶替效率等方面进行了研究^[23],先后提出了水平段安装套管滚轮扶正器、套管漂浮技术、套管抬头下入等工艺技术,来降低水平段下套管的摩阻,但仍不能满足固井需要。目前,迫切需要研发能够主动适应储层特性、满足开采要求的低成本个性化固井工具及配套技术。

2.6 “井工厂”钻井关键设备及工具

确保“井工厂”钻井作业顺利实施的主要设备包括:快速移动钻机和先进的导向钻井工具。

2.6.1 快速移动钻机

北美页岩气藏埋深各异,多数页岩气藏埋深1 000~2 500 m,少数气藏埋深超过3 000 m,且作业区地势平坦,因此北美地区快速移动钻机的钻深能力较小,但灵活度更强。目前,北美地区自动化钻机按移动方式分为滑移式钻机和行走式钻机^[24]。滑移式钻机包括Savanna移动钻机、Versa-Rig300钻机、Rack and Pinion钻机和Sparta模块式钻机等,行走式钻机包括GES型8向行走钻机、Nabors快速移动钻机、Landshark快速移动钻机、Flex rig陆地钻机和APEX等。2009年问世的Savanna钻机的钻深能力超过4 000 m,在北美深部页岩区具有广泛的作业优势,目前有650、651、652E和653E等4种型号。快速移动钻机的技术优点为:1)钻机实现全过程交流电自动控制,作业安全性全面提高;2)钻机运移速度达12.19 m/h,仅需1.5 h便可从一个井位移动到另一井位;3)钻机具有集成滑移系统、自动送钻系统、自动化坡道及自动化电脑监测控制与诊断系统等配套设施,作业效率显著提升。

2.6.2 导向钻井工具

“井工厂”作业模式对井眼轨道设计及井眼轨迹控制的要求很高,页岩气水平井水平段较长(一般为1 000~1 500 m),钻井作业中存在井眼质量差、摩阻扭矩大、机械钻速较低等问题。因此,必须采用性能优良的低成本导向钻井工具,以满足井眼轨迹实时精确控制的要求,降低单井作业成本。国外油田服务公司在高造斜率、低成本导向工具研发方面已取得突破性进展,相继推出了 PowerDrive Archer RSS 系列和 Motary Steerable 定向控制系统。

PowerDrive Archer RSS 的技术创新体现在以下几方面:1)具备与传统容积式马达相媲美的超高造斜率(达 $17^{\circ}/30\text{m}$),在井眼轨道设计中可以进一步下移造斜点,使造斜段变短,水平段更长,从而增大油层泄油面积,提高气井产能;2)导向钻进时连续旋转,大大提高了井眼清洁能力,摩阻扭矩变小,有利于水平段延伸,且大幅降低了卡钻的风险,降低了单位进尺的钻井成本;3)造斜平稳,井眼光滑,有利于后期完井作业施工,且成本更低;4)为减少起下钻次数,进一步提高井眼质量和井眼清洁程度,缩短非生产时间,研发了专用的 Steel-body PDC 钻头,钻头使用寿命等各项指标得到优化^[25-26],在 Permian 盆地一口小井眼水平井应用中,一趟钻完成了造斜段和水平段的施工。

Motary Steerable 导向工具采用目标钻头速度(targeted bit speed, TBS)导向技术^[27],充分发挥了容积式马达和 MWD 的技术优势,可实现三维井眼轨迹的精确控制,显著缩短滑动钻进时间,改善井眼质量,降低长水平段水平井钻井成本。当造斜率为 $(0^{\circ}\sim 3^{\circ})/30\text{m}$ 时, TBS 技术可以取代旋转导向系统作为低成本导向技术;当造斜率较高时,又可快速实现模式转换,直至获得理想的造斜率。在 Bakken 页岩区一口长水平段水平井钻井中,试验应用了 Motary Steerable 导向工具,从井深2 870 m开始连续钻至井深5 984 m,进尺超过3 000 m,滑动钻进时间从30%降至8%,钻井时间缩短了7 d,节省钻井费用超过52万美元。

此外,还需配备移动式钻井液循环系统和固控设备,实现作业过程的连续性;配备离线作业设备,实现离线固井与测井,不占用钻机时间,提高设备利用率;配备工作液回收处理系统,实现钻井液、压裂液等工作液的回收利用,降低成本。

3 “井工厂”钻井技术主要特点

1) 标准化井场设计和地面工程建设使多口井共用同一生活设施和井场道路,有效减少了井场面积,降低了生态影响和地面工程建设成本。

2) 可实现批量钻井(依次钻开不同井的相同井段)、脱机作业(注水泥、候凝、测井过程分离)、远程控制、自动化作业、流水线作业等,从而有效提高设备利用率和钻井效率,减少非生产时间,缩减人员配备,减少因钻井周期长而带来的一系列井下故障。Fayetteville 页岩气区(埋深约为2 200 m)2007—2011年“井工厂”钻井情况的统计结果表明(见表1)^[28],通过学习曲线法则,钻井时间减少了52%,水平段长度增加了84%,但钻井成本未因水平段增长而增加,平均单井作业成本控制在280~300万美元。

表1 Fayetteville 页岩 2007—2011 年钻井情况统计结果

Table 1 The drilling results of Fayetteville shale in 2007—2011

年份	钻井时间/d	水平段长度/m	钻井成本/万美元
2007	17	810	280
2008	14	1 100	300
2009	12	1 250	290
2010	11	1 380	280
2011	8	1 500	280

3) 节约原材料,实现钻井液、完井液、压裂液等工作液的重复利用。统计表明,“井工厂”钻井作业可以实现废弃钻井液、废弃压裂液、天然放射物质等废物的综合处理和资源共享,钻井液回收利用率约为40%~50%,压裂液重复利用率约为25%。

4) 丛式井井场有利于进行多口井批量化压裂试气作业,通过采用拉链式作业模式,同一井场一口井压裂,一口井进行电缆桥塞射孔联作,2项作业交替进行并无缝衔接,提高了设备利用率,缩短了作业时间,实现了压裂的规模化和裂缝的网络化,极大地提高了压裂试气的效率,实现了效益的最大化。

4 我国页岩气“井工厂”钻井技术面临的技术瓶颈

我国通过几年来在川渝地区页岩气藏的勘探开发实践,已初步形成适合川渝地区页岩气藏开

发的“井工厂”技术,主要包括快速安全钻完井技术、储层改造技术和实时随钻监测与测量技术等,但与国外相比,还处在探索应用阶段,在配套装备仪器方面还存在明显的差距与不足。目前,我国“井工厂”钻井技术面临的主要技术瓶颈有:

1) 储层“甜点”区域识别和可靠的地质特征获取困难。“甜点”往往存在于页岩脆性较高、脆性指数较大的区域,同时又是钻井时储层易塌易漏层段,如何优选“甜点”并获取可靠的地质特征,成为丛式水平井组钻井所面临的一个重要的问题。目前解决这一难点的常用手段是采用随钻测井实时判别储层“甜点”区域,为井眼轨道设计和井眼轨迹控制提供依据;利用随钻成像测井判断井壁原生裂缝、诱导裂缝的分布及形态,有效识别断层,从而判断储层关联性。

2) 丛式井组地面布局和井网设计难度大,实践经验匮乏。“井工厂”钻井技术提高钻井效率、降低钻井成本的主要途径是可重复作业,即在同一井场同时进行多口井的钻完井施工。然而,我国页岩气区多分布在丘陵、山区,很难采取类似于国外的大规模井场布局。同时,井网设计参数缺乏可靠依据,很难降低井眼碰撞的风险。因此,地面布局和井网设计不仅要广泛借鉴和吸收国内外“井工厂”作业理念和经验,更要探索出适合我国页岩气开发的井场布局和井网设计模式。可考虑采用狭长(最大宽度小于60 m)、设备分区的柔性井场布局,以满足地面限制条件,并利用高分辨率的三维地震分析技术进行井位和井眼轨道优化。

3) 关键工具、材料对外依存度大,设备自动化程度低。快速移动钻机是顺利实施“井工厂”作业的关键设备,国外目前已研制出包括滑移式和行走式在内的多套自动化钻井设备,国内仍处于对陆地钻机的改装阶段;高造斜率旋转导向系统是提高钻井效率的重要工具,国内目前仍处于研发测试阶段,还不能为“井工厂”作业提供服务;在对关键设备及工具进行改装应用的同时,应全面开展钻完井工作液及工具研发,实现工作液和关键工具的国产化。

4) 缺乏指导“井工厂”施工所需的行业标准。我国页岩气储层的成藏条件较美国复杂,对页岩气开发最为前沿的技术和理念认识还比较粗浅,亟需对前期勘探开发经验进行系统的总结和分析。如何有效地判别某项技术是否适合特定条件下的页岩气储层,如何有效开展钻完井后期参数

评价,如何保证管理团队在“井工厂”作业运作过程中的可靠性,目前还没有统一的技术标准和规范。

5 我国“井工厂”钻井技术发展建议

1) 树立全过程成本控制理念,组建协同工作专家组,确保各环节高效安全运作。页岩气藏作为“三低”的非常规资源,新技术投入大,作业成本和投资风险普遍较高。因此,必须树立成本控制理念,从勘探评价、开发方案制定、地面工程建设到后期调整等方面精打细算,确保各项技术经济适用。同时,实现各环节数据资源共享和资源循环利用,通过协同工作专家组对施工参数进行评价,制定科学的调整方案,保证“井工厂”模式科学高效运行。

2) 借鉴吸收我国海洋平台钻井技术和苏里格致密气藏成功开发经验。国外“井工厂”技术已取得长足的发展,我国在学习借鉴国外“井工厂”先进技术的同时,也要不断总结分析国内的成功经验,如海洋平台丛式井钻井技术和苏里格模式,形成适应我国地质特征的页岩气“井工厂”开发模式。

3) 开展个性化工具及配套技术的研发。“井工厂”技术成功应用的关键是先进技术设备的推广,只有配备针对性强的工具及完整的技术链,才能满足页岩气藏“井工厂”技术的需求。

4) 尽快制定适应我国页岩气“井工厂”钻井的行业标准和钻后评价体系。“井工厂”技术是标准化、一体化和配套化的作业技术,标准化的施工方案是保障其高效优质施工的前提,如果缺少系统的指导方案,“井工厂”技术很难产生应有的施工效果。此外,亟需建立“井工厂”作业的钻后评价体系,通过钻后参数评价,优化和调整施工参数,进一步提高作业效率和开发效果。

参 考 文 献

References

- [1] 蒋恕. 页岩气开发地质理论创新与钻完井技术进步[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(3): 17-23.
Jiang Shu. Geological theory innovations and advances in drilling and completion technology for shale gas development[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(3): 17-23.
- [2] 路保平. 中国石化页岩气工程技术进步及展望[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(5): 1-8.

- Lu Baoping. Sinopec engineering technical advance and its developing tendency in shale gas[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2013, 41(5): 1-8.
- [3] 张金成, 孙连忠, 王甲昌, 等. “井工厂”技术在我国非常规油气开发中的应用[J]. *石油钻探技术*, 2014, 42(1): 20-25.
- Zhang Jincheng, Sun Lianzhong, Wang Jiachang, et al. Application of multi-well pad in unconventional oil and gas development in China[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2014, 42(1): 20-25.
- [4] Demong K L, Boulton K A, Elgar T, et al. The evolution of high density pad design and work flow in shale hydrocarbon developments[R]. SPE 165673, 2013.
- [5] 李文飞, 朱宽亮, 管志川, 等. 大型丛式井组平台位置优化方法[J]. *石油学报*, 2011, 32(1): 162-166.
- Li Wenfei, Zhu Kuanliang, Guan Zhichuan, et al. Location optimization for the drilling platform of large-scale cluster wells[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32(1): 162-166.
- [6] Poedjono B, Zabaldano J B, Shevchenko I, et al. Case studies in the application of pad design drilling in the Marcellus shale[R]. SPE 139045, 2010.
- [7] El Sayed Moustafa Radwan, Magdy Ahmed H Hozayen, Sabry Lotfy Mahmoud. Seismic attribute utilization for FFDP well placement optimization, upper cretaceous fractured complex carbonate reservoir, onshore oilfield, UAE [R]. SPE 166015, 2013.
- [8] 曾保全, 程林松, 齐梅, 等. 特低渗透油藏压裂水平井新型布井方式研究[J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2013, 35(2): 115-120.
- Zeng Baoquan, Cheng Linsong, Qi Mei, et al. Novel well pattern for fractured horizontal well in ultra-low permeability reservoir [J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2013, 35(2): 115-120.
- [9] 赵文彬. 大牛地气田 DP43 水平井组的井工厂钻井实践[J]. *天然气工业*, 2013, 33(6): 60-65.
- Zhao Wenbin. Drilling practice of a well plant in the cluster horizontal wells of DP43 in the Daniudi Gas Field, Ordos Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(6): 60-65.
- [10] Nye R, Tommaso D Di. Well optimization using a LWD spectral azimuthal gamma ray tool in unconventional reservoirs[R]. OMC 2013-137, 2013.
- [11] Azike O. Multi-well real-time 3D structure modeling and horizontal well placement: an innovative workflow for shale gas reservoirs[R]. SPE 148609, 2011.
- [12] Maggi P, Brister R, Beattie S. Advancing the learning curve in drilling with casing technology[R]. OTC 18270, 2006.
- [13] Alves I A S, Aragao A F L, Bastos B, et al. SS: Pre-Salt Santos Basin C: well construction learning curve acceleration[R]. OTC 20177, 2009.
- [14] Oleas A, Osuji C E, Chenevert M E, et al. Entrance pressure of oil based mud into shale: effect of shale water activity and mud properties[R]. SPE 116364, 2008.
- [15] Young S, Friedheim J. Environmentally friendly drilling fluids for unconventional shale[R]. OMC 2013-102, 2013.
- [16] Meghan R, Emanuel S, Katherine P, et al. Novel water based mud for shale gas part II: mud formulation and performance [R]. SPE 152945, 2013.
- [17] Witthayapanyanon A, Leleux J, Vuillemet J, et al. High performance water-based drilling fluids-an environmentally friendly fluid system achieving superior shale stabilization while meeting discharge requirement offshore Cameroon[R]. SPE 163502, 2013.
- [18] 辜涛, 李明, 魏周胜, 等. 页岩气水平井固井技术研究进展[J]. *钻井液与完井液*, 2013, 30(4): 75-80.
- Gu Tao, Li Ming, Wei Zhousheng, et al. The research progress of shale gas horizontal well cementing technology[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2013, 30(4): 75-80.
- [19] 谭春勤, 丁士东, 刘伟, 等. 页岩气水平井固井技术难点分析与对策//《2012 年固井技术研讨会论文集》编委会. 2012 年固井技术研讨会论文集[C]. 北京: 石油工业出版社, 2012: 20-28.
- Tan Chunqin, Ding Shidong, Liu Wei, et al. Difficulty and countermeasures of shale gas horizontal well cementing technology //Editorial board of the cementing technology symposium proceedings. The cementing technology symposium proceedings [C]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012: 20-28.
- [20] Alane B J, Thomas W J, Lynne S F, et al. Focus on cement design and job execution increases success for shale cementing operations[R]. SPE 155757, 2012.
- [21] Williams R H, Khatri D K, Keese R F, et al. Flexible, expanding cement system (FECS) successfully provides zonal isolation across Marcellus shale gas trends[R]. SPE 149440, 2011.
- [22] 谭春勤, 刘伟, 丁士东, 等. SFP 弹性水泥浆体系在页岩气井中的应用[J]. *石油钻探技术*, 2011, 39(3): 53-56.
- Tan Chunqin, Liu Wei, Ding Shidong, et al. Application of SFP elasto-toughness slurry in shale gas well[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2011, 39(3): 53-56.
- [23] 闫联国, 周玉仓, 彭页 HF-1 页岩气井水平段固井技术[J]. *石油钻探技术*, 2012, 40(4): 47-51.
- Yan Lianguo, Zhou Yucang. Horizontal well cementing technology of shale gas Well Pengye HF-1[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2012, 40(4): 47-51.
- [24] 夏家祥, 韩烈祥, 朱丽华, 等. 北美移动钻机技术现状[J]. *钻采工艺*, 2013, 36(4): 1-5.
- Xia Jiaxiang, Han Liexiang, Zhu Lihua, et al. The technical status of portable rig in North America[J]. *Drilling & Production Technology*, 2013, 36(4): 1-5.
- [25] Sulaiman A, Sumaida B. Systematic approach to optimize the rig move within Adco onshore field[R]. SPE 166781, 2013.
- [26] Peytchev P A, Crighton A, Upadhyay A, et al. Rapid rig design-a cost effective innovative design for field development [R]. SPE 148608, 2011.
- [27] Bassarath W D, Maranuk C A. Application of targeted bit speed (TBS) technology to optimize Bakken shale drilling [R]. SPE 163406, 2013.
- [28] Alexander T, Baihly J, Boyer C, et al. 页岩气革命[J]. *油田新技术*, 2011, 23(3): 40-55.
- Alexander T, Baihly J, Boyer C, et al. The shale gas revolution [J]. *New Technology of Oilfield*, 2011, 23(3): 40-55.