

中国石化页岩气工程技术进步及展望

路保平

(中国石化石油工程技术研究院,北京 100101)

摘 要:中国石化通过持续的攻关研究,形成了具有自主知识产权的页岩气工程配套技术,具备了页岩气水平井水平段长 2 000 m、分段压裂 20 段以上的钻完井与压裂设计、施工能力,并实现了涪陵等地区页岩气资源勘探突破,促进了中国石化页岩气勘探开发进程。全面介绍了中国石化页岩气工程地质环境描述技术、优快钻井及井工厂技术、LVHS 油基钻井液体系、SPF 弹塑性水泥浆固井技术、分段压裂关键配套工具、滑溜水压裂液体系、页岩气水平井分段压裂技术和页岩气技术装备研发等技术及应用现状,并指出了未来页岩气工程技术的五大发展趋势。

关键词:页岩气 工程技术 水平井 分段压裂 发展趋势 中国石化

中图分类号:TE24 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2013)05-0001-08

Sinopec Engineering Technical Advance and Its Developing Tendency in Shale Gas

Lu Baoping

(Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 100101, China)

Abstract: Through years of research work, Sinopec formed its shale gas development supporting techniques with intellectual property rights and have the capability in drilling, completion and hydraulic fracturing design and application for staged horizontal well with lateral length 2 000 m and over 20 stages. Those techniques have been applied and some breakthroughs have been made in shale gas' exploration in areas such as Fuling. Those techniques application are helping to promote shale gas' exploration and development of Sinopec. This paper introduced the techniques in geological description, fast drilling and well plant, LVHS oil based drilling fluid, SPF elastic and plastic cementing slurry, staged hydraulic fracturing tool, slick water system, staged fracturing and instrumentations and pointed out the tendencies in shale gas exploration and development as engineering operation standardization and integration, secure and low cost drilling, more effective hydraulic fracturing, emphasis on environment protection and waterless fracturing.

Key words: shale gas; engineering techniques; horizontal well; staged fracturing; development tendency; Sinopec

页岩油气开采已成为全球油气资源开发的一个热点,美国是全球最早开发页岩气资源的国家,页岩气革命使其页岩气得以经济有效开发,年产量由 1998 年的 $104.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 跃升到 2012 年的约 $2700 \times 10^8 \text{ m}^3$,占其当年天然气产量的 40% 左右。国际石油界普遍认为页岩气革命发生的主要原因是得益于工程技术的发展与进步,特别是水平井钻完井工艺和水平井分段压裂技术的推广应用^[1-6]。

中国拥有丰富的页岩气资源,自 2000 年开始跟踪国际页岩气勘探开发进展,2004 年启动国内页岩

气资源调查,2006 年中国石油集团公司与美国新田石油公司联合开展了四川盆地威远气田页岩气资源

收稿日期:2013-09-10;**改回日期:**2013-09-20。

作者简介:路保平(1962—),男,1982 年毕业于华东石油学院钻井专业,2001 年获石油大学(北京)博士学位,教授级高工,国家级中青年专家,主要从事石油工程技术科研及管理工作。系本刊编委会主任。

联系方式:(010)84988676, lubp. sripe@sinopec.com。

基金项目:中国石化“十条龙”科技攻关项目“涪陵区块页岩油气勘探开发关键技术”及中国石化科技攻关项目“页岩气‘井工厂’技术研究”(编号:P13023)部分研究内容。

评价,2008年国土资源部设立了页岩气项目“中国重点地区页岩气资源潜力及有利区带优选”,2009年完成了第一口页岩气评价井——威201井,正式开启了我国页岩气勘探开发的序幕^[7-8]。截至2012年底,已经完钻页岩油气井60余口,约30口井经压裂获工业气流。但是,我国页岩油气勘探开发仍处于起步阶段,钻完井周期长、压裂改造效果不理想、开发成本高等问题普遍存在,还未达到经济有效开发的效果。其主要原因:一是中美页岩油气资源地质特征及地表条件等方面的差异,国外现有技术不能完全适应于我国的地质情况;二是我国还没有掌握经济有效实用的页岩油气核心工程技术。因此我们在学习国外先进技术的同时,应加快研发适应我国地质特征的页岩气工程技术,推进我国的页岩气资源勘探开发进程。

中石化自开展页岩气勘探开发工作以来,为加快进程、实现页岩气的高效开发,在引进应用国外页岩气工程技术的同时,非常重视页岩气工程技术的自主研发与应用,逐步形成了以钻井、钻井液、固完井、分段压裂、关键井下工具为主体的单项工程技术和配套工程技术,为涪陵焦石坝区块页岩气商业性突破、彭水等区块页岩气取得重大进展提供了有效的技术支持,促进了中石化页岩油气勘探开发工作的进展。

1 中国石化页岩气勘探开发概况

自2011年7月中石化第一口页岩气水平井——建页HF-1井完钻以来,截至2013年9月,中石化在四川盆地及周缘的涪陵焦石坝、彭水、建南等区块先后完钻了26口页岩气水平井,其中,在涪陵焦石坝区块共完钻13口页岩气水平井。焦页1HF井是中国石化在涪陵海相页岩气领域第一口实质性突破井,压裂后初期日产气达到 $11 \times 10^4 \text{ m}^3$,生产近1年时间,稳定日产约 $6.5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。在总结焦页1HF井成功经验的基础上,进一步优化钻井完井工艺,缩短钻完井周期,压裂有效性显著提高,目前正顺利开展涪陵焦石坝区块首轮页岩气产能建设任务。与此同时,彭水区块页岩气勘探开发工作也取得重大进展。

1.1 涪陵焦石坝区块

涪陵焦石坝区块位于川东南川东高陡褶皱带包鸾-焦石坝背斜带焦石坝构造,主要目的层为龙马

溪组下部的优质页岩地层。截至目前,该区块已完钻页岩气水平井13口,平均井深4 162 m,平均水平段长1 454 m,平均钻井周期82 d,平均建井周期108 d,平均机械钻速4.67 m/h。其中,焦页1-2HF井钻井周期最短,为60.79 d,焦页8-2HF井钻井周期最长,为114.29 d。

该区块已先后完成9口页岩气水平井压裂施工,水平段长1 000~1 500 m,压裂分段15~22段,单井注入液量19 972.3~39 648.9 m^3 ,加入支撑剂773.3~989.3 m^3 ,平均压裂时效2段/d。其中,焦页8-2HF井压裂后最高试气无阻流量超过 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$,创国内目前页岩气单井产量最高纪录。

1.2 彭水区块

彭水页岩气藏位于上扬子盆地武陵褶皱带彭水德江褶皱带桑拓坪向斜,主要目的层为下志留系龙马溪组页岩地层。截至目前,该区块已完钻页岩气水平井4口,平均井深3 820 m,平均水平段长1 294 m,平均钻井周期97.61 d,平均建井周期125.49 d,平均机械钻速4.92 m/h。其中,彭页3HF井钻井周期最短,为94.29 d。

该区块已先后完成2口页岩气水平井的压裂施工。其中彭页HF-1井水平段长1 020 m,分12段压裂改造,注入总液量16 211.6 m^3 ,加入支撑剂1 332.7 t,历时8 d;彭页3HF井水平段长1 260 m,分22段压裂改造,注入总液量46 542.26 m^3 ,加入支撑剂2 108.1 m^3 ,施工时间20 d。彭页3HF井每段注入总液量均在1 900 m^3 以上,加砂量超过90 m^3 ,刷新了国内页岩气压裂的多项工程纪录。

1.3 建南区块

建南页岩气藏位于上扬子地台川东褶皱带石柱复向斜中部建南构造,主要目的层为侏罗系下统自流井组东岳庙段。截至目前,该区块已完钻页岩气水平井2口,平均井深2 333 m,平均水平段长1 012 m,平均钻井周期70.81 d,平均建井周期117.86 d,平均机械钻速5.93 m/h。其中,建页HF-1井是中国石化第一口页岩气水平井。

该区块已完成2口页岩气水平井的压裂施工。建页HF-1井在借鉴国外同类井压裂工艺技术的基础上,与国外公司联合开展了泵送桥塞、射孔联作分段压裂试验,水平段长1 003 m,分7段压裂改造,注入总液量11 643.3 m^3 ,加入支撑剂394.5 m^3 ,施工时间5 d。

2 中国石化页岩气工程技术进展

中国石化针对页岩气勘探开发存在的技术难题,以技术国产化、优质高效低成本成井和有效压裂为目标,通过持续攻关研究,初步形成了具有自主知识产权的页岩油气工程配套技术系列^[9-11],具备了水平段长 2 000 m 钻完井、分段压裂 20 段以上的压裂设计与施工能力,并在页岩气勘探开发实践中得到了及时应用,全面支撑了中国石化页岩油气勘探开发工作。

2.1 页岩气工程地质环境描述技术

页岩气工程地质环境描述技术有效指导了重点地区页岩油气井钻井优化设计、可压性评价、完井方式选择及压裂方案设计等。

1) **岩石力学特征评价技术** 针对页岩地层非均质性强、各向异性突出的特点,以测井资料处理和岩心测试为重点,研究形成了包括岩石力学特征宏观分析评价技术、页岩地层力学各向异性评价技术和考虑地层层理裂隙、工作液、地层压力等因素影响的页岩地层井壁稳定性分析预测技术等的岩石力学特征评价技术,为页岩气水平井钻完井与压裂设计提供依据与指导。

2) **建立了页岩可压性评价方法** 考虑岩石脆性、岩石力学参数、有机碳含量、总含气量等因素,将地质上的甜点与影响压裂裂缝起裂及延伸难易程度的岩石脆性有机结合起来,建立了页岩可压性评价方法。可压性指数评价模型为:

$$FI = (S_1, S_2, \dots, S_n)(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)^T \\ = \sum_{i=1}^n S_i \omega_i (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中: FI 为可压性指数; S 为页岩储层参数的标准化值; ω 为储层参数的权重系数。

应用页岩可压性评价方法,对中国石化不同区块的页岩进行了初步计算评价,得到涪陵、泌阳、元坝、新场、彭水区块的页岩地层可压性指数分别为 0.42、0.56、0.51、0.45、0.57,均低于国外的 Barnett 页岩的可压性指数(0.64)。

3) **开展了页岩裂缝扩展规律物模试验研究** 以露头页岩岩心为试验对象,在模拟不同井下工况下进行了系列物模试验研究,在岩石脆性与剪切破坏形式、压裂液类型与水力裂缝复杂程度的关系等方面得到了初步认识^[12]。

4) **初步建立了页岩储层综合评价标准** 通过与国外大学合作,结合中国石化页岩储层特殊性 & 压裂效果等因素,初步得出考虑页岩品质、完井品质 & 压裂品质的页岩储层综合评价标准。

2.2 钻井设计及优快钻井技术

2.2.1 “井工厂”钻井优化设计技术

通过对国内外“井工厂”技术的调研分析,结合中国石化页岩气区块的特点开展了“井工厂”技术攻关研究,初步形成了“井工厂”钻井优化设计技术。1)在对页岩气区块钻井工程地质环境因素精细描述的基础上,形成了页岩气井井身结构序列,有效封隔了复杂地层,降低了钻柱扭矩和摩阻,提高了水平段作业安全性,满足了压裂增产措施的需求等;2)初步形成了包括合理确定造斜点、造斜率、剖面类型、靶前位移的井眼轨道优化设计技术;3)针对不同页岩气区块的实际情况,形成了优快钻井设计技术;4)形成了“井工厂”平台井数、布井方式、水平段钻井方位、水平段间距、钻机类型、标准化井场等设计技术。

2.2.2 页岩气水平井优快钻井配套技术

经过 2 年的技术攻关与现场试验,已经形成了页岩气水平井优快钻井配套技术,包括气体钻井技术、复合钻井技术、水平段“一趟钻”钻井技术及泡沫定向钻井技术等。1)2013 年有 5 口井采用气体钻井技术,平均井深 4 134 m,平均水平段长 1 504 m,平均钻井周期 71 d,与 2013 年 13 口完成井平均钻井周期相比缩短了 11 d。其中焦页 1-2HF 井完钻井深 4 168 m,水平段长 1 533 m,钻井周期 60.79 d,平均机械钻速 6.04 m/h,创涪陵地区页岩气水平井钻井周期最短纪录。2)对于气体钻井技术应用受限的页岩气井,主要采用“PDC 钻头+螺杆”复合钻井技术提速,焦页 11-2HF 井完钻井深 4 080 m,水平段长 1 419 m,钻井周期 75 d,平均机械钻速 5.5 m/h。3)已完成水平段长 1 500 m 的页岩气水平井 13 口,初步掌握了水平段长 2 000 m 的页岩气水平井钻井技术,在未使用旋转导向钻井系统的情况下,焦页 9-1HF 井等 3 口井实现了 1 500 m 水平段“一趟钻”钻完的技术指标,其中焦页 5-2HF 井水平段长 1 530 m,平均机械钻速 15.81 m/h。4)针对定向段机械钻速低的难题,开展了泡沫定向钻井技术研究与试验,见到了明显的提速效果,其中焦页 13-2HF 井在定向段采用泡沫钻井技术,机械钻速提高了 251%。

2.3 油基钻井液配套技术

中国石化自主研发了适用于页岩储层的油基钻井液体系以及配套的施工工艺、回收再利用与含油废弃物处理工艺,从而形成了页岩气油基钻井液配套技术^[13-14]。

1) 油基钻井液体系 研发了油基钻井液用乳化剂和流性调节剂,以此为基础形成了 LVHS 油基钻井液体系,配方为:基油+2.5% SMGEL(有机土)+3.0% S MEMUL(乳化剂)+2.0% SMFLA-O(降滤失剂)+CaCl₂ 水+1.0% CaO+0.4% SMHFSA(流性调节剂)+重晶石,其与国外油基钻井液体系的性能指标对比见表 1。由表 1 可见, LVHS 油基钻井液体系主要性能已接近国外油基钻井液体系,并且具有以下特点:a. 较低的漏斗黏度和塑性黏度、较高的切力和理想的动塑比,有利于长水平段井眼净化;b. 油水比为(70~90):(10~30),均具有良好的乳化稳定性,破乳电压达 700~1 600 V;c. 柴油、矿物油均可做为基油,可以满足不同环境条件下施工的要求;d. 具有良好的封堵防漏效果。该油基钻井液已在彭页 2HF 井、彭页 3HF 井等井中成功应用,整个钻井过程施工顺利、钻井液性能稳定、井眼清洁效果良好。

2) 与 LVHS 油基钻井液体系配套的防漏堵漏技术 研发了针对不同漏速的 LVHS 油基钻井液配套防漏堵漏技术,室内模拟试验结果表明,其对于 20 目以上模拟微孔隙和 0.2 mm 以下的微裂缝具有良好的堵漏效果。该防漏堵漏技术在彭页 2HF 井三开井段进行了应用,该井三开井段累计进尺 2 381 m,水平段长 1 650 m。与国外公司施工的邻井彭页 4HF 井相比,该井钻井液漏失量降低 54%。

3) 页岩油气开发废弃物处理技术 针对页岩油气开发过程中产生大量含油和含水废弃物的问题,开展了钻井废弃物无害化处理技术研究、处理装置研发和储层改造压裂液处理再利用技术研究,基本上实现了水基钻井废弃物的无害化处理、油基钻

井液的零排放与回收再利用。该技术采用油基钻井液回收和清洗分步实施工艺,使油基钻井液回收率>97%,大大节约了油基钻井液费用,清洁环保;采用生物技术研制的清洗剂干粉,清洗能力强、环保、无异味,清洗处理后钻屑含油量大大降低,清洗后钻屑中含油量小于 3%,可以就地排放;装备采用多种新型设备系统集成,具有搅拌、混合、粉碎、清洗、脱液干燥等功能,并且处理量大(钻屑处理量 5 m³/h),满足钻进过程油基钻屑随钻处理要求。从 2012 年开始,该技术已经在胜利油田渤页 2HF 井、梁页 1HF 井及义 173-5HF 井 3 口非常规页岩油气井(使用油基钻井液体系)进行了成功应用,使用效果非常好,处理量大,系统冗余性高,安装搬迁方便快捷,使用维护保养简单,设备可靠性高,完全能够满足随钻处理和连续钻井施工的要求。

2.4 页岩气水平井配套固井技术

中国石化自主研发了 SFP 弹性水泥浆体系、适用于油基钻井液的 SCW 冲洗液与固井施工工艺,形成了页岩气水平井配套固井技术,并在泌阳、涪陵、彭水、新场等区块近 20 口页岩气水平井进行了现场应用,固井质量优质率达到 90%以上,保证了环空密封的完整性,满足了分段压裂施工的要求^[15]。与国外公司承担固井技术服务的页岩气井相比,在保证固井质量和环空密封完整性的同时,单井固井成本约降低 25%,实现了降本增效的目的。

1) SFP 弹性水泥浆体系 以自主研发的弹性粒子和增韧剂为基础,形成 SFP 弹性水泥浆体系,基础配方为:G 级水泥+2.00%~6.00% SFP-1(弹性材料)+0.05% SFP-2(增韧材料)+0.10% DZH+1.50% DZS+2.00% DZJ-Y+44.00% H₂O,主要性能参数见表 2。该水泥浆体系具有以下特点:a. 良好的强度特性与弹塑性,水泥石抗压强度>20 MPa,弹性模量 4~8 GPa,抗拉强度>4.5 MPa;b. 具有微膨胀性,线性微膨胀率达 0~0.2%,能保证环空密封的完整性;c. API 滤失量小于 50 mL;d. 适用温度 20~

表 1 LVHS 油基钻井液与国外钻井液体系性能比较

Table 1 Comparison of LVHS oil-based drilling fluid performance to foreign one

油基钻井液体系	密度/(kg·L ⁻¹)	破乳电压/V	塑性黏度/(mPa·s)	动切力/Pa	初终切/Pa	动塑比	高温高压滤失量/mL
国外公司	1.40	650	30	9.0	4/7	0.30	2.8
LVHS	1.40	1 235	29	12.5	5/7	0.44	2.4
国外公司	1.70	720	56	13.5	9/18	0.24	2.6
LVHS	1.70	1 051	39	12.5	5/8	0.32	2.6

表 2 SFP 弹性水泥浆体系与常规水泥浆体系性能比较

Table 2 Comparison of SFP elasto-toughness slurry to conventional one

水泥浆	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$)	滤失量/ mL	自由液/ mL	稠化时间/ min	弹性模量/ GPa	抗拉强度/ MPa	韧性系数	48h 抗压强度/ MPa
常规	1.90	36	>0.5	可调	14.0	2.0~3.0	3.521	24
SFP 弹性	1.87	28	0	可调	6.2	>4.5	6.742	21

140 ℃, 密度 1.85~2.40 kg/L; e. 具有良好的沉降稳定性, 上下密度差小于 0.03 kg/L, 无自由液。

2) 适用于油基钻井液的 SCW 冲洗液 为了改善冲洗液对油基钻井液的冲洗效果, 提高固井质量, 研发了适用于油基钻井液的 SCW 冲洗液。该冲洗液采用多种表面活性剂复合, 强化洗油和润湿反转效果, 润湿角 < 30°, 润湿点 < 25%, 4 min 内冲洗效率达到 100%。同时采用活性固相材料, 可固化泥饼, 提高胶结质量。

3) 固井工艺 依据不同区块压裂参数、地层参数及套管数据, 合理设计弹性水泥浆配方, 控制水泥石机械力学特性, 保证射孔压裂施工及其他作业期间环空水泥石密封的完整性; 依据不同区块应用的钻井液体系、井身结构及施工特点, 合理设计前置液配方并优化其性能, 形成了页岩气井固井四级冲洗工艺技术, 实现了对钻井液高效驱替和井壁清洗; 开展长水平段水平井套管下入摩擦阻分析, 研究开发了漂浮减阻器, 形成了漂浮下套管技术和漂浮替浆技术; 优选适合页岩气水平井的套管扶正器, 科学设计套管扶正器数量, 保证套管居中度达到 70% 以上; 开发专业固井施工模拟软件, 对顶替效率、施工参数、全过程平衡压力固井的关键因素开展模拟和分析。上述技术措施确保了固井科学的科学性和合理性, 有效提高了固井质量和施工安全性。

2.5 分段压裂关键配套工具

针对水平井裸眼、套管等不同完井方式下分段压裂的需求, 研制开发了裸眼封隔器滑套分段压裂工具、泵送桥塞分段压裂工具及水力喷射分段压裂工具等 3 种分段压裂关键配套工具^[16]。

1) 裸眼封隔器滑套分段压裂工具 研制开发了裸眼封隔器、井下隔离阀、压差式打开滑套、投球式打开滑套、憋压球、投球控制装置、插管封隔器、插入装置等裸眼封隔器滑套分段压裂工具, 其技术性能参数为: 适用井径为 149.2~155.6 mm (5 7/8"~6 1/8"); 球座级差为 3.175 mm (1/8"); 密封能力为 70 MPa; 耐温 120 ℃。该工具已经在胜利油田、红河油田和大牛地气田等 20 多口井进行了成功应用,

成功率 100%, 单井最大压裂段数 12 段, 最大加砂量 873.0 t。目前, 中国石化已具备了一趟管柱实现 20 段以上分段压裂的施工能力。

2) 泵送桥塞分段压裂工具 研制开发了易钻桥塞复合材料、坐封工具、井口带压作业装置以及压力导通式多级射孔联作装置等配套工具。该分段压裂工具适用于套管内分段压裂, 其坐封力达到 115 kN, 丢手力达到 150 kN, 耐上压差 75 MPa, 耐温 120 ℃, 可实现 5 簇以上的簇射孔, 综合性能达到国外工具同等水平。易钻桥塞分段压裂工具在江汉油田、中原油田等油田 10 多口井进行了现场应用, 成功率 100%, 钻塞时间 30~40 min。

3) 水力喷射分段压裂工具 该工具将水力喷射技术和滑套工具相结合, 把带滑套的水力喷射工具串一趟管柱下入井中, 投球打开各级滑套实施分段压裂。目前已形成 $\phi 114.3$ 、 $\phi 127.0$ 、 $\phi 139.7$ 和 $\phi 177.8$ mm (4 1/2"、5"、5 1/2" 和 7") 等工具系列, $\phi 139.3$ mm (5 1/2") 工具一趟管柱可实现 8 段压裂, $\phi 177.8$ mm (7") 工具一趟管柱可实现 14 段压裂, 单段加砂量 40~50 m³。水力喷射分段压裂工具在 20 口水平井进行了成功应用, 成功率 100%, 有效率 100%, 单井最高压裂 8 段。

2.6 滑溜水压裂液体系

中国石化以自主研发的高效减阻剂为基础形成了滑溜水压裂液体系, 降阻率达到 78%, 抗温能力达到 120 ℃, 黏度 2~30 mPa·s, 储层伤害率小于 10%, 易返排, 综合性能达到国外产品同等水平。该体系已经在焦页 HF-1 井、元页 HF-1 井、彭页 3HF 井及涪页 3-2HF 井等页岩气水平井进行了成功应用。其中, 焦页 1HF 井完成 15 段压裂, 减阻率达 70%~78%, 携砂性能好, 有 11 段砂液比超过 12%, 最高砂液比为 18%。

2.7 水平井分段压裂配套技术

针对页岩气水平井压裂的特点, 中国石化对分段压裂优化设计、分段压裂工艺、裂缝监测和压后评估等技术进行了专题攻关研究, 初步形成了页岩气

水平井分段压裂配套技术,并在涪陵、元坝、彭水等区块先后完成了20多口水平井的分段压裂设计、施工作业及压后评估分析,应用效果良好。尤其值得指出的是,就目前的压后评价结果而言,初步判定中国石化涪陵焦石坝区块页岩气水平井压裂后大部分形成了复杂裂缝甚至网络裂缝,因此,大范围的三维网络裂缝的形成是页岩气井压后获得高产的重要因素。

1) 页岩气分段压裂优化设计技术 以形成远井网络裂缝,增加有效改造体积,实现有效压裂为目标,研究形成了页岩气分段压裂优化设计技术。

a. 压裂设计流程。从储层特征评价入手,结合完井质量,初步确定射孔方式、分段压裂工艺和压裂液体系,再根据压前储层测试评价结果,对储层进行再认识,对分段压裂工艺和压裂液性能进行进一步优化。

b. 压前储层测试评价。微注压裂测试:利用0.16 L/s的小排量、泵入体积约4 m³的压裂液、获取预压储层的渗透率、地层压力等参数。微型压裂测试:应用主压裂排量,泵入一定体积的压裂液,在获取摩阻、闭合应力、近井筒裂缝弯曲摩阻及天然裂缝发育情况的同时,产生适当大的诱导应力,降低水平应力差值,为主压裂实现三维网络裂缝充分延伸提供条件。

c. 施工参数设计原则。对于塑性地层,遵循两高一低(高黏度、高砂比、低排量)的设计原则;对于脆性地层,遵循三高两低(高排量、高液量、高砂量、低黏度、低砂比)的设计原则^[17]。

d. 网络裂缝参数优化设计方法。该设计方法充分考虑网络裂缝控制因素(即足够高的脆性矿物含量、较低水平应力差异、天然裂缝/诱导缝发育及其与主应力的夹角较小、足够高的裂缝内净压力等),应用渗流干扰与诱导应力干扰的耦合模型来设计施工参数,优化裂缝参数,同时应用形成的主裂缝与天然裂缝交互沟通的裂缝网络模型来增大改造体积。

e. 返排设计。采取预置网络裂缝的方法,先模拟压后排液初期的含水饱和度分布和压力分布,然后模拟排液期间压裂液的返排规律及气液两相流规律,通过考察地质参数、裂缝参数及排采参数等13个参数与返排率、见气时机及峰值气量出现的时间等关系,以实现最佳的压后排采效果为目标,优化排采时机及排采制度。

2) 分段压裂工艺 与3种压裂完井配套工具相结合形成了3项分段压裂技术,即泵送桥塞分段

压裂技术、裸眼封隔器滑套分段压裂技术和不动管柱水力喷射分段压裂技术。

3) 水力裂缝监测技术 引进了美国Haliburton公司Pinnacle裂缝测斜仪与法国Vinci公司Simfrac微震仪,形成了水力压裂裂缝监测技术,为页岩油气储层水力裂缝监测、压裂设计与施工的优化与评估奠定了基础。

a. 测斜仪裂缝监测技术。在压裂井周围地面和邻井(与施工井间距小于500 m)井下多点处放置测斜传感器,测量压裂导致的地层倾斜及岩石变形,通过地球物理反演,确定造成大地变形场的压裂参数,解释出裂缝形态及尺寸,可用于井深3 500 m以浅地层裂缝监测。该技术已在华北大牛地丛式井组的3口井进行了应用,其中2口井为同步压裂,裂缝解释结果可靠,与同时采用的微地震监测解释结果基本一致。

b. Simfrac微震仪裂缝监测技术。由测井车将微震仪下入到施工井压裂施工层位的下方,由地面压力泵注入清水,待地层压开后停泵,等待地层闭合,监测地层闭合过程中产生的P波和S波,处理软件对微地震事件进行处理、成图,得到裂缝的分布方向和尺寸,也可下入观测井中对压裂施工产生的裂缝进行监测。

4) 压后评估技术 压后评估的主要目的是通过评估,认识有关规律,使后续井的压裂设计更加科学、更有针对性,以提高压裂的有效性。中国石化目前已形成的压后评估的方法及体系主要包括:一是通过压裂施工压力曲线形态对远井储层特征进行再认识,如脆性、岩石力学特征、地应力特征、天然裂缝特征等;二是应用两套裂缝监测技术与G函数叠加导数图版评估裂缝特性,如天然裂缝的发育情况,单一裂缝、复杂裂缝及网络裂缝的比例,裂缝的起裂和扩展情况等。更为重要的是要结合地质特征与压裂工艺条件,判断分析哪些单一裂缝可转化为复杂缝,哪些复杂缝可转化为网络缝,哪些网络缝可转化为三维方向重复充分扩展和有效支撑的理想状态。

2.8 页岩气技术装备研发及其他工作进展

中国石化高度重视页岩气技术装备的研发工作,先后开展了页岩气压裂所需的大型压裂车、混砂车、连续油管 and 微地震检测仪的技术攻关研究。目前已经完成了3 000型大型压裂车研发制造,即将投入使用,130混砂车已经进入现场应用,连续油管研制进入工业化应用,微地震检测仪已取得重大进

展。另外中国石化已经发布了 9 项非常规石油工程标准,进一步完善了非常规油气工程实验室建设,健全了分析测试及模拟试验体系,为页岩油气等非常规油气资源大发展提供试验和技术支持手段。

3 页岩气工程技术发展趋势

中国石化尽管已初步形成了页岩油气工程配套技术,国内其他公司与院校也开展了页岩气工程技术研究与应用,但与国外先进技术相比还有一定的差距,工程技术本身有待于进一步优化提升、配套完善与研究攻关,以真正实现页岩油气经济有效规模的开发。结合中国石化页岩油气勘探开发的需求与国外页岩油气工程技术发展历程,笔者认为未来页岩油气工程技术向以下五个方向发展。

3.1 向标准化、一体化、配套化方向发展

对于已初步形成的工程技术应进一步完善技术本身及技术配套,形成完整的技术链,实现技术的规范化、有形化、标准化,逐步形成页岩油气勘探开发一体化工作流程及配套技术标准,降低勘探开发成本、提高压裂效果、实现页岩油气科学开发。

3.2 向安全优质、高效低成本成井方向发展

一是大力发展提高页岩气钻完井效率和速度的配套工程技术;二是采用直井寻发现、水平井求产能、“井工厂”规模化开发的思路,发展“井工厂”钻完井技术,以利用较小占地面积,最大程度发挥设备利用率,实现顺序化、批量化的钻完井作业,提高作业效率,降低作业成本。

3.3 向提高压裂有效性的方向发展

一是发展形成网络缝和增大压裂裂缝有效体积的新型压裂技术和新型分段压裂工具;二是发展精细压裂技术,加强地质与工程结合,研究地质甜点,优化压裂的段数、段长、压裂规模与加砂量等,实现任意井段长度、任意裂缝间距和段数的分段压裂,提高压裂有效性;三是发展“井工厂”压裂技术,使压裂由单井压裂向多井、整体压裂和规模化“井工厂”压裂方向发展,提高压裂施工效率与页岩气井采收率,降低压裂成本。

3.4 向重视环境保护技术的方向发展

开展高性能水基钻井液与环保型压裂液的技术

攻关,研发高效油基钻井液与压裂液回收重复再利用技术,实现钻井液、压裂返排液无害化处理,以保护环境,降低开发成本。

3.5 向无水压裂技术的方向发展

页岩油气井压裂用水量大,一口井一般压裂用水为 15 000~30 000 m³,彭页 3HF 井用液量高达 46 542 m³,在“井工厂”开发模式下,压裂用水量将十分惊人。我国水资源短缺,而中国石化页岩气工区地形条件复杂,压裂用水的来源、运输、保存及循环利用均存在较大困难。因而对于将来的页岩气的规模化开采而言,无水压裂技术(如 LPG 压裂技术、CO₂ 等高能气体压裂技术等)将成为一个重要的发展方向,它不但大大节约水资源,还可显著提高压裂的有效性。

4 结论与建议

1) 水平井钻完井与分段压裂是实现页岩气资源有效勘探开发的关键技术,安全、优质、高效、低成本成井和压裂的有效性是页岩气工程技术实用性、先进性的判断标准。

2) 中国石化通过持续的攻关研究,初步形成了具有自主知识产权的页岩油气工程配套技术,具备了页岩气水平井水平段长 2 000 m、分段压裂 20 段以上的钻完井与压裂设计、施工能力,并实现了涪陵焦石坝等区块页岩气勘探开发的重大突破与进展。

3) 与国外先进的页岩气工程技术相比,我国页岩气工程配套技术,尤其是页岩气核心工程技术还存在较大的差距,因此,在学习国外先进技术的同时,应加快研发适应我国地质特征的页岩气核心工程技术,推进我国页岩气资源勘探开发进程。

4) 页岩气工程技术将向五个方面发展,即向标准化、一体化、配套化方向发展,钻完井技术向安全优质、高效低成本方向发展,压裂技术向进一步提高有效性方向发展,向更加重视环境保护方向发展,向无水压裂技术方向发展。

致谢:在本文撰写过程中,中国石化石油工程技术研究院王怡、张金成、王显光、臧艳彬、王海涛、陶谦及胜利分院刘宝丰等同志在资料收集及论文修改等方面提供了大量帮助,蒋廷学、陈作、丁士东、陆黄生等同志也提出了许多宝贵修改意见,在此一并表示感谢。

参 考 文 献

References

- [1] Sakmar S L. Shale gas developments in north America: an overview of the regulatory and environmental challenges facing the industry[R]. SPE 144279, 2011.
- [2] Aaron Padila. Social responsibility & management systems: elevating performance for shale gas development [R]. SPE 156728, 2012.
- [3] Faraj B, Williams H, Addison G, et al. Gas potential of selected shale formations in the western Canadian sedimentary basin [J]. Gas TIPS, 2004, 10(1): 21-25.
- [4] Dong Z, Holditch S A, McVay D A, et al. Global unconventional gas resource assessment[R]. SPE 148365, 2011.
- [5] 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.
- [6] 薛承瑾. 国内页岩气有效开采值得关注的几个问题[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(4): 1-6.
Xue Chengjin. Noteworthy issues on effective production of shale gas resource in China[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(4): 1-6.
- [7] 郑军卫, 孙德强, 李小燕, 等. 页岩气勘探开发技术进展[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(3): 511-517.
Zheng Junwei, Sun Deqiang, Li Xiaoyan, et al. Advances in exploration and exploitation technologies of shale gas[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(3): 511-517.
- [8] 张金川, 徐波, 聂海宽, 等. 中国页岩气资源勘探潜力[J]. 天然气工业, 2008, 28(6): 136-140.
Zhang Jinchuan, Xu Bo, Nie Haikuan, et al. Exploration potential of shale gas resources in China[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(6): 136-140.
- [9] 蒋廷学. 页岩油气水平井压裂裂缝复杂性指数研究及应用展望[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(2): 7-12.
Jiang Tingxue. The fracture complexity index of horizontal wells in shale oil and gas reservoirs[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(2): 7-12.
- [10] 刘伟, 陶谦, 丁士东. 页岩气水平井固井技术难点分析与对策[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(3): 40-43.
Liu Wei, Tao Qian, Ding Shidong. Difficulties and countermeasures for cementing technology of shale gas horizontal well [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(3): 40-43.
- [11] 蒋廷学, 贾长贵, 王海涛, 等. 页岩气网络压裂设计方法研究[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(3): 36-40.
Jiang Tingxue, Jia Changgui, Wang Haitao, et al. Study on network fracturing design method in shale gas [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(3): 36-40.
- [12] 张旭, 蒋廷学, 贾长贵, 等. 页岩气储层水力压裂物理模拟试验研究[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(2): 70-74.
Zhang Xu, Jiang Tingxue, Jia Changgui, et al. Physical simulation of hydraulic fracturing of shale gas reservoir [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(2): 70-74.
- [13] 王显光, 李雄, 林永学. 页岩水平井用高性能油基钻井液研究与应用[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(2): 17-22.
Wang Xianguang, Li Xiong, Lin Yongxue. Research and application of high performance oil base drilling fluid for shale horizontal wells [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(2): 17-22.
- [14] 何振奎. 泌页 HF1 井油基钻井液技术[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(4): 32-37.
He Zhenkui. Oil base drilling fluid technology applied in Well Biye HF1 [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(4): 32-37.
- [15] 谭春勤, 刘伟, 丁士东, 等. SFP 弹韧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.
- [16] 陈勉, 金衍. 基于岩心分析的页岩气压裂工艺参数优选[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(4): 7-12.
Chen Mian, Jin Yan. Shale gas fracturing technology parameters optimization based on core analysis [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(4): 7-12.
- [17] 曲海, 李根生, 刘营. 拖动式水力喷射分段压裂工艺在筛管水平井中的应用[J]. 石油钻探技术, 2012, 40(3): 83-86.
Qu Hai, Li Gensheng, Liu Ying. The application of dragged multi-stage hydrojet-fracturing in horizontal well with screen pipe completion [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(3): 83-86.

[编辑 陈会年]