

深层页岩气开发工程技术进展

曾义金^{1,2*}

1 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室, 北京 100101

2 中国石化石油工程技术研究院, 北京 100101

* 通信作者, zengyj.sripe@sinopec.com

收稿日期: 2019-02-22

中石化“十条龙”科技攻关项目“川东南深层页岩气钻完井及压裂技术”支持

摘要 深层页岩气储层埋藏深、地应力大、岩石强度高、塑性强, 导致钻井速度低、周期长, 压裂复杂裂缝程度低, 改造体积小, 极大制约了深层页岩气的经济有效开发。鉴于此, 针对我国特殊的页岩储层地质条件, 围绕深层页岩气的有效开发重大工程技术难题, 开展了基础理论方法探索、核心工具研发、液体材料体系开发以及关键工艺技术研究等攻关, 并取得了重大技术进展, 初步形成了 3500~4500 m 深层页岩气开发工程技术体系。在四川盆地涪陵江东和平桥区块、威荣、永川、丁山等地区应用了近 80 口井, 钻井周期缩短了 29.8%, 测试产量达到 $(10\sim 25)\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, 基本实现了深层页岩气的经济有效开发。

关键词 深层页岩气; 钻井; 压裂; 关键技术; 有效开发

Progress in engineering technologies for the development of deep shale gas

ZENG Yijin^{1,2}

1 State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 100101 China

2 Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China

Abstract The pay zone of deep shale gas usually has high strength and strong plasticity due to the large burial depth and the high level of in-situ geostress. Such geological conditions result in not only a low rate of penetration (ROP) and long drilling period for the drilling engineering, but also a low complexity of the fracture network and a small stimulated reservoir volume (SRV) from the fracturing. These greatly limit the economical and effective development of deep shale gas. Concerning the major engineering technical problems of the effective development of deep shale gas, research focusing on basic theory and methods, essential tools, liquid material system, and key techniques was carried out considering the special geological conditions of shale gas in China. Through this technical research, great technology progress has been achieved, and the engineering technical system for deep shale gas at the depth of 3500~4500 m has initially formed. These technologies were adopted for nearly eighty wells in the Fuling Jiangdong and Pingqiao blocks in the Sichuan basin, Rongwei, Yongchuan, Dingshan and other areas. The drilling time decreased by 30%, and the test production reaches $(10\sim 25)\times 10^4\text{ m}^3$ per day, which basically realizes the economical and effective development of deep shale gas.

Keywords deep shale gas, drilling, fracturing, key technology, effective development

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2019.03.021

引用格式: 曾义金. 深层页岩气开发工程技术进展. 石油科学通报, 2019, 03: 233-241

ZENG Yijin. Progress in engineering technologies for the development of deep shale gas. Petroleum Science Bulletin, 2019, 03: 233-241.

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2019.03.021

0 概述

国土资源部颁布的地矿行业标准《页岩气资源储量计算与评价技术规范》(DZ/T 0254-2014)^[1],将页岩储层埋深超过 3500 m 的定义为深层,其中埋深超过 4500 m 的定义为超深层。据测算,我国深层页岩气资源量巨大,以涪陵页岩气田江东和平桥区块以及威荣、永川、丁山等区域为例,深层页岩气资源量高达 $4612 \times 10^8 \text{ m}^3$,勘探开发前景十分广阔^[2]。

随着埋藏深度增加,页岩地层地质力学特性发生了较大变化,导致工程作业难度增大^[3-6],主要表现为:①地层层序增多、压力体系更加复杂;②岩石强度增加,可钻性变差,机械钻速降低;③储层深度预测精度降低,标志层不明显,轨迹控制难度增大;④地层水平应力差增大,裂缝转向横向扩展难度增加;⑤地层温度和压力升高,岩石塑性增强,裂缝起裂难度增加,缝道变窄,加砂困难,改造体积降低;⑥地层闭合压力增加,支撑剂嵌入地层及被压碎的概率大幅增加,导流能力递减快。这些都为深层页岩气开发工程技术提出了新的挑战。

美国针对深层页岩气开发形成了较为成熟的地质工程一体化技术和钻完井与压裂工程技术体系,其深层页岩气主要在 Eagle Ford、Haynesville 和 Cana Woodford^[7-9],深层页岩气井数约占总井数的 10%。在钻井技术方面,研发了硬地层 AxeBlade 斧式 PDC 钻头、Kymera XT 混合钻头新型钻头,形成了高性能钻头+大排量循环+52 MPa 大功率泵+大扭矩螺杆+高造斜率旋转导向组合技术,平均钻井周期 35~55 d,单井钻井成本 250~450 万美元。并且,HydraGlyde 低成本水基钻井液、强密封泡沫水泥浆的应用规模在不断扩大^[9-13]。在压裂技术方面,开发了耐温 170 °C 以上、降阻率大于 65% 的高效滑溜水体系,研制了大通径桥塞、无限级固井滑套、可降解桥塞等工具,形成了少段、多簇、大孔径射孔和“预处理酸+线性胶+滑溜水(1~3 mPa·s)+冻胶”大规模压裂模式。

为实现深层页岩气的经济有效开发,中国石化针对我国深层页岩储层特殊的地质条件,紧紧围绕缩短钻井周期、降低工程成本和提高单井产量的目标,从基础理论方法、关键技术等方面开展了研究与实践,推进了深层页岩气工程技术发展。

本文系统阐述了深层页岩气开发工程技术新进展,并提出了发展建议,对我国深层页岩气工程技术的不断改进、提升和经济有效开发具有借鉴和指导意义。

1 工程技术理论与方法

深层页岩气开发工程技术理论一直是研究的重点,特别是压裂理论,包括裂缝起裂和延伸机理、可压性评价模型、体积压裂形成机制等,本文只介绍甜点的研究情况。

1.1 页岩储层地质工程甜点计算新模型

研究表明^[14-15],采用实际页岩参数与标杆页岩参数的欧氏贴进度表征页岩“甜点”,与压后产量关联性程度更高,为此,提出了页岩“综合甜点”计算新方法。产剖测试结果验证了应用综合甜点(>0.5)进行精细分段的适用性,通过减少低效/无效段数,可降低成本 10% 以上。

(1)地质甜点。计算页岩地质甜点时,常应用最小——最大规范化方法对页岩关键地质参数进行归一化处理,采用专家打分法确定各参数权重,然后对各参数进行权重的加权即可得到页岩地质甜点指数。具体计算公式如下:

$$S_{\text{地质}} = (S_1, S_2, \dots, S_n)(w_1, w_2, \dots, w_n)^T$$

式中: $S_{\text{地质}}$ 为页岩地质甜点指数; n 为地质参数的个数; S_i 为页岩地质参数的归一化值($i=0, 1, 2, \dots, n$); w_i 为地质参数的权重因子($i=0, 1, 2, \dots, n$)。

(2)页岩工程甜点计算方法

$$S_{\text{工程}} = \left(\frac{YMS_C - YMS_{C_{\min}}}{YMS_{C_{\max}} - YMS_{C_{\min}}} + \frac{PR_C - PR_{C_{\max}}}{PR_{C_{\min}} - PR_{C_{\max}}} \right) / 2$$

式中: $S_{\text{工程}}$ 为页岩工程甜点指数; YMS_C 为综合测定的杨氏模量值, MPa; $YMS_{C_{\max}}$ 和 $YMS_{C_{\min}}$ 分别为综合测定的最大杨氏模量和最小杨氏模量, MPa; PR_C 为综合测定的泊松比; $PR_{C_{\max}}$ 和 $PR_{C_{\min}}$ 分别为综合测定的最大泊松比和最小泊松比。

(3)基于地质甜点和工程甜点的页岩综合甜点计算方法:

$$S_{\text{综合}} = (S_{\text{地质}}, S_{\text{工程}})(w_{\text{地质}}, w_{\text{工程}})^T$$

式中: $S_{\text{综合}}$ 为页岩综合甜点指数; $w_{\text{地质}}$ 和 $w_{\text{工程}}$ 分别为地质甜点和工程甜点的权重因子,基于实际地质及工程参数,根据专家打分法确定两者权重值分别为 0.6 和 0.4。

(4)基于页岩甜点的簇射孔优化方法

为了准确分析页岩储层地质力学特性,基于地震、地质、测录井等数据建立了三维地质模型,实现了井眼轨迹、地层模型三维可视化技术,建立了基于三维建模、二维地层等厚对比、电磁波电阻率正反演和随

钻成像伽马测井的地质导向方法，形成了基于地层界面、靶点位置、测井曲线数值等参数的工程预警模式，有效提高了深层页岩气钻井轨迹控制和页岩甜点穿行精度。通过综合页岩甜点评价指标、不同应力差、射孔簇数、排量对地层诱导应力和净压差的影响研究(图 1、图 2)，形成了深层页岩少簇、短簇射孔优化方法。

在大型分段压裂后，页岩气井由于环空密封失效导致井口带压井比例高达 50% 以上，为了揭示环空密封失效机理，研制了一套物理模拟装置，能模拟高温高压动态载荷下水泥石受力、损伤、破坏过程。大量实验研究发现，分段压裂过程实际是水泥石的一个加载和卸载过程，加载应力超过水泥石屈服强度时，产生塑性变形或损伤，卸载后存在残余应变，每次加载都产生新的塑性应变，卸载后残余应变也不断增加，累积残余应变达 1% 以上(图 3)时，产生气窜(图

1.2 井筒密封完整性失效机理分析

(1) 环空水泥石密封失效机理

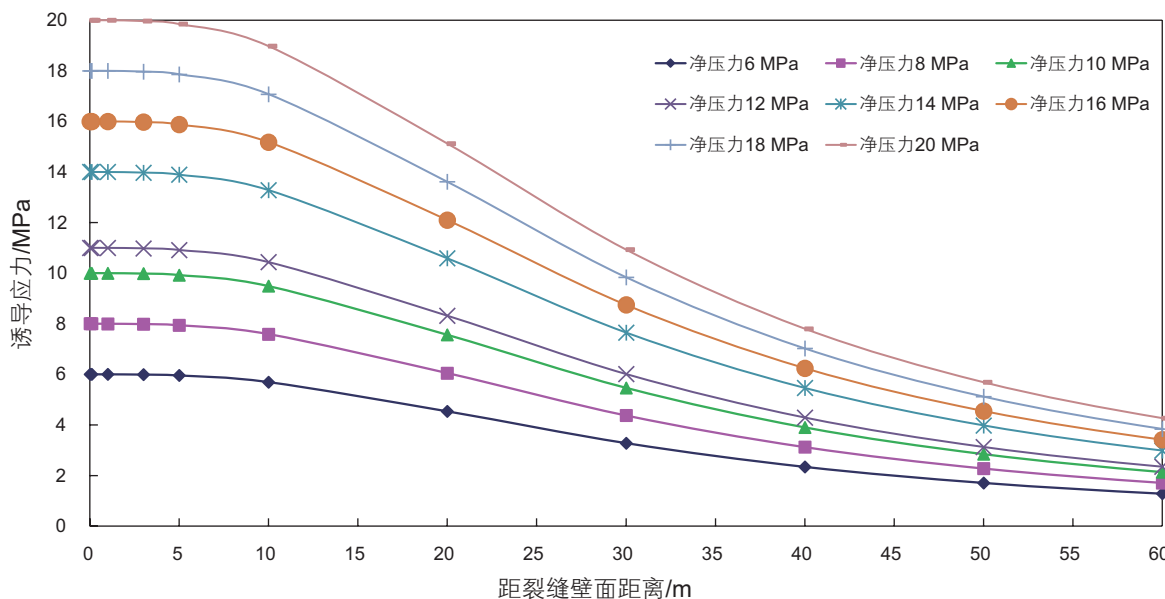


图 1 不同净压差对应的诱导应力

Fig. 1 The induced stresses with different net pressure differences

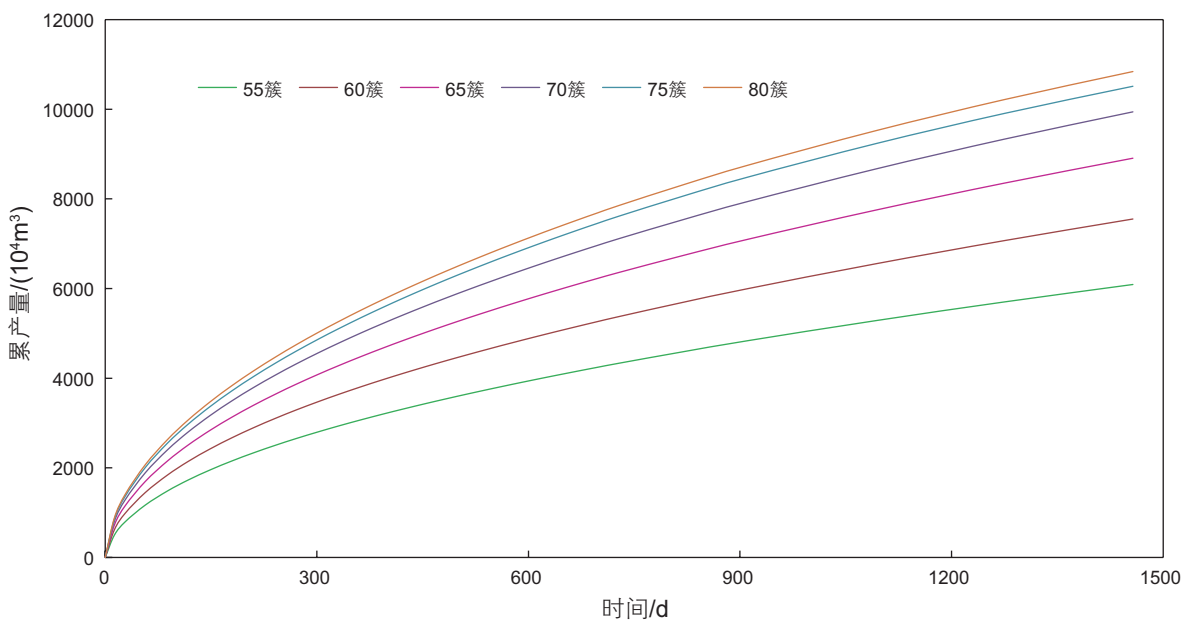


图 2 不同压裂簇数下累积产量随时间的变化曲线

Fig. 2 The cumulative production versus time under different fracturing clusters

4), 导致井口带压。在试验分析的基础上提出了水泥石强度准则。研究认为, 水泥石弹性模量 ≤ 5.5 GPa时, 可满足90~110 MPa压裂作业, 对应地层深度3500~4500 m, 并开发了弹韧性水泥浆体系, 性能指标满足准则要求, 体系应用后井口带压井减少了80%。

(2) 深层页岩气井套管损坏机理

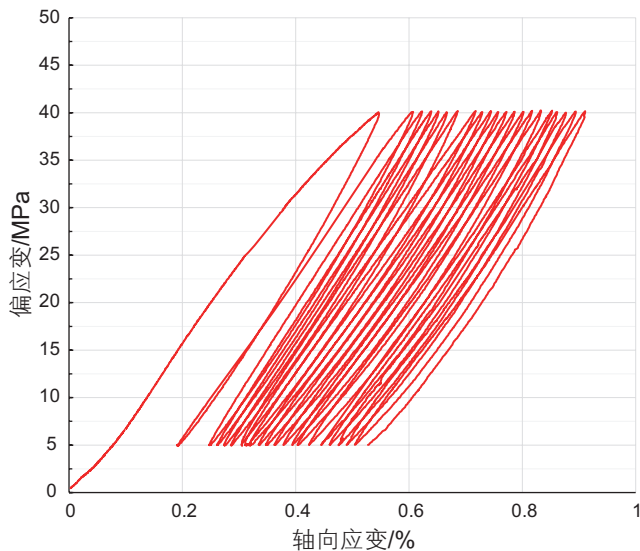


图3 循环荷载下水泥石力学特征

Fig. 3 The mechanical characteristics of cement under cyclic loading

我国威远地区深层页岩气井生产套管变形问题突出, 目前对套管变形的原因认识尚不明确。研究认为, 引起套管变形/损坏的原因可能是: ①压裂过程中流体压力在层理、节理等微裂隙传递, 使裂缝内孔隙压力提高, 当达到临界值时, 激发天然裂缝滑动, 造成地层剪切滑移或潜在的小断层移动, 非均质载荷作用导致套管损坏; ②压裂过程中井筒压力急剧变化导致套管疲劳损伤, 或分段压裂时加载卸载高应力差导致套管损坏等。在中国石油威远地区具有裂缝/断层、岩性节理/层理相关性的套管变形点占套管变形点总数的61.7%, 但在中国石化威荣地区套管变形位置与裂缝发育情况、地应力、应力差、固井质量、井眼曲率等关系不明显, 呈现出不同的失效特征, 套管变形规律与机理仍需进一步研究。

2 钻完井工具及仪器

2.1 水平井钻井提速工具

深层页岩气井井段增长, 定向井段采用常规PDC钻头容易发生托压且造斜率偏低, 为此研发了适用于深层页岩气水平井定向钻井钻头及提速工具。

(1) 超短保径PDC钻头。与常规PDC钻头相比,

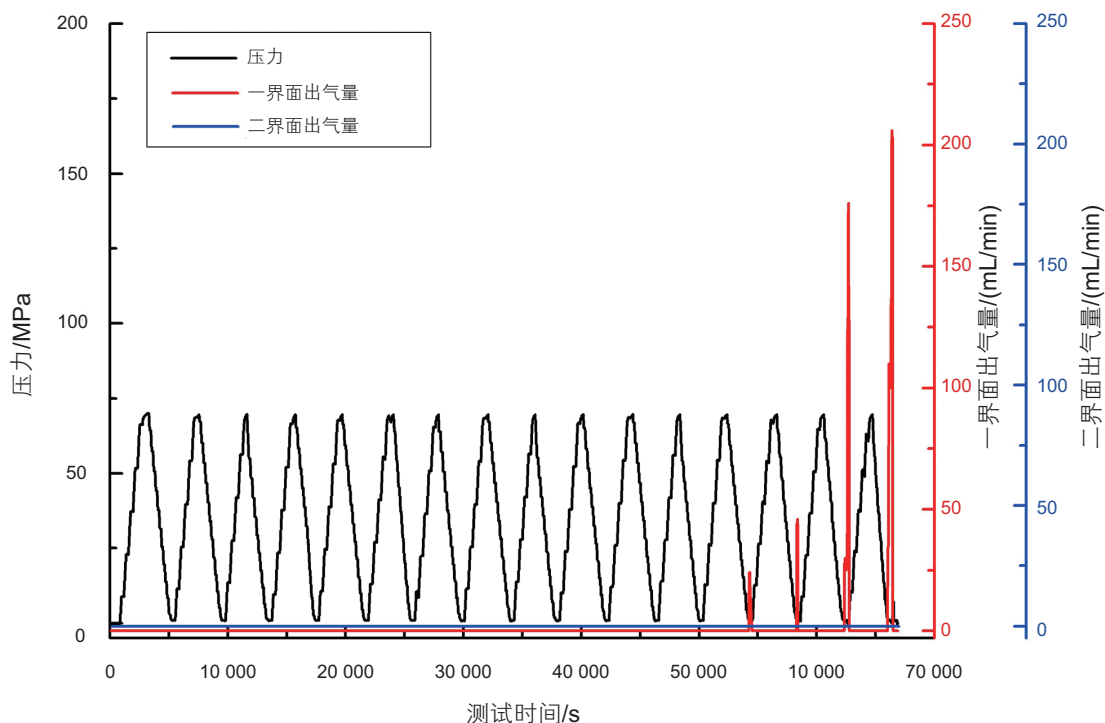


图4 循环荷载下密封失效特征

Fig. 4 The seal failure characteristics under cyclic loading

缩短了钻头的保径长度，提高了钻头侧向切削力和定向造斜率。在JY191-1HF井应用，单只钻头进尺414 m，平均机械钻速4.99 m/h，较邻井机械钻速提高25%以上，扭方位92.4°无托压。

(2)牙轮PDC混合钻头。混合钻头兼具PDC钻头和牙轮钻头的优点^[5-9]，具有良好的耐磨性和防止托压优势。相比牙轮钻头，它的进尺长、机械钻速高；相比PDC钻头，它能有效解决定向托压问题，工具面稳定。该钻头在多口深层页岩气井中应用都取得了良好效果。在JY89-1HF井浊积砂地层中应用，机械钻速达5.51 m/h，同比邻井机械钻速提高了50%以上，JY184-2HF井和JY185-3HF井应用，机械钻速同比提高了20%和23%。

(3)减震稳扭旋冲钻井提速工具。其特点是：缓冲减震，钻头接触井底岩石瞬间，减少对钻头的冲击；防止失速，超出设定扭矩限值时，旋转运动转化为直线运动，减少钻头吃入量，防止失速，消除黏滑；能量自动存储释放，超出设定扭矩限值的能量被自动存储，待扭矩恢复至正常值时，能量自动释放，增加钻头吃入量；复合冲击，在井底产生高频冲击扭矩及冲击力，形成冲击破岩和剪切破岩复合破岩效果。在深层页岩气中应用机械钻速平均提高了26.6%。

2.2 短弯螺杆钻具

短弯螺杆是指螺杆钻具弯点到转子输出端距离(见图5)较常规弯螺杆短的一种新型螺杆，常规螺杆为1.5~2.0 m，短弯螺杆为1.0~1.2 m，在弯角相同的情况下，可获得更高的造斜率，从而减少滑动钻进尺寸，增加复合进尺比例，提高钻井速度。该工具在JY184-4HF井应用，试验井段3292~3540 m，纯钻时间为41 h，进尺248 m，其中定向进尺113 m，复合进尺136 m。应用表明，1.25°Ø172 mm短弯螺杆平均造

斜率为0.31°/m，较常规螺杆提高105.49%，平均机械钻速达6.08 m/h，同比常规螺杆提高了17.87%。

2.3 近钻头成像伽马测量仪

针对深层页岩气储层深度预测精度低，标志层不明显，轨迹调整频繁的难题，为提高深层页岩气优质储层钻遇率，提高轨迹控制精度，成功研制了近钻头成像测量仪。攻克了近钻头无线跨动力钻具短距离传输、高速旋转动态16扇区伽马成像、井斜与方位检测等核心技术。突破了不同电导率钻井液对无线短传的影响，实现了不同钻井液介质跨动力钻具短传技术。该系统先后在深层页岩气井现场应用7口井，在高振动、高转速、窄空间等约束下，实现了离钻头0.5 m的伽马成像探测、0.9 m的动态井斜检测，性能指标达到了国际领先水平。

2.4 新型压裂分段工具

(1)全通径无限级分段压裂工具。采用连续油管或常规油管在套管内下入压裂工具，通过拖动管柱到设计的部位坐封隔器并实现环空加砂压裂，其主要技术参数如表1所示。工具在现场应用时，施工最高压力为65 MPa，施工排量为2.2 m³/min，封隔器重复次数达8次，施工结束后，工具性能良好，还可以重复利用。

(2)大通径桥塞分段压裂工具。为解决深层页岩气井压裂技术难题，降低综合工程成本，研制了5-1/2"大通径桥塞分段压裂工具，外径110 mm，通径70 mm，耐压70 MPa，耐温150 °C，坐封力16~18 t，憋压球可降解，储层分段压裂后井筒内无需进行钻桥塞作业，大内通径有利于压裂液及时返排，快速进行测试投产，提高施工效率，降低施工成本。

(3)可溶桥塞。针对深层页岩气井压裂后连续油

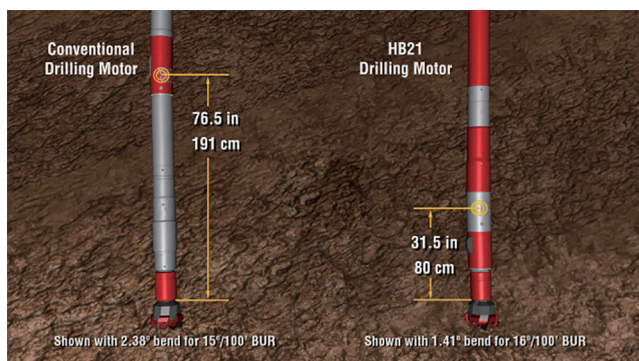
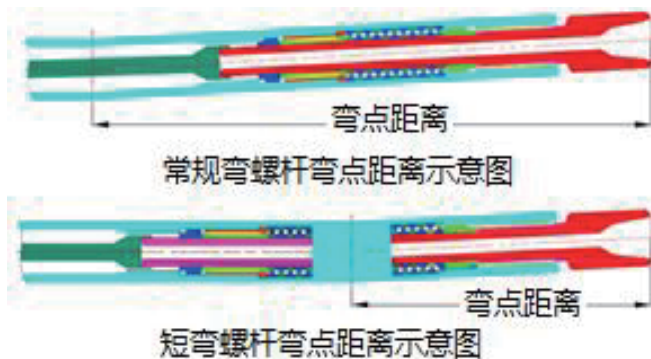


图5 短弯螺杆与常规螺杆结构对比

Fig. 5 The structural comparison between short-curved motor and conventional motor



管钻压传递差、钻桥塞时间长、井口带压作业风险大等问题,研制了4-1/2"、5-1/2"可溶桥塞,其耐压差70 MPa、耐温120℃、可溶时间72~200 h可调。现场应用了多口井,单井压裂不少于11段,施工压力最高62 MPa,压后16天桥塞全部溶解,大大缩短了后期作业时间和完井施工周期,单井作业成本降低20%以上,有效解决了用常规复合桥塞作业后钻桥塞困难、损伤套管和带压作业等难题。

3 钻完井及压裂流体材料

3.1 页岩地层高性能水基钻井液

深层页岩储层具有层理裂缝发育、水敏性强的特点,为了防止井眼失稳,确保井筒安全,深层页岩气钻井常用高温高密度油基钻井液体系^[1]。为了降低作业成本,减少油基岩屑后期处理成本,使工程更加环保,利用水基钻井液钻页岩气水平井一直是工程界追求的目标。通过对页岩地层失稳机理的研究,及不断的技术创新,研发了新型纳微米封堵材料、胺基抑制剂、高效润滑剂,并构建了深层页岩水基钻井液体系,密度1.80~2.30 g/cm³,HTHP滤失量4~6 mL,耐温150℃,极压润滑系数0.09~0.12。2018年在WY23平台应用了4口井,顺利完成了水平段1500 m钻井施工,井壁稳定,保证了钻井安全施工。其中,WY23-3HF井提前18天完成水平段钻井施工,WY23-3HF井完钻摩阻仅200 kN,接近邻井油基钻井液摩阻,并

创造了钻井周期75天的最短工区纪录。实践证明,这套水基钻井液页岩稳定周期可达60~70 d,满足了页岩气水平井钻井要求。

3.2 泡沫水泥浆体系

针对页岩气井漏失和压裂后井眼环空密封失效问题,研发了机械式充气固井装备。该装备利用高压气体混合发泡方法,在掺有发泡剂、稳泡剂的嘉华G级水泥浆中直接产生泡沫,通过合理的注气量,形成了充气泡沫水泥浆体系^[3],其密度为1.15~1.60 g/cm³,并可根据需要实时调整,水泥石的抗压强度为6~16 MPa、弹性模量为8~6 GPa。该技术较好地解决了固井漏失和分段压裂动载荷作用下对环空水泥石的损伤,提高了井眼环空密封质量。该体系在页岩气井技术套管固井中应用了30多口井,在川东南页岩气井生产套管固井中应用了3口井,固井质量优良。实践证明,泡沫水泥浆体系能更好地防止大型压裂导致的环空水泥环密封失效,为页岩气井的井筒长期密封提供了新的技术方法。

3.3 高效滑溜水体系

深层页岩气储层特征和体积压裂要求压裂液低摩阻、低黏度、低伤害、高携砂等,研发了新型高效降阻剂(SRFR)、增稠剂(SRFP)、交联剂(SRFC)、黏土稳定剂(SRCS)和助排剂(SRCA)等关键化学产品,并以关键化学品为基础,在中浅层页岩气压裂用的I型滑溜水体系的基础上,开发了适合深层页岩气压裂的

表1 全通径无限级分段压裂工具主要技术参数

Table 1 The main technical parameters of full-diameter infinite stage fracturing tool

工具	外径/mm	内径/mm	长度/mm	备注
液压丢手	79	33	520	丢手压力21 MPa
封隔器	114	40	1820	耐温120℃,封隔压力70 MPa
喷射器	100	36	240	最大过砂量45 t
接箍定位器	130	38	520	上提拉力1.2~2.2 t
无限级滑套	200	121.4	2213	打开压力16~20 MPa

表2 滑溜水性能

Table 2 The sliding water performance

体系名称	类型	降阻剂浓度/%	适用温度/℃	降阻率/%	溶解时间/s	黏度/(mPa·s)	表面张力/(mN/m)	降阻膨率/%
I型滑溜水	乳液型	0.07~0.1	150	80	60	1~3	26	75
II型滑溜水	粉末型	0.03~0.1	160	82	100	2~15	28	80

II型滑溜水体系，降摩阻率达到80%，性能见表2。新型滑溜水体系具有低摩阻、低膨胀、低伤害、低成本、快溶解等特点，在涪陵页岩气田平桥和江东、川南东溪页岩气等区块现场应用了50余井次，成功率100%，取得了较好的现场应用效果，满足了深层页岩气储层体积压裂改造的需要。

4 工程作业关键技术

4.1 井身结构与井眼轨道优化设计技术

四川盆地深层页岩气地表裂缝、溶洞、出水、出气等复杂情况多，为此，应用高密度电法勘探、测井、钻井、录井等综合技术手段^[7-8]，弄清地表溶洞、裂缝的分布规律，明确地层出水、出气以及压力分布特征，将四开井身结构简化为三开，并持续优化套管和钻头尺寸。针对定向段造斜率低、技术套管下深大和井眼尺寸大的问题，通过提高定向段造斜率(造斜率由4-5°/30 m提高至6-7°/30 m，靶前距由350 m调整到300 m)、上提技术套管下深等措施，将造斜点下移至技术套管鞋之下，定向段井眼尺寸由311.2 mm缩小为215.9 mm，实践表明，机械钻速同比提高30%~40%。

4.2 深层页岩气钻井提速技术

(1) 冲击器+大功率螺杆+PDC钻井提速技术

提高钻井速度，缩短钻井周期是钻井作业永恒的追求目标，针对深层页岩气井提速问题，提出了提高硬地层破岩效率三要素理论，即与地层相匹配的钻头、大钻压大扭矩破岩能量、减少钻头破岩能量损耗，基于该理论，制定了冲击器+大功率螺杆+PDC钻井提速技术。旋冲钻井是通过在钻头上部安装一个冲击器，将钻井液压力能转变为高频冲击力，在旋转和冲击共同作用下破碎岩石，显著提高了破岩效率；大功率螺杆采用等壁厚马达结构，提高每级承压能力，它具有优选短幅内摆线线型结构，该线型具有不打扣、偏心距小、综合曲率半径大等优点，改善了马达受力状况，输出扭矩15 000 Nm，机械钻速同比提高30%~40%。

(2) 控压降密度钻井技术

浅层裂缝气量小、侵入快、易漏失，采用控压降密度钻井技术可有效提高井筒稳定性并减少漏失；页岩储层裂缝断层发育带溢漏同存，采用控压降密度钻井技术，防止油基钻井液漏失和复杂情况的发生。该技术在JY9-3HF等井中应用，复杂时效显著降低，井内无漏失、坍塌，平均机械钻速13.04 m/h，同比提高29.89%。

4.3 提高裂缝改造体积技术

(1) 平面射孔技术

与螺旋射孔不同，平面射孔模式(图6)类似于直井的定向射孔，但直井定向射孔对裂缝方位的要求非常精确，而平面射孔对此无严格要求。优化的平面射孔的孔密为4~8孔/周，3~5簇/段。平面射孔可使得破裂压力降低10%~20%，压裂车组数量减少30%~50%，提高改造时效，同时可增加裂缝改造强度，使裂缝高度、宽度、长度增加19%~36%，SRV增加20%~40%。

(2) 交替注入技术

深层页岩气储层水平应力差大，靠压裂施工参数调整难以获得能突破天然裂缝张开的临界压力，因此，裂缝的复杂性也难以提升。目前常用的缝内转向剂也存在诸多弊端，如深层压裂的压力窗口窄，难以有效封堵动态扩展的裂缝；若高角度天然裂缝与层理缝共存，也容易引起裂缝高度的失控等。针对钙质含量高的页岩储层，采用滑溜水和酸液交替注入2~3次，可形成酸蚀通道，降低岩石强度，使破裂压力降低30%以上，施工压力降低2~3 MPa，提高了裂缝复杂性。

(3) 变黏度、变排量技术

为了形成多尺度复杂缝，采用变黏度、变排量组合模式注入滑溜水和线性胶，使裂缝宽度增加50%以上，SRV增加30%以上。排量对裂缝形态和SRV影响较大，一般线性胶排量控制在2~6 m³/min，滑溜水排量控制在10~12 m³/min。低、中、高黏滑溜水产生多尺度裂缝破裂，中、高黏度线性胶(占比20%~30%)使多尺度裂缝延伸(不超过100 mPa·s)。

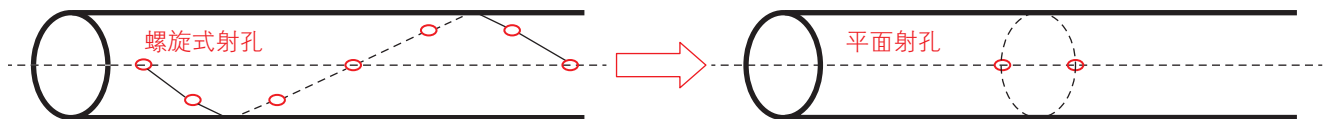


图6 平面射孔和螺旋射孔示意图

Fig. 6 Planar perforation VS helical perforation

表3 深层页岩气钻完井及压裂情况

Table 3 The application of drilling and fracturing in deep shale gas drilling

地区	完钻井数/口	垂深/m	井深/m	水平段长/m	平均机械钻速/(m/h)	钻井周期/天	测试产量/(万 m ³ /d)
涪陵	56	3600~4300	5400~5600	1568	7.54	78.2	18.7
威荣	9	3600~4000	5500~5700	1501	5.86	115.2	21.3
永川	9	3800~4200	5600~5870	1502	3.54	115.29	10.5
丁山	3	4100~4400	5300~5700	1034	2.7	219.0	12.4

(4)多尺度小粒径支撑剂技术

造出不同尺度的裂缝空间后,如何实现全尺度裂缝的饱和充填是提高ESRV的终极目标。采用多尺度小粒径支撑剂的优势有:在高闭合压力下导流能力与中粒径差别不大,有利于提高铺砂浓度和增强抗嵌入能力,确保不同分支裂缝封堵、降滤失和支撑,同时,支撑剂沉降速度减小1/3~1/2,有利于提高远井筒裂缝支撑效率。实践证明,小粒径支撑剂用量30%~40%,其加砂量提高10%~20%。

4.4 现场应用情况

深层页岩气工程技术在涪陵页岩气田平桥和江东区块、威荣、永川、丁山等地区现场实践和应用近80口井,取得了显著效果(见表3所示)。应用后,江东和平桥地区钻井机械钻速同比提高了27.2%,钻井周期缩短了29.8%,测试产量达到 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 以上,基本实现了深层页岩气的商业化开发。

5 结论与建议

国外深层页岩气区块已部分得到商业开发,并形成了配套钻井、压裂技术。我国深层页岩气勘探开发刚刚起步,地质条件更为复杂,近几年深层页岩气工程技术取得了较大进展,并成功完成了一批深层页岩

气井,但离高速、高效、低成本的要求还有差距,仍需进一步优化提升、配套完善与持续攻关。

(1)强化基础理论研究。完善硬地层钻井提速理论与方法,建立深层页岩气高效钻井方法;攻克深层页岩多尺度缝构建机制,构建高导流方法,进一步提高深层页岩压裂体积;持续攻关生产套管变形规律及机理,提出套管外部载荷计算模型,彻底解决套管变形问题。

(2)攻克一趟钻技术。目前与国外的最大差距是钻井周期长,核心问题是井下工具性能差,高效PDC钻头、大扭矩长寿命螺杆、旋转导向等仍是制约深层页岩气高效钻井的瓶颈技术,要大力开展攻关,实现一开次、一趟钻。

(3)推广深层页岩气工程新技术。推广深层高压页岩控压降密度钻井技术、高性能水基钻井液、泡沫水泥浆、弹性水泥浆、近钻头伽马成像探测、深层页岩高导流体积压裂技术等新技术,缩短钻井周期,提高单井产量,降低工程成本。

致谢:在本文撰写过程中,中国石化石油工程技术研究院臧艳彬、王海涛、甄剑武、倪卫宁、陶谦、魏辽等同志在资料收集及论文修改等方面提供了大量帮助。牛新明、蒋廷学等同志提出了许多宝贵修改意见。在此一并表示感谢!

参考文献

- [1] 中华人民共和国地质矿产行业标准. DZ/T0254-2014 页岩气资源储量计算与评价技术规范[S]. 北京:中国标准出版社. [People's Republic of China Geological and Mineral Industry Standard. Regulation of shale gas resources/ reserves estimation[S], DZ/T0254-2014. Regulation of shale gas resources/ reserves estimation[S]. Beijing: China Standard Press.]
- [2] 蒋廷学, 卞晓冰, 王海涛, 等. 深层页岩气水平井体积压裂技术[J]. 天然气工业, 2017, 37(1): 90-96.[JIANG T X, BIAN X B, WANGH T, et al. Volume fracturing of deep shale gas horizontal wells[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(1): 90-96.]
- [3] 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 B P. Sinopec engineering technical advance and its developing tendency in shale gas[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(5): 1-8.]
- [4] 曾义金. 页岩气开发的地质与工程一体化技术[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(1): 1-6. [ZENG Y J. Integration technology of geology & engineering for shale gas development[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(1): 1-6.]

- [5] 臧艳彬. 川东南地区深层页岩气钻井关键技术[J]. 石油钻探技术, 2018, 46(3): 7-12. [ZANG Y B. Key drilling technology for deep shale gas reservoirs in the southeastern Sichuan Region[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(3): 7-12]
- [6] 艾军, 张金成, 臧艳彬, 等. 涪陵页岩气田钻井关键技术[J]. 石油钻探技术. 2014, 42(5)9-14. [AI J, ZHANG J C, ZANG Y B, et al. The key drilling technologies in Fuling Shale Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(5): 9-15.]
- [7] POPE C, PETERS B, BENTON T, PALISCH T. Haynesville shale-one operator's approach to well completions in this evolving play[C]// SPE 125079-MS, 4-7 October, 2009, Louisiana, USA.
- [8] WOOD D D, SCHMIT B E, RIGGINS L, JOHNSON B J, TALLEY C A. Cana Woodford stimulation practices-A case history[C]//SPE 143960-MS, 14-16 June, 2011, Texas, USA.
- [9] 杨金华, 田洪亮, 郭晓霞, 等. 美国页岩气水平井钻井提速提效案例与启示[J]. 石油科技论坛. 2013, 32(6): 44-48. [YANG J H, TIAN H L, GUO X X, et al. Improvement of drilling speed and efficiency of US shale gas horizontal well[J]. Oil Forum. 2013, 32(6): 44-48]
- [10] 许建国, 陶瑞东, 郑智冬, 等. 牙轮-PDC混合钻头在迪北 103 井的应用试验[J]. 天然气工业, 2014, 34(10): 71-74. [XU J G, GUO R D, ZHENG Z D, et al. Pilot test of a roll-PDC hybrid bit in Well Dibe 103, Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(10): 71-74]
- [11] 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 X G, LI X, LIN Y T. Research and application of high performance oil base drilling fluid for shale horizontal wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(2): 17-22].
- [12] 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 W, TAO Q, DING S D. Difficulties and countermeasures for cementing technology of shale gas horizontal well[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(3): 40-43.]
- [13] 肖京南, 刘建, 桑来玉, 等. 充气泡沫水泥浆固井技术在焦页 9 井的应用[J]. 断块油气田, 2016, 23(6): 835-837. [XIAO J N, LIU J, SANG L Y, et al. Application of foamed cement slurry to Jiaoye-9 well[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2016, 23(6): 835-837]
- [14] 蒋廷学, 卞晓冰. 页岩气储层评价新技术—甜度评价方法[J]. 石油钻探技术, 2016, 44(04): 1-6. [JIANG T X, BIAN X B. The novel technology of shale gas play evaluation——sweetness calculation method[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2016, 44(4): 1-6]
- [15] JIANG T X, ZHOU D H, JIA C G, et al. The study and application of multi-stage fracturing technology of horizontal wells to maximize ESRV in the exploration & development of fuling shale gas play[C]. SPE 181797, 22-26 October, 2017, Beijing, China.

(编辑 马桂霞)