

# 庆深气田深层钻完井配套技术

韩福彬<sup>1</sup>, 杜敬安<sup>1</sup>, 王忠福<sup>2</sup>, 姜玉芳<sup>3</sup>

(1. 大庆油田有限责任公司勘探事业部, 黑龙江 大庆 163458; 2. 大庆钻探工程公司钻井生产技术服务一公司, 黑龙江 大庆 163358; 3. 大庆钻探工程公司钻井工程技术研究院, 黑龙江 大庆 163413)

**摘要:** 自庆深气田徐深 1 井取得深层天然气勘探重大突破以来, 大庆油田步入了油气勘探开发并举阶段。2004—2010 年完成 123 口井, 平均井深 4118 m、钻井周期 141 d, 钻井技术水平较低。虽然开展提速技术攻关取得一定效果, 但仍然不能满足天然气快速增储上产的需求, 还存在着固井后井口带压问题, 急需深入开展钻完井技术攻关。自 2011 年起, 借鉴国内外深层提速技术成果, 分开次、分层段针对岩性特点制定提速对策, 通过优化井身结构、优选高效 PDC 钻头、实验并自研液动旋冲和涡轮等新型提速工具, 大幅度提高了深井钻井技术水平, 2011—2013 年完成 19 口井, 平均井深 4075 m、同比缩短钻井周期 48.6 d; 针对井口带压问题, 综合分析其产生因素, 开展系列技术研究, 形成了防气窜固井配套技术, 为深层天然气快速增储上产提供了支持和保障。

**关键词:** 深层天然气; 钻井; 完井; 液动旋冲工具; 涡轮; 防气窜; 庆深气田

**中图分类号:** TE242; TE25      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-7428(2015)12-0018-05

**Matching Technology for Deep Drilling and Completion in Qingshen Gas Field/HAN Fu-bin<sup>1</sup>, DU Jing-an<sup>1</sup>, WANG Zhong-fu<sup>2</sup>, JIANG Yu-fang<sup>3</sup>** (1. Exploration Department of Daqing Oilfield Limited Company, Daqing Heilongjiang 163458, China; 2. Drilling Production Technology Service Company of Daqing Drilling & Exploration Engineering Corporation, Daqing Heilongjiang 163358, China; 3. Drilling Engineering Technology Research Institute of Daqing Drilling & Exploration Engineering Corporation, Daqing Heilongjiang 163413, China)

**Abstract:** Since the breakthrough of deep natural gas exploration in well 1 of Qingshen gas field, Daqing oilfield has stepped into the stage of both oil and gas exploration and development. For the low drilling technical level, only 123 wells were completed during 2004—2010 with average well depth 4118m and drilling cycle 141d. Since 2011, by using the experience of speed increasing technology for deep drilling both in China and abroad, and based on the rock features, the speed-raise countermeasures were worked out. By the well structure optimization, high-efficient PDC bits selection and independent-research on new tools, deep drilling level was greatly improved. During 2011—2013, 19 wells were completed with average depth of 4075m, drilling cycle was shortened 48.6d. According to the existing well head pressure, the causes were analyzed with a series of technical research; the matching cementing technology of gas channeling prevention was formed to provide the support and guarantee to increase reserve and production of deep natural gas.

**Key words:** deep natural gas; well drilling; well completion; hydraulic rotary percussion tool; turbine; gas channeling prevention; Qingshen gas field

大庆油田自发现以来, 一直以开发原油为主。但自徐深 1 井取得深层天然气勘探的重大突破后, 深井钻井工作量大幅度增加, 2005 年和 2007 年分别提交了千亿方的天然气探明储量, 自此步入了油气勘探开发并举阶段。

大庆深井的钻井技术水平较低, 2000—2003 年平均井深 3910 m、平均钻速 2.77 m/h、钻井周期 169 d。为满足快速提交探明储量的需求, 2004—2007 年开展了以优化井身结构、钻头优选、复合钻

井、强化钻井参数、预防钻井事故为主要内容的提速技术攻关, 平均井深 4073 m、平均钻速 3.17 m/h、平均钻井周期缩短 46 d, 但仍然长达 123 d。此外, 还探索形成了气体钻井技术, 但由于受地质条件、安全和成本的限制, 无法全面推广应用。在完井方面, 出现了多口井固井后井口带压现象, 存在安全隐患的同时还严重制约了增产改造技术措施的应用。

针对钻速慢的问题, 借鉴国内外深层提速技术成果, 从进一步优化井身结构、优选先进提速工具和

收稿日期: 2015-06-15; 修回日期: 2015-11-30

作者简介: 韩福彬, 男, 汉族, 1970 年生, 高级工程师, 油气钻井工程专业, 硕士, 主要从事钻井技术推广应用与管理工作, 黑龙江省大庆市让胡路区西柳街 4 号, hanfubin@petrochina.com.cn。

高效钻头、研制国产提速工具等方面出发,开展科研攻关与现场试验,取得了良好的提速效果,加快了深层天然气藏的经济有效勘探与开发步伐;针对井口带压问题,综合分析其产生因素,开展系列技术研究,形成了防气窜固井配套技术,为深层天然气快速增储上产提供了保障。

## 1 地质特点及钻完井难点

### 1.1 地质特点

庆深气田位于松辽盆地北部,深层是指白垩系下统泉二段以下至基岩风化壳地层,包括泉头组二段和一段、登娄库组四段至一段、营城组、沙河子组、火石岭组和基岩风化壳(石炭—二叠系)。各套地层顶面埋藏深度:泉二段 2150 ~ 2250 m、登娄库组 2500 ~ 2650 m、营城组 2700 ~ 3450 m、沙河子组、火石岭组和基岩顶面埋藏深度变化更大。地层岩性:泉头组二段和一段、登娄库组以泥岩、砂岩及其过渡岩性组成;营城组为流纹岩、安山岩及其碎屑岩和各类沉积碎屑岩;沙河子组为泥岩、砂(砾)岩夹煤层;火石岭组为中基性火山岩、砾石夹煤层。沙河子组是本区的主要烃源岩层,营城组火山岩和沙河子组砂(砾)岩是主要勘探对象<sup>[1-3]</sup>。

### 1.2 钻完井难点

(1) 深层岩石硬度大,岩石可钻性级值最高达 10.38 级,硬度大于 5000 MPa,火山岩、砾岩地层钻头磨损严重、钻速低。

(2) 平均地温梯度高达 4.1 °C/100 m,4000 ~ 5500 m 井深,井底温度 160 ~ 220 °C 之间。对钻井工具、仪器、助剂抗温性能要求高,易发生井下复杂,固井施工难度大。

(3) 深部地层压实程度高,孔渗低。徐家围子断陷带主力气层孔隙度 2.0% ~ 10.0%,渗透率  $(0.04 \sim 2.574) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,一般地层压力系数为 0.90 ~ 1.10,局部存在异常压力层系。

(4) 部分区块裂缝发育,存在胶结性差的破碎性地层,易发生井壁剥落、坍塌和恶性漏失等复杂。

(5) 深层储层中富含二氧化碳(CO<sub>2</sub>)伴生气,最高含量达 90% 以上,会对水泥石产生腐蚀作用,降低水泥石的碱性,使水泥环强度下降,渗透率增大。

(6) 增产改造工艺要求全井封固,封固段长、温差大,环空液柱压力及流动摩阻力大、易漏失。

## 2 钻井提速技术

通过钻井设计的优化有利于深层提速提效,需综合考虑设计井深、层位、岩性、地层压力、三开裸眼段长度以及各开次固井施工难度等多种因素。直井技套下深以 PDC 钻头实现二完为优化原则;三开重点优化设计应用高效 PDC 钻头复合钻井、气体钻井、液动旋冲钻井以及涡轮钻井等配套技术来提高下部井段钻井速度,从而确保缩短钻井周期,降低钻井成本。

### 2.1 井身结构优化

针对已钻井井身结构井间差异大、四开井累计完井时间就高达 69 d 等问题,开展井身结构优化,明确各开次完钻层位,深层直井全部实现三层井身结构。以 GS 区块为例说明深层直井井身结构优化过程:首先,优化表层套管下深为 352 m,封固地表松散地层,安装井口和承载技套质量;其次,根据气体钻井地层出水预测软件结果显示,GS3 井 3180.00 ~ 4388.00 m 井段地层出水量少适合开展气体钻井,因此优化技套下深为 3180 m(登四项),封固泉头组上部水层;最后,设计三开应用气体钻井、液动旋冲、涡轮钻井等综合配套提速技术。GS3 井实钻完钻井深 4920 m、钻井周期为 126.29 d,同采用四层套管井身结构的 GS1 和 GS2 井对比,分别节约钻井周期 199.12 d 与 102.54 d<sup>[5]</sup>。

### 2.2 高效钻头优选

在大庆深层气井利用综合“定量”选型方法优选钻头。根据所钻遇的地层岩性、测井资料等确定所钻井段的岩石级值及其匹配的钻头类型,利用已钻井的实钻数据进行综合评价,用最优化理论和模糊数学中聚类分析的方法针对二开、三开的地层进行了钻头优选,从而确定了深层钻头的适用范围,形成了深井钻头序列<sup>[2]</sup>。

对于技术套管段 Ø311.1 mm 井眼设计完钻层位为泉二段顶部的,由于泉三段—泉二段地层岩石硬度 < 700 MPa、抗压强度 < 100 MPa、可钻性级值 4 ~ 5,选用 CK506 钻头,基本实现 1 ~ 2 只 PDC 钻头完钻,钻进周期控制在 25 d 以内;对于技术套管段 Ø311.1 mm 井眼设计完钻层位为登娄库组的,由于泉一段—登娄库组地层岩石硬度 700 ~ 900 MPa、抗压强度 100 ~ 120 MPa、可钻性级值 5 ~ 6,优选双排齿、强攻击剖面、防止缩径倒划齿设计的 FX65D 钻头,在 GS3 井的 2503.90 ~ 3180.00 m 井段开展实

验,单只钻头进尺 676.1 m、纯钻时间 287.7 h、机械钻速达到 2.35 m/h,同比邻井平均水平节省 5 趟钻、节约时间 12 d,首次实现登娄库组 311.1 mm 井眼 PDC 完钻。

对于目的层段  $\phi 215.9$  mm 井眼,由于岩石硬度  $>900$  MPa、抗压强度  $>100$  MPa、可钻性级值  $>6$ ,

因此选用的钻头序列为双排齿的 MM64DH、Q636 (液动旋冲)、DD55560M-1 (涡轮)或是 637 级别以上的牙轮钻头。其中 MM64DH 钻头应用 5 口井累计进尺 4281.3 m,占三开总进尺的 74%,钻速 3.5 m/h,比牙轮钻头提高 48%。钻头类型选择参见图 1。

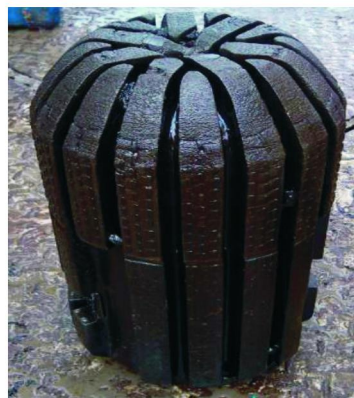
### 2.3 液动旋冲提速工具的研制与应用



(a)用于登四段的  $\phi 301$ mm FX65D钻头



(b)用于沙河子组的  $\phi 215.9$ mm MM64DH钻头



(c)用于营城组的  $\phi 215.9$ mm DD5560M-1钻头

图1 不同地层的钻头选型

#### 2.3.1 工作原理

液动旋冲工具工作原理如图 2 所示。钻井泵输出的高压钻井液,经过钻柱射流元件的喷嘴时产生附壁效应,假如先附壁于右侧,则由 E 输出道进入缸体的上腔,推动活塞及冲锤下行撞击砧子,完成一次冲击。在 E 输出道输出同时,反馈信号回至 B 放空孔,在活塞行程末使主射流切换附壁于左侧并经 C 输出道进入缸体的下腔,推动活塞及冲锤回程,同样在 C 输出道输出的同时,反馈信号又回到 D 信号孔,将主射流切换到右侧,如此往返,实现冲击动作。上、下缸体内回水,则通过 C、E 输出道而排到放空孔,再经水道到达井底钻头,冲洗井底后返回到地表井口<sup>[4]</sup>。

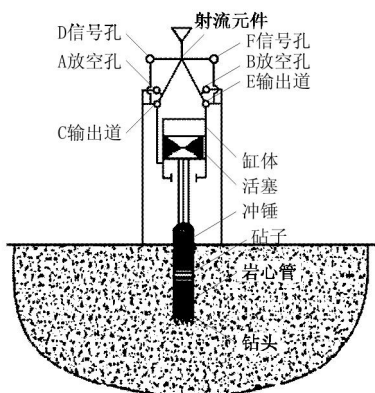


图2 液动旋冲工具工作原理

液动旋冲工具将钻井液的流体能量转化为机械能,PDC 钻头因周向的周期性冲击和轴向的水力脉冲,改变了 PDC 钻头的破岩方式,减缓了钻头的磨损速度,提高了钻头的破岩效率,进而提高了机械钻速。

#### 2.3.2 工具特点

(1) 提供额外的周向高频冲击力,消除粘滑现象,辅助 PDC 钻头剪切岩层;(2) 提高 PDC 钻头的适用性和耐久性;液动脉冲辅助破岩;(3) 纯机械构造,适用温度高;(4) 现场操作简单可行、安全可靠<sup>[2,6]</sup>。

#### 2.3.3 现场应用效果

液动旋冲工具不断改进完善,研制了适用于 6、8 1/2、9 1/2、12 1/4 in 井眼的 DQY127、DQY178、DQY196、DQY279 型等 4 种规格的液动旋冲工具(见图 3)。其中的 DQY178 型工具广泛应用于庆深气田深层直井目的层提速施工,在 8 口井中总进尺 4067.07 m,平均机械钻速 3.64 m/h,取得了良好的应用效果。

### 2.4 涡轮钻具的研制与应用

#### 2.4.1 工作原理

涡轮钻具(见图 4)是利用高压钻井液冲击反向弯曲的涡轮定、转子叶片,将钻井液的压力能转换为机械能,使钻头高速旋转,研磨地层实现破岩<sup>[2,7]</sup>。

#### 2.4.2 工具特点



图3 液动旋转工具



图4 涡轮钻头

(1)全金属结构设计,抗温性能良好;(2)输出扭矩平稳,钻具震动小,不易损伤和失速;(3)涡轮钻具驱动孕镶钻头高速旋转(800~1100 r/min)研磨地层,所钻井眼规则,井径变化小;(4)配合孕镶

钻头适宜于提高硬或极硬地层单只钻头进尺和行程钻速。

### 2.4.3 现场应用效果

自主研发的DQW178型涡轮钻具配合DD5560孕镶金刚石钻头,在SS9h井的3274~3607 m井段,一趟钻进尺326.19 m,钻穿了营城组进入沙河子组下部完钻。相当于6只牙轮钻头进尺,机械钻速1.67 m/h。与牙轮钻头相比,机械钻速提高145.6%、缩短钻井时间16.8 d;在SH11井3460.35~3923.72 m的沙河子组地层使用一只DD5560孕镶金刚石钻头,总进尺459.28 m、平均机械钻速2.24 m/h,机械钻速提高71.0%,相当于7只牙轮钻头进尺,缩短钻井周期12.07 d。

### 2.4.4 与国外涡轮钻具对比

大庆地区4口井应用了国外涡轮钻具,包括美国及俄罗斯涡轮钻具。从表1可以看出,大庆油田自研的涡轮钻具,各项指标接近或优于国外同类产品,在提速方面取得了显著的效果。

表1 自研涡轮钻具与引进涡轮钻具提速效果对比

型号	井号	层位	井段/m	进尺/m	机械钻速/(m·h <sup>-1</sup> )	提速效果/%
DQW-178(自研)	SS9h	沙河子	3274~3601	326.19	1.67	145.60
DQW-178(自研)	SS11	营城组-沙河子	3460.35~3482.13	459.28	2.62	100.00
			3486.22~3923.72		2.23	70.23
165-T1-MK1(美)	GS3	营城组	4485~4601	156.58	1.43	17.24
T2-178(俄)	DS15	登三-沙河子	2879~3607	728.18	2.13	33.15

## 3 防气窜固井技术

2010年以前,大庆油田深井固井普遍采用双级注固井工艺,相继发生了SS8井、SS2-17井等环空窜气现象,给后期生产和周边地区带来了严重的安全隐患。其特点是井口压力高、窜气量小,分析认为根本原因是存在微环隙。因此,针对可能导致微环隙的几个因素,从优化完井管串结构、提高冲洗效果、研发微膨胀水泥浆等方面入手研究,形成了防气窜固井技术<sup>[8-10]</sup>。

### 3.1 完井管串结构优化

由于双级注固井工艺的管串是连续的,全井封固时水泥浆凝固过程中套管受到的拉应力无法释放,形成了套管与水泥环之间的微间隙。借鉴国内外其它油田的经验,将双对固井级注固井工艺优化为尾管固井后再回接到井口固井工艺,既解决了套

管拉应力分散好和释放问题,又降低了单次作业环空液柱压力及流动摩阻,使漏失风险降到最低。

### 3.2 抗高温双效前置液研究

通过对表面活性剂、悬浮剂及调节剂的优选,研制了抗高温双效前置液体系。主要应用于高温井、深井及复杂井固井,主要具有以下特点:无需加入无机和聚合物类悬浮剂,利用表面活性剂本身的增稠效果可配制加重双效前置液;通过优选调节剂,可以针对不同井况、施工方案,对双效前置液进行合理的流变设计,最大程度地提高冲洗顶替效果,从而提高水泥环的界面胶结质量;密度适应范围宽、稳定性好,1.0~1.50 g/cm<sup>3</sup>可调,上下密度差<0.02 g/cm<sup>3</sup>;冲洗效果好,冲净时间<4 min;抗温达150℃;失水≤150 mL/30 min。

### 3.3 微膨胀水泥浆体系研究

针对部分井气窜和井口带压情况,在原有胶乳



水泥浆体系的基础上开展了抗高温微膨防窜胶乳水泥浆体系研究。

选择非发气、非钙矾石类膨胀材料。在塑性状态下,膨胀剂中的高反应活性组分首先与水泥的水化产物反应,形成相对受限的水化环境,使水泥浆产生塑性体积膨胀。在水泥浆硬化后,反应活性较低的组分与有机物单体共同作用,与水泥水化反应同步进行产生体积膨胀,此过程避免了由于膨胀剂水化产生的应力破坏水泥石已形成的结构。G级水泥中加入1%~4%膨胀剂实验表明:当加量达到1.5%时,膨胀量恰好抵消水泥凝固过程中的收缩量;加量为2%时水泥石体积略有涨大。确定的配方为:G+25%石英砂+5%防腐剂+2.0%膨胀剂+18%胶乳,其最高适用温度200℃,最大适用温差80℃,适合高温、大温差固井,该水泥浆体系失水低、直角稠化、微膨、防窜(抗窜能力:抗窜压差每米大于30 MPa<sub>a</sub>)、防腐、沉降稳定性及流变性能较好。

## 4 应用效果

### 4.1 直井提速技术效果(参见表2)

表2 庆深气田深层直井提速情况

年份	平均井深/m	平均钻速/(m·h <sup>-1</sup> )	钻井周期/d	完井周期/d	建井周期/d	统计井数/口
2011—2013	4075.30	4.13	91.60	19.05	118.40	19
2004—2010	4118.80	2.99	141.70	25.85	175.30	123

2011—2013年,共实施深层直井19口,平均井深4075.30 m,平均钻井周期91.6 d,平均机械钻速4.13 m/h,同比2004—2010年平均钻井周期缩短48.6 d,尤其达深16井完钻井深4400.00 m,全井仅用了8只PDC钻头,钻井周期64.96 d,创出了松辽盆地深层直井“大庆速度”。

### 4.2 防气窜固井技术效果

2011年以来,在ZS17等19口井中应用抗高温双效前置液、抗高温微膨胀胶乳防窜水泥浆体系进行尾管及回接固井技术,固井地面施工及固井质量合格率均为100%,未出现环空气窜及井口带压问

题,满足油田勘探生产需要。

## 5 结论与建议

(1)通过井身结构优化、高效钻头优选、液动旋冲工具、涡轮钻井以及气体钻井等新工艺新技术集成配套与应用,深井提速效果明显,初步形成了深层直井提速配套技术,达到了平均井深4075 m、机械钻速4.13 m/h、钻井周期91.6 d的技术水平。

(2)固井是个系统工程,防气窜应综合考虑各个环节。集成配套应用完井管串结构优化、高效前置液和防窜水泥浆体系等技术,能够解决高温气井的环空气窜问题。

(3)涡轮钻具在硬地层钻进过程中见到了良好的提速效果,但宋深9井、宋深11井均出现不同程度的井斜超标。因此,进一步开展钻具受力分析,优选螺扶尺寸和安放位置,优化出合理的钻具组合,从而在保障提速效果的同时保证井身质量。

## 参考文献:

- [1] 孔凡军,周英操,张书瑞,等.松辽盆地北部深层天然气勘探钻井技术[J].中国石油勘探,2004,9(4):38-42
- [2] 韩福彬,杨决算,李瑞营,等.大庆深层钻井技术现状与展望[J].大庆石油地质与开发,2014,33(5):220-225.
- [3] 陈绍云,邢琛,孙妍.提高庆深气田气体钻井效率技术研究[J].石油钻采工艺,2014,36(1):22-25.
- [4] 曾涛,于莹莹,黄丽.DQY178液动旋冲工具在东北地区应用[J].科技资讯,2013,(36):77.
- [5] 孙莉,李瑞营,孙义春.古深3井非目的层井段气体钻井设计与实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(6):53-56.
- [6] 李欢欢,王玉玺,李秋杰.扭力冲击器在大庆油田肇深17井的试验应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(4):44-47.
- [7] 冯定.涡轮钻具复合钻进技术[J].石油钻采工艺,2007,29(3):19-21.
- [8] 张宏军.深井固井工艺技术研究[J].石油钻探技术,2006,34(5):44-48.
- [9] 韩福彬.庆深气田深层气井防气窜固井配套技术[J].天然气工业,2009,29(2):70-72.
- [10] 李子丰,孟宪鹏,梁尔国,等.水泥浆胶凝失重与套管轴向拉力关系实验研究[J].石油钻采工艺,2010,32(6):23-27.