

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2011.01.016

川东北河坝区块井身结构的优化与实践

唐志军

(中国石化胜利石油管理局 钻井工艺研究院, 山东 东营 257017)

摘 要:川东北地区地质环境复杂,不仅给钻探工作带来诸多困难,同时对井身结构设计优化也提出了更高的要求。在简要分析该地区钻井技术难点的基础上,综合考虑钻井工艺水平、配套工具、货源、压力平衡关系、工程约束条件、事故发生概率等相关因素,应用系统工程原理,对川东北河坝区块的井身结构进行了优化与研究。重点对河坝 1 井井身结构进行了跟踪评价和钻后优化,形成了川东北地区两套井身结构优化设计方案。优化后的三开井身结构系列在河坝区块应用 3 口井,均大幅度缩短了钻井周期和建井周期,取得了良好的应用效果。

关键词:井身结构;优化设计;川东北地区;河坝 1 井

中图分类号:TE22 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2011)01-0073-05

Casing Optimization and Practice at Heba Block of Northeastern Sichuan Basin

Tang Zhijun

(Drilling Technology Research Institute, Shengli Petroleum Administration, Sinopec, Dongying, Shandong, 257017, China)

Abstract: The complexity of the geologic environment in Northeast Sichuan Basin brings a lot of difficulties for exploration and presents higher requirement for casing program optimization. Based on brief analysis of drilling technical difficulties in this region, the casing program was studied and optimized using systems engineering principles with the consideration of drilling technology, drilling tools, formation pressure, drilling capability and down hole trouble etc. . The follow up evaluation and post drilling optimization were conducted in casing program of Well Heba 1. Two casing program optimization designs in Northeast Sichuan Basin were developed. The optimized 3-spud casing program were used for 39 wells in Puguang gasfield, the optimized 4-spud casing program were used for 3 wells in Heba block. All the drilling cycles were significantly shortened and good results were obtained.

Key words: casing program; optimizing design; Northeast Sichuan Area; Well Heba 1

1 概 述

川东北地区地质环境复杂,不确定因素多,给钻探工作带来诸多困难,主要表现在^[1-5]:1)低压漏层以孔隙性渗漏与微裂缝漏失为主,主要目的层既为高压储层同时又为漏层,钻井液密度安全窗口极窄,致使防漏和堵漏工作要贯穿于整个钻井施工过程;2)陆相地层砂泥岩互层,软硬变化大且砂岩多为硅质胶结,岩石致密坚硬、可钻性低、研磨性强,钻头类

型选择面窄;3)地层倾角大,易井斜;4)目的层埋藏深,地层岩性变化大,地层压力预测及监测准确性差;5)同一裸眼井段中往往多套压力系统共存,喷、漏、塌、卡等井下故障多发;6)地层流体中富含

收稿日期:2009-06-04;**改回日期:**2010-12-02

作者简介:唐志军(1961—),男,1985年毕业于胜利油田职工大学钻井专业,2004年函授毕业于石油大学(华东),高级工程师,副院长,主要从事钻井工艺技术、钻井工程设计方面的科研工作。

联系方式:(0546)8501266, tangzhijun_slyt@sinopec.com

H₂S、CO₂ 等酸性气体。

基于上述技术难点,该地区对井身结构的要求高,井身结构设计及优化难度大。井身结构设计方法在理论上经历了一个“自下而上”和“自上而下”的过程^[2],针对复杂深井,目前有关领域的专家又提出了“从中间向两边考虑”的设计思路。不论哪一种方法,其目的都是实现安全钻达目的层位,其理论都是为满足五个压力平衡方程^[6]。对于复杂深井的井身结构设计可以综合运用上述几种方法,再由约束条件进行调节,给出相对合理的井身结构设计方案。但对于打过第一批探井的区块,应该根据实际情况借鉴系统工程原理对初期设计的井身结构进行跟踪、评价和优化。为此,在综合考虑钻井工艺水平、配套工具、货源、压力平衡关系、工程约束条件、事故发生概率等相关因素的基础上,应用系统工程原理^[7],对川东北河坝区块的井身结构进行了优化与研究。

2 井身结构优化

2.1 钻前设计

河坝 1 井位于四川盆地东北部通南巴构造带河坝场高点,钻探目的层分别为下三叠统嘉陵江组二段、飞仙关组三段、石炭系黄龙组;完钻层位为志留系中统。该区块属高压气藏,目的层多,地层压力高,且分属不同的压力系统。

河坝 1 井设计的井身结构见表 1。其中一开表层技术套管下深 150 m,其目的为增强井控能力,缩短下开次钻进裸眼长度;二开技术套管下深 2 800 m,其目的为封固自流井组中部以上陆相易塌、中低压地层;三开技术套管下至飞仙关组三段顶部,其目的为封固雷口坡组至嘉陵江组、飞仙关组四段大段盐膏层、含 H₂S 高压气层等复杂地层,为下一步安全钻井创造条件;四开尾管完井。

| 表 1 河坝 1 井井身结构设计结果 | | | | |
|--|-------------|-------|-------------|-------------|
| Table 1 Casing program design of Well Heba 1 | | | | |
| 开次 | 钻头直径/ mm | 钻深/m | 套管直径/ mm | 套管下深/ m |
| 导管 | 914.4 | 20 | 762.0 | 20 |
| 一开 | 660.4 | 151 | 508.0 | 150 |
| 二开 | 444.5 | 2 802 | 339.7 | 2 800 |
| 三开 | 311.1 | 5 023 | 244.5 | 5 020 |
| 四开 | 215.9 | 6 100 | 177.8 | 4 820~6 100 |

2.2 跟踪评价

对实钻过程进行安全系统评价。河坝 1 井二开井段,由于 $\phi 444.5$ mm 钻头的破岩面积大、可选择型号少,加之地层倾角大、岩性变化频繁,井壁垮塌掉块非常严重,井下清洁困难,不得不提前下入 $\phi 339.7$ mm 套管,封至下沙溪庙组地层中部。由于提前下入了第一层技术套管,使上部承压能力较低的地层暴露于三开裸眼井段,考虑嘉二段地层可能出现高压气层,而上部地层出现多次井漏,做承压试验地层承压能力不能满足密度 2.00 kg/L 的要求,提前于井深 4 335.92 m(地层为嘉三段底部)下入了第二层 $\phi 244.5$ mm 技术套管,封固了须家河组、雷口坡组及嘉陵江组三段承压能力低的非主要目的层。四开钻进过程中揭示了嘉陵江组二段和飞仙关组三段两个高压气层,而嘉陵江组二段钻进时钻井液密度为 2.14 kg/L,如果使用密度为 2.14 kg/L 的钻井液继续钻进下部地层,特别是裂缝比较发育的飞仙关组三段、上二叠统长兴组、石炭系黄龙组等目的层可能会发生大型漏失,继而会导致“上喷下漏”的恶性事故。因此,引进 ABL 膨胀筛管封隔技术封隔嘉二段高压气层,为了更安全,同时四开下入 $\phi 193.7$ mm 尾管,下至飞三段顶。五开下入 $\phi 127.0$ mm 尾管。河坝 1 井实钻井身结构见表 2。

| 表 2 河坝 1 井实钻井身结构 | | | | |
|---|-------------|----------|-------------|-----------------------|
| Table 2 Actual casing program for Well Heba 1 | | | | |
| 开次 | 钻头直径/ mm | 钻深/m | 套管直径/ mm | 套管下深/ m |
| 套管 | 860.4 | 16.20 | 720.0 | 16.20 |
| 一开 | 660.4 | 148.30 | 508.0 | 147.92 |
| 二开 | 444.5 | 2 187.00 | 339.7 | 2 183.55 |
| 三开 | 311.1 | 4 340.00 | 250.8+244.5 | 4 335.90 |
| 四开 | 215.9 | 5 007.09 | 193.7 | 4 032.40~ 5 002.80 |
| 五开 | 165.1 | 6 130.00 | 127.0 | 4 849.10~ 6 130.00 |

注:四开、五开均为尾管固完井,其中 4 462.69~4 533.22 m 为膨胀管封隔段。

2.3 钻后优化

河坝区块第一批探井钻完后,基于对地质情况的进一步的认识,针对实钻过程中前期设计井身结构出现的问题,利用系统工程原理对该区块后续评

价井的井身结构进行了优化。首先进行系统分析,结合当前钻井工艺水平、配套工具、管材货源问题等多种因素对套管系列进行了优化;在此基础上综合考虑压力平衡关系(地层孔隙压力、地层破裂压力)、工程约束条件(垮塌、漏失、套管挤毁等)、事故发生概率及钻井方式(陆相地层采用气体钻井)等相关因素,对套管下深进行了优化研究。

2.3.1 套管系列优化

鉴于国内深井常用套管程序($\phi 508.0\text{ mm}$ — $\phi 339.7\text{ mm}$ — $\phi 244.5\text{ mm}$ — $\phi 177.8\text{ mm}$ — $\phi 127.0\text{ mm}$)存在的不足,对其进行了优化:扩大下部井眼尺寸,用 $\phi 273.1\text{ mm}$ 套管取代 $\phi 244.5\text{ mm}$ 套管。经优化形成以下的井身结构系列:三开为 $\phi 508.0\text{ mm}$ — $\phi 339.7\text{ mm}$ — $\phi 273.1\text{ mm}$ — $\phi 177.8\text{ mm}$,四开为 $\phi 508.0\text{ mm}$ — $\phi 339.7\text{ mm}$ — $\phi 273.1\text{ mm}$ — $\phi 193.7\text{ mm}$ — $\phi 139.7\text{ mm}$ (或 $\phi 146.1\text{ mm}$ 无接箍套管)。

优化后井身结构系列的主要特点是,使用 $\phi 273.1\text{ mm}$ 套管作为主要的技术套管。目前国内已经具备了生产 $\phi 273.1\text{ mm}$ 、 $\phi 193.7\text{ mm}$ 和 $\phi 146.1\text{ mm}$ 套管及无接箍套管的能力,可以为钻井现场施工的需要提供保障。该套井身结构系列的优点在于:

1) 相对扩大了完井管柱的尺寸。使用 $\phi 165.1\text{ mm}$ 钻头下入 $\phi 146.1\text{ mm}$ 无接箍套管,可以为完井提供较大的管柱尺寸,为天然气生产开发提供优良的井眼条件。

2) 大部分井段可使用 $\phi 139.7\text{ mm}$ 钻杆钻进,利于提高钻井速度和保证井下安全。大尺寸钻杆可以减少钻杆内水力能量的损失,有利于提高钻进排量与钻头水力能量的利用;大尺寸钻杆还可以提高遇卡时的提拉能力。

3) 下部井眼可采用较大尺寸的钻头钻进,有利于优化钻井、取心、打捞落鱼及下套管固井施工等作业,而且在遇到井下复杂情况时有调整的余地。

2.3.2 套管下深优化

河坝区块评价井主要目的层为飞仙关组和嘉陵江组;完钻层位为飞仙关组。根据该区块的地质特点(见表 3),借鉴河坝 1 井的实践经验,利用系统工程的基本方法进行系统设计,综合考虑地层孔隙压力、地层承压能力、地层漏失、套管挤毁及钻井方式等相关因素进行分析研究,确定出优化后的套管下深,以下从导管、表层套管、技术套管 1、技术套管 2 等方面具体说明。

表 3 河坝区块地质分层及压力数据
Table 3 Heba Block's geological stratification and formation pressure data

| 地质分层 | | | | 地震反射层 | 设计地层 | | 主要目的层 | 地层压力系数 |
|------|----|-------|------|---------------------------------|--------|---------|-------|-----------|
| 系 | 统 | 组 | 段 | | 井深底界/m | 厚度/m | | |
| 侏罗系 | 上统 | 蓬莱镇组 | | J ₂ s | 914 | 914 | | 1.00~1.35 |
| | | 遂宁组 | | | 1 574 | 660 | | |
| | | 上沙溪庙组 | | | 2 734 | 1 160 | | |
| | 中统 | 下沙溪庙组 | | | 3 154 | 420 | | |
| | | 千佛崖组 | | | 3 494 | 340 | | |
| | | 自流井组 | | | 3 894 | 400 | | |
| | 上统 | 须家河组 | | T ₃ x | 4 264 | 370 | | 1.00~1.35 |
| 三叠系 | 中统 | 雷口坡组 | 三段 | T ₂ l ₁ | 4 384 | 120 | | 1.25~1.60 |
| | | | 二段 | | 4 484 | 100 | | |
| | | | 一段 | | 4 778 | 294 | | |
| | 下统 | 嘉陵江组 | 五-四段 | T ₁ j ₅₋₄ | 4 957 | 179 | | 1.60~2.16 |
| | | | 三段 | T ₁ j ₂ | 5 161 | 204 | | |
| | | | 二段 | | 5 361 | 200 | | |
| | | | 一段 | | 5 625 | 264 | | |
| | | 飞仙关组 | 四段 | T ₁ f ₄ | 5 705 | 80 | 气层 | 1.60~2.28 |
| | | | 三段 | | 5 905 | 200(未穿) | | |
| | | | | | | | | |

1) 导管 $\phi 508.0\text{ mm}$ 导管封隔地表松散流砂、砂砾层,建立井口。

2) 表层套管 $\phi 339.7\text{ mm}$ 表层套管以封隔上

部易塌地层为主。目前河坝地区表层套管的下入深度一般在上沙溪庙组(或下沙溪庙组)。具体下入深度应考虑套管抗挤强度满足气体钻井的需要,如下

一层技术套管下入较深,必须采用先悬挂后回接至井口的方式。

3) 技术套管 1 $\phi 273.1$ mm 技术套管封过雷口坡组,井深 4 400~4 800 m。主要目的是封隔承压能力低的地层及避免钻开下部高压地层时,高密度钻井液将上部地层压漏;同时还应考虑到钻井液对地层冲刷、浸泡时间、地层自身的稳定性及可钻性等因素。鉴于该层套管下深较深,受钻机负荷的限制可能要先悬挂后回接;但在钻机负荷能够满足要求的前提下,建议优先采用一次性下入套管,这样可以避免“悬挂”带来的后续问题。

4) 技术套管 2 $\phi 193.7$ mm 技术套管原则上是下至飞三段顶部。其目的是为封隔嘉二段高压层,并为避免不同压力系统的两个高压地层嘉二段、飞三段(河坝 1 井地层压力系数实测数据为:嘉二段 2.16、飞三段 2.28)暴露在同一裸眼井段。但实际下深需要根据嘉二段以上裸眼井段的承压能力来确定。具体分析如下:

若嘉二段产层以上裸眼井段承压能力能达到 2.36 kg/L 则可继续钻进,用该密度钻井液钻开嘉二段产层,如无异常可逐步将钻井液密度调整至近平衡钻井液密度的低限,于飞三段产层顶部下入 $\phi 193.7$ mm 技术套管,先悬挂后回接。四开采用 $\phi 165.1$ mm 钻头钻至设计井深,裸眼或下入 $\phi 146.1$ mm 无接箍尾管完井。

若嘉二段产层以上裸眼井段承压能力达不到 2.36 kg/L,则于嘉二段产层顶部(不能揭开产层)下入 $\phi 193.7$ mm 技术套管,先悬挂后回接。四开适当降低钻井液密度,采用 $\phi 165.1$ mm 钻头钻进。其中:a. 若在嘉二段地层钻遇高压气层或漏层,则在飞三段产层顶部(不钻开产层)下入 $\phi 146.1$ mm 无接箍尾管,采用 $\phi 117.5$ mm 钻头钻至设计井深,裸眼完井;b. 若在嘉二段地层未钻遇高压气层或漏层,则当在钻开飞三段产层前能将上部裸眼井段承压能力提高至 2.48 kg/L 时,用 2.35 kg/L 密度钻井液钻开飞三段产层;当在钻开飞三段产层前上部裸眼井段承压能力不能提高至 2.48 kg/L 时,则在飞三段产层顶部(不钻开产层)下入 $\phi 146.1$ mm 无接箍尾管,采用 $\phi 117.5$ mm 钻头钻至设计井深,裸眼完井。

依据上述系统分析确定套管下深原则,用计算机程序根据所钻地区压力剖面、井身结构设计系数等资料,根据裸眼井段的力学平衡关系,使每两层套管之间的裸眼井段满足以下 5 个力学平衡方程(式

(1)~(5))^[6],加以校核,并对各层套管下深作适当调整,最终确定各层套管的准确下深。

防井涌方程:

$$\rho_{\max} \geq \rho_{\text{pmax}} + S_b + \Delta\rho$$

(1)

防压差卡钻方程:

$$0.009\ 8(\rho_{\max} - \rho_{\text{pmin}})H_{\text{pmin}} \leq \Delta p$$

(2)

防漏方程:

$$\rho_{\max} + S_g + S_f \leq \rho_{\text{fmin}}$$

(3)

关井时的防漏方程:

$$\rho_{\max} + S_f + S_k H_{\text{pmax}}/H_{\text{cl}} \leq \rho_{\text{fcl}}$$

(4)

防井涌、井塌方程:

$$\rho_{\max} \geq \max\{\rho_{\text{pmax}} + S_b + \Delta\rho, \rho_{\text{cmax}}\}$$

(5)

式中: ρ_{\max} 为裸眼井段使用的最高钻井液密度,kg/L; ρ_{pmax} 为裸眼井段钻遇的最高地层孔隙压力当量密度,kg/L; ρ_{pmin} 为裸眼井段钻遇的最低地层孔隙压力当量密度,kg/L; ρ_{fmin} 为裸眼井段钻遇的最低地层破裂压力当量密度,kg/L; ρ_{fcl} 为上一层套管鞋处的地层破裂压力当量密度,kg/L; ρ_{cmax} 为裸眼井段钻遇的最高井壁坍塌压力当量密度,kg/L; H_{pmin} 为裸眼井段最低地层孔隙压力处的井深,m; H_{pmax} 为裸眼井段最高地层孔隙压力处的井深,m; H_{cl} 为上一层套管的下入深度,m; S_b 为抽汲压力系数,kg/L; S_g 为激动压力系数,kg/L; S_f 为地层破裂压力安全增值,kg/L; S_k 为井涌允量,kg/L; Δp 为压差卡钻允值,MPa; $\Delta\rho$ 为附加钻井液密度,kg/L。

2.3.3 优化方案及相关分析

优化后的井身结构见表 4。该井身结构具有以下优点:

1) 上部地层可安全使用气体钻井方式,钻井速度快;

表 4 井身结构优化设计方案

Table 4 Optimization design of casing program

| 开钻序号 | 井眼尺寸/mm | 钻深/m | 套管尺寸/mm | 套管下深/m | 层位 |
|------|-----------------|-----------------|---------|-----------------|-------|
| 导管 | 660.4 | 150 | 508.0 | 150 | |
| 一开 | 406.4/ 444.5 | 2 002 | 339.7 | 2 000 | 上沙溪庙组 |
| 二开 | 311.1 | 4 402~ 4 802 | 273.1 | 4 400~ 4 800 | 雷口坡组 |
| 三开 | 241.3 | 5 402~ 5 702 | 193.7 | 5 400~ 5 700 | 飞四段 |
| 四开 | 165.1 | 井底 | 146.1 | 井底 | 飞三段 |

2) 技术套管封过雷口坡组承压能力低的地层,不必过分依赖钻井液,为打开高压储层提供了良好的井眼条件;

3) 与河坝 1 井相比,三开采用 $\phi 241.3$ mm 钻头,增大了钻头与套管之间的环空间隙;

4) 深部井段钻井安全性高,有利于实现地质目的。

该井身结构的实施难点为技术套管重量大,要求钻机负荷足够大。

3 现场应用

优化后的三开井身结构系列($\phi 508.0$ mm— $\phi 339.7$ mm— $\phi 273.1$ mm— $\phi 177.8$ mm)主要用于普光气田。截至 2009 年 5 月普光气田主体钻井工程宣布结束,共完钻 39 口井,均采用该系列。该套井身结构的应用一方面确保了安全钻井施工,另一方面为提高机械钻速奠定了基础。据统计,普光气田 39 口开发井累计钻井进尺 234 841 m,平均钻井周期 175.96 d,与同区块探井钻井周期相比,减少了 156.83 d。普光 202-1 井更是创出了钻井周期 108 d、建井周期 134 d 的川东北地区最好纪录。

优化后的四开井身结构系列($\phi 508$ mm— $\phi 339.7$ mm— $\phi 273.1$ mm— $\phi 193.7$ mm— $\phi 139.7$ mm 或 $\phi 146.1$ mm 无接箍)在河坝区块河坝 101 井、102 井、104 井等 3 口井进行了应用。目前,这 3 口井均已安全顺利完钻,除河坝 104 井根据甲方要求二开封过嘉四段、井身结构作了调整外,河坝 101、102 井与河坝 1 井相比大大缩短了钻井周期(河坝 1 井钻井周期 1 165.84 d,河坝 102 井钻井周期 414.85 d)。

4 结论及建议

1) 以 $\phi 273.1$ mm 套管为技术套管的井身结构优化方案,为川东北地区复杂地质条件下的安全钻探提供了解决方案,应用效果良好。

2) 可以用系统工程原理来解决复杂地质条件下深井的井身结构优化问题,实现井身结构系统全面的优化。虽然该理论在 20 世纪 60 年代就已形成体系,但在井身结构优化领域的使用还处于初级阶

段,还有待于进一步探索,形成使用方便的模型或一体化计算机应用程序。

3) 为了加快南方深部油气勘探开发步伐,应加快合理井身结构与气体钻井、钻头选型技术、复杂深井钻井液技术等多方面技术的配套研究,为南方复杂深井钻井提供技术支撑,实现复杂条件下深井超深井安全、优质、快速、低耗钻井。

参 考 文 献

- [1] 边培明. 深层海相气井井身结构优化及应用[J]. 钻采工艺, 2006, 29(6): 13-15.
Bian Peiming. Optimization and application of casing program in deep marine gas well[J]. Drilling & Production Technology, 2006, 29(6): 13-15.
- [2] 邹建龙, 高永会, 朱海金, 等. 川东北地区高密度防气窜水泥浆体系研究[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(1): 46-49.
Zou Jianlong, Gao Yonghui, Zhu Haijin, et al. Research of high-density cement slurry to prevent gas migration in Northeast Sichuan[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(1): 46-49.
- [3] 陈济峰, 李根生, 万立夫. 川东北地区钻井难点及对策[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(6): 48-52.
Chen Jifeng, Li Gensheng, Wan Lifu. Challenges and measurements of drilling in Northeast Sichuan[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(6): 48-52.
- [4] 陈济峰, 燕修良, 高航献. 川东北地区气体钻井技术实践与认识[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(4): 39-42.
Chen Jifeng, Yan Xiuliang, Gao Hangxian. Gas drilling technique in Northeast Sichuan Basin[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(4): 39-42.
- [5] 刘四海, 崔庆东, 李卫国. 川东北地区井漏特点及承压堵漏技术难点与对策[J]. 石油钻探技术, 2008, 36(3): 20-23.
Liu Sihai, Cui Qingdong, Li Weiguo. Circulation loss characteristics and challenges and measures to plug under pressure in Northeast Sichuan Area[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2008, 36(3): 20-23.
- [6] 管志川, 李春山, 周广陈, 等. 深井和超深井钻井井身结构设计方法[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2001, 25(6): 42-44.
Guan Zhichuan, Li Chunshan, Zhou Guangchen, et al. A method for designing casing program in deep and superdeep wells[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 2001, 25(6): 42-44.
- [7] 刘绘新, 张鹏, 熊友明. 合理井身结构设计的新方法研究[J]. 西南石油学院学报, 2004, 26(1): 19-22.
Liu Huixin, Zhang Peng, Xiong Youming. A new method of well structure design by salt rock creep pressure profile[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2004, 26(1): 19-22.