

# 大位移井悬链线剖面设计的数值计算

鲁 港<sup>1</sup>, 曹传文<sup>2</sup>, 夏泊沂<sup>3</sup>

(1. 中国石油辽河油田公司勘探开发研究院, 辽宁 盘锦 124010; 2. 中国石油辽河油田公司钻井工程部, 辽宁 盘锦 124010; 3. 中国石油长城钻探工程公司工程技术研究院, 辽宁 盘锦 124010)

**摘要:**悬链线剖面是大位移井轨道的经典类型,在进行设计时需要求解一个以悬链线初始井斜角为未知数的非线性方程。由于未知数包含在多个三角函数和对数函数中,计算工作量较大,而且常用的迭代求解方法存在一些问题。通过数学变换将该方程转换成一个只包含对数函数和多项式函数的新方程,对新方程的函数性态做了几何分析,进而提出了寻找求解区间的步长搜索算法和自适应步长搜索算法。利用二分法在求解区间上能够快速求出新方程的数值解。利用大位移井设计实例验证了本文算法的有效性,并对圆弧井段并眼曲率与方程解的关系进行了讨论。本文提出的算法可用于大位移井轨道设计的计算机软件开发中。

**关键词:**大位移井;悬链线;并眼轨道;数值计算;二分法

**中图分类号:**TE243 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2010)02-0001-03

**Numerical Calculation on Design of Catenary Shape Profile for Extended Reach Well/LU Gang<sup>1</sup>, CAO Chuan-wen<sup>2</sup>, XIA Bo-yi<sup>3</sup>** (1. Exploration & Development Research Institute, Liaohe Oilfield Company, PetroChina, Panjin Liaoning 124010; 2. Liaohe Oilfield Company Drilling Department, PetroChina, Panjin Liaoning 124010, China; 3. Engineering & Technology Research Institute, Great Wall Drilling Corporation, PetroChina, Panjin Liaoning 124010)

**Abstract:** Catenary shape profile is a classical type of extended reach well; a nonlinear equation with the initial well oblique angle as unknown factor should be solved for its design. As this unknown factor exists in several triangular functions and logarithmic functions, large amount of calculation is required; and common-used iterative solution method is not so ideal. The nonlinear equation is changed to a new one only with logarithmic function and polynomial function, to which geometric analysis is made on the function character, and step search algorithm and adaptive step search algorithm are proposed for solution interval. Numerical solution of new equation can be got rapidly in solution interval by dichotomy. The effectiveness of the above algorithm was proved by the design case of extended reach well, and relationship between hole curvature in arc well section and equation solution was discussed. The algorithm introduced in this paper can be applied in the development of computer software for the design on extended reach well trajectory.

**Key words:** extended reach well; catenary; borehole trajectory; numerical calculation; dichotomy

在大位移井的并眼轨道设计中,为了尽量减小钻柱的摩阻、改善钻柱的受力情况,在 20 世纪 80 年代出现了悬链线井身剖面,并在大位移井的钻井实践中显示出了其优越性<sup>[1,2]</sup>。悬链线井身剖面是二维的,典型的悬链线剖面通常由 4 个井段组成:直井段、圆弧井段、悬链线井段和稳斜井段。在早期的悬链线剖面设计方程组中,使用了双曲函数,使得计算非常复杂。韩志勇<sup>[3]</sup>提出的无因次设计方法消除了计算公式中的双曲函数,使计算过程大为简化。

悬链线剖面设计需要一个非线性方程的数值解,刘修善<sup>[1]</sup>建议使用迭代法进行求解。但是在该非线性方程中,未知数包含在几个三角函数之中,计

算工作量较大,而且由于三角函数的周期性,容易出现多解现象。本文对该非线性方程做了数学变换,消除了方程中的含未知数的三角函数,并给出了使用二分法求其数值解的具体迭代算法。

## 1 并眼轨道数学模型

悬链线剖面设计的数学模型如下<sup>[1]</sup>:

$$\begin{aligned} \Delta L_1 \cos \alpha_1 + \frac{\sin \alpha_b - \sin \alpha_1}{K_2} + a \left( \frac{1}{\sin \alpha_b} - \frac{1}{\sin \alpha_1} \right) \\ + \Delta L_4 \cos \alpha_4 = H_1 \quad (1) \\ \Delta L_1 \sin \alpha_1 + \frac{\cos \alpha_1 - \cos \alpha_b}{K_2} + a \left( \ln \tan \frac{\alpha_1}{2} - \ln \tan \frac{\alpha_b}{2} \right) \end{aligned}$$

收稿日期:2009-09-04; 修回日期:2009-11-25

项目基金:国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”之课题 21-6“钻井工程设计和工艺软件”(项目编号:2008ZX05021-006)资助

作者简介:鲁港(1963-),男(汉族),辽宁锦州人,中国石油辽河油田公司勘探开发研究院高级工程师,应用数学、钻井工程、勘探开发专业,硕士,从事石油钻探领域数学模型及算法的理论研究和计算机软件开发工作,辽宁省盘锦市兴隆台区石油大街 9 号勘探数据中心(124010),Lugang1963@163.com。

$$+\Delta L_4 \sin \alpha_4 = A_1 \quad (2)$$

式中: $\Delta L_1$ ——直井段的长度, m;  $\alpha_1$ ——直井段的井斜角, 弧度;  $K_2$ ——圆弧井段的井眼曲率, 弧度/m;  $\alpha_b$ ——悬链线井段初始井斜角, 弧度;  $a$ ——悬链线特征参数, m;  $\alpha_4$ ——稳斜井段的井斜角, 弧度;  $\Delta L_4$ ——稳斜井段的长度, m;  $H_1$ ——靶点垂深, m;  $A_1$ ——靶点平移, m。

对于通常的设计来说, 第一个井段是直井段, 这时  $\alpha_1 = 0$ ; 如果第一个井段是斜直井段, 则  $\alpha_1 > 0$ 。

在方程组(1~2)中, 有5个待定参数:  $\Delta L_1$ 、 $K_2$ 、 $\alpha_b$ 、 $a$ 、 $\Delta L_4$ , 需要将其中3个参数指定为已知的。本文讨论已知  $\Delta L_1$ 、 $K_2$  和  $\Delta L_4$  的情况下的数值求解方法, 这时, 将  $a$  和  $\alpha_b$  作为待求参数。从式(1)~(2)得:

$$\frac{1}{\sin \alpha_b} - \frac{1}{\sin \alpha_4} - \frac{h_0 - \sin \alpha_b}{a_0 + \cos \alpha_b} (\ln \tan \frac{\alpha_4}{2} - \ln \tan \frac{\alpha_b}{2}) = 0 \quad (3)$$

$$a = \frac{h_0 - \sin \alpha_b}{K_2 \left( \frac{1}{\sin \alpha_b} - \frac{1}{\sin \alpha_4} \right)} \quad (4)$$

式中:

$$h_0 = K_2 (H_1 - \Delta L_1 \cos \alpha_1 - \Delta L_4 \cos \alpha_4) + \sin \alpha_1 \quad (5)$$

$$a_0 = K_2 (A_1 - \Delta L_1 \sin \alpha_1 - \Delta L_4 \sin \alpha_4) - \cos \alpha_1 \quad (6)$$

从式(4)可以看出, 如果已经求出了  $\alpha_b$ , 则从该式直接就可以计算出悬链线特征参数  $a$ 。而式(3)只包含未知数  $\alpha_b$ , 与悬链线特征参数  $a$  无关, 故只需要研究方程(3)的解法。

## 2 数值算法

刘修善<sup>[1]</sup>建议使用迭代法求解方程(3), 但是没有进一步讨论使用哪种迭代法。求解一般的非线性一元方程的迭代法有很多, 例如 Newton 迭代法、弦截法、二分法等<sup>[4]</sup>。不同的迭代法对于迭代初值的设定以及函数性态有不同的要求。Newton 法等需要导数信息, 且对迭代初值有一定的要求。通过编程对比计算, 发现二分法最适合于方程(3)的数值求解计算。

由于方程(3)中包含了多个三角函数, 并且未知数  $\alpha_b$  在三角函数之中,  $\sin \alpha_b$ 、 $\cos \alpha_b$  与  $\tan(\alpha_b/2)$  具有相关性, 直接进行迭代求解的计算稳定性较差。为此, 先对方程(3)做一些数学处理之后再求解。

令  $t = \tan(\alpha_b/2)$ , 并利用三角函数中的倍角公式得:

$$\sin \alpha_b = \frac{2t}{1+t^2}, \quad \cos \alpha_b = \frac{1-t^2}{1+t^2}$$

于是, 方程(3)化简成下面的形式:

$$F(t) = 0 \quad (7)$$

式中:

$$F(t) = c_4 t^4 - c_3 t^3 + a_0 t^2 - c_1 t + c_0 - (h_0 t^3 - 2t^2 + h_0 t) \ln(t_4/t)$$

$$c_4 = \frac{a_0 - 1}{2}, \quad c_3 = \frac{a_0 - 1}{\sin \alpha_4}, \quad c_1 = \frac{a_0 + 1}{\sin \alpha_4}, \quad c_0 = \frac{a_0 + 1}{2}, \quad t_4 = \tan \frac{\alpha_4}{2}$$

显然, 方程(7)只包含对数函数和多项式函数, 而方程(3)不仅包含对数函数, 而且还包含多种三角函数, 因此, 方程(7)比方程(3)更容易求解。从数值计算的角度来看, 多项式比三角函数的计算工作量要小得多。

记  $t_1 = \tan(\alpha_1/2)$ , 由于  $0 \leq \alpha_1 < \alpha_b < \alpha_4 < \pi/2$ , 可知:  $0 \leq t_1 < t < t_4 < 1$ , 即未知数  $t$  有明确的限定区间。

另外, 使用 L' Hospital 法则可以求出:  $\lim_{t \rightarrow 0^+} F(t) = c_0 > 0$ , 根据函数的连续性, 当  $t$  比较小时, 函数值  $F(t)$  是正数。当  $t$  比较大时, 如果函数值为负数, 则满足二分法的使用条件。函数  $F(t)$  的变化情况参见图 1。

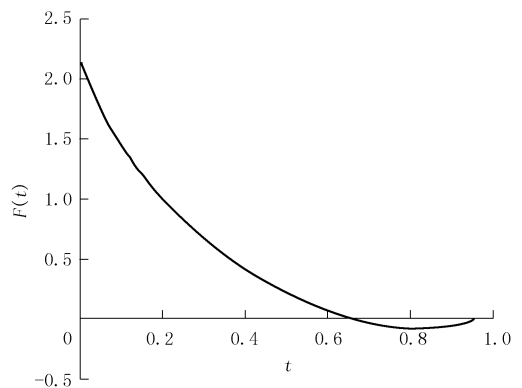


图1 函数  $F(t)$  的曲线

根据对函数  $F(t)$  的数学性质的分析, 首先给出求解区间的2个搜索算法。

### (1) 算法1(求解区间搜索算法)

假设  $\Delta t$  是给定的比较小的搜索步长, 例如  $\Delta t = (t_4 - t_1)/100$ 。

①令  $t_L = \Delta t$ , 计算  $F_L = F(t_L)$ 。

②令  $t_R = t_L + \Delta t$ , 计算  $F_R = F(t_R)$ 。

③若  $F_L F_R \leq 0$ , 则求解区间为  $[t_L, t_R]$ , 停止。

④若  $t_R > t_4$ , 则搜索失败, 停止。

⑤令  $t_L = t_R$ ,  $F_L = F_R$ , 转第(2)步。

如果步长  $\Delta t$  足够小, 则算法1一般能够搜索到求解区间。如果算法1没有找到求解区间, 可能原

因之一是步长  $\Delta t$  不够小。解决这个问题的方法是对步长  $\Delta t$  进行自适应控制。

(2)算法 2(自适应求解区间搜索算法)

假设  $\varepsilon$  是给定的任意小的正数,例如  $\varepsilon = 10^{-12}$ ,  $\beta$  是给定的步长收缩系数,  $0 < \beta < 1$ ,可取  $\beta = 0.5$ 。

①给定初始步长  $\Delta t$ 。

②使用算法 1 搜索求解区间。若算法 1 成功找到求解区间,则停止。

③若  $\Delta t < \varepsilon$ ,则搜索失败,停止。

④令  $\Delta t = \beta\Delta t$ ,转第(2)步。

如果自适应求解区间搜索算法仍然没有找到求解区间,可以初步判断方程(3)无解。

在找到了求解区间  $[t_L, t_R]$  之后,使用二分法求方程(7)的数值解。

(3)算法 3(二分法)

假设  $\varepsilon_2$  是给定的精度控制参数,例如  $\varepsilon_2 = 10^{-16}$ 。

①令  $t_C = (t_L + t_R)/2$ ,计算函数值  $F_C = F(t_C)$ 。

②若  $|F_C| < \varepsilon_2$ ,则  $t = t_C$  是方程(7)的满足精度的数值解。

③若  $F_L F_C < 0$ ,则令  $t_R = t_C, F_R = F_C$ ,转第(1)步。

④若  $F_R F_C < 0$ ,则令  $t_L = t_C, F_L = F_C$ ,转第(1)步。

值得注意的是,方程(7)并不是总有满足  $t_1 < t_4$  的解。使用算法 2 可以对无解的情况做出判断。在开发计算机软件时,最好能够绘制出类似于图 1 的函数  $F(t)$  的曲线图,可以直观地对有解或无解做出判断,还可以对解的位置有个近似的估算。

3 悬链线井段参数计算

假设悬链线井段的初始点为  $P$ ,对于悬链线井段上井深为  $L$  的任意一点  $Q$ ,记  $\Delta L = L - L_2$ ,则有:

$$\tan\alpha = a \tan\alpha_b / (a - \Delta L \tan\alpha_b) \quad (8)$$

$$\Delta A = a [\ln \tan(\alpha/2) - \ln \tan(\alpha_b/2)] \quad (9)$$

$$\Delta H = a [(1/\sin\alpha_b) - (1/\sin\alpha)] \quad (10)$$

$$k = \sin^2 \alpha / a \quad (11)$$

式中: $\alpha$ —— $Q$  点的井斜角,弧度; $\Delta A$ —— $Q$  点相对于  $P$  点的平移,m; $\Delta H$ —— $Q$  点相对于  $P$  点的垂深增量,m; $k$ —— $Q$  点的井眼曲率,弧度/m。

4 算例

LL202 井是国内某钻井公司在古巴承钻的一口双靶点井,甲方要求设计成大位移井。已知靶点 A

的垂深为 1914.7 m,相对于井口的北、东坐标分别为 3143 和 -576 m;靶点 B 的垂深为 1974.7 m,相对于井口的北、东坐标分别为 4457 和 -818 m。在进行悬链线剖面设计时,将悬链线井段的结束点选为靶点 A,而将靶点 B 作为稳斜井段的终点。根据 2 个靶点的坐标事先可以算出稳斜井段的长度为  $\Delta L_4 = 1337.45$  m,井斜角为  $\alpha_4 = 87.43^\circ$ 。根据地质及工程的要求,选定造斜点为  $\Delta L_1 = 620$  m。

假定圆弧井段的井眼曲率为  $K_2 = 2^\circ/25$  m,根据算法 1,求得求解区间为  $[0.0095, 0.823]$ ,在该求解区间上使用二分法求解方程(7),经过 49 步迭代,得到误差小于  $10^{-15}$  的数值解  $t = 0.664321$ 。对应于该解,有  $\alpha_b = 67.194^\circ, a = 7571.46$  m,剖面关键点设计结果见表 1。

表 1 LL202 井悬链线剖面设计结果

井深/m	井斜角 / (°)	方位角 / (°)	北坐标 /m	东坐标 /m	垂深/m	平移/m	备注
0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	
620.00	0.00		0.00	0.00	620.00	0.00	
1459.92	67.18	349.60	431.38	-79.17	1280.21	438.59	
4303.61	87.43	349.60	3142.85	-576.81	1914.70	3195.34	靶点A
5641.06	87.43	349.60	4457.00	-818.00	1974.70	4531.44	靶点B

函数  $F(t)$  的曲线图见图 1,从图 1 可以看出,方程(7)应该有 2 个解,我们求出的是第一个解,还有一个解为  $t = 0.8561$ ,对应的  $\alpha_b = 87.43^\circ$  等于稳斜井段的井斜角,不是我们要求的解,应舍弃。

当圆弧井段的井眼曲率  $K_2$  变化时,相应的函数  $F(t)$  的变化情况见图 2。从图 2 可以看出,当  $K_2$  从大逐渐变小时,函数曲线的最小值逐渐增大;当  $K_2$  等于某个数值时,函数曲线与横轴相切,该  $K_2$  值不妨称为临界曲率。当  $K_2$  小于临界曲率时,函数曲线

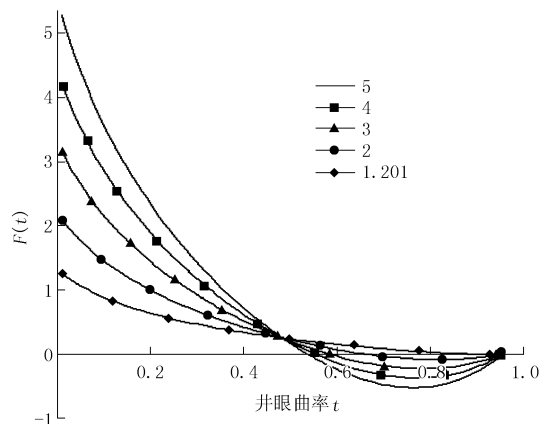


图 2 函数  $F(t)$  的曲线随圆弧井段井眼曲率的变化情况

# 四川煤层气井施工的问题与对策

尹中山<sup>1,2</sup>, 胡勋茂<sup>2</sup>

(1. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059; 2. 四川省煤田地质局, 四川 成都 610072)

**摘要:**我们在四川施工了5口煤层气井(其中参数井4口),各项参数反映四川煤层气具备了开发和小井网试采的储层条件。但在施工过程中存在钻探进度慢、测试坐封选层难、井斜控制难、煤层对比和采取率不甚理想、煤储层污染严重等问题。通过分析,提出采用“三开”井身结构、防斜打直、进一步开展大口径绳索取心的攻关、储层保护等建议,以推进四川煤层气的勘探开发中钻探技术上的保证。

**关键词:**煤层气井;小井网;三开井身结构;防斜打直;绳索取心;储层保护

**中图分类号:**TE24 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2010)02-0004-05

**Problems and the Countermeasures of Coal-bed Methane Well Construction in Sichuan/YIN Zhong-shan<sup>1,2</sup>, HU Xun-mao<sup>2</sup>** (1. College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China; 2. Sichuan Bureau of Coal Geological, Chengdu Sichuan 610072, China)

**Abstract:** We have constructed 5 coal-bed methane wells (there are 4 parameter wells) in Sichuan. The parameters reflected the procession of reservoir condition for coal-bed methane development and small network of production test in Sichuan. But there are still serious existing problems such as slow drilling process, difficult layer selection for setting test and hole deviation control, coal seam correlation and coal recovery not ideal as expected and coal reservoir pollution. Three spuds well structure, deviation control with drilling straight, research on large diameter wire-line coring and reservoir protection were suggested by the condition analysis to promote the drilling technical guarantee for coal-bed methane exploration and development in Sichuan.

**Key words:** coal-bed methane well; small network; three spuds well structure; deviation control with drilling straight; wire-line coring; reservoir protection

## 1 概况

四川省煤炭煤层气资源较为丰富。据预测,四川省煤层气资源量达3480亿 $m^3$ ,属特大型煤层气田。为加快评价和勘探开发力度,四川省煤田地质局自2003年到2009年6月在四川省古蔺县施工了5口煤层气井(其中4口参数井),完成了采样、煤层气含量、注入/压降法测试、测井、固井等工作,获得了一系列有重要参考价值的参数,经初步评价,该地区的地面抽采前景较为乐观。具备了开发和小井网试采的储层条件。

在四川古蔺大村施工的5口煤层气井情况如表1所列。DCMT-3、DC-1、DC-2井采取了一次完井的工艺,并顺利完成钻井、测试、煤层气综合测井、固井,即将开展射孔、压裂、排采的任务,为加快施工进度、缩短工期、保证成井的质量和煤储层保护开辟了一个新途径。

## 2 钻探难题原因分析及对策

在钻探施工中遇到了诸多复杂情况,如钻探进度慢、测试坐封选层难、井斜控制难、采取率不甚理想、煤储层污染严重等问题,通过认真分析,查找原因,研究应对策略,为今后在该地区施工煤层气井有重要意义。

### 2.1 钻探进度慢

经分析,钻探进度慢的原因主要有以下三个。

(1)井身结构选择不合理,一开井径偏小,遇到复杂情况处理的余地小。

SPMT-1、CJMT-2、DCMT-3三口井钻探施工中均不同程度地出现了地层涌漏水现象,SPMT-1、CJMT-2井出现了多种复杂现象,停工或等待等时间达10多天。

(2)钻探井内事故多,井斜变化大,纠斜占据了较多时间,钻探进度缓慢,严重影响工期。

(3)地层软硬互层变化频繁,松散层垮塌、掉块

收稿日期:2009-08-06; 修回日期:2009-12-08

基金项目:四川省地质勘查基金大村项目的部分成果(编号:[2008]1111号)

作者简介:尹中山(1967-),男(汉族),四川宣汉人,四川省煤田地质局地质勘查处副处长、高级工程师,石油地质专业,硕士,从事石油\煤田、煤层气勘探开发技术研究和管理工作,四川省成都市清华路38号四川省煤田地质局,yzs-11@163.com。

表 1 五口煤层气井的情况

井号	SPMT-1	CJMT-2	DCMT-3	DC-1	DC-2
开钻时间	2003-05-04	2004-05-04	2007-12-11	2008-12-10	2009-04-26
完钻时间	2003-08-25	2004-07-28	2008-07-03	2009-04-24	2009-06-04
施工周期/d	113	86	184	135	40
工作内容	试井扩孔	试井	试井固井压裂排采	试井固井压裂排采	固井压裂排采
终孔井深/m	527.91	655.32	658.70	578.00	615.00
开孔井径/mm	311	150	311	444.5	444.5
终孔井径/mm	95-215.9	95	215.9	215.9	215.9
煤层厚度/m	10.19/15层	8.37/11层	15.31/9层	15.45/8层	11.89/9层
煤层采取率/%	94/86	97/82	93.0/76.2	86.0/75.3	94.7/79.3
目的煤层	3	3	3	3	3
测试层	3	2	3	3	2
固井次数	1	1	2	2	2
土层套管(导管)/(mm×m)	Ø273×18.64	Ø146×17.68		Ø377×28.89	Ø377×36.51
表层套管/(mm×m)			Ø244.5×320.53	Ø244.5×238.92	Ø244.5×243.89
技术套管/(mm×m)			Ø139.7×656.24	Ø139.7×573.40	Ø139.7×612.98
人工井底/m			647.70	562.00	600.00

严重。

针对我省二叠系、三叠系煤系地层的特点和煤层气井的施工要求,选择适合该地区特点的煤层气钻井工艺方法,采用相应的钻探施工技术措施,防范各类井内事故的发生,确保钻效。并建议采用“复杂地层条件下煤层气钻井井身结构”即三开井身结构(如表2)。

表 2 三开井身结构

开钻程序	钻头尺寸/mm	套管类型	套管尺寸/mm
一开	Ø444.5/406.4	表层套管	Ø377/339.7
二开	Ø311.1	技术套管	Ø244.5
三开	Ø215.9	生产套管	Ø139.7/177.8

## 2.2 测试坐封选层难

井径扩大率超限(20%~40%),壁不规则。测试坐封胶筒 Ø195 mm,胶筒长度 1.10 m 左右,膨胀空间也是有限的,若井壁井径大,直接增大了测试坐封器的工作难度。

采用近平衡钻进、轻压吊打钻进或气举反循环钻进等工艺措施,减少钻井液对井壁的浸泡和破坏、减少井内压力激动,确保井壁的完整。

## 2.3 井斜控制难

煤层气井井斜质量标准较煤炭资源勘探钻孔质量标准严格,一般井斜 $\leq 3^\circ/500\text{ m}$ 。DC-1井最大井斜 $4.5^\circ$ (纠斜前),DCMT-3井最大井斜 $5.2^\circ$ (纠斜前),纠斜后稳定 $2.5^\circ\sim 3^\circ$ 。造成井斜的原因是:

(1)地层倾角大,一般在 $20^\circ\sim 40^\circ$ ,软硬岩层交替出现,容易导致井斜角超限;

(2)大口径,全面钻进,没有导向,容易造成井斜超限;

(3)煤系地层垮塌严重,井壁出现“大肚子”,若不采用专用扶正器防斜,井斜偏大。

措施:钻孔安装要实现三点一线(偏差不得超过 $\pm 10\text{ mm}$ ),钻具(含主动钻杆)要直;控制钻进参数和轻压吊打,钻进一根单根要来回扫孔和划眼,确保井壁完整,不出现螺旋型井眼和S型井眼;可采取塔式钻具或钟摆钻具组合控斜,同时采用电子单点测斜仪跟踪测斜,发现井斜超限,及时采用螺杆纠斜。

## 2.4 岩煤心采取质量偏低

在SPMT-1、CJMT-2井中采用常规取心器和Ø75 mm绳索取心器,加上小井眼施工、泥浆使用等原因导致施工中垮塌、掉块频频发生,严重影响煤、岩心的采取质量。DCMT-3、DC-1、DC-2井采用Ø215.9-77 mm阶梯状金刚石底喷绳索取心钻头,大口径取心技术满足了测试、一次成井的要求,但由于泥浆使用和护壁措施不到位,仍存在采取率不高的问题。

措施:(1)认真装配好取心工具,仔细检查内管总成各部件,是否灵活好用,并调试好钻头内台阶与卡簧座的装配间隙;(2)取心钻进前,应重新调试好钻井液性能,确保井壁稳定,井内无坍塌、掉块现象;(3)取心钻进时,严格按煤层气绳索取心钻进操作规程进行。

## 2.5 煤储层保护问题

5口井的钻探时间40~184天,平均112天,钻探周期长,煤层浸泡的时间长;通过注入/压降法测试,DCMT-3井 $C_{10}$ 煤储层的表皮系数高达70,表明储层遭遇严重的污染,因此要加强煤储层的保护。

### 2.5.1 钻井液与煤系地层垮塌的关系

四川地层涌漏垮现象普遍存在,压力系数变化频繁,要充分利用气测录井异常显示的实时结果,并结合注入/压降法的煤储层压力资料,及时调整钻井液密度、粘度等参数,以便与地层压力的匹配平衡。

### 2.5.2 钻井液体体系的选用

(1)尽量降低钻井液对煤储层渗透性侵害。应选用低密度、低粘度、低失水和低固相(或无固相)低伤害钻井液体系。

(2)在非煤系井段可选用低固相(或无固相)钻井液,可适当添加一些聚合物处理剂和防塌剂,使其既能维护井壁稳定,又能悬浮岩粉,以保持井内清洁。但在煤系中钻进,尽可能使用清水或无固相钻井液,可适当添加少量的增粘降失水处理剂,抑制水敏性岩层膨胀。

(3)在弱碱或酸性条件下的钻井液体系利于煤层保护,DCMT-3井的pH值8~9,个别时候达10~10.5,用的苛性钠(NaOH)碱性太强,最好用纯碱( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )调节酸碱度,把pH值控制在合理范围内,有利于煤储层保护。

(4)用氯化钾(KCl)对防止泥岩地层水敏性强和避免垮塌有较好作用。不宜使用过量的聚丙烯酰胺类(PAM)的絮凝作用较强的高分子材料。

### 2.5.3 固井水泥浆的危害

宜采用中低密度水泥浆,一般控制在 $1.5 \sim 1.7 \text{ g/cm}^3$ ,对煤储层伤害小,又能起到封隔目的煤储层、含水层和易垮塌层的目的,确保后续压裂和排采作业。另外水泥上返高度应根据目的煤层的位置等情况决定。依照目前国际国内的普遍做法“按煤系地层以上150 m封固原则”,结合四川煤系地层扩径率较高、 $T_1f$ 组地层涌漏水普遍存在,可能会使水泥浆上返速度出现忽大忽小的不稳定状态等,最佳措施宜封固到最上一个含(涌)水层上20~30 m,既能保护套管不受损坏,又能达到采气目的。结合三开井身结构(井径)的思路,若表层套管下到涌水层且固井,可根据实际情况执行上面的150 m原则。

### 2.5.4 钻探快速通过

减少煤系地层垮塌、煤储层的浸泡和污染的时间。

### 2.5.5 测井、测试、固井等作业连续进行

各协作单位的衔接和配合要到位,材料准备充分,减少停待或无效时间,提高工作效率。技术分析和测试选层、坐封选位也要精益求精,避免出现一层次下4次封隔器的被动局面。

## 3 钻井施工实践

现以DC-2井为例,介绍大村煤层气生产试验井的钻井施工实践及取得的成果和存在的问题。

### 3.1 钻井主要设备

TSJ-2000型钻机,TBW1200/7A型泥浆泵,动力机为12 V135/380HP、6135/150HP,并配备单点测斜仪、泥浆测试仪及钻井施工所需的各类附属设备、各型钻具和绳索取心工具。

### 3.2 井身结构、钻具组合及钻进参数

#### 3.2.1 井身结构

针对以往井身结构选择不当的问题,在DC-2井中选择了适合该区地质特点的三开井身结构。

一开: $\text{O}444.5 \text{ mm}$ 三牙轮钻头钻至基岩5~10 m后,下入 $\text{O}377.0 \text{ mm} \times 6.0 \text{ mm}$ 井口导管。

二开: $\text{O}311.1 \text{ mm}$ 三牙轮钻头钻至三叠系下统飞仙关组二段( $T_1f_2$ )底部,确保已钻穿飞仙关组涌漏水地层后,下入钢级J<sub>55</sub>的 $\text{O}244.5 \text{ mm} \times 8.94 \text{ mm}$ 表层套管,用油井水泥采取水泵固井,水泥返至地面。

三开: $\text{O}215.9 \text{ mm}$ 三牙轮钻头钻至二叠系上统龙潭组( $P_3l$ )顶5~10 m,换用 $\text{O}215.9-75 \text{ mm}$ 阶梯状底喷金刚PDC取心钻头(以下简称PDC取心钻头)实施取心,钻至C<sub>25</sub>煤层底板以下50 m完钻。测井后,下入钢级J<sub>55</sub>的 $\text{O}139.7 \text{ mm} \times 7.72 \text{ mm}$ 生产套管,用固井车固井,水泥返至井深201.20 m处。

#### 3.2.2 钻具组合

钻具组合按最大钻压设计为塔式钻具组合,施工中根据现场实际情况作适当调整。

一开井段1.20~28.89 m:3A444.5 mm钻头+ $\text{O}194 \text{ mm}$ 接头+ $\text{O}177.8 \text{ mm}$ 钻铤+ $\text{O}159 \text{ mm}$ 钻铤+ $\text{O}165 \text{ mm}$ 接头+方钻杆。

二开井段28.89~239.00 m:3A311 mm钻头+ $\text{O}165 \text{ mm}$ 接头+ $\text{O}165 \text{ mm}$ 钻铤+ $\text{O}159 \text{ mm}$ 接头+ $\text{O}127 \text{ mm}$ 钻杆+方钻杆。

三开井段239.00~578.00 m:3A215.9 mm钻头+ $\text{O}165 \text{ mm}$ 接头+ $\text{O}165 \text{ mm}$ 钻铤+ $\text{O}159 \text{ mm}$ 钻铤+ $\text{O}159 \text{ mm}$ 接头+ $\text{O}127 \text{ mm}$ 钻杆+方钻杆。

定向纠斜钻具组合:3A215.9 mm钻头+ $\text{O}165 \text{ mm}$ 螺杆+1°弯接头+ $\text{O}165 \text{ mm}$ 无磁钻杆+ $\text{O}165 \text{ mm}$ 钻铤+ $\text{O}159 \text{ mm}$ 钻铤+ $\text{O}159 \text{ mm}$ 接头+ $\text{O}127 \text{ mm}$ 钻杆+方钻杆。

绳索取心钻具组合:PDC取心钻头+ $\text{O}127 \text{ mm}$ 绳索取心双管+ $\text{O}127 \text{ mm}$ 钻杆+方钻杆。

#### 3.2.3 钻进参数

为控制井身质量和岩、煤心采取质量,该井以轻压吊打为主,在钻进中一般采用较小的钻压和较低的转速。DC-2 井钻进参数见表 3。

表 3 DC-2 井钻进参数

钻进井段/m	钻压 /kN	转速/(r·min <sup>-1</sup> )	泵排量/(L·s <sup>-1</sup> )	泵压 /MPa	备注
1.20 ~ 36.51	5 ~ 20	40	20	0.3 ~ 1.0	一开钻进
36.51 ~ 243.89	40	60	20	0.9 ~ 1.2	二开钻井
243.89 ~ 615.00	40 ~ 50	60	20	1.2 ~ 1.8	三开钻进
440.00 ~ 554.00	30 ~ 35	40	17	1.1 ~ 2.3	取心钻进
三次定向纠斜	30 ~ 40		20	1.8 ~ 6.0	定向纠斜

### 3.3 钻井液技术

(1) 一开钻进采用较高粘度和密度的钻井液,泥浆材料以粘土粉、CMC、烧碱(NaOH)为主。以确保第四系(Q)冲积层地层的稳定、不坍塌、不扩径。

(2) 二开及三开上部井段采用不分散低固相钻井液,适量加入聚丙烯酸钾(KPAM)、羧甲基纤维素钠(Na-CMC)、磺化沥青钠盐(SAS-1)及惰性材料,用纯碱(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)调节 pH 值,保持适当的密度和粘度,以降低钻井液滤失量,提高对水敏性岩层的抑制性,确保井壁稳定,防止井壁坍塌和涌漏水等井内复杂情况的发生。

(3) 三开下部及取心井段为满足煤层气参数井对煤储层保护的的特殊要求,在钻进至接近龙潭组(P<sub>3</sub>1)时,逐渐将不分散低固相钻井液调试到无固相钻井液,详见表 4。

表 4 DC-2 井钻井液性能表

取样井深 /m	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	漏斗粘度/s	pH 值	API 失水量/mL	泥饼 /mm	含砂量/%
1.20 ~ 36.51	1.10 ~ 1.20	25 ~ 30	9 ~ 12	20 ~ 25	2 ~ 4	>4
36.51 ~ 400.00	1.05 ~ 1.08	22 ~ 26	8 ~ 9	15 ~ 18	1.5 ~ 2	2 ~ 4
400.00 ~ 615.00	1.03 ~ 1.05	18 ~ 20	7 ~ 8	11 ~ 15	0.5 ~ 1	0.5 ~ 1.0

### 3.4 绳索取心技术

#### 3.4.1 取心工具

利用现有的 Ø127 mm 钻杆(内平、内径不小于 94 mm)做绳索取心钻杆,配绳索取心双管钻具,钻头为 Ø215.9-77 mm 阶梯状底喷金刚石 PDC 取心钻头,钻头内径为 Ø75 mm,岩心直径 ≥ 68 mm,内管长度 1.50 m,取心时内管采用半合管。在 Ø215.9 mm 井眼内进行取心,正常时一般进尺为 1.00 ~ 1.40 m,采煤心时一般控制在 0.40 ~ 0.80 m。

#### 3.4.2 取心效果

DC-2 井在 440.00 ~ 462.44、502.44 ~ 554.00 m 井段共取心 90 回次,取心进尺 74.00 m,岩心长

度 71.87 m,平均长度收获率 97.1%;煤层取心进尺 7.27 m,煤心长度 6.89 m,平均长度收获率 94.8%,平均重量收获率 77.6%。采煤层顶板样 3 件,底板样 3 件,煤层气样 18 件。

#### 3.4.3 绳索取心钻进操作程序

(1) 全井取心钻进前应试通井一次,确保取心钻具顺利下入井底。

(2) 对取心钻具进行通径检查,确保内管总成投放、打捞畅通。

(3) 全面检查取心工具各部件是否完好,灵活好用,并调试好钻头内台阶与卡簧的装配间隙。

(4) 进入取心钻进前应调试好钻井液性能,既确保井壁稳定又满足对煤储层的保护要求。

(5) 严格按煤层气绳索取心钻进操作规程要求作业,确保岩煤心收获率。

### 3.5 井身质量控制技术

(1) 把好设备安装质量关,保证天车、转盘中心、井口在一直线上,经试运转验收合格后,方可开钻。

(2) 开钻进行井口校正居中,确保开钻井眼垂直,一开轻压吊打,适当控制钻速,加单根时用水平仪角尺找正方钻杆,粗径钻具随井深的延深而加长。

(3) 二开及三开,开钻时轻压慢钻,待新井眼完成后方能采用正常钻进,钻进过程中适当控制钻压,保持送压均匀,钻进参数力求合理,三班操作统一,防止井斜。

(4) 在钻遇软硬互层时采用吊打方式,并坚持提钻划眼钻进,严格控制钻压在 30 ~ 50 kN,采用低钻压较高转速,确保井眼垂直和井壁完整。

(5) 严格按设计要求跟踪测斜,每 50 m 测斜一次,跟踪井斜、方位、控制井身质量,发现井斜增大时,及时采用螺杆定向纠斜。

(6) 加快钻井效率,减少煤系地层浸泡时间和污染,防止井壁垮塌和扩径。

### 3.6 煤储层保护

(1) 钻开龙潭组(P<sub>3</sub>1)后采用清水或无固相钻井液钻进,减少各种化学元素和固相对煤储层的损害,pH 值控制在 7.5 ~ 8 之间。搞好钻井液净化工作,认真清理循环系统中的岩粉及沉淀物,减少钻井液中的固相含量对煤储层的伤害。

(2) 在开泵和上、下钻具过程中要操作平稳,减小压力激动对井壁和煤层的伤害。

(3) 采用中低密度水泥固井工艺,固井时尽量减少固井施工中瞬间压差对煤层的伤害。

(4)提高煤层段的固井质量,在煤层段固井用水泥中适当添加促凝剂,减少水泥对煤层的污染。

#### 4 取得的成果

(1)DC-2井按照《煤层气钻井工程质量验收标准》验收,整个钻井工程质量合格,达到了该井设计目的。

(2)该井的施工实践证明,三开井身结构适合该区地层地质条件,能有效地解决该区钻井过程中井内出现的垮塌、涌漏水问题。

(3)在煤系地层选用优质无固相防塌钻井液,既实现了对煤储层的保护,又防止了煤系地层的坍塌,确保了井壁的稳定,顺利完成钻井施工任务。

(4)DC-2井的成功实施,为下一步四川煤层气井钻井施工工艺奠定了较好的基础。

#### 5 几点建议

(1)加快煤层气钻井施工技术质量管理。针对施工地区地质情况,提前制定切实可行的施工技术措施,备齐所需各种机械配件和原材料,减少停待时间和辅助时间,优选钻井参数,实施近平衡钻进,努力提高钻效和工程质量。

(2)积极预防涌、漏水和井壁坍塌等井下复杂

情况,尽量避免因不利因素发生造成钻井施工困难。

(3)加强井身质量控制,采取有效的防斜措施。重点控制煤系地层中下部的井斜,是一口井井斜的决定因素。特别是在软硬互层交替频繁地层中钻进时,应严格坚持轻压吊打、提钻划眼钻进。可以考虑采用扶正器或导向钻进实现井斜控制的立体化。

(4)改进取心工具,以期达到提高回次进尺长度、减少回次次数,提高钻效,确保取心质量。

(5)建议在布井时要全面收集施工地区地质资料,为钻井创造有利条件。

#### 参考文献:

- [1] 张相.煤层气钻井中的几个关键技术问题浅析[J].中国煤田地质,2007,(5).
- [2] 尹中山.四川煤层气勘探开发应注意的问题[J].四川地质学报,2009,(2).
- [3] 尹中山.川南煤田古叙矿区煤层气勘探选层的探讨[J].中国煤炭地质,2009,(2).
- [4] 王梅仙.影响煤层气钻井完井工艺技术的几个问题[J].煤炭技术,2006,(10).
- [5] 乔磊,申瑞臣,等.沁水盆地南部低成本煤层气钻井完井技术[J].石油勘探与开发,2008,(4).

致谢:严新建等同志参与了部分工作,在成文工作中得到有关领导、专家的支持和帮助,在此一并致谢!

下能够正确求出该解,计算量小,计算过程稳定。

#### 参考文献:

- [1] 刘修善.井眼轨道几何学[M].北京:石油工业出版社,2006. 196-200.
- [2] 韩志勇.定向钻井设计与计算[M].北京:中国石油大学出版社,2007. 160-164.
- [3] 韩志勇.定向井悬链线轨道的无因次设计方法[J].石油钻采工艺,1997,19(4):13-16.
- [4] 编写组.数学手册[M].北京:人民教育出版社,1979. 103-111.
- [5] 鲁港,王刚,孙忠国,等.定向井钻井中空间圆弧轨道计算的两个问题[J].石油地质与工程,2006,20(6):53-55.
- [6] 陈铁铮,鲁港,商维斌,等.最小曲率法中水平投影长度的计算[J].石油地质与工程,2007,21(5):82-84.
- [7] 张积锁,鲁港.圆弧井段井斜变化率和方位变化率的计算[J].石油地质与工程,2007,21(4):68-70.

(上接第3页)

位于横轴之上,表明方程(7)无解。临界曲率可以用于指导设计参数 $K_2$ 的适当设定:当使用算法1和算法2无法找到求解区间时,应适当增大 $K_2$ 的数值。

#### 5 结语

(1)针对通常的悬链线轨道设计关键参数方程中三角函数多、计算工作量较大、迭代收敛条件强等问题,采取数学变化的方法将该方程转化成一个只包含对数函数和多项式函数的新方程,并提出了寻找求解区间的步长搜索算法和自适应步长搜索算法,进而使用二分法求新方程的数值解。

(2)数学分析和数值实践表明,新算法不仅能够正确判断设计方程是否有解,而且在有解的情况