

文章编号: 0253-9993(2008)12-1351-07

变断面深厚表土钻井井壁竖向结构稳定性

程 桦^{1,2}, 刘吉敏², 荣传新², 姚直书²

(1. 安徽建筑工业学院, 安徽 合肥 230022, 2. 安徽理工大学 土木工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 采用理论分析和有限元分析 2 种方法深入研究了变断面深厚表土钻井井壁竖向稳定性问题. 用外推法建立了变断面非满水钻井井壁竖向稳定临界深度计算公式, 并分析了其影响因素; 借助 ABAQUS 软件分析了不同阶段钻井井壁的竖向稳定性问题, 计算了钻井井壁竖向稳定临界深度, 分析了井壁自重、不同边界条件、井壁底部接触面积对竖向稳定临界深度的影响. 结果表明, 井壁筒受力状态和边界条件对竖向稳定临界深度的影响最大.

关键词: 变断面; 钻井井壁; 竖向稳定性; 临界深度; 有限元

中图分类号: TD265.32 **文献标识码:** A

Variable cross section shaft drilling lining's vertical stability in thick alluvium

CHENG Hua^{1,2}, LIU Ji-min², RONG Chuan-xin², YAO Zhi-shu²

(1. Anhui Institute of Architecture Industry, Hefei 230022, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: Theoretical analysis and finite element analysis were used to study variable cross section drilling shaft lining's vertical stability in thick alluvium. The critical height calculation formula of variable cross section drilling shaft lining unfilled with water was presented by extrapolation, and its influence factors were analyzed. Shaft vertical stability in different phases was analyzed with general finite element analysis software ABAQUS, its critical height was calculated. The influence of shaft lining dead weight, different boundary conditions, touching areas at shaft bottom on vertical stability were also analyzed. The results show that the effect of shaft lining's stress state and boundary conditions on vertical stability is biggest.

Key words: variable cross section; drilling shaft lining; vertical stability; critical height; finite element method

随着钻井法凿井施工技术与工艺的不断进步, 采用大型钻井法施工深厚冲积层 (>450 m) 的优越性更加突显出来, 钻深 550 m 以上的矿山大型立井井筒工程日益增多 (如已建成的山东龙固矿 3 口井, 钻深 580 m; 在建的安徽板集矿 3 口井, 钻深 660 m). 我国自 2004 年以来, 先后自行研制成功了可施工直径 12 m、深度 800 m 的 AS12/800 超大型强力钻机, 以及钻井直径达 13.0 m, 钻井深度达 1 000 m 的 AD130/1 000 型全液压力头式新型强力钻机等, 为今后钻井法施工大直径深立井提供了先进的钻井设备保障^[1-2].

然而具有诸多优点的钻井法, 在井壁悬浮下沉到井底但尚未进行壁后充填时, 存在着井壁筒竖向结构失稳的危险性, 且随着井筒深度和井型的加大, 这种危险性越发突出. 该问题最早曾于 20 世纪 80 年代由洪伯潜院士提出, 并基于弹性稳定理论, 给出了悬浮下沉法固井前充满配重水钻井井壁筒在泥浆中的竖向

稳定临界深度的解析式^[3], 此后该方面研究工作一度停滞. 直到近年来, 随着建井深度和井型的不断增大, 钻井井壁筒竖向稳定性问题又重新得到重视. 牛学超、洪伯潜等将悬浮下沉井壁筒简化为液体中的有底管状细长压杆, 以能量法为基础, 利用结构稳定性理论和流体力学原理, 分别推导出了充满配重水钻井井壁筒竖向稳定临界深度解析式^[4]和非满配重水钻井井壁筒竖向稳定临界深度解析式^[5-6], 但在公式推导过程中采用了井壁刚度沿竖向为连续的基本假定, 不适用于变断面、变强度、变刚度井壁筒的竖向结构稳定性计算. 而且以往的分析拘泥于单一的理论解析, 无法对井壁筒在悬浮下沉过程可能出现的各种工况下的竖向结构稳定性问题开展研究. 本文采用弹性稳定性理论, 给出了变断面非满水钻井井壁筒竖向结构稳定临界深度计算公式; 借助 ABAQUS 软件, 研究了钻井井壁筒在不同工况下竖向结构稳定性问题, 计算了其竖向稳定临界深度, 分析了井壁自重、不同边界条件、井壁底部接触面积等因素对竖向稳定临界深度的影响.

1 井壁筒竖向稳定临界深度

钻井井壁筒在泥浆中悬浮下沉到底但尚未进行壁后充填阶段的稳定问题是结构稳定性问题. 考虑到理论解的一般性, 主要给出变断面非满水钻井井壁筒竖向稳定临界深度计算公式^[7-11].

1.1 基本假定

① 假设井壁筒屈曲时只发生平面弯曲变形, 且弯曲变形是微小的; ② 井壁材料是无限线弹性的, 井壁与泥浆间无摩擦力和黏结力; ③ 将井壁筒视为一个两端铰支的细长杆, 井口楔体对井壁的约束为连杆支座, 井底岩石对井壁底的约束为铰支座; ④ 井壁筒外直径不变, 内直径变化, 井筒内未加满配重水, 为变断面非满水状态.

1.2 受力分析

在井壁漂浮下沉到井底但尚未进行壁后充填阶段, 井壁将受到 5 种力的作用 (图 1): ① 钢筋混凝土井壁受到的重力 P_c , 方向向下; ② 井壁底受到岩石的反力 R_A 和泥浆的浮力 P_m , 方向向上, 随着泥浆密度的改变或井壁底接触泥浆面大小的不同, 井底反力和井壁底受到的浮力会同时改变; 但只要井壁上部条件不变, 井壁底受到的竖向力之和就不会改变; ③ 井口木楔或工字钢对井壁的约束 R_B , 由于楔体对井壁以径向约束为主, 对井壁的轴向约束相对于径向约束可以忽略不计, 因而楔体对井壁反力的方向为井壁的径向; ④ 井壁配重水对井壁内表面的压力 P_w , 沿井壁径向; ⑤ 泥浆对井壁外表面的压力 P_m , 方向沿井壁外表面法向的反方向.

考虑到计算变断面钻井井壁的复杂性, 采用外推法建立变断面钻井井壁的竖向稳定临界深度. 即假定一个计算高度 H_i , 计算此高度下的井壁外力功 ΔW 和应变能增量 ΔU , 若在某一高度 H_i 下 $\Delta U = \Delta W$, 则此假定的计算高度 $H_i = H_{cr}$. 否则, 继续计算不同高度下的应变能增量 ΔU 和外力功 ΔW , 直至 $\Delta U = \Delta W$ 为止.

在假定的计算高度 H_i 下, 根据井壁厚度、内外钢板厚度、井壁材料的弹性模量、截面惯性矩、配重水高度等的不同将井壁分为 n 层, 其中有 m 层位于配重水面 C 以下. 自井底最低处的井壁中心点计起, 各段井壁的相对高度为 h_i ($i=1, 2, \dots, n$) 即 $H_i = h_n$, $H_w = h_m$. 距离井壁底部 x 处的任意截面为 $n-n$ 截面, 其计算简图如图 2 所示.

1.3 公式推导

考虑到井筒内未装满配重水, 此时的应变能增量需要区分配重水水面以上和以下 2 个部分, 设配重水水面以上为 CB 段, 水面以下为 AC 段. 井壁根据材料、截面属性等的不同共分为 n 段, 其中有 m 段在配重水水面以下.

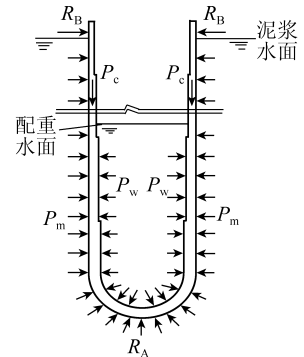


图 1 变断面非满水钻井井壁受力分析
Fig. 1 Mechanical analysis of variable cross section drilling shaft lining unfilled with water

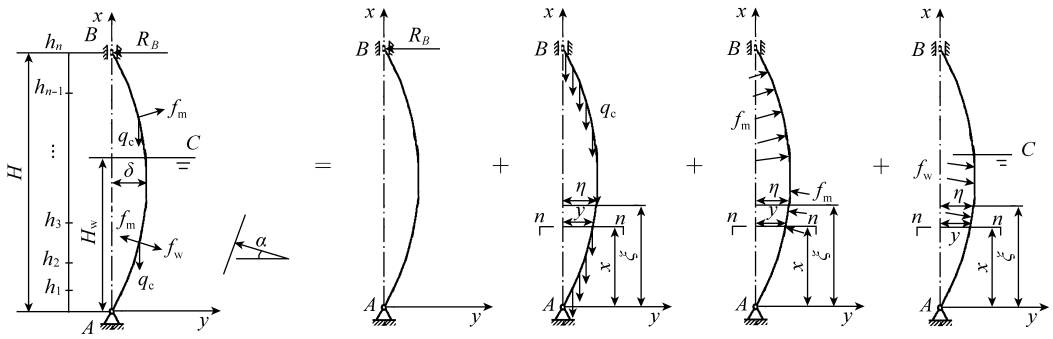


图 2 变断面非满水钻井井壁竖向稳定性计算

Fig. 2 Calculation of variable cross section shaft's vertical stability unfilled with water

取 $y = \delta \sin \frac{\pi x}{H}$ 为井壁的挠度曲线方程. 式中, δ 为井壁筒轴线中点的最大挠度; H 为指定计算高度下的井筒总深度. 且 $y(0) = 0, y(x) = y, y(\xi) = \eta$. 设第 i 段井壁单位长度的井壁自重为 q_{ci} , 单位长度泥浆重力 f_m 、单位长度的配重水重力为 f_{wi} . 其中, $f_m = \frac{\pi}{4} D^2 \gamma_m \sin \alpha = q_m \sin \alpha, f_{wi} = \frac{\pi}{4} d_i^2 \gamma_w \sin \alpha = q_{wi} \sin \alpha$. α 为井壁曲线上任意点切线与 x 轴正向的夹角; q_m 为单位长度泥浆重力, $q_m = \frac{\pi}{4} D^2 \gamma_m$; q_{wi} 为单位长度的配重水重力, $q_{wi} = \frac{\pi}{4} d_i^2 \gamma_w$; x 为井壁筒任意横断面圆心到井底的距离; 由分段积分再求和确定此时的系统应变能 ΔU , 即

$$\Delta U = \sum_{i=1}^m \int_{h_{i-1}}^{h_i} \frac{M_{ACi}^2}{2E_i I_i} dx + \sum_{i=m}^n \int_{h_{i-1}}^{h_i} \frac{M_{CBi}^2}{2E_i I_i} dx, \quad (1)$$

其中,

$$\begin{aligned} M_{ACi} &= \sum_{i=1}^n \frac{\delta H}{\pi} (q_{ci} + q_m) \left(-\cos \frac{\pi \zeta}{H} \right) \Big|_{h_{i-1}}^x + \sum_{i=1}^m \frac{\delta H}{\pi} q_{wi} \cos \frac{\pi \zeta}{H} \Big|_{h_{i-1}}^x + \sum_{i=1}^n \delta \sin \frac{\pi x}{H} q_{ci} (\zeta - x) \Big|_x^{h_i} - \\ &\frac{\delta x}{\pi} \sum_{i=1}^n (q_{ci} + q_m) \left(-\cos \frac{\pi \zeta}{H} \right) \Big|_{h_{i-1}}^{h_i} + \frac{\delta x}{\pi} \sum_{i=1}^m q_{wi} \left(-\cos \frac{\pi \zeta}{H} \right) \Big|_{h_{i-1}}^{h_i} + \delta x \sum_{i=1}^n q_m \sin \frac{\pi \zeta}{H} \left(\frac{\zeta}{H} - 1 \right) \Big|_{h_{i-1}}^{h_i} - \\ &\delta x \sum_{i=1}^m q_{wi} \sin \frac{\pi \zeta}{H} \left(\frac{\zeta}{H} - 1 \right) \Big|_{h_{i-1}}^{h_i} - \sum_{i=1}^n \delta q_m \sin \frac{\pi \zeta}{H} (\zeta - x) \Big|_{h_{i-1}}^x + \sum_{i=1}^m \delta q_{wi} \sin \frac{\pi \zeta}{H} (\zeta - x) \Big|_{h_{i-1}}^x ; \\ M_{CBi} &= \sum_{i=1}^n \frac{\delta H}{\pi} (q_{ci} + q_m) \left(-\cos \frac{\pi \zeta}{H} \right) \Big|_{h_{i-1}}^x + \sum_{i=1}^m \frac{\delta H}{\pi} q_{wi} \cos \frac{\pi \zeta}{H} \Big|_{h_{i-1}}^{h_i} + \sum_{i=1}^n \delta \sin \frac{\pi x}{H} q_{ci} (\zeta - x) \Big|_x^{h_i} - \\ &\frac{\delta x}{\pi} \sum_{i=1}^n (q_{ci} + q_m) \left(-\cos \frac{\pi \zeta}{H} \right) \Big|_{h_{i-1}}^{h_i} + \frac{\delta x}{\pi} \sum_{i=1}^m q_{wi} \left(-\cos \frac{\pi \zeta}{H} \right) \Big|_{h_{i-1}}^{h_i} + \delta x \sum_{i=1}^n q_m \sin \frac{\pi \zeta}{H} \left(\frac{\zeta}{H} - 1 \right) \Big|_{h_{i-1}}^{h_i} - \\ &\delta x \sum_{i=1}^m q_{wi} \sin \frac{\pi \zeta}{H} \left(\frac{\zeta}{H} - 1 \right) \Big|_{h_{i-1}}^{h_i} - \sum_{i=1}^n \delta q_m \sin \frac{\pi \zeta}{H} (\zeta - x) \Big|_{h_{i-1}}^x + \sum_{i=1}^m \delta q_{wi} \sin \frac{\pi \zeta}{H} (\zeta - x) \Big|_{h_{i-1}}^{h_i} . \end{aligned}$$

外力做功包括井壁的自重、泥浆对井壁外的压力以及配重水对井壁内侧的压力 3 个力的做功之和, 即

$$\Delta W = W_{qc} + W_m + W_w = \sum_{i=1}^n \frac{1}{8} \pi^2 \delta^2 q_{ci} + \sum_{i=1}^m \left(\frac{\delta^2 q_{wi}}{2} \sin \frac{\pi x}{H} \right) \Big|_{h_{i-1}}^{h_i} . \quad (2)$$

由式 (1), (2) 可见, 若假定 $n = m = 1$, 其计算结果与等断面满水钻井井壁竖向稳定临界深度的结果^[4]相同; 若假定 $n = 2, m = 1, H_{cw} = h_1$, 其计算结果与等断面非满水钻井井壁竖向稳定临界深度计算结果相同. 显然, 等断面满水、非满水钻井井壁临界深度计算结果都是变断面非满水钻井井壁竖向稳定临界

深度的计算结果在一定条件下的特例, 变断面非满水钻井井壁竖向稳定临界深度计算公式更具有—般性, 更接近工程实际.

2 有限元分析

2.1 解析式

钻井井壁的竖向稳定性问题是一个几何非线性弹性稳定性问题. 该问题一般被归结为极值稳定的增量法解和欧拉稳定的广义特征值解. 这里属于欧拉稳定性问题, 即系统的初应力状态处于某种临界状态时, 对于临界位移的任何挠动都可能使系统丧失稳定性.

设 Π 为系统的总势能, U 为弹性体系的应变能, V 为外力在系统的变形过程中所做的功, 它们都是系统位移 δ 的函数, 则

$$\Pi = U - V = \frac{1}{2} \delta_b^T K_b \delta_b + \frac{1}{2} \delta_b^T K_\sigma \delta_b - \delta_b^T P. \quad (3)$$

由最小势能原理 $\frac{d\Pi}{d\delta} = 0$, 则 $(K_b + K_\sigma) \delta_b = P$. 如果纵向荷载按比例因子 λ 增加, 则几何刚度矩阵也相应地增加为 λK_σ , 上式即为

$$(K_b + \lambda K_\sigma) \delta_b = P. \quad (4)$$

假定此时达到了临界状态, 则在其位移 δ_b 附近必然存在一挠动的位移 $\Delta\delta_b$, 使得系统在外力不变的条件也处于平衡, 因此

$$(K_b + \lambda K_\sigma) (\delta_b + \Delta\delta_b) = P. \quad (5)$$

式 (4) 与式 (5) 相减, 得到 $(K_b + \lambda K_\sigma) \Delta\delta_b = 0$. 为了使上述齐次方程组有非零解, 其系数矩阵的行列式必须等于零, 即 $|K_b + \lambda K_\sigma| = 0$.

一旦求得了特征值 λ , 即可求出结构失稳的临界荷载. 这里主要通过特征屈曲的临界荷载来反演结构失稳的临界深度. 通过求解特征屈曲的特征值, 得到使相应结构发生失稳时的临界荷载, 与真实荷载进行对比, 从而确定结构稳定情况. 通过特征值 λ 判断稳定状态即 $\lambda < 0$ 时, 结构不会发生失稳; $0 < \lambda < 1$, 结构将发生失稳; $\lambda > 1$, 结构不会发生失稳. 本文选用有限元软件 ABAQUS 进行数值模拟.

2.2 井壁结构竖向稳定性

2.2.1 计算模型

钻井法凿井在完成钻进工序后, 将顺序进入井筒悬浮下沉、下沉到底但尚未进行壁后充填、以及壁后充填固井 3 种工况. 工况 1: 上端固定、下端自由的细长杆计算模型; 工况 2: 两端铰支的细长杆计算模型; 工况 3: 下端固定、上端铰支的细长杆计算模型, 且井壁筒采用壳单元模拟.

以某井壁结构为原型, 其井壁结构形式及参数见表 1.

2.2.2 稳定性特征

在工况 1 条件下 (表 2), 井壁筒始终作用有自重力和泥浆浮力, 其在各个高度及相应配重水高度下的 5 阶特征值均小于零, 说明此时的井壁结构是稳定的. 随着悬浮下沉高度的增加, 自重力逐步加大, 井壁筒受力恶化, 导致稳定性减弱, 但始终仍处于稳定平衡状态.

在工况 2 条件下 (表 3), 井壁筒悬浮下沉至井底, 因边界条件发生变化, 计算模型变为两端铰支的细长杆, 计算结果表明, 在取井壁筒全长 659.675 m (计算高度从井底中心处计起) 计算时其一阶特征值小于 1, 显然此时的井壁结构处于不稳定状态; 当取 637.275 m 时, 其一阶特征值为 1, 则井壁筒竖向结构稳定临界深度可定为 637.6 m.

在工况 3 条件下 (表 4), 井壁筒悬浮下沉至井底后实施壁后充填, 计算模型变为下端固定、上端铰支的细长杆. 分析表 4 可见, 在充填高度分别为 30, 40, 50, 60 m 时, 5 阶特征值都大于 1, 且特征值随着充填高度的增加而增大, 说明壁后充填阶段井壁结构是稳定的, 且随着充填高度的增加, 稳定性也在增强.

表 1 井壁类型及参数

Table 1 Shaft's types and parameters

序号	段高/m	井壁厚度/mm	混凝土强度等级	井壁结构	复合井壁厚度/mm
1	22.4	550	C30	钢筋混凝土井壁	-
2	72.0	550	C30	钢筋混凝土井壁	-
3	30.0	550	C40	钢筋混凝土井壁	-
4	30.0	550	C50	钢筋混凝土井壁	-
5	90.0	750	C50	钢筋混凝土井壁	-
6	54.0	750	C60	钢板混凝土复合井壁	内层钢板厚 18, 外层钢板厚 18
7	85.0	900	C60	钢板混凝土复合井壁	内层钢板厚 18, 外层钢板厚 18
8	60.0	900	C60	钢板混凝土复合井壁	内层钢板厚 10, 外层钢板厚 10
9	48.0	900	C70	钢板混凝土复合井壁	内层钢板厚 16, 外层钢板厚 10
10	32.0	900	C70	钢板混凝土复合井壁	内层钢板厚 20, 外层钢板厚 16
11	32.0	900	C70	钢板混凝土复合井壁	内层钢板厚 25, 外层钢板厚 20
12	76.0	900	C70	钢板混凝土复合井壁	内层钢板厚 30, 外层钢板厚 25
13	24.0	650	C70	钢板混凝土复合井壁	内层钢板厚 20, 外层钢板厚 16
14	1.6	650	C70	钢筋混凝土井壁	-
15	3.0	650	C70	钢筋混凝土井壁	-

表 2 悬浮下沉阶段井壁稳定性数值计算

Table 2 Numerical calculation of shaft's vertical stability in floating and sinking

井壁高度/m	相应的配重水高度/m	第 1 阶特征值	第 2 阶特征值	第 3 阶特征值	第 4 阶特征值	第 5 阶特征值	结 论
28.275	13.400	-843.630 00	-843.630 00	-1 568.100 0	-1 568.100 0	-1 852.200 0	结构稳定
216.275	55.203	-10.130 00	-10.130 00	-44.757 0	-44.757 0	-68.631 0	结构稳定
361.275	89.800	-1.683 50	-1.683 50	-8.094 3	-8.094 3	-21.662 0	结构稳定
505.275	171.064	-0.501 04	-0.501 04	-2.665 0	-2.665 0	-7.056 8	结构稳定
565.275	216.739	-0.317 94	-0.317 94	-1.598 5	-1.598 5	-4.455 0	结构稳定
637.275	271.549	-0.186 69	-0.186 69	-1.171 2	-1.171 2	-3.113 0	结构稳定
659.675	291.703	-0.163 41	-0.163 41	-1.059 6	-1.059 6	-2.749 3	结构稳定

表 3 井壁下沉到底但尚未壁后充填阶段井壁竖向稳定性数值计算

Table 3 Numerical calculation of shaft's vertical stability after floating and sinking but before backfilling

井壁高度/m	配重水高度/m	第 1 阶特征值	第 2 阶特征值	第 3 阶特征值	第 4 阶特征值	第 5 阶特征值	结 论
28.275	13.400	-937.190 00	-937.190 00	-1 903.700 0	-1 903.700 0	-2 299.900 0	
216.275	55.203	24.493 00	24.493 00	64.359 0	64.359 0	-73.143 0	
361.275	89.800	5.400 50	5.400 50	14.137 0	14.137 0	30.091 0	
505.275	171.064	1.989 60	1.989 60	5.100 2	5.100 2	11.192 0	
565.275	216.739	1.441 30	1.441 30	3.733 6	3.733 6	8.203 1	
637.275	271.549	1.006 60	1.006 60	2.625 6	2.625 6	5.694 7	
659.675	291.703	0.905 31	0.905 31	2.361 7	2.361 7	5.095 7	

表 4 壁后充填阶段井壁竖向稳定性数值计算

Table 4 Numerical calculation of shaft's vertical stability in backfilling

充填高度/m	第 1 阶特征值	第 2 阶特征值	第 3 阶特征值	第 4 阶特征值	第 5 阶特征值	结 论
30	1.146 0	1.146 0	2.879 3	2.879 3	6.204 4	结构稳定
40	1.195 4	1.195 4	2.990 8	2.990 8	6.444 9	结构稳定
50	1.247 2	1.247 2	3.107 6	3.107 6	6.698 3	结构稳定
60	1.301 7	1.301 7	3.229 7	3.229 7	6.963 9	结构稳定

通过对上述 3 种不同工况下的数值分析可知, 由于工况的变化, 改变了井壁筒的边界条件, 在很大程度上影响了其稳定特性, 且在工况 2 条件下稳定性最差, 在设计与施工中应给予高度重视.

3 临界深度影响因素分析

3.1 井壁筒自重

由式 (1), (2) 可知, 井壁筒自重与临界深度成反比. 在取井壁全长、井筒内注入使井壁下沉到底所需的最小配重水状态下, 分别加大井壁自重 3%, 5% 和 10% 三种情况下的井壁竖向稳定特性, 具体见表 5.

分析表 5 可知, 由于自重的增加, 加大了单位变形下外力功的变化梯度, 恶化了井壁筒的竖向结构稳定性能, 致使井壁自重越大、特征值越小, 井壁筒结构竖向稳定性越差.

3.2 边界条件

稳定理论表明, 边界条件是影响临界荷载大小的重要因素之一. 表 6 为取井壁筒全长、井筒内注入最小配重水, 边界条件分别为上端固定, 下端横向约束、纵向约束、双向约束以及两端铰支、两端固定 5 种情况下的井壁结构竖向稳定性数值分析计算结果.

表 6 不同边界条件下的稳定性数值计算
Table 6 Numerical calculation at different boundary

边界条件	5 阶特征值				
上端固定、下端横向约束	-1.226 70	-1.226 70	-2.606 0	-2.606 0	-5.570 0
上端固定、下端纵向约束	0.513 72	0.513 72	2.654 7	2.654 7	7.222 8
上端固定、下端双向约束	2.506 90	2.506 90	6.236 3	6.236 3	14.548 0
两端铰支	0.905 31	0.905 31	2.361 7	2.361 7	5.095 7
两端固定	2.542 70	2.542 70	6.295 2	6.295 2	14.708 0

表 6 表明, 在其它条件相同的情况下, 两端固定约束条件下井壁的特征值最大, 稳定性最好; 上端固定、下端双向铰支次之; 上端固定、下端纵向约束较差; 两端铰支最差. 由此可见, 在施工过程中, 可通过优化壁后充填工艺, 改变约束条件的方法达到改善井壁筒竖向结构稳定特性.

3.3 井壁底部接触面积

在井壁筒悬浮下沉到底、没壁后注浆前, 井壁底将坐落在阶梯状钻孔底部, 其接触状态既不是简单的点接触, 也不是完全固支, 研究不同接触情况对井壁结构稳定性的影响是十分有意义的. 为此, 假定了 8 种底部接触外半径情况, 分别计算了竖向结构稳定特征值. 计算表明, 随着井壁底与钻孔接触外半径的加大, 与岩面的接触面积不断增加, 改善了边界条件, 增强了井壁筒竖向结构的稳定性.

4 结 论

(1) 本文给出的变断面非满水钻井井壁竖向稳定临界深度计算公式, 综合考虑了井壁筒断面、结构形式、充填水位等因素对其稳定性的影响, 以往基于等断面满水、非满水钻井井壁条件推导得到临界深度计算公式是其在一定条件下的特例. 因此, 文中给出的计算公式更具有—般性.

(2) 研究表明, 受力状态、自重、边界条件、筑壁材料特性以及井底接触面积等对井壁筒竖向结构稳定临界深度都有不同程度的影响, 其中井壁筒受力状态和边界条件影响最大.

(3) 鉴于在井壁筒悬浮下沉与壁后充填工艺3个施工阶段中,以井壁筒下沉到底但尚未进行壁后充填时对井壁结构竖向稳定性最为不利,如在施工中采取悬吊井壁筒壁后充填工艺等方法,可有效改善井壁筒竖向结构稳定特性.

参考文献:

- [1] 王耀林. 国外井巷特殊施工技术 [J]. 中国煤炭, 1994 (4): 11-17.
Wang Yaolin. The foreign special engineering techniques of shaft and roadway [J]. China Mine, 1994 (4): 11-17.
- [2] 许宜坤. 我国钻井法施工技术新进展 [A]. 第六次全国煤炭工业科学技术大会文集 [C]. 北京: 煤炭工业出版社, 2005.
Xu Yikun. The new development of engineering techniques of shaft drilling method in our county [A]. The Corpus of Sixth Coal Industry Science and Technology Meeting [C]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2005.
- [3] 洪伯潜. 钻井法凿井深井井壁在泥浆中的轴向稳定 [J]. 煤炭科学技术, 1980, 8 (9): 22-25.
Hong Boqian. The longitudinal stabilization of shaft wall with shaft drilling method in the slurry [J]. Coal Science and Technology, 1980, 8 (9): 22-25.
- [4] 牛学超, 洪伯潜, 杨仁树. 充满配重水钻井井壁筒在泥浆中竖向结构稳定的理论研究 [J]. 煤炭学报, 2005, 30 (4): 463-466.
Niu Xuechao, Hong Boqian, Yang Renshu. Theory study on axial structural stability of bored shafts filled with water [J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30 (4): 463-466.
- [5] 牛学超, 洪伯潜, 杨仁树. 非满配重水钻井井壁筒竖向结构稳定的理论研究 [J]. 岩土力学, 2006, 27 (11): 1 897-1 901.
Niu Xuechao, Hong Boqian, Yang Renshu. Study on vertical structural stability of bored shafts filled part of water [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27 (1): 1 897-1 901.
- [6] 林鸿苞. 钻井法凿井变断面井壁在泥浆中的竖向稳定 [J]. 煤炭工程, 1988 (1): 1-7.
Lin Hongbao. Vertical stabilization of shaft wall with shaft drilling method in the slurry [J]. Mine Engineering, 1988 (1): 1-7.
- [7] Timoshenko. Theory of elastic stability [M]. New York: McGRAW-HILL Book Company Inc., 1961.
- [8] Chajes A. Principle of structural of stability theory [M]. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1974.
- [9] 周承侗. 弹性稳定理论 [M]. 成都: 四川人民出版社, 1981.
Zhou Chengchou. The theory of elastic stability [M]. Chengdu: Sichuan People's Publishing House, 1981.
- [10] 刘鸿文. 材料力学 (下册) (第2版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1983.
Liu Hongwen. Material mechanics (The second edition) [M]. Beijing: Higher Education Publishing House, 1983.
- [11] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用 (第2版) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
Zhu Bofang. Theory and application of finite element (The second edition) [M]. Beijing: China Water Power Press, 1998.