

文章编号: 1000-7598-(2006) 11-1897-05

非满配重水钻井井壁筒竖向结构稳定的理论研究

牛学超^{1,2}, 洪伯潜³, 杨仁树²

(1.北京工业职业技术学院 建筑工程系, 北京 100042; 2.中国矿业大学(北京校区) 力学与建筑工程学院, 北京 100083; 3.煤炭科学研究总院, 北京 100013)

摘 要: 提出了国内广泛采用的悬浮下沉井壁钻井施工法有其深度极限的观点。分析了泥浆中的井壁筒在加入配重水(非满水)后井壁底接触岩石时的受力状态; 结合国内悬浮下沉井壁钻井法的工艺特点, 建立了泥浆中的井壁筒为有底管状自重压杆的力学模型; 以能量法为基础, 利用结构稳定理论和流体力学理论原理, 推导了非满配重水井壁筒竖向结构稳定临界高度的解析式, 并给出了典型算例; 强调了工程设计中利用该公式的注意事项, 并指出进一步研究这一问题的内容和方法。

关 键 词: 悬浮下沉井壁; 钻井井筒; 液体中的自重压杆; 结构稳定

中图分类号: TD 351

文献标识码: A

Study on vertical structural stability of bored shafts filled part of water

NIU Xue-chao^{1,2}, HONG Bo-qian³, YANG Ren-shu²

(1. Department of Architecture Engineering, Beijing Vocational and Technical Institute of Industry, Beijing 100042, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 3. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: The concept of depth limit for the method applied to sinking of shaft lining by means of floatation in shaft boring that is widely utilized in mine construction in China was put forward. The mechanical state of shaft lining filled part of water when its pan touching the base rock of shaft bottom was analyzed. Contacting with the technical characteristic of shaft lining sinking by means of floatation, the calculation model of shaft lining filled part of water in mud before fixed, as a self-gravitating bar in liquid, was set-up. Based on energy methods as well as the principle of structural stability theory and hydromechanics theory, the analytical equation for vertical structure stability critical height of shaft cylinder filled part of water was calculated. A typical example was persuasively analyzed. The attention to use the equation was emphasized in shaft design and its construction. Finally, its further research contents and direction are pointed out.

Key words: sinking of shaft lining by means of floatation; bored shaft; self-gravitating bar; structural stability

1 引 言

特殊凿井法是通过深厚表土层的凿井方法。在特殊凿井的各种方法中, 采用最广泛的是冻结法和钻井法。随着上覆深厚表土层煤田的进一步开发, 在保证井壁质量、施工机械化程度、施工安全和井筒造价方面, 钻井法越来越体现出其优越性。在我国, 钻井法技术日臻完善, 已成功地完成了 56 个井筒的施工, 正在建设的山东龙固煤矿的 2 个主井井筒和一个风井井筒钻凿深度已近 600 m。然而, 被广泛采用的悬浮下沉凿井法, 在井壁沉到井底固井前加入配重水的过程中, 存在井壁筒竖向整体结构失稳的危险。这一危险在钻井井筒较浅时不能体现

出来。随着我国经济的持续高速发展, 煤炭资源的不断开发利用, 被深厚表土层覆盖的两淮、鲁西南等煤田将逐渐被开采, 这里建设的井筒很多将超过 600 m。采用钻井法施工井筒将不可避免, 钻井法施工过程中井壁的竖向结构稳定性成为越来越重要的现实问题^[1,2], 甚至关系到钻井法的应用前景。早在 20 世纪 80 年代初, 这一潜在危险曾被提出^[3], 并已经推导出悬浮下沉法固井前充满配重水钻井井壁筒在泥浆中竖向结构稳定性的解析式^[4]。有的学者提出采用分段下沉井壁的方案^[5], 这样可以防止钻井井壁筒竖向整体结构失稳, 但目前还没有这种井壁下放设备, 即使有了这类设备, 施工的井壁质量也不易保证, 至今我国仍然全部采用悬浮下沉法。

收稿日期: 2004-11-15 修改稿收到日期: 2005-06-27

基金项目: 十·五国家科技攻关项目 (No. 2004108)。

作者简介: 牛学超, 男, 1964 年生, 博士, 主要从事从事工程爆破和岩土工程稳定的教学与研究工作。E-mail: niuxuechao@sohu.com

如前所述,虽然已经推导出悬浮下沉法充满配重水钻井井壁筒在泥浆中竖向结构稳定性的解析式,但只有在浅表土施工中才在井壁筒下沉后充满配重水,而在深井筒施工中则采用加入非满配重水(不充满整个井壁筒)的方法,目前这种状态下井壁筒竖向结构稳定性问题缺少深入研究。本文利用能量法的压杆稳定理论和流体力学原理,推导出固井前加入非满配重水钻井井壁筒在泥浆中竖向结构稳定性的临界高度解析式,该式可作为悬浮下沉钻井井壁设计和施工的参考。

2 固井前钻井井壁筒受力分析

固井前泥浆中悬浮下沉井壁筒非满配重水状态下主要承受 5 种荷载,如图 1 所示。其中钢筋混凝土井壁的自重为 q_c ,方向向下;其二,井壁筒底受到井底岩石的反力为 r_A 和洗井液的压力(浮力)为 p_m ,合力方向向上。随着泥浆密度的改变或井壁筒底接触液面大小的不同,井底反力和井壁筒底受到的浮力会同时改变。井口木楔或工字钢楔对井壁的约束力为 R_B ,由于楔体对井壁以径向约束为主,对井壁筒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沿井壁筒径向;井壁筒配重水对井壁内表面的压力为 p_w ,方向沿井壁筒径向;泥浆对井壁筒外表面的压力为 p_m ,方向沿井壁外表面法向的反方向。

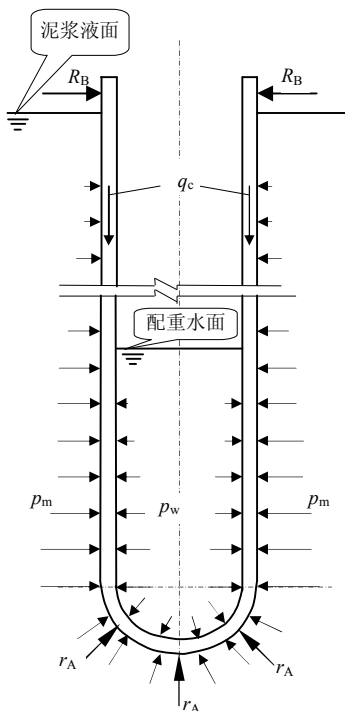


图 1 泥浆中井筒受力分析

Fig.1 The mechanical analysis of shaft boring in mud

3 临界高度公式推导

3.1 基本假设

钻井井壁下沉到井底接触到岩石后,井壁筒相当于液体中部分充水有底管状自重压杆,如图 2(a)。对此时的井壁筒作如下假设:

- (1) 井壁筒横截面内外圆同心,等截面,且均质;
- (2) 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;
- (3) 井壁材料服从虎克定律;
- (4) 井壁筒侧向变形很小,以至在曲率公式 $y''/[1+(y')^2]^{3/2}$ 中与 (1) 相比 $(y')^2$ 可以略去,因此,曲率能够用 y'' 来近似。

如图 2(a)所示,井壁筒位于泥浆中,其内加入部分配重水,在荷载作用下产生微弯曲。假设轴向挠曲线的表达式为

$$v = \delta \sin \frac{\pi x}{H} \quad (1)$$

式中 δ 为井壁筒轴线中点的最大挠度; x 为井壁筒任意横断面圆心到井底的距离; H 为井筒的深度。

另设 E 为井壁材料的平均弹性模量, I 为井筒横截面惯性矩,则井底和井口满足几何边界条件和自然边界条件,即

$$\left. \begin{aligned} v(0) &= 0 & M(0) &= EIv''(0) = 0 \\ v(H) &= 0 & M(H) &= EIv''(H) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

3.2 公式推导

井壁受到外侧泥浆的压力和内侧配重水压力的共同作用,如图 1。根据阿基米德定律,当井壁筒处于铅垂状态时,筒体部分任意横截面处井壁外泥浆和井筒内配重水对井筒的压力的代数和均为 0;当井壁筒微弯曲时,泥浆和配重水对井筒的压力将产生合力,这个合力对外表现为浮力;泥浆对单位长度井壁筒外侧压力的合力为 f_m ,简称单位长度井壁筒泥浆浮力,配重水对单位长度井壁筒内侧压力的合力为 f_w ,简称单位长度井壁筒配重水压力,分别为^[6]

$$f_m = q_m \sin \alpha = \frac{\pi}{4} D^2 \gamma_m \sin \alpha \quad (3)$$

$$f_w = q_w \sin \alpha = \frac{\pi}{4} d^2 \gamma_w \sin \alpha \quad (4)$$

式中 $q_m = \frac{\pi}{4} D^2 \gamma_m$; $q_w = \frac{\pi}{4} d^2 \gamma_w$; D 为钻井井壁筒的外直径; d 为钻井井壁筒的内直径; γ_m 为井壁筒外泥浆的重度; γ_w 为井壁筒中配重水的重度; α 为井壁筒轴线上任意点切线与 x 轴正向的夹角;利用叠加法计算井筒任意横截面的弯矩,叠加方法如图 2 所示。

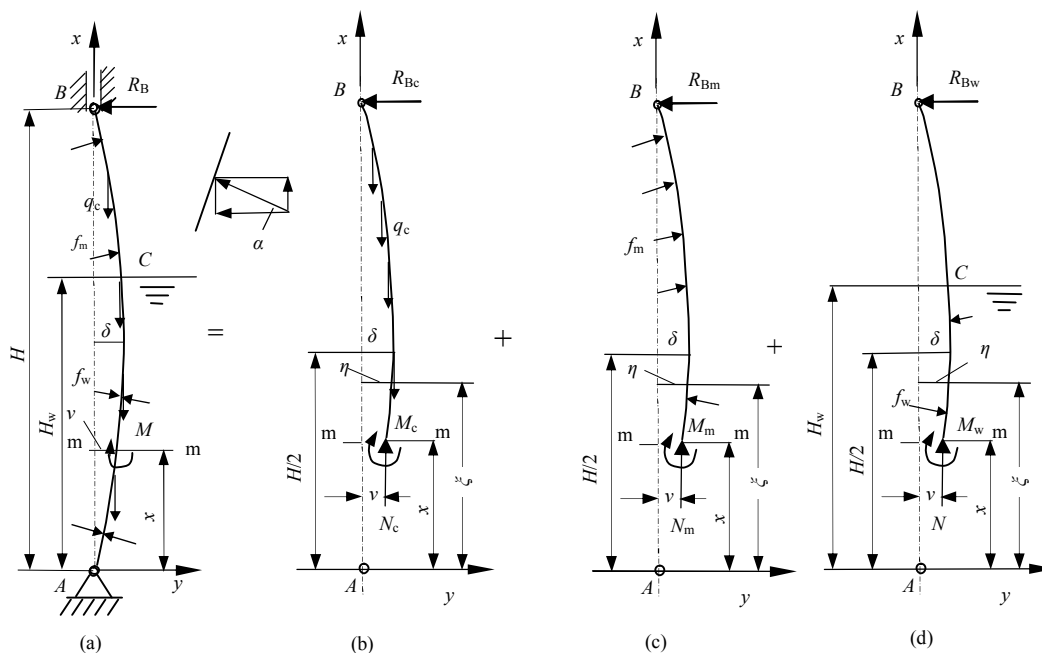


图 2 泥浆中钻井井筒稳定计算示意图

Fig.2 The sketch map of stability calculation for shaft in drilling

图 2(b)中, 在单位长度钢筋混凝土井壁重力 q_c 作用下, 取 $\sum M_A = 0$, 则由 q_c 引起的 B 点支座反力为

$$R_{Bc} = \frac{\int_0^H q_c v dx}{H} = \frac{2q_c \delta}{\pi} \quad (5)$$

图中 m - m 截面上部荷载(混凝土井壁自重)在该面引起的弯矩为

$$M_c = -\int_x^H (\eta - v) q_c d\xi + R_{Bc}(H - x) = \frac{q_c \delta}{\pi} (H - H \cos \beta + \pi H \sin \beta - \pi x \sin \beta - 2x) \quad (6)$$

式中 η , ξ 分别为 m - m 截面以上井筒轴线上任意一点的横、纵坐标; $\beta = \frac{\pi x}{H}$; 其他符号意义同前。

如图 2(c), 由 $\sum M_A = 0$ 和式 (3), 解得由单位长度井壁筒泥浆浮力 f_m 引起的 B 点支座反力 R_{Bm} :

$$R_{Bm} H = -\int_0^H f_m \cos \alpha x dx - \int_0^H f_m \sin \alpha v dx = \frac{2q_m H \delta}{\pi} \quad (7)$$

解上式得

$$R_{Bm} = \frac{2q_m \delta}{\pi} \quad (8)$$

图中 m - m 截面上部荷载(泥浆的浮力)在该面引起的弯矩为

$$M_m = \int_x^H f_m \sin \alpha (\eta - v) d\xi + \int_x^H f_m \cos \alpha (\xi - x) d\xi + R_{Bm}(H - x) = \frac{q_m \delta}{\pi} (H - H \cos \beta - 2x) \quad (9)$$

如图 2(d), 配重水的高度为 H_w , 由 $\sum M_A = 0$ 和式 (4), 可解得由井壁筒内水压力引起的 B 点支座反力 R_{Bw} :

$$R_{Bw} = \frac{1}{H} \left(\int_0^{H_w} f_w \cos \alpha x dx + \int_0^{H_w} f_w \sin \alpha v dx \right) = q_w \delta \left(\frac{1}{\pi} \cos \frac{\pi H_w}{H} + \frac{H_w}{H} \sin \frac{\pi H_w}{H} - \frac{1}{\pi} \right) = \frac{c_1 q_w \delta}{\pi} \quad (10)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= -1 + \cos \frac{\pi H_w}{H} + \frac{\pi H_w}{H} \sin \frac{\pi H_w}{H} \\ &= -1 + \cos \varphi + \frac{\pi H_w}{H} \sin \varphi \\ \varphi &= \frac{\pi H_w}{H} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

在图 2(d)中, 当 m - m 截面位于水面以下时, 其截面弯矩可由 R_{Bw} 和 f_w 二力产生的弯矩叠加而求得; 当 m - m 截面位于水面以上时, 其截面弯矩仅需由 R_{Bw} 即可求得。可见, 分别求出这 2 个力各自在 m - m 截面产生的弯矩, 而后用叠加法求整个井筒的弯矩, 则较为方便。当 $0 \leq x < H_w$ 时, 井筒内配重水在 m - m 截面产生的弯矩为

$$M_{ww} = -\int_x^{H_w} f_w \sin \alpha (\eta - v) d\xi + \int_x^{H_w} f_w \cos \alpha (\xi - x) d\xi = \frac{q_w \delta}{\pi} (-H \cos \varphi - \pi H_w \sin \varphi + H \cos \beta + \pi x \sin \varphi) = \frac{q_w \delta}{\pi} (-H c_2 + H \cos \beta + \pi x \sin \varphi) \quad (12)$$

式中 $c_2 = \cos \varphi + \varphi \sin \varphi$ 。当 $0 \leq x < H$ 时, 由 R_{Bw} 在 m-m 截面产生的弯矩为

$$M_{wR} = R_{Bw}(H-x) = \frac{q_w \delta}{\pi} c_1 (H-x) \quad (13)$$

叠加整个井壁筒各断面的弯矩。由于 AC 段和 CB 段的弯矩表达式不同, 应分别进行计算:

$$M_{AC} = M_c + M_m + M_{ww} + M_{wR} \quad (0 \leq x < H_w) \quad (14)$$

$$M_{CB} = M_c + M_m + M_{wR} \quad (H_w \leq x < H) \quad (15)$$

井壁筒微弯曲时, 整个井壁筒应变能的改变由 AC 和 CB 段的应变能增量组成^[7]:

$$\Delta U = \frac{1}{2EI} \int_0^{H_w} M_{AC}^2 dx + \frac{1}{2EI} \int_{H_w}^H M_{CB}^2 dx \quad (16)$$

上式右边第 2 项积分相当复杂, 为了便于推导, 将式 (14)、式 (15) 代入上式后, 利用定积分的性质将积分起点变成坐标原点, 再将式 (6)、式 (8)、式 (12)、式 (13) 代入上式, 并整理得

$$\begin{aligned} \Delta U = & \frac{1}{2EI} \int_0^H (M_c^2 + M_m^2 + 2M_c M_m) dx + \\ & \frac{1}{2EI} \int_0^H (M_{wR}^2 + 2M_c M_{wR} + 2M_m M_{wR}) dx + \\ & \frac{1}{2EI} \int_0^{H_w} (M_{ww}^2 + 2M_c M_{ww} + 2M_m M_{ww} + \\ & 2M_{wR} M_{ww}) dx = \frac{\delta^2 H^3}{2\pi^2 EI} \mathbf{QAK} \end{aligned} \quad (17)$$

式中

$$\mathbf{Q} = (q_c^2 \quad q_m^2 \quad q_w^2 \quad q_c q_m \quad q_m q_w \quad q_w q_c) \quad (18)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{14} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{61} & \cdots & a_{6n} \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$\mathbf{K} = (1 \quad k \quad k^2 \quad k^3)^T \quad (20)$$

$$k = H_w / H \quad (21)$$

$$a_{11} = \frac{25}{12} + \frac{\pi^2}{6} - \frac{24}{\pi^2} \quad (22)$$

$$a_{12} = a_{13} = a_{14} = 0 \quad (23)$$

$$a_{21} = \frac{5}{6} - \frac{8}{\pi^2} \quad (24)$$

$$a_{22} = a_{23} = a_{24} = 0 \quad (25)$$

$$a_{31} = \frac{2c_1}{\pi^2} - \frac{2c_1}{\pi^2} \cos \varphi + \frac{c_1^2}{3} - \frac{4}{\pi} \sin \varphi + \frac{5}{2\pi} \sin \varphi \cos \varphi \quad (26)$$

$$a_{32} = \frac{3}{2} + 3c_1 + 2c_1^2 + \pi c_1 \sin \varphi + 2 \sin^2 \varphi \quad (27)$$

$$a_{33} = c_1 + c_1^2 - \pi \sin \varphi \quad (28)$$

$$a_{34} = -\frac{2\pi c_1}{3} \sin \varphi + \frac{\pi^2}{3} \sin^2 \varphi \quad (29)$$

$$a_{41} = \frac{19}{6} - \frac{32}{\pi^2} \quad (30)$$

$$a_{42} = a_{43} = a_{44} = 0 \quad (31)$$

$$a_{51} = \frac{c_1}{3} - \frac{4c_1}{\pi^2} + \frac{2c_1}{\pi} \sin \varphi + \frac{6}{\pi} \sin \varphi - \frac{3}{\pi} \sin \varphi \cos \varphi - \frac{4}{\pi^2} \cos \varphi + \frac{4}{\pi^2} \quad (32)$$

$$a_{52} = -3 - 2c_1 - \frac{4}{\pi} \sin \varphi - 2 \sin^2 \varphi \quad (33)$$

$$a_{53} = 2 + 2c_1 + \pi \sin \varphi \quad (34)$$

$$a_{54} = -\frac{4\pi}{3} \sin \varphi \quad (35)$$

$$a_{61} = -2 + \frac{c_1}{3} - \frac{12c_1}{\pi^2} + \frac{4c_1}{\pi} \sin \varphi + 2c_1 \cos \varphi + \frac{12}{\pi} \sin \varphi + 3 \sin^2 \varphi - \frac{15}{2\pi} \sin \varphi \cos \varphi + 2 \cos \varphi - \frac{4}{\pi^2} \cos \varphi + \frac{4}{\pi^2} \quad (36)$$

$$a_{62} = -\frac{5}{2} - 2c_1 - 2c_1 \cos \varphi - \frac{4}{\pi} \sin \varphi - 7 \sin^2 \varphi - 2\pi \sin \varphi \cos \varphi - 2 \cos \varphi \quad (37)$$

$$a_{63} = 2 + 2c_1 + \pi \sin \varphi + 2\pi \sin \varphi \cos \varphi \quad (38)$$

$$a_{64} = -\frac{4\pi}{3} \sin \varphi \quad (39)$$

井壁筒从铅垂位置变为微弯曲位置时, 外力对井壁筒做了功。做功的外力有 q_c 、 f_m 和 f_w 。自重力对井壁筒所做的功为^[8]

$$w_{qc} = \int_0^H \frac{1}{2} q_c (H-x) \left(\frac{dv}{dx} \right)^2 dx = \frac{1}{8} \pi^2 q_c \delta^2 \quad (40)$$

略去高阶无穷小, 浮力对单位长度井筒所做的功为 $w = \frac{\pi q \delta^2}{2H} \sin \beta \cos \beta$, 则 f_m 和 f_w 对井筒变形所做的功分别为

$$w_m = \int_0^H w dx = \frac{\pi q_m \delta^2}{2H} \int_0^H \sin \beta \cos \beta dx = 0 \quad (41)$$

$$w_w = \int_0^{H_w} w dx = \frac{\pi q_w \delta^2}{2H} \int_0^{H_w} \sin \beta \cos \beta dx = \frac{q_w \delta^2}{2} \sin^2 \varphi \quad (42)$$

由式 (40)、式 (41) 和式 (42), 得井壁筒从铅垂状态到微弯曲时外力功的改变量为

$$\Delta W = w_{qc} + w_m + w_w = \delta^2 \left(\frac{\pi^2 q_c}{8} + \frac{q_w \sin^2 \varphi}{2} \right) \quad (43)$$

式中 $\varphi = \frac{\pi H_w}{H}$, $\beta = \frac{\pi x}{H}$, 其他符号意义同前。以上推导过程中均舍去了高阶无穷小。

由能量守恒定律^[9], $\Delta W = \Delta U$ 和式 (17)、式 (43) 得井壁筒临界高度为

$$H_{cr} = H = \frac{\pi^2 EI (\pi^2 q_c + 4 q_w \sin^2 \varphi)}{4 Q A K} \quad (44)$$

3.3 算例

某煤矿主井井筒采用钻井法施工, 以悬浮下沉法下放井壁。井筒钻凿深度为 508 m, 采用钢筋混凝土井壁结构。井筒外径为 7.0 m, 内径为 5.7~6.0 m, 轴向中间部分内径为 5.8 m, 井壁混凝土强度等级为 C60, 泥浆的重度取 12 kN/m³, 配重水重度取 10 kN/m³。最大配重水充填高度为 400 m。试计算井壁筒下沉到井底, 固井前在泥浆中的竖向结构稳定性。

根据井筒具体情况和钢筋混凝土的性质选取有关参数^[10, 11]。钢筋混凝土的计算弹性模量取 $E = 36 \text{ GPa}$ 。截面惯性矩为 $I = 62.3 \text{ m}^4$; $\gamma_m = 12 \text{ kN/m}^3$; $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$; $\gamma_c = 27.2 \text{ kN/m}^3$; $\varphi = \frac{\pi H_w}{H} = 2.47$; 将上述参数代入式 (44), 得井壁加入 400 m 配重水的结构临界高度为 $H_{cr} = 572 \text{ m} (> 508 \text{ m})$, 因而井壁筒下沉过程中加水高度为 400 m 是安全的。

4 结 语

随着深厚表土层下煤层的开采, 悬浮下沉井壁钻井法的适应性变成了现实问题, 关于钻井井筒的极限深度方面的研究极少, 不能满足工程实践的需要。本文给出的非满水井壁筒临界高度解析式是在能量法理论的基础上推出的, 尽管推导过程严密, 但仍有待实践进一步检验; 由于井壁的复杂性, 比如: 不同井筒井壁的配筋率不同, 有无内外钢板以及钢板的厚度不同等因素, 均会影响公式中井壁材料弹性模量 E 的取值, 从而影响计算结果, 因而 E 的取值必须相当谨慎; 国内钻井井筒采用变截面的形式越来越多, 这种井筒的临界高度理论有待进一步研究; 本文理论结果可供钻井井壁设计和施工时参考。

参 考 文 献

- [1] 洪伯潜, 臧桂茂, 谭杰. 龙固矿近 600 m 深钻井井壁设计与安装[J]. 中国煤炭, 2004, 30(6): 9—11.
HONG Bo-qian, ZANG Gui-mao, TAN Jie. Design and installation of sidewall of 600 m-deep-well in Longgu mine[J]. *China Coal*, 2004, 30(6): 9—11.
- [2] 洪伯潜. 不断发展的钻井法凿井技术——钻井法凿井技术的应用与发展[J]. 煤炭学报, 2003, 28(增刊): 40—43.
HONG Bo-qian. Continuously developed shaft drilling method for mine shaft sinking—application and development of shaft drilling method for mine shaft sinking[J]. *Journal of China Coal Society*, 2003, 28(Supp.): 40—43.
- [3] 洪伯潜. 钻井法凿井深井井壁在泥浆中的轴向稳定[J]. 建井技术, 1980, 71(9): 22—25.
- [4] 牛学超, 洪伯潜, 杨树仁. 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 Xue-chao, HONG Bo-qian, YANG Ren-shu. The theory study on axial structural stability of drilled shafts filled with water[J]. *Journal of China Coal Society*, 2005, 30(4): 463—466.
- [5] 崔广心. 深井钻井的井壁结构 and 支护方法[J]. 建井技术, 1984, 18(4): 42—46.
- [6] 潘家铮. 压力钢管[M]. 北京: 电力工业出版社, 1982.
- [7] 费志中. 弹性稳定[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1989.
- [8] 刘鸿文. 高等材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- [9] Chajes A. Principle of structural stability theory [M]. New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1974.
- [10] 郭耀杰. 钢结构稳定设计[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- [11] 腾智明, 罗福午, 施岚青. 钢筋混凝土基本构件[M]. 北京: 清华大学出版社, 1987.