

特深钻探钻柱组合优化设计研究

尹浩, 梁健, 孙建华

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000)

摘要: 钻杆柱作为地球深部探测中深地与深水钻探技术的核心与关键, 单一规格钻柱许用深度有限, 难以满足大陆万米特深孔科学钻探及大洋深水深孔钻探工程的设计要求。本文通过减轻下部钻柱重力及提高上部钻柱强度方案, 对其组合设计开展优化研究。以拉伸条件下的强度计算为主, 加之一定的设计安全系数和拉伸余量来满足动载荷以及其他复杂情况对钻柱强度的需求, 并开发了钻柱组合设计与安全系数计算的软件, 可实现不同孔深设计和钻杆结构要求下的钻柱组合设计与安全系数计算。

关键词: 特深孔钻探; 钻柱组合; 安全系数; 拉力余量; 软件开发

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2019)04-0056-07

Research on optimum drilling string assembly design for extra deep hole drilling

YIN Hao, LIANG Jian, SUN Jianhua

(The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: The drill string is the core and key technology in deep land and deep water drilling for deep earth exploration; however, with the limited allowable drilling depth, the drill string of a single specification is difficult to meet the design requirements of 10000m extra deep continental scientific drilling and deep ocean drilling. In this paper, by reducing the weight of the lower portion of the drill string and improving the strength of the upper portion, the design of the drill string assembly is optimized. With the priority of tensile strength calculation, the demand on the drill string strength is satisfied in consideration of the safety factor and tensile allowance in case of dynamic loads and other complex situations, and the software for the drill string assembly design and safety coefficient calculation is developed, which can realize the drill string assembly design and safety coefficient calculation for different hole depths and drill rod structures.

Key words: extra deep hole drilling; drill string assembly; safety factor; tension allowance; software development

0 引言

钻杆柱作为地球深部探测、深地与深水钻探技术的核心与关键, 其用以递送扭矩和钻压、输送冲洗液和提取岩心、更换钻头及处理事故, 钻柱结构组合设计的合理性与可靠性是确保工程优质、高效、安全实施的重要条件, 直接关系到钻探工程的成败, 是钻探工程的重要研究内容之一。由于钻柱材料强度的限制和重力的存在, 单一规格常规钢制钻柱许用深

度有限, 难以满足大陆万米特深孔科学钻探及大洋深水深孔钻探工程的设计要求^[1-5]。

为使钻柱具有更大的许下深度, 在满足孔身结构和钻机提升能力的前提下, 可采取复合钻柱的设计方法, 即减轻下部钻柱重力或提高上部钻柱强度^[6]。在前苏联科拉科学超深井与联邦德国大陆深钻的实施中, 均对复合钻柱进行了研究与应用, 完井深度分别达到了 12262 m 与 9101 m^[7]。特深孔复

收稿日期: 2019-02-14 **DOI:** 10.12143/j.tkgc.2019.04.010

基金项目: 国家重点研发计划“深地资源勘查开采”重点专项“5000 米智能地质钻探技术装备研发及应用示范”(编号: 2018YFC0603400)课题“高性能薄壁绳索取心钻杆研制”(编号: 2018YFC0603403); 国家自然科学基金项目“科学超深井铝合金钻杆的腐蚀防护机制研究”(编号: 41772390)

作者简介: 尹浩, 男, 回族, 1987 年生, 工程师, 地质工程专业, 硕士, 从事钻探器具及工艺研究工作, 河北省廊坊市金光道 77 号, yin_hao@fox-mail.com。

引用格式: 尹浩, 梁健, 孙建华. 特深钻探钻柱组合优化设计研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(4): 56-62.

YIN Hao, LIANG Jian, SUN Jianhua. Research on optimum drilling string assembly design for extra deep hole drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(4): 56-62.

合钻柱一般是由不同外径(上粗下细)、同种外径不同壁厚(上厚下薄)、同种壁厚不同钢级(上高下低)或不同材质(上钢下铝或其他轻合金)的钻杆组成。与单一规格钻杆组合的钻柱来讲,复合钻柱减轻了钻柱重力、满足了强度要求、提高了钻进效率,在相同钻机负荷能力下可钻达更深地层^[8]。钻柱的运动形式和受力十分复杂,主要包括:自转、公转(涡动)、纵向振动、扭转振动、横向振动等,并且随着钻进方法、钻进工序的不同而异。虽然在不同的工作状态下,钻柱受力情况有所差异,但其中经常作用且数值较大的力为拉力,尤其在以科学钻探为目的的特深垂直孔钻探中^[9-11]。综上,本文在组合钻柱设计中,以拉伸计算为主^[12],通过考虑一定的设计安全系数和拉伸余量来满足起下钻时的动载荷以及其他复杂情况对钻柱强度的需求,开展了钻柱组合优化设计的研究,并开发了钻柱组合设计与安全系数计算软件,可实现不同孔深设计和钻杆结构要求下的钻柱组合设计与安全系数计算,可提高科研人员的工作效率和准确度。

1 复合钻柱组合设计理论

由于钻柱材料使用强度的限制和重力的存在,致使钻柱在钻达一定深度后,仅自重的作用即可使钻柱拉断失效,因此钻柱的使用存在极限深度。为了增加钻柱的使用深度,需要进行合理的钻柱组合设计,以保证钻柱整体的可靠性与安全性。

由于越靠近孔口的钻柱承受自身浮重(浮力与重力的合力)越大,加之钻柱中和点需作用在钻铤上,故从钻铤往上逐级增径设计钻柱规格^[13]。同时,钻柱设计过程中,既要考虑一定的设计安全系数,又要满足一定的拉力余量。其中,设计安全系数用于确定屈服极限抗拉载荷较大的钻柱设计,拉力余量用于确定屈服极限抗拉载荷较小的钻柱设计。最后,根据设计安全系数与拉力余量确定的最大许用静拉载荷计算各级钻柱的最大使用长度等参数。

1.1 最大许用静拉载荷的确定

钻杆的最大许用静拉载荷是由钻杆截面以下钻柱浮重产生的允许钻杆承受的最大载荷。同时,考虑到起下钻时的动载及摩擦、卡瓦挤压、解卡拉力余量等因素,钻柱管体任意截面上的最大许用静拉载荷应同时满足以下 3 个条件:

$$\begin{cases} F_{\text{许}} \leq F_{\text{最大许用拉伸载荷}} / N \\ F_{\text{许}} \leq F_{\text{屈服极限抗拉载荷}} / (\sigma_s / \sigma_G) \\ F_{\text{许}} \leq F_{\text{最大许用拉伸载荷}} - F_{\text{拉力余量}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $F_{\text{许}}$ ——钻杆的最大许用静拉载荷, kN; $F_{\text{最大许用拉伸载荷}}$ ——钻杆的最大许用拉伸力, kN; N ——钻柱设计的安全系数; $F_{\text{屈服极限抗拉载荷}}$ ——钻杆达到屈服极限的拉伸力, kN; σ_s ——钻杆材料的屈服强度, MPa; σ_G ——钻杆自重作用下产生的拉伸应力, MPa; $F_{\text{拉力余量}}$ ——处理卡钻等孔内事故预留的拉力余量,一般取 200~800 kN。

根据理论计算可知:

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_G} = \sqrt{1 + \frac{DK}{2L_s} + \left(\frac{DK}{2L_s}\right)^2}, \text{ 其中 } K = \frac{1}{\tan(\alpha + \varphi)} \quad (2)$$

式中: D ——钻杆外径, mm; K ——卡瓦横向负荷系数; α ——卡瓦锥角, 取 $9^\circ 27' 45''$; φ ——摩擦角, 摩擦系数 $\mu = \tan\varphi = 0.08$; L_s ——卡瓦长度, 取 400 mm。

考虑钻杆拉伸载荷达到屈服极限时材料将产生轻微永久变形, 取屈服极限的 90% 作为钻杆最大许用拉伸力, 即:

$$F_{\text{最大许用拉伸力}} = 0.9F_{\text{屈服极限抗拉载荷}} = 9 \times 10^{-4} \sigma_s A \quad (3)$$

式中: σ_s ——钻杆屈服强度, MPa; A ——钻杆横截面积, mm^2 。

综上所述, 得到同时满足以上条件的最大许用静拉载荷, 进而确定各级钻杆的尺寸规格、许用长度、钢级。

1.2 钻柱长度及安全系数确定

1.2.1 一径到底

一种尺寸规格和钢级的钻柱可满足设计要求的情况下, 钻柱许用长度 L_a 和使用长度 L_b 分别应满足以下条件:

$$\begin{cases} F_{\text{许}} = (L_a q_1 + L_c q_c) K_{\text{浮}} \\ L_{\text{孔}} = L_b + L_c \end{cases} \quad (4)$$

安全系数 N 为:

$$N = \frac{F_{\text{最大许用拉伸力}}}{(L_b q_1 + L_c q_c) K_{\text{浮}}} \quad (5)$$

式中: $L_{\text{孔}}$ ——设计孔深, m; L_a ——钻柱许用长度, m; L_b ——钻柱实际使用长度, m; L_c ——钻铤或加重钻杆长度, 满足 $L_c = 1.2F_{\text{钻压}}/q_c$, m; q_1 ——第一级钻杆每米重, kN; q_c ——钻铤每米重, kN;

$K_{浮}$ ——钻柱在孔内泥浆中的浮力系数, $K_{浮} = 1 - \rho_{泥浆} / \rho_{钻柱}$ 。

1.2.2 塔式结构

一种尺寸规格和钢级的钻柱不能满足设计要求的条件下,可选择厚壁、大尺寸规格或更高钢级的钻杆,从下而上逐级进行钻柱许用长度确定,直到满足设计孔深要求。

假设自下而上每级钻柱许用长度为: L_1 、 L_2 、 \dots 、 L_i 、 \dots 、 L_n ,最后一级的使用长度为 L_b ,则存在以下关系:

$$\begin{cases} L = L_c + L_1 + L_2 + \dots + L_{n-1} + L_b \\ F_{许1} = (L_c q_c + L_1 q_1) K_{浮} \\ F_{许2} = (L_c q_c + L_1 q_1 + L_2 q_2) K_{浮} \\ \vdots \\ F_{许i} = (L_c q_c + L_1 q_1 + L_2 q_2 + \dots + L_i q_i) K_{浮} \\ \vdots \\ F_{许n} = (L_c q_c + L_1 q_1 + L_2 q_2 + \dots + L_{n-1} q_{n-1} + L_b q_b) K_{浮} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $F_{许1}$ 、 $F_{许2}$ 、 \dots 、 $F_{许i}$ ——各级钻杆最大许用静拉载荷, kN; q_1 、 q_2 、 \dots 、 q_i ——各级钻杆的质量, kg^[13-15]。

结合式(1)~(6),可求得各级钻杆许用长度和各级钻杆的安全系数。如有特殊要求,可通过改变各级钻杆尺寸规格和钻杆材料,对各级钻杆的使用长度和安全系数进行一定范围修改。

2 设计理论程序化

根据上述超深孔用钻柱结构组合设计理论,结合面向对象的编程语言,通过控件布局、变量设置、回调函数编写,其中使用数组结构表示多级钻柱组合的各级参数,实现极限钻柱结构设计和钻柱结构安全系数计算软件的开发。本文中钻柱安全系数是假定钻杆接头、螺纹尺寸与钻杆体等强度设计前提下得到的;如考虑钻杆整体外平度、钻杆缴粗限制、泥浆环空压耗等因素而需要对钻杆接头尺寸有所限制,需另外确定钻杆接头处的安全系数。

2.1 极限钻柱结构设计软件

2.1.1 输入参数确定

计算过程中涉及到的输入参数包括设计孔深、泥浆密度、钻铤材料密度、钻压、工作安全系数、拉力余量、接头加重系数、钻杆外径、钻杆壁厚、钻杆屈服强度、钻杆材料密度、钻铤外径、钻铤内径、卡瓦长度。本设计通过 10 个元素数组设置,最多支持十级钻杆塔式结构设计。

2.1.2 输出参数确定

计算过程中涉及到的输出参数包括每级钻杆横截面积、承载极限、最大允许静拉负荷、钻杆长度、钻杆重力、安全系数、钻铤长度、钻铤重力。

2.1.3 界面实现

设计软件界面包括输入参数、输出参数、钻柱结构图绘制 3 部分(如图 1 所示)。

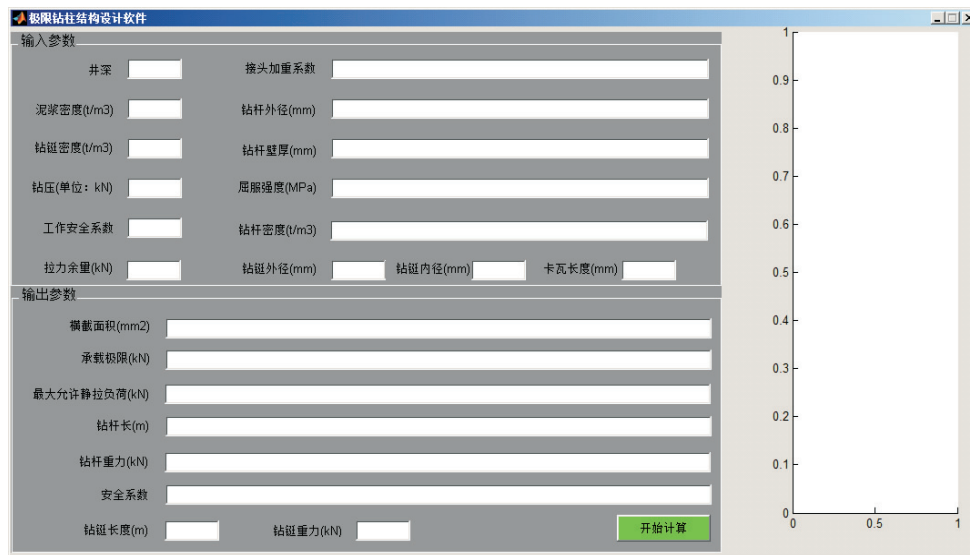


图 1 极限钻柱结构设计软件用户界面

Fig.1 Software user interface for the ultimate drill string structure design

2.2 钻柱结构安全系数计算软件

2.2.1 输入参数确定

计算过程中涉及到的输入参数包括设计孔深、泥浆密度、钢密度、钻压、最低安全系数、拉力余量、钻杆级数或开数、卡瓦长度、加重钻杆接头加重系数、加重钻杆外径、加重钻杆内径、接头加重系数、钻杆外径、钻杆内径、钻杆屈服强度、钻杆密度、每级钻杆设计长度。本设计通过 10 个元素数组设置,最多支持 10 级(塔式结构)或 10 开(一径到底)钻杆结构

设计。

2.2.2 输出参数确定

计算过程中涉及到的输出参数包括每级钻杆横截面积、屈服承载极限、钻杆浮重、钻杆重力、钻杆长度、加重钻杆长度、安全系数。

2.2.3 界面实现

设计软件界面包括输入参数、输出参数、钻柱结构图绘制 3 部分,如图 2 所示。



图 2 钻柱结构安全系数计算软件用户界面

Fig.2 Software user interface for the drill string structural safe factor design

上述 2 个软件也可用于计算悬挂套管极限长度及给定长度套管的使用安全系数。

3 算例

3.1 10000 m 绳索取心极限钻柱组合设计

3.1.1 设计参数

10000 m 绳索取心钻柱极限孔身结构设计的设计参数包括:设计孔深 10000 m、泥浆密度 1.05~1.2 t/m³、钻铤材料密度 7.85 t/m³、钻压 100 kN、工作安全系数 2.0、拉力余量 800 kN、接头加重系数 1.05、卡瓦长度 400 mm、钻铤外径 190.5 mm、钻铤内径 108.66 mm、钻杆材料(S135 或 V150)与钻柱参数(见表 1)。其中,钻杆参数中的数值均可在一定范围内调整,从而获得不同的钻柱设计方案。

3.1.2 软件计算

表 1 10000 m 钻柱设计参数

Table 1 Design parameters of the drill string for 10000m hole

钻杆级数	钻杆外径/mm	钻杆壁厚/mm	钻杆材料密度/(t·m ⁻³)	屈服强度/MPa
1 级	127	9.17	7.85	931
2 级	127	10.54	7.85	931
3 级	139.7	10.54	7.85	1044
4 级	139.7	12.70	7.85	1044
5 级	168.3	15.20	7.85	1044

将设计参数逐级输入到设计软件,如当前级数或钻杆规格不能满足设计孔深,系统将提示“当前级数或钻杆规格不能满足设计孔深,请增加钻柱级数或调整钻杆规格”,直到得到满足设计孔深的方案。计算得到的钻柱相关结构参数如图 3 和表 2 所示。

3.2 5000 m 绳索取心钻柱安全系数计算

3.2.1 设计参数



(a) 泥浆密度为1.05 t/m³时



(b) 泥浆密度为1.2 t/m³时

图3 10000 m 孔深极限钻柱结构设计界面

Fig.3 Ultimate drill string structural design interface for 10000m hole

表2 10000 m 钻柱结构参数

Table 2 Structural parameters of the drill string for 10000m hole

钻杆级数	钻杆横截面积/mm ²	钻杆承载极限/kN	泥浆密度 1.05 t/m ³			泥浆密度 1.2 t/m ³		
			钻杆许用长度/m	钻杆重力/kN	钻杆安全系数	钻杆许用长度/m	钻杆重力/kN	钻杆安全系数
1级	3394.5	3160.3	5372.5	1503	2.00	5493.7	1537	2.00
2级	3856.3	3590.2	702.6	223	2.00	718.5	228	2.00
3级	4276.8	4465.0	1289.1	454	2.00	1318.2	465	2.00
4级	5067.1	5290.0	1026.2	429	2.00	1049.4	438	2.00
5级	7310.9	7632.5	1517.8	915	2.17	1326.4	799	2.25

5000 m 绳索取心钻柱安全系数计算的设计参数包括:设计孔深 5000 m、终孔孔径 96 mm、泥浆密度 1.1 t/m³、钻压 50 kN、工作安全系数 2.0、拉力余量 500 kN、卡瓦长度 400 mm、加重钢钻杆与钻杆参数(见表 3,参考 GB/T 16950—2014)^[16]。其中钻杆参数中的数值(包括尺寸规格和材料)均可在一

定范围内进行合理调整,从而获得不同的钻柱设计方案。

3.2.2 软件计算

将设计参数逐一输入到设计软件中的文本框中(如图 4 所示),计算得到的钻柱结构参数见表 4。

表 3 5000 m 钻杆设计参数

Table 3 Design parameters of the drill string for 5000m hole

钻杆级数	钻杆外径/mm	钻杆内径/mm	钻杆材料密度/(t·m ⁻³)	屈服强度/MPa	接头加重系数	加重钻杆外径/mm	加重钻杆内径/mm
1 级	88.9	78.1	7.85	931	1.05	92	78.1
2 级	114.3	101.6	7.85	931	1.05	118	101.6
3 级	139.7	125.4	7.85	931	1.05	146	125.4
4 级	168.3	152.4	7.85	931	1.05	176	152.4

表 4 5000 m 钻柱结构参数

Table 4 Structural parameters of the drill string for 10000m hole

钻杆级数	钻杆横截面积/mm ²	钻杆承载极限/kN	钻杆浮重/kN	钻杆重力/kN	钻杆长度/m	加重钻杆长度/m	钻杆安全系数
1 级	1416.5	1318.8	448.7	521.9	4521.30	478.7	2.29
2 级	2153.5	2004.9	412.7	479.9	2685.70	314.3	3.74
3 级	2977.4	2771.9	275.4	320.3	129.76	202.4	7.23
4 级	4004.8	3728.5	101.0	117.5	354.00	146.0	19.64



图 4 5000 m 绳索取心钻柱安全系数计算界面

Fig.4 Drill string structural design interface for 5000m wire-line coring hole

4 结论

本文通过对钻柱组合设计理论的研究,对特深钻探钻柱组合的设计过程进行了程序化编程,实现用于极限孔身结构与给定孔身结构两种情况下钻柱组合的设计,并得出如下结论:

(1)通过钻柱组合设计的程序化设计,大大提高了设计效率,可以通过选用不同尺寸规格和材料的钻杆组合,实时得到不同的钻柱组合设计方案。

(2)通过软件计算,给出了 10000 m 绳索取心极限孔身钻柱组合方案与 5000 m 绳索取心钻柱方案;通过软件,可进一步研究各设计参数对钻柱组合与安全系数的关系,对于特深钻探研究具有一定的参考意义。

(3)本文钻柱安全系数是假定钻杆接头与螺纹尺寸根据与钻杆体等强度设计原则进行设计的前提

下得到的,得到的钻柱组合方案存在一定的局限性,下一步将考虑钻杆外平度、钻杆墩粗限制、泥浆环空压耗等因素对钻杆接头尺寸的限制,进而优化杆体尺寸、设计接头结构和匹配环空间隙。

(4)随着向地球更深部进军,对钻柱提出了新的要求,高强重比、高耐温性、高韧性是钻柱未来的发展方向。

参考文献 (References):

[1] 孙建华,张永勤,赵海涛,等.复杂地层中深孔绳索取心钻探技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2006,33(5):46-50.
SUN Jianhua, ZHANG Yongqin, ZHAO Haitao, et al. Research on deep hole wire line core drilling tech. in complicated stratum[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2006,33(5):46-50.

[2] 孙建华,张永勤,梁健,等.深孔绳索取心钻探技术现状及研发工作思路[J].地质装备,2011,12(4):11-14.
SUN Jianhua, ZHANG Yongqin, LIANG Jian, et al. Status

- and R & D approach of deep hole wire line core drilling technology[J]. *Equipment for Geotechnical Engineering*, 2011, 12(4): 11-14.
- [3] 王达. 深孔岩心钻探的技术关键[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2009, 36(S1): 1-4.
WANG Da. Key technique of deep hole drilling[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2009, 36(S1): 1-4.
- [4] 张培丰. 深孔岩心钻探问题探讨[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2011, 38(8): 6-11.
ZHANG Peifeng. Analysis on deep-hole geological core drilling [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2011, 38(8): 6-11.
- [5] 张金昌. 深部找矿关键钻探技术问题与对策[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2011, 38(11): 1-6.
ZHANG Jinchang. Challenges and countermeasures of key drilling techniques for the deep prospecting [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2011, 38(11): 1-6.
- [6] 张伟. 特深岩心钻孔套管程序和钻具级配等问题的探讨[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2010, 37(11): 1-5.
ZHANG Wei. Discussion on casing program and drilling tools match relation of ultra-deep geological core hole [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2010, 37(11): 1-5.
- [7] 张金昌, 谢文卫. 科学超深井钻探技术国内外现状[J]. *地质学报*, 2010, 84(6): 887-894.
ZHANG Jinchang, XIE Wenwei. Status of scientific drilling technology for ultra-deep well [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(6): 887-894.
- [8] 孙建华, 陈师逊, 刘秀美, 等. 小直径特深孔绳索取心口径系列及钻柱方案[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2013, 40(8): 1-5, 17.
SUN Jianhua, CHEN Shixun, LIU Xiumei, et al. Diameter series and drill pipe scheme for wire-line coring with small diameter in ultra-deep borehole [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2013, 40(8): 1-5, 17.
- [9] 林元华, 施太和, 徐显广, 等. 复杂地层钻井的钻柱设计及使用技术研究[J]. *天然气工业*, 2004, 24(8): 47-49.
LIN Yuanhua, SHI Taihe, XU Xianguang, et al. Drill string design of drilling complex formations and its application technique study [J]. *Natural Gas Industry*, 2004, 24(8): 47-49.
- [10] Xue, Q., Leung, H., Huang, L., et al. Modeling of torsional oscillation of drillstring dynamics [J]. *Nonlinear Dyn.*, 2019: 1-17.
- [11] 梁健, 郭宝科, 王志刚, 等. 绳索取心复合钻柱的动力学行为研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2017, 44(7): 34-40.
LIANG Jian, GUO Baoke, WANG Zhigang, et al. Dynamics behavior of compound drill string for wire line coring [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2017, 44(7): 34-40.
- [12] 李自俊. 钻柱静拉设计及其判别式[J]. *石油学报*, 1991, 12(2): 132-138.
LI Zijun. Design and criterion of a drill pipe under tension [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1991, 12(2): 132-138.
- [13] 张建群. 关于深井钻柱设计的一些问题[J]. *大庆石油学院学报*, 1979, (2): 74-86.
ZHANG Jianqun. Some problems about drill string design in deep well [J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 1979, (2): 74-86.
- [14] 梁健, 孙建华. 科学超深井钻杆柱受力分析与计算 [C] // 中国地质学会探矿工程专业委员会. 第十六届全国探矿工程(岩土钻掘工程)技术学术交流年会论文集, 2011, 38(S1): 432-437.
LIANG Jian, SUN Jianhua. Analysis and calculation of forces on drill string for scientific super-deep drilling [J]. *Mineral Engineering Committee, Geological Society of China. Special for the Sixteenth National Exploration Engineering (Drilling and Tunneling) Academic Conferences*, 2011, 38(S1): 432-437.
- [15] (苏)普·阿·甘朱緬. 岩心钻探实用计算 [M]. 地质出版社, 1980.
(CCCP) P. A. ганджумен. Practical calculation of core drilling [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1980.
- [16] 王达, 何远信, 等. 地质钻探手册 [M]. 湖南长沙: 中南大学出版社, 2014.
WANG Da, HE Yuanxin, et al. *Geological drilling manual* [M]. Changsha Hunan: Central South University Press, 2014.

(编辑 韩丽丽)