

特深孔地质岩心钻探钻孔口径及管柱规格研究

梁 健^{1,2}, 尹 浩¹, 孙建华¹, 王志乔², 蔡纪雄³, 李鑫淼¹

(1.中国地质科学院勘探技术研究所,河北廊坊 065000; 2.中国地质大学(北京)工程技术学院,北京 100083;
3.无锡钻探工具厂有限公司,江苏无锡 214147)

摘要:针对 5000 m 地质岩心钻探基础准则与依据缺失,油气钻井与岩心钻探工艺及装备差异大等问题,本文梳理分析了国内外深部地质岩心钻探口径系列及管柱规格,厘定了基本外界条件及相互关联要求,开展了特深孔岩心钻探环空水力学计算与绳索取心钻杆的等强度设计,初步构建了以绳索取心钻进工艺为主体的 5000 m 特深孔钻探口径系列与钻(套)管柱规格。

关键词:特深孔;岩心钻探;钻孔口径;绳索取心钻杆;环空压耗

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)08-0036-11

Research on hole diameter, drill string specification and casing program for ultra-deep geological core drilling

LIANG Jian^{1,2}, YIN Hao¹, SUN Jianhua¹, WANG Zhiqiao², CAI Jixiong³, LI Xinmiao¹

(1.Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;
2.School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
3.Wuxi Drilling Tools Inc., Wuxi Jiangsu 214174, China)

Abstract: In view of some issues such as the lack of basic criteria and basis for 5000m geological core drilling, the great difference between oil and gas drilling and core drilling in drilling technology and equipment, this paper summarizes and systematically analyses the diameter size and tubing string specifications in deep geological core drilling at home and abroad. On this basis, basic external conditions and interrelated requirements are defined with calculation of annular hydraulics and design of the wire-line drill string strength for ultra-deep hole core drilling. The diameter size, drill string and casing string specification for 5000m ultra-deep hole drilling are preliminarily set up with the wire-line drilling process as the main part.

Key words: ultra-deep hole; core drilling; hole diameter; wire-line drilling rod; annular pressure loss

0 引言

深地探测是地球科学的最前沿,被看成是解决人类面临能源资源和生存空间基本问题的必由之路,深地开拓科技问题已提升到战略高度^[1-2]。深部钻探作为必要的技术手段之一,目前我国尚缺失 5000 m 以深地质岩心钻探技术与装备,而油气钻井与地质岩心钻探差异大,无法直接应用^[3]。为响应党中央“向地球深部进军”的号召,全面实施深地探

测、深海探测、深空对地观测和土地工程科技“四位一体”的科技创新战略,亟需开展大深度智能地质钻探关键技术与装备的研发,包括开展复杂地层钻进智能控制、地质岩心钻机关键技术与装备研制、大深度高性能薄壁绳索取心钻杆研制、小口径高效系列钻具研究、环保冲洗液体系与废浆处理技术等,突破智能控制、高效钻进、轻量化与模块化等关键技术,为探索地球深部奥秘、勘探深部资源等提供有力

收稿日期:2019-06-05 DOI:10.12143/j.tkgc.2019.08.006

基金项目:国家重点研发计划课题“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)、“高温环境下铝合金钻杆磨损失效及防护机制研究”(编号:51404217);中国地质调查局地地质调查项目“深海钻探技术与工程支撑”(编号:DD20190585)

作者简介:梁健,男,汉族,1980 年生,高级工程师,中国地质大学(北京)博士在读,地质工程专业,从事深地与深水钻探工程和钻具研发工作,河北省廊坊市金光道 77 号,liangjian_cniet@qq.com。

引用格式:梁健,尹浩,孙建华,等.特深孔地质岩心钻探钻孔口径及管柱规格研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(8):36-46.

LIANG Jian, YIN Hao, SUN Jianhua, et al. Research on hole diameter, drill string specification and casing program for ultra-deep geological core drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(8):36-46.

的技术装备支撑。

近年来,多个部门先后设计和施工了 3000 m 以深的地质岩心钻孔,其中山东莱州“中国岩金第一钻”于 2013 年 5 月 29 日终孔,终孔深度 4006.17 m,创我国地质岩心钻探深度纪录^[4]。深孔地质岩心钻探“满眼”钻进的服役工况更加复杂,其将遇到的困难与挑战可概括为“地层多变性、连续取心难、环空间隙小、孔壁摩阻大、地表驱动难、送钻精度低、钻孔口径小、钻具输出弱”。随着钻孔深度的不断增加、工作难度的持续增大,深孔施工过程中钻孔事故率大幅度增大,其中不同程度地存在着钻杆柱极限承载力低、韧性不足致使钻杆断裂、螺纹拉脱,以及口径系列不匹配致使冲洗液环空压力降偏大,易发生钻孔漏失和孔壁不稳定等技术问题^[5-10],采用常规工艺技术难以满足钻探要求。

因此,针对 5000 m 特深孔地质岩心钻探基础准则与依据缺失,制定钻孔结构、钻具级配、装备配置等规范,构建以绳索取心为主的特深孔多工艺地质钻探技术体系是一项复杂的系统工程^[11]。本文参考现行标准并综合其他工程实践作为参考,开展 5000 m 地质钻探钻孔口径、管柱规格等设计与计算,方案兼顾推广应用现实需求,优化和加强以 H、P 作为深部固体矿产钻探主要口径,做好 152 mm 以上口径产品研制工作,并完成了现行方案与国内外深部钻探案例对比分析。

1 国内外深孔岩心钻探口径系列及管柱规格

1.1 德国 Gewerkschaft Waler AG 公司

以绳索取心钻探工艺为基础,发展了 H/P/S 三种钻孔口径和管柱规格,可解决最大深度分别为 4500 和 4000 m 的钻孔(见表 1)。当钻杆柱被迫留在孔内时可当套管使用,用次一级较小钻杆继续钻进,即下一开次钻头直径小于本开次钻杆最小内径。钻杆加大了管体壁厚,增加了钻杆柱的刚度和耐腐蚀能力,减小了岩心直径;同时,改进钻杆的尺寸公差(壁厚、同轴度、直线度等),显著减少钻杆柱的振动;接头与杆体摩擦焊接,螺纹为改进的 API 螺纹,多次拧卸磨损较小。以上措施使钻杆柱的安全性和可靠性大幅增加,其平均寿命达到 12000 m。

1.2 德国大陆深钻计划(KTB)先导孔

举世瞩目的位于普法尔茨的联邦德国大陆深钻计划(KTB)先导孔经历 560 d 的钻探施工,于 1989 年

表 1 GW—深孔钻探绳索取心系统

Table 1 GW wire-line deep hole coring system

钻孔直径/mm	岩心直径/mm	管体外径/内径/mm	接头外径/内径/mm	钻具质量/(kg·m ⁻¹)	标定深度/m	安全系数
94	60	88.9/77.8	90.5/74.0	11.6	4000	2.0
123	80	112.0/98.5	118.0/95.0	18.0	4000	2.0
159	100	139.7/124.0	154.0/124.0	26.7	4500	2.0

注:杜祥麟(翻译);刘广志(校核)。Modern exploration by deep slim hole drilling and wire line coring。(内部资料)

4 月 4 日,以 4000.1 m 的深度达到其科学目的。从 480~3893 m 的孔段,采用了绳索取心钻探工艺,总进尺 3142.6 m,取得岩心 3074.66 m,岩心采取率 97.84%。先导孔钻孔设计四开完钻,其中三开技术套管为活动套管,可实现超前裸眼钻进,以解决地层复杂致使钻孔结构设计开次不足的问题。KTB 先导孔的钻孔及套管程序见图 1。

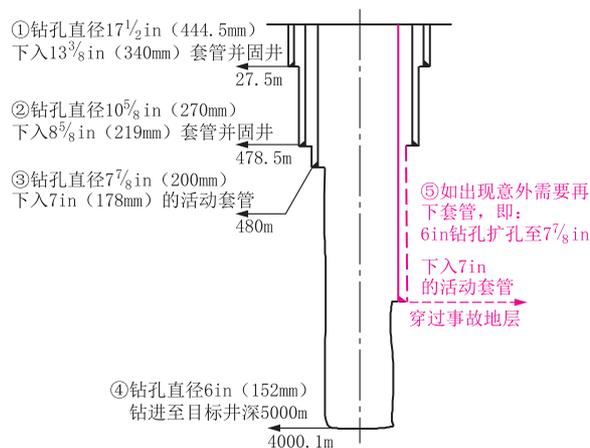


图 1 KTB 先导孔的钻孔及套管程序

Fig.1 Borehole structure of KTB pilot hole

KTB 先导孔工程研究结果表明:重新设计包括钻杆在内的绳索取心钻进系统,除了设计钻杆外,还要设计专用的钻铤(见表 2);钻杆的抗拉强度构成了最重要的设计准则;钻头及岩心管的尺寸要依据钻杆的设计而定;钻杆长度 9 m,结构为外平内加厚形式;采用屈服强度为 965 MPa 的优质合金钢制作

表 2 KTB 先导孔绳索取心钻杆柱的技术参数

Table 2 Wire-line coring drill string assembly of KTB pilot hole

钻孔直径/mm	钻杆柱组合	管体外径/内径/mm	接头外径/内径/mm	钻具质量/(kg·m ⁻¹)	终孔深度/m
152.4	钻杆	139.7/125.5	139.7/110.0	24.8	4000.1
	钻铤	139.7/113.3	139.7/113.3	43.9	

注:杨志豪,张伟(翻译);王达(校对)。联邦德国大陆深钻计划—钻探技术报告。(KTB-Report95-3 内部资料)

接头,采用屈服强度 725 MPa 的合金钢作为钻杆体;钻杆体两端墩粗,以摩擦焊接方法与接头连接在一起;钻杆外平减少了卡钻的危险,另外减小了小环空高转速情况下的钻杆柱摩擦。

1.3 夏威夷科钻

夏威夷科学钻孔设计孔深为 4500 m,终孔深度 4419.6 m,全孔连续取心,采用了“复合式”钻杆柱

设计,即由上部 $\text{O}88.9$ mm 高强度的 Hydril 501 油管柱(套管内)和下部常规 HMCQ 绳索取心钻杆(裸眼内)组合而成^[12-13],见表 3。施工采用了超前裸眼钻进,全孔的取心钻进孔径统一为 $\text{O}98.4$ mm,遇复杂地层无法钻进时,通过扩孔来加大孔径并下套管。

表 3 夏威夷深孔绳索取心系统

Table 3 Wire-line coring system for Hawaii scientific drilling

钻孔直径/mm	岩心直径/mm	钻杆柱组合	管体外径/内径/mm	接头外径/内径/mm	定尺长度/m	钻具质量/(kg·m ⁻¹)	终孔深度/m
98.4	61	油管	88.9/76.0	98.3/76.0	3	13.84	4419.6
		绳索钻杆	88.9/81.0	88.9/77.8	3	8.53	

1.4 中国大陆科钻 CCSD-1 井绳索取心钻进预案

中国大陆科钻 CCSD-1 井井身结构总体方案设计原则为“少下套管,裸眼终孔”,加之地质情况不明,设计方案有两个体系,即绳索取心体系和提钻取心体系^[14]。绳索取心体系井身结构见图 2;钻具组合参数见表 4。CCSD-1 井井身结构设计方案仅给出了套管程序径向级配尺寸,套管的下入深度还需根据具体地层信息确定。A 设计使用长年 CHD134 和 CHD101 两套钻具,钻杆可做套管使用;如遇复杂情况,CHD76 或 NBQ 钻具可做储备口径。B 设计第二层为 146 mm 口径,下 $\text{O}127$ mm 套管,然后换 95 mm 口径,用 $\text{O}91$ mm 加重绳索取心钻具钻至终孔;如遇复杂情况, $\text{O}71$ mm 加重绳索取心钻具做为储备口径。

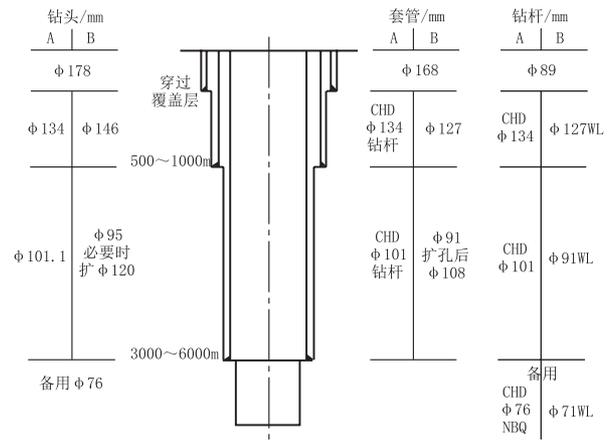


图 2 CCSD-1 井绳索取心钻进预案
Fig.2 Wire-line core drilling pre-plan for Well CCSD-1

表 4 长年 CHD-深孔绳索取心系统

Table 4 Longyear CHD wire-line coring system

型号	钻孔直径/mm	岩心直径/mm	管体外径/内径/mm	接头外径/内径/mm	定尺长度/m	钻具质量/(kg·m ⁻¹)	标定深度/m
CHD-76	75.7	43.5	70.0/60.3	70.0/55.0	6	8.27	3000
CHD-101	101.1	61.0	94.0/83.0	94.0/78.5	6	13.10	3000
CHD-134	134.0	85.0	127.0/104.8	127.0/114.3	6	20.89	2300

1.5 中国岩金勘查第一深钻

山东莱州西岭金矿区 ZK96-5 钻孔被誉为“中国岩金第一深钻”,五开完钻、终孔口径 75 mm、孔深 4006.17 m,最终钻孔结构见图 3。其中,在五开钻进至 3300~4006.17 m 时,由于 N 规格绳索取心钻杆能力的不足,使用了复合钻杆柱技术,即下部配 2800 m 的常规 N 规格($\text{O}71$ mm)绳索取心钻杆,上部采用 $\text{O}60$ mm 特制外丝钻杆^[4]。在取心作业时,先提出上部 $\text{O}60$ mm 特制外丝钻杆后,再下入打捞器打捞岩心。复合钻杆柱技术解决了 S75 绳索钻杆

能力不足的缺陷,增加了辅助时间。我国常规绳索取心钻杆常用规格系列见表 5。

表 5 我国常规绳索取心钻杆规格系列

Table 5 Specification series of conventional wire-line coring drill rod in China

型号	钻孔直径/mm	岩心直径/mm	管体外径/内径/mm	接头外径/内径/mm	定尺长度/m	钻具质量/(kg·m ⁻¹)
S75	75.5	49	71.0/61.0	73.0/60.7	3	8.14
S95	95.5	64	88.9/78.9	90.5/78.5	3	10.35
S122	122.5	85	114.3/101.6	116.3/101.6	3	16.91

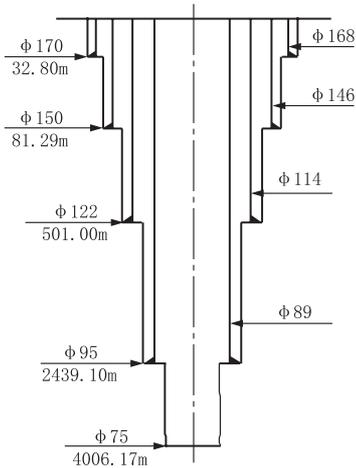


图 3 “中国岩金第一深钻” ZK96-5 孔孔身结构

Fig.3 Borehole structure of ZK96-5

综上所述,在采用绳索取心钻进工艺为主体的前提下,德国 Gewerkschaft Waler AG 公司和中国大陆科钻 CCSD-1 井预案采用了重型绳索取心钻具体系设计思路,2~3 开次完钻;夏威夷科钻和岩金勘查第一深钻为复合钻杆柱的设计思路;同时,德国大陆科钻 KTB 与夏威夷科钻采用超前裸眼钻进。

2 环空水力学计算

2.1 泥浆压力损耗理论

特深孔地质岩心钻探循环系统压力损耗问题相对复杂,由于循环系统管路不规则,加之泥浆的流变特性变化较大,为此在工程上进行简化计算,即将泥浆看作宾汉流体、钻头外径与裸眼直径相等。根据水力学伯努利方程,可推导出计算压耗的基本公式^[15]。

(1) 地表管汇压力损耗。

$$\nabla p_s = B_1 \rho^{0.8} \eta^{0.2} Q^{1.8} (L_1/d_1^{4.8} + L_2/d_2^{4.8} + L_3/d_3^{4.8} + L_4/d_4^{4.8}) \quad (1)$$

式中: ∇p_s ——地面管汇压耗,MPa; B_1 ——内平系数,取 3.26×10^4 ; ρ ——泥浆密度, g/cm^3 ; η ——泥浆塑性粘度, $Pa \cdot s$; Q ——泥浆流量, L/s ; L_1 ——高压管线长, m ; L_2 ——立管长, m ; L_3 ——水龙带长, m ; L_4 ——方钻杆长, m ; d_1 ——高压管线内径, mm ; d_2 ——立管内径, mm ; d_3 ——水龙带内径, mm ; d_4 ——方钻杆内径, mm 。

(2) 钻杆柱内压力损耗。

对于层流:

$$\nabla p_{in} = \frac{4.074 \times 10^4 \eta L_1 Q}{d^4} + \frac{\tau_o L}{187.5d} \quad (2)$$

对于紊流:

$$\nabla p_{in} = B_2 \rho^{0.8} \eta^{0.2} Q^{1.8} L/d^{4.8} \quad (3)$$

式中: ∇p_{in} ——钻杆内压耗,MPa; B_2 ——常数,内平钻杆 $B_2 = 3.26 \times 10^4$,贯眼钻杆 $B_2 = 3.63 \times 10^4$; L ——钻杆柱长度, m ; d ——钻杆柱内径, mm ; τ_o ——宾汉流体动切力, Pa 。

(3) 钻头水口压力损耗。

$$\nabla p_b = 5\rho Q^2/(c^2 A_0^2) \quad (4)$$

式中: ∇p_b ——钻头压力降,MPa; c ——流量系数; A_0 ——钻头喷嘴或出水口面积, mm^2 。

(4) 环空压力损耗。

对于层流:

$$\nabla p_{out} = \frac{6.112 \times 10^4 \eta Q L}{(D - D_p)^3 (D + D_p)} + \frac{\tau_o L}{166.7(D - D_p)} \quad (5)$$

对于紊流:

$$\nabla p_{out} = B_3 \cdot \frac{\rho^{0.8} \eta^{0.2} Q^{1.8} L}{(D - D_p)^3 (D + D_p)^{1.8}} \quad (6)$$

式中: ∇p_{out} ——钻杆环空压耗,MPa; B_3 ——常数,内平钻杆 $B_3 = 3.26 \times 10^4$,贯眼钻杆 $B_3 = 3.63 \times 10^4$; D ——环空外径, mm ; D_p ——环空内径, mm 。

2.2 钻孔口径优化与套管程序选择

通过计算各开次裸眼钻进时的理论压耗、泵功率及碎岩面积等,确定合理钻头直径,以选用最优套管规格,实现优化现有钻孔口径系列和套管程序等。同时,由于无具体地层信息,套管的下入深度无法确定,但当某一开次无论套管下深多少,由式(6)可知,在保证裸眼流速及塑性粘度一致的前提下,如有套管且间隙合理,其泵功率、循环压降相对基于下一开次裸眼口径计算的结果一定降低,碎岩面积不变,也就是说基于裸眼计算具有其合理性,计算出的泵功率及循环压降为最大值。因此,本文计算是基于裸眼钻进开展的,低(或无)固相泥浆密度 $1.05 g/cm^3$,塑性粘度 $0.001 Pa \cdot s$,裸眼环空流速 $1.5 m/s$;一开设计孔深 $4500 m$,二开孔深 $5000 m$,三开孔深 $5500 m$;从钻杆柱刚度、抗腐蚀能力、标准管体规格等方面考虑,钻杆体分别选为:一开 $\phi 139.7/125.36/7.17 mm$ 、二开 $\phi 114.3/100.54/6.88 mm$ 、三开 $\phi 88.9/77.9/5.50 mm$ (外径 OD /内径 ID /壁厚 S)。

图 4~6 是不同开次裸眼钻进理论压耗、泵功率、碎岩面积等随钻孔直径变化的趋势图。从图中可知,随着钻孔口径的增大,泥浆循环压降

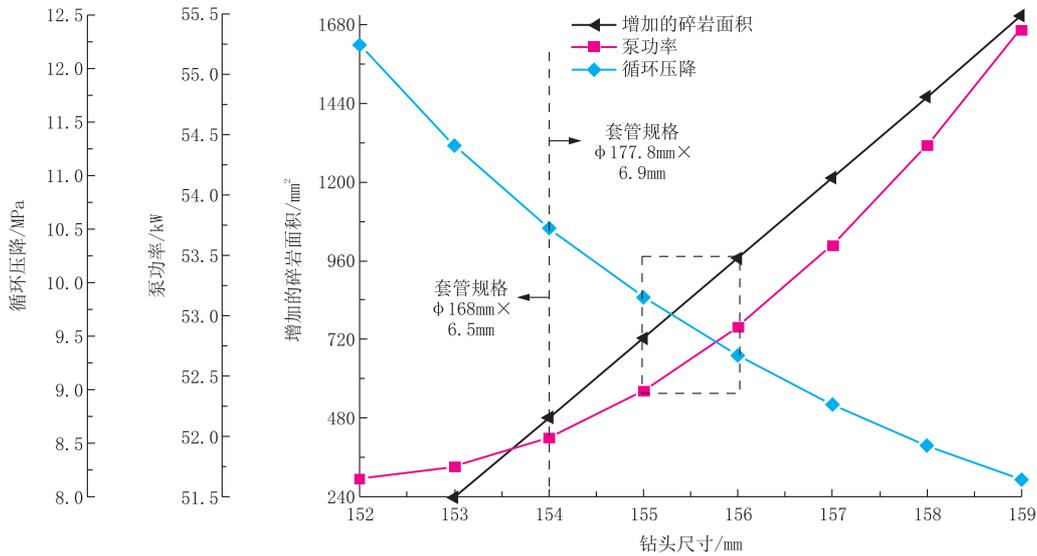


图4 一开裸眼钻进理论压耗、泵功率等变化趋势

Fig.4 Variation trends of theoretical pressure loss and pump power in first open-hole section drilling

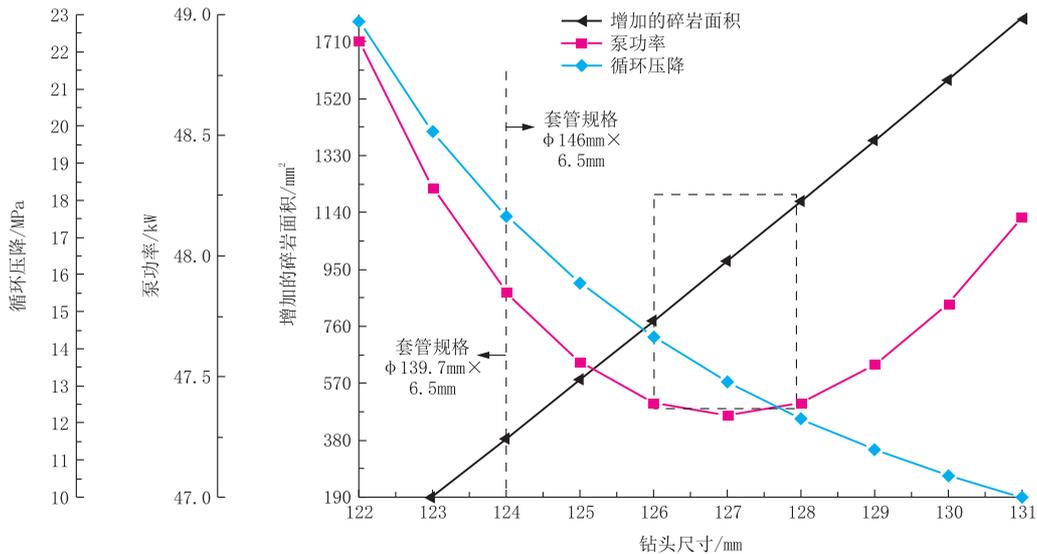


图5 二开裸眼钻进理论压耗、泵功率等变化趋势

Fig.5 Variation trends of theoretical pressure loss and pump power in second open-hole section drilling

降低、碎岩面积增加,一开钻进的泵功率降低、二开和三开的泵功率先降后升;其中三个开次的泵功率变化在1.5~4.0 kW,影响不大,因此循环压降和碎岩面积成为优选钻孔口径的最重要因素;综合得出一开最优口径为155~156 mm,二开最优口径为126~128 mm,三开最优口径为101 mm;同时,从现行国家及行业标准中的套管规格来看,一开套管规格选用分界口径为154 mm,二开套管规格选用分界口径为124 mm,三开套管规格选用分界口径为101 mm。

图7是一开裸眼钻进孔内压耗分布图。从图中

可知,泥浆压力损耗主要集中在外环空的压力损耗,占总压力损耗的93.3%;地表管线压力损耗可忽略不计;由于碎岩后岩粉和孔壁造浆作用,钻孔外环空与内环空液柱压差占总压力损耗的0.2%。

图8是一开裸眼钻进 $\varnothing 152$ mm(现行标准口径)与 $\varnothing 156$ mm(本文一开优选口径)钻孔直径的碎岩面积、压力损失等参数变化比率图。从图中可知,钻孔直径增加后,156 mm钻孔口径的泵功率升高2.4%,环空压耗下降33.7%,碎岩面积增加12%。

综合以上计算与分析,给出了优化后的口径系列和套管程序见表6。

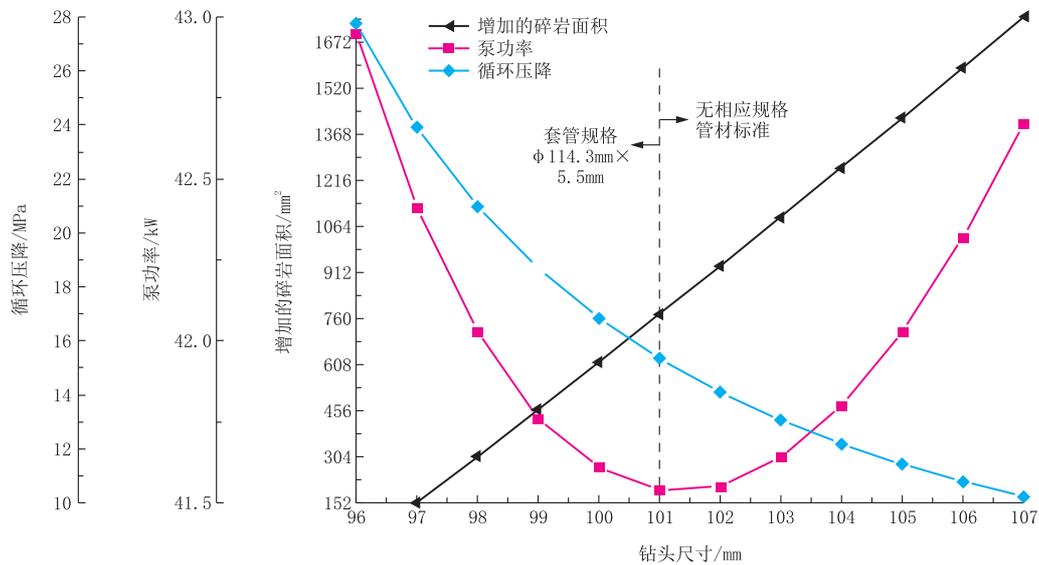


图 6 三开裸眼钻进理论压耗、泵功率等变化趋势

Fig.6 Variation trends of theoretical pressure loss and pump power in third open-hole section drilling

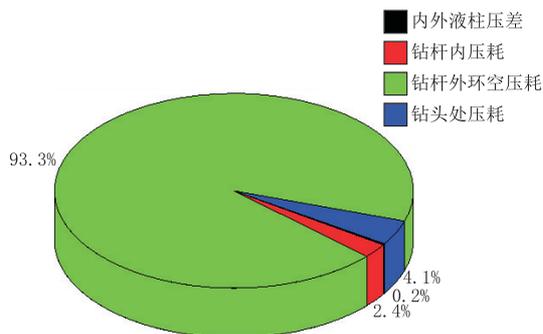


图 7 一开裸眼钻进孔内压耗分布图

Fig.7 Distribution of pressure loss in first open-hole section drilling

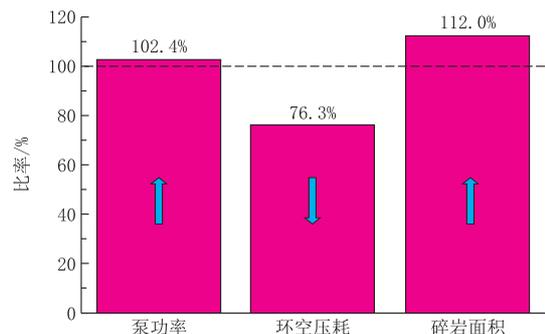


图 8 一开裸眼钻进 $\phi 152$ mm 与 156 mm 口径参数变化比率

Fig.8 Parametric change ratio between 152mm and 156mm borehole size in first open-hole section drilling

表 6 水力学优化后的钻孔口径和套管程序

Table 6 Borehole diameter and casing procedure with hydraulic optimization

开次	钻孔直径/mm	套管外径/内径/mm	套管接头外径/内径/mm	钻杆外径/内径/mm	钻深/m	泵量/(L·min ⁻¹)	泵压/MPa
一开钻杆柱	156	177.8/164	177.8/163	139.7/125.36	4500	340.8	9.3
二开钻杆柱	127	146/133	146/132	114.3/100.54	5000	216.6	13.1
三开钻杆柱	101	114.3/104.3	114.3/103.3	88.9/77.9	5500	162.6	15.3

3 钻杆等强度设计

本文的钻杆设计准则如下:

(1) 钻杆等强度设计,即接头螺纹根部截面屈服强度不小于杆体强度、内外螺纹强度基本一致。

(2) 钻杆端部加厚形式包括外平内加厚、内平外加厚及内外加厚形式,加厚形式应综合考虑应用孔深、钻进工艺、内管投放、事故处理、起下钻坐卡及其自动化操作等。

(3) 接头与杆体连接形式(螺纹连接、加厚直联、摩擦焊直联)、加厚端尺寸、螺纹等应结合生产制造中设备生产参数综合考虑。

钻杆结构参数计算思路框架见图 9。

3.1 钻杆结构尺寸关系

根据图 10 的钻杆结构关系与等强度设计准则,建立了母接头壁厚 \geq 公接头壁厚、接头壁厚 \geq 杆体壁厚、螺纹小径+2 倍牙高=螺纹大径、台肩+螺纹纵向尺寸=接头壁厚的尺寸关系计算模型:

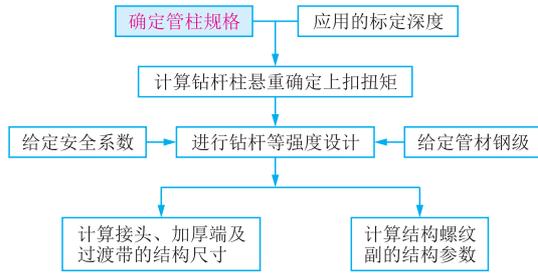


图9 钻杆结构参数计算思路

Fig.9 Calculation chart of drill rod structural parameters

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{S_{\text{母端}}}{S_{\text{公根}}} &= \frac{D_o^2 - (D_o - 2x_1)^2}{(D_o - 2x_1)^2 - D_i^2} \geq \frac{1}{2} \\ (D_o - 2x_1)^2 - D_i^2 &\geq d_o^2 - d_i^2 \\ D_o^2 - (D_i + 2x_2)^2 &\geq d_o^2 - d_i^2 \\ D_o - 2x_1 &= d_{\text{根大}} \\ D_i + 2x_2 &= d_{\text{端大}} \\ d_{\text{根小}} &= d_{\text{根大}} - 2h \\ d_{\text{端小}} &= d_{\text{端大}} - 2h \\ x_1 + x_2 + (L - 2P) \cdot \text{Cone} &= (D_o - D_i) / 2 \end{aligned} \right. \quad (7)$$

式中: $S_{\text{母端}}$ ——母接头近端部横截面积, mm;
 $S_{\text{公根}}$ ——公接头根部横截面积, mm; D_o ——接头外径, mm; D_i ——接头内径, mm; d_o ——钻杆体外径, mm; d_i ——钻杆体内径, mm; x_1 ——公螺纹台肩径向宽度, mm; x_2 ——母螺纹根部台肩径向宽度, mm; $d_{\text{根大}}$ ——公接头螺纹大端大径, mm; $d_{\text{端大}}$ ——公接头螺纹小端大径, mm; $d_{\text{根小}}$ ——公接头螺纹大端小径, mm; $d_{\text{端小}}$ ——公接头螺纹小端小径, mm; L ——螺纹长度, mm; P ——螺距, mm; Cone ——螺纹锥度。

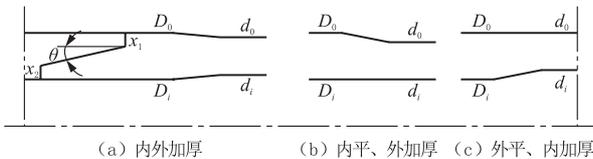


图10 接头及杆体结构示意图

Fig.10 Structural sketch of drill rods

钻杆接头螺纹结构参数如图 11、图 12 所示。图 12 中: d 为螺纹有效平均最大直径, mm; d_1 为螺纹有效平均最小直径, mm; d_2 为螺纹有效平均直径, mm。

3.2 钻杆的受力分析

钻进过程中, 钻杆柱运动及受力极其复杂, 包括自转、涡动、纵向振动、扭转振动、横向振动等^[16-20]。以静力学计算为基础, 钻杆的抗拉强度构成了其最

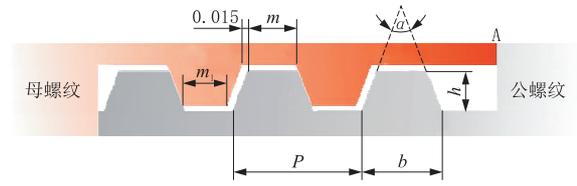


图 11 螺纹结构参数示意图

Fig.11 Sketch of thread structure

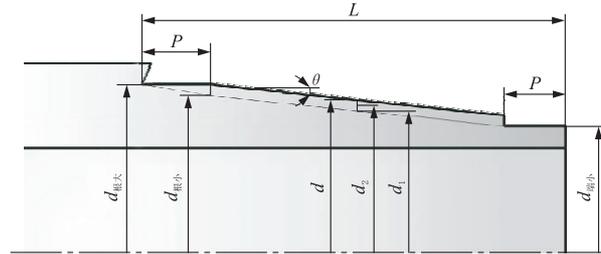


图 12 螺纹径向参数示意图

Fig.12 Sketch of thread radial parameters

重要的设计准则。在不考虑动载荷的影响下, 钻杆体部分受到自重拉伸与工作扭矩扭转的作用; 除此之外, 钻杆接头还受到上扣扭矩的影响, 同时接头处还存在螺纹连接结构。在进行螺纹末端轴向力的确定时, 除考虑自重产生的 F_a , 还需要考虑上扣扭矩 T_u 与工作扭矩对螺纹所受轴向力的影响(如图 13 所示)。

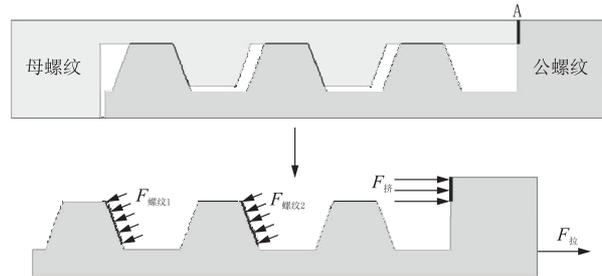


图 13 钻杆接头螺纹面及端面受力示意图

Fig.13 Sketch of stress on thread surface and end of joint

(1) 钻杆自重产生轴向力为:

$$F_a = G_{\text{杆}} K_a = \rho g l \pi (d_o^2 - d_i^2) K_a \cdot 10^6 / 4 \quad (8)$$

式中: F_a ——自重产生的轴向力, kN; ρ ——合金钢密度, g/cm³; l ——钻杆柱长度, m; K ——浮力系数; a ——接头增重系数。

(2) 由上扣扭矩 T_u 产生的接头所受轴向力 F_u 为^[21]:

$$F_u = \frac{2T_u}{d_1 \tan(\rho' + \psi) + (D_o + d_{\text{根小}} + 2h)\mu} \quad (9)$$

其中, 预紧应力与破坏应力之比为:

$$\sigma_u / \sigma_s = 0.35(1 + 1/Q) \quad (10)$$

式中: F_u ——上扣扭矩 T_u 产生的接头所受轴向力, kN; T_u ——上扣扭矩, $N \cdot m$; ψ ——螺纹螺旋升角, ($^\circ$); ρ' ——当量摩擦角, $\rho' = \arctan\{\mu/\cos[\arctan(\tan\beta\tan\psi)]\}$, ($^\circ$); μ ——有润滑脂作用下的螺纹动摩擦系数, 取值 0.1; β ——牙型半角, ($^\circ$); Q ——预紧系数, 考虑到接头为冲击或动力拧紧, Q 取值为 2。

综上所述, 推导出由于预紧产生的公螺纹轴向拉力为:

$$F_u = 0.131\pi\sigma_s(d_1^2 - D_i^2) \quad (11)$$

式中: F_u ——上扣扭矩 T_u 产生的接头所受轴向力, kN; σ_s ——上钻杆接头材料屈服强度, GPa;

(3) 钻进过程中, 钻杆接头承受钻头与地层间以及钻杆与井壁(套管)间碎岩、摩擦的反扭 T 而产生的轴向力为 F_b , 其中 $T_{井壁}$ 与 $T_{钻头}$ 根据钻井实测数据归纳的公式计算。

$$T = T_{井壁} + T_{钻头} \quad (12)$$

$$T_{井壁} = \pi d_o \epsilon_1 l / 1000 \quad (13)$$

$$T_{钻头} = \pi d_o^2 \epsilon_2 \quad (14)$$

由此可推导出反扭 T 而产生的轴向力为 F_b , 公式如下:

$$F_b = \frac{2T}{d_1 \tan(\rho' + \psi) + (D_o + d_{根小} + 2h)\mu} \quad (15)$$

式中: T ——工作扭矩, $N \cdot m$; $T_{井壁}$ ——井壁对钻杆产生的反扭矩, $N \cdot m$; $T_{钻头}$ ——地层对钻头产生的反扭矩, $N \cdot m$; F_b ——工作扭矩 T 产生的接头所受轴向力, kN; l ——钻孔深度, m; d_o ——钻杆杆体外径, mm; $\epsilon_1 = 2.65$, $\epsilon_2 = 0.011$ 。

3.3 钻杆的强度要求

随着孔深的不断增加, 孔口处钻杆所受轴向拉力逐渐增加, 得益于上扣扭矩的预紧作用, 螺纹牙上的接触压力基本保持不变, 扭矩产生的台肩面之间的挤压力逐渐减小^[22], 当上扣扭矩产生的台肩挤压力为零时, 钻杆柱长度达到设计的使用长度, 即上扣扭矩产生的螺纹轴向力不小于设计钻杆柱总重力 F_a 。因此, 钻杆接头承受总的轴向力 F 取 F_a 与 F_b 之和。

3.3.1 接头的拉伸与扭转强度

接头除去螺纹部分占用空间外的有效抗拉强度校核公式如下:

$$\sigma_{拉} = \frac{F}{S_{公根}} = \frac{4F}{\pi(d_{根小}^2 - D_i^2)} \leq [\sigma_s] \quad (16)$$

式中: $\sigma_{拉}$ ——钻杆接头螺纹大端根部横截面受到的轴向拉应力, GPa; F ——接头所承受的总的轴向拉力, kN; $S_{公根}$ ——公接头根部危险断面面积, mm^2 ; $[\sigma_s]$ ——接头材料的许用拉应力, 取 $0.9\sigma_s$, GPa。

接头除去螺纹部分占用空间外的有效扭转强度校核公式如下:

$$\tau_{扭} = \frac{T + T_u/3}{W_p} = \frac{16(T + T_u/3)d_{根小}}{\pi(d_{根小}^4 - D_i^4)} \quad (17)$$

式中: $\tau_{扭}$ ——钻杆接头受到的切应力, GPa; W_p ——扭转截面系数, mm^3 。

3.3.2 螺纹的剪切强度

假设剪应力平均分布在牙根端面上, 由螺纹沿周向悬臂梁根部断面剪切, 其剪切强度条件为:

$$\tau = \frac{F_s \cos(\beta - \psi - \rho)}{S_r \cos\beta \cos\rho} \leq [\tau] \quad (18)$$

简化后为:

$$\tau = \frac{F_s}{S_r} = \frac{F_s}{z \pi d_1 b} \leq [\tau] \quad (19)$$

式中: F_s ——接头螺纹所承受的剪切力, 取 F , kN; S_r ——齿根面积, mm^2 ; ρ ——摩擦角, $\rho = \arctan\mu$; z ——螺纹有效作用牙数, $z = L/P - 2$; b ——螺纹牙底宽, mm; $[\tau]$ ——接头材料的许用剪应力, 取 $0.65\sigma_b$, GPa。

3.3.3 螺纹的弯曲强度

将螺纹牙展开, 在螺纹齿高中点处受到平均分布力 F_M/z 作用下的悬臂梁, 其最大弯曲应力为^[23]:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{F_M/z \cdot h/2}{\pi d_2 b^2/6} = \frac{3F_M h}{\pi d_2 b^2 z} \leq [\sigma_w] \quad (20)$$

式中: F_M ——螺纹侧面受到的分布载荷沿轴向的合力, 取 F , kN; h ——螺纹齿高, mm; $[\sigma_w]$ ——许用弯曲正应力, 取 σ_s , GPa。

3.3.4 螺纹的挤压强度

$$\sigma = \frac{F_p}{S_p} = \frac{4F_p}{\pi z (d^2 - d_1^2)} \leq [\sigma_p] \quad (21)$$

式中: F_p ——接头螺纹所承受的挤压力, 取 F , kN; $[\sigma_p]$ ——材料的许用挤压应力, 取 $2\sigma_b$, GPa; S_p ——螺纹承受挤压的面积, mm^2 。

3.3.5 自锁

$$\psi = \arctan(P/\pi d_2) \leq \psi_v = \arctan\rho' \quad (22)$$

3.4 螺纹参数强度校核

3.4.1 公螺纹大端小径 $d_{根小}$

将式(16)和式(17)分别代入下式可计算出螺纹大端小径 $d_{\text{根小}}$ 的最小值。

$$[\sigma] = \sqrt{\sigma_{\text{拉}}^2 + 3\tau_{\text{扭}}^2} \leq \sigma_s/n \quad (23)$$

式中： n ——设计安全系数。

3.4.2 螺纹长度 L

假设接头根部被拉伸破坏时，螺纹牙也被挤压破坏，可进行螺纹长最小值 L_{min} 的计算。即，满足 $S_{\text{公根}}/S_p = [\sigma_p]/[\sigma_s]$ ，可推出：

$$L_{\text{min}} = \frac{FPn}{\pi\sigma_s scf(h-R_1-R_2)(d+d_1)} + 2P \quad (24)$$

式中： R_1, R_2 ——螺纹齿顶、齿根的圆角半径，mm； scf ——螺纹应力集中因子，可取 0.6。

根据螺纹几何关系，可推出：

$$d+d_1 = 2d_{\text{根小}} - Cone(L-2P) + 2h \quad (25)$$

将式(25)代入式(24)，解关于 L_{min} 的一元二次方程，可得到 L_{min} 。

3.4.3 螺纹牙高 h

假设接头根部被拉伸破坏时，螺纹牙也被挤压破坏，可进行螺纹牙高最小值 h_{min} 的计算，即：

$$h_{\text{min}} = \frac{Fn}{\pi\sigma_s scf(L/P-2)(d+d_1)} + R_1 + R_2 \quad (26)$$

将式(25)代入式(26)，解关于 h_{min} 的一元二次方程，可得到 h_{min} 。

3.4.4 螺距 P

根据式(21)可推导出螺距最大值 P_{max} ，即：

$$P_{\text{max}} = \frac{\pi\sigma_s L scf(h-R_1-R_2)(d+d_1)}{Fn + 2\pi\sigma_s scf(h-R_1-R_2)(d+d_1)} \quad (27)$$

将式(25)代入式(27)，解关于 P_{max} 的一元二次方程，可得到 P_{max} 。

3.4.5 接头外径 D_0

根据受力满足第四强度理论及式(7)，可计算出接头外径 D_0 。

3.5 钻杆结构及螺纹参数计算结果

选用国家和行业标准中的钻杆体规格，并由表 6 可知各开次设计深度，给定设计安全系数为 2.0、选择 API 标准中 S135 钢级强度；假定钻杆定尺长度为 9 m、接头的增重系数为 1.05、泥浆密度 1.05 g/cm³，可计算出钻杆柱的悬重及确定其上扣扭矩值。再结合式(7)、(16)~(21)及(23)，并考虑钻孔直径与绳索取心工艺需求，可计算出接头外径 D_0 。与内径 D_i 以及螺纹大端大径 $d_{\text{根大}}$ 与螺纹小端大径 $d_{\text{端大}}$ ；以及给定的牙型角、螺纹锥度、螺距、螺纹长度、牙高等，根据式(24)~(27)求出 $L_{\text{min}}, h_{\text{min}}, P_{\text{max}}$ ，验证最初给定的 L, h, P 是否合理，不合理根据计算出的极值重新给定。

综合以上计算，给出了钻孔直径、套管程序、钻杆尺寸和螺纹参数计算结果(见表 7)。从表 7 中可知，与现行标准相比，各开次钻孔直径加大，增加了钻头的碎岩面积，潜在的降低了机械钻速，但环空压耗的下降为孔底动力钻具使用留有压降空间，还可抑制由于高泵压带来的钻孔漏失和孔壁不稳定等问题，同时适当加大的钻杆柱外环间隙降低了管柱与孔壁的碰撞概率和摩擦阻力；由于设计钻深的加大，从钻杆柱刚度、抗腐蚀能力等方面考虑，参考标准适量增加了杆体的壁厚；依据等强度设计原则，综合考虑环间隙、螺纹参数、内管打捞投放以及孔口

表 7 外径/内径计算优化的钻杆结构和套管程序

Table 7 Optimization results of drill pipe structural parameters and casing program

开次	钻孔直径/ mm	钻杆外径/内径/ 壁厚/mm	钻杆接头外径/ 内径/mm	套管外径/内径/ mm	套管接头外径/ 内径/mm	钻深能 力/m	设计安 全系数	API管 材钢级		
一开钻杆柱	156	139.7/125.36/7.17	145.86/123.36	177.8/164	177.8/163	4500	2.0	S135		
二开钻杆柱	127	114.3/100.54/6.88	120.0/94.54	146/133	146/132	5000	2.0	S135		
三开钻杆柱	101	88.9/77.9/5.50	95.47/69.9	114.3/104.3	114.3/103.3	5500	2.0	S135		
备注	计算值	给定值	计算值	选择值	选择值	给定值	给定值	给定值		
不同规格 螺纹的基 准参 数	锥度 <i>cone</i>	螺纹长度 L/mm	螺纹长度 L_{min}/mm	螺距 P/mm	螺距 P_{max}/mm	牙型高度 h/mm	牙型高度 h_{min}/mm	牙顶宽 $m_1/m/mm$	螺纹大端大径 $d_{\text{根大}}/mm$	螺纹小端大径 $d_{\text{端大}}/mm$
	1:12	80	60.46	10	15.69	1.5	1.09	4.598/4.583	139.06	134.06
	1:12	75	59.59	8	12.49	1.3	1.02	3.652/3.637	111.74	106.82
	1:12	70	58.39	8	11.93	1.3	1.07	3.652/3.637	87.18	82.68
	给定值	给定值	计算值	给定值	计算值	给定值	计算值	计算值	计算值	计算值

注：给定值为计算的前提条件值；计算值为按算法计算后的数值；选择值是根据计算值和给定值查询标准后选择的数据。

操作等事宜,钻杆接头结构确定为内外加厚形式,适度的外加厚(单边 3 mm 左右)既有效满足绳索取心钻进工艺需求,还可高效满足起下钻坐卡及其自动化操作,同时在不过多“牺牲”岩心直径的条件下,满足了内管总成的高效投放与打捞;加大了螺纹锥度可有效提高加接单根时螺纹的对中性;通过增加螺纹长度和螺纹扣高,优化设计接头尺寸,使得整体管柱的结构与环空尺寸合理化。

4 结论

综上所述和分析,可以得到以下几点结论:

(1)5000 m 深孔绳索取心钻进应以重型取心钻具体系设计为主导思路,2~3 开次完钻或采用超前裸眼钻进方法,必要时可考虑复合钻杆柱组合设计。

(2)通过环空水力学计算,优化了不同开次的钻孔直径,结果显示降低了环空压耗,泵功率变化不大,碎岩面积增大,为孔底动力钻具使用留有压降空间,初步形成了深孔岩心钻探新的钻孔口径系列。

(3)以静力学计算为基础,钻杆轴向力为主的等强度设计构成了最重要的基本准则,在满足绳索取心“满眼”钻进工艺特点的同时,为获得尽量大的岩心及便于薄壁金刚石钻头的使用,钻杆加厚形式为内外微粗。

(4)适当增加的钻杆体壁厚,增加了钻杆柱刚度、抗腐蚀能力,但减小了岩心直径;需重新设计包括钻杆在内的绳索取心钻进系统。

(5)钻头、内管总成及专用钻铤(或加重钻杆)的尺寸要依据钻杆的设计而定,等强度设计方法使钻杆柱重力与接头尺寸之间的关系达到最佳化。

(6)钻杆采用直联结构,与摩擦焊相比,可保证钻杆的尺寸公差(壁厚、同轴度、直线度),会显著减少钻杆柱的振动;与螺纹连接相比,减小了螺纹处薄弱点数量,增加了孔内作业的安全性和可靠性,但钻杆矫直需要增加工序。

(7)后续设计中还可增加螺纹防磨和密封及接头耐磨带技术,采用技术可靠并且经济的制造方法。

(8)计算中给出了不同开次钻进时所需的泵量与泵压,可为后续泥浆泵设计与优选提供技术参考。

参考文献 (References):

[1] 董树文,李廷栋,高锐,等.地球深部探测国际发展与我国现状综述[J].地质学报,2010,84(6),743-770.

DONG Shuwen, LI Tingdong, GAO Rui, et al. International progress in probing the earth's lithosphere and deep interior: A review[J]. Acta Geologica Sinica, 2010,84(6):743-770.

[2] 刘广志.刘广志论科学钻探[M].北京:地质出版社,2005:5-7.

LIU Guangzhi. LIU Guangzhi on scientific drilling[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005:5-7.

[3] 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.

[4] 陈师逊.中国岩金第一深钻施工情况介绍[J].地质装备,2013,14(6):21-25.

CHEN Shixun. Introduction of the deepest borehole in rock gold exploration in China[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2013,14(6):21-25.

[5] 陈师逊,杨芳.深部钻探复合钻杆的研究与应用[J].地质与勘探,2014,50(4):772-776.

CHEN Shixun, YANG Fang. Research and application of composite drill pipes in deep drilling[J]. Geology and Exploration, 2014,50(4):772-776.

[6] 陈师逊,翟育峰,王鲁朝,等.西藏罗布莎科学钻探施工对深部钻探技术的启示[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(11):1-9.

CHEN Shixun, ZHAI Yufeng, WANG Luzhao, et al. Enlightenment to deep drilling technology from scientific drilling in Luobusha of Tibet[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012,39(11):1-9.

[7] 朱恒银,蔡正水,王强,等.深部钻探技术方法的研究与应用[J].地质装备,2013,14(6):26-31.

ZHU Hengyin, CAI Zhengshui, WANG Qiang, et al. Research and application of deep drilling technology[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2013,14(6):26-31.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 梁健,郭宝科,孙建华,等.深孔绳索取心钻杆抗拉脱能力有限元分析[J].煤田地质与勘探,2013,41(2):90-93.

LIANG Jian, GUO Baoke, SUN Jianhua, et al. Finite element method of resistance to pull-off for deep hole wire-line drill rod[J]. Coal Geology & Exploration, 2013,41(2):90-93.

[11] 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.
- [12] 张伟. 夏威夷科学钻探项目的钻探技术和施工情况[J]. *探矿工程*, 1994(4): 52-53.
- ZHANG Wei. Diameter series and drill pipe scheme for wire-line coring with small diameter in ultra-deep borehole[J]. *Exploration Engineering*, 1994(4): 52-53.
- [13] 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.
- [14] 王达. 科学钻探钻孔结构的研究[C]//王达. 中国大陆科学钻探工程钻探技术论文选集. 北京: 地质出版社, 2007: 125-129.
- WANG Da. Research on borehole structure of scientific drilling[C]//WANG Da. Selected works on drilling techniques of chinese continental scientific drilling (CCSD) project. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 125-129.
- [15] 刘希圣. 钻井工艺原理—中册—钻进技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 1988.
- LIU Xisheng. Principles of well drilling technology—Medium volume—Drilling technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1988.
- [16] 李子丰. 钻柱力学基本方程及其应用[J]. *力学学报*, 1995, 27(4): 406-414.
- LI Zifeng. Basic equations and its applications of drill string mechanics[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1995, 27(4): 406-414.
- [17] 李子丰. 钻柱力学研究中几个值得探讨的问题[J]. *石油机械*, 1996, 24(8): 32-35.
- LI Zifeng. Some problems in the drill string mechanics[J]. *China Petroleum Machinery*, 1996, 24(8): 32-35.
- [18] 狄勤丰, 王文昌, 胡以宝, 等. 钻柱动力学研究及应用进展[J]. *天然气工业*, 2006, 26(4): 57-59.
- DI Qinfeng, WANG Wenchang, HU Yibao. Research and application progress of the drill string dynamics[J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(4): 57-59.
- [19] 胡以宝, 狄勤丰, 邹海洋, 等. 钻柱动力学研究及监控技术新进展[J]. *石油钻探技术*, 2006, 34(6): 7-10.
- HU Yibao, DI Qinfeng, ZOU Haiyang et al. Dynamics research of drill string and monitoring technology[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2006, 34(6): 7-10.
- [20] 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. Dynamic behavior of compound drill string for wire line coring[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2017, 44(7): 34-40.
- [21] 山本晃. 螺纹联接的理论与计算[M]. 郭可谦, 高素娟, 等译. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1984.
- Akira Yamamoto. Theory and calculation of thread connection[M]. Translator: GUO Keqian, GAO Sujian. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Literature Press, 1984.
- [22] 狄勤丰, 陈锋, 王文昌, 等. 双台肩钻杆接头三维力学分析[J]. *石油学报*, 2012, 33(5): 871-877.
- DI Qinfeng, CHEN Feng, WANG Wenchang, et al. Three-dimensional mechanical analysis of the double-shouldered tool joint[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(5): 871-877.
- [23] 梅凤翔. 工程力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- MEI Fengxiang. Engineering mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- 致谢:** 在特深孔地质岩心钻探钻孔口径及管柱规格的论证过程中, 得到了中国地质调查局王达教授级高工和张伟教授级高工、中国地质调查局勘探技术研究所张金昌教授级高工和刘凡柏教授级高工、中国地质调查局探矿工程研究所陶士先教授级高工、中煤科工集团西安研究院有限公司石智军研究员、中国地质大学(北京)刘宝林教授和王成彪教授、中国地质装备集团有限公司刘跃进教授级高工和朱江龙教授级高工、山东省地质矿产勘查开发局第三地质大队陈师逊教授级高工、无锡钻探工具厂有限公司彭莉副总、金石钻探(唐山)股份有限公司田波董事长等专家和学者的帮助, 在此表示衷心的感谢!

(编辑 韩丽丽)