特深孔小口径绳索取心钻探防斜控斜机理与工程实践

赵海滨[1,2]，蔡记华[1]，胡郁乐[1]，王玉吉[2]，刘海波[2]，刘　伟[2]，张永春[2*]
（1.中国地质大学(武汉)，湖北 武汉 430074；2.山东省地质矿产勘查开发局第一地质大队，山东 济南 250014）

摘要：针对特深孔小口径绳索取心钻探中高地应力、狭小环空间隙、钻具刚度不足等因素耦合导致的钻孔偏斜难题，依托胶东地区某4000 m特深钻孔，系统分析了致斜因素与力学传导机制。基于平面应变厚壁圆筒弹性力学、悬臂梁模型及孔底岩屑堆积致斜模型，推导了孔壁变形、钻杆偏心侧向力、岩屑不对称堆积致斜等公式，揭示了“地应力引发孔壁变形—环空间隙不均—钻杆偏心弯曲—钻头侧向受力—孔底岩屑堆积—偏斜持续累积”的传导规律，构建了“源头减弱孔壁变形-中部阻断偏斜传导-末端抑制偏斜积累”三级防斜控斜技术体系，并分0～1500、1500～3000、3000～4000 m孔段优化了钻进参数、钻头结构与冲洗液性能。工程实践表明，全孔平均顶角1.9°，最大顶角4.6°，岩心采取率96.6%，显著优于未经优化的邻孔。研究成果为特深小口径绳索取心钻孔垂直度控制提供了理论依据与可量化参数标准。

关键词：特深孔；小口径；绳索取心；钻孔偏斜；防斜控斜；高地应力；力学模型；钻探工艺
中图分类号：P634.7　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：2096-9686(2026)06-0154-07

Mechanism and engineering practice of deviation control for ultra-deep small-diameter wireline coring drilling

ZHAO Haibin[1,2], CAI Jihua[1], HU Yule[1], WANG Yuji[2], LIU Haibo[2], LIU Wei[2], ZHANG Yongchun[2*]
(1. *China University of Geosciences, Wuhan Hubei* 430074, *China*; 2. *No.*1 *Geological Team of Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Jinan Shandong* 250014, *China*)

Abstract: To address the borehole deviation problem caused by the coupling of factors such as high in-situ stress, narrow annular clearance, and insufficient drill string stiffness in ultra-deep small-diameter wireline core drilling, the deviation-inducing factors and mechanical transmission mechanisms were systematically analyzed based on a 4000 m ultra-deep borehole in the Jiaodong area. Based on the plane-strain thick-walled cylinder elasticity theory, cantilever beam model, and bottom-hole cuttings accumulation-induced deviation model, quantitative formulas for borehole wall deformation, lateral force from drill pipe eccentricity, and deviation induced by asymmetric cuttings accumulation were derived. This revealed the transmission law of "in-situ stress inducing borehole wall deformation → uneven annular clearance → eccentric bending of the drill pipe → lateral force on the drill bit → bottom-hole cuttings accumulation → continuous deviation accumulation". A three-level deviation prevention and control technical system was constructed, comprising "weakening borehole wall deformation at the source, blocking deviation transmission in the middle, and restraining deviation accumulation at the end". Furthermore, drilling parameters, bit structure, and drilling fluid performance were optimized for the 0～1500 m, 1500～3000 m, and 3000～4000 m hole sections, respectively. Engineering practice shows that the whole borehole achieved an average hole inclination angle of 1.9° and a maximum

收稿日期：2026-03-26；**修回日期**：2026-05-06　　**DOI**：10.12143/j.ztgc.2026.06.017
第一作者：赵海滨，男，汉族，1982年生，正高级工程师，地质工程专业，主要从事地质工程技术工作，山东省济南市历城区敬德街521号，124450427@qq.com。
通信作者：张永春，男，汉族，1987年生，工程师，勘查技术与工程专业，主要从事地质工程技术工作，山东省济南市历城区敬德街521号，383584611@qq.com。
引用格式：赵海滨，蔡记华，胡郁乐，等.特深孔小口径绳索取心钻探防斜控斜机理与工程实践[J].钻探工程，2026，53(6)：154-160.
ZHAO Haibin, CAI Jihua, HU Yule, et al. Mechanism and engineering practice of deviation control for ultra-deep small-diameter wireline coring drilling[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(6): 154-160.

hole inclination angle of 4.6°, with a core recovery rate of 96.6%, which are significantly superior to those of the adjacent non-optimized borehole. The research results provide a theoretical basis and quantifiable parameter standards for the verticality control of ultra-deep small-diameter wireline core drilling.

Key words: ultra-deep hole; small-diameter; wireline coring; borehole deviation; deviation prevention and control; high in-situ stress; mechanical model; drilling technology

0　引言

地质勘探与科学钻探对钻孔垂直度、岩心采取率等指标提出极高要求。小口径绳索取心钻探具有不提钻取心、效率高、扰动小等优势,在地质钻探中广泛应用[1-3]。随着“向地球深部进军”战略实施与新一轮找矿突破战略行动推进,面临因孔深增大引发的高地应力场、狭小环空间隙、孔底复杂工况等多因素耦合诱发的钻孔偏斜难题,如何提高中靶精度,助力找矿突破,成为深部钻探必须突破的关键技术难题[4-6]。

目前,国内外防斜控斜研究多集中于石油钻井与常规地质钻探,针对超深孔小口径绳索取心和高地应力的硬岩复杂地层,防控技术仍不完善。国产钻具刚度不足、导向性差,冲洗液与地层适配性弱,钻进参数调控依赖经验等问题突出[7-10]。

本文依托胶东地区4000 m特深钻孔,系统剖析偏斜产生因素与理论依据,提出成套应对策略,明确创新成果,解决科学问题,为解决特深孔钻探“卡脖子”问题提供前瞻性研究参考。

1　致斜因素与理论依据

1.1　影响因素

钻孔偏斜是地质条件、钻具结构、钻探工艺、孔内工况等因素共同作用、逐级传递、相互放大的复杂过程,各因素之间存在一定的力学关联[11-12]。

1.1.1　地质因素

地质条件是钻孔偏斜的根本诱因,作用具有强制性和基础性。胶东地区3000 m以深钻孔垂向地应力本底值高,地应力各向异性明显,水平最大与最小主应力差值约10 MPa。钻孔成型后,孔壁极易因非对称回弹而发生变形,导致孔内环空间隙分布不均,为钻杆偏心、钻头侧向受力提供初始条件。同时,地层软硬不均、地层倾角变化、构造破碎带发育均会使钻头切削阻力不均;深部高地应力环境下产生的岩心饼裂现象,会进一步破坏孔底约束对称性,使钻头出现偏摆和滑移,推动钻孔偏斜发展[13-14]。

1.1.2　钻具因素

钻具与孔径因素是偏斜传导的关键路径。小口径环空间隙小,孔壁即使发生微小变形,也会迅速导致钻杆与孔壁接触,使钻柱无法居中。钻杆柱长细比大、抗弯刚度低,在轴向压力作用下易发生弯曲,弯曲进一步扩大偏心距,形成“弯曲-偏心-侧向力-进一步弯曲”的正反馈循环。

钻头结构对偏斜具有直接放大作用:胎体高度偏大会使钻头下部等效悬臂长度增加,增大侧向挠度;水口数量与分布不对称会造成水力冲蚀不均,加剧孔底受力失衡,使偏斜趋势进一步增强[15-16]。

1.1.3　钻探工艺因素

钻探工艺参数直接决定偏斜发展速度与累积幅度。钻压过大会显著增大钻杆轴向压力,加剧钻杆弯曲变形;转速不合理会引发钻柱共振,扩大侧向摆动;冲洗液性能不匹配,液柱压力不足以平衡地应力,孔壁变形无法得到有效抑制;同时,冲洗液携岩能力不足会导致岩屑无法及时带出,加剧孔底工况恶化。工艺参数的不合理匹配,会使原本可控的偏斜快速发展为明显孔斜[17]。

1.1.4　孔内工况因素

孔内工况是偏斜最终表现与持续扩大的现场条件。小口径环空返渣通道狭窄,岩屑在高围压下沉降速度增快,易在孔底形成不对称沉渣垫,使钻头处于偏心支撑状态,进而产生附加侧向力与倾覆力矩,引发偏心切削。此外,孔壁坍塌、掉块、缩径等复杂工况会破坏钻具导向条件,使钻孔轨迹难以保持垂直,造成钻孔偏斜持续累积。

1.2　理论分析

1.2.1　地应力致孔壁变形

平面应变厚壁圆筒弹性力学理论源于弹性力学经典Lame解,是分析无限长圆柱孔在远场地应力与内压作用下应力与变形的精确解析方法。该理论要求材料线弹性、小变形、几何长径比极大且满足平面应变状态($\varepsilon_z=0$),在深部垂直钻孔、地应力场均匀或各向异性条件下具有严格适用性,应用

该理论可精确求解孔壁非对称回弹位移与环空间隙分布，为揭示地应力致斜机理提供关键理论支撑。

基于平面应变厚壁圆筒弹性力学理论，在不考虑液柱支撑时，孔壁径向回弹变形量Δr：

$$\Delta r=\frac{r(1-\mu^2)}{E_r}(2S_h-S_H) \tag{1}$$

式中：r——钻孔半径；μ——岩石泊松比；E_r——岩石弹性模量；S_H、S_h——水平最大、最小主应力。

若考虑液柱支撑，引入孔内静液柱压力P_w，修正后的孔壁径向回弹变形量$\Delta r'$：

$$\Delta r'=\frac{r(1-\mu^2)}{E_r}\left[(2S_h-S_H)-2P_w\right] \tag{2}$$

钻孔形成后，地应力释放，孔壁产生非对称回弹，静液柱压力可有效约束变形，孔壁径向变形量与液柱压力呈线性负相关，与水平地应力差呈正相关。

1.2.2 环空间隙与钻杆偏心

钻杆在钻孔内的单边环空间隙B[18]：

$$B=\frac{D-d}{2} \tag{3}$$

式中：D——钻孔直径；d——钻杆外径。

钻杆最大偏心距e_{max}与环空间隙B的关系[18]：

$$e_{max}\approx B-\Delta r' \tag{4}$$

环空间隙越小，孔壁的微小变形就越容易导致钻杆偏离中心位置，从而增大钻杆轴线与钻孔轴线之间的偏心距；而偏心距的增大会使钻头在旋转时受到更强的侧向分力，引发孔斜、振动加剧、钻具磨损加快等现象。

1.2.3 钻杆弯曲与侧向力

依据弹性悬臂梁模型，将钻杆视为弹性悬臂梁，其最大弯曲挠度ω_{max}：

$$\omega_{max}=\frac{F_y L^3}{3EI} \tag{5}$$

式中：F_y——钻头侧向分力；L——钻杆悬臂长度；E——钻杆弹性模量；I——钻杆截面惯性矩。

在小口径狭小环空间隙、特深孔条件下，钻杆易因孔壁非对称变形发生偏心，且偏心距沿孔深连续变化。在钻压作用下，偏心变化将直接转化为钻头横向切削力。本文基于钻柱微元受力分析与小变形假定，推导侧向分力与偏心变化率的关系。

基本假设：钻杆为线弹性材料，变形处于小变形范围；钻压沿钻杆轴向施加；偏心距沿孔深连续分布；横向转角极小，即$\sin\theta\approx\tan\theta\approx\theta$。

钻杆轴线在任意深度x处的转角斜率$\theta=de/dx$，轴向钻压P在横向产生的侧向力$F_y=P\sin\theta$，在小变形条件下$\sin\theta=de/dx$，代入得：

$$F_y=P\frac{de}{dx} \tag{6}$$

式中：e——钻杆/钻头的偏心距；de/dx——偏心距沿孔深的变化率。

钻杆在受到轴向压力作用时会发生弯曲变形，导致其轴线偏离原始轴线路径，处于偏心状态，其偏心距在钻进过程中动态变化。在钻孔内，环空间隙不对称，钻孔孔壁椭圆化，钻杆被“挤”向一侧，发生偏心，偏心沿深度变化，产生侧向分力，该侧向分力直接作用于钻头，使其在地层中进行横向切削或产生偏磨效应，成为造成钻孔孔斜的关键驱动力。

1.2.4 孔底岩屑堆积致斜

孔底岩屑堆积是冲洗液性能及上返流速、深部地层特性、钻头水力结构及钻进工艺参数共同作用的结果。环空间隙过小导致返渣受限，高围压硬岩岩屑密度大、沉降快，钻头流场分布不均及冲洗液携砂能力不足等因素，导致岩屑无法及时排出孔底，在孔底局部形成不对称堆积沉渣垫，为后续侧向力产生与钻孔偏斜提供了直接条件。

以孔底偏心支撑力、岩屑弹性垫、孔斜演化规律为基础，结合上述小口径绳索取心钻探工程特点，在经典沉渣致斜模型基础上推导建立孔底岩屑堆积致斜公式，定量表征岩屑堆积对孔斜增长率的影响。

(1)岩屑堆积产生的侧向力F_d。将孔底局部岩屑垫视为弹性支撑体，在钻压作用下产生侧向阻力。取岩屑垫接触面为环形，引入岩屑堆积不均匀度γ表征岩屑非对称分布特征，实现岩屑垫压缩变形与等效刚度耦合。

$$F_d=\pi k_c r h_0 \gamma \tag{7}$$

式中：k_c——岩屑垫等效刚度；h_0——均匀岩屑厚度。

(2)孔斜增长率$d\alpha/dx$。侧向力驱动钻头横向切削，使孔斜随孔深不断增加。大量工程观测表明，孔斜增长率与侧向力成正比，与单边环空间隙成反比。为统一反映地层可钻性、钻具特性、水力条件等综合影响，引入综合经验系数，建立侧向力与孔斜增长率的关系。

$$\frac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{d}x}=C\frac{\pi k_c r h_0 \gamma}{B} \tag{8}$$

式中:C——经验系数;α——钻孔顶角。

孔底岩屑不对称堆积形成偏心支撑,产生附加侧向力,孔斜增长率与岩屑堆积不均匀度成正比,与环空间隙成反比。

孔底岩屑堆积致斜公式实现了岩屑堆积对钻孔偏斜影响的定量表征、力学原理揭示与工程指导,明确了孔斜增长率与岩屑不均匀度成正比、与环空间隙成反比的核心规律,揭示了小口径窄间隙工况下孔底致斜的放大机制,为优化孔底清洁、提高水力平衡、实施末端抑偏斜提供了坚实的理论依据,同时完善了超深小口径绳索取心钻探多因素耦合致斜理论体系。

1.2.5　钻头结构致斜

基于材料力学悬臂梁模型与金刚石钻头受力模型,钻头胎体高度H_t与侧向挠度ω的关系:

$$\omega=\frac{\Delta F H_t^3}{3EI} \tag{9}$$

式中:ΔF——切削齿受力差。

钻头侧向挠度与胎体高度呈三次方关系,胎体过高会大幅放大偏摆效应;水口数量不对称会引发水力失衡,产生额外侧向力,加剧偏斜。

2　防斜控斜应对方案

根据前述关于偏斜机理分析,钻孔偏斜遵循地应力引发孔壁变形—环空间隙不均—钻杆偏心弯曲—钻头侧向受力—孔底岩屑堆积—偏斜持续累积的力学传导路径。为此,本文构建“源头减弱孔壁变形-中部阻断偏斜传导-末端抑制偏斜积累”的三级协同防斜控斜技术体系,按照孔深分3个孔段(0～1500 m中浅孔段、1500～3000 m深孔段、3000～4000 m特深孔段),分别制定对应的钻进参数和钻孔防斜优化参数,实现钻孔偏斜全链条防控。

2.1　源头减弱孔壁变形

2.1.1　孔壁变形原因

孔壁变形是钻孔偏斜的初始根源,其核心诱因来自高地应力卸荷回弹与冲洗液支撑力不足双重作用。钻孔在3000 m以深地层水平地应力差可达10 MPa,钻孔形成后,孔壁岩体由三向应力约束变为双向应力主导状态,应力释放导致孔壁发生非对称径向回弹,使钻孔截面呈椭圆形,环空间隙沿周向分布不均。同时,深部硬岩脆性高、裂隙发育,若冲洗液压力不足以平衡地层压力,孔壁岩体会产生扩容、松弛,甚至出现微裂纹扩展,进一步加大变形量。孔壁一旦发生非均匀变形,钻杆会立即向间隙小的一侧偏移,形成初始偏心,为后续偏斜发展创造条件。

2.1.2　源头防控措施

(1)地应力平衡压力调控。计算不同孔深平衡地应力所需静液柱压力,建立三级孔深(0～1500、1500～3000、3000～4000 m)地应力平衡压力调控体系,适当调整冲洗液密度和参数,抑制孔壁回弹变形。

(2)孔壁强化护壁。分3个孔段(0～1500 m中浅孔段、1500～3000 m深孔段、3000～4000 m特深孔段)分别制定防塌防斜冲洗液,添加腐植酸钾、封堵剂,固结孔壁岩体,提高等效弹性模量,进一步减小变形量。

2.2　中部阻断偏斜传导

2.2.1　钻具与孔径优化

采用同系列较大直径钻头,适当扩大环空间隙,降低孔壁微小变形对钻杆居中的影响。如在H口径钻进中,使用Ø98 mm钻头,较常规Ø95 mm钻头增大3 mm,增大3.1%,可有效降低钻杆贴壁概率。3500 m以深孔段采用镦粗加厚高强度钻杆,壁厚由常规5.8 mm提高至7.0 mm,显著提升抗弯刚度,减少受压弯曲挠度。同时采用满眼钻具组合,在关键位置布设扶正器与扩孔器,强制钻具居中,切断偏心与侧向力的传导路径。

2.2.2　钻头结构优化

钻头结构直接影响侧向挠度、水力平衡与孔底受力对称性,是中部阻断偏斜的核心部件。结合力学模型与工程试验,确定如下钻头优化参数。

(1)胎体高度。侧向挠度与胎体高度三次方正相关,过高会显著放大偏摆,因此特深孔段适当提高胎体刚度与稳定性,0～3000 m孔段控制在11～14 mm,3000～4000 m特深孔段控制在12～14 mm,避免高度过大引发侧向挠度激增。

(2)水口布局。保证无死角冲洗,避免因水力不对称产生附加侧向力。0～1500 m采用10或12个对称水口(图1),1500～4000 m采用6个均布水口,保障流场均衡。

(3)水口型式。采用矩形水口,射流方向偏向孔底外侧15°～30°,增强孔底岩屑扰动与携带能力,



图1 钻头

Fig.1 Drill bits

减少沉渣滞留。

(4)保径精度。采用保径能力强的金刚石钻头,外径公差控制在±0.1 mm以内,确保与扩孔器、扶正器形成稳定满眼结构。

2.3 末端抑制偏斜积累

2.3.1 钻进参数精细化调控

采用低钻压、低转速工艺,降低钻杆弯曲与钻头侧向切削力;随孔深增加逐步降低钻压与转速,避免长钻杆柱失稳弯曲。同时合理匹配泵压和泵量,保证岩屑及时排出,避免孔底堆积。

2.3.2 轨迹监测与动态纠偏

每50~100 m进行一次测斜,及时掌握钻孔顶角与方位角变化,出现偏斜趋势应及时通过轻压慢转、上下往复扫孔的方式进行轨迹矫正,避免孔斜持续累积。

2.3.3 孔底清洁管控

每次下钻至距孔底1~2 m处先进行反复冲孔,待泵压稳定、岩屑排净后再轻压钻进。通过钻头水口优化与冲洗液性能匹配,保证岩屑在孔底无单侧堆积、无沉渣垫形成,确保钻头受力对称。

3 工程实践

3.1 工程概况

钻孔位于胶东半岛东部文登岩体中心位置,设计孔深4000 m,实际终孔深度4023.70 m,采用三开绳索取心钻进工艺:一开采用Ø150 mm金刚石单管钻进至149.84 m,下Ø146 mm套管;二开采用Ø122 mm绳索取心钻进至1467.27 m,下Ø114 mm套管;三开采用Ø98 mm绳索取心钻进至4023.70 m,裸眼终孔[9]。钻探施工现场见图2。

3.2 地质条件

钻孔获取的岩心主要为二长花岗岩,大致可分为三类,如图3所示。



图2 钻探施工现场

Fig.2 Drilling construction site



(a)完整岩层



(b)破碎带



(c)饼裂岩层

图3 获取的岩心

Fig.3 Recovered cores

(1)完整岩层。岩心完整度较高的地层分布在350~500、1500~2000、2850~3000 m孔段。

(2)破碎带。全孔揭露29层破碎带,总厚度458.44 m,在280.37~317.90、626.75~660、986.29~1015.89 m钻遇三层严重破碎带,岩石松散,裂隙发育。

(3)饼裂岩层。全孔钻遇37层较为破碎的饼裂状岩层,总厚度535.11 m,主要分布于2100～2550、2800～2900、3550～3650、3970～4023.70 m孔段,钻头碎岩后应力释放,岩心呈饼裂状,厚度10～15 mm。

3.3　参数优化

3.3.1　0～1500 m中浅孔段

该孔段环空间隙相对较大,地应力相对较低,但地层软硬变化明显,易产生初始偏斜。通过多组对比试验发现:钻压＞14 kN时,钻杆出现轻微弯曲,孔斜增长率上升10%以上;转速＞337 r/min时,钻头振动加剧,保径效果下降。经工程验证,在该孔段施工合理的钻进参数:钻压10～14 kN,转速234～337 r/min,泵量90～110 L/min。钻头水口数量10～12个,胎体高度11～14 mm,冲洗液密度1.05～1.10 g/cm^3,漏斗黏度45～55 s,API滤失量≤10 mL,摩擦系数≤0.090,可有效抑制偏斜。经参数优化后,该孔段顶角0.4°～2.3°,平均1.5°。

3.3.2　1500～3000 m深孔段

该孔段地应力增大、环空间隙变小,钻杆细长比增加,易发生弯曲与贴壁。试验表明:钻压＞12 kN时,偏心明显增大;转速＞333 r/min时,钻柱共振风险上升,孔斜波动增大。经工程验证,在该孔段施工合理的钻进参数:钻压10～12 kN,转速234～333 r/min,泵量70～90 L/min。钻头水口数量6个,胎体高度11～14 mm,冲洗液密度1.03～1.08 g/cm^3,漏斗黏度40～48 s,API滤失量≤12 mL,摩擦系数≤0.075,可有效抑制偏斜。经参数优化后,该孔段顶角1.0°～3.1°,平均1.7°。

3.3.3　3000～4000 m特深孔段

该孔段为高地应力、小环空、长钻杆柱耦合的极端工况,是偏斜控制的最难孔段。试验表明:钻压＞10 kN时,极易造成钻杆失稳弯曲;转速＞234 r/min时,会导致侧向切削力急剧增大;泵量＜50 L/min时,孔底沉渣无法有效排出。经工程验证,在该孔段施工合理的钻进参数:钻压8～10 kN,转速170～234 r/min,泵量50～70 L/min。钻头水口数量6个,胎体高度12～14 mm,冲洗液密度1.02～1.06 g/cm^3,漏斗黏度35～42 s,API滤失量≤15 mL,摩擦系数≤0.065,可有效抑制偏斜。经参数优化后,该孔段顶角1.6°～4.6°,平均3.2°。

3.4　实践效果

根据孔斜监测结果,全孔平均顶角1.9°,最大顶角4.6°,最小顶角0.4°,符合《岩心钻探规程》对孔斜的要求。选取邻区未经过工艺优化的钻孔对比,邻孔孔深2000 m,最大顶角5.2°,平均顶角2.7°。经工艺优化的钻孔在轨迹稳定性、成孔质量上优势明显,验证了三级防控体系与量化参数的工程适用性。

工程施工中钻具运行平稳,岩心采取率高达96.6%,孔壁失稳现象显著减少,终孔垂直度满足设计要求。

4　结论

4.1　主要研究成果

本文以胶东某4000 m特深孔为工程载体,明确了地应力各向异性、环空间隙狭小、钻具抗弯刚度不足、孔底岩屑不对称堆积及钻头结构不合理是导致钻孔偏斜的核心因素,建立了多因素耦合的偏斜力学模型。研究构建了“源头减弱孔壁变形-中部阻断偏斜传导-末端抑制偏斜积累”的三级防斜控斜技术体系,进行0～1500、1500～3000、3000～4000 m分孔段的钻进参数、钻头结构与冲洗液性能成套优化。工程应用表明,全孔平均顶角1.9°,最大顶角4.6°,岩心采取率96.6%,有效解决了高地应力与小间隙耦合下偏斜机理不清、防控措施针对性不强、参数设计缺乏定量依据等三大关键工程问题,实现了特深小口径绳索取心钻孔垂直度的稳定控制。

4.2　主要创新点

(1)理论机理创新:构建多因素耦合力学模型,系统分析各因素间力学传导关系,通过公式推导与现场验证,定量揭示孔壁变形、钻杆偏心、岩屑堆积、钻头结构对偏斜的传导与放大规律,厘清特深小口径钻孔偏斜的核心力学机制。

(2)技术体系创新:提出“源头减弱孔壁变形-中部阻断偏斜传导-末端抑制偏斜积累”三级防斜控斜技术体系,实现了偏斜根源抑制、传导过程阻断、末端偏差矫正的闭环控制,解决单一防控措施针对性弱、效果不稳定的问题。

(3)工程应用创新:结合工程实践,验证适当增大钻孔直径对降低环空间隙敏感效应、抑制钻杆偏心的作用;通过加厚钻杆壁厚提升抗弯刚度,减少钻杆弯曲变形与偏心;明确钻头胎体高度、水口数量及冲洗液优化区间,形成特深小口径绳索取心钻探可量化、可推广的钻具选型与施工工艺参数标

准,提高参数设计的科学性。

参考文献(References):

[1] 王小宝.岩心钻探技术在深层地质勘探中的研究与应用[J].中国金属通报,2024(23):179-181.
WANG Xiaobao. Research and application of core drilling technology in deep geological exploration[J]. China Metal Bulletin, 2024(23):179-181.

[2] 曾思敏,杨永顺,张秉强,等.深孔地质岩心钻探中跨口径绳索取心钻具运用[J].中国地质调查,2024,11(6):15-21.
ZENG Simin, YANG Yongshun, ZHANG Bingqiang, et al. Application of cross-diameter wireline corer drilling tool in deep hole geological core drilling[J]. Geological Survey of China, 2024,11(6):15-21.

[3] 杨芳,张明德,王勇军,等.深部钻探绳索取心跨口径钻具的应用研究与拓展[J].钻探工程,2023,50(4):25-31.
YANG Fang, ZHANG Mingde, WANG Yongjun, et al. Research and development of cross-diameter wire-line coring system in deep drilling[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4): 25-31.

[4] 潘德元,熊亮,王杰,等.地质岩心钻孔轨迹控制技术研究进展[J].地质科技通报,2026,45(1):147-159.
PAN Deyuan, XIONG Liang, WANG Jie, et al. Research progress on trajectory control technology for geological core drilling[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2026,45(1):147-159.

[5] 潘德元,贺前平,蔡隽,等.雪峰弧构造带钻孔轨迹控制关键技术研究[J].钻探工程,2024,51(5):108-114.
PAN Deyuan, HE Qianping, CAI Juan, et al. Study of drilling trajectory control for improving exploration accuracy in Xuefenghu structural belt[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(5): 108-114.

[6] 张恒春,曹龙龙,王文,等.万米科学特深井防斜纠斜技术方案及研究建议[J].钻探工程,2024,51(4):31-37.
ZHANG Hengchun, CAO Longlong, WANG Wen, et al. Technical scheme and research suggestion of deviation prevention and correction for myriametric extra-deep scientific well[J]. Drilling Engineering, 2024,51(4):31-37.

[7] 王达,何远信.地质钻探手册[M].长沙:中南大学出版社,2014.
WANG Da, HE Yuanxin. Geological Drilling Handbook[M]. Changsha: Central South University Press, 2014.

[8] 高科,郭京坤,吕兰,等.深部大陆科学钻探装备关键技术发展综述[J].吉林大学学报(地球科学版),2026,56(1):295-314.
GAO Ke, GUO Jingkun, LV Lan, et al. Review on the development of key technologies for deep continental scientific drilling equipment[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2026,56(1):295-314.

[9] 刘广志.金刚石钻探手册[M].北京:地质出版社,2009.
LIU Guangzhi. Diamond Drilling Manual[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009.

[10] 王奎.复杂地层深孔岩心钻探关键技术应用研究[J].世界有色金属,2024(7):193-195.
WANG Kui. Research on the application of key technologies for deep hole core drilling in complex strata[J]. World Nonferrous Metals, 2024(7):193-195.

[11] 张永春,赵海滨,常洪华.威海地区3000 m深部地热钻探关键技术的应用与分析[C]//第二十一届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集.大同:中国地质学会,2021:123-131.
ZHANG Yongchun, ZHAO Haibin, CHANG Honghua. Key technology for 3000 m-deep small diameter geothermal drilling in the Weihai area of Shandong Province[C]//Proceedings of the 21st National Annual Conference on Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling). Datong: China Geological Society, 2021:123-131.

[12] 贾飞,王健策,潘垚,等.钻进技术与测斜监控双管齐下的西岭超深孔防控斜与纠斜技术[J].矿产勘查,2022,13(12):1833-1842.
JIA Fei, WANG Jiance, PAN Yao, et al. Deviation prevention, control and rectification technology of Xi Ling ultra-deep hole based on drilling technology and deviation monitoring[J]. Mineral Exploration, 2022,13(12):1833-1842.

[13] 刘强.防斜纠斜技术在小口径岩心钻探中的应用——以江西省德兴市德兴铜矿铜厂矿区为例[J].世界有色金属,2024(9):175-177.
LIU Qiang. Application of anti inclination and correction technology in small caliber core drilling: A case study of the Dexing Copper mine copper plant in Dexing City, Jiangxi Province[J]. World Nonferrous Metals, 2024(9):175-177.

[14] 王志祥,韩庆,欧涛.绳索取心振动防堵钻具的试验研究[J].钻探工程,2024,51(S1):143-149.
WANG Zhixiang, HAN Qing, OU Tao. The development of wireline coring barrel vibration anti-blocking drilling tools[J]. Drilling Engineering, 2024,51(S1):143-149.

[15] 童召军,刘恒,韩海亮,等.复杂构造地层钻进工艺及钻头优选[J].矿产勘查,2024,15(S2):527-532.
TONG Zhaojun, LIU Heng, HAN Hailiang, et al. Drilling technology and bit selection for complex structure strata[J]. Mineral Exploration, 2024,15(S2):527-532.

[16] 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 technologies and methods[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2013, 14(6): 26-31.

[17] 潘德元,万大剑,吕敬尊,等.张福山矿区复杂地质条件岩心钻探关键技术研究[J].钻探工程,2025,52(S1):277-282.
PAN Deyuan, WAN Dajian, LV Jingzun, et al. Research on key technologies for core drilling in complex geological conditions at Zhangfushan Mining Area[J]. Drilling Engineering, 2025,52(S1):277-282.

[18] 国土资源部.地质岩心钻探规程:DZ/T 0227—2010[S].北京:中国标准出版社,2010.
Ministry of Land and Resources. Geological core drilling regulations: DZ/T 0227—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.

(编辑 王跃伟)