

隧洞勘察定向钻进连续取心钻具性能验证试验

葛字家^{1,2}, 张书磊^{1,2*}, 张恒春³, 马攀峰^{1,2}, 代常友^{1,2}, 吕万宏^{1,2}

(1. 深圳先河水利水电工程有限公司, 广东 深圳 518000; 2. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003;
3. 中国地质科学院勘探技术研究所, 天津 300399)

摘要:为解决深埋输水隧洞勘察中传统垂直孔勘察效率低、定向钻具无法实现连续取心的问题,基于绳索取心与定向钻进技术,研制了新型定向钻进连续取心钻具,并搭建室内钻进试验平台,对钻具的定向造斜和连续取心性能进行了验证。结果表明:该钻具性能稳定,能够实现定向钻进与高质量连续取心,实际造斜能力达 $3.50^{\circ}/30\text{ m}$,与理论计算值基本吻合,岩心采取率高达93%~98%,岩石质量指标达80%~91%。本研究为深埋长隧洞工程勘察提供了一种高效、可靠的技术方案,对推动定向钻进连续取心技术的发展具有重要意义。

关键词:定向钻进;连续取心;绳索取心;工程勘察;深埋输水隧洞

中图分类号:P634.4 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2026)01-0085-06

Performance verification test of directional drilling continuous coring tools for tunnel exploration

GE Zijia^{1,2}, ZHANG Shulei^{1,2*}, ZHANG Hengchun³, MA Panfeng^{1,2}, DAI Changyou^{1,2}, LÜ Wanhong^{1,2}

(1. Shenzhen Xianhe Water Resources and Hydropower Engineering Co., Ltd., Shenzhen Guangdong 518000, China;
2. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou Henan 450003, China; 3. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Tianjin 300399, China)

Abstract: To address the challenges of low efficiency associated with traditional vertical boreholes and the inability of conventional directional drilling tools to achieve continuous coring in deep-buried water conveyance tunnel exploration, a novel directional drilling continuous coring tool was developed based on wireline coring and directional drilling technologies. An indoor drilling test platform was established to validate the tool's performance in directional deflection and continuous coring. The results demonstrate that the tool operates stably, successfully achieving directional drilling and high-quality continuous coring. The actual deflection capability reached $3.50^{\circ}/30\text{ m}$, closely aligned with the theoretical calculation. The core recovery rate was as high as 93%~98%, with a Rock Quality Designation (RQD) value ranging from 80% to 91%. This research provides an efficient and reliable technical solution for the exploration of deep-buried long tunnels and holds significant importance for advancing the development of directional drilling continuous coring technology.

Key words: directional drilling; continuous coring; wireline coring; engineering investigation; deep-buried water conveyance tunnel

0 引言

深埋输水隧洞常遇“深切割、大高差、构造强

烈、岩性复杂”等复杂地理、地质条件,施工前需进行地质勘察,获取洞身段实物资料,钻探是获取洞

收稿日期:2025-08-16; 修回日期:2025-09-22 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.01.013

基金项目:黄河勘测规划设计研究院有限公司一类课题“定向钻进取心钻具结构设计研究”(编号:2021KY051)

第一作者:葛字家,男,汉族,1982年生,院长,执行董事,高级工程师,地质工程专业,硕士,主要从事水利工程钻探技术与水利施工相关技术的研究工作,广东省深圳市罗湖区东晓街道中设广场B栋1106单元,382726483@qq.com。

通信作者:张书磊,男,汉族,1991年生,主任,高级工程师,地质工程专业,博士,主要从事钻探与基础工程施工方面的研究工作,广东省深圳市罗湖区东晓街道中设广场B栋1106单元,1142405252@qq.com。

引用格式:葛字家,张书磊,张恒春,等.隧洞勘察定向钻进连续取心钻具性能验证试验[J].钻探工程,2026,53(1):85-90.

GE Zijia, ZHANG Shulei, ZHANG Hengchun, et al. Performance verification test of directional drilling continuous coring tools for tunnel exploration[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(1):85-90.

身段岩心实物资料的唯一有效手段^[1]。传统的工程地质勘察方式是沿着隧洞线路间隔布置垂直孔,但受山高坡陡、交通不便、生态脆弱等复杂环境和地域限制,难以实现密集设置取心钻孔,且垂直孔获取的高价值岩心(洞身段)少,无效岩心(洞身段以外)多。定向钻技术能改变传统的“点式勘察”方式,沿着隧洞轴线延伸方向钻进,获得连续的地质信息,变为“线式”勘察,为工程地质勘察人员提供更有价值的信息^[2-4]。但是,目前石油、煤炭等领域广泛使用的定向钻具难以满足水利工程勘察钻孔全孔钻取岩心的要求^[5-6]。

长期以来,大量国内外学者和工程技术人员围绕隧洞勘察领域定向钻进技术的拓展应用开展了相关研究。但是仅有 Aziwell、Epiroc 和 Devico 等公司掌握了定向钻进连续取心技术,并实际应用于隧道建设、矿山增储等多个领域,效果良好^[7-9]。国内中国地质科学院勘探技术研究所^[10-13]、中国地质科学院探矿工艺研究所^[14]、吉林大学^[15]、中国地质大学(北京)^[16]、中煤科工西安研究院(集团)有限公司^[17]等在定向钻进连续取心钻具研究方面取得了丰富的开创性成果,但与国外先进水平仍有一定差距。定向钻进连续取心技术仍是深埋输水隧洞工程勘察领域的难题。

本文基于绳索取心技术和定向钻进技术,研制了一种新型定向钻进连续取心钻具,并围绕定向造斜/纠斜、连续取心等展开一系列室内试验研究,旨在评价定向钻进连续取心钻具的整体工作性能,以期弥补现有技术在定向钻进连续取心钻具设计优化方面的不足,为定向钻进连续取心作业提供新的技术方案。

1 工作原理及主要技术参数

1.1 基本结构

定向钻进连续取心钻具为绳索取心与定向钻进组合式取心钻具,如图1所示,主要由钻具姿态测量系统、造斜/纠斜机构、内管打捞机构、外管等组成,能在造斜的同时实现绳索取心钻进,可测量孔底的顶角、方位角及工具面向角。该钻具通过钻机驱动绳索取心钻杆带动孔底钻具回转钻进。

孔底钻具姿态测斜系统选用 LHE1131 型电子多点测斜仪,属于存储式测斜仪,可间隔一定时间记录当前的方位角、顶角、深度等参数。这些数据



图1 定向钻进连续取心钻具

Fig.1 Directional drilling continuous coring drill tool

随取心内管一同回收,由工程师现场读取分析,结合钻进目标实时调整钻进参数,从而实现高精度的钻孔轨迹控制。

1.2 造斜/纠斜原理

定向钻进连续取心钻具通过液压分动机构和弯外壳实现造斜/纠斜钻进。如图2所示,在下送钻具过程中,分动机构处于联动状态,当进行造斜/纠斜钻进时,分动机构上的硬质合金滑块在液压作用下伸出,紧贴孔壁上,并与传扭外管实现分动,可随钻具转动向下滑行。分动机构选用的硬质合金具有超高耐磨性。



图2 造斜组件

Fig.2 Deflection component

1.3 造斜能力理论计算

根据三点定圆法,对钻具的造斜率进行计算,预测该钻具的造斜能力^[18]。钻具模型如图3所示。

原点在钻头破碎面圆心上,根据模型中参数,得到井眼曲率计算公式:

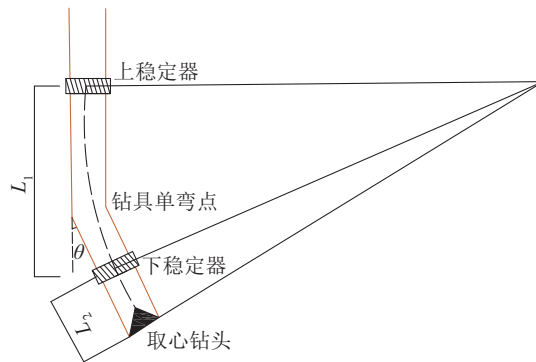


图3 钻具造斜效果示意

Fig.3 Schematic diagram of the drilling tool deflection effect

$$K=\frac{2\theta}{L_1+L_2}\tag{1}$$

式中:K——预测井眼曲率,(°)/30 m;L₁——上下两个稳定器的中心距,m;L₂——下稳定器到钻头底唇面距离,m;θ——设计弯曲角度,(°)。

将参数 L₁=0.7 m、L₂=0.15 m、θ=1.5°代入式(1),计算出该钻具的造斜能力为 3.53°/30 m。在实际造斜钻进中,三点几何法计算的约束条件有多种,所计算出的井眼曲率仅用于对钻具性能的简单评价^[10]。

1.4 主要技术参数

研制的定向钻进连续取心钻具主要技术参数:钻头直径 98 mm,钻具直径 92 mm,配套绳索取心钻杆外径 89 mm,定向造斜段的狗腿度为 3~12(°)/30 m,适用孔斜范围为 0°~90°。

2 性能验证试验

2.1 试验地层制作

为保证室内试验的顺利开展,在黄河勘测规划设计研究院有限公司洛阳试验基地浇筑 C60 混凝土柱来模拟岩石地层,混凝土柱直径为 1.2 m,深度为

32 m。在浇筑混凝土柱的过程中,每浇筑 1 m,采用机械振捣的方式密实处理,直至浇筑至孔口,养护超过 3 个月后,方可开展钻进试验。

2.2 试验设备及钻进规程

试验现场如图 4 所示,本试验采用的钻机、钻具、钻杆、孔底钻具姿态测量系统、泥浆泵等主要试验设备的技术参数如表 1 所示。此外,本试验还使用了高压胶管、稳压罐、卷扬机等辅助设备。

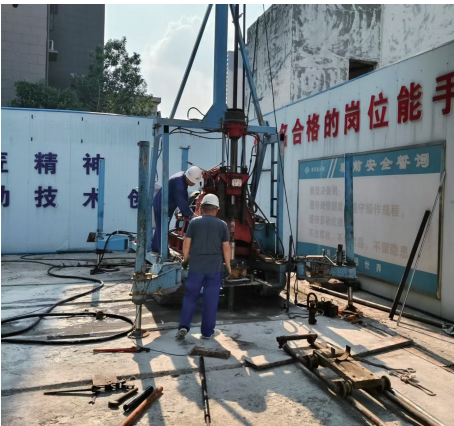


图 4 试验现场
Fig.4 Test site

表 1 主要试验设备及相关技术参数
Table 1 Main test equipment and related technical parameters

名 称	型 号	主 要 技 术 参 数
钻机	XY-2 型履带式塔机一体化钻机	立轴转速:正转 8 挡,65~1172 r/min,反转 2 挡,51~242 r/min;立轴行程:600 mm;立轴通孔直径:76 mm;最大扭矩:2760 N·m;最大起拔力:60 kN
钻具	Ø98 mm 绳索定向钻进连续取心钻具	钻头直径:98 mm;钻具直径:92 mm;取心直径:41.5 mm;钻具弯管角度:1.5°
钻杆	Ø89 mm 绳索取心钻杆	外径:89 mm;内径:73 mm;单根长度:3000 mm
孔底钻具姿态测量系统	LHE1131 型电子多点测斜仪	测量精度:顶角±0.2°,方位角±1.0°,磁性工作面方位±0.5°,高边工作面方位±0.5°
泥浆泵	BW320 型卧式三缸单作用往复式泥浆泵	最大排量:320 L/min;最高压力:10 MPa

试验采用清水作为冲洗液,设计磁北工具面角为 180°,试验钻孔向正南方向进行定向取心钻进。钻进规程参数如表 2 所示。

2.3 试验方案及其注意事项

2.3.1 试验方案

本试验的目的是检验定向钻进连续取心钻具的定向造斜/纠斜、连续取心的性能。具体流程如下:(1)在地面进行钻具组装与调试,检查并调整取

表 2 试验钻进规程
Table 2 Test drilling procedures

规程参数	参数范围
钻压/kN	15~30
转速/(r·min ⁻¹)	200~400
泵量/(L·min ⁻¹)	60~165

心钻头内卡簧、取心管垫片及各丝扣的密封和连接情况,确保取心管同心、仪器到位,保证内管顺利投

放,同时完成测斜仪的校准与参数设置;(2)开展不同泵压测试试验,检验钻具分离机构及反扭支撑系统的工作性能。

钻进前,先使用 $\varnothing 98$ mm全断面PDC钻头垂直钻进约2.5 m,然后下入定向钻具至距孔底0.2 m左右,启动泥浆泵,采用冲洗液冲孔,之后关闭泥浆泵,投入内管测量总成,完成孔内多点测斜,测定磁北工具面角并调整钻杆方位直至符合设计要求。

钻进过程中要缓慢下放钻具,泵压增至2 MPa以上,钻具分动机构启动,开始回转取心钻进。初期低速钻进,稳定后提升至正常转速,整个过程中严禁钻具反转。取心过程中保持适当泵量,加大钻压提高钻速并防止岩心损坏,每钻进2.4 m打捞一次岩心内管,重复操作,连续钻进3个回次后再次投入测量仪器,根据测量结果判断继续钻进或调整钻具,确保试验符合既定目标。

2.3.2 试验注意事项

在定向钻进取心试验过程中需注意以下事项:(1)入孔前应检查钻具外管是否完好无损,避免钻头、弯接头和内管总成与卡盘发生刮蹭;(2)为防止污物或岩屑进入定向钻具,可将内管总成随钻具一同下入孔内,同时确保测斜仪已开启;(3)首次泵入内管总成时,应测量冲洗液循环压力,确保泥浆压力低于钻具分动机构动作压力。

在钻具定向操作中,应根据设计工具面角与实测工具面角的差值及时调整,若差值为负则增加 360° ,之后再角度调整值换算为应旋转钻杆的周长。通过将钻杆旋转相应的周长,调整钻具造斜方向。注意在孔底钻具定向过程中应上下活动钻柱,以释放残余应力与扭矩,确保定向精度。

3 试验结果与分析

3.1 钻孔轨迹分析

通过室内钻孔试验对研制钻具的造斜性能进行了测试和检验,并基于孔底钻具姿态测斜系统采集的钻孔轨迹数据,计算了试验钻孔的曲率、水平位移、垂直位移,得到了试验钻孔的三维轨迹曲线以及其在北南向垂直面、东西向垂直面、水平面的投影曲线,如图5所示。

图5(a)中,黑色实线代表钻孔的真实空间轨迹;蓝色点线代表钻孔轨迹在南北向垂直面的投影,对应图5(b);绿色点线代表钻孔轨迹在东西向

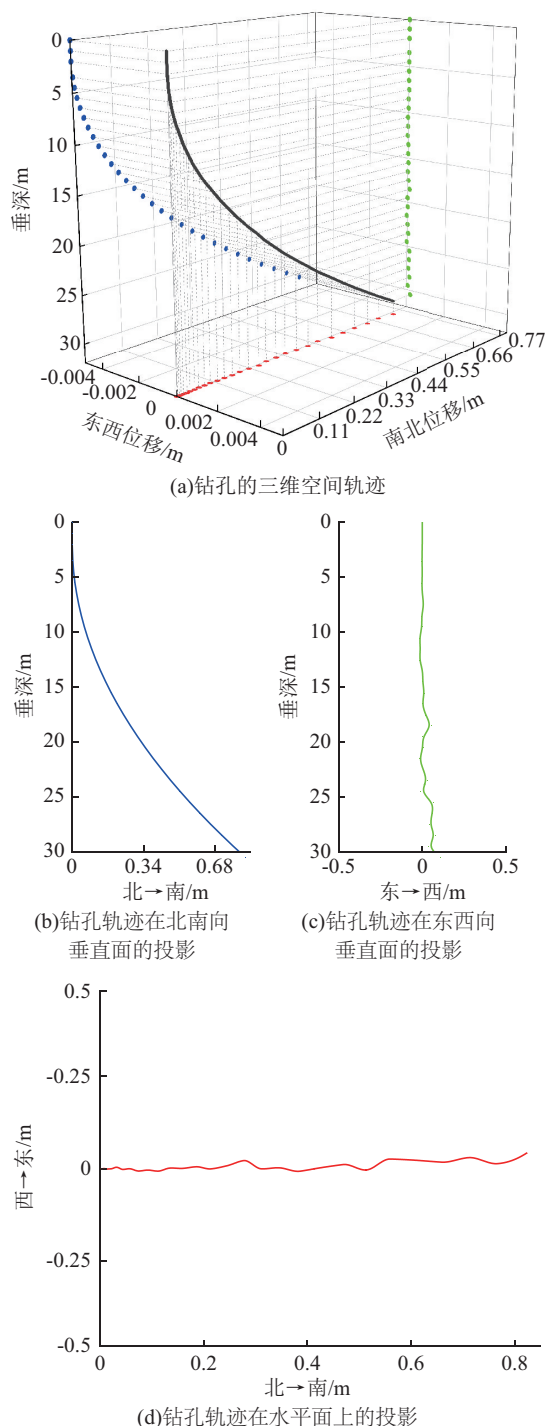


图5 钻孔三维空间轨迹及不同剖面投影图

Fig.5 3D drillhole trajectory and different sectional projections

垂直面的投影,对应图5(c);红色点线代表钻孔轨迹在水平面上的投影,对应图5(d)。从图5可知,试验钻孔测深为30.50 m,垂深30.48 m,自2.5 m处开始造斜,最大孔斜角 3.25° ,最大水平位移为0.82 m。

其方位角控制在 $180^{\circ} \pm 0.2^{\circ}$ 范围内,稳定性好。造斜段最大狗腿度为 $3.50^{\circ}/30\text{ m}$ 。

试验结果显示,该钻孔轨迹平滑,总体成弧状,狗腿度在设计值范围内,钻进过程中方位角未发生明显偏差,且未出现钻压和扭矩异常状况,说明该定向钻具造斜和钻进性能稳定。

3.2 钻取的岩心结果分析

本次试验共钻进12个回次,回次进尺、取心长度、岩心采取率、岩石质量指标(RQD值)等相关情况如表3所示,钻取的岩心如图6所示。试验结果显示:钻取的岩心呈柱状,长度大多分布在10~40 cm范围内,岩心采取率高达93%~98%,RQD为80%~91%,未发生明显岩心破碎现象。此外,该钻具设计钻取的岩心直径为41.5 mm,实际钻取的岩心直径为40.0 mm,岩心直径磨损在正常范围内。综合多种岩心数据可知,该钻具在取心钻进过程中工作平稳,取心性能稳定,可钻取高质量岩心,能提供可靠的原始地层资料。

表3 采取岩心主要参数

Table 3 Main parameters of core sampling

孔段/m	回次进尺/m	取心长度/m	岩心采取率/%	RQD值/%
2.5~4.9	2.4	2.25	93.75	80.56
4.9~7.3	2.4	2.32	96.67	84.32
7.3~9.7	2.4	2.28	95.00	87.91
9.7~12.1	2.4	2.35	97.92	81.72
12.1~14.5	2.4	2.27	94.58	89.04
14.5~16.9	2.4	2.31	96.25	85.16
16.9~19.3	2.4	2.30	95.83	83.77
19.3~21.7	2.4	2.27	94.58	82.45
21.7~24.1	2.4	2.33	97.08	90.22
24.1~26.5	2.4	2.28	95.00	86.41
26.5~28.9	2.4	2.34	97.50	80.89
28.9~31.3	2.4	2.31	96.25	88.63

4 结论

(1)基于水利工程深埋长隧洞工程勘察对勘探技术的需求,研制了一种基于定向钻进技术和绳索取心技术的定向钻进连续取心钻具,在定向钻进的同时,实现造斜段连续取心。

(2)室内试验结果显示,该钻具在室内搭建的混凝土地层钻进中,能够实现造斜、连续取心功能,



(a)钻取的部分岩心 (b)钻取的岩心直径40mm

图6 钻取的岩心实物

Fig.6 Actual image of the drilled core

造斜段最大狗腿度为 $3.50^{\circ}/30\text{ m}$,与钻孔轨迹设计理论值 $3.53^{\circ}/30\text{ m}$ 基本一致,岩心采取率 $>93\%$,初步展示出良好的造斜取心性能。

(3)定向钻进连续取心技术属于工程勘察领域的前沿技术,结合了钻探、测井和自动化等专业尖端技术。本研究成果为推动定向钻进连续取心技术的进步提供了试验基础。

参考文献(References):

- [1] 许琦,叶健,张广厦,等.定向钻探技术在隧洞超前地质预报中的应用初探[J].钻探工程,2025,52(3):30-36.
XU Qi, YE Jian, ZHANG Guangxia, et al. Preliminary probe into application of directional drilling technology in geological forecast of tunnels [J]. Drilling Engineering, 2025, 52 (3) : 30-36.
- [2] 张恒春,刘广,吴纪修,等.川藏铁路3000m水平定向钻井技术方案[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(11):1-6.
ZHANG Hengchun, LIU Guang, WU Jixiu, et al. Technical plan for 3000m long horizontal directional drillingfor Sichuan Tibet Railway [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(11):1-6.
- [3] 颜慧明,项洋,齐凌轩,等.定向钻探技术在水利水电深埋隧洞勘察中的应用研究——以引江补汉工程为例[J].钻探工程,2025,52(3):22-29.
YAN Huiming, XIANG Yang, QI Lingxuan, et al. Application research of directional drilling technology for deep buried tunnel engineering investigation: taking the water diversion project from the Yangtze River to the Hanjiang River as an example [J]. Drilling Engineering, 2025,52(3):22-29.
- [4] 周梦迪,刘欢,韩丽丽,等.用于工程勘察的水平定向钻探技术探讨[J].钻探工程,2023,50(2):135-142.
ZHOU Mengdi, LIU Huan, HAN Lili, et al. Discussion on the horizontal directional drilling technology for engineering investigation [J]. Drilling Engineering, 2023,50(2):135-142.
- [5] 陈虎,和鹏飞,万圣良.国产旋转导向及随钻测井系统在渤海某油田的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(3):35-38.
CHEN Hu, HE Pengfei, WAN Shengliang. Application of China-made rotary steering and logging while drilling systems in adjustment well of Bohai [J]. Exploration Engineering (Rock &

- Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(3): 35-38.
- [6] 曹永斌, 杨德全, 杜斌, 等. “四合一”钻具在定向钻井工程中的应用分析[J]. 钻探工程, 2024, 51(S1): 172-177.
- CAO Yongbin, YANG Dequan, DU Bin, et al. Application analysis of the “four in one” drilling tools in directional drilling engineering[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1): 172-177.
- [7] Shinmoto Y, Miyazaki E, Wada K, et al. Development of a continuous directional coring system for deep-sea drilling[J]. SPE Drilling & Completion, 2012, 27(1): 139-144.
- [8] Tsang C K, Chau S F, Chan J. Subsea horizontal directional coring (HDC) [J]. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, 2024, 47(3): 31-36.
- [9] 苟晓东. 长距离定向连续取心技术在岩土勘察中的应用与研究——以新加坡 HDC3-1 地铁勘察项目为例[J]. 钻探工程, 2025, 52(5): 134-141.
- GOU Xiaodong. Application and research of long-distance directional continuous coring technology in geotechnical investigation: a case study of the Singapore HDC3-1 metro project[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(5): 134-141.
- [10] 韩泽龙, 李小洋, 施山山, 等. 定向钻进连续取心钻具设计及取心参数仿真分析[J]. 钻探工程, 2025, 52(1): 39-46.
- HAN Zelong, LI Xiaoyang, SHI Shanshan, et al. Design of drilling tool and simulation analysis of parameters for continuous coring in directional drilling [J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1): 39-46.
- [11] 张新刚, 刘志强, 林修阔. 定向钻进连续取心技术在深部矿产勘探中的应用[J]. 矿床地质, 2012, 31(S1): 1101-1102.
- ZHANG Xingang, LIU Zhiqiang, LIN Xiukuo. Application of directional drilling continuous coring technology in deep mineral exploration[J]. Mineral Deposits, 2012, 31(S1): 1101-1102.
- [12] 向军文, 陈晓林, 胡汉月. 定向造斜及水平钻进连续取心技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2007, 34(9): 33-36.
- XIANG Junwen, CHEN Xiaolin, HU Hanyue. Continuous coring technology in inclination drilling & horizontal drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2007, 34(9): 33-36.
- [13] 吴纪修, 尹浩, 张恒春, 等. 水平定向勘察技术在长大隧道勘察中的应用现状与展望[J]. 钻探工程, 2021, 48(5): 1-8.
- WU Jixiu, YIN Hao, ZHANG Hengchun, et al. Application status and R&D trend of horizontal directional investigation technology for long tunnel investigation[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(5): 1-8.
- [14] 吴金生, 黄晓林, 蒋炳, 等. 水平绳索随钻定向钻进技术研究与应用[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(5): 260-264, 271.
- WU Jinsheng, HUANG Xiaolin, JIANG Bing, et al. Research and application of horizontal wire-line directional deviation correction while drilling[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(5): 260-264, 271.
- [15] 林婷婷, 刘泽楷, 马银龙, 等. 定向钻进连续取心钻具姿态监测系统[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(9): 138-146.
- LIN Tingting, LIU Zekai, MA Yinlong, et al. Design of attitude monitoring system for directional drilling continuous coring tools[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(9): 138-146.
- [16] 任攀攀. 连续造斜绳索取心钻具设计理论研究及研制[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
- REN Panpan. Design theory research and development of continuous deflecting wire-line coring tool[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2010.
- [17] 邹祖杰. 近水平定向取心技术与配套钻具研究及应用[J]. 煤矿安全, 2024, 55(12): 214-220.
- ZOU Zujie. Research and application of near-horizontal directional coring technology and supporting drilling tools[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(12): 214-220.
- [18] 刘修善, 何树山, 邹野. 导向钻具几何造斜率的研究[J]. 石油学报, 2004, 25(6): 83-87.
- LIU Xiushan, HE Shushan, ZOU Ye. Study on the geometric build angle rate of steerable motor[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(6): 83-87.

(编辑 王跃伟)