

贵州永温大坪矿区小直径螺杆钻探轨迹纠斜应用

赵俊杰^{1,2}, 解 钊^{1,2*}, 张恒春^{1,2}, 施山山^{1,2}, 李小洋^{1,2}, 邓 拓³

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 自然资源部定向钻井工程技术创新中心, 河北 廊坊 065000; 3. 湖南省工程地质矿山地质调查监测所, 湖南 长沙 410014)

摘要:针对贵州永温大坪磷矿区钻探施工中钻孔轨迹偏移问题,系统开展了纠斜技术的应用研究。通过优化钻孔轨迹控制方案,设计分阶段动态调控策略(如“先降斜后稳方位”),结合 $\varnothing 73$ mm弯螺杆钻具、JTL-40GX型光纤陀螺测斜定向仪,实现了孔斜角与方位角的精准协同控制。研究结果表明:SJK04、SJK05、SJK06钻孔的终孔偏移量分别为9.79、5.91、11 m,分别占设计允许值的67%、36%、64%,均满足工程精度要求(偏移量 $\leq 1\%$)。其中,SJK05钻孔通过定向纠斜钻进,孔斜角从4.93°降至1.68°(降幅65.9%),方位角调整幅度达161°。本研究为复杂地层钻探的轨迹控制提供了技术参考,展示了分阶段调控策略的工程适用性。

关键词:定向纠斜;钻孔轨迹控制;螺杆钻具;测斜定向仪

中图分类号:P634.7 文献标识码:B 文章编号:2096-9686(2025)S1-0294-06

Application of trajectory correction technology in small-diameter screw drilling at Yongwen Daping Mining Area, Guizhou

ZHAO Junjie^{1,2}, XIE Chuan^{1,2*}, ZHANG Hengchun^{1,2}, SHI Shanshan^{1,2}, LI Xiaoyang^{1,2}, DENG Tuo³

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China; 2. Technology Innovation Center for Directional Drilling Engineering, Ministry of Natural Resources, Langfang Hebei 065000, China; 3. Engineering Geology and Mine Geology Survey and Monitoring Institute of Hunan Province, Changsha Hunan 410014, China)

Abstract: This study systematically investigated the application of deviation correction technologies to address borehole trajectory deviations encountered during drilling operations in the Yongwen Daping phosphate mining area. By optimizing the wellbore trajectory control plan and implementing a phased dynamic regulation strategy (“first reducing inclination, then stabilizing azimuth” e.g.), combined with a $\varnothing 73$ mm bent screw drilling tool and a JTL-40GX fiber-optic gyroscopic inclinometer for directional measurement, precise coordinated control of the well deviation angle and azimuth angle was achieved. The results demonstrate that the final deviations of the SJK04, SJK05, and SJK06 boreholes were 9.79, 5.91, and 11m, respectively, corresponding to 67%, 36%, and 64% of the permitted design values, which meets the engineering accuracy requirements (deviation limit $\leq 1\%$). Notably, directional drilling in the SJK05 borehole reduced the well deviation angle from 4.93° to 1.68° (a reduction of 65.9%) and adjusted the azimuth angle by 161°. This research provides a technical reference for trajectory control in complex stratigraphic drilling and demonstrates the engineering applicability of the phased regulation strategy.

Key words: directional correction; well trajectory control; screw drilling tool; directional survey instrument

收稿日期:2025-05-08; 修回日期:2025-06-23 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.S1.046

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“固体矿产高效精准勘探技术及自动化钻探装备升级与应用”(编号:DD20242850);贵州省科技计划项目“贵州省复杂地形和地质条件下深部取心钻探关键装备材料研究”(编号:黔科合支撑[2025]一般065)、“贵州省岩溶地区复杂地层岩心钻探关键技术难题综合研究”(编号:黔科合支撑[2023]一般173号)

第一作者:赵俊杰,男,汉族,1999年生,助理工程师,石油与天然气工程专业,硕士,从事深部钻探技术研究工作,河北省廊坊市广阳区金光道77号,zhao_junjie0514@foxmail.com。

通信作者:解钊,男,汉族,1999年生,助理工程师,机械工程专业,硕士,从事深部钻探技术研究工作,河北省廊坊市广阳区金光道77号,ktsxiec@163.com。

引用格式:赵俊杰,解钊,张恒春,等.贵州永温大坪矿区小直径螺杆钻探轨迹纠斜应用[J].钻探工程,2025,52(S1):294-299.

ZHAO Junjie, XIE Chuan, ZHANG Hengchun, et al. Application of trajectory correction technology in small-diameter screw drilling at Yongwen Daping Mining Area, Guizhou[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(S1):294-299.

0 引言

绳索取心钻具在自然造斜力微弱的地层中钻进效率高,但在钻遇大倾角、软硬互层或破碎地层等复杂条件时,若不采取有效控制措施,极易引发钻孔弯曲,甚至导致严重孔斜事故^[1]。定向纠斜技术作为解决钻孔轨迹偏移的关键手段,在矿产勘探与油气开发等领域应用广泛^[2-3]。地质钻探因其口径较小等特点,难以直接应用石油领域常用的钟摆钻具或满眼钻具等技术^[4]。目前,地质钻探主要依托孔底动力钻具(如螺杆钻具)和高精度随钻测量仪器(如陀螺测斜仪)实现轨迹的主动控制。国内外研究表明,在复杂地层、深孔和小直径钻孔条件下,实现高精度(如偏移量 $\leq 1\%$)的轨迹纠偏仍面临显著挑战。

本研究针对贵州永温大坪磷矿区3个深孔地质勘探孔(SJK04,SJK05,SJK06)在施工中出现的钻孔轨迹偏移问题,开展定向纠斜技术应用研究。

1 工程概况

1.1 地层资料

3个直孔钻遇的地层自上而下依次为:娄山关组—石冷水组、高台组、金顶山组、清虚洞组、明心寺组、牛蹄塘组及灯影组。以SJK04孔为例(见图1),在金顶山组地层段,孔斜角突然增大。分析认为,该段地层其岩性主要为深灰色泥质粉砂岩夹黑色泥岩条带,节理裂隙发育,具体特征如下:节理面较平滑,间距 <0.5 m,倾角约 60° ;节理多呈微张至张开状态,无充填;岩心以柱状为主,少量呈长柱状或块状,属中风化程度;受节理影响,岩心较破碎,呈块状。

该地层造斜效应显著,推测与节理发育及岩体破碎有关。而后续孔段(明心寺组)孔斜角变化平缓,其岩性表现为水平构造,层理清晰,节理裂隙不发育,岩体完整性较好。因此,最终选择在明心寺组层段实施纠斜定向作业,以确保钻孔轨迹控制。

1.2 钻孔轨迹计算方法

钻孔轨迹计算采用平均角法,又称角平均法。假设测段为一直线,其方向的孔斜角和方位角分别为上、下两测点的平均孔斜角和平均方位角。具体计算公式如下式(1)~(3)。为了方便现场计算和实时调整钻具高边工具面以及钻进参数,采用Sysdrill测量计算软件帮助精确导入并计算钻孔轨迹^[5]。平均角法计算的示意图可参考图2。

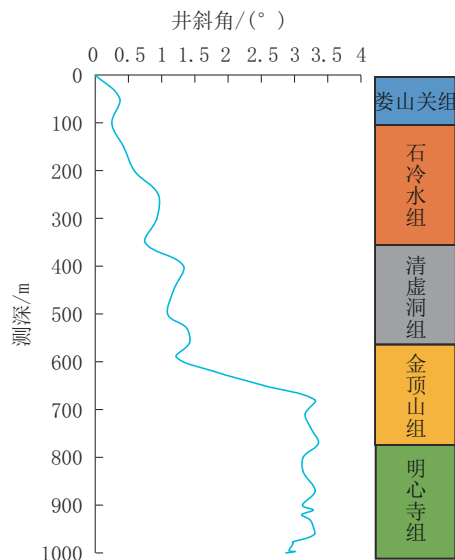


图1 SJK04已钻深度孔斜角变化

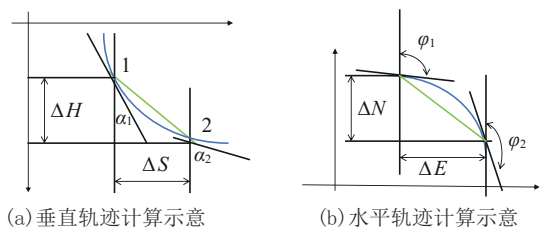


图2 平均角法计算示意

$$\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \quad \varphi = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \quad (1)$$

$$\Delta H = \Delta L \cos \varphi \quad \Delta S = \Delta L \sin \varphi \quad (2)$$

$$\Delta N = \Delta S \cos \varphi \quad \Delta E = \Delta S \sin \varphi \quad (3)$$

式中: α ——平均孔斜角, $(^\circ)$; φ ——平均方位角, $(^\circ)$; α_1, α_2 ——两测点孔斜角, $(^\circ)$; φ_1, φ_2 ——两测点方位角, $(^\circ)$; ΔH ——垂直轨迹位移增量,m; ΔS ——水平轨迹位移增量,m; ΔL ——两测点投影面直线距离,m; ΔN ——南北方向轨迹位移增量,m; ΔE ——东西方向轨迹位移增量,m。

1.3 钻孔纠斜设计

3个孔设计深度大、终孔允许偏移量要求高($\leq 1\%$ 设计深度),且待纠斜孔段位于明心寺组泥页岩地层,具有特定的工程难度。各钻孔基本现状及设计要求详见表1。

针对钻孔现状及矿区复杂地层特点,拟采取以下针对性纠斜技术措施:

(1)实施分阶段动态调控策略:核心原则是优先控制孔斜角,再协同调整方位角。根据各孔初始状

表1 永温大坪矿区纠斜钻孔基本情况

钻孔 编号	设计深 度/m	待纠斜起始 深度/m	起始孔 斜角/°	起始方 位角/°	允许偏 移量/m
SJK04	1427	1000	2.87	153	14.27
SJK05	1632	1235	2.99	247.6	16.32
SJK06	1721	1221	1.99	265	17.21

态差异,制定差异化方案:SJK04与SJK06孔:采用“先降斜后稳/调方位”策略。SJK05孔:采用“先降斜优化轨迹,后稳斜钻进”策略,必要时结合反向增斜。

(2)动态优化与实时监控:具体调控参数(如工具面角)将基于实时测量数据和轨迹预测模型进行动态优化,并利用Sysdrill等专业软件进行轨迹计算、预测与实时监控,确保终孔偏移量严格控制在

≤1%设计深度范围内。

SJK04、SJK05、SJK06钻孔纠斜起始段均位于明心寺组地层,该组岩性以灰、灰绿或深灰色薄至中层粉砂质泥岩为主(局部夹泥质粉砂岩条带)。该地层普遍具有以下利于实施定向纠斜作业的特征:层理构造清晰,整体节理裂隙不发育(局部存在少量闭合或微张裂隙),溶蚀现象不显著,岩心以柱状或长柱状为主,岩体完整性中等至较好(局部呈破碎状),微风化,岩层软硬适中。基于上述地层特性,最终选择在明心寺组层段实施纠斜定向作业,以确保对钻孔轨迹的有效控制。图3展示了3个钻孔在纠斜起始深度附近的水平轨迹视图对比,直观反映了其初始偏移状态。

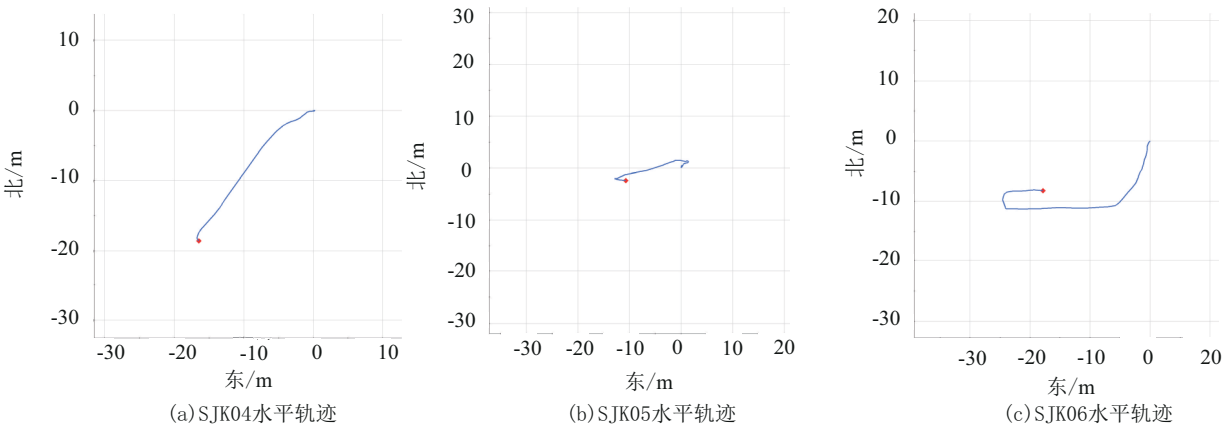


图3 钻孔待纠斜段初始水平轨迹视图对比

2 定向纠斜设备仪器及工艺方法

2.1 主要设备仪器

根据钻孔直径,选用5LZ-73×7(Ø73 mm,1°~1.25°)弯螺杆性能参数见表2和Ø96 mm全面金刚石造斜钻头(见图4),上接Ø73 mm绳索取心钻杆;定向仪器选择JTL-40GX型有缆光纤陀螺测斜定向仪(见图5),同时配备BW320型泥浆泵以满足螺杆钻具对泵量的要求(162~578 L/min)^[6-7]。

2.2 孔底回转动力

孔底回转动力主要通过螺杆马达实现(其内部结构见图6)。其作用是使孔底钻具与钻头进行回转钻进,同时上部钻杆被锁死,不会转动以避免影响定向方位的改变。目前,螺杆马达与弯外管通常被加工为一体,形成定向钻进专用工具,称为“弯螺杆马达”,能够同时实现定向、造斜和孔底回转动力

表2 螺杆主要技术参数

性能	参数
螺杆型号	5LZ-73*7
外径/mm	73
排量/lpm	162-578
转速/(r•min ⁻¹)	121-432
工作压力降/MPa	3.2
输出扭矩/(N•m)	613
最大压力降/Mpa	4.52
最大扭矩/(N•m)	867
工作钻压/kN	12
最大钻压/kN	25
输出功率/kW	36

的3项功能^[8-9]。



图4 金刚石钻头实物



图5 JTL-40GX型有缆光纤陀螺测斜定向仪

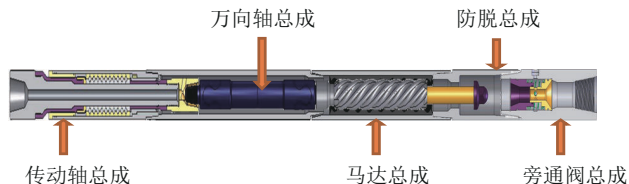


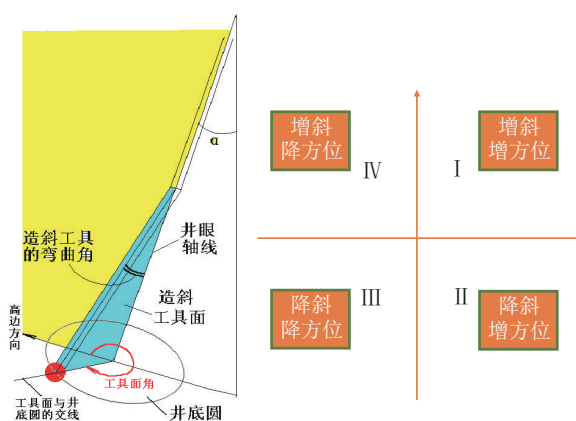
图6 螺杆马达内部结构示意图

2.3 工具面定向

根据纠斜目标,为了使钻孔沿着设计的轨迹前进,需要确定每次纠斜时调整工具面角的角度,以确保钻孔朝着预定的轨迹前进^[10-11]。

根据工具面角所在象限位置,可以调整孔斜角和方位角的改变程度,以满足实际工程需求。通过确定象限位置,可以有效地控制钻孔的方向。具体工具面角施工工艺见图7。

工具面实际施工角度的计算公式为:工具面安装角=理论计算安装角+反扭角。在考虑 $\varnothing 73$ mm 绳索取心钻杆时,反扭角通常为 $4\sim 5^\circ/100$ m,但是反扭角的大小会随着钻压的变化而变化。因此,在后续的纠斜过程中,反扭角的调整应该根据前一次纠斜的结果进行调整,以确保钻孔能够按照设计的轨迹前进。



(a) 垂直轨迹 (b) 工具面角不同象限效果

图7 工具面角工艺示意

3 定向纠斜过程

定向钻具组合: $\varnothing 96$ mm 金刚石/牙轮钻头 $\times 1$ 只+ $\varnothing 73$ mm $\times 1.25^\circ$ 螺杆 $\times 1$ 根+ $\varnothing 75$ mm 定向接头(内置键槽) $\times 1$ 只+ $\varnothing 75$ mm 绳索取心钻杆。钻进钻具组合示意图见图8。地面组装时需测量并校正定向接头与螺杆之间的角差,确保钻具同轴性。启动泥浆泵,验证泵量($162\sim 578$ L/min)满足螺杆马达驱动需求。

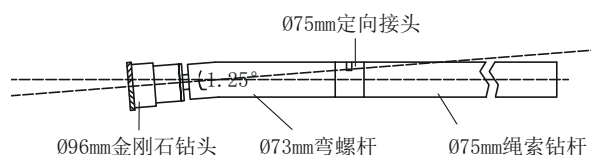


图8 定向钻具组合

利用软件导入实测钻孔轨迹数据(轨迹数据也可通过定向所使用的光纤陀螺仪测量),进行计算和分析,确定当前孔眼底部方位,并设定靶心区域。通过模拟和规划定向方位,为后续作业提供指导。在地面组装定向所用钻具,包括螺杆钻具、定向接头和钻头,测量并记录定向接头与螺杆之间角差。随后启动泥浆泵,确认正常运转后开始下放钻具。

在地面调试定向所需仪器,包括绞车、主机和陀螺仪,确保与电脑能够正常传输数据。随后,通过绞车将仪器下放至钻杆内,直至到达定向接头,并确保仪器正确进入键槽。

之后读取底部轨迹数据,确认螺杆工具的朝向。随后连接侧开提手,提起钻柱,并转动钻柱将方向调整至计划位置。完成定向后,提出仪器,并安装反扭矩器以进行后续定向钻进(见图9)。在完

成单根钻进后,拆卸反扭转器,加接单根钻杆,并重复以上定向操作。

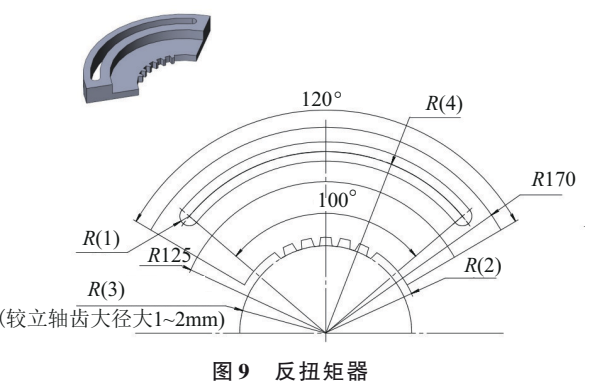


图9 反扭矩器

4 定向纠斜成效

对 SJK04、SJK05、SJK06 钻孔成功实施了定向纠斜作业。通过实时轨迹监测与参数动态优化,3 个钻孔均有效控制了钻孔轨迹,终孔偏移量严格控制在设计允许值($\leq 1\%$ 设计深度)范围内,满足工程精度要求,详见表 3。

分析表 3 数据,可得出以下主要结论与技术亮点:

(1)策略有效性验证:分阶段动态调控策略成功应用于不同初始状态的钻孔。针对 SJK04 初始孔斜与方位均需调整,采用“边降斜边降方位”;针对 SJK05 初始孔斜较大且方位需大角度反转($\approx 180^\circ$),采用“先大幅降斜后大角度微调方位”;针对 SJK06 初始孔斜较小但设计深度最大,采用“先降斜优化轨迹,后反向增斜稳方位”。3 种策略均实现了预期目标,验证了该策略的适应性和灵活性。

(2)精准协同控制:利用光纤陀螺仪的高精度测量和弯螺杆钻具的定向能力,结合 Sysdrill 软件的

实时预测与监控,实现了孔斜角与方位角的精准协同控制。

(3)高效轨迹修正:SJK06 钻孔在纠斜进尺内,不仅将孔斜角从 1.99° 降至 1.0° (降幅 49.7%),更实现了高达 173° 的方位角调整(从 290° 至 79° 东北,最终稳定在 92°),展现了分阶段调控策略在高效修正大偏移轨迹方面的优势。

(4)严格精度达标:3 个钻孔的终孔偏移量(9.79、5.91、11 m)分别占其设计允许值的 67% 、 36% 和 64% ,均显著优于 $\leq 1\%$ 设计深度的工程要求(即 $\leq 14.27\text{ m}$, $\leq 16.32\text{ m}$, $\leq 17.21\text{ m}$),充分证明了整套技术方案在复杂地层深孔钻探中实现高精度轨迹控制的能力。

5 结论

本研究针对贵州永温大坪磷矿区深孔地质勘探中面临的钻孔轨迹高精度控制(偏移量 $\leq 1\%$ 设计深度)难题,系统开展了小直径螺杆钻具结合光纤陀螺测斜定向仪的定向纠斜技术应用研究。通过工程实践与效果分析,得出以下主要结论:

(1)提出的“孔斜角优先控制,方位角协同优化”分阶段动态调控策略(如“先降斜后稳/调方位”、“边降斜边降方位”、“先降斜后反向增稳”),有效解决了单一调控模式下孔斜与方位相互制约的难题。其核心优势在于:阶段性目标明确(如 SJK05 优先大幅降斜)、调控参数动态响应(根据实时数据优化工具面角,考虑反扭矩影响)、适应性强(可针对不同初始状态灵活调整)。实践表明,该策略在明心寺组复杂泥页岩地层中成功实现了孔斜角(最大降幅 49.7%)与方位角(最大调整幅度 173°)的高

表3 钻孔定向纠斜关键过程参数与效果对比

参 数	SJK04	SJK05	SJK06
采用纠斜策略	边降斜边降方位	先大幅降斜后微调方位	先降斜后反向增稳
起始孔斜角/(°)	2.87	2.99	1.99
起始方位角/(°)	153	247.6	265
纠斜后孔斜角/(°)	1.82	1.68	2.19
纠斜后方位角/(°)	80.4	99	92
孔斜角变化	降幅 36.6%(2.87→1.82)	降幅 43.8%(2.99→1.68)	先降 49.7%(1.99→1.0)后增斜
方位角调整幅度/(°)	72.6(153→80.4)	148.6(247.6→99)	173(265→92)
实测终孔偏移量/m	9.79	5.91	11
偏移量允许值	67%	36%	64%
是否满足要求	是	是	是

效协同控制,是确保终孔偏移量(最小仅占允许值的36%)达标的创新方法学创新。

(2)采用 $\varnothing 73$ mm小直径弯螺杆钻具,配合JTL-40GX型高精度光纤陀螺测斜定向仪,成功克服了深孔(>1200 m)、小孔径条件下轨迹测量与控制的瓶颈。该组合技术具有测量精度高(满足 $\leq 1\%$ 偏移的精度需求)、孔内适应性强(耐高温高压,抗振动干扰)、施工效率高(结合绳索取心工艺,减少起下钻时间)的显著优势。

(3)基于平均角法,利用Sysdrill等专业软件进行钻孔轨迹的实时计算、预测与可视化监控,建立了钻进参数的动态优化机制。该机制能够提前预警轨迹偏移风险(如SJK04及时启动纠斜)、有效预测终孔位置偏移量。最终,3个钻孔的实测偏移量(9.79,5.91,11 m)均被精准预测并严格控制在允许值(14.27,16.32,17.21 m)范围内(占比67%,36%,64%),为复杂地层钻探提供了可靠的过程控制手段。

(4)本研究表明,在具有类似永温大坪矿区明心寺组地层特性(如层理发育、软硬互层、局部破碎)的磷矿或其他固体矿产深孔勘探中,采用“分阶段动态调控策略”+“小直径螺杆-光纤陀螺高精度组合”+“实时预测与动态优化”的技术体系,可有效解决钻孔轨迹严重偏移问题,实现 $\leq 1\%$ 设计深度的严苛精度要求。特别是在需要大角度方位调整($>150^\circ$)或高效轨迹修正的场景下(如SJK05,

SJK06),该技术体系展现出显著优势。

参考文献:

- [1] 罗思贤,高飞,杨芝广,等.攀西地区钒钛磁铁矿整装勘查钻探坚硬岩层的研究和探索[J].四川地质学报,2019,39(S1):215-218.
- [2] 黄忠高,李志强,潘海迪,等.江西省浮梁县朱溪矿区ZK5407深孔螺杆定向纠斜施工工艺技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(8):43-48,54.
- [3] 黄杨,孙绍平,蒋清燕,等.钻孔偏斜原因分析及纠斜技术应用[J].四川地质学报,2022,42(S1):159-162.
- [4] 王勇刚,陈岑,张年念,等.苏3X-1区块侧钻水平井优选方法研究[J].四川地质学报,2019,39(2):334-338.
- [5] 何昌润,吴金生,张维刚,等.小直径随钻定向纠斜技术在马尔康党坝乡锂矿的应用[J].四川地质学报,2022,42(S1):62-65.
- [6] 陈明,童俊涛,曾令,等.螺杆钻具钻孔纠斜技术在诸广矿集区钻探施工中的应用[J].世界核地质科学,2023,40(2):462-472.
- [7] 石智军,许超,李泉新,等.随钻测量定向钻进技术在煤矿井下地质勘探中的应用[J].煤矿安全,2014,45(12):4.
- [8] 宋继伟,冉飞,方青,等.贵州省贞丰县金矿勘查小口径定向分支钻进技术[J].地质与勘探,2024,60(6):1217-1227.
- [9] 陈晓君,宋刚,王诗竣,等.中空螺杆马达井底动力绳索取心钻具的研制与试验[J].钻探工程,2024,51(5):36-44.
- [10] 豆旭谦,王力,金新.硬岩定向钻进螺杆钻具性能分析及应用[J].煤矿机械,2020,41(1):3.
- [11] 吴金生,张统得,李晓晨,等.小直径深孔随钻定向纠斜技术在地质钻探中的应用[C]//中国地质学会.第二十届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集.中国地质科学院探矿工艺研究所;四川省核工业地质局;广西第一地质工程公司;河南地勘局第一地质勘察院,2019:81-88.

(编辑 王文)