

煤矿井下小直径定向钻进轨迹控制技术研究 进展与展望

刘芸泽¹, 赵建国^{2*}, 卢帅屹¹, 马银龙¹

(1. 深部探测与成像全国重点实验室, 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 中煤科工西安研究院(集团), 陕西 西安 710077)

摘要:为明确煤矿井下小直径定向钻进轨迹控制的关键问题与发展方向,面向长距离近水平钻孔对轨迹精度、成孔稳定性和施工效率的需求,系统梳理了轨迹偏斜机理、轨迹控制工具、随钻测量与近钻头感知、轨迹预测及智能控制等方面的研究进展。分析表明:煤层、夹矸、碎软煤体、硬质顶底板及构造破碎带等复杂地质条件交替分布,导致钻头受力、孔壁稳定性、钻压传递和岩屑返排状态不断变化,易引起顺层偏离、软硬界面穿层偏斜、硬岩段纠斜效率降低及长距离轨迹偏差累积;小直径条件进一步限制螺杆马达、稳定器、测量短节、供电通信模块和排渣通道的协同集成。现阶段,单弯螺杆钻具仍是主动造斜与纠斜的基础工具,复合定向、旋转导向、PDC钻头、多动力组合钻具和多参数随钻测量可在稳斜、破岩、清孔和反馈方面提供补充,但其小直径适配能力、复杂煤系地层中的运行可靠性及现场闭环验证仍显不足。未来应强化偏斜机理与工程数据耦合,发展小型化近钻头感知和稳定传输技术,推动机理模型与数据驱动模型融合,并将预测结果转化为工具面角、钻压、转速及滑动/回转切换等可执行参数,形成“感知、预测、决策、执行、校验”闭环控制体系。

关键词:煤矿井下;小直径定向钻进;长距离近水平孔;钻孔轨迹控制;随钻测量;轨迹预测;智能控制

中图分类号:P634;TD82 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2026)S1-0048-10

Research advances and prospects in trajectory control technologies for small-diameter directional drilling in underground coal mines

LIU Yunze¹, ZHAO Jianguo^{2*}, LU Shuaiyi¹, MA Yinlong¹

(1. State Key Laboratory of Deep Earth Exploration and Imaging, College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710077, China)

Abstract: To clarify the key issues and development directions of borehole trajectory control for small-diameter directional drilling in underground coal mines, this paper systematically reviews research progress in borehole deviation mechanisms, trajectory-control tools, measurement while drilling, near-bit sensing, trajectory prediction, and intelligent control, with emphasis on the requirements of long-distance near-horizontal boreholes for trajectory accuracy, borehole stability, and drilling efficiency. The analysis shows that the alternating distribution of coal seams, partings, broken soft coal, hard roof and floor rocks, and structural fracture zones causes continuous variations in bit loading, borehole stability, weight-on-bit transfer, and cuttings transport conditions. These variations may result in deviation along bedding planes, cross-layer deviation at soft-hard interfaces, reduced efficiency of borehole deviation

收稿日期:2026-07-28; 修回日期:2026-09-01 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.S1.005

基金项目:陕西省重点研发计划项目(编号:2025CY-YBXM-455)

第一作者:刘芸泽,男,汉族,2003年生,硕士研究生,地质工程专业,研究方向为钻探机具与材料,吉林省长春市朝阳区西民主大街938号, yunze25@jlu.edu.cn。

通信作者:赵建国,男,汉族,1983年生,研究员,地质工程专业,硕士,从事煤矿井下钻探工艺研究工作,陕西省西安市高新区西锦业一路82号,274949130@qq.com。

引用格式:刘芸泽,赵建国,卢帅屹,等.煤矿井下小直径定向钻进轨迹控制技术研究进展与展望[J].钻探工程,2026,53(S1):48-57.

LIU Yunze, ZHAO Jianguo, LU Shuaiyi, et al. Research advances and prospects in trajectory control technologies for small-diameter directional drilling in underground coal mines[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1):48-57.

correction in hard-rock intervals, and cumulative borehole-trajectory errors in long-distance drilling. Small-diameter conditions further constrain the coordinated integration of positive displacement motors, stabilizers, measurement subs, power-supply and communication modules, and cuttings-removal passages. At present, single-bend positive displacement motors remain the basic tools for deflecting and borehole deviation correction. Compound directional drilling, rotary steerable drilling, PDC bits, multi-power drilling assemblies, and multi-parameter measurement-while-drilling systems provide complementary functions in angle holding, rock breaking, flushing and cuttings removal, and information feedback. However, their adaptability to small-diameter boreholes, operational reliability in complex coal-measure strata, and field validation of closed-loop control remain insufficient. Future research should strengthen the coupling between borehole deviation mechanisms and engineering data, develop miniaturized near-bit sensing and reliable data-transmission technologies, promote the integration of mechanism-based and data-driven models, and convert prediction results into executable parameters, including tool face angle, weight on bit, rotary speed, pump discharge, and switching between sliding drilling and rotary drilling, thereby establishing a closed-loop control system integrating sensing, prediction, decision-making, execution, and verification.

Key words: underground coal mine; small-diameter directional drilling; long-distance near-horizontal boreholes; borehole trajectory control; measurement while drilling; trajectory prediction; intelligent control

0 引言

煤矿井下钻探由常规成孔向服务于地质保障和智能开采的精细化工程技术转变^[1-4]。其中,近水平长距离钻孔对轨迹精度、成孔稳定性和施工效率提出更高要求。历经多年发展,我国煤矿坑道钻探装备已初步实现智能化。在顺煤层定向长钻孔实施、长距离大垂距定向钻进实践、随钻测量定向钻进装备研究和复杂顶板高位孔施工等应用中,轨迹控制成为制约中靶精度、成孔质量和施工效率的核心技术环节^[5-8]。

随着开采深度不断增大,软硬复合地层、坚硬顶底板和构造破碎带对钻孔轨迹精度控制的干扰日益突出,长距离钻孔面临偏斜加剧、钻进效率下降和孔内事故频发等多重风险^[9]。近年来自动化钻机、随钻测量系统、旋转导向钻进技术、轨迹预测方法和钻探数字化管控平台成为研究热点^[10]。一体化智能钻进系统提出将钻具姿态参数、钻孔几何参数、地质参数和工况参数纳入统一感知与控制框架^[11]。表明轨迹控制正由经验纠斜向“测量、预测、决策和执行”协同的方向转变。基于此,有必要系统梳理煤矿井下小直径定向钻进轨迹控制的关键问题与发展方向。

实践报道、装备应用试验和专利文献资料表明,煤矿井下定向钻孔直径多处于百毫米级^[12-14]。因此小直径定向钻进主要指煤矿井下百毫米级直径钻孔条件下,导向执行、随钻测量、供电通信及冲洗排渣空间受到显著约束的定向钻进工况。

在小直径钻孔空间约束下,螺杆马达外径、弯

角和输出扭矩受到限制,测量短节、供电通信模块和稳定器难以同时获得充足的布置空间,钻杆内外环空进一步压缩了冲洗介质循环和岩屑返排通道,导致造斜执行能力、测量反馈精度、数据传输速率和事故处理能力同时受限。近钻头测量领域的研究已将结构小型化、防爆模块化、测量协同化和控制整体化确定为关键研究方向^[15]。小直径定向钻具专利体现了测量短节和造斜钻具布置的小型化需求,智能化钻探控制方法与复合供电多参数测量方案,反映出小直径装备正在向控制和测量一体化发展^[16-18]。

煤系地层条件复杂多变,煤层、夹矸、碎软煤体、硬质顶底板和构造破碎带交替发育。不同地层在强度、层理、可钻性和孔壁稳定性上存在明显差异,钻头在软硬界面处会受到不均匀破岩阻力和侧向反力。碎软煤层易出现孔壁失稳和孔内事故^[19],复杂顶板硬岩段可能导致扭矩受限、排渣不畅和成孔可靠性下降^[8],长距离超前钻探还面临轨迹偏差累积和纠斜困难等难题^[9]。小直径钻进条件与复合地层共同作用时,大尺寸导向和测量方案难以直接移植,单弯螺杆钻具、复合定向钻进、旋转导向钻进和随钻测量均需重新考虑煤矿井下空间条件和安全^[3]。

现有研究已构建以单弯螺杆钻具、复合定向钻具、随钻测量系统和智能化钻探平台为主体的技术框架,相关专利成果覆盖轨迹控制、地层识别、旋转导向组合、轨迹跟踪和多参数测量等方向^[20-26]。近年来,近钻头随钻测量、智能化钻探配套钻具、钻孔

测量技术、碎软煤层深孔气动定向钻进现场案例以及煤矿井下钻探技术装备发展等研究成果表明,智能钻探、测量感知与定向控制,已成为煤矿井下钻探技术的研究前沿与核心议题^[27-29]。通用定向钻进领域的机器学习、模型预测控制和实时轨迹预测方法可提供方法参考^[30-33]。

1 煤矿井下小直径定向钻孔轨迹偏斜机制

1.1 小直径定向钻孔轨迹偏斜的影响因素

煤矿井下小直径定向钻进的钻孔偏斜机理与地层性质密切相关。如图1所示,在煤矿井下复杂地质条件下,钻头沿孔深方向不断穿越软硬界面、煤岩界面以及完整岩体与破碎带界面,破岩阻力和孔壁约束随孔深呈非均匀变化。因此,煤矿井下偏斜并非单一方向控制误差,而是非均质地层、孔壁稳定性和钻具受力共同作用的综合结果。

地层因素是诱发钻孔轨迹偏斜的重要外部条件。煤层、夹矸、硬质顶底板、破碎带和构造破碎带在强度、层理、可钻性方面存在明显差异。当钻头两侧接触的岩层力学性质不同时,切削端受力不均,容易产生侧向反力和孔底钻具偏转;当煤岩界面或软硬岩层界面具有一定倾角时,钻头可能沿低阻力方向切削或滑移,表现为顺层漂移、向软弱层

偏移,或在硬层界面处发生抬升、下扎和方位漂移。在碎软煤层和破碎带中,塌孔、掉块及岩屑堆积还会改变钻柱与孔壁的接触边界,进一步增加轨迹突变及孔内事故风险。

小直径条件会进一步加剧上述影响效应,钻具外径、环空间隙和仪器短节长度均受钻孔空间约束。螺杆马达小型化在一定程度上削弱了扭矩输出和本体的耐冲击能力,稳定器和导向执行机构尺寸受限导致稳斜和连续纠斜余量降低,测量短节后移增大了测点到钻头的距离^[15-16],使钻孔轨迹反馈的实时性下降。此外,长距离近水平钻孔具有孔深大、摩阻高的力学特征,多孔施工还受到钻孔空间关系制约^[34]。若钻孔在软硬界面或硬岩段持续偏移,后续纠斜操作会不可避免地增加滑动定向时间、摩阻、排渣压力和事故风险^[13]。

复杂孔内工况会通过改变钻压和扭矩传递、钻柱受力边界及测量反馈质量进一步放大轨迹偏斜。在长距离近水平孔中,钻柱与孔壁之间的摩阻随孔深增加,容易造成托压、工具面响应偏差及孔底有效钻压不足;排渣不畅、岩屑床堆积和冲洗介质循环异常则可能引起附加弯曲、局部卡阻及轨迹突变。工程案例表明,无线随钻测量与螺旋钻杆配合能够改善复杂顶板条件下的排渣效果和成孔质量,

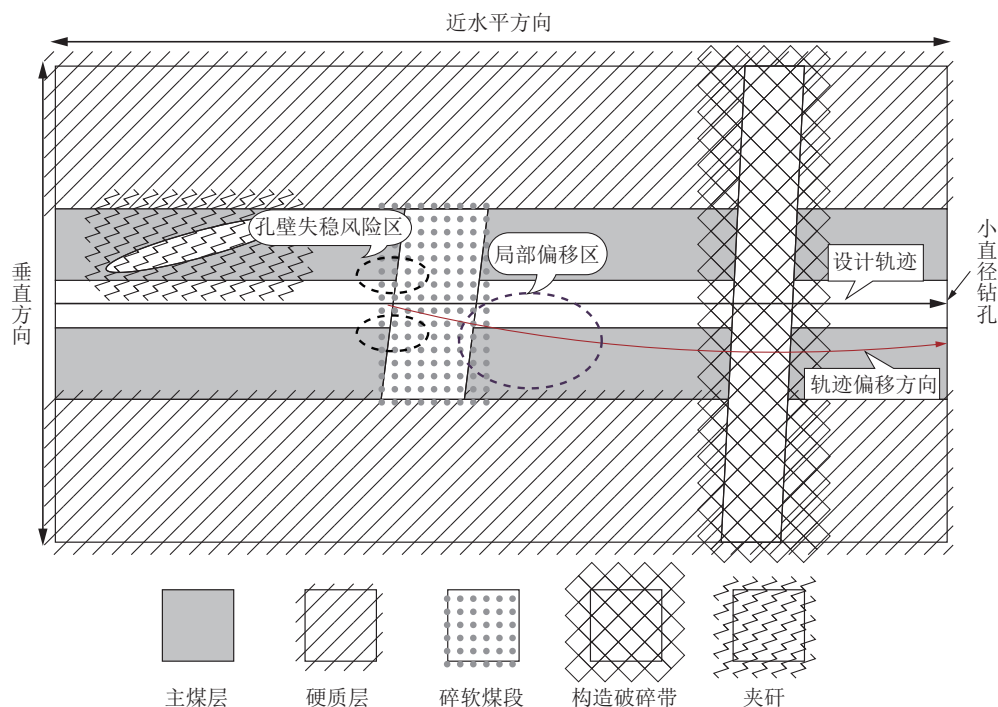


图1 煤矿井下定向钻孔穿越复杂地质条件示意

说明轨迹偏斜不能仅从钻头破岩角度考虑,还应考虑钻柱与孔壁接触、岩屑运移和冲洗介质循环的耦合作用^[35]。此外,测点与钻头之间的空间距离以及信号传输延迟会使测量结果滞后于孔底状态变化,导致偏差识别和纠斜指令不能及时作用于钻头;在长距离和多孔施工条件下,这类局部误差还可能随

孔深累积,增加中靶困难和钻孔空间干扰风险^[34]。

1.2 典型轨迹偏斜模式及工程表征

小直径定向孔的同一轨迹偏差可能由不同因素触发,而同一地层扰动也会因钻具组合和孔内工况不同呈现不同结果。结合现有工程研究,可将典型问题归纳为表 1 所列六类偏斜模式。

表 1 典型偏斜模式及成因

偏斜模式	地层条件	工程表现	工程关注点
顺层偏斜 ^[19]	碎软煤层、层理发育煤层	偏离目标层位,孔壁稳定性下降	调整工具面角、滑动/回转比例和钻压,并在下一测点校核
软硬界面穿层偏斜 ^[6,20]	煤岩界面、夹矸、顶底板过渡带	抬升、下扎或方位漂移	识别界面与入射姿态;协调工具面角、钻压和转速,缩短校验间隔
硬岩段偏斜与低效率 ^[36]	硬质顶底板、硬岩夹层	造斜效率降低,纠斜时间增加	匹配 PDC 钻头或多动力钻具,控制钻压和转速,核查实际造斜率
孔壁失稳诱发偏斜 ^[13-14]	破碎带、碎软煤层、复杂顶板	卡钻、轨迹突变、成孔困难	先恢复孔壁与返排条件,再实施纠斜;异常持续时停止自动建议并人工处置
长距离误差累积 ^[34,37]	长距离、大垂距、多孔施工	中靶困难、串孔风险增加	统一坐标和测点基准,分段比较设计与实钻轨迹,动态修正后续控制量
测量滞后纠斜不及时 ^[35]	测点距钻头远、信号延迟	纠斜决策滞后	优先采用近钻头或多参数测量;标记数据时延与置信度,按下一测点复核

表 1 所列六类模式均可能使实钻轨迹偏离目标窗口,但控制顺序不同:当地层界面或硬岩段引起姿态变化时,应先依据倾角、方位角、机械钻速、扭矩和振动判断偏斜趋势,再调整工具面角、钻压、转速或钻进方式;当泵压、返渣和摩阻异常指向孔壁失稳或排渣受阻时,应先恢复成孔条件,避免在信息失真的状态下继续加大纠斜动作。

综上,复合地层偏斜是地层条件、钻具结构、孔壁稳定性和测量反馈等综合因素耦合的结果。轨迹控制若只依赖经验调整工具面角,难以适应小直径、长距离和软硬互层条件,需要将偏斜机理分析、钻具适应性评价与随钻测量预测结合起来。

2 小直径定向钻进轨迹控制工具体系

2.1 造斜与稳斜执行工具

工具层面的主要矛盾在于:小直径要求钻具整体结构紧凑,长距离孔又要求钻杆柱能够稳定传递钻压、保持工具面、及时纠斜并有效降低摩阻。在地层倾角和钻压波动影响下,过多依赖滑动造斜则会降低效率并增加岩屑堆积与卡钻风险。因此,煤矿井下轨迹控制长期以单弯螺杆钻具为基础^[3],并

逐步发展出双动力复合定向的轨迹控制模式^[20]。

单弯螺杆钻具适用于近水平小直径孔的主动造斜、纠斜和分支孔控制^[20]。保德煤矿 3353 m 顺煤层定向孔工程表明,超长水平定向钻孔可充分反映小直径深孔对该类工具的实际要求,同时需与复合钻进、减阻、随钻测量和冲洗液循环协同配合,才能满足超长顺煤层钻孔的轨迹控制要求^[5]。

复合定向钻具适用于长距离近水平孔和存在局部需纠斜的平顺轨迹孔段。其原理是在需要调整倾角或方位时采用滑动造斜,在需要提高效率和改善成孔质量时切换为复合钻进^[20-21]。研究表明,复合定向对提高成孔深度、改善轨迹平顺性和提高施工效率具有积极效果^[21]。双动力复合定向钻进则通过钻机回转动力与螺杆马达孔底动力协同,提高回转钻进稳斜比例,适用于深孔、硬岩夹层或摩阻较大的孔段。复合定向钻进的关键不是简单增大弯角或钻压,而是在滑动造斜能力、孔径扩大和钻具安全之间折中^[19]。

单弯螺杆钻具和复合定向主要回应了“能够主动实施纠斜”的需求,但仍受滑动钻进效率、钻孔轨迹平顺性和硬岩破岩能力限制。旋转导向系统能

够在钻具连续回转状态下实现钻孔轨迹的实时调整,从而有效减少长时间滑动钻进造成的摩阻增大和排渣不畅。煤矿井下旋转地质导向和埋线旋转导向钻具组合相关专利指出,该方向已开始面向小直径工况开展专门设计^[25]。但其不足也明显:各类组件受小直径空间制约,煤系软硬互层中推靠力与地层响应匹配难度大。因此,旋转导向可作为重要发展方向,但工程成熟度仍需通过现场试验进行验证。

2.2 定向钻进破岩工具

硬质顶底板、夹矸及软硬互层常常导致机械钻速降低、钻压传递不稳定,并增加钻头侧向受力和轨迹控制难度。PDC钻头主要通过切削齿布置、冠部轮廓和水口结构优化,提高硬岩及软硬互层孔段的破岩效率和钻进稳定性^[38]。PDC钻头本身不承担主动造斜或纠斜功能,其对轨迹控制的作用主要体现在稳定破岩过程、减小钻头受力波动,并为导向钻具保持稳定响应提供良好的条件。

除破岩工具外,部分辅助成孔工具可通过改善钻压传递和岩屑返排条件,间接提高长距离钻孔的轨迹稳定性。硬岩多动力组合钻具通过回转、轴向冲击或扭转冲击提高硬岩破碎能力^[36];定向钻扩一体化钻具利用定向先导孔控制扩孔路径,适用于需要先导定向和后续扩孔的工程^[39];近水平超深孔钻柱动力推进系统通过推进器和岩屑床清洗器改善钻压传递、长距离推进和排渣^[37]。此类工具针对性较强,其选用应综合考虑地层性质、孔深、孔径、冲洗介质和钻机能力等因素。

针对硬岩孔段空间偏差较大和纠斜效率较低的问题,自适应防偏钻具可通过调整钻具支撑状态和受力特征,减小特定试验条件下的钻孔空间偏差^[9]。PDC钻头则主要用于改善硬岩破碎与扩孔效率,二者作用机理不同。上述工具的实际效果还受地层条件、钻具组合、钻压、转速、泵量和随钻测量精度等多重因素影响,不能仅依据单一工具判断轨迹控制能力。

总体而言,破岩与辅助成孔工具并非轨迹控制的直接执行机构,但能够通过稳定破岩、改善钻压传递和岩屑返排条件,为单弯螺杆钻具、复合定向钻具及旋转导向钻具实施造斜、稳斜和纠斜提供必要的孔底条件。

2.3 随钻测量与近钻头感知工具

造斜工具能否发挥作用,取决于随钻测量数据反馈能否及时、准确并与执行机构匹配。按集成方式和信号传输路径,煤矿井下随钻测量装备可分为常规随钻测量、近钻头测量和多参数工况监控三类,三者分别对应不同的仪器结构约束和工程配套要求。

常规随钻测量以防爆测量探管为核心,通过通缆、泥浆脉冲、电磁波或记录式方式传输倾角、方位角和工具面角。其仪器结构相对成熟,已广泛配套于顺煤层定向长钻孔、复杂顶板高位定向孔和超前探查定向孔施工^[3,7]。工程实践结果表明^[13],测量仪器的选配需与螺杆钻具规格、钻杆排渣能力和孔径同步确定,仅靠仪器本身无法保证复杂孔段的纠斜执行效果。

近钻头测量适用于目标窗口窄、软硬互层频繁和测量滞后明显的孔段。其原理是将参数测量单元尽量靠近钻头布置,结合跨螺杆供电通信技术、涡轮发电原理或高速泥浆脉冲传输手段,获取近钻头位置钻具姿态、工具振动、孔底压力、扭矩和地层响应信息。其主要作用是缩短测点与钻头之间距离,为偏斜预判、异常识别和工具面角修正提供更直接的数据支撑。其不足之处主要集中在小直径煤矿井下应用场景:仪器需实现小型化、防爆模块化和抗冲击设计,跨螺杆供电通信难度大,传感器抗震性和信号稳定性仍需提高^[15]。图2展示了几种常见定向钻进轨迹控制工具。

多参数随钻测量和工况监控系统进一步把轨迹几何参数与动力参数、供电状态、地层特性和孔内环境联系起来。多参数随钻测量系统通过双向输出螺杆马达、复合供电测量探管、有线传输随钻测量钻杆和随钻测量送水器组合,实现钻进和停钻工况下的多参数动、静态全时采集;随钻监控系统可用于特定冲洗介质条件下的流量、压力、温度和返流参数监测^[40]。

总体来看,煤矿井下小直径定向钻进轨迹控制需要造斜执行、钻具组合、钻头破岩和测量感知等工具协同配合。各类工具在主动纠斜、稳斜保向、硬岩破岩、排渣清孔和随钻反馈中的作用各有侧重,适用边界也受孔径、孔深、地层条件和装备配套能力限制。为便于比较不同工具的功能定位和工程适用性,汇总如表2所示。

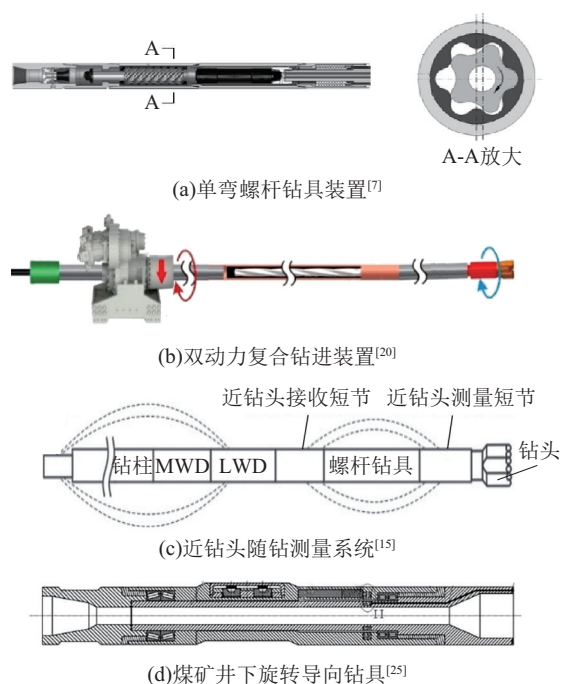


图2 常见定向钻进轨迹控制工具

从具体问题看,连续造斜能力不足、小直径钻具集成受限、硬岩破岩效率低、测量与供电通信受限、扩孔和长距离推进困难,是当前装备层面反复出现的主要约束。针对这些问题,相关专利主要集中在旋转导向、小直径钻具、多参数测量、硬岩破岩和钻柱推进等方向,但由于普遍缺少连续现场数据,仅将其作为技术布局的参考依据,不用于直接评价控制效果。

对于公开工程案例和研究报道,从孔径、孔深、地层条件、主要问题、工具组合、测量方式以及实际施工效果等方面进行归纳比较。通过比较不同工程场景下的工具组合、测量方式和施工效果,可以判断各类轨迹控制技术的适用边界,并识别长距离摩阻、岩屑返排、测量传输、硬岩纠斜和小直径集成等主要瓶颈。表3汇总了代表性现场工程与参数研究成果。

表2 小直径定向钻进轨迹控制工具体系和适用边界

工具层级	技术对象	作用	适用条件	主要局限
造斜工具	单弯螺杆钻具;复合/双动力复合定向;旋转导向	造斜、稳斜、连续纠斜	近水平长孔、局部纠斜、精确中靶孔段	滑动排渣受限;复合定向依赖人工经验与钻进参数控制;旋转导向小直径可靠性待验证
破岩工具	PDC钻头;硬岩多动力钻具;扩孔/推进清孔工具	提高破岩、扩孔和清孔能力	硬岩夹层、复杂顶板、超深孔段	需与螺杆、钻压、转速、泵量和测量协同
测量工具	MWD;近钻头测量;多参数随钻监控	获取轨迹、工况和地层响应	测量滞后明显、目标窗口窄、复杂地层孔段	小型化、防爆、供电通信和传感器耐久性受限

总体来看,煤矿井下造斜工具是在小直径、近水平和煤矿井下复杂地层约束下形成多工具协同体系。单弯螺杆钻具仍是基础,复合定向有助于提高效率 and 轨迹平顺性,旋转导向代表连续纠斜方向,PDC钻头和动力组合钻具可针对特定地层问题提供补充,随钻与近钻头测量提供反馈条件。证据强度上,应优先采用公开工程案例和现场数据,其次采用装备试验与煤矿数据验证;专利文本主要说明结构方案或控制思路,油气及通用算法文献只作为方法借鉴。主要不足是工具参数与地层响应匹配不足、小直径集成难度大,以及工具能力与预测控制尚未稳定闭环^[41]。

3 轨迹预测与智能控制方法

工具造斜能力并不等同于钻孔轨迹控制效果。钻头进入软硬互层界面、硬岩夹层或破碎带后,孔底受力和孔壁边界先于测量反馈发生变化,而常规测点参数采集、工具面角调整和地面控制决策存在滞后。单次偏差还会随孔深累积^[34]。因此,控制方法由“发现偏差后人工调整工具面”,转向“随钻测量识别偏差、模型预测趋势、智能控制辅助纠斜”^[35]。这一转变的关键在于明确模型输入需求、输出能否转化为现场可执行参数,以及预测结果是否经过煤矿井下工况验证。轨迹预测方法与现场控制执行之间的内在联系如图3所示。

3.1 轨迹测量、跟踪与偏差识别

常规随钻测量技术能够获得孔深、倾角、方位

表3 代表性工程与研究参数

场 景	孔径与孔深	问 题	工具与测量方式	实际效果或数据	局限与启示
保德煤矿顺煤层超长孔 ^[5]	孔径 120 mm, 主孔深度 3353 m	摩阻大、传输距离长	单弯螺杆钻具; 复合钻进; 泥浆脉冲随钻测量系统	完成 3353 m 顺煤层贯通定向孔	依赖减阻、测量传输和冲洗液循环
淮南复杂顶板高位孔 ^[13]	10 个孔, 孔深均 501 m, 孔径 120 mm, 总进尺 5010 m	断层、塌孔、憋压、轻微卡钻	Ø89 mm 螺旋钻杆; Ø120 mm 定向钻头; Ø120/Ø200 mm 扩孔钻头	通过 363 m、372 m 断层孔段; 总进尺 5010 m	测量、排渣和孔径保持需配套
阳泉碎软煤层深孔 ^[14]	孔径 120 mm, 10 个孔均超过 450 m, 最深 607 m, 累计 5380 m	排渣困难、事故风险高	Ø89 mm 气动螺杆; 有线随钻测量; 气动套铣打捞	最大单班 76 m; 处理 2 起严重卡钻事故	气源、排渣、测量和打捞共同制约
长距离快速超前钻探防偏试验 ^[9]	对比孔深 204 m	倾角下降、空间偏差大	自适应防偏钻具; Ø91 mm 三翼内凹钻头	上下偏差由 14.51 m 降至 4.1 m; 左右偏差 3.9 m	需匹配地层和钻进参数
双动力复合定向参数研究 ^[20]	适用于 3000 m 以上超深定向长孔试验	滑动造斜与回转稳斜耦合	双动力复合定向; 准动力学模型	弯角 1.25° 或 1.5°; 40~60 r/min; 扩径率 4%~6%; 稳斜孔段 < 80%	弯角、钻压和扩径率需折中

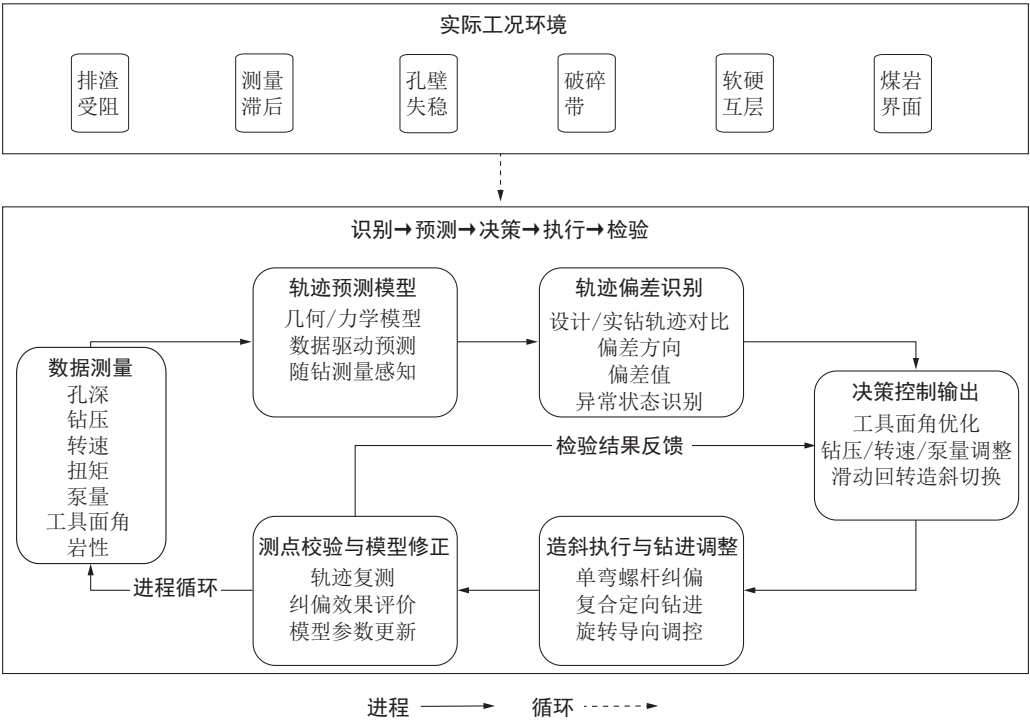


图3 煤矿井下定向钻进轨迹预测与智能控制框架^[42-45]

角和工具面角,但测点与钻头之间的空间距离导致以上参数信息测量反馈滞后^[7]。近钻头测量通过缩短测点与钻头之间的距离可提供更直接的偏差识别数据,但仍受小型化、供电通信、防爆和抗冲击性能限制^[15]。

轨迹跟踪进一步解决“测量后如何判断偏差并给出控制量”的问题。早期轨迹预测与控制专利基于钻孔几何参数计算后续孔段的纠斜方向与工具面角^[46-47]。矿用定向钻孔轨迹跟踪专利进一步考虑钻具自重、预测轨迹到设计轨迹的距离约束^[26]。这

类方法适用于轨迹数据较完整、工具响应较稳定的孔段,不足是模型往往简化地层、钻具和孔壁相互作用,在岩性突变、孔壁失稳或工具响应不稳定时需现场校验。多孔施工时还可依据相邻钻孔空间坐标和下一测点预测结果识别串孔风险,但其可靠性受测量精度、坐标统一性和异常数据制约^[34]。

3.2 轨迹预测方法

轨迹预测的作用是根据已有测点、钻具组合、钻进参数和地层条件,判断后续孔段的偏移趋势及纠斜控制量。现有方法可分为模型驱动预测和数据驱动预测两类。模型驱动预测方法主要基于钻孔几何关系、三点定圆、平衡正切、钻具受力或孔底组合简化模型,具有物理含义清楚、计算量小、便于嵌入随钻测量软件等优点;但在煤矿中,孔径扩大、塌孔、岩屑床和摩阻变化会改变实际造斜响应,使预测结果对假设条件较为敏感。

Wei等^[30]建立了基于BP神经网络的近水平定向钻孔轨迹预测模型,用于预测钻头倾角和方位角;Yan等^[31]采用随机森林预测钻孔三向位移增量。该类方法在数据来源和钻具组合相对一致时具有较好精度,但对样本规模、特征完整性和跨矿区泛化能力依赖明显。

深度学习、在线学习和误差补偿方法可作为发展参考。Gao等^[42]采用LSTM/FCNN类方法进行井斜序列预测;Tunkiel等^[33]提出钻进过程中同步训练和更新模型思路;Zhou等^[43]利用BP神经网络补偿随钻测量系统姿态角误差。这些研究的共同启示是,轨迹预测正由离线经验模型向随钻更新和测量误差补偿方向发展。但对煤矿井下小直径钻进而言,数据连续性、模型部署、防爆通信、跨矿区迁移和现场执行参数转换仍需进一步验证。

油气钻井中的模型预测控制和轨迹控制专利为约束优化提供了方法参考,主要围绕基于孔深的偏差识别、通用轨迹控制和地层评价反馈展开^[48-50]。但其工具尺度、通信条件和施工环境与煤矿井下差异明显,尚不能作为煤矿现场适用性的直接证据。

3.3 随钻感知融合与智能闭环控制

轨迹参数只能描述已经形成的几何结果,闭环控制还需融合钻进参数、地层响应和孔内工况。现有研究已利用多模态钻进数据、钻屑图像和机器学习方法识别岩性及卡钻风险,可为偏斜原因判断和控制决策提供辅助信息,但仍受数据同步、钻屑滞

后、样本标注和跨矿区泛化限制^[24,35]。

现有智能控制研究主要通过模块化平台融合轨迹、地质和工程参数,并依据轨迹偏差输出工具面角、补偿参数及滑动钻进或回转钻进建议^[23,45];多参数随钻测量系统则为姿态、工况和数据传输提供基础^[18]。这些研究初步连接了感知、预测和决策环节^[44],但仍受数据接口、执行机构、现场校验及孔内不确定性制约。

为比较不同轨迹测量、预测与智能控制方法的技术特征,依据已有研究,从主要输入、主要输出、验证效果和主要局限等方面进行归纳,结果见表4。现有方法已基本覆盖随钻监测、偏差识别、轨迹预测和辅助决策等环节,但不同方法的验证条件和技术成熟度差异较大,能够完成控制参数生成、现场执行及后续测点校验的闭环研究仍较少。

综合表4可知,煤矿井下小直径定向钻进轨迹控制可概括为“感知、预测、决策、执行、校验”的闭环技术路径。感知层获取轨迹、地层和工况信息;预测层判断后续轨迹偏移趋势;决策层生成工具面角、钻压、转速、泵量及钻进方式等控制建议;执行层依托单弯螺杆钻具、复合定向钻进、旋转导向钻进或钻机控制系统实施纠斜;校验层利用后续测点修正预测模型和控制参数。目前,多数研究仍处于随钻监测、趋势预测或辅助决策阶段,受小直径空间、供电通信、执行机构及现场数据规模限制,预测结果向现场控制参数的稳定转换和闭环验证仍不充分。

4 结论与展望

(1)煤矿井下小直径定向钻孔轨迹偏斜是地层非均质性、钻具受力、孔壁状态、岩屑返排和测量滞后共同作用的结果,主要表现为顺层偏离、软硬界面穿层偏斜、硬岩段纠斜效率低和长距离轨迹偏差累积。小直径条件进一步限制导向工具、测量短节、供电通信模块和岩屑返排通道的协同集成,使轨迹控制成为地层、钻具、孔壁和测量反馈耦合的系统问题。

(2)单弯螺杆钻具仍是煤矿井下造斜和纠斜的基础工具,双动力复合定向钻进可兼顾钻进效率与钻孔轨迹平顺性,旋转导向钻进代表未来连续纠斜的发展方向,PDC钻头、硬岩多动力组合钻具及扩孔、推进和清孔工具可改善硬岩破碎、钻压传递与

表4 轨迹预测与智能控制方法对比

方法类型	主要输入	主要输出	实际效果	主要局限
随钻轨迹测量与偏差识别	孔深、倾角、方位角、工具面角；近钻头姿态/振动/压力/扭矩	实钻轨迹、测点偏差、孔底状态	随钻监测；近钻头缩短滞后	供电通信、防爆、小型化受限
轨迹跟踪与防串孔预测	测点姿态、坐标、相邻孔关系	下一测点坐标、串孔风险、工具面角	软件集成；空间风险提示	依赖测量精度和坐标管理
几何/力学轨迹预测	设计/实钻轨迹、测点间距、钻具姿态、工具响应	后续轨迹、纠斜方向或控制量	可解释，便于嵌入测量软件	塌孔、扩径、岩屑床和摩阻会改变实际响应
机器学习与随钻更新	历史轨迹参数、控制参数、方位角、倾角、弯角、连续轨迹序列、实时传感器和姿态角数据	钻头处倾角/方位角、三向位移增量、超前井斜预测、姿态误差补偿	BP误差约0.51°和0.68°；随机森林水平/上下误差约1%、左右约9%；深度学习可捕捉序列相关性	样本规模、数据质量、跨矿区泛化和井下实时部署仍需验证
模型预测控制与智能决策	轨迹偏差、约束、工具面角、钻进参数	工具面角、补偿参数、滑动/回转建议	支撑约束优化和平台化决策	控制建议到现场参数仍需校验
地层/工况智能识别融合	钻进参数、钻屑图像、姿态和工况数据	岩性识别、卡钻或异常预警	用于岩性和卡钻预测	钻屑滞后、光照污染、泛化受限

岩屑返排条件。随钻测量、近钻头测量和多参数工况监测为偏差识别及控制决策提供了数据基础。但现有技术仍存在工具参数与地层响应匹配不足、小直径集成难度大、稳定供电通信能力有限以及复杂地层现场可靠性不足等问题。其中，单弯螺杆钻具和常规随钻测量已具有较丰富的工程应用基础，旋转导向、近钻头多参数感知和智能闭环控制仍需加强现场验证。

(3)轨迹预测与智能控制正在由几何轨迹外推向地层、钻具和工况多源信息融合发展，但现有研究多停留在随钻监测、趋势预测和辅助决策阶段。

后续工作宜分三阶段推进：(1)完成轨迹、钻进、地层和孔内工况数据的时间与深度同步，记录传感器位置、采样时延、缺失值和异常状态，输出带置信度的数据；(2)在孔径、工具曲率、钻压与扭矩能力、泵量和安全规则约束下，利用机理与数据混合模型预测后续轨迹，生成工具面角、钻压、转速、泵量及滑动/回转切换建议，并由现场人员确认；(3)依托单弯螺杆、复合定向或旋转导向工具等执行，在下一测点以设计与实钻轨迹偏差、实际造斜率、轨迹平顺性、机械钻速、异常率和人工接管情况进行校验。若结果未达预期、模型置信度不足或工况异常扩大，应回退至人工控制并更新模型。验证可先从同一矿区、同一钻具组合的连续孔段试验开始，再扩展至不同地层和矿区。

参考文献：

- [1] 石智军,姚克,姚宁平,等.我国煤矿井下坑道钻探技术装备40年发展与展望[J].煤炭科学技术,2020,48(4):1-34.
- [2] 李泉新,刘飞,方俊,等.我国煤矿井下智能化钻探技术装备发展与展望[J].煤田地质与勘探,2021,49(6):265-272.
- [3] 杨冬冬,张幼振,李泉新,等.我国煤矿区定向钻进轨迹控制关键技术及发展趋势[J].煤炭科学技术,2026,54(2):60-78.
- [4] 姚宁平,姚亚峰,方鹏,等.我国煤矿坑道钻探装备技术进展与展望[J].钻探工程,2021,48(1):81-87.
- [5] 石智军,董书宁,杨俊哲,等.煤矿井下3000 m顺煤层定向钻进关键技术[J].煤田地质与勘探,2019,47(6):1-7.
- [6] 郝世俊,彭旭.煤矿井下长距离大垂距定向钻进工艺精准透巷技术研究[J].煤炭科学技术,2019,47(5):47-52.
- [7] 石智军,姚克,田宏亮,等.煤矿井下随钻测量定向钻进技术与装备现状及展望[J].煤炭科学技术,2019,47(5):22-28.
- [8] 王鲜,李泉新,许超,等.顶板复杂岩层无线随钻测量复合定向钻进技术[J].煤矿安全,2019,50(9):88-91.
- [9] 刘送永,徐保龙,秦立学,等.煤矿巷道掘进长距离快速超前钻探工艺策略及配套机具研究[J].煤炭科学技术,2023,51(S2):229-239.
- [10] 石智军,李泉新,姚克.煤矿井下智能化定向钻探发展路径与关键技术分析[J].煤炭学报,2020,45(6):2217-2224.
- [11] 雷晓荣.“孔-井-地”一体化智能钻进系统及关键技术[J].煤炭科学技术,2020,48(7):274-281.
- [12] 金鑫.煤矿井下硬岩定向钻进螺杆马达选型及试验[J].煤田地质与勘探,2018,46(1):176-180.
- [13] 童碧,许超,王鲜,等.淮南矿区复杂顶板高位定向孔复合排渣钻进技术[J].煤炭科学技术,2020,48(S1):140-143.
- [14] 刘飞,李泉新,方俊,等.阳泉矿区碎软煤层深孔气动定向钻进关键技术与实践[J].煤田地质与勘探,2024,52(9):184-191.
- [15] 郝世俊,褚志伟,李泉新,等.煤矿井下近钻头随钻测量技术研究现状和发展趋势[J].煤田地质与勘探,2023,51(9):10-19.

- [16] 山西汾西矿业(集团)有限责任公司.一种煤矿井下小直径定向钻具:202022273960.9[P].2021-08-03.
- [17] 山西朗腾信息科技有限公司.一种煤矿井下水平定向智能化钻探控制方法:202410021043.1[P].2024-02-06.
- [18] 中煤科工西安研究院(集团)有限公司.煤矿井下复合供电全工况多参数随钻测量系统及方法:202211122020.7[P].2022-12-09.
- [19] 王力,姚宁平,姚亚峰,等.煤矿井下碎软煤层顺层钻完孔技术研究进展[J].煤田地质与勘探,2021,49(1):285-296.
- [20] 李泉新,褚志伟,许超,等.煤矿井下双动力复合定向钻进轨迹调控研究[J].工矿自动化,2021,47(12):25-31.
- [21] 赵建国,赵江鹏,许超,等.煤矿井下复合定向钻进技术研究与应用[J].煤田地质与勘探,2018,46(4):202-206.
- [22] 姚克,李泉新,方俊,等.煤矿井下旋转地质导向钻进技术装备研究[J].煤炭科学技术,2022,50(12):36-42.
- [23] 中煤科工西安研究院(集团)有限公司,中国地质大学(武汉).一种基于分段模糊控制的定向钻孔轨迹控制方法及控制系统:202211012746.5[P].2022-12-06.
- [24] 中煤科工西安研究院(集团)有限公司.一种煤矿井下回转钻进地层岩性智能识别方法:202510209526.9[P].2025-07-04.
- [25] 中煤科工集团西安研究院有限公司.一种煤矿井下埋线旋转导向钻具组合及工控方法:202110126987.1[P].2021-06-01.
- [26] 太原理工大学.一种矿用定向钻孔轨迹跟踪方法、系统及可存储介质:202111177820.4[P].2021-12-03.
- [27] 高晓亮.煤矿井下智能化钻探配套钻具研究进展[J].煤田地质与勘探,2023,51(10):156-166.
- [28] 陈龙,杨冬冬,李泉新,等.煤矿井下钻孔测量技术研究现状及发展趋势[J].煤田地质与勘探,2025,53(11):222-237.
- [29] 田宏亮,李旺年,李泉新,等.我国煤矿井下钻探技术装备50年发展与展望[J].煤田地质与勘探,2026,54(5):308-329.
- [30] Wei H C, Yao N P, Tian H L, et al. A predicting model for near-horizontal directional drilling path based on BP neural network in underground coal mine [J]. Jaciii, 2022, 26 (3): 279-288.
- [31] Yan B Y, Zhang X T, Tang C X, et al. A random forest-based method for predicting borehole trajectories [J]. Mathematics, 2023, 11(6): 1297.
- [32] Georgiou A, Evangelou S A, Jaimoukha I M, et al. Tracking control for directional drilling systems using robust feedback model predictive control [J]. IFAC PapersOnLine, 2020, 53 (2): 11974-11981.
- [33] Tunkiel A, Dan S, Tomasz W. Training-while-drilling approach to inclination prediction in directional drilling utilizing recurrent neural networks [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 196.
- [34] 董洪波,马斌,张阳阳,等.煤矿井下定向钻进防穿孔方法及应用[J].煤炭科学技术,2022,50(4):271-276.
- [35] 张幼振,李泉新,李旺年,等.煤矿井下随钻智能感知技术研究与应用[J].煤炭科学技术,2026,54(4):320-332.
- [36] 中煤科工集团西安研究院有限公司.煤矿井下煤层底板硬岩多动力定向组合钻具及其成孔方法:201910856973.8[P].2021-01-08.
- [37] 中煤科工集团西安研究院有限公司.煤矿井下近水平超深孔定向钻进钻柱动力推进系统及方法:201810728314.1[P].2019-12-31.
- [38] 中煤科工集团西安研究院有限公司.一种煤矿井高位定向钻进用PDC钻头:202010599190.9[P].2021-09-14.
- [39] 中煤科工集团西安研究院有限公司.煤矿井下定向钻扩一体化钻具及定向钻进随钻扩孔方法:202110338778.3[P].2022-06-24.
- [40] 中煤科工集团西安研究院有限公司.一种煤矿井下气体定向钻进用随钻监控系统及方法:202111049562.1[P].2024-04-16.
- [41] 李泉新,刘飞,董洪波,等.深部煤炭开采地质保障智能钻进系统及关键技术[J].煤炭学报,2026,51(S1):540-553.
- [42] Gao Y, Wang N, Li F. Steering drilling wellbore trajectory prediction based on the NOA-LSTM-FCNN method [J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 5215.
- [43] Zhou Y, Xu Y C, Cui Y, et al. Accurate prediction of attitude angles in the measurement while drilling system through back-propagation neural networks [J]. Measurement Science and Technology, 2025, 36(6): 065101.
- [44] Li W N, Wu M, Yao K, et al. Design of an intelligent control system for underground directional drilling trajectory in coal mines[C]//41st Chinese Control Conference (CCC). 2022.
- [45] Li W N, Wu M, Chen S P, et al. Design of an intelligent control system for compound directional drilling in underground coal mines [J]. Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2024, 28(4): 1052-1062.
- [46] 中煤科工集团西安研究院.一种煤矿井下定向钻孔轨迹预测方法:201310272813.1[P].2013-09-25.
- [47] 中煤科工集团西安研究院有限公司.煤矿井下定向钻孔轨迹控制方法:201610285963.X[P].2019-06-28.
- [48] Hoehn O, Neubert M, Peter A, et al. Depth-based borehole trajectory control; US202016935741[P]. 2023-12-19.
- [49] Services E H, Inc. Trajectory control for directional drilling; AU2020426033[P]. 2022-06-23.
- [50] Services E H, Inc. Trajectory control for directional drilling using formation evaluation measurement feedback; AU2020045706[P]. 2025-05-22.

(编辑 王文)