

煤矿地质防治水中定向钻进技术的应用优势及效果分析

刘宝晶

神木县隆德矿业有限责任公司，陕西省榆林市神木市，719300；

摘要：水害是煤矿安全生产的重大隐患，尤其在深部开采与复杂地质条件下，传统钻进技术因轨迹可控性差、覆盖范围有限、效率低等问题，难以满足精准防治水需求。定向钻进技术凭借“轨迹精准控制、多分支覆盖、探测-治理一体化”核心特性，成为煤矿地质防治水的关键技术手段。本文系统阐述定向钻进技术的原理与核心设备，从轨迹可控性、覆盖范围、施工效率、功能集成、安全保障五个维度分析其应用优势，并结合含水层探测、注浆堵水、疏水降压三类典型防治水场景，量化分析技术应用效果。

关键词：煤矿地质防治水；定向钻进技术；应用优势；效果分析

DOI：10.69979/3041-0673.26.02.051

引言

我国煤矿开采逐步向深部（埋深 $>800\text{m}$ ）与复杂地质区域推进，受断层、褶皱、溶洞等地质构造影响，含水层与采空区积水引发的水害风险显著攀升。据行业统计，深部煤矿水害事故中，70%以上与传统防治水技术的局限性相关——常规回转钻进技术仅能实现“直线型”钻孔，无法绕开断层破碎带或精准抵达目标含水层，导致探测数据偏差大；单孔覆盖面积不足 1000m^2 ，需密集施工钻孔，不仅增加成本，还易引发孔壁坍塌等安全。

定向钻进技术通过随钻测量（MWD）与导向控制技术，实现钻孔轨迹的三维动态调整，可在复杂地质条件下精准穿梭于目标区域，同时集成“探测-注浆-疏水”多功能，有效弥补传统技术短板。本文聚焦该技术在煤矿地质防治水中的应用逻辑，从技术原理、核心优势到实际效果展开系统分析，为其规模化应用提供理论与实践参考^[1]。

1 煤矿定向钻进技术原理与核心设备

1.1 技术核心原理

定向钻进技术以“实时监测-动态导向-轨迹修正”为核心逻辑，通过三大关键环节实现精准钻进：

轨迹设计：基于煤矿地质勘探数据，利用专用软件（如 Landmark 定向设计系统）预设三维钻孔轨迹，明确靶点坐标、拐点角度（通常 $\leq 15^\circ/100\text{m}$ ，避免钻杆疲劳）与分支孔布局；

随钻监测：钻进过程中，随钻测量仪（MWD）实时采集钻孔参数，包括顶角（钻孔与水平面夹角，精度 $\pm 0.1^\circ$ ）、方位角（钻孔轴线在水平面投影与正北方向夹角，精度 $\pm 0.5^\circ$ ）、工具面角（导向工具的倾斜方向，

精度 $\pm 1^\circ$ ），数据通过泥浆脉冲或电磁波传输至地面控制系统；

动态导向：地面系统对比实测轨迹与设计轨迹，若偏差超 5%，通过调整导向工具改变钻进方向——例如当钻孔偏离含水层靶点时，增大工具面角使钻杆向靶点方向偏移，直至轨迹回归设计路径。

1.2 核心设备组成

定向钻进系统由“钻进动力-导向控制-监测传输-辅助保障”四类设备构成，关键参数与功能如下：

定向钻机：采用全液压驱动，常见型号如 ZDY6000LD 型（额定扭矩 $6000\text{N}\cdot\text{m}$ ，额定转速 $0\sim 120\text{r/min}$ ），具备恒扭矩、恒转速调节功能，可适应硬度 $f=10\sim 15$ 的岩石地层；

随钻测量仪（MWD）：分为泥浆脉冲式与电磁波式，前者适用于水基钻井液环境，测量深度可达 1500m ，后者适用于无水干钻场景，信号传输延迟 $<0.5\text{s}$ ，核心参数（顶角、方位角）测量误差 $\leq 0.2^\circ$ ；

导向工具：以单弯螺杆钻具为主（弯角 $1.25^\circ\sim 2.5^\circ$ ），通过改变弯外壳角度调整钻进方向，配合 PDC 钻头（聚晶金刚石复合片钻头），在砂岩地层钻进速度可达 $8\sim 12\text{m/h}$ ，较传统合金钻头提升 50%；

高强度钻杆：采用 S135 级合金钢材质，外径 73mm 或 89mm ，抗扭强度 $\geq 1200\text{MPa}$ ，抗疲劳寿命 ≥ 1000 次起下钻，可耐受复杂地层的冲击与磨损；

辅助设备：包括泥浆循环系统（提供钻井液，冷却钻头并携带岩屑，钻井液黏度控制在 $30\sim 50\text{s}$ ，确保岩屑悬浮）、孔壁加固装置^[2]。

2 定向钻进技术在煤矿防治水中的应用优势

2.1 轨迹可控性强，适配复杂地质条件

传统回转钻进的钻孔轨迹偏差率常超 15%，尤其在穿越断层或软硬岩交互地层时，易偏离目标区域；而定向钻进通过 MWD 实时监测与动态导向，轨迹偏差可控制在 5% 以内，具备三大适配能力：

绕障能力：当遇到断层破碎带（宽度 > 2m）或采空区积水时，可通过调整轨迹绕开隐患区域，避免钻杆卡钻或钻孔涌水；

精准定位：能按设计轨迹垂直或水平穿越目标含水层，例如在灰岩岩溶水防治中，可精准抵达溶洞发育区，确保探测数据与治理措施直达核心区域；

分层作业：针对多层含水层，可设计“阶梯式”轨迹，逐层探测或治理，避免不同含水层串通引发次生水害。

2.2 覆盖范围广，降低钻孔施工成本

定向钻进通过“主孔+分支孔”布局，大幅扩大单孔覆盖面积：

分支孔扩展：在主孔钻进至目标层后，可施工 3-5 个分支孔，分支间距 20-50m，单孔覆盖面积可达 3000-5000m²，是传统直线钻孔（覆盖面积 800-1200m²）的 3-5 倍；

减少钻孔数量：以某井田防治水工程为例，传统技术需施工 25 个钻孔覆盖 10 万 m² 区域，而定向钻进仅需 6 个分支孔即可实现全覆盖，钻孔数量减少 76%，节省设备投入与施工时间；

降低巷道占用：定向钻孔可从地面或现有巷道开孔，无需额外掘进专用钻场，减少巷道掘进量 30%-40%，间接降低成本。

2.3 施工效率高，缩短防治水周期

传统技术存在“起下钻频繁、工序衔接慢”问题，而定向钻进通过“一次成孔+多功能集成”提升效率：

连续钻进：采用“不提钻换钻头”技术，通过钻杆内通道输送新钻头至孔底，起下钻时间减少 60%，单孔施工周期从传统 15 天缩短至 7-10 天；

高速钻进：PDC 钻头配合螺杆钻具，在 f=8-12 的砂岩地层钻进速度达 8-12m/h，较传统合金钻头（4-6m/h）提升 50%；在 f=13-15 的硬岩地层，通过优化钻井液黏度（40-50s）与钻压（15-20kN），钻进速度仍可达 5-7m/h；

工序集成：无需更换设备即可完成“探测-注浆-监测”全流程，例如在含水层探测后，直接通过钻杆注入注浆材料，工序衔接时间从传统 48 小时缩短至 8 小时。

2.4 功能一体化，实现“探测-治理-监测”闭环

定向钻进技术突破传统“探测与治理分离”的局限，可同步完成三类核心任务：

精准探测：钻进过程中，通过钻杆内通道采集岩屑样品（每 5m 取样 1 次），结合 MWD 数据与水文观测，确定含水层厚度（误差 ≤ 5%）、渗透系数（误差 ≤ 8%）与水位标高（误差 ≤ 0.5m）；

高效治理：针对富水区域，可通过分支孔实施“全方位注浆”——注浆压力控制在 1.2-1.5 倍含水层水压，浆液扩散半径达 5-8m，形成连续止水帷幕；若需疏水降压，可设计大孔径定向孔（孔径 150-200mm），单孔疏水量可达 50-100m³/h；

动态监测：治理完成后，保留部分分支孔作为长期观测孔，通过安装压力传感器实时监测含水层水压变化，数据传输至矿井水害监测平台，实现防治效果的持续跟踪。

2.5 安全系数高，降低作业风险

传统钻孔施工中，巷道揭露含水层时易引发突水，且人员需在钻场附近作业，安全风险高；定向钻进通过“远距离操控+减少巷道揭露”降低风险：

远程控制：地面或井下控制室可实现钻进参数的远程调节，人员无需靠近孔口，避免钻孔涌水或孔壁坍塌造成的伤害；

减少揭露：通过定向钻孔提前探明并治理水害隐患，减少巷道掘进过程中对含水层的直接揭露，突水风险降低 70% 以上；

应急响应快：若钻进中遇突发涌水（涌水量 > 50m³/h），可立即启动泥浆循环系统注入高黏度钻井液（黏度 > 60s）封堵钻孔，同时通过 MWD 定位涌水点，为后续注浆堵水提供精准坐标^[2]。

3 定向钻进技术在防治水中的实际应用效果

3.1 含水层探测

在某深部煤矿（埋深 1200m）的砂岩裂隙水探测中，应用定向钻进技术设计“主孔+3 分支孔”轨迹，主孔深度 800m，分支孔分别抵达不同砂岩含水层（K2、K3 含水层），实现以下效果：

参数探测精度：通过岩屑分析与水文观测，确定 K2 含水层厚度为 28m（传统技术测量值 25m，误差 10.7%，定向技术误差 3.6%），渗透系数为 1.2×10^{-4} m/s（传统技术误差 15%，定向技术误差 7%），水位标高+350m（误差 0.3m）；

隐患定位：分支孔在 K3 含水层探测到 2 处裂隙发育区（坐标 X=32560m，Y=18720m，深度 750m；X=32610m，Y=18750m，深度 765m），为后续注浆堵水提供精准靶点；

成本节省：仅施工 1 个定向孔即完成 2 个含水层的

探测,较传统技术减少4个钻孔,节省工期20天,成本降低45%。

3.2 注浆堵水

某煤矿工作面回采前,发现底板灰岩含水层(奥陶系灰岩)存在突水风险,应用定向钻进技术实施注浆堵水,具体效果如下:

注浆范围覆盖:设计“1主孔+5分支孔”的扇形布局,单孔覆盖面积4800m²,5个分支孔形成直径80m的圆形注浆区,覆盖整个工作面底板;

堵水效果:采用水泥-水玻璃双液浆(体积比1:0.8),注浆压力1.4倍含水层水压(2.8MPa),浆液扩散半径7m,注浆后含水层渗透系数从 3.5×10^{-3} m/s降至 8×10^{-5} m/s,堵水率达96%;

涌水量控制:工作面回采期间,最大涌水量从注浆前的120m³/h降至22m³/h,降幅81.7%,满足回采期间涌水量≤30m³/h的安全要求。

3.3 疏水降压

某高瓦斯煤矿为降低煤层顶板砂岩水压力(原始水位标高+420m,需降至+380m以下),应用定向钻进技术施工疏水孔,效果如下:

水位控制精度:施工3个定向疏水孔(孔径180mm),孔深650m,设计轨迹穿过砂岩含水层核心区,通过调节疏水阀门开度,将水位稳定控制在+375-+380m,波动幅度≤5m;

疏水效率:单孔疏水量达85m³/h,3个孔日均疏水量6120m³,仅用15天即完成水位降至安全标高的目标,较传统技术(需30天)效率提升50%;

长期稳定性:疏水期间通过观测孔监测水位,6个月内水位无明显回升(波动≤3m),且未引发周边含水层水位异常下降,避免水资源浪费。

4 面临挑战与优化方向

4.1 现存技术挑战

复杂地层适应性不足:在硬度 $f > 15$ 的硬岩地层,PDC钻头磨损速率加快,钻进速度降至3-5m/h,较软岩地层下降60%;在破碎带(裂隙发育密度 > 5 条/m),孔壁坍塌率超20%,需频繁进行孔壁加固;

监测信号传输受限:在高矿化度地层(矿化度 > 10000 mg/L),电磁波式MWD信号衰减严重,传输距离从1500m缩短至800m;泥浆脉冲式MWD在高黏度钻井液中(黏度 > 60 s),脉冲信号易被干扰,数据传输成功率降至85%;

分支孔施工难度大:分支孔与主孔连接处的角度控

制精度要求高(偏差需 $\leq 1^\circ$),若角度过大易导致钻杆断裂;且分支孔施工时岩屑易在主孔底部堆积,导致返屑不畅,影响钻进效率。

4.2 技术优化方向

钻具材料升级:研发超硬耐磨PDC钻头(采用纳米复合金刚石材),提升硬岩地层耐磨性,使钻进速度提升至6-8m/h;开发高强度柔性钻杆(采用钛合金材质,抗扭强度 ≥ 1500 MPa),适应大角度分支孔钻进;

监测技术改进:采用“泥浆脉冲+光纤传输”双模MWD系统,高矿化度地层切换光纤传输,信号传输成功率提升至98%;优化传感器精度,将顶角、方位角测量误差降至 $\pm 0.05^\circ$;

孔壁稳定性提升:针对破碎带,开发新型化学护壁浆液,固化时间可调节(10-30min),抗压强度达15MPa,孔壁坍塌率控制在5%以内;

智能化升级:开发定向钻进AI轨迹优化系统,结合地质大数据(如地层硬度、裂隙分布)自动调整钻进参数(钻压、转速、钻井液黏度),实现“无人值守”钻进;构建数字孪生钻进模型,实时模拟钻孔轨迹与地层交互,提前预警孔壁坍塌或涌水风险^[4]。

5 结论

定向钻进技术凭借“轨迹精准可控、覆盖范围广、效率高、功能集成、安全可靠”的核心优势,在煤矿地质防治水的“探测-治理-监测”全流程中展现出显著价值:其不仅能在复杂地质条件下精准获取含水层参数,还能通过分支孔实现大面积注浆堵水或高效疏水降压,使矿井涌水量最大降幅达80%,钻孔成本降低45%,同时大幅降低水害风险。

参考文献

- [1]田科.煤矿防治水常见问题对策措施讨论[J].能源与节能,2024(10):280-282.
- [2]胡兵,徐翰,刘振宇,等.等值反磁通瞬变电磁法在煤矿水文地质勘查中的应用[J].煤炭工程,2023,55(Supple1):60-64.
- [3]田垒,崔春林,王雁.煤矿地质工作与防治水工作的融合[J].内蒙古煤炭经济,2021(5):196-197.
- [4]段玉柱.定向钻进技术在煤矿地质防治水中的應用[J].内蒙古煤炭经济,2024,(19):103-105.

作者简介:刘宝晶,(1990.07-),男,汉族,陕西省神木市人,初级助理工程师,本科,研究方向:煤矿地质。