

工作面采空区积水疏放技术优化方案

章海伟 秋盼 康汉丰

陕西旬邑青岗坪矿业有限公司 陕西咸阳 712000

摘要：工作面采空区积水极易诱发突水灾害，对煤炭开采安全与作业效率构成显著威胁，改良积水疏放技术是破解这一困境的核心路径。本文围绕提升疏放精准度、管控工程成本核心目标，结合采空区积水分布特征与现有疏放技术短板，从疏放钻孔布置参数优化、动态排水系统构建、疏放效果实时监测体系完善三个维度，制定靶向优化方案。依托技术改良达成积水快速排驱，有效消解采空区积水隐患，筑牢工作面回采作业安全基础，同时强化疏放作业的经济性与高效性，为同类地质条件下采空区积水治理提供可借鉴的技术支撑。

关键词：采空区；积水疏放；技术优化；工作面开采；安全保障

引言

煤炭开采作业中，工作面采空区积水已成为制约开采安全的关键性隐患，极易催生突水事故，引发设备损毁及人员伤亡，对开采效率与经济效益形成显著冲击。现阶段采空区积水疏放技术普遍显现疏放不彻底、参数适配性欠佳、动态调控缺失等问题，难以匹配复杂地质条件下的开采需求。鉴于此，开展工作面采空区积水疏放技术优化探索，搭建精准高效经济型疏放体系，对消解积水隐患、保障回采作业安全具备重要现实价值。本文依托采空区积水分布特征与现有技术短板，系统梳理并阐述技术优化的思路与实施方案。

一、工作面采空区积水疏放技术应用背景与现实需求

（一）采空区积水形成的客观背景与地质条件约束

煤炭开采作业中，工作面持续推进催生岩层的移动与破断效应，大量采空空间随之发育，为积水的储存构筑了基础载体。采空区积水的孕育与区域地质构造、水文地质条件深度耦合，岩层裂隙的发育规模与连通性主导着地下水的渗透路径，大气降水、地表径流经由裂隙补给体系持续汇入采空区域，渐次汇聚成稳定积水体。在不同开采深度与煤层赋存情境下，采空区的形态特征与积水分布格局呈现显著分异性，加剧了积水治理的复杂程度，亦为疏放技术的实践应用奠定了基础前提。

（二）采空区积水对开采作业的多重危害与安全制衡

采空区积水的长期滞留，易扰动周边岩层应力场平衡状态，加剧巷道围岩的变形趋势，提升支护作业的复杂系数。一旦积水压力突破岩层承载阈值，突水事故发生概率显著上升，不仅会损毁开采装备、阻断运输通道，进而导致开采作业停滞^[1]。除此之外，积水对煤层及顶底板岩层的软化作用，会削弱岩体自身稳定性，致使冒顶、片帮等地质灾害风险攀升，对开采作业的连续性与安全性形成强效制约，也印证了积水疏放工作的核心必要性。

（三）煤炭开采规模化发展对疏放技术的现实诉求

伴随煤炭开采向深部规模化演进，工作面尺度拓展、开采强度攀升，采空区波及范围同步拓展，积水存量与承压强度同步攀升，传统疏放技术已难以匹配复杂工况场景的积水治理诉求。确保大规模开采作业安全开展、提升资源回采效率，迫切需要高效精准的疏放技术赋能，依托科学疏放手段消解积水隐患，为开采作业构建安全作业环境，此类现实诉求正驱动着疏放技术的优化升级与技术革新。

二、现有工作面采空区积水疏放技术存在的问题剖析

（一）疏放钻孔布置精准性不足，积水排出不彻底

当前疏放技术体系中，钻孔布置多依托经验化参数设计，未结合采空区积水动态分布态势与岩层裂隙发育特征实施精准布设。部分钻孔的深度参数、布设间距及倾角设置适配性不足，致使隐蔽性积水区域覆盖疏漏，形成疏放盲区；残留积水长期滞留易催生局部高压水体。此外，钻孔施工过程中缺少对岩层渗透性的实时勘测，

作者简介：章海伟（1987.01-），男，汉，甘肃平凉人，本科学历，研究方向：煤矿采矿、水害防治技术与研究。

易产生钻孔穿层偏差，弱化积水导通效能，制约整体疏放成效。

(二) 疏放技术适配效能不足，难以应对复杂工况场景

传统疏放技术体系更适用于浅部简单地质条件下的采空区积水治理场景，针对深部开采形成的大体积采空区、破碎带发育区域及富水地层等复杂工况，适配效能显著不足。具体来看，常规重力疏放模式在积水压力偏低或导通通道不畅的情形下，排水效能显著衰减^[2]。强制排水系统的泵组选型配置与管路铺设缺乏针对性设计，易诱发堵塞、过载等运行故障，难以维系持续稳定的疏放状态。

(三) 疏放与监测协同衔接不足，缺失动态调控效能

当前疏放作业与积水监测体系协同衔接不足，监测指标维度单一且数据反馈存在延迟，难以精准捕捉采空区积水水位、压力的动态波动特征。疏放参数的调整多依托事后经验推断，无法依托监测数据实施精准动态调控；轻则因疏放滞后引发积水压力上扬，重则因过度疏放造成水资源无端损耗与能源浪费，进而加剧作业环节的安全不确定性。

三、基于问题导向的工作面采空区积水疏放技术优化方案

(一) 精准化疏放钻孔布置优化

针对传统疏放作业中钻孔布置依赖经验、精准度欠佳，进而导致疏放盲区多、积水排出不彻底的核心短板，搭建“地质探测-参数设计-动态调整”全流程闭环管控的一体化优化框架，实现从前期勘查至施工管控的全链条精准把控。优先采用三维地震勘探与瞬变电磁探测相融合的综合勘查技术，结合两种技术的空间定位与富水性探测互补优势，精准刻画采空区积水的分布边界、赋存状态及岩层裂隙的发育特征与连通路径，整合多源勘查信息为参数设计提供扎实支撑，构建涵盖积水与地质条件的精细化三维地质模型。依托模型输出的精准信息，通过数值模拟工具进行多场景参数推演，最终确定钻孔的最优深度、布设间距及倾角参数，确保钻孔精准抵达各积水核心区域，全面覆盖传统技术难以触及的隐蔽性积水盲区^[3]。在钻孔施工全流程中同步嵌入随钻测斜技术，实时追踪轨迹偏差并及时完成动态校正，有效规避穿层偏差、轨迹偏移等施工缺陷，确保钻孔与积水通道精准贯通，从源头提升疏放作业的靶向性与积水排出的彻底性。见图1所示：

(二) 差异化疏放技术体系构建

聚焦传统疏放技术难以适配多类型复杂工况的核心

短板，结合大体积采空区、破碎带发育区域、富水地层浅部等不同工况的地质特征与积水赋存规律，构建针对性强的差异化疏放技术体系。针对大体积采空区高水位积水工况，运用“重力疏放-强制排水”阶梯式联合技术方案：在积水区域最低洼处布设重力疏放钻孔，依托重力势能实现初期快速泄压排水，同步在积水核心区关键点位配置大功率耐磨排水泵组，配套抗堵塞耐磨管路布设系统，通过变频调控保障高压、大流量积水的持续稳定排驱；面对破碎带发育区域，优先采用高强度速凝浆液开展注浆加固作业，对发育裂隙实施分层封堵修整，经渗透测试确认形成稳定疏放通道后再启动疏放作业，有效规避疏放进程中围岩坍塌、碎屑堵塞钻孔的风险；针对富水地层浅部采空区，采用分段式梯度疏放技术方案，按岩层稳定性分区段自上而下渐进推进疏放作业，同步实时开展岩层位移与应力监测，动态调整疏放强度与围岩支护参数，保障疏放作业与围岩支护的协同高效推进。

(三) 疏放-监测协同调控系统搭建

聚焦疏放作业与监测体系数据割裂、调控滞后的核心短板，构建“监测-分析-调控-反馈”全流程闭环协同调控体系。在采空区按积水分布梯度与风险等级，于积水核心区、疏放钻孔出口及围岩关键断面布设水位、压力、流量、水温多维度监测传感器，采用低功耗物联网无线传输技术，完成监测数据的实时捕获、加密传输与边缘计算预处理，搭建可视化监测终端，直观呈现积水疏放全流程状态。依托预处理后的精准数据，构建基于PID算法的智能调控模型：监测到水位或压力突破预设安全阈值时，自动调控排水泵组变频功率、阀门开度及钻孔流量分配等疏放参数，实现疏放强度的毫秒级精准动态管控^[4]。监测到疏放流量异常衰减或压力突变时，立即触发分级预警，结合传感器组网定位技术锁定钻孔堵塞、管路泄漏等异常点位，推送针对性处置方案指导现场清孔、维修作业。

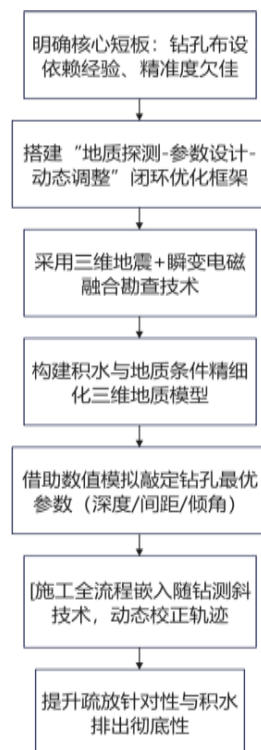


图1 精准化疏放钻孔布置优化流程

四、工作面采空区积水疏放技术优化实施成效分析

(一) 疏放效率显著提升，积水排出更彻底

优化后的精准化疏放钻孔布设体系，依托三维地震勘探与瞬变电磁探测融合技术构建的精细化地质模型，实现了钻孔参数与采空区积水、岩层条件的科学适配，以及钻孔轨迹的全程精准管控。该模型能够整合多源勘探数据，精准刻画积水区域的边界范围、赋存状态及隐蔽分布特征，让钻孔得以精准抵达各积水核心区域，全面覆盖传统技术因依赖经验设计而难以触及的零散型、深层隐蔽性积水盲区，显著强化积水导通的顺畅性与高效性。相较于传统技术，积水排驱速率实现明显提速，以往需通过多次补孔、反复调整才能覆盖的疏放区域，依托优化方案可一次性完成全区域积水高效排驱，残留积水体量得到大幅压缩，从根本上破解了传统疏放作业中积水残留的核心难题。同步嵌入的随钻测斜技术，能够实时校正钻孔施工偏差，有效规避因轨迹偏移引发的无效施工，大幅压缩整体疏放作业周期，为工作面回采作业的连续推进筑牢坚实的时间支撑，进一步保障了开采作业的整体效率。

(二) 复杂工况适配性增强，开采作业稳定性提升

差异化疏放技术体系的构建，成功破解传统技术在复杂地质条件下适配效能不足的核心难题。面向大体积采空区高水位积水，“重力疏放-强制排水”联合技术模式达成不同压力等级积水的分阶段高效排驱，规避单一疏放方式效能低下的弊端；在破碎带发育区域，注浆加固与疏放作业的同步推进，稳固围岩结构，杜绝疏放进程中钻孔堵塞与围岩坍塌现象，维系疏放通道持续畅通；针对富水地层浅部采空区，分段式疏放技术统筹兼顾疏放效能与岩层稳定性，规避突水、冒顶等灾害风险^[5]。优化技术在各类复杂工况下的稳定落地，让开采作业摆脱积水隐患的束缚，作业连续性及整体稳定性大幅提升。见图2所示：

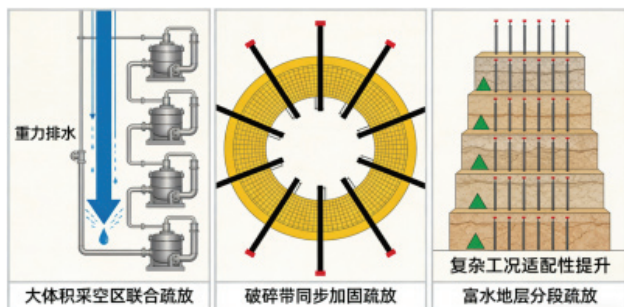


图2 差异化疏放技术体系应用场景示意图

(三) 智能管控水平提升，运维与安全效益凸显

疏放-监测协同调控系统的搭建，达成积水疏放全流程的智能化精细管控。多参数监测传感器的全域布设与无线传输技术的落地应用，保障水位、压力、流量等关键数据的实时捕获与动态反馈，彻底扭转传统疏放作业盲目调控的局面。智能调控模型可依托监测数据自动适配疏放参数，既规避过度疏放引发的水资源与能源无端损耗，又杜绝疏放滞后诱发的积水压力上扬；异常预警机制能够快速锁定钻孔堵塞等故障点位，指导现场精准处置，降低运维成本与作业强度。更为关键的是，实时监测与动态调控的协同联动，大幅强化积水灾害预警的及时性与精准度，从源头遏制突水等恶性事故发生，为煤炭开作业筑牢安全屏障，综合安全效益与经济效益同步凸显。

结语

本文围绕工作面采空区积水疏放技术优化开展系统探究，先厘清技术应用的背景与现实诉求，深度剖析现有技术存在的核心症结。立足问题导向，从精准化钻孔布设、差异化技术体系构建、疏放-监测协同调控三个维度制定靶向优化策略，实践验证表明，该策略可大幅提升疏放效能、强化复杂工况适配能力，同步提升智能管控水平，实现安全与运维效益的双重增益。此次探究梳理形成的技术优化路径与实施经验，为同类地质条件下采空区积水治理提供可靠技术支持，助推煤炭开领域安全高效开采技术体系的持续完善，推动积水治理工作向精细化、智能化方向进阶推进。

参考文献

- [1] 杜志峰, 陈振江, 刘义鹏. 倾斜长钻孔疏放上部采空区积水技术与研究[J]. 煤炭科技, 2022, 43(04): 191-194.
- [2] 黄浩. 近距离煤层开采顶板采空区积水防治技术研究[J]. 华北科技学院学报, 2022, 19(03): 32-37.
- [3] 方亚杰, 黄伟, 钱自卫, 等. 工作面两侧采空区大体量积水疏放技术[J]. 陕西煤炭, 2023, 42(02): 106-109+157.
- [4] 樊国欣. 采空区积水疏放技术在煤矿中的应用[J]. 能源与节能, 2022, (08): 189-191+209.
- [5] 李文东. 工作面上覆采空区积水防治技术分析与应用[J]. 江西煤炭科技, 2021, (04): 114-116+119.