

# 煤矿深部开采深孔预注浆防治水关键技术研究

刘 创<sup>1</sup> 杨志斌<sup>1</sup> 邓银海<sup>2</sup>

1. 禹州枣园煤业有限公司 河南 禹州 461670

2. 永贵能源开发有限责任公司新田煤矿 贵州 毕节 551700

**摘要:** 煤矿深部开采面临复杂水文地质条件, 深孔预注浆是防治水关键技术。研究分析深部含水层分布、地下水赋存等水文地质特征, 阐述深孔预注浆孔位布置、钻进工艺等核心构成。剖析孔位精准布置、深孔钻进等关键技术难点, 从孔位布置、钻进工艺等方面提出优化路径。通过优化技术, 可提升深孔预注浆防治水效果, 为煤矿深部安全开采提供有力支撑。

**关键词:** 煤矿深部开采; 深孔预注浆; 水文地质条件; 技术难点; 优化路径

**引言:** 煤矿深部开采规模不断扩大, 复杂的水文地质条件给开采带来诸多挑战, 水害问题成为制约深部煤矿安全高效开采的关键因素。深孔预注浆技术作为防治水的重要手段, 其效果直接影响开采安全与经济效益。深入研究煤矿深部开采深孔预注浆防治水关键技术, 明确水文地质条件对注浆技术的影响, 剖析技术难点并提出优化路径, 对保障煤矿深部开采安全、推动煤炭行业可持续发展具有重要意义。

## 1 煤矿深部开采水文地质条件分析

### 1.1 深部含水层分布特征

深部含水层分布受地层岩性、构造运动及古岩溶演化等多重因素控制, 整体呈现多层叠置、分区异质性显著的特点。华北型煤田深部普遍发育奥陶系石灰岩含水层, 其顶部古风化壳可划分为隔水充填带、弱隔透水充填带及富透水带三种类型, 不同类型充填结构的分布具有明确的空间分异规律<sup>[1]</sup>。随着开采深度增加, 含水层埋深显著加大, 水压呈现递增趋势, 而富水性则表现为减弱特征, 形成高承压弱富水的典型分布特征, 这种分布规律与深部地应力对裂隙水介质的力学作用密切相关。

### 1.2 深部地下水赋存规律

深部地下水赋存状态受控于水文地质结构、地应力场及水循环条件, 呈现出明显的分层性与动态演化特征。裂隙水介质是深部地下水的主要赋存载体, 受地应力作用影响, 裂隙发育程度与连通性决定地下水赋存富集程度。深部地下水循环深度随开采活动扰动不断加深, 矿化度随之增大, 水动力场演化显著, 开采活动会使井田成为岩溶流场的强烈汇点, 引导地下水向采掘区域溯源流动, 部分区域奥陶纪灰岩顶部存在无水或弱富水带, 进一步加剧地下水赋存的空间差异性。

### 1.3 深部开采涌水水源识别

深部开采涌水水源识别依赖水化学特征、水文地球化学场及水力联系等多方面指标, 核心是通过解析水源的独特标识实现精准区分。不同含水层地下水的水化学类型存在明显差异, 可通过特征离子含量及比值实现初步识别, 结合分层聚类分析等方法, 能够明确涌水水源与各含水层的水力关联。随着智能化技术发展, 基于水化学数据构建的识别模型已广泛应用, 可快速完成水源判别, 为防治水措施制定提供精准依据, 相关技术已在多家煤矿企业实现工程应用。

### 1.4 深部开采涌水通道类型及特征

深部开采涌水通道主要分为自然构造通道与人为扰动通道两大类, 各类通道具有独特的发育特征与导水能力。自然构造通道以断裂破碎带、岩溶裂隙为主, 受采动影响, 原生裂隙与采动裂隙相互贯通, 形成Z形离层空间等复杂导水网络, 加速地下水运移。人为扰动通道以封闭不良钻孔为主要类型, 这类通道易沟通上部强富水含水层, 成为隐蔽性极强的导水载体, 其出水特征与所在区域含水层水化学特征高度关联, 导水能力受钻孔封闭质量与地层压力影响显著。

## 2 深孔预注浆技术核心构成

### 2.1 深孔预注浆孔位布置技术

深孔预注浆孔位布置需紧密结合深部含水层分布特征与涌水通道发育规律, 核心是通过精准定位实现注浆范围的全面覆盖<sup>[2]</sup>。布置过程需综合考量地层岩性差异、地应力分布状态及采掘工程布置情况, 采用三维空间定位方法优化孔位间距与角度, 孔位间距通常控制在6-12m, 钻孔倾角根据地层倾角调整为15°-45°, 确保注浆形成连续完整的隔水帷幕。孔位布置需避开构造破碎带等地质薄弱区域, 兼顾注浆效率与施工安全性, 通过数值计算方法优化孔位参数, 使注浆范围与潜在涌水区

域精准匹配, 相关设计方法已在深部防治水工程中广泛应用。

## 2.2 深孔钻进工艺

深孔钻进工艺直接影响注浆孔施工质量与钻进效率, 需适配深部高承压、高应力及复杂岩性的地质条件。钻进过程采用分级钻进模式, 根据不同深度岩性特征调整钻进参数, 浅部300m以内钻进速度控制在1.5-3.0m/h, 深部300m以下钻进速度调整为0.8-1.5m/h, 选用金刚石钻头耐磨损材料减少孔壁坍塌风险。钻进过程中实施孔斜实时监测与校正, 孔斜偏差控制在1‰以内, 通过定向钻进技术控制钻孔轨迹偏差, 确保钻孔精准抵达设计深度与位置。钻进过程中同步开展岩芯取样分析, 取样间距为5-10m, 为后续注浆材料选择与参数确定提供基础数据, 保障钻进工艺与地质条件的适配性。

## 2.3 注浆材料选择与配比技术

注浆材料选择需满足深部高承压、强渗透地层的封堵要求, 优先选用凝结时间可控、强度高、抗渗性强的注浆材料。常用材料包括水泥基复合材料、化学注浆材料等, 选择过程需结合含水层渗透系数、水压大小及裂隙发育特征, 避免材料与地下水发生不良反应。配比设计需通过室内试验确定最优比例, 重点控制材料凝结时间与抗压强度, 兼顾流动性与稳定性, 通过调整胶凝材料与骨料比例, 使注浆材料能够快速填充裂隙、形成有效隔水层, 相关配比方法已通过大量室内试验验证。

## 2.4 注浆参数确定技术

注浆参数确定是保障注浆效果的关键, 核心是结合深部水文地质条件与注浆材料特性, 科学设定注浆压力、注浆量、注浆速度等核心参数。注浆压力需根据含水层水压与地层抗压强度确定, 通常为含水层水压的1.5-2.0倍, 控制在3-8MPa, 避免压力过高导致孔壁破裂或压力过低影响封堵效果。注浆量通过含水层裂隙体积与渗透系数计算得出, 单孔注浆量一般为50-200m<sup>3</sup>, 结合施工过程中的实时反馈动态调整。注浆速度需与材料凝结时间匹配, 控制在5-15m<sup>3</sup>/h, 确保注浆材料在凝结前充分填充裂隙, 参数确定过程需结合地质勘察数据与室内试验结果, 提升参数设定的科学性与合理性。

## 2.5 注浆施工流程

注浆施工流程遵循标准化、规范化原则, 按顺序完成钻孔清理、注浆管安装、浆液制备、注浆施工、注浆结束等关键步骤。规范的施工流程是确保注浆质量和防治水效果的重要保障, 每个环节都需要严格把控。钻孔清理采用高压水冲洗方式, 冲洗压力控制在1.0-1.5MPa, 去除孔壁泥质杂物与岩粉, 确保注浆通道畅通。注浆管

安装需确保密封严密, 避免浆液泄漏影响注浆效果, 注浆管直径选用108mm-159mm。浆液制备采用机械搅拌方式, 搅拌时间不低于5min, 确保材料混合均匀, 根据施工需求实时调整浆液浓度<sup>[3]</sup>。注浆施工过程中实施全程监测, 及时处理注浆压力异常、浆液泄漏等问题, 注浆结束后进行封孔处理, 封孔深度不低于50m, 形成完整的隔水体系, 保障施工流程的连贯性与规范性。

## 3 深孔预注浆关键技术难点分析

### 3.1 深部复杂地质条件下孔位精准布置难点

孔位精准布置难点源于深部水文地质条件的复杂性与不确定性, 深部地层岩性变化剧烈, 构造破碎带、岩溶裂隙发育不规则, 难以通过前期勘察实现地质条件的精准预判, 深部勘察钻孔间距通常为500-1000m, 难以全面覆盖复杂地质区域。地应力分布不均会导致钻孔轨迹易发生偏移, 偏移量可达0.5-2.0m, 无法精准抵达预设注浆区域, 影响隔水帷幕的连续性。同时, 深部含水层分布的空间异质性强, 涌水通道发育隐蔽, 难以通过常规勘察手段精准定位, 导致孔位布置与实际地质条件存在偏差, 降低注浆覆盖的有效性, 增加防治水风险。

### 3.2 深孔钻进过程中的技术难题

深孔钻进面临的技术难题集中体现为复杂地质条件对钻进质量与效率的制约。深部地层高应力、高承压特性易引发孔壁坍塌、钻孔变形等问题, 尤其在破碎岩层区域, 钻进过程中岩芯易脱落、卡钻, 严重影响钻进进度。深部岩性硬度不均, 钻进过程中钻头磨损剧烈, 需频繁更换耗材, 增加施工成本与工期。此外, 深部钻进深度大, 孔斜控制难度显著提升, 微小偏差经长距离钻进后会被放大, 导致钻孔无法抵达设计位置, 影响后续注浆施工效果。

### 3.3 注浆材料适配性难题

注浆材料适配性难题核心是难以找到完全匹配深部复杂地质与水文条件的注浆材料。深部高承压、强渗透地层对注浆材料的强度、抗渗性及凝结时间要求严苛, 现有注浆材料存在明显局限性。水泥基材料凝结时间调整范围有限, 在高渗透裂隙中易发生浆液流失, 难以形成有效封堵; 化学注浆材料虽流动性好, 但成本较高, 且部分材料存在环境相容性不足的问题。同时, 深部地下水矿化度高、水质复杂, 易与注浆材料发生化学反应, 降低材料强度与抗渗性能, 进一步加剧适配难度。

### 3.4 注浆过程中的施工控制难题

注浆过程中的施工控制难题主要体现在参数调控与异常处理两个方面。深部地层水文地质条件动态变化, 注浆压力、注浆量等参数需实时调整, 但现有监测技术难以实

现参数的精准捕捉与快速响应,易出现压力过高导致孔壁破裂、压力过低无法实现有效封堵的问题。注浆过程中易出现浆液泄漏、串浆等异常情况,此类问题隐蔽性强,难以快速定位泄漏点,处理不及时会导致注浆材料浪费,降低注浆效果<sup>[4]</sup>。此外,深部注浆施工空间有限,设备操作难度大,进一步增加施工控制的复杂性。

#### 4 深孔预注浆技术优化路径

##### 4.1 孔位布置技术优化

孔位布置优化核心是提升定位精准度与覆盖有效性,破解深部地质条件不确定性带来的偏差问题。引入三维地质建模技术,整合前期勘察的地层岩性、构造分布、含水层赋存等数据,构建可视化地质模型,精准预判涌水通道与富水区域分布。结合定向钻进技术特点,优化孔位间距与角度设计,采用动态调整机制,根据钻进过程中实时获取的岩芯数据与孔内地质信息,及时修正孔位参数。融合数值模拟方法,模拟不同孔位布置方案的注浆效果,筛选最优布置模式,实现注浆范围与潜在水害区域的精准匹配,提升隔水帷幕的连续性与完整性。

##### 4.2 深孔钻进工艺优化

深孔钻进工艺优化重点解决孔壁坍塌、孔斜偏差、钻头磨损等核心难题,提升钻进效率与施工质量。优化分级钻进模式,根据深部不同地层岩性硬度与完整性,细化钻进参数梯度,针对破碎岩层采用套管跟进钻进技术,减少孔壁坍塌风险。选用新型耐磨复合钻头,结合钻进过程中的岩性变化动态调整钻进速度,降低钻头磨损频率,减少耗材更换次数。引入高精度孔斜监测系统,实现钻进过程中孔斜数据的实时采集与分析,通过自动校正装置及时调整钻孔轨迹,控制长距离钻进过程中的偏差累积,确保钻孔精准抵达设计位置。

##### 4.3 注浆材料性能优化

注浆材料性能优化以提升适配性、强度与抗渗性为核心,兼顾经济性与环境兼容性。基于深部高承压、强渗透、高矿化度的水文地质特点,研发复合型注浆材料,通过在水泥基材料中添加改性剂,拓宽凝结时间调整范围,提升材料抗渗性与抗压强度,减少浆液在高渗透裂隙中的流失。优化化学注浆材料配方,降低材料成本,改善环境兼容性,避免与深部复杂水质发生不良反

应。通过室内试验与现场试验结合,建立注浆材料性能评价体系,根据不同地质条件定制材料配方,实现材料性能与深部地质环境的精准适配。

##### 4.4 注浆参数与施工流程优化

注浆参数与施工流程优化聚焦参数精准调控与流程规范化,提升注浆效果与施工效率。建立注浆参数动态调整模型,结合深部水文地质条件的动态变化,实时采集注浆压力、注浆量等数据,通过智能算法快速反馈并调整参数,避免压力过高或过低带来的施工隐患。优化施工流程衔接,简化冗余环节,将钻孔清理与岩芯分析同步推进,提升施工连贯性<sup>[5]</sup>。引入智能化监测设备,实现注浆全过程参数实时监测与异常预警,快速定位浆液泄漏、串浆等问题并制定针对性处理方案。规范注浆结束后的封孔工艺,采用高强度封孔材料,确保封孔质量,形成完整隔水体系,进一步提升防治水可靠性。

#### 结束语

煤矿深部开采深孔预注浆防治水技术,通过对其核心构成及关键难点的剖析,明确了孔位布置、钻进工艺、材料性能及注浆参数与施工流程等方面的优化方向。通过引入三维地质建模、新型耐磨复合钻头、研发复合型注浆材料及建立动态调整模型等措施,可有效提升技术的精准性、效率与可靠性,为煤矿深部开采提供坚实的防治水保障,确保开采活动的安全顺利进行。

#### 参考文献

- [1]高晓耕.复杂富水地层千米级盲竖井预注浆治理实践研究[J].建井技术,2025,46(3):1-6.
- [2]王亚楠.巷道掘进过断层深孔帷幕注浆技术应用[J].煤,2023,32(9):95-97,100.
- [3]周禹良,李斌,杨雪.富水溶蚀白云岩地层井筒地面预注浆技术研究[J].金属矿山,2022(12):10-17.
- [4]童仁剑,郑士田,吴燕军,等.地面定向孔超前预注浆掩护巷道穿断层破碎带关键技术[J].煤炭科学技术,2022,50(6):196-203.
- [5]吴宝富,隋旺华,韩贵雷,等.翠宏山铁多金属矿溃砂动水注浆封堵机理与加固效应的模型试验研究[J].水文地质工程地质,2025,52(4):145-158.