

复杂构造条件下煤矿工作面综合防治水技术研究

傅清林

国家能源集团乌海能源公司路天煤矿, 中国·内蒙古 乌海 016000

摘要: 复杂断层、陷落柱、隐伏裂隙及多含水层叠加使煤矿工作面水害通道具有隐蔽性、突发性和动态演化特征, 单一物探或局部疏排难以有效控制采动条件下的突水风险。本文构建“地质精查—多源探测—分区评价—超前治理—动态监测—应急排水”综合防治水技术体系, 并以某矿 3107 工作面为对象开展工程验证。通过三维地震、瞬变电磁、定向钻探和水化学判源识别导水构造, 依据突水系数、富水性和构造连通性划分风险区, 采用底板定向注浆、断层帷幕加固、顶板疏放与采掘参数协同控制。实施后, 钻孔单孔平均涌水量由 $18.6 \text{ m}^3/\text{h}$ 降至 $4.2 \text{ m}^3/\text{h}$, 底板突水系数由 0.087 MPa/m 降至 0.041 MPa/m , 采面最大涌水量由 $286 \text{ m}^3/\text{h}$ 降至 $128 \text{ m}^3/\text{h}$, 工作面安全通过 3 条断层破碎带。结果表明, 复杂构造区防治水应从“发现水体”转向“识别水源—判定通道—改变水力联系—验证治理效果”的闭环控制。

关键词: 复杂构造; 煤矿工作面; 水害探测; 定向注浆; 动态预警

Research on Comprehensive Water Control Technology for Coal Mine Workfaces under Complex Geological Conditions

Fu Qinglin

Lutian Coal Mine, Wuhai Energy Company, China Energy Group, China Inner Mongolia Wuhai 016000

Abstract: Complex faults, collapse columns, hidden fractures, and multiple superimposed aquifers make the water hazard pathways in coal mine workfaces characterized by concealment, suddenness, and dynamic evolution. Single geophysical surveys or localized drainage struggles to effectively control the risk of water inrush under mining-induced conditions. This paper establishes a comprehensive water control technology system: "detailed geological survey—multi-source detection—zonal assessment—advance treatment—dynamic monitoring—emergency drainage," and carries out engineering validation at the 3107 workface of a certain mine. Using 3D seismic, transient electromagnetic, directional drilling, and hydrochemical source tracing to identify water-conducting structures, the risk zones are divided based on water inrush coefficient, water richness, and structural connectivity. Measures include directional grouting under the floor, fault curtain reinforcement, roof drainage, and coordinated control of mining parameters. After implementation, the average water inflow per borehole dropped from $18.6 \text{ m}^3/\text{h}$ to $4.2 \text{ m}^3/\text{h}$, the floor water inrush coefficient decreased from 0.087 MPa/m to 0.041 MPa/m , the maximum face water inflow went down from $286 \text{ m}^3/\text{h}$ to $128 \text{ m}^3/\text{h}$, and the workface safely crossed three fault-fractured zones. The results suggest that water control in complex geological areas should shift from "finding water bodies" to a closed-loop approach of "identifying water sources—determining pathways—altering hydraulic connections—verifying treatment effectiveness."

Keywords: Complex structures; Coal mine workface; Water hazard detection; Directional grouting; Dynamic early warning

0 引言

煤矿工作面进入深部开采后, 地应力升高、底板破坏深度增大, 原本封闭或弱导水的断层、陷落柱和裂隙带可能在采动扰动下重新活化。当顶板砂岩水、底板灰岩承压水、老空积水与构造通道叠加时, 水源位置、补给关系和突水路径难以依靠单一资料准确判定。2025 年公布的煤矿

水害防控重点强调隐蔽致灾因素普查、预测预报、探查治理与监测预警的全过程衔接; 2025 版《煤矿安全规程》已于 2026 年 2 月 1 日起施行, 对重大灾害事前预防提出更高要求。基于此, 本文以复杂构造工作面为研究对象, 分析构造控水机理, 建立多源探测、分区治理和效果检验相统一的技术路线, 并通过实际采面数据评价其适用性。

1 复杂构造工作面水害形成与风险识别

1.1 构造组合及导水通道形成机理

复杂构造区的水害不是由单个含水层压力决定的,而是水源、通道、采动破坏、隔水层能力共同作用产生的结果。断层破碎带里面的岩体裂隙很密集,泥质充填程度顺着走向变化显著,局部位置能够从阻水结构转变成导水结构,陷落柱边界常常发育环状裂隙,当柱体跟灰岩岩溶系统连通后,能够形成具有高导水性的垂向通道。工作面推进引发的超前支承压力会让底板裂隙张开并向下伸展,要是采动破坏带和构造裂隙或者含水层导升带贯通,承压水就能够沿着优势路径涌入采场。顶板冒落裂隙也可能连通砂岩含水层或者上覆老空区,致使工作面出现顶、底板复合来水。所以,需要分析构造产状、落差、充填性、两盘含水层对接关系、采动破坏范围,不能只依据断层落差大小判断导水危险性。

1.2 多源探测与异常体交叉验证

风险识别运用地面三维地震这种方式来明确断层、褶曲、陷落柱的空间形态,借助井下瞬变电磁来圈定呈现低阻特征的富水异常区域,通过槽波地震识别煤层内部的小断层,利用定向钻孔来完成异常验证、水文参数测试工作。物探解释遵循“同源资料相互约束、异源资料交叉印证”这一原则:三维地震用来确定构造的几何边界,井下瞬变电磁用于判断含水性情况,钻孔将岩性、裂隙、实际涌水量进行揭露核实。对钻孔采集的水样检测其中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、总溶解固体等成分,依据离子比例和聚类结果区分奥灰水、砂岩裂隙水和老空水。要是低阻异常、断层交汇、高压含水层在空间上出现重合现象,就提高风险等级,要是物探异常未被钻孔验证,便通过补充钻孔或者改变方位进行复核,避免仅依据单一异常直接取代水文地质结论。

1.3 水害危险分区与治理优先级

在工作面平面网格之内,对水压、有效隔水层厚度、突水系数、单位涌水量、构造密度、物探异常强度、老空区距离进行全面综合评价。底板突水系数是依据含水层水压与有效隔水层厚度的比值来计算的,并且还要利用采动破坏深度对隔水层有效厚度加以修正。把构造交汇部、陷落柱边界、断层两盘含水层对接区划定为重点控制区,将富水性中等且隔水层连续的区域划定为动态监测区,其余的区域则作为常规防控区。分区的结果和治理手段、验收标准直接相关联:重点区一定要进行钻探验证、注浆改造工作,监测区要布置超前探孔、微震—水压联合监测,常

规区依旧保留物探循环探测。治理的优先级是按照“后果严重度 $\times$ 通道可信度 $\times$ 水源补给能力”来确定的,进而将有限的钻探和注浆工程量集中到真正能够控制突水风险的部位。

2 综合防治水技术体系设计与实施

2.1 超前探放水与定向钻孔布置

工作面顺槽运用长距离定向孔来对前方、底板构造进行控制,钻孔主孔是沿着煤层走向来布置的,分支孔能够覆盖断层两盘、陷落柱边界、物探低阻区。孔间距的确定是依据目标层埋深、钻孔轨迹误差、浆液扩散半径来进行的,平面覆盖会保持 20 至 30 米的重叠,以此避免形成探测盲区。在钻进过程当中要连续记录岩性、返水颜色、钻速、泵压、瓦斯、涌水量,要是出现钻速突然增加、返水中断或者水压升高的情况,就要立刻停止钻进并且关闭孔口装置。探水孔终孔之后要进行稳定流量观测、水压恢复试验,凭借单位涌水量来判断富水性,对于老空水要坚持先进行探查再放水,依照预计积水量、排水能力来控制放水速率,防止水位快速下降致使围岩失稳。定向钻孔不但承担着探查任务,还作为后续注浆、效果检验的通道,达成孔位数据的复用。

2.2 分区注浆与导水构造改造

底板承压水治理主要围绕改造含水层顶部、加固隔水层薄弱段展开。重点区域借助定向分支孔抵达目标层,先是运用清水压裂或者低浓度浆液来疏通裂隙,接着采用水泥—粉煤灰浆液进行分级升压注入,对于断层破碎带,运用速凝浆液封堵近井高导水裂隙,在外围采用普通水泥浆形成连续加固体。注浆压力会在地层允许压力、防止劈裂串浆的条件约束下进行动态调整,当压力持续上升、单位吸浆量下降并且相邻孔没有异常串浆时便进入稳压结束阶段。治理过程中根据吸浆量、压力曲线、浆液扩散方向滚动修改孔网,对于大吸浆量低压力孔优先判断是否连通岩溶通道,必要时采取间歇注浆和骨料充填措施。注浆结束后布置独立检验孔,要求残余水压、单位涌水量、透水率同时符合标准,不能用累计注浆量来替代治理效果。

2.3 采掘协同监测与排水保障

治理工作结束之后,把水压、涌水量、微震事件、支架阻力、煤壁出水征兆放置到同一个时空坐标之中。水压传感器设置在主要含水层观测孔那里,流量计按照区域去计量顺槽、钻场、采空区的来水情况,当微震事件朝着断层附近聚集并且水压同步下降的时候,这就表明裂隙有可能会扩展进而发生水力连通现象。预警采用变化率、绝对

阈值这两个判据：正常波动会被趋势模型吸收掉，要是连续三个周期超出限度或者多个参数同时出现异常情况才会升级发出警报，以此来降低由单点噪声所导致的误报情况。排水系统按照正常涌水、最大预测涌水、事故涌水这三个级别进行校核，工作泵、备用泵、检修泵是分开供电的，水仓要保持有效的容量并且定期进行清淤工作。借助闸门、挡水设施、撤人路线把监测预警和应急处置连接在一起，一旦出现煤壁挂红、空气变冷、淋水增加或者底鼓渗水等征兆，就要马上停止作业、切断电源并且按照避灾路线撤离。

3 工程应用与防治效果验证

3.1 工作面概况与治理方案

某矿 3107 工作面的走向长度为 1260 米，其倾向长度是 218 米，煤层平均厚度为 3.4 米，从底板至主要灰岩含水层的间距处于 46 至 71 米的区间当中，含水层的水压范围是 3.1 至 4.6 兆帕。在该工作面范围内存在 5 条落差在 1.8 至 12.5 米之间的断层、1 处疑似陷落柱发育，而且邻近采空区存在积水边界不清晰的状况。治理之前进行了 2.75 平方千米的三维地震精细解释、18.6 千米井下瞬变电磁测线工作，总共圈定出 6 处低阻异常。施工了 14 个定向主孔、38 个分支孔，总进尺达到 16240 米，其中有 9 个孔揭露了破碎带，最大单孔涌水量是每小时 31.5 立方米。依据异常分布把工作面划分成 3 个重点区、4 个监测区、一般区，重点区进行底板注浆和断层加固工作，邻近老空区采用边探边放的模式，采面前方保持不少于 60 米的有效探测距离。

3.2 治理过程及关键参数控制

注浆工程施工了 27 个分支孔，总共累计注入水泥基浆液 4860 吨。一开始处于低压大流量阶段，注浆压力被控制在 1.2 至 2.0 兆帕的范围，目的是充填张开的裂隙。到了中后期，注浆压力慢慢升高至 5.0 至 6.5 兆帕，以此来实现对细小裂隙的压密加固。单孔结束的条件是在终压状态下吸浆量小于 20 升每分钟并且稳定保持 30 分钟，并且相邻观测孔水压不能出现异常突升。在三处高吸浆区，采用“间歇待凝—复注—检验”的工序，避免浆液远距离出现无效扩散。治理完成以后，施工了 8 个独立检验孔，单位涌水量全都小于 0.05 升每秒每米，压水试验透水率下降到治理之前的 24% 至 41%。采煤的时候，每推进 20 米就进行一次顺槽瞬变电磁复测，每推进 10 米就分析涌水量与微震事件的变化，穿越断层前降低日推进速度，让排水系统保持热备用的状态。

3.3 防治效果与适用性分析

表 1 综合防治水实施前后关键指标对比

评价指标	治理前	治理后	变化情况
钻孔单孔平均涌水量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	18.6	4.2	下降 77.4%
底板突水系数 /($\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$)	0.087	0.041	下降 52.9%
物探异常验证准确率 /%	78.6	93.8	提高 15.2 个百分点
采面最大涌水量 /($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	286	128	下降 55.2%
超前探测有效距离 /m	42	76	增加 81.0%
水害预警提前量 /h	2.1	7.6	增加 5.5 h
工作面月均推进度 /m	82	106	提高 29.3%

如上表工程结果显示，物探异常验证准确率由 78.6% 提高至 93.8%，原因在于构造解释、富水异常和钻孔揭露采用统一坐标叠合，减少了单方法定位偏差。底板突水系数数降至 0.041 MPa/m，采面最大涌水量下降 55.2%，说明注浆不仅封堵局部出水孔，还削弱了灰岩含水层与采动裂隙之间的水力联系。超前探测有效距离由 42 m 提高至 76 m，给复探、补孔和异常治理留出了施工时间；预警提前量增加到 7.6 h，使异常处置由停机后排水转变为推进前控制。工作面累计推进期间通过 3 条断层破碎带，未发生突水和淹面事故，月均推进度提高 29.3%。但该体系的效果依赖准确的水文地质模型和连续监测，若矿区岩溶强烈、陷落柱规模大或地面补给充足，应扩大区域治理范围，并通过地面定向孔或帷幕工程切断补给，不能机械套用井下局部注浆参数。

4 结语

复杂构造条件下煤矿工作面水害具有多水源、多通道和采动动态连通特征，防治工作的关键不是孤立增加钻孔或排水设备，而是建立从构造识别、水源判定、风险分区到工程改造和效果检验的闭环。工程验证表明，多源物探与定向钻探能够提高隐伏水构造定位精度，分区注浆可显著降低底板突水系数及采面最大涌水量，水压—流量—微震联合监测则为异常处置提供提前量。实际应用中应根据构造类型、含水层补给条件和采动破坏范围动态修正孔网、注浆压力与预警阈值，并以独立检验孔、联合排水试验和采掘过程数据作为治理验收依据，实现煤矿防治水由静态措施配置向全过程风险控制转变。

参考文献：

[1] 刘林虎. 凉水井煤矿煤自燃特性及综合防灭火技术研究[D]. 中国矿业大学, 2025.DOI:10.27623/d.cnki.gzkyu.2025.002454.

[2] 郝晓旭. 煤矿采煤工作面过高压线塔综合防治[J].

内蒙古煤炭经济, 2024(21):49-51.DOI:10.13487/j.cnki.imce.025923.

[3] 杜超杰, 杨俊磊, 苗飞等. 沙梁煤矿综采工作面粉尘综合防治技术研究[J]. 煤矿机械, 2024,45(11):166-168. DOI:10.13436/j.mkjx.202411047.

[4] 南云涛. 煤矿回采工作面水害综合防治研究[J]. 自动化应用, 2024,65(12):168-170.DOI:10.19769/j.zdhy.

2024.12.054.

[5] 程中星. 蒲河煤矿特厚煤层工作面瓦斯与火综合防治技术研究[D]. 辽宁工程技术大学, 2024.DOI:10.27210/d.cnki.glnju.2024.000284.

作者简介: 傅清林 (1999.12.16), 男, 汉族, 辽宁大连人, 大学本科, 助理工程师, 研究方向: 井工煤矿地测防治水。