

煤矿地测防治水工作中突水水源快速判别技术

袁 伟

山西宁武大运华盛庄旺煤业有限公司 山西 忻州 036700

【摘要】：煤矿突水灾害直接威胁井下作业安全，制约煤炭资源高效开采，突水水源快速准确判别是灾害防控与应急处置的核心前提。本文结合煤矿水文地质实际特征，系统分析突水灾害形成机理与不同水源的水文地质、水化学及同位素差异，梳理传统与新型判别方法的适用性及局限性，重点构建涵盖水化学、同位素及动态参数的综合判别指标体系，探索多源信息融合的判别思路。研究表明，单一判别方法难以适配复杂地质条件，基于多指标协同的综合判别模式可提升水源识别的时效性与准确性，为煤矿地测防治水工作提供技术支撑。

【关键词】：煤矿突水；突水水源；快速判别；水化学分析；同位素示踪；指标体系

DOI:10.12417/2705-0998.26.01.076

引言

煤炭作为我国能源结构的重要组成部分，井下开采深度逐年增加，水文地质条件愈发复杂，突水灾害发生概率显著上升。突水事故不仅会造成设备损毁、生产中断，更易引发人员伤亡，造成重大经济损失与生态影响。水源判别作为突水灾害防控的关键环节，其效率与精度直接决定后续治理措施的针对性与有效性。当前复杂地质环境下，单一判别技术受干扰因素影响较大，难以满足应急处置对快速性、准确性的需求。基于此，系统梳理突水水源类型及特征，整合各类判别方法优势，构建科学的指标体系，对提升煤矿地测防治水工作水平、保障开采安全具有重要现实意义。

1 煤矿突水灾害特征与水源类型分析

1.1 煤矿突水灾害形成机理

煤矿突水灾害的形成是地质构造、水文条件与开采扰动共同作用的结果。地质构造破碎带为水体运移提供天然通道，断层、裂隙的发育程度直接影响突水的可能性与强度，破碎带岩体的抗渗性弱化后，易成为水体突入井下的薄弱环节。开采活动引发的围岩应力重新分布，会进一步扩展原有裂隙，形成新的导水通道，打破岩体与水体的平衡状态。当水体压力超过岩体抗渗承载力时，水体将沿导水通道快速涌入采掘空间，形成突水灾害。水文条件的复杂性体现在水源补给的稳定性与水体压力的动态变化，持续补给的水源会不断提升突水风险，而水体压力的骤变可能触发突发性突水。

1.2 常见突水水源类型及其水文地质特征

常见煤矿突水水源主要包括地表水、松散层孔隙水、基岩裂隙水与碳酸盐岩岩溶水四类。地表水多通过采空区塌陷裂隙、断层通道渗入井下，补给来源受降水、径流影响显著，水量季节变化明显，水流速度较快且携带泥沙等杂质，易造成巷道堵塞与水质浑浊。松散层孔隙水赋存于第四系松散沉积物中，含水层厚度不均，渗透性受颗粒级配影响较大，水质多为淡水，水量相对稳定，但受开采扰动影响后易发生溃沙突水。

基岩裂隙水分布于基岩风化带与构造裂隙中，含水层连续性差，水量受裂隙发育程度控制，水质偏中性，动态变化与区域降水关联度较高。碳酸盐岩岩溶水赋存于溶洞、溶蚀裂隙中，水量大且水压高，补给范围广，突水时具有突发性强、破坏力大的特点，水质多富含碳酸氢根离子。

1.3 不同水源的水化学与同位素特征差异

不同突水水源的水化学与同位素特征存在显著差异，为水源判别提供核心依据。地表水水化学类型多为 $\text{HCO}_3\text{-Ca} \cdot \text{Mg}$ 型，总溶解固体（TDS）含量较低，离子浓度受降水稀释作用影响明显，pH 值多呈中性至弱碱性。松散层孔隙水 TDS 含量中等，离子组成受沉积物淋滤作用影响，多表现为 $\text{HCO}_3\text{-Na} \cdot \text{Ca}$ 型或 $\text{Cl-HCO}_3\text{-Na}$ 型，阳离子以钠、钙离子为主。基岩裂隙水 TDS 含量差异较大，风化裂隙水 TDS 偏低，构造裂隙水因循环深度增加，TDS 含量有所上升，水化学类型多为 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型。岩溶水 TDS 含量较高，水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型为主，钙离子与碳酸氢根离子浓度显著高于其他水源。同位素特征方面，地表水与松散层孔隙水的 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值贴近当地大气降水线， ^3H 含量较高；基岩裂隙水因循环周期长， ^3H 含量较低， $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值略偏离大气降水线；岩溶水同位素组成受补给区高程、循环深度影响， $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对偏负， ^3H 含量极低甚至检测不到。

1.4 突水水源判别的难点与挑战

突水水源判别面临多重难点与挑战，制约判别精度与效率。复杂地质构造导致多水源混合现象普遍，不同水源在运移过程中发生水力联系，造成水化学、同位素特征叠加，难以区分单一水源属性。开采活动引发的水质扰动，使部分指标发生异常变化，干扰特征指标的识别与判定。部分水源的特征指标存在重叠区域，单一指标难以实现精准区分，需多指标协同验证。应急场景下对判别速度要求较高，传统检测方法流程繁琐、耗时较长，无法满足快速处置需求。此外，水文地质条件的动态变化的，使固定判别标准难以适配不同开采阶段的水源特

征, 进一步增加判别难度。

2 突水水源快速判别方法综述

2.1 传统判别方法及其局限性

传统突水水源判别方法以水文地质调查与经验判断为主, 依托井下观测、钻孔资料分析水源可能来源。通过排查采掘区域周边含水层分布、断层导水性等地质条件, 结合突水点水量、水质直观特征进行判断, 操作简便且成本较低。但传统方法局限性显著, 过度依赖工作人员经验, 主观性较强, 判别精度受经验积累程度影响较大。无法量化分析水源特征, 难以应对多水源混合、水质扰动等复杂场景。判别过程缺乏系统的指标支撑, 仅能实现粗略判别, 无法满足精准防控与应急处置的需求, 在复杂水文地质条件下易出现误判。

2.2 水化学分析法

水化学分析法是突水水源快速判别的核心方法, 依托不同水源的水化学指标差异实现精准识别, 具有检测速度较快、结果稳定的优势。通过测定突水点水样的离子组成、TDS、pH 值等指标, 结合离子比值法、舒卡列夫分类法等手段, 对比已知水源的水化学特征库, 完成水源类型判定。离子比值法通过分析 $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ 、 $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^- / \text{SO}_4^{2-}$ 等比值, 区分不同水源的水化学演化路径, 规避单一离子浓度受干扰的影响。TDS 与 pH 值可快速初步判断水源类型, 地表水与浅层孔隙水 TDS 偏低、pH 中性, 深层岩溶水 TDS 偏高、pH 弱碱性。该方法适配多数地质场景, 可在应急状态下快速获取核心指标, 但受多水源混合、水质污染影响时, 需结合其他方法验证, 避免单一指标误判。

2.3 同位素示踪技术

同位素示踪技术凭借稳定性强、抗干扰能力突出的特点, 在复杂水源判别中应用广泛, 可有效弥补水化学分析法的不足。通过测定水样中 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 ^3H 等同位素含量, 利用同位素分馏效应与循环特征, 追溯突水水源的补给来源与循环路径。 $\delta^2\text{H}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 作为稳定同位素, 其组成受补给区气候、高程等因素控制, 不同水源的同位素特征具有唯一性, 可精准区分地表水、浅层水与深层水。 ^3H 作为放射性同位素, 半衰期较短, 可通过含量判断水源循环周期, 区分现代补给水源与古老水源, 有效识别多水源混合场景中不同来源的贡献比例。该技术检测精度高, 受水质扰动影响小, 但检测设备成本较高, 操作流程相对复杂, 需专业人员完成, 在应急快速判别中需结合现场快速检测技术优化应用。

2.4 地球物理探测与监测技术

地球物理探测与监测技术可实现突水水源的非接触式快速探测, 为判别工作提供实时数据支撑, 适用于井下复杂作业环境。常用技术包括直流电法、瞬变电磁法、地质雷达法等, 通过检测岩体导电性、介电常数等物理参数, 识别含水层分布、

导水通道位置及水体富集区域。直流电法利用不同介质导电性差异, 快速圈定富水区范围, 判断水体与采掘空间的距离, 为水源定位提供依据; 瞬变电磁法探测深度深、分辨率高, 可有效识别深部含水层与断层导水构造, 适应复杂地质条件; 地质雷达法可精准探测浅层导水裂隙与水体分布, 检测速度快, 可实现现场实时解读。配套监测技术通过实时采集水温、水压、流量等动态参数, 捕捉突水前后的参数变化规律, 辅助水源类型判别。该类技术可快速获取地质与水文参数, 但易受井下金属设备、地质构造干扰, 需结合其他方法验证探测结果。

2.5 多源信息融合判别思路

多源信息融合判别思路整合水化学、同位素、地球物理等各类方法的优势, 构建综合判别模型, 提升复杂场景下的判别精度与可靠性。通过采集水化学指标、同位素数据、地球物理探测结果及动态监测参数, 建立多维度数据集, 利用数据分析算法剔除干扰信息, 提取核心特征指标。结合水文地质条件, 构建权重分配模型, 对不同来源信息赋予合理权重, 突出稳定性强、辨识度高的指标作用。通过多指标协同验证, 规避单一方法的局限性, 有效解决多水源混合、水质扰动等复杂问题。该思路可实现从定性判别到定量分析的转变, 结合智能化算法可提升判别速度, 适配应急处置需求, 但需建立完善的特征数据库与标准化流程, 确保不同来源信息的兼容性与准确性。

3 快速判别指标体系构建

3.1 判别指标选取原则

判别指标选取需遵循针对性、稳定性、快速性与可操作性原则, 兼顾判别精度与应急需求。针对性原则要求指标能精准反映不同水源的独特特征, 有效区分相似水源属性, 规避指标重叠干扰。稳定性原则强调指标受外界扰动影响小, 在不同地质条件与开采阶段保持相对稳定, 确保判别结果的可靠性。快速性原则适配应急场景需求, 选取可快速检测的指标, 缩短检测周期, 为处置工作争取时间。可操作性原则要求指标检测无需复杂设备与繁琐流程, 便于井下现场开展, 同时兼顾检测成本的合理性。此外, 指标选取需兼顾全面性, 覆盖水化学、同位素、动态参数等多个维度, 形成协同验证体系, 提升指标体系的适配能力。

3.2 水化学指标体系

水化学指标体系是快速判别指标体系的核心组成部分, 涵盖离子组成、离子比值、TDS、pH 等关键指标, 可快速捕捉水源水化学特征。离子组成指标选取 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 等常见离子, 通过测定其浓度反映水源的淋滤、循环特征, 其中 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 浓度可有效区分岩溶水与其他水源, Cl^- 浓度可判断水源受海水入侵或人类活动影响程度。离子比值指标选取 $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ 、 $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^- / \text{SO}_4^{2-}$ 、 $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-) / (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 等, 规避单一离

子浓度波动的影响,精准反映水源的水化学演化路径,例如 Na^+/Cl^- 比值大于1时多为浅层孔隙水或裂隙水,比值接近1时可能受海水或深层水影响。TDS指标反映水体中溶解物质总量,不同水源TDS范围存在差异,可作为初步判别依据;pH值反映水体酸碱性,地表水与浅层水多呈中性,深层岩溶水多呈弱碱性,酸性水体可能受硫化物氧化影响,需结合其他指标验证。

3.3 同位素指标

同位素指标作为稳定性强的特征指标,纳入体系可提升复杂场景下的判别精度,主要包括 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 ^3H 三类核心指标。 $\delta^2\text{H}$ 与 $\delta^{18}\text{O}$ 作为稳定同位素,其组成遵循大气降水线规律,不同水源的同位素值分布在特定区间,地表水与浅层孔隙水贴当地大气降水线,深层裂隙水与岩溶水因循环深度增加、分馏效应影响,同位素值偏离降水线且偏负,可通过该特征追溯补给来源。 ^3H 作为放射性同位素,主要来源于大气降水,半衰期约12.43年,可通过含量判断水源循环周期,现代补给水源(地表水、浅层水) ^3H 含量较高,大于10TU,古老水源(深层岩溶水、封闭裂隙水) ^3H 含量极低,小于1TU,甚至无法检测,可有效区分新老水源混合场景。此外,根据区域地质条件,可补充 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{34}\text{S}$ 等同位素指标,进一步细化水源特征,提升指标体系的适配性。

3.4 水温、水压、流量等动态参数

水温、水压、流量等动态参数可实时反映突水水源的运移

特征,作为辅助指标纳入判别体系,弥补静态指标的局限性。水温指标受水源循环深度、补给区温度影响,地表水与浅层水水温随季节变化明显,深层水水温稳定且受地温梯度控制,随深度增加而升高,可通过水温差异初步判断水源埋藏深度。水压指标反映水体受力状态,岩溶水水压显著高于孔隙水与裂隙水,突水时水压骤升且稳定在较高水平,浅层水水压较低且波动较大,可结合水压变化规律判断水源类型。流量指标反映水源补给能力,地表水与岩溶水突水时流量大且补给稳定,裂隙水流量较小且易受降水影响,流量的动态变化可辅助判断水源补给的稳定性与可持续性。动态参数需实时采集,结合静态指标协同分析,才能全面反映水源属性,提升判别准确性。

4 结论

煤矿突水水源快速判别是地测防治水工作的核心环节,其精度与效率直接关系开采安全。不同突水水源的水文地质、水化学及同位素特征存在显著差异,为判别工作提供核心依据,但复杂地质条件下的多水源混合、水质扰动等问题,增加了判别难度。单一判别方法存在局限性,水化学分析法与同位素示踪技术可提供精准的特征依据,地球物理探测技术可快速获取地质与动态参数,多源信息融合思路可整合各类方法优势,提升复杂场景适配能力。构建的综合判别指标体系,涵盖水化学、同位素、动态参数三类核心指标,遵循针对性、稳定性等选取原则,可实现不同水源的快速精准判别。

参考文献:

- [1] 梁小伟,杜亮.麻家梁煤矿奥灰突水机理探查研究[J].煤炭与化工,2025,48(11):62-64+69.
- [2] 赵慧国.煤矿底板承压水突水治理技术及其应用[J].凿岩机械气动工具,2025,51(11):210-212.
- [3] 赵振伟,张金福,吴传实,等.高承压含水层煤矿突水风险评估方法[J].煤矿现代化,2025,34(06):134-137.
- [4] 张文泉,邵建立,史俊伟,等.煤层采动底板隐伏断裂扩展突水机制及突水判据[J].煤田地质与勘探,2025,53(10):161-171.
- [5] 王世刚.苇子沟煤矿顶板突水危险性评价分析研究[J].陕西煤炭,2025,44(06):99-103+123.