



移动扫码阅读

董书宁, 李 智, 郑士田, 等. 煤层底板导水通道钻孔超前探查与多元信息识别技术[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 15–23.
DONG Shuning, LI Zhi, ZHENG Shitian, *et al.* Advanced drilling detection and multi-information identification of water-conducting channel of coal floor[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 15–23.

煤层底板导水通道钻孔超前探查与多元信息识别技术

董书宁^{1,2,3}, 李 智^{1,2,3}, 郑士田^{2,3}, 郭小铭^{2,3}, 王宇航^{2,3}

(1. 煤炭科学研究总院, 北京 100013; 2. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077;

3. 陕西省煤矿水害防治重点实验室, 陕西 西安 710077)

摘要:煤层底板多发育有各类导水通道, 严重威胁着矿井的安全生产。为更加科学地建立底板导水通道多元信息识别技术体系, 预防底板突水, 首先根据导水通道类型多样、位置不明、突水危害大等特征和地面定向钻进区域探查技术的优点, 提出了轨迹合理、目标层合理和探查区域最大化的探查原则。其次总结分析了淮北矿区、淮南矿区、邢台矿区、黄河北煤田等区域导水通道探查过程, 发现在揭露导水通道时, 岩屑、钻时、钻井液漏失量等直观指标和压水试验透水率、注浆参数等验证性指标均与正常地层有明显差别。为此将钻探过程中多源信息判识指标分为定性和定量两大类。根据钻遇导水通道时, 岩屑和钻时 2 项定性指标的变化幅度, 给出了对应的标准曲线, 进而确定了导水通道类型分类体系; 接着综合分析钻井液漏失量和压水试验透水率 2 项定量指标在钻孔揭露导水通道时的变化, 提出了钻井液漏失量 30 m³/h、压水试验透水率 10 Lu 作为导水性分级的界限, 据此建立了通道导水性能双因素综合分级体系, 将导水性划分为 4 个等级。最后以华北型煤田某典型矿井为例, 根据探查原则实施 4 个孔组对导水通道进行了超前探查, 应用多元信息识别技术成功判识出探查区域内的 4 条断层、2 处岩溶裂隙带和 1 个陷落柱, 并确定了导水通道的导水性等级。研究成果对提升煤层底板导水通道识别和治理具有指导作用和重要意义。

关键词:超前探查; 地面定向钻进; 底板水害防治; 导水通道

中图分类号: TD745

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)07-0015-09

Advanced drilling detection and multi-information identification of water-conducting channel of coal floor

DONG Shuning^{1,2,3}, LI Zhi^{1,2,3}, ZHENG Shitian^{2,3}, GUO Xiaoming^{2,3}, WANG Yuhang^{2,3}

(1. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. CCTEG Xi'an Research Institute(Group)Co., Ltd., Xi'an 710077, China;

3. Shanxi Key Laboratory of Coal Mine Water Hazard Prevention and Control Technology, Xi'an 710077, China)

Abstract: The coal floor develops various water-conducting channels, which seriously threaten the safe production of mines. In order to establish a more scientific multi-information identification technology system for the water-conducting channels in the coal floor, and prevent floor water inrush. Firstly, the principles of reasonable trajectory, reasonable target layer and exploration area maximization are proposed based on the characteristics of the water-conducting channels and the advantages of the ground directional drilling area exploration technology. Diversified types, unclear locations, and significant water inrush hazards are the characteristics of water-conducting channels. Secondly, the summary analysis is conducted on the exploration process of water diversion channels in areas such as HuaiBei Mining Area, Huainan Mining Area, Xingtai Mining Area, and Huanghebei Coal Field. When revealing the water-conducting channels, there are significant differences in visual indicators such as rock debris, drilling time, drilling fluid leakage, and confirmatory indicators such as permeability and grouting parameters compared to revealing normal formations. Therefore, the identification indicators of multi-information

收稿日期: 2023-04-06 责任编辑: 周子博 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2023-0493

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804102)

作者简介: 董书宁(1961—), 男, 陕西蓝田人, 研究员, 博士。E-mail: dongshuning@cctegxian.com

通讯作者: 李 智(1992—), 男, 陕西西安人, 助理研究员, 博士研究生。Tel: 029-87860973, E-mail: lizhi@cctegxian.com

during the drilling process are divided into two types: qualitative and quantitative. Based on the variation amplitude of two qualitative indicators, rock debris and drilling time, when encountering water-conducting channels, it gives corresponding standard curves, and determines the classification system for water-conducting channel types. Subsequently, a comprehensive analysis is conducted on the changes in the two quantitative indicators of drilling fluid leakage and permeability when encountering water-conducting channels. $30 \text{ m}^3/\text{h}$ of drilling fluid leakage and 10 Lu of permeability are proposed as the classification criteria for conductivity. Based on this, a dual factor comprehensive classification system for water-conducting channels conductivity is established, and the conductivity is divided into four levels. Finally, taking a typical mine in the North China coalfield as a case study, the principle of exploration is adopted to explore the water-conducting channels. The multi-information identification technology is applied to successfully identify four faults, two karst fracture zones and a collapse in the detection area, and determines conductivity levels of water-conducting channels. The research results have guiding effect and important significance for improving the identification and control of water-conducting channels.

Key words: advanced detection; ground directional drilling; prevention of floor water hazard; water-conducting channel

0 引 言

煤炭作为我国的主体能源,在社会经济发展中具有举足轻重的作用。经过几十年来的持续开发,我国中东部地区浅部煤炭资源逐步枯竭,已经进入了下组煤开采阶段^[1],且采掘深度以 $8 \sim 12 \text{ m/a}$ 的速度延伸^[2],下组煤开采过程中受到煤层底板灰岩含水层的突水威胁不断加大^[3-4]。据统计华北地区 20% 的煤炭资源受底板岩溶水的威胁,部分老矿区受底板突水威胁的煤炭资源甚至高达 $50\% \sim 85\%$ ^[5-6]。煤层底板广泛发育有岩溶裂隙带、断层和陷落柱等导水通道^[7-9],随着矿井开采深度和开采规模的不断加大,开采过程中煤层底板处于“三高一扰动”的复杂应力环境^[10],陷落柱、断层或岩溶裂隙带等导水通道在采动影响下,极易与下伏奥灰强富水充水含水层连通,发生严重突水淹井事故,甚至造成人员伤亡^[11-12]。

导水通道导致的突水具有隐蔽性、突发性和破坏性强的特点^[13],围绕煤层底板突水机理与导水通道探查治理,相关学者做了大量的研究^[14-17]。董书宁等^[18]综合考虑华北型煤田煤层埋深、底板承受水压与底板岩层结构组合等判识指标,确定了底板水害治理模式的选择准则。赵庆彪^[19]在对邯邢矿区下组煤开采受奥灰水威胁的基础上,指出隐伏构造的隐蔽性和难以探知性是导致底板突水的根本原因,提出通过近水平钻孔探查隐伏构造,并根据浆液的漏失量判断隐伏构造的位置,但并没有总结出定向钻进探查导水通道需遵循的原则。赵家巍等^[20]从开采扰动、隐伏构造、承压水作用角度分析,根据典型突水矿井地质条件及突水原因分析,建立了含隐伏导水通道的概化力学模型,进而推导出煤层底板渗流路径的扩展规律。董书宁等^[21]从宏观上构建煤层底板水害超前区域治理理论框架与技术体系,针对

隐伏导水通道提出了判识指标和判识方法,但未对各定性指标钻遇不同导水通道时的变化进行详细描述,没有进一步利用定量指标的变化提出导水通道导水性大小的分级体系。郑士田^[22]在潘集二矿导水通道重大突水事故中利用地面定向钻进技术对突水点快速探查,准确查明了陷落柱形态并成功封堵导水通道。王进尚等^[23]以递进导升及断裂力学原理为基础,建立了断层递进导升简化断裂力学模型,得出底板隐伏断层在采动影响下,随着工作面的不断推进,当导升高度达到底板破坏区的最小安全距离时会发生突水。顾大钊等^[24]指出,为了实现对矿井水源、水量、通道等水文地质信息的准确勘探和预测,有必要研究地下水赋存的准确探测技术。此外,物探方法也被广泛应用在导水通道的探查^[25-26],但主要以探查大型导水通道为主,中小型垂向导水通道的识别精度仍不够高。总的来说,以上工作尚没有提出系统详细的导水通道类型识别体系,也未形成能够表征通道导水性大小的分级体系。

通过分析导水通道的特征与地面区域探查技术的优点,提出了导水通道精准探查的原则。分析探查工程中岩屑、钻时、钻井液漏失量和压水试验透水率等指标,形成系统的导水通道类型分类体系和导水性分级体系,为快速准确识别导水通道提供了科学依据,进而为煤层底板水害的治理提供指导。

1 导水通道探查设计原则

煤层底板导水通道主要有以下特征^[27-29]: ①通道类型多样,有岩溶裂隙型、断层型、陷落柱型及复合型导水通道; ②褶曲轴部、岩溶发育区域以及大型断层附近有利于导水通道的发育; ③一般位置不明,常规物探手段难以准确探查; ④底板导水通道所引发的突水具有突发性、水量大、危害性强的特点。

由于煤层底板导水通道的以上特点,对其探查

方法要具有针对性和适用性,目前地面定向钻进是快速准确探查导水通道最常用的手段。可以利用多分支水平孔技术面状超前探查区域导水通道,再根据导水通道类型与导水性的不同采取对应的注浆治理工艺将其改造为隔水层段,以满足煤矿安全开采需求^[30],导水通道探查设计应服从以下原则:

1) 轨迹合理。在设计时应避开采空区及井下巷道,避免影响对导水通道的判断。各钻孔设计方位应尽可能与裂隙的优势发育方向斜交。

2) 目标层合理。在物探基础上,探查目标层应选择导水通道最发育的含水层,层厚 6~10 m 为宜且经过治理后能够满足突水系数的要求。

3) 探查区域最大化。定向孔应设计多级分支对区域内的导水通道进行全面探查,钻孔间距不大于浆液扩散半径的 2 倍,既满足探查精度又保证治理效果。

2 导水通道多元信息判识

结合地面定向钻进技术的特点,在探查导水通道过程中揭露地层起伏或构造时,岩屑、钻时、钻井液漏失量等直观指标和压水试验透水率、注浆参数等验证性指标均与正常地层条件下有显著差异。结合淮北矿区、淮南矿区、邢台矿区、黄河北煤田等工程实践与理论分析^[8,18,31-32],将多源信息判识指标分为定性和定量 2 大类,据此对导水通道进行分类,对导水性进行分级,为准确识别各类导水通道提供科学依据。

2.1 导水通道定性判识指标

2.1.1 岩屑指标

1) 岩屑变化标准曲线如图 1 所示,在煤层底板灰岩含水层顺层钻进过程中,若岩屑在进尺超过 5 m 范围,灰岩占比逐渐变化为其他岩性(泥岩、砂岩等),不调整轨迹继续钻进后又恢复灰岩岩性,说明揭露岩溶裂隙带或地层存在微小起伏,定义该类

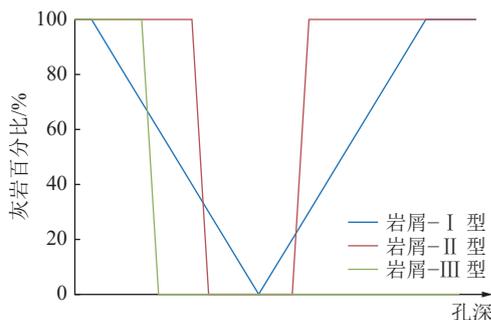


图 1 岩屑指标标准曲线

Fig.1 Rock debris standard curve

型为“岩屑-I”型。

2) 在煤层底板灰岩含水层顺层钻进过程中,若岩屑在进尺 5 m 范围以内从灰岩突变为其他岩性,通过调整钻孔轨迹后岩性中灰岩占比又恢复为 100%,且孔内无明显异响声,表明揭露的是断层构造,定义该类型为“岩屑-II”型。

3) 在煤层底板灰岩含水层顺层钻进过程中,若岩屑从灰岩占比由 100% 突变为泥岩、砂质泥岩、煤等混杂岩性,甚至出现黄铁矿、方解石等煤层伴生物质或钻井液失返,无法获得岩屑,同时孔内有明显异响声,表明揭露陷落柱,定义该类型为“岩屑-III”型。

2.1.2 钻时指标

由于不同岩石的硬度具有差异性,用单位长度岩层所用的钻进时间可判别岩性的变化^[33]。我国华北型煤田煤系地层主要有泥岩、砂岩、灰岩和煤层。一般而言,煤层底板常见的岩层中,泥岩硬度低,砂岩中等,灰岩最高,因此单位长度钻进泥岩钻时短、砂岩次之,而灰岩钻时最长。钻时变化标准曲线如图 2 所示。

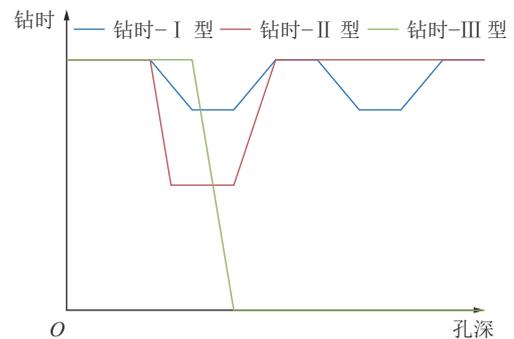


图 2 钻时指标标准曲线

Fig.2 Drilling time standard curve

1) 与岩屑录井较为类似,在地层起伏条件下岩性发生渐变,因此由灰岩地层到其他地层过渡时,钻时录井表现为钻时逐渐减小,调整钻孔轨迹后钻时快速恢复,钻时变化范围不大于 2 min/m,以此趋势单次或反复出现,定义该类型为“钻时-I”型。

2) 若钻时迅速减小但钻具并未放空(钻具放空时钻时为 0),持续钻进后钻时仍未有明显增加,调整钻探轨迹后钻时缓慢恢复原速率,钻时变化范围大于 2 min/m,定义该类型为“钻时-II”型。

3) 若钻时突然减小为 0,说明钻具在该处放空,该类型为“钻时-III”型。

钻时与岩屑的变化可以直观地定性判识揭露通道的类型,但对于不同通道导水性的分级需要定量指标进行判识。

2.2 导水通道定量判识指标

2.2.1 钻井液漏失量

探查过程中揭露不同发育程度导水通道时钻井液消耗量具有明显差别,如揭露陷落柱往往会发生钻井液全部漏失现象^[18]。因此,钻井液漏失量可以作为通道导水性判识的重要指标,揭露导水通道后若钻井液漏失量 $\leq 30 \text{ m}^3/\text{h}$,表明揭露的导水通道空间有限,发育范围较小,该通道导水性定义为“漏失-I”型,如图3中①与②区域;若钻井液漏失量 $> 30 \text{ m}^3/\text{h}$,甚至钻井液失返,表明揭露的导水通道较“漏失-I”型空间大,发育范围大,导水性好,该通道导水性定义为“漏失-II”型,如图3中③与④区域。

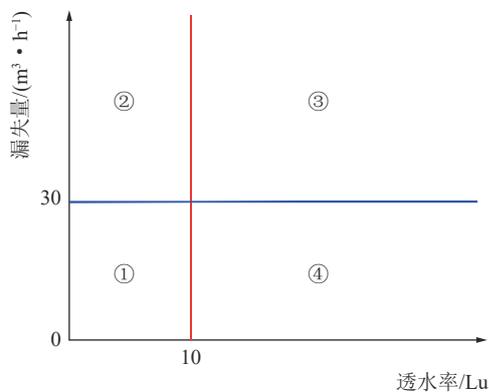


图3 漏失量与透水率类型分区

Fig.3 Zone of leakage and permeability types

2.2.2 压水试验透水率

钻孔压水试验是将清水压入钻孔试验段,根据一定时间内压入的水量和施加压力大小的关系,测定岩体相对透水性的试验。通过压水试验可以测定并评价岩体透水性能,从而分析岩体完整性和发育程度,反映揭露导水通道的导水情况^[34]。压水试验的结果用透水率的大小反映。

在揭露导水通道后进行压水试验,若压水试验获得的透水率 $\leq 10 \text{ Lu}$,说明通道连通性差,通道导水性定义为“透水-I”型,如图3中①与②区域;若压水试验获得的透水率 $> 10 \text{ Lu}$,或压水压力为0,表明揭露的导水通道较“透水-I”型通道连通性强,导水能力好,通道导水性定义为“透水-II”型,如图3中③与④区域。

2.3 导水通道分类体系

根据导水通道类型和导水性对其进行科学分类是指导煤层底板水害治理的重要前提条件。前文总结出岩屑、钻时、钻井液漏失量和压水试验透水率4个主要判识指标,其中岩屑和钻时用于定性判识导水通道的类型,钻井液漏失量和透水率用于定量确

定导水通道的导水性。

1)导水通道类型分类体系。结合2.1节中岩屑和钻时指标提出目标含水层中通道类型的分类体系,见表1。

表1 导水通道类型分类体系

Table 1 Classification system of water-conducting channel types

岩屑类型	钻时类型	导水通道类型
岩屑-I型	钻时-I型	非导水通道
岩屑-I型	钻时-II型	岩溶裂隙带
岩屑-II型	钻时-II型	小型断层
岩屑-II型	钻时-III型	大中型断层
岩屑-III型	钻时-II型	半胶结陷落柱
岩屑-III型	钻时-III型	未胶结或局部胶结陷落柱

2)导水性分级体系。钻井液漏失量和透水率指标可以定量的对导水通道导水性进行分类,进而指导导水通道的治理。根据我国现阶段主要底板水害治理区揭露导水通道时以上指标的情况^[12,20],提出钻井液漏失量 $30 \text{ m}^3/\text{h}$,压水试验透水率 10 Lu 作为导水性分级的界限。据此对导水通道的导水性能建立双因素综合分级体系,见表2。

表2 导水通道导水性分级体系

Table 2 Classification of hydraulic conductivity of water-conducting channel

漏失量类型	透水率类型	导水性
漏失-I型	透水-I型	一级
漏失-I型	透水-II型	二级
漏失-II型	透水-I型	三级
漏失-II型	透水-II型	四级

一级导水性:漏失量 $\leq 30 \text{ m}^3/\text{h}$,透水率 $\leq 10 \text{ Lu}$ 。表现为钻井液漏失量小或无消耗,压水压力在短时间内上升,说明通道发育空间有限,通道间连通性差,导水性弱,不需要专门进行注浆加固。

二级导水性:漏失量 $\leq 30 \text{ m}^3/\text{h}$,透水率 $> 10 \text{ Lu}$ 。表现为钻井液漏失量小,压水试验时水压上升缓慢,说明通道发育空间有限,但通道间连通性好,导水性一般,注浆加固过程中注浆材料选择水泥、粉煤灰等常规材料即可。

三级导水性:漏失量 $> 30 \text{ m}^3/\text{h}$,透水率 $\leq 10 \text{ Lu}$ 。表现为钻井液漏失量大,压水压力在短时间内上升,说明通道发育空间大,但通道间连通性差,导水性一般,注浆加固过程中注浆材料选择水泥、粉煤灰等常

规材料即可。

四级导水性：漏失量 $>30\text{ m}^3/\text{h}$ ，透水率 $>10\text{ Lu}$ 。表现为钻井液漏失量大或失返，压水试验水压上升缓慢，说明通道发育空间大，且通道间连通性好，导水性强，注浆加固过程中注浆材料除水泥、粉煤灰等常规材料，还应加入粗砂等骨料，对导水通道进行快速封堵。

3 工程示例

3.1 工程背景

华北型煤田某典型煤矿位于安徽省淮北市，东部有较大的复背斜，中部为复向斜，井田构造较为复杂。主采山西组6号煤层，煤层回采受到底板太原组薄层灰岩含水层和奥陶系灰岩含水层威胁。煤层底板共发育12层太原组薄层灰岩($L_1 \sim L_{12}$)，平均厚度 $1.32 \sim 12.17\text{ m}$ ，岩溶发育程度差异极大，Ⅲ631工作面曾发生过陷落柱突水，经物探解析区内发育多条断层并存在底板低阻异常区，底板导水通道的存在严重威胁着矿井的安全生产。

3.2 导水通道探查概况

结合第1节导水通道探查原则，利用地面定向钻进技术针对Ⅲ63采区部分工作面进行导水通道探

查。D1、D2、D3孔组实钻轨迹如图4所示。D4孔组实钻轨迹如图5所示。

3.3 导水通道识别与分类

3.3.1 导水断层

在D1孔组和D2孔组的探查过程中，根据判别标准识别出了导水断层4条，与采掘过程中实揭的断层SF1~SF4位置基本一致，位置如图4所示。

以D1主孔为例进行分析。岩屑指标方面：D1主孔于井深739 m开始沿 L_3 灰岩含水层钻进，灰岩含量100%，自1020 m岩屑由灰白色灰岩突变为灰黑色灰岩且夹杂泥岩颗粒，1022 m岩屑完全变为泥岩，调整钻孔轨迹，1058 m岩性恢复为灰白色灰岩。岩性变化期间没有发生异响。岩屑变化过程与图1中岩屑-II型标准曲线基本一致，据此判定1020 m附近存在断层。

钻时指标方面：如图6所示，D1主孔在从739 m进入太原组灰岩后正常钻时为 $6 \sim 8\text{ min/m}$ ，钻进至1020 m钻时突然加快到 $2 \sim 4\text{ min/m}$ ，1058 m钻时恢复到 $6 \sim 8\text{ min/m}$ ，钻时变化期间没有发生钻具突然放空的现象，且钻时变化范围大于 2 min/m ，继续钻进，1058~1190 m钻时为 $6 \sim 8\text{ min/m}$ ，期间也没有发生钻具突然放空的现象。钻时变化趋势与图2

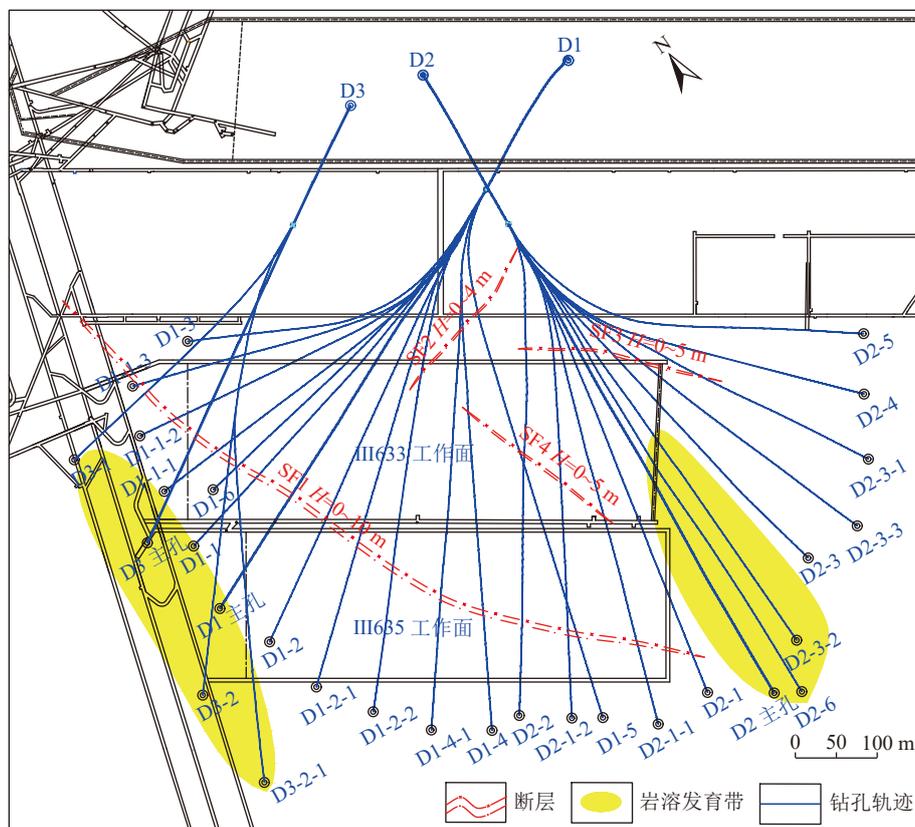


图4 D1、D2、D3孔组探查轨迹平面

Fig.4 Detection track of D1、D2、D3 hole groups

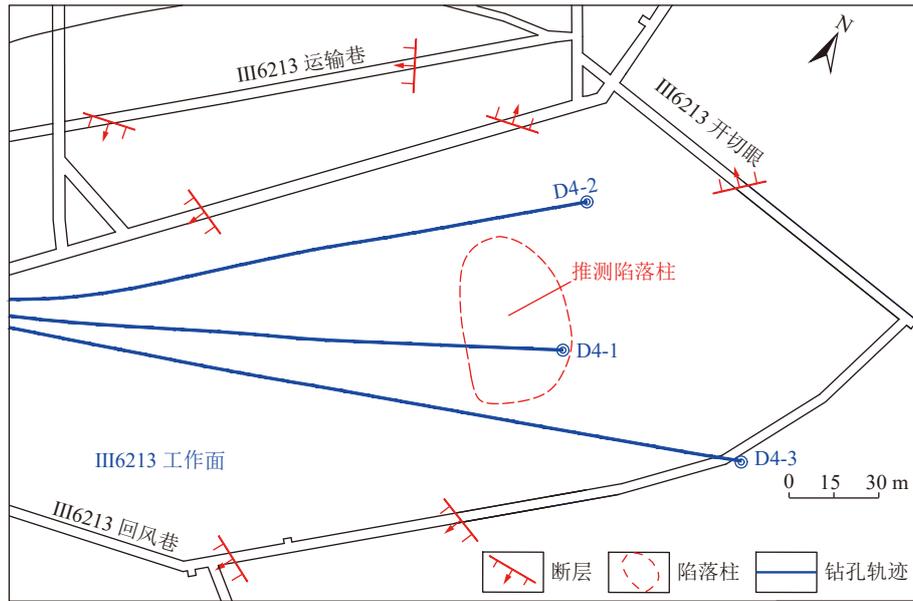


图5 D4孔组探查轨迹平面

Fig.5 Detection track of D4 hole groups

中钻时-Ⅱ型标准曲线基本一致。

根据以上分析, D1主孔岩屑和钻时变化类型为岩屑-Ⅱ型和钻时-Ⅱ型, 结合表1定性识别出1020 m附近存在小型断层。

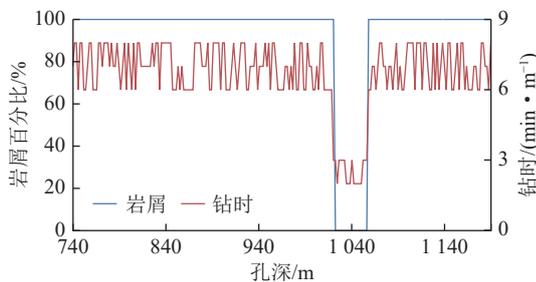


图6 D1主孔岩屑与钻时变化

Fig.6 Variation of rock debris and drilling time of D1 hole

根据2.2节的判识指标, D1主孔在1020 m附近钻探过程中钻井液漏失量为 $2 \text{ m}^3/\text{h}$, 属于“漏失-I”型; 压水试验透水率为 7.39 Lu , 属于“透水-I”型。根据表2确定出该处断层导水性为一级, 是发育空间有限, 通道间连通性差的小型断层, 不需要专门进行注浆加固。继续钻进至终孔1190 m岩性为纯灰岩, 未发生漏失。

3.3.2 导水岩溶裂隙带

在D2孔组和D3孔组的探查过程中, 根据判识标准识别出了导水裂隙发育带2处(图4)。

以D3-2孔为例进行分析。岩屑指标方面: D3-2孔自孔深600 m处沿 L_3 灰岩含水层钻进, 灰岩含量100%, 从860 m开始灰岩比例逐渐下降, 到1008 m

岩屑完全变为泥岩, 在1026 m岩屑中灰岩含量增加至20%, 至1060 m恢复为纯灰岩。岩性变化期间没有发生异响, 继续钻进至终孔1200 m仍为灰岩岩性。岩屑变化过程如图7所示, 与图1中岩屑-Ⅱ型标准曲线基本一致, 判定1008 m附近揭露岩溶裂隙带。

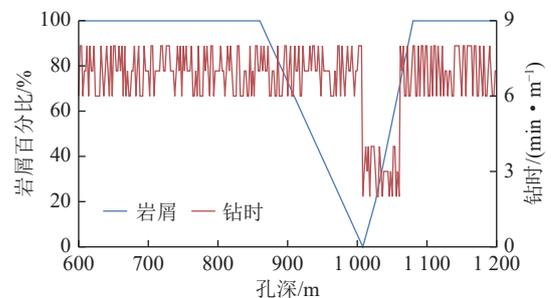


图7 D3-2孔岩屑与钻时变化

Fig.7 Variation of rock debris and drilling time of D3-2

钻时指标方面: 如图7所示, D3-2孔从600 m进入太原组灰岩正常钻时为 $6 \sim 8 \text{ min/m}$, 钻进至1008 m钻时突然加快到 3 min/m , 1008~1060 m钻时 $2 \sim 4 \text{ min/m}$, 调整轨迹后1061 m钻时恢复为 $6 \sim 8 \text{ min/m}$, 钻时变化范围大于 2 min/m , 钻时变化期间没有发生钻具突然放空的现象。钻时变化趋势与钻时-I型判识标准基本一致。钻时变化趋势与图2中钻时-Ⅱ型判识标准基本一致。继续钻进至终孔1200 m, 钻时为 $6 \sim 8 \text{ min/m}$, 期间也没有发生钻具突然放空的现象。

根据以上分析, D3-2孔岩屑和钻时变化类型为岩屑-I型和钻时-Ⅱ型, 结合表1定性识别出1008~

1 026 m 范围存在岩溶裂隙带。结合 D3 孔组其他钻孔情况, 判识 D3 孔组末端存在岩溶裂隙发育带。

根据 2.2 节的判识指标, D3-2 孔在 1 008 m 附近钻探过程中钻井液未发生明显漏失, 为“漏失-I”型; 进行压水试验, 透水率为 0.355 Lu, 为“透水-I”型。根据表 2 识别出该处通道导水性为一级, 是发育空间有限, 通道间连通性差的岩溶裂隙发育带, 不需要专门进行注浆加固。继续钻进至终孔 1 200 m 岩性为纯灰岩, 未发生漏失。

3.3.3 导水陷落柱

某工作面回采至 135 m 时发生底板出水, 水呈浑浊状, 稳定水量约 170 m³/h, 推测工作面发育有隐伏导水通道。在 D4 孔组探查过程中, 根据判识标准识别出 1 个导水陷落柱, 位置如图 5 所示。

D4-1 孔自孔深 680 m 处沿 L₃ 灰岩含水层钻进, 灰岩含量 100%, 正常钻时 7 min/m 左右, 钻进至 765 m 钻井液发生大量漏失, 漏失量大于 50 m³/h, 岩屑颗粒大小不一, 岩性杂乱。钻进至 779 m 钻井液失返, 无法获取岩屑。孔内发生“噼啪”声异响, 继续顶漏钻进至 788 m 钻井液仍失返并发生塌孔卡钻现象, 起钻准备注浆。779~788 m 钻时加快至 2 min/m, 未出现钻具放空现象。D4-1 孔岩屑变化符合岩屑-III 型标准曲线, 钻时变化趋势与图 2 中钻时-II 型判识标准基本一致。判定 779~788 m 进入陷落柱边缘裂隙带。

根据以上分析, D4-1 孔岩屑和钻时变化类型为岩屑-III 型和钻时-II 型, 结合表 1 定性识别出 779~788 m 范围存在半胶结陷落柱。D4 孔组其他钻孔对疑似陷落柱位置继续进行探查, 在附近位置同样发生钻井液全漏与钻时突然加快的现象。

根据 2.2 节的判识指标, D4-1 孔在 779~788 m 钻井液发生失返, 为“漏失-II”型; 进行压水试验, 压力为 0, 为“透水-II”型。根据表 2 识别出该处通道导水性为四级, 是发育空间大, 通道导水性强的陷落柱。治理过程中注浆材料除水泥外, 还应选用骨料对其进行封堵。

4 结 论

1) 根据煤层底板导水通道的特征, 利用地面定向钻进区域探查技术的优点, 提出导水通道超前钻探设计应服从轨迹合理、目标层合理和探查区域最大化的原则。

2) 确定了导水通道多元信息判识指标为: 以岩屑和钻时为主的定性指标与以钻井液漏失量和压水

试验透水率为主的定量指标。以此为基础提出了导水通道类型定性分类体系, 又根据钻井液漏失量是否大于 30 m³/h 和压水试验透水率是否大于 10 Lu 建立了导水性分级体系。

3) 通过分析华北型煤田某典型煤矿的水文地质条件与水害特征, 结合探查设计原则, 实施了该煤矿部分工作面导水通道探查工程, 利用导水通道判识指标和多元信息识别技术在研究区内准确识别出 4 条导水断层, 2 处岩溶裂隙发育带和 1 个导水陷落柱, 并确定了它们的导水性等级。

参考文献(References):

- [1] 何满潮. 深部建井力学研究进展[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 726-746.
HE Manchao. Research progress of deep shaft construction mechanics[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 726-746.
- [2] 秦波. 基于 ABAQUS 的深部巷道围岩变形破坏规律及应用研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2013: 1-2.
QIN Bo. Deformation and failure regularity of deep roadway and application research based on ABAQUS [D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2013: 1-2.
- [3] LIN Gang, DONG Donglin, LI Xiang, et al. Accounting for mine water in coal mining activities and its spatial characteristics in China[J]. Mine Water and the Environment, 2020, 39: 150-156.
- [4] 曾一凡, 刘晓秀, 武强, 等. 双碳背景下“煤-水-热”正效协同共采理论与技术构想[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 538-550.
ZENG Yifan, LIU Xiaoxiu, WU Qiang, et al. Theory and technical conception of coal-water-thermal positive synergistic co-extraction under the dual carbon background[J]. Journal of China coal society, 2023, 48(2): 538-550.
- [5] 靳德武. 我国煤层底板突水问题的研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2002, 30(6): 1-4.
JIN Dewu. Research status and outlook of water outburst from seam floor in China coal mines.[J]. Coal Science and Technology, 2002, 30(6): 1-4.
- [6] 袁亮. 我国煤炭资源高效回收及节能战略研究[J]. 中国矿业大学学报(社会科学版), 2018, 20(1): 3-12.
YUAN Liang. Strategies of high efficiency recovery and energy saving for coal resources in China[J]. Journal of China University of Mining & Technology(Social Sciences), 2018, 20(1): 3-12.
- [7] 李永军, 彭苏萍. 华北煤田岩溶陷落柱分类及其特征[J]. 煤田地质与勘探, 2006, 34(4): 53-57.
LI Yongjun, PENG Suping. Classifications and characteristics of Karst collapse columns in North China coalfields[J]. Coal Geology Exploration, 2006, 34(4): 53-57.
- [8] 郑士田. 两淮煤田煤层底板灰岩水害区域超前探查治理技术[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(4): 142-146, 153.
ZHENG Shitian. Advanced exploration and control technology of limestone water hazard in coal seam floor in Huainan and Huaibei coalfields[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(4): 142-146, 153.

- [9] 陈忠辉,胡正平,李辉,等. 煤矿隐伏断层突水的断裂力学模型及力学判据[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(5): 673-677.
CHEN Zhonghui, HU Zhengping, LI Hui, *et al.* Fracture mechanical model and criteria of insidious fault water inrush in coal mines[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2011, 40(5): 673-677.
- [10] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2813.
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, *et al.* Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2803-2813.
- [11] 尹尚先,连会青,刘德民,等. 华北型煤田岩溶陷落柱研究70年:成因·机理·防治[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(11): 1-29.
YIN Shangxian, LIAN Huiqing, LIU Deming, *et al.* 70 years of investigation on Karst collapse column in North China Coalfield: cause of origin, mechanism and prevention[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(11): 1-29.
- [12] 武强,郭小铭,边凯,等. 开展水害致灾因素普查防范煤矿水害事故发生[J]. 中国煤炭, 2023, 49(1): 3-15.
WU Qiang, GUO Xiaoming, BIAN Kai, *et al.* Carrying out general survey of the water disastercausing factors to prevent the occurrence of coal mine water disasters. [J]. *China Coal*, 2023, 49(1): 3-15.
- [13] 张党育,蒋勤明,高春芳,等. 华北型煤田底板岩溶水害区域治理关键技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(6): 31-36.
ZHANG Dangyu, JIANG Qinming, GAO Chunfang, *et al.* Study progress on key technologies for regional treatment of Karst water dam-age control in the floor of North China Coalfield[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(6): 31-36.
- [14] 张玉军,张志巍,肖杰,等. 承压水体上煤层底板下位隐伏断层采动突水机制研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 283-291.
ZHANG Yujun, ZHANG Zhiwei, XIAO Jie, *et al.* Study on mining water inrush mechanism of buried fault under coal seam floor above confined water body[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(2): 283-291.
- [15] 王克勤. 隐伏陷落柱突水的快速治理技术研究[J]. 能源与节能, 2020(6): 126-127,166.
WANG Keqin. Research on the rapid treatment technology of water inrush from hidden collapse column[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2020(6): 126-127,166.
- [16] ZHANG Tianjun, PANG Mingkun, JI Xiang, *et al.* Dynamic response of a non-darcian seepage system in the Broken Coal of a Karst Collapse Pillar[J]. *Mine Water and the Environment*, 2021, 40: 713-721.
- [17] XU Zhimin, SUN Yajun, GAO Shang, *et al.* Comprehensive exploration, safety evaluation and grouting of karst collapse columns in the Yangjian coalmine of the Shanxi province, China[J]. *Carbonates and Evaporites*, 2021, 36(1): 1-12.
- [18] 董书宁,郭小铭,刘其声,等. 华北型煤田底板灰岩含水层超前区域治理模式与选择准则[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(4): 1-10.
DONG Shuning, GUO Xiaoming LIU Qisheng, *et al.* Model and selection criterion of zonal preact grouting to prevent mine water disasters of coal floor limestone aquifer in North China type coalfield[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(4): 1-10.
- [19] 赵庆彪. 奥灰岩溶水害区域超前治理技术研究及应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(6): 1112-1117.
ZHAO Qingbiao. Ordovician limestone karst water disaster regional advanced governance technology study and application[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(6): 1112-1117.
- [20] 赵家巍,周宏伟,薛东杰,等. 深部承压水上含隐伏构造煤层底板渗流路径扩展规律[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1836-1845.
ZHAO Jiawei, ZHOU Hongwei, XUE Dongjie, *et al.* Expansion law of seepage path in the concealed structural floor of coal seam in deep confined water[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(6): 1836-1845.
- [21] 董书宁,刘其声,王皓,等. 煤层底板水害超前区域治理理论框架与关键技术[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 185-195.
DONG Shuning, LIU Qisheng, WANG Hao, *et al.* Theoretical framework and key technology of advance regional control of water inrush in coal seam floor[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(1): 185-195.
- [22] 郑士田. 地面定向钻进技术在煤矿陷落柱突水防治中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(7): 229-233.
ZHENG Shitian. Application of ground directional borehole technology to control prevention karst collapsed column water inrush in coal mines[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(7): 229-233.
- [23] 王进尚,姚多喜,黄浩. 煤矿隐伏断层递进导升突水的临界判据及物理模拟研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 2014-2020.
WANG Jinshang, YAO Duoxi, HUANG Hao. Critical criterion and physical simulation research on progressive ascending water inrush in hidden faults of coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(7): 2014-2020.
- [24] 顾大钊,李井峰,曹志国,等. 我国煤矿矿井水保护利用发展战略与工程科技[J]. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3079-3089.
GU Dazhao, LI Jingfeng, CAO Zhiguo, *et al.* Technology and engineering development strategy of water protection and utilization of coal mine in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(10): 3079-3089.
- [25] 温亨聪,刘宝宝,杨海涛. 煤矿导水通道超前探查研究[J]. 煤炭技术, 2020, 39(12): 118-121.
WEN Tingcong, LIU Baobao, YANG Haitao. Research on advanced exploration of coalmine water-conducting channels[J]. *Coal Technology*, 2020, 39(12): 118-121.
- [26] 鲁晶津. 工作面隐伏含水断层电透视异常特征模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(8): 168-175.
LU Jingjin. Simulation study on electrical penetration anomalous features of hidden water-bearing fault in working face[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(8): 168-175.
- [27] 孙运江,左建平,李玉宝,等. 邢东矿深部带压开采水裂隙带微震监测及突水机制分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2335-2342.
SUN Yujiang, ZUO Jianping, LI Yubao, *et al.* Micro-seismic monitoring on fractured zone and water inrush mechanism analysis

- is of deep mining above aquifer in Xingdong coalmine[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(8): 2335–2342.
- [28] 刘泽威, 刘其声, 刘 洋. 煤层底板隐伏断层分类及突水防治措施[J]. *煤田地质与勘探*, 2020, 48(2): 141–146.
LIU Zewei, LIU Qisheng, LIU Yang. Classification of hidden faults in coal seam floor and measures for water inrush prevention[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(2): 141–146.
- [29] 郭惟嘉, 张士川, 孙文斌, 等. 深部开采底板突水灾变模式及试验应用[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(1): 219–227.
GUO Weijia, ZHANG Shichuan, SUN Wenbin, *et al.* Experimental and analysis research on water inrush catastrophe mode from coal seam floor in deep mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(1): 219–227.
- [30] HU Weiyue, ZHAO Chunhu. Evolution of water hazard control technology in China's coal mines[J]. *Mine Water and the Environment*, 2021, 40: 334–344.
- [31] 陈军涛, 张 毅, 武善元, 等. 黄河北煤田顶底板定向注浆关键技术[J]. *煤矿安全*, 2021, 52(5): 104–111.
CHEN Juntao, ZHANG Yi, WU Shanyuan, *et al.* Key technology of directional grouting in roof and floor of coal field in the north of the Yellow River[J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(5): 104–111.
- [32] DONG Shuning, ZHENG Liwei, TANG Shengli, *et al.* A scientometric analysis of trends in coal mine water inrush prevention and control for the period 2000–2019[J]. *Mine Water and the Environment*, 2020, 39: 3–12.
- [33] 薛 硕, 吴昊晟, 倪朋勃, 等. 钻时和扭矩变换方法在岩性变化判断中的应用探讨[J]. *录井工程*, 2021, 32(2): 26–30.
XUN Shuo, WU Haocheng, NI Pengbo, *et al.* Discussion on application of drilling time and torque conversion method in lithology change identification[J]. *Mud Logging Engineering*, 2021, 32(2): 26–30.
- [34] 王锦国, 周志芳, 黄 勇. 基于压水试验资料的岩体透水性分形特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(4): 562–565.
WANG Jinguo, ZHOU Zhifang, HUANG Yong. Study on permeability of rock mass based on water pressure test data by using fractal theory[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(4): 562–565.