

# 陕西省煤矿典型水灾隐患特征及治理技术

董书宁<sup>1,2,3</sup>, 樊 敏<sup>1,2,3</sup>, 郭小铭<sup>2,3</sup>, 刘英峰<sup>2,3</sup>, 郭 康<sup>2,3</sup>, 姬中奎<sup>2,3</sup>, 李超峰<sup>2,3</sup>, 薛小渊<sup>2,3</sup>

(1. 煤炭科学研究院, 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技术重点实验室, 陕西 西安 710077)

**摘要:** 陕西省煤炭资源丰富, 2022年煤炭产量达7.46亿t, 是我国主要产煤省份之一。由于全省煤矿区地质及水文地质条件差异明显, 煤矿水灾类型多样, 随着近年煤炭开采强度的增大, 水灾事故时有发生, 防治水形势较为严峻。以煤炭赋存条件为基础, 系统总结区域水文地质结构特征, 界定典型水灾类型及各类水灾影响区域分布, 论述典型水灾的形成机理及特征, 并提出了相应的防控技术。研究表明: ①陕西省主要煤炭产区分为陕北、黄陇、渭北三大区, 陕北侏罗纪煤田主要有顶板松散沙层水灾隐患、厚层砂岩水灾隐患、溃水溃沙灾害, 局部区域分布有烧变岩对煤矿造成水灾隐患; 黄陇煤田主要受顶板巨厚砂岩水灾隐患、离层溃水隐患、泥砂溃涌灾害隐患威胁; 陕北石炭—二叠纪煤田和渭北煤田, 主要受到煤层底板奥陶系灰岩水灾隐患威胁。②陕北侏罗系煤田顶板水灾隐患主要为顶板含水层受开采导水裂隙带扰动形成, 导水裂隙波及砂岩含水层或松散沙层可形成持续大流量涌水, 部分区域充水强度较大, 在短时间水量较大超过排水系统能力时造成顶板水灾, 在薄基岩区域垮落带直接导通松散沙层时可转变为溃水溃沙灾害, 导水裂隙带影响到烧变岩富水区域时可形成瞬时水量大且持续的烧变岩水灾; 黄陇煤田顶板巨厚砂岩含水层受采动导水裂隙带波及形成高强度持续涌水并可能形成顶板水灾, 当含水层下部隔水层厚度较大时, 可能形成离层溃水灾害, 当近煤层顶板岩层松软遇水易崩解时可转变为泥砂溃涌灾害; 陕北石炭—二叠纪煤田和渭北煤田, 煤层开采底板扰动破坏带或断层等构造导通奥陶系灰岩含水层时, 会引发极为严重的底板突水灾害, 该类灾害具突发性强、瞬时水量大的特征。③各区域的顶板水灾隐患治理技术主要包括钻孔疏泄、注浆治理、开采参数控制等, 底板水灾隐患治理技术主要包括区域注浆加固及封堵等; 烧变岩水灾隐患主要采取帷幕注浆与钻孔探放有机结合的防治技术。

**关键词:** 陕西省煤矿; 溃水溃沙; 烧变岩水灾; 离层溃水; 泥砂溃涌; 底板奥灰水灾

**中图分类号:** TD745    **文献标志码:** A    **文章编号:** 0253-9993(2024)02-0902-15

## Characteristics and prevention and control techniques of typical water hazards in coal mines in Shaanxi Province

DONG Shuning<sup>1,2,3</sup>, FAN Min<sup>1,2,3</sup>, GUO Xiaoming<sup>2,3</sup>, LIU Yingfeng<sup>2,3</sup>,  
GUO Kang<sup>2,3</sup>, JI Zhongkui<sup>2,3</sup>, LI Chaofeng<sup>2,3</sup>, XUE Xiaoyuan<sup>2,3</sup>

(1. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 3. Shaanxi Key Laboratory of Coal Mine Water Hazard Prevention and Control Technology, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** Shaanxi province is rich in coal resources and is one of the main coal-producing provinces in China, with a coal

收稿日期: 2023-11-12 修回日期: 2024-01-15 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jcgs.YH23.1493

基金项目: 陕西省自然科学基础研究计划重点资助项目(2023-JC-ZD-27); 天地科技有限公司科技创新创业资金专项重点资助项目(2022-2-TD-ZD005)

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

引用格式: 董书宁, 樊敏, 郭小铭, 等. 陕西省煤矿典型水灾隐患特征及治理技术[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 902-916.

DONG Shuning, FAN Min, GUO Xiaoming, et al. Characteristics and prevention and control techniques of typical water hazards in coal mines in Shaanxi Province[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 902-916.



移动阅读

production of 746 million tons in 2022. Due to the obvious differences in geological and hydrogeological conditions in the coal mining areas of the province, there are various types of water disasters in its coal mines. With the increase of coal mining intensity in recent years, the frequency of water disasters increases significantly, and the situation of water prevention and control is challenging. On the basis of the overall analysis of the hydrogeological conditions in the coal mining areas of Shaanxi province, combined with the types of water disasters revealed in the mining process of various mining areas in the province, the regional distribution of all kinds of water disasters is systematically summarized, and the formation mechanism and characteristics of typical water disasters are discussed. Also, the corresponding prevention and control technology and progress are put forward. The results show that ① the main coal producing areas in Shaanxi province are divided into northern Shaanxi, Huanglong and Weibei. The Jurassic coalfield in northern Shaanxi is mainly affected by the water disaster of roof's loose sand layer, the water disaster of thick sandstone, water and sand burst disaster, and the burnt rock flood exists in some coal mines. The Huanglong coalfield is mainly threatened by roof super-thick sandstone water, separated layer water, mud and sand burst disaster or hidden danger. The Carboniferous-Permian coalfields in northern Shaanxi and Weibei are mainly threatened by the water damage of Ordovician limestone on the coal seam floor. ② The hidden danger of roof flood in the Jurassic coalfield in northern Shaanxi is mainly formed by the disturbance of roof aquifer by mining water diversion fracture zone, which can form a continuous large flow water gushing through sandstone aquifer or loose sand layer, and the water filling intensity is large in some areas. Roof flood occurs when the amount of water exceeds the capacity of the drainage system in a short time, and it can be transformed into water and sand burst disaster when the collapse zone in the thin bedrock area directly leads to the loose sand layer. When the water-conducting fracture zone affects the water-rich area of burnt rock, it can form a flood of burnt rock with large instantaneous water volume and continuous flood. The super-thick sandstone aquifer on the roof of the Huanglong coalfield is swept by the mining water-conducting fracture zone to form a high-intensity continuous water gushing and may form roof flood. When the thickness of the lower aquifer is large, the separated layer water burst disaster may be formed. When the roof strata near the coal seam is soft and easy to collapse, it can be transformed into mud and sand burst disaster. In the Carboniferous-Permian coalfield and the Weibei coalfield in northern Shaanxi, when structures such as coal seam mining floor disturbance failure zones or faults lead to the Ordovician limestone aquifers, they will cause extremely serious floor water inrush disasters, which are characterized by strong sudden occurrence and large instantaneous water volume. ③ The roof water disaster treatment technology in each region mainly includes drilling hole drainage, grouting treatment, mining parameter control and so on, and the floor water damage is mainly treated by regional grouting reinforcement and plugging. Burnt rock water disaster is mainly treated by the combination of curtain grouting and drilling exploration.

**Key words:** coal mine in Shaanxi Province; water and sand inrush; burnt rock water hazard; bed separation water inrush; mud and sand inrush; floor Ordovician limestone water hazard

煤炭在我国一次能源结构中占据着首要地位,煤炭资源的安全高效开采关乎国家能源安全和发展<sup>[1]</sup>。陕西省煤炭资源丰富,拥有陕北、神东、黄陇等亿吨级煤炭基地<sup>[2]</sup>,是我国煤炭能源战略发展的重要区域,2022年全省原煤产量达7.46亿t,约占全国总煤炭产量的16.8%<sup>[3]</sup>。然而,由于区域水文地质条件的差异明显,全省水灾类型多样,且随着省内侏罗纪煤田开发强度逐渐增加,实际揭露结果表明,陕西省煤矿水文地质条件总体较为复杂,近年来各类水灾事故呈多发态势<sup>[4]</sup>,例如2016年铜川照金煤矿发生的“4·25”泥砂溃涌事故、2021年榆林郝家梁煤矿发生的“7·15”溃水溃沙事故、郭家河煤矿发生的“8·21”离层溃水事故等,此外,陕西省部分煤矿涌水量极大,

矿井防治水工作难度高<sup>[5-6]</sup>,这都成为制约陕西煤矿安全生产的重要因素。

国内外部分学者就陕西省煤矿水灾隐患进行了系统性研究,范立民<sup>[7]</sup>总结得出陕西省煤矿水害的基本类型为顶板水、底板水、采空区水、烧变岩水,王苏健等<sup>[8]</sup>也对陕西安康、榆林、神木等地煤矿水害的防治技术进行了系统总结;在致灾机理方面,大量学者针对榆林矿区、黄陇煤田直罗组和洛河组含水层进行了含水层富水性<sup>[9-11]</sup>、沉积控水模式<sup>[12-14]</sup>及开采扰动下含水层渗流规律研究<sup>[15-16]</sup>,用于指导顶板含水层充水型水灾隐患防治;同时开展了矿山水文地质结构概化分析<sup>[17-19]</sup>、溃水溃沙灾害形成机理<sup>[20-21]</sup>、离层溃水灾害形成机理<sup>[22-23]</sup>等方面综合研究;借鉴我国华北型煤田

多年来煤层底板奥灰水防治形成的新技术成果<sup>[24-25]</sup>,在渭北煤田开展了底板隔水层阻隔水能力与超前区域治理研究。

近年来,虽然全省煤矿水害防治工作理念、技术水平都有了长足的进步,但由于大中型煤矿数量的大幅增加<sup>[26]</sup>、开采规模的显著增大<sup>[27]</sup>以及全省煤矿水文地质条件差异明显,水灾事故发生起数和死亡人数均有较明显的上升趋势,这些都给陕西省煤矿防治水工作带来巨大挑战。为了进一步保障陕西省煤炭资源的安全高效开发,需系统分析陕西省煤矿水文地质条件的差异性特征,进行水灾隐患类型分区,并提出各类水灾的防治技术,以期为全省煤矿水患防治提供有益的指导。

## 1 陕西省煤田分布及水文地质条件

### 1.1 煤炭资源分布特征

陕西省域分属三大构造单元<sup>[28]</sup>,北部属于华北陆块区,中部属于秦祁昆造山系,南部属于扬子陆块区,主要分布陕北侏罗纪煤田、黄陇侏罗纪煤田、渭北石炭—二叠纪煤田、陕北石炭—二叠纪煤田和陕北三叠纪煤田,主要位于渭河以北地区,渭河以南有零星煤层分布(图1)。五大煤田均属于较稳定的鄂尔多斯盆地东南缘区域,含煤地层包括石炭系太原组、二叠系山西组、三叠系瓦窑堡组、侏罗系延安组<sup>[29]</sup>,各组可采煤层3~5层,平均可采厚度1.84~12.80 m,含煤面积约5.6万km<sup>2</sup>,占全省面积的28%,资源储量约1815.65亿t<sup>[30]</sup>。

### 1.2 煤矿区地质及水文地质特征

陕西省地域南北狭长,省内五大煤田分布区内地表水系以黄河及其支流为主,发育有古生界—新生界多个碳酸岩、碎屑岩、松散岩类含水岩系,区域内以大气降水为主要补给来源,从各自的补给区向当地黄河、渭河等形成的排泄基准面径流,以泉水、河流、人工采矿涌水的形式排泄<sup>[31-32]</sup>。

区内主要含水岩系自下而上可划分为4个含水层系统<sup>[33-34]</sup>(图2)。

#### (1) 寒武系—奥陶系碳酸盐岩类岩溶含水层系统。

以溶隙、溶孔及小溶洞为主要含水空间,在陕北、关中区域深部连续分布,沿东部黄河一线抬升,在府谷、吴堡、渭南一带有出露,深部岩溶水滞留封闭,在东部埋深较浅区域存在现代岩溶水的循环交替,普遍水量大、水质好。

#### (2) 石炭系—侏罗系碎屑岩类裂隙含水层系统。

包括石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系共4个含水层,在陕西省内均有发育,岩性以砂泥岩互层为主,

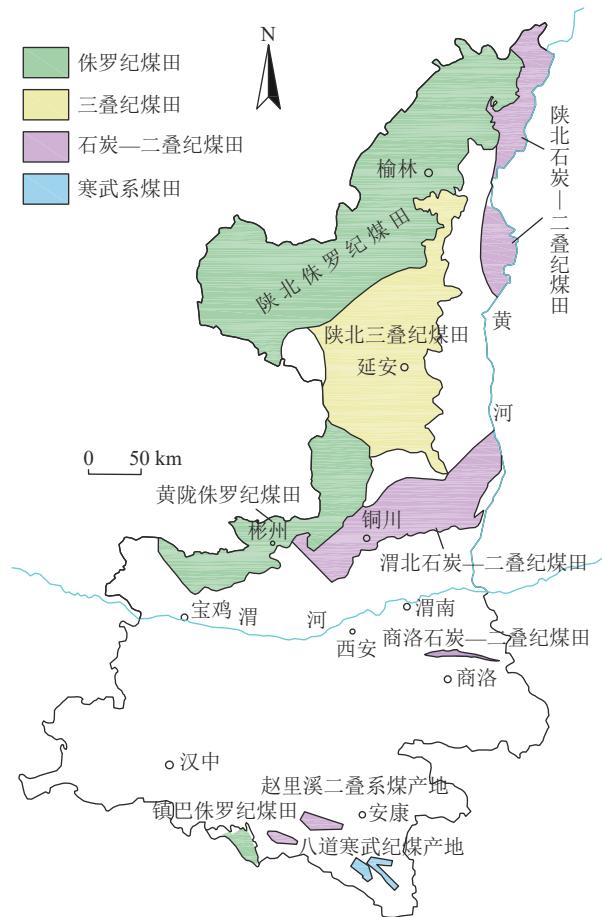


图1 陕西省主要煤炭资源分布

Fig.1 Distribution of main coal resources in Shaanxi Province

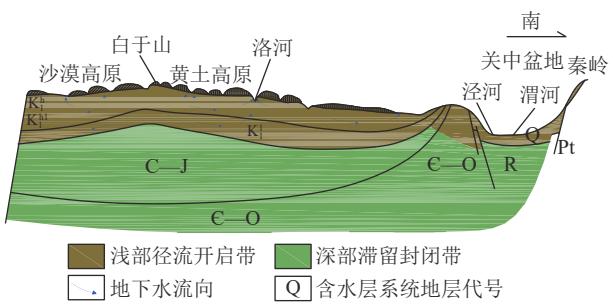


图2 地下水含水层系统剖面<sup>[35]</sup>

Fig.2 Profile of groundwater aquifer system<sup>[35]</sup>

整体埋藏较深,补给条件差,径流迟缓,富水性弱。陕北局部区域埋深较小,露头区受侏罗系煤层自燃形成烧变岩,富水性较强。

#### (3) 白垩系碎屑岩类孔隙—裂隙含水层系统。

岩性以砂岩、砾岩为主,夹泥岩薄层,该含水岩系在鄂尔多斯盆地内沿白于山分为南北两部分,省内主要分布于南部黄土高原区域,白垩系在沟谷中出露,接受大气降水补给,向南部洛河、泾河方向径流,以河流、人工采矿涌水为主要排泄方式,是区域内煤矿开采的主要充水含水层。

#### (4) 新生界松散岩类孔隙含水层系统。

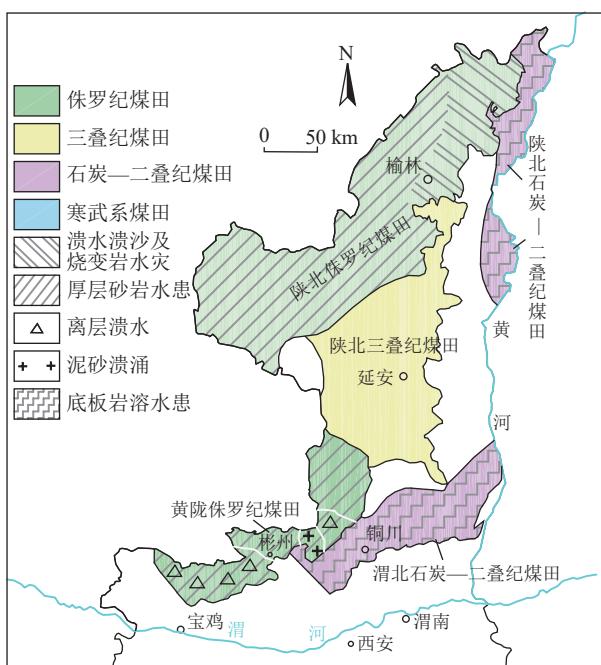


图3 陕西省主要煤田水灾隐患分布

Fig.3 Distribution of hidden danger of flood in main coalfields in Shaanxi Province

主要包括第四系风积和冲积层、冲(洪)积砂砾石层及黄土, 储水、导水性较好, 榆林北部地表冲积层、风积沙层富水性强, 向南部黄土高原受地形切割强烈, 地下水相对贫乏。

### 1.3 典型水灾分布

受区域构造及沉积作用控制, 陕西省内含水层系统复杂, 其中影响煤矿开发的主要含水层包括侏罗系孔隙裂隙含水层、白垩系孔隙裂隙含水层、第四系孔隙含水层、奥陶系岩溶裂隙含水层, 各含水层分布及特征差异明显(表1)。同时, 主要煤矿区的煤层赋存条件多样<sup>[36-37]</sup>, 加之开采强度不一, 造成不同区域的煤炭开采引发的水灾类型及影响程度<sup>[38]</sup>各不相同(表2)。

通过系统分析陕西省煤矿区水文地质条件, 结合多年来开采实际揭露水灾影响程度, 发现陕西省主要煤矿区的水灾类型具有明显的分区特征, 各煤田水灾隐患类型差异显著(图3)。

具体而言, 陕西省东部边界沿黄河—渭河至铜川一带分布的陕北石炭—二叠系煤田、渭北石炭二叠系煤田均受底板奥灰水患威胁, 但陕北石炭—二叠系煤

表1 陕西省煤矿开采主要充水含水层特征

Table 1 Characteristics of main water-filled aquifers in coal mining in Shaanxi Province

含水层	侏罗系孔隙裂隙含水层		白垩系洛河组孔隙裂隙含水层	第四系萨拉乌苏组孔隙含水层	奥陶系岩溶裂隙含水层
	烧变岩含水层	直罗组砂岩含水层	白垩系洛河组孔隙裂隙含水层	第四系萨拉乌苏组孔隙含水层	奥陶系岩溶裂隙含水层
主要分布范围	陕北榆林、神木	渭河以北广泛分布	渭河以北广泛分布	陕北榆林北部	渭北澄合、韩城
岩性	粉砂~中砂岩, 烧变后呈片状、块状	细砂~粗砂岩, 局部含泥岩	细、中、粗砂岩为主	粉细砂、细砂、亚黏土为主	石灰岩、白云质灰岩
厚度/m	20~30, 局部达50	30~100, 局部达200	200~300, 最大达到450	30~80	0~150
渗透系数/(m·d <sup>-1</sup> )	一般>100, 最大可达1 631.3	0.004~4.958	0.016~0.848	0.231~5.100	0.000 812~0.224
单位涌水量/(L·(s·m) <sup>-1</sup> )	9.98	0.003~5.830	0.011~3.185	0.084~1.500	0.000 294~3.22
富水性	强	弱~强	弱~强	中等~强	强, 但富水性极不均一

表2 2000—2022年陕西省部分煤矿水灾事故

Table 2 Water inrush accident in some coal mines in Shaanxi Province from 2000 to 2022

序号	煤矿名	发生事件	事故类型	影响程度
1	桑树坪煤矿	2003年9月, 挖进工作面老空透水, 水量8.7万m <sup>3</sup>	老空透水	死亡15人
2	黄陵一号井	2004年4月, 402工作面顶板溃水 <sup>[39]</sup> , 最大1 086 m <sup>3</sup> /h	顶板溃水	停产数日
3	长安煤矿	2008年10月, 4103掘进工作面老空透水	老空透水	死亡3人
4	桑树坪煤矿	2011年8月, 奥灰水经小窑淹没矿井, 最大涌水量6 580 m <sup>3</sup> /h	底板突水	全矿井被淹
5	隆德煤矿	2012年11月, 富水沙层经钻孔溃至井下	溃水溃沙	淹没水泵房
6	桑树坪煤矿	2015年12月, 老空水淹没巷道	老空透水	停产数日
7	照金煤矿	2016年4月, ZF202工作面泥砂溃涌	泥砂溃涌	死亡11人
8	板定梁塔煤矿	2017年4月, 邻矿剥采坑积水淹没掘进巷道, 12.16万m <sup>3</sup>	地表水灾	6人被困涉险
9	郝家梁煤矿	2021年7月, 30108工作面溃水溃沙	溃水溃沙	死亡5人
10	郭家河煤矿	2021年, 1309工作面离层突水	离层溃水	1人被困涉险
11	芦则沟煤矿	2022年7月, 11503运输巷掘进工作面突水	老空透水	死亡3人

注: 另有大量煤矿发生水灾险情导致淹工作面、短期停产等事件。

田目前开采标高多高于奥灰水位<sup>[40]</sup>,因此底板水患威胁区域主要在渭北石炭一二叠系煤田东部;沿西部省界自北向南依次分布的陕北侏罗系煤田、陕北三叠系煤田、黄陇侏罗系煤田主要受顶板水患影响,陕北三叠系煤田主要可采煤层厚度仅0~3.10 m,煤层顶板以延安组弱富水性含水层为主<sup>[41]</sup>,受水患威胁程度小。陕北、黄陇侏罗系煤田水患不同埋深、不同含隔水层组合条件下表现出多种涌水致灾特征<sup>[42-43]</sup>,陕西省煤矿典型水灾类型及特征见表3。省内老空透水灾害时有发生,其防治措施主要在于对历史上开采遗留的老窑积水空间探查和治理;地表水灾害在陕北侏罗系煤田东部浅埋煤层较为多见,其他地区煤层浅埋、露头或存在封闭不良钻孔时也会出现地表水灾害,老空透水和地表水灾害在省内不具有明显分区特征,致灾机理较明确,防治技术成熟,在此不作为典型水灾列出。

笔者综合分析各分区水文地质特征,进一步研究各类水灾隐患形成的主要机制,并梳理总结主要防治技术,旨在为陕西省煤矿区水灾防治工作提供有力支撑。

## 2 陕北侏罗纪煤田典型水灾特征及治理技术

### 2.1 水灾分布特征

陕北侏罗纪煤田沿陕蒙省界呈NE向条带状分布于定边至神木,整体位于鄂尔多斯盆地伊陕斜坡北部,主采延安组2<sup>2</sup>、3<sup>1</sup>、5<sup>2</sup>煤,开采厚度2~12 m。

区内矿井埋深向SW方向逐渐增大,水灾类型也存在差异,其中中埋、深埋区域以直罗组(J<sub>2</sub>z)、洛河组(K<sub>1</sub>l)厚层砂岩水灾为主,浅埋区域以第四系松散

孔隙含水层(Q<sub>3</sub>s)溃水溃沙为主,局部煤层露头区域存在烧变岩水灾<sup>[44]</sup>,溃水溃沙与烧变岩水灾主要分布在神府矿区及榆神矿区东部<sup>[45]</sup>,是区域典型水灾隐患(图4)。

### 2.2 典型水灾特征及治理技术

#### 2.2.1 溃水溃沙

(1) 溃水溃沙形成机理。

基于溃水溃沙的致灾过程及特征,对浅埋煤层覆岩破坏结构重新划分(图5)<sup>[47]</sup>,提出了“导水沙裂隙带”的定义,将具备水沙纵向运移通道的垮落性裂隙带和网络性裂隙带统称为导水沙裂隙带<sup>[48]</sup>。溃水溃沙即在薄基岩上覆富水沙层条件下开采时,导水沙裂隙带波及富水沙层,涌水溃沙大量涌入井下采掘空间致灾<sup>[49]</sup>,具有突发性强、持续时间不定、破坏性大的特点。

(2) 溃水溃沙治理关键技术体系。

溃水溃沙的致灾条件主要有以下4个方面<sup>[50]</sup>:①物源条件。导水沙裂隙带内具备一定厚度的富水沙层。②通道条件。主要导水通道为采掘形成的导水沙裂隙带,次要通道有断层构造、封闭不良钻孔等。③动力条件。潜水沙层的高水位压力与自身重力势能。④空间条件。采掘位置具备容纳水沙进入的空间。

溃水溃沙灾害防控的核心在于改变溃水溃沙的物源、通道或动力条件,目前经过大量实践,基本形成了包括注浆固沙、封堵通道、疏水降压<sup>[51]</sup>等关键技术于一体的,溃水溃沙灾害防治技术体系(图6)。

(3) 应用案例。

哈拉沟煤矿22408工作面采高为3.5 m,过沟段

表3 陕西省煤矿典型水灾类型、特征及问题

Table 3 Typical types and characteristics of water disaster in coal mines in Shaanxi Province

水灾类型	烧变岩水灾	溃水溃沙	离层溃水灾害	泥砂溃涌	厚层砂岩水灾	底板奥灰水灾
致灾含水层	烧变岩	萨拉乌苏组	洛河组	洛河组、直罗组	直罗组、洛河组	峰峰组
分布范围	神府、榆神矿区	永陇、焦坪矿区	旬耀矿区	榆横矿区及黄陇煤田	澄合、韩城矿区	为主
岩层组合特征	煤层直接接触 烧变岩	顶板薄基岩上 覆富水沙层	含水层下伏 泥岩隔水层	厚层泥岩与煤 层顶板间距小	厚层砂岩下无隔水层	底板隔水层厚度小
防治水问题	留设煤柱浪费 煤炭资源	缺乏判识标准, 沙层固结难度大	主控因素不明, 探放难度大	突发性强,难以治理	限采厚措施浪费 煤炭资源	超前治理技术 体系不健全

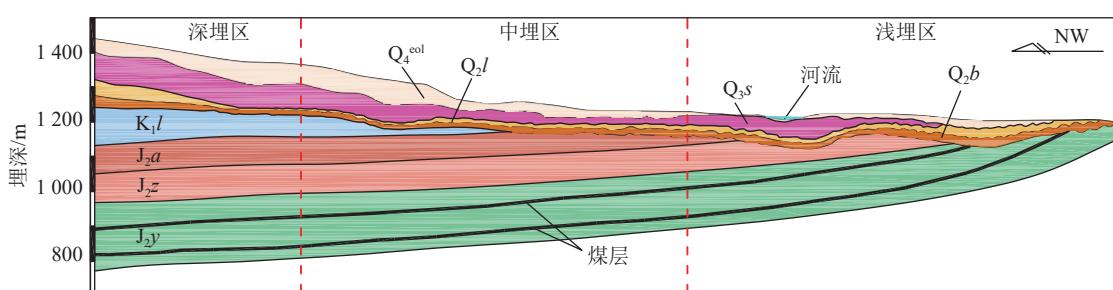


图4 陕北侏罗系煤田地层结构及煤层埋深分区<sup>[46]</sup>

Fig.4 Stratigraphic structure and coal seam depth zoning of Jurassic coalfield in northern Shaanxi<sup>[46]</sup>

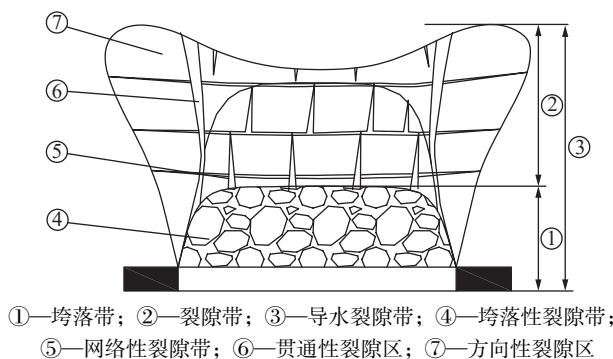
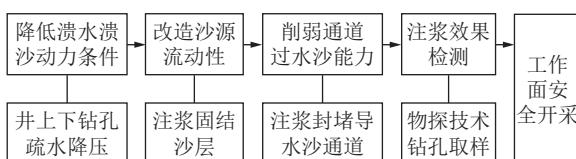
图 5 浅煤层覆岩破坏划分示意<sup>[47]</sup>Fig.5 Schematic diagram of failure division of overlying rock in shallow coal seam<sup>[47]</sup>

图 6 溃水溃沙灾害治理技术体系

Fig.6 Technical system for disaster control of water and sand inrush

顶板基岩厚度 12.5~25.3 m, 松散含水层厚度 21.5 m, 计算其导水沙裂隙带能够波及松散沙层, 溃水溃沙风险较高, 并依据上述关键技术开展了一系列治理工程(图 7)。

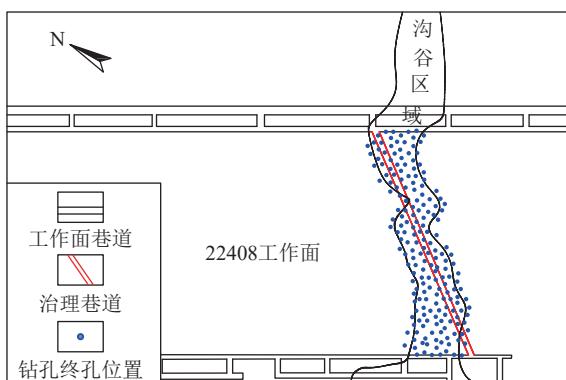


图 7 哈拉沟煤矿 22408 工作面溃水溃沙治理工程

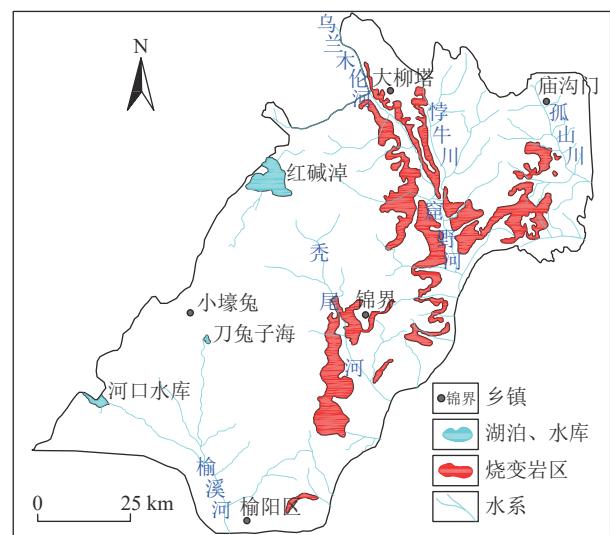
Fig.7 Water and sand inrush control project of 22408 working face in Halagou Coal Mine

通过分析, 采用注浆固沙为主的治理方式, 在 22408 工作面沿地表沟谷走向掘设一条疏放水巷道, 施工顶板疏水钻孔 82 个, 累计放水量为  $3.17 \times 10^5 \text{ m}^3$ , 残余水位仅 5.4 m; 同时井下沿沟谷基岩厚度小于 20 m 区域施工注浆钻孔 330 个, 对上覆风化岩及松散沙层进行劈裂注浆, 经钻孔取样检测, 注浆加固厚度及范围满足要求, 实现了矿井 22408 工作面安全生产。类似的, 大柳塔、石圪台等煤矿也采用该技术成功治理了溃水溃沙灾害隐患。

## 2.2.2 烧变岩水灾

### (1) 烧变岩水灾特征。

陕北侏罗纪煤田烧变岩主要分布在神府、榆神矿区秃尾河、窟野河沟谷沿岸<sup>[52]</sup>(图 8), 为沟谷露头区域煤层自燃、覆岩烧变后形成, 一般厚度 20~30 m。

图 8 烧变岩分布区域<sup>[53]</sup>Fig.8 Regional map of burnt rock distribution<sup>[53]</sup>

烧变岩裂隙空隙发育, 受大气降水与地表水体补给, 静储量丰富<sup>[54]</sup>, 近水库、河流处动储量较大。张家峁煤矿在火烧区钻孔实测单位涌水量最大  $10 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$ , 渗透系数最大  $148.7 \text{ m/d}$ <sup>[55]</sup>。煤层开采揭露或导水裂隙带波及烧变岩富水区可形成烧变岩水灾, 柠条塔煤矿揭露烧变岩后瞬时水量可达  $1200 \text{ m}^3/\text{h}$ <sup>[56]</sup>。

### (2) 烧变岩水灾隐患治理技术。

对于无补给水源的烧变岩含水层, 其水患的治理与老空水治理较为类似, 核心在于准确探查和超前疏放。但是, 在陕北存在的烧变岩与地表水、强含水层联通情况下, 单纯的探查和疏放技术就无法有效消除烧变岩水患, 更多需要采用帷幕注浆技术来有效治理烧变岩水灾隐患<sup>[57]</sup>。

具体技术手段是, 在查明烧变岩边界及水文地质条件的基础上, 选取合适位置以地面双排钻孔注浆形成帷幕墙, 阻断烧变岩补给水源, 辅以井下钻孔疏放烧变岩静储量, 达到水患治理的效果, 其技术体系如图 9 所示。

对于烧变岩这类型强渗透性介质中注浆时浆液运移方向不定、搭接难等问题, 提出了双位、双向引流注浆关键技术<sup>[58]</sup>, 注浆过程中依次按顺序穿插注一序孔~三序孔, 内排孔注浆时同排钻孔抽水引流, 完成帷幕横向搭接; 外排孔注浆时, 地面井下钻孔同时引流, 确保帷幕深度(图 10)。

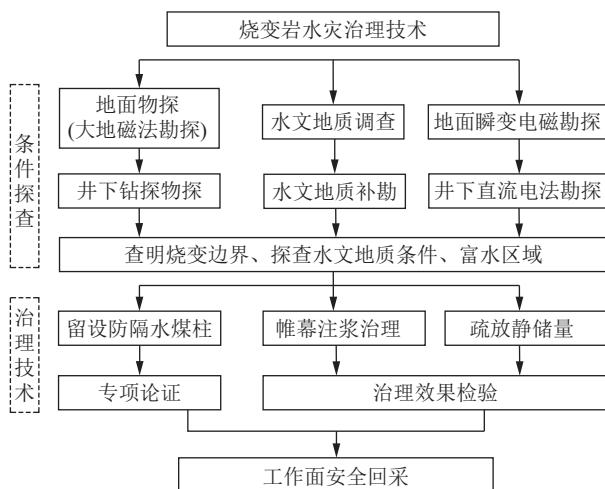
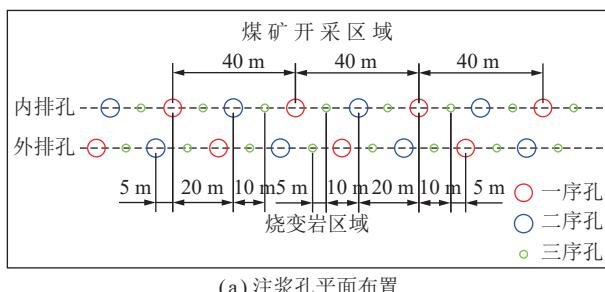


图9 烧变岩水灾隐患治理技术体系

Fig.9 Technical system for prevention and control of water disaster in burnt rock



(a) 注浆孔平面布置

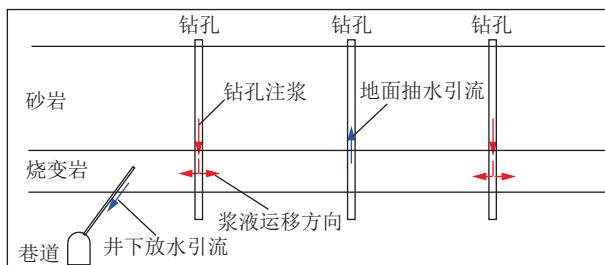
图10 注浆孔分序布置及注浆技术示意<sup>[59]</sup>

Fig.10 Schematic diagram of grouting hole layout and sequence<sup>[59]</sup>

### (3) 应用案例。

张家峁煤矿15208工作面开切眼附近上覆4<sup>-2</sup>煤烧变岩区，距工作面5<sup>-2</sup>煤顶板70~80 m，工作面采厚6 m，按区域覆岩破坏规律，其采后导水裂隙带能直接导通上覆烧变岩，烧变岩受常家沟水库补给，静储量丰富，工作面回采受烧变岩水患威胁。

依据烧变岩帷幕注浆治理技术，在地面施工注浆钻孔122个，累计注浆约 $8.9 \times 10^4$  t，建造帷幕长度625 m，治理后采用井下钻孔对烧变岩静储量疏放完成，回采工作面涌水量小于5 m<sup>3</sup>/h，有效切断了采掘空间与地表水体的水力联系，实现安全生产。

## 3 黄陇煤田水灾特征及治理技术

### 3.1 水文地质条件及水灾分布

黄陇煤田沿陕甘省界呈NE向条带状分布于陇县至黄陵县北，属鄂尔多斯盆地渭北断隆区西部彬县—黄陵坳褶带，主采侏罗系延安组2煤、3煤、4煤，开采厚度2~14 m。黄陇煤田矿井具有大埋深、高开采强度、厚顶板砂岩含水层等特征<sup>[60]</sup>（图11），以白垩系巨厚砂岩、砾岩孔隙裂隙含水层为主要充水含水层，下伏安定组或直罗组通常发育有厚度及与煤层间距不等的泥岩关键隔水层，是控制区域水灾特征的重要因素。当关键隔水层厚度相对较小，采动裂隙能直接波及其上富含水层时，矿井主要表现为持续涌水形式；当关键隔水层厚度较大(>100 m)且位于含水层底部，采动导水裂隙局部波及含水层后，关键隔水层阶段性隔水能力自修复，矿井易出现离层溃水灾害隐患；当大厚度泥岩关键隔水层位于煤层垮落带范围内，且遇水易崩解，则具备泥砂溃涌灾害隐患。

黄陇煤田矿井开采基本都受顶板厚层砂岩水灾隐患影响，以彬长矿区北部最为典型，如胡家河、高家堡等矿井涌水量均在2 000 m<sup>3</sup>/h以上；离层溃水灾害主要出现在永陇、焦坪矿区；泥砂溃涌主要出现在旬

地层	柱状	厚度/m	岩性及富水性
第四系 新近系		100~200	黄土为主，含黏土、沙砾层，富水性弱~中等
白垩系		120~400	洛河组中粗砂岩，夹砾岩，富水性弱~中等
		30~60	宜君组砾岩，富水性弱
侏罗系		120~180	安定组、直罗组、延安组，砂岩、泥岩互层，富水性弱，局部为隔水层
		平均3~16	煤层
三叠系			砂岩、泥岩，隔水层

图11 黄陇煤田典型地层结构

Fig.11 Typical stratigraphic structure of Huanglong coalfield

耀矿区的照金、青岗坪等矿。

### 3.2 典型水灾特征及治理技术

#### 3.2.1 厚层砂岩水灾隐患

##### (1) 厚层砂岩充水特征。

工作面回采过程中,导水裂隙随开采面积增大而逐渐增加,涌水量随推进度呈台阶式增长,含水层侧向、垂向大量的动态补给<sup>[61]</sup>,导致工作面回采中后期涌水量表现出持续高强度增大的特征(图12),且导水裂隙带内隔水层厚度小或缺失,工作面开采结束后采空区涌水量仍然能持续数年,衰减量很小。

##### (2) 厚层砂岩水患防控技术。

黄陵煤田洛河组厚层砂岩含水层垂向富水性差异明显,总体表现为中段富水性相对较好,上段、下段富水性弱(表4),基于含水层富水性垂向分段特征,提出了“适当波及、主动防控”的巨厚砂岩水患防治思路<sup>[63]</sup>(图13),即通过合理布设开采参数,采用综放开

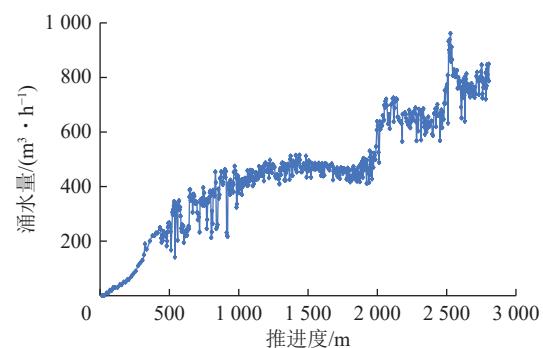


图12 彬长某矿工作面涌水量曲线

Fig.12 Water inflow curve of working face in a mine of Binchang mining area

采工艺,允许导水裂隙带适当波及洛河组含水层下部,避免波及强富水段,确保洛河组上部砂岩含水层水递进式缓慢进入矿井,使得生产效率大幅提高,且涌水量仅略微增加,总体涌水情况可控。扭转了以往以“限制采高”为主的被动防治水思路。

表4 彬长矿区高家堡煤矿洛河组垂向分段特征<sup>[62]</sup>

Table 4 Vertical Segmentation characteristics of Luohe formation in Gaojiapu Coal Mine, Binchang Mining area<sup>[62]</sup>

洛河组分段	上段	中上段	中下段	下段
岩性、厚度	中细粒砂岩、泥岩,平均51 m	中粗砂岩为主,平均126 m	中粗砂岩为主,平均125 m	中细砂岩、泥岩类,平均80 m
渗透系数/(m·d⁻¹)	0.0715	0.6712~0.7899	0.1264~0.2391	0.0058~0.0102
单位涌水量/(L·(s·m)⁻¹)	0.0210	0.0185~0.5164	0.0206~0.1847	0.0010~0.0058
水位/m	827.037	727.991~820.447	705.751~817.207	696.611~802.515
富水性	弱	弱~中等	弱~中等	弱

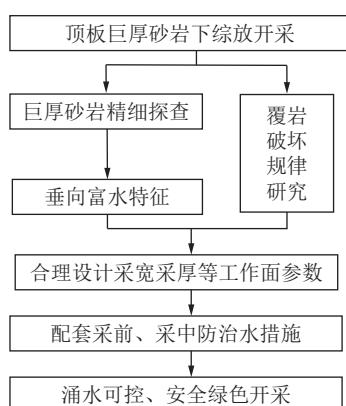


图13 厚层砂岩水患防治技术体系

Fig.13 Technical system for prevention and control of water disaster in thick sandstone

##### (3) 应用案例。

将厚层砂岩水患防治技术体系应用于胡家河煤矿401101工作面,回采末期涌水量稳定在480 m<sup>3</sup>/h,保障了彬长公司首个12 m综放采厚工作面的回采防治水安全;亭南煤矿206工作面依据该技术体系提高

工作面采厚1.5倍以上,增加煤炭产量约170万t,实现工作面涌水可控回采。

巨厚砂岩防治水技术思路及体系已在黄陵煤田亭南、胡家河、孟村等矿井多个工作面成功推广应用,保障区域煤炭资源回收率的同时,减小了对地下水水源的影响程度。

#### 3.2.2 离层溃水灾害隐患

##### (1) 离层溃水灾害形成机理。

与宁东煤田离层溃水灾害不同的是,黄陵煤田离层溃水灾害多属于高位离层<sup>[64]</sup>,即离层形成位置与煤层顶板间距较大,一般在180 m以上。巨厚洛河组砂砾岩与下伏安定组或直罗组泥岩是离层形成的基本条件,随着工作面推进,覆岩不均匀沉降产生离层空间,上覆含水层持续向离层空间充水形成离层水体(图14),在高水头压力(可达3 MPa以上)及开采扰动条件下<sup>[65]</sup>,离层空间破断,工作面出现离层溃水。

##### (2) 离层溃水灾害充水特征。

离层溃水灾害隐患多见于永陵矿区郭家河、崔木煤矿,回采中正常情况下无涌水或涌水量很小,离层

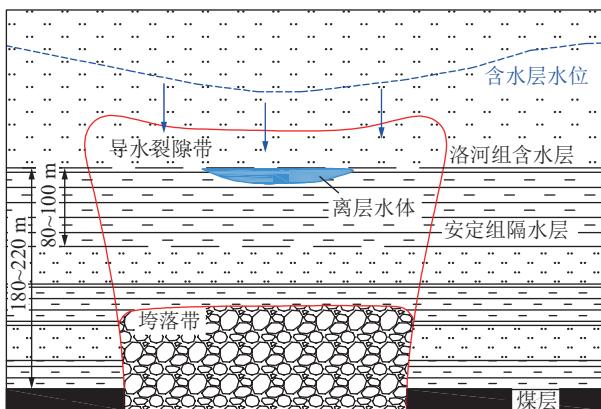


图 14 高位离层水体形成机理

Fig.14 Formation mechanism of high place bed separation water  
溃水周期性出现,表现为溃水量峰值大、水量增长迅速、持续时间短的特征(图 15),常伴随周期来压、上隅角瓦斯突增等现象。

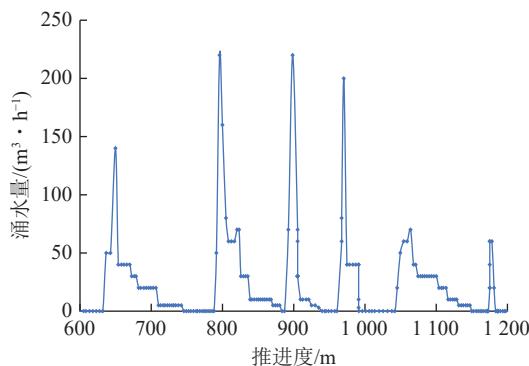


图 15 永陇矿区崔木煤矿工作面涌水量曲线

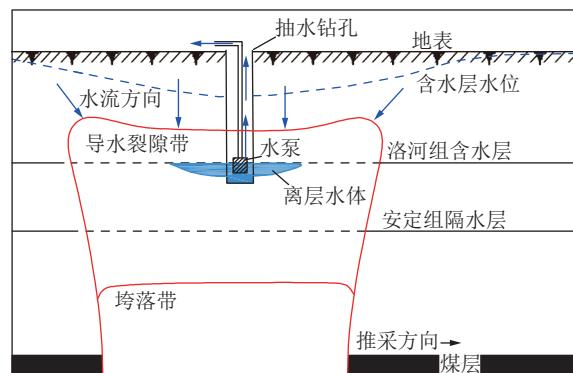
Fig.15 Water inflow curve of working face in Cuimu Coal Mine of Yonglong Mining area

### (3) 离层溃水灾害治理技术。

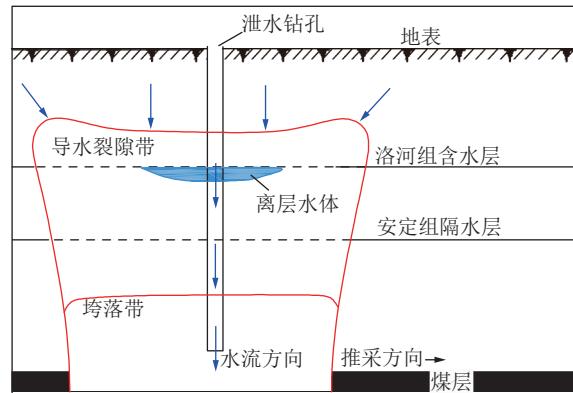
黄陵煤田矿井主要以地面抽水和泄水钻孔<sup>[66-67]</sup>防治离层溃水灾害隐患。地面抽水钻孔一般布设在回采工作面后方及相邻采空区内,施工大孔径钻孔( $\phi > 400$  mm)至预计离层形成位置以下 20 m,孔内下入水泵持续抽水,疏放含水层静储量,降低离层积水体水压(图 16(a));地面泄水钻孔是在采前工作面内施工大孔径钻孔( $\phi > 190$  mm)至煤层顶板附近,采取反复透孔或下筛管等措施保持钻孔与采空区持续联通,从而实现离层水体经钻孔以稳定水量泄至采空区内(图 16(b))。地面离层水患治理工程解决了井下治理的设备能力不足、成孔困难的难题。

### (4) 应用案例。

地面抽泄水钻孔在永陇矿区崔木、郭家河等矿井的离层溃水灾害防治工作中起到了关键作用。崔木煤矿 22313 工作面附近施工泄水钻孔 3 个、抽水钻孔 4 个,其抽水孔累计抽水量约  $8.4 \times 10^5$  m<sup>3</sup>,目前工作



(a) 抽水钻孔防治离层水



(b) 泄水钻孔防治离层水

Fig.16 Principle of prevention and control of bed separation water by surface pumping and drainage boreholes

面已安全推采 710 m,最大涌水量  $60 \text{ m}^3/\text{h}$ ,离层溃水峰值水量降低,水患治理效果显著。

### 3.2.3 泥砂溃涌灾害隐患

#### (1) 泥砂溃涌致灾机理及特征。

泥砂溃涌是一种高强度涌水所伴生的灾害,煤层开采垮落带范围内发育的厚层泥岩,在上覆含水层受开采扰动向矿井充水过程中,泥岩遇水软化崩解,经支架前切顶大通道涌入工作面致灾(图 17),其形成机理与溃水溃沙具有本质区别<sup>[68]</sup>(表 5)。泥砂溃涌灾害具有偶发性和突发性,顶板水携带泥砂能很快造成排水系统瘫痪,随后造成淹面等事故。

#### (2) 泥砂溃涌灾害风险评价。

根据对该类灾害机理的分析,采用多源信息融合方法进行泥砂溃涌灾害危险性评价。其核心是从水源、物源、构造、开采条件 4 个方面选取 8 个主控因素,建立泥砂溃涌危险指数数学模型,并利用 GIS 等方法进行叠加处理,最终实现不同开采区域的危险性分区<sup>[69]</sup>。

#### (3) 泥砂溃涌灾害治理技术体系。

泥砂溃涌是顶板涌水、矿压显现等多因素诱发的水文地质与工程地质叠加灾害,该类灾害的防治需以

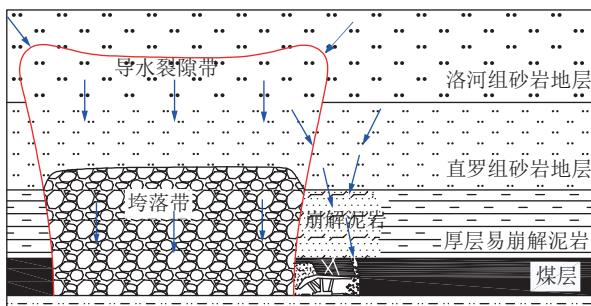


图 17 泥砂溃涌致灾机理

Fig.17 Disaster mechanism caused by mud and sand inrush

表 5 泥砂溃涌与溃水溃沙差异对比

Table 5 Analysis of the difference between the “water and sand inrush” and the “mud and sand inrush”

致灾因素	泥砂溃涌	溃水溃沙
物源	煤层直接顶泥岩	松散沙层
水源	基岩含水层	松散沙层水
通道	架前切顶冒落	薄基岩断裂
动力源	矿山压力显现	含水层水压
初始条件	水源物源分离	水源物源混合

物源、构造条件探查为基础,重点加强采前构造区域治理及回采中顶板管理工作,防控技术路线如图 18 所示。

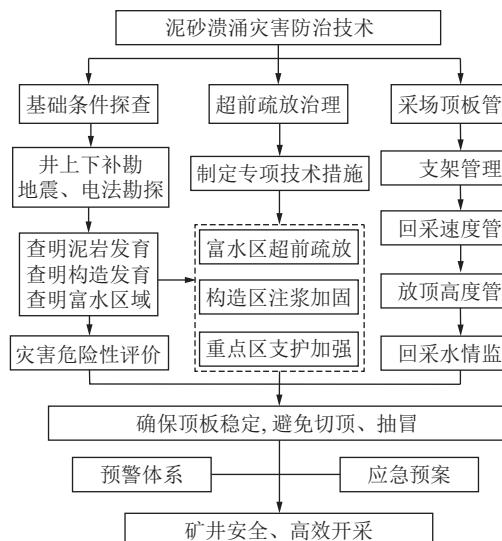


图 18 泥砂溃涌灾害防治技术体系

Fig.18 Prevention and control technology of mud and sand inrush

## 4 渭北煤田水灾特征及治理技术

### 4.1 渭北煤田矿井带压开采现状

渭北煤田沿关中平原北侧呈 NE 向分布于铜川—韩城一带,属鄂尔多斯盆地渭北断隆区铜川—韩城断

褶带,主采 2、3、5、11 煤,平均煤厚 6.52 m。渭北煤田自西向东可划分为铜川、蒲白、澄合、韩城 4 个矿区,奥灰富水性自西向东增强,其中以澄合、韩城矿区受底板奥灰水威胁最为严重,区域煤层底板与奥陶系峰峰组含水层间距 5.6~103.6 m(图 19),底板突水系数最大可达 0.3 MPa/m,以桑树坪、山阳、董家河矿井受底板奥灰水患威胁最为严重(表 6)。

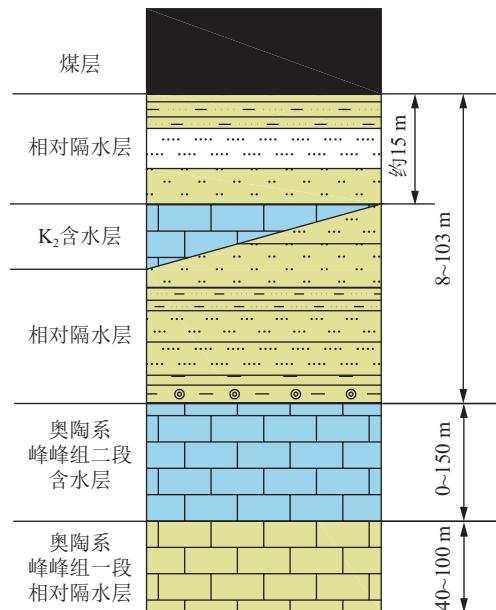


图 19 渭北煤田典型煤层底板结构

Fig.19 Floor structure of typical coal seam in Weibei coalfield

### 4.2 底板水患超前区域治理技术体系

底板岩溶水患受隐导水通道控制,具有突发性强、突水点集中、突水量大、持续时间长的特点。针对华北型石炭—二叠纪煤田煤层底板岩溶水灾,提出了基于定向钻孔注浆的底板隔水层加固与含水层改造技术,并经过多年理论研究与技术实践,创建了包含治理模式选择、高效钻进与注浆参数控制、隐伏通道判识及注浆效果检验等多项关键技术的底板超前区域治理技术体系<sup>[70]</sup>(图 20),为矿井底板岩溶水灾隐患治理提供了全面的技术支撑。

### 4.3 应用案例

西卓煤矿位于澄合矿区东部,主采 5 号煤底板距 K2 灰岩含水层顶面的间距为 16~22 m(图 21),K2 含水层与下伏奥灰含水层存在水力联系,顶界面承受的水压为 1.62~2.52 MPa,突水系数为 0.08~0.16 MPa/m,回采面临的底板水患威胁严重。

依据上述治理体系选择治理技术路线。① 钻进位置与方式:治理区域为黄土塬面,地势平坦,煤层埋深约 500 m,地面施工条件优越,可以选用地面定向钻进方式。② 改造层位:K2 灰岩总厚度 7~10 m,改造

表 6 渭北煤田各矿井带压开采参数

矿区及矿井	铜川、蒲白矿区	澄合矿区						韩城矿区		
		董家河	董东	山阳	安阳	西卓	百良	象山	下峪口	桑树坪
底板水压/MPa		0.3~2.9	0.6~1.8	0.1~3.6	0~1.2	0.3~3.1	0.5~2.2	0~1.5	0~2.8	0~2.9
隔水层厚度/m	不带压	8.2~77.5	30~35	15.3~102.3	23.5~53.0	31.5~90.3	35~60	30	16~20	5.6~74.9
突水系数/(MPa·m <sup>-1</sup> )		0.01~0.13	0.02~0.06	0.01~0.17	0~0.03	0.02~0.07	0.02~0.05	部分小于0.06	0~0.26	0~0.03

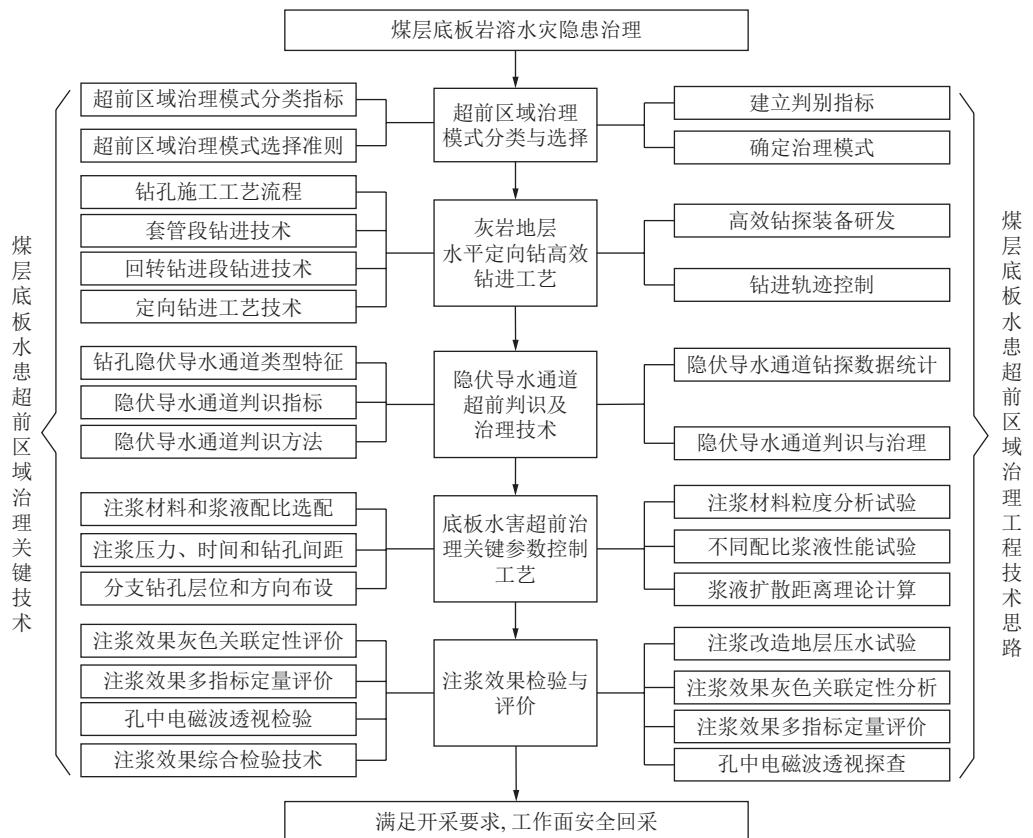


Fig 20 Technical system of advanced regional treatment of coal seam floor

地层系		岩性	柱状	厚度层间距
系	组			
二叠系	山西组			
		5煤		
石炭系	太原组	砂泥岩互层		16~22 m
		K <sub>3</sub> 灰岩		7~10 m
奥陶系	峰峰组	砂泥岩互层		50~65 m
		厚层灰岩		约54 m

图 21 西皂煤矿 1509 工作面煤层底板结构

Fig.21 Coal seam floor structure of 1509 working face in Xizhuo Coal Mine

$K_2$ 下分层后,  $K_2$ 含水层转变为相对隔水层, 可以封堵奥灰水导升通道, 消除底板水灾隐患, 即选择对  $K_2$ 下分层进行注浆改造。

针对矿井 1509 工作面布设 2 个孔组 (图 22), 施工分支孔 11 个, 钻孔水平段间距 60 m, 采用梳状布孔方式, 将  $K_1$  含水层注浆改造为相对隔水层, 保障了工

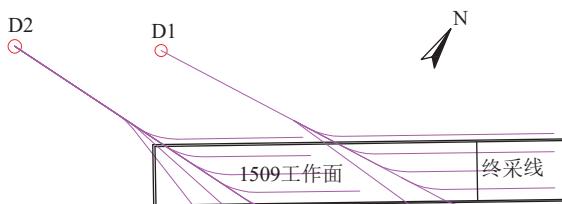


图 22 西卓煤矿 1509 工作面区域治理钻孔布设

Fig.22 Layout of boreholes for regional treatment in 1509 working face of Xizhuo Coal Mine

作面的安全回采。该工程是煤层底板岩溶水患地面超前区域治理技术在陕西省内的首次成功应用。

## 5 结语与展望

陕西省煤矿水灾水患类型多而复杂,部分矿井开采受多种类型水患叠加影响,目前研究所形成的防治水技术体系能为省内煤矿水灾水患防控提供一定技术支撑,随着全省煤矿智能化建设速度加快,对省内煤矿防治水工作也提出了更高的要求。将来陕西省要进一步做好各区域内煤矿防治水经验及技术总结与推广,从以下3方面推动全省煤矿防治水工作发展。

(1) 推进顶底板水患治理向井上下结合、区域超前治理方向转变,特别加强顶板含水层区域减水、离层水抽排的科技攻关,以治理工程降低矿井充水强度与水灾风险。

(2) 加快防治水智能化体系建设,从多源数据监测、水患综合评价、水灾预测预警方面着手,建设全过程、全方位的智能化防治水系统。

(3) 分区制定科学合理的防治措施,发展低损伤、绿色防治水技术,推动煤矿防治水向保治用结合协同防控方向转变,从煤矿全生命周期的角度进行防治水工作布局,切实保障省内煤矿的安全高效绿色智能开发。

## 参考文献(References):

- [1] 武强,涂坤,曾一凡.“双碳”目标愿景下我国能源战略形势若干问题思考[J].科学通报,2023,68(15): 1884–1898.  
WU Qiang, TU Kun, ZENG Yifan. Research on China's energy strategic situation under the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(15): 1884–1898.
- [2] 申艳军,杨博涵,王双明,等.黄河几字弯区煤炭基地地质灾害与生态环境典型特征[J].煤田地质与勘探,2022,50(6): 104–117.  
SHEN Yanjun, YANG Bohan, WANG Shuangming, et al. Typical characteristics of geological hazards and ecological environment of coal base in the bends area of the Yellow River[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(6): 104–117.
- [3] 省应急管理厅.陕西日报:陕西以先进工艺提升煤矿本质安全水平[EB/OL].(2023-08-11)[2023-11-11]. [http://www.shaanxi.gov.cn/xw/lx/bm/202308/t2023\\_0811\\_2296950.html](http://www.shaanxi.gov.cn/xw/lx/bm/202308/t2023_0811_2296950.html).
- [4] 曾一凡,武强,赵苏启,等.我国煤矿水害事故特征、致因与防治对策[J].煤炭科学技术,2023,51(7): 1–14.  
ZENG Yifan, WU Qiang, ZHAO Suqi, et al. Characteristics, causes, and prevention measures of coal mine water hazard accidents in China[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 1–14.
- [5] 王生全,牛建立,刘洋,等.锦界煤矿矿井涌水规律及其控制因素分析[J].煤矿安全,2014,45(2): 145–147, 150.  
WANG Shengquan, NIU Jianli, LIU Yang, et al. Gushing water law and its control factors analysis of Jinjie Coal Mine[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(2): 145–147, 150.
- [6] 盛超.高家堡矿井工作面底板集中泄水巷疏排水设计[J].煤炭工程,2018,50(11): 6–9.  
SHENG Chao. Water drainage design of working face floor centralized drainage roadway in Gaojiabao Coal Mine[J]. Coal Engineering, 2018, 50(11): 6–9.
- [7] 范立民.陕西省煤矿水害类型、区域分布及典型水害分析[C]//煤矿水害防治技术研究——陕西省煤炭学会学术年会论文集.西安:煤炭工业出版社,2013: 21–27.
- [8] 王苏健,陈通,李涛,等.陕西省煤炭开发中矿井防治水及水资源保护技术[C]//煤矿水害防治技术研究——陕西省煤炭学会学术年会论文集.西安:煤炭工业出版社,2013: 16–20.
- [9] 范立民,迟宝锁,王宏科,等.鄂尔多斯盆地北部直罗组含水层研究进展与水害防治建议[J].煤炭学报,2022,47(10): 3535–3546.  
FAN Limin, CHI Baosuo, WANG Hongke, et al. Progress of aquifer of Zhiluo Formation in northern Ordos Basin and suggestions on water hazard prevention[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(10): 3535–3546.
- [10] 郭小铭,王皓,周麟晟.煤层顶板巨厚基岩含水层空间富水性评价[J].煤炭科学技术,2021,49(9): 167–175.  
GUO Xiaoming, WANG Hao, ZHOU Linsheng. Evaluation of spatial water enrichment of ultra-thick bedrock aquifer in coal seam roof[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(9): 167–175.
- [11] 李超峰,刘业献,张金魁,等.基于双Packer抽水试验的洛河组水文地质特征垂向变异性研究[J].煤田地质与勘探,2023,51(11): 55–64.  
LI Chaofeng, LIU Yexian, ZHANG Jinkui, et al. Vertical variability of hydrogeological characteristics of Luohe Formation by double packer system pumping test[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(11): 55–64.
- [12] 冯洁,侯恩科,王苏健,等.陕北侏罗系砂岩沉积控水规律研究[J].采矿与安全工程学报,2022,39(3): 546–556.  
FENG Jie, HOU Enke, WANG Sujian, et al. The law of sedimentary water control of Jurassic system in northern Shaanxi Province[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(3): 546–556.
- [13] 郭小铭.彬长矿区洛河组沉积控水及开采扰动流场响应特征研究[D].北京:煤炭科学研究院,2023: 92–96.  
GUO Xiaoming. Sedimentary controlling groundwater in Luohe Formation and the response of water flow field characteristics after mining disturbance in Binchang mining area[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2023: 92–96.
- [14] 杨建,刘洋,刘基.基于沉积控水的鄂尔多斯盆地侏罗纪煤田防治水关键层研究[J].煤矿安全,2018,49(4): 34–37.  
YANG Jian, LIU Yang, LIU Ji. Study on key layer of water prevention and control in Ordos Basin Jurassic Coalfield based on sedimentary water control theory[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(4): 34–37.
- [15] 程香港,乔伟,李路,等.煤层覆岩采动裂隙应力–渗流耦合模型及涌水量预测[J].煤炭学报,2020,45(8): 2890–2900.  
CHENG Xianggang, QIAO Wei, LI Lu, et al. Model of mining-induced fracture stress-seepage coupling in coal seam over-burden and prediction of mine inflow[J]. Journal of China Coal Society, 2020,

- 45(8): 2890–2900.
- [16] 刘英锋, 郭小铭. 导水裂缝带部分波及顶板含水层条件下涌水量预测[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(5): 97–101, 107.
- LIU Yingfeng, GUO Xiaoming. Prediction of water inflow in roof aquifer affected by water-flowing fracture zone[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(5): 97–101, 107.
- [17] 赵春虎, 靳德武, 李智学, 等. 陕北榆神矿区煤层开采顶板涌水规律分析[J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 523–533.
- ZHAO Chunhu, JIN Dewu, LI Zhixue, et al. Analysis of overlying aquifer water inrush above mining seam in Yushen mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2): 523–533.
- [18] 王新, 郭小铭. 越层水文地质现象及对煤矿防治水的影响研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(8): 150–156.
- WANG Xin, GUO Xiaoming. Study on hydrogeological phenomena of across stratigraphic boundary and impact on prevention and control of mine water[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(8): 150–156.
- [19] 罗安昆, 王皓, 郭小铭, 等. 巨厚含水层采动影响下矿井涌水量预测[J]. 煤矿安全, 2017, 48(9): 182–185.
- LUO Ankun, WANG Hao, GUO Xiaoming, et al. Prediction of water inflow under the influence of mining of thick aquifer[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(9): 182–185.
- [20] 杜锋, 李振华, 姜广辉, 等. 西部矿区突水溃沙类型及机理研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(7): 1846–1853.
- DU Feng, LI Zhenhua, JIANG Guanghui, et al. Types and mechanism of water-sand inrush disaster in west coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(7): 1846–1853.
- [21] 隋旺华. 矿山采掘岩体渗透变形灾变机理及防控 I: 顶板溃水溃砂[J]. 地球科学与环境学报, 2022, 44(6): 903–921.
- SUI Wanghua. Catastrophic mechanism of seepage deformation and failure of mining rock mass and its prevention & control I: Water-sand mixture inrush from seam roof[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2022, 44(6): 903–921.
- [22] 曹海东. 煤层开采覆岩离层水体致灾机理与防控技术研究[D]. 北京: 煤炭科学研究院, 2018: 95–102.
- CAO Haidong. Study on prevention & control technology and disaster-caused mechanism of bed separation water body in overburden strata during coal seam mining[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2018: 95–102.
- [23] 乔伟, 王志文, 李文平, 等. 煤矿顶板离层水害形成机制、致灾机理及防治技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 507–522.
- QIAO Wei, WANG Zhiwen, LI Wenping, et al. Formation mechanism, disaster-causing mechanism and prevention technology of roof bed separation water disaster in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2): 507–522.
- [24] 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.
- [25] 董书宁, 王皓, 张文忠. 华北型煤田奥灰顶部利用与改造判别准则及底板破坏深度[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 2216–2226.
- DONG Shuning, WANG Hao, ZHANG Wenzhong. Judgement criteria with utilization and grouting reconstruction of top Ordovician limestone and floor damage depth in North China coal field[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 2216–2226.
- [26] 陕西省自然资源厅. 陕西省自然资源厅陕西省发展和改革委员会关于印发《陕西省矿产资源总体规划(2021–2025年)》的通知[EB/OL]. (2023–02–01)[2023–11–11]. <https://zrzyt.shaanxi.gov.cn/info/1222/63581.htm>.
- [27] 张坤, 丁湘, 冉星仕, 等. 厚松散薄基岩区开采突水溃沙危险性分析[J]. 陕西煤炭, 2023, 42(2): 134–137, 191.
- ZHANG Kun, DING Xiang, RAN Xingshi, et al. Risk analysis of water and sand inrush in mining of thick loose and thin bedrock area[J]. Shaanxi Coal, 2023, 42(2): 134–137, 191.
- [28] 韦忙忙. 陕西省煤炭资源赋存规律及其信息管理系统研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2017: 13–14.
- WEI Mangmang. Study on the law of coal resources and its information management system in Shaanxi province[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017: 13–14.
- [29] 贾志刚, 胡勇. 陕西省煤炭资源分布与潜力评价研究[J]. 陕西煤炭, 2009, 28(2): 38–39.
- JIA Zhigang, HU Yong. Study on distribution and potential evaluation of coal resources in Shaanxi Province[J]. Shaanxi Coal, 2009, 28(2): 38–39.
- [30] 王丹凤. 新时期陕西省煤炭资源勘查开发布局研究[J]. 中国煤炭, 2021, 47(12): 1–6.
- WANG Danfeng. Study on the layout of coal resources exploration and development in Shaanxi in the new Era[J]. China Coal, 2021, 47(12): 1–6.
- [31] 马涛, 李文莉, 韩双宝, 等. 黄河流域陕西省地下水资源分布特征、影响因素及开发潜力[J]. 中国地质, 2023, 50(5): 1432–1445.
- MA Tao, LI Wenli, HAN Shuangbao, et al. Distribution characteristics, influencing factors and development potential of groundwater resources in Shaanxi Province of the Yellow River Basin[J]. Geology in China, 2023, 50(5): 1432–1445.
- [32] 周宗俊. 陕西省地下水系统划分的探讨[J]. 陕西地质, 1985(1): 100–107.
- ZHOU Zongjun. Discussion on the division of groundwater system in Shaanxi Province[J]. Geology of Shaanxi, 1985(1): 100–107.
- [33] 陶虹, 李辉, 孙晓东, 等. 陕西煤矿区地下水监测工程构想[J]. 陕西地质, 2016, 34(2): 85–89, 100.
- TAO Hong, LI Hui, SUN Xiaodong, et al. Conception of groundwater monitoring project in coalfields of Shaanxi Province[J]. Geology of Shaanxi, 2016, 34(2): 85–89, 100.
- [34] 张宗祜, 李烈荣. 中国地下水水资源与环境图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 2004: 6–9.
- ZHANG Zonghu, LI Lierong. China groundwater resources and environment map[M]. Beijing: China Map Publishing House, 2004: 6–9.
- [35] 侯光才. 鄂尔多斯白垩系盆地地下水系统及其水循环模式研究[D]. 长春: 吉林大学, 2008: 27–35.
- HOU Guangcai. Groundwater system and water circulation pattern in Ordos cretaceous groundwater basin[D]. Changchun: Jilin University, 2008: 27–35.
- [36] 吴疆, 关蕴文, 蒲仁海, 等. 鄂尔多斯盆地东南部上古生界煤层分布特征[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2023, 53(5): 830–842.
- WU Jiang, GUAN Yunwen, PU Renhai, et al. Geophysical identific-

- ation and distribution of Upper Paleozoic coals in southeastern Ordos Basin[J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2023, 53(5): 830–842.
- [37] 焦养泉, 王双明, 范立民, 等. 鄂尔多斯盆地侏罗纪含煤岩系地下水系统关键要素与格架模型[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2411–2422.
- JIAO Yangquan, WANG Shuangming, FAN Limin, et al. Key elements and framework model of groundwater system in Jurassic coal measures of Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2411–2422.
- [38] 孙魁. 煤矿水害致灾机理研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2017: 91–93.
- SUN Kui. Study on disaster causing mechanism of coal mine flood[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017: 91–93.
- [39] 卫勇锋, 杨社民. 黄陵矿业集团一号煤矿矿井充水形成原因探讨[J]. 陕西煤炭, 2009, 28(4): 29–30.
- WEI Yongfeng, YANG Shemin. Discussion on the cause of mine water filling in No.1 Coal Mine of Huangling Mining Group[J]. Shaanxi Coal, 2009, 28(4): 29–30.
- [40] 高春华, 张鹏晖, 张俊峰, 等. 吴堡矿区首采地段水文地质特征及矿床充水条件分析[J]. 中国煤炭地质, 2010, 22(5): 36–44.
- GAO Chunhua, ZHANG Penghui, ZHANG Junfeng, et al. Hydrogeological characteristics and deposit water-filling condition analysis in the first winning district of Wubu Mine Area[J]. Coal Geology of China, 2010, 22(5): 36–44.
- [41] 常青锋, 刘宗斌. 陕北三叠纪煤田子长矿区涧峪岔勘查区水文地质特征及充水因素分析[J]. 地下水, 2016, 38(3): 203–205.
- CHANG Qingfeng, LIU Zongbin. Analysis of hydrogeological characteristics and water filling factors in Jianyucha exploration area of Triassic coal field Zichang mining area in northern Shaanxi[J]. Ground Water, 2016, 38(3): 203–205.
- [42] 靳德武, 李超峰, 刘英锋, 等. 黄陇煤田煤层顶板水害特征及其防控技术[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 205–213.
- JIN Dewu, LI Chaofeng, LIU Yingfeng, et al. Characteristics of roof water hazard of coal seam in Huanglong Coalfield and key technologies for prevention and control[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 205–213.
- [43] 范立民, 孙魁, 李成, 等. 榆神矿区煤矿防治水的几点思考[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(1): 182–188.
- FAN Limin, SUN Kui, LI Cheng, et al. Thoughts on mine water control and treatment in Yushen mining area[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(1): 182–188.
- [44] 庞凯, 武强, 曾一凡. 含水层与多烧变岩含水体互层下煤层顶板突(涌)水风险性预测[J]. 煤炭工程, 2022, 54(12): 135–141.
- PANG Kai, WU Qiang, ZENG Yifan. Prediction of roof water inrush risk under the complex condition of interbedded aquifer and multi burnt rock aquifers[J]. Coal Engineering, 2022, 54(12): 135–141.
- [45] 薛建坤, 王皓, 赵春虎, 等. 鄂尔多斯盆地侏罗系煤田导水裂隙带高度预测及顶板充水模式[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(6): 1222–1230.
- XUE Jiankun, WANG Hao, ZHAO Chunhu, et al. Prediction of the height of water-conducting fracture zone and water-filling model of roof aquifer in Jurassic coalfield in Ordos Basin[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(6): 1222–1230.
- [46] 孙魁, 范立民, 马万超, 等. 鄂尔多斯盆地北部直罗组地下水地球化学特征及其指示意义[J/OL]. 煤炭学报:1–16 [2023–11–11]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0537>.
- SUN Kui, FAN Limin, MA Wanchao, et al. Geochemical characteristics of groundwater about Zhiluo Formation in the northern Ordos Basin and its indicative significance[J/OL]. Journal of China Coal Society:1–16 [2023–11–11]. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0537>.
- [47] 刘洋. 突水溃沙通道分区及发育高度研究[J]. 西安科技大学学报, 2015, 35(1): 72–77.
- LIU Yang. Study on development height and the partition of water and sand inrush channel[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2015, 35(1): 72–77.
- [48] 董书宁, 姬亚东, 王皓, 等. 鄂尔多斯盆地侏罗纪煤田典型顶板水害防控技术与应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2367–2375.
- DONG Shuning, JI Yadong, WANG Hao, et al. Prevention and control technology and application of roof water disaster in Jurassic coalfield of Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2367–2375.
- [49] 庞振忠. 榆神矿区采动覆岩全破断型突水溃沙机理与控水开采模式[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2022: 83–91.
- PANG Zhenzhong. Mechanism of water and sand inrush and water control mining model of fully broken overburden in Yushenmining area[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2022: 83–91.
- [50] 赵兰春, 王树营, 于建新. 软弱薄基岩裂隙发育特征及抑制(溃)机理[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2020, 40(3): 77–80.
- ZHAO Lanchun, WANG Shuying, YU Jianxin. Fracture development characteristics of weak-thin bedrock and the inhibition mechanism of water and sand inrush[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology(Natural Science), 2020, 40(3): 77–80.
- [51] 王振荣. 厚松散含水层煤层开采突水溃沙防治技术[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(8): 46–51.
- WANG Zhenrong. Water inrush and sand inrush prevention and control technology for coal mining in seam with thick and loose aquifer[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(8): 46–51.
- [52] 陈彬. 中国西北地区侏罗系中烧变岩的特征、形成时代及地质意义[D]. 成都: 成都理工大学, 2022: 39–41.
- CHEN Bin. Characteristics, ages and geological significance of the Jurassic combustion metamorphic rocks in northwestern China[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2022: 39–41.
- [53] 侯恩科, 车晓阳, 冯洁, 等. 榆神府矿区含水层富水特征及保水采煤途径[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 813–820.
- HOU Enke, CHE Xiaoyang, FENG Jie, et al. Abundance of aquifers in Yushenfu coal field and the measures for water-preserved coalmining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 813–820.
- [54] 王家乐. 张家峁井田 $2^2$ 煤烧变岩地下水水流场数值模拟[D]. 西安: 西安科技大学, 2018: 25–28.
- WANG Jiale. Numerical simulation of groundwater flow field of  $2^2$

- coalburnt rock in Zhang Jiaomo coal field[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2018: 25–28.
- [55] 董书宁, 杨志斌, 姬中奎, 等. 神府矿区大型水库旁烧变岩水保水开采技术研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 709–717.  
DONG Shuning, YANG Zhibin, JI Zhongkui, et al. Study on water preserved mining technology of burnt rock aquifer beside the large reservoir in Shengfu mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 709–717.
- [56] 姬中奎. 柠条塔矿 S1210 工作面突水条件分析[J]. 煤矿安全, 2014, 45(8): 188–191.  
JI Zhongkui. Analysis on water inrush condition of S1210 Working face in Ningtaota Coal Mine[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(8): 188–191.
- [57] 董书宁, 柳昭星, 郑士田, 等. 基于岩体宏细观特征的大型帷幕注浆保水开采技术及应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 1137–1149.  
DONG Shuning, LIU Zhaoxing, ZHENG Shitian, et al. Technology and application of large curtain grouting water conservation mining based on macroscopic and microscopic characteristics of rock mass[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 1137–1149.
- [58] 苗彦平, 姬中奎, 李军, 等. 待采工作面上覆烧变岩注浆帷幕建造技术[J]. 煤矿安全, 2019, 50(7): 108–111.  
MIAO Yanping, JI Zhongkui, LI Jun, et al. Construction technology of grouting curtain for overburden burnt rock in waiting mining face[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(7): 108–111.
- [59] 董书宁. 鄂尔多斯盆地煤层典型顶板水害成因与防控技术[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 309–310.
- [60] 刘英锋, 王新. 黄陇侏罗纪煤田顶板水害防治问题及对策探讨[J]. 西安科技大学学报, 2013, 33(4): 431–435.  
LIU Yingfeng, WANG Xin. Water hazard prevention and control in Huanglong Jurassic coalfield[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2013, 33(4): 431–435.
- [61] 李超峰, 虎维岳. 回采工作面顶板复合含水层涌水量时空组成及过程预测方法[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(3): 1–13.  
LI Chaofeng, HU Weiyue. Prediction method of mine water inflow regime from a layered extra-thick aquifer[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(3): 1–13.
- [62] 李超峰, 虎维岳, 刘英锋. 洛河组含水层垂向差异性研究及保水采煤意义[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 848–857.  
LI Chaofeng, HU Weiyue, LIU Yingfeng. Vertical hydrogeological characteristics of Luohu aquifer and its significance of water-preserved coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 848–857.
- [63] 郭小铭, 董书宁. 深埋煤层开采顶板基岩含水层渗流规律及保水技术[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 805–812.  
GUO Xiaoming, DONG Shuning. Seepage law of bedrock aquifer and water-preserved mining technology in deep coal seam mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 805–812.
- [64] 乔伟, 赵世隆, 李连刚, 等. 采动覆岩高位离层演化特征及涌(突)水前兆信息研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(2): 194–205.  
QIAO Wei, ZHAO Shilong, LI Liangang, et al. Study on evolution features of high level overburden separation layer and precursor information of water inrush during coal mining[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(2): 194–205.
- [65] 乔伟, 刘梦楠, 李连刚, 等. 采动覆岩“突水离层带”岩体结构演化致灾机理及突水预报方法[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 818–832.  
QIAO Wei, LIU Mengnan, LI Liangang, et al. Disaster mechanism induced by structure evolution of “water-inrushing separation zone” of mining rock mass and prediction method of water inrush from separation layer[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 818–832.
- [66] 张培森, 张睿, 段中稳, 等. 一种针对工作面顶板离层水害的地面抽水孔抽排方法: CN111894671B[P]. 2022-06-24.
- [67] 张培森, 张睿, 段中稳, 等. 一种采用地面泄水钻孔超前治理采场顶板离层水害的方法: CN111894672B[P]. 2021-11-23.
- [68] 郭小铭, 董书宁, 刘英锋, 等. 深埋煤层开采顶板泥砂溃涌灾害形成机理[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(5): 889–897.  
GUO Xiaoming, DONG Shuning, LIU Yingfeng, et al. Formation mechanism of mud and sand inrush disaster during the mining of deep-buried coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2019, 36(5): 889–897.
- [69] 郭小铭, 郭康, 刘英锋. 深埋煤层开采顶板泥砂溃涌灾害多源信息评价[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(1): 113–119, 128.  
GUO Xiaoming, GUO Kang, LIU Yingfeng. Multi-source information evaluation of mud and sand inrush disaster during the mining of deep-buried coal seam[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(1): 113–119, 128.
- [70] 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.