

我国不同类别煤层底板水害致灾机理与防控远景导向

曾一凡^{1,2,3}, 朱慧聪^{1,2,3}, 武 强^{1,2,3}, 王厚柱^{1,4}, 傅先杰⁵, 王铁记⁶, 王玺瑞⁷, 樊九林⁸, 胡荣杰⁹,
才向军¹⁰, 阚雪冬¹¹, 高生保⁵

(1. 中国矿业大学(北京)国家煤矿水害防治工程技术研究中心, 北京 100083; 2. 矿山水防治与资源化利用国家矿山安全监察局重点实验室, 北京 100083; 3. 矿业大学(北京)内蒙古研究院, 内蒙古鄂尔多斯 017000; 4. 中国中煤能源集团有限公司, 北京 100120; 5. 中煤新集能源股份有限公司, 安徽淮南 232001; 6. 冀中能源峰峰集团有限公司, 河北邯郸 056200; 7. 冀中能源股份有限公司, 河北邢台 054000; 8. 华电煤业集团有限公司, 北京 100035; 9. 安徽省皖北煤电集团有限责任公司, 安徽宿州 234099; 10. 开滦能源化工股份有限公司, 河北唐山 063000; 11. 焦作煤业(集团)有限公司, 河南焦作 454002)

摘要: 我国成煤条件苛刻, 赋煤环境复杂多变, 资源呈全域性跨多地质类型、点散式分布, 导致回采共(伴)生地质灾害频现。同时, 伴随煤炭资源开发布局优化调控, 煤层底板水害负面影响性越趋显著, 高承压水水力驱动及强敏感性缺陷构造活化的协同作用导致煤层底板水害宏观动力学表象威胁性显著提升, 成为我国煤炭资源高质量转型发展的内生阻力。为全方位掌握我国煤层底板水害发展形势, 探讨未来基于新技术开展防控作业的重点攻关方向, 从时间、空间、突水量等多维视角下全方位展示了近年来我国煤层底板水害动态演变趋势, 对类型进行了“总-分”式细划, 并通过建立地质力学模型探讨了我国煤层底板水害力学互馈响应机制, 基于灾害宏观表象等揭示了其内生致灾机理, 指出了防控技术理念的新发展路径和远景导向。研究发现: 统计分析了我国煤层底板水害多维视角下的演变规律和特征, 探讨建立了我国煤层底板水害主体架构, 依据事故核心致因体系及宏观致灾表象等将煤层底板水害划分为岩溶陷落柱突水、断层活化突水及裂隙导升(复合)灰岩水突涌 3 大类, 进一步细化为全路径贯通增量导升型突水(岩溶陷落柱)、贯穿煤层型突水(断层)、单层随采卸荷直接型突水(裂隙)等 12 个子类, 并针对性的独立分析了 3 个大类煤层底板水害地理空间分布规律; 分析了地应力和承压水水压对岩溶陷落柱突水过程承压水导升路径异化发育作用机制, 提出了覆岩顶板动/静载扰动诱发底板岩溶陷落柱突水模式, 阐明了其力学启动条件及致灾机理; 建立了煤层底板断层宏细观地质力学构造概化模型, 基于诱发断层活化突水的核心致灾诱因识别并建立了不同类别煤层底板断层活化突水力学判据; 以裂隙为基础单元, “由 1 至 n”式建立了单一层位和复合层位承压含水层诱发裂隙型导升(复合)灰岩水突涌的临界判别条件, 揭示了该类型底板水害全过程致灾机理; 在总结现行煤层底板水害探查、预测及控制技术理念基础上, 结合前沿发展方向, 指出并建议在煤层底板本底地质基因的全生命周期采动诱发特征三维动态重构、适用于时空分异动态地质环境的煤层底板突水预测预报理念升级、低扰动强干预的随采随治保控水互馈注浆治理技术应用、修复后地质生态系统长效监控诊断诊疗平台建立等方面展开攻关, 构建煤层底板水害全时空防控大体系, 紧跟新质生产力大背景下全煤行业新业态发展步伐。

关键词: 矿井水防治; 底板水害; 岩溶陷落柱; 断层; 致灾机理

中图分类号: 文献标志码: A **文章编号:** 0253-9993(2025)02-1066-28

收稿日期: 2024-12-16 策划编辑: 韩晋平 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.XH24.1562

通讯作者: 武 强(1959—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 中国工程院院士。E-mail: wuq@cumt.edu.cn

引用格式: 曾一凡, 朱慧聪, 武强, 等. 我国不同类别煤层底板水害致灾机理与防控远景导向[J]. 煤炭学报, 2025, 50(2): 1066-1093.

ZENG Yifan, ZHU Huicong, WU Qiang, et al. Disaster-causing mechanism and prevention and control vision orientation of different types of coal seam floor water disasters in China[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(2): 1066-1093.



移动阅读

Disaster-causing mechanism and prevention and control vision orientation of different types of coal seam floor water disasters in China

ZENG Yifan^{1,2,3}, ZHU Huicong^{1,2,3}, WU Qiang^{1,2,3}, WANG Houzhu^{1,4}, FU Xianjie⁵, WANG Tieji⁶, WANG Xirui⁷, FAN Jiulin⁸, HU Rongjie⁹, CAI Xiangjun¹⁰, KAN Xuedong¹¹, GAO Shengbao⁵

(1. National Engineering Research Center of Coal Mine Water Hazard Controlling, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Mine Water Control and Resources Utilization, National Mine Safety Administration, Beijing 100083, China; 3. China University of Mining and Technology (Beijing) Inner Mongolia Research Institute, Ordos 017000, China; 4. China National Coal Group Corp, Beijing 100120, China; 5. China Coal Xinji Energy Co., Ltd., Huainan 232001, China; 6. Jizhong Energy Fengfeng Group Co., Ltd., Handan 056200, China; 7. Jizhong Energy Resources Co., Ltd., Xingtai 054000, China; 8. Huadian Coal Industry Group Co., Ltd., Beijing 100035, China; 9. Anhui Wanbei Coal and Electricity Group Co., Ltd., Suzhou 234099, China; 10. Kailuan Energy Chemical Co., Ltd., Tangshan 063000, China; 11. Jiaozuo Coal Industry (Group) Co., Ltd., Jiaozuo 454002, China)

Abstract: China's coal-forming conditions are harsh, the coal-bearing environment is complex and changeable, and the resources are distributed in a global, multi-geological type and scattered distribution, resulting in frequent occurrence of mining-associated geological disasters. At the same time, with the optimization and regulation of coal resource development layout, the negative orientation of coal seam floor water damage is becoming more and more significant. The synergistic effect of high confined water hydraulic drive and strong sensitive defect structure activation leads to a significant increase in the threat of macroscopic dynamic representation of coal seam floor water damage, which has become an endogenous resistance to the high-quality transformation and development of coal resources in China. In order to grasp the development situation of coal seam floor water disaster in China in an all-round way and discuss the key research direction of prevention and control operation based on new technology in the future, the dynamic evolution trend of coal seam floor water disaster in China in recent years is comprehensively demonstrated from the multi-dimensional perspectives of time, space and water inrush quantity. The type is divided into 'total-sub' type, and the mechanical mutual feedback response mechanism of coal seam floor water disaster in China is discussed by establishing geomechanical model. Based on the macroscopic representation of disaster, the endogenous disaster-causing mechanism is revealed, and the new development path and vision orientation of prevention and control technology concept are pointed out. The results show that: The evolution law and characteristics of coal seam floor water disasters in China from a multi-dimensional perspective are statistically analyzed, and the main framework of coal seam floor water disasters in China is discussed and established. According to the accident core cause system and macroscopic disaster-causing representation, the coal seam floor water disasters are divided into three categories: karst collapse column water inrush, fault activation water inrush and fracture-induced (composite) limestone water inrush, which are further refined into 12 subcategories, such as full-path through incremental water inrush (karst collapse column), through coal seam water inrush (fault), single-layer direct water inrush (fracture) with mining and unloading. The geographical spatial distribution of water disasters in three major types of coal seam floors was analyzed independently. The mechanism of ground stress and confined water pressure on the alienation development of confined water conduction path in the process of water inrush from karst collapse column is analyzed. The water inrush mode of floor karst collapse column induced by dynamic/static load disturbance of overburden roof is proposed, and its mechanical starting conditions and disaster-causing mechanism are clarified. The generalized model of macro-micro geomechanical structure of coal seam floor fault is established. Based on the identification of the core disaster-causing factors that induce fault activation water inrush, the mechanical criteria of fault activation water inrush in different types of coal seam floor are established. Based on the fracture as the basic unit, the critical discriminant conditions for the inrush of fissure-type ascending (composite) limestone water induced by single-layer and composite-layer confined aquifers are established by the formula of 'one to n', and the disaster-causing mechanism of the whole process of this type of floor water disaster is revealed. On the basis of summarizing the current concept of coal seam floor water disaster detection, prediction and control technology, combined with the frontier development direction, it is pointed out and suggested that the three-dimensional dynamic reconstruction of the whole life cycle mining-induced mutation characteristics of the back-

ground geological gene of the coal seam floor, the upgrading of the concept of coal seam floor water inrush prediction and prediction suitable for the dynamic geological environment of space-time differentiation, the application of low disturbance and strong intervention with mining\water control and mutual grouting treatment technology, and the establishment of long-term monitoring, diagnosis and treatment platform for geological ecosystem after restoration should be carried out to build a large system of full-time and space-time prevention and control of coal seam floor water disaster, and keep up with the development of new formats in the whole coal industry under the background of new productivity.

Key words: mine water prevention and control; floor water damage; karstic collapse pillar; fault; disaster mechanism

0 引言

我国位于世界上构造最复杂的大陆板块之一,各类板块运移、地质沉积、构造演化活动频繁,强度、烈度大,给煤层的形成提供了一个极为复杂的着床环境和成煤条件^[1],使我国煤炭资源呈现全域性跨多地质类型、点散式分布特征,地质灾害致因体系隐蔽、冗杂,加之不断增大的能源需求激发原煤产能持续提升,煤炭资源开发范围逐步向广域、纵深开进,导致赋煤环境发生协同变化,新型地质条件诱发新型灾害,使我国成为世界上煤炭开采共(伴)生地质灾害最多的国家之一^[2]。其中,底板水害业已成为我国煤炭领域转型升级进程中的重要阻碍。当前,在西部建立煤炭主产基地及向深部要资源已成定势^[3-5],煤层底板水害的负面影响性越趋显著,岩溶陷落柱、断层等原生缺陷构造敏感性提高,极易受采动影响发生活化;高水压加载下,裂隙(网络)等“面状分散”式承压水导升通道快速起裂-扩展-延伸,为集束型爆发式突涌水通道的形成埋下重大隐患。

为科学管控我国煤层底板水害恶性发展,诸多专家学者开展了一系列针对性研究工作^[6-11],在超前探查^[12-17]、预测预报^[18-24]及工程治理^[25-28]等方面颇见成效。但是,在生态脆弱区山、水、林、田、湖、草原位保护的社会责任约束下,以及能源产业新质生产力发展和绿色矿山建设需求下^[29-32],煤炭产业发生深刻变革,煤层底板水害防治工作不再局限于对单一层面的灾害治理,更强调兼具对矿区生态环境系统的减损及原位保护^[33-35]。

为全面掌握新发展阶段下煤层底板承压水孕灾致灾、防灾减灾等理论技术发展趋势,锚定未来一段时期内的发展路径,在全面总结分析我国煤层底板水害多维度动态发展规律性、地理区位分布特征基础上,深入阐明了不同类别煤层底板水害的垂直细划特征、宏观致灾表象及动力响应机理,并对现有底板水害综合除患治理技术体系进行整合梳理,探究了矿区生态环境系统减损及原位保护等多目标集约下我国煤层底板水害的未来发展趋势和防控路径导向。

1 我国煤层底板水害总况

既发事故是研究灾害发展规律及探讨未来发展趋势的重要支撑,对既发事故进行数统分析是开展相关研究的重要路径。笔者通过对国家矿山安全监察局及各省(自治区、直辖市)分局通报的煤层底板水害事故数据进行整理统计作为主要数据来源,并以有关期刊文献资料公开数据作为补充,形成一份有统计记录以来的我国煤层底板水害事故数据库,基于此展开进一步的灾害发展规律研究。

1.1 发展规律

据不完全统计,1958年-2023年间,我国(本文数据统计及灾害研究范围均限指中国大陆地区(文中以简写“我国”代指,下同),不含港澳台)共发生煤层底板水害百余起,其中,仅2000年以来即发生56起,占统计年份区间事故总起数的54.4%。为了对我国煤层底板水害的发展历程建立全方位系统性认知,从年份、突水量、省份等维度对2000年以来我国煤层底板水害事故展开数统分析,探寻内在发展规律性特征。

结合图1a可以看到,2000年以来,我国煤层底板水害事故起数随时间推移整体呈现“双起双降”的动态演变趋势,单一年份最大突水量曲线走势协同演变。即2000—2005年、2008—2010年两个统计年份区间内事故起数整体逐年增加,而2005—2008年、2010—2014年两个区段内事故数呈递减趋势,及至2014年后保持动态稳定。结合2000年以来我国原煤产量曲线可以看到,煤层底板水害高发的两个峰值区间均位于原煤产量长时平稳递增的“黄金十年”,煤炭产业在该时期内的高速发展协同诱发煤层底板水害事故发展态势的急速恶化。与之形成鲜明对比的是,2016年至今,我国原煤产量再次出现长时平稳递增特征并延续至2023年,但是,煤层底板水害事故起数整体局面得到高强高效管控,底板水害仅在个别年份零星出现,这与当前政府有关部门对煤层底板水害防治工作的高度重视及高压管控力度、相关矿企及员工整体安全意识的加强、灾害预防预控新技术体系的强化完善等密不可分。

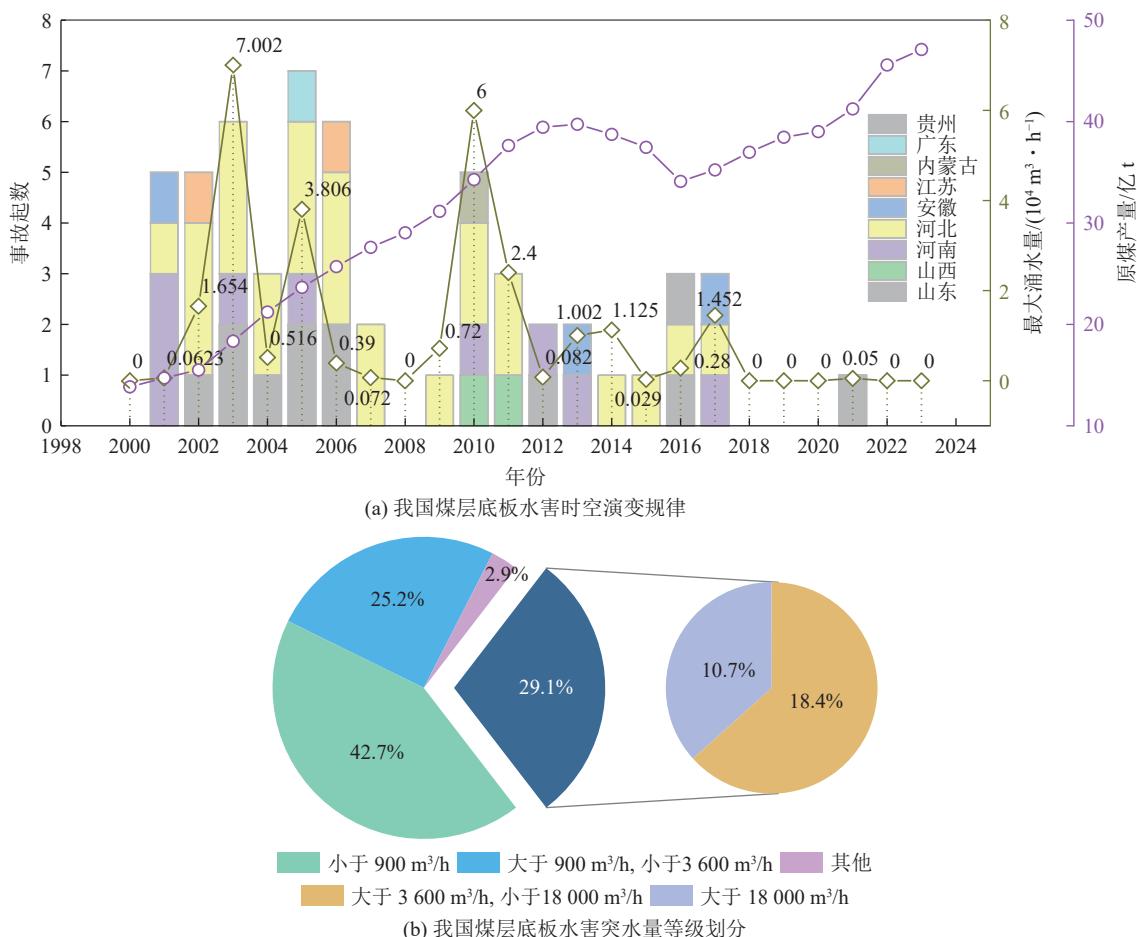


图1 我国煤层底板水害时空演变规律及突水量特征

Fig.1 The temporal and spatial evolution law of coal seam floor water disaster and the characteristics of water inrush in China

图1b为我国煤层底板水害突水量区间占比统计概况。从中可见,突水量小于900 m³/h的煤层底板水害事故数量占比达到了42.7%,几乎占到统计总量的一半,表明煤层底板水害大部工况下突水量相对较小,可控性较高。但是,更应引起注意的是,突水量大于3 600 m³/h的事故起数占比高达29.1%,接近总数的1/3,且其中又有近1/3事故突水量大于18 000 m³/h。由此可见,煤层底板水害事故突水量两极分化严重,虽然有近半壁水害突水危害相对较小,但极端涌水在煤层底板水害中亦较为频发,其探-防-治等各环节难度均较大,严重威胁煤炭资源的安全高效开发,并导致大量有效煤炭资源呆滞,造成资源的严重浪费。因此,煤层底板水害的成因、机理、防控技术等仍应引起校-政-企-地各方的高度重视。

整合煤层底板水害统计数据,按照不同省份煤层底板水害严重程度(事故频次)进行分析,以此对煤层底板水害进行分区,并以连线和箭头形式勾勒出我国煤层底板水害在空间维度下的总体展布规律,突出不同严重程度分区之间的界限和内在关联性,形成图2所示空间展布规律图。在该维度下,我国煤层底板水

害呈“一核-两极-多点”的全局空间规律性分布特征,并可依据煤层底板水害严重程度划分为“核心区”、“两极区”和“散点区”等3个主要分区,其中:“一核”概指河北省全域,其在统计区间的14个年份内共发生煤层底板水害26起,高居榜首,最长7年连发;“两极”概指山东省和河南省,其中,山东省7个年份内共发10起,河南省7个年份内共发9起;“多点”指统计年份区间内发生煤层底板水害事故数量在3起以内的其他省份,如山西、安徽、江苏、贵州、广东等。可见,我国煤层底板水害的集群效应极为突出,且与华北石炭二叠纪煤田岩溶-裂隙水水害区范围高度吻合,这也直接反映出了我国煤层底板水害的地质本底诱因及发育发展规律性特征。

1.2 基本属性

通过对近年来我国煤层底板水害事故数统分析及其潜灾-孕灾-致灾-灾后显现特征等演化过程进行精细化整合分析,提取其总体共性/独立特征,依据导升水路径、缺陷构造几何形态、充填物结构、空间展布规律、灾害宏观响应特征、致灾动力源头等共性因素及活化带宽、时间效应综合反馈、隔水层失稳破坏

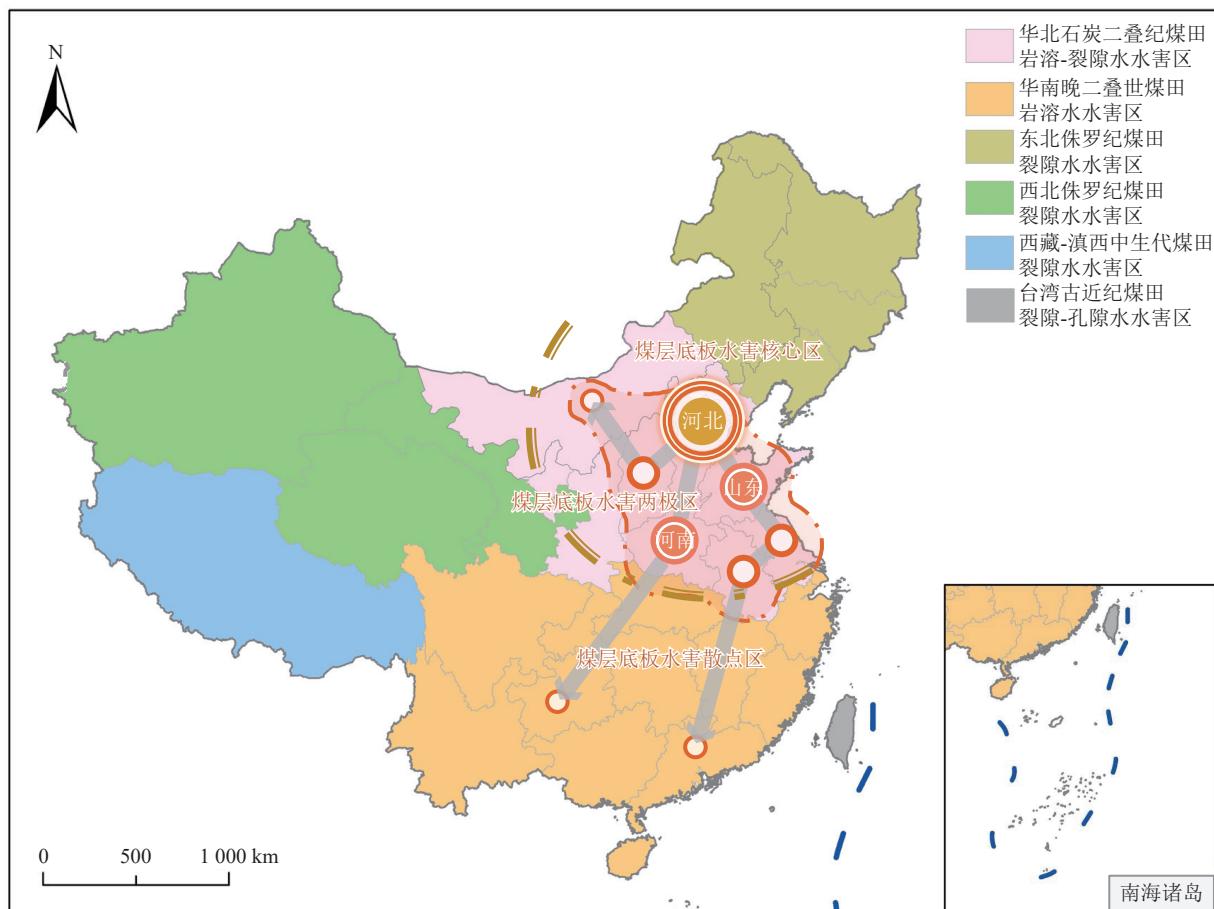


图2 我国煤层底板水害空间展布规律

Fig.2 Spatial distribution law of coal seam floor water disaster in China

形式等独立因素对煤层底板水害进行精细划分,建立科学精准的灾害分支系统,突出强调不同类型煤层底板水害核心致灾诱因体系及宏观动力学响应特征,归纳灾害类型,并以图3所示整合立面图形式将岩溶陷

落柱、断层、裂隙等3种底板水害类型关键特征点做对比表征,为进一步建立煤层底板水害主体架构奠定基础。

岩溶陷落柱和断层是受地质构造运动和原位水化学场等耦合作用下所形成的原生地质缺陷构造,并在采动诱发下成为底板灰岩水涌突至采场的优势导升水通道的重要组成部分。岩溶陷落柱和断层内部多赋存有结构及组分不一的充填物,是控制岩溶陷落柱和断层导水和储水能力的重要结构,对宏观突水致灾表象具有重要的影响。值得一提的是,充填物对岩溶陷落柱和断层发育成为煤层底板灰岩水导升通道的控制作用并非绝对的,少数情况下,当充填物原位赋存破碎块体间独立性好、泥质化程度低、导水能力强时,岩溶陷落柱和断层未受采动影响即为具有导储水能力的构造,采动诱发有效隔水层劣化损伤后即可诱发灰岩水导升突涌。裂隙主要指采动诱发煤层底板破坏后发育的采动裂隙网络集束形成的具有一定宏观几何尺度的集束型导升灰岩水路径。裂隙型导升水通道需要经历小裂隙萌生-发育至裂隙集束形成管束型通道的分阶段演化过程,且存在多层灰岩水共

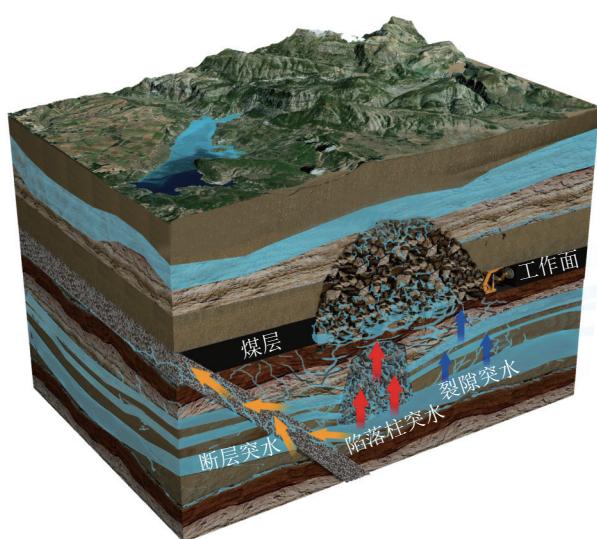


图3 我国煤层底板水害总体宏观表征

Fig.3 Overall macroscopic characterization of coal seam floor water disaster in China

同参与突水过程的现象,因此其突水宏观表象滞后性亦较为显现。

1.3 主体架构

基于导升水路径、缺陷构造几何形态、充填物结构、空间分布规律、灾害宏观响应特征、致灾动力源

头等共性因素及活化带宽、时间效应综合反馈、隔水层失稳破坏形式等独立因素构成的指标体系对我国煤层底板水害进行分类和界别,建立起如图4所示的底板水害类型概览思维导图及致灾因素体系架构。

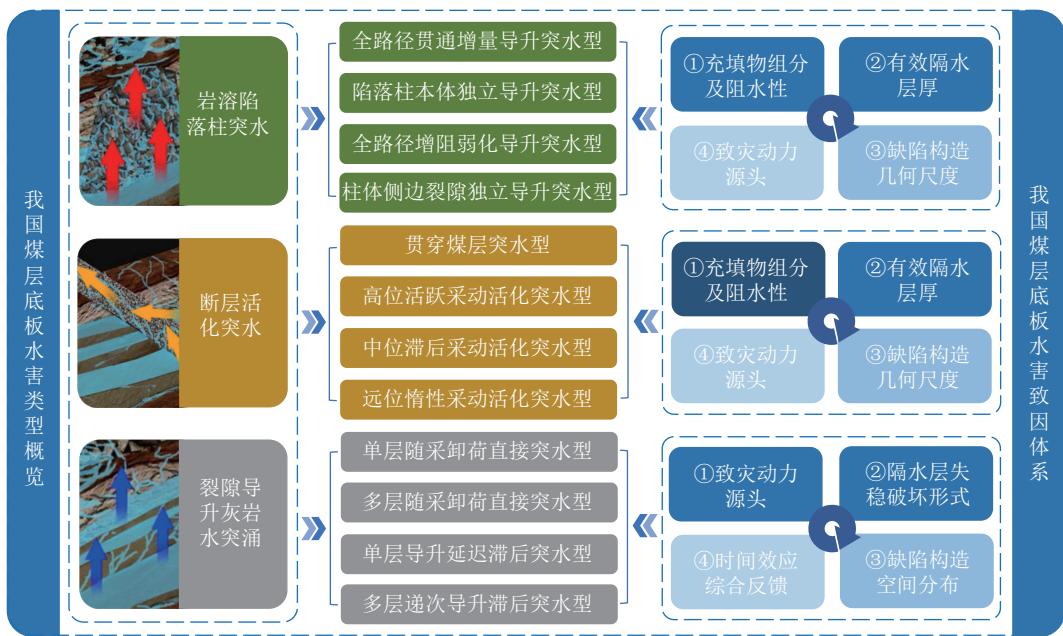


图4 我国煤层底板水害主体架构

Fig.4 The main structure of coal seam floor water disaster in China

依据岩溶陷落柱与采场之间的空间位置关系可知,岩溶陷落柱一般包括底板隐伏型和贯穿煤层型两种。其中,在目前已探知的岩溶陷落柱中,大部分以隐伏形式存在^[36],因此,对陷岩溶陷落柱突水类型的划分重点考虑其充填物阻水能力及不同路径(柱体及围岩裂隙等)的导升水能力。据此将之划分为全路径贯通增量导升型突水、陷落柱本体独立导升型突水、全路径增阻弱化导升型突水和柱体侧边裂隙独立导升型突水等4个子类。同岩溶陷落柱与煤层之间空间层位关系不同的是,断层的赋存形式多样,对煤层构成潜在突水危险性的类型通常包括但不限于完全隐伏于底板之下、贯穿煤层等^[37-38],因此,针对断层型突水的划分重点考虑断层与煤层之间空间层位分布关系(即断层倾角、延伸长度等控制下断层几何尺度的差异性)^[39]。基于此,将断层型突水划分为贯穿煤层型突水、高位活跃采动活化型突水、中位滞后采动活化型突水和低位惰性采动活化型突水等4个子类。对裂隙型突水而言,原生裂隙作为该类型导升水通道“本底”发育基础的原生缺陷构造,其几何尺度与岩溶陷落柱和断层存在不同量级的差异,因此其整体发育过程呈现出明显的阶段性特征(隔水层递进式失稳破

坏),且其阶段性特征与采场扰动、含水层数量等因素紧密相关(致灾动力源头),突水点位多元散发。基于此,将之划分为单层随采卸荷直接型突水、多层随采卸荷直接型突水、单层导升延迟滞后型突水和多层递次导升滞后型突水等4个子类。

1.4 地理空间展布特征

在先期开展的煤层底板水害数统分析及主体架构中主干大类和分支子类的划分结论基础上,对不同类型煤层底板水害的地理空间分布特征进行深入研究,厘清不同类型煤层底板水害地理空间发展脉络及走向,为进一步明确下一时期内煤层底板水害防控路径提供客观发展规律依据。

1.4.1 岩溶陷落柱突水

据统计,我国即发岩溶陷落柱突水事故或存在相关致灾隐患的矿井主要位于我国华北和华东地区,分布区横跨河南、河北、安徽、山东、山西、内蒙古等省份(自治区)的20多个煤田^[40],其中河北省是我国即发岩溶陷落柱水害的核心地区(图5),统计年份区间内仅河北一省的事故数量即占事故总数的39.1%。同时,河北省岩溶陷落柱水害的严重程度亦居各省份之首,62.5%的事故突水量在10 000 m³/h以上。另外,

山东省国家庄煤矿、安徽省任楼煤矿、桃园煤矿、潘二煤矿,江苏省张集煤矿,内蒙古自治区骆驼山矿等矿井突水量亦达到了 $10\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 以上量级。由图5可见(以连线和箭头勾勒空间维度下的展布规律性,下同),我国岩溶陷落柱突水事故主要赋存于华北石炭-二叠纪煤田,其中不乏涉及山西、陕西、内蒙古等产

煤大省,且均为我国大型煤炭生产基地的驻地所在,相关分布区内涉及的煤炭总产能占同期全国总量的75.63%,由于岩溶陷落柱的隐蔽赋存/显现突水造成大量煤炭资源呆滞,严重制约能源产业的安全高效发展,亟待通过革新技术手段减弱或消除岩溶陷落柱突水威胁性,解放煤炭产能。

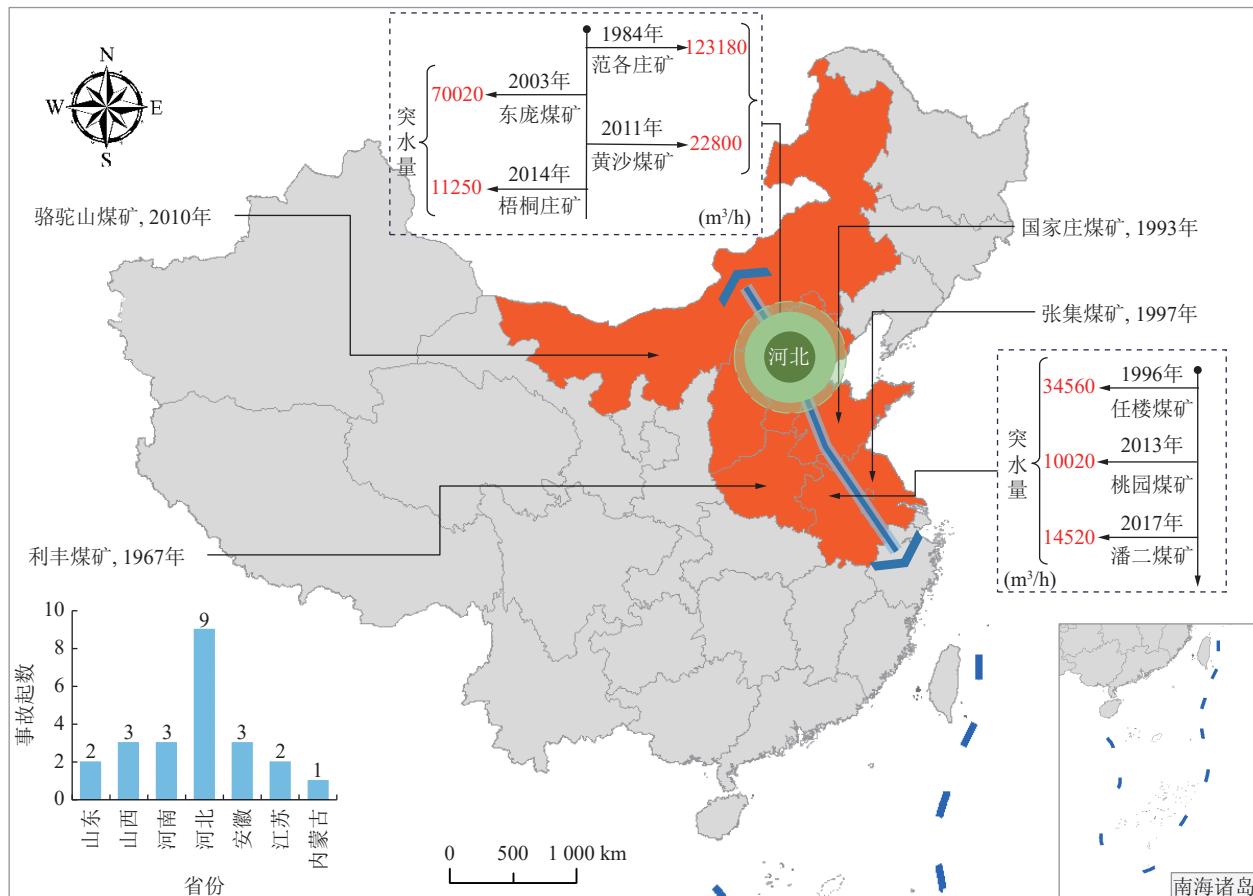


图5 我国煤层底板岩溶陷落柱突水灾害分布规律

Fig.5 Distribution law of water inrush disaster of karst collapse column in coal seam floor in China

可见,岩溶陷落柱突水灾害受原位地质条件因素制约明显,在我国分布较为集中,容易引发重特大型突水事故。尤其是受岩溶陷落柱影响难以安全开发或不能开发的呆滞煤炭资源总量大,对我国煤炭产业总体发展造成显著负面影响。同时,在后续煤炭资源接续开发过程中,揭露并诱导煤层底板岩溶陷落柱突水灾害发生的隐蔽致灾威胁性仍保持高位态势。因此,对岩溶陷落柱突水机理的深入研究及防控技术的开发刻不容缓。

1.4.2 断层活化突水

断层是诱发煤层底板水害的关键缺陷地质构造,2000年以来,我国发生的煤层底板水害事故中由断层活化直接引发的事故占近六成,是我国煤层底板水害的关键大类。根据统计分析结果形成我国煤层底板

断层活化突水地理空间分布规律图,如图6所示。由图可见,我国煤层底板断层活化突水灾害主要集中于河南、河北两省地区,并在山东、安徽、山西、江苏等临近省份及广东、贵州等远部离散省份均有发生,辐射半径大,范围广。其中,仅河南和河北两省在统计年份区间内即发生40余起断层活化突水事故,占同期全国事故总数的66.6%,集群效应极为显著,是断层活化突水事故“重灾区”。另一方面,河南和河北两省断层活化突水事故中突水量大于 $10\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 的仅有4起,所占比重仅一成,远低于岩溶陷落柱的六成高占比,表明断层活化突水严重程度整体低于岩溶陷落柱。

1.4.3 裂隙导升(复合)灰岩水突涌

包括岩溶陷落柱、断层等在内的我国煤层底板全

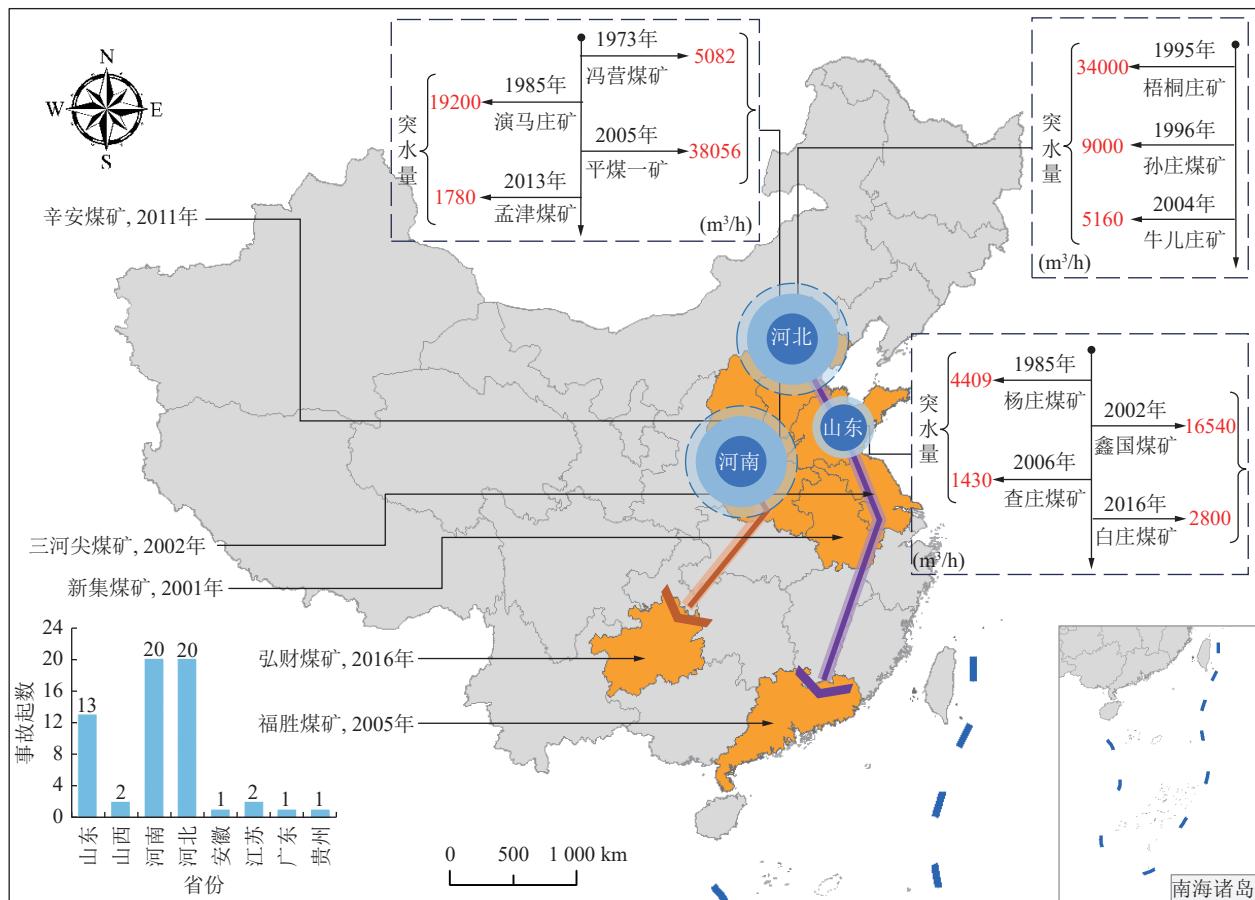


图 6 我国煤层底板断层活化突水灾害分布规律

Fig.6 Distribution law of fault activation water inrush disaster in coal seam floor in China

类别水害架构的补给水源大都为底板灰岩含水层(包括太原组灰岩、奥陶系灰岩等)。同时,由前述分析可知,岩溶陷落柱和断层的发育均在周围伴生小断层、裂隙(网络)等局部小尺度不整合缺陷构造,非岩溶陷落柱、断层赋存区域亦发育有原生裂隙。因此,存在岩溶陷落柱和断层活化突水区域同时存在以裂隙(网络)等小型导水构造引发底板突水的威胁性,当然亦存在无岩溶陷落柱和断层等大型缺陷构造参与、仅由裂隙(网络)承担导升水通道功能的煤层底板突水。因此,裂隙(网络)属于岩溶陷落柱突水、断层活化突水和裂隙导升灰岩水突涌等3大类煤层底板水害致灾要素的一部分,尤其裂隙与岩溶陷落柱、断层等缺陷构造之间具有显著的共/伴生特征。因此,裂隙导升(复合)灰岩水突涌灾害地理空间分布范围与笼统角度的煤层底板水害分布范围一致,即“有煤层底板水害即有裂隙导升(复合)灰岩水活动”。故此处对“仅由裂隙(网络)承担导升水通道功能的煤层底板突水”和“岩溶陷落柱即断层诱发的煤层底板突水”地理空间分布状态共绘“一张图(图7)”,对二者开展协同对比分析。

由图7可见,仅由裂隙(网络)承担导升水通道功

能的裂隙导升(复合)灰岩水突涌灾害集中区范围远小于岩溶陷落柱突水和断层活化突水范围,同时,在统计年份区间内,裂隙导升(复合)灰岩水突涌灾害数量仅占总数的19.4%,这也进一步从侧面印证了岩溶陷落柱突水和断层活化突水灾害特别是后者的高发性,也说明了无岩溶陷落柱、断层等大型缺陷构造参与的裂隙导升(复合)灰岩水突涌灾害孕灾-致灾环境相对严格苛刻,发生率低。河北省仍然是该类型事故的核心地区、重灾区,一省事故数量远超其他省份事故数量总和。

结合前述岩溶陷落柱突水及断层活化突水地理空间分布规律分析结果及下图7可知,裂隙导升(复合)灰岩水突涌灾害集中赋存区域(河北、河南、山东等3省份)亦为岩溶陷落柱突水和断层活化突水“重灾区”,三者协同共存。及此从地理空间分布规律角度提取出了我国煤层底板水害的共性地质基因,揭示了岩溶陷落柱、断层、裂隙这3类诱发煤层底板水害的核心缺陷构造之间的内生联动关系,为进一步开展灾害子类划分工作,分析我国煤层底板水害核心致灾诱因,揭示突水模式及致灾机理提供落脚点和切入点。

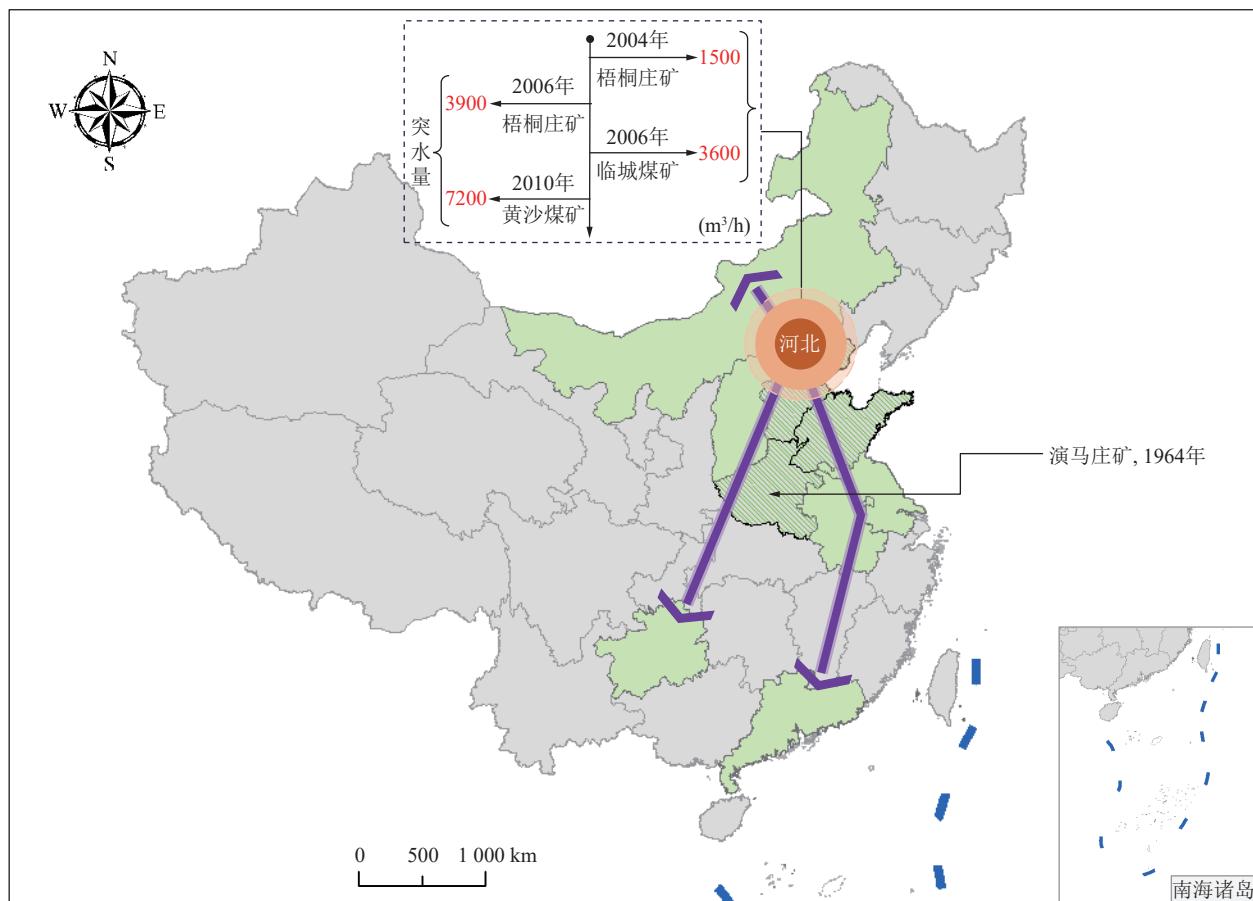


图7 我国煤层底板裂隙导升(复合)灰岩水突涌灾害分布规律

Fig.7 The distribution law of water inrush disaster in coal seam floor fracture lifting (composite) limestone in China

2 我国煤层底板水害特征及致灾机理

基于对不同类型煤层底板水害的整合分析,在煤层底板水害大类划分基础上开展纵深研究,提取核心致灾诱因,对大类进行细划,探究致灾模式,揭示孕灾-致灾机理,以期“由点及面”式全方位、立体化阐述我国煤层底板水害内生发展规律,为通过立足总体发展现况指引未来发展导向提供必要的主体内容支撑。

2.1 岩溶陷落柱突水

2.1.1 核心致灾诱因

岩溶陷落柱剖面形状多为椭圆形、类圆形等,已探明的岩溶陷落柱中,纵向剖面几何形状多为上小下大的锥形结构,同时,亦存在上大下小的倒锥形、上下大小不定的串珠形等^[41-42],在很大程度上会影响柱体导(含)水能力。另外,岩溶陷落柱柱体充填物形体、层位分布、独立性(胶结程度)、架构空间、摩阻性能等协同构成了控制柱体内部过水及常态化储水能力的先决条件,直接决定其宏观导(含)水性能,是岩溶陷落柱突水灾害核心致灾诱因体系的关键导向性因素和重要组成部分。

上述充填物导(含)水能力、柱体几何尺度及形貌等虽是控制灾害发生的核心致灾诱因,但其本质上属于“孕灾”阶段的灾害链上游因素,而采场扰动、临空卸荷效应、顶板覆岩破断冒落冲击动载等致灾动力源则为打破隐蔽致因体系平衡、最终触发灾害“启动键”的灾害链下游终端因素。

2.1.2 子类划分

陷落柱属于岩溶塌陷地质结构范畴。广义上而言,煤炭开采中的岩溶陷落柱主要指煤田中发育于地下水径流带上的柱状塌陷体。该种对陷落柱的界别方法割裂了陷落柱与其围岩中衍生缺陷构造群(小断层、裂隙等)的关系。因此,本文将陷落柱及其衍生缺陷构造群(小断层、裂隙等)均视为煤田岩溶陷落柱的有机地质组分,并基于此进行类别界定和突水模式划分。

结合前述核心致灾诱因分析结论,对岩溶陷落柱子类的细划归属主要基于其导(含)水能力展开,并以此开展进一步的机理性探讨。通过界定岩溶陷落柱本体内部主要导升水通道及外部辅助通道,并结合所述两种导升水通道阻水和储水能力,将岩溶陷落柱型突水细划为全路径贯通增量导升突水型、陷落柱本体

独立导升突水型、全路径增阻弱化导升突水型和柱体侧边裂隙独立导升突水型等4个子类, 各类别岩溶陷

落柱柱体及围岩缺陷构造群主要理化性质、水理性质、分布特征、综合突水威胁性等指标对比见表1。

表1 不同子类岩溶陷落柱型突水特征指标

Table 1 Water inrush characteristic index table of different sub-class karst collapse column type

岩溶陷落柱类别	柱体充填物特征	柱体围岩缺陷构造群特征	综合导(含)水性能
全路径贯通增量导升突水型	破碎块体独立性好, 泥质化程度低, 孔隙率高	小断层、裂隙(网络)等较为发育、密集, 贯通度较高	导(含)水能力较强, 具备较高突水危险性
陷落柱本体独立导升突水型	破碎块体独立性好, 泥质化程度低, 孔隙率低	小断层、裂隙(网络)等缺陷构造在地质构造应力作用下趋向闭合状态	导(含)水能力一般, 具备一定突水危险性
全路径增阻弱化导升突水型	破碎块体独立性差, 泥质化程度高, 孔隙率低	小断层、裂隙(网络)等缺陷构造在地质构造应力作用下逐渐发生闭合	导(含)水能力较差, 突水危险性低, 可控程度高
柱体侧边裂隙独立导升突水型	破碎块体独立性差, 泥质化程度高, 孔隙率低	柱体侧边裂隙(网络)等较为发育、密集, 贯通度较高	导(含)水能力较差, 突水危险性低, 可控程度高

图8为基于岩溶陷落柱本体及围岩衍生缺陷构造群的复合导(含)水能力对岩溶陷落柱型突水进行细划后的4个子类宏观示意图。图8a所示全路径贯通增量导升型突水的岩溶陷落柱柱体充填物相对独立(胶结程度低), 孔隙率高, 内部过水能力强且可储水空间大。同时, 柱体外围边缘赋存有几何尺度不等的小断层、裂隙等衍生缺陷构造, 且具备相当的过水能

力, 可提供增量涌突水效应, 二者协同构成该子类岩溶陷落柱水害的主体导升水运移路径。图8b为陷落柱本体独立导升型突水, 柱体内部过水能力强, 可储水量大, 在外载荷激发下成为关键导升水通道。但柱体边缘围岩内的小断层、裂隙等衍生缺陷构造受相关地质作用力控制, 趋向于闭合状态, 过水能力降低, 增量导升水效应弱。第3个子类是全路径增阻弱化导

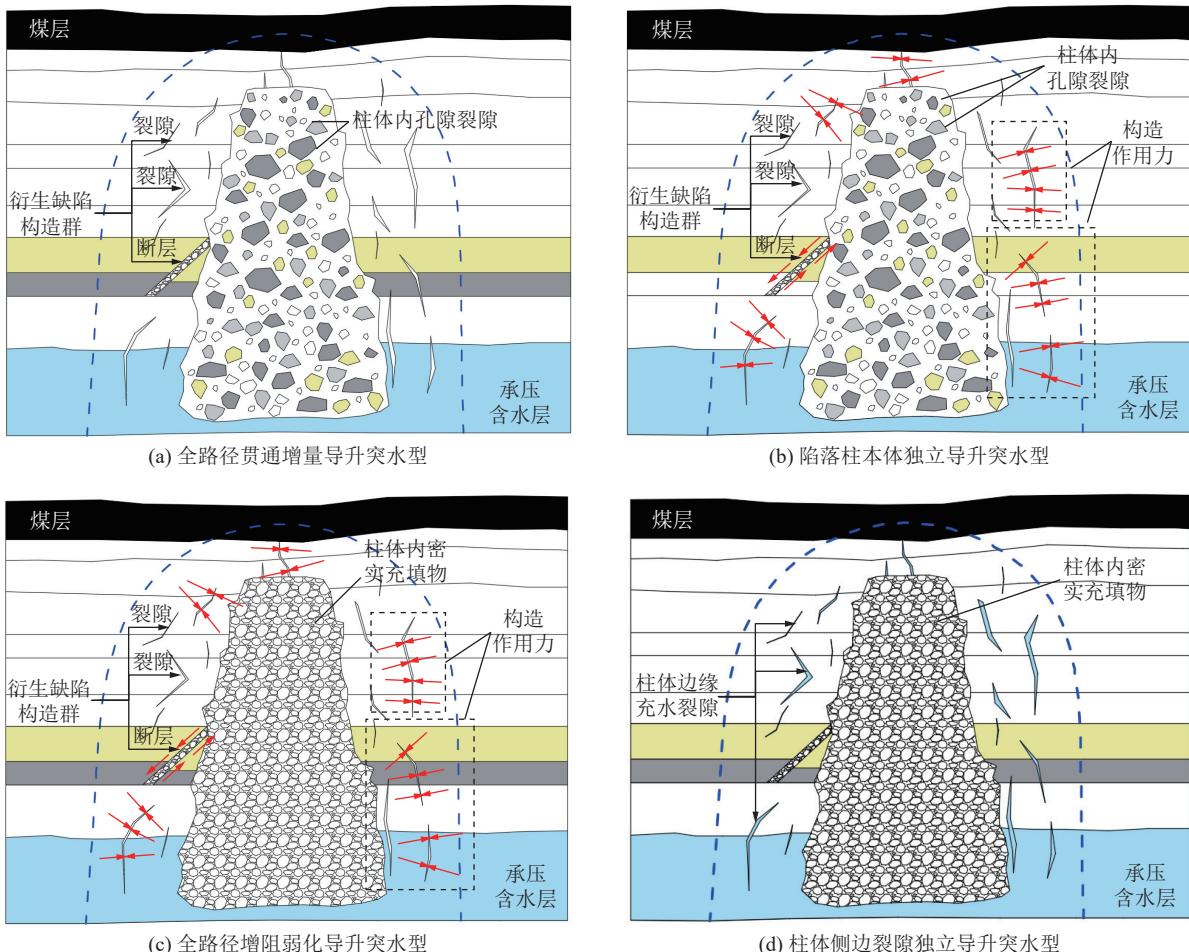


图8 煤层底板岩溶陷落柱突水子类划分

Fig.8 Water inrush subclass division of karst collapse column in coal seam floor

升型突水,如图8c所示,该类型岩溶陷落柱柱体充填物独立性差,孔隙率低,储水空间小,属导(含)水能力较差的岩溶陷落柱。同时,柱体边缘围岩内衍生缺陷构造亦不具备较强过水能力,因此该类型岩溶陷落柱突水危险性较低。另外,当岩溶陷落柱柱体内部充填物致密、孔隙率低、不具备导升水和储水能力,而柱体边缘小断层、裂隙等缺陷构造可承载一定导升水活动时,构成了第4类岩溶陷落柱突水类型,即柱体侧边裂隙独立导升型突水(图8d)。

2.1.3 突水模式及致灾机理

在分析阐明岩溶陷落柱子类划分准则及结果的基础上,归纳岩溶陷落柱突水宏观共性特征,提取共性基因,并结合其赋存地质环境背景,建立地质力学模型,以致灾因素为切入点,形成突水临界判据,掌握突水致灾过程机制。

2.1.3.1 突水临界判据

由前述可知,目前已探知的岩溶陷落柱中大部分以隐伏形式存在,因此本文以煤层底板隐伏型岩溶陷落柱为例,探讨建立其临界突水判据。岩溶陷落柱突水灾变过程涉及诱因繁多,灾变机理复杂,且不同类型突水过程所涉灾变机理存在显著特异性。因此,为

了能够建立起初步的具有普适性的岩溶陷落柱突水临界判据,为后续开展进一步的岩溶陷落柱突水全场景建模及灾变理论机制探讨工作奠定基础,本文考虑以突水灾变终端环节为切入点,即以煤层底板采动破坏带和岩溶陷落柱顶部之间的有效隔水层为目标研究对象,建立起如图9所示的地质力学构造概化模型,从主导控制岩溶陷落柱突水的终端结构分析并形成具有一般属性的岩溶陷落柱突水临界判据。

基于诱发岩溶陷落柱突水的动力源产生形式及传递路径,将之划分为静态加载扰动激发型和动力突袭扰动激发型2种模式。静态加载扰动激发型岩溶陷落柱突水模式是指煤层采出诱发底板卸荷与堆矸压覆载荷长期加载的循环加卸载作用下,底板岩溶陷落柱柱体与采场之间的有效隔水层发生损伤劣化直至失阻诱发突水;动力突袭扰动激发型岩溶陷落柱突水模式是指工作面推进时煤层采出对陷落柱的揭露未直接引起其活化和承压水导升运移活动,而是在工作面采后顶板覆岩破断冒落对底板形成的冲击加载叠加到底板卸荷与堆矸压覆载荷进程中,强烈的瞬时动力突袭使加卸荷过程诱发初始损伤的有效隔水层产生二次不可逆的破坏性损伤,有效隔水层完全失阻引发突水。

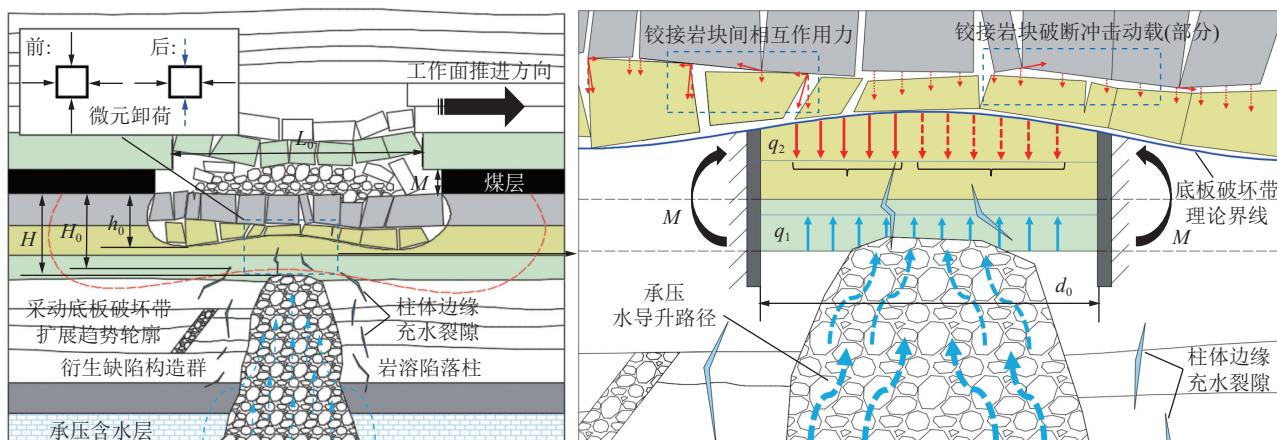


图9 煤层底板岩溶陷落柱地质力学构造概化模型

Fig.9 The generalized model of geomechanical structure of karst collapse column in coal seam floor

图9中, q_2 为有效隔水层上覆岩体自重载荷

$$q_2 = \frac{E_1 h_1^3 (\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \dots + \gamma_n h_n)}{E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3 + \dots + E_n h_n^3} \quad (1)$$

式中: E_n 为第 n 层岩层的弹性模量, GPa; γ_n 为第 n 层岩层的容重, kg/m³; h_n 为第 n 层岩层的厚度, m。

结合岩梁抗弯理论对有效隔水层进行力学分析,可得: 岩溶水压为 $q_1 d_0$ 时, 临界隔水层厚度为

$$h = \frac{d_0}{2} \sqrt{\frac{3q_1}{R_T} - \frac{3E_1 h_1^3 (\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \dots + \gamma_n h_n)}{R_T (E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3 + \dots + E_n h_n^3)}} \quad (2)$$

式中: R_T 为抗拉强度, MPa; d_0 为有效隔水层与岩溶陷落柱顶部接触面长度, m。

根据 Mohr – Coulomb 准则可知, 工作面回采过程中底板最大破坏深度^[43]为

$$h_0 = \frac{\sigma}{2\pi\gamma} \left[\frac{2\sqrt{\varepsilon}}{\varepsilon-1} - \cos^{-1} \left(\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon+1} \right) \right] - \frac{\sigma_c}{\gamma(\varepsilon-1)} \quad (3)$$

式中: σ_c 为底板岩体抗压强度, MPa; $\varepsilon = (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi)$; ϕ 为煤层内摩擦角, °。

联立式(1)、式(3), 并结合图9力学分析结果, 岩

溶陷落柱静态加载扰动激发型突水临界判据为

$$\left\{ \begin{array}{l} ①: q = q_1 - \frac{E_1 h_1^3 (\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \dots + \gamma_n h_n)}{E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3 + \dots + E_n h_n^3} \\ ②: H - \frac{\sigma}{2\pi\gamma} \left[\frac{2\sqrt{\varepsilon}}{\varepsilon-1} - \cos^{-1} \left(\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon+1} \right) \right] + \frac{\sigma_c}{\gamma(\varepsilon-1)} \leq \frac{d_0}{2} \sqrt{\frac{3q}{R_T}} \end{array} \right. \quad (4)$$

当式(4)不成立时, 采动卸荷效应及空区堆研压覆静载作用不会诱发岩溶陷落柱突水。此时, 考虑顶板覆岩动力突袭扰动的致损突水机制。动载扰动作用下, 底板岩体内任意一点应力^[44-46]为

$$\sigma = \left\{ 1 + \sqrt{1 + \frac{2E[M - \sum h_i(K_p - 1)]}{\sum h_i \Delta h L_0}} \right\} \frac{\Delta h L_0 e^{-\eta x}}{L_d} \quad (5)$$

式中: Δ 为顶板岩梁体积力, MPa; L_0 为顶板岩梁长度, m; K_p 为碎胀系数; M 为回采高度, m; x 为动力源至触研点距离, m; η 为应力衰减系数, $\eta = (2-\nu)/(1-\nu)$, ν 为泊松比; L_d 为基本顶悬顶距, m。

联立式(3)、式(5)可得动载扰动作用下底板破坏深度为

$$h_0 = \frac{h L_0 e^{-\eta x}}{2\pi L_d} \left\{ 1 + \sqrt{1 + \frac{2E[M - \sum h_i(K_p - 1)]}{\sum h_i \Delta h L_0}} \right\} \times \left\{ \left[\frac{2\sqrt{\varepsilon}}{\varepsilon-1} - \cos^{-1} \left(\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon+1} \right) \right] - \frac{\sigma_c}{\gamma(\varepsilon-1)} \right\} \quad (6)$$

因此, 动载扰动作用时, 煤层底板发生陷落柱突水的临界判据为

$$\left\{ \begin{array}{l} ①: q = q_1 - \frac{E_1 h_1^3 (\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \dots + \gamma_n h_n)}{E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3 + \dots + E_n h_n^3} \\ ②: H - \frac{h L_0 e^{-\eta x}}{2\pi L_d} \left\{ 1 + \sqrt{1 + \frac{2E[M - \sum h_i(K_p - 1)]}{\sum h_i \gamma h L_0}} \right\} \times \left\{ \left[\frac{2\sqrt{\varepsilon}}{\varepsilon-1} - \cos^{-1} \left(\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon+1} \right) \right] - \frac{\sigma_c}{\gamma(\varepsilon-1)} \right\} \leq \frac{d_0}{2} \sqrt{\frac{3q}{R_T}} \end{array} \right. \quad (7)$$

即当式(7)成立时, 煤层底板岩溶陷落柱隔水层在覆岩破断冲击动载扰动作用下发生失稳破坏, 诱发突水。

特别的, 上述模型及临界判别条件主要针对陷落柱顶部突水的3种子类, 对于柱体侧边裂隙独立导升型突水, 其导升水路径与岩溶陷落柱主导控制顶部突水类型存在差异, 具体表现为采动底板破坏带与柱体侧边裂隙之间的有效隔水层厚度差异性。即当采动底板破坏带范围随采逐渐扩大并突破有效隔水层后, 与岩溶陷落柱柱体侧边裂隙导升水路径形成接触并

建立水力联系后诱发突水。因此, 该类型临界突水判据可初步表述为

$$\left\{ \begin{array}{l} ①: q = q_1 - \frac{E_1 h_1^3 (\gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \dots + \gamma_n h_n)}{E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3 + \dots + E_n h_n^3} \\ ②: H_0 - h_0 \leq \frac{d_0}{2} \sqrt{\frac{3q}{R_T}} \end{array} \right. \quad (8)$$

即当岩溶陷落柱符合柱体侧边裂隙独立导升突水陷落柱特征时, 在满足式(8)条件下, 煤层底板具备发生以岩溶陷落柱柱体侧边裂隙主导控制的导升突水。

2.1.3.2 突水致灾机理

回采作业启动前, 煤层底板岩体处于初始三向应力状态(图10a第一阶段), 并维持相对平衡。及至工作面开始推进后, 煤层的采出使底板以深地应力场临空卸荷, 如图10a第二阶段所示, 产生大小为 σ_2 的卸荷量, 此时, 应力单元体内的法向地应力残余量为 $\sigma_1 - \sigma_2$ (其中, σ_1 为应力单元体对应位置处的初始地应力强度), 原位三向应力平衡状态被打破, 底板出现向采出空间侧运移的趋势。采场扰动递进波及至承压含水层与岩溶陷落柱接触处, 岩溶陷落柱在持续性采动及承压水水压协同作用下逐步失稳, 充填物结构发生异变, 破碎块体独立性增强, 间隙增大, 阻水能力降低, 最终发育形成导储承压水体的空间, 承压水体初步导升至岩溶陷落柱柱体(或边缘裂隙等)内。工作面继续推进, 煤层直接顶临空弯曲破断冒落, 与底板接触后产生的冲击动载以底板组合岩体为介质向底板以深递进式传递, 宏观上形成对底板的初次加载作用。随后动载冲击在传递过程中迅速释放、转化、消弭, 最终残余量赋存于冒落堆研和煤层底板岩体内并以堆研体自重载荷和煤层底板岩体弹性变形的形式对底板形成持续的嗣后静态加载(静态加载扰动激发型, 图10a第三阶段), 加载量为 σ_3 。图10a第四阶段中工作面已周期来压, 顶板覆岩发生大面积破断冒落, 所形成的冲击动载对煤层底板形成烈度较高的二次加载(加载量为 σ_4 (动力突袭扰动激发型), 应力单元体内的法向地应力残余量增大至 $\sigma_1 - \sigma_2 + \sigma_3$)。此时, 在循环加卸载耦合作用下, 煤层底板岩溶陷落柱柱体顶部与上部采场之间的有效隔水层岩体劣化损伤程度不断增大, 失阻增透范围持续延伸扩展, 最终完全贯通形成导升水路径, 使岩溶陷落柱柱体内的承压储水体沿之进入上部采场, 从而引发煤层底板水害事故(图10b)。同时, 当岩溶陷落柱柱体内部充填物密实性高, 可过水及储水空间小, 柱体不具备导升水和储水能力, 而柱体边缘小断层、裂隙等缺陷构造可承载一

定导升水活动时,采动底板破坏带与柱体边缘裂隙之间的有效隔水层在循环加卸载耦合扰损下,最终失阻

增透,柱体边缘充水裂隙与采场沟通建立贯通的导升水通道,诱发突水灾害。

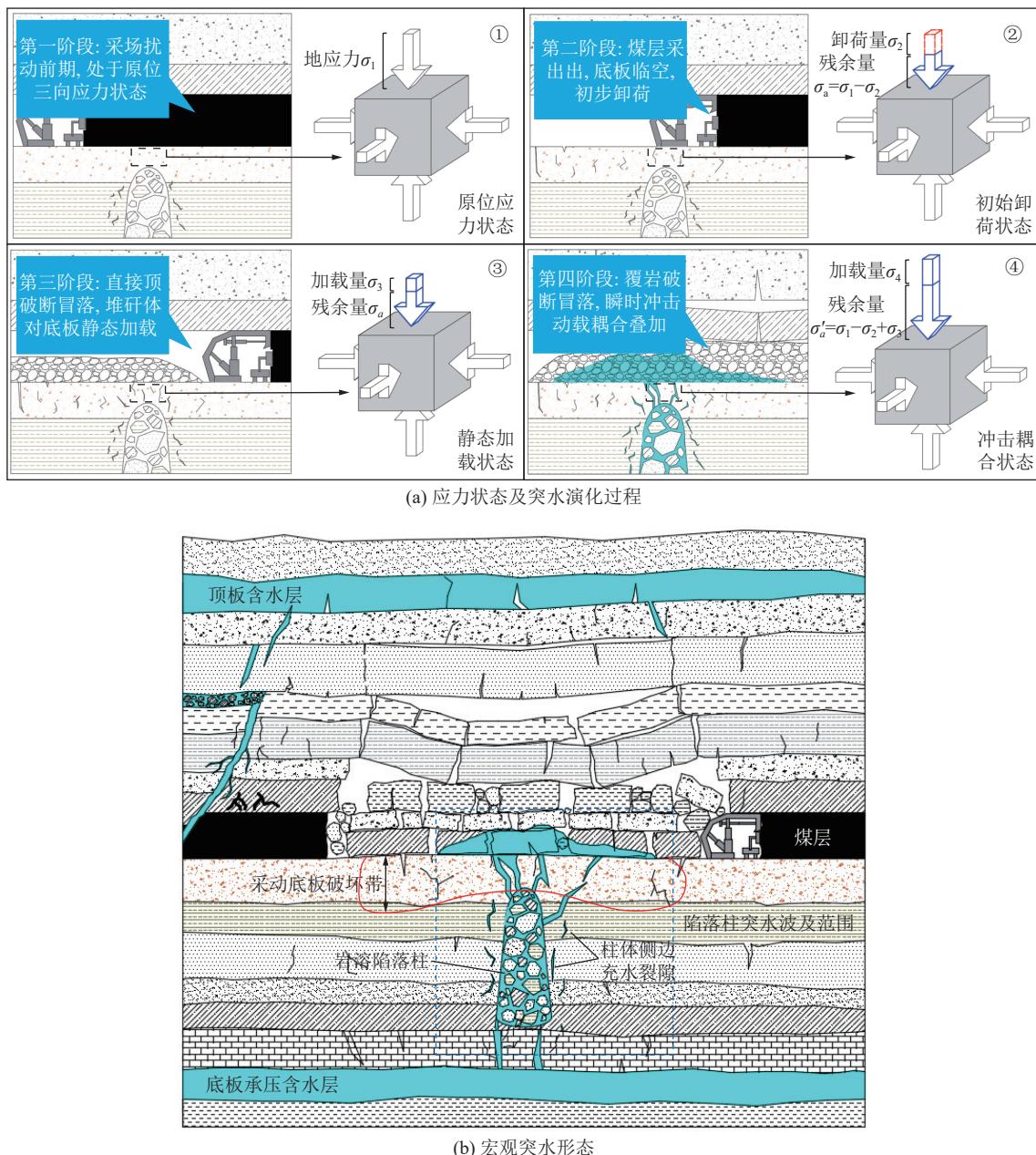


图 10 煤层底板岩溶陷落柱突水致灾过程

Fig.10 Water inrush disaster process of karst collapse column in coal seam floor

2.2 断层活化突水

2.2.1 核心致灾诱因

断层是煤层底板水害主体架构的主要组成部分,是直接或间接参与煤层底板水害的关键地质构造之一。由煤层底板断层型突水宏观致灾表象可知,滞后性是涉断层底板水害的关键显现特征及灾害类型追踪辨识重要判据。而断层滞后性受控于断层充填物组分、断层充填物过水能力、断层几何尺度及其与采场之间活化隔断带范围等因素^[47-48],属断层型煤层底

板水害核心致灾诱因体系组成要素。另外,考虑采后采场-围岩地质综合体内的相关因素耦合作用所导致的时间效应差异、断层充填物等亦为断层型煤层底板水害的致灾诱因之一。

通过前述分析可知,岩溶陷落柱突水致灾动力源包括静态加载和动态加载两种模式。事实上,包括岩溶陷落柱突水、断层活化突水等在内的底板水害之动力源均可表述为静态加载和动态加载两种。并结合断层与煤层间空间层位关系,开展以目标为导向的子

类细划、突水临界判据识别及致灾机理研究工作。

2.2.2 子类划分

结合前述核心致灾诱因的分析结果及“下三带”理论,以采动破坏带底界面为基准线,按照断层顶界

面与该基准线距离将煤层底板断层划分为贯穿煤层突水型、高位活跃采动活化突水型、中位滞后采动活化突水型及远位惰性采动活化突水型4类,各类型示意图如图11所示。

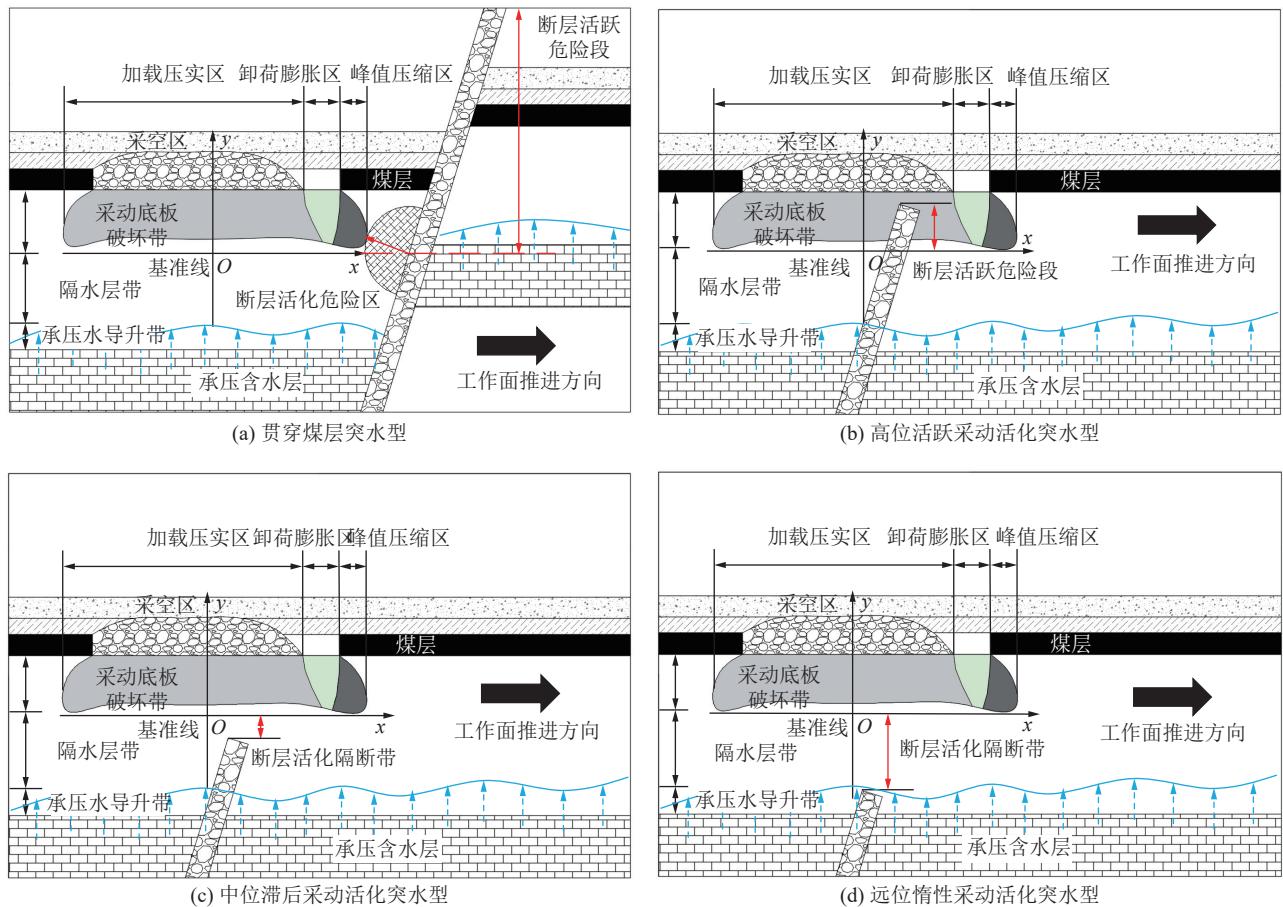


图11 煤层底板断层活化突水子类划分

Fig.11 Classification of fault-activated water inrush subclasses in coal seam floor

不同类型断层与底板采动破坏带之间的时空关系存在较大差异:贯穿煤层型断层与底板采动破坏带之间存在一个危险区(图11a),该区域首先与底板采动破坏带对接并开始活化,活化进程与工作面推采作业工序之间的时间错位程度不显著;高位活跃采动活化型断层与底板采动破坏带存在重叠区(图11b),重叠区内的断层直接受采动影响启动活化,属于活跃危险段;中位滞后采动活化型断层顶界面位于隔水带内,与采动破坏带之间存在一个活化隔断带(图11c),能够延迟断层启动活化时间,突水延迟滞后特征相对明显;远位惰性采动活化型断层顶界面位于承压水导升带内,隔水带和部分承压水导升带即为该类型断层顶界面与底板采动破坏带之间的活化隔断带(图11d),因此,该类型断层受采动影响最小,诱发突水的可能性低。

2.2.3 突水模式及致灾机理

为深入探讨断层活化诱发突水致灾时机及过程,在对断层型突水诱因及子类划分基础上,提取不同类型断层活化突水共性特征,基于理论分析手段建立起具有普适性的煤层底板断层活化突水临界判据条件,揭示突水致灾机理。

2.2.3.1 突水临界判据

煤层底板断层力学构造复杂,在原始地应力、采动循环加卸载等应力场作用下,断层构造应力重分布力学响应机制模糊多变,充填物结构异常演化。结合前述分析,以初步构建煤层底板水害体系架构为导向,建立起与岩溶陷落柱等其他煤层底板水害大类具有直观统一性的断层型普适突水临界判据,从力学角度分析断层活化突水路径的形成过程,将断层及其所处采后采场-围岩地质综合体进行概化处理,建立地质

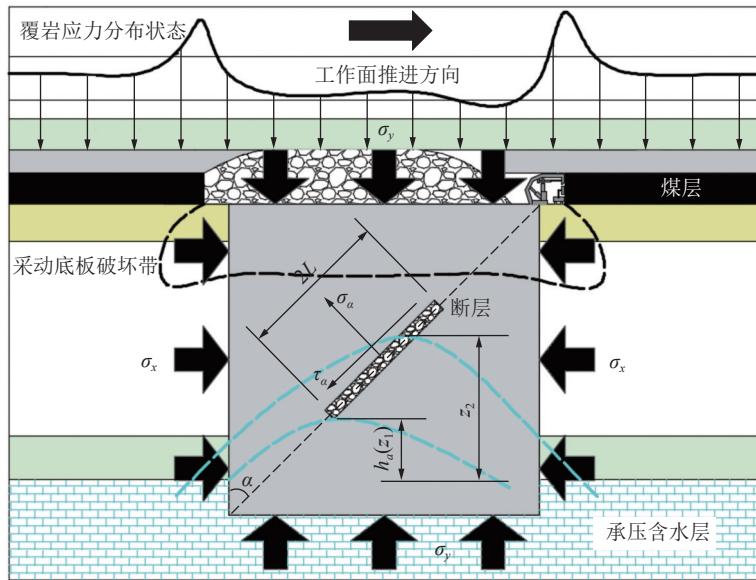


图 12 煤层底板断层地质力学构造概化模型

Fig.12 A generalized model of fault geomechanical structure of coal seam floor

力学构造概化模型,如图 12 所示。其中,将断层拟化为实验室尺度的岩石裂隙,其与垂向夹角为 α ,长度为 $2L$,裂隙面上正应力为 σ_a ,剪应力为 τ_a 。将实验室尺度的裂隙岩体与采后采场-围岩地质综合体进行耦合叠加分析,以此打通宏观和细观尺度研究通道,实现跨多尺度下断层力学结构的精细化推演和研究。

考虑断层带内承压水体孔隙水压力 P 作用^[49],对断层面应力状态进行分析^[50],正应力和剪应力分别为

$$\begin{cases} \sigma_a = -\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\alpha - P\right) \\ \tau_a = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\alpha \end{cases} \quad (9)$$

式中: σ_x 为水平地应力, MPa; σ_y 为垂直地应力, MPa; α 为裂隙与垂直地应力方向夹角, ($^{\circ}$); P 为承压水水压, MPa。

结合裂隙尖端应力强度因子计算公式可得

$$\begin{cases} K_I = -\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\alpha - P\right) \sqrt{2\pi L} \\ K_{II} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\alpha \sqrt{2\pi L} \end{cases} \quad (10)$$

进一步,基于 D-P 准则及压剪作用下裂隙尖端应力场分量解析方程组^[51-52]可求得岩体 II 型断裂韧度

$$K_{IIC} = \frac{6c\sqrt{2\pi L}\cos\varphi}{-2\sqrt{2}\sin\varphi\sin\frac{\theta}{2} + (3 - \sin\varphi)\sin\frac{\theta}{2}\sqrt{\omega(1+\omega)}} \quad (11)$$

式中: c 为黏聚力, MPa; φ 为内摩擦角, ($^{\circ}$); θ 为裂隙尖端扩展角度, ($^{\circ}$); ω 为代表性参量, $\omega = 1 + \cos(\theta/2) \cos(3\theta/2)$ 。

基于常规压剪试验所建立的 I-II 型复合断裂经验公式为^[53-54]

$$\lambda K_I + |K_{II}| = K_{IIC} \quad (12)$$

式中: λ 为压剪比系数。

联立式 (10)—式 (12) 得到承压水作用下断层开启活化扩展的临界水压值

$$P = \frac{6c\cos\varphi}{\lambda\sin\frac{\theta}{2}[-2\sqrt{2}\sin\varphi + (3 - \sin\varphi)\sqrt{\omega(1+\omega)}] + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2\lambda}(\lambda\cos 2\alpha - \sin 2\alpha) + \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}} \quad (13)$$

承压水体经断层导升过程的伯努利能量方程为^[55-57]

$$z_1 + \frac{P_0}{\gamma_z} + \frac{\eta_1 v_1}{2g} = z_2 + \frac{P_z}{\gamma_z} + \frac{\eta_2 v_2}{2g} + h_f + h_j \quad (14)$$

式中: z_1 , z_2 为初始位置和导升进程任意位置处水头高度, m, $z_2 - z_1 = L$; P_0 为 z_1 位置处水头压力, MPa; P_z 为 z_2 位置处水头压力, MPa; γ_z 为承压含水层水体容重, KN/m³; η_1 , η_2 为动水流动能修正系数; v_1 , v_2 为动水流速, m/s; g 为重力加速度, m/s²; d 为渗流通道截面当量直径, m, $d = 4R_h$ 。

沿程能量损失 h_f 和局部能量损失 h_j 计算方法如下

$$h_f = \xi \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}, \quad h_j = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (15)$$

式中: ξ 为沿程阻力系数; ζ 为局部阻力系数。

当 $P_z = P$ 时,承压水导升高度达到最大。此时,结合式 (14) 式 (15) 可求得考虑初始承压水导升高度的

综合导升高度为

$$h = \frac{P_0 - P}{\gamma_z} - \frac{v^2}{2g} \left(\xi \frac{l}{4R_H} + \zeta \right) + h_a \quad (16)$$

式中: h_a 为承压水初始导升高度, m。

根据底板破坏深度、承压水导升高度和断层赋存位置之间的几何关系, 可以得出

$$h_0 + h \geq H_0 \quad (17)$$

式中: h_0 为采动底板破坏深度, m, 参见式 (3); H_0 为断层顶界面与煤层底板间距, m。

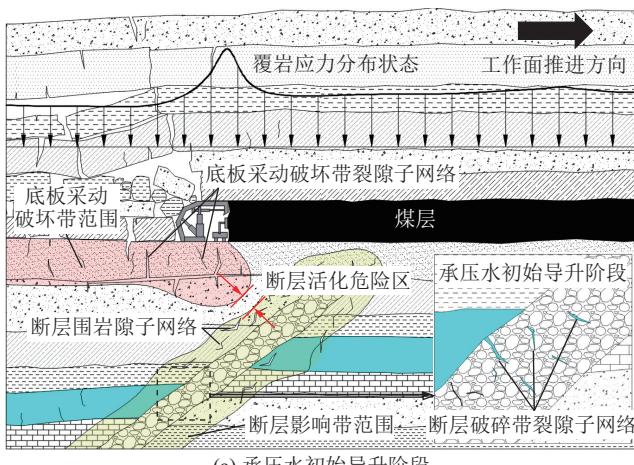
联立式 (3)、式 (16)、式 (17), 建立煤层底板断层活化突水临界综合判据

$$\left\{ \begin{array}{l} \textcircled{1}: P = \frac{6ccos\varphi}{\lambda\sin\frac{\theta}{2}\left[-2\sqrt{2}\sin\varphi+(3-\sin\varphi)\sqrt{\omega(1+\omega)}\right] + \frac{\sigma_x-\sigma_y}{2\lambda}(\lambda\cos 2\alpha-\sin 2\alpha) + \frac{\sigma_x+\sigma_y}{2}} \\ \textcircled{2}: \frac{\sigma}{2\pi\gamma}\left[\frac{2\sqrt{\varepsilon}}{\varepsilon-1}-\cos^{-1}\left(\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon+1}\right)\right] - \frac{\sigma_c}{\gamma(\varepsilon-1)} + \frac{P_0-P}{\gamma_z} - \frac{v^2}{2g}\left(\xi \frac{l}{4R_H} + \zeta\right) + h_a \geq H_0 \end{array} \right. \quad (18)$$

即当式 (18) 成立时, 煤层底板断层具备发生突水灾害的理论基本条件。

2.2.3.2 突水致灾机理

在工作面回采作业的启动-推进-持续推进进程中, 采场扰动逐渐波及至断层影响带范围内, 并在采动及承压水水压协同作用下, 断层破碎带与其围岩内部启动滑移发育裂隙(图 13a), 断层破碎带内充填物离散性开始增大, 孔隙率提高, 承压水体沿裂隙通道向断层破碎带内运移。此时, 断层启动活化进程, 并具备初步导升水能力。



(a) 承压水初始导升阶段

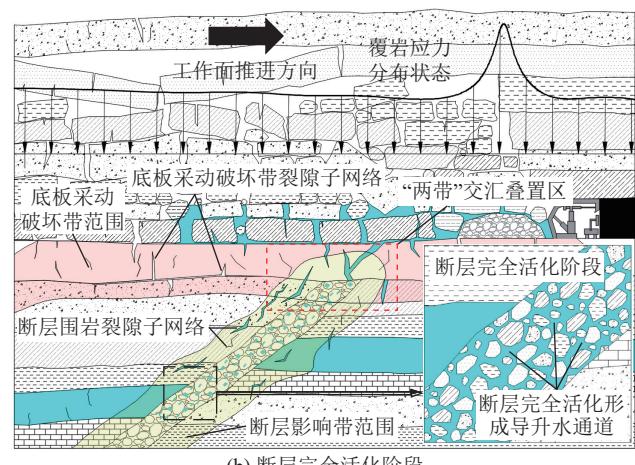
随回采继续, 断层内部充填物离散性进一步增大, 裂隙通道进一步发育完善, 承压水体沿断层持续导升。同时, 底板采动破坏带范围逐渐扩大, 并与断层影响带交汇叠置(图 13b), 底板采动破坏带裂隙与断层围岩裂隙形成初步接触。在承压水水压及工作面持续推采产生的动静载扰动持续耦合加载下, 底板采动破坏带与断层影响带叠置区范围进一步扩大, 断层内外裂隙持续延伸扩展, 并与底板采动破坏带裂隙形成完整接触, 构建起完备的导水裂隙网络, 承压水体经断层破碎带裂隙子网络、断层围岩裂隙子网络和底板采动破坏带裂隙子网络最终抵达采场引发突水灾害。

2.3 裂隙导升(复合)灰岩水突涌

2.3.1 核心致灾诱因

与岩溶陷落柱突水和断层活化突水相比, 煤层底板裂隙导升(复合)灰岩水突涌灾害的核心致灾诱因具有显著的独属性, 且涉及的致灾诱因体系纷繁庞杂。对于奥灰/太灰单一含水层, 决定直接突水/延迟滞后突水的关键在于承压含水层上覆有效隔水层厚度及煤层采动底板岩体卸荷量, 二者共同作用成为控制突水时机的核心要素之一。同时, 承压水水压、采动底板破坏带范围等亦为协同控制奥灰/太灰单一含水层突水宏观显现特征的参与要素之一^[58-59]。

本质而言, 岩溶陷落柱突水和断层活化突水均具有一定原生缺陷构造基础作支撑, 且在采动诱发下缺陷构造几何形态不会有显著的宏观特征性演变。但是, 煤层底板裂隙导升(复合)灰岩水突涌灾害的原生缺陷构造基础相对薄弱, 裂隙发育及最终突破有效隔水层转化为导升水通道过程受采动控制作用显著, 且奥灰+太灰*n复合承压含水层之间的互馈贯通均伴随裂隙的发育-扩展-延伸活动, 亦由此导致该类型煤



(b) 断层完全活化阶段

图 13 采动诱发煤层底板断层活化突水致灾过程

Fig.13 Mining-induced coal seam floor fault activation water inrush disaster-causing process

层底板水害的宏观显现特征与含水层层位及数量密切相关。因此多层次水源体系的增量水压驱动、薄层灰岩储运导升(压)即成为奥灰+太灰*n复合承压含水层独属的核心致灾诱因^[60]。值得注意的是,有效隔水层厚度、采动底板岩体卸荷量、承压水水压等也是奥灰+太灰*n复合承压含水层核心致灾诱因体系的重要组分。

2.3.2 子类划分

不同地区煤层底板承压含水层赋存环境各异,底

板有效隔水层厚度亦存在较大差别,导致以底板采动裂隙(网络)主导的煤层底板突水宏观显现特征呈现较强的规律性。因此,以承压含水层数量及其空间组合分布特征、承压水水压、煤层底板有效隔水层厚度等为主控因素体系组分,将裂隙导升(复合)灰岩水突涌灾害细划为单层随采卸荷直接突水型、单层导升延迟滞后突水型、多层随采卸荷直接突水型和多层递次导升滞后突水型等4个子类,不同类型对应示意图如图14所示。

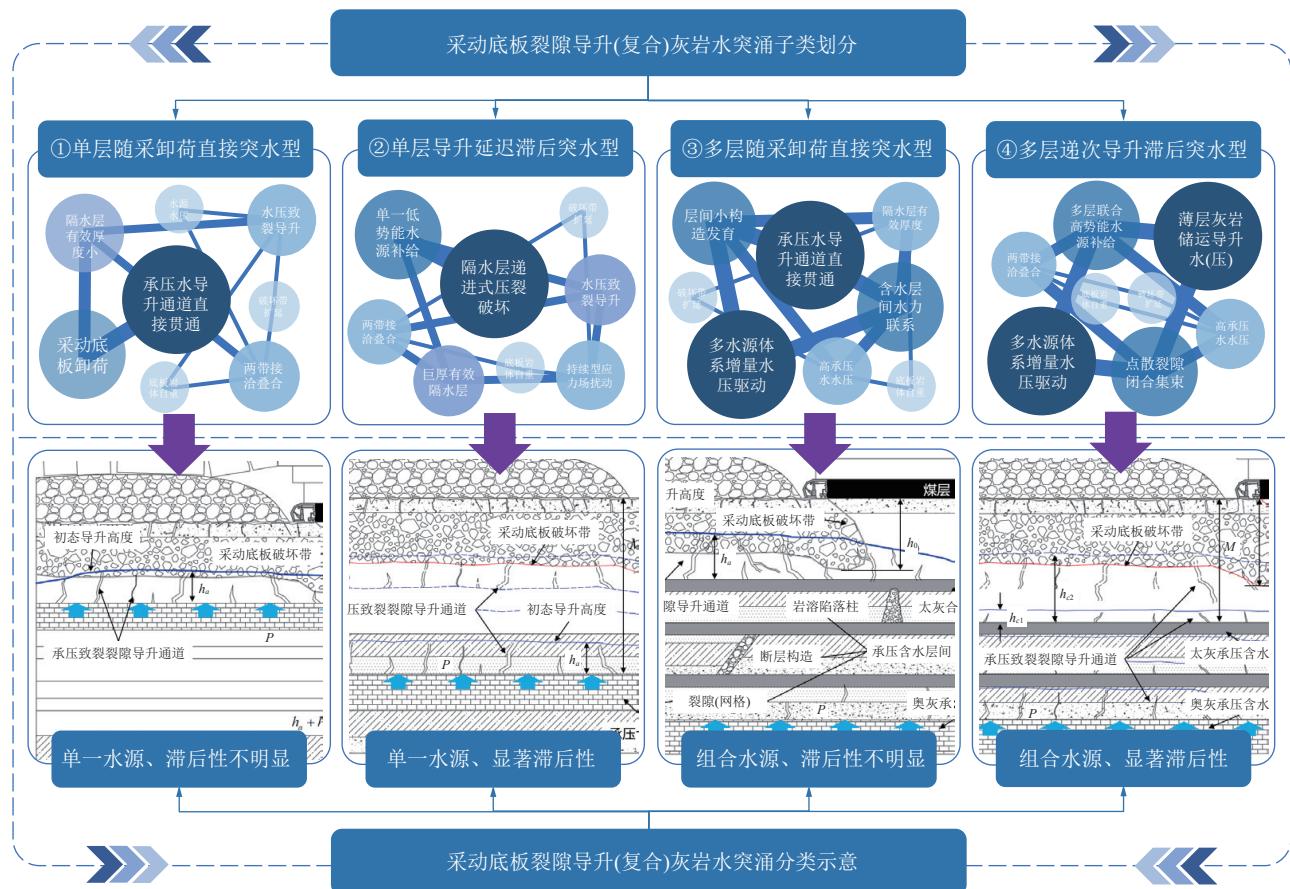


图 14 采动底板裂隙导升(复合)灰岩水突涌子类划分

Fig.14 Division of sub-categories of water inrush in mining floor fracture lifting (composite) limestone

当煤层底板承压含水层为奥灰/太灰单一层位含水层结构形式,且其赋存层位距采场较近,易在短时间内接收工作面采动作用并形成及时响应时,在承压含水层水压协同加载作用下奥灰/太灰单一层位含水层顶部岩体界面裂隙(承压水初始导升带)与采动底板破坏带接壤形成导升水通道,承压水体涌入采场诱发水害(图14①单层随采卸荷直接突水型)。另外,当奥灰/太灰单一层位含水层与采场之间有效隔水层厚度较大时,承压含水层顶部岩体界面裂隙与采动底板破坏带贯通导升水通道形成时间跨度远大于单层随采卸荷直接突水型,宏观表现为突水过程与工作面推

采过程之间的时差错位性(图14②)。

对于奥灰+太灰*n复合承压含水层结构形式,其导升突水宏观显现特征同样包括直接突水和滞后突水两种。当复合承压含水层间发育有断层、岩溶陷落柱、裂隙等原生导升水构造时,各个含水层之间具有一定程度的本源水力联系,当采动波及至相关区域时,原生导升水构造迅速活化,激活各承压含水层之间承压水体的导升-传输-转运等活动,最终汇集至最高层位承压含水层并经其顶部岩体界面裂隙与采动底板破坏带接壤形成的导升水通道突涌至采场形成突水灾害。此类型水害虽有多层承压含水层,但其相互之

间完全互馈贯通形成集中导升水能力的时间跨度小, 宏观上的突水过程与工作面推采过程的错位性不明显, 即为多层随采卸荷直接突水型(图14③)。当复合承压含水层间无显著原生导升水构造或原生导升水构造不足以快速激活临近含水层间水力联系时, 各承压含水层间的互馈-贯通具有显著递进式演变规律, 即自最低层位奥灰承压含水层起, 逐层突破上覆有效隔水层, 与上覆灰岩承压含水层逐层沟通并建立起具有集中导升水能力的水运移通道, 承压水溃涌至采场内诱发突水灾害(图14④)。应该说明的是, 复合承压含水层结构形式亦有可能引发单层直接突水, 即最高层位承压含水层在未与其下部含水层组建起具有集中导升水能力的水运移通道之前直接发育形成了贯通上覆采场的导升水通道并引发水体突涌。

2.3.3 突水模式及致灾机理

同前所述, 进一步开展采动底板裂隙导升(复合)灰岩水突涌灾害的临界启动突涌水判别条件研究, 为子类划分依据提供支撑。同时, 结合子类细划及理论建模分析结果, 揭示其突水致灾机理, 为全方位加深对采动底板裂隙导升(复合)灰岩水突涌的认知提供一定参考。

2.3.3.1 突水临界判据

煤层底板裂隙导升(复合)灰岩水突涌过程涉及承压含水层在采动应力场演化环境中的协同-互馈作用, 相关突水致灾诱因组分复杂且相互之间联动响应多, 临界突水条件隐蔽性强。为了能够对煤层底板裂隙导升(复合)灰岩水突涌灾害临界启动突涌水条件

进行精准识别和把握, 需要从水-岩-应力耦合场的力学干涉-互馈机制角度, 由点及面展开研究和分析, 以实现对煤层底板裂隙导升(复合)灰岩水突涌灾害各阶段宏观表象和内生机能进行精细刻画和阐释。为此, 在前述对煤层底板裂隙导升(复合)灰岩水突涌灾害主/子类型细划及内生致灾诱因体系整合分析基础上, 建立煤层底板“奥灰/太灰单一层位承压含水层”及“奥灰+太灰*n复合承压含水层”结构体系岩体界面裂隙扩展导升承压水体力学构造模型, 如图15所示。其中, 对不同层位承压含水层、同层位承压含水层水平方向不同点位裂隙作为基础研究单元进行组合划分, 立足裂隙细微观发育的力学本质特征, 以煤层底板裂隙导升(复合)灰岩水突涌灾害的阶段性宏观表象为基础分步建立突涌水临界理论判据。

1) 奥灰水启动导升传输阶段。选取奥灰承压含水层(复合含水层第①层, 以下简称“第①含水层”)岩体界面裂隙 f_1 作为研究示例, 建立“奥灰水启动导升传输”第一阶段的启动突涌水临界判别条件。图15中, 将裂隙 f_1 划分为长 a_1 的主体段和长 b_1 的尖端段, 尖端段是裂隙延伸扩展的主要场所。在裂隙主体段和尖端段共同作用下, 裂隙尖端应力强度因子为^[61]

$$K_{a_1+b_1} = \sin \beta_1 \sqrt{\frac{a_1 + b_1}{\pi}} \sigma_{Lx1}^1 \left(2 \arcsin \frac{a_1}{a_1 + b_1} - \pi \right) - \left(\frac{\sigma_{Lx1} + \sigma_{Ly1}}{2} + \frac{\sigma_{Lx1} - \sigma_{Ly1}}{2} \cos 2\beta_1 - P_1 \right) \sqrt{\pi(a_1 + b_1)} \quad (19)$$

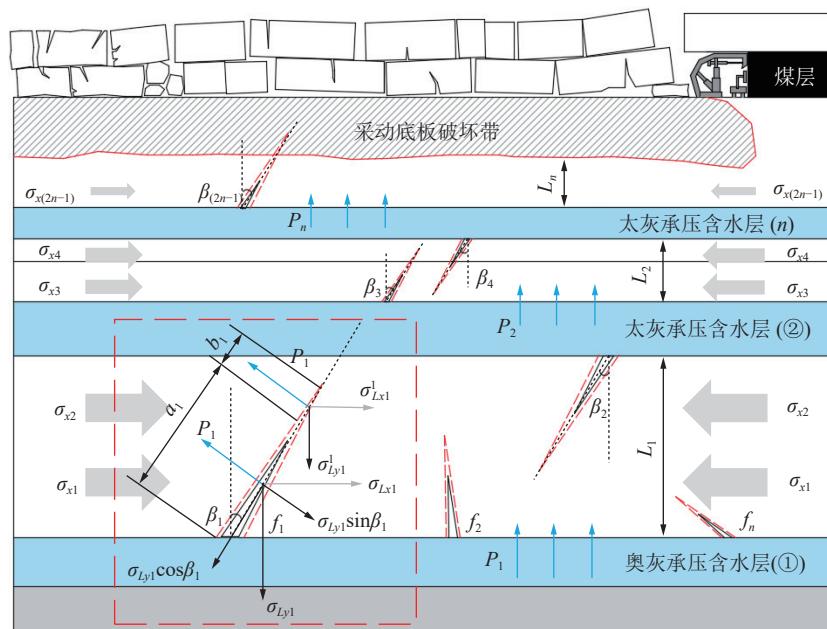


图15 煤层底板含水层岩体界面裂隙扩展导升承压水力学构造模型

Fig.15 Mechanical structure model of confined water in coal seam floor aquifer rock mass interface crack propagation

式中: σ_{Lx1} 和 σ_{Ly1} 分别为水平地应力和法向地应力作用于裂隙 f_1 上 a_1 主体段裂隙面的作用力, MPa; β_1 为裂隙面与含水层垂向夹角, ($^{\circ}$); P_1 为奥灰承压含水层水压, MPa; a_1 、 b_1 分别为裂隙 f_1 主体段和尖端段的长度, m; σ_{Lx1}^1 为水平地应力作用于裂隙 f_1 上 b_1 尖端段的作用力, MPa。

结合材料力学屈服特性, 并联立式(19)可求得第①含水层顶部岩体界面裂隙在原位长度基础上突破第一层有效隔水层区段向上覆首层太灰承压含水层(复合含水层第②层, 以下简称“第②含水层”, 其他层位太灰承压含水层同理)延伸扩展的实际距离为

$$b_1 = a_1 \left\{ \sec \left[\frac{\pi \left(\frac{\sigma_{Lx1} + \sigma_{Ly1}}{2} + \frac{\sigma_{Lx1} - \sigma_{Ly1}}{2} \cos 2\beta_1 - P_1 \right)}{2 \sin \beta_1 \sigma_{Lx1}^1} \right] - 1 \right\} \quad (20)$$

针对第②含水层, 其水压为 P_2 , 结合上述分析可同理求得该层底部岩体界面裂隙突破第一层有效隔水层区段向奥灰承压含水层延伸扩展的实际距离为

$$b_2 = a_2 \left\{ \sec \left[\frac{\pi \left(\frac{\sigma_{Lx1} + \sigma_{Ly1}}{2} + \frac{\sigma_{Lx1} - \sigma_{Ly1}}{2} \cos 2\beta_1 - P_2 \right)}{2 \sin \beta_1 \sigma_{Lx1}^1} \right] - 1 \right\} \quad (21)$$

式中, P_2 为第②含水层水压, MPa。

此时, 奥灰承压含水层的初始导升带高度可以表示为

$$h_1 = \max [(a_1 + b_1)_{f_1}, (a_1 + b_1)_{f_2}, \dots, (a_1 + b_1)_{f_n}] \quad (22)$$

式中, f_1, f_2, \dots, f_n 为同层位水平方向不同点位的基础

$$\begin{cases} ① \max \{ [a_{(2n-3)} + b_{(2n-3)}]_{f_1}, [a_{(2n-3)} + b_{(2n-3)}]_{f_2}, \dots, [a_{(2n-3)} + b_{(2n-3)}]_{f_n} \} \cos \beta_{(2n-3)} \geq L_{n-1} \\ ② \max \{ [a_{(2n-2)} + b_{(2n-2)}]_{f_1}, [a_{(2n-2)} + b_{(2n-2)}]_{f_2}, \dots, [a_{(2n-2)} + b_{(2n-2)}]_{f_n} \} \cos \beta_{(2n-2)} \geq L_{n-1} \\ ③ [a_{(2n-3)} + b_{(2n-3)}]_{f_{x(2n-3)}} + [a_{(2n-2)} + b_{(2n-2)}]_{f_{x(2n-2)}} \geq L_{n-1} \end{cases} \quad (25)$$

3) 承压水完全突破煤层底板突涌阶段。进一步, 当前 n 层承压含水层之间建立水力联系后, 结合采动底板破坏带深度计算公式^[35], 可知第 n 含水层承压水体(即采动底板破坏带之下首层承压含水层)突破第 n 层有效隔水层(即该层位含水层与采动底板破坏带之间的距离 L_n)的临界判别条件为

$$\begin{cases} [a_{(2n-1)} + b_{(2n-1)}]_{f_{x(2n-1)}} + \frac{\sigma}{2\pi\gamma} \left[\frac{2\sqrt{\varepsilon}}{\varepsilon-1} - \cos^{-1} \left(\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon+1} \right) \right] \\ - \frac{\sigma_c}{\gamma(\varepsilon-1)} \geq L_n \end{cases} \quad (26)$$

裂隙研究单元。

对于“奥灰+隔水层+太灰”的地层层序组合结构而言, 当起裂点位于第①含水层顶部岩体界面/第②含水层底部岩体界面的裂隙完全贯穿层间有效隔水层时, 则第①含水层和第②含水层之间即可建立水力联系。同时, 若第①含水层和第②含水层某一位置处的相向延伸扩展裂隙连接贯通亦可沟通两含水层。基于此, 可以建立第①含水层承压水体突破上覆第一层有效隔水层(厚度为 L_1)的临界判别条件

$$\begin{cases} ① \max [(a_1 + b_1)_{f_1}, (a_1 + b_1)_{f_2}, \dots, (a_1 + b_1)_{f_n}] \cos \beta_1 \geq L_1 \\ ② \max [(a_2 + b_2)_{f_1}, (a_2 + b_2)_{f_2}, \dots, (a_2 + b_2)_{f_n}] \cos \beta_2 \geq L_1 \\ ③ (a_1 + b_1)_{f_{x_1}} + (a_2 + b_2)_{f_{x_2}} \geq L_1 \end{cases} \quad (23)$$

式中, f_{x_1}, f_{x_2} 分别为第①含水层和第②含水层层位岩体界面同层位水平方向任一点位的基础裂隙研究单元。

由式(23)可知, 当①②③满足其中之一时, 第①含水层和第②含水层之间即可建立水力联系。

2) 太灰水启动导升转运阶段。第①含水层启动导升转输阶段结束后, 第②含水层水压由 P_2 开始发生递进式演变。因此, 该含水层承压水体突破其上相邻有效隔水层(厚度为 L_2)的临界判别条件为

$$\begin{cases} ① \max [(a_3 + b_3)_{f_1}, (a_3 + b_3)_{f_2}, \dots, (a_3 + b_3)_{f_n}] \cos \beta_1 \geq L_2 \\ ② \max [(a_4 + b_4)_{f_1}, (a_4 + b_4)_{f_2}, \dots, (a_4 + b_4)_{f_n}] \cos \beta_2 \geq L_2 \\ ③ (a_3 + b_3)_{f_{x_3}} + (a_4 + b_4)_{f_{x_4}} \geq L_2 \end{cases} \quad (24)$$

同理可知, 第 $n-1$ 含水层承压水体突破第 $n-1$ 层有效隔水层(厚度为 L_{n-1})的临界判别条件为

$$\begin{cases} ① \max \{ [a_{(2n-3)} + b_{(2n-3)}]_{f_1}, [a_{(2n-3)} + b_{(2n-3)}]_{f_2}, \dots, [a_{(2n-3)} + b_{(2n-3)}]_{f_n} \} \cos \beta_{(2n-3)} \geq L_{n-1} \\ ② \max \{ [a_{(2n-2)} + b_{(2n-2)}]_{f_1}, [a_{(2n-2)} + b_{(2n-2)}]_{f_2}, \dots, [a_{(2n-2)} + b_{(2n-2)}]_{f_n} \} \cos \beta_{(2n-2)} \geq L_{n-1} \\ ③ [a_{(2n-3)} + b_{(2n-3)}]_{f_{x(2n-3)}} + [a_{(2n-2)} + b_{(2n-2)}]_{f_{x(2n-2)}} \geq L_{n-1} \end{cases} \quad (25)$$

综上, 采动底板裂隙导升(复合)灰岩水突涌灾害临界判别条件分述如下:

针对奥灰/太灰的单一层位承压含水层:

$$(a+b)_{f_x} + \frac{\sigma}{2\pi\gamma} \left[\frac{2\sqrt{\varepsilon}}{\varepsilon-1} - \cos^{-1} \left(\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon+1} \right) \right] - \frac{\sigma_c}{\gamma(\varepsilon-1)} \geq L_x \quad (27)$$

式中: a 、 b 分别为单一层位承压含水层同层位任一裂隙 f_x 主体段和尖端段的长度, m; L_x 为单一层位承压含水层上覆有效隔水层厚度, m。

针对奥灰+太灰* n 的复合层位承压含水层:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \begin{aligned}
 & \text{①} \max [(a_1 + b_1)_{f_1}, (a_1 + b_1)_{f_2}, \dots, (a_1 + b_1)_{f_n}] \cos \beta_1 \geq L_1 \\
 & \text{②} \max [(a_2 + b_2)_{f_1}, (a_2 + b_2)_{f_2}, \dots, (a_2 + b_2)_{f_n}] \cos \beta_2 \geq L_1 \\
 & \text{③} (a_1 + b_1)_{f_{i_1}} + (a_2 + b_2)_{f_{i_2}} \geq L_1
 \end{aligned}
 \\ \left\{ \begin{array}{l}
 \begin{aligned}
 & \text{①} \max [(a_3 + b_3)_{f_1}, (a_3 + b_3)_{f_2}, \dots, (a_3 + b_3)_{f_n}] \cos \beta_1 \geq L_2 \\
 & \text{②} \max [(a_4 + b_4)_{f_1}, (a_4 + b_4)_{f_2}, \dots, (a_4 + b_4)_{f_n}] \cos \beta_2 \geq L_2 \\
 & \text{③} (a_3 + b_3)_{f_{i_3}} + (a_4 + b_4)_{f_{i_4}} \geq L_2
 \end{aligned}
 \\ \dots \\
 \left\{ \begin{array}{l}
 \begin{aligned}
 & \text{①} \max \{[a_{(2n-3)} + b_{(2n-3)}]_{f_1}, [a_{(2n-3)} + b_{(2n-3)}]_{f_2}, \dots, [a_{(2n-3)} + b_{(2n-3)}]_{f_n}\} \cos \beta_{(2n-3)} \geq L_{n-1} \\
 & \text{②} \max \{[a_{(2n-2)} + b_{(2n-2)}]_{f_1}, [a_{(2n-2)} + b_{(2n-2)}]_{f_2}, \dots, [a_{(2n-2)} + b_{(2n-2)}]_{f_n}\} \cos \beta_{(2n-2)} \geq L_{n-1} \\
 & \text{③} [a_{(2n-3)} + b_{(2n-3)}]_{f_{x_{(2n-3)}}} + [a_{(2n-2)} + b_{(2n-2)}]_{f_{x_{(2n-2)}}} \geq L_{n-1} \\
 & \{\text{①}\} [a_{(2n-1)} + b_{(2n-1)}]_{f_{x_{(2n-1)}}} + h_0 \geq L_n
 \end{aligned}
 \end{array} \right.
 \end{array} \right. \quad (28)$$

2.3.3.2 突水致灾机理

煤层底板裂隙导升(复合)灰岩水突涌过程中,裂隙是构成导升水通道的主体框架结构,是控制突涌水灾害的核心所在。承压含水层水体初始导升阶段中,在原位承压水水压作用驱动下,各承压含水层岩体顶/底界面应力微集中区萌生裂隙,成为承压水体初始导升带的主要构成组分(图16a)。由于此时裂隙几何尺度有限,承压含水层间/承压含水层与采动底板破坏带间的有效隔水层并未被完全突破,仍承担有效隔水效能,各承压含水层之间未建立起具有集中导升水能力的水运移路径。同时,承压含水层间/承压含水层与采动底板破坏带间可能赋存有岩溶陷落柱、断层、原生裂隙等缺陷构造,为后续承压含水层间贯通及最终诱发采场突涌水埋下了一定的增量隐蔽致灾因素基础。

随工作面接续推采,煤层底板应力场的动态演化

在各承压含水层间引发联动响应,具体表现为承压含水层岩体顶/底界面微裂隙产生进一步延伸扩展,直接突破含水层组间有效隔水层或在对向相邻含水层岩体界面裂隙延伸扩展活动协同演进后接壤贯通或延伸扩展裂隙与岩溶陷落柱等原生缺陷构造接壤贯通,下部层位高承压含水层水体在高水压驱动下沿贯通路径涌入上覆相邻含水层内,直至两层位水压平衡后,两个独立的承压含水层之间初步建立起具有集中导升水能力的耦合水力联合体。进一步,更高层位承压含水层之间发生循环演进,直至奥灰承压含水层水体递进导升至煤层底板内最高层位太灰承压含水层后,其岩体顶界面裂隙延伸扩展并与采动底板破坏带接壤贯通。此时,对于煤层底板水-岩系统而言,突涌水通道已完全建立,组合承压含水层水体逐层递进储存-转运-导升,在采场形成多点位宏观突涌水灾害(图16b)。

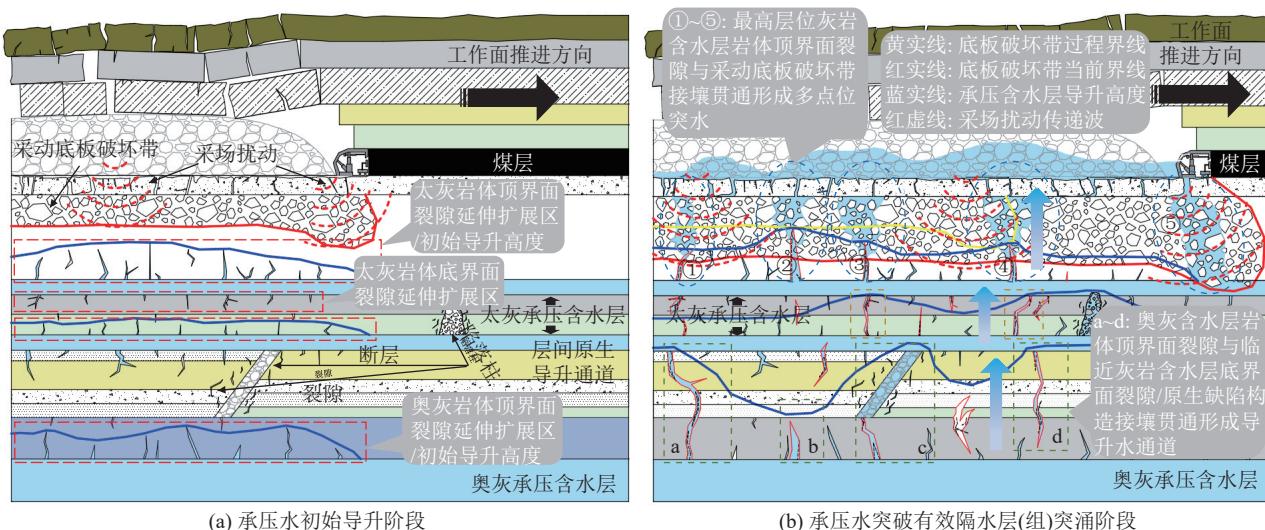


图16 采动底板裂隙导升(复合)灰岩水突涌致灾过程

Fig.16 Disaster-causing process of water inrush in mining floor fracture lifting (composite) limestone

3 我国煤层底板水害防控远景导向

致灾模式及机理的探讨是为了全方位加深对灾害潜灾-孕灾-致灾全场景、全过程的深层次认知,系统性掌握灾害发生的前因后果,并最终为开展查治一体化煤层底板水害预防预控工作提供必要的基础地质信息保障。因此,有必要对当前我国煤层底板水害防控领域研究及发展现况做出阐述,并基于此进一步

展望我国煤层底板水害防治领域的远景发展路径和基础导向。

3.1 发展现况

当前,对煤层底板水害的综合探查、预测、工程治理等主要包括(钻)物探、突水系数法^[62-64]、脆弱性指数法^[65-69]、疏水降压^[70-73]、带压开采^[74-77]、区域注浆治理^[78-82]等,已经形成了一套相对成熟的煤层底板水害综治技术体系,如图17所示。

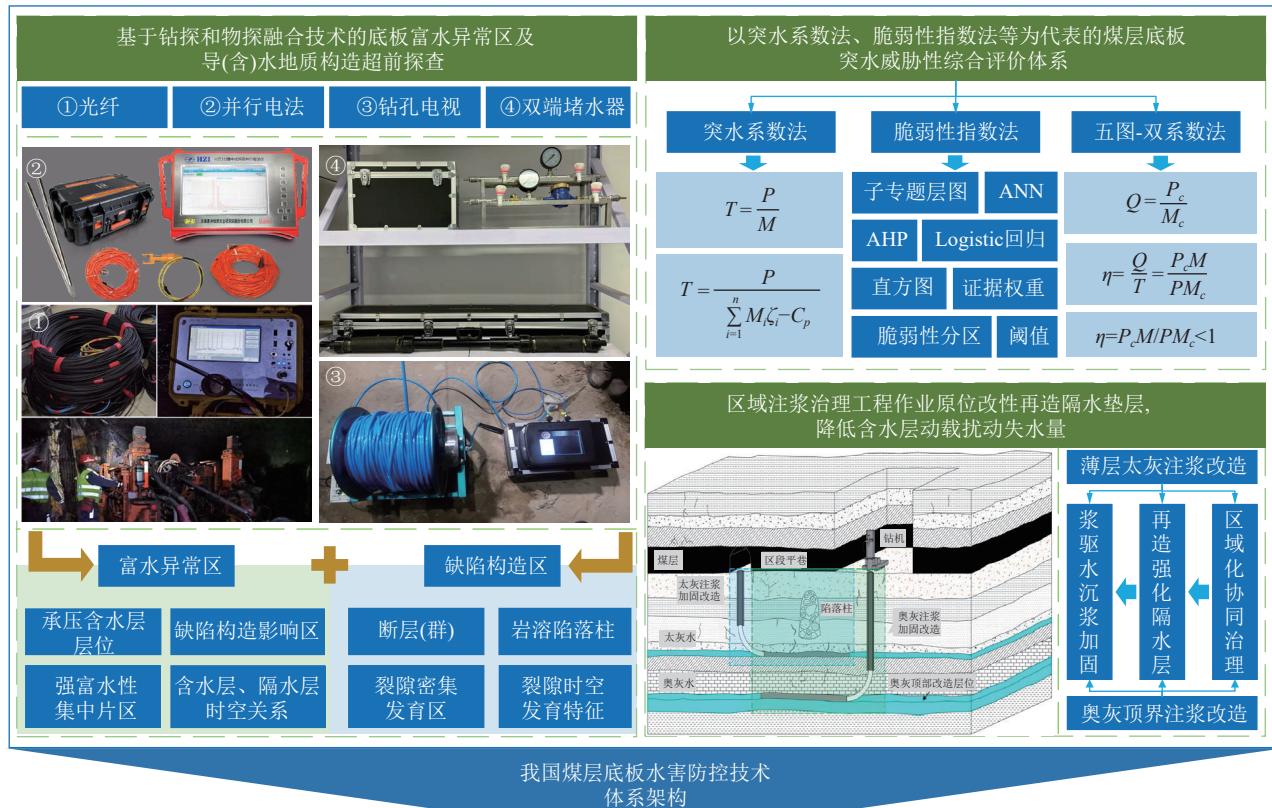


图 17 我国煤层底板水害防控技术体系架构

Fig.17 China's coal seam floor water disaster prevention and control technology system architecture

1) 基于钻探和物探融合技术的煤层底板富水异常区及导(含)水地质构造超前探查,划定富水区及地质异常体赋存区位。

采用光纤、并行电法、钻孔电视、双端堵水器等多元化综合物探手段圈定煤层底板承压含水层富水异常区及岩溶陷落柱、断层、裂隙富集区等导(含)水地质构造分布范围。随后利用钻探进行二次辅助勘探,落实物探成果科学准确性,基本划定含水层富水异常区及导(含)水地质构造区位,查明赋存规律,为采掘巷道系统布置、底板水害超前治理等提供基础地质信息支撑。

2) 整合地质采矿信息数据,以突水系数法、脆弱性指数法等综合评价体系评估煤层底板突水威胁性。

整合矿井水文地质条件、工程地质条件、回采地质条件、底板富水异常区和导(含)水地质构造探查成果等地质采矿信息数据资料,嵌入突水系数法、脆弱性指数法等综合评价体系中,量化评估煤层底板发生突水灾害的概率及区位等前沿信息,为进一步合理选择超前治理措施提供参考。

3) 统筹(钻)物探技术探查及突水威胁性理论评价,给定目标区域底板突水危害的综合结果,基于疏水降压或带压开采技术制定综治方案。

综合评估煤层底板突水威胁程度后,在不进行或较少进行疏水降压作业时能安全回采,则在规范框架下带压开采;不能安全开采时,则采取疏水降压措施开展超前疏放水,降低承压水水压对有效隔水层/带的

致裂突破作用。疏水降压主要包括地面群孔疏水、井下巷道疏水、地面直通式疏水、井下上仰式疏水、井下下行式疏水等方式。

4) 开展区域化注浆治理作业,实施原位改性再造隔水垫层,强化隔水带整体效能,降低含水层动静载扰动失水量,实现“煤-水”双资源共采^[83]。

合理选择目标注浆改造层位,采用水平顺层孔对薄层灰岩(或奥灰层顶部一定范围)进行注浆加固,再造隔水垫层,以主动防控技术思路开展底板水害超前治理。从区域化角度着手,以浆驱水,变“导储水”层为“阻隔水”层,扩大底板隔水带有效区域范围,提升主体稳定性及抗压能力,增强阻隔水效能,使突水系数值回落至安全区间内。

3.2 远景导向

在新能源产业发展架构及新质生产力发展的新形势下,煤炭资源开发过程面临的综合地质条件向熵增方向演变,面临的地质灾害越趋多元化、复杂化,呈现难防-难控-难治的窘迫局面,驱使煤炭开采理念、工艺、方法等发生同步转换。以煤层底板水害为例,大采高、大采深,深部高地应力、高地温、高水压、非线性动力响应特征等改变了煤层底板水害的常规宏观显现征兆,传统底板防治水理念及技术难以契合新的底板水害发展趋势,亟待进行更新迭代^[84]。

1) 突破地质信息勘探关键卡脖子技术,开展“点-线-面-体”全链条跨尺度超-精-全探查和三维动态重构,掌握煤层底板本底地质基因的全生命周期采动诱发特征。

考虑物探、钻探、化探等传统地质勘探手段存在的精度低、探查范围有限等突出技术局限性,充分结合能源产业高质量转型升级及新质生产力发展内生动能,充分融合高校-企业-政府-地方等各方面力量,着力煤层底板地质信息勘探新技术及装备研发,突破传统逻辑框架约束,以新发展形势为导向开辟全新研发路径,开发出低碳、绿色、高效、科学、精准的成套装备系统,实现对煤层底板水文及工程本底地质基因的“点-线-面-体”全链条跨多尺度超-精-全探查。建立矿井全生命周期煤层底板本底地质基因采动诱发特征勘探体系,实时掌握采动底板构造形态演变规律,为进一步调整开采工艺和方法、优化水害预防预控技术方案、创新防治水路径提供基础地质信息依据和保障。

基于随采协同“点-线-面-体”全链条跨多尺度超-精-全勘探成果,建立包括岩溶陷落柱、断层、原生裂隙等缺陷构造以及含隔水层层序组合在内的煤层底板工程水文地质系统三维时空变异形态模型,并

以该模型为基底,辅以数值模拟、室内试验等手段对模型阶段性演进趋势进行预测预报和补充推演,为当前阶段工作面回采进程中开展底板防治水工程提供灾变前兆信息,指明“病灶”所在,对症下药,为建立更加科学高效、全面精准的煤层底板水害超前治理工程技术体系提供强有力的地质信息勘探技术和服务保障。

2) 以煤层赋存环境随采协同异化特性控制底板水灾变规律为导向,构建适用于时空分异动态地质环境的煤层底板突水预测预报理念。

煤炭资源开发的时空分布特征是决定煤层底板水害发展走向的关键控制因素。当前,煤炭资源开发路径在纵向上逐渐向地球深部延续,地质环境的时空分异性日益凸显,控制灾变的隐蔽致灾因素不断增加,深部工程岩体系统逐渐脱离传统浅部岩体理论可解释临界范围,演变出新形态的岩体力学宏-细-微观多元态表征规律,成为控制煤层底板承压水体孕灾-致灾的源头要素。

由于目前对“深部”量化标准及定义并未达成业内共识^[85],难以用统一度量衡对“深部”进行界定,导致深部煤层底板水害预测预报理念发展颇显落后。因此,首先应集中力量开展深部地质环境联合攻关,建立全新深部岩体力学理论,强化室内试验与工程现场相结合的研究手段,反演深部地质环境特征,整合跨省份、跨地域的深地地质基因信息,基于大数据分析技术并立足室内试验和工程现场研究成果,尽早对“深部”的统一衡量标准达成共识。其次,加强深部原位保真岩石存取技术装备的研发及深部岩体室内试验成套设备的研制,通过建立深部地质行为状态的室内模拟环境,大批量开展室内试验获取深部本底工程地质信息,为进一步精确“深部”界定标尺提供补充参考和校准,为建立深部底板水害预测预报模型提供数据支撑。最后,整合理论-试验-现场等环节研究成果,结合传统底板水害预测预报模型逻辑,嵌入深部地质行为状态,开发出深部复杂非线性底板突水预测预报理论模型,实现对深部煤层底板突水危险性的预测评价和分析。

3) 考虑采动渗流场变异特性开展低扰动强干预的随采随治保控水互馈注浆治理,实现煤层底板承压含水层全周期、全过程把控。

煤层底板区域注浆治理技术控水效果显著,但浆液对目标含水层水体的驱替、含水层固结改性对地下水生态系统造成永久性、不可逆转的扰损,有悖新发展理念及生态脆弱矿区地下含水层主体供水作用目标,是底板防治水领域初级发展阶段以牺牲部分生态环境换取资源安全开发的具有显著时效约束性的

应对措施,难以契合新时代新背景下煤炭资源绿色安全高效开发需求。

基于此,首先考虑含水层本底基质系统微孔\裂隙的自吸渗性,研发一种微\纳米粒级的高可注性新型注浆材料,扩大孔\裂隙尺度下的注浆域,对含水层开展增强注浆。同时,考虑含水层微孔\裂隙展布规律、区域水力联动响应特征等与含水层富水性分区的时空叠置关系,建立起考虑采动渗流场变异特性的含水层储\析水宏观表征概化模型,动态划分采损劣化增透区和本底基质控水优势区,对采损劣化增透区进行定向引流控域注浆,强化含水层本底结构稳定性、控制含水层承压作用下水体运移活动,最大程度降低注浆工程对含水层水体的扰动、污染和破坏,以控制性的局部干预引导含水层整体储水效能的有效维持和工程扰动减水量的显著下降,实现地下水生态系统价值导向的保控水双重增益目标^[86-88]。

4)建立健全全生命周期维保机制,构筑采后底板承压含水层-浆岩固结体-隔水层地质生态系统长效监控诊断诊疗平台。

煤炭资源开发结束后,采场处于相对静默状态,但围岩仍存在蠕变储能-破断释能等局部低扰损活动,对底板承压含水层-浆岩固结体-隔水层地质生态系统二次平衡形成干扰,使其出现宏-微观扰损,对含水层稳定性及其储\供水资源禀赋造成一定程度威胁。基于此,考虑建立采后底板承压含水层-浆岩固结体-隔水层地质生态系统长效监控诊断诊疗平台,充分融合采前多元多尺度勘探手段,搭建地下采场围岩全方位的岩层静态能量演化规律及动态运移力源场监控网络,贯通诊疗平台与煤层底板地质系统之间互馈响应信号的长时高效传输通道,实时捕捉采集煤层底板地质系统演变响应信号,在诊疗平台中进行迭代、训练,还原承压含水层-浆岩固结体-隔水层地质生态系统演变过程,并对下一阶段演变趋势及其关键控因做出合理预测预判,通过平台开展超前修复和防控,消除不稳定因素和条件。

通过建立煤层底板承压含水层-浆岩固结体-隔水层地质生态系统长效管控机制,可实现采后采场围岩活动及能量演化的动态监测及区域注浆治理工程干预下的含水层稳定性全生命周期监管,为推进绿色矿山建设、实现采后地下水生态系统的长久性保护提供方向指引。

4 结语

我国煤层底板水害分布范围广,压覆煤炭资源量大。相较顶板水害,底板水害愈加难防难控,核心致

因体系复杂,事故后果严重。多年来,经过诸多业内专家学者在煤层底板水害隐蔽致因探查、孕(致)灾机理探究、防控技术研发等方向的持续深耕,建立起了融合“突水系数法”、“五图-双系数法”、“脆弱性指数法”等方法的煤层底板突水危险性评价体系,并形成了以区域注浆治理为代表的煤层底板水害治理技术框架,有效遏制了我国煤层底板水害的恶性发展趋势,解放了大量呆滞煤炭资源。

在现今高质量发展及新质生产力理念指引下,以煤炭资源为代表的能源产业开启转型升级,内生动能驱使新发展格局的衍生,煤炭开采面临新局面、新挑战。转型升级、革故鼎新,意味着对传统定式发展思维的摒除和新发展理念的培植。首先,应大力提升校企双向互馈-贯通融合发展,革除企业和科研院所间的交流鸿沟,建立校企平行对接发展体制机制,实现企业员工进校园,树立行业领域前沿发展理念;科研学者入现场,搭建工程现场“实验室”及理论应用“练兵场”。同时,联合发挥政府、地方、企业、科研院所等各方主体优势性,共同打造煤层底板水害防治技术装备高质量协同研发平台,培育能够直入现场、直面难题、直击要害的高精尖矿山底板水害防控领域技术服务型人才,为我国矿山煤层底板水害防控领域实现跨越式发展构筑坚实的人才堡垒。

参考文献(References):

- [1] 武强,赵苏启,孙文洁,等.中国煤矿水文地质类型划分与特征分析[J].煤炭学报,2013,38(6): 901-905.
WU Qiang, ZHAO Suqi, SUN Wenjie, et al. Classification of the hydrogeological type of coal mine and analysis of its characteristics in China[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(6): 901-905.
- [2] 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.
- [3] 曾一凡,于超,武强,等.煤矿防治水“三区”划分方法及其水害防治意义[J/OL].煤炭学报,1-16[2024-03-08].
ZENG Yifan, YU Chao, WU Qiang, et al. Coal Mine Water Hazard Control "Three Zones" Method and Significance[J/OL]. Journal of China Coal Society: 1-16[2024-03-08]. [自助核对补缺]
- [4] 李文平,乔伟,李小琴,等.深部矿井水害特征、评价方法与治水勘探方向[J].煤炭学报,2019,44(8): 2437-2448.
LI Wenping, QIAO Wei, LI Xiaoqin, et al. Characteristics of water disaster, evaluation methods and exploration direction for controlling groundwater in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2437-2448.
- [5] MEI A S, WU Q, ZENG Y F, et al. Evaluation of water inrush vulnerability and feasibility analysis of mining under rivers: A case

- study involving the Jinjie coal mine in China[J]. *Mine Water and the Environment*, 2023, 42(2): 312–329.
- [6] 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 mesoscopic characteristics of rock mass[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(3): 1137–1149.
- [7] 靳德武, 赵春虎, 段建华, 等. 煤层底板水害三维监测与智能预警系统研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2256–2264.
JIN Dewu, ZHAO Chunhu, DUAN Jianhua, et al. Research on 3D monitoring and intelligent early warning system for water hazard of coal seam floor[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 2256–2264.
- [8] 李杨杨, 张士川, 孙熙震, 等. 煤层采动底板突水演变过程可视化试验平台研制与试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3515–3524.
LI Yangyang, ZHANG Shichuan, SUN Xizhen, et al. Development and experimental study on visualization test platform for water inrush evolution process of coal seam mining floor[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(11): 3515–3524.
- [9] 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.
- [10] 张文泉, 朱先祥, 李松, 等. 橡胶-粉煤灰基矿井底板裂隙注浆材料性能的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(5): 1–10.
ZHANG Wenquan, ZHU Xianxiang, LI Song, et al. Experimental study on performance of rubber-fly ash-based mine floor fissure grouting material[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(5): 1–10.
- [11] ZENG Y F, MEI A S, WU Q, et al. Double verification and quantitative traceability: A solution for mixed mine water sources[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 630: 130725.
- [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 disaster-causing factors to prevent the occurrence of coal mine water disasters[J]. *China Coal*, 2023, 49(1): 3–15.
- [13] 乔伟, 靳德武, 王皓, 等. 基于云服务的煤矿水害监测大数据智能预警平台构建[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2619–2627.
QIAO Wei, JIN Dewu, WANG Hao, et al. Development of big data intelligent early warning platform for coal mine water hazard monitoring based on cloud service[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(7): 2619–2627.
- [14] 王皓, 董书宁, 姬亚东, 等. 煤矿水害智能化防控平台架构及关键技术[J]. 煤炭学报, 2022, 47(2): 883–892.
WANG Hao, DONG Shuning, JI Yadong, et al. Key technology and platform development of intelligent prevention and control on coal mine water disaster[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(2): 883–892.
- [15] 靳德武, 乔伟, 李鹏, 等. 煤矿防治水智能化技术与装备研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(3): 10–17.
JIN Dewu, QIAO Wei, LI Peng, et al. Research status and prospects on intelligent technology and equipment for mine water hazard prevention and control[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(3): 10–17.
- [16] 刘志新, 王明明. 环工作面电磁法底板突水监测技术[J]. 煤炭学报, 2015, 40(5): 1117–1125.
LIU Zhixin, WANG Mingming. Study on encircling face electromagnetic method for monitoring coal face floor inrush[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(5): 1117–1125.
- [17] 郑纲, 徐小兵, 何渊, 等. 厚煤层放顶煤开采底板突水机理及水害探查技术[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(S1): 7–13.
ZHENG Gang, XU Xiaobing, HE Yuan, et al. Mechanism of Ordovician limestone water inrush from the floor of caving mining face in thick coal seam and water hazard detection technology of nearly horizontal borehole[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(S1): 7–13. [核对英文翻译]
- [18] 武强, 庞炜, 戴迎春, 等. 煤层底板突水脆弱性评价的GIS与ANN耦合技术[J]. 煤炭学报, 2006, 31(3): 314–319.
WU Qiang, PANG Wei, DAI Yingchun, et al. Vulnerability forecasting model based on coupling technique of GIS and ANN in floor groundwater bursting[J]. *Journal of China Coal Society*, 2006, 31(3): 314–319.
- [19] 隋旺华. 矿山采掘岩体渗透变形灾变机理及防控Ⅱ: 底板突水[J]. 工程地质学报, 2022, 30(6): 1849–1866.
SUI Wanghua. Catastrophic mechanism and its prevention and control of seepage deformation and failure of mining rock mass Ⅱ: A review of water inrush from seam floor[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022, 30(6): 1849–1866.
- [20] 施龙青, 曲兴玥, 韩进, 等. 多模型融合评价煤层底板灰岩岩溶突水危险性[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2484–2493.
SHI Longqing, QU Xingyue, HAN Jin, et al. Multi-model fusion for assessing the risk of inrush of limestone Karst water through mine floor[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(8): 2484–2493.
- [21] 李凯, 李晓龙. 基于改进型突水系数法治理底板奥灰水害技术[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(6): 125–131.
LI Kai, LI Xiaolong. Techniques for prevention and control of Ordovician limestone water disasters based on modified water inrush coefficient method[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(6): 125–131.
- [22] 陈实, 刘小明, 杨竣皓, 等. 基于克里格插值的煤矿底板突水系数等值线优化研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(7): 68–74.
CHEN Shi, LIU Xiaoming, YANG Junhao, et al. Research on contour line optimization of coal floor water inrush coefficient based on Kriging interpolation[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(7): 68–74.
- [23] 施龙青, 张荣遨, 徐东晶, 等. 基于GWO-Elman神经网络的底板突水预测[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2455–2463.
SHI Longqing, ZHANG Rongao, XU Dongjing, et al. Prediction of water inrush from floor based on GWO-Elman neural network[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(7): 2455–2463.
- [24] 李慎举. 山西霍宝干河煤矿煤层底板突水评价与预测预报研究

- [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2017.
- LI Shenju. Study on evaluation and prediction of water inrush from coal seam floor in Huobaogang Coal Mine, Shanxi Province[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2017. [核对英文翻译]
- [25] 郑士田, 马荷雯, 姬亚东. 煤层底板水害区域超前治理技术优化及其应用[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(5): 167–173.
- ZHENG Shitian, MA Hewen, JI Yadong. Optimization of regional advanced coal floor water hazard prevention and control technology and its application[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(5): 167–173.
- [26] 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.
- [27] 武强. 我国矿井水防控与资源化利用的研究进展、问题和展望[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 795–805.
- WU Qiang. Progress, problems and prospects of prevention and control technology of mine water and reutilization in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 795–805.
- [28] 张雁, 黄选明, 彭巍, 等. 截水帷幕在露天煤矿截渗减排中的应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1865–1873.
- ZHANG Yan, HUANG Xuanning, PENG Wei, et al. Application of water cutoff curtain in the seepage cutoff and drainage reduction of open-pit coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1865–1873.
- [29] 武强, 张守成, 刘宏磊, 等. 矿山环境正效应开发利用适宜性评价理论与方法[J/OL]. 煤炭学报: 1–17[2024–03–08].
- WU Qiang, ZHANG Shoucheng, LIU Honglei, et al. Theory and method of suitable evaluation for mine environmental positive effects development and utilization[J/OL]. Journal of China Coal Society: 1–17[2024–03–08]. [自助核对]
- [30] 武强, 刘宏磊, 敖嫩, 等. 矿山环境正效应开发利用理论模式与工程应用[J]. 煤炭学报, 2022, 47(4): 1405–1415.
- WU Qiang, LIU Honglei, AO Nen, et al. Development and utilization models for the positive environmental impacts in mines[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1405–1415.
- [31] 武强, 刘宏磊, 曾一凡, 等. 我国绿色矿山建设现状与存在问题及对策建议[J]. 绿色矿山, 2023(1): 25–32.
- WU Qiang, LIU Honglei, ZENG Yifan, et al. Situation, challenges, and proposed strategies for green mine construction in China[J]. Journal of Green Mine, 2023(1): 25–32.
- [32] 武强, 刘宏磊, 陈奇, 等. 矿山环境修复治理模式理论与实践[J]. 煤炭学报, 2017, 42(5): 1085–1092.
- WU Qiang, LIU Honglei, CHEN Qi, et al. Theoretical study of mine geo-environmental restoration model and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(5): 1085–1092.
- [33] ZENG Y F, PANG Z Z, WU Q, et al. Study of water-controlled and environmentally friendly coal mining models in an ecologically fragile area of northwest China[J]. Mine Water and the Environment, 2022, 41(3): 802–816.
- [34] MENG S H, WU Q, ZENG Y F, et al. A novel method for *in situ* monitoring and quantifying the dynamic responses of groundwater to the effects of mining[J]. Mine Water and the Environment, 2024, 43(2): 382–398.
- [35] ZENG Y F, MENG S H, WU Q, et al. Ecological water security impact of large coal base development and its protection[J]. Journal of Hydrology, 2023, 619: 129319.
- [36] 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 Demin, 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.
- [37] 于小鸽, 罗文娜, 徐东晶, 等. 含导水断层的煤层防隔水煤(岩)柱留设优化计算[J/OL]. 煤炭学报, 2024: 1–12. (2024–11–05). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=MTXB20241105001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. [自助核对]
- YU Xiaoge, LUO Wen-na, XU Dongjing, et al. Optimal calculation of water-proof coal (rock) pillar in coal seam with water-conducting fault[J/OL]. China Industrial Economics, 2024: 1–12. (2024–11–05). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=MTXB20241105001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. [自助核对]
- [38] 孙文斌, 郝建邦, 戴宪政, 等. 采动诱发断层活化响应机制特征研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(4): 12–20.
- SUN Wenbin, HAO Jianbang, DAI Xianzheng, et al. Response mechanism characteristics of mining-induced fault activation[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(4): 12–20.
- [39] 武强, 崔芳鹏, 赵苏启, 等. 矿井水害类型划分及主要特征分析[J]. 煤炭学报, 2013, 38(4): 561–565.
- WU Qiang, CUI Fangpeng, ZHAO Suqi, et al. Type classification and main characteristics of mine water disasters[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(4): 561–565.
- [40] 姚邦华, 王连成, 魏建平, 等. 煤矿陷落柱突水的变形–渗流–冲蚀耦合模型及应用[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 2007–2013.
- YAO Banghua, WANG Liancheng, WEI Jianping, et al. A deformation-seepage-erosion coupling model for water outburst of Karst collapse pillar and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 2007–2013.
- [41] 赵金贵, 郭敏泰, 李文生. 西山煤田岩溶陷落柱柱体形态与组构特征[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2389–2398.
- ZHAO Jingui, GUO Mintai, LI Wensheng. Morphological and fabric characteristics of Karst collapse pillars in Xishan coalfield[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2389–2398.
- [42] 尹尚先, 武强, 王尚旭. 华北煤矿区岩溶陷落柱特征及成因探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(1): 120–123.
- YIN Shangxian, WU Qiang, WANG Shangxu. Studies on characters and forming mechanism of karstic collapse columns at mine area of North China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(1): 120–123.
- [43] 彭苏萍, 王金安. 承压水体上安全采煤: 对拉工作面开采底板破坏机理与突水预测防治方法[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001.
- [44] 王家臣. 厚煤层开采理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009;

- 186–190.
- [45] 徐学锋,窦林名,刘军,等.动载扰动诱发底板冲击矿压演化规律研究[J].采矿与安全工程学报,2012,29(3):334–338.
XU Xuefeng, DOU Linming, LIU Jun, et al. Analysis on evolution laws of floor burst induced by dynamic disturbance[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(3): 334–338.
- [46] 褚怀保,杨小林,侯爱军,等.媒体中爆炸应力波传播与衰减规律模拟实验研究[J].爆炸与冲击,2012,32(2):185–189.
CHU Huaibao, YANG Xiaolin, HOU Ajun, et al. A simulation-based experimental study on explosion stress wave propagation and attenuation in coal[J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(2): 185–189.
- [47] 董书宁,柳昭星,王皓,等.导水断层破碎带注浆浆液扩散机制试验研究[J].采矿与安全工程学报,2022,39(1):174–183.
DONG Shuning, LIU Zhaoxing, WANG Hao, et al. Experimental study on serum diffusion mechanism during grouting in water conducting fault fracture zone[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(1): 174–183.
- [48] 武强,朱斌,李建民,等.断裂带煤矿井巷滞后突水机理数值模拟[J].中国矿业大学学报,2008,37(6):780–785.
WU Qiang, ZHU Bin, LI Jianmin, et al. Numerical simulation of lagging water-inrush mechanism of rock roadways near fault zone[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(6): 780–785.
- [49] 于秋鸽,张华兴,张玉军,等.采动影响下断层活化机理及影响因素分析[J].煤炭学报,2019,44(S1):18–30.
YU Qiuge, ZHANG Huaxing, ZHANG Yujun, et al. Analysis of fault activation mechanism and influencing factors caused by mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(S1): 18–30. [核对英文翻译]
- [50] 刘鸿文.材料力学.Ⅱ[M].北京:高等教育出版社,2011.
- [51] 刘杰,李建林,周济芳,等.D-P准则与岩石断裂韧度K_{Ic},K_{IIc}关系的研究[J].岩石力学与工程学报,2004(S1):4300–4302.
LIU Jie, LI Jianlin, ZHOU Jifang, et al. Research on relation of D-P failure criterion and rock fracture toughness K_{Ic}, K_{IIc}[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004(S1): 4300–4302. [自助核对]
- [52] 杨振生.含水岩石边界裂纹起裂判据研究[D].徐州:中国矿业大学,2019.
YANG Zhensheng. Study on initiation criterion of boundary cracks in water-bearing rocks[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019. [核对英文翻译]
- [53] 周群力.岩石压剪断裂判据及其应用[J].岩土工程学报,1987,9(3):33–37.
ZHOU Qunli. Compress shear fracture criterion of rock and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 9(3): 33–37.
- [54] 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.
- [55] 张玉军,张志巍,李友伟.含隐伏断层煤层底板承压水采动导升机制研究[J].采矿与安全工程学报,2023,40(1):17–24.
ZHANG Yujun, ZHANG Zhiwei, LI Youwei. Study on the mechanism of confined water mining lifting in coal seam floor with a hidden fault[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(1): 17–24.
- [56] 蔡增基,龙天渝.流体力学泵与风机[M].5版.北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [57] 刘鹤年.流体力学[M].2版.北京:中国建筑工业出版社,2004.
- [58] 赵庆彪,赵昕楠,武强,等.华北型煤田深部开采底板“分时段分带突破”突水机理[J].煤炭学报,2015,40(7):1601–1607.
ZHAO Qingbiao, ZHAO Xinnan, WU Qiang, et al. Water burst mechanism of “divided period and section burst” at deep coal seam floor in North China type coalfield mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1601–1607.
- [59] 李利平,路为,李术才,等.地下工程突水机理及其研究最新进展[J].山东大学学报(工学版),2010,40(3):104–112,118.
LI Liping, LU Wei, LI Shucai, et al. Research status and developing trend analysis of the water inrush mechanism for underground engineering construction[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2010, 40(3): 104–112,118.
- [60] 尹尚先,王屹,尹慧超,等.深部底板奥灰薄灰突水机理及全时空防治技术[J].煤炭学报,2020,45(5):1855–1864.
YIN Shangxian, WANG Yi, YIN Huichao, et al. Mechanism and full-time-space prevention and control technology of water inrush from Ordovician and thin limestone in deep mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1855–1864.
- [61] 胡宝玉.邯邢矿区深部开采煤层底板奥灰突水机理及防治关键技术[D].北京:煤炭科学研究院,2020.
HU Baoyu. Mechanism of Ordovician limestone water inrush from coal seam floor in deep mining in Hanxing mining area and its prevention and control key technologies[D]. Beijing: ••••••••, 2020. [自助核对补缺]
- [62] 姚辉,尹慧超,尹尚先,等.底板突水危险性评价研究进展[J/OL].煤炭科学技术,1–9[2024–03–08].
YAO Hui, YIN Huichao, YIN Shangxian, et al. Developing of the evaluation of water inrush risk from coal seam floor[J/OL]. Coal Science and Technology, 1–9[2024–03–08]. [自助核对补缺]
- [63] 张鹏,孙亚军,曹换举.煤层底板承压含水层上安全开采技术研究[J].煤炭科学技术,2012,40(9):104–107.
ZHANG Peng, SUN Yajun, CAO Huanju. Study on technology of safety mining above pressurized aquifer in seam floor[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(9): 104–107.
- [64] 胡巍,徐德金.有限元强度折减法在底板突水风险评价中的应用[J].煤炭学报,2013,38(1):27–32.
HU Wei, XU Dejin. Application of finite element strength reduction method to risk assessment of groundwater inrush from coal seam floor[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1): 27–32.
- [65] 武强,张志龙,马积福.煤层底板突水评价的新型实用方法 I:主控指标体系的建设[J].煤炭学报,2007,32(1):42–47.
WU Qiang, ZHANG Zhilong, MA Jifu. A new practical methodology of the coal floor water bursting evaluating I: The master controlling index system construction[J]. Journal of China Coal Society,

- 2007, 32(1): 42–47.
- [66] 武强, 张志龙, 张生元, 等. 煤层底板突水评价的新型实用方法Ⅱ: 脆弱性指数法[J]. 煤炭学报, 2007, 32(11): 1121–1126.
WU Qiang, ZHANG Zhilong, ZHANG Shengyuan, et al. A new practical methodology of the coal floor water bursting evaluating Ⅱ: The vulnerable index method[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(11): 1121–1126.
- [67] 武强, 解淑寒, 裴振江, 等. 煤层底板突水评价的新型实用方法Ⅲ: 基于 GIS 的 ANN 型脆弱性指数法应用[J]. 煤炭学报, 2007, 32(12): 1301–1306.
WU Qiang, XIE Shuhan, PEI Zhenjiang, et al. A new practical methodology of the coal floor water bursting evaluating Ⅲ: The application of ANN vulnerable index method based on GIS[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(12): 1301–1306.
- [68] 武强, 王金华, 刘东海, 等. 煤层底板突水评价的新型实用方法Ⅳ: 基于 GIS 的 AHP 型脆弱性指数法应用[J]. 煤炭学报, 2009, 34(2): 233–238.
WU Qiang, WANG Jinhua, LIU Donghai, et al. A new practical methodology of the coal floor water bursting evaluating Ⅳ: The application of AHP vulnerable index method based on GIS[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(2): 233–238.
- [69] 武强, 张波, 赵文德, 等. 煤层底板突水评价的新型实用方法Ⅴ: 基于 GIS 的 ANN 型、证据权型、Logistic 回归型脆弱性指数法的比较[J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 21–26.
WU Qiang, ZHANG Bo, ZHAO Wende, et al. A new practical methodology of coal seam floor water burst evaluation: The comparison study among ANN, the weight of evidence and the logistic regression vulnerable index method based on GIS[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1): 21–26.
- [70] 刘基, 靳德武, 王皓. 基于含水层-钻孔水量交换的疏水钻孔水量计算[J]. 煤炭学报, 2021, 46(9): 2995–3005.
LIU Ji, JIN Dewu, WANG Hao. Water yield calculation of drainage boreholes based on water exchange between aquifers and boreholes[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(9): 2995–3005.
- [71] 靳德武, 李鹏. 煤层底板水害防治智能决策支持系统框架构建[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(1): 161–169.
JIN Dewu, LI Peng. Framework on intelligent decision support system for coal seam floor water hazard prevention and control[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(1): 161–169.
- [72] 李海燕, 胥洪彬, 李召峰, 等. 深部巷道断层涌水治理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(3): 635–641, 648.
LI Haiyan, XU Hongbin, LI Zhao Feng, et al. Study on treatment of fault water gushing in deep roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(3): 635–641, 648.
- [73] 赵宝峰, 吕玉广. 煤层底板厚层砂岩含水层可疏性综合评价[J]. 煤矿安全, 2021, 52(9): 196–203.
ZHAO Baofeng, (LÜ/LV/LU/LYU) Yuguang. Comprehensive evaluation of drainage feasibility for thick sandstone aquifer of floor[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(9): 196–203.
- [74] 刘世伟, 赵家鑫, 袁乐忠, 等. 基于 MTD 类分布小样本增强的带压开采煤层底板破坏深度预测 [J/OL]. 煤炭科学技术: 1–11[2024–03–11].
- LIU Shiwei, ZHAO Jiaxin, YUAN Lezhong, et al. Predicting the failure depth of coal seam floor in pressure mining based on small sample enhancement of MTD class distribution[J/OL]. Coal Science and Technology: 1–11[2024–03–11]. [自助核对补缺]
- [75] 王朋朋, 赵毅鑫, 姜耀东, 等. 邢东矿深部带压开采底板突水特征及控制技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2444–2454.
WANG Pengpeng, ZHAO Yixin, JIANG Yaodong, et al. Characteristics and control technology of water inrush from deep coal seam floor above confined aquifer in Xingdong Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2444–2454.
- [76] 尹尚先, 连会青, 徐斌, 等. 深部带压开采: 传承与创新[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(1): 170–181.
YIN Shangxian, LIAN Huiqing, XU Bin, et al. Deep mining under safe water pressure of aquifer: Inheritance and innovation[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(1): 170–181.
- [77] 姚辉, 尹尚先, 徐维, 等. 基于组合赋权的加权秩和比法的底板突水危险性评价[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(6): 132–137.
YAO Hui, YIN Shangxian, XU Wei, et al. Risk assessment of floor water inrush by weighted rank sum ratio based on combination weighting[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(6): 132–137.
- [78] 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 Huabei coalfields[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(4): 142–146, 153.
- [79] 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.
- [80] 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 damage control in the floor of North China Coalfield[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(6): 31–36.
- [81] 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.
- [82] 施龙青, 邱梅, 牛超, 等. 肥城煤田奥灰顶部注浆加固可行性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(3): 356–362.
SHI Longqing, QIU Mei, NIU Chao, et al. Feasibility analysis of grouting reinforcement of Ordovician top in Feicheng coalfield[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(3): 356–362.
- [83] LIU X X, ZENG Y F, WU Q, et al. Ecological-based mining: A coal–water–thermal collaborative paradigm in ecologically fragile areas in western China[J]. Engineering, 2024, 38: 209–222.
- [84] 武强, 涂坤, 曾一凡, 等. 打造我国主体能源(煤炭)升级版面临的主要问题与对策探讨[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1625–1636.

- WU Qiang, TU Kun, ZENG Yifan, et al. Discussion on the main problems and countermeasures for building an upgrade version of main energy(coal) industry in China[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(6): 1625–1636.
- [85] 谢和平,高峰,鞠杨,等.深部开采的定量界定与分析[J].煤炭学报,2015,40(1): 1–10.
- XIE Heping, GAO Feng, JU Yang, et al. Quantitative definition and investigation of deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 1–10.
- [86] 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.
- [87] 武强,申建军,王洋.“煤-水”双资源型矿井开采技术方法与工程应用[J].煤炭学报,2017,42(1): 8–16.
- WU Qiang, SHEN Jianjun, WANG Yang. Mining techniques and engineering application for “Coal-Water” dual-resources mine[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(1): 8–16.
- [88] 尹尚先,徐斌,尹慧超,等.矿井水防治学科基本架构及内涵[J].煤炭科学技术,2023,51(7): 24–35.
- YIN Shangxian, XU Bin, YIN Huichao, et al. Basic structure and connotation of mine water prevention and control discipline[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 24–35.