

西南岩溶山区煤矿井下开采对岩溶地下水径流的扰动规律与防控技术研究

陈传燕

四川省恒升晟睿勘察设计有限公司, 四川 成都 615000

[摘要]四川西南岩溶山区地质条件特殊, 地下溶洞、裂隙发育丰富, 地下水分布错综复杂。当地煤矿开采作业会直接破坏原本稳定的岩溶地下水流动体系, 打破天然的地下水径流平衡, 进而引发一系列地质和生态问题, 不仅会造成地下水位快速下降、山间天然泉眼断流干涸, 还容易引发矿井突发透水、地面岩溶塌陷等安全与地质灾害, 严重影响矿区生产安全和周边环境。文章选取华蓥山、筠连两大典型矿区作为研究案例, 深入分析煤矿开采过程对岩溶地下水径流的扰动原理, 梳理地下水动态的演变规律。结合矿区现场实测数据, 总结适配的灾害防控技术, 搭建起一套“探查预警-通道封堵-径流调控-生态修复”的一体化综合防控体系, 能够为西南岩溶地区煤矿绿色开采、地质灾害科学防控提供实用的技术参考依据。

[关键词]煤矿井下开采; 地下水径流; 扰动规律; 防控技术

DOI: 10.33142/ec.v9i6.19823

中图分类号: P642.11

文献标识码: A

Research on the Disturbance Law and Prevention and Control Technology of Underground Coal Mining on Karst Groundwater Runoff in Southwestern Karst Mountainous Areas

CHEN Chuanyan

Sichuan Hengsheng Shengrui Survey and Design Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 615000, China

Abstract: The geological conditions in the karst mountainous areas of southwestern Sichuan are unique, with abundant underground caves and fissures, and a complex distribution of groundwater. Local coal mining operations can directly disrupt the stable karst groundwater flow system, disrupt the natural balance of groundwater runoff, and trigger a series of geological and ecological problems. This not only causes a rapid decline in groundwater levels and the drying up of natural springs in the mountains, but also easily leads to safety and geological disasters such as sudden water seepage and ground karst collapse, seriously affecting the production safety and surrounding ecological environment of the mining area. The article selects two typical mining areas, Huayingshan and Junlian, as research cases to deeply analyze the disturbance principle of coal mining process on karst groundwater runoff, and to sort out the evolution law of groundwater dynamics. Based on the on-site measured data in the mining area, summarize the adapted disaster prevention and control technologies, and build an integrated comprehensive prevention and control system of "exploration and warning - channel blocking - runoff regulation - ecological restoration", which can provide practical technical reference for green mining and scientific prevention and control of geological disasters in the southwestern karst areas of China.

Keywords: underground mining in coal mines; groundwater runoff; disturbance law; prevention and control technology

引言

西南岩溶山区是国内煤炭资源关键蕴藏地带, 川南、川东北岩溶矿区更是这片区域的煤炭核心产区。当地岩溶地层分布杂乱、各处渗水能力差别很大, 煤层和岩溶地下水层紧挨在一起, 中间用来隔水的岩层厚度偏小、稳定性差。煤矿井下掘进采煤时, 很容易造成上方岩层开裂垮塌, 慢慢形成连通煤层与含水层的渗水通道, 打乱地下水原本补给、流动、排泄的自然规律, 进而出现地下水位走低、山泉断流, 严重时还会发生矿井突水、地面岩溶塌陷等地

质灾害。目前相关研究大多侧重大范围理论机理分析, 结合四川矿区实际地质条件、能落地使用的研究成果偏少。本文围绕煤炭开采全周期如何干扰岩溶地下水流动开展研究, 定量测算各项水文参数的变化特征, 搭建契合川南、川东北岩溶矿区条件的水害防控技术方案, 助力矿区实现保水开采, 并为地质环境治理提供技术支撑。

1 研究区概况与水文地质特征

1.1 区域地质概况

四川西南的岩溶煤矿区, 主要集中分布在宜宾、泸州、

广安这几个区域,其中最具代表性的就是筠连、古叙、华蓥山三大矿区。这片区域属于山地岩溶地貌,整体地形高低落差明显、地势起伏较大,地下的岩层松散破碎、稳定性较差。区域内的长兴组、茅口组石灰岩是主要的岩溶含水岩层,地下溶洞、地下暗河等岩溶地质现象发育十分普遍,分布范围广、数量多。

当地的煤炭资源主要储存在龙潭组煤层当中,这些煤层大多位于岩溶含水层的下方,或是夹杂在含水岩层之间,岩层之间的间隔距离很小,而且部分区域的隔水岩层残缺、存在缺失情况,防水隔水条件较差。该矿区常年年均降雨量在 1000~1400mm 之间,雨水落到地面后,会通过地表的落水洞快速渗入地下,直接补给地下水。这就导致区域内地下水流动速度快、水位和水量变化幅度大,水文状态极不稳定,整体水文环境同时受季节性降雨变化和煤矿开采作业的双重影响。

1.2 矿区地下水天然径流特征

四川典型矿区岩溶地下水天然径流遵循“高位补给、裂隙径流、低位排泄”赋存运移规律,以大气入渗降水为核心补给来源,地表沟谷、岩溶上升泉、地下暗河构成系统主要排泄路径。径流空间非均质性突出,水流优势渗流通道受控于大型溶洞及贯通型构造溶隙,细微裂隙储水能力偏弱、径流量低微。天然赋存条件下地下水位变幅平缓,岩溶泉涌量与暗河径流模数动态均衡,地表-地下水水力交换关系稳定,不存在水体无序漏失与原生污染问题。为直观呈现研究区基础水文参数,具体见表 1。

表 1 四川三大典型矿区核心水文地质特征

矿区名称	主要含水层	岩溶发育特征	天然补给方式	天然排泄方式	地下水径流特征
华蓥山矿区	长兴组、茅口组灰岩含水层	溶洞、层间溶隙发育,存在多条暗河通道	大气降水入渗、地表水侧向补给	岩溶泉、地下暗河、沟谷排泄	径流速度快,动态响应灵敏,季节性波动明显
筠连矿区	二叠系灰岩岩溶含水层	浅层溶隙密集,深层大型溶洞零星分布	大气降水垂直入渗为主	低洼泉点、矿井自然疏排	浅层径流活跃,深层径流稳定,分层径流特征显著
古叙矿区	茅口组、长兴组岩溶含水层	落水洞、溶蚀漏斗广泛分布,径流通道复杂	降水入渗+地表径流汇入补给	暗河集中排泄、分散泉排	优势径流通道主导,局部径流滞缓,整体连通性强

表 2 岩溶地下水径流参数扰动特征

径流参数	天然状态	开采扰动状态	扰动变化特征	扰动影响范围
地下水位	稳定,年波动幅度<2m	持续下降,最大降深 30~120m	采空区周边水位骤降,远端水位缓慢衰减	单工作面影响半径 500~1000m
矿井涌水量	稳定微量涌水	突增后缓慢衰减,雨季峰值显著	降水响应滞后 3~7d,季节性波动剧烈	覆盖整个采区及周边岩溶含水区
地下水流速	均匀缓慢,0.1~0.3m/d	局部骤增,最高可达 5~10m/d	优势通道流速激增,非通道区域流速锐减	集中于采动导水裂隙带范围内
水力梯度	平缓均匀,梯度 0.02~0.05	局部陡增,最大梯度 0.3~0.5	采空区周边形成水力降落漏斗,梯度突变明显	降落漏斗影响范围可达 1~3km

2 煤矿井下开采对岩溶地下水径流的扰动规律

依托四川岩溶矿区原位工程监测数据及西南矿山工程落地实践,井下采掘引发的岩溶地下水径流扰动呈渐进不可逆的多维演化特征:采动裂隙重塑地下水径流空间通道,原生补径排水文系统发生结构性异变,径流特征参数出现阶段性突变;扰动进程可划分为初始扰动、强扰动、稳态调适三个时序阶段,各阶段水文响应特征差异化突出。

2.1 径流通道重构规律

华蓥山矿区现场实测研究表明,巷道掘进与煤层回采扰动作用下,上覆基岩发生弯沉变形、阶段性垮落,衍生采动裂隙带并渐进导通岩溶含水层原生溶蚀裂隙。采动前期微裂隙密集萌生,渗流阻力衰减、地下水径流条件优化;开采中期贯通型导水裂隙切穿含水层地层,构筑“采空区-构造裂隙-岩溶溶洞”复合型渗流网络,含水层径流系统发生整体性重构;开采后期浅部裂隙在覆岩自重应力作用下压密闭合,深部优势渗流通道永久性赋存。井下动态监测数据证实:工作面推进至 150m 里程时,导水裂隙发育至长兴组灰岩含水层中部层位,开切眼及采空区后方发育倾角 55°~60° 主控渗流通道,为矿井突涌水优势路径,区域地下水径流系统发生颠覆性异变。

2.2 地下水径流参数扰动特征

采动扰动下,岩溶地下水水位、流量、流速、水力梯度等核心径流参数发生显著突变,且呈现明显的空间差异性,如表 2 所示。

由表可知,矿体开采打破原有地层应力,扰动改变地下水水力坡度分布规律,采空区周边逐步形成地下水降落漏斗;原本顺着岩层横向流动的地下水,自四周渗流,全方位汇聚至采空区范围,汇水作用变强,极易引发矿井突水、地面岩溶塌陷灾害。另外矿区地下水受降雨补水影响更灵敏,矿井涌水多少和降雨量挂钩,但雨水渗进地下需要时间,岩体涌水响应相较降雨存在时序滞后,进一步提升矿井水害治理管控的难度。

2.3 差异化扰动规律

四川岩溶矿区采矿诱发地下水环境扰动空间分异特征突出:川南华蓥山、古叙矿区岩溶储集空间发育完善,地下暗河、溶洞系统连片展布,煤炭采掘扰动后地下水径流系统快速重塑,水资源渗漏损耗规模偏高,极易引发岩溶泉枯竭、岩溶塌陷等地质灾害;筠连矿区含水介质以浅层溶隙型储水构造为主,采掘扰动仅局限于浅表含水层,深部含水岩组赋存条件保持稳定,矿区主要显现矿井涌水量攀升特征,次生地质灾害发育程度偏低。浅部煤层开采易改造地表水系径流条件,诱发落水洞水力贯通;深部煤层采掘易扰动基岩深部承压含水层,潜藏隐蔽型矿井突水风险,含水层修复治理工程难度偏高。

2.4 扰动诱发的工程与生态问题

地下水径流秩序被打乱后,主要会带来两大棘手难题。第一类关乎矿山生产安全:地下水改道形成新的透水缝隙,很容易造成井下突发透水、溃水险情;采空坑里的积水排不出去长期积存,水体和围岩反复发生化学反应,析出各类污染物质,让矿井排出的污水水质越来越差。第二类属于生态地质灾害:地下水位持续走低,致使山上岩溶泉水断流干涸、地里土壤缺水发干,石漠化范围不断扩张;地下水流失掏空地层,径流管路垮塌还会带来地面下陷、岩溶塌坑等问题,整片区域水土环境失衡,直接干扰矿区附近居民日常用水等生产生活。

3 适配四川岩溶山区的地下水径流防控应用型技术体系

依托四川岩溶矿区地下水受扰动的变化特点,贴合西南矿山现场实际施工情况,按照“源头控隐患、封堵导水通道、实时调节水量、后期生态补修”的治理思路,摒弃传统粗放式抽排积水的处置模式,打造契合当地地质环境的成套综合治理技术体系。

3.1 岩溶水系统精准探查预警技术

针对四川岩溶山区矿区地质条件复杂的突出问题,区域内岩溶通道赋存隐蔽、地下水采动扰动响应规律复杂多变、为此,采用地质钻探+高密度电法+瞬变电磁法三位

一体的综合探查前置核心技术,实现矿区水文地质隐患全方位、高精度精细化探查排查。在实际探查工作中,通过地质钻探精准锁定地下岩层、煤层的真实结构,再搭配高密度电法、瞬变电磁法两种物探技术互补探测,弥补单一探测方式的短板,全面、精准探明矿区内部溶洞、溶隙、地下暗河的具体分布位置、规模大小及延伸范围。同时详细查清开采煤层与岩溶含水层的上下空间对应关系,精准定位隔水层厚度不足、岩体破碎的薄弱区段,以及地下水集中流动的优势径流通道,彻底摸清矿区地下水文地质的整体情况,从源头杜绝探查盲区。在此基础上,配套安装实时水位、涌水量自动化监测设备,搭建一体化动态监测预警系统,通过数据实时分析,精准研判井下围岩裂隙演化、贯通发育趋势,提前识别、预警岩溶突水、涌水安全风险,为矿区后续水害防控工程设计、施工方案优化、安全开采规划提供真实、精准、全面的数据支撑,提升矿区开采的安全保障性。

3.2 局部注浆帷幕通道封堵技术

针对采动贯通导水裂隙与岩溶渗漏管路,推广分区可控局部注浆帷幕封堵工艺。摒弃全域注浆高耗材粗放治理范式,依托水文探测成果精准圈划导水构造与隔水层破损带,配比水泥-水玻璃复合浆材实施分段定向注浆,充填空洞储水空间、胶结碎裂围岩,封堵地下水汇集渗流途径,重构地层原生隔水防渗体系。

现场工程实测证实,该注浆工艺能够大幅削减井下涌水规模、缓和地下水径流造成的地层形变扰动,相比传统全域治水工艺可压缩项目综合投入,适配四川各类中小型岩溶山水害整治工况,是西南区域岩溶矿井地下水防控的主流实用技术。对于地表发育的落水洞、溶蚀漏斗地貌,就地调配黏土与采矿矸石分层铺筑碾压,闭合地表浅表渗漏缝隙,阻滞大气降水快速下渗补给含水层,规避降雨入渗扰动原有地下水循环系统。

3.3 保水采煤径流调控技术

立足四川煤层与岩溶含水层近距叠置赋存的地质条件,实施分区差异化保水开采工艺。预留 $\geq 80\text{m}$ 隔水煤岩柱切断含水层与采场水力导通通道;运用分层分段控速回采工艺,遏制导水断裂带向上扩渗发育;依托矸石-膏体协同充填固结技术压实采空空间,封堵浅表卸荷裂隙,重构地下水天然径流脉络,完成地下水径流人工靶向调控。

3.4 矿区地下水生态修复技术

针对开采造成的地下水流失、水位下降、生态破坏问题,构建地表-地下一体化生态修复体系。地表层面,对

矿区岩溶裸露区实施植被恢复,种植耐旱乡土植物,修复石漠化土地,减缓降水快速入渗与地表径流流失,优化地下水补给条件;地下层面,对治理后的渗漏通道、含水层进行人工补水调控,逐步恢复区域地下水位,修复原有泉点、暗河排泄体系,重构稳定的地下水补径排平衡。同时对矿区矿井水进行净化处理与资源化利用,实现“控水、保水、用水”一体化,契合绿色矿山建设要求。

4 工程应用效果分析

该地下水防控技术已规模化落地应用于四川华蓥山绿水洞煤矿、筠连重点矿区等西南岩溶矿山工程。工程实施后,矿井疏干涌水量显著削减,区域地下水位年均抬升3~5m,区内岩溶泉群全线复流,井下突发性突水地质隐患根治;同步提升地表植被盖度,有效阻滞石漠化演进进程,达成矿产采掘与地下水原位生态保育协同建设目标,工程应用实效佐证整套工艺稳定性达标。

5 结论

四川西南岩溶山区开展煤矿开采作业时,会打破山体原有岩层结构,产生大量采动裂缝。这些裂缝会重新打通岩溶地下水的流动路径,改变流动规律,朝着煤矿采空区集中汇集。在不同开采阶段、不同山体区域都存在明显差

异,呈现出阶段性、不均衡的特点。在岩溶发育程度高的区域,岩层溶洞、裂隙多、地质结构破碎,煤矿开采后极易出现地下水渗漏流失、地面塌陷等地质问题;而岩溶发育程度较低的区域,地质结构相对完整,开采带来的影响较轻,主要表现为出水异常等问题。通过“精准探查-注浆封堵-保水调控-生态修复”一体化防控技术,推动四川西南岩溶山区煤矿绿色、安全、可持续开采。

[参考文献]

- [1]马新尧.复杂环境下煤矿井下开采与支护方案讨论[J].能源与节能,2026(4):209-212.
- [2]任红兵.煤矿井下充填开采技术研究与应[J].煤炭新视界,2024(2):204-205.
- [3]王翰秋.煤矿井下水体劣化覆岩稳定性控制与保水开采研究[D].河北:河北工程大学,2024.
- [4]郑扬帆,汪帆,李兵,等.煤矿井工开采对地下水环境的影响及防范探究[J].煤炭技术,2024,43(2):140-144.

作者简介:陈传燕(1988—),女,山东淄博人,工程师,重庆工程职业技术学院水文地质与工程地质毕业,现就职于四川省恒升晟睿勘察设计有限公司,从事资源勘查、岩土勘察、地质灾害、及相关技术咨询类工作。