某金属矿山水害帷幕截流治理技术及效果评价研究*

马超[1,2],马万奇[1],郭道冉[1,2],侯英卓[1],孙述海[1,2],孙玥[1],邓琳麒[3],齐跃明[3]

(1.山东省地矿工程勘察院(山东省地质矿产勘查开发局八〇一水文地质工程地质大队), 山东 济南 250014;
2.山东省地下水环境保护与修复工程技术研究中心, 山东 济南 250014;
3.中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州市 221116)

摘要:针对金属矿山深部开采面临的复杂岩溶水害威胁,亟须发展精细化帷幕截流治水技术及多维度效果评价方法。为提升水害防治效率并验证工程效果,以ZK铁矿为研究对象,结合物探与钻探超前识别岩溶通道,实施基于通道识别的精细化注浆工艺(动态调控压力2~4 MPa、水灰比1∶1~0.6∶1);应用FEFLOW软件模拟预测了帷幕截流前后地下水流场变化及矿井日排水量衰减效果(降至7 984 m^3/d,堵水效率65%);构建出融合注浆量分析、水文监测、物探探查、检查孔验证及AHP定量评价的多维效果评价体系。结果表明:精细化注浆工艺有效封堵了复杂岩溶裂隙网络,矿区日均排水量由22 984 m^3/d降至7 770 m^3/d,减少15 214 m^3/d,堵水效率达66.2%,接近于模拟预测值;AHP综合评价得分0.895(优秀级),其中排水率降幅(权重31.1%)和堵水效能贡献显著。该技术体系为类似金属矿山含水层保护与水害防控提供了理论支撑和可复制的技术范式。

关键词:金属矿山;帷幕截流;注浆堵水;岩溶水防治;效果评价

中图分类号:TD745 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)07-0082-15

Study on Curtain Closure Treatment Technology and Effect Evaluation of Water Disaster in a Metal Mine

Ma Chao[1,2], *Ma Wanqi*[1], *Guo Daoran*[1,2], *Hou Yingzhuo*[1], *Sun Shuhai*[1,2], *Sun Yue*[1], *Deng Linqi*[3], *Qi Yueming*[3]

(1.Shandong Provincial Geo-mineral Engineering Exploration Institute (801 Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Shandong Geology & Mineral Resources Bureau), Jinan, Shandong 250014, China;
2.Shandong Engineering Research Center for Environmental Protection and Remediation on Groundwater, Jinan, Shandong 250014, China;
3.School of Resources and Geosciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: In view of the threat of complex karst water disasters in deep mining of metal mines, it is urgent to develop refined curtain closure water control technology and multi-dimensional effect evaluation methods. In order to improve the efficiency of water disaster prevention and control and verify the engineering effect, ZK Iron Mine was selected as the research object. Combined with geophysical prospecting and drilling to identify the karst channel in advance, the fine grouting technology based on channel identification was implemented (dynamic control pressure of 2-4 MPa, water-cement ratio of 1∶1-0.6∶1). FEFLOW software was used to simulate and predict the change of groundwater flow field before and after curtain closure and the attenuation effect of daily mine drainage (reduced to 7 984 m^3/d, water plugging efficiency of 65%). A multi-dimensional effect evaluation system integrating grouting volume analysis, hydrological monitoring, geophysical exploration, inspection hole verification and AHP quantitative evaluation was constructed. The results show that the fine grouting process effectively plugs the complex karst fracture network. The daily average drainage volume of the mining area decreased from 22 984 m^3/d to 7 770 m^3/d, a decrease of 15 214 m^3/d, and the water plugging efficiency reached 66.2%, which is close to the simulated predicted value. The comprehensive evaluation score of AHP is 0.895 (excellent grade), among which the reduction of drainage rate (weight of 31.1%) and the contribution of water plugging efficiency are significant. This technical system provides theoretical support and a replicable technical paradigm for aquifer protection and water disaster prevention and control in similar metal mines.

Key words: Metal mine, Curtain closure, Grouting water plugging, Karst water prevention, Effect evaluation

---

* **收稿日期**:2025-08-22
基金项目:国家自然科学基金项目(52274223,41741020);河南省2024年水利科技攻关项目(GG202413)
作者简介:马超(1988—),男,山东微山人,高级工程师,主要从事地下水资源研究、矿坑水资源化利用、矿山防治水、地下水污染防治等研究工作。E-mail:cdmachao@126.com
通信作者:邓琳麒(2002—),男,陕西渭南人,硕士研究生,主要从事矿山水害防治研究。E-mail:2736739576@qq.com

0 引言

金属矿产资源作为支撑国民经济发展的基础性战略物资,其安全高效开发直接关系到国家工业体系稳定与国防安全[1]。我国作为全球最大的金属矿产生产国与消费国,近年来金属矿床的开采规模与开发强度持续提升[2],但随着浅部资源逐渐枯竭,深部开采面临的复杂水文地质问题日益凸显[3-5]。尤其在岩溶发育区,金属矿山开采常引发突水淹井、地下水污染等重大灾害,严重威胁金属矿山的安全生产[6-9],已成为制约金属矿山可持续开发的重大问题。据统计,我国岩溶区金属矿山因水害导致的停产事故占总灾害事故的35%以上,年均经济损失超50亿元,因此,构建适用于复杂岩溶条件的水害防治技术体系已成为行业迫切需求[10]。

在矿山水害防治领域,帷幕截流技术因具有显著的"堵水减排"效果,已逐渐取代传统"强排疏干"模式,成为绿色矿山建设的核心技术之一,且在煤矿领域的实践已形成较为成熟的技术范式[11-16]。如:陈陆望等[1]针对侏罗系砂岩含水层采用帷幕注浆技术,通过控制注浆压力梯度实现了337 m的水位陡差,有效阻断了含水层侧向补给;王晨光等[2]在元宝山露天煤矿对第四系松散含水层实施帷幕截流,使矿坑排水量削减42%,验证了该技术在均质含水层中的适用性。这些研究通过标准化注浆工艺与单维度水位监测,解决了相对简单水文地质条件下的水害防控问题,为矿山帷幕工程设计提供了基础参数。

然而,金属矿山的水文地质条件与煤矿存在本质差异,其岩溶-裂隙网络具有多尺度非均质性[17-19],裂隙开度为5~30 mm,岩溶管道直径可达数米,导致煤矿的防治水思路难以在金属矿山直接套用。现有金属矿山帷幕技术研究存在一定的局限性,一方面注浆工艺的精细化程度不足,传统均匀注浆模式无法适应岩溶发育的空间差异性。陈新等[9]在张马屯铁矿区的研究显示,采用1∶1的固定水灰比注浆时,岩溶管道区浆液流失率高达30%,而微裂隙区则出现充填不充分的问题。另一方面,注浆工艺的效果评价体系单一,多依赖单一物探手段测得电阻率或排水量数据,缺乏对帷幕完整性的精准验证。尚宏波等[7]的研究表明,仅通过水位变化评价堵水效果时,可能遗漏帷幕绕流通道,导致工程后期涌水量反弹率达15%。在注浆效果评价中,陈泓等[20]使用PSO-BP神经网络建立了单位注浆量预测模型,为用单位注浆量对注浆效果评价提供了指导。汤振等[21]借用物探指标、钻探指标及水位变化指标评价了帷幕墙的止水效果。其评价角度较为单一,此评价模式只考虑到了帷幕墙的止水率,而未考虑注浆帷幕结构的完整性及在极端天气情况下的帷幕墙响应稳定性问题[22-23],具有一定的局限性。

为了应对上述帷幕工程在复杂岩溶与裂隙环境中的局限性与不确定性,国内外近年已有若干研究开始聚焦于帷幕注浆的风险评估、形成机理、结构完整性与长期响应等方面。Yuan等[17]在金属矿地下大规模帷幕注浆工程中,基于地质条件、水文条件与注浆参数构建多因子综合评价模型,对注浆前后水害风险进行了分区对比,发现帷幕能够显著减少危险区与相对危险区的范围。Zhao等[24]分析了高压注浆形成的帷幕在含水裂隙区的突水通道定位与演变机制,指出裂隙通道失效或绕流是帷幕减效的关键路径之一。研究强调不仅要审慎选择注浆压力和注浆孔布置,还要及时识别最危险的通水通道。Kong等[25]针对水丰富巷道超前注浆帷幕的形成机理进行了细致研究,揭示了浆液扩散与围岩-矿体界面对帷幕注浆效果的影响。此外,帷幕注浆墙的长期变形与在水压、地压作用下的稳定性也受到重视,Fan等[26]选取钻探和钻孔电视成像得出的渗透率、岩石质量等级和裂缝填充率为评价指标,为评价帷幕结构完整性提供了新手段,但未考虑极端天气情况对帷幕墙的功能响应影响。Jenifer等[27]为评估地下水潜力使用了突变级数法、熵值法及AHP方法,其结果表明,AHP方法具有87%的显著准确率,因此可使用AHP方法评价帷幕注浆工程截流效果,为帷幕墙截流治水效果评价提供了科学指南。这些研究共同指出帷幕工程的设计不仅要考虑注浆量、注浆深度、材料配比等传统参数,更应纳入通道识别、帷幕本体结构完整性与长期监测等维度,才能在复杂岩溶-裂隙条件下实现稳定、高效截流效果。

复杂岩溶条件下的金属矿山帷幕工程仍面临较大的技术瓶颈,由于岩溶发育呈现垂直性分带差异,导致岩溶通道的精准识别与注浆响应差异不明确。而对帷幕墙注浆截流治水效果评价缺乏多维度协同验证框架。针对以上问题,以ZK矿区为研究对象,综合采用物探与钻探技术超前识别岩溶发育区,建立精准定位的精细化注浆工艺,实现对岩溶管道的动态高效封堵。运用FEFLOW数值模拟方法,系

统分析帷幕建设前后地下水流场、水位陡坎及降落漏斗形态的演变规律,定量预测涌水量削减效果。在工程效果评价方面,融合注浆量、矿井日排水量、水位、电阻率及结石体充填率进行综合分析,构建了以 AHP 方法为核心的多维综合评价体系,重点从堵水效能、结构完整性、长期稳定性三大维度设置指标,涵盖排水量降幅、透水率变化、裂隙充填率、电阻率响应及暴雨工况下的幕体抗扰动性能,实现对帷幕截流工程效果的多尺度、全流程量化评估。该集成技术体系不仅显著提升了水害防控效果,也为类似水文地质条件下金属矿山含水层保护与灾害协同控制提供了系统、可推广的工程范式。

1 水文地质条件

1.1 矿区水文地质条件

研究区位于华北地块鲁西隆起东北缘,见图 1,受 NNE 向淄河断裂及齐河-广饶断裂控制,形成由近东西向、北北东向及北西向断裂组成的构造格架。金岭短轴背斜核部为燕山期闪长岩体,两翼接触奥陶系灰岩与石炭-二叠系砂页岩,构成矽卡岩型铁矿床。第四系覆盖层厚 20～26 m,以粉砂质黏土夹砾石为主,底部发育黏土-砾石层 2～8 m。奥陶系马家沟群灰岩(北庵庄组、五阳山组等)为岩溶裂隙主含水层,岩性以灰岩、泥质白云岩为主,透水性强。石炭-二叠系砂页岩分布于金岭断层以东,闪长岩分布于研究区西侧,二者共同形成该区域的主要隔水单元。

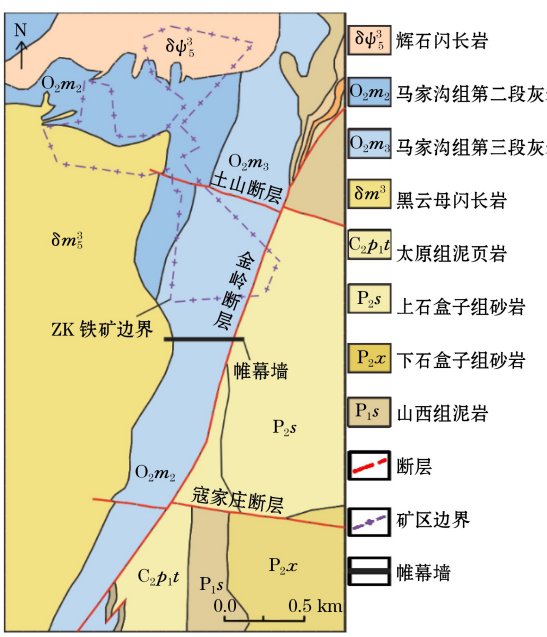


图 1 研究区区域地质概况图

Fig.1 Reginal geological map of the study area

(1) 浅部强径流带(0～－50 m)。位于风化壳与基岩过渡带,受地表水入渗及季节性水位波动影响显著。东部溶洞发育(线岩溶率 18.44%),充填红褐色黏土;西部以垂向溶蚀裂隙为主(线岩溶率 6.94%),裂隙长 20～60 cm,局部达 3 m,连通性强,但黏土充填降低有效渗透性,形成局部阻水段。

(2) 中部优势径流带(－50～－300 m)。主要地层为五阳山组灰岩,受金岭断层与 F1 断裂切割,灰岩层内发育多期构造裂隙,叠加岩浆侵入热液蚀变作用。灰岩岩溶发育强烈(线岩溶率 11.79%),以高角度溶蚀裂隙为主,延伸长度 5～30 m,连通性极佳,方解石结晶少见,表明地下水径流较为活跃。

(3) 深部弱径流带(－300～－350 m)。处于区域地下水循环滞缓带,围压增大抑制溶蚀空间扩展(线岩溶率<3%),以毫米级溶孔及闭合裂隙为主。渗透性极弱,对矿区涌水量贡献可忽略,但需警惕深部断裂带沟通浅层含水系统的潜在风险。

综上,研究区的岩溶发育受构造与岩性双重控制,呈现显著垂向分带性。

1.2 矿山水害问题分析

在前期的水文地质调查过程中发现,ZK 铁矿矿坑水补给以奥陶系灰岩岩溶裂隙水为主,占比超过 80%。主径流通道沿矿区南部岩溶发育带展布,断面流量可达 2.4×10^4 m^3/d。第四系孔隙水补给次之,通过局部“天窗”区垂向渗漏补给。雨季降水入渗系数达 0.19,单日最大补给量超 6 000 m^3,形成动态补给压力。随着矿区不断向深部开采,水压梯度陡然增加,石炭系砂页岩隔水层受高水压击穿的风险显著增大。2023 年周边临近闭坑矿山停止疏干排水后,区域灰岩水位回升 22.5 m,诱发地下水流场反转,突水量峰值达 23 181 m^3/d,远超排水系统设计负荷,ZK 铁矿面临严峻的水害威胁。

1.3 帷幕截流工程目标

近年来,随着 ZK 矿区开采深度逐渐加大,且临近矿区闭坑停止排水后,ZK 矿区排水压力逐渐加大。其巨大的排水压力不仅对矿山安全生产与经济效益带来影响,同时也对矿山生态环境造成冲击。本文的帷幕墙设计以排水量 $2.298\ 4\times10^4$ m^3/d 为基准,减少排水量 1.5×10^4 m^3/d,控制日均涌水量在 7 984 m^3/d 以下,降幅≥65%,以期实现涌水量可控、安全生产与生态可持续协同的目标。

2 帷幕截流工程设计

2.1 帷幕参数设计

2.1.1 帷幕墙选址及设计

根据前期调查资料,ZK 矿区主要涌水来源于矿区南部阁庄组灰岩中的岩溶水,结合地理地貌及交通条件,为减小矿区排水压力,在其南部主径流通道处设计了一处帷幕墙,见图 2。

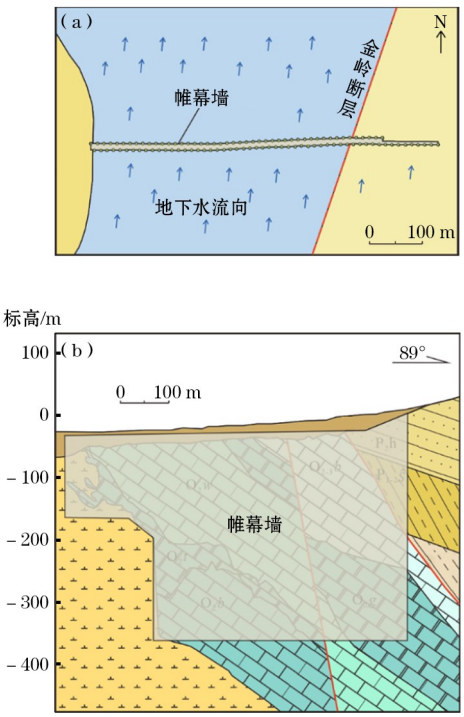


图 2 帷幕墙位置示意

Fig.2 Schematic diagram of the curtain wall location

帷幕墙西侧依托于闪长岩岩基,东侧跨过金岭断层,和金岭断层形成复合屏障,顶部锚固于第四系底部粉质黏土层,底部嵌入-350 m 以下弱径流带灰岩。在金岭断层以西及断层附近布设双排钻孔,以东砂岩含水层带布设单排钻孔,注浆孔孔间距 10 m,排距 8 m,共设计了 100 个注浆孔,最终形成横跨 540 m,高约 350 m,厚度 20 m 的大型帷幕墙。

2.1.2 帷幕注浆基本参数

(1) 扩散半径。研究区内灰岩岩溶裂隙开度为 5～30 mm,浆液水灰比为 1∶1～0.6∶1,注浆压力梯度为 2～4 MPa,通过现场注浆试验,最终设计浆液有效扩散半径为 8 m。

(2) 注浆孔孔间距。采用双排交错布孔模式,依据扩散厚度与帷幕厚度关系,按公式(1)计算最优孔间距 D:

$$D=2\sqrt{R^2-(\frac{T}{2})^2} \tag{1}$$

式中:R 为扩散半径,$R=8$ m;T 为设计帷幕墙厚度,$T=10$ m。

计算可得孔间距为 12.5 m,考虑到岩溶空间发育的不均一性,孔间距取 10 m,非关键区为兼顾经济性可放宽至 12 m。

(3) 注浆压力。根据《矿山帷幕注浆规范》(DZ/T 0285—2015),结合区域工程实践经验,注浆过程中注浆压力按地层深度进行分层控制,0～-100 m 处要求结束压力为 2～2.5 MPa;-100～-300 m 处要求结束压力为 2.5～3.5 MPa;-300～-400 m 要克服深部高水压,要求结束压力为 3.5～4 MPa。

(4) 浆液配比。注浆材料选用水泥浆液,为应对不同岩溶发育情况,要求采用不同水灰比。在微小裂隙中注浆需采用水灰比为 1∶1 的水泥浆液,力求水泥浆液渗入微小裂隙,形成浸润式填充;而在岩溶发育强烈的区域需采用水灰比为 0.8∶1 的水泥浆液,在减少浆液流失的同时可提高堵水效率。

(5) 幕体防渗性能。《矿山帷幕注浆规范》(DZ/T 0285—2015)要求帷幕体设计透水率的取值要根据岩性特征进行科学选取,在可溶岩发育区,为了确保帷幕体具备良好的抗渗性能,帷幕体的透水率可取 3～5 Lu。在实际过程中,帷幕轴线地层岩溶发育不均,其透水率分布也具有不均一性,在岩溶发育强烈的地方透水率可达 7～10 Lu,为实现截流治水的工程目标,设计帷幕体防渗性能不能大于 4 Lu。

2.2 施工工艺与关键技术

2.2.1 注浆方式与顺序

注浆采用“自上而下”的分段注浆方式,每段 20～40 m,岩溶强发育区可缩短至 3～20 m,以利用浆液自重实现底部密实、减少上窜。遵循“逐渐加密”的原则施工注浆孔:一序孔间距 40 m,先构建注浆骨架并扰动地下水场;在一序孔的基础上加密布设二、三序孔,注浆压力提高 20%～30%,以扩散至更细裂隙并穿透未充填通道,实现补强。该分序分压设计既是逐级充填的过程,也是对前序注浆效果的验证与完善,最终确保帷幕整体质量。

2.2.2 注浆压力与水灰比

在注浆工程中,浆液水灰比一般分为 1∶1、

0.8∶1 和 0.6∶1 三个等级。初始阶段多采用 1∶1稀浆无压注浆,以扩大扩散半径、构建骨架并探查通道大小。若注浆压力逐渐升高,表明裂隙较细,可在安全条件下采用高压稀浆封堵;若压力长期无变化,说明岩溶通道较大,应及时改用浓浆(0.8∶1 或 0.6∶1)以减少跑浆。若在高浓度注浆连续 5 h 后仍无明显压力或流量响应,则宜采取间歇注浆,待 6 h 后再次注入稀浆以激活压力变化,从而提高充填效率并确保浆液在地层中的有效分布。

2.3 地下水流数值模拟分析

为进一步预测研究区帷幕墙的堵水截流效果,使用 FEFLOW 软件构建了研究区水文地质概念模型,通过该模型,可进一步探讨水文地质体的空间结构、含水层的分布情况以及地下水水位和水量的变化规律。通过收集研究区的地层岩性、水文地质资料、岩溶发育特点以及含水层之间的地下水力联系,对模拟区域作概化处理,西部以闪长岩隔水层为界设置隔水边界,东侧金岭断层作为区域隔水地质单元设置为隔水边界,上部边界第四系潜水含水层设置为自由水面,勘探结果显示,−450 m 水平下岩溶发育程度较低,岩石结构致密且裂隙不发育,因此将其设为具有阻水能力的底板,作为下部的隔水边界。对于南北边界,因未发现天然水文地质边界,且区域地下水流场显示水流方向总体呈自南向北趋势,故将南北边界概化为第三类边界条件。该边界条件通过定义边界单元的交换系数和边界外侧参考水头来刻画模拟区与外侧广阔含水层之间的侧向补排关系。在本模型中,交换系数依据边界段所在含水层的渗透系数与等效宽度计算,取 95.65 m^2/d;边界外侧参考水头则基于区域水文地质调查和长期观测孔数据,设定南边界为 10.3 m,北边界为−28.4 m,以反映区域内自南向北的水流趋势。此设置有效避免了因截取局部模型而可能产生的边界失真问题,使模拟结果更符合实际。

研究区内的主要水补给来源为大气降水,收集研究区内的 1954—2023 年气象站降水数据,平均年降水量取 0.633 5 m,降水入渗系数取 0.19。主要排泄为蒸发和矿山排水,由于区内岩溶水埋藏较深,地下水位埋深普遍超过蒸发极限深度,蒸发量极小,因此研究模型不考虑蒸发排泄。矿山排水为研究区内地下水的主要排泄途径,根据 2023 年 9 月矿区实测数据取排水量为 21 000 m^3/d。研究区的水文地质概念模型见图 3。

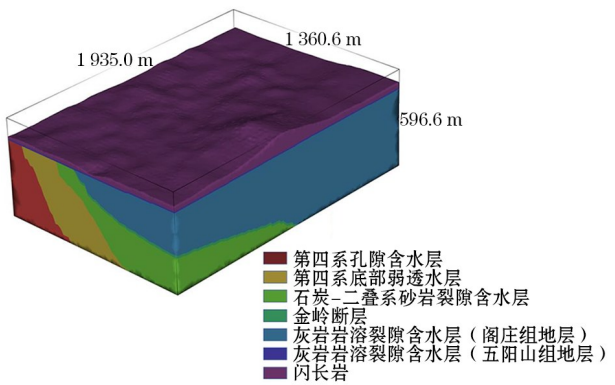
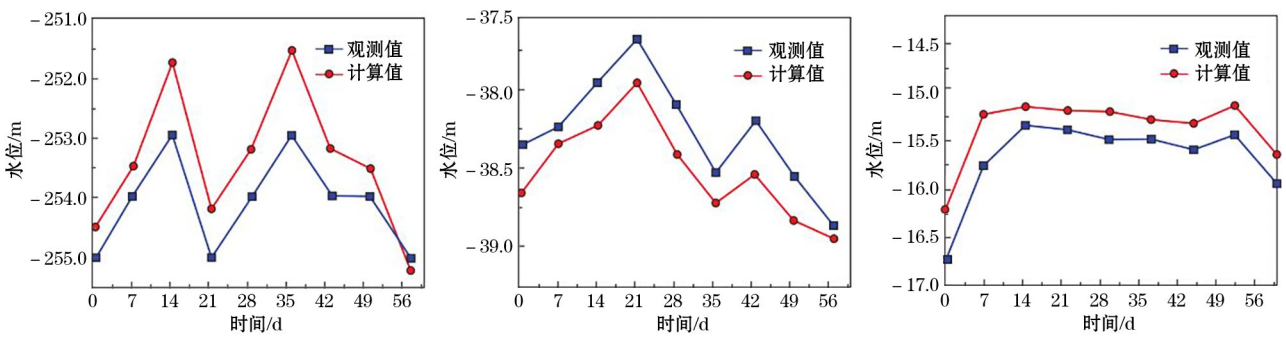


图 3 研究区水文地质概念模型

Fig.3 Conceptual hydrogeological model of the study area

模型建立后,采用 PEST 模块进行模型自动调参,通过迭代计算使实测水位与模拟水位的拟合达到最优。利用研究区已知的 6 个观测孔数据,选取 2024 年 5 月和 6 月对研究区进行流场识别验证,见图 4。同时进行地层渗透系数反演,K_x 与 K_y 分别代表沿水平方向 x 轴与 y 轴的地层渗透系数,K_z 代表垂直于水平方向上的地层渗透系数,见表 1。从水位拟合结果来看,模型计算出的水位与实际观测孔测量出的水位呈现高度的一致性,通过模型识别与验证,可进行下一步的水位预测。



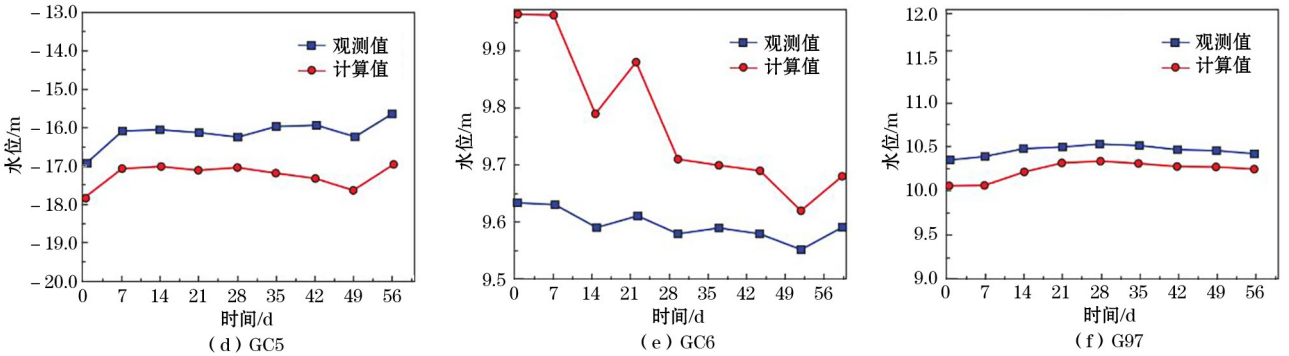


图 4　观测孔模拟水位与观测水位的对比

Fig.4　Comparison between simulated and observed hydraulic heads in observation wells

表 1　水文地质概念模型含水层参数

Table 1　Aquifer parameters for the hydrogeological conceptual model

含水层	K_x/(m/d)	K_y/(m/d)	K_z/(m/d)
第四系孔隙含水层	12.360	15.360	16.280
第四系底部弱透水层	0.001	0.001	0.001
石炭-二叠系砂岩裂隙水含水层	0.000 22	0.001	0.000 1
金岭断层	1×10^{-6}	1×10^{-6}	1×10^{-7}
阁庄组地层	3.820	1.890	0.120
五阳山组地层	7.870	2.220	0.520
风化闪长岩	0.004	0.004	0.004

帷幕建立前，地下水主要从矿区南部奥陶系灰岩岩溶裂隙含水层向北径流补给矿井，主要排泄为矿井的疏干排水，为进一步定量化预测帷幕墙的截流阻水效果，对研究区帷幕墙建立前后的地下水水位流场进行模拟，见图 5。从地下水等水位线的分布形态、水位差以及流量变化来进一步研究帷幕墙的截流阻水效果。

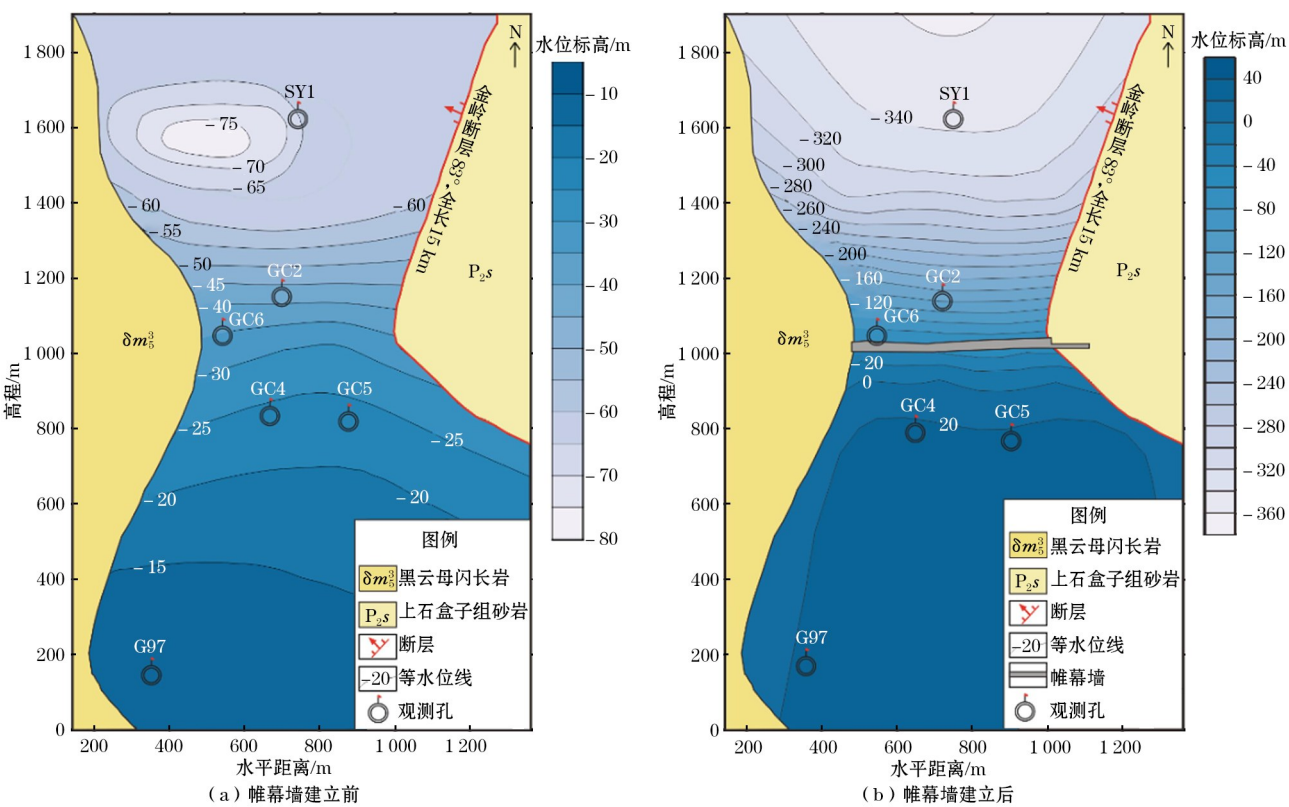


图 5　地下水水位流场的对比

Fig.5　Comparison of groundwater level flow fields

从图 5 可以看出,帷幕建立前的初始水位流场中,矿区地下水的主要补给水源为地下水系统的侧向补给及大气降雨补给,主要排泄为矿区的疏干排水,受到矿区疏干排水影响,原有地下水流场发生扰动,在－430 m 平面内形成以巷道为中心的辐射状降落漏斗,而远离排水区域的流线稀疏,说明水力梯度趋于平缓,补给量较稳定。帷幕墙建立后的水位流场中,北侧水位迅速下降至－380 m 标高,而南侧水位抬升至＋20 m 标高,形成高达 400 m 的水位陡坎。从流线形态来看,帷幕墙南侧水位抬升区水力梯度趋于平缓,北侧水位降落区水位线分布较为均匀,说明帷幕墙有效阻隔了南北侧的水力联系。模拟结果较为理想,但同时需要考虑,帷幕墙南侧水位不断上升,岩溶水开始向第四系补给,在第四系中缓慢向北流动,最终补给北侧岩溶水,而下部部分岩溶水通过帷幕东侧绕流补给北部岩溶水,但其补给路径被延长,受到的径流阻力也显著增加。以矿山排水量为依据进行模拟计算,在平均年降水量为 633.5 mm 的气象条件下,模拟预测出矿区日均排水量由原先的 22 984 m^3/d 下降至 7 984 m^3/d,堵水效率约为 65%。

3 工程效果评价

3.1 注浆量分析

北排钻孔的注浆总量与单位注浆量数据表明(见图 6),两者相关性显著,但分布差异明显。

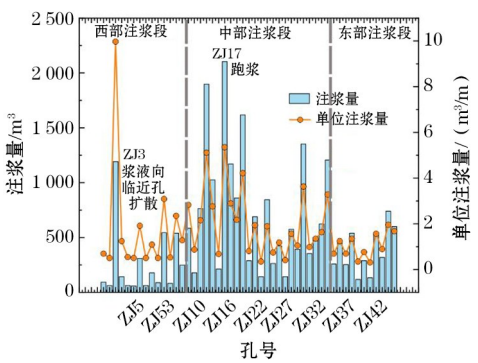


图 6 北排各孔注浆量和单位注浆量曲线

Fig.6 Curves of borehole grouting volume and grouting volume per metre of drilling for the north row

从图 6 可以看出,各钻孔注浆量和单位钻孔注浆量均不一致,这说明各个钻孔的岩溶发育具有差异性。由西向东分别表现为:ZJ1～ZJ12 孔的整体注浆量较小,且注浆量分布较为均匀,表明该段地层非地下水径流的主要通道,岩溶发育程度较低。ZJ2 孔作为一序孔注浆量达到 1 187.7 m^3,显著高于临近孔,表明该孔浆液有效封堵了岩溶通道,浆液扩散至临近孔,减少了临近孔的注浆量,进一步证明了截流工程的有效性;ZJ12～ZJ35 孔在帷幕截流工程的中段,注浆量大且差异性强,是地下水主通道所在。ZJ17 孔的注浆量高达 2 104.3 m^3,而 ZJ18 孔仍有 1 171.1 m^3,表明发生跑浆现象,需多手段进一步验证;ZJ35～ZJ45 孔在帷幕墙东段,注浆量高于预期且分布均匀,表明存在岩溶通道,但发育较均一,帷幕连续性较好。

不同孔序的注浆情况对比见图 7。

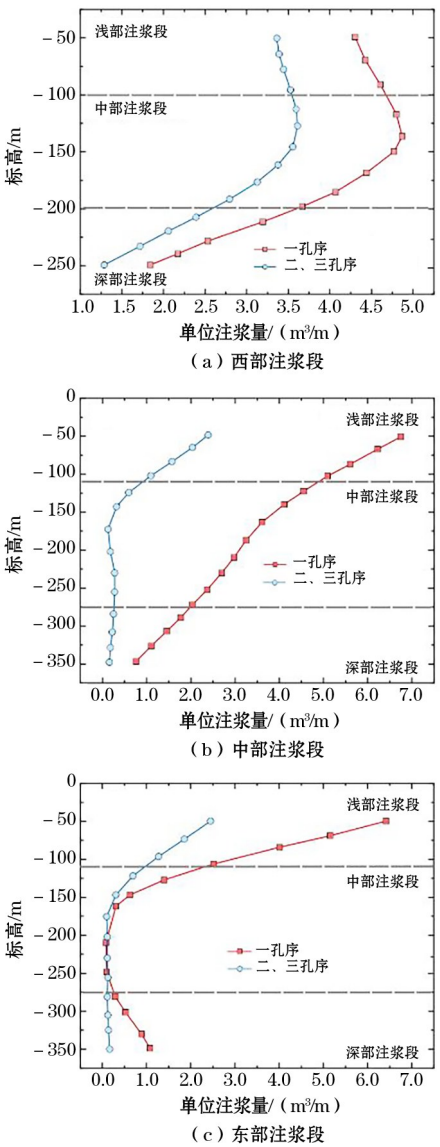


图 7 各区注浆孔不同孔序单位孔注浆量垂向变化曲线

Fig.7 Vertical variation curves of grouting volume per unit hole by borehole sequence in various zones

整体上二、三序孔单位注浆量显著低于一序孔,

符合“先大后小、逐级补强”的规律。西段二、三序孔的注浆量比一序孔约少 26%，在 −100～−200 m 深度先增后减，表明该段岩溶较发育；中段减少幅度最大(约 82%)，说明岩溶通道大且连通性好，一序孔注浆即可扩散至后序孔；东段约少 65%，且垂向变化不明显，显示岩溶发育弱、地层完整性好。总体结果验证了帷幕截流工程在不同段落的有效性与针对性。

3.2　矿井日排水量

帷幕施工过程中，由矿山单位对矿井日排水量进行监测，收集帷幕墙施工前后的矿井日排水量数据，日排水量的变化见图 8。

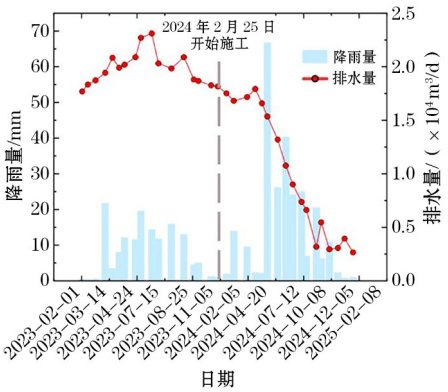


图 8　ZK 矿日排水量的变化

Fig.8　The changes of daily water discharge in ZK mine

由图 8 可知，帷幕施工前，矿井日排水量变化较为平缓，表明矿井存在稳定的水源补给且富水量较大，与大气降水量存在明显的响应关系，当大气降水量增大时，矿井日排水量也随之增大。随着帷幕工程的施工，矿井排水量逐渐减少，注浆堵水在减少矿井排水量方面起到了积极作用。总体来说，矿井日排水量由 22 984 m^3/d 下降至 7 770 m^3/d，减少了 15 214 m^3/d，堵水效率达到 66.2%，超过了 65%的模拟预期目标，这充分说明帷幕墙起到了显著的阻水截流作用。

3.3　水位变化分析

结合当地降雨量，基于上游观测孔 GC4 和 G97 与下游观测孔 GC2 的水位观察数据，进行水位变化分析，见图 9。

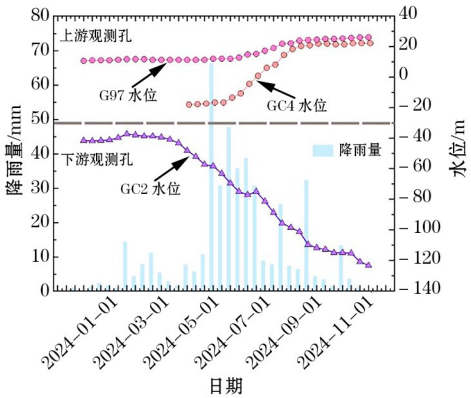


图 9　帷幕墙上下游岩溶水水位的变化

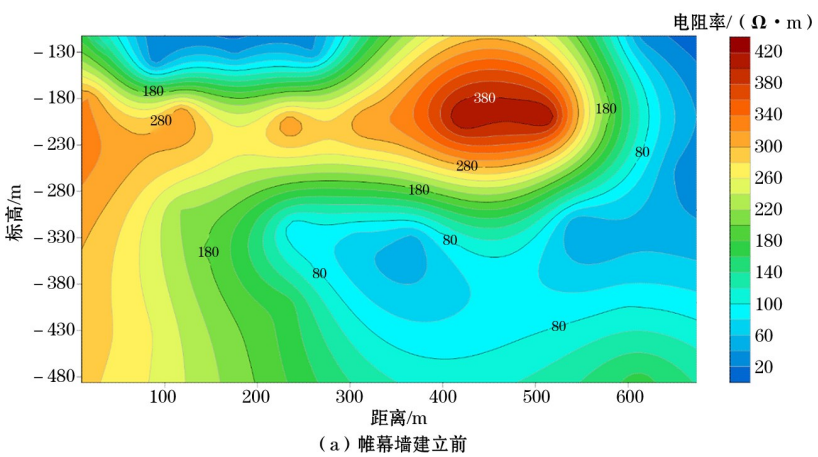
Fig.9　Changes in karst water levels upstream and downstream of the curtain wall

施工帷幕前(2024 年 1 月)，上游 G97 孔的水位为 17.9 m，下游 GC2 孔的水位为 −41.6 m，水力梯度为 59.5 m。帷幕工程完成后，上游水位升至 22.3 m，下游水位降至 −122.2 m，水力梯度增至 144.5 m。

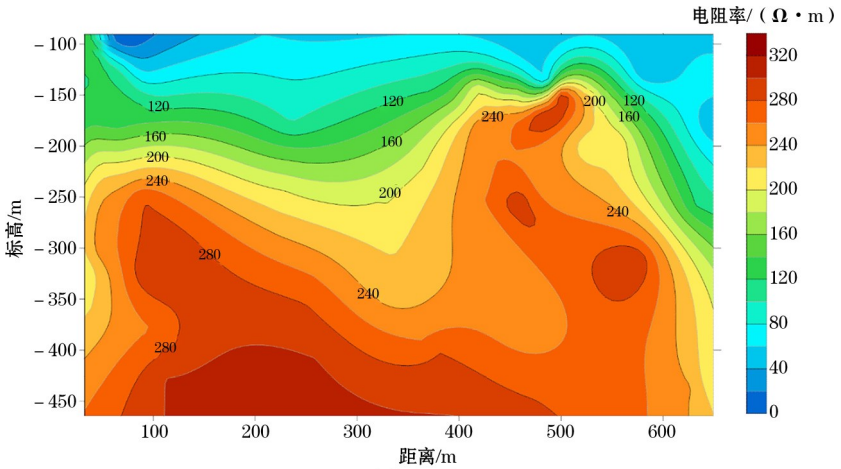
水位动态变化表明，2 月开工后，4 月下游水位率先下降，说明帷幕逐步阻断补给；7 月起上游水位抬升，表现出“雍积”效应，而下游水位在雨季仍持续下降，反映其补给已被切断并受疏干排水控制。整体来看，帷幕工程有效改变了原有地下水流场，显著提高了上下游水位差，验证了帷幕的截流效果。

3.4　注浆帷幕的地球物理技术探查

地球物理技术可以通过地层的物理性质差异探查地质结构。在本次帷幕截流工程施工前后，使用可控源音频大地电磁测深法沿注浆孔连线进行了探查，物探成果见图 10。



(a) 帷幕墙建立前



(b) 帷幕墙建立后

图 10 帷幕施工前后地球物理探查结果对比

Fig.10 Comparison of geophysical exploration results before and after curtain construction

帷幕注浆前,孔轴线西段浅部存在低阻异常,推测为第四系砾石层孔隙水,下部为闪长岩隔水边界;东段受金岭断层控制,电阻率突变,-280～-400 m 为灰岩岩溶水的主通道,东侧则为砂岩裂隙水径流。注浆后,地层电阻率整体升高,尤其在-280～-400 m 范围,结石体有效充填灰岩裂隙,岩溶与孔洞显著减少;中段浅部电阻率局部下降,推测为部分水流绕流至第四系,但总体上注浆对灰岩岩溶管道封堵作用明显。

3.5 注浆结石体钻探分析

为进一步了解帷幕墙截流阻水效果,在研究区内布设了 8 个检查钻孔,通过对检查孔岩芯的详细分析,可直观观测到水泥浆液在地层中的扩散状态,见图 11。



(a) 结石体半充填 (b) 颗粒状充填 (c) 短柱状充填

(d) 泥土缝隙充填 (e) 片状薄层充填 (f) 致密薄层充填

图 11 检查孔水泥结石体的特征

Fig.11 Characteristics of cement grout stone bodies in inspection holes

钻探数据显示,水泥结石体主要呈全充填(41%)和半充填(59%)两种状态。半充填部分多因裂隙中原有天然黏土在钻进过程中被冲走。图 11(a)显示结石体呈半充填状态,这是因为注浆压力不足,仅在裂隙表面形成薄层,能阻水但易受冲刷破坏;图 11(b)显示颗粒状状态,这是因为水泥浆在水流或空气干扰下凝结不均,空隙大、强度低;图 11(c)显示短柱状充填,当压力适中时填充较好,可增强帷幕墙防渗性能;图 11(d)显示浅层泥土缝隙被填充,浆液易在泥土中扩散,进一步胶结泥土;图 11(e)显示片状薄层充填,当裂隙平整时形成均匀薄层,有效阻断水力联系;图 11(f)显示致密薄层充填,这是理想填充状态,在合适压力、浆液配比及裂隙条件下形成致密薄层充填,可显著提高防水性能和力学强度,延长帷幕墙寿命。

3.6 帷幕截流效果的综合评价

3.6.1 基于 AHP 的帷幕截流效果评价

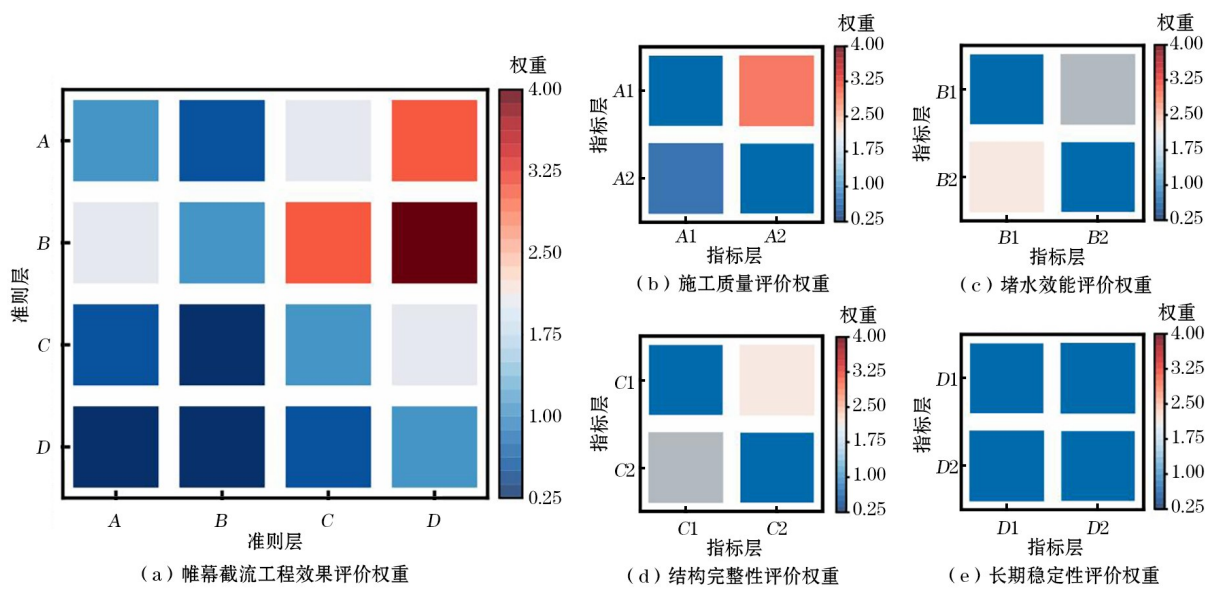
采用层次分析法(AHP)对帷幕截流的效果作出定量评价。在本次评价中以帷幕截流治水效果为最终目标,建立三层评价体系,其中准则层为施工质量、堵水效果、结构完整性与长期稳定性。选取指标孔斜合格率、注浆均匀性评价施工质量,选取透水率降幅与排水率降幅评价堵水效果,选取裂隙填充率与电阻率重构度评价帷幕的结构完整性,选取水头差的稳定性与暴雨期地下水的响应度来评价长期稳定性,见表 2。

表 2 帷幕截流工程治水效果评价模型

Table 2 Evaluation model for water control effect of the curtain cut-off project

目标层	准则层	指标层
帷幕截流工程效果	施工质量(A)	孔斜合格率(A1)
		注浆均匀性(A2)
	堵水效能(B)	透水率降幅(B1)
		排水率降幅(B2)
	结构完整性(C)	裂隙填充率(C1)
		电阻率重构度(C2)
	长期稳定性(D)	水头差稳定性(D1)
		暴雨期响应度(D2)

根据该帷幕截流工程的具体工况,以《矿山帷幕注浆规范》(DZ/T 0285—2015)作为依据,邀请矿山防治水、岩土工程及防渗墙设计专家组成专家组,采用 1～9 标度法进行评判,并构造判断矩阵,见图 12。其中准则层的最大特征值 $\lambda_{max}=4.021$,一致性指标 $CI=0.007$,平均随机一致性指标 $RI=0.90$,一致性比例 $CR=0.008<0.1$,通过一致性检验。基于准则层可进行指标层权重计算,权重计算结果见图 12。



(a) 帷幕截流工程效果评价权重 (b) 施工质量评价权重 (c) 堵水效能评价权重 (d) 结构完整性评价权重 (e) 长期稳定性评价权重

图 12 帷幕截流工程治水效果判断矩阵

Fig.12 Judgment matrix of water control effect of the curtain cut-off project

专家评分结果显示,矿山帷幕截流工程效果在各指标上存在差异。准则层中,堵水效能的权重最大,为工程效果首要判断依据。指标层中,排水率降幅的权重占比为 31.1%,突出了降低矿坑涌水量的核心目标;孔斜合格率的权重占比为 19.5%,反映了钻孔精度对帷幕连续性的决定性作用;透水率降幅的权重占比为 15.6%,体现了含水层渗透性改造效果;裂隙填充率的权重占比为 10.7%,检验了浆液充

填充分性及堵水效能;注浆均匀性的权重占比为6.5%,影响浆液扩散均质度;电阻率重构度的权重占比为5.3%,辅助评估空间连续性;暴雨期响应度与水头差稳定性的权重占比均为5.65%,表明该模型考虑了极端情况对帷幕体稳定性的长效反馈机制。

得到指标权重后,采用极差法对原始数据进行归一化处理,逆向指标取反,对各指标进行评分,结果见表3。其中归一化得分为各指标得分,贡献值基于上述评分权重采用线性模型计算算术加权平均值,可求出各指标对于帷幕截流治水效果的贡献值。

表3 帷幕注浆工程效果综合评分

Table 3 Comprehensive evaluation form for water control effect of the curtain grouting project

指标	原始数据	归一化得分	贡献值	评分依据
孔斜合格率($A1$)	孔斜合格率100%	1.00	0.195	全孔倾斜<1.2%为满分
注浆均匀性($A2$)	变异系数C_v=0.85	0.40	0.026	行业标准C_v<0.5为优
透水率降幅($B1$)	吕荣值≤0.97 Lu	0.90	0.140	规范要求≤3 Lu为优
排水率降幅($B2$)	排水率下降65%	1.00	0.311	降幅50%为满分
裂隙填充率($C1$)	全充填占比41%	0.70	0.075	全充填占比>60%为满分
电阻率重构度($C2$)	高阻区向深部迁移	0.80	0.043	原高阻区电阻率下降值>60%为满分
水头差稳定性($D1$)	稳态水头差140 m	1.00	0.057	稳态水头差>100 m为满分
暴雨期响应度($D2$)	2024年7月水头差保持率85%	0.85	0.048	降雨66 mm时,水头差波动<3 m为满分
总分			0.895	

根据AHP分级,总分为0.895,大于0.85,评价结果为优秀,证明帷幕截流治水工程整体上较为成功。

3.6.2 基于熵值法的帷幕截流工程效果评价

熵值法是一种根据各项指标观测值所提供信息的大小来确定权重的客观方法。信息熵越小,指标的变异程度越大,其提供的信息量越多,权重也应越大。本次研究中选择可以量化的矿山日排水量($X1$)、帷幕上游水位标高($X2$)和帷幕下游水位标高($X3$)作为熵值法评价的关键指标。矿山日排水量选用观测数据,上游水位选择观测孔G97水位观测数据,下游水位选择观测孔GC2水位观测数据。其中帷幕上游水位标高为正向指标,值越大代表帷幕阻水效果越好;矿山日排水量和帷幕下游水位标高为负向指标,值越小代表工程效果越好。分别选取2024年2月工程项目开始($T1$)、2024年9月北排钻孔施工完成($T2$)、2024年12月南排钻孔施工完成($T3$)和2025年2月工程施工结束($T4$)4个关键时间节点作为研究样本,结果见表4。

表4 用熵值法评价帷幕截流效果的原始数据

Table 4 Raw data for evaluating the curtain cut-off effect by the entropy method

样本	$X1$/(m³/d)	$X2$/m	$X3$/m
$T1$	18 659.61	4.1	−41.90
$T2$	11 982.40	22.44	−98.96
$T3$	7 978.43	25.81	−123.26
$T4$	7 839.42	25.60	−122.60

由于指标量纲和方向不同,需对原始数据进行标准化处理,使所有指标转化为正向且无量纲。对于正向指标:

$$y_{ij}=\frac{x_{ij}-\min(x_j)}{\max(x_j)-\min(x_j)} \tag{2}$$

对于负向指标:

$$y_{ij}=\frac{\max(x_j)-x_{ij}}{\max(x_j)-\min(x_j)} \tag{3}$$

计算后的标准化矩阵 $\boldsymbol{T}$ 为:

$$\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0\\ 0.617\,1 & 0.844\,5 & 0.701\,3\\ 0.987\,2 & 1 & 1\\ 1 & 0.990\,3 & 0.991\,9\end{bmatrix} \tag{4}$$

对于每个指标,计算样本的比重 p_{ij}:

$$p_{ij}=\frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}y_{ij}} \tag{5}$$

计算后的比重矩阵 $\boldsymbol{T}'$ 为:

$$\boldsymbol{T}'=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0\\ 0.236\,9 & 0.297\,9 & 0.260\,4\\ 0.379\,0 & 0.352\,7 & 0.371\,3\\ 0.384\,0 & 0.349\,4 & 0.368\,3\end{bmatrix} \tag{6}$$

计算熵值 e_j 的公式为:

$$e_j=-k\sum_{i=1}^{n}p_{ij}\ln(p_{ij}) \tag{7}$$

式中,$k=1/\ln(n)$,n 为样本数量,$n=4$ 时,$k\approx0.721\,3$。$p_{ij}=0$ 时,定义 $\ln(p_{ij})=0$。计算得,$e_1\approx$

0.776,$e_2 \approx 0.789$,$e_3 \approx 0.783$。计算第 j 个指标的权重 w_j 的公式为:

$$w_j = \frac{g_j}{\sum g_j} \tag{8}$$

式中,g_j 为第 j 个指标的差异系数,其计算公式见式(9)。

$$g_j = 1 - e_j \tag{9}$$

计算得:$g_1 = 0.224$,$g_2 = 0.211$,$g_3 = 0.217$。$w_1 \approx 0.343\ 6$,$w_2 \approx 0.323\ 6$,$w_1 \approx 0.332\ 8$,权重分布均匀。

计算第 i 个样本综合得分 s_i 为:

$$s_i = \sum_{j=1}^{m} w_j\, y_{ij} \tag{10}$$

则 $T1$ 的综合得分为 0,$T2$ 的综合得分为 0.718 0,$T3$ 的综合得分为 0.995 4,$T4$ 的综合得分为 0.994 2。

综合得分从 $T1$ 到 $T3$ 逐渐上升,表明工程效果随帷幕施工进度的推进而不断提升,$T3$ 与 $T4$ 得分相近,表明工程在 2024 年 12 月已达到稳定效果,帷幕截流目标已实现。从指标权重来看,矿井排水量、帷幕上游水位与帷幕下游水位权重均衡,说明工程效果需要综合考量。通过熵值法构建的评价模型,客观反映了帷幕截流治水工程的效果,并且进一步验证了AHP评价指标权重的合理性,显示帷幕截流治水工程显著降低了排水量、增大了水位差,达到了预期目标。

4 讨论

4.1 浆液运移流变学控制机制

浆液在裂隙中的扩散模式主要受流变控制与动能控制的竞争关系支配[28-29]。在本工程中,对于开度较小的裂隙(如 5～10 mm),水流流速较低,浆液的屈服应力 τ_0 起主导作用。注入浆液后,浆液能迅速形成以注浆孔为核心的“栓塞体”,有效抵抗动水冲刷,从而实现稳定填充。反之,在 ZJ17 钻孔处的宽大主径流岩溶通道中,地下水流速较高,水流施加的剪切应力可能远大于浆液的屈服应力,此时浆液被动水稀释、冲散,从“栓塞式”填充转变为“絮带状”,导致大量浆液流失,固结效率降低。浆液的固结是一个典型的流固耦合过程,即使在动水冲刷下,浆液中的水泥颗粒在通过微小裂隙或裂隙变径处时,会发生滤积效应,水流携带水泥颗粒运移时,部分颗粒会被裂隙壁面捕获、沉积,逐渐形成低渗透性的滤饼层。此滤饼层一方面增加了后续浆液流动的阻力,改变了局部流场;另一方面为浆液最终凝固提供了“骨架”。本研究采用的间歇注浆策略,正是利用了这一机制。首次注浆后暂停,为滤饼层的形成和浆液初凝提供缓冲时间,后续复注时,浓浆能在已形成的弱骨架基础上进行有效填充和密实,从而显著提高在强动水条件下的浆液留存率。

上述理论解释了本工程中动态调整注浆参数的必要性。在低流速区采用稀浆(1∶1),旨在利用其较好的流动性实现远距离扩散,扩大封堵范围。而在高流速区,及时切换为浓浆(0.8∶1 或 0.6∶1)并辅以间歇注浆,核心目的在于提高浆液的屈服应力,增强其抗冲刷能力,并主动促进滤积效应,从而克服动水的不利影响。ZJ17 孔的浆液流失,正是动能控制机制占优的体现,也指明了未来研究的重点,需建立注浆压力、水灰比与实时动水流速的动态响应模型,实现更为精准的按需注浆。

4.2 AHP 评价模型不确定性分析

研究构建的多维度效果评价体系,结合了注浆量分析、水文观测孔数据、地球物理技术探查和检查孔结石体分析,从不同角度验证了帷幕截流工程的效果,使用 AHP 方法对帷幕截流治水工程效果进行了评价,具有一定的科学性和全面性。在对帷幕截流治水工程效果的评价过程中发现,注浆均匀性($A2$)采用变异系数为评分标准,评分值明显低于其他指标。一方面该指标可以说明注浆过程中浆液分布的连续性不好,注浆压力与注浆配比仍有一定的改善空间,而另一方面说明该指标未考虑到地层裂隙空间分布的不均一性,裂隙空间分布的不均一性同样会对注浆均匀性产生影响。该指标用于评价施工质量有一定的局限性,在未来研究中可考虑如何消除地层不均一性对注浆均匀性的评价影响。水头差稳定性($D2$)指标未能完全反映绕流风险,所选的指标不能很好地考虑绕流风险对施工带来的影响,未来的评价中对此可进一步考虑,建立更完善的工程效果评价体系。

4.3 帷幕长期稳定性与矿区环境地质效应

帷幕体的长期性能主要面临本体劣化与绕流风险。帷幕水泥结石体在长期高水压、地下水化学侵蚀及地应力作用下,其结构强度和抗渗性能可能存在劣化风险。建议未来建立长期监测系统,通过布

置在帷幕体内的渗压计、水质监测孔,定期检测幕体前后水头差与渗流水化学成分变化,评估其性能衰减规律。研究中数值模拟模型已提示存在东侧绕流补给路径,长期来看,幕体南北侧巨大的水头差将持续驱动地下水寻找新的优势径流通道。尤其需警惕幕体端部与天然隔水边界的接触带,以及深部未被完全封堵的微小裂隙,在长期渗透冲刷下可能逐渐扩展形成新的绕流通道。这要求实施周期性水文地质勘查与物探扫描,动态监控区域流场变化,做到风险早识别、早干预。

帷幕工程在保障安全生产的同时,也深刻改变了区域地下水循环模式,引发一系列环境效应。工程大幅减少了矿井疏干排水量,对区域岩溶含水层水资源储存量起到了很好的保护性效应,有助于维持矿区周边泉水流量或民用井水位,避免因大规模疏干引发的地面沉降、地裂缝等环境地质问题,符合绿色矿山建设理念。帷幕南侧水位的显著升高,可能导致浅层地下水埋深变浅,在低洼地带引发土壤次生盐渍化风险。同时,矿坑水与围岩的相互作用时间延长,可能改变水岩化学平衡,需关注矿区排水水质的长期演化趋势,防止有害元素积累。因此,未来的矿山管理应建立“帷幕性能-区域水文-生态环境”一体化综合监测网,将帷幕工程视为一个动态的地下水调控系统进行全生命周期管理,从而实现矿山安全、水资源保护与生态环境稳定的多目标协同。

5 结论

(1) 提出了基于岩溶通道识别的精细化动态注浆工艺。该工艺通过物探与钻探超前识别岩溶发育差异性,并据此动态调整注浆参数,有效解决了传统均匀注浆在复杂岩溶网络中“跑浆”与“充填不足”的难题,为强动水条件下实现岩溶通道的有效封堵提供了技术支撑。

(2) 帷幕截流工程效果显著,数值模拟与现场监测相互验证。FEFLOW 数值模拟准确预测了帷幕墙建成后将形成近 400 m 的水位陡坎,堵水效率约为 65%。工程实践表明,矿区日均排水量下降至 7 770 m^3/d,堵水效率达 66.2%,验证了工程设计合理、效果优异。

(3) 构建了主客观相结合的多维效果综合评价体系。使用 AHP 方法确定了评价模型指标权重,并用熵值法进行对比,增强了 AHP 方法的可信度。评价综合得分为 0.895,表明该帷幕工程的整体效果为“优秀”,并从堵水效能、结构完整性、长期稳定性等多个维度,为帷幕截流工程效果提供了系统性量化评价方法。

(4) 本研究技术范式具有广泛的推广价值,但长期稳定性与环境影响需持续关注。本技术体系为类似水文地质条件的金属矿山提供了可复制的帷幕注浆堵水解决方案。未来工作重点应转向帷幕体材料劣化、绕流风险的监测预警,以及截流工程对区域水资源平衡的生态环境效应评估,实现矿山安全与绿色开发的协同。

参考文献(References):

[1] 陈陆望,武明辉,侯晓伟,等.帷幕墙影响下侏罗系砾岩含水层地下水化学时空演化规律[J].煤田地质与勘探,2025,53(1):174-183.
Chen Luwang, Wu Minghui, Hou Xiaowei, et al. Spatiotemporal evolutionary patterns of the hydrochemistry of Jurassic conglomerate aquifers under the influence of curtain wall[J]. Coal Geology & Exploration,2025,53(1):174-183.

[2] 王晨光,高胜,牛光亮.元宝山露天煤矿疏排水现状与帷幕截水实施效果[J].煤炭工程,2023,55(11):77-82.
Wang Chenguang, Gao Sheng, Niu Guangliang. Present situation of drainage and implementation effect of water cutoff curtain in Yuanbaoshan open-pit coal mine[J]. Coal Engineering,2023,55(11):77-82.

[3] 孔雅茜.南方某石灰石矿矿坑涌水治理效果评价[J].中国矿业,2024,33(增刊 1):392-396.
Kong Yaqian. Evaluation of water inrush control effect of a limestone mine in South China[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(Suppl.1):392-396.

[4] 王海.隐伏火烧区烧变岩含水层水害治理技术研究[J].煤田地质与勘探,2024,52(5):88-97.
Wang Hai. Technologies for water hazard prevention and control in burnt rock aquifers within concealed burnt areas [J]. Coal Geology & Exploration,2024,52(5):88-97.

[5] 许峰.阶梯式导水断层带探查及水害防治技术[J].矿业安全与环保,2023,50(1):82-85.
Xu Feng. Exploration of stepped water conducting fault zone and water disaster prevention technology[J]. Mining Safety & Environmental Protection,2023,50(1):82-85.

[6] 吴松锋,刘忠,李奇,等.流固耦合作用下富水深埋隧道帷幕注浆力学模型[J].科学技术与工程,2022,22(35):15775-15783.

Wu Songfeng, Liu Zhong, Li Qi, et al. Mechanical model of curtain grouting in deep-buried tunnel with abundant water under fluid structure coupling[J]. Science Technology and Engineering,2022,22(35):15775-15783.

[7] 尚宏波,靳德武,柳昭星,等.地下含水层帷幕注浆单液水泥浆扩散规律研究[J].煤炭科学技术,2021,49(11):134-141.
Shang Hongbo, Jin Dewu, Liu Zhaoxing, et al. Research on diffusion law of pure liquid cement slurry for curtain grouting in underground aquifer[J]. Coal Science and Technology,2021,49(11):134-141.

[8] 陈军涛,张毅,武善元,等.黄河北煤田顶底板定向注浆关键技术[J].煤矿安全,2021,52(5):104-111.
Chen Juntao, Zhang Yi, Wu Shanyuan, et al. Key technology of directional grouting in roof and floor of coal field in the north of the Yellow River[J]. Safety in Coal Mines,2021,52(5):104-111.

[9] 陈新,张庆松,王凤刚,等.张马屯铁矿区既有阻水帷幕薄弱区治理技术方案[J].金属矿山,2021(5):190-196.
Chen Xin, Zhang Qingsong, Wang Fenggang, et al. Technical scheme of the integrated treatment for the weakness zone of the existing water plugging curtain in Zhangmatun Iron Mining Area[J]. Metal Mine,2021(5):190-196.

[10] 杨柱,赵恰,黄炳仁.矿山帷幕强动水通道注浆控制技术及工程应用[J].矿业研究与开发,2020,40(12):117-121.
Yang Zhu, Zhao Qia, Huang Bingren. Grouting control technology and engineering application of strong dynamic channel of mine curtain[J]. Mining Research and Development,2020,40(12):117-121.

[11] 罗依珍,成国文,尹利君,等.鸿图嶂隧道突涌水预测及防治措施[J].水文地质工程地质,2020,47(5):64-72.
Luo Yizhen, Cheng Guowen, Yin Lijun, et al. Prediction and prevention of sudden water gushing in the Hongtuzhang tunnel[J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2020,47(5):64-72.

[12] 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 disasterin Jurassic coal field of Ordos Basin[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(7):2367-2375.

[13] 柳昭星,尚宏波,石志远,等.岩溶裂隙发育地层帷幕注浆材料性能及适用性研究[J].煤炭科学技术,2020,48(4):256-265.
Liu Zhaoxing, Shang Hongbo, Shi Zhiyuan, et al. Study on performance and applicability of curtain grouting materi-als in karst fractured stratum[J]. Coal Science and Technology,2020,48(4):256-265.

[14] 齐跃明,周沛,周来,等.考虑采动效应的闭坑矿井水硫酸盐污染规律[J].煤田地质与勘探,2024,52(4):89-100.
Qi Yueming, Zhou Pei, Zhou Lai, et al. Sulphate contamination in an abandoned coal mine in light of mining effects[J]. Coal Geology & Exploration,2024,52(4):89-100.

[15] 苏成志,齐跃明,景佳俊.临湖铁矿开采采场围岩裂隙演化规律及防治水技术研究[J].金属矿山,2023,(12):196-203.
Su Chengzhi, Qi Yueming, Jing Jiajun. Research on the evolution laws of surrounding rock fractures and water control techniques in a Lakeside Iron Ore mining[J]. Metal Mine,2023(12):196-203.

[16] 齐跃明,李民族,许进鹏.复杂地质条件下的突水疏放试验及水文地质意义[J].采矿与安全工程学报,2016,33(1):140-145.
Qi Yueming, Li Minzu, Xu Jinpeng. Draining test of mine water inrush under complex geological conditions and its hydrogeological significance[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2016,33(1):140-145.

[17] Yuan Shichong, Han Guilei, Liu Dajin, et al. Multicriteria risk assessment of water inrush in underground mines with large-scale curtain grouting: a mine disaster risk reduction strategy[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk,2024,5(1):2409200.

[18] Zhe Yalei, Hou Kepeng, Liang Wei, et al. Research on sustainable mining and water prevention in large open-pit water deposits[J]. Sustainability,2023,15:10238.

[19] Zhang Jiaxing, Pei Xiangjun, He Zhihao, et al. Comparison of time-dependent viscosity slurry and cement-clay slurry for anti-seepage grouting on faults[J]. Frontiers in Earth Science,2022,10:1037791.

[20] 陈泓,黄永辉,张智宇,等.基于 PSO-BP 神经网络的单位注浆量预测[J].有色金属(中英文),2025,15(2):288-297.
Chen Hong, Huang Yonghui, Zhang Zhiyu, et al. PSO-BP neural network based unit grouting volume prediction[J]. Nonferrous Metals,2025,15(2):288-297.

[21] 汤振,蒋小珍,陈立根,等.龙门县某石灰岩采石场帷幕止水工程及注浆效果评价[J].中国岩溶,2022,41(1):47-58.
Tang Zhen, Jiang Xiaozhen, Chen Ligen, et al. Groundwater sealing by grouting curtain technique and its grouting effect evaluation of a limestone quarry in Longmen county[J]. Carsologica Sinica,2022,41(1):47-58.

[22] Zhu Yushan, Wang Xiaoling, Deng Shaohui, et al. Evaluation of curtain grouting efficiency by cloud model-based fuzzy comprehensive evaluation method[J]. KSCE Journal of Civil Engineering,2019,23(7):2852-2866.

[23] Tao Xiangling, Ma Jinrong, Zeng Wei. Treatment effect investigation of underground continuous impervious curtain application in water-rich strata[J]. International Journal of Mining Science and Technology,2015,25(6):975-981.

[24] Zhao Yong, Yang Tianhong, Deng Wenxue, et al. Location and mechanism analysis of curtain water inrush channels based on MT derived parameters: a case study[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 138: 105377.

[25] Kong Bei, Han Lijun, Zheng Jiongze. Study on formation mechanism of advance grouting curtain in ore-rock contact zone in water-rich roadway[J]. Applied Sciences, 2024, 14(14): 6257.

[26] Fan Guichao, Zhong Denghua, Yan Fugen, et al. A hybrid fuzzy evaluation method for curtain grouting efficiency assessment based on an AHP method extended by D numbers [J]. Expert Systems With Applications, 2016, 44: 289-303.

[27] Jenifer M Annie, Jha Madan K. Comparison of analytic hierarchy process, catastrophe and entropy techniques for evaluating groundwater prospect of hard-rock aquifer systems[J]. Journal of Hydrology, 2017, 548(5): 605-624.

[28] Liang Xiaoming, Feng Kun, Wang Chenlin, et al. Evaluation of rheology and washout resistance of cement-based grouts in water-rich strata [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, 157: 106334.

[29] Yoon Jinyoung, Kim Hyunjun, Shin Sungwoo, et al. Rheology-based determination of injectable grout fluidity for preplaced aggregate concrete using ultrasonic tomography [J]. Construction and Building Materials, 2020, 260: 120447.