

贵州裸露型岩溶地下河系统污染防治技术

——以遵义坪桥地下河系统污染防治工程为例

陈涛^{1,2}, 赵华宣^{1,2}, 李强^{1,2}, 赵彬^{1,2},

陈浩^{1,2}, 江峰^{1,2}, 易世友^{1,2}, 高峰^{1,2}

(1. 贵州省地质矿产勘查开发局114地质大队, 贵州遵义563000;

2. 贵州省地矿局第二工程勘察院有限公司, 贵州遵义563000)

摘要: 裸露型岩溶区岩溶强发育、水文地质条件复杂, 受污染的地下河系统通道隐蔽性强、污染防治难度大。本文以坪桥地下河系统污染防治工程为例, 在近污染源的主径流通道实施“地下水防渗帷幕+污水抽排”工程措施实现近源截排。施工面临岩溶破碎地层易掉块卡埋钻、钻效低及岩溶强发育段浆液扩散距离远等难题。通过配备适宜的钻进工艺, 采取纯压式灌浆、水泥砂浆灌填溶洞、低压限量及速凝浆液灌注等灌浆控制措施, 保证了工程进度质量, 实现了源头治理污染地下水的目的。“近源截排”对类似水文地质条件下地下水污染防治提供可借鉴的地质治理模式。

关键词: 裸露型岩溶; 地下河系统; 污染防治; 防渗帷幕; 近源截排; 浆液流距控制; 地质治理

中图分类号: P634; X52 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2024)03-0060-09

Pollution prevention technology for exposed karst underground river systems in Guizhou: Taking the pollution prevention project of Pingqiao Underground River System in Zunyi as an example

CHEN Tao^{1,2}, ZHAO Huaxuan^{1,2}, LI Qiang^{1,2}, ZHAO Bin^{1,2},

CHEN Hao^{1,2}, JIANG Feng^{1,2}, YI Shiyu^{1,2}, GAO Feng^{1,2}

(1. 114 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development
of Guizhou Province, Zunyi Guizhou 563000, China;

2. 2nd Engineering Investigation Institute, Guizhou Bureau of Geology and Mineral, Zunyi Guizhou 563000, China)

Abstract: The exposed karst areas has the characteristics of strong karst development and complex hydrogeological conditions, which leads to the concealed nature of the channels in underground river systems and the challenges for pollution prevention. Taking pollution prevention project in Pingqiao Underground River System as an example, the measure of “underground impermeable curtain + sewage pumping and drainage” was used in the main flow channels near the pollution source to realize “near source drainage truncation”. The construction faced difficulties such as

收稿日期: 2024-01-06; 修回日期: 2024-04-14 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.03.008

基金项目: 贵州省科学技术厅重大科技成果转化项目“地下河走向物理化学探测及数字地图绘制技术集成与应用”(编号: 黔科合成果[2023]重大006); 贵州省地质矿产勘查开发局重大科研项目“贵州岩溶地下水环境污染勘查与地质治理关键技术研究”(编号: 黔地矿科合[2022]2号)

第一作者: 陈涛, 男, 汉族, 1991年生, 工程师, 探矿工程专业, 主要从事钻探施工管理及技术研究工作, 贵州省遵义市银河北路桃溪河畔喜来登酒店国际商务中心13~16层, 1352732461@qq.com。

通信作者: 赵华宣, 男, 汉族, 1968年生, 研究员, 探矿工程专业, 主要从事钻探技术及管理, 贵州省遵义市银河北路桃溪河畔喜来登酒店国际商务中心13~16层, 1060440458@qq.com。

引用格式: 陈涛, 赵华宣, 李强, 等. 贵州裸露型岩溶地下河系统污染防治技术——以遵义坪桥地下河系统污染防治工程为例[J]. 钻探工程, 2024, 51(3): 60-68.

CHEN Tao, ZHAO Huaxuan, LI Qiang, et al. Pollution prevention technology for exposed karst underground river systems in Guizhou: Taking the pollution prevention project of Pingqiao Underground River System in Zunyi as an example[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(3): 60-68.

blockages and low drilling efficiency due to complex karst fragmentation and excessive waste of materials due to long grout flow distances in strong karst segments. Effective technical measures such as suitable drilling techniques, pure pressure grouting, cement mortar grouting to fill dissolution voids, low-pressure and limited volume grouting and accelerated slurry grouting were employed to ensure the quality of the project, which achieved the goal of contaminated groundwater treatment from the source. The technology of "near source drainage truncation" provides a replicable geoscientific management model for contaminated groundwater prevention in analogous hydrogeological conditions.

Key words: exposed karst; underground river system; pollution prevention; impermeable curtain; near source drainage truncation; grout flow distance control; geoscientific management

0 引言

贵州处于我国西南岩溶地区核心地带,是长江珠江上游重要的生态屏障,岩溶地下水是贵州生产生活的重要水源和生态环境的重要组成部分^[1]。历史原因老渣堆建在裸露的溶洞、裂隙之上且未采取有效防渗措施^[2],降雨汇集堆场与废渣接触形成富含污染组分的淋滤液通过天窗、落水洞、伏流入口等溶洞管道以径流方式快速运移进入地下水层,岩溶山区双层结构特征地表水和地下水频繁转换与相互补给造成下游地下河/地表水系统双重污染^[3-5],恶化当地和两江生态环境。对贵州裸露型岩溶受污染地下河系统实施有效工程防治措施尤为急迫。

贵州裸露型岩溶山区地表岩溶洼地、落水洞、天窗等个体形态密布,岩溶强烈发育,含水性极不均一,地下河系统发育,岩溶水文地质条件复杂、岩溶通道隐蔽性强及各向异性、污染防治难度大^[6-7]。本文介绍了裸露型岩溶地下河系统污染防治的工程措施,通过优选钻进工艺和灌浆方式,采用适宜于强岩溶区帷幕灌浆的施工技术,解决了裸露型岩溶山区污染防治工程施工中的技术难题,为类似复杂条件下地下水污染防治工程施工提供借鉴和参考。

1 概况

1.1 工程概况

长江经济带西南裸露型岩溶山区遵义市坪桥地下河系统污染防治试点项目(一期)是2021年第一批中央水污染防治资金预算项目及首个西南岩溶地下河污染修复类项目,共分为6个阶段实施,其中项目治理工程(简称“遵义坪桥地下河系统污染防治工程”)属于最关键的阶段。工程地点位于遵义市红花岗区深溪镇坪桥工业园区,紧邻坪桥工业园区1号、2号废渣处置场。场内高污染浓度渗滤液经1号、2号废渣处置场间径流污染通道进入地下水系统,恶化坪桥地下河出口及湘江河水质。在勘察

探明径流污染通道之一(处置场2号坝东部抽排竖井—J02监测井—CK6、CK11钻孔一线)^[7]的地下水系统上游邻近废渣堆场区域实施“地下水防渗帷幕+污水抽排”的近源截排工程防治措施,实施防渗帷幕灌浆孔196个、抽排井2个及渗流观测孔4个,帷幕钻孔总进尺13941.69 m,达到源头阻控受污染地下水、防止污染进一步扩散和改善下游湘江河水质的地下水系统污染防治效益。

1.2 地层特征

工程区属裸露型岩溶区,大面积出露三叠系中统关岭组第二段(T_2g^2)地层,上部灰色、深灰色灰岩夹泥质灰岩为主,下部暗灰色泥质条带灰岩夹泥岩、灰岩等。标高800 m至地表岩溶强发育、标高800 m以下岩溶微发育(相对隔水层),工程区地层岩溶结构及特征见表1。

1.3 工程设计

1.3.1 防治方案及优化

1.3.1.1 防渗帷幕+污水抽排方案

从阻隔、抽出处理、可渗透反应格栅、监测自然衰减、原位化学氧化/还原、原位生物修复、渗透反应墙等地下水污染防治常用技术^[8]中筛选阻隔、渗透反应墙、抽出处理3种备选方案,根据项目特点从技术可接受性、成熟度、有效性、修复时间、环境影响方面采用矩阵法评分法分析评价,选用阻隔与抽出处理(回抽利用)结合技术。

污染源处于岩溶地下水系统上游区域,地下水来水量和污染源附近受污染地下水水量远小于出口水量,对应处理成本也低很多。含水溶蚀裂隙分散,无法直接利用钻孔将大部分污染水抽出处理,需在污染源下游合适的污染通道断面上实施地下帷幕工程,将污染地下水进行截流蓄积后再利用排污钻孔抽出地表进行处理或回用(图1)。

1.3.1.2 方案优化

防治工程实施应消除废渣渗滤液经已治理污

表1 工程区地层岩溶结构及特征

Table 1 Karst structure and characteristics in working area

岩溶带	地层岩性特征	存在问题
岩溶强发育	标高800 m至地表为三叠系中统关岭组第二段(T_2g^2)灰岩:岩溶裂隙溶洞总体较发育,其中标高815~823 m局部岩溶强发育,见0.2~0.5 m无充填溶洞,岩体破碎,透水性中—强,线岩溶率21.19~35.06%,透水率10~95.9 Lu(溶洞发育的强岩溶段40.0~95.9 Lu),全漏失、钻屑随钻遇裂隙、溶洞流失。枯水期地下水位标高813.78~816.303 m,即地面以下56.7~59.20 m,丰水期水位标高823.98~825.0 m,地下水污染通道标高812~815 m	(1)岩溶发育破碎地层易孔斜; (2)岩溶裂隙、溶洞发育的有效段常规浆液漏失严重、易窜浆、浆液扩散距离远及且灌注十分困难,对工程成本、进度等影响大;
岩溶微发育	标高800 m以深为三叠系中统关岭组第二段(T_2g^2)泥质灰岩:岩溶微发育,线岩溶率为0~8.88%、透水率<10 Lu,进入泥质灰岩段约10 m后<1 Lu,为相对隔水层	(3)无效段孔壁见掉块和窜浆,易卡塞或固结钻具、灌浆栓塞, (4)取心钻进钻效低

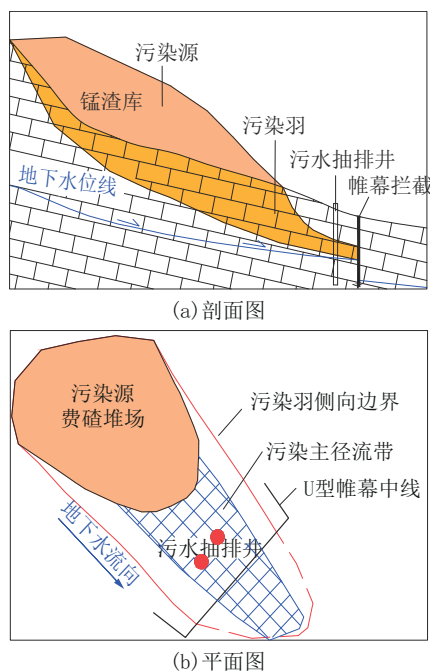


图1 “防渗帷幕+污水抽排”方案示意

Fig.1 Schematic diagram of “anti-seepage curtain+ sewage pumping and drainage” scheme

染径流通道(带)或其他通道(防渗帷幕抬高局部地下水水位)影响/污染下游地下水水质,需有效控制防渗帷幕顶界高程,截断污染主径流带并形成有效的污染水截流调蓄库。根据勘察结果、现场施工条件及工程费用等作下述优化:

(1)防渗帷幕工程垂直于地下水污染主径流带、两侧边界以勘察探明的污染羽侧向边界外延并结合现场施工条件,帷幕轴线在边界处折向污染源呈“U”型布置、帷幕轴线长150 m,形成帷幕调蓄库截流蓄积污染地下水。

(2)帷幕顶界高程830 m,即以区内丰水期历史

最高地下水水位高程(825 m)+5 m为准,帷幕底界揭穿下部泥质灰岩夹泥岩弱透水层10 m。

(3)污染抽排孔布置在帷幕上游与污染源之间的污染主径流带上,及时抽出蓄积污染水。

1.3.2 防治工程

1.3.2.1 防渗帷幕

防渗帷幕采用双排钻孔防渗,孔距和排距均为1.5 m,梅花型布置,计196个灌浆孔。施工次序先下游排(X排)后上游排(S排),上、下游排按2序施工,Ⅰ序孔和Ⅱ序孔均距3 m。帷幕钻孔顶高程873~876 m、底高程787~821 m(以进入泥质灰岩>10 m),帷幕顶界(高程830 m)以下是有效段,高程830 m至地表为无效段,钻孔终孔孔径 ≥ 75 mm,注浆压力 ≤ 1.0 MPa。

1.3.2.2 渗流观测孔

帷幕工程上下游各设2个渗流观测孔以直观反映检验帷幕工程防渗质量与效果,孔深70.0 m、孔径 ≥ 75 mm。

1.3.2.3 抽排井

帷幕上游与污染源之间的主径流带设2口抽排井,及时抽出地下帷幕工程汇集的受污染地下水,孔深80 m(进入泥质灰岩段约10 m), $\Phi 219$ mm实/滤管护壁成井,并配备自动抽水控制系统,实时抽出蓄积的污染水。

2 技术难题

(1)帷幕钻孔数量多、工序繁琐、工期紧张(工期3个月),常规的施工组织作业方式和取心钻进工艺不满足工期要求。

(2)施工区域岩溶强发育,裂隙溶洞分布密集、

岩体破碎,钻孔易偏移或垮塌掉块卡钻^[9]。

(3)主径流带干溶洞和连续性裂隙发育,且通道连通性极好,常规的灌浆措施浆液扩散距离远、帷幕形态不可控、灌注时间长、注浆量大^[10],特别是浆液远距离扩散后对主径流带岩溶通道造成永久性堵塞,无法形成有效的污染水截流调蓄库。

(4)相邻钻孔灌浆段岩溶裂隙相互窜通,灌注浆液易受相邻钻孔钻井液冲蚀、稀释影响,造成防渗质量降低及浆液上窜固结钻孔内钻具引发孔内事故。

3 工程施工

3.1 防渗帷幕施工

3.1.1 进度控制

根据帷幕钻孔施工顺序、工作量及技术和工期要素,投入3个作业班组全天候作业,根据3个班组设备能力、数量、技能水平、区段帷幕钻孔深度(有效段长度)、岩溶发育情况等将帷幕钻孔分3个作业区段,以40 d完成帷幕钻孔,60 d完成防渗帷幕全部工作。防渗帷幕钻孔施工主要设备投入及帷幕钻孔计划见表2。

表2 帷幕钻孔施工主要设备投入及帷幕钻孔计划

Table 2 Main equipment and plan for curtain drilling construction

设备名称	规格型号	数量	施工部位	区 段	单机效率/(孔·台 ⁻¹)	单孔用时/(d·孔 ⁻¹)	孔深/m	有效段/m
钻机(含泵)	JDL300	4	1班组	X1~X20,S1~S19	9.0	3.89	86.8~84.4	42.8~40.4
	XY180	10	2班组	X21~X68,S20~S67	8.4	4.16	83.9~62.4	39.9~18.4
	XY-2	6	3班组	X69~X99,S68~S97	9.33	3.75	62.1~54.5	18.1~8.8
帷幕灌浆	GZJ400型高速制浆机/ATT8500F型自动记录仪各3套、双层搅拌桶6台、BW250型泥浆泵6台、200 kW发电机组1台							
其他	KXP-1型测斜仪6套、JP150型砂浆搅拌机3台							

3.1.2 钻孔施工

3.1.2.1 钻进工艺与钻孔结构

钻孔结构和钻进工艺是帷幕施工的关键要素,其孔径与钻进效率直接影响帷幕施工效率、质量及成本^[11]。施工中为保证钻孔质量、提高钻进效率要素,采用金钢石单管取心钻进、绳索取心钻进、复合片全面碎岩钻进及相应的钻孔结构。

(1)先导孔金刚石提钻取心钻进:开孔 $\varnothing 110$ mm、终孔 $\varnothing 91$ mm,钻时3.5~4.5 d/孔、灌注0.5~1.5 d/孔。

(2)质量检查孔绳索取心钻进:开孔 $\varnothing 110$ mm、终孔 $\varnothing 75$ mm,钻时2.5~3.0 d/孔、较金钢石提钻取心钻进缩短1.0~1.5 d/孔,提高了钻进效率和岩心采取率。

(3)全面破碎钻进:一般灌浆孔采用复合片全面破碎钻进,在试验3个钻孔后推广,岩屑随钻遇的裂隙溶洞流失、各灌段孔斜偏差 $<1.5\%$ 、孔内沉砂(0.15~0.18 <0.2 m)等钻孔质量指标均满足要求,钻时2.0~2.5 d/孔,较取心钻进缩短1.5~2.0 d/孔。帷幕工程实际施工时间52 d,比预计提前8 d,提速效果较好。

3.1.2.2 主要技术措施

(1)大区域协作、小区块突进加快施工进度。

(2)相邻钻孔错深 >15 m,错时进入有效段,避

免灌注浆液冲失、稀释,并防止浆液上窜固结孔内钻具引发孔内事故。

(3)钻进过程中应详细记录岩性变化和裂隙溶洞的位置、规模及充填情况等,有效段遇较大的溶洞,需将该溶洞单独作灌浆填充处理直至压水试验满足要求后再继续钻进。

(4)钻孔偏距(孔斜)控制措施。岩溶强发育地层裂隙溶洞分布密集、岩体破碎,钻孔轴线极易偏斜导致偏距超出设计和规程要求,采取了以下偏距(孔斜)预防措施:①钻机安装后调平钻机、校直立轴,确保三角架中心、立轴中心及钻孔中心三点一线,并定期校核钻机水平;②使用长直粗径钻具防斜,钻具长度 ≤ 4.5 m、钻头与钻具直径差6~10 mm;③加密测控斜:孔口以下10 m、20 m孔深测一次孔斜(计算偏距),帷幕灌浆段每灌段测一次孔斜,偏距(孔斜)超过允许值,及时采取措施纠偏;④使用较低钻压和转速控制防斜: $\varnothing 110$ mm孔径钻压7~8 kN、 $\varnothing 91$ mm孔径钻压6~7 kN、 $\varnothing 75$ mm孔径钻压5~6 kN,转速200~300 r/min;⑤钻遇岩溶裂隙(溶洞)和地层变化,适当减速降压,随时注意纠正钻孔偏斜。控斜效果见表3,帷幕灌浆钻孔施工196个,各深度段钻孔偏距均小于设计及技术规程,

帷幕钻孔施工偏距与孔斜控制措施有效,效果较好。

表3 帷幕钻孔偏距(孔斜)控制效果
Table 3 Preventive effects of curtain drilling offset (deviation)

钻孔深度/ m	孔数/ 个	设计/规程 允许偏距/m	实际偏距/ m	结论
54.60~60.34	56	1.29~1.5	0.32~0.55	满足要求
61.45~70.00	40	1.5~1.75	0.35~0.67	满足要求
70.00~80.00	44	1.75~2.0	0.45~0.68	满足要求
80.00~87.65	56	2.0~2.17	0.55~0.85	满足要求

3.1.3 灌注施工

3.1.3.1 灌注工艺与压力

灌浆孔无效段距离长、岩溶裂隙发育、岩体破碎,易掉块卡埋灌浆栓塞,有效段裂隙溶洞较发育,从施工安全和进度方面考虑,采用设备较简单、操作便利、有利于加快施工速度的纯压式灌注工艺^[12-14]。灌注结束压力1.0 MPa(敏感地层0.8 MPa)。

3.1.3.2 浆液制备

(1)制浆材料以P.O42.5普通硅酸盐水泥(80 μm孔筛余量<5%)为主,大岩溶裂隙/溶洞添加粉煤灰、水玻璃。

(2)高速搅拌机(转速<1200 r/min)制浆、搅拌时间<30 s。

3.1.3.3 帷幕灌浆

(1)开灌比根据灌段透水率调整: $q \leq 20$ Lu时开灌比5:1; $q = 20 \sim 30$ Lu时开灌比3:1; $q = 30 \sim 40$ Lu时开灌比2:1; $q > 40$ Lu时开灌比1:1、复灌0.5:1。

(2)灌浆压力从低压逐步升高至达到设计压力,先以0.3~0.6 MPa压力灌浆后逐步升高,结束压力1.0 MPa,敏感地层(压力无增加、注入量猛增、无充填溶洞)适当降低<0.8 MPa。

(3)流量根据灌段透水率控制:透水率 $q < 5$ Lu时流量2~3 L/min; $q = 5 \sim 10$ Lu时流量3~5 L/min; $q = 10 \sim 20$ Lu时流量8~10 L/min; $q > 20$ Lu时流量>10 L/min,快速灌完已拌制好的浓浆液。

(4)浆液配比调整:压力不变、注入率持续减少,浆液配比不变;浆液注入量>300 L或灌注时间已达30 min而灌浆压力和注入率均无改变或改变

不显著,灌浓一级浆液;注入率>30 L/min越级浓浆灌注。

(5)灌注结束:压力1.0 MPa、注入率>1 L/min、屏浆30 min平均注入率>1 L/min,岩溶裂隙、溶洞发育灌段以灌注量控制浆液扩散距离,已灌注水泥量达2.0 t(注入量400 kg/m)未达结束标准,待凝复灌。

3.1.4 强岩溶带流距控制

主径流带及附近部分帷幕钻孔有效段溶蚀裂隙、溶洞强发育,透水率一般 ≥ 50 Lu,常规灌注措施存在浆液扩散距离远、灌注时间长、灌注材料浪费大等灌浆难题,同时浆液远距离扩散易大范围堵塞地下水通道引发地下水系统水力学环境改变。施工中根据岩溶发育情况以及透水率结果分类采取浆液扩散控制技术措施,有效的将浆液扩散范围控制在一定范围内形成防渗帷幕墙(图2)。

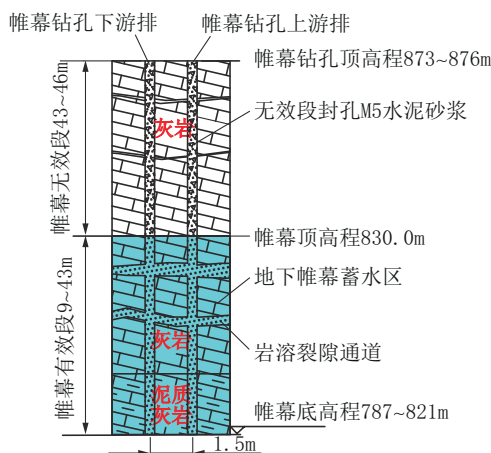


图2 防渗帷幕墙剖面

Fig.2 Cross sectional view of the impermeable curtain wall

(1)水泥砂浆灌填溶洞:下游排I序孔在污染主径流带5个帷幕钻孔标高815~823 m遇0.2~0.5 m溶洞,采用导管灌注水泥砂浆灌填溶洞空间“先堵”的措施^[15]。确定溶洞顶、底位置、溶洞高度及充填状况后下 $\varnothing 68$ mm \times 5.5 mm导管至距溶洞底0.2~0.3 m、上接导料漏斗,按溶洞高度配制0.4:1:0.8~0.43:1:1的高强度水泥砂浆(砂粒径<5 mm),试验性能参数:稠度120~150 mm,坍落度80~120 mm,3 d强度14.8~15.7 MPa,溶洞规模大时砂浆稠度低,经漏斗和导管下行灌填溶洞空间,采用限量、分次多层灌填控制浆液使用量和扩散距离,每次灌填厚度

0.08~0.15 m,前次灌浆初凝后探明剩余空洞高度,后续灌至填满溶洞空间(图3)。遇溶洞的帷幕钻孔经分次多层砂浆灌填后,溶洞连通性减弱,周边钻孔相近深度钻遇大型溶洞的风险和岩层透水率明显降低,灌注时浆液扩散距离和浆液消耗量大幅减少,降本增效效果显著。

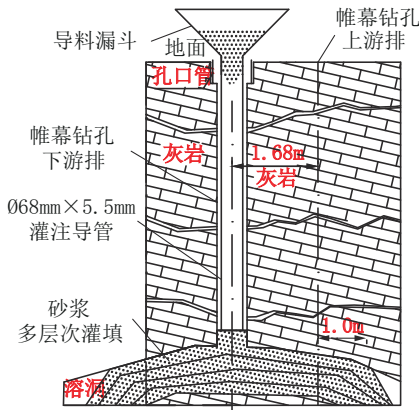


图3 砂浆灌填溶洞示意

Fig.3 Schematic diagram of mortar grouting in dissolution voids

(2)水泥注入量达400 kg/m仍不起压或低压维持不变,采用低压、限流、限量等自流式灌浆^[16],控制注入率在10~30 L/min,候凝4~5 h复灌至达到结束条件。

(3)速凝浆液+自流式限灌:水泥注入量达800 kg/m仍不起压,添加3~5%水玻璃加快水泥浆在通道中变稠/凝固,缩短浆液扩散距离,同时控制注入率10~30 L/min、候凝2~3 h复灌至达到结束条件。

(4)现场试验水:水泥:粉煤灰比例为0.6:1:0.3的水泥粉煤灰混合浆液^[17],试验性能参数:析水率2.6%、7 d强度9.8 MPa、28 d强度19.2 MPa、马氏漏斗粘度55 s、防渗等级>W8,混合浆液的稳定性、流动性、结石强度及防渗性能满足帷幕灌注要求。灌注600 m³混合浆液较同量水灰比0.5:1的纯水泥浆减少水泥用量246 t,降低成本10.9万元,降低工程成本和减少环境污染效果较好。

3.2 抽排井施工

3.2.1 钻进工艺与钻孔结构

根据钻遇地层岩性、水文地质特征对钻进效率的影响,为确保抽排井施工质量和提高钻井效率,

使用长粗径硬质合金钻具取心钻进和空气潜孔锤钻进。

(1)长粗径合金钻具圆孔防斜。表层段0~1.50 m为第四系为粘土夹砾石,采用 $\varnothing 300$ mm空气潜孔锤钻进3.0 m,并以 $\varnothing 280$ mm长粗径合金防斜钻具圆洗孔,下 $\varnothing 273$ mm管并水泥固结止水。

(2)空气潜孔锤钻进。基岩段采用能实时采集井内岩溶裂隙通道情况和受污染地下水埋深、涌水量等特征参数并疏通污染水来水通道及井底清洁和钻效较高^[18-20]的空气潜孔锤钻进。以小径探污染水、大径扩孔成井的方式提高效率并降低成本,表层护壁管水泥固结后以 $\varnothing 165$ mm孔径钻进,揭露污染水通道和试抽水确定钻孔污水量后, $\varnothing 245$ mm扩孔下 $\varnothing 219$ mm管(滤/实)成井。

3.2.2 自动控制抽水

两口排污井分别采用10 m³/h与20 m³/h深井潜水泵,抽水设备配备自动控制系统,通过感应井内水位变化实现自动启停,实时抽出蓄积的污染水。设置好启停的水位深度数据,井内水位达到高程823.0 m时启动抽水设备,降至高程813.0 m时关闭抽水设备^[21](图4)。

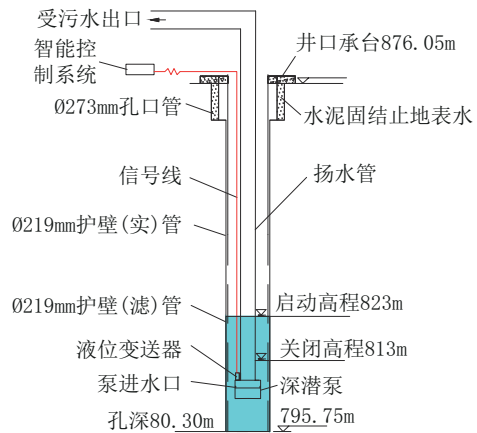


图4 自动控制抽水设施安装示意

Fig.4 Schematic diagram of installation of the automatic induction pumping facility

4 帷幕质量检验

帷幕灌浆结束后,每单元及灌注量大或岩溶强发育部位实施18个检查孔,加权平均透水率为0.42~2.51<3 Lu。污染主径流通道3~4单元6个检查孔与邻近钻孔灌浆前压水试验结果(表4)。通

6.39 mg/L);停止抽水地下水位溢出地下帷幕墙顶部,地下河出口 NH_4^+ 、 Mn^{2+} 浓度明显上升。

5.3 企业用水、下游污水处理费用双节约

抽排井抽出含 NH_4^+ 、 Mn^{2+} 的污染水进入坪桥工业园废渣处置场渗滤液中转池,由遵义天磁锰业集团回用。以平均每日抽水量 500 m^3 、水费 $3.0\text{ 元}/\text{m}^3$ 计算,节约企业用水费用约55万元/年。下游污水处理厂按每日减少污水量 500 m^3 、污水处理费以 $15.0\text{ 元}/\text{m}^3$ 计算,减少污水处理费用约274万元/年。

6 结论与建议

(1)地下水帷幕工程汇集受污染的地下水、抬升受污染地下水水位形成地下调蓄库,实现源头阻控受污染地下水、防止污染进一步扩散和改善下游江河水质的地下水系统污染防治效益。

(2)通过对地下水系统上游邻近污染源的污染主径流通道实施“近源截排”,对污染地下水开展近源抽排并回用,降低下游污染受体的污染物排放浓度,极大程度缓解甚至清除末端高昂持续的污水处理投入问题,建议政府和有关企业制定相关标准规范,推广该项技术。

(3)强岩溶带采用水泥砂浆分次多层限量灌填溶洞、速凝浆液+自流式限灌以及低压、限流、限量自流式灌浆等灌浆工艺,在帷幕线一定范围内形成防渗帷幕墙,有效控制浆液扩散范围,避免浆液远距离扩散堵塞周边的地下水通道。

(4)污染源处于水文地质条件复杂的地下水系统上游区域的污染治理项目,采用“近源截排”的地下水污染防治地质治理模式是可行和有效的。

参考文献(References):

- [1] 王明章.论贵州省岩溶石山地区的岩溶地下水开发[J].贵州地质,1999(3):259-265.
WANG Mingzhang. Discussion on the development of karst stone underground water of karst mountainous region, Guizhou [J]. Guizhou Geology, 1999(3):259-265.
- [2] 肖筱瑜,李衡,张静,等.岩溶型尾矿库渗滤液重金属污染防治技术研究进展[J].矿产与地质,2013,27(2):173-176.
XIAO Xiaoyu, LI Heng, ZHANG Jing, et al. Research progress on heavy metal pollution prevention technology of leachate from karst type tailings pond[J]. Miner Resouces and Geology, 2013, 27(2):173-176.
- [3] 罗维,杨秀丽,宁黎元,等.贵州省主要碳酸盐岩含水层污染现状与特征[J].地球科学,2019,44(9):2851-2861.
LUO Wei, YANG Xiuli, NING Liyuan, et al. Pollution status

- characteristics of main carbonate aquifers in Guizhon Province[J]. Earth Science, 2019, 44(9):2851-2861.
- [4] 李贵仁,鄔立.强岩溶地区历史遗留渣堆地下水污染治理技术研究[J].现代矿业,2019,35(3):193-195.
LI Guiren, WU Li. Study on groundwater pollution treatment technology of historical residue in strong karst area[J]. Modern mining, 2019, 35(3):193-195.
- [5] 陈俭友,易世友,顾和孝.坪桥工业矿废渣影响下的典型裸露型岩溶水文地球化学特征与控制因素研究[J].地下水,2021,43(5):43-49.
CHEN Jianyou, YI Shiyu, GU Hexiao. Hydrogeochemical characteristics and control factors of typical exposed karst affected by Ping Bridge industrial mine waste[J]. Ground Water, 2021, 43(5):43-49.
- [6] 宁航,王宗星,柳富田,等.基于系统空间特征识别的岩溶地下水污染成因分析[J].地质科技通报,2022,41(5):367-376.
NING Hang, WANG Zongxing, LIU Futian, et al. Genesis of karst groundwater contamination based on system spatial feature recognition[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(5):367-376.
- [7] 易世友,李强,高峰,等.遵义市坪桥地下河系统污染源及污染通道研究[J].地下水,2023,45(5):43-46.
YI Shiyu, LI Qiang, GAO Fen, et al. Study on pollution source and pollution passage of Pingqiao underground river system in Zunyi City[J]. Ground water, 2023, 45(5):43-46.
- [8] 刘伟江,等.地下水污染风险管控与修复技术手册[M].北京:中国环境出版集团,2021.
LIU Weiyang, et al. Research Progress and Prospect of Groundwater Pump and Treat Technology[M]. Beijing: China Environment Publishing Group, 2021.
- [9] 邓鹏,黄明勇,方青,等.贵州省旦坪铝土矿钻探施工工艺[J].钻探工程,2021,48(3):78-85.
DENG Peng, HUANG Mingyong, FANG Qing, et al. Exploration drilling technology for the Danping Bauxite Mine in Guizhou Province[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(3):78-85.
- [10] 汪文萍,蒋买勇,曹磊.岩溶堤坝控制注浆浆液扩散机制与工程应用[J].人民黄河,2018,40(1):140-143.
WANG Wenping, JIANG Maiyong, CAO Lei. Diffusion mechanism and application of high efficiency control of grouting in embankment karst[J]. Yellow River, 2018, 40(1):140-143.
- [11] 陈浩,赵华宣,贾玉川,等.贵州岩溶疏干区浅层地热能地埋管施工技术[J].钻探工程,2021,48(3):170-177.
CHEN Hao, ZHAO Huaxuan, JIA Yuchuan, et al. Placement of shallow geothermal heat pipes in the dewatered karst area of Guizhou Province[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(3):170-177.
- [12] 李万全,夏焰光.铜多金属矿帷幕注浆堵水方案研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程). 2012,39(1):68-72.
LI Wanquan, XIA Yanguang. Scheme study on curtain grouting for water blocking in copper polymetallic deposit [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(1):68-72.
- [13] 付壮.纯压式深孔岩溶帷幕灌浆技术[J].水利建设与管理,2020,40(3):53-572.
FU Zhuang. Pure pressure deep hole karst curtain grouting technology[J]. Water Conservancy Construction and Management,

- 2020, 40(3):53-57.
- [14] 田原. 水库帷幕灌浆中纯压式灌浆的施工流程[J]. 内蒙古水利, 2015(5):50-51.
TIAN Yuan. Construction flow of pure pressure grouting in curtain grouting of reservoir[J]. Inner Mongolia Water Resources, 2015(5):50-51.
- [15] 张正雄. 岩溶坝基帷幕灌浆高注浆量控制措施与效果分析[J]. 钻探工程, 2021, 48(7):121-125.
ZHANG Zhengxiong. Measures and effect of high grouting volume control in curtain grouting for karst dam foundation[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(7):121-125.
- [16] 王伏春, 刘源, 乐应. 强岩溶地区动水注浆技术探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(2):78-81.
WANG Fuchun, LIU Yuan, YUE Ying. Discussion on dynamic water grouting technique in strong karst area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(2):78-81.
- [17] 刘常新. 水库坝基帷幕灌浆用水泥粉煤灰混合浆液性能分析[J]. 黑龙江水利科技, 2021, 49(1):16-19.
LIU Changxin. Performance analysis of cement and fly ash mixed grout for dam foundation curtain grouting[J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2021, 49(1):16-19.
- [18] 高起前, 曾四和. 气动潜孔锤打基岩井钻进过程中初见水位与含水层的判别与应用[J]. 四川地质学报, 2011, 31(11):18-21.
GAO Qiqian, ZENG Sihe. Identification and application of initial water level and water bearing stratum during pneumatic down hole air hammer drilling bedrock [J]. Acta Geologica Sichuan, 2011, 31(11):18-21.
- [19] 陈鑫发, 牛建设. 空气潜孔锤钻进技术在豫西抗旱找水打井施工中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(10):37-39.
CHEN Xinfa, NIU Jianshe. The application of air DTH hammer drilling technique in the construction for drought resistant water seeking wells in western Henan [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011, 38(10):37-39.
- [20] 陈涛, 赵华宣, 陈浩, 等. 毕节试验区矿泉水勘查WLCK1井施工技术[J]. 钻探工程, 2023, 50(S1):316-322.
CHEN Tao, ZHAO Huaxuan, CHEN Hao, et al. Construction technology of mineral water exploration Well WICK1 in Bijie Test Area [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1):316-322.
- [21] 徐洪科, 王华俊, 闻人霞. 西堰门大桥锚室渗水病害机理及处治技术研究[J]. 工程勘察, 2017, 45(10):29-33.
XU Hongke, WANG Huajun, WEN Renxia. Study on disease mechanism and treatment technique of anchor room seepage of Xihoumen Bridge [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2017, 45(10):29-33.

(编辑 王文)