

基于 Visul Modflow 的复合衬垫隔障式防渗墙在某铜矿露天边坡堵水方案的研究

Visul Modflow Study on Composite Liner Barrier Cutoff Wall in the Open-pit Slope
Water Control Plan of a Copper Mine

徐磊^{1,2}, 黄炳仁^{1,2}, 周耀东³

(1. 长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南长沙 410012; 2. 金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南长沙 410012; 3. 万宝矿产有限公司, 北京 100053)

摘要:本文以某铜矿 S 坑为工程背景, 研究在相关材料的试验与研究的基础上, 设计在东部边坡布设复合隔障式防渗墙对 S 坑东部边坡渗漏进行封堵, 并通过 Visul Modflow 软件对防渗墙的防渗效果进行模拟。模拟结果显示, 复合隔障式防渗墙能够在 100 年内阻止污染物对地下水产生污染。

关键词:复合衬垫隔障式防渗墙; 露天边坡渗漏; 酸性废水; Visul Modflow

中图分类号: TD854 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2022)05-0024-08

Abstract: The S pit of a copper mine is reused to accommodate acidic wastes. The backfill has reached 525 m elevation and is expected to reach a final top elevation of +575 m. The waste backfill in S pit produces polluting acidic water. On the eastern slope of S pit, there is a strong aquifer of Quaternary alluvium (Q_h^{apl}) with a length of about 1 500 m. Water inflows from Chindwin River and Yawma River into the pit through this layer. Under normal conditions. However, as the level of acidic backfill rises in S pit, acidic waste water will enter the strong aquifer of sand and gravel on the eastern slope by dispersion and seepage after the acidic pit water reaches above the 545 m bench, which will contaminate the nearby groundwater, Yawma River and soil. Based on the experimental research of related data, composite liner barrier cutoff wall was proposed in this study for the eastern slope of S pit to stop seepage. The seepage control efficiency of the cutoff wall was simulated in Visul Modflow software and results showed that composite liner barrier cutoff wall could stop pollutants from contaminating groundwater for 100 years.

Key words: composite liner barrier cutoff wall; open-pit slope permeation; acidic wastewater; Visul Modflow

1 前言

本次防渗堵漏研究区域为 S 坑北侧至东北侧长约 1 500 m、从 535 m 至 575 m 约 40 m 高的边坡。该研究区域的含水层从上往下依次为第四系残坡积、坡洪积 (Q_h^{edl}) 松散孔隙弱含(透)水层, 该层渗透系数为 $2.09 \times 10^{-7} \sim 9.51 \times 10^{-7}$ cm/s, 透水性由弱到强, 其中黑棉土层渗透系数可达 2.09×10^{-7} cm/s; 第四系冲、洪积 (Q_h^{apl}) 松散孔隙强-中等含(透)水层, 该层渗透系数为 $4.24 \times$

$10^{-5} \sim 9.00 \times 10^{-2}$ cm/s, 平均 2.12×10^{-2} cm/s, 钻孔单位涌水量 $0.17 \sim 3.13$ L/s·m, 平均 1.45 L/s·m, 富水性强, 透水性强—中等, 根据河水位变化, 与雅玛河互为补排关系; 新近系上中新统 ($N_{1\alpha\pi}$) 安山斑岩-英安斑岩隔水层, 该层渗透系数 $3.75 \times 10^{-6} \sim 2.79 \times 10^{-5}$ cm/s, 平均 1.28×10^{-5} cm/s, 微~弱透水性, 富水性弱, 为隔水层。其中 Q_h^{edl} 松散孔隙弱含(透)水层主要由隔水性较好的黑棉土和粉砂质黏土构成, Q_h^{apl} 松散孔隙强-中等含(透)水层主要由分选性较差的中细砂和砂卵石层构成, $N_{1\alpha\pi}$ 安山斑岩-英安斑岩隔水层主要由隔水性良好的安山斑岩构成^[1-4]。

S 坑边坡含水层为砂层和砂卵石层, 根据 K 矿水文地质报告中区域地质资料描述: S 矿东侧出露的第四系(Q)冲、洪积砂层、砂卵石层分布范围广, 为雅玛河的老河床, 砂层、砂卵石含水层直接接受

[作者简介] 徐磊(1985-), 男, 山东诸城人, 硕士, 工程师, 主要从事矿山防治水、矿山地灾预防与治理等方面的研究工作。

[引用格式] 徐磊, 黄炳仁, 周耀东. 基于 Visul Modflow 的复合衬垫隔障式防渗墙在某铜矿露天边坡堵水方案的研究[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(5): 24-31.

雅玛河的河水补给,且根据河水与 S 坑 +545 m 平台的水质化验对比,两者水质相似,其水化学类型为 HCO_3^- -(K + Na)型。因此,边坡渗漏水的主要水源及通道为:雅玛河水通过河床砂层、砂卵石含水层,直接向 S 矿坑的东部边坡充水。雅玛河在矿区段的平均水位标高为 574.52 m,河床的底标高为 570 m。

2 边坡防渗方案

2.1 S 矿坑酸性废水的主要污染指标

S 矿坑回填的废石在氧化过程中,生成含多种金属离子的酸性废水,水样化验报告统计见表 1,坑内回填后中和的酸性废水的 pH 值 6.8,水中硫酸盐、铜离子和铅离子含量均高。

表 1 S 坑回填废石水质报告统计

取样地点	pH 值	硫酸盐/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	铜/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	铅/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
S 坑 +535 m 水平	6.8	2 892	1.51	0.16
世界卫生组织标准	6~9	250	0.5	0.1

2.2 防渗方案设计参照的标准

目前缅甸尚没有类似工程防渗方案设计的标准可参照,也没有通用的国际标准文本,本项目的设计主要参照国外相关固体废料填埋规范和我国垃圾填埋场的设计标准,能够满足本项目的设计要求^[5]。

2.3 防渗墙结构的设计

本方案在 S 坑东部边坡渗漏段采用压实黑棉土 + HDPE 土工膜 + 压实黑棉土构筑的复合衬垫隔障式防渗墙来进行防渗处理,具体如图 1 所示,复合防渗结构兼具 HDPE 土工膜和压实黑棉土的优点,对坑内的酸性废水外泄提供了双重防渗保护。HDPE 土工膜的高防渗性能可减少压实黑棉土的厚度,减少防渗墙的施工工程量,降低施工成本。此外,黑棉土和 HDPE 土工膜均属柔性材料,抗震抗变形能力强。

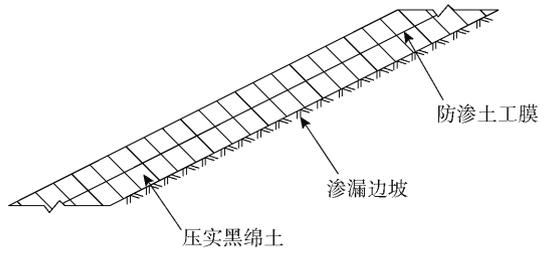


图 1 S 坑防渗墙的墙体结构图

压实黑棉土分为内外墙体,HDPE 土工膜位于内外墙体的中心,防渗墙墙体的设计饱和抗渗系数达到 $1 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$,设计年限不低于 100 年。

2.4 防渗墙墙体的范围

根据含水层边界条件确定的防渗墙墙体的范围为 ABCDEFGHIJKLMNOP,各控制点的坐标如图 2 所示。其平面投影面积为 $137\,374.074 \text{ m}^2$ 。

2.5 防渗层参数设计

2.5.1 压实黑棉土墙体参数设计

1) 土体材料的种类及技术要求

本次防渗材料的试验研究主要是针对矿区黑棉土试样的土工试验研究,试验结果见表 2 至表 4。

根据《生活垃圾卫生填埋处理技术规范》GB50869—2013 和《碾压式土石坝设计规范》SL274—2001 规范的要求:作为防渗材料的压实土饱和渗透系数应小于 $1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$,有机质含量不大于 2%。采用矿区当地的黑棉土作为防渗墙填筑材料,经室内渗透及渗透变形试验,压实后试样的饱和渗透系数 K_{20} 为 $3.72 \sim 8.15 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$,压力变形渗透系数 K_{20} 为 $2.17 \sim 9.28 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$,满足本方案的抗渗要求。

2) 压实土厚度设计

根据《危险废弃物鉴别标准》GB 5085—2007 和《尾矿库安全技术规程》AQ 2006—2005 中 13.2.6 规定:S 坑回填的酸性废石属 II 类废料,II 类库的环保防渗要求为库的底部和周边应具有一层防渗系统,其防渗厚度不小于 1.5 m 的黏土防渗层。根据《生活垃圾卫生填埋处理技术规范》GB 50869—2013 规定:场底及四壁衬里厚度不小于 2 m 时,可采用天然勃土类衬里结构。考虑本次防渗的重要性的特殊性,压实土的水平厚度取 10 m,远大于相关规范规定的厚度要求。

3) 压实土的最优含水量、压实度、饱和抗渗系数

现场取土室内土工最优含水量为 15.5% ~ 17.8%,压实度不小于 95%,饱和渗透系数为 $3.72 \sim 8.15 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ 。

4) 填筑分层厚度

依照规范要求取 30 cm。

5) 黑棉土墙体填筑估算总方量

估算墙体压实土体的总方量为 $733\,350 \text{ m}^3$ 。

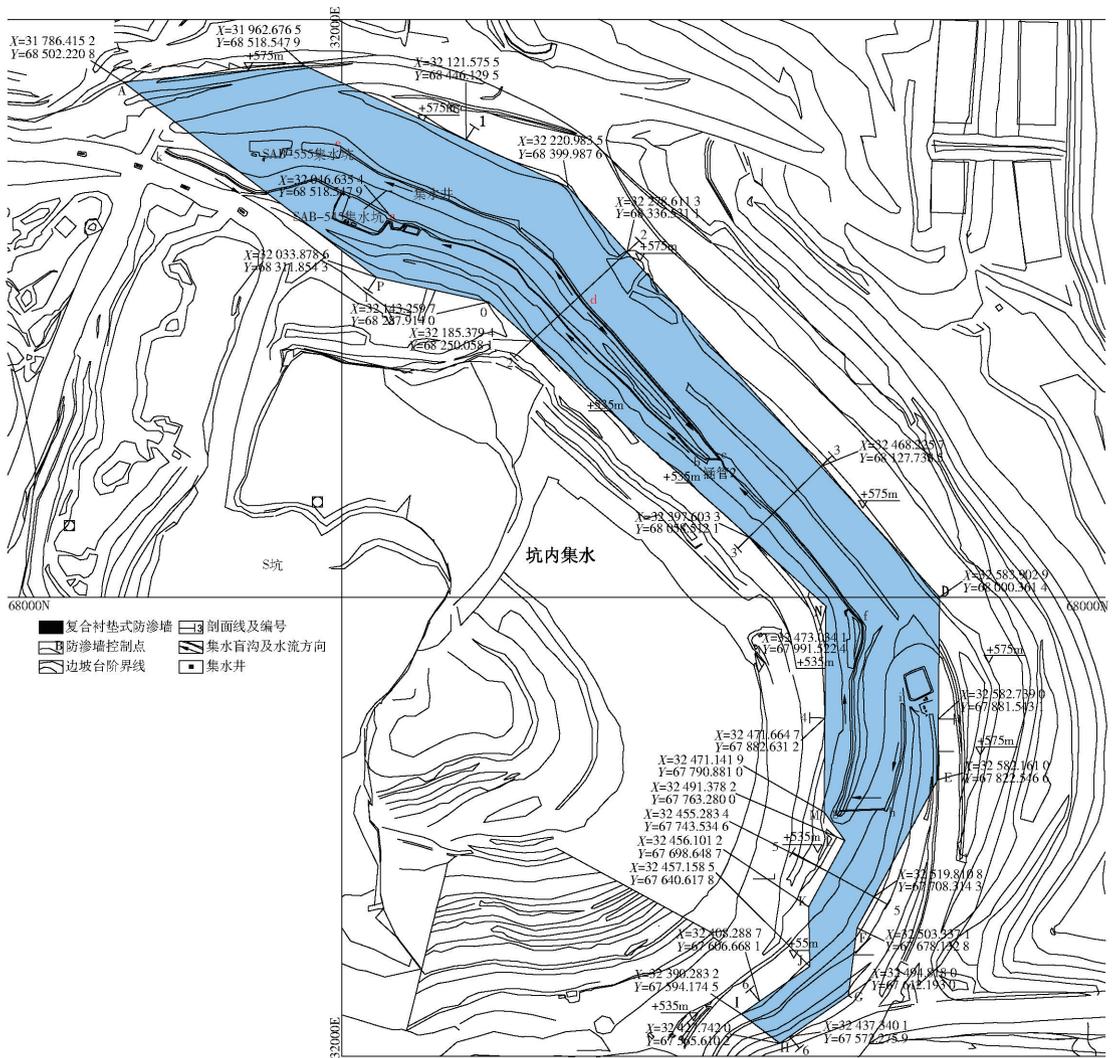


图2 S坑防渗墙布置平面图

表2 黑棉土土工实验室土样物理性质试验汇总表

土样 编号	轻型击实		比重	可塑性			粗砾	中砾	细砾	粗砂	中砂	细砂	粉粒	黏粒	含砂 率/%
	最优 含水 率/%	最大 干密度/ g·cm ⁻³		液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	60~20	20~5	5~2	粒径/mm					
							0.0	0.0	1.5	2~ 0.5	0.5~ 0.25	0.25~ 0.075	0.075~ 0.005	<0.005	
1号	21.3	1.61	2.64	75.4	20.5	54.9	0.0	0.0	1.5	4.4	8.5	25.4	34.4	25.8	38.3
2号	18.1	1.67	2.69	72.8	17.5	55.3	0.0	0.0	1.5	3.1	8.1	26.6	30.2	30.5	37.8

表3 黑棉土土工实验室土样力学性质试验汇总表

土样 编号	含水 率/%	干密度/ g·cm ⁻³	试验 状态	垂直压力/kPa						抗剪强度				
				0~ 50	50~ 100	100~ 200	200~ 400	0~ 50	50~ 100	100~ 200	200~ 400	试验 方法	凝聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
				压缩系数/MPa ⁻¹			压缩模量/MPa							
1号	21.3	1.61	天然饱和	0.720	0.600	0.380	0.200	2.28	2.73	4.32	8.20	天然快剪	35.55	24.5
				0.820	0.740	0.340	0.210	2.00	2.22	4.82	7.81	饱和快剪	35.92	23.6
2号	18.1	1.67	天然饱和	0.740	0.480	0.300	0.175	2.18	3.36	5.37	9.21	天然快剪	27.66	26.0
				0.780	0.600	0.380	0.200	2.07	2.69	4.24	8.06	饱和快剪	28.66	25.2

表4 黑棉土土工实验室土样渗透变形试验汇总表

试样 编号	最大干密度/ g·cm ⁻³	渗透系数 K ₂₀ / cm·s ⁻¹	渗透变形				
			起始坡降	临界坡降 i _k	破坏坡降 i _f	渗透系数 K ₂₀ /cm·s ⁻¹	破坏形式
1号	1.61	8.15 × 10 ⁻⁸	1.00	1.75	125.00	9.28 × 10 ⁻⁷	流土
2号	1.67	3.72 × 10 ⁻⁸	2.00	2.50	125.00	2.17 × 10 ⁻⁷	流土

2.5.2 土工膜参数设计

1) 土工膜厚度设计以及

目前国内外针对土工膜厚度计算并无完全成熟的理论计算方法,考虑本防渗墙的重要性以及防渗墙填筑工况,实用时需留有较大的安全系数,土工防渗膜厚度确定为 2 mm。

2) 土工膜的材质及选型

本项目选用 2 mm 厚的双糙面 HDPE 土工膜。

3) HDPE 土工膜的总面积

墙体压实土体的总平方量为 151 000 m²。

2.6 防渗墙的稳定性分析

防渗墙的稳定性分析分为 2 个部分:①防渗墙体与现有边坡之间的滑移分析;②防渗墙内部在土工膜界面的滑移分析。由于防渗墙施工与坑内废石回填同步进行,防渗墙施工只超前废石回填高度约 5 m,因此,两者均可按下式进行施工期抗滑稳定安全系数计算:

$$K = \frac{W \cos \alpha \cdot f}{W \sin \alpha} = \frac{f}{\operatorname{tg} \alpha}$$

式中:W——超前防渗墙体的重量,或者土工膜外侧墙体(超前部分)重量;

α——防渗墙体的坡角,或者墙体内土工膜的铺设坡角,坡比 1:2 对应坡角为 27°;

f——防渗墙体与边坡的磨擦系数,或糙面土工膜与压实黏土间摩擦系数,根据资料分别取 0.75、0.65。

计算得出的抗滑稳定性系数 K 分别为 1.5 和 1.3,均能满足《碾压式土石坝设计规范》SL274—2001 修改和补充规定,土坝、堆石坝坝坡的抗滑稳定安全系数不得小于 1.05 ~ 1.30。

2.7 防渗墙体的耐久性分析

S 坑东部边坡防渗墙体由压实黏土与聚乙烯土工膜组成,聚乙烯土工膜防渗膜位于压实黏土的中间,深埋于地下,近似于恒温恒湿的封闭环境,不会受长期紫外照射及大气氧化影响,其设计寿命可达 100 年以上。

综上所述:压实黏土和土工膜的耐久性均能达到本方案设计的 100 年要求,并考虑 S 坑东部边坡的压实黏土与土工膜组成复合衬垫隔障防渗系统,其设计参数取值按压实黏土与土工膜各自作用独立的防渗系统进行计算,具双重保险作用。因此,本方案设计的防渗系统的耐久性是可可靠的。

3 防渗墙防渗透数值模拟研究

3.1 模型的建立

采用 Visual Modflow 软件建立矿区下水渗流模型。模型模拟范围根据矿区的边界范围而定,东西范围 X 从 30 078 ~ 35 421 m,宽约 5 343 m,南北范围 Y 从 65 620 ~ 70 205 m,长约 4 585 m,总面积约为 9.93 km²,具体如图 3 所示。

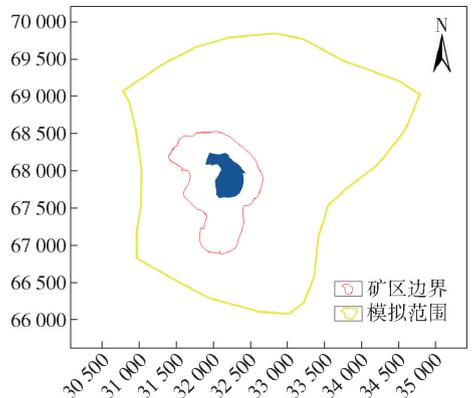


图3 数值模拟范围

矿区位于钦敦江西侧、雅玛河南侧,主要充水含水层为第四系孔隙水含水层,北部为雅玛河,东南部及西北部为地表分水岭,地势西南高,东北低。为避免数值模型过小及人为划定边界造成的误差,本次数值模拟范围不局限于 S 矿区,而是将模拟范围根据矿坑排水的最大影响范围适当外推。根据区域水文地质条件,模型北部边界为雅玛河,处理为河流边界;东南部及西北部边界为地表分水岭,处理为零通量边界,西南部为流量边界。

本次模拟初始参数的选取主要是根据抽水试验整理资料给出,由于第四系第一含水层抽水孔较少,

取室内经验值 1.10×10^{-7} cm/s 为该层渗透系数的值,砂层含水层的渗透系数初值根据抽水数据的计算结果得出为 2.12×10^{-2} cm/s。

本次建立了包含 S 矿区在内的相对完整水文地质单元范围的地下水三维数值模型,具体如图 4 所示。

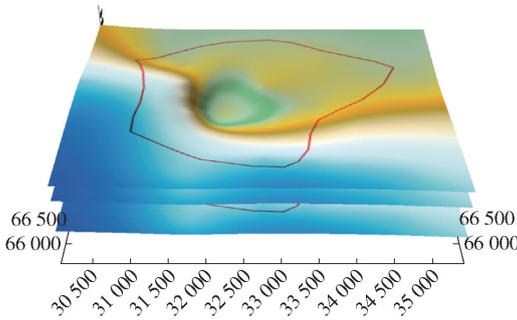


图 4 岩层顶底板高程三维图

本次模拟共有二层地层,从上到下,依次导入第四系第一相对隔水层的顶底板及第二含水层的顶底板,采用克里金插值方法生成每一层标高数据。

本次模拟根据模拟区实际水文地质资料,对模型进行识别检验:非稳定流流场识别检验和抽水试验模型识别检验,具体如图 5、图 6 所示。

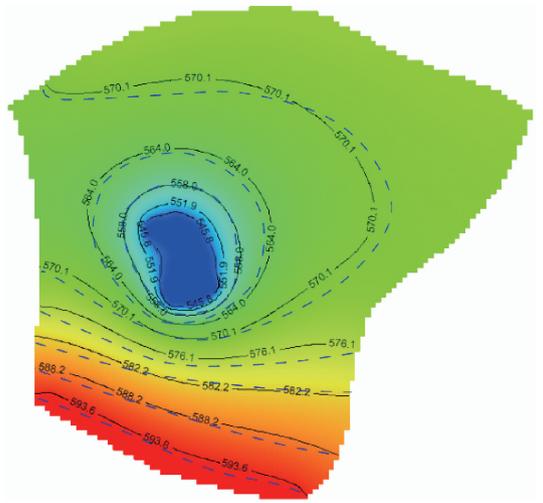


图 6 非稳定流流场拟合图

所示。

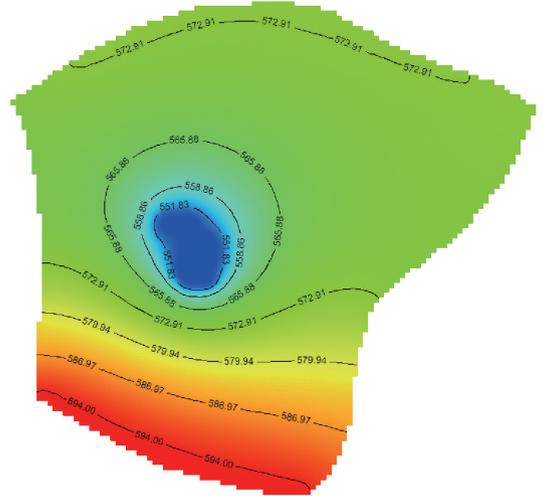


图 7 回填 545 m 标高时地下水等值线图

(2)酸性废水位标高高于 +545 m,废水与砂卵石含水层接触,但低于砂卵石层水位标高(+573 ~ 575 m),地下水流向 S 坑,酸性水不直接流入雅玛河,但会逐渐流入矿坑周围砂卵石层的疏干区域,造成周围砂卵石含水层的局部污染。

回填 573 m 标高时地下水动态如图 8 所示。

(3)与强含水层水位相等,在矿坑与雅玛河之间不存在渗流,但酸性废水中的污染物会通过弥散的形式,缓慢污染矿区附近的砂卵石层和雅玛河河水。

回填 575 m 标高时地下水动态变化如图 9 所示。

3.2 污染物运移预测

本次工作已用 Visual Modflow 建立了水流模

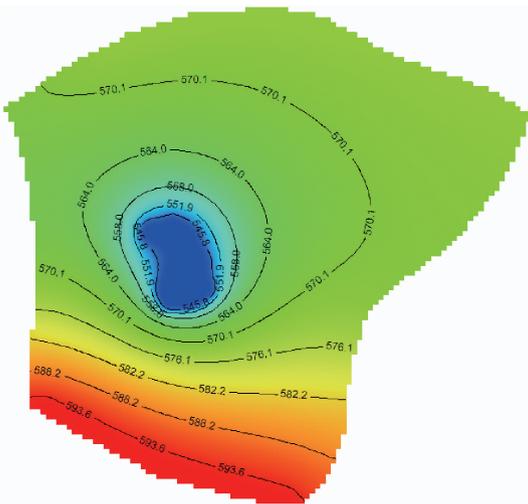


图 5 识别模型阶段结束时时刻地下水流场图

利用识别后的数值模型对研究区 S 矿回填情况下,地下水动态进行预测。由于坑内酸性水水位随着坑内废石的回填逐渐抬升,根据废水对地下水的危害分为三个阶段。

(1)酸性废水位标高低于 +545 m 标高,废水与砂卵石含水层不接触,酸性废水对附近地下水(土)不造成危害,回填 545 m 标高时地下水动态如图 7

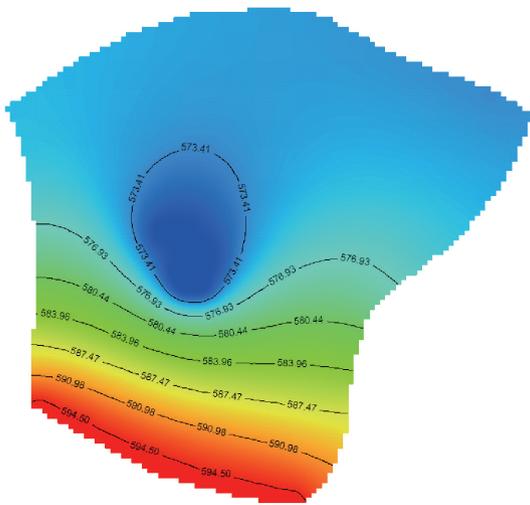


图8 回填 573 m 标高时地下水等值线图

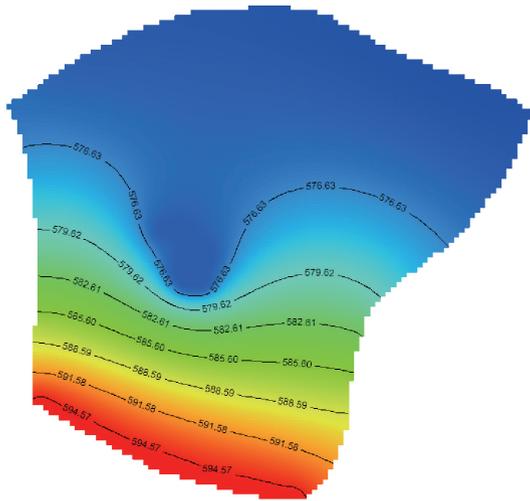


图9 回填 575 m 标高时地下水等值线图

型,在此基础上,可利用 Visual Modflow 中的 MT3DMS 模块进一步来模拟预测地下水中污染质的运移情况。

本次工作参考类似溶质运移模拟的经验,从保守角度考虑,取弥散度参数值取 10 m。

由于坑内酸性水水质浓度随着坑内废石的回填逐渐升高,因此在矿区东侧和东北侧沿着坡面一侧建立了衬垫式隔障式防渗墙,宽度每层厚度 10 m,防渗墙沿着 S 矿坑从坑底到坑顶沿扇形分布,防渗墙高度 536 ~ 575 m。本次模拟预测根据污染风险分析的情景设计,在选定优先控制污染物的基础上,对地下水中硫酸盐、铜离子和铅离子的影响范围进行模拟预测,污染物的超标范围参照国际标准相关要求,具体标准见表 5。

在复合衬垫隔障式防渗墙的情况下对污染物在

地下水的运移进行预测。

表 5 评价因子及评价标准一览表

评价因子	铜离子	硫酸盐	铅离子
质量标准/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.50	250	0.10
实测浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.51	2 892	0.16

1) 硫酸盐渗漏地下水污染预测

此情景条件下的地下水污染模拟结果如图 10 所示。

结果表明矿区在正常运行状况下,整个模拟运行期间矿区防渗墙边界处硫酸盐的浓度都没有超过地下水国际质量标准。硫酸盐污染物进入地下水后,在对流和弥散的作用下,浓度开始先逐步增加增大最后趋于稳定。

2) 铜离子渗漏地下水污染预测

此情景条件下的地下水污染模拟结果如图 11 所示。

结果表明矿区在正常运行状况下,整个模拟运行期间矿区防渗墙边界处铜离子的浓度都没有超过地下水国际质量标准。铜离子污染物进入地下水后,在对流和弥散的作用下,浓度开始先逐步增加增大最后趋于稳定。

3) 铅离子渗漏地下水污染预测

此情景条件下的地下水污染模拟结果如图 12 所示。

结果表明矿区在正常运行状况下,整个模拟运行期间矿区防渗墙边界处铅离子的浓度都没有超过地下水国际质量标准。铅离子污染物进入地下水后,在对流和弥散的作用下,浓度开始先逐步增加增大最后趋于稳定。

由预测结果可知,污染物在水动力条件作用下主要由西南向东北方向运移。考虑在沿矿坑布置复合衬砌隔障式防渗墙的情景下,由预测结果可以看出地下水中硫酸盐、铜离子和铅离子污染地下水后,在 100 年内检出范围没有超出矿坑区范围。

4 结论

本次 S 坑边坡防渗方案研究首先对 S 坑的水文地质条件进行了分析与研究,在相关材料的试验与研究的基础上,在东部边坡设计了压实黑棉土 + HDPE 土工膜 + 压实黑棉土的复合隔障式防渗墙的防渗堵漏方案,压实黑棉土分为内外墙体,水平厚度为 10 m,HDPE 土工膜位于内外墙体的中心,厚度为

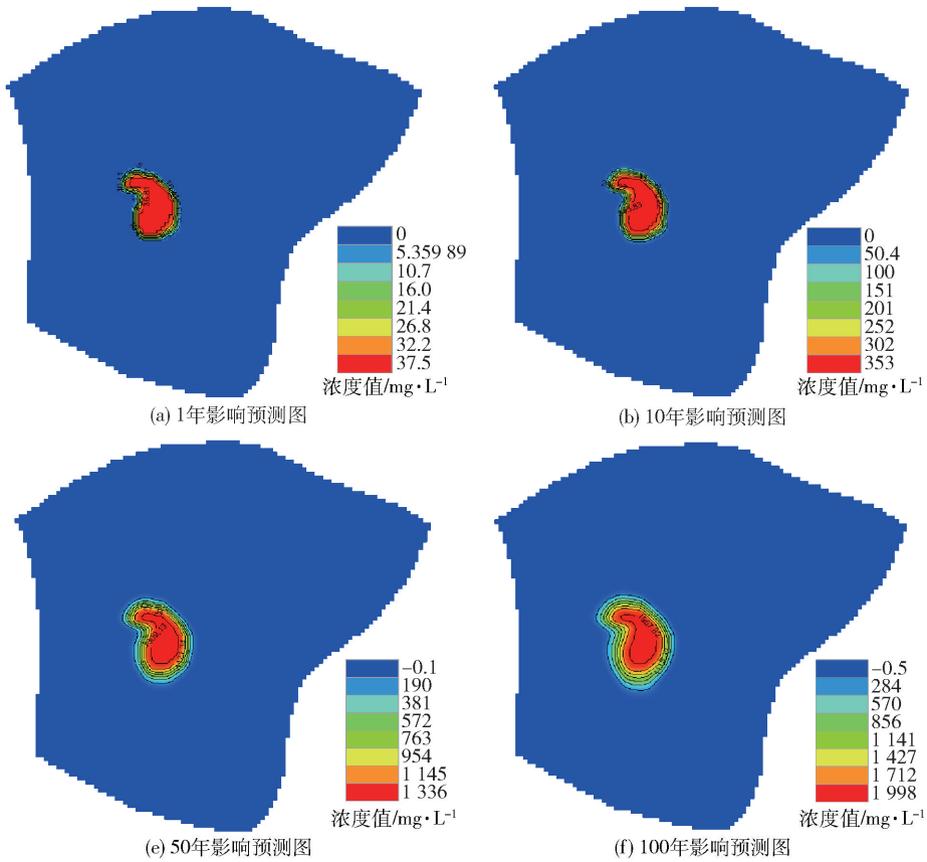


图 10 硫酸盐渗漏潜水含水层影响范围图

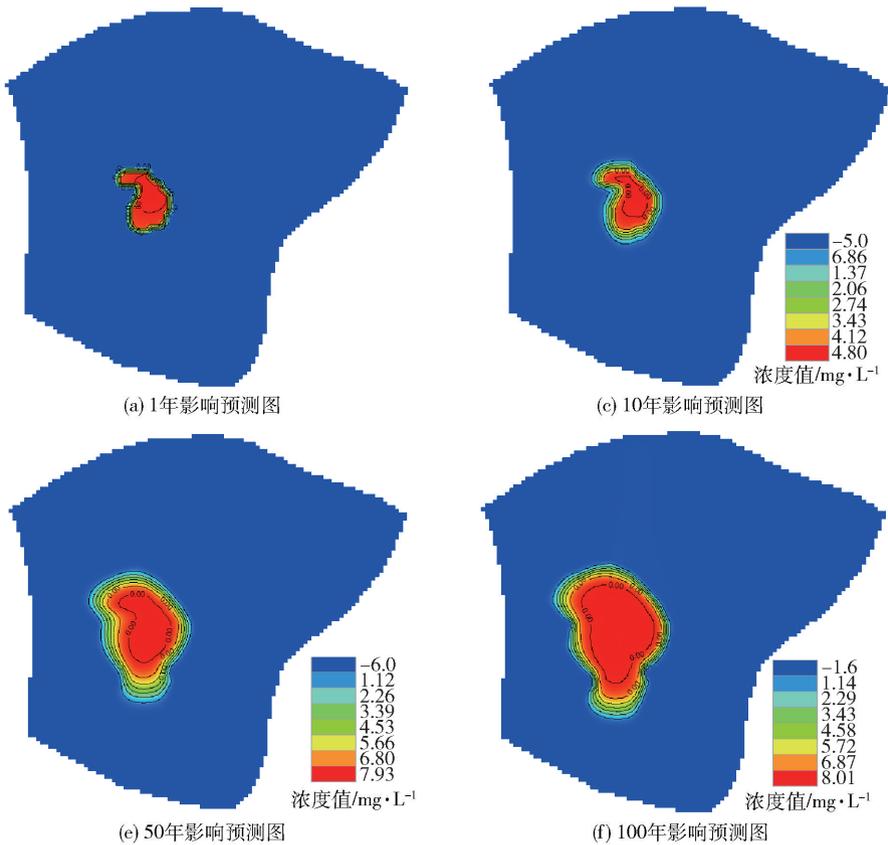


图 11 铜离子渗漏潜水含水层影响范围图(备注: $\times 10^{-7}$)

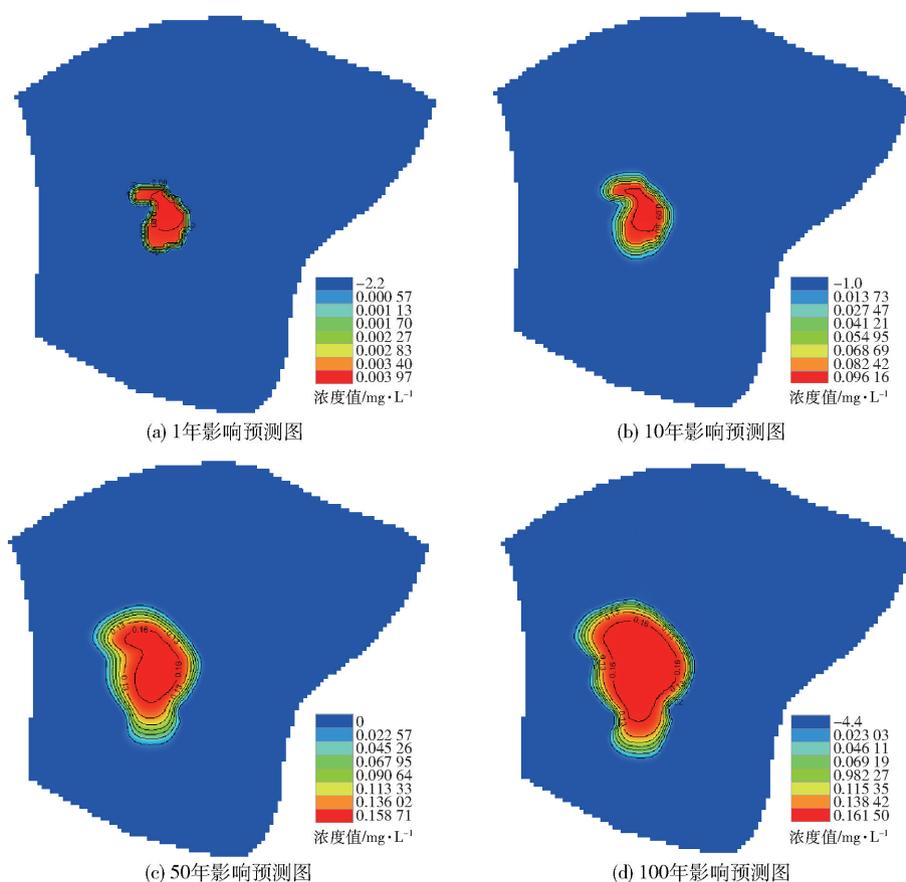


图 12 铅离子渗漏潜水含水层影响范围图

2 mm, 防渗墙墙体的设计饱和抗渗系数达到 1×10^{-9} cm/s, 设计年限不低于 100 年。本次研究分析了该防渗墙的稳定性和耐久性, 利用 Visual Modflow 软件建立了 S 坑地下水流模型和污染物运移模型, 并利用该模型模拟了复合衬垫隔障式防渗墙对溶质运移的阻断效果, 由预测结果可以看出: 在复合衬垫隔障式防渗墙的隔水作用下, 100 年内地下水中硫酸盐、铜离子和铅离子污染地下水后, 检出范围没有超出矿坑区范围。

[参考文献]

[1] 岑威钧, 沈长松, 童建文. 深厚覆盖层上复合土工膜防

渗堆石坝筑坝特性研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 175 - 180.

[2] 玛雁. 大宁水库土石坝复合土工膜防渗关键技术[D]. 北京: 清华大学, 2010.

[3] 杨旭东. 聚丙烯土工织物的使用寿命预测[D]. 上海: 东华大学, 2005.

[4] 罗春泳. 粘土的环境土工特性及垃圾填埋场衬垫性状研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.

[5] Petersen R C. The RCE: a riparian, channel, and environmental inventory for small streams in the agricultural landscape [J]. Freshwater biology, 1992, 27 (2): 295 - 306.