



## 矿山强渗松散层柔性磁吸防渗膜垂向帷幕截水技术研究

王海 黄选明 张雁 曹海东 孙浩 苗贺朝 田增林

### 引用本文:

王海, 黄选明, 张雁, 等. 矿山强渗松散层柔性磁吸防渗膜垂向帷幕截水技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(9): 180–188.  
WANG Hai, HUANG Xuanming, ZHANG Yan. Flexible magnetic suction impermeable membrane of vertical curtain water interception technology for strong seepage loose layer of coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(9): 180–188.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2022-0165>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 我国大水矿山侧向帷幕截水技术及水资源保护效果研究

Lateral curtain interception technology and water conservation effect in groundwater abundant mines of China  
煤炭科学技术. 2023, 51(7): 207–223 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.QN21-014>

##### 基于保障生态地下水位的露天煤矿主动保水技术研究

Research on active water conservation technology in open-pit coal mine based on ecological protection groundwater level  
煤炭科学技术. 2021, 49(4): 49–57 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2021.04.006>

##### 基于等厚度水泥土帷幕的斜井井筒水治理技术研究

Research on water leakage control technology of inclined shaft of coal mine based on cement soil curtain of equal thickness  
煤炭科学技术. 2023, 51(7): 224–233 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2023-0313>

##### 巨厚含水松散层下开采地表移动变形规律研究

Study on surface movement and deformation laws in miningunder thick water-bearing loose layer  
煤炭科学技术. 2022, 50(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/bea4b523-85f5-4b5b-86f6-2e1628a8bc29>

##### 邻近厚松散层既有立井井筒地面注浆地层加固技术

Ground grouting stratum reinforcement technology for thick loose layer adjacent to existing shaft  
煤炭科学技术. 2022, 50(7): 127–134 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/eb8ca742-1ca3-46f9-ad54-ab618e39e7df>

##### 西部矿区高矿化度矿井水膜蒸馏处理技术

Technology of membrane distillation treatment for highly-mineralized mine water in western mining area  
煤炭科学技术. 2022, 50(3): 295–300 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/6dd899b8-faf6-4aeb-9d5a-fc1deac01489>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

王海, 黄选明, 张雁, 等. 矿山强渗松散层柔性磁吸防渗膜垂向帷幕截水技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(9): 180–188.

WANG Hai, HUANG Xuanming, ZHANG Yan, et al. Flexible magnetic suction impermeable membrane of vertical curtain water interception technology for strong seepage loose layer of coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(9): 180–188.

## 矿山强渗松散层柔性磁吸防渗膜垂向帷幕截水技术研究

王海<sup>1,2</sup>, 黄选明<sup>1</sup>, 张雁<sup>1</sup>, 曹海东<sup>1</sup>, 孙浩<sup>3</sup>, 苗贺朝<sup>1</sup>, 田增林<sup>1</sup>

(1. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077; 2. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116;

3. 国家能源集团内蒙古平庄煤业(集团)有限责任公司, 内蒙古 赤峰 024076)

**摘要:** 我国矿产资源丰富, 矿业种类多, 矿山数量多, 矿业开发导致矿区周边地下水位下降、水资源浪费、水质污染、地表塌陷、土地退化、植被覆盖度减少、地下水资源和生态环境受到不同程度影响。为解决矿山强渗松散层水侧向补给矿坑引起的水资源浪费和生态环境破坏问题, 保护矿山地下水资源和生态环境, 提出了柔性磁吸防渗膜垂向帷幕截水技术, 研究了防渗膜材料性能, 研发了磁吸防渗膜连接工艺, 开展了不同防渗膜连接工艺室内试验, 并在试验矿区进行了1369 m的强渗松散层截水帷幕现场试验应用。研究结果表明: 防渗膜渗透系数低、结构致密、柔软、抗变形、经久耐用, 是截流、控污、防渗的良好材料, 可满足矿山强渗松散层垂向帷幕要求。研发的磁吸接头材料及连接工艺解决了现有叠覆搭接、连接锁、接头箱等连接工艺的铺设深度浅、接头渗漏、操作复杂等问题, 磁吸接头连接的防渗膜帷幕施工深度不受连接条件的限制, 磁吸接头连接工艺截水效果优于叠覆搭接和连接锁(接头箱)连接工艺。进行了自带磁和后充磁2种柔性磁吸防渗膜制作、铺设、连接和帷幕回填成墙试验, 防渗膜接头处缝隙由5~20 cm减小为0, 相邻两幅防渗膜紧密的连接为有机整体, 减少了接头处截水帷幕的过水通道。通过开展矿山强渗松散层柔性磁吸防渗膜垂向帷幕截水试验, 试验区帷幕位置下方长期积满强渗松散层渗漏水的集水坑已干涸, 帷幕外侧强渗松散层水位升高5.55~9.12 m, 帷幕内侧强渗松散层水位降低3.21~5.84 m, 强渗松散层水资源保护取得良好效果。

**关键词:** 保水开采; 强渗; 松散层; 柔性; 磁吸防渗膜; 垂向帷幕

中图分类号:P641; TD74 文献标志码:A 文章编号: 0253-2336(2023)09-0180-09

### Flexible magnetic suction impermeable membrane of vertical curtain water interception technology for strong seepage loose layer of coal mines

WANG Hai<sup>1,2</sup>, HUANG Xuanming<sup>1</sup>, ZHANG Yan<sup>1</sup>, CAO Haidong<sup>1</sup>, SUN Hao<sup>3</sup>, MIAO Hechao<sup>1</sup>, TIAN Zenglin<sup>1</sup>

(1. Xi'an Research Institute, China Coal Technology & Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China; 2. College of Resources and Earth Sciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Inner Mongolia Pingzhuang Coal Industry (Group) Co., Ltd., Chifeng 024076, China)

**Abstract:** With abundant mineral resources, many types of mining industry and many mines, mining development in China has led to the decline of groundwater level around the mines, waste of water resources, water quality pollution, surface collapse, land degradation, reduction of vegetation cover, and different degrees of impact on groundwater resources and ecological environment. In order to solve the problems of water waste and ecological damage caused by the lateral recharge of water from the strong seepage loose layer to the mine pit, we proposed a vertical curtain water interception technology with flexible magnetic suction membrane to protect the groundwater resources and ecological environment of coal mines. We firstly studied the performance of the suction membrane material, developed the magnetic absorption suction membrane connection process, and carried out indoor tests of different suction membrane connection processes, then we

收稿日期: 2022-08-09 责任编辑: 周子博 DOI: 10.12438/cst.2022-0165

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804100, 2019YFC1805400); 中煤科工西安研究院(集团)有限公司科技创新资助项目(2020XAYJS03)

作者简介: 王海(1987—), 男, 江苏睢宁人, 副研究员, 博士研究生。Tel: 029-85266849, E-mail: wanghai3777@163.com

通讯作者: 黄选明(1962—), 男, 陕西临潼人, 研究员。E-mail: huangxuanming@cctegxian.com

conducted a 1 369 m strong seepage loose layer water interception curtain field test application in the test mine. The research results show that the impermeable membrane has low permeability coefficient, dense structure, high flexibility, resistance to deformation and durability, and is a good material for water cut, pollution control and seepage control, which can meet the requirements of vertical curtain for the strong seepage loose layer of the mine. The self-developed magnetic suction joint material and connection process solved the problems of shallow laying depth, joint leakage and complicated operation of existing connection processes such as overlapping lap, joint lock and joint box, etc. The construction depth of suction membrane curtain connected by magnetic suction joint is not limited by the connection conditions, and the water interception effect of magnetic suction joint connection process is better than that of overlapping lap and joint lock (joint box) connection process. Through the test of making, laying, connecting and backfilling the curtain into a wall with 2 kinds of flexible magnetic absorbent impermeable membranes, the gap at the joint of the impermeable membrane was reduced from 5-20 cm to 0, and the two adjacent impermeable membranes were closely connected as an organic whole, which reduced the water passage of the interception curtain at the joint. Through the mine-field site test, it was found that the water catchment pits below the curtain which had been filled with strong seepage loose layer water leakage for a long time, had dried up, and the water level of strong seepage loose layer outside the curtain had increased by 5.55-9.12 m, and the water level inside the curtain had decreased by 3.21-5.84 m, so the protection of strong seepage loose layer water resources had achieved good results.

**Key words:** water-preserved mining; strong seepage; loose layer; flexibility; magnetic suction impermeable membrane; vertical curtain

## 0 引言

矿产资源是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础,矿业支撑了我国70%以上的国民经济运转<sup>[1]</sup>,2020年我国能源消费总量49.8亿t标煤,一次能源消费量预计在2030年前后达峰,峰值52.9亿~61.4亿t标煤<sup>[2]</sup>。我国矿产资源丰富,但开发利用难度较大,整体开发利用效率较低<sup>[1]</sup>。截至2019年,我国煤矿数量5 268处,非煤矿山大体3万多座<sup>[3-4]</sup>。矿业开发导致矿区周边地下水位下降、水资源浪费、水质污染、地表塌陷、土地退化、植被覆盖度减少、地下水资源和生态环境受到不同程度影响<sup>[5-8]</sup>。王双明等<sup>[9]</sup>指出矿产资源是地球演化过程形成的层状沉积矿产,是近地表地壳的组成部分,开采会对地质条件和生态环境造成损害。顾大钊等<sup>[10]</sup>调研了全国11个省、自治区的396座生产矿井,统计分析得出我国平均煤矿富水系数约为1.87,矿井水平利用率约为35%,每年外排矿井水40多亿m<sup>3</sup><sup>[10]</sup>。我国部分矿山位于强富水强补给的砂卵石层区域,松散层渗透系数大,受地表河流侧向补给,常采用抽水井抽水方式控制或疏降矿坑水位,疏降水量巨大。以内蒙古平庄煤业集团元宝山露天矿为例,露天矿位于英金河与老哈河交汇处,受深厚砂卵石层强渗透性影响,地表英金河与老哈河河水源源不断渗入矿坑,造成矿坑水量巨大<sup>[11]</sup>。

针对矿山开采造成的地下水和生态环境影响,王双明<sup>[9,12]</sup>、顾大钊<sup>[10]</sup>、董书宁<sup>[6]</sup>等分别提出了减损开采、煤矿地下水库(疏导法)和充填开采(堵截法)、基于截水帷幕的矿山主动保水技术。现有水资源保护技术改变了传统的矿山以疏排为主的地下水控制

方式,减少了环境破坏,保护了地下水资源,保障了矿区生态地下水位,实现减损、保水、绿色开采。近年来,强渗松散层截水帷幕相继在朱仙庄煤矿<sup>[13]</sup>、张家峁煤矿<sup>[14]</sup>、西湾露天煤矿<sup>[15]</sup>、扎尼河露天煤矿<sup>[16-18]</sup>应用,并取得了良好的截水效果。截水帷幕技术由地面直钻孔注浆帷幕向地面定向水平孔注浆、沟槽式地下连续墙帷幕发展<sup>[19]</sup>,沟槽式地下连续墙帷幕是矿山浅表强渗松散层有效的截水方式。现有矿山强渗松散层截水帷幕存在抗变形能力弱、接头连接差、阻水率低的问题<sup>[6,19]</sup>。针对矿山强渗松散层截水需求和存在的问题,根据磁吸密贴原理,研发了柔性磁吸防渗膜材料及工艺,通过磁吸防渗膜材料将相邻的防渗膜帷幕连接为连续的整体,解决现有截水帷幕抗变形能力弱、接头连接效果差、阻水率低的问题。并开展了垂向柔性磁吸防渗膜帷幕室内试验、元宝山露天煤矿现场应用试验及效果分析,丰富了截水帷幕技术体系,为类似工况的矿山提供参考。

## 1 试验区工程与水文地质条件

试验区位于内蒙古自治区赤峰市,年降雨量为340~400 mm,年蒸发量为1 950~2 000 mm,最大冻结深度2.01 m。试验区露天煤矿位于英金河河谷平原上,英金河在露天区的中部通过。整个露天矿区含煤地层全部被英金河冲积、洪积形成富水性强的第四系含水层覆盖。

### 1.1 地形地貌

试验区为低山丘陵地貌,东、西元宝山构成玄武岩台地。试验区位于东、西元宝山构成的2个玄武岩台地之间的英金河冲积平原上,其两侧有元宝山矿、风水沟矿,两矿区地形为第三系玄武岩台地,

标高为+670~+700 m。台地周围为黄土掩盖的丘陵区, 标高为+480~+600 m, 试验矿区地表标高+472~+490 m。比东、西元宝山低约200 m。区外最高点为西元宝山, 海拔标高为+673.2 m。

## 1.2 工程地质条件

试验矿区第四系地层上部为2~5 m亚黏土或亚砂土, 土层细而致密, 具直立节理。下部为10~60 m厚的圆砾、卵石及砂砾石层, 磨圆度较好, 多呈扁圆

状, 粒径一般为2~30 mm, 最大可达200 mm, 砾石成分为安山岩、花岗岩、片麻岩、玄武岩等。砂砾层为富水性强的含水层。

全新统地层主要分布于老哈河、英金河等河谷地带。由现代河流冲积物组成, 以砂砾为主, 风成砂、亚砂土、亚黏土次之。地层厚14~85 m, 一般厚55 m, 西南薄、东北厚。

试验矿区松散层和岩层物理力学性质见表1。

表1 地层物理力学性质统计  
Table 1 Statistical of physical and mechanical properties of strata

| 地层年代 | 岩土类别 | 含水率/% | 黏聚力/kPa | 内摩擦角/(°)  | 弹性模量/MPa  | 泊松比  | 重度/(kN·m <sup>-3</sup> ) |
|------|------|-------|---------|-----------|-----------|------|--------------------------|
| 第四系  | 砂土   | —     | 0       | 37.6      | 10.2      | 0.32 | 22.2                     |
|      | 砂砾   | —     | 8.9~27  | 31.9~34.8 | 18.8~24.4 | 0.25 | 18.4                     |
| 新近系  | 细砂岩  | —     | 120.0   | 25.0      | 550       | 0.30 | 20.0                     |
| 侏罗系  | 煤    | 20.1  | 60.0    | 31.0      | 600       | 0.29 | 13.1                     |
|      | 砂岩   | 13.0  | 173.0   | 27.0      | 880       | 0.25 | 21.1                     |
|      | 泥岩   | 11.5  | 109.0   | 24.7      | 500       | 0.35 | 21.1                     |
|      | 弱层   | 16.5  | 2.2     | 10.9      | 20        | 0.45 | 18.0                     |

## 1.3 水文地质条件

露天矿区附近有英金河和老哈河两条河流。英金河发源于河北省围场北部山区热水附近, 在露天矿区中部通过, 把露天矿区分成东北、西南2部分。英金河河床主要沉积物为卵石、圆砾和少量砂子, 透水性较强, 河水对其下的第四系潜水层的补给条件好; 英金河河床宽度变化较大, 为200~900 m, 下游比降1/700~1/800, 从上游夹带下的大量泥、砂、砾石淤积在河床上部, 形成了厚0.05~1.0 m的淤土或泥、砂、砾的混合层, 降低了河水的垂直渗透能力, 河水位与浅水相差3~8 m, 形成悬浮段。

老哈河发源于河北省平泉县七老图山脉的光头山, 河床宽500~1 000 m, 河流比降1/800~1/900, 河床及河漫滩主要由砂、砂土及砾石组成。由于英金河河水中的细颗粒在上游已大部沉积, 河床的下渗能力也逐渐加大, 英金河与老哈河汇口地带, 河水位与其下的第四系潜水层水位渐趋一致, 连成一体, 英金河河水与第四系潜水共同泻入老哈河。

试验矿区的主要含水层为第四系冲积、洪积孔隙潜水层, 主要受英金河上游河水和大气降水的渗入补给, 其次是处于河谷两侧地势较高的基岩裂隙水和黄土丘陵区的孔隙水, 通过冲沟或坡积地层汇集渗入补给含水层。

富水性弱的侏罗纪含煤系承压含水层主要在英

金河河谷两侧地势较高的冲沟中, 侏罗纪含水层出露部分直接接受大气降水的渗入和上覆黄土孔隙水及玄武岩裂隙水的补给。侏罗纪含煤系承压含水层, 一方面在一些露头处有水泻出, 经地表渗入补给第四系潜水; 另一方面, 在第四系潜水层底部与该承压含水层接触处, 在承压的条件下, 通过裂隙泻入其上覆的第四系潜水层。

露天矿区连续疏排地下水形成了以矿区为中心的水位降落漏斗, 下游的老哈河对矿区已经形成了河水倒灌的径流方向。排泄方式由原有的下降泉变为以矿坑疏排为主。

## 2 柔性防渗膜垂向帷幕材料与工艺

常规截水帷幕技术主要有钻孔注浆帷幕、地下连续墙、旋喷桩排、黏土芯墙等, 为克服采矿活动对帷幕墙体的扰动影响, 提出了通过双轮铣、液压成槽机、锯槽机等成槽设备在地层中施工矩形槽段, 通过地面铺膜机具在槽段内垂向隐蔽铺设防渗膜, 在防渗膜与槽段间空隙回填原状土、充填水泥—粉煤灰浆液、砂浆、自凝灰浆或混凝土等, 可满足矿山强渗松散层截水帷幕严苛的抗渗和抗变形要求, 极大地提高防渗效果。

### 2.1 柔性防渗膜帷幕材料

HDPE(高密度聚乙烯)防渗膜主要由97.5%的

高密度聚乙烯、约2.5%的碳黑、抗老化剂、抗氧化剂、紫外线吸收剂、稳定剂等辅料组成,渗透系数达 $10^{-13}\text{cm/s}$ 。防渗性能好、经久耐用,是截流、控污、防渗的良好材料,防渗膜主要性能参数见表2。

表2 防渗膜主要参数

Table 2 Main parameters of the impermeable membrane

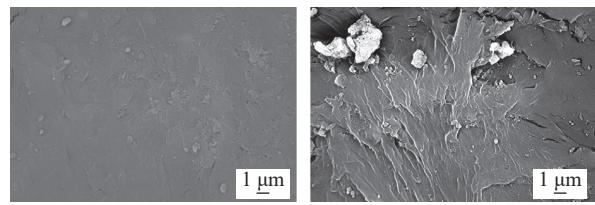
| 项目                                 | 指标      |      |      |      |
|------------------------------------|---------|------|------|------|
| 厚度/m                               | 1.5     | 2.0  | 2.5  | 3.0  |
| 密度/(g·cm <sup>-3</sup> )           |         | 0.94 |      |      |
| 拉伸屈服强度(纵、横向)/(N·mm <sup>-1</sup> ) | ≥20     | ≥26  | ≥33  | ≥40  |
| 拉伸断裂强度(纵、横向)/(N·mm <sup>-1</sup> ) | ≥30     | ≥40  | ≥50  | ≥60  |
| 屈服伸长率(纵、横向)/%                      |         | ≥11  |      |      |
| 断裂伸长率(纵、横向)/%                      |         | ≥600 |      |      |
| 直角撕裂负荷(纵、横向)/N                     | ≥170    | ≥225 | ≥280 | ≥340 |
| 抗穿刺强度/N                            | ≥360    | ≥480 | ≥600 | ≥720 |
| 碳黑含量/%                             | 2.0~3.0 |      |      |      |

目前防渗膜的生产工艺有流延法和吹塑法。流延法通过熔体流延骤冷生产无拉伸、非定向的平挤薄膜,有单层流延和多层共挤流延2种方式。流延法的优点是生产效率高,不同厚度之间可随意调整,成本低,土工膜成品光泽度高,柔韧性好,最低厚度可以做到0.2 mm,缺点是厚度不够均匀、成膜宽度不大于6 m。吹塑法的生产工艺是3层共挤吹塑生产,将原料通过3个加热螺杆送料进入吹塑机模头,加热熔化成熔体,挤出机头并形成圆筒状,吹起形成一定直径的膜泡,冷却形成土工膜,牵引分割后经展膜架将土工膜展开最后成卷。吹塑工艺的优点是土工膜厚度均匀,拉伸强度高,膜的质量稳定,缺点是生产成本高,光泽度和伸长率不如流延法生产的防渗膜。流延法因为成本低,产品柔韧性好,目前隧道工程及民用工程使用较多,而吹塑法因为产品厚度均匀,质量稳定性较高,更适用于垃圾填埋场、水库、油罐区防渗等质量要求较高的工程。

图1显示了防渗膜放大5 000倍情况下的微观结构,图1a为防渗膜平面微观结构,整体平面致密、光滑、无空隙,具有良好的阻水作用。图1b为防渗膜断面微观结构,断面形状清晰,可见纤维状组成物,整体致密、抗撕裂、抗穿刺能力强。

## 2.2 垂向隐蔽铺设防渗膜帷幕连接工艺

垂直铺塑防渗技术是在20世纪80年代研制并发展起来的一种新型防渗技术,该技术将土工膜这一廉价的新型材料引入垂直防渗水利工程中,以期达到降低工程造价、满足防渗要求的目的<sup>[20]</sup>。



(a) 防渗膜平面微观 (b) 防渗膜断口微观

图1 防渗膜微观结构

Fig.1 Microstructure of the impermeable membrane

受防渗膜接头处缝隙影响,防渗膜帷幕渗透系数由 $10^{-13}\text{cm/s}$ 增大到 $10^{-5}\text{cm/s}$ ,无法保证防渗膜的连续性,降低了防渗效果。为解决每幅防渗膜之间存在缝隙、连接性弱、整体抗渗性降低的问题,防渗膜垂直铺设连接工艺采用叠覆搭接、连接锁、接头箱等方式连接为一体,提高阻水效果。

如图2a所示,初始成槽后将第一幅HDPE防渗膜置入槽内,为保证铺膜深度,HDPE防渗膜底进入下部相对隔水层深度 $\geq 2.0\text{m}$ 。在上一幅HDPE防渗膜铺设完成后,将下一幅HDPE防渗膜置入槽内,与上一幅防渗膜搭接连接,搭接宽度1~2 m。同时在槽段内灌注防渗材料,提高整体封堵和阻隔效果。采用叠覆搭接连接工艺的防渗膜帷幕深度大,目前最深已施工56 m防渗膜截水帷幕。



图2 防渗膜接头连接工艺示意

Fig.2 Connecting process of impermeable membrane joint

如图2b所示,初始成槽后将已焊接成整体的HDPE防渗膜置入槽内,下一幅HDPE防渗膜置入槽内,与上一幅防渗膜进行互锁连接。同时在槽段底部灌注防渗材料,封堵和阻隔污染区域。防渗膜幅间采用连接锁进行连接,锁扣间孔洞插入膨胀止水条。铺膜完成后在防渗膜两侧接头下放注浆管至膜的底部,灌注防渗材料。连接锁连接工艺主要用

于水库围坝、堤防等水工建筑物垂直防渗和危废污染场地治理,铺设深度由开始的3~4 m发展到目前的13~14 m<sup>[21]</sup>。如图2c所示,初始成槽后将“H”型钢制作的接头箱下放在槽段内,接头箱采用法兰接头形式,用螺栓连接。已与限位端连接的HDPE防渗膜置入槽内,再将下一幅HDPE防渗膜置入槽内,与上一幅防渗膜通过接头箱连接。防渗膜两侧端安装“[”型限位,内侧安装遇水膨胀橡胶,防渗膜下放结束后,遇水膨胀橡胶遇水膨胀,将水流隔断。铺膜完成后在接头箱内下放注浆管至底部,灌注防渗材料至地表。2018年10月进行了多次防渗接头箱连接试验,最大深度达到18.6 m。如图2d所示,初始成槽后将两端已粘附磁吸接头的HDPE防渗膜置入槽内,在上一幅HDPE防渗膜铺设完成之后,将下一幅已黏附磁吸接头的HDPE防渗膜置入槽内,与上一幅防渗膜通过磁吸接头粘附连接。磁吸接头连接的防渗膜帷幕施工深度将不受连接条件的限制,防渗膜铺设深度可满足设计深度要求。

### 2.3 不同柔性防渗膜连接工艺效果对比

因连接锁连接深度较浅,本次研究主要对比分析截水帷幕垂向铺设的防渗膜在叠覆搭接、接头箱连接、磁吸接头连接、热熔连接等不同连接工艺时柔性防渗膜的整体抗渗性能。

如图3所示,使用截水帷幕试验模型箱模拟帷幕开挖的围井槽段,在截水帷幕试验模型箱内进行不同柔性防渗膜连接试验,玻璃胶密封底部接缝,用砂石混合料模拟原始地层材料回填,对防渗膜外侧“槽段”进行填充。打开进水阀门,对防渗膜外侧“地层”进行回灌模拟帷幕外侧水位,观测防渗膜帷幕围井内侧渗漏水情况,并定量测试渗水量大小。

防渗膜接头连接工艺效果对比试验结果见表3,热熔连接防渗效果最好,试验时间内不渗水;其次是

表3 不同柔性防渗膜连接工艺防渗效果统计

Table 3 Anti-seepage effect of different flexible anti-seepage membrane connection techniques

| 连接工艺 | 试验条件    |       |         |        |     | 试验结果  |  |
|------|---------|-------|---------|--------|-----|-------|--|
|      | 搭接距离/cm | 搭接缝/条 | 稳定水头/cm | 试验时间/h | 渗透性 | 渗水量/g | 单条缝渗透速率/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ) |
| 叠覆搭接 | 40      | 2     | 59      | 2      | 渗漏  | 1 268 | 3.17×10 <sup>-4</sup>                      |
|      | 60      | 1     | 59      | 2      | 渗漏  | 498   | 2.49×10 <sup>-4</sup>                      |
|      | 80      | 1     | 59      | 2      | 渗漏  | 286   | 1.43×10 <sup>-4</sup>                      |
| 磁吸连接 | 40      | 2     | 59      | 2      | 渗漏  | 536   | 1.34×10 <sup>-4</sup>                      |
|      | 60      | 2     | 59      | 2      | 渗漏  | 157   | 3.93×10 <sup>-5</sup>                      |
|      | 80      | 2     | 59      | 2      | 渗漏  | 38    | 9.50×10 <sup>-6</sup>                      |
| 连接锁  | —       | 1     | 59      | 2      | 渗漏  | 300   | 1.50×10 <sup>-4</sup>                      |
| 热熔连接 | 10      | 1     | 59      | 2      | 不渗  | —     | —  |

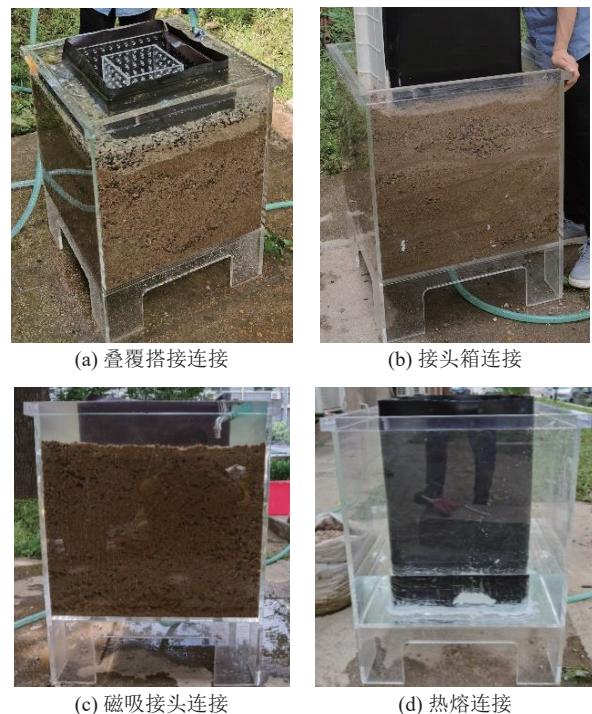


图3 防渗膜接头连接工艺效果对比试验

Fig.3 Comparison test on the effect of anti-seepage membrane joint connection

磁吸连接80 cm宽度时,渗水率为 $9.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{h}$ ;叠覆搭接80 cm宽度时,渗水率为 $1.43 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{h}$ ,且随着搭接宽度的减小而增大;接头箱连接工艺的接头渗水稍大,主要是由于是试验时接头箱的接头缝隙处理不够,导致渗水量较大。防渗膜搭接位置的铺设平整度对防渗效果有很大影响,当防渗膜铺设平整时,回填的砂石材料挤密防渗膜,其抗渗效果有很大提高。从试验结果分析,结合现场操作方便性,磁吸接头连接的搭接工艺效果较好。

### 3 柔性磁吸防渗膜垂向帷幕技术

试验矿区矿坑主要充水水源为第四系潜水含水

层, 占矿坑疏排水量的 95% 左右。在剥采充分揭露第四系潜水含水层底板后, 矿坑的疏排水量达到最大值 53 万  $m^3/d$ , 疏排水量中以第四系潜水含水层的静储量为主, 动态补给量为辅; 其后随着静储量的持续疏放, 疏排水量中动态补给量占比逐年增大, 静储量占比降低, 矿坑疏排水量呈逐年下降并渐趋稳定。

为减少矿坑疏排水量, 沿现有矿坑东南侧一级

边坡平台向北延伸, 建造除矿坑西南角(隔水边界或弱给水边界)的矿坑边界全封闭截水帷幕, 对矿坑所有来水边界进行阻截, 可最大程度减少矿坑疏排水量。如图 4 所示, 先期在矿坑南侧开展 1 380 m 的试验工程, 进行柔性磁吸防渗膜垂向帷幕技术试验和验证, 深度 13~39 m, 试验区域揭露地层主要为圆砾夹砂、卵石层、黄土及风化砂岩、泥岩; 圆砾石粒径大小为 50~150 mm, 渗透系数 17~700 m/d。

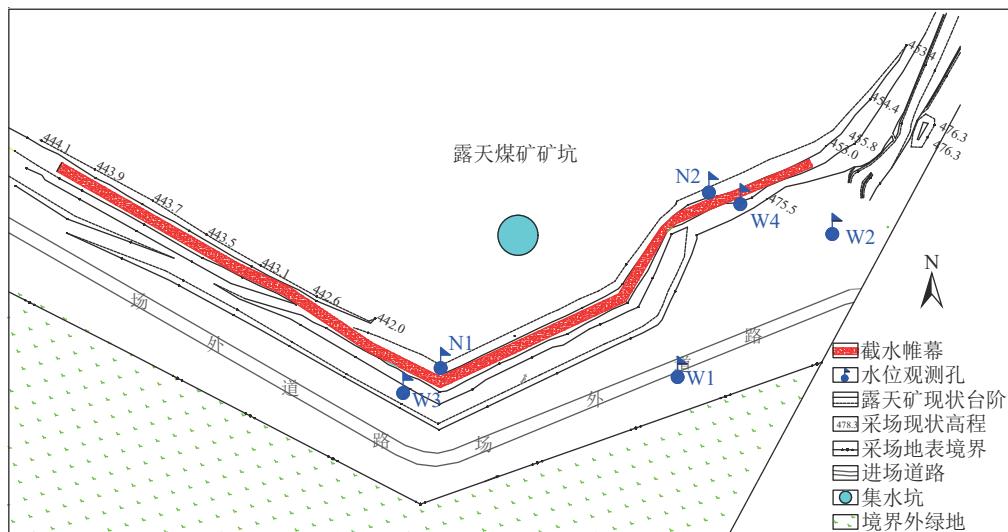


图 4 试验区截水帷幕平面示意  
Fig.4 Schematic plan of water cutting curtain in test area

### 3.1 柔性防渗膜垂向隐蔽铺设

元宝山露天煤矿截水帷幕试验工程的槽段采取分段开挖方式, 开挖槽宽 0.8 m, 液压抓斗抓出的槽内土(岩)体直接由自动装卸车运至弃土场。在抓斗施工中, 如果遇到坚硬土层或岩石, 则采用铣槽机进行入岩。如图 5 所示, 在柔性防渗膜两侧端分别黏结 1.0 m 宽自带磁或后充磁磁膜, 或在柔性防渗膜制作过程中在两侧端加入磁性材料, 使柔性防渗膜两侧端本身具有磁吸功能或经充磁后具有磁吸功能。利用图 2d 所示的铺膜机将第一幅柔性自带磁或后充磁防渗膜下放至已开挖的帷幕槽段, 第一幅柔性自带磁或后充磁防渗膜下放完成之后用固钉机对磁膜进行固定; 下放第二幅柔性自带磁或后充磁防渗膜时移动铺膜机, 控制第二幅膜与第一幅膜的水平距离在 30 cm 以上, 下放完第二幅柔性自带磁或后充磁防渗膜之后, 移动铺膜机使第二幅柔性自带磁或后充磁防渗膜逐渐靠近第一幅膜, 直至两幅膜搭接处粘结, 搭接长度控制在 1.0 m。

### 3.2 柔性防渗膜接头磁吸连接

柔性自带磁防渗膜铺设完第一幅和第二幅防渗

膜后, 在移动铺膜机使第二幅柔性自带磁防渗膜逐渐靠近第一幅膜的过程中, 两幅防渗膜搭接处因磁力相互吸引, 连接为连续的整体。

柔性后充磁防渗膜连接方式如图 6a 所示, 充磁机通过电缆线与充磁板连接, 充磁板在柔性磁吸防渗膜接头的帷幕槽口位置由上而下逐段充磁, 充磁板在线圈中通过瞬间的脉冲大电流, 使线圈产生短暂的超强磁场, 从而使磁吸膜磁化, 具备磁吸功能。如图 6b 所示, 在磁膜搭接处充磁完成后, 通过一个长度为 100 cm、直径为 75 cm 的圆柱形滚筒压膜器

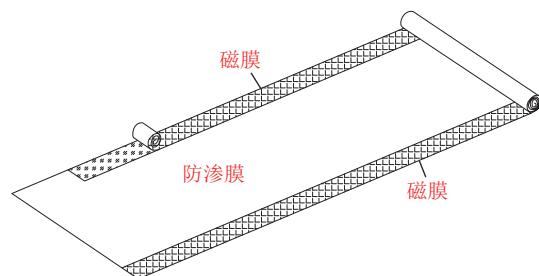


图 5 柔性磁吸防渗膜制作示意  
Fig.5 Schematic for making the flexible magnetic suction impermeable membrane

压紧、连接磁膜搭接处。使用吊机将压膜器吊起,自上而下反复滚压搭接处磁膜(反复两次),速度控制在4 m/min,促使搭接处磁膜黏结紧密。



图6 磁吸防渗膜充磁及接头压膜

Fig.6 Magnetization and joint pressure membrane of the magnetic suction impermeable membrane

如图7a所示,防渗膜常规铺设搭接后接头处存在5~20 cm的缝隙,而且中间部分的凸起缝隙更大,导致防渗膜搭接处缝隙成了截水帷幕的最大过水通道,严重影响截水帷幕效果。如图7b所示,防渗膜采用磁吸连接后接头处无缝隙,相邻两幅防渗膜紧密的连接为一体,避免缝隙成为截水帷幕的过水通道,提高了帷幕截水效果。传统的注浆帷幕通过地面施工直钻孔、地面定向钻孔、井下水平钻孔或井上下联合钻孔,在钻孔中分段注浆,浆液通过钻孔进入地层,在地层中扩散、凝结形成连续的帷幕墙体。注浆帷幕主要适用于岩溶、溶隙、裂隙地层,具有施工方便、工艺流程简单、截水率较高的优势。同时钻孔注浆帷幕的浆液扩散方向和注浆量不可控,在强渗松散层扩散范围大,不易形成连续帷幕墙体,注浆帷幕形成的帷幕墙体刚性大,抗变形能力弱,易产生裂缝,形成过水通道。柔性磁吸防渗膜实现了防渗膜的紧密、连续粘贴,防渗膜帷幕整体具有良好的阻水性能,通过磁吸防渗膜材料将相邻的防渗膜帷幕连接为连续的整体,解决现有截水帷幕抗变形能力弱、接头连接效果差、阻水率低、浆液扩散不可控的问题。柔性磁吸防渗膜帷幕适用于松散层、岩层,可满足150 m以浅的工程需求,相比传统注浆帷幕具有造价低、施工效率高、耐用、效果好的优点。

### 3.3 柔性防渗膜垂向帷幕填充成墙

如图8所示,柔性磁吸防渗膜铺设、连接后,在防渗膜与帷幕槽段间空隙填充原状土、水泥-粉煤灰浆液、砂浆、自凝灰浆或混凝土等材料,填充材料与柔性防渗膜挤压、粘结为一体,形成整体截水帷幕墙体。

在已灌注充填材料帷幕槽段的相邻槽段一端插

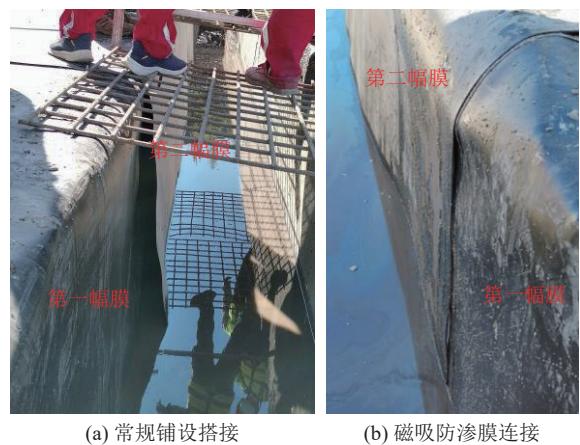


图7 柔性磁吸防渗膜与常规铺设效果对比

Fig.7 Laying effect comparison of the flexible magnetic suction impermeable membrane and conventional membrane

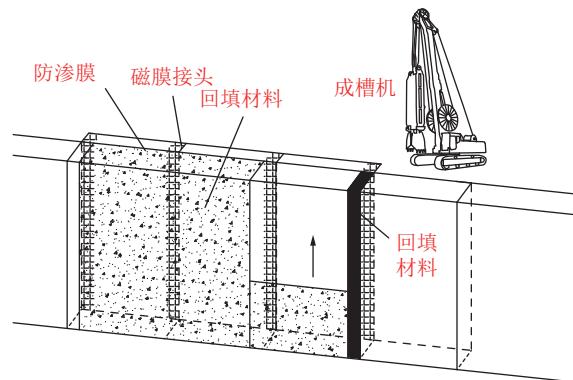


图8 柔性磁吸防渗膜帷幕填充示意

Fig.8 Curtain filling of the flexible magnetic suction impermeable membrane

入接头箱,接头箱外侧包裹一层绝缘材料,固定槽段充填材料扩散范围,防止磁吸防渗膜位置进入充填材料,为防渗膜磁吸连接腾出空间。在相邻帷幕槽段内填充混凝土、砂浆、自凝灰浆、回填原状土等充填材料,槽段内泥浆在浇筑充填材料的同时进行回收利用,充填材料灌注至地面或设计高度时停止。在相邻帷幕槽段内浇筑的充填材料初凝后,缓慢上拔、起吊接头箱,将接头箱一节一节拔出槽段,放置于地面,为下一个相邻槽段防渗膜连接腾出空间。重复上述过程,直至完成防渗膜垂向帷幕施工,形成连续的防渗膜垂向帷幕体。

## 4 应用效果及分析

如图9a所示,试验工程开展前的帷幕位置下方集水坑长期积满强渗松散层渗漏水,集水坑与截水帷幕的位置关系如图4所示,整个试验区域的渗水量1 600 m<sup>3</sup>/d。1 369 m截水帷幕试验工程完成后,如图9b所示,帷幕位置下方集水坑已干涸、无水,试

验区域强渗松散层水已彻底被柔性磁吸防渗膜垂向帷幕阻隔，帷幕外侧松散层水已无法补给帷幕内侧松散层，帷幕外侧强渗松散层水仅能通过帷幕两端绕流方式补给。



(a) 截水帷幕施工前 (b) 截水帷幕施工后

图9 磁吸防渗膜垂向帷幕效果对比

Fig.9 Effect comparison of the magnetic suction impermeable membrane before and after implementation

如图10所示，W1、W2、W3和W4为试验区帷幕外侧强渗松散层水位观测孔，N1、N2为试验区帷幕内侧强渗松散层水位观测孔。试验区帷幕截水工程自2021年8月10日开始试验施工，墙外W1观测孔水位初始标高433.16 m，至2021年9月29日，帷幕长度完成782 m，W1观测孔水位标高上升至+433.77 m，墙外水位抬升了0.61 m，W3观测孔、W4观测孔水位标高均为+435.79 m；2021年10月9日，帷幕长度完成978 m，W1观测孔水位标高上升至+434.06 m，墙外水位抬升了0.90 m，W3观测孔、W4观测孔水位标高均为435.79 m，W2观测孔水位标高为+433.83 m；2021年11月3日，截水帷幕完成1369 m，截水帷幕外侧水位进一步抬升，内部水位逐渐下降，截至2021年11月28日，帷幕外侧观测孔W1、W2、W3、W4的水位标高分别为+442.28、+440.31、+443.97和+441.34 m，分别较原水位升高

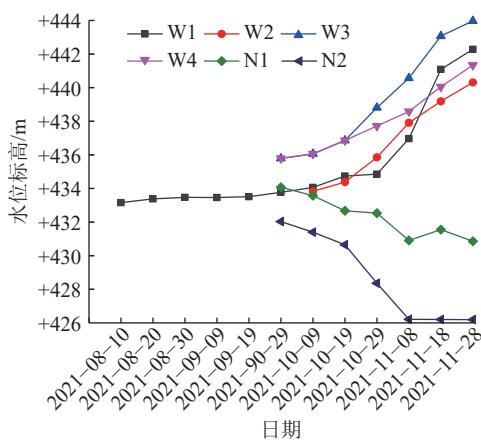


图10 试验区帷幕内外侧松散层水位变化

Fig.10 Changes of water level of loose layer inside and outside curtain in test area

9.12、6.48、8.18和5.55 m；帷幕内侧观测孔N1、N2的水位标高分别为+430.86、+426.19 m，分别较原水位降低3.21、5.84 m。

## 5 结 论

1) HDPE 防渗膜主要由高密度聚乙烯、碳黑、抗老化剂、抗氧剂、紫外线吸收剂、稳定剂等辅料组成，渗透系数达  $10^{-13}$  cm/s，结构致密、柔软、抗变形、防渗性能好、经久耐用，是截流、控污、防渗的良好材料，可满足矿山强渗松散层垂向帷幕要求。

2) 防渗膜每幅宽度4~8 m，垂向帷幕工程应用时需将多幅防渗膜连接为一体，常用的连接工艺有叠覆搭接、连接锁、接头箱等，存在铺设深度浅、接头渗漏、操作复杂等问题；针对现有问题，研发了磁吸接头材料及连接工艺，经室内试验对比，磁吸接头连接工艺效果优于叠覆搭接和接头箱连接工艺。

3) 试验区进行了自带磁和后充磁2种柔性磁吸防渗膜制作、铺设、连接和回填成墙试验，防渗膜接头处缝隙由5~20 cm减小为0，磁吸连接后防渗膜接头处无缝隙，相邻2幅防渗膜紧密的连接为有机整体，避免接头处缝隙成为截水帷幕的过水通道，大幅提高了帷幕截水效果。

4) 试验区强渗松散层采用柔性磁吸防渗膜垂向帷幕后，帷幕位置下方长期积满强渗松散层渗漏水的集水坑已干涸、无水，帷幕外侧强渗松散层水位较试验前水位升高5.55~9.12 m，帷幕内侧强渗松散层水位较试验前水位降低3.21~5.84 m，柔性磁吸防渗膜垂向帷幕在试验矿区取得良好应用效果。

## 参考文献(References):

- [1] 左芝鲤,成金华,郭海湘.新时代我国矿产资源安全浅析[J].中国国土资源经济,2021,34(11): 54-61, 83.  
ZUO Zhili, CHENG Jinhua, GUO Haixiang. An analysis of China's mineral resources security in the new era[J]. Natural Resource Economics of China, 2021, 34(11): 54-61, 83.
- [2] 苏健,梁英波,丁麟,等.碳中和目标下我国能源发展战略探讨[J].中国科学院院刊,2021,36(9): 1001-1009.  
SU Jian, LIANG Yingbo, DING Lin, et al. Research on China's energy development strategy under carbon neutrality[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(9): 1001-1009.
- [3] 中华人民共和国中央人民政府.国务院新闻办发布会介绍《全国安全生产专项整治三年行动计划》有关情况[EB/OL].(2020-4-28)[2021-11-8]. [http://www.gov.cn/xinwen/2020-04/28/content\\_5506931.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2020-04/28/content_5506931.htm)
- [4] 刘懿,史先锋,吴鹏,等.全国非煤矿山总量情况统计分析及监管建议[J].中国安全生产科学技术,2019,15(10): 178-183.  
LIU Yi, SHI Xianfeng, WU Peng, et al. Statistical analysis on total

- amount status of non-coal mines in China and supervision suggestions[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2019, 15(10): 178–183.
- [5] 范立民, 吴群英, 彭捷, 等. 黄河中游大型煤炭基地地质环境监测思路和方法[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(5): 1417–1427.
- FAN Limin, WU Qunying, PENG Jie, et al. Thoughts and methods of geological environment monitoring for large coal bases in the middle reaches of the Yellow River[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(5): 1417–1427.
- [6] 董书宁, 王海, 黄选明, 等. 基于保障生态地下水位的露天煤矿主动保水技术研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(4): 49–57.
- DONG Shuning, WANG Hai, HUANG Xuanming, et al. Research on active water conservation technology in open-pit coal mine based on ecological protection groundwater level[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(4): 49–57.
- [7] 范立民. 保水采煤面临的科学问题[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(3): 667–674.
- FAN Limin. Some scientific issues in water-preserved coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(3): 667–674.
- [8] 靳德武, 刘基, 许峰, 等. 榆神矿区浅埋煤层减水开采中预疏放标准确定方法[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(1): 220–229.
- JIN Dewu, LIU Ji, XU Feng, et al. Method of determining of pre-drainage standard in water-decrease mining of shallow seam in Yushen mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(1): 220–229.
- [9] 王双明, 孙强, 乔军伟, 等. 论煤炭绿色开采的地质保障[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(1): 8–15.
- WANG Shuangming, SUN Qiang, QIAO Junwei, et al. Geological guarantee of coal green mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 8–15.
- [10] 顾大钊, 李井峰, 曹志国, 等. 我国煤矿矿井水保护利用发展战略与工程科技[J]. *煤炭学报*, 2020, 46(10): 3079–3089.
- GU Dazhao, LI Jingfeng, CAO Zhiguo, et al. Technology and engineering development strategy of water protection and utilization of coal mine in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 46(10): 3079–3089.
- [11] 薛禹群, 吴吉春, 谢春红, 等. 元宝山露天煤矿地下水疏干数值模拟[J]. *煤炭学报*, 1996, 21(3): 255–260.
- XUE Yuqun, WU Jichun, XIE Chunhong, et al. Numerical simulation of ground water drainage for Yuanbaoshan opencast coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 1996, 21(3): 255–260.
- [12] 王双明, 申艳军, 孙强, 等. 西部生态脆弱区煤炭减损开采地质保障科学问题及技术展望[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2020, 2(4): 043531.
- WANG Shuangming, SHEN Yanjun, SUN Qiang, et al. Scientific issues of coal detraction mining geological assurance and their technology expectations in ecologically fragile mining areas of Western China[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2020, 2(4): 043531.
- [13] 刘基, 靳德武, 姬亚东, 等. 复杂水文地质条件下大型帷幕截流工程效果数值仿真分析[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(8): 2427–2436.
- LIU Ji, JIN Dewu, JI Yadong, et al. Numerical simulation analysis of closure effect of large curtain work with complex hydrogeological conditions[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(8): 2427–2436.
- [14] 董书宁, 杨志斌, 姬中奎, 等. 神府矿区大型水库旁烧变岩水保水开采技术研究[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(3): 709–717.
- DONG Shuning, YANG Zhibin, JI Zhongkui, et al. Study on water-preserved mining technology of burnt rock aquifer beside the large reservoir in Shenfu mining area[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(3): 709–717.
- [15] 崔建平, 蒲治国, 丁湘, 等. 露天煤矿烧变岩黏土基注浆帷幕建造技术[J]. *煤炭工程*, 2021, 53(7): 59–64.
- CUI Jianping, PU Zhiguo, DING Xiang, et al. Construction of clay-based grouting curtain in burnt rock of open-pit coal mine[J]. *Coal Engineering*, 2021, 53(7): 59–64.
- [16] 王海, 黄选明, 朱明诚, 等. 基于高掺量粉煤灰防渗墙的露天矿水资源保护技术[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(3): 1160–1169.
- WANG Hai, HUANG Xuanming, ZHU Mingcheng, et al. Water-preserved coal mining technology in open pit based on cutoff wall with high fly ash content[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(3): 1160–1169.
- [17] 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 Xuanming, 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.
- [18] 李文嵩, 党亚堃, 朱明诚, 等. 露天煤矿截水帷幕防渗膜垂向隐蔽铺设施工工艺[J]. *煤田地质与勘探*, 2020, 48(4): 68–73.
- LI Wensong, DANG Yakun, ZHU Mingcheng, et al. Construction technology of vertical concealed laying of anti-seepage membrane for water cutoff curtain in the open-pit coal mine[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2020, 48(4): 68–73.
- [19] 王海, 董书宁, 孙亚军, 等. 我国大水矿山侧向帷幕截水技术及水资源保护效果研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(7): 207–223.
- WANG Hai, DONG Shuning, SUN Yajun, et al. Lateral curtain interception technology and water conservation effect in groundwater abundant mines of China[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(7): 207–223.
- [20] 孙晓东, 周嘉宾, 郑峰, 等. 柔性垂直阻隔技术在危废污染应急治理项目中的应用[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2016, 43(10): 126–130.
- SUN Xiaodong, ZHOU Jiabin, ZHENG Feng, et al. Application of technology of flexible vertical seepage control block in the project of the hazardous waste pollution emergency control[J]. *Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2016, 43(10): 126–130.
- [21] 杨小凤. 垂直铺塑防渗技术的改进及推广应用[D]. 济南: 山东大学, 2007: 50–70.
- YANG Xiaofeng. Reformation and application on anti-seepage technique by laying plastic vertically[D]. Jinan: Shandong University, 2007: 50–70.