



## 基于等厚度水泥土帷幕的斜井井筒水治理技术研究

杨志斌 石银斌 王海 李文平 吕文波 雷占

### 引用本文:

杨志斌, 石银斌, 王海, 等. 基于等厚度水泥土帷幕的斜井井筒水治理技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 224–233.  
YANG Zhibin, SHI Yinbin, WANG Hai. Research on water leakage control technology of inclined shaft of coal mine based on cement soil curtain of equal thickness[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 224–233.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0313>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 基于地面定向钻孔注浆的煤矿立井钻井法井壁渗漏水治理技术

Well wall water leakage control technology of vertical well drilling method in coal mines based on grouting of ground directional drilling

煤炭科学技术. 2024, 52(7): 168–177 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1261>

#### 斜井突水涌砂机理及井壁破裂修复技术研究

Research on water and sand inrush mechanism and repair technology of shaft rupture in inclined shaft

煤炭科学技术. 2019(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/bc1db5d9-cef1-441b-8147-28def4c1b2e7>

#### 矿山强渗松散层柔性磁吸防渗膜垂向帷幕截水技术研究

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

煤炭科学技术. 2023, 51(9): 180–188 <https://doi.org/10.12438/cst.2022-0165>

#### 厚表土薄基岩凿井突水溃砂井筒破坏治理技术研究

Study on shaft damage control technology of water inrush and sand burst in drilling process with thick topsoil and thin bedrock

煤炭科学技术. 2021, 49(4): 176–185 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.04.021>

#### 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.cst.QN21-014>

#### 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>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

杨志斌, 石银斌, 王海, 等. 基于等厚度水泥土帷幕的斜井井筒水治理技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 224–233.

YANG Zhibin, SHI Yinbin, WANG Hai, *et al.* Research on water leakage control technology of inclined shaft of coal mine based on cement soil curtain of equal thickness[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 224–233.

## 基于等厚度水泥土帷幕的斜井井筒水治理技术研究

杨志斌<sup>1</sup>, 石银斌<sup>2</sup>, 王海<sup>1</sup>, 李文平<sup>2</sup>, 吕文波<sup>2</sup>, 雷占<sup>2</sup>

(1. 中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077; 2. 国家能源集团乌海能源有限责任公司, 内蒙古 乌海 016099)

**摘要:**为解决我国西部地区松散层和浅部风化基岩层含水丰富导致的斜井井筒过富水松散层段在井筒施工缝、混凝土接茬、井壁裂缝位置发生渗漏、恶化井下作业环境、降低作业效率、增大井下排水负担和费用、影响煤矿的安全生产的问题,从保护地下水资源和井筒安全运营的角度出发,分析了煤矿斜井井筒渗漏水特征和现有的疏排水、壁后注浆、旋喷桩、帷幕注浆等治理措施,研究了斜井井筒渗漏水层位等厚度水泥土帷幕原理和结构、参数选择依据、帷幕构筑方法,测试分析了地层条件、综合含水率、水泥掺量等因素对水泥土帷幕性能影响,并进行了现场示范应用。研究结果表明:煤矿斜井井筒渗漏水位置大多发生在底板、腰墙和二者接缝处,涌水量数十至数百立方米每小时,有的甚至发生涌水携砂情况,危及井筒安全;等厚度水泥土帷幕通过横向切削、回撤切削搅拌、喷浆搅拌成墙3个步骤将混合均匀的地层材料与水泥浆液在煤矿斜井井筒外侧地层中形成上下厚度均匀、接头数量少、截水率高的等厚度水泥土墙体,有效阻隔斜井井筒与外侧松散层、风化基岩之间的水力联系;等厚度水泥土帷幕的强度与水泥掺量正相关,渗透系数与水泥掺量负相关,黏土地层的水泥土帷幕性能弱于黄土、细砂等地层;示范应用现场的帷幕原状心样抗压强度8.62 MPa,渗透系数 $2.69 \times 10^{-8}$  cm/s,井筒涌水量由16.8 m<sup>3</sup>/h降至1.6 m<sup>3</sup>/h左右,较治理前减少90.5%,取得良好应用效果。此方法可解决我国西部富水松散层斜井井筒渗漏水问题,保障斜井井筒安全运营,保护矿山地下水资源。

**关键词:** 煤矿斜井; 井筒治水; 井筒漏水; 松散层; 渗漏水; 等厚度水泥土帷幕; 涌水量

**中图分类号:** TD745

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-2336(2023)07-0224-10

### Research on water leakage control technology of inclined shaft of coal mine based on cement soil curtain of equal thickness

YANG Zhibin<sup>1</sup>, SHI Yinbin<sup>2</sup>, WANG Hai<sup>1</sup>, LI Wenping<sup>2</sup>, LYU Wenbo<sup>2</sup>, LEI Zhan<sup>2</sup>

(1. Xi'an Research Institute(Group) Co., Ltd., China Coal Technology & Engineering, Xi'an 710077, China; 2. Wuhai Energy Co., Ltd., China Energy Investment Corporation, Wuhai 016099, China)

**Abstract:** The loose layers and shallow weathered bedrock in western China are rich in water, and the inclined shaft crossing the water-rich loose layer is prone to leak at the wellbore construction joints, concrete joints and wall cracks. Leakage will lead to the deterioration of underground working environment, lower working efficiency, increase the burden and cost of underground drainage, and affect the safety of coal mine production. In order to solve the above problems, this paper analyses the characteristics of water seepage in slanting coal mine shafts from the perspective of protecting groundwater resources and safe operation of shafts, and the existing management measures such as drainage, post-wall grouting, rotary pile spraying and curtain grouting. And the principle and structure of soil-cement curtain with equal thickness of water leakage level in inclined shaft, the basis of parameter selection and the method of curtain construction were studied. The effects of formation conditions, comprehensive moisture content, cement content and other factors on the performance of cement curtain were analyzed. The field test application of water leakage control of inclined shaft was carried out in test mining area. The research results

收稿日期: 2023-03-16

责任编辑: 黄小雨

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2023-0313

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804100); 中煤科工集团西安研究院有限公司科技创新基金资助项目(2022XAYJS06)

作者简介: 杨志斌(1985—), 男, 江西临川人, 副研究员, 博士。E-mail: yangzhibin@cctegxian.com

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

shows that the water leakage of inclined shaft in coal mine mostly occurs in the bottom plate, waist wall and the joint of both, and the water inflow was tens of  $\text{m}^3/\text{h}$  ~ hundreds of  $\text{m}^3/\text{h}$ , and some even had water gushing and carrying sand, endangering the safety of the shaft. The equal-thickness soil-cemented curtain forms an equal-thickness wall with uniform thickness, few joints and high water interception rate in the outer stratum of the slanting coal mine shaft through three steps: lateral cutting, retraction cutting and mixing, and slurry mixing to form a wall. It effectively blocks the hydraulic connection between the inclined shaft, the outside loose layer and the weathered bedrock. The strength of the cement curtain of equal thickness is positively correlated with the cement admixture, and the permeability coefficient is negatively correlated with the cement admixture. The performance of the cement curtain of clay stratum is weaker than that of loess and fine sand stratum. The in-situ core sample of the curtain at the demonstration application site has a compressive strength of 8.62 MPa and a permeability coefficient of  $2.69 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ . The water influx in the borehole is reduced from 16.8  $\text{m}^3/\text{h}$  to about 1.6  $\text{m}^3/\text{h}$ , which is 90.5% less than before the treatment, and achieved good application results. This method can solve the seepage problem of inclined shaft in loose layer in western China, ensure the safe operation of the well shaft, and protect the groundwater resources.

**Key words:** coal mine inclined shaft; water treatment in shaft; water inflow in mine shaft; loose layer; leakage of water; cement curtain of equal thickness; water inflow

## 0 引言

我国煤炭消费量大,煤炭开采对地下水环境影响大,2022年原煤产量45.6亿t,按吨煤开采产生矿井水1.87  $\text{m}^3$ ,每年产生矿井水约 $8.52 \times 10^9 \text{ m}^3$ <sup>[1-2]</sup>。为保护煤矿区地下水资源,董书宁等<sup>[3-4]</sup>研究了地面直钻孔注浆帷幕、桩排式帷幕、地下连续墙等帷幕截水技术,并在露天煤矿生态水位保护、大型水体旁烧变岩水资源保护成功应用。曾一凡等<sup>[5-6]</sup>提出了一种集约型煤水热多资源正效协同开采模式,剖析了该模式的内涵与基本协同模式,对全生命周期煤炭开采伴生资源控制-利用-储存形成矿区资源产供储一体产业链。王海、张雁等<sup>[7-9]</sup>研究了防渗膜帷幕、超高压角域射流注浆、咬合桩等帷幕截水技术,在扎尼河、元宝山露天煤矿成功应用,大幅减少矿坑疏排水量。石志远等<sup>[10]</sup>采用地面直钻孔注浆帷幕、地面水平孔注浆帷幕的方式实现了复合强富水含水层帷幕截渗。地面直钻孔注浆帷幕、地面水平孔注浆帷幕、井下钻孔注浆帷幕、桩排式帷幕、地下连续墙和防渗膜帷幕等技术有效保护了煤矿区的松散层水、烧变岩水、基岩裂隙水、溶隙水<sup>[1]</sup>。由于煤矿斜井井筒施工缝、混凝土接茬、井壁裂缝的存在,我国西部煤矿斜井井筒在富水松散层段大多发生渗漏现象,涌水量数十至数百立方米每小时,有的甚至存在涌水携砂情况。井筒是矿井通达地面的主要进出口,是矿井生产期间提升运输煤炭(或矸石)、运送人员、材料和设备以及通风和排水的咽喉工程<sup>[11-12]</sup>。煤矿斜井井筒渗漏水一方面恶化了井下作业环境、影响了作业效率,另一方面造成了地下水资源的浪费,增大了井下排水负担和费用,井筒一旦发生破坏,将严重影响煤矿的安全生产,后果不堪设想。

针对我国西部富水松散层煤矿斜井井筒渗漏水

问题,袁东锋等<sup>[11]</sup>采用地质雷达探测壁后空洞和富水区,壁后注浆治理井筒涌水漏砂;常青等<sup>[12]</sup>针对斜井穿过萨拉乌苏组含水层渗漏水现象,提出了井壁结构分段复合支护的方法通过富水含水层;刘巍、王路等<sup>[13-14]</sup>研究了斜井高压富水、过水通道、空腔空洞和井筒涌水机理,以帷幕注浆为主、壁后注浆为辅的注浆堵水方案治理斜井井筒水;袁世冲<sup>[15]</sup>采用临时木垛支撑缓解井壁变形速率,结合帮部破壁注浆封堵水、砂来源与通道,为井筒整体修复赢得宝贵时间;杨栋、翟加文、赵峰等<sup>[16-18]</sup>采用壁后注浆方法有效封堵了斜井井筒渗漏水,减少了斜井井筒治理段渗漏水。魏世荣等<sup>[19]</sup>采用地面旋喷注浆+井下壁后注浆的方式治理斜井井筒过富水松散层和风化基岩段渗漏水,井筒渗水量大幅减少。同时,仍有大多数煤矿采用钻孔降水的方式控制斜井井筒渗漏水。现有煤矿斜井井筒渗漏水治理方法存在破坏地下水资源和生态环境、降低井筒强度、影响井筒结构安全性、浆液扩散方向和范围不可控的问题。针对煤矿斜井井筒过富水松散层段渗漏水治理需求和存在的问题,开发了一种基于等厚度水泥土帷幕的煤矿斜井井筒水治理技术,通过室内试验和现场示范应用,解决煤矿斜井井筒渗漏水问题,为类似工况的矿山提供参考。

## 1 斜井井筒渗漏水特征及治理措施

### 1.1 斜井井筒渗漏水特征

我国西部地区煤层厚度大、埋藏浅,地质结构特殊,松散层和浅部风化基岩层含水丰富。表1所示宋新庄煤矿流砂层富水性强,涌水漏砂严重,顶板喷层部分脱落,井帮底角局部垮塌,涌水量35  $\text{m}^3/\text{h}$ <sup>[11]</sup>。杭来湾煤矿井筒施工至萨拉乌苏组含水层时涌水量为70  $\text{m}^3/\text{h}$ <sup>[12]</sup>。榆树湾煤矿主斜井涌水量26.8~86.8  $\text{m}^3/\text{h}$ ,



平均 60.94 m<sup>3</sup>/h, 副斜井涌水量 49~85.2 m<sup>3</sup>/h, 平均 68.5 m<sup>3</sup>/h<sup>[13]</sup>。曹家滩煤矿主副斜井形成后, 地下水渗漏严重, 主副斜井井筒总涌水量约 350 m<sup>3</sup>/h, 主要涌水层为保德组红土层底部的砂化含水层和安定组顶部风化基岩含水层, 砂化层胶结性差, 长期的流水携沙导致井筒壁后掏空, 井筒存在失稳风险<sup>[14]</sup>。金鸡滩煤矿副斜井 230~320 m 段水沟处底板涌水中出现含砂现象, 水量、含砂量持续增大, 底板有裂缝发育, 顶板有破裂及淋水现象, 斜井最大出水量达 72 m<sup>3</sup>/h, 含砂量最大达到 16%, 且水量及含砂量持续快速增加, 井壁多处出现破裂, 斜井上覆地表发育 11 个塌陷坑, 总体积约 650 m<sup>3</sup>, 斜井顶板、底板最大移近量 422.5 mm<sup>[15]</sup>。榆阳煤矿采用斜井开拓, 斜井穿过松散层厚度 16 m 左右, 井筒涌水量约 30 m<sup>3</sup>/h, 2003 年井筒涌水量约 70 m<sup>3</sup>/h<sup>[13]</sup>。甜水堡煤矿副斜井在流砂层区域段混凝土砌碛浇筑接缝多处渗水, 井筒 210~309 m 段混凝土出现破裂、剥落<sup>[16]</sup>。朝川矿一井新施工带式输送机斜井明槽段回填后, 第四系潜水通过疏松回填土渗漏涌入井筒内, 涌水量达 35 m<sup>3</sup>/h 左右<sup>[17]</sup>。大佛寺煤矿斜井井筒穿过松散层孔隙含水层、基岩承压含水层时底板、两帮裂缝、拱顶等多处发生渗漏, 主、副斜井渗漏量分别为 120 m<sup>3</sup>/h 和 95 m<sup>3</sup>/h<sup>[18]</sup>。骆驼山煤矿主斜井在掘进过程中穿过第四系及其下部基岩风化带时井筒涌水量较大, 涌水量 25 m<sup>3</sup>/h, 雨季期间井筒实测涌水量达到 91 m<sup>3</sup>/h, 以底板出水、侧帮与底板接茬处出水为主<sup>[19]</sup>。袁大滩煤矿主斜井、副斜井、进风立井和回风立井掘进过程的井筒涌水量预计分别为 243、388、1 409、1 388 m<sup>3</sup>/h<sup>[13]</sup>。

可见, 煤矿斜井井筒穿越地层主要为地表土层、砂层、黄土、红土、风化基岩和岩层, 松散层和浅部风化基岩层含水丰富, 井筒渗漏位置大多位于砂层、

风化基岩等富水性强的地层, 涌水量大, 并伴有携砂现象。

1.2 斜井井筒渗漏水治理措施及缺陷

由于煤矿斜井井筒渗漏水位置大多位于富水松散层或风化基岩层, 渗漏段地层埋深相对较浅、渗透系数大, 大部分煤矿采用地面钻孔疏降的方式控制井筒渗漏水, 降水量大、地下水位下降明显, 水资源浪费。如表 1 所示, 部分煤矿采用井筒壁后注浆的方式治理井筒渗漏水, 如宋新庄煤矿、金鸡滩煤矿、甜水堡煤矿、大佛寺煤矿。宋新庄煤矿壁后注浆采用双管注浆工艺, 注浆材料包括单液水泥浆及 C-S 浆, 井壁涌水量由 35.0 m<sup>3</sup>/h 减少至 1.3 m<sup>3</sup>/h, 堵水率 92.3%<sup>[11]</sup>。金鸡滩煤矿通过壁后注浆封堵水砂通道, 水量和砂量迅速降低, 水量降至 35 m<sup>3</sup>/h, 砂量稳定在 0.1% 以下<sup>[15]</sup>。甜水堡煤矿通过壁后注浆在硫酸盐腐蚀环境中注入抗腐蚀浆液, 井筒的涌水量由 20.9 m<sup>3</sup>/h 降至 4.6 m<sup>3</sup>/h, 堵水率 78%<sup>[16]</sup>。大佛寺煤矿通过壁后注浆封堵主斜井井筒拱顶及两帮主要出水点, 主斜井涌水量由 120 m<sup>3</sup>/h 减小为 30 m<sup>3</sup>/h, 堵水率 75% 左右<sup>[18]</sup>。

如表 1 所示, 部分煤矿采用地面注浆的方式治理井筒渗漏水, 如曹家滩煤矿、朝川矿一井、骆驼山煤矿。曹家滩煤矿以帷幕注浆为主、井筒壁后补充注浆为辅进行注浆堵水, 采用 SJP 黏度时变浆液和浮石材料, 主斜井治理段水量由 97 m<sup>3</sup>/h 降至 14 m<sup>3</sup>/h, 堵水率 85.5%, 返砂现象消除, 副斜井治理段水量由初始 98 m<sup>3</sup>/h 降至 25 m<sup>3</sup>/h, 堵水率 74.5%<sup>[14]</sup>。朝川矿一井采用大密度浅孔、水泥-粉煤灰与水泥-水玻璃不同浆液、低注浆压力的方式, 对井筒疏松回填段进行注浆封堵, 渗水量由 35 m<sup>3</sup>/h 降至 1 m<sup>3</sup>/h 以下<sup>[17]</sup>。骆驼山煤矿采用以旋喷注浆为主、壁后注浆为

表 1 我国部分煤矿斜井渗漏水情况及治理措施统计  
Table 1 The statistical of leakage in inclined mine shaft and control measures in some coal mines

序号	矿井	渗漏水井筒及地层	渗漏水量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	治理措施
1	宋新庄煤矿 <sup>[11]</sup>	副斜井、砂层	35	壁后注浆
2	杭来湾煤矿 <sup>[12]</sup>	主斜井、砂层	70	—
3	榆树湾煤矿 <sup>[12-13]</sup>	主斜井、砂层副斜井、砂层	26.8~86.8, 49.0~85.2	—
4	曹家滩煤矿 <sup>[14]</sup>	主副斜井、松散层和风化岩	350	帷幕注浆+壁后注浆
5	金鸡滩煤矿 <sup>[15]</sup>	副斜井、砂层	72	壁后注浆
6	榆阳煤矿 <sup>[13]</sup>	主斜井、砂层	70	—
7	甜水堡煤矿 <sup>[16]</sup>	副斜井、砂层	20.9	壁后注浆
8	朝川矿一井 <sup>[17]</sup>	带式输送机斜井、回填矸石矸石	35	地面注浆
9	大佛寺煤矿 <sup>[18]</sup>	主斜井、松散层和岩层	120	壁后注浆
10	骆驼山煤矿 <sup>[19]</sup>	主斜井、砂层	62.94~91	旋喷桩+壁后注浆

辅封堵井筒涌水,主斜井治理段涌水量由  $62.94 \text{ m}^3/\text{h}$  降至  $4.93 \text{ m}^3/\text{h}$ ,堵水率  $92.1\%$ <sup>[19]</sup>。

表 1 中列出的成功案例只是现实中的一小部分,仍存在部分斜井井筒治理效果不佳的情况。主要是因为井筒壁后注浆需要在井筒钻孔、下入注浆管对井筒外侧松散层注浆封堵,破坏井筒结构、降低井筒强度、增大了进一步渗漏水风险。地面注浆需在井筒渗漏水位置的上方地面施工垂直或倾斜钻孔至渗漏水位置,从地面下入注浆管进行注浆封堵漏水点外侧松散层,由于松散层孔隙发育,浆液在松散层中的扩散方向、范围不可控,难以注入浆液或注浆量不可控。

## 2 斜井井筒水治理技术

为有效解决壁后注浆和地面钻孔注浆在煤矿斜井井筒过富水松散层段渗漏水治理方法存在的问题,提出了一种基于等厚度水泥土帷幕的斜井井筒水治理技术。

### 2.1 斜井井筒水治理原理及帷幕结构

如图 1 所示,通过在煤矿斜井井筒外侧一定范围的松散层和风化基岩段构筑圈闭的等厚度水泥土帷幕,将斜井井筒与松散层水和风化基岩层水之间的水力联系隔断,同时,在等厚度水泥土帷幕范围内地表铺设防渗膜、浇筑一定厚度的防渗砂浆或混凝土层,隔绝大气降水对帷幕内侧地层的补给。等厚度水泥土帷幕通过施工机械的刀具和链条围绕切割箱旋转切割斜井井筒外侧的地层,使地层混合均匀,然后从切削箱底端喷射水泥浆和高压气体,让地层中的岩土体颗粒与水泥浆充分混合搅拌,在斜井井筒外侧形成连续的原位水泥土帷幕墙。等厚度水泥土帷幕自地面开始,穿过黄土、砂层、风化基岩等含水层进入泥岩(或黏土)隔水层  $1 \sim 2 \text{ m}$ ,形成环绕斜井井筒、顶底有界、圈闭连续的隔水保护圈层。

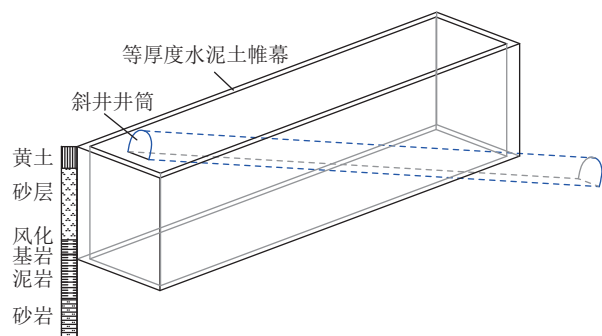


图 1 煤矿斜井井筒渗漏水治理结构示意图

Fig.1 Coal mine inclined shaft water leakage control structure diagram

等厚度水泥土帷幕适用于标贯击数  $N$  值不大于 100 击的软、硬质土层,中粗砂质土层,颗粒直径小于  $100 \text{ mm}$  的卵砾石层和全风化及强风化基岩以及抗压强度不大于  $5 \text{ MPa}$  的岩层中施工,垂向深度不大于  $100 \text{ m}$ 。

如图 2 所示斜井井筒的等效半径为  $R$ ,井筒外侧塑性区半径为  $R_p$ ,等厚度水泥土帷幕施工过程中机械扰动半径为  $R_D$ 。为避免斜井井筒附近地层受到等厚度水泥土帷幕的施工扰动,导致井筒井筒发生变形破坏,要求等厚度水泥土帷幕内壁距离斜井井筒的水平距离  $S$  不得小于井筒外侧塑性区范围和施工扰动范围之和。

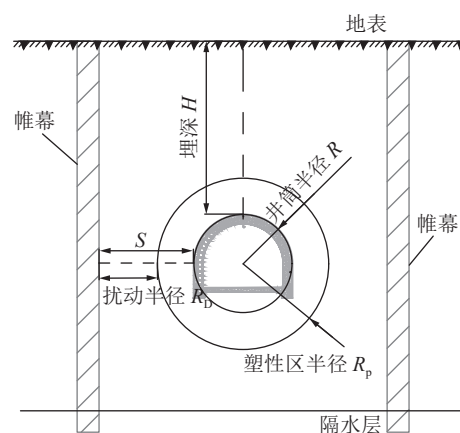


图 2 等厚度水泥帷幕与斜井井筒位置关系

Fig.2 Relationship between equal thickness cement curtain and inclined shaft position

因此,煤矿斜井井筒等厚度水泥土帷幕内壁与斜井井筒外壁的最小间距通过下式确定:

$$S = R_p - R + R_D \quad (1)$$

式中:  $S$  为帷幕内壁与斜井井筒外壁的最小间距,  $\text{m}$ ;  $R_p$  为斜井井筒围岩塑性区半径,  $\text{m}$ ;  $R$  为斜井井筒等效半径,  $\text{m}$ ;  $R_D$  为帷幕施工扰动半径,  $\text{m}$ 。

根据《水电水利工程高压喷射灌浆技术规范》,在透水地层中进行围井抽水(或注水)试验,帷幕墙的渗透系数  $k$  按式(2)进行计算<sup>[20]</sup>。

$$k = \frac{2Qt}{L(H+h_0)(H-h_0)} \quad (2)$$

式中:  $k$  为渗透系数,  $\text{m/d}$ ;  $Q$  为渗水量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $t$  为帷幕墙平均厚度,  $\text{m}$ ;  $L$  为围井周边帷幕墙轴线长度,  $\text{m}$ ;  $H$  为围井内试验水位至井底的深度,  $\text{m}$ ;  $h_0$  为地下水位至井底的深度,  $\text{m}$ 。

将图 1 所示的斜井井筒外侧圈闭的等厚度水泥土帷幕视作围井,将围井周边帷幕墙轴线长度  $L$  变为等厚度水泥土帷幕墙轴线长度  $C$ 、帷幕墙平均厚度  $t$  变为等厚度水泥土墙体厚度最小值  $D$ 、渗透系

数  $k$  变为等厚度水泥土帷幕综合渗透系数  $K$ 、围井内试验水位至井底的深度  $H$  变为等厚度水泥土帷幕内侧地下水位高度  $H_N$ 、地下水位至井底的深度  $h_0$  变为等厚度水泥土帷幕外侧地下水位高度  $H_W$ 、渗水量  $Q$  变为等厚度水泥土帷幕许可涌水量  $Q_x$ , 则可将式(2)变换为式(3):

$$D = \frac{CK(H_W + H_N)(H_W - H_N)}{2Q_x} \quad (3)$$

式中:  $D$  为帷幕墙体厚度最小值, m;  $C$  为帷幕墙轴线长度, m;  $K$  为帷幕综合渗透系数, m/h;  $H_N$  为帷幕内侧地下水位高度, m;  $H_W$  为帷幕外侧地下水位高度, m;  $Q_x$  为许可涌水量,  $\text{m}^3/\text{h}$ 。

煤矿斜井井筒等厚度水泥土帷幕厚度最小值通过式(3)计算得到。

## 2.2 等厚度水泥土帷幕构筑方法

常规的截水帷幕主要采用横向分幅、垂向施工的方式构筑侧向截水帷幕, 施工过程中截水帷幕墙体分幅分序施工, 最终形成相互连接的截水帷幕。该种构筑方式存在大量接头位置, 每幅截水帷幕墙体的接头位置是帷幕墙体的薄弱环节, 常常是渗漏水通道, 降低截水帷幕的阻水效果。如图3所示, 为减少截水帷幕的接头数量, 提高帷幕截水效果, 等厚度水泥土帷幕采用先垂向切削、挖掘至帷幕设计深度, 然后自地面至设计深度范围内横向连续切削挖掘, 到设计位置后回撤, 再将第一步切削挖掘的地层再次切削搅拌均匀, 最后沿横向边切削搅拌边喷浆、混合成墙。通过往-返-往三步施工形成连续的等厚度水泥土帷幕墙体。

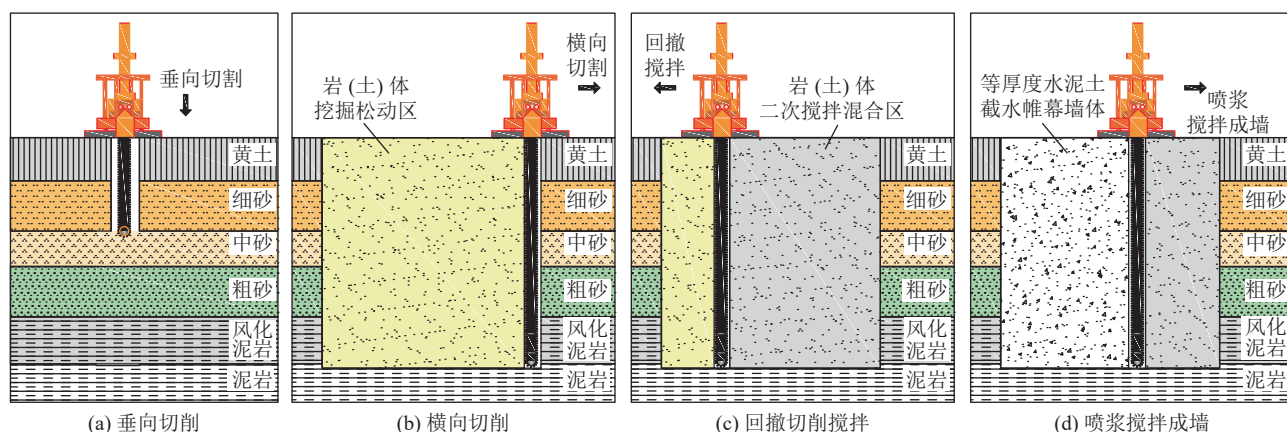


图3 等厚度水泥帷幕施工示意

Fig.3 Construction diagram of equal thickness cement curtain

等厚度水泥土帷幕混合搅拌过程是将施工位置上下各地层打散重新分布, 如图4所示, 各地层岩土体在刀具的切削作用下被剥离原有地层, 土颗粒与注入膨润土浆液混合, 如图4中I区, 形成混合泥浆; 含砾砂层中的砂、砾石颗粒一部分随刀具向上运动, 如图4中II区; 另一部分在重力作用下穿过截割齿之间空隙发生沉降, 如图4中III区, 与被链刀由另一侧带入的颗粒混合, 如图4中IV区, 然后在刀具的作用下, 向上移动, 最终在刀具的搅拌作用与其他地层混合<sup>[21-25]</sup>。然后通过刀盘底部的注浆孔注入一定比例的水泥浆液, 在链刀上下转动的作用下, 水泥浆液与混合均匀的地层材料形成如图3d所示的上下厚度均匀、接头数量少、截水率高的等厚度水泥土墙体。

## 2.3 等厚度水泥土帷幕墙体参数及性能

等厚度水泥土帷幕性能主要受地层、水泥掺量、综合含水率等因素控制。为研究不同地层条件下等

厚度水泥土帷幕性能, 选取了黏土、黄土和细砂3种地层材料进行试验, 分别进行了掺加地层材料质量的15%、20%、25%和30%水泥的帷幕强度和渗透

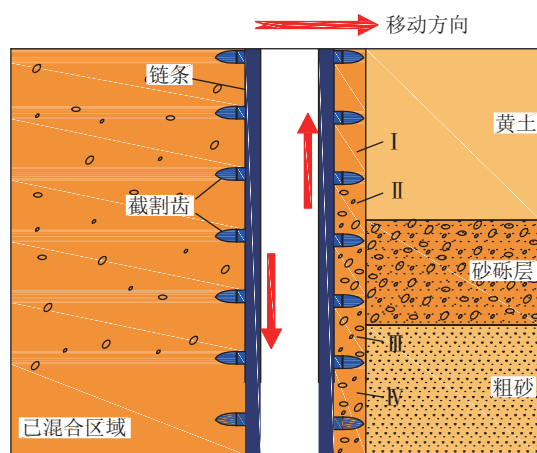


图4 等厚度水泥土帷幕切削搅拌示意

Fig.4 Equal thickness soil-cement curtain cutting and stirring



系数测试。综合含水率为地层含水量、挖掘液含水量、水泥浆液含水量之和与地层及水泥的质量比。由于现场井筒渗漏水实测温度为  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,因此本次试验研究的养护温度选择  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,综合含水率取 33%。

如图 5 所示,制备了黏土、黄土和细砂 3 种地层材料的水泥土抗压试样、抗渗试样,将 3 种地层材料的水泥土试样在温度  $(10\pm 1)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、湿度大于 95% 的养护箱中养护。

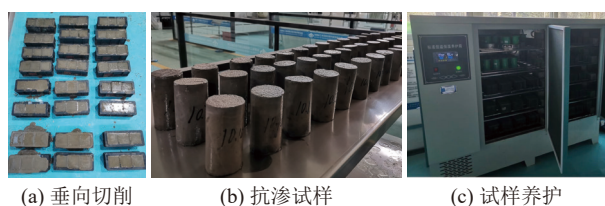


图 5 等厚度水泥土试样及养护照片

Fig.5 Photos of equal thickness soil-cement samples and curing

水泥土抗压试样和抗渗试样养护至规定龄期后,从养护箱中取出,先将试样擦拭干净,测量尺寸,试样尺寸测量精确至  $1\text{ mm}$ 。将抗压试样安放在如图 6a 所示的抗压强度试验机的下压板上(或下垫板上),试样的承压面与成型时的顶面垂直,试样中心与试验机下压板(或下垫板)中心对准。开动试验机,当上压板与试样接近时,调整球座,使接触面均匀受压。承压试验应连续而均匀加荷,直至试样破坏,测得水泥土试样的单轴抗压强度。将抗渗试样放入图 6b 所示的岩石渗透仪,通过记录时间  $t$  内通过试样表面的水流量、水头高度,结合试样长度和试样过水断面面积计算得到水泥土试样的渗透系数。



图 6 等厚度水泥土试样测试仪器

Fig.6 Instrument for testing soil-cement samples of equal thickness

如图 7 所示,龄期 3 d,水泥掺量 25% 的黏土地层水泥土的强度分别是水泥掺量 15%、20%、30% 的 193%、121% 和 73%;龄期 7 d,水泥掺量 25% 的黏土地层水泥土的强度分别是水泥掺量 15%、20%、30% 的 182%、130% 和 91%;龄期 28 d,水泥掺量

25% 的黏土地层水泥土的强度分别是水泥掺量 15%、20%、30% 的 178%、128% 和 103%。水泥掺量 20%、25%、30% 的黏土水泥土的 7、28 d 强度均达到  $1\text{ MPa}$  以上。龄期 28 d 时,水泥掺量 15%、20%、25%、30% 的黏土水泥土渗透系数分别为  $6.16\times 10^{-6}$ 、 $4.15\times 10^{-7}$ 、 $4.11\times 10^{-8}$ 、 $3.12\times 10^{-8}\text{ cm/s}$ 。

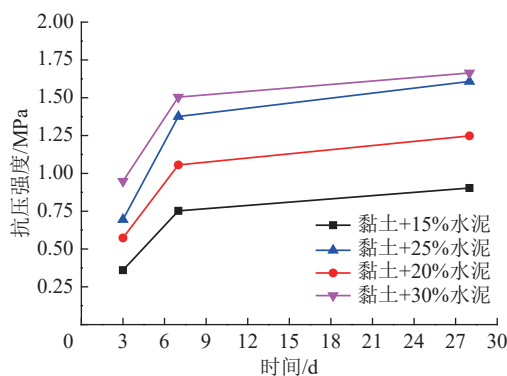


图 7 黏土水泥土强度变化

Fig.7 The changes of clay-cement strength

如图 8 所示,龄期 3 d,水泥掺量 25% 的黄土地层水泥土的强度分别是水泥掺量 15%、20%、30% 的 153%、137% 和 95%;龄期 7 d,水泥掺量 25% 的黄土地层水泥土的强度分别是水泥掺量 15%、20%、30% 的 161%、117% 和 87%;龄期 28 d,水泥掺量 25% 的黄土地层水泥土的强度分别是水泥掺量 15%、20%、30% 的 171%、122% 和 93%。水泥掺量 20%、25%、30% 的黄土地层水泥土的 7、28 d 强度均达到  $1.4\text{ MPa}$  以上。龄期 28 d 时,水泥掺量 15%、20%、25%、30% 的黄土地层水泥土渗透系数分别为  $5.53\times 10^{-6}$ 、 $4.03\times 10^{-7}$ 、 $3.83\times 10^{-8}$ 、 $3.02\times 10^{-8}\text{ cm/s}$ 。

如图 9 所示,龄期 3 d 时,水泥掺量 25% 的细砂地层水泥土的强度分别是水泥掺量 15%、20%、30% 的 153%、141% 和 108%;龄期 7 d,水泥掺量 25% 的黄土地层水泥土的强度分别是水泥掺量 15%、20%、

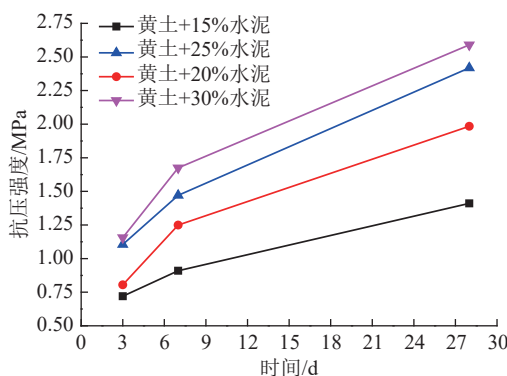


图 8 黄土水泥土强度变化

Fig.8 Changes in strength of loess soil-cement

30%的118%、109%和82%;龄期28 d,水泥掺量25%的黄土地层水泥土的强度分别是水泥掺量15%、20%、30%的123%、105%和80%。水泥掺量20%、25%、30%的黄土地层水泥土的7 d强度达到1.63 MPa以上。龄期28 d时,水泥掺量15%、20%、25%、30%的黄土地层水泥土渗透系数分别为 $6.83 \times 10^{-6}$ 、 $3.82 \times 10^{-7}$ 、 $6.17 \times 10^{-8}$ 、 $5.09 \times 10^{-8}$  cm/s。

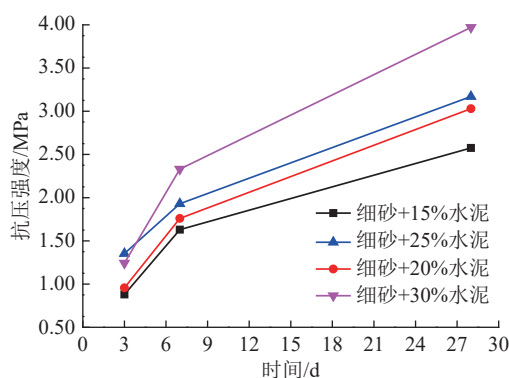


图9 细砂水泥土强度变化

Fig.9 Strength changes of fine sand cement

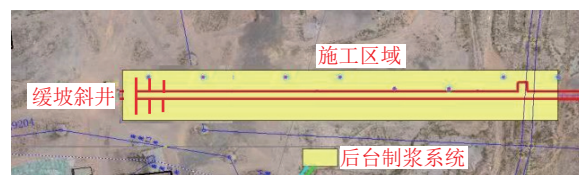
由图7—图9可知,当养护温度和综合含水率确定时,黏土地层的水泥土帷幕的强度较小、渗透系数相对较大。水泥掺量在20%~25%时,黏土、黄土、砂层的水泥土均有较好的强度和渗透系数,满足煤矿斜井井筒水治理要求。

### 3 现场示范应用

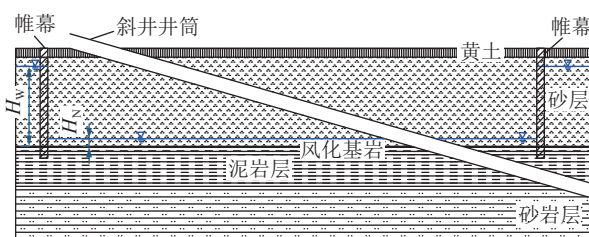
骆驼山煤矿位于内蒙古乌海市海勃湾区,如图10所示,研究区缓坡斜井地表主要为黄土,地势较为平坦,缓坡斜井穿越黄土层、砂层,二叠系石盒子组风化泥岩层、泥岩和砂岩,最终进入山西组地层并在+920 m水平落底。随着井筒外侧松散层水位的抬升,缓坡斜井井筒涌水量由不足 $5 \text{ m}^3/\text{h}$ 增长至 $16.8 \text{ m}^3/\text{h}$ 以上,井筒中心松散层水位较外围松散层水位低3 m。

如图11所示,骆驼山煤矿缓坡斜井在 $k_0+130 \text{ m}$ 底板涌水 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $k_0+169 \text{ m}$ 帮部涌水 $0.77 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $k_0+187 \text{ m}$ 帮部涌水 $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 、 $k_0+214.5 \text{ m}$ 躲避硐室涌水 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ ,井筒内涌水水温实测 $10^\circ\text{C}$ 左右,其中 $k_0$ 为0斜井井筒口位置,将斜井井筒口作为里程起点。

随着松散含水层地下水位的上升,以及缓坡斜井涌水通道的冲刷、车载压裂变形扩大等影响,缓坡斜井涌水量将进一步增大甚至出现涌水携砂现象。为有效治理缓坡斜井井筒渗漏水问题,减少矿井排水费用、优化井内作业环境、减轻矿井水外排环保压



(a) 研究区平面



(b) 研究区剖面

图10 研究区平面和剖面

Fig.10 Plan and profile of the study area



图11 骆驼山煤矿缓坡斜井井筒渗漏水

Fig.11 Luotuoshan Coal Mine gently sloping shaft seepage

力、降低井筒设备设施腐蚀破坏的维修成本,采用等厚度水泥土帷幕的方式彻底解决斜井井筒水问题。

根据式(1)计算得等厚度水泥土帷幕距离斜井井筒距离 $S$ 为1.86 m,示范应用时取2 m;根据3计算得等厚度水泥土帷幕厚度 $D$ 为0.22 m,示范应用时取0.6 m。骆驼山煤矿缓坡斜井等厚度水泥土帷幕施工时每段长度10 m,深度约17 m。第1步掺入膨润土浆液原位横向切割,20~30 min/m,10 m分幅切削约耗时5 h;第2步快速回撤切削搅拌,1 h回切到位;第3步喷浆搅拌成墙,注浆压力1.5~2.5 MPa,注浆流量为800~1200 L/min,喷浆搅拌速度为30~40 min/m,约耗时6 h。

如图12所示,在缓坡斜井两侧和端头位置构筑圈闭松散层和风化基岩截水帷幕,帷幕内侧距离井筒2 m,帷幕厚度0.6 m,帷幕底部穿过风化基岩进入完整基岩1 m。等厚度水泥土帷幕将装有刀具和链条的切削箱插入地下,随主机横向移动,刀具和链条围绕切削箱旋转切割,并从切削箱底端向地层中喷射地层质量25%的水泥浆和高压气体,使地层中



的岩土体颗粒与注入的水泥浆进行充分的混合搅拌,最终形成等厚度、高质量防渗、有一定承载力、无缝搭接的水泥土连续墙。骆驼煤矿缓坡斜井等厚度水泥土帷幕隔断了缓坡斜井井筒与松散层水和风化基岩水之间的水力联系,在缓坡斜井外侧形成一面新的阻水、支护墙体,有效地保护了斜井井筒的安全运营。

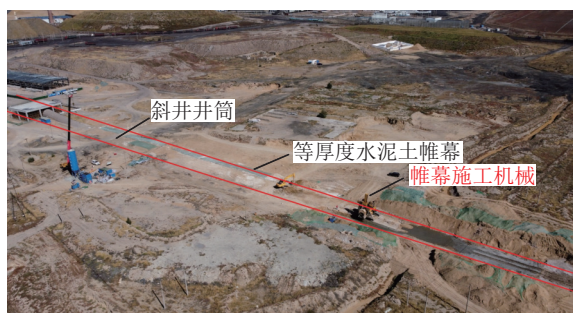


图 12 骆驼山煤矿缓坡斜井等厚度水泥土帷幕鸟瞰图

Fig.12 Aerial view of cement curtain of equal thickness of gentle slope inclined shaft in Luotuoshan Coal Mine

#### 4 应用效果分析

如图 13 所示,在等厚度水泥土帷幕示范应用现场,取帷幕切削搅拌注浆混合完成后溢出地表尚未凝固的水泥土制作试块。每台班抽查 1 延米墙身,每延米墙身制作水泥土试块 3 组,试样尺寸为  $70.7\text{ mm} \times 70.7\text{ mm} \times 70.7\text{ mm}$ ,采用水下养护方式养护。



图 13 等厚度水泥土现场试样

Fig.13 Field sample of cement soil of equal thickness

如图 14 所示,分别测试现场水泥土试样的 3、14、28 d 强度,3 d 的水泥土试样强度已大于 5 MPa,28 d 的水泥土强度大于 15 MPa。28 d 的水泥土渗透系数为  $0.527 \times 10^{-8}\text{ cm/s}$ 。

如图 15 所示,在骆驼山煤矿缓坡斜井等厚度水泥土帷幕中心位置钻孔取心,取出的等厚度水泥土帷幕墙体心样完整、取心率高达 95% 以上。帷幕墙体原状心样的抗压强度为 8.62 MPa,渗透系数为  $2.69 \times 10^{-8}\text{ cm/s}$ 。

如图 16 所示,骆驼山煤矿缓坡斜井井筒治理前的涌水量为  $16.8\text{ m}^3/\text{h}$  以上,自缓坡斜井井筒等厚度

水泥土帷幕施工开始,井筒涌水量开始缓慢减少,完成井筒一侧的等厚度水泥土帷幕时涌水量降为  $8\text{ m}^3/\text{h}$  左右,减少约 50%。坡斜井井筒等厚度水泥土帷幕完全封闭后,井筒涌水量降为  $2.5\text{ m}^3/\text{h}$ ,以后稳定在  $1.6\text{ m}^3/\text{h}$  左右,较治理前减少 90.5%。

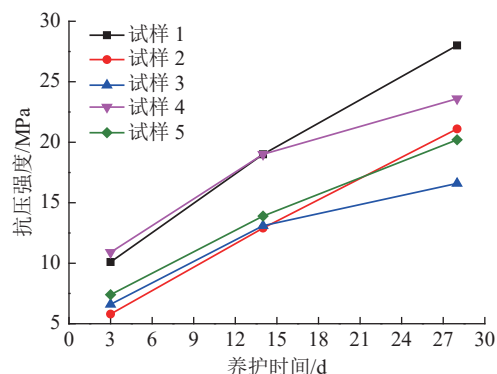


图 14 等厚度水泥土现场试样强度

Fig.14 Strength of field samples of soil-cement of equal thickness



图 15 等厚度水泥土帷幕取心效果

Fig.15 Coring effect of cement curtain of equal thickness

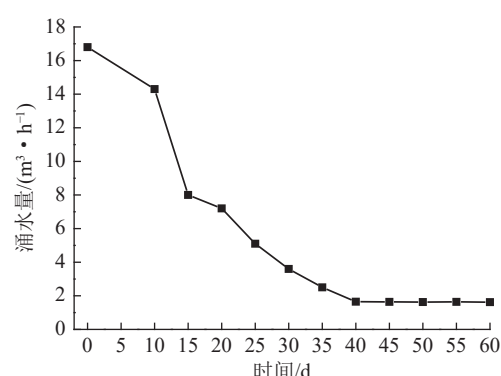


图 16 示范项目斜井井筒治理段涌水量变化

Fig.16 Changes of water inflow in treatment section of inclined shaft of demonstration project

#### 5 结 论

1)等厚度水泥土帷幕适用于标贯击数值不大于 100 击的软(硬)质土层、中粗砂质土层、颗粒直径小于 100 mm 的卵砾石层、全风化及强风化基岩和抗

压强度不大于 5 MPa 的岩层, 垂向施工深度 100 m 以浅。

2) 等厚度水泥土帷幕内壁距离斜井井筒的水平距离大于等于井筒外侧塑性区范围和施工扰动范围之和, 可避免斜井井筒附近地层受到等厚度水泥土帷幕的施工扰动, 导致井筒井筒变形破坏。

3) 等厚度水泥土帷幕通过横向切削、回撤切削搅拌、喷浆搅拌成墙 3 个步骤将混合均匀的地层材料与水泥浆液在煤矿斜井井筒外侧地层中形成上下厚度均匀、接头数量少的等厚度水泥土墙体, 具有施工效率高、截水率高、成本低的特点; 等厚度水泥土帷幕性能主要受地层、水泥掺量、综合含水率等因素控制。

4) 骆驼山煤矿缓坡斜井渗漏水段等厚度水泥土帷幕墙体取心率高达 95% 以上, 原状心样的抗压强度 8.62 MPa, 渗透系数  $2.69 \times 10^{-8}$  cm/s, 井筒涌水量由 16.8 m<sup>3</sup>/h 降至 1.6 m<sup>3</sup>/h 左右, 较治理前减少 90.5%, 等厚度水泥土帷幕在煤矿斜井井筒水治理中取得良好应用效果。

#### 参考文献(References):

- [1] 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/OL]. 煤炭科学技术: (2021-11-12)[2023-03-10], 1-16. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.QN21-014>.  
WANG Hai, DONG Shuning, SUN Yajun, *et al.* Lateral curtain interception technology and water conservation effect in ground-water abundant mines of China[J/OL]. Coal Science and Technology: (2021-11-12)[2023-03-10], 1-16. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.QN21-014>.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 曾一凡, 刘晓秀, 武强, 等. 双碳背景下“煤-水-热”正效协同共采理论与技术构想[J]. 煤炭学报, 2023, 48(2): 538-550.  
ZENG Yifan, LIU Xiaoxiu, WU Qiang, *et al.* Theory and technical conception of coal-water-thermal positive synergistic co-extraction under the dual carbon background[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 538-550.
- [6] 曾一凡, 孟世豪, 吕扬, 等. 基于矿井安全与生态水资源保护等多目标约束的超前疏放水技术[J]. 煤炭学报, 2022, 47(8): 3091-3100.  
ZENG Yifan, MENG Shihao, LYU Yang, *et al.* Advanced drainage technology based on multi-objective constraint of mine safety and water resources protection[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 3091-3100.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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: (2022-04-26)[2023-03-16]. 1-10. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0165>.  
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: (2022-04-26)[2023-03-16]. 1-10. <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0165>.
- [10] 石志远. 复合强富水含水层帷幕薄弱带识别方法与靶向加固技术[J]. 煤炭工程, 2022, 54(4): 57-61.  
SHI Zhiyuan. Identification method and target reinforcement technology of weak zone of curtain in multiple media and water-abundance aquifer[J]. Coal Engineering, 2022, 54(4): 57-61.
- [11] 袁东锋, 宋荣普, 周禹良, 等. 斜井流砂层段壁后空洞探测及注浆处理技术[J]. 煤矿安全, 2018, 49(2): 63-66.  
YUAN Dongfeng, SONG Rongpu, ZHOU Yuliang, *et al.* Hollow exploration and backfill grouting for inclined shaft liner in quicksand layer[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(2): 63-66.
- [12] 常青, 张磊, 史鑫. 小保当一号矿井主斜井施工方法选择及井壁结构设计[J]. 煤炭工程, 2020, 52(8): 14-17.  
CHANG Qing, ZHANG Lei, SHI Xin. Construction method selection and shaft wall structure design of main inclined shaft in Xiaobaodang No. 1 Mine[J]. Coal Engineering, 2020, 52(8): 14-17.
- [13] 刘巍, 王秀娟, 张付涛, 等. 榆林矿区厚松散层矿井水文地质特征与井筒涌水分析[J]. 煤炭工程, 2019, 51(8): 111-114.  
LIU Wei, WANG Xiujuan, ZHANG Futao, *et al.* Analysis on hydrogeological characteristics and shaft water inflow in thick and loose strata of Yulin Mining Area[J]. Coal Engineering, 2019, 51(8): 111-114.

- [14] 王 路, 马 壮, 徐建民, 等. 煤矿大断面斜井过松散层砂化段注浆堵水技术[C]//2022年全国工程建设行业施工技术交流会论文集, 北京, 2022, 743-747.  
WANG Lu, MA Zhuang, XU Jianmin, *et al.* Water plugging technology by grouting in sandy section of large Section inclined shaft in coal mine[C]//Proceedings of 2022 National Engineering Construction Industry Construction Technology Exchange Meeting, 2022, 743-747.
- [15] 袁世冲. 金鸡滩煤矿副斜井突水涌砂原因与抢险治理措施[J]. 煤炭技术, 2020, 39(5): 116-118.  
YUAN Shichong. Cause and remediation of water-sand inrush in inclined shaft of Jinjitan coal mine[J]. Coal Technology, 2020, 39(5): 116-118.
- [16] 杨 栋, 许刚刚, 刘 冲. 硫酸盐侵蚀环境下斜井加固技术研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(10): 44-47.  
YANG Dong, XU Ganggang, LIU Chong. Reinforcement technology of inclined shaft in sulfate erosion environment[J]. Coal Engineering, 2021, 53(10): 44-47.
- [17] 翟加文, 王国合, 刘 信. 地面低压注浆封堵斜井井筒明槽回填段潜水技术[J]. 矿业安全与环保, 2012, 39(4): 49-51.  
ZHAI Jiawen, WANG Guohe, LIU Xin. Surface low pressure grouting sealing backfill section of inclined shaft[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2012, 39(4): 49-51.
- [18] 赵 峰. 壁后注浆技术在大佛寺煤矿斜井中的应用研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2006.  
ZHAO Feng. The application study of the wall grouting behind technique at manage the inclined well of Dafosi coal mine[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2018.
- [19] 魏世荣, 金祥波, 池明波, 等. 斜井井筒涌水特征及注浆治理方法研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(3): 62-67.  
WEI Shirong, JIN Xiangbo, CHI Mingbo, *et al.* Water gushing characteristics and grouting treatment method of inclined shaft[J]. Coal Engineering, 2022, 54(3): 62-67.
- [20] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 水电水利工程高压喷射灌浆技术规范: DL/T5200-2004[S]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [21] 张锴锋, 夏高翔. TRD工法水泥土连续墙在富水粉细砂层中的应用[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2022, 20(2): 69-73.  
ZHANG Kaifeng, XIA Gaoxiang. Application of TRD cement-soil walls in water-rich silty fine sand layers[J]. Journal of Nanjing Institute of Technology(Natural Science Edition), 2022, 20(2): 69-73.
- [22] 桂大壮, 张庆松, 刘人太, 等. TRD工法在砂层中的关键工艺参数优化研究与应用[J]. 施工技术, 2018, 47(23): 84-89.  
GUI Dazhuang, ZHANG Qingsong, LIU Rentai, *et al.* Research and application of key process parameters optimization of TRD method in sand layer[J]. Construction Technology, 2018, 47(23): 84-89.
- [23] 卫俊杰. TRD-排桩工法在深基坑围护体系中的应用分析研究[J]. 中国建材科技, 2022, 31(3): 119-123, 82.  
WEI Junjie. Analysis and research on application of TRD row pile construction method in deep foundation pit enclosure[J]. China Building Materials Science & Technology, 2022, 31(3): 119-123, 82.
- [24] 谢家文. 复合水泥土力学性能与渗透特性试验研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.  
XIE Jiawen. Laboratory researches on mechanical properties and permeability of composite cement soil [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2020.
- [25] 姜 鹏. TRD墙桩一体防渗与支护机理研究及应用[D]. 济南: 山东大学, 2020.  
JIANG Peng. Research and application of impermeability and support mechanism of trench cutting re-mixing deep wall interpolated H section steel[D]. Jinan: Shandong University, 2020.