



移动扫码阅读

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.

我国大水矿山侧向帷幕截水技术及水资源保护效果研究

王海^{1,2},董书宁¹,孙亚军²,王皓¹

(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)

摘要:我国矿山种类多、数量多,涵盖煤炭、冶金、有色金属、化工等,大部分矿山采用疏干排水方式控制地下水,部分大水矿山矿井每天疏排水量数万立方米到数十万立方米,疏干排水引发地下水位下降、水资源枯竭、岩溶塌陷和地面沉降、地表水污染、地下水环境恶化等问题。为解决大水矿山的安全开采和水资源浪费问题,自20世纪60年代开始进行矿山截水帷幕技术研究,经过近60a的发展,由单一的地面直钻孔注浆发展为地面定向钻孔注浆、井下钻孔注浆、井上下联合钻孔注浆、桩排、连续墙、防渗膜等多种截水帷幕技术,先后在80余座矿山成功应用了半封闭式、封闭式、落底式和悬挂式截水帷幕,截水率大多在60%以上,帷幕外侧水位显著抬升,取得非常好的应用效果,保护了矿山水资源和矿区生态环境。选取金属矿岩溶裂隙水全封闭帷幕、煤矿基岩落底式注浆帷幕、松散层与岩溶地层定向水平孔注浆帷幕、松散层防渗膜落底式帷幕等4种典型截水帷幕案例进行了详细阐述,分析了典型截水帷幕案例的截水技术及水资源保护效果,有效截水率均在75%以上。基于帷幕截水技术发展趋势,提出了大水矿山侧向帷幕截水技术将朝着松散层侧向无接头连续截水帷幕、基岩侧向截水帷幕定向扩散注浆、低渗透基层侧向截水帷幕等技术方向发展,践行“绿水青山就是金山银山”理念,保护矿山地下水资源,实现矿山保水、保生态、减损、绿色开采。

关键词:大水矿山;侧向帷幕;截水技术;涌水量;水资源保护

中图分类号:TD12

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2023)07-0207-17

Lateral curtain interception technology and water conservation effect in groundwater abundant mines of China

WANG Hai^{1,2}, DONG Shuning¹, SUN Yajun², WANG Hao¹

(1. CCTEG Xi'an Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 2. College of Resources and Earth Sciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: There are many types and numbers of mines in China, covering coal, metallurgy, non-ferrous metals, chemical industry and so on. Most of the mines use dewatering and drainage to control groundwater, and some of the water abundant mines have tens of thousands of m³ to hundreds of thousands of m³ of mine drainage per day, which causes the problems of declining groundwater level, water resources depletion, karst collapse and ground subsidence, surface water pollution, and deterioration of groundwater environment. In order to solve the problem of safe mining and water waste in water abundant mines, research on mine water cut-off curtain technology has been carried out since 1960 s, and after nearly 60 years of development, it has developed from single ground straight drilling and grouting to various water cut-off curtain technologies such as ground directional drilling and grouting, downhole drilling and grouting, combined drilling and grouting up and down the shaft, row of piles, continuous wall and seepage control membrane, etc. In more than 80 mines, semi-closed, closed, drop-bottom and suspended water interception curtains have been successfully applied, with water interception rate mostly

收稿日期:2021-09-14

责任编辑:周子博

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.QN21-014

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2019YFC1805400, 2017YFC0804100);中煤科工集团西安研究院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。E-mail: wanghai3777@163.com

通讯作者:董书宁(1961—),男,陕西蓝田人,研究员,博士生导师,博士。E-mail: dongshuning@cctegxian.com

above 60% and water level on the outside of the curtain significantly raised, achieving very good application results and protecting mine water resources and mine ecological environment. Four typical water interception curtain cases, such as metal mine karst fissure water fully closed curtain, coal mine bedrock drop bottom type slurry curtain, loose layer and karst stratum directional horizontal hole slurry curtain, loose layer impermeable membrane drop bottom type curtain, were selected for detailed elaboration, and the water interception technology and water resource protection effect of typical water interception curtain cases were analyzed, and the effective water interception rate was above 75%. Based on the development trend of curtain water interception technology, it is proposed that the technologies of continuous jointless water curtain in the lateral direction of loose layer, directional diffusion grouting in the lateral water curtain of bedrock, and lateral water curtain in the thick grass-roots level with low permeability are future directions, so as to practice the concept of "Green Mountains Are Mountains of Gold", to protect the groundwater resources of mine, and to realize water conservation, ecology conservation, loss reduction and green mining.

Key words: water abundant mine; lateral curtain; water interception technology; mine water inflow; water conservation

0 引言

大水矿山是指水文地质条件复杂,每天矿坑疏排水量数万立方米以上的矿山,我国广泛分布这类矿山^[1]。大水矿床充水来源均较为多样化,大多是几种水源共同补给地下采坑,主要包括地表水系、大气降水、孔隙水、裂隙水、岩溶水。也有部分矿床在非雨季以岩溶水为最主要充水来源,在雨季则以大气降水、地表水等为主要充水来源。总体来说,可以将大水矿床分为以孔隙水为主要充水来源的矿床和以岩溶水为主要充水来源的矿床^[2]。由于此类矿山的含水层厚、涌水量较大,通常难以疏干,同时排水量大、排水费用高、还引起地面塌陷,给矿山的安全开采带来极大的威胁^[1]。

我国矿山资源的开采强度和开采规模高于国外发达国家,产生的矿井水量较大,我国煤矿平均富水系数约为1.87,2018年我国煤炭产量36.8亿t,矿井水产生量约为68.8亿m³,煤矿矿井水平利用率约为35%,矿井水的外排、渗漏造成严重的水资源浪费^[3]。

国外安格连斯克煤矿、斯托林铁矿、罗希亚煤矿等在砂层、煤层和卵石层中构筑矿山截水帷幕,取得了良好的效果^[4]。我国矿山防治水工作者在多年从事矿井注浆堵水工作所积累的丰富经验基础上,借鉴水电部门坝基灌浆防渗技术,提出利用钻孔注浆建造帷幕,堵截矿区地下水流的方法^[5]。自20世纪60年代以来,侧向帷幕截水技术先后在煤炭、冶金、有色金属、化工等系统的大水矿山相继应用,取得可喜的成功,效益显著^[5]。目前,大水矿山防治水技术主要包括以下3个部分:地表疏干、地下疏干、控制疏干,地面帷幕注浆,井下帷幕注浆^[2]。疏干排水会引发地下水下降、水资源枯竭、岩溶塌陷和地面沉降、地表水污染、地下水环境恶化、海水倒灌等问题。通过探明矿山水文地质工程地质条件,厘清矿坑水

的补给源和补给通道,根据矿山水文地质工程地质条件,确定适宜的侧向截水帷幕路线、顶底位置,确保帷幕底部进入稳定隔水层、顶部高于历史水位,构筑连续的帷幕墙体拦截矿山外围含水层侧向补给,从根本上解决矿山面临的水资源和生态保护难题,变被动治理为主动保水^[6]。

《煤矿防治水细则》规定“煤矿防治水工作应当坚持预测预报、有疑必探、先探后掘、先治后采的原则,根据不同水文地质条件,采取探、防、堵、疏、排、截、监等综合防治措施”^[7]。其中“防、堵、截”的治理措施可从源头上减少矿山涌水量、避免水害事故的发生。同时,《煤矿防治水细则》明确提出“推进防治水工作由过程治理向源头预防、局部治理向区域治理、井下治理向井上下结合治理、措施防范向工程治理、治水为主向治保结合的转变”^[7]。近年来,我国在煤炭、有色金属、冶金、化工等行业大水矿山施工了80多个截水帷幕工程,减少了矿坑疏排水量,保障了矿山安全开采、保护了生态环境,取得了良好的应用效果。将我国大水矿山现状、侧向帷幕截水技术及其应用效果进行分析,为矿山企业水资源和生态环境保护提供参考。

1 我国大水矿山现状

我国矿产资源开采方式主要有露天开采和地下开采2种。矿山露天开采首先将表层岩土剥离,然后进行煤炭和矿石的开采,具有资源采出率高、劳动效率高、机械化程度高、安全条件好、生产成本低等优点。地下开采通过开凿竖井或斜井到达煤层或矿层之后,再开凿出煤巷或岩巷以及采煤或采矿工作面,然后开采煤炭或矿石,运出地面。无论是露天开采还是地下开采均会改变原有的地层条件和地下水环境,我国矿山大多受地下水影响,矿井疏排水量巨大,单个矿井日排水量可达数十万立方米。

我国部分大水矿山涌水量见表 1, 每天矿井涌水量数万立方米到数十万立方米。大水煤矿主要补给源是相邻矿井、灰岩裂隙水、溶隙水、地表水、砂岩风化裂隙水、岩溶水、老空水和第四松散层水。而有

色金属、冶金矿山主要补给源是第四系松散层水、灰岩溶隙裂隙水和岩溶水。

如表 1 所示, 矿山疏排水量巨大, 矿山防排水问题解决不好不仅增加矿山排水费用、降低矿山经

表 1 我国部分大水矿山涌水量统计^[5-40]

Table 1 Water inflow statistics of some of the water abundant mines in China^[5-40]

序号	矿井	补给源	矿井涌水量/(m ³ ·d ⁻¹)
1	青山泉煤矿	相邻矿井水	最大31 680
2	大封煤矿	灰岩裂隙、溶隙水	28 128
3	平煤七星煤业	地表水, 灰岩裂隙水	最大114 000, 正常45 600
4	平煤五矿	大气降水和地表水	34 320
5	松藻煤矿	煤系底板茅口石灰岩水	最大84 000
6	牛儿庄煤矿	薄层灰岩水	56603 工作面36 000
7	柠条塔煤矿	直罗组砂岩风化裂隙水	24 000
8	白山坪煤矿	地表水沿着砾岩空洞涌水	最大60 000
9	国家庄煤矿	四灰岩溶水	33 816
10	龙门峡南煤矿	顶板的长兴灰岩和底板茅口灰岩水	最大480 000
11	竹山塘煤矿	老空区水	129 600
12	锦界煤矿	松散层孔隙潜水和中生界碎屑岩裂隙水	127 200
13	营盘壕煤矿	基岩孔隙裂隙承压含水层水	最大62 736, 正常44 808
14	东明露天煤矿	富水性好的松散含水层水	149 300
15	元宝山露天煤矿	全新统冲积相圆砾层水	467 600
16	伊敏露天煤矿	第四系松散含水层水	60 000
17	白音华一号露天矿	第四系孔隙潜水、基岩孔隙裂隙水	17 952
18	良山铁矿太平矿区	第四系含水层与裂隙岩溶水	突水时57 600
19	中关铁矿	灰岩水	150 300
20	张马屯铁矿	奥陶系灰岩水	20 400
21	店子铁矿	灰岩、砂岩、白云质灰岩溶隙水	57 887
22	金岭铁矿(井工)	第四系水和灰岩水	天窗处坑道38 398.7
23	水口山铅锌矿	松散层水	71 520
24	黑旺铁矿(露天)	灰岩裂隙水	91 999
25	司家营研山铁矿	砂卵石层水	最大62 994, 正常33 542
26	谷家台铁矿	第四系流沙层、岩溶裂隙水	最大100 000, 正常70 000-80 000
27	莱新铁矿	第四系、第三系	最大50 000, 正常20 000
28	业庄铁矿	岩溶水	120 000
29	龙塘沿铁矿	岩溶裂隙水, 第四系水	66 100
30	黄屯硫铁矿	岩层含水层水	108 000
31	凡口铅锌矿	壶天群含水层	最大60 000
32	南李庄铁矿	岩溶裂隙水	66 825
33	金岭铁矿	岩溶裂隙水	102 432
34	新庄铜铅锌矿	基岩风化裂隙水	76 920
35	徐楼铁矿	岩溶裂隙水	44 361
36	新华山铜矿	岩溶裂隙水	25 423.2
37	后江桥铁锰矿	冲洪积层孔隙水	61 953
38	张马弓铁矿	岩溶裂隙水	49 392
39	毛坪铅锌矿	地表水补给	最大35 349, 正常26 984
40	大志山铜矿	灰岩溶洞裂隙水	58 639
41	吴庄铁矿	矿床含水层水	33 600
42	王窑铁矿	岩溶裂隙水	最大160 800

济效益,还可能引发事故、灾害,造成生命、财产损失,影响生态环境,致使泉水断流、水井干涸、地面塌陷。

2 大水矿山侧向帷幕截水技术

为破解矿山疏干排水引起的水资源和生态环境问题,针对我国矿山水文地质条件和现场实际需求,在水利水电帷幕灌浆、混凝土防渗墙、黏土截水槽和高压喷射灌浆等^[41]垂向防渗方式的基础上发展了多种大水矿山侧向帷幕截水技术。

2.1 我国现有大水矿山帷幕截水技术

自20世纪60年代以来,我国相继在煤矿、冶金

矿山、有色矿山等实施了80余项截水帷幕工程,矿山涌水的补给源包括相邻被淹矿井、地表河流、第四系松散层、岩溶裂隙、烧变岩、断层破碎带等,帷幕技术包括地面直钻孔注浆、井下直钻孔注浆、地面水平定向钻孔注浆、井下水平钻孔注浆、旋喷注浆、混凝土连墙、咬合桩、超高压角域射流注浆、防渗膜帷幕等。侧向帷幕构筑机械有地面钻机、地面定向钻机、井下钻机、旋喷钻机、MJS、双轮铣、液压抓斗成槽机等。侧向帷幕构筑材料有水泥浆液、水泥粉煤灰浆液、水泥黏土浆液、黏土浆液、水泥水玻璃浆液、水泥尾砂浆、水泥尾砂黏土浆、混凝土、水泥尾矿砂浆、HDPE膜(表2)。

表2 我国矿山帷幕截水技术及工程统计^[5-39,42-77]

Table 2 Statistics of curtain interception technologies and engineering of mines in China^[5-39,42-77]

序号	地区	矿井	补给源	技术、工艺	帷幕长度/m	帷幕埋深/m	涌水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	治理后涌水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	截水效果
1	江苏徐州	青山泉煤矿	相邻被淹井	灰岩帷幕注浆,直钻孔,间距3.5~10 m,墙厚10 m,水泥黏土浆、水玻璃	565	10~150	最大31 680		13.6%
2	河南焦作	演马庄煤矿	松散层水经天窗渗漏	灰岩帷幕注浆,直钻孔,孔间距30~50 m,黄土浆液	930	50~70	最大6 600	减少25 920	20%,水位差30~77 m
3	山东枣庄	郭东煤矿	河水渗漏	薄层灰岩帷幕注浆,直钻孔,孔距30.5 m	262	3~37			年节省排水电费5万元
4	山东新汶	协庄煤矿	松散层水经河床补给灰岩	灰岩帷幕注浆,直钻孔,孔间距7.5~15 m,水泥-黏土浆液	3 115	35~40	1 960		年节约排水费56万元
5	广东	关春煤矿	灰岩溶隙水	灰岩帷幕注浆,半封闭,截强径流带,直钻孔,下行分段自流,孔间距20~30 m,水泥粉煤灰浆液	235	100~280	15 000~18 000		73%
6	山东枣庄	大封煤矿	灰岩裂隙和溶隙水	灰岩帷幕注浆,直钻孔,帷幕厚10 m,孔间距10 m			28 128	129.6	99.54%
7	河北邯郸	滏岭庄	灰岩水	灰岩帷幕注浆,直钻孔,孔间距7~10 m,水泥粉煤灰浆液;在深部薄基岩灰岩首次建矿区帷幕	630	273			水位差20 m,年节省排水费60万元
8	山东枣庄	田屯煤矿		直钻孔注浆帷幕,孔间距10 m,帷幕厚10 m	262				水位差6.5 m,年节约费用4 104万元
9	山东枣庄	甘霖煤矿黄贝井	溶隙水	灰岩帷幕注浆,直钻孔,帷幕厚度10 m,孔间距8~10 m,水泥黏土浆液,以矸石土代替部分水泥	460	12~30.5		减少3 456~4 608	泉水增加,水位差12 m
10	重庆	松藻煤矿	灰岩溶隙水	截流巷并辅以注浆堵水帷幕,解决了困扰矿井20多年的C ₆ 岩溶水害问题			最大84 000	19 200	77.14%
11	河南平顶山	平煤五矿	地表水经灰岩补给	灰岩帷幕注浆,直钻孔,布置2排钻孔,排距8 m,孔间距16 m,水泥浆液		90~140	34 320	6 000	82.52%
12	新疆库车	常村煤矿	地表水经基岩裂隙补给	基岩帷幕注浆,地面直钻孔,双排灌浆孔,孔排距20 m,厚度30 m,高度40 m	300	38~40	河流补给8 400	河流补给3 600	57.15%

续表

序号	地区	矿井	补给源	技术、工艺	帷幕长度/m	帷幕埋深/m	涌水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	治理后涌水 量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	截水效果
13	内蒙古 呼伦贝尔	敏东一矿	砂砾岩含水岩 和松散层 孔隙水	地面钻孔注浆封堵覆盖岩导水 裂隙通道, 注浆钻孔布置在 开采边界附近, 孔间距80 m, 水泥水玻璃浆液	280	230 ~ 266	首面26 625, 注浆5 568	注浆工作面 3 600	35.34%
14	陕西神木	柠条塔煤矿	砂岩风化 裂隙水	地面帷幕注浆, 直钻孔, 3 排钻孔, 孔间距20 m, 排距 15 m, 水泥黏土复合浆 和水泥浆	600		24 000	9 000	62.50%
15	湖南耒阳	白山坪煤矿	地表水经砾岩 空洞补给	地面钻孔, 孔间距6 m, 浆液 扩散半径3 m, 水泥浆液、水 泥水玻璃双液浆	160	80 ~ 115	最大60 000		
16	河南平顶山	平煤七星 煤业	地表水经 灰岩补给	浅截、帷幕注浆截流, 封堵 补给路径, 减少涌水量		65	最大114 000, 正常45 600	最大37 200, 正常14 400	68.42%
17	山东	国家庄煤矿	灰岩岩溶水	井下帷幕, 帷幕带宽度40 m, 采用水泥、黏土、粉煤灰	1 700		33 816	720	97.90%
18	山东	白庄煤矿	灰岩岩溶水	井上下联合注浆, 注浆 段长19.2 m, 粉煤灰、 黏土水泥浆	2 000				95.00%
19	河北邯郸	牛儿庄煤矿	灰岩岩溶 裂隙水	灰岩帷幕注浆, 定向钻孔, 水平孔间距15 ~ 20 m, 水泥 浆、辅以部分砂、石	274	365	56603工作面 36 000	0	100%
20	山东齐河	邱集煤矿	灰岩承压水	灰岩帷幕注浆, 地面定向钻 孔, 在采区外围形成帷幕, 平面分支孔间距10 m, 垂向 间距2 m, 纯水泥浆液			水文孔1 440 ~ 6 480	水文孔水量 降到144	水位差 126.74 m
21	河南禹州	平禹一矿	灰岩裂隙水	在主要进水通道上钻孔注浆, 形成帷幕状的人工阻水体, 堵截流向矿坑的地下水量		300 ~ 640			
22	安徽淮北	朱仙庄	岩溶裂隙水	定向钻孔帷幕注浆、帷幕墙 厚40 m, 水泥浆液	3 130	300 ~ 400	初始量45 600	2 184	95.26%
23	陕西榆林	张家峁煤矿	烧变岩水 与水库水	地面直钻孔帷幕, 孔间距 10 m, 双排, 水泥-粉煤灰混 合浆、水泥-水玻璃双液浆、 水泥单液浆	632	平均 60	工作面初始 12 072	120	99.00%
24	新疆昌吉	大黄山煤矿 白杨河 7号井	烧变岩裂隙水	地面直钻孔帷幕注浆, 帷幕 高50 ~ 160 m, 厚20 m。单 排钻孔, 孔间距6 m, 水泥 浆液	东岸250, 西岸260	111 ~ 116	14 000		
25	新疆奇台	将军戈壁二 号露天煤矿	烧变岩涌水	地面钻孔帷幕注浆, 帷幕厚 度5 m, 注浆段高26 m, 水泥浆液	360	26	10 000		
26	陕西神木	西湾露天 煤矿	河流经烧 变岩补给	地面直钻孔帷幕注浆, 2排钻 孔, 间距10 m、排距3 m, 黏 土浆、黏土-水泥浆、黏土- 水泥-水玻璃浆	720	80	16 752	1 704	89.00%
27	河南义马	沈村煤矿	相邻矿井 老空区水	以垂直孔为主, 人工定向斜 孔为辅, 孔间距15 m, 帷幕 宽度6.01 m			9 600	3 029.04	68.44%
28	湖南宁乡	竹山塘煤矿	老空区水	地面钻孔, 帷幕厚度4 m, 孔 间距10 m, 水泥 水玻璃双液浆	400	60	129 600	88 800	31.48%
29	新疆昌吉	硫磺沟	河水经老 空区补给	直钻孔灌注混凝土+水泥浆液, 2排钻孔、排距30 m、孔间距 4 m, C30混凝土、水泥浆液	160	30 ~ 55	14 756	251	97.20%

续表

序号	地区	矿井	补给源	技术、工艺	帷幕长度/m	帷幕埋深/m	涌水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	治理后涌水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	截水效果
30	四川	龙门峡南煤矿	灰岩溶蚀裂隙水	高压水射流清洗弱强地层介质和帷幕注浆处理溶蚀裂隙突水点,帷幕孔布设在壁后2 m以外	直径12 圆形		最大480 000		98.00%
31	山东济宁	菜园煤矿	砂层孔隙水	竖井井筒帷幕,采用“自下而上固管分段射孔注浆”方式,水泥浆液和水泥粉煤灰浆液	周长53.38	108~109	溃水溃沙	0	100%
32	江西宜春	山环煤矿	松散含水层	竖井井筒帷幕,2排帷幕钻孔,排距1.5 m,孔距2.55 m,水泥浆、水泥水玻璃双液浆	主井17.27, 副井12.56	80	840	120	85.71%
33	陕西咸阳	雅店煤矿	砂岩含水层水	竖井井筒帷幕,用岩帽为止浆垫,均匀布置注浆孔,孔间距1.48 m,水泥浆液、水泥水玻璃双液浆	26.69	35	854.4	144	83.15%
34	山西	寺河煤矿潘庄风井	河水经古河床补给	竖井地面帷幕,2圈帷幕孔,外圈3.5 m,内圈1.5 m,孔间距1.3 m,水泥水玻璃双液浆			6 000		
35	宁夏	红柳煤矿	导水断层	井下巷道帷幕,20个帷幕注浆孔,环状间距8 m,水泥浆液	81		巷道5 280	0	100%
36	湖南资兴	周源山煤矿	断层破碎带、地面河流	直线式布置2排双液注浆孔,孔距2.0 m,排距1.5 m,双液高压注浆			5 150.4	2 520	51.07%
37	内蒙古呼伦贝尔	扎尼河	松散层水	混凝土地连墙、咬合桩、超高压角域射流注浆、HDPE膜井下近矿体帷幕注浆,在井下布置探水注浆钻孔,浆液有效扩散半径6 m,水泥浆、水泥水玻璃浆	5 815	26~60	数万		75.00%
38	江西新余	良山铁矿太平矿区	大理石含水层	矿区南端环形单排全封闭帷幕注浆,单排孔,间距12 m,帷幕厚10 m,改性黏土浆、改性湖泥浆	3 393	平均510、 深830	150 300	30 000	80.00%
39	河北邯郸	中关铁矿	灰岩含水层	“匚”字形帷幕,厚度10 m,地面钻孔,孔间距15 m,水泥浆,下行分段注浆	1 460	330~560	20 400	3 672	82.00%
41	山东青州	店子铁矿	河流渗漏补给灰岩、砂岩溶隙	岩层帷幕注浆,直钻孔,帷幕厚8 m,钻孔间距10 m,分3序注浆,水泥-黏土浆液	2 000	250.7~550	57 887	19 749	65.88%
42	山东淄博	黑旺铁矿-露天	灰岩裂隙断层溶洞水	灰岩帷幕注浆,半封底,直钻孔,下行分段,孔间距10 m,水泥浆	1 520	105~160	91 999	36 800	60.00%
43	河北滦县	司家营研山铁矿	新河经砂卵石层补给	高压旋喷桩地下帷幕连续墙,有效墙厚0.4 m,墙体强度不小于3 MPa,桩径大于1 m,桩间距0.8 m	696.5	入基岩1	59 400	11 260	81.00%
44	安徽	白象山铁矿	断层导水	巷道前方、周围形成隔水帷幕,孔口管浅孔注浆			最大40 000	9.6/段	97.00%
45	河北邯郸	南李庄铁矿	灰岩岩溶裂隙水	灰岩帷幕注浆,直钻孔,帷幕高度450 m,厚度8 m,孔间距10 m,水泥、尾矿砂、膨润土混合浆液	1 961.6	583.27	预计66 825		80.00%

续表

序号	地区	矿井	补给源	技术、工艺	帷幕长度/m	帷幕埋深/m	涌水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	治理后涌水 量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	截水效果
46	山东淄博	金岭铁矿 (井工)	灰岩含水层	直钻孔注浆天窗加盖帷幕堵截地下水垂向渗流, 人造水平式隔水层, 水泥浆	帷幕面积 20 000 m^2	平均186	天窗处38 398	天窗处4 424	88.50%, 水位差180 m
47	山东莱芜	谷家台 铁矿	河流经松散层 和灰岩补给	近矿体顶板帷幕注浆, 注浆形成四周都不透水的封闭空间, 钻孔注浆, 帷幕体总厚度40 m			正常80 000, 注前40 000	4 000	90.00%
48	山东济南	莱新铁矿	地表水体经天窗 直接补给灰岩含水层	近矿顶板注浆堵水, 巷道内钻孔对矿体顶板灰岩含水层注浆, 形成紧贴矿体顶底的稳固人工隔水层, 水泥浆液	间距10 m× 11 m	大于30	正常20 000, 最大50 000		65.00%, 年节约排水电费 3 358万元
49	山东济南	业庄铁矿	岩溶水	井下近矿体帷幕注浆, 矿体顶板灰岩形成纵横交错的立体钻孔体系, 帷幕厚度25 m		大于25	120 000		90.00%, 水位恢复
50	安徽巢湖	龙塘沿铁矿	岩溶裂隙水	井下近矿体帷幕注浆, 穿脉水平探水钻孔注浆和顶板加密注浆, 帷幕厚35 m, 水泥浆和黏土水泥浆			矿坑66 100, 采场10 800	矿坑26 100, 采场480	60.50%, 采场 减少90%以上
51	安徽淮北	徐楼铁矿	大气降水经灰岩 补给	近矿体帷幕注浆, 直钻孔, 顶板及围岩厚25 m整体注浆层, 水泥浆	水平盖层	45 ~ 100	44 361	2 500	94.00%
52		张马弓铁矿	奥陶统灰岩	灰岩帷幕注浆, 地面钻孔, 注浆孔34个	480	460	49 392	22 752	53.93%
53	山东沂源	韩旺铁矿	地表水	竖井筒帷幕注浆, 上部旋喷下部高压注浆		入岩1-3	2 400.24	79.2	90.00%
54	江苏徐州	吴庄铁矿	矿床含水层	基岩帷幕注浆, 孔距为12 m, 纯压、下行式注浆法, 水泥浆	220	288 ~ 569	33 600	7 680	77.14%
55	河北沙河	王窑铁矿	灰岩岩溶 裂隙水	井下帷幕注浆, 工作面灰岩施工20 ~ 30 m钻孔, 墙厚20 ~ 30 m, 水泥浆液			160 800		
56	安徽淮北	刘楼铁矿	河流经天窗 补给	全封闭井下帷幕注浆, 隔离漏水“天窗”及地表河水与矿体联系, 帷幕厚8 m, 孔间距13 m, 水泥浆液	650		4 100	2 700	34.15%
57	山东淄博	高阳铁矿	溶洞、断层破 碎带、裂隙	地面定向钻孔+井下帷幕注浆, 帷幕厚2 m, 水泥浆液、水泥水玻璃双液浆	141	264.5	7 000	1 000	85.71%
58	江西九江	城门山铜矿 (露天)	灰岩断层 破碎带	地面钻孔, 10 m间距钻孔, 水泥浆液、改性湖泥浆液	660	200 ~ 290			95.66%
59	湖南常宁	水口山 铅锌矿	堵截洪峰、保 证矿山安全	直钻孔+定向钻帷幕注浆, 悬挂式, 墙厚10 m, 孔间距10 m, 水泥、尾砂	560	200 ~ 652	71 520	32 184	55.00%
60	湖北大冶	铜录山铜矿 (露井联合)	河流经岩溶 补给	深部厚层灰岩帷幕注浆, 直钻孔, 悬挂式, 帷幕厚10 m, 孔距5 ~ 20 m, 水泥、稻草、锯末、水玻璃、尾砂	470	60 ~ 285	10 959	5 041	54.00%, 内外 水位差 25 ~ 41m
61	安徽铜陵	新桥硫铁矿	岩溶管道水	强岩溶厚层灰岩动水帷幕注浆, 帷幕厚10 m, 孔间距5 ~ 20 m, 黏土、粉煤灰和水泥	700	260			77.97%
62	湖北大冶	鲤鱼湖 铜铁矿	基岩裂隙 溶洞水层	地面钻孔, 孔间距8 m, 黏土改良的尾砂浆液	1 016	平均365, 深465	14 345, 正常8 857	3 096	65.00%
63	安徽庐江	黄屯硫铁矿	接顶底板 含水层	基岩帷幕注浆, 钻孔, 孔距6 ~ 7 m, 局部加密至3 ~ 4 m, 水泥黏土浆	2 722.1	入弱透水20	预计108 000	37 800	65.00%

续表

序号	地区	矿井	补给源	技术、工艺	帷幕长度/m	帷幕埋深/m	涌水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	治理后涌水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	截水效果
64	湖北大冶	大红山矿	大气降水和湖水经大理岩补给	大理岩帷幕注浆, 半封闭, 悬挂, 直钻孔, 单排, 孔距10 m, 帷幕厚10 m, 水泥尾矿、水泥黏土浆	530	141.02 ~ 366.43	15 676, 帷幕3 842	1 520	60.44%
65	湖北大冶	铜山铜铁矿	白云岩夹大理岩岩溶裂隙水	岩溶裂隙帷幕注浆, 直钻孔, 单排, 孔间距10.0 m, 水泥浆	250.12	平均442		渗透系数 0.061 m/d	70.00%
66	湖北大冶	金井咀	岩溶裂隙水				8 701		
67	广东	凡口铅锌矿	灰岩岩溶裂隙水	灰岩帷幕注浆, 直钻孔, 孔距8 ~ 10 m, 骨料、聚氨酯化学浆液、水泥水玻璃双液浆、黏土水泥浆	1 670	70 ~ 110	旱季28 000, 最大60 000	8 551	75.00%
68	湖南	铜山岭有色矿	岩溶裂隙水	基岩帷幕注浆, 帷幕厚10 m, 孔间距5 ~ 10 m, 水泥、尾砂	410	113 ~ 262	6 336	1 152	81.82%
69	山东莱芜	莱芜西巷	河流补给	帷幕注浆截断河水渗漏与倒灌, 孔间距15 ~ 30 m	1 050	84.44			截断河床渗漏, 减少96.50%
70	山东淄博	金岭铁矿	灰岩含水层	“水平帷幕”注浆, 人为造成隔水层	1 000	150 ~ 160	102 432		节省排水费 93.3万元/a
71	江西	新庄铜铅锌矿	大气降水经基岩风化裂隙补给	岩层帷幕注浆, 孔间距10 m, 水泥浆、黏土浆	300	30 ~ 260	预计76 920	4 500	94.00%
72	广东	藤铁矿	岩溶水	岩溶帷幕注浆, 地面钻孔, 段长5 ~ 10 m, 水泥黏土浆	580				85.00%
73	安徽铜陵	新华山铜矿	大理岩岩溶水	大理岩岩溶截水帷幕, 孔距6 ~ 26 m, 改性泥浆	290	190	25 423.2		
74	湖北大冶	红卫铁矿	大理岩岩溶水	大理岩帷幕注浆, 悬挂式帷幕, 地面钻孔, 下行式注浆, 孔距8 ~ 10 m	100	75 ~ 98	5 200	1 757	65.00%
75	湖南道县	后江桥铁锰矿	地表水渗透补给	灰岩帷幕注浆, 封底式, 孔间距10 m, 扩散距离8 m, 纯水泥浆液	4 012	266.64	预计61 953		80.00%
76	湖北阳新	赵家湾铜矿	河流及灰岩水	孔间距10 m, 帷幕厚8 m, 扩散半径7.1 m, 注浆段长5 ~ 10 m, 水泥尾砂浆	344.16	入隔水层10	4 755.875	893.325	81.22%
77	云南彝良	毛坪铅锌矿	河流经补给地下水	“垂直孔+‘鱼刺型’分支孔+S’型分支孔”的帷幕注浆, 幕体厚10 m, 孔间距10 m, 黏土水泥浆	1 456	375	最大35 349, 正常26 984		50.00%以上
78	湖北大冶	大志山铜矿	灰岩溶洞裂隙水	灰岩帷幕注浆, 地面钻孔, 孔间距10 m, 帷幕厚10 m, 水泥尾砂浆、水泥黏土浆和水泥尾砂黏土浆	1 616.8	最深568.25	58 639	15 984	72.70%
79	河北唐山	昌麟耐火粘土矿	断层水	竖井井筒帷幕, 止浆垫+钻孔注浆, 段高15 ~ 17 m, 水泥、水泥水玻璃	50	93 ~ 140	2 160		
80	江西乐平	铜多金属矿	壶天群含水层	基岩帷幕注浆, 帷幕厚10 m, 孔间距10 m, 水泥粉煤灰水玻璃浆液	500	124	36 368, 正常11 720		60.00%
81	辽宁葫芦岛	葫芦岛钢屯钼矿	断层裂隙水	基岩裂隙帷幕注浆, 帷幕厚30 m, 高压注浆, 段长20 m	1 840	标高120 ~ 270			

1964—1965年, 青山泉煤矿为切断2号井与3号井之间含水灰岩的水力联系, 解除生产矿井受相邻被淹井的威胁, 保证3号井的安全生产。在灰岩

中进行帷幕注浆, 成功建成我国第一个矿区帷幕, 封堵了流向矿井的地下水^[5]。青山泉煤矿灰岩岩溶率20% ~ 30%, 地下水流速30 ~ 538 m/h, 矿坑最大涌水

量 $1\ 320\ \text{m}^3/\text{h}$ ，采用地面直钻孔注浆，钻孔间距 $3.5\sim 10\ \text{m}$ ，帷幕墙长度 $565\ \text{m}$ ，深度 $10\sim 150\ \text{m}$ ，帷幕墙厚 $10\ \text{m}$ ，采用水泥黏土浆、水玻璃注浆材料。帷幕截水率 13.6% ，帷幕内外水位差 $27\ \text{m}$ ，水量减少 $228.3\ \text{m}^3/\text{h}$ ，消减了洪峰，解除了淹井威胁。

1970—1986 年，水口山铅锌矿灰岩溶隙的渗透系数 $35.32\ \text{m}/\text{d}$ ，地下水流速 $44\ \text{m}/\text{h}$ ，涌水量 $71\ 520\ \text{m}^3/\text{d}$ ，为减少矿坑涌水量，防止疏干引起的地表塌陷，采用“地面直钻孔+定向钻孔”注浆，孔间距 $10\ \text{m}$ ，灌注水泥、尾砂，是我国在厚层灰岩中建造的第一个注浆截水帷幕。水口山铅锌矿厚层灰岩悬挂式注浆帷幕长 $560\ \text{m}$ ，深度 $200\sim 652\ \text{m}$ ，平均深 $450\ \text{m}$ ，墙厚 $10\ \text{m}$ ，截水率 55.00% ，水量减少到 $32\ 184\ \text{m}^3/\text{d}$ ，堵截洪峰，保障了矿山安全。

1978—1983 年，溢岭庄煤矿为截断深部大青灰岩含水层侧向补给，减少矿井涌水量，采用地面直钻孔注浆帷幕，钻孔间距 $7\sim 10\ \text{m}$ ，水泥粉煤灰浆液。我国矿山系统第一个在深部薄层灰岩中建造注浆帷幕截流工程，帷幕长度 $630\ \text{m}$ ，深度 $273\ \text{m}$ ，内外水位差 $20\ \text{m}$ ，节省排水费 $60\ \text{万元}/\text{a}$ 。

目前，矿山截水帷幕从垂向上是否进入隔水层分为①落底式帷幕：帷幕底端穿透含水层并进入下部隔水层一定深度的截水帷幕，如扎尼河露天矿帷幕、硫磺沟煤矿帷幕、张家岭煤矿帷幕、朱仙庄煤矿帷幕、黑旺铁矿（露天）帷幕、后江桥铁锰矿帷幕等；②悬挂式帷幕：帷幕底端置于含水层中的截水帷幕，如水口铅锌矿帷幕、铜录山铜矿（露井联合）帷幕、大红山矿帷幕等。

而矿山截水帷幕从平面上是否闭合分为①全封闭式帷幕：将工作面、采区或矿区圈闭在帷幕范围内，在平面上形成连续的闭合圈层。如中关铁矿帷幕、谷家台铁矿帷幕、刘楼铁矿帷幕；②半封闭式帷幕：未将工作面、采区或矿区完全圈闭在帷幕范围内，在平面上未形成连续的闭合圈层。如青山泉煤矿帷幕、扎尼河露天矿帷幕、硫磺沟煤矿帷幕、张家岭煤矿帷幕、朱仙庄煤矿帷幕等。

矿山截水帷幕按施工场地空间位置又分为①地面注浆帷幕：造浆、压浆和注浆孔钻进均在地面进行，便于用大型钻机和大型设备，效率高，质量好，但相对钻孔有效进尺较低，特别是在含水层较薄时；②井下注浆帷幕：造浆、压浆和注浆孔钻进均在井下巷道硐室中进行，适用于含水层埋藏深度大，有可利用的井下巷道或具备开拓注浆巷道的条件。需增加井巷开拓投资，钻进、注浆不能用大型设备；③地面-井下联合注浆帷幕：造浆、压浆在地面通过输浆孔向井下钻进的注浆孔注浆，可利用大型设备，效率高，节约工作量，钻孔针对性强^[61]。

2.2 大水矿山帷幕截水技术对比

落底式矿山截水帷幕深入含水层底板的隔水层不小于 $5\ \text{m}$ ，适用于含水层厚度不大，透水性相对均一的情况；该类型帷幕对含水层顶底板间全面封闭，解决了深部绕流，一般堵水率较高，但帷幕工程量较大。悬挂式矿山截水帷幕置于强含水层中或仅穿透强含水带进入弱透水带，适用于含水层厚度大，截水率要求不高的情况；该类型帷幕工程量较小，在设计堵水率的范围内，可缩短工期，降低造价，但存在一定的深部绕流问题。

目前截水帷幕构筑工艺主要有钻孔注浆、旋喷、地连墙、咬合桩、防渗膜等（表 3）。钻孔注浆帷幕包括地面直钻孔注浆、地面向水平孔注浆、井下水平孔注浆、井上下联合钻孔注浆等；通过施工钻孔，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；适应岩溶、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，同时钻孔注浆浆液扩散范围大、注浆量不可控，在松散层扩散范围小、不易形成连续帷幕墙体。

旋喷帷幕包括单管旋喷、双重管旋喷、三重管旋喷、多重管旋喷，利用钻机将旋喷注浆管及喷头钻置于帷幕底设计高程，将预先配制好的浆液通过高压发生装置使液流获得巨大能量后，从注浆管边的喷嘴中高速喷射出来，形成一股能量高度集中的液流，直接破坏土体，喷射过程中，钻杆边旋转边提升，使

表 3 截水帷幕技术对比

Table 3 Comparison of interception curtain technology

帷幕类型	适应工况	优点	缺点
钻孔注浆帷幕	岩溶、溶隙、裂隙地层	施工方便、工艺流程简单、截水率较高	浆液扩散范围大、注浆量不可控
旋喷帷幕	黏土、砂层及部分砂卵石地层	效果好、原位处置、截水率高	造价高、速度慢、废浆污染
素混凝土地连墙帷幕	地面垂向成槽施工、松散层、岩层	防渗性好、适应性强、功效高、质量可靠	造价较高、施工深度受限
桩排式帷幕	松散层及风化基岩	截水效果较好、地面施工方便	接头多、质量难控制、造价较高、工期较长
防渗膜帷幕	地面垂向成槽施工、松散层、岩层	造价低、施工效率高、耐用、效果好	膜横向连接困难、整体性较弱、施工深度受限

浆液与土体充分搅拌混合,在土中形成一定直径的柱状固结体,从而使土体得到加固、阻水。适宜淤泥、淤泥质土、黏性土、粉土、沙土、人工填土和碎石土地层;具有效果好、原位处置、截水率高的优势,同时造价高、施工速度慢、效率低、废浆污染环境。

地连墙是在地面上采用一种双轮铣、液压抓斗成槽机械,沿着帷幕轴线,在泥浆护壁条件下,开挖出一条狭长的深槽,清槽后,用导管法灌注水下混凝土筑成一个单元槽段,如此逐段进行,在地下筑成一道连续的混凝土墙,作为截水、防渗、挡水结构。适宜松散层、岩层,可施工 150 m 深度;具有工效高、工期短、质量可靠、经济效益高的优势,同时造价较高、施工深度受限。

桩排式帷幕是通过大直径钻机、旋挖钻机施工垂向钻孔至帷幕设计深度,在钻孔内灌注素混凝土或浆液,使相邻排桩间部分圆周相嵌,形成具有良好防渗作用的整体连续阻水结构。适用于松散层及风化基岩地层,具有截水效果较好、机械占地空间小、地面施工方便的优势,同时接头多、质量难控制、造价较高、工期较长。

防渗膜帷幕是近年研发并成功应用的截水帷幕形式,成槽方式与地连墙一致,在地面上采用一种双轮铣、液压抓斗挖槽机械,沿着帷幕轴线,在泥浆护壁条件下,开挖出一条狭长的深槽,清槽后,在槽段内垂向隐蔽铺设 HDPE 防渗膜,如此逐段进行,在地下筑成一道连续的防渗膜帷幕墙,作为截水、防渗结构。适宜松散层、岩层,可施工 150 m 深度;造价低、施工效率高、耐用、效果好,同时防渗膜横向连接困难、整体性较弱、施工深度受限。

矿山截水帷幕常用防渗材料见表 4,天然黏土无化学污染物、环境影响小、成本低,但渗透系数大、防渗能力弱、取土破坏耕地。膨润土渗透系数小、防渗性好、适应不均匀沉降,但是施工条件苛刻、失水

易干燥、遇水会膨胀。防渗膜延伸性好,适应变形能力强,化学稳定性好,防渗性能好,使用量少,易于运输;缺点是对铺设技术和条件要求较高,容易被刺破,没有自动愈合修复能力。抗渗混凝土具有来源广泛、施工简便,兼有防渗和承重 2 种功能等优点,但防渗性能不及防渗膜好,而且混凝土属于不均匀的脆性材料,易产生沉降和裂缝^[74]。水泥粉煤灰浆液材料来源广泛、施工简便、扩散性好、防渗性较好,由于粉煤灰火山灰活性反应慢、浆液凝结慢、抗冲刷弱、扩散范围不可控,材料用量大。水泥水玻璃双液浆凝胶快、抗冲刷性好、扩散范围小、防渗性较好,但耐久性弱、脆性大、成本高。

3 大水矿山侧向截水帷幕典型案例分析

在我国已施工的 80 多个矿山截水帷幕工程中筛选中关铁矿、硫磺沟煤矿、朱仙庄煤矿和扎尼河露天矿 4 个典型案例进行截水帷幕技术对比分析。

3.1 中关铁矿全封闭注浆帷幕

中关铁矿位于河北省沙河市,矿床位于邯邢铁矿区,是一个储量近亿吨、品位超过 46% 的优质矿山,属于埋藏较深的隐伏矿体,矿床顶板为奥陶系中统灰岩,裂隙岩溶发育,富水性强,典型的矽卡岩型复杂富水矿床^[23,75]。同时该矿位于百泉泉域地下水强径流带,开采-230 m 中段时,矿坑涌水量可达 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。为了解决矿山开采、安全运营以及采矿与地下水资源保护等方面的矛盾问题,需系统性解决地下水问题,开展了“矿体侧向大型注浆截水帷幕”矿山防治水与矿区地下水生态环境综合治理工程^[23]。

在矿区南端矿量集中区实施环形单排全封闭注浆帷幕 3 393 m,单排注浆孔,钻孔间距 12 m,钻孔平均深 510 m、最深 830 m,帷幕厚 10 m,帷幕主体工程注浆孔 314 个,检查孔 38 个,特殊地段的加密孔 41 个,平均孔深 519.50 m,注浆段单孔平均长度

表 4 防渗材料基本特点对比

Table 4 Comparison of basic characteristics of impermeable materials

防渗材料	渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	优点	缺点
天然黏土	$10^{-4} \sim 10^{-6}$	不引入人工物质和化学污染物,环境影响小	防渗能力弱、取土破坏耕地造成水土流失
膨润土	$10^{-9} \sim 10^{-10}$	防渗好、适应不均匀沉降、环境影响小	施工条件要求比较苛刻、失水易干燥、 安装时遇水会膨胀
防渗膜	$10^{-11} \sim 10^{-13}$	防渗好、化学稳定性好、适应变形能力强、使用量少	容易被刺破、存在老化问题、铺设技术和 条件要求较高
抗渗混凝土	$10^{-7} \sim 10^{-12}$	材料来源广泛、施工简便、兼有防渗和承重两种功能	对各成分配比要求严格、可能产生裂缝 导致渗水、漏水
水泥粉煤灰浆液	$10^{-7} \sim 10^{-8}$	材料来源广泛、施工简便、扩散性好	凝结慢、抗冲刷弱、扩散范围不可控,材料用量大
水泥水玻璃双液浆	$10^{-7} \sim 10^{-8}$	凝胶快、抗冲刷性好、扩散范围小	耐久性弱、脆性大、成本高

381.04 m。钻探总进尺 204 163.50 m，注浆段总长 135 269.20 m。注浆压力为静水头压力的 1.5~2.0 倍，注浆方式采用下行式注浆。注浆材料以单一水泥浆为主，遇特殊地段适当加入掺合料如砂、黏性土、粉煤灰和水玻璃等^[75]。中关铁矿是我国首个对矿山先进行治水，然后再建井的例子。

3.2 硫磺沟煤矿落底式基岩注浆帷幕

硫磺沟煤矿第四系松散含水层厚 5~17 m，渗透系数大，与头屯河水力联系密切。第四系松散含水层在河床与 4-5 煤、9-15 煤露头直接接触，存在一定的水力联系。受矿区周边老空区地面塌陷影响，老空区涌水量增大至 14 756 m³/d。但矿区渗流通道、渗流路径及渗流边界不清，老空水的补给通道主要为头屯河河床塌陷形成的通道，头屯河水直接补给老空水。

如图 1 所示，根据物探探测出的电阻异常区域采用钻探探查验证，K2 线探出 3 处采空区、1 条巷道，K3 线揭露 1 处采空区、2 条巷道。在 K2、K3 线探测出采空区、巷道的位置分别加密 1~2 排钻孔进一步探测，排间距 2 m，钻孔梅花状布置，钻孔间距 4 m。

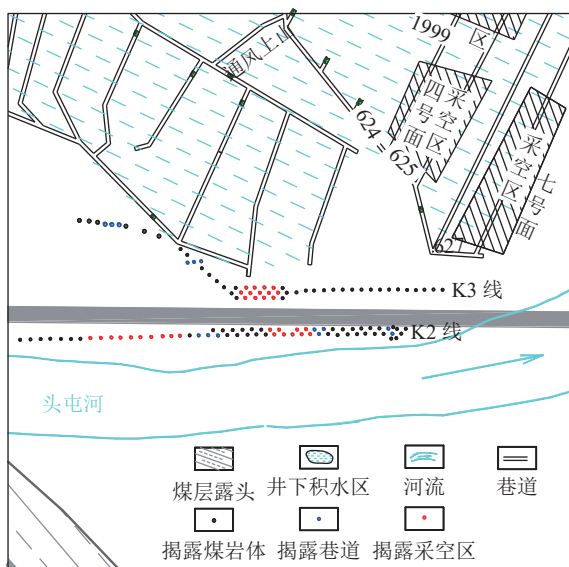


图 1 硫磺沟煤矿帷幕钻孔平面布置

Fig.1 Layout of curtain drilling in Liuhuanggou Coal Mine

在揭露的采空区和废弃巷道浇筑 C30 混凝土，通过钻孔灌注至采空区或废弃巷道，充填、加固河床下部采空区和废弃巷道，共灌注 C30 商砼 2 500 m³ 左右。采空区和巷道上部采用纯水泥浆注浆加固地层裂隙和细微空洞，揭露煤岩体的钻孔采用纯水泥浆封堵钻孔，避免形成垂向导水通道。通过灌注混凝土和纯水泥浆液，在矿区东侧形成 1 道长约 160 m、宽 30 m 的地下截水帷幕墙体，隔断了矿区老空区与

外侧头屯河河床之间的水力联系。

3.3 朱仙庄煤矿定向水平孔注浆帷幕

如图 2 所示，朱仙庄煤矿井田北部“五含”地层大面积压覆于 8 煤层、10 煤层等含煤地层、“太灰”及“奥灰”含水层之上，呈角度不整合接触关系。“五含”与“四含”、“太灰”和“奥灰”之间均存在明显水力联系，垂向和侧向补给条件良好，威胁矿井北部 8 煤层安全开采^[47]。通过在朱仙庄煤矿 8 煤层分布区外侧约 120 m 位置建造一条长约 3 130 m、有效宽度约 40 m、高约 60 m 的帷幕墙。采用地面直孔和水平孔 2 种钻孔方式，地面直孔 94 个，水平孔 20 个，总钻探进尺约 73 000 m。注浆材料以水泥为主，掺注粉煤灰，特殊情况下灌注黄沙等骨料^[47]。朱仙庄煤矿截水帷幕是国内首次实施“大规模长距离”松散层、岩溶地层混合地下截水帷幕工程。

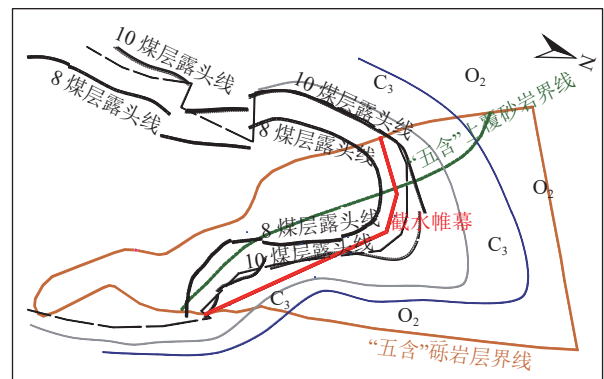


图 2 朱仙庄煤矿帷幕平面示意

Fig.2 Curtain plan of Zhuxianzhuang Coal Mine

3.4 扎尼河露天煤矿防渗膜落底式截水帷幕

扎尼河露天煤矿砂卵石层粒径 1~5 cm，次圆状，分选好，含少量细砂，渗透性好，渗透系数达 80~180 m/d^[76]。受矿坑疏排水影响，地下水径流方向变为向东北、北向疏降中心径流，疏降中心形成疏降漏斗。矿坑疏排水量主要由露天煤矿北侧海拉尔河水通过第四系强渗透砂卵石层沿煤层隐伏露头动态补给组成，动态补给量约占疏排水总量的 82% 以上^[77]。

矿坑疏排水降水破坏周边草原生态环境、造成水资源浪费，为减少露天煤矿矿坑疏排水量、保护草原水资源和生态环境，采用截水帷幕替代传统的露天煤矿疏排降水方案^[76-77]。如图 3 所示，扎尼河截水帷幕分别应用了防渗膜帷幕、抗渗混凝土地连墙、超高压角域射流注浆、咬合桩帷幕，形成了“顶不越、底不漏、两端不绕、接头不渗”的 5 815 m 地下截水帷幕墙，其中防渗膜帷幕长 3 100 m。帷幕墙厚 0.6~0.8 m，深度 21~56 m，进入底部相对隔水层泥岩 2 m。

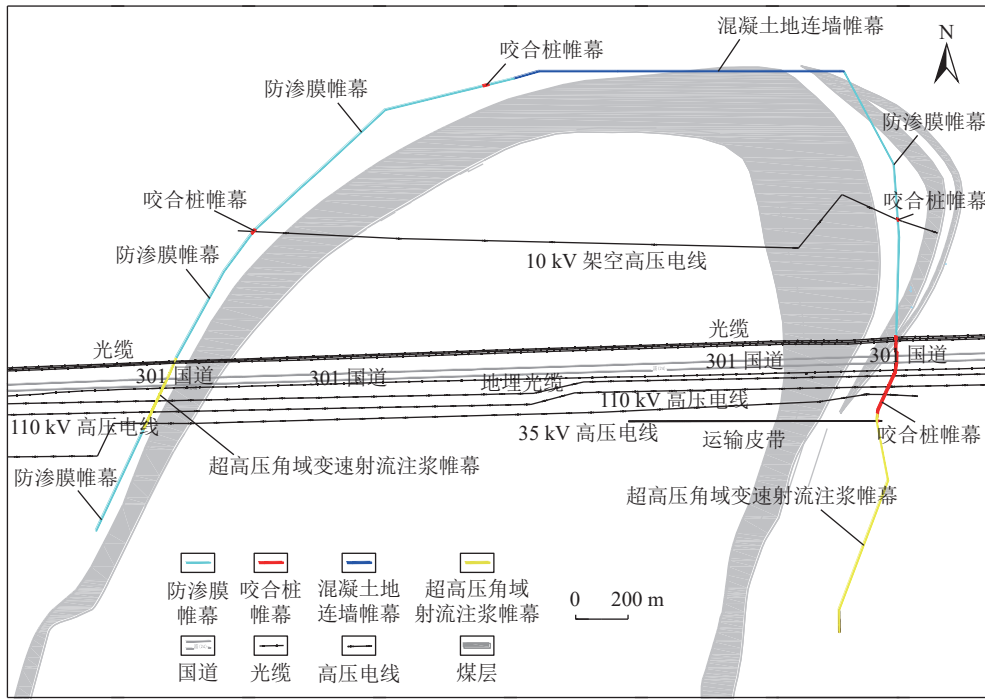


图3 扎尼河露天矿截水帷幕平面示意

Fig.3 Schematic plan of water cut-off curtain at Zani River open pit mine

如图4所示, 防渗膜帷幕采用液压抓斗、双轮铣等成槽机在帷幕线位置开挖出宽0.6~0.8 m、深21~56 m的沟槽, 每幅槽段长度根据地层条件分为8、15、22 m, 开挖过程中采用泥浆保证槽壁稳定。由防渗膜铺膜机从槽口向槽底垂向隐蔽铺设HDPE防渗膜, 每幅防渗膜之间采用接头箱连接, 形成连续的防渗膜帷幕。帷幕槽段内注入粉煤灰掺量80%的水泥粉煤灰混合浆液, 浆液置换出槽段内泥浆重复利用, 混合浆液与防渗膜形成复合防渗墙体, 既提高了防渗墙的防渗性能, 又实现了帷幕墙体可变形^[6,76]。



图4 扎尼河露天矿防渗膜帷幕示意

Fig.4 Schematic of impermeable membrane curtain for Zani River open pit mine

4 侧向截水帷幕水资源保护效果

中关铁矿截水帷幕构筑完成后, 帷幕内外40 m水力坡度明显高于矿区天然水力坡度和帷幕内水力坡度, 并筒施工少量排水及矿区水位季节性变化即可引起水力流场的明显变化, 帷幕注浆工程有效隔断了地下岩溶裂隙水贯通, 发挥了明显的阻水作用。矿坑疏排水量由150 300 m³/d减少到30 000 m³/d, 截水率在80%以上, 取得了非常好的效果, 保护了地下水资源与水文地质环境, 改善了采矿作业条件, 提高了井下作业的安全程度, 降低排水费用^[23,75]。

由图5可知, 2018年8月, 硫磺沟煤矿老空区涌水量增大至9 022 m³/d, 对矿井安全生产构成严重威

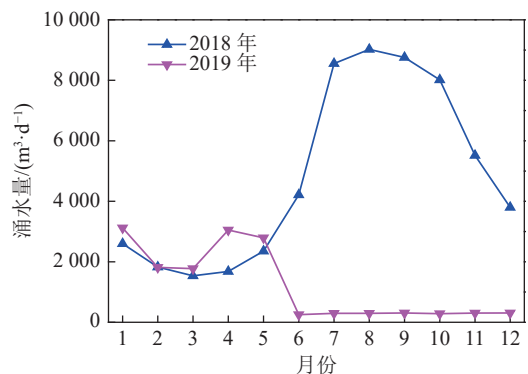


图5 硫磺沟截水帷幕实施前后老空区水量变化

Fig.5 Changes of water quantity in goaf area before and after the implementation of water interception curtain

2019 年 4 月,开始实施矿区与头屯河之间的 K2、K3 线截水帷幕工程,施工过程中的老空区涌水量逐渐下降。2019 年 6 月,截水帷幕施工完成,老空区涌水量降至 $251 \text{ m}^3/\text{d}$,并维持稳定涌水量,较 2018 年最大涌水量减少了 97.2%。截水帷幕工程经历了 2019 年 6—8 月头屯河径流的检验,效果良好,老空区涌水量未出现反弹现象。每年减少 $1\ 650\ 713 \text{ m}^3$ 老空区涌水量,保护了地表水资源。

朱仙庄煤矿帷幕建成后帷幕内“五含”初始水位基本在 -70 m ,帷幕外“五含”初始水位为 $-11.7 \sim -21.1 \text{ m}$,平均约 -17 m ,墙内外水位差 50 m ,帷幕截流作用明显。放水试验末期,帷幕内“五含”水位降至 -230 m ,累计降深 160 m 左右,帷幕外“五含”水位平均降至 -25 m ,累计降深约 11 m ,帷幕内外水位差约为 200 m 。“五含”水位疏降至 -230 m 时,地下水由帷幕外向帷幕的残余渗水量约为 $50 \text{ m}^3/\text{h}$,当疏降至 -350 m 时,地下水由帷幕外向帷幕内的残余水量约为 $91 \text{ m}^3/\text{h}$,截流率达到 95.26%^[47]。

如图 6 所示,自扎尼河露天煤矿截水帷幕施工以来,矿坑疏排水量开始逐渐减少,至 2020 年 9 月,露天煤矿疏排水量已减少 75.02%,动态补给量已减少 89%,矿区水资源保护效果显著。截水帷幕外侧水位较之前明显抬升,帷幕位置水位由之前的埋深 12 m 左右抬升至 6.5 m ,地下水水位逐渐恢复至原始水位,地下水水位达到了植被正常生长的阈值地下水埋深^[6]。

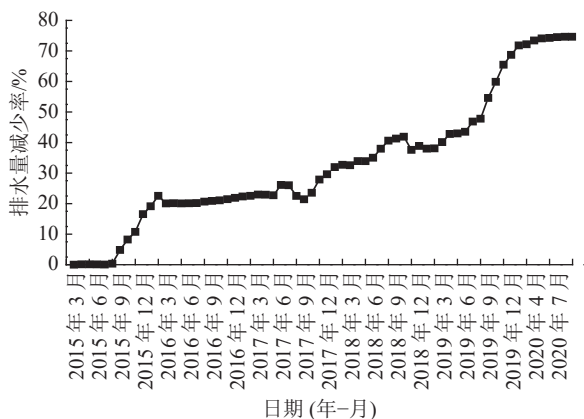


图 6 扎尼河露天煤矿矿坑疏排水减少情况

Fig.6 Reduction of drainage in open pit coal mine

由上述 4 个典型案例可知,矿山侧向截水帷幕技术从源头上解决矿区水害威胁、水资源浪费问题,可有效减小矿山开采对地下水和生态环境造成的损伤,实现矿山真正意义上的保水、保生态、减损、绿色开采。

5 大水矿山侧向截水帷幕技术发展趋势

我国大水矿山侧向帷幕截水技术已由地面直钻孔注浆帷幕发展为井上下联合定向水平钻孔注浆、地连墙、防渗膜等多种帷幕截水技术,并在 80 余座矿山应用,取得非常好的应用效果。但仍存在如下问题:

1)截水帷幕墙体连续性弱、注浆帷幕截水率低、造价高、垂向隐蔽铺设防渗膜连接难度大、膜与膜之间有机连接工效低。

2)基岩注浆帷幕的浆液沿孔隙、裂隙扩散,扩散范围广、方向不可控、浆液灌注量大、成本高。

3)基层侧向帷幕大多采用直钻孔或水平定向孔灌注浆液构筑,通过填充贯通的裂隙、空洞形成连续的帷幕体,而相对完整的低渗岩层中帷幕墙体成墙困难,尚无有效的低渗岩层注浆技术。

针对矿山侧向帷幕截水技术存在的问题,下一步矿山帷幕截水技术发展趋势为:

1)松散层侧向无接头连续帷幕截水,实现截水帷幕连续、有机一体,提高帷幕连接质量、施工效率和整体防渗效果。

2)基岩侧向帷幕截水定向扩散注浆材料,扩散范围和流动方向可控,力学性能好,密度小,体积稳定,强度提高快,韧性好,能够与周围岩体协调变形,固化后形成闭孔连胞结构,不透水。

3)低渗厚岩层侧向帷幕截水构筑技术,厚岩岩定向水平孔水力压裂注浆、二氧化碳爆破注浆、孔间割缝注浆等,构筑水平向帷幕体,形成连续的圈闭式侧向截水帷幕,保护顶板含水层水资源。

6 结 语

1)我国矿山种类多、数量多,部分大水矿山每天矿井涌水量数万立方米到数十万立方米,疏干排水引发地下水下降、水资源枯竭、岩溶塌陷和地面沉降、地表水污染、地下水环境恶化、海水倒灌等问题。

2)截水帷幕通过探明矿山水文地质工程地质条件,厘清矿山水的补给源和补给通道,设计适宜的截水帷幕轴线、顶底位置,采用地面钻孔注浆、地面定向钻孔注浆、井下钻孔注浆、井上下联合钻孔注浆、桩排、地连墙等技术构筑连续的截水帷幕墙体拦截含水层侧向补给矿山。

3)我国矿山帷幕截水技术经过近 60 a 的发展,由单一的地面直钻孔注浆发展为井上下定向钻孔注浆、地连墙、防渗膜等多种帷幕截水技术,在 80 余座矿山成功应用,并取得非常好的应用效果,保护了矿

山水资源和矿区生态环境。

4) 下一步矿山帷幕截水技术将朝着松散层侧向无接头连续截水帷幕、基岩侧向帷幕截水定向扩散注浆、低渗厚岩层侧向帷幕截水构筑技术等方向发展,进一步践行绿水青山就是金山银山理念,保障矿山地下水资源,实现矿山保水、保生态、减损、绿色开采。

参考文献(References):

- [1] 王益伟,罗周全,杨彪,等.大水矿山开采水环境系统失效致灾机理[J].中南大学学报(自然科学版),2016,47(3):1002-1010.
WANG Yiwei, LUO Zhouquan, YANG Biao, *et al.* Groundwater environment system failure mechanism for mining in groundwater abundant mines[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2016, 47(3): 1002-1010.
- [2] 贾明.大水矿山隔水关键层再造及其安全可靠研究[D].长沙:中南大学,2012.
JIA Ming. Recycling water-resisting key-stratum for mine with great water and researching of its safety reliability[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [3] 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,2021,46(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, 2021, 46(10): 3079-3089.
- [4] 孙子正.矿山阻水帷幕薄弱带综合分析方法与治理技术[D].济南:山东大学,2012:8-10.
SUN Zizheng. Integrated analytical method with weakzone of mine water stop curtain and its treatment technology[D]. Jinan: Shandong University, 2012: 8-10.
- [5] 陈勤树.我国矿区注浆帷幕截流技术的研究与应用[J].矿业研究与开发,1993(S2):8-18.
CHEN Qinshu. Research and application of curtain grout technology for flow cut-off in China's mines[J]. Mining Research and Development, 1993(S2): 8-18.
- [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] 国家煤矿安全监察局.煤矿防治水细则[M].北京:煤炭工业出版社,2018:1-5.
- [8] 韩习运.动水帷幕、浅截注浆在防治水中的应用[J].煤炭工程,2008,40(1):45-46.
HAN Xiyun. Application of moving water curtain and shallow cut grouting in water control[J]. Coal Engineering, 2008, 40(1): 45-46.
- [9] 王福顺.帷幕注浆截流在矿井防治地表水害中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(1):236-238,243.
WANG Fushun. Application of curtain grouting flow closure in mine surface water hazard prevention[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2007, 34(1): 236-238, 243.
- [10] 周述和.重庆松藻煤矿茅口灰岩岩溶水害与治理[J].中国煤田地质,2005,17(5):65-67,77.
ZHOU Shuhe. Maokou limestone karstic water flooding and harnessing in Songzao coalmine, Chongqing[J]. Coal Geology of China, 2005, 17(5): 65-67, 77.
- [11] 郭庆武.定向水平井封堵薄灰残余出水点技术研究与实践[J].煤炭与化工,2021,44(2):16-18,23.
GUO Qingwu. Research and practice of sealing thin ash residual outflow point technology in directional horizontal shaft[J]. Coal and Chemical Industry, 2021, 44(2): 16-18, 23.
- [12] 李建文.帷幕注浆技术在柠条塔煤矿水害治理中的应用[J].煤炭技术,2016,35(5):203-205.
LI Jianwen. Application of curtain grouting technology on water inrush control in Ningtiaota coal mine[J]. Coal Technology, 2016, 35(5): 203-205.
- [13] 罗秋德.白山坪井帷幕注浆法防治水方法[J].湖南安全与防灾,2009(7):46-48.
LUO Qinde. Water prevention and control method of curtain grouting in Baishanping well[J]. Hunan Safety and Disaster Resistant, 2009(7): 46-48.
- [14] 桑红星.帷幕截流技术在大水矿井治水中的应用[D].青岛:山东科技大学,2005:66-67.
SANG Hongxing. Cement purdah to prevent water in the big colliery[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2005: 66-67.
- [15] 张文忠,朱明诚.华蓥山煤田溶蚀裂隙治理技术研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2015,34(9):1016-1020.
ZHANG Wenzhong, ZHU Mingcheng. Study on the treatment technology of corrosion fractures in Hua Yingshan coalfield[J]. Journal of Liaoning Technical University:Natural Science, 2015, 34(9): 1016-1020.
- [16] 张友军.帷幕注浆堵水技术在竹山塘煤矿的应用[J].低碳世界,2014(13):122-123.
ZHANG Youjun. Application of curtain grouting technology in Zhushantang coal mine[J]. Low Carbon World, 2014(13): 122-123.
- [17] 朱春孝,谢配红,邢立亭,等.西北半干旱地区大水矿床成因机制-以锦界煤矿为例[J].水利与建筑工程学报,2013,11(6):11-15.
ZHU Chunxiao, XIE Peihong, XING Liting, *et al.* Genetic mechanism of heavy-water deposit in north west arid region of China-taking Jinjie mine as an exsample[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2013, 11(6): 11-15.
- [18] 山东时代工程咨询有限公司.鄂尔多斯营盘壕煤矿矿井水深度处理工程发布招标公告[EB/OL].(2018-9-28)[2021-9-14].
<http://www.membranes.com.cn/xingyedongtai/gongyexinwen/2018-09-28/34282.html>.
- [19] 赵春虎,王强民,王皓,等.东部草原区露天煤矿开采对地下水系统影响与帷幕保护分析[J].煤炭学报,2019,44(12):

- 3685-3692.
- ZHAO Chunhu, WANG Qiangmin, WANG Hao, *et al.* Analysis of influence of open-pit coal mining on groundwater system and curtain wall protection in grassland area of Northeastern[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(12): 3685-3692.
- [20] 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.
- [21] 高源. 白音华一号露天矿复合排水管路系统优化设计[J]. *煤炭工程*, 2012(10): 17-19.
- GAO Yuan. Optimization design of compound drainage pipe system in Baiyinhua No.1 open-pit mine[J]. *Coal Engineering*, 2012(10): 17-19.
- [22] 王威, 郑士田, 李文江, 等. 黄河北煤田顶底板双灰岩水害分析及防治技术[J]. *煤矿安全*, 2020, 51(4): 93-96.
- WANG Wei, ZHENG Shitian, LI Wenjiang, *et al.* Analysis and prevention technology of mine water hazard in roof and floor limestone aquifer of northern Huanghe coalfield[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(4): 93-96.
- [23] 韩贵雷, 袁胜超. 大型型矿山矿坑水综合治理关键技术[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2019: 2-13.
- [24] 张省军, 袁瑞甫. 矿山注浆堵水帷幕稳定性及监测方法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009: 7-9.
- [25] 付士根, 李全明, 马海涛. 帷幕注浆堵水隔障带稳定性及监测及研究[M]. 北京: 气象出版社, 2017: 1-5, 120.
- [26] 丛山. 矿山帷幕注浆堵水工程设计与施工[M]. 北京: 地质出版社, 2011: 4-5, 265-279.
- [27] 王志国. 富水边坡注浆帷幕破裂机理及稳定性研究[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2016: 2-3, 11-18.
- [28] 刘建峰. 莱新铁矿“大水”矿床防治水方案的选择[J]. *矿业工程*, 2016, 14(3): 21-24.
- LIU Jianfeng. Selection of water control solutions for heavy-water deposit of Laixin iron mine[J]. *Mining Engineering*, 2016, 14(3): 21-24.
- [29] 王亮. 大型金属矿产井下近矿体帷幕注浆堵水技术研究[D]. 长沙: 长沙矿山研究院, 2011: 2-7, 79-81.
- WANG Liang. Study on preventing water technique by nearly orebody curtain grouting at watery metallic deposits[D]. Changsha: Changsha Institute of Mining Research, 2011: 2-7, 79-81.
- [30] 谢世平, 侯垣麟, 刘天奇. 龙塘沿铁矿首采段近矿体帷幕注浆应用[J]. *矿业研究与开发*, 2020, 40(5): 80-83.
- XIE Shiping, HOU Yuanqi, LIU Tianqi. Application of curtain grouting near orebody in the first mining section of Longtanyan iron mine[J]. *Mining Research and Development*, 2020, 40(5): 80-83.
- [31] 乐应. 安徽黄屯硫铁矿矿坑涌水治理的帷幕注浆工艺[J]. *现代矿业*, 2018(7): 220-222.
- LE Ying. Curtain Grouting Technique for Pit Water Discharge reatment of Huangtun Pyrite Mine in Anhui Province[J]. *Modern Mining*, 2018(7): 220-222.
- [32] 杨柱, 赵恰, 黄炳仁. 矿山帷幕强动水通道注浆控制技术及应用[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.
- [33] 高学通, 刘殿风, 蒋鹏飞. 岩溶裂隙产状对帷幕注浆施工及堵水的影响[J]. *金属矿山*, 2013(3): 25-28.
- GAO Xuetong, LIU Dianfeng, JIANG Pengfei. Influence of the karst fissure occurrence on construction and water plugging of curtain grouting[J]. *Metal Mine*, 2013(3): 25-28.
- [34] 杨建安, 洪安娜. 宜丰新庄铜铅锌矿地下水综合防治技术[J]. *金属矿山*, 2018(7): 175-178.
- YANG Jianan, HONG Anna. Comprehensive prevention and control technology for groundwater in Xinzhuang copper, lead-zinc mine from Yifeng[J]. *Metal Mine*, 2018(7): 175-178.
- [35] 徐磊. 平原浅埋岩溶大水矿床井下近矿体注浆帷幕层堵水加固效果研究[D]. 长沙: 长沙矿山研究院, 2015: 1-5.
- XU Lei. Water plugging and reinforcement effect research of underground nearly orebody curtain grouting layer for large karst water deposit shallow buried in plain[D]. Changsha: Changsha Institute of Mining Research, 2015: 1-5.
- [36] 刘志虹. 新华山铜矿矿坑涌水量预测及防治水探讨[J]. *西部资源*, 2019(2): 102-103.
- LIU Zhihong. Water inflow prediction and water control in Xinhuaashan copper mine[J]. *Western Resources*, 2019(2): 102-103.
- [37] 贾鹏涛. 帷幕注浆技术在复杂富水金属矿山防治水中的应用[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2013: 3-9.
- JIA Pengtao. Application of curtain grouting technique in water-proof and water control in complex and water-rich metal mine[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2013: 3-9.
- [38] 李金秀. 滇东北毛坪铅锌矿区深部开采条件下矿坑水防治研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015: 43-52, 62-63.
- LI Jinxiu. Study on pit water control under deep mining condition in Maoping lead-zinc mine area, Northeast Yunnan [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015: 43-52, 62-63.
- [39] 李元松, 吴春华, 段鑫, 等. 大志山注浆帷幕防治水工程大型抽水试验[J]. *武汉工程大学学报*, 2015, 37(8): 6-12.
- LI Yuansong, WU Chunhua, DUAN Xin, *et al.* Steady-flow pumping test of groundwater blockage by grouting curtain in Dazhishan mine[J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 2015, 37(8): 6-12.
- [40] 王立志. 王窑铁矿地下水研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009: 49-51.
- WANG Lizhi. Groundwater research of Wangyao iron mine[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009: 49-51.
- [41] 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.

- [42] 钟兆泓, 赵鹏, 贾朋涛. 矿山治水防渗帷幕问题探讨[J]. 工程设计与研究, 2008, 125(12): 10-13, 25.
ZHONG Zhaohong, ZHAO Peng, JIA Pengtao. Discussion on the curtain of water control and seepage prevention in mine[J]. Engineering Design and Research, 2008, 125(12): 10-13, 25.
- [43] 富鹏飞. 帷幕注浆技术在煤矿水害防治中的应用[J]. 煤矿现代化, 2020(6): 69-70, 73.
FU Pengfei. Application of curtain grouting technology in prevention and control of water disaster in coal mine[J]. Coal Mine Modernization, 2020(6): 69-70, 73.
- [44] 赵伟, 张跃恒, 董振国, 等. 敏东一矿软岩区地下水注浆治理技术及应用研究[J]. 钻探工程, 2021, 48(6): 87-94.
ZHAO Wei, ZHANG Yueheng, DONG Zhenguo, et al. Application research on groundwater grouting treatment technology in the soft rock area of Mindong No. 1 Mine[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(6): 87-94.
- [45] 李功. 煤矿边界水患综合治理技术应用研究[J]. 山东煤炭科技, 2006(2): 18-20.
LI Gong. Study on the application of comprehensive control technology for coal mine boundary flood[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2006(2): 18-20.
- [46] 潘国营, 蔡二贝, 李连春, 等. 平禹一矿岩溶水害综合防治技术[J]. 中州煤炭, 2014(11): 77-80.
Pan Guoying, CAI Erbei, LI Lianchun, et al. Comprehensive prevention and control technology of karst water disasters in Pingyu No. 1 coal mine[J]. Zhongzhou Coal, 2014(11): 77-80.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 蒙永励, 刘晓珠. 新疆阜康市大黄山煤矿七号井突水防治方案的探讨[C]//中国金属学会冶金地质分会2008年年会论文集, 北京: 2008: 195-198.
- [50] 张春锋. 将军戈壁二号露天煤矿采场北帮烧变岩水治理方案[J]. 露天采矿技术, 2016, 31(5): 4-7.
ZHANG Chunfeng, FU Zhong, ZHANG Dexiao, et al. Burnt rock water control scheme in Jiangjun Gobi No. 2 open-pit coal mine stope north slope[J]. Opencast Mining Technology, 2016, 31(5): 4-7.
- [51] 刘兴. 西湾露天煤矿东边坡涌水因素分析及综合治理方法[J]. 露天采矿技术, 2020, 35(6): 74-76.
LIU Xing. Water influx factors analysis and comprehensive treatment methods on east slope of Xiwan Open-pit Coal Mine[J]. Opencast Mining Technology, 2020, 35(6): 74-76.
- [52] 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.
- [53] 徐连利. 煤矿隔离帷幕注浆截流技术[J]. 中国煤炭, 2008(9): 53-56.
XU Lianli. Underground grouting technology for water blocking curtain in coal mines[J]. China Coal, 2008(9): 53-56.
- [54] 朱启宽. 蔡园矿副井帷幕注浆防水综合治理研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2006: 6-9, 47-48.
ZHU Qikuan. Study of the comprehensive government of grouting and sealing-up by concrete curtain on Caiyuan coal mine auxiliary shaft[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2006: 6-9, 47-48.
- [55] 胡政明. 帷幕注浆堵水技术在山环煤矿的应用[J]. 江西煤炭科技, 2012(4): 1-2.
HU Zhengming. Application of curtain grouting water shut-off technology in Shanhuan colliery[J]. Jiangxi Coal Science & Technology, 2012(4): 1-2.
- [56] 李高锋. 雅店煤矿副立井探水方案及注浆工艺[C]//陕西省煤炭学会学样会论文集, 北京: 2015: 88-91.
- [57] 谭奉云. 帷幕注浆阻水在寺河煤矿潘庄进风立井的应用[J]. 中小企业管理与科技, 2012(1): 156-157.
TAN Fengyun. Application of curtain grouting to water blocking in Panzhuang air intake shaft of Sihe Coal Mine[J]. Management & Technology of SME, 2012(1): 156-157.
- [58] 马涛. 红柳煤矿掘进大巷过断层帷幕注浆技术[J]. 中国煤炭, 2014, 40(2): 95-97.
MA Tao. Curtain grouting technology for passing through fault of driving roadway in Hongliu coal mine[J]. China Coal, 2014, 40(2): 95-97.
- [59] 赵伏军, 徐燕飞, 王宏宇. 煤矿井下断层渗流特性与注浆防渗效果分析[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(7): 17-20.
ZHAO Fujun, XU Yanfei, WANG Hongyu. Analysis on vadose features of fault and leakage grouting prevention effect in underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(7): 17-20.
- [60] 郝鸿声, 潘宝正, 张清, 等. 浅孔注浆堵水技术在白象山铁矿的应用[J]. 采矿技术, 2015, 15(6): 43-106.
HAO Hongsheng, PAN Baozheng, ZHANG Qing, et al. Application of shallow hole grouting technology in Baixiangshan iron mine[J]. Mining Technology, 2015, 15(6): 43-106.
- [61] 卢萍, 侯克鹏. 帷幕注浆技术在矿山治水中的应用现状与发展趋势[J]. 现代矿业, 2010(3): 21-24.
LU Ping, HOU Kepeng. The current application status and development trend of curtain grouting in water-rich mine[J]. Modern Mining, 2010(3): 21-24.
- [62] 秦桂展, 陈汉玉. 井下帷幕注浆技术在淮北刘楼铁矿的应用[J]. 能源与节能, 2015(1): 102-103, 180.
QIN Guizhan, CHEN Hanyu. Application of the technology of underground curtain grouting in Huaibei Liulou iron mine[J]. Energy and Energy Conservation, 2015(1): 102-103, 180.

- [63] 刘强,张可能,尹琼. 矿山帷幕注浆过程控制及注浆效果评价[M]. 长沙:中南大学出版社,2017:9-11,41-45.
- [64] 刘旺. 铜录山矿帷幕注浆堵水技术[J]. 矿业研究与开发,1993(S2):19-38.
LIU Wang. Curtain grouting water plugging technology in Tonglushan mine[J]. Mining Research and Development, 1993(S2): 19-38.
- [65] 元宙昊. 矽卡岩型岩溶矿地下水径流动态模拟与帷幕优化研究[D]. 武汉:武汉工程大学,2016:22-27,37-39.
YUAN Zhouhao. Study on the dynamic simulation of groundwater flow and the grouting optimization of the Skarn karst mine[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2016: 22-27, 37-39.
- [66] 祝世平,王伏春,曾夏生. 大红山矿帷幕注浆治水工程及其评价[J]. 金属矿山,2007,36(9):79-83,93.
ZHU Shiping, WANG Fuchun, ZENG Xiasheng. Groundwater blockage by grouting curtain in Dahongshan mine and its evaluation[J]. Metal Mine, 2007, 36(9): 79-83, 93.
- [67] 张博,余佳,桂飞,等. 半封闭式帷幕注浆堵水技术在铜山铜铁矿的应用[J]. 湖北理工学院学报,2016,32(5):17-21.
ZHANG Bo, YU Jia, GUI Fei, *et al.* Application of semi-enclosed curtain grouting for water plugging in Tongshan copper & iron mine[J]. Journal of Hubei Polytechnic University, 2016, 32(5): 17-21.
- [68] 杨大林. 金井咀金矿床水文地质特征及矿坑涌水量预测方法初探[J]. 中南冶金地质,1997(1):39-43.
YANG Dalin. Preliminary study on hydrogeological characteristics and prediction method of mine water inflow in Jinjingzui gold deposit[J]. South-central metallurgical geology, 1997(1): 39-43.
- [69] 李清来. 帷幕注浆堵水在红卫岩溶充水铜铁矿床防治地面塌陷中的应用[J]. 中国岩溶,1997,16(4):403-412.
LI Qinglai. Application of curtain in grouting blocking to ground collapse prevention in Hongwei karst water-impregnated copper-iron oredeposit[J]. Carsologica Sinica, 1997, 16(4): 403-412.
- [70] 李进勇. 帷幕注浆技术在赵家湾铜矿防治水工程中的应用[D]. 武汉:中国地质大学(武汉),2010:4-19,52-58.
LI Jinyong. Application of curtain grouting technology in water control and smelting project of Zhaojiawan copper mine[D]. Wuhan: China University of Geosciences, Wuhan, 2010.
- [71] 孙光华,王庆林. 帷幕注浆在竖井掘进中的应用[J]. 河北理工大学(自然科学版),2008,30(2):1-3,8.
SUN Guanghua, WANG Qinglin. Application of curtain grouting in shaft driving[J]. Journal of North China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2008, 30(2): 1-3, 8.
- [72] 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.
- [73] 李春锋. 帷幕注浆在葫芦岛钢屯铜矿防治水的应用[J]. 有色矿冶,2015,31(4):51-54.
LI Chunfeng. The application of curtain grouting in the field of water control of in Gangtun molybdenum ores, Huludao[J]. Non-ferrous Mining and Metallurgy, 2015, 31(4): 51-54.
- [74] 罗育池,廉晶晶,张沙沙,等. 地下水污染防控技术:防渗、修复与监控[M]. 北京:科学出版社,2018:71-76.
- [75] 常宏,李同鹏,唐恺,等. 帷幕注浆技术在中关铁矿堵水中的应用[J]. 现代矿业,2019(10):79-82,126.
CHANG Hong, LI Tongpeng, TANG Kai, *et al.* Application of curtain grouting technology in water blocking in Zhongguan iron mine[J]. Modern mining, 2019(10): 79-82,126.
- [76] 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.
- [77] 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):1865-187.
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): 1865-187.