

涡北煤矿851工作面“四含”注浆改造工程应用及治理效果评价

朱 杨¹, 胡 儒^{2*}

¹淮北矿业股份有限公司涡北煤矿, 安徽 亳州

²国家煤矿水害防治工程技术研究中心, 宿州学院, 安徽 宿州

收稿日期: 2025年12月15日; 录用日期: 2026年1月16日; 发布日期: 2026年1月23日

摘要

为防控“四含”下开采引发的水害风险,本文以涡北煤矿851工作面为例,设计施工“四含”注浆改造工程及井下探放水工程,基于注浆及井下探放水工程成果,从浆液扩散距离、“四含”、风化带、断层水文地质性质、井下探放水等方面进行多维度验证,综合评价“四含”注浆改造治理效果,结果表明:该注浆改造工程有效阻断了“四含”水渗流通道,降低了含水层富水性,实现了“四含”水害的精准治理,并形成了可供借鉴的多维度注浆改造效果评价体系,为类似松散含水砂层工作面的注浆改造提供了技术参考与工程示范。

关键词

四含, 注浆改造, 涡北煤矿, 治理效果评价

Application and Treatment Effect Evaluation of “Fourth Aquifer” Grouting Reconstruction Project in 851 Working Face of Guobei Coal Mine

Yang Zhu¹, Ru Hu^{2*}

¹Guobei Coal Mine, Huaibei Mining Co., Ltd., Bozhou Anhui

²National Coal Mine Water Hazard Prevention Engineering Technology Research Center, Suzhou University, Suzhou Anhui

Received: December 15, 2025; accepted: January 16, 2026; published: January 23, 2026

*通讯作者。

Abstract

To address the water hazard risk induced by mining under the “Fourth Aquifer” (abbreviated as “Sihan”), this paper takes the 851 Working Face of Guobei Coal Mine as an example, designing and constructing the “Sihan” grouting reconstruction project and underground water exploration and drainage project. Based on the achievements of the grouting and underground water exploration and drainage projects, multi-dimensional verification is conducted from aspects of grout diffusion distance, hydrogeological properties of the “Fourth Aquifer”, weathered zone and faults, as well as underground water exploration and drainage. A comprehensive evaluation of the treatment effect of the “Fourth Aquifer” grouting reconstruction is carried out. The results show that the grouting reconstruction project has effectively blocked the seepage channels of “Fourth Aquifer” water, reduced the water abundance of the aquifer, and achieved precise control of the “Fourth Aquifer” water hazard. Furthermore, a referable multi-dimensional evaluation system for grouting reconstruction effect has been formed, providing technical reference and engineering demonstration for the grouting reconstruction of working faces in similar loose water-bearing sand layers.

Keywords

Fourth Aquifer, Grouting Reconstruction, Guobei Coal Mine, Treatment Effect Evaluation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤炭是我国的基础能源之一，在我国能源消费中长期占据重要地位。在未来较长一段时间内煤炭作为我国基础能源的主体地位不会改变。然而，由于国家对煤炭资源的大量、持续的开发利用，浅部煤炭资源逐渐较少并濒临枯竭，致使煤炭开采出现了深浅两极化的趋势。为了延长矿井生产年限，浅部煤炭资源尤其是浅部薄基岩区煤层组煤炭资源的开采回收，成为较多矿井不可回避的现实问题[1]-[5]。

近几年，近含水层开采突水溃砂事故发生频繁，2023年11月5日淮北矿业集团信湖煤矿发生“11·5”突水溃砂淹井事故，造成巨大损失[6]。2021年8月14日，青海柴达尔煤矿溃砂事故，工作面顶板抽冒破坏，沟通上覆新近系高承压含水砂层，瞬间涌出泥砂量超2万立方米，淹没巷道致20人死亡，直接经济损失约1亿元[7]。近松散含水层下采煤引发的突水溃砂事故，轻者引发设备损毁、巷道淤堵，重者造成巨大财产损失及人员伤亡。

随着采前探查治理技术的不断提高，近几年常采用超前治理、超前注浆、含水层改性等方法对第四系松散含水层进行改进从而实现煤层的安全高效开采。李睿健[8]对五沟煤矿1010-1工作面“四含”及风化带注浆改造后采动覆岩破坏进行了研究，分析了注浆前后“四含”、风氧化带水文地质条件及工程性质的变化；山东鲁泰控股集团太平煤矿采用注浆改造方法治理“四含”，从浆液扩散范围、物探、检查孔取芯等方面综合分析了注浆治理效果[9]；闫鑫等[10]通过后序孔岩屑录井、注浆层位取芯观测以及对比分析注浆治理前后含水层水位、井下疏放水量、地层透水率、井下钻孔串浆等参数，对煤层顶板注浆治理效果进行检验，揭示注浆效果；朱先祥等[11]提出了浆-水置换概念，将浆-水置换效应融入幂律流体

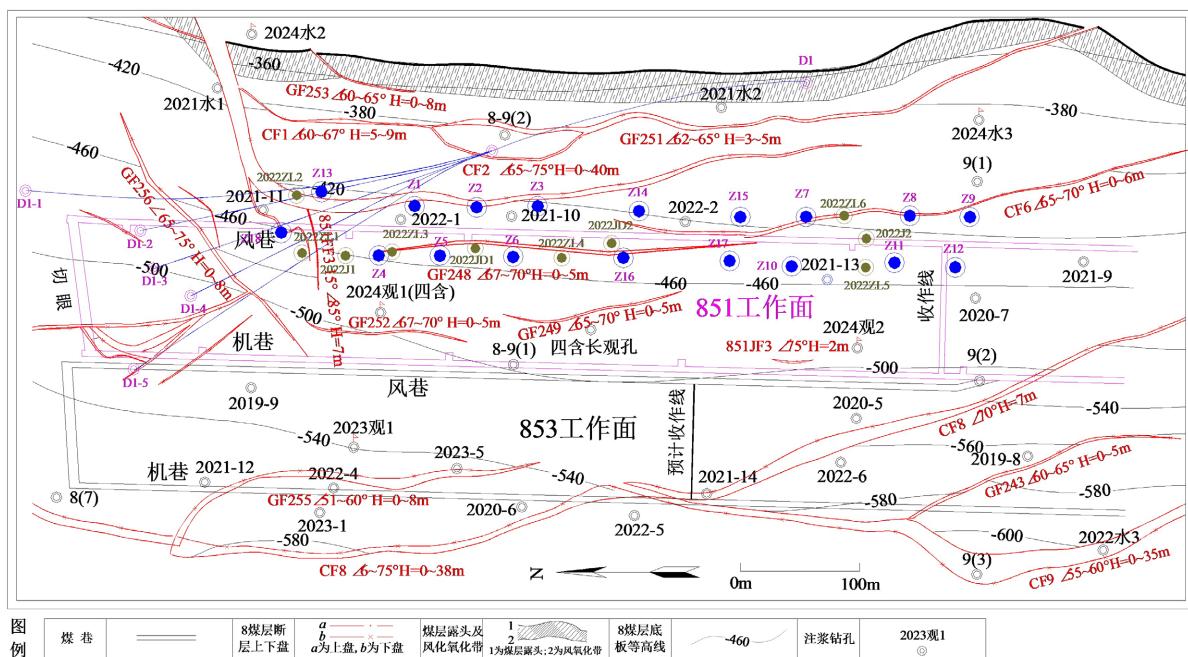
渗流扩散方程, 并验证了浆 - 水置换效应下的幂律流体球形渗透浆液扩散机制。纵观知网文献, 以“松散层”“四含”“注浆”等相关关键词进行搜索, 针对注浆治理改造效果评价方面的研究报道相对较少, 而随着定向钻技术的成熟及工程成本控制, 注浆改造“四含”将成为解放浅部呆滞煤量的有效及可靠手段, 针对注浆改造治理效果方面的研究可能成为未来的热点。

淮北矿业集团已在涡北、杨柳等煤矿多次开展了“四含”注浆改造治理工程, 产生的经济及社会效益显著。本文以淮北矿业集团涡北煤矿 851 工作面“四含”注浆改造工程为例, 从注浆改造后浆液扩散范围、“四含”、风化带、断层水文地质性质等方面开展注浆效果综合评述, 以期从注浆过程关键环节控制、注浆治理改造效果评价等方面形成范式, 为同类地质条件下“四含”治理工程实施及改造效果评价提供参考和借鉴, 为松散含水层下工作面回采提供可靠保障, 从而实现煤层的安全高效开采。

2. 工作面概况

2.1. 851 工作面地质条件

851 工作面为首采综放工作面, 可采储量约 115 万 t, 限厚开采后可采储量约 90 万 t, 预计 6 月具备回采条件。工作面走向长约 720 m, 倾斜宽约 115 m, 煤(岩)层倾角 $20^\circ\sim35^\circ$, 851 风巷上下限标高 -430.3~484.5, 工作面位置及布置情况见图 1, 851 机、风巷共计揭露 21 条断层, 对工作面回采影响较大断层 4 条, 分别为倾向断层 851F₃ ($H=7$ m)、851F₄ ($H=6$ m)、GF₂₅₆ ($H=3\sim6$ m) 和走向断层 GF₂₄₈ ($H=0\sim5$ m)。据三维地震资料反演, 851F₃、851F₄ 断层均为 CF₂ 断层的次生断层。



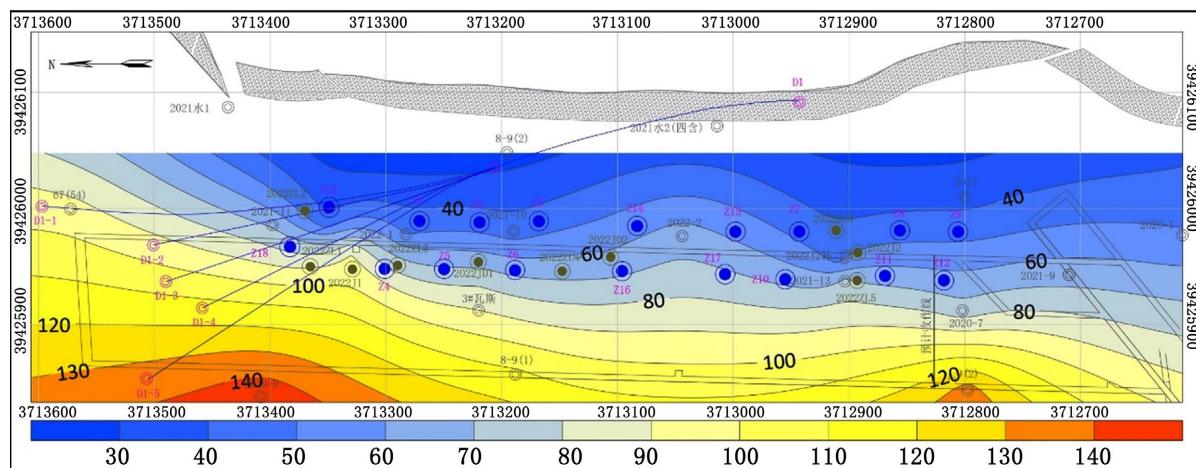


Figure 2.8 Coal roof bedrock thickness contour map
图 2.8 煤顶板基岩厚度等值线图

2.2. 水文地质条件

851 工作面开采主要受“四含”水影响, 图 3 为 851 工作面“四含”厚度等值线图, 851 工作面顶部“四含”稳定发育, 厚度最小为 2.7 m (2022J2 孔), 最大为 14.55 m (2022JD1 孔), 工作面中段“四含”厚度较两侧薄, 岩性主要以钙质粘土、细砂、灰岩砾石为主。

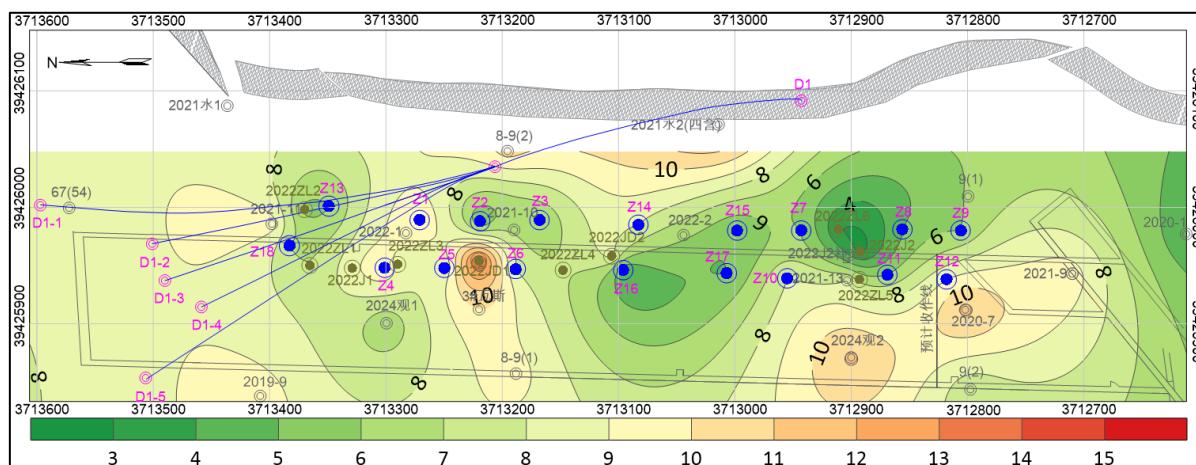


Figure 3. Contour map of the “Fourth Aquifer” thickness of the 851 working surface (including calcareous clay)
图 3. 851 工作面“四含”厚度等值线图(包含钙质粘土)

根据周边钻孔“四含”抽(注)水试验资料(见表 1), 绘制 851 工作面及附近“四含”单位涌水量等值线图(图 4)。由图 4 可知, 851 工作面及附近单位涌水量整体由南向北逐渐增大, 最小为 0.00093 L/(s·m) (2024 观 2 孔); 最大为 0.006247 L/(s·m) (2022ZL1 孔), 富水性等级为弱。851 工作面范围内渗透系数为 0.00144 m/d (2024 观 2 孔)~0.1077 m/d (2022ZL1 孔)。

3. 注浆机理及工作面注浆工程施工概况

3.1. 注浆机理

851 工作面“四含”注浆改造的核心机理是“靶向封堵 + 浆 - 水置换 + 协同隔水”, 针对“四含”

松散含水砂层、风化带裂隙及断层导水通道的复合地质条件, 通过差异化注浆作用实现水害根源治理。

Table 1. Statistical table of the results of the “Fourth Aquifer” water pumping (injection) test of the loose layer in the 85 mining area

表 1. 85 采区松散层“四含”抽(注)水试验成果统计表

孔号	含水层厚度 (m)	静止水位 标高(m)	恢复水位 (m)	单位涌水量 (L/s·m)	渗透系数 (m/d)	与工作面空间关系
06 观 1	7.3	7.2	-41.7	0.00017	0.0013	距 851 机巷 225 m
2020 四含观 1	15	-7.59	-41.1	0.0031	0.0434	距 851 收作线 775 m
2021-水 1	11.33	-1.49	/	0.0045	0.039	/
2021-水 2	13.2	-2.47	-63.5	0.00055	0.0035	距 851 风巷 105 m
2021-水 3	5.64	-7.56	/	0.0043	0.083	/
2021-水 4	11.74	-4.99	/	0.00016	0.001	/
2021-水 5	7.65	-7.93	/	0.0015	0.02	/
2022ZL1	7.05	-0.53	-36.55	0.006247	0.1077	/
2022ZL5	7.6	-1.03	-18.5	0.001009	0.0118	/
2023 四含观 3	4.05	3.99	-10.3	0.000236	0.0047	距 851 机巷 376 m
2024 观 1	6.25	58.68	59.23	0.00193	0.035	工作面内
2024 观 2	11.2	4.09	34.24	0.00093	0.00144	工作面内
2024 水 2	/	/	/	0.000019	0.00025	/
2024 水 3	/	/	/	0.00031	0.00430	/

对于“四含”松散层(以钙质粘土、细砂、灰岩砾石为主, 含孔隙、溶隙), 采用地面定向斜孔高压注浆, 利用水泥基浆液的幂律流体特性, 在压力驱动下实现“浆 - 水置换”——浆液渗透填充孔隙与溶隙, 挤压排出赋存水体, 凝结后形成刚性骨架, 降低含水层富水性与透水性; 针对风化带砂岩、泥岩的裂隙发育特征, 浆液通过渗透作用填充细微裂隙, 利用触变性快速胶结岩体, 将弱透水的风化带改造为微透水的相对隔水层。

对 GF₂₅₆、851FF₃等断层及次生裂隙, 通过定向水平孔注浆, 借助高压劈裂效应使浆液沿断层破碎带扩散, 填充断层导水通道并胶结破碎岩块, 阻断断层与“四含”的水力联系, 将原弱透水~微透水的断层带改造为极微透水的隔水层。

整体注浆过程中, 浆液优先沿孔隙、溶隙、断层裂隙等优势通道运移, 通过渗透、劈裂、胶结三重作用, 形成覆盖“四含 - 风化带——断层”的连续隔水帷幕, 从源头阻断地下水渗流路径, 实现“驱水固沙、封堵导水通道、重构隔水体系”的治理目标, 为工作面安全回采提供地质保障。

本工程注浆材料选用水泥基浆液, 注浆初期浆液黏度较高, 在高压注浆压力驱动下, 经裂隙、孔隙剪切作用后黏度显著降低, 保障浆液远距离运移; 浆液静置时形成空间网状结构, 流动后结构破坏, 停止流动后快速恢复, 可有效防止注浆过程中浆液流失, 提高封堵效率; 初凝时间控制在 4~8 小时, 终凝时间不超过 24 小时, 既满足浆液扩散渗透需求, 又能快速形成刚性骨架, 其流变特性符合幂律流体特征, 从而进一步实现“驱水固沙”效果。

“四含”介质以钙质粘土、细砂、灰岩砾石为主, 兼具孔隙(孔径 0.1~5 mm)、溶隙及裂隙(宽度 0.5~10 mm)双重特征, 浆液与介质的匹配性主要体现在:

(1) 孔隙适配性

浆液水灰比设计为 1:1~1:1.5, 颗粒粒径 $\leq 80 \mu\text{m}$, 小于“四含”砂层平均孔隙孔径, 可通过渗透作用填充孔隙, 实现浆-水置换, 降低含水层富水性。

(2) 裂隙适配性

利用浆液剪切稀化特性, 在高压作用下沿断层裂隙(最大宽度 10 mm)劈裂扩散, 可充分填充断层破碎带及次生裂隙。

(3) 渗透-劈裂协同适配

针对“四含”孔隙-裂隙共生的介质特点, 浆液在低压阶段以渗透方式填充孔隙, 压力升高后转为劈裂扩散, 覆盖不同尺度导水通道, 形成连续隔水帷幕, 与“四含”、风化带、断层构成的复杂介质体系形成良好适配, 保障注浆改造效果。

3.2. 注浆工程施工概况

851 工作面近“四含”开采, 注浆项目通过施工地面定向斜孔对厚煤层限高开采区顶板“四含”及风氧化带进行“驱水固沙”, 降低含水层富水性; 施工定向水平孔对倾向断层 GF₂₅₆、851F_{F3}、851F_{F4} 及 CF₂ 断层裂隙进行注浆封堵, 提高断层隔水性能, 根本上消除工作面顶板水害威胁。

注浆项目分为两期进行, 工程布置如图 1 所示, 钻探工程量如表 2 所示。第一期注浆于 2023 年 3 月 31 日完成现场钻探及注浆施工, 历时 197 天, 完成钻孔 10 个, 累计钻探进尺 4706.69 m, 累计注水泥 3592.17 吨。第二期注浆于 2023 年 11 月 21 日开工, 2024 年 3 月 23 日完工, 工期 124 天, 累计完成 5 个定向水平孔和 18 个定向斜孔, 累计钻探进尺 9872 m, 注水泥 38280 t, 注浆终压 4.0~6.2 MPa, 其中定向水平孔钻探进尺 2190 m, 定向斜孔钻探进尺 7682 m, 2 期工程压水试验 134 次, 实现了对断层、“四含”和风化带的高效探查, 所有施工钻孔均达到了“四含”注浆治理的目的。

Table 2. List of drilling engineering quantities

表 2. 钻探工程量一览表

施工单位	钻孔号	施工日期	孔深(m)	水文地质测验	注水泥(t)	终压(MPa)	单位注浆量(t/m)
中煤 科工西安 研究院 (集团) 有限公司	Z1	2023.11.27~2024.2.20	430	压水试验 6 次	650	4.0	15.5
	Z2	2023.12.6~2024.2.27	425	压水试验 4 次	1094	5.0	28.1
	Z3	2023.12.2~2024.2.25	425	压水试验 4 次	591	4.9	15.2
	Z4	2023.11.21~2024.2.19	426	压水试验 4 次	424	4.2	10.3
	Z5	2023.11.25~2024.2.22	425	压水试验 4 次	603	4.5	15.5
	Z6	2024.2.17~2024.2.28	425	压水试验 4 次	476	4.4	12.2
	Z7	2023.12.18~2024.2.16	415	压水试验 4 次	2253	5.4	77.7
	Z8	2023.12.3~2024.2.20	415	压水试验 6 次	982	5.2	33.9
	Z9	2023.12.3~2024.2.17	423	压水试验 6 次	1567	4.4	42.4
	Z10	2024.1.22~2024.3.3	425	压水试验 6 次	2927	5.6	69.7
	Z11	2023.12.10~2024.2.16	430	压水试验 6 次	370	4.2	8.0

续表

	Z12	2023.12.3~2024.2.8	420	压水试验 6 次	5562	4.9	150.3
	Z13	2024.2.29~2024.3.17	422	压水试验 4 次	1575	4.4	39.4
	Z14	2024.2.20~2024.3.12	436	压水试验 6 次	2389	4.6	58.3
	Z15	2024.2.19~2024.3.5	438	压水试验 6 次	1925	4.2	44.8
	Z16	2024.2.23~2024.3.12	438	压水试验 6 次	2484	4.3	59.1
	Z17	2024.2.16~2024.3.15	438	压水试验 6 次	3109	4.3	74.0
	Z18	2024.3.15~2024.3.23	426	压水试验 4 次	520	4.2	13.7
	D1-1	2024.1.28~2024.2.5	966	压水试验 6 次	451	6.2	1.1
	D1-2	2024.1.9~2024.1.17	868	压水试验 4 次	903	4.6	3.0
	D1-3	2023.12.4~2024.1.8	866	压水试验 6 次	6852	4.5	22.8
	D1-4	2024.1.17~2024.1.22	846	压水试验 4 次	269	5.2	1.0
	D1-5	2024.1.22~2024.1.28	917	压水试验 4 次	304	5.0	0.9
山东省 煤田 地质局 第一 勘探队	2022JD2	2023.5.30~2023.6.22	492	压水试验 2 次	438	6.0	0.9
	2022JD1	2023.6.01~2023.6.27	512	压水试验 2 次	354	6.0	0.7
	2022ZL3	2023.6.23~2023.8.04	510	压水试验 2 次	359	6.0	0.7
	2022J1	2023.7.12~2023.8.20	512	压水试验 2 次	311	6.0	0.6
安徽省 煤田 地质局 第三 勘探队	2022ZL1	2022.9.16~2022.12.9	497	抽、压水 试验各 1 次	230	6.0	0.5
	2022ZL2	2022.12.19~2023.3.12	475	压水试验 2 次	467.50	6.0	1.0
	2022ZL4	2023.2.24~2023.3.31	390	压水试验 2 次	306	6.5	0.8
	2022ZL5	2022.10.16~2022.12.10	425	注、压水 试验各 1 次	147.77	10.0	0.3
	2022ZL6	2022.12.13~2023.3.16	404	压水试验 2 次	325.50	11.0	0.8
	2022J2	2022.12.20~2023.3.26	489	压水试验 2 次	282.50	11.0	0.6

4. 注浆改造效果评价

4.1. 浆液扩散距离分析

注浆浆液在含水层中优先向优势通道渗流、挤压或是劈裂, 由于地质条件复杂, 含水层裂隙发育差异, 浆液运移扩散不规则, 扩散范围具有明显不均一性[12]。但根据漏浆及串浆信息可知, 断层带浆液已知扩散平面距离达到 160 m, “四含”段浆液扩散已知平面距离 55~126 m, 风化带段浆液扩散平面距离 45 m(表 3)。

参考漏浆距离、串浆距离、注浆规律以及井下放水情况, 将治理区注浆效果初步划分为 3 个区域(注浆可靠区、“四含”扩散区和断层加固区), 见图 4。其中, 注浆可靠区最大外扩范围选取最小串浆距离, “四含”扩散区最大外扩范围选取最大串浆距离。

Table 3. Grouting diffusion distance statistics
表 3. 注浆扩散距离统计

注浆段	事件	层位	平面最近距(m)
D1-3 第二段			
D1-3 第三段	2#钻场漏浆	断层带、风化带裂隙	160
D1-2 第二段			
D1-4 第一段			
Z15 第一段	2021 水 2 孔串浆	四含溶隙、裂隙	88
Z5 第二段	3#瓦斯孔串浆	风化带裂隙	45
Z10 第一段	Z17 二开终孔串浆	四含顶部孔隙、裂隙通道	55
Z10 第二段	Z16 二开终孔串浆	四含顶部孔隙、裂隙通道	126
Z18 第一段	2024-Z2 直疏孔串浆	四含顶部孔隙、裂隙通道	60

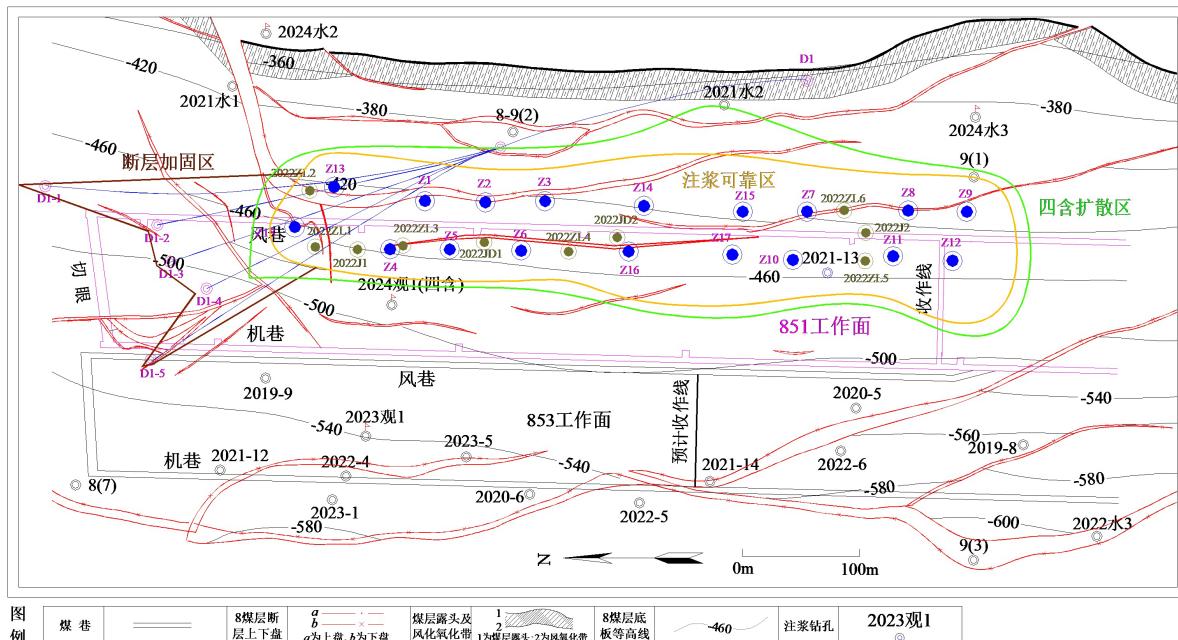


Figure 4. Prediction chart of grouting diffusion range

图 4. 注浆扩散范围预测图

总体来说，由于“四含”地层内溶隙、孔隙、裂隙发育较好，以及断层间裂隙的连通性，导致浆液扩散距离较远，这有利于保证治理范围内风巷两侧“四含”的驱水固沙以及断层的加固。

4.2. “四含”水文地质性质对比分析

4.2.1. 注浆改造后“四舍”透水性分析

对松散层“四含”进行注浆改造的钻孔主要为18个定向斜孔，各钻孔揭露“四含”深度、岩性及压水试验数据如表4所示。851工作面范围内“四含”稳定发育，主要由砂、砾石、以及钙质粘土组成。注浆前851工作面“四含”透水率为 $2.55\sim11.76\text{ Lu}$ ，其中Z3、Z6、Z7、Z8、Z95个孔透水率大于 10 Lu 。而注浆后“四含”透水率显著下降至 $0.39\sim2.57\text{ Lu}$ ，仅Z6、Z8、Z9三个孔透水率大于 1 Lu ，降幅范围为 $0.78\sim0.93$ 。

Table 4. Detailed table of the “Fourth Aquifer” lithology and water permeability before and after grouting in the 851 working face**表 4.** 851 工作面“四含”岩性及注浆前后透水率详表

孔号	孔深(m)	四含岩性	透水率(Lu)		透水率降幅
			注浆前	注浆后	
Z1	389	398 细砂、钙质粘土	7.07	0.89	0.87
Z2	391	395 钙质粘土	8.57	0.82	0.90
Z3	389	394 粘土砾石	10.75	0.9	0.92
Z4	387	396 钙质粘土	7.91	0.82	0.90
Z5	391	398 钙质粘土	/	0.73	/
Z6	388	395 钙质粘土	10.56	1.13	0.89
Z7	391	398 粘土、中砂、钙质粘土	11.32	0.78	0.93
Z8	391	395 钙质粘土	10.77	1.04	0.90
Z9	391	396 细砂、钙质粘土	11.76	2.57	0.78
Z10	393	400 钙质粘土	2.55	0.4	0.84
Z11	392	397 砂砾岩	4.19	0.68	0.84
Z12	392	400 钙质粘土	5.1	0.49	0.90
Z13	385	390 钙质粘土	2.75	0.39	0.86
Z14	398	406 粘土砾石	5.37	0.84	0.84
Z15	402	407 钙质粘土	4.56	0.79	0.83
Z16	402	406 砾石	4.99	0.91	0.82
Z17	404	409 钙质粘土	5.37	0.82	0.85
Z18	389	395 钙质粘土、粘土质砂	8.67	0.98	0.89

参考《水利水电工程地质勘察规范 GB50487-2008》(<https://www.cabr-fire.com/gf/449/list-449.htm>)附录 F 岩土体渗透性分级[13]，如表 5 所示。以透水率 k 为依据对注浆前后 851 工作面“四含”的透水性进行分级可知，注浆前 851 工作面四含透水性为弱透水至中等透水，注浆后“四含”透水性为微透水至弱透水(仅 Z6、Z8、Z9 三个孔表现为弱透水)。由此可见注浆后透水性等级至少下降一个级别，对“四含”的注浆改造效果显著。

Table 5. Permeability classification of rock and soil mass**表 5.** 岩土体渗透性分级

渗透性等级	标准		
	渗透系数 K (cm/s)	渗透系数 K (m/d)	透水率 k (Lu)
极微透水	$K < 10^{-6}$	$K < 8.64 \times 10^{-4}$	$k < 0.1$
微透水	$10^{-6} \leq K < 10^{-5}$	$8.64 \times 10^{-4} \leq K < 8.64 \times 10^{-3}$	$0.1 \leq k < 1$
弱透水	$10^{-5} \leq K < 10^{-4}$	$8.64 \times 10^{-3} \leq K < 0.0864$	$1 \leq k < 10$
中等透水	$10^{-4} \leq K < 10^{-2}$	$0.0864 \leq K < 8.64$	$10 \leq k < 100$
强透水	$10^{-2} \leq K < 1$	$8.64 \leq K < 86.4$	$k \geq 100$
极强透水	$K \geq 1$	$K \geq 86.4$	

4.2.2. 注浆改造后“四含”富水性分析

利用压水试验的注水量 Q_1 代替涌水量 Q 、用水位抬升 S_1 来代替水位降深 S 计算单位涌水量 q , 计算公式如式(1)所示。

$$q = \frac{Q_1}{60 \times (L + 100 \times P)} \quad (1)$$

其中, q 为单位涌水量, 单位 $\text{L}/(\text{s} \cdot \text{m})$; L 为孔深, 单位 m ; Q_1 为流量, 单位 L/min ; P 为全压力, 单位 MPa 。

根据压水试验数据利用式(1)换算得到各钻孔的“四含”单位涌水量如表 6 所示, 851 工作面“四含”注浆前后单位涌水量(压水试验换算值)对比如图 5 所示。

Table 6. Calculation results of unit water inflow (converted value from pressurized water test) for the “Fourth Aquifer” of the 851 working face

表 6. 851 工作面“四含”单位涌水量(压水试验换算值)计算成果表

孔号	分段孔深 L (m)	注浆前/后	试验段长(m)	流量 Q_1 (L/min)	全压力 P (MPa)	单位涌水量 q ($\text{L}/(\text{s} \cdot \text{m})$)
Z1	398	注浆前	10	250	3.535	0.005544
	398	注浆后	10	52	5.835	0.000883
Z2	395	注浆前	9	250	3.242	0.005793
	395	注浆后	9	52	7.042	0.000788
Z3	395	注浆前	9	250	2.585	0.006376
	395	注浆后	9	52	6.385	0.000839
Z4	396	注浆前	11	250	2.875	0.006096
	396	注浆后	11	52	5.775	0.000890
Z5	398	注浆前	12	250	0.325	0.009679
	398	注浆后	12	52	5.925	0.000875
Z6	395	注浆前	9	250	2.63	0.006332
	395	注浆后	9	52	5.13	0.000954
Z7	398	注浆前	12	250	1.84	0.007159
	398	注浆后	12	52	5.54	0.000910
Z8	395	注浆前	9	250	2.58	0.006381
	395	注浆后	9	52	5.58	0.000909
Z9	396	注浆前	10	250	2.125	0.006847
	396	注浆后	10	52	2.568	0.001328
Z10	405	注浆前	22	250	4.454	0.004900
	405	注浆后	22	52	5.954	0.000866
Z11	397	注浆前	13	250	4.585	0.004870
	397	注浆后	13	52	5.885	0.000879
Z12	400	注浆前	17	250	2.882	0.006054
	400	注浆后	17	52	6.282	0.000843

续表

Z13	408	注浆前	26	250	3.5	0.005497
	408	注浆后	26	52	5.1	0.000944
Z14	408	注浆前	13	250	3.58	0.005440
	408	注浆后	13	52	4.78	0.000978
Z15	409	注浆前	14	250	3.914	0.005206
	409	注浆后	14	52	4.714	0.000984
Z16	408	注浆前	12	250	4.172	0.005049
	408	注浆后	12	52	4.772	0.000979
Z17	410	注浆前	14	250	3.324	0.005612
	410	注浆后	14	52	4.524	0.001005
Z18	399	注浆前	11	250	2.622	0.006302
	399	注浆后	11	52	4.822	0.000984

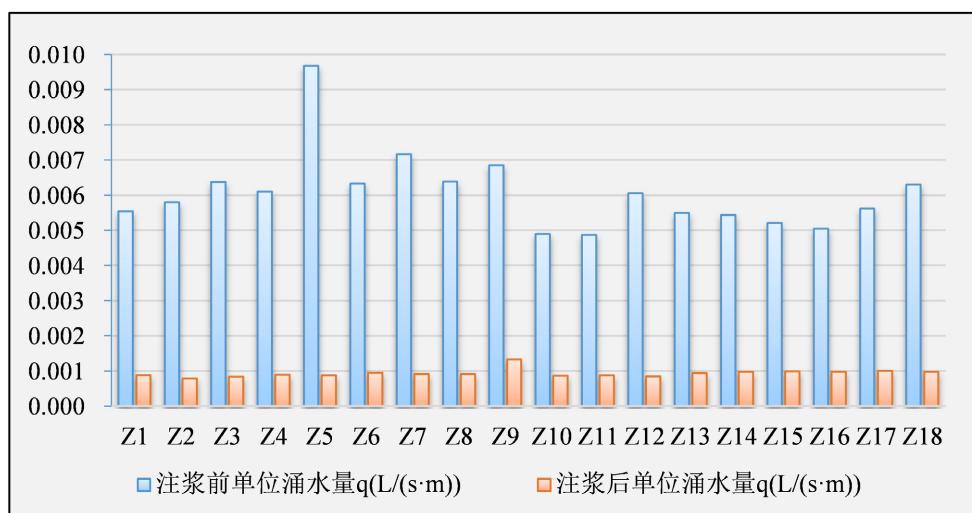


Figure 5. Column comparison chart of unit water inflow (converted value from pressure water test) before and after “Fourth Aquifer” grouting on the 851 working face

图 5. 851 工作面“四含”注浆前后单位涌水量(压水试验换算值)柱状对比图

由图 5 注浆前后 851 工作面“四含”单位涌水量 q 对比来看, 各钻孔注浆后单位涌水量均显著下降, 除钻孔 Z9 和 Z17 注浆后单位涌水量略大于 0.001 L/(s·m) 外, 其余钻孔注浆后“四含”单位涌水量均小于 0.001 L/(s·m)。根据《煤矿防治水细则(2018)》[14] 富水性等级划分, 所有钻孔注浆后“四含”均为弱富水性。

4.3. 风化带水文地质性质对比分析

851 工作面风化带岩性主要为砂岩与泥岩, 注浆前 851 工作面顶板风化带基岩透水率为 1.3~5.38 Lu, 注浆后透水率为 0.23~0.39 Lu, 较注浆前透水性显著降低, 降幅范围为 0.82~0.95 (表 7、图 6)。依据表 5, 注浆前 851 工作面风化带透水性为弱透水, 注浆后 851 工作面风化带透水性为微透水。注浆前后透水性下降了一个级别, 可视为隔水层或相对隔水层, 表明针对风化带的注浆工程效果明显。

Table 7. Detailed table of lithology of weathered zone of 851 working face and water permeability before and after grouting
表 7. 851 工作面风化带岩性及注浆前后透水率详表

孔号	取芯段孔深(m)	岩性	透水率(Lu)		透水率降幅
			注浆前	注浆后	
Z1	399	430	2.25	0.27	0.88
Z2	396	425	2.69	0.26	0.90
Z3	395	425	2.37	0.24	0.90
Z4	397	426	5.38	0.26	0.95
Z5	399	425	2.09	0.26	0.88
Z6	300	425	/	/	/
Z7	399	411	2.93	0.29	0.90
Z8	396	412	2.97	0.31	0.90
Z9	397	421	1.73	0.29	0.83
Z10	401	425	1.84	0.27	0.85
Z11	397	428	1.3	0.23	0.82
Z12	400	420	4.12	0.28	0.93
Z13	391	407	2.75	0.39	0.86
Z14	407	436	1.91	0.27	0.86
Z15	408	436	1.88	0.26	0.86
Z16	397	438	/	/	/
Z17	200	438	/	/	/
Z18	200	426	/	/	/

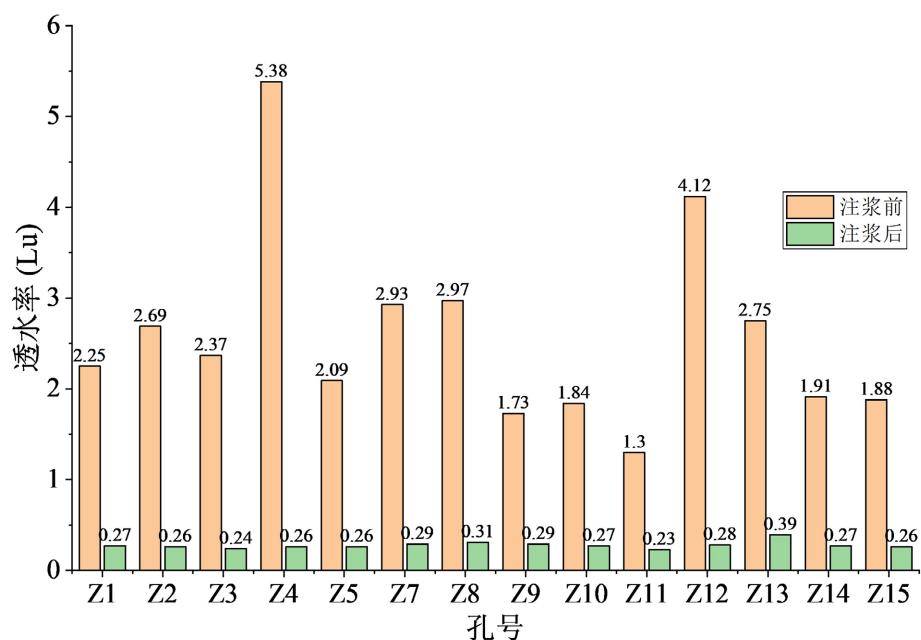


Figure 6. Comparison of lithology and water permeability of the weathered zone on the 851 working face before and after grouting

图 6. 851 工作面风化带岩性及注浆前后透水率对比图

4.4. 断层带水文地质性质对比分析

D1 孔组包括 5 个定向水平孔，目标对倾向断层 GF₂₅₆、851F₃、851F₄ 及 CF₂ 断层裂隙进行注浆封堵，提高断层隔水性能，增强上覆基岩围岩稳定性。各定向水平孔注浆段断层及注浆前后透水率如表 8 所示。注浆前断层注浆段地层透水率为 0.2~1.11 Lu，注浆后透水率为 0.02~0.1 Lu，注浆后透水性显著降低，降幅范围为 0.85~0.97。依据表 5，注浆前断层注浆段地层为弱透水~微透水，注浆后为极微透水，可视为良好的隔水层。由此可认为对断层的注浆改造工程效果明显，断层导水性显著降低，可有效阻隔断层与“四含”的水力联系。

Table 8. Detailed water permeability of the fault grouting section of the 851 working face before and after grouting
表 8. 851 工作面断层注浆段注浆前后透水率详表

孔号	分段孔深(m)	治理断层	透水率(Lu)		透水率降幅
			注浆前	注浆后	
D1-1	725	GF ₂₅₁ , CF ₂	1.11	0.05	0.95
	875	851F ₄ , GF ₂₅₆ , GF ₂₅₆₋₁	0.20	0.03	0.85
	966	/	0.15	0.02	0.87
D1-2	768	GF ₂₅₁ , CF ₂ , 851F ₄	0.78	0.04	0.95
	868	GF ₂₅₆ , GF ₂₅₆₋₁	0.34	0.04	0.88
D1-3	666	GF ₂₅₁ , CF ₂	1.08	0.10	0.91
	766	851F ₃ , F ₄	0.39	0.04	0.90
	866	GF ₂₅₆	0.38	0.03	0.92
D1-4	686	CF ₂ , GF ₂₅₁	0.64	0.08	0.88
	846	851F ₃ , F ₄ , GF ₂₅₆	0.48	0.03	0.94
D1-5	719	CF ₂ , GF ₂₅₁	0.35	0.05	0.86
	917	851F ₃ , GF ₂₅₆	0.69	0.02	0.97

4.5. 井下探放水工程布置及效果分析

851 工作面顶板瞬变电磁探查共计发现 4 处低阻异常区(图 7)，为加快顶板砂岩水、“四含”水，降低含水层顶板水压和涌水量，根据 851 工作面顶板含水层及低阻异常区分布，风巷、机巷共设计了 10 个钻场 132 个探放水孔，探放水孔布置见图 7，设计及施工钻孔具体为：851 工作面风巷设计 1、2、3、4、9、10 共 6 个钻场，布置钻孔 57 个；851 工作面机巷设计钻场 4 个，布置钻孔 75 个。

探放水期间单孔最大涌水量超过 10 m³/h 的孔有补 2-9#(14.5 m³/h)、验 3-1#(12 m³/h)、6-1#(13 m³/h)、6-8#(20.1 m³/h)、6-10#(15 m³/h)、7-1#(12.8 m³/h)、7-9#(20 m³/h)、7-10#(10 m³/h)、8-4#(15 m³/h)、8-8#(20 m³/h)、8-9#(14 m³/h)、8-16#(10 m³/h)、9-6#(12 m³/h)，其中仅 9-6# “四含”出水点距最近的定向斜孔 Z5 孔距离(约为 43 m)略小于最小窜浆距离 45 m，表明以最小窜浆距离划分的注浆可靠区(图 3~6)是可靠的。仅 3 个钻孔(6-8#、7-9#、8-8#)最大涌水量达到 20 m³/h。以往涌水量大的钻孔(1-7#、1-8#、1-12#、2-7#、3-8#和 3-2#)，在最新透孔检验出水量均小于 1 m³/h，综合反映了地面钻孔注浆改造效果良好。

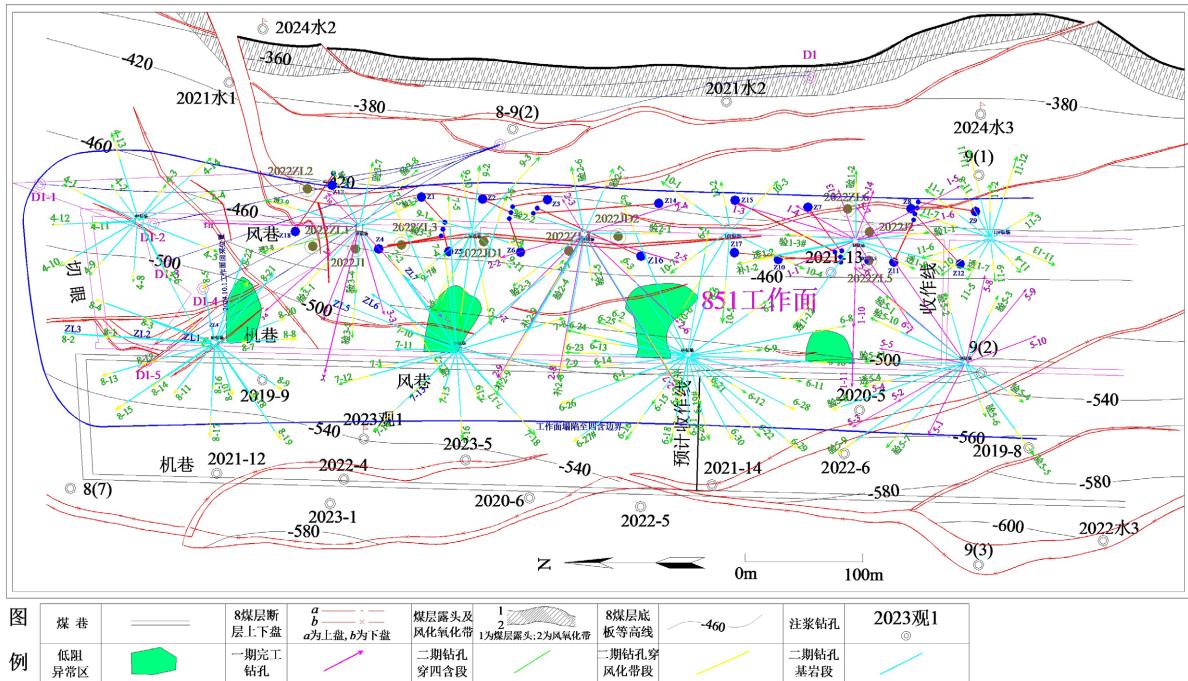


Figure 7. Schematic diagram of geophysical exploration low-resistance anomaly area and water exploration and drainage hole layout

图 7. 物探低阻异常区与探放水孔布置示意图

5. 讨论和结论

5.1. 讨论

涡北煤矿 851 工作面“四含”注浆改造工程的成功实施，不仅实现了水害精准治理，其技术路径与评价体系还为同类松散含水砂层开采提供了重要实践参考，结合工程成果与行业研究现状，可从技术创新、效果成因及未来优化方向三方面展开讨论。

从技术方案来看，本工程创新性采用“定向斜孔 + 定向水平孔”的组合注浆模式，针对“四含”松散层、风化带、断层三类不同水文地质单元实施差异化治理，进一步拓展了定向钻技术的应用场景，通过两期施工累计完成 23 个钻孔、14578.69 m 钻探进尺，注浆终压控制在 4.0~6.20 MPa，既保证了浆液扩散范围(断层带达 160 m、“四含”段 55~126 m)，又避免了高压对围岩的二次破坏，验证了该组合模式在复杂地质条件下的可行性。

从治理效果成因分析，注浆改造的显著成效源于“浆液特性 - 介质条件 - 施工参数”的精准匹配。工程选用的水泥基浆液符合幂律流体特征，剪切稀化效应使其在高压下顺利渗透孔隙、劈裂裂隙，触变性则减少了浆液流失，与“四含”钙质粘土、细砂、砾石组成的孔隙-裂隙共生介质形成良好适配；同时，基于压水试验数据换算单位涌水量的评价方法，结合透水性分级标准，量化了注浆前后水文地质性质的变化，弥补了现有研究中效果评价定性化的不足；井下探放水结果进一步佐证了治理有效性，说明多维度验证体系能全面反映治理效果。

本工程也存在一定优化空间：受“四含”地层非均质性影响，浆液扩散呈现明显不均一性，虽通过加密钻孔减少了治理盲区，但局部区域仍可能存在未完全封堵的微小裂隙；此外，注浆参数(如浆液水灰比、终压)的设计主要基于区域地质资料，针对不同厚度“四含”(2.7~14.55 m)的适应性仍需进一步量化，

未来可通过数值模拟优化钻孔布置密度，根据孔隙裂隙尺度调整浆液颗粒级配与流变参数，提升治理的均匀性与经济性。

从应用价值来看，本工程凸显了注浆改造在“解放浅部呆滞煤量”中的核心作用，避免了突水溃砂事故造成的人员伤亡与财产损失，其构建的“浆液扩散 + 水文地质性质 + 井下探放水”多维度评价体系，补充了现有研究在效果验证维度上的不足，为淮北矿区及类似薄基岩、近松散含水层开采区域提供了可复制的技术范式，助力实现煤炭资源安全高效开采与水害防治的协同发展。

5.2. 结论

本文以涡北煤矿“四含”下工作面安全回采为目标，通过设计施工定向斜孔与定向水平孔组合注浆方案，结合多维度效果验证，实现了“四含”水害的精准治理，主要结论如下：

(1) 注浆改造工程成效显著，全面改善了目标地质单元的水文地质性质。“四含”透水率由注浆前 $2.55\sim11.76 \text{ Lu}$ 降至 $0.39\sim2.57 \text{ Lu}$ ，透水性从弱 - 中等透水转为微 - 弱透水，富水性达弱富水等级；风化带透水率从 $1.3\sim5.38 \text{ Lu}$ 降至 $0.23\sim0.39 \text{ Lu}$ ，成为微透水的相对隔水层；断层带透水率由 $0.2\sim1.11 \text{ Lu}$ 降至 $0.02\sim0.1 \text{ Lu}$ ，转变为极微透水的良好隔水层，有效阻断了地下水渗流通道。

(2) 创新采用“定向斜孔驱水固沙 + 定向水平孔裂隙封堵”的差异化注浆模式，适配“四含”松散层、风化带、断层的复合地质条件。两期工程累计完成23个钻孔、 14578.69 m 钻探进尺，注水泥 41872.17 t ，浆液在断层带最大扩散距离达 160 m ，“四含”段达 $55\sim126 \text{ m}$ ，实现了对不同地质单元的全覆盖治理。

(3) 构建了“浆液扩散距离 + 水文地质性质 + 井下探放水”的多维度效果评价体系，通过压水试验量化分析、钻孔串浆观测及探放水验证，全面证实了注浆改造的可靠性——原涌水量较大的钻孔经改造后出水量均小于 $1 \text{ m}^3/\text{h}$ ，注浆可靠区划分与实际治理效果高度契合。

(4) 工作面已安全回采，回采期间未出现顶板滴淋水或其他异常出水情况，成功解放了851工作面90万t煤炭储量，避免了突水溃砂风险，兼具显著经济与社会效益。工程技术方案与评价体系为我国浅部薄基岩区、近松散含水砂层工作面的注浆改造提供了可复制的技术参考与工程示范，为煤炭资源安全高效开采提供了地质保障。

基金项目

宿州学院横向项目(2025fgzxm02)、宿州学院博士科研启动基金项目(2022BSK011)、宿州学院博士后科研启动基金项目(2024BSH002)、安徽普通高校重点实验室(宿州学院)开放课题(KMMWRU202403)、宿州学院省级大学生创新创业训练计划项目(S202510379066)资助。

参考文献

- [1] 韩书远, 宣以琼.“四含”注浆改造与煤(岩)柱合理留设技术[J]. 兰州工业学院学报, 2025, 32(3): 51-56.
- [2] 章隽. 五沟煤矿1022工作面缩小防护煤柱机理研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽建筑大学, 2024.
- [3] 邢茂林, 郑士田, 石志远, 等. 注浆改造厚含水砂层提高开采上限技术及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(5): 113-122.
- [4] 孟佳乐. 邹庄煤矿7703工作面采前防治水安全性评价[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽建筑大学, 2024.
- [5] 张奇. 许疃煤矿六采区101煤提高开采上限可行性研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽建筑大学, 2025.
- [6] 姜永琪. 张集煤矿1410(3)工作面覆岩破坏特征及水害防治安全性评价[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽建筑大学, 2024.
- [7] 董青红, 郑慧慧, 魏民涛, 等. 新近系和薄基岩下突水溃砂防治的风险机制: 古剥蚀面起伏与风化程度的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53(5): 889-900.

-
- [8] 李睿健. 五沟煤矿 1010-1 工作面“四含”及风化带注浆改造后采动覆岩破坏研究[D]: [硕士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
 - [9] 李超, 王长双, 付艺茗. 注浆改造第四系下组松散含水层技术应用研究[J]. 中国煤炭工业, 2025(11): 64-65.
 - [10] 闫鑫, 丁湘, 蒲治国, 等. 煤矿顶板巨厚松散层水害超前区域治理效果检验[J]. 煤炭工程, 2025, 57(8): 64-71.
 - [11] 朱先祥, 张琦, 马俊鹏, 等. 浆-水置换效应下含水砂层渗透注浆扩散机制[J]. 岩土力学, 2025, 46(6): 1957-1966.
 - [12] 仲锐. 松散层多孔介质注浆浆液扩散和渗流规律研究[D]: [硕士学位论文]. 廊坊: 华北科技学院, 2025.
 - [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 水利水电工程地质勘察规范: GB 50487-2008 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
 - [14] 杜运夯, 孙小林, 陈小国. 《煤矿防治水细则》专家解读[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社有限责任公司, 2018.