

顾北煤矿13521里段工作面地面区域探查治理效果分析

佟金成, 刘启蒙

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2026年4月15日; 录用日期: 2026年5月18日; 发布日期: 2026年5月28日

摘要

针对顾北煤矿13521里段工作面底板C₃I组灰岩含水层富水性强、构造裂隙发育及突水风险较高的问题, 采用地面区域探查与钻孔高压注浆相结合的综合治理技术, 对底板含水层进行超前改造。基于钻探施工资料、注浆参数及数值模拟结果, 结合井下钻探与物探检测, 对注浆扩散规律及治理效果进行了系统分析。结果表明: 治理后工作面范围内低阻异常区基本消失, 钻探验证出水量显著降低, 突水系数小于0.1 MPa/m安全限值, 形成有效隔水屏障; 数值模拟结果表明, 注浆压力、水灰比及浆液粘度对浆液扩散范围具有显著影响。

关键词

地面区域探查, 注浆治理, 灰岩水害, 治理效果分析

Analysis of the Ground Surface Area Exploration and Control Effects of the 13521 Inner Section Working Face in Gu Bei Coal Mine

Jincheng Tong, Qimeng Liu

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: April 15, 2026; accepted: May 18, 2026; published: May 28, 2026

Abstract

In response to the problems of strong water-bearing capacity, well-developed structural fractures and high risk of water inrush in the C₃I group of limestone aquifer at the bottom of the 13521 inner section working face in the Gu Bei Coal Mine, a comprehensive management technology combining ground

regional exploration and high-pressure grouting through boreholes was adopted to carry out advanced transformation of the aquifer at the bottom. Based on the drilling construction data, grouting parameters and numerical simulation results, combined with underground drilling and geophysical exploration detection, a systematic analysis was conducted on the grouting diffusion law and the management effect. The results show that after the management, the low-resistance abnormal area within the working face range has basically disappeared, the water output verified by drilling has significantly decreased, the water inrush coefficient is less than the safety limit of 0.1 MPa/m, and an effective water barrier has been formed. The numerical simulation results show that the grouting pressure, water-cement ratio and slurry viscosity have a significant impact on the diffusion range of the slurry.

Keywords

Ground Area Exploration, Grouting Treatment, Limestone Water Hazard, Analysis of Treatment Effect

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

煤层底板含水层突水是制约深部矿井安全高效开采的重要水文地质问题之一。随着开采深度增加, 底板岩体受构造及采动影响, 裂隙发育程度增强, 尤其在华北型煤田中, 奥陶系灰岩及太原组灰岩含水层普遍具有承压高、富水性不均及岩溶发育等特征, 使底板突水风险进一步加大[1]-[3]。因此, 在回采前对底板含水层进行有效改造, 削弱其富水性及导水能力, 是矿井防治水工作的关键[4]-[6]。

目前, 针对煤层底板灰岩水害的防治, 常采用疏水降压、注浆加固及区域综合治理等技术手段[7][8]。其中, 区域注浆治理通过向岩体裂隙及溶隙中注入浆液, 实现对导水通道的封堵与含水层结构的改造, 在工程实践中得到广泛应用[9]-[11]。已有研究表明, 浆液扩散范围受注浆压力、浆液性能及地层条件等多因素影响, 其中注浆压力、浆液粘度及水灰比对扩散效果具有重要控制作用[12][13]。然而, 针对复杂地质条件下多参数条件对浆液扩散规律的影响, 仍需结合工程实例开展进一步分析。

顾北煤矿 13521 里段工作面底板发育 C₃I 组灰岩含水层, 受断层构造影响局部隔水层变薄, 具备一定突水条件。为保障工作面安全回采, 矿井实施了地面区域探查与钻孔注浆相结合的综合治理工程, 通过主孔-分支孔布置方式, 对底板含水层进行超前探查与加固处理。

本文在工程实践基础上, 结合钻探施工资料及注浆参数, 开展浆液扩散数值模拟分析, 并通过井下钻探与物探手段对治理效果进行验证, 重点分析注浆压力、浆液粘度及水灰比对浆液扩散范围的影响规律, 评价区域探查治理技术的应用效果。

2. 工作面地质条件与水文地质条件

2.1. 工作面地质条件

13521 里段工作面整体为一东低西高的单斜构造, 地层走向近南北。根据地面三维地震、巷道揭露、井下槽波地震和坑透勘探成果表明: 13521 里段工作面内共发育断层 9 条, 分别为 Fs960、FS960-1、FD13521-1、Fh13521-5、Fj13521-2、Fj13521-3、Fj13521-4、Fj13521-5、Fq13521-1, 其中对工作面开采影响较大的断层 1 条(Fs960 断层); 面外发育 F109 断层, 对工作面开采有一定影响。现阶段根据地面钻孔、井下钻孔探查以及多条巷道实揭未发现 F109 断层具有含(导) 水现象。面内及面外断层发育情况见表 1, 断层分布位置见图 1。

Table 1. Statistical table of fault conditions in the 13521 section working face

表 1. 13521 里段工作面断层情况统计表

构造名称	性质	走向/°	倾向/°	倾角/°	落差/m	备注
Fs960	正	109~117	19~27	25~36	0.5~9.0	沿回采方向 贯穿工作面中部
FS960-1	正	122	32	75	3.0	工作面深部 靠近收作线
FD13521-1	正	290	200	54	0.9	回风顺槽 靠近收作线处
Fh13521-5	正	82	172	45	0.5	收作线附近
Fj13521-2	正	194	284	25~30	1.6~1.8	收作线处
Fj13521-3	正	185	275	43~50	1.1	工作面深部 靠近收作线
Fj13521-4	正	160	250	60	0.6~0.7	工作面中部 靠近胶带机顺槽
Fj13521-5	正	160	250	55	1.7	工作面浅部 靠近胶带机顺槽
Fq13521-1	正	92	2	44~47	0.5	收作线处
F109	正	112~146	202~236	40~65	100~140	面外(工作面南侧), 与回风顺槽最小平距 40 m

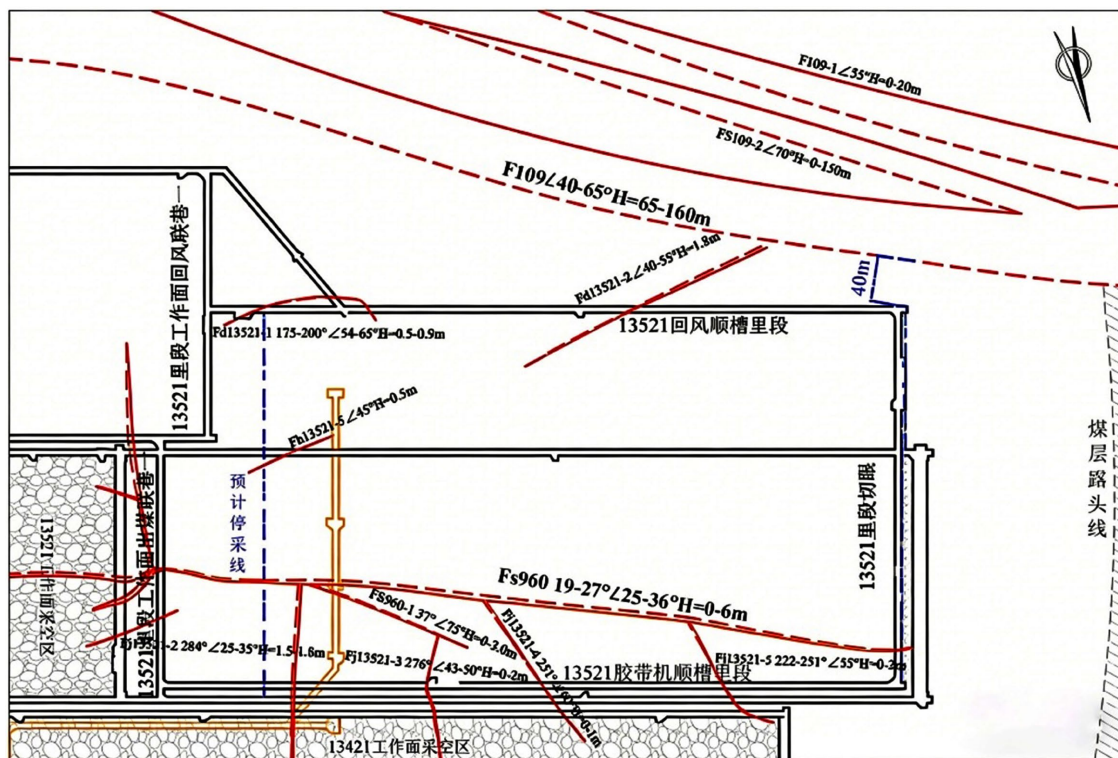


Figure 1. Structural plan of the working face of section 13521

图 1. 13521 里段工作面构造平面图

2.2. 工作面水文地质条件

1) 工作面开采直接充水水源为煤层顶板砂岩裂隙水与底板 C₃I 组灰岩水。

1 煤层顶板砂岩裂隙水富水性弱, 为静储量型, 易疏干, 井下出水形式主要表现为沿顶板裂隙出现滴(淋)水现象。本采区已收作的 5 个工作面采掘和本面掘进揭露断层期间偶有顶板滴水现象, 为零星锚杆锚索眼附近滴(淋)水, 断层不含水、不导水, 但受断层影响, 煤(岩)层裂隙发育, 工作面在顶板裂隙发育段

回采时, 可能出现顶板滴(淋)水现象。因此, 顶板砂岩裂隙水对安全生产不会构成影响。

据地面钻孔揭露及底抽巷实见资料, 工作面及周边范围 1 煤层底板与 C₃I 组灰岩正常间距 16.81 m (水 19)~23.20 m(五 5), 平均 20.64 m; 受 Fs960 断层影响, 局部隔水层变薄, 厚度 8.60~13.80 m, 为 13521 里段工作面直接充水含水层。C₃I 组灰岩含水层富水性弱, 回采期间主要通过底板构造裂隙与采动裂隙进入工作面, 对工作面回采产生一定的影响。

2) C₃II 组、C₃III 组太原组灰岩、奥陶系灰岩是 13521 里段工作面的间接充水含水层, 在断层构造裂隙发育地段, 深部高承压灰岩水可能通过导水通道与 C₃I 组灰岩地层存在一定的水力联系。在工作面采动扰动影响下, 形成一定深度的底板破坏带, 可能会出现煤层底板涌水现象。

3. 地面区域探查治理工程设计与施工

13521 里段工作面底板灰岩水害防治坚持奥灰水与太灰水防治并重、以探查垂向导水构造为重点、区

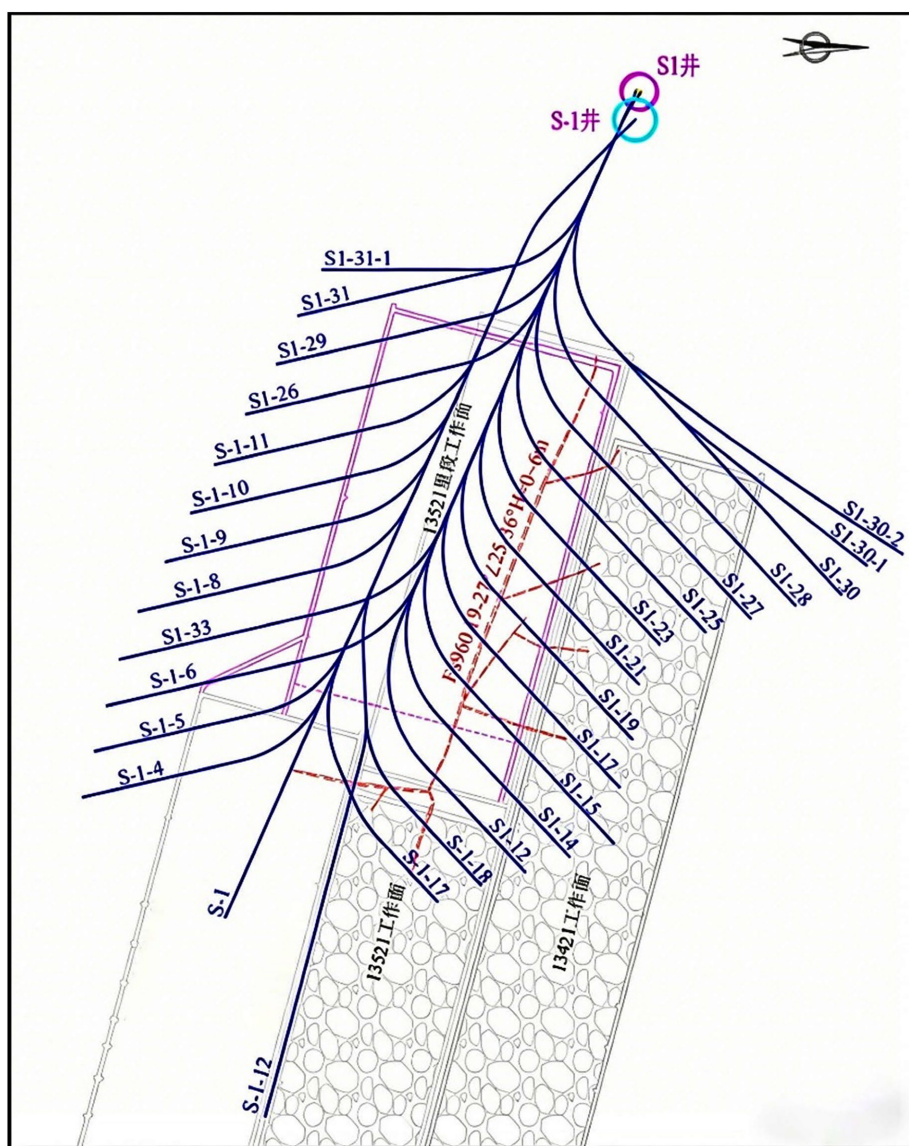


Figure 2. Layout plan of ground area exploration and treatment

图 2. 地面区域探查治理平面布置图

域超前探查治理与 C₃I 组含水层疏水降压相结合的技术路线。为探查 1 煤底板导水构造, 注浆封堵裂隙, 阻隔下部奥灰水、C₃III 组太灰水对上部太灰含水层的补给, 消除深部灰岩水害威胁, 开展了 13521 里段工作面底板灰岩水害地面区域探查治理工程, 治理工程各钻孔分布见图 2。

3.1. 地面区域探查治理工程设计

13521 里段工作面底板灰岩水害地面区域探查治理工程采用主孔 - 分支孔组合方式, 孔间距不大于 60 m, 设计主孔 2 个, 分支孔 30 个, 总进尺 16,633 m, 覆盖 13521 里段工作面。注浆遵循先稀后稠原则, 孔口止浆, 水平分支孔分段下行或者前进式注浆方式; 连续注浆与间歇注浆相结合, 间歇注浆时间根据实际施工情况确定, 间歇注浆时间不小于 12 h。

3.2. 地面区域探查治理工程施工情况

共完成钻探工程量 16,633 m, 工作面底板区域探查治理施工过程中, 工作面附近 30 m 范围内未发现掉钻、明显漏失等情况。累计注入水泥 134898.4 t, 面沙 2239.3 t, 工业盐 102.3 t, 三乙醇胺 12.0 t, 锯末 72.6 t。

4. 岩层注浆模拟

4.1. 数值计算模型及参数

本次探查治理目标层位为 C₃^o 灰, 地质资料显示: 工作面 1 煤层底板标高 -523.2~-507.8 m, 平均 -515.3 m, 煤层厚度 7.0~9.3 m, 平均 7.8 m。1 煤顶底板以砂岩、砂质泥岩为主。正常地段 1 煤底板至 C₃¹ 灰和 C₃^o 灰顶部平均间距分别大约为 20.64 m 和 75.6 m, C₃¹ 灰厚度约 2.2 m, C₃^o 灰厚度约 2.2 m, C₃I 组灰岩水压约为 4.1 MPa。C₃^o 灰横向上存在岩溶发育带, 富水性不均一。据此设计平面上的数值计算模型, 模型尺寸 100 m × 100 m, 注浆孔直径 152 mm。

边界条件及控制条件: 模型内部钻孔边界为浆液入口边界, 模型四周为浆液出口边界。本次研究的浆液流体的水灰比均大于 1.0, 属于不可压缩的牛顿流体, 可以利用牛顿流体本构方程。将地下水与浆液流体共存的空间视为两相流场, 同时将地下水看作不可压缩性质, 流体饱和度设定为 2.0。本次地面区域治理期间实际注浆压力在 7.0 MPa 以上, 粘度系数小于 0.004 Pa·s, 水灰比大于 1.9。

注浆孔设置在 C₃^o 灰岩含水层内, 分别模拟不同注浆参数(注浆压力、粘度系数及水灰比)下浆液在岩层内的扩散情况, 本次模拟注浆时间为 4 h。具体注浆参数如表 2 所示。

Table 2. Grouting simulation under different grouting conditions

表 2. 不同注工况条件下的注浆模拟

注浆参数	工况一	工况二	工况三	工况四	备注
注浆压力 P/MPa	6.0	7.0	7.0	7.0	
粘度系数 μ /Pa·s	0.008	0.008	0.004	0.004	模拟周期分四阶段
水灰比 R	1.9	1.9	1.9	1.2	

4.2. 模拟结果

依据不同的工况条件, 对相同模拟周期下水泥浆液在岩层中扩散随时间动态变化规律进行研究, 具体模拟研究结果为:

1) 工况一: 浆液压力为 6.0 MPa, 粘度系数 0.008 Pa·s, 水灰比为 1.9 时, 灰岩含水层内浆液扩散情况如图 3 所示。

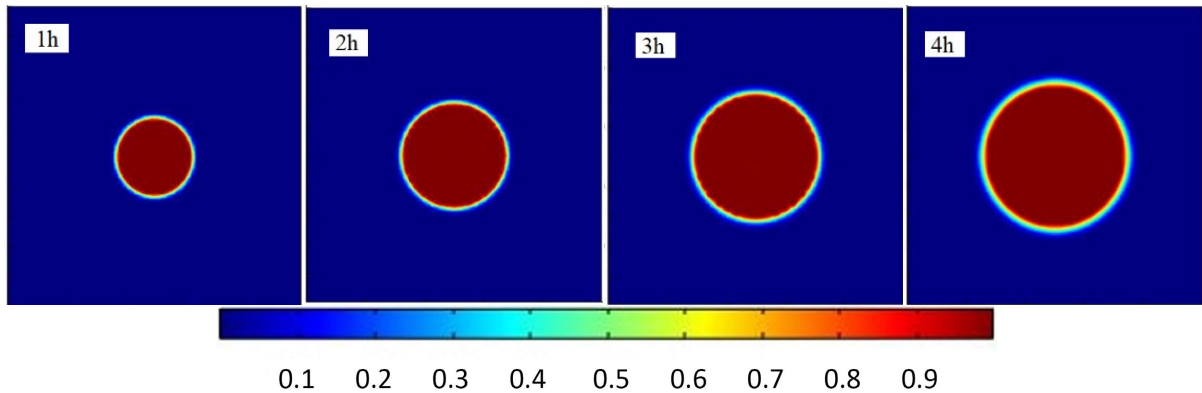


Figure 3. Slurry diffusion pattern under operating condition 1

图 3. 工况一条件下浆液扩散规律图

如图 3 所示, 完全密实区范围外有一层半密实区浆液扩散圈层, 再往外延伸至无压区。当浆液扩散至半密实区边缘时, 注浆压力显著降低, 注浆效果较差, 在密实区范围时, 注浆压力较大, 岩层中的裂隙被浆液完全充填, 注浆效果较好。当注浆持续时间为 1 h 时, 水泥浆液有效扩散半径为 11.5 m, 但随着注浆时间的增加, 混合浆液扩散范围逐渐增大, 当注浆时长达到 4 h 时, 注浆有效扩散半径约为 27.5 m。

2) 工况二: 浆液压力为 7.0 MPa, 粘度系数 0.008 Pa·s, 水灰比为 1.9 时, 灰岩含水层内浆液扩散情况如图 4 所示。

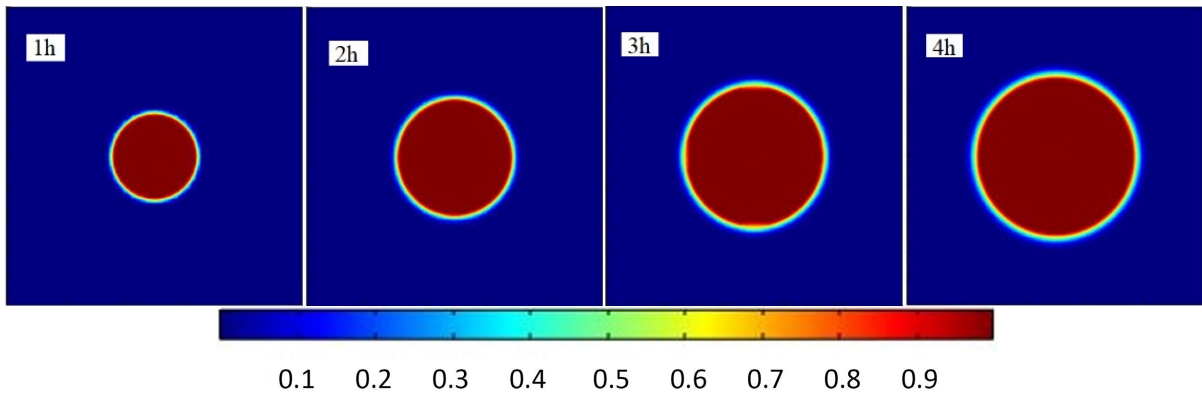


Figure 4. Slurry diffusion pattern under operating condition 2

图 4. 工况二条件下浆液扩散规律图

增大注浆压力至 7.0 MPa, 其它参数不变的情况下, 对比工况一条件下的注浆扩散情况。当注浆持续时间为 1 h 时, 水泥浆液有效扩散半径增大至 13 m, 随着注浆时间的增加, 混合浆液扩散范围逐渐增大, 当注浆时长达到 4 h 时, 注浆有效扩散半径约为 30 m。表明浆液有效扩散半径与注浆压力成正相关性, 即随着注浆压力的增大, 浆液扩散半径也随之增大。

3) 工况三: 浆液压力为 7.0 MPa, 粘度系数 0.004 Pa·s, 水灰比为 1.9 时, 灰岩含水层内浆液扩散情况如图 5 所示。

在工况二条件的基础上, 不改变注浆压力和浆液水灰比的情况下, 降低浆液的动力粘度系数。注浆模拟效果可与工况一和工况二的注浆扩散情况进行对比分析。当注浆持续时间为 1 h 时, 水泥浆液有效扩散半径变化不明显, 约为 18 m, 但随着注浆时间的增加, 混合浆液扩散范围逐渐增大, 当注浆时长达到 4 h 时, 注浆有效扩散半径约为 40 m。表明浆液有效扩散半径与浆液的粘度系数也成负相关性, 即随

着粘度系数的降低, 浆液扩散半径也随之增大。

4) 工况四: 浆液压力为 7.0 MPa, 粘度系数 0.004 Pa·s, 水灰比为 1.2 时, 灰岩含水层内浆液扩散情况如图 6 所示。

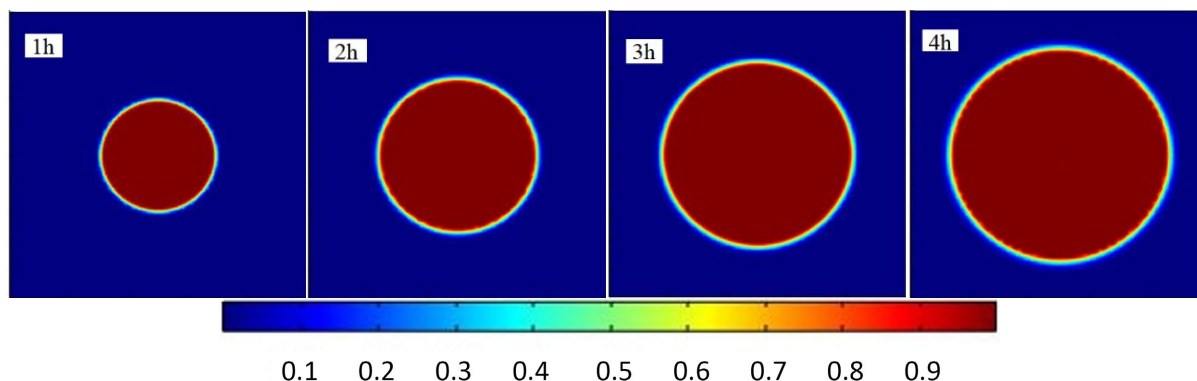


Figure 5. Slurry diffusion pattern under three working conditions

图 5. 工况三条件下浆液扩散规律图

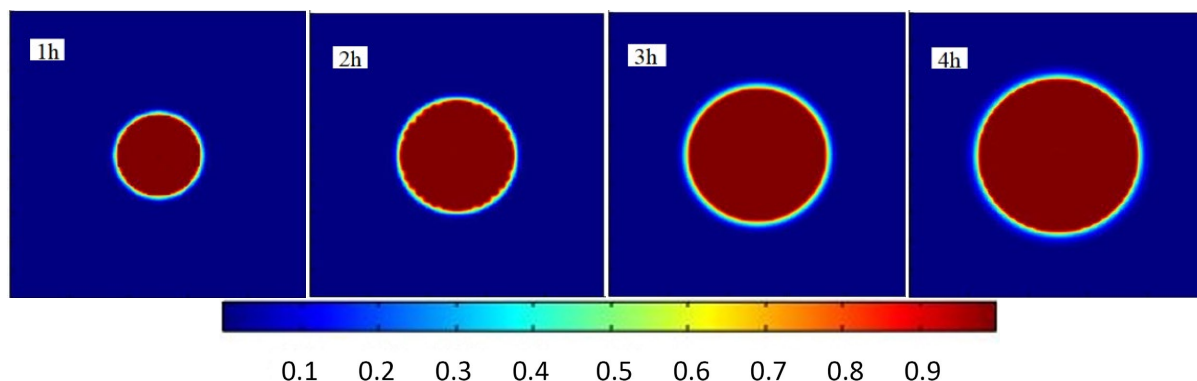


Figure 6. Slurry diffusion pattern under operating condition 4

图 6. 工况四条件下浆液扩散规律图

工况四是在工况三条件研究的基础上, 降低浆液的水灰比, 而浆液的粘度系数和注浆压力参数与工况三条件保持一致。当注浆持续时间为 1 h 时, 水泥浆液有效扩散半径变化不明显, 约为 12 m, 但随着注浆时间的增加, 混合浆液扩散范围逐渐增大, 当注浆时长达到 4 h 时, 注浆有效扩散半径约为 30 m。表明浆液有效扩散半径与浆液的水灰比同样成正相关性, 即水灰比增大时, 浆液扩散半径也随之增大。

5. 治理效果验证与综合评价

5.1. 钻探验证结果

为验证南一 1 煤采区 13521 里段工作面范围地面区域探查治理效果, 在 13421 胶顺底抽巷迎头钻场及放水联巷二钻场施工 15 个定向验证长钻孔、24 个常规孔, 施工过程中未发现异常情况, 钻探工程量 11347.7 m, 终孔层位 C_3 灰, 并对验证钻孔水量、水质、水温和水压特征进行分析。钻孔布孔间距不大于 100 m, 工作面验证孔数量大于注浆孔总数的 10%, 钻孔分布如图 7 所示。

13521 里段工作面范围内施工 15 个定向验证长钻孔, 施工期间仅 Y5-4、Y5-6、Y5-7 等 3 个钻孔出水(表 3), 其余 12 个钻孔均无水, 验证钻孔单孔最大水量 0.36 m³/h。

前期施工的 24 个常规钻孔中有 17 个钻孔出水(表 4), 钻孔水量 0.1~2.0 m³/h。

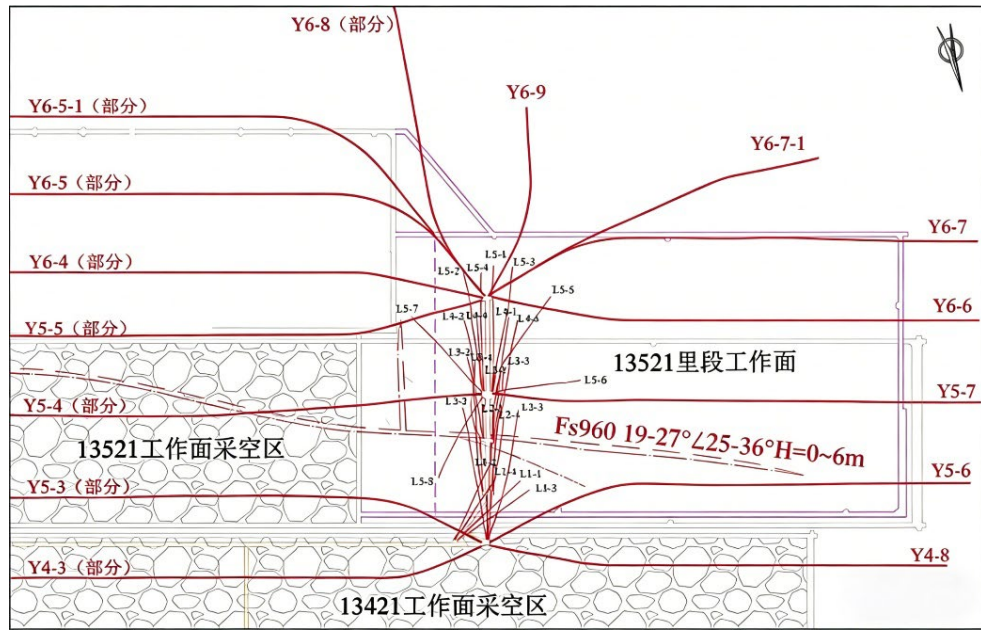


Figure 7. Verification borehole distribution map
图 7. 验证钻孔分布图

Table 3. Detailed table of downhole drilling verification of the exploration and treatment effects in the 13521 section of the working face

表 3. 13521 里段工作面区域探查治理效果井下钻孔验证情况详表

孔号	终孔孔深/m	出水孔深/m	出水层位	出水量/m ³ ·h ⁻¹	水压/MPa	水温/°C
Y5-4	576	576		0.1	0	-
Y5-6	582	582	C ₃ ⁵	0.36	0	35
Y5-7	576	576		0.29	0	36

Table 4. Water output from boreholes in the bottom drainage and effluent sections of the 13421 conveyor belt roadway

表 4. 13421 胶带机顺槽底抽巷、放水巷钻孔出水情况

序号	施工地点	孔号	终孔情况			目前/封闭前出水情况		
			水量/m ³ ·h ⁻¹	水压/MPa	水温/°C	水量/m ³ ·h ⁻¹	水压/MPa	水温/°C
1	13421 胶带机顺槽底抽巷放水巷二	L1-4	2.0	/	/	/	/	/
2		L2-1	0.6	/	/	/	/	/
3		L2-2	0.1	/	/	/	/	/
4		L2-4	0.2	/	/	/	/	/
5		L3-2	0.4	/	/	/	/	/
6		L3-4	0.4	/	/	/	/	/
7		L4-2	0.1	/	/	/	/	/
8		L4-3	0.2	/	/	/	/	/
9		L4-4	0.2	/	/	/	/	/
10		L5-2	0.1	/	35	/	/	/
11		L5-3	0.3	/	35	/	/	/

续表

12		L5-4	0.2	/	35	/	/	/
13		L5-5	0.1	/	/	/	/	/
14	13421 胶带机顺槽	L5-8	1	/	35	/	/	/
15	底抽巷放水巷二	D5-4	0.6	/	35	/	/	/
16		D5-5	0.1	/	35	/	/	/
17		D6-5	1.08	/	32	/	/	/

5.2. 物探验证结果

采用三维电法和音频电透视技术对治理区进行检测。治理前存在 2 个明显低阻异常区, 治理后异常区消失, 表明区域封堵效果显著。

5.3. 地面区域探查治理效果分析

通过物探探查、钻探探查加固治理等防治水措施, 排除了工作面内有导水陷落柱发育的可能, 对其它存在底板裂隙发育带及构造发育区等异常区进行了注浆治理, 切断了底板奥灰水在工作面范围内回采阶段突(涌)水的通道。综合注浆后, 音频电透视法探测显示, 通过探查验证及注浆加固, 13521 里段工作面底板岩层原物探异常区消失, 综合治理效果良好。

6. 结论

- 1) 13521 里段工作面底板灰岩水害区域探查治理期间沿太原组 C_3^0 灰施工 3 个主孔及 30 个分支孔, 实现了工作面区域探查治理全覆盖。
- 2) 综合井下物探、钻探验证表明, 地面区域探查治理范围内未发现明显富水异常区, 工作面底板深部奥灰水与 C_3I 组灰岩间无垂向导水通道。
- 3) 综合井下钻探、物探验证及注浆模拟评价, 实施地面区域探查治理后, 阻隔了深部奥灰、 C_3III 组太灰与浅部 C_3I 组、 C_3II 组太灰之间的垂向水力联系, 工作面底板奥灰含水层突水系数为 0.0821 MPa/m, 小于安全开采限压值 0.1 MPa/m。

参考文献

- [1] 徐斌, 仲岑, 董书宁, 等. 中厚及以上煤层综采条件下底板破坏带深度计算模型对比[J]. 煤田地质与勘探, 2026, 54(3): 152-163.
- [2] 李瑾, 周利岗. 动态分类体系在矿井水文地质类型划分中的应用——以寿阳潞阳麦捷煤业 15 号煤层为例[J]. 华北自然资源, 2025(5): 24-29.
- [3] 方恩才, 余国锋, 赵一鸣. 张集煤矿厚煤层工作面底板灰岩突水监测预报研究[J]. 煤炭科技, 2022, 43(4): 116-121.
- [4] 马娇, 牛宁, 祁宇璇. 桑北煤矿水文地质特征及防治水“三区”划分[J]. 石化技术, 2025, 32(11): 347-349.
- [5] 杨志斌. 煤层底板突水灾害动水快速截流机理及预注浆效果定量评价[D]: [博士学位论文]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2021.
- [6] 刘志勇. 深部煤层底板高承压含水层水害全周期治理技术研究[J]. 煤炭与化工, 2026, 49(3): 55-60+65.
- [7] 吴东. 工作面突水原因分析及其综合防治措施应用[J]. 煤矿现代化, 2026, 35(1): 174-178.
- [8] 刘倩, 张凯, 许光泉, 等. 奥陶系灰岩水数值模拟及防治应用[J]. 煤炭技术, 2026, 45(1): 113-120.
- [9] 谢治刚, 孙贵, 高宇航, 等. 地面多分支水平孔注浆量预计方法改进及应用[J]. 采矿技术, 2025, 25(5): 178-182.

- [10] 李智, 郑士田, 石志远, 等. 极软中厚煤层越界开采区老空水害防治技术[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(6): 167-174.
- [11] 贾华峰, 程洲. 地面水平分支井注浆加固技术施工方法及应对措施[J]. 西部探矿工程, 2021, 33(1): 62-65.
- [12] 康红普, 张玉军, 胡皓宇, 等. 煤矿可控性导水通道封堵与加固技术研究进展[J]. 绿色矿山, 2026, 4(1): 7-26.
- [13] 郑晨. 太原组上段灰岩含水层岩溶结构特征及其对浆液扩散的影响[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2015.