

巷道过断层超前治理技术与工程应用

佟金成¹, 李 兵¹, 薛悟强²

¹安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

²鄂尔多斯市华兴能源有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯

收稿日期: 2026年6月18日; 录用日期: 2026年7月18日; 发布日期: 2026年7月30日

摘 要

断层破碎带岩层强度低、自稳能力差且导水性良好, 不仅削弱了对深部奥陶系灰岩水的阻隔能力, 增大巷道突(涌)水风险, 还导致围岩稳定性降低、支护难度增加, 严重制约了煤矿安全高效生产。针对单一治理模式难以协同控制深部奥灰水害与浅部断层破碎带围岩失稳及局部涌水的难题, 以唐家会煤矿61203运输巷道穿越DF2断层为工程案例, 提出了“地面区域注浆封堵深部奥灰水源”与“井下精准注浆加固巷道断层破碎带”相结合的超前治理技术。该技术首先利用地面施工定向钻孔实施高压劈裂注浆, 封堵DF2断层的垂向导水通道及深部奥灰含水层补给路径, 实现水源的超前治理; 其次, 按照“先探后治”原则, 在井下对断层破碎带及影响区进行探查与帷幕注浆, 精准加固巷道顶底板破碎岩体并封堵残余导水裂隙, 从而构建“深部水源封堵-浅部破碎带加固”的双屏障治理体系。最终, 通过钻探检验、瞬变电磁法超前探测以及掘进期间涌水量与围岩稳定性的动态观测, 综合评价治理效果。结果表明, 该治理技术有效阻断了深部奥灰水的垂向导升, 显著提高了过断层区域围岩的强度和稳定性, 克服了单一治理模式的局限, 为深部导水断层的治理提供了可靠的技术路径, 对类似复杂地质条件下巷道安全高效掘进具有重要的工程借鉴与推广价值。

关键词

断层破碎带, 奥灰水害, 超前治理, 注浆加固, 巷道掘进

Advanced Treatment Technology and Engineering Application of Roadway Crossing Fault

Jincheng Tong¹, Bing Li¹, Wuqiang Xue²

¹School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

²Ordos Huaxing Energy Co., Ltd., Ordos Inner Mongolia

Received: June 18, 2026; accepted: July 18, 2026; published: July 30, 2026

文章引用: 佟金成, 李兵, 薛悟强. 巷道过断层超前治理技术与工程应用[J]. 矿山工程, 2026, 14(4): 1128-1137.
DOI: 10.12677/me.2026.144111

Abstract

The rock strata in the fault zone are characterized by low strength, poor self-stabilization ability, and good water conductivity. This not only weakens the barrier effect against deep Ordovician limestone water, increasing the risk of water inrush in the tunnel, but also leads to a decrease in the stability of the surrounding rock and an increase in the difficulty of support, seriously restricting the safe and efficient production of coal mines. In response to the challenge of simultaneously controlling deep Ordovician limestone water hazards and the instability of the shallow fault zone and local water gushing with a single treatment mode, taking the 61203 transport tunnel of Tangjiahe Coal Mine crossing the DF2 fault as an engineering case, an advanced treatment technology combining “ground regional grouting to block the deep Ordovician limestone water source” and “underground precise grouting to reinforce the fault zone in the tunnel” was proposed. This technology first uses ground directional drilling to implement high-pressure splitting grouting to block the vertical water-conducting channels of the DF2 fault and the water supply path of the deep Ordovician limestone aquifer, achieving the forward treatment of the water source. Secondly, following the principle of “exploration first, then treatment”, underground exploration and curtain grouting are carried out in the fault zone and the affected area to precisely reinforce the broken rock mass of the tunnel roof and floor and block the residual water-conducting fractures, thereby establishing a dual-barrier governance system of “blocking deep water sources and reinforcing shallow fault zones”. Finally, the treatment effect is comprehensively evaluated through drilling inspection, advanced detection by the transient electromagnetic method, and dynamic observation of water inflow and surrounding rock stability during tunneling. The results show that this treatment technology effectively blocks the vertical upward conduction of deep Ordovician limestone water, significantly improves the strength and stability of the surrounding rock in the fault-crossing area, overcomes the limitations of a single treatment mode, and provides a reliable technical path for the treatment of deep water-conducting faults. It has important engineering reference and promotion value for the safe and efficient tunneling under similar complex geological conditions.

Keywords

Fault Fracture Zone, Ordovician Limestone Water Disaster, Advance Governance, Grouting Reinforcement, Roadway Excavation

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

我国华北型煤田作为重要的煤炭产区[1],其石炭-二叠系煤炭开采普遍面临底板奥陶系灰岩水(简称“奥灰水”)引发的突水威胁[2]。随着煤炭开采逐渐向深部和复杂地质条件发展[3]-[5],导致赋煤环境发生协同变化,新型地质条件诱发新型灾害问题日益凸显[6]。其中,煤层底板水害已成为制约深部安全开采的关键问题[7]-[9]。矿井突水是煤矿安全生产的主要威胁之一[10][11],其底板突水事件多与断裂构造、岩溶陷落柱等密切相关[12]-[15]。断层作为主要导水通道,其附近围岩破碎、强度低、透水性强且稳定性差[16][17],不仅显著削弱了阻隔深部奥灰水的能力,增大了突水风险,还易诱发巷道过断层带时顶板破碎、冒顶等重大安全隐患,严重制约了掘进效率与安全[18][19]。

针对巷道过断层治理难题,国内学者开展了系列研究。张敦喜等[20]提出井下长钻孔“两堵一注”结

合新型注浆材料的技术；康永水等[21]建议采用井下长钻孔预注浆与注浆锚索联合支护的综合治理方案；董书宁、朱敬忠等[22][23]基于地面定向钻孔技术构建了奥灰水害超前区域防治模式；高耀全等[24]融合历史勘探、动态采掘及实时监测数据，构建了奥灰水害全时空防治体系。近年来，杨峰[25]应用千米定向钻探技术显著提高了巷道超前探放水精度；刘利清[26]采用定向长钻分支孔精准超前探查底板隔水层厚度及前方水文地质条件，为类似条件下的安全掘进提供了技术支撑。

尽管上述研究在巷道过断层及奥灰水害治理方面取得了一定进展，但单一治理模式仍存在明显局限。井下注浆受限于钻孔深度与注浆压力，难以有效封堵深部高压奥灰水源；而单纯的地面区域治理虽可从源头封堵水源，但对浆液扩散范围控制精度不足，易造成浆液流失，且难以精准加固巷道附近破碎围岩并有效控制浅部局部涌水风险。因此，如何协同治理深部高压奥灰水害与浅部断层破碎带围岩失稳及局部涌水，成为亟待突破的技术难题。

针对上述问题，本研究以唐家会煤矿 61203 运输顺槽安全穿越强导水性 DF2 断层为工程背景，提出了“地面区域注浆封堵深部奥灰水源”与“井下精准注浆加固巷道断层破碎带”相结合的超前治理技术。该技术通过地面定向钻孔高压劈裂注浆，精准封堵深部奥灰水垂向导水通道，从源头消除奥灰水威胁；并结合井下“先探后治”帷幕注浆精准加固破碎围岩与封堵残余裂隙。二者协同突破了单一治理局限，显著提升整体效能。本文系统阐述了该技术的方案设计、实施过程、效果验证及工程应用成效，旨在为类似复杂地质条件下巷道安全高效掘进提供可借鉴的实践经验。

2. 研究区概况

2.1. 地质概况

唐家会煤矿位于内蒙古准格尔煤田中部。研究区域主采煤层为石炭系太原组中上部的 6 煤层，区内缺失石炭系本溪组地层沉积。顶板主要由石炭纪薄层太原组砂岩和厚层二叠系砂岩构成，底板下伏奥陶系灰岩(奥灰)含水层，距 6 煤层底板距离为 47.70~64.90 m(平均 57.90 m)。区域构造总体为单斜构造，地层倾角平缓($0^{\circ}\sim 5^{\circ}$)。矿区中东部和中西部发育有 NE-SW 向展布的 DF1 和 DF2 两条主要断裂构造带，裂隙发育程度高。其中，DF2 断层及其次生断层对矿井安全生产构成主要威胁。

本研究对象为矿井一盘区西翼的 61203 运输顺槽所穿越的 DF2 断层。该断层为正断层，走向 NE，倾向 174° ，倾角 $60^{\circ}\sim 75^{\circ}$ ，落差 5~40 m(运输顺槽 13.90 m)，延伸长度约 3850 m。断层切割层位较深，自 4 煤层向下延伸至奥陶系灰岩(奥灰)含水层，构成潜在的垂向导水通道。矿井一盘区构造及工作面分布如图 1 所示。

2.2. 水文地质概况

61203 工作面回采期间的主要充水水源为顶板砂岩裂隙水、底板砂岩裂隙水(均为直接充水水源)以及底板奥陶系灰岩(奥灰)水(间接充水水源)。其中，奥灰水因其高水压，是潜在的、威胁最大的充水水源。各充水水源特征分述如下：

1) 顶板砂岩裂隙水：含水层主要由 4、6 煤层间的中、细砂岩构成。单位涌水量 $q = 0.0023\sim 0.091$ L/(s·m)，渗透系数 $K = 0.0014\sim 0.081$ m/d，富水性弱。采掘期间涌水量较小，对矿井生产影响有限。当前 6 煤开采的主要水害威胁来自底板。

2) 底板砂岩裂隙水：含水层岩性以细砂岩、粗砂岩为主。单位涌水量 $q = 0.0073\sim 0.009173$ L/(s·m)，渗透系数 $K = 0.0118\sim 0.05258$ m/d，富水性弱，补给条件差，易于疏干。

3) 底板奥灰水：含水层岩性为奥陶系灰岩，单位涌水量 $q = 0.00966\sim 0.6095$ L/(s·m)，渗透系数 $K = 0.0464\sim 3.133$ m/d，富水性弱~中等。在底板岩层完整条件下，奥灰水对采掘安全影响较小。然而，当采掘

活动揭露或接近 DF2 断层时，奥灰水可经由该断层垂向导水通道发生补给，导致涌水量增加(邻近工作面揭露单孔最大涌水量达 158 m³/h)和水压升高(1.10 MPa)，成为威胁 61203 运输巷道安全掘进和工作面回采的主要充水水源。

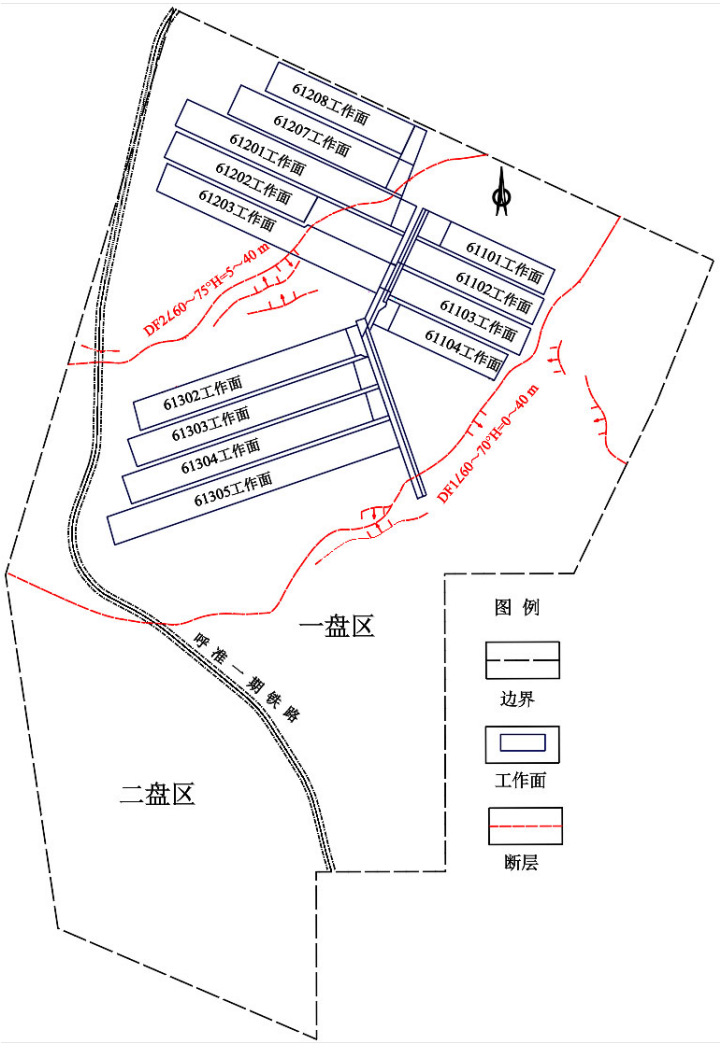


Figure 1. Structural features and working face distribution of the No. 1 panel of the mine
图 1. 矿井一盘区构造及工作面分布图

3. 巷道过断层综合治理方案

基于对 61203 工作面与水文地质条件的综合分析，DF2 断层作为沟通深部奥灰含水层的垂向导水通道，对 61203 运输巷道的安全掘进构成双重威胁：深部奥灰水沿断层带突(涌)水的重大风险和断层破碎带围岩强度低、自稳性差导致的冒顶失稳隐患。为防控上述风险，保障巷道安全高效穿过 DF2 断层带，本研究采用“地面区域注浆封堵奥灰水源 + 井下精准注浆加固断层破碎带”相结合的超前治理技术体系。

3.1. 地面区域治理

地面区域治理的核心目标是通过注浆充填加固 DF2 断层的垂向导水通道(包括破碎带及隐伏裂隙)，

从根本上切断深部高承压奥灰含水层与上部煤系地层的水力联系,为井下安全掘进创造有利条件。具体采用地面施工水平定向钻孔技术,远距离向目标区域注入无机注浆材料,实现对 DF2 断层破碎带及隐伏垂向导水通道的精准封堵与围岩加固,提供“主动式”区域水害防治方案。

3.1.1. 治理方案设计实施

针对 61203 运输巷道穿越的 DF2 断层段共设计施工 4 个定向钻孔(Z3, Z3-1, Z3-2, Z3-3)。基于前期探查发现,奥灰地层存在裂隙发育、注浆漏失严重等问题,因此将终孔层位设定于富水性相对较弱的 9 下煤底板砂岩层。钻孔按 40 m 间距穿越 DF2 断层,且所有钻孔终孔均穿过断层 30 m,确保有效覆盖治理区并外延 30 m 范围,钻孔布置如图 2 所示。

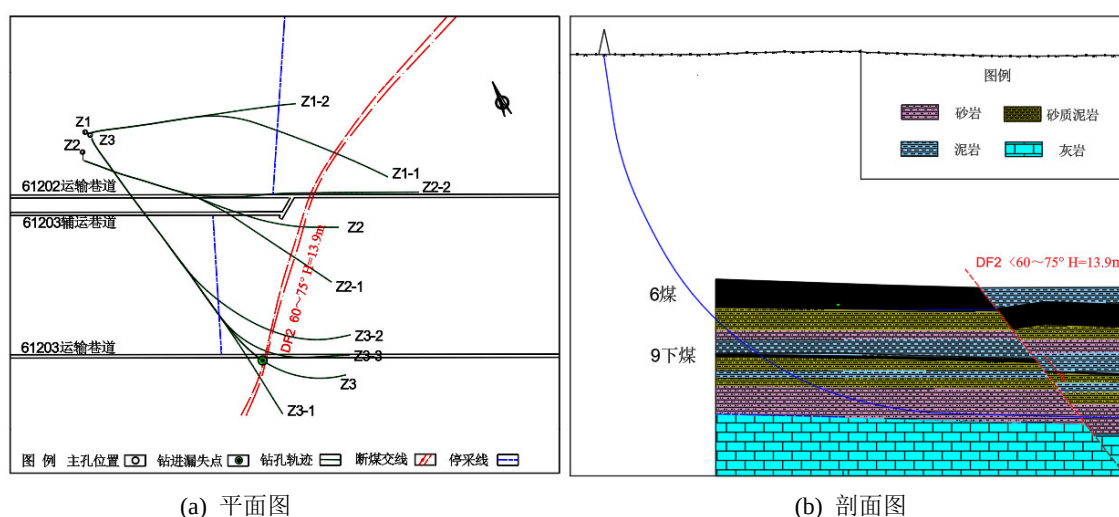


Figure 2. Plan and profile views of boreholes for surface treatment of the DF2 fault
图 2. DF2 断层地面区域治理钻孔平、剖面图

注浆采用“低压充填→高压劈裂”动态分级控制:低压阶段(0~6 MPa)以大流量单液水泥浆(水灰比 2:1)快速充填封堵较大裂隙并构建骨架;高压阶段(6~8 MPa)则切换为小流量复合浆液(水:水泥:粉煤灰 = 1:(0.40~0.50):(0.50~0.70))进行劈裂注浆,压实围岩并充填次生裂隙,提升密度与抗压强度。依据实时监测数据动态调节浆液浓度与注入速率。

3.1.2. 探查成果与注浆效果

Z3 主孔在接近 DF2 断层时(距断层 3 m)即发生钻井液全漏失,单位注浆量高达 33.67 t/m,直观反映出该区域断层裂隙发育。而后续施工的分支孔(Z3-1 至 Z3-3)穿越 DF2 断层带时,钻井液漏失现象基本消失,单位注浆量锐减至不足 5 t/m,这一显著对比直接说明,前期注入的大量浆液已有效充填断层带的裂隙通道。

注浆后对所有受注段进行压水试验。结果显示,单位吸水率均显著下降,降幅达 74.52%~94.44%,最终值均远低于 $\leq 0.01 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m} \cdot \text{m})$ 的设计标准。其中 Z3 孔效果最为显著,其单位吸水率由注浆前 $0.0036 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m} \cdot \text{m})$ 降至 $0.0002 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m} \cdot \text{m})$,降幅高达 94.44%。注浆量最大的钻孔(Z3)其吸水率降幅也最大,两者变化趋势高度吻合。

基于注浆量变化特征与压水试验吸水率测试结果分析,表明地面高压劈裂注浆成功实现了对 DF2 断层破碎带的有效充填加固。治理后断层带的隔水性能得到显著提升,有效阻断了深部奥灰水的垂向补给通道,实现了奥灰水源头封堵的核心目标。

3.2. 井下探查治理

为验证地面区域治理对深部奥灰水通道的封堵效果，确保巷道安全穿过 DF2 断层带。当 61203 运输巷道掘进至距 DF2 断层法线距离 30 m 处时，遵循“先探后治”原则实施井下钻孔探查治理。

首先施工专项探查孔，旨在精准查明断层空间位置、产状及其导(含)水性，并评估地面注浆对深部水源的封堵效果；其次，在 DF2 断层带及其后方 15 m 影响区(巷道设计轮廓线外 20 m)，依据设计注浆扩散半径 7.5 m 实施交圈帷幕注浆，精准封堵残余导水通道、加固顶底板破碎岩体，从而有效防控巷道过断层期间的突(涌)水与围岩失稳风险。探查与治理钻孔终孔位置如图 3 所示。

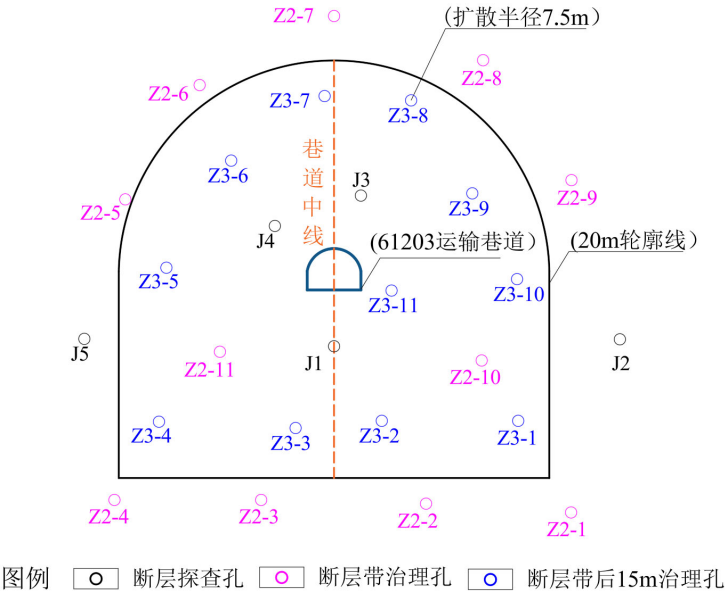
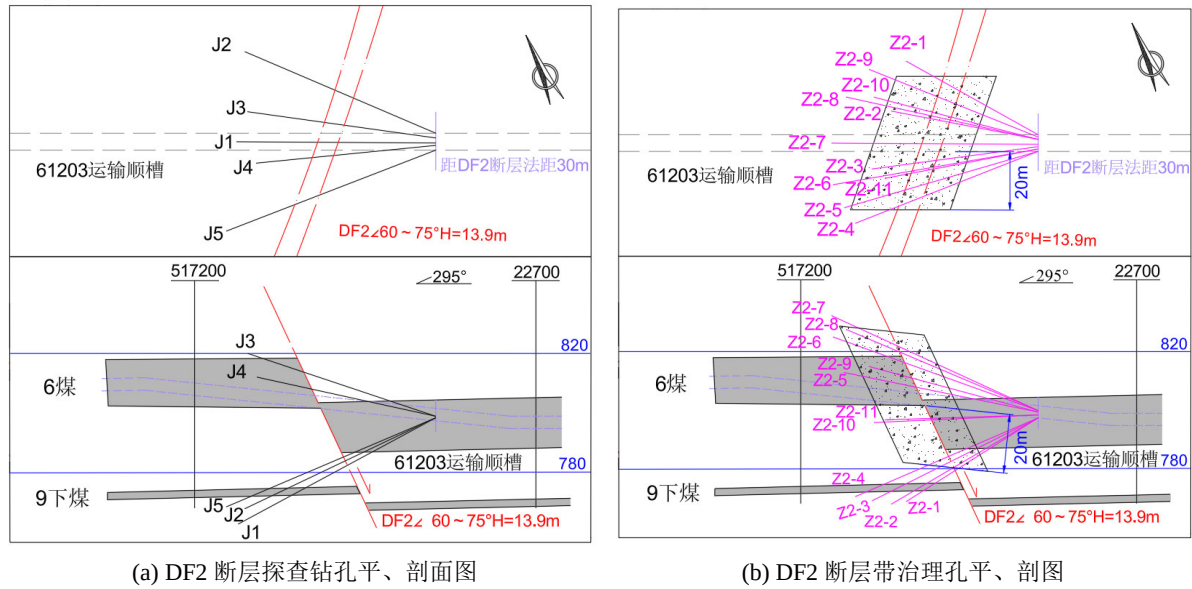
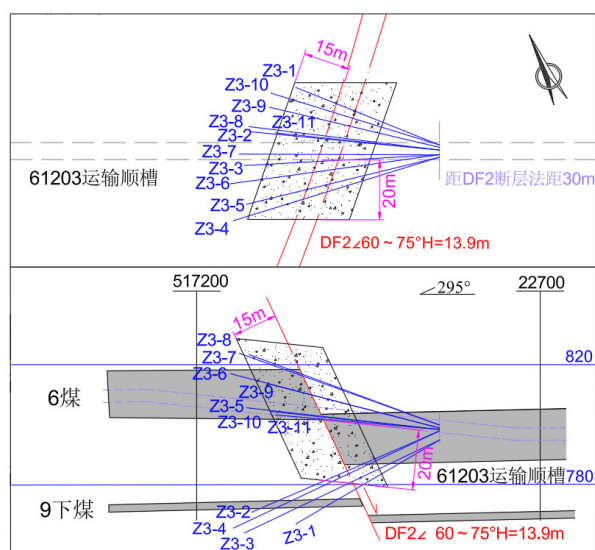


Figure 3. Distribution of final borehole locations in curtain grouting
图 3. 帷幕注浆钻孔终孔位置分布图

3.2.1. 治理方案设计与实施





(c) DF2 断层带后 15 m 治理孔平、剖面图

Figure 4. Schematic diagram of borehole surface and cross-section for downhole exploration and treatment
图 4. 井下探查治理钻孔平、剖示意图

巷道掘进至 DF2 断层法线距离 30 m 处即停止掘进，期间累计完成钻孔施工 29 个。其中，5 个为专项探查孔(图 4(a))，核心任务是精确定位 DF2 断层的具体位置、产状、导(含)水性，并检验前期地面区域治理对深部奥灰水垂向导水通道的封堵效果。其余 24 个为治理孔，依据探查孔获取的地质资料，针对 DF2 断层带本身及其后方 15 m 影响区，在 6 煤顶底板及 9 下煤底板三个关键层位，按照设计注浆扩散半径 7.5 m 进行交圈帷幕注浆布孔(图 4(b)和图 4(c))，旨在精准封堵残余导水裂隙并加固破碎围岩体。

注浆采用 P.O42.5 普通硅酸盐水泥单液浆。水灰比控制在 3:1 至 1:1 之间，遵循由稀到浓、逐级调整的原则，确保浆液充分渗透充填裂隙。注浆结束标准为连续两次满足：终孔涌水量小于 1 m³/h；注浆孔口压力大于等于 9 MPa 且稳定 30 min 以上；吸浆量小于 1.20 m³/h。

3.2.2. 探查成果与注浆效果

探查钻孔的终孔水量为 0.60~77.7 m³/h，出水点主要集中于 6 煤及其顶底板区域，表明该区域富水性相对较强；相比之下 9 下煤顶底板砂岩含水层则显示富水性较弱。这一现象与地面注浆效果密切相关：地面高压注浆有效充填了 9 下煤附近的断层裂隙，驱替并压缩了该区域的裂隙水，促使部分水和浆液迁移至 6 煤顶底板裂隙中，从而增强其相对富水性。该结果表明，地面区域治理已成功封堵了 DF2 断层带深部的奥灰水通道，从源头上阻断了高压奥灰水的补给。

本次施工的 29 个断层注浆加固钻孔在初次注浆阶段，尤其是探查孔，其注浆量普遍较大，则反映出前期裂隙发育和富水状况。而透孔复注时注浆量则明显减少，表明初次注浆有效充填目标裂隙。最终，所有钻孔均达到注浆结束标准(终孔涌水量 < 1 m³/h，注浆孔口压力 ≥ 9 MPa 且稳定 ≥ 30 min，吸浆量 < 1.20 m³/h)，充分证明设计帷幕范围内残余导水裂隙已被充分封堵，破碎岩体得到有效加固，实现了浅部围岩稳定性提升与涌水风险防控目标。

4. 巷道过断层效果验证及评价

为全面评估“地面区域注浆封堵深部奥灰水源 + 井下精准注浆加固巷道断层破碎带”相结合的治理效果，本研究综合采用了钻探检验、物探探测及掘进期动态观测三种方法进行验证。

4.1. 钻探检验

施工的 6 个效果检验孔终孔涌水量降至 0.20~1.40 m³/h (均值 0.86 m³/h), 累计注浆量 4.00 t (单孔均值 0.67 t), 较治理前探查孔注浆量 (单孔均值 34 t) 降低 98.0%; 注浆区岩芯测试结果显示, 岩体单轴抗压强度 (UCS) 均值由注浆前的 18.30 MPa (范围 16.20~20.10 MPa) 提升至 34.70 MPa (范围 31.50~37.90 MPa), 增幅达 89.60%。现场岩芯清晰可见浆液充分充填裂隙, 将破碎岩体胶结成致密的整体。这表明, 注浆显著增强了断层带岩体的力学强度和结构完整性。

4.2. 物探探测

在距断层带约 30 m 的巷道位置, 采用瞬变电磁法对停掘面前方 100 m 范围进行探测 (图 5)。探测结果显示, 注浆后 DF2 断层带及其前方顺层方向的视电阻率整体呈现相对高阻, 未发现明显低阻异常区。这表明治理后断层带富水性较弱, 仅存在少量顶板淋水的风险。该结果有力证实了地面高压劈裂注浆有效封堵了深部奥灰水的垂向导水通道, 阻断了水源补给。

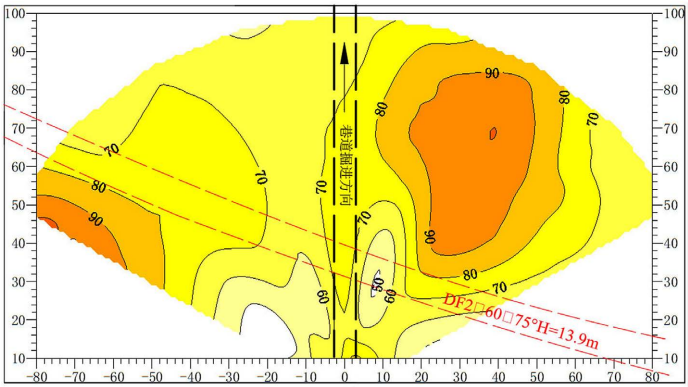


Figure 5. Results of transient electromagnetic detection along the bedding direction in the tunnel
图 5. 巷道顺层方向瞬变电磁探测成果

4.3. 掘进期动态观测

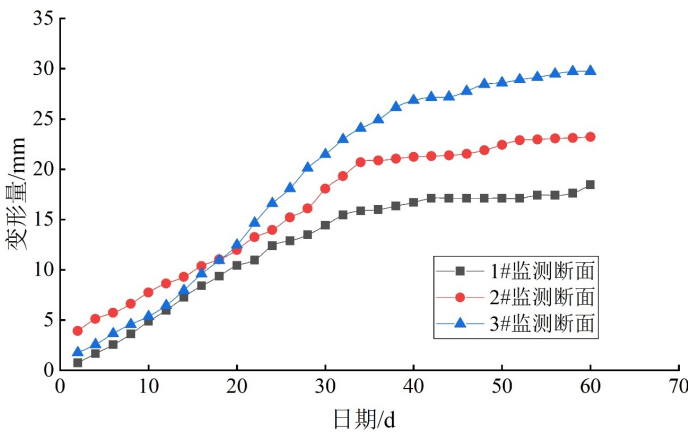


Figure 6. Horizontal convergence curve of roadway in fault fracture zone
图 6. 断层破碎带巷道水平收敛曲线

在巷道实际穿越 DF2 断层破碎带期间的观测显示: 底板无涌水, 顶板淋水量稳定在 1.00 m³/h 以下;

围岩整体保持稳定,未发生顶板冒落、片帮等失稳现象,支护结构工作正常;水平收敛监测(图 6)显示:1#、2#、3#断面两帮收敛变形量分别为 18.45 mm、23.22 mm、29.75 mm,变形量均较小,巷道整体成型质量好,围岩稳定可控。这表明井下帷幕注浆有效加固了破碎围岩,显著提升了围岩自稳能力,保障了掘进安全。

4.4. 综合验证结论

钻探、物探及动态观测结果共同验证了协同治理体系的有效性。物探呈现的相对高阻特征与掘进期底板零涌水、较低的顶板淋水量,直接证实了地面注浆成功阻断了深部奥灰水源及其垂向导水通道。钻探获取的岩芯强度与完整性显著提升以及掘进期围岩稳定、变形量小的观测结果,有力证明了井下帷幕注浆对巷道穿越区破碎围岩的有效加固。地面-井下相结合的治理体系通过阻断深部高压奥灰水害与提高浅部围岩力学性能,为巷道安全高效穿越断层破碎带提供了根本保障。

5. 结论

1) 本研究形成了一套“地面区域治理阻源、井下精准加固围岩”相结合的治理技术体系。工程实践表明,该体系通过地面定向钻孔高压劈裂注浆与井下“先探后治”帷幕注浆的有机结合,有效克服了单一治理模式的局限,为实现巷道安全、高效穿越强导水断层提供了可供参考的技术路径。

2) 治理效果表明,该技术体系阻断了深部水害并显著提升了浅部围岩稳定性。地面治理使断层垂向导水通道得到有效封堵,单位吸水率降幅最高达 94.44%,实现了奥灰水源头的超前封堵;井下加固使破碎岩体单轴抗压强度提升 89.6%,围岩收敛变形量控制在 30 mm 以内,保障了掘进期间围岩的稳定可控。

3) 综合钻探、物探与动态观测的验证方法,多维度证实了本技术方案的可靠性。治理后检验孔涌水量骤减、岩芯完整性显著改善,瞬变电磁法呈现明显高阻特征,以及掘进期底板零涌水、顶板淋水量小的实际工况,共同构成了该协同治理体系成功应用的有力证据。

参考文献

- [1] 闫鑫,丁湘,蒲治国,等.基于 AHP-CRITIC 奥灰突水危险性评价的工作面水害分区防控[J].中国矿业,2024,33(12): 217-225.
- [2] Dong, F., Yin, H., Cheng, W., Li, Y., Qiu, M., Zhang, C., et al. (2022) Study on Water Inrush Pattern of Ordovician Limestone in North China Coalfield Based on Hydrochemical Characteristics and Evolution Processes: A Case Study in Binhu and Wangchao Coal Mine of Shandong Province, China. *Journal of Cleaner Production*, **380**, Article 134954. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134954>
- [3] 郭亮,王俊红,李永亮,等.煤矿巷道顶板锚杆受力分析与支护机理[J].中国煤炭,2025,51(6): 57-70.
- [4] 李娟娟,孟庆彬,安刚健,等.深部破裂围岩-锚杆支护时效特性及巷道长时稳定性分析[J].中国矿业,2025,34(9): 244-256.
- [5] 石磊,王鹏,姜丙孝,等.深部复杂破碎软岩巷道围岩变形控制技术研究[J].中国矿业,2025,34(6): 215-223.
- [6] 曾一凡,朱慧聪,武强,等.我国不同类别煤层底板水害致灾机理与防控远景导向[J].煤炭学报,2025,50(2): 1073-1099.
- [7] 孟志强,安峰江,郝国强,等.基于改进突水系数法的底板水害区域注浆治理技术[J].金属矿山,2026(1): 218-224.
- [8] 马莲净,赵宝峰,吕玉广.煤层底板分阶段疏水降压水害防控方法[J].中国安全科学学报,2022,32(S1): 145-151.
- [9] 鲁晶津.直流电阻率法在煤层底板水害监测中的应用研究[J].工矿自动化,2021,47(2): 18-25.
- [10] 桑兴旭,罗五洲,钟平,等.基于组合权重-TOPSIS 法的矿井突水风险评价[J].中国矿业,2024,33(S1): 397-402.
- [11] 桑向阳,林云,刘保民,等.基于水位、水温、突水量和水质的充水水源识别神经网络模型[J].河南理工大学学报(自然科学版),2024,43(5): 36-42.
- [12] 陈建伟.断层破碎带“线状”导水通道综合注浆治理技术[J].煤炭工程,2025,57(3): 58-64.

-
- [13] 王书永. 矿井深部煤层底板采动效应的岩体结构与突水机理分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2025, 45(2): 490.
- [14] 许光泉, 张海涛, 周继生, 等. 华北煤田岩溶陷落柱及其突水研究综述及展望[J]. 中国岩溶, 2022, 41(2): 259-275.
- [15] 朱敬忠, 刘启蒙, 刘瑜, 等. 断层活化特征及防隔水煤柱合理化留设研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(8): 166-171.
- [16] 尹耀辉. 煤矿导水裂隙带的物探方法研究进展与应用[J]. 中国矿业, 2025, 34(S1): 490-495.
- [17] Xie, F., Zhang, Z., He, W. and Chen, D. (2025) Research on Ground Directional Grouting Reinforcement Technology and Coupling Control of Fault Fracture Zone through Rock Roadway. *Applied Sciences*, **15**, Article 5647. <https://doi.org/10.3390/app15105647>
- [18] 邢茂林. 煤矿深部巷道群穿灰岩推覆体水害超前治理技术[J]. 煤炭工程, 2023, 55(2): 81-85.
- [19] 殷帅峰, 李娅琪, 李昊, 等. 沿空煤巷过断层破碎带围岩控制技术研究[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(5): 102-108.
- [20] 张敦喜, 杨张杰, 王庆牛, 等. 采煤工作面断层超前治理技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(3): 30-36.
- [21] Kang, Y., Liu, Q., Xi, H. and Gong, G. (2018) Improved Compound Support System for Coal Mine Tunnels in Densely Faulted Zones: A Case Study of China's Huainan Coal Field. *Engineering Geology*, **240**, 10-20. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.04.006>
- [22] 董书宁, 刘其声, 王皓, 等. 煤层底板水害超前区域治理理论框架与关键技术[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 185-195.
- [23] Zhu, J., Liu, Y., Liu, Q., Yang, S., Fan, J., Cui, Y., et al. (2021) Application and Evaluation of Regional Control Technology of Limestone Water Hazard: A Case Study of the Gubei Coal Mine, North China. *Geofluids*, **2021**, 1-15. <https://doi.org/10.1155/2021/6661319>
- [24] 高耀全, 高银贵, 陆自清, 等. 基于透明地质的唐家会煤矿奥灰水防治技术[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(1): 101-108.
- [25] 杨峰. 定向钻探技术在煤矿防治水中的应用[J]. 江西煤炭科技, 2025(3): 150-152, 155.
- [26] 刘利清. 定向长钻分支孔在超前探水工作中的应用[J]. 江西煤炭科技, 2025(1): 139-142.