Mine Engineering 矿山工程, 2025, 13(6), 1476-1485
Published Online November 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/me
https://doi.org/10.12677/me.2025.136163

地面定向钻孔在煤底板区域探查治理中的应用

胡珊珊，王来斌

安徽理工大学地球与环境学院，安徽 淮南

收稿日期：2025年10月14日；录用日期：2025年11月13日；发布日期：2025年11月25日

摘 要

为确保巷道穿越断层及灰岩区段的施工安全并提升掘进效率，对灰岩地层开展地面区域探查与治理工程。本文针对临涣矿八采区底大巷施工影响范围内潜在灰岩层地质异常体与导水通道，采用地面定向钻进技术实施注浆加固，基于钻孔注浆量与透水率数据的系统分析，揭示工作面底板灰岩含水层的岩溶发育特征，为巷道安全、高效、连续掘进以及后续工作面底板灰岩水害防治提供可靠保障。

关键词

超前区域治理，底板岩溶水害，注浆加固，地面定向钻孔

Ground Directional Drilling for Exploration and Treatment of Coal Floor Strata

Shanshan Hu, Laibin Wang

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

Received: October 14, 2025; accepted: November 13, 2025; published: November 25, 2025

Abstract

To ensure construction safety and enhance driving efficiency when the roadway passes through fault zones and limestone strata, a surface regional exploration and grouting treatment project was carried out in the limestone formation. This paper addresses the potential geological anomalies and water-conducting channels within the limestone layers in the affected area of the bottom roadway driving in the No. 8 Mining District of Linhuan Mine. By applying surface directional drilling technology for grouting reinforcement, and based on a systematic analysis of borehole grouting volumes and permeability data, the karst development characteristics of the limestone aquifer in the floor of the working face are revealed. This study provides a reliable guarantee for safe, efficient, and continuous roadway driving and for subsequent water hazard prevention and control in the floor

文章引用：胡珊珊，王来斌．地面定向钻孔在煤底板区域探查治理中的应用[J]．矿山工程, 2025, 13(6): 1476-1485.
DOI: 10.12677/me.2025.136163

limestone of the working face.

Keywords

Advanced Regional Water Control, Water Inrush from Floor Karst Aquifer, Grouting for Ground Reinforcement, Surface-Based Directional Boreholes

1. 引言

在我国华北地区的煤炭开采活动中，高承压含水层所构成的水文地质隐患尤为突出。目前，底板突水已成为煤矿生产中一种重要的灾害类型[1] [2]。随着煤矿开采向深部持续延伸，工作面底板灰岩突水的发生几率显著上升[3] [4]。实践表明，在多种防治方法中，采用底板注浆技术是阻断突水途径、控制水害发生的一种高效手段[5]-[7]。在传统的煤层底板含水层加固工程中，普遍采用垂直钻孔注浆工艺。但方法存在一定局限性[8]-[10]，而地面定向近水平钻孔钻进[11] [12]融合了定向钻进与常规注浆钻孔技术，通过在地面部署定向钻机，先后完成直孔段与造斜段施工，使钻孔精准进入目标治理层位，并转为顺岩层走向钻进。董书宁等提出了将水平定向钻探技术应用于煤层底板的创新思路，可扩大对裂隙带和含水构造的揭露范围，提升底板注浆改造的整体效果与效率[13]-[15]。

以临涣煤矿八采区底大巷施工区域1086工作面为背景，采用地面定向钻孔超前区域治理技术，选取10煤底板太原组二灰和三灰岩层作为目标加固层位。通过现场试验，对比分析了治理前后10煤底板钻孔透水率的变化，进行了治理效果的验证与评估。在实施过程中，通过对10煤层底板潜在的导水通道及储水空间进行注浆加固，巷道盾构机安全掘进和后续工作面底板水害的防治提供了有效保障，显著降低了突水风险。

2. 水文地质条件及主要水害

2.1. 水文地质概况

八采区位于矿井西翼，地层整体呈单斜构造，断层较为发育，褶曲形态以宽缓型为主。主要开采煤层为7、8、9、10煤层，煤层倾角一般介于5°~25°之间。断裂构造以北东向及近南北向的斜切正断层为主，构造复杂区主要分布于勘探线LJ2与LJ4之间的骑路周断层、大吴家断层与周吴断层一带，以及LJ5至LJ8之间小断层密集发育的区域；其余区域构造相对简单。

太原组灰岩顶部的一灰至四灰含水层与10煤底板的间距为40.17~61.40 m，平均为50.12 m。该段地层上部以砂岩与泥岩互层为主，下部主要由泥岩和粉砂岩组成，局部夹有少量中、细砂岩，整体隔水性能较好。仅在局部受断层影响构造带，岩层厚度有所减薄；随着采掘工程向深部延伸，加之高地压及高承压含水层的作用，其隔水性可能出现弱化。

钻孔揭露太原组地层总厚度为128.16~134.47 m，其中灰岩累计厚度为49.70~66.68 m。太原组一灰厚度为1.85~3.65 m，平均厚度2.19 m；二灰厚度为3.23~4.30 m，平均厚度3.94 m；三灰厚度为1.49~11.50 m，平均厚度7.13 m；四灰厚度为10.52~12.00 m，平均厚度11.26 m；一灰至四灰灰岩平均总厚度为26.53 m。奥灰含水层与10煤底板的间距约为143.2~199.0 m。底板灰岩含水层分布如表1和图1所示。底板高

承压灰岩水可能在采掘活动扰动与垂向导水通道共同作用下涌入工作面，从而诱发突水事故。

Table 1. Statistics of drilling exposure of limestone aquifers 1-4 (Partial)
表 1. 钻探揭露 1-4 灰统计表(部分)

孔号	厚度(m)			
	一灰	二灰	三灰	四灰
DG1-1	2.14	3.99	8.67	10.52
DG1-4	2.14	3.85		
DG1-6	2.11	4.30		
DG1-10	3.65	3.97	8.64	12.00
DG1-11	2.16	3.87	11.50	
DG1-14	2.19	3.23	5.36	
DG1-15	1.85			
DG1-17	2.09	4.34	1.49	

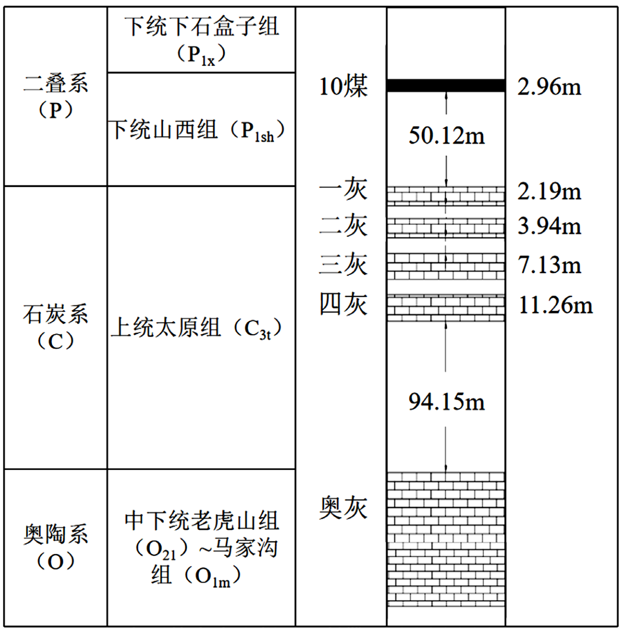

Figure 1. Schematic diagram of the floor limestone aquifer
图 1. 底板灰岩含水层示意图

太原组一灰至四灰岩溶裂隙发育不均一，垂向上，二灰、三灰和四灰厚度及岩溶裂隙发育程度高于一灰，且浅部较深部灰岩裂隙发育；横向上则呈现无规律分布。五灰至八灰埋藏较深，距离主采煤层较远，岩溶裂隙不发育，水动力条件较弱，对煤层开采影响相对较小。根据太原组含水层(组) (一至四灰、五至八灰)抽(注)水试验，其单位涌水量为 0.000001603~0.438 L/(s·m)，渗透系数为 0.0000392~1.129 m/d，富水性为弱~中等。据 2021-观 3 孔资料显示一灰至四灰最高水位 27.08 m，最低水位−274.75 m；五灰至八灰最高水位在 2023-观 8 孔为−45.20 m，最低水位−75.17 m。该含水层富水性空间分异显著，表现为地

面长观孔水位差异较大，井下探查孔出水量相差较大，局部区域水压可达 7.75 MPa，说明太原组灰岩含水层组具有高承压弱富水性。太原组含水层主要通过层间径流以及与奥灰含水层在接触带区域发生水力联系。此外，在二叠系底部砂岩裂隙含水层与太原组之间隔水层较薄的地段，亦可能存在局部互补关系。

奥灰含水层岩性以浅灰色至灰色中厚层至巨厚层白云质灰岩和石灰岩为主，具细晶质结构，方解石自形程度较高，常见豹皮状构造。顶部见少量黄铁矿结核，岩体质地致密、性能、成分不均。浅部岩溶裂隙较发育，可见小型溶洞。

根据 2021-观 2 孔和 2022-观 1 孔抽水试验结果，单位涌水量为 0.00858~0.04428 L/(s·m)，渗透系数为 0.0293~0.124 m/d，显示该区域富水性较弱。然而，结合III6 孔(童亭)抽水试验数据(单位涌水量 0.131 L/(s·m)，渗透系数 1.07 m/d)以及童亭背斜 3 线水源勘探孔数据(单位涌水量 11.29 L/(s·m)，渗透系数 17.92 m/d)，反映出区域奥灰含水层富水性具有显著的不均一性，局部富水性极强。根据地面奥灰含水层长观孔水位监测数据(2016-观 3 孔，六采区，2023 年 10 月 1 日，水位−21.50 m；2020-观 5 孔，海孜风井，同期水位−41.21 m；2022-观 1 孔，八采区，同期水位−41.71 m)，最高水压可达 9.80 MPa，奥灰含水层同样具有高水压特征。因此，奥灰含水层组具有高承压弱富水的特点。

2.2. 底板灰岩水害

临涣矿八采区底大巷主要受底板太原组灰岩含水层与奥陶系灰岩含水层的突水威胁。其中，太原组灰岩含水层以静储量为主，补给条件有限，补给来源相对不足。采区直接充水水源主要为煤层顶底板砂岩裂隙水，间接充水水源为太原组灰岩岩溶裂隙水。该太灰含水层岩溶裂隙发育不均一，整体富水性较弱，但局部水压可达 7.75 MPa。针对上述水文地质条件，防治水工作总体遵循“疏水降压开采”的原则。在 10 煤层底板布置井巷工程时，所留设的隔水岩柱厚度必须大于安全阈值。对于特殊地段，如掘进过程中遇断层导致煤层与太灰含水层对口接触，或二者间距显著缩小的情况，必须采取针对性的防治措施，如疏水降压或注浆加固，以保障掘进安全。

巷道下距奥灰含水层为 143.2~199.0 m，奥灰含水层存在高水压，局部富水极强的特点，太原组灰岩底部为本溪组铝质泥岩，致密性脆，具有一定的隔水性能，且具有一定的阻隔奥灰突水效果。利用奥灰水位计算安全隔水层厚度，根据安全隔水层厚度计算公式如下：

$$t = \frac{L\left(\sqrt{r^2L^2 + 8K_pP} - rL\right)}{4K_p} \tag{1}$$

式中：t 为安全隔水层厚度 m；L 为巷道底板宽度 m，取 8.53m；r 为底板隔水层的平均重度 MN/m^3，取 0.027；K_p 为底板隔水层的抗拉强度 MPa，取 0.4；P 隔水层底板承受的水头压力 MPa，取 9.80 MPa；

根据公式计算，安全隔水层厚度为 28.7 m。四灰底板至奥灰顶板的距离为 94.15 m，而奥灰顶界面至巷道底板界面的实际厚度为 153 m，远大于《煤矿防治水细则》规定的安全隔水层厚度。因此，该段岩体能够有效抵抗奥灰高承压水头压力，避免奥灰水突破底板涌入矿井巷道或工作面，从而保障安全生产。综上可知，八采区矿井水害主要受太原组灰岩含水层影响。

3. 地面超前区域水害治理

为应对临涣矿八采区 1086 工作面底大巷面临的底板灰岩水害威胁，基于补充地质与水文地质勘探结果，该巷道邻近灰岩含水层，施工期间需严格执行“两探”(即物探与钻探)措施。若采用井下定向钻或常规钻探方法进行探查，不仅易造成井下交叉、平行作业，带来安全隐患，且其施工效率难以满足盾构巷道安全、高效、连续掘进的要求。因此，最终确定采用地面定向钻探技术，对八采区底大巷工程区域实施超前探查与综合治理。

3.1. 治理设计

为有效控制八采区底大巷施工期间的底板灰岩水害，本次治理工作设定以下两项主要目标与任务：第一，采用地面定向钻探技术，对大巷施工底板区域内的地质异常体及导水通道进行精细探查；第二，针对所发现的导水通道与储水空间实施注浆加固，以消除灰岩水害威胁，确保巷道实现安全高效连续掘进。

通过施工地面定向钻孔，可对断层破碎带及灰岩岩溶裂隙开展超前预注浆充填，从而有效封堵潜在导水通道与储水空间，降低巷道掘进期间的突水风险。同时，高压注浆能够加固断层破碎带与灰岩含水层，提高围岩的整体强度和稳定性，降低支护难度，为盾构机安全高效推进创造有利条件。

底板含水层注浆治理的核心在于使浆液在底大巷影响区域内实现均匀扩散与有效覆盖。基于“由外到内、分序加密、围堵结合”的工程原则，并结合目的层的渗透性与透水率，将注浆孔间距设定为 60 m，有效扩散半径控制为 30 m，以确保治理效果、经济性与施工安全。

在平面范围内，治理区域覆盖巷道中心线及其两侧各 30 m 范围；在剖面上，则对巷道底板以下不小于 30 m 的区段进行超前探查与注浆加固。治理总长度约 1760 m，治理面积约 0.11 km²。遵循“全面覆盖，不留遗憾”的设计理念[16]，在八采区底大巷治理区内共布置 D1 与 D2 两个地面定向钻孔组。各孔组采用“一主孔多分支”的扇状发散结构，包括一个主孔及若干分支孔，重点针对三维地震识别出的地质构造与潜在的导水通道等关键区域。具体钻孔轨迹如图 2 所示。

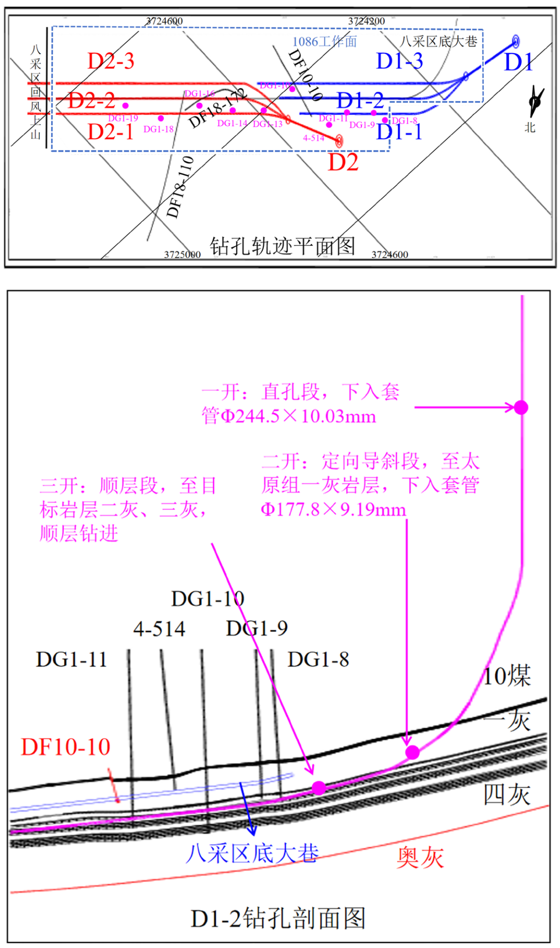

Figure 2. Arrangement plan of borehole group D1 and D2
图 2. D1 和 D2 孔组钻孔布置方案设计

在评价注浆效果及判断岩层裂隙发育程度时，钻孔注浆量是最直观的判别指标。太原组灰岩含水层顶部一灰至四灰与 10 煤底板的平均间距为 50.12 m，满足区域治理后对突水系数的控制要求。一灰至四灰灰岩平均厚度为 24.32 m，裂隙发育程度较高，具备良好的可注性。由图 1 可知，一灰与二灰厚度较薄，三灰厚度为 7.13 m，介于二者之间且较四灰为薄，符合地面顺层钻孔技术对地层条件的要求。综合以上因素，将二灰与三灰层位确定为地面区域治理的目的层。

3.2. 治理施工

本治理工程共布置 2 个地面定向孔组 D1 与 D2，包含 8 个分支孔，每个孔组设 1 个机动孔。采用孔口密闭止浆与静压分序分段下行式注浆工艺。在三开段钻进过程中，执行以下注浆控制标准：当漏失量 $\geq 5\ m^3/h$ 时，立即进行压水试验并实施注浆加固；当漏失量 $<5\ m^3/h$ 时，每钻进 200 m 进行一次压水试验，若 30 分钟内孔口压力达到静水压力的 1.5 倍，则继续钻进，否则需进行注浆处理；此外，每钻进 300 m 必须进行一次系统注浆；三开段钻遇断层破碎带时，一律进行注浆加固。

根据周边钻孔水位变化情况确定注浆终压，原则上孔口终压达到静水压力 1.5 倍($\nless 15$ MPa)，终量$\ngtr 52$ L/min，稳定时间$\nless 30$ min。各分支孔终孔注浆结束后，根据注浆量大小，必要时扫至孔底，带钻具分段注浆封孔。

注浆材料选用 P.O 42.5 级水泥与清水配制，浆液比重在 1.20~1.60 范围内由小至大动态调整，标准见表 2。前期以稀浆探查为主，中后期根据孔口压力响应逐步提高浆液浓度。施工过程中注浆压力控制合理，未对矿井正常生产造成影响。

Table 2. Cement consumption and specific gravity for 1 m^3 of grout at different water-cement ratios
表 2. 不同水灰比情况下制 1 m^3 浆水泥用量及比重表

序号	水灰比	水(kg)	水泥(kg)	比重(g/cm³)
1	1:1	756	756	1.51
2	1.1:1	773	703	1.48
3	1.2:1	788	657	1.44
4	1.3:1	801	616	1.42
5	1.4:1	813	581	1.39
6	1.5:1	823	549	1.37
7	1.6:1	832	520	1.35
8	1.7:1	841	494	1.33
9	1.8:1	848	471	1.32
10	1.9:1	855	450	1.30
11	2:1	861	431	1.29

八采区底大巷地面区域探查治理工程累计完成 2 孔组 8 分支孔的施工，共实施注浆 32 次。设计注浆量为 5000 t，实际注浆量为 3593.60 t，低于设计值。其中，D1 孔组注浆 16 次，累计注水泥 2084.60 t，注浆孔口终压为 15.0~17.5 MPa，各钻孔单位注浆量分别为：D1-1 孔 0.69 t/m、D1-3 孔 0.71 t/m、D1-2 孔 0.42 t/m、D1 机动孔 0.31 t/m；D2 孔组注浆 16 次，累计注水泥 1509 t，注浆孔口终压为 15.1~16.6 MPa，

各钻孔单位注浆量分别为：D2-1 孔 0.46 t/m、D2-3 孔 0.32 t/m、D2-2 孔 0.31 t/m、D2 机动孔 0.27 t/m。注浆量分布情况如图 3 所示。

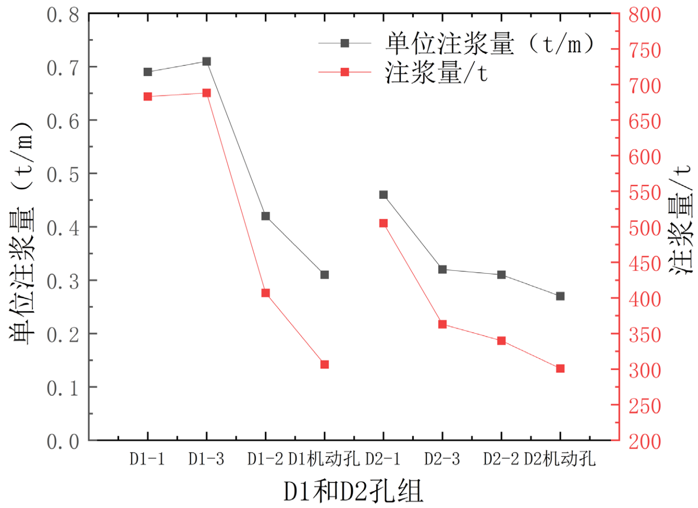

Figure 3. Grout volume of branch holes in borehole groups D1 and D2
图 3. D1 和 D2 孔组各分支孔注浆量

施工顺序遵循“先外后内、围堵结合”的原则，即优先对两侧钻孔进行注浆，再处理中心线区域钻孔。该工艺旨在形成封闭的注浆帷幕，有效控制浆液扩散路径，提升整体治理效果。由图 3 可见，D1 孔组按 D1-1→D1-3→D1-2→D1 机动孔顺序施工。位于巷道外帮外侧 30 m 范围内的先期钻孔 D1-1 与 D1-3 注浆量较大，而后期沿巷道中心线施工的 D1-2 与 D1 机动孔注浆量显著减小，表明前期外围注浆已有效封堵主要导水通道。同样，D2 孔组按 D2-1→D2-3→D2-2→D2 机动孔顺序施工，其外帮外侧先施工的 D2-1 与 D2-3 注浆量较大，后续中心区域钻孔注浆量逐步降低，进一步验证了外围注浆对通道封堵的有效性。

注浆量直接反映岩溶裂隙的空间体积与连通性。通过对 D1 与 D2 孔组不同深度注浆量数据进行统计与可视化制图(图 4)，可识别岩溶发育程度及其空间展布，进而分析其是否受地质构造控制。

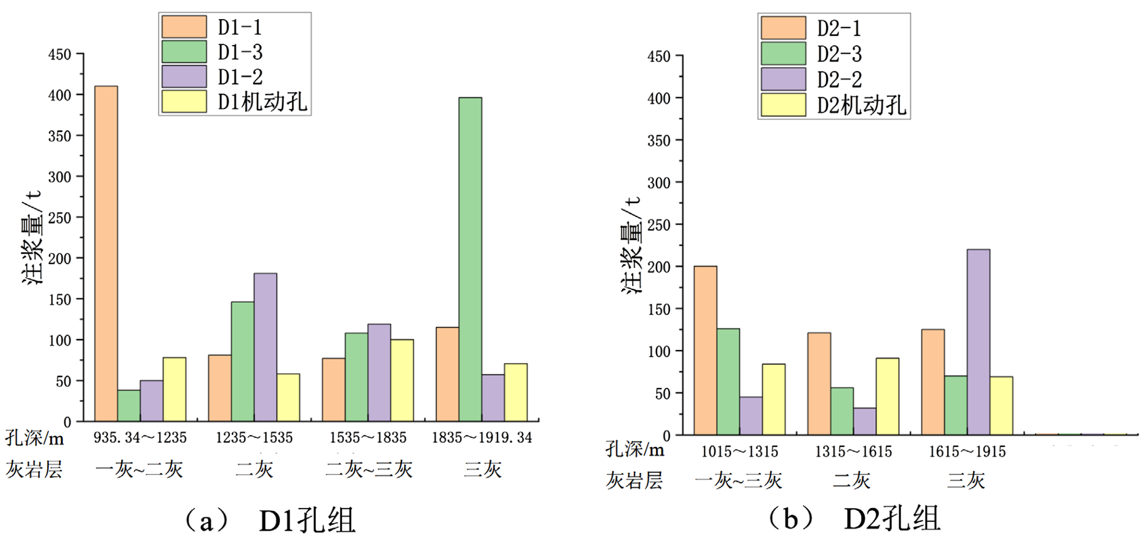

Figure 4. Grouting volume per meter for different injection sections of branch holes in borehole group D1 and D2
图 4. D1 和 D2 孔组各分支孔不同受注段注浆量

结合图 3 与图 4 分析可知，D1 孔组中先注浆的 D1-1 和 D1-3 钻孔注浆量较大，主要分布于巷道两侧外帮外围，后注浆的 D1-2 钻孔和 D1 机动孔注浆量较小，钻孔为巷道中心线位置。根据钻孔施工顺序注浆量逐渐减小，说明注浆效果较好。D1-1 钻孔在一到三灰岩层总体注浆量由大到小，但一灰段注浆量显著偏高；D1-2 钻孔在一~二灰段受先注浆钻孔的影响，注浆量小，在二~三灰段注浆量也由大到小，说明随着深度的增加，灰岩层的岩溶发育程度变差。D1-3 钻孔在一灰受先注浆钻孔影响，注浆量较小，在二灰~三灰层注浆量由大到小，但三灰段注浆量显著偏高，经地质资料核实，三灰层附近发育 DF10-10 断层。

D2 孔组的注浆量主要集中于巷道外帮外侧的 D2-1 钻孔(该孔组首个施工钻孔)，D2-1 和 D2-3 钻孔的注浆量都随孔深增大逐渐减小，注浆层位涵盖一灰至三灰，地层可注性逐渐降低，灰岩岩溶发育程度变差。沿巷道中心线施工的 D2-2 钻孔受先逐渐钻孔影响在一~二灰注浆量小，说明注浆效果较好，但在三灰段注浆量异常偏高，经分析判定该异常与 DF18-172 断层的影响密切相关。综上所述，随着注浆段深度不断增加，注浆量逐渐减小，显示出灰岩岩溶发育也逐渐变差，同时地质构造也是注浆量大小主要控制的关键因素之一。

4. 水害治理效果评价

注浆治理前后岩体透水率的变化，是评价浆液封堵效果与岩体渗透性改善的关键指标。D1 与 D2 孔组累计完成压水试验 67 次，其中在注浆前后分别进行了 40 次有效对比试验。基于现场压水试验数据，对比分析了八采区底大巷区域水害治理前后各钻孔透水率的变化情况，结果如图 5 所示。

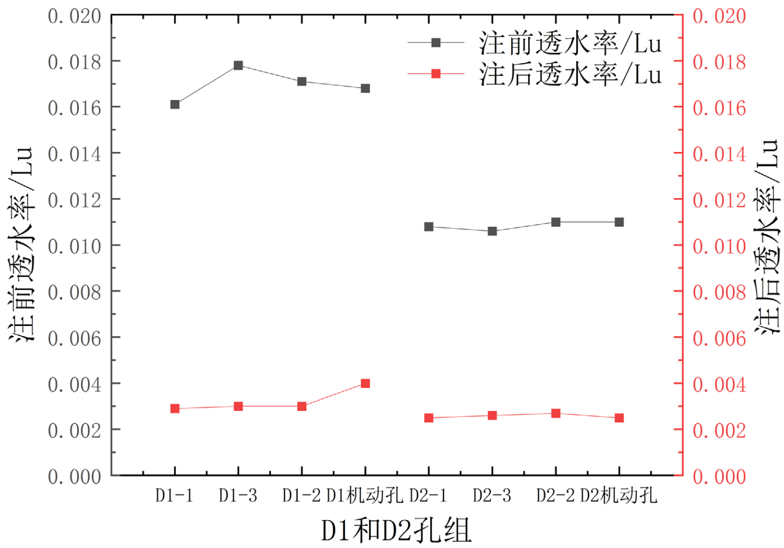

Figure 5. Lugeon values of packer tests for branch holes in borehole groups D1 and D2
图 5. D1 和 D2 孔组各分支孔压水试验透水率

根据图 5 所示数据，各钻孔在注浆治理后透水率均显著下降：D1-1 由 0.0161 Lu 降至 0.0029 Lu，D1-3 由 0.0178 Lu 降至 0.003 Lu，D1-2 由 0.0171 Lu 降至 0.003 Lu，D1 机动孔由 0.0168 Lu 降至 0.004 Lu；D2-1 由 0.0108 Lu 降至 0.0025 Lu，D2-3 由 0.0106 Lu 降至 0.0026 Lu，D2-2 由 0.011 Lu 降至 0.0027 Lu，D2 机动孔由 0.011 Lu 降至 0.0025 Lu。治理后透水率较治理前普遍下降一个数量级，表明注浆工程有效降低了岩体渗透性，为极微透水岩层。

结合图 3 与图 4 进一步分析，D1-3 钻孔注浆量最大，且其注前透水率也高于其他钻孔，说明该分支孔所在区域岩体破碎程度较高，裂隙发育充分，具备良好的储水与导水条件，属于八采区底大巷底

板范围内的富水异常区，因而成为注浆加固的重点区段。D1 与 D2 孔组注浆治理前后透水率的具体降幅如图 6 所示。

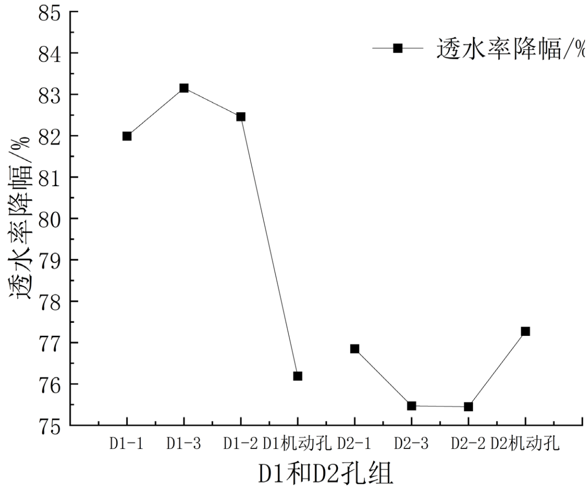

Figure 6. Reduction in water permeability rate of branch holes in borehole group D1 and D2, pre- and post-grouting
图 6. D1 和 D2 孔组各分支孔注浆前后透水率降幅

根据图 6 数据，各钻孔透水率在注浆治理后降幅显著：D1-1 降幅 81.99%，D1-3 降幅 83.15%，D1-2 降幅 82.46%，D1 机动孔降幅 76.19%；D2-1 降幅 76.85%，D2-3 降幅 75.47%，D2-2 降幅 75.45%，D2 机动孔降幅 77.27%。其中，D1-1、D1-3 和 D1-2 钻孔的透水率降低幅度均超过 80%，表明注浆效果显著；D1 机动孔及 D2 孔组各钻孔的透水率降幅介于 75%~80%之间，虽略低于前者，仍属于有效改良范围。

整体而言，所有钻孔透水率均有明显下降，未出现改善不显著的情况，说明注浆过程中未破坏原有岩体结构或产生新的导水通道。综上所述，通过地面定向钻孔区域治理，太原组上段二灰与三灰含水层已被有效改造为等效隔水层，实现了底板水害防治的预期目标。

压水试验是定量获取岩体渗透性参数的经典方法，但仍存在局限性。其结果仅反映钻孔周边有限范围的渗透特性，而实际岩体渗透性由于岩溶发育程度和地层构造的不同常呈显著空间异质性，单纯依赖该离散钻孔数据易漏判关键水文构造，导致区域渗流场误判。为弥补其在空间代表性与长期动态评估上的不足，巷道施工时加强包括水压及流量的地下水监测，通过持续采集多源数据，评估治理工程长期性能与稳定性，为渗控效果评价提供更全面可靠的依据。

5. 结论

1) 研究区太原组灰岩总厚度为 49.70~66.68 m。一灰平均厚度 2.19 m；二灰平均厚度 3.94 m；三灰平均厚度 7.13 m；四灰平均厚度 11.26 m；一灰至四灰灰岩平均总厚度为 26.53 m。灰岩含水层组具高承压、弱富水特征。岩溶发育呈现显著的非均一性，随着灰岩层埋藏深度的增加，岩溶发育逐渐变差，这一差异主要受灰岩层位与构造控制。断裂系统为岩溶发育提供了优势通道，是导致注浆量空间分异的关键因素。

2) 通过 D1、D2 孔组不同深度注浆量数据的统计分析与可视化制图，该区域注浆量分布受地质构造因素控制。施工遵循“先外后内、围堵结合”的原则，形成较好的围堵墙，有效控制浆液扩散路径，提升整体治理效果。依据注浆前后岩体透水率变化可知，含水层经注浆处理后渗透性显著降低。同时，随注浆量增加，后续分支孔的初始注浆压力较先期钻孔明显提高，这一现象表明注浆改造效果良好，围岩稳定性得到有效提升。上述注浆成果为巷道盾构安全掘进及工作面底板水害防治提供了有效技术保障，显著降低了突水风险。

参考文献

[1] 李飞, 孔德中, 汪洋, 等. 我国煤层底板突水机理与防治研究现状及展望[J]. 煤矿安全, 2022, 53(11): 200-206.

[2] 刘泽威, 刘其声, 刘洋. 煤层底板隐伏断层分类及突水防治措施[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(2): 141-146.

[3] 戴磊, 段李宏. 地面定向钻孔超前区域治理底板岩溶水害技术应用[J]. 煤炭工程, 2022, 54(2): 83-88.

[4] 张培森, 颜伟, 张文泉, 等. 含隐伏断层煤层回采诱发底板突水影响因素研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(4): 765-772.

[5] 张党育, 蒋勤明, 高春芳, 等. 华北型煤田底板岩溶水害区域治理关键技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(6): 31-36.

[6] 田乐, 孙晓宇. 巨厚冲积层薄基岩煤层底板区域防治水地面定向钻探技术[J]. 煤炭技术, 2020, 39(4): 111-113.

[7] 邢茂林. 煤层底板区域治理后断层突水原因及探讨[J]. 煤矿安全, 2023, 54(3): 204-211.

[8] 边凯, 李思宇, 刘博, 等. 承压水上含断层煤层开采底板突水规律研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(6): 169-177.

[9] 慕松利, 张二蒙, 赵霖, 等. 赵固二矿工作面断层突水防治技术[J]. 煤矿安全, 2019, 50(12): 64-68.

[10] 童仁剑. 地面顺层孔超前探查预加固断层破碎带应用研究[J]. 煤炭技术, 2020, 39(8): 20-23.

[11] Ma, Y.N., Yang, J.S., Li, L.Y., *et al*. (2022) Analysis on Ultimate Water Pressure and Treatment Measures of Tunnels Operating in Water Rich Areas Based on Water Hazard Investigation. *Alexandria Engineering Journal*, **61**, 6581-6589. https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.11.040

[12] Zhang, Y.J. and Li, F.M. (2022) Prediction of Water Inrush from Coal Seam Floors Based on the Effective Barrier Thickness. *Mine Water and the Environment*, **41**, 168-175. https://doi.org/10.1007/s10230-022-00846-x

[13] 董书宁, 柳昭星, 王皓, 等. 导水断层破碎带注浆浆液扩散机制试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(1): 174-183.

[14] 董书宁, 王皓, 张文忠. 华北型煤田奥灰顶部利用与改造判别准则及底板破坏深度[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 2216-2226.

[15] 石志远. 地面顺层钻进在煤层底板高压岩溶水害区域超前治理中的应用[J]. 煤矿安全, 2015, 46(S1): 67-70.

[16] 田雨桐, 张平松, 吴荣新, 等. 煤层采动条件下断层活化研究的现状分析及展望[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(4): 60-70.