

# 煤层底板含水层区域注浆改造浆液扩散范围现场示踪试验

郭艳<sup>1,4</sup>, 桂和荣<sup>1</sup>, 洪荒<sup>2</sup>, 陈永青<sup>2</sup>, 孙晓宇<sup>3</sup>, 胡荣杰<sup>2</sup>, 郭祥东<sup>1</sup>, 赵群<sup>2</sup>, 戴亚男<sup>3</sup>, 余浩<sup>1</sup>,  
李俊<sup>1,4</sup>, 孙亮<sup>2</sup>, 高川<sup>2</sup>

(1. 国家煤矿水害防治工程技术研究中心(宿州学院), 安徽宿州 234000; 2. 安徽省皖北煤电集团有限责任公司, 安徽宿州 234000; 3. 天地科技股份有限公司, 北京 100000; 4. 中国科学技术大学地球与空间学院, 安徽合肥 230000)

**摘要:**近年来,为解放底板高承压灰岩水上煤炭资源,华北煤田普遍采用地面向钻技术,对太原组薄层灰岩进行区域性注浆加固改造(习称“底板区域治理”),以全面封堵灰岩岩溶裂隙并阻断垂向导水通道。该技术中,与浆液扩散范围(半径)密切相关的“水平分支孔”孔间距设计问题,一直备受学界和业界的广泛关注。皖北矿区底板区域注浆工程量大,特别是深部资源开采,将有数十亿元的注浆工程,有必要查清浆液扩散范围真实数据。为此,以皖北矿区恒源煤矿为研究基地,依托Ⅱ63采区底板区域治理工程,设计并实施浆液扩散范围示踪试验,在中间的水平分支孔(Z8-7)投放荧光剂(示踪剂),在两侧的水平分支孔(Z8-6、Z8-8)以及交叉分支检测孔(Z8JC)取岩屑样鉴别荧光水泥,以获得浆液扩散范围,进而在浆液扩散影响因素分析基础上,构建恒源煤矿底板区域注浆治理浆液扩散范围计算公式。结果表明:①综合岩屑现场及室内鉴别结果分析,获得恒源煤矿Ⅱ63采区底板区域注浆浆液扩散范围为38.3~44.0 m,且水泥分布密集区在水平分支孔浆液扩散范围30 m以内,该区域内注浆效果最佳。②通过现场岩屑快速鉴别与室内岩屑精准鉴别,取得的浆液扩散范围基本一致,证明了荧光示踪浆液扩散范围的有效性。③通过对比分析,认为在计算参数、边界约束等符合实际注浆工况条件下,浆液扩散范围理论计算和数值模拟结果,与现场示踪试验实测结果较为接近。④利用示踪试验过程中的压水试验及注浆参数、钻遇构造及水文地质响应等数据,考虑重力、构造、地下水径流等因素影响,借助SPSS非线性拟合软件,得到恒源煤矿Ⅱ63采区底板区域注浆浆液扩散范围计算公式。⑤基于恒源煤矿受注层实际地质、水文地质条件,利用拟合的浆液扩散范围计算公式得出Ⅱ63采区Z8场地浆液扩散范围为37.8~42.9 m,与浆液扩散范围示踪试验实测结果相近,计算公式可在类似条件下推广应用。本次煤矿底板区域注浆浆液扩散范围现场示踪工程试验,不仅取得了浆液扩散范围的真实数据,而且阐明了浆液扩散与多种地质、水文地质因素之间的内在联系,揭示了超深、超长定向钻注浆浆液扩散机理,构建了浆液扩散范围计算公式,为类似条件下底板区域治理工程水平分支孔孔间距的合理设计提供了参考依据。

**关键词:**底板区域治理;浆液扩散范围;示踪试验;浆液扩散计算公式;皖北矿区恒源煤矿

**中图分类号:**P641 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2024)04-2045-12

收稿日期:2024-01-08 修回日期:2024-03-25 责任编辑:钱小静 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.XH24.0032

基金项目:安徽省高校自然科学重点资助项目(2022AH051369);中国博士后科学基金面上资助项目(2023M743361);安徽省公益性地质资助项目(2023-g-1-11)

作者简介:郭艳(1985—),女,安徽宿州人,高级实验师,博士后(在站),硕士生导师。E-mail: guoyan@ahszu.edu.cn

通讯作者:桂和荣(1963—),男,安徽舒城人,教授,博士生导师,博士。E-mail: guiherong@163.com

引用格式:郭艳,桂和荣,洪荒,等.煤层底板含水层区域注浆改造浆液扩散范围现场示踪试验[J].煤炭学报,2024,49(4):2045-2056.

GUO Yan, GUI Herong, HONG Huang, et al. Site tracing experiment on the diffusion range of regional grouting renovation under the coal seam floor aquifer[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(4): 2045-2056.



移动阅读

## Site tracing experiment on the diffusion range of regional grouting renovation under the coal seam floor aquifer

GUO Yan<sup>1,4</sup>, GUI Herong<sup>1</sup>, HONG Huang<sup>2</sup>, CHEN Yongqing<sup>2</sup>, SUN Xiaoyu<sup>3</sup>, HU Rongjie<sup>2</sup>, GUO Xiangdong<sup>1</sup>, ZHAO Qun<sup>2</sup>, DAI Yanan<sup>3</sup>, YU Hao<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1,4</sup>, SUN Liang<sup>2</sup>, GAO Chuan<sup>2</sup>

(1. National Engineering Research Center of Coal Mine Water Hazard Controlling, Suzhou University, Suzhou 234000, China; 2. Wanbei Coal Power Group Co., Ltd., of Anhui Province, Suzhou 234000, China; 3. Tiandi Technology Co., Ltd., Beijing 100000, China; 4. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230000, China)

**Abstract:** In recent years, to liberate coal resources from high pressure limestone water on the coal seam floor, North China Coalfields have generally adopted surface directional drilling technology to carry out regional grouting reinforcement and transformation (commonly known as “floor regional treatment”) on the thin-layer limestone of the Taiyuan Formation in order to comprehensively seal karst cracks in limestone and block vertical guide water channels. In this technology, the design of the spacing between “horizontal branching holes” closely related to the diffusion range (radius) of the slurry has been widely studied by academia and industry. There is a large amount of grouting work in the bottom plate area of the Anhui North mining area, especially in the mining of deep resources, which will cost billions of yuan. It is necessary to verify the true data of the diffusion range of the grout. Therefore, based on the Hengyuan Coal Mine in the northern Anhui mining area as the research base, relying on the II63 mining area floor area treatment project, the slurry diffusion range tracing test was designed and implemented. The fluorescent agent (tracer) was added to the horizontal branch hole (Z8-7) in the middle, and the rock debris samples were taken from the horizontal branch holes (Z8-6, Z8-8) and cross branch detection holes (Z8JC) on both sides to identify fluorescent cement and obtain the diffusion range of the slurry. Furthermore, based on the analysis of the influencing factors of slurry diffusion, a formula for calculating the diffusion range of slurry in the grouting treatment of the bottom plate area of the Hengyuan Coal Mine was constructed. The results show that: ① Based on the analysis of on-site and indoor identification results of rock debris, the diffusion range of grouting slurry under the coal seam floor area of the Hengyuan Coal Mine II63 mining area was 38.3–44.0 m, and the cement distribution was dense within the diffusion range of horizontal branch hole slurry within 30 meters. The grouting effect was the best in this area. ② Through a rapid identification of on-site rock cuttings and precise identification of indoor rock cuttings, the diffusion range of the slurry obtained was basically consistent, proving the effectiveness of fluorescence tracing of the diffusion range of the slurry. ③ Through comparative analysis, it was believed that under actual grouting conditions such as calculation parameters and boundary constraints, the theoretical calculation and numerical simulation results of the slurry diffusion range were close to the measured results of on-site tracing experiments. ④ Using the data from water pressure tests, grouting parameters, drilling structures, and hydrogeological responses during the tracer test process, taking into account the factors such as gravity, structure, and groundwater runoff, and using SPSS nonlinear fitting software, a formula for calculating the diffusion range of grouting slurry in the bottom plate area of the Hengyuan Coal Mine II63 mining area was obtained. ⑤ Based on the actual geological and hydrogeological conditions of the injection layer in the Hengyuan Coal Mine, using the fitted slurry diffusion range calculation formula, the slurry diffusion range of Z8 site in the II63 mining area was obtained to be 37.8–42.9 m, which was similar to the measured results of the slurry diffusion range tracer test. The calculation formula could be promoted and applied under similar conditions. The on-site tracing engineering test of the diffusion range of grouting slurry in the coal mine floor area not only obtained real data on the diffusion range of slurry, but also clarified the inherent relationship between slurry diffusion and various geological and hydrogeological factors. The diffusion mechanism of grouting slurry for ultra deep and ultra long directional drilling was revealed, and a formula for calculating the diffusion range of slurry was constructed, providing a reference basis for the reasonable design of horizontal branch hole spacing in bottom plate area treatment projects under similar conditions.

**Key words:** regional grouting under coal seam floor; slurry diffusion range; tracer test; calculation formula for slurry diffusion; Hengyuan Coal Mine of Northern Anhui Mining Area

我国煤矿水文地质条件复杂,煤炭资源开发受水害威胁严重。随着矿井开采水平的延伸、开采强度的增大,煤层底板灰岩水害威胁更加严重,安全形势严峻<sup>[1-2]</sup>。淮北煤田位于华北聚煤区南缘,是全国大水矿区之一,水害事故频发<sup>[3]</sup>,如任楼煤矿1996年“3·4”、桃园煤矿2013年“2·3”奥灰突水淹井事故,峰值突水量分别为34 571、29 000 m<sup>3</sup>/h。淮北煤田下组煤(6号或10号)开采,主要威胁水源是底板灰岩水,包括石炭系太原组灰岩水(简称“太灰水”,一般12层)及奥陶系灰岩水(简称“奥灰水”)<sup>[4]</sup>。为防治底板灰岩水害,解放高承压水上煤炭资源,近年来华北煤田普遍采用地面定向钻技术,在煤层底板太原组薄层灰岩中选择合适的“目的层”(多为第3层或第4层灰岩),利用“直孔+多个水平分支孔”,对“目的层”实施区域注浆加固改造,在增加底板隔水层厚度的同时,全面封堵垂向导水通道,该技术习称“底板区域治理”<sup>[5-6]</sup>。

底板区域治理技术具有探查治理时间超前、探查治理空间范围大、水害隐患整体消除效果好等特点<sup>[7-8]</sup>。该技术涉及的关键技术较多,其中与浆液扩散半径密切相关的“水平分支孔”孔间距设计问题,一直受到学界和业界的普遍关注。孔间距设计过大,可能出现治理“盲区”,达不到治理效果,潜在的底板水害威胁不能彻底消除;若孔间距设计过小,会增加治理成本。显然,合理设计水平分支孔孔间距,与浆液扩散半径的精准度密切相关。

目前,底板区域治理工程方案设计中,水平分支孔孔间距设计多依赖于经验,有一定的盲目性,制约了治水效果及治水成本。受注地层(即“目的层”)地质及水文地质条件复杂多变,高压注浆过程中浆液性质、地层结构构造等不确定性较大,浆液扩散过程极具隐蔽性,浆液扩散机理及范围难以预测。

关于注浆浆液扩散,学者已经进行大量研究,并取得丰富成果。王东亮、韩磊、刘光军等<sup>[9-11]</sup>基于数值模拟技术,分别建立单一裂隙注浆、大坝灌浆、地层土体劈裂注浆模型,分析了注浆压力、浆液密度、渗透系数、孔隙度等因素对浆液扩散的影响。谷拴成、张二蒙、李建等<sup>[12-14]</sup>分别设计了裂隙动水(在注浆前就存在水流流动)注浆、覆岩隔离注浆室内相似材料试验,探讨了浆液在裂隙中或无压段(关键层下方裂隙形成的初始阶段)的扩散、充填规律,分析了参数之间的联系。余永强、潘东东等<sup>[15-16]</sup>分别研制了一套高温富水环境下破碎岩体注浆试验装置、复杂岩溶裂隙—管道介质注浆相似材料模拟试验系统,揭示了隧道工

程高温裂隙岩体注浆浆液的扩散规律,并基于相似材料试验进行了室内验证。翟明磊等<sup>[17]</sup>自主研发了可视化变开度裂隙注浆模拟试验系统,研究裂隙岩体注浆过程中的浆液渗流—岩体变形耦合作用。翟明磊和白海波<sup>[18]</sup>建立了考虑浆液流动与岩体变形耦合作用的裂隙注浆扩散理论模型,模型参数取值参照工程实例,开展了浆液扩散机制研究及影响因素分析。

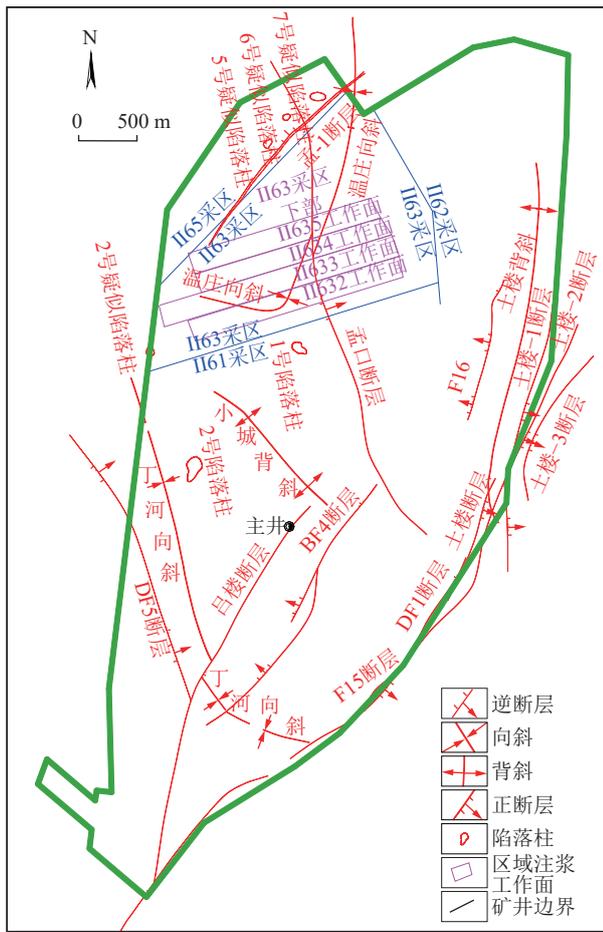
然而,上述研究体现在数值模拟或室内相似材料试验层面,参数设置、条件假设等,与实际工况差距较大。虽然矿山帷幕注浆行业标准中已建立有传统的竖直注浆孔孔距近似计算公式<sup>[19]</sup>,可以计算出浆液扩散范围,但该公式是否适用于华北矿区大规模底板区域治理工程中的水平分支孔孔间距设计,有待进一步实践检验。

现有的注浆理论多适用于各向同性、均质等非常理想的条件,无法表征复杂多变的地质、水文地质条件,因而所计算的浆液扩散半径失真在所难免。尤其是超深超长钻、直孔加水平分支孔注浆技术,是近10a来引进煤矿深部开采防治水工程中,关于浆液扩散半径的注浆理论较少。从技术需求侧看,基于实际工况的浆液扩散现场实测与机理研究受到企业和学界的广泛期待。皖北煤电恒源煤矿底板区域治理工程量较大,特别是深部资源开采,将有数十亿元的注浆工程,因而有必要查清浆液扩散范围真实数据。

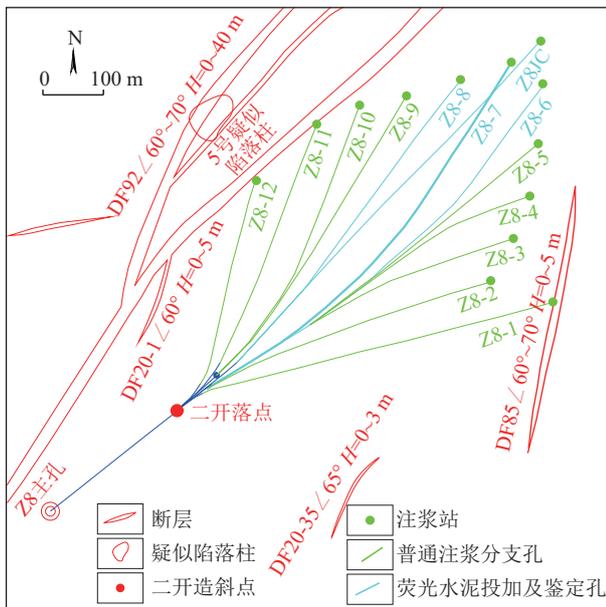
为此,笔者以淮北煤田恒源煤矿为研究基地,利用Ⅱ63等采区底板区域治理工程,设计煤层底板区域注浆浆液扩散范围(半径)的现场示踪试验方案,通过向一个注浆孔水泥浆液中投加示踪剂,在其他钻孔岩屑中鉴别含示踪剂水泥的方法,确定浆液扩散范围,并结合浆液扩散影响因素分析,建立恒源煤矿地质及水文地质条件下的浆液扩散半径计算公式,为类似条件下的底板区域治理工程中水平分支孔合理设计提供参考依据。

## 1 示踪试验场地概况

恒源煤矿位于淮北煤田的睢萧矿区,总体上为一走向NNE,倾向NW的单斜构造,次级褶曲较为发育,使局部地层呈NE或NW向(图1)。地层倾角一般在3°~15°,受构造影响局部倾角变化较大。矿井范围内无基岩出露,均为新生界松散层所覆盖,钻探揭露的地层有奥陶系(O<sub>1+2</sub>)、石炭系(C<sub>2+3</sub>)、二叠系(P)、新近系(N)和第四系(Q)。本矿井含煤地层为石炭—二叠系,钻孔揭露煤系地层总厚度大于800 m,为一套连续的海陆过渡相及陆相碎屑岩和可燃有机岩沉积。



(a) 恒源煤矿简易构造及区域注浆概况



(b) Z8场地区域注浆水平分支孔设计

图1 恒源煤矿构造略图及Z8场地水平分支孔平面分布  
Fig.1 Outline of Hengyuan Coal Mine structure and horizontal branch hole layout plan of Z8 site

该煤矿水文地质类型为复杂型,下组煤(6煤)开采的主要威胁水源是底板灰岩水(图2)。随着矿井向

深部延伸开采,“三高”(高地压、高水压、高地温)条件下,底板太灰水头增高,突水系数增大,底板灰岩突水威胁增大。同时,矿井所在的濰萧矿区曾实揭15个岩溶陷落柱。仅通过传统的井下底板注浆,达不到安全开采的要求。经论证,在地面实施定向钻高压注浆加固改造太原组三灰(L<sub>3</sub>),以满足安全突水系数的要求。自2016年1月—2022年5月,恒源煤矿开始对II63采区的4个工作面(II632、II633、II634、II635工作面)、II63采区下部及II65采区范围内的底板灰岩(L<sub>3</sub>)进行区域注浆加固改造(图1(a))<sup>[20]</sup>。

Z8钻场共设计Z8-1、Z8-2等12个水平分支孔(图1(b),其中H为断层的断距)。该治理区域灰岩地层稳定性较好,渗透性较差,具有较好的代表性,各分支孔钻进过程中全程钻井液正常消耗,漏失量0~1 m<sup>3</sup>/h,压水试验显示,本区域地层注浆前平均渗透系数为8.3×10<sup>-4</sup> m/d。

## 2 示踪试验方案设计

### 2.1 示踪剂选取与投放

#### 2.1.1 基本原理

注浆浆液中加入适当示踪剂,通过高压注浆注入受注层示踪孔。施工追踪孔,取岩屑观测其示踪剂情况,若含有示踪剂,表明浆液已扩散至追踪位置;若不含示踪剂,说明浆液没有扩散至追踪位置。基于该原理,开展浆液扩散示踪试验。

#### 2.1.2 示踪剂选取

所选示踪剂首先应遵循环境友好原则。经多次试验筛选,最终选用荧光粉作为本次示踪试验的示踪剂<sup>[21-22]</sup>。选用的荧光粉在暗环境下用365 nm紫外线灯照射时产生荧光效果,荧光醒目、辨识度高、无毒无害,溶于水后无色透明,不改变原有体系的颜色,而且呈化学惰性,不与加入的产品体系中化学成分发生反应,不改变产品的原有理化性质。此外,荧光粉耐酸碱,耐氯漂,不受加入产品体系酸碱度的影响。一般每吨水性产品中加入约10 g荧光粉即可检测出荧光效果<sup>[23-24]</sup>。

将荧光粉按一定比例加入相对密度为1.5的浆液(水灰比1:1)中,通过室内多次试验验证,含荧光水泥鉴别效果较好。为保证较好的荧光效果,每吨水中加入荧光粉25 g。图3(a)为纯含荧光水泥,整体呈荧光蓝;图3(b)为含荧光水泥与细沙、灰岩颗粒等混合后效果,荧光灯照射下,荧光水泥颗粒醒目易分辨;图3(c)、(d)为将荧光水泥与细沙、灰岩颗粒等混合,加水稀释2500倍,放置24 h后的鉴别效果,含荧光水泥醒目易分辨。

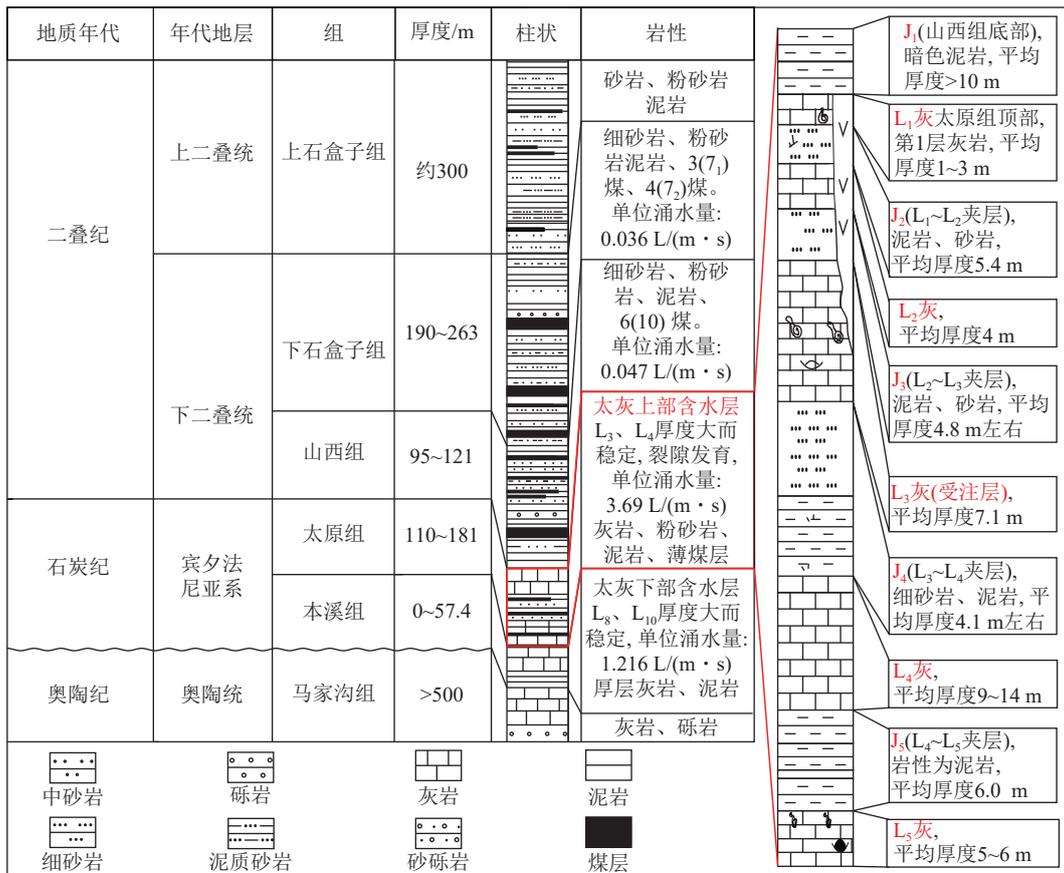


图 2 恒源煤矿下组煤顶底板综合水文地质柱状图

Fig.2 Comprehensive hydrogeological bar chart of the coal roof and floor in the lower group of Hengyuan Coal Mine

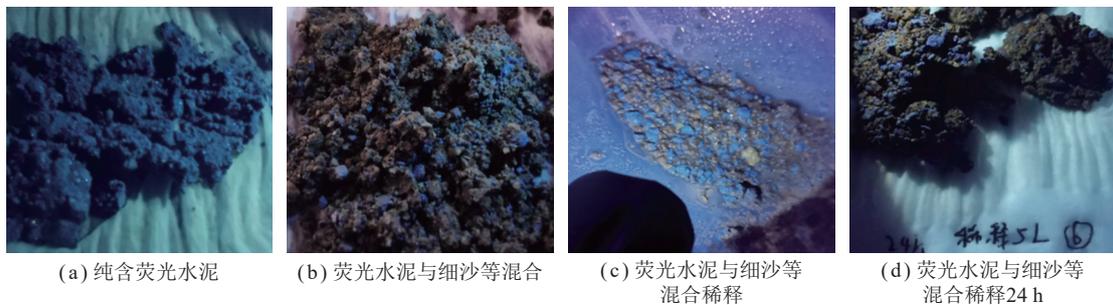


图 3 荧光水泥室内鉴别

Fig.3 Indoor identification of fluorescent cement

2.1.3 示踪剂投放

为提高现场投加荧光粉的精度, 将其配制成一定质量分数的荧光剂溶液, 以尽量减少操作可能带来的误差。经不同比例配制及比较分析, 最终确定配制的荧光剂溶液质量分数为 2.5%, 即 100 g 荧光剂溶液中由 97.5 g 水和 2.5 g 荧光粉组成。若注入相对密度为 1.2 的浆液, 则需水量为 1.8 t, 按 1 t 水需荧光剂 25 g 计, 则每 2 m<sup>3</sup> 浆液需荧光剂 45 g, 考虑 5% 损耗, 则需投入荧光剂溶液 1 890 g, 详见表 1。

恒源煤矿一级搅拌池单次搅拌水泥浆液 2 m<sup>3</sup>, 每次搅拌 3 min 形成粗浆, 然后送二级搅拌池。注浆初期注入相对密度 1.2 浆液, 待粗浆从一级搅拌池出来

进入二级搅拌池时, 将提前称好的 1 890 g 荧光剂溶液投放于粗浆中, 随粗浆一起进入二级搅拌池, 并以此类推, 循环投放。当注入相对密度 1.3、1.4 浆液时, 则需分别投入 1 785.2、1 680.0 g 荧光剂溶液 (表 1), 并做好投放时间与投放量记录。

2.1.4 示踪剂检验分析

投放荧光剂后, 从地面注浆站二级搅拌池取相对密度 1.2、1.3 浆液样品, 待其凝固结石后, 取出结石体, 暗环境下 365 nm 荧光灯照射, 看其荧光情况 (图 4)。其中, 图 4(a) 为含荧光水泥浆液结石粉碎后, 荧光灯照射效果; 图 4(b) 为粉碎的结石碎屑与 8 号场地取出的灰岩岩粉混合在一起的荧光效果。可以看出, 含荧

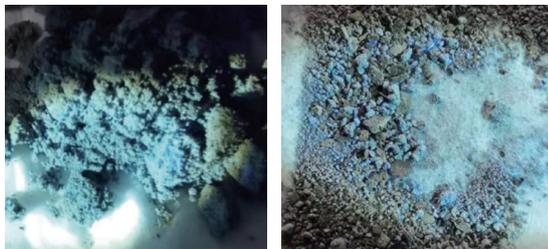
表 1 水泥浆液投加荧光剂溶液统计

Table 1 Statistical table for adding fluorescent agent solution to cement slurry

相对密度	水灰比	所需质量(2 m <sup>3</sup> 浆液)/kg		荧光粉质量/g	考虑5%荧光粉损耗质量/g	荧光剂溶液质量/g
		水泥	水			
1.2	3.00	600	1 800	45.0	47.25	1 890.0
1.3	1.89	900	1 700	42.5	44.63	1 785.2
1.4	1.33	1 200	1 600	40.0	42.00	1 680.0
1.5	1.00	1 500	1 500	37.5	39.38	1 575.2
1.6	0.78	1 800	1 400	35.0	36.75	1 470.0
1.7	0.62	2 100	1 300	32.5	34.13	1 365.2

注:① 注浆站一级搅拌池粗浆量为2 m<sup>3</sup>;② 每吨水加25 g荧光粉;③ 荧光剂溶液按水粉质量比为39:1配制(即质量分数2.5%),再换算成每2 m<sup>3</sup>浆液所需荧光剂溶液的质量。

光水泥结石整体呈荧光蓝色,与灰岩岩屑混合后,含荧光水泥颗粒醒目标易区分。



(a) 荧光水泥结石粉碎 (b) 荧光水泥结石粉碎与岩粉混合

图 4 Z8-7 孔注入浆液结石荧光情况

Fig.4 Fluorescence of grouting slurry stones of hole Z8-7

## 2.2 示踪试验工程

(1) 示踪试验工程包括 1 个主孔(直孔 Z8)、3 个水平分支孔(Z8-6、Z8-7、Z8-8)和 1 个与 Z8-7 孔交叉的分支检测孔(Z8JC)。目标治理区水平分支孔孔间距为 50~70 m(图 5)。

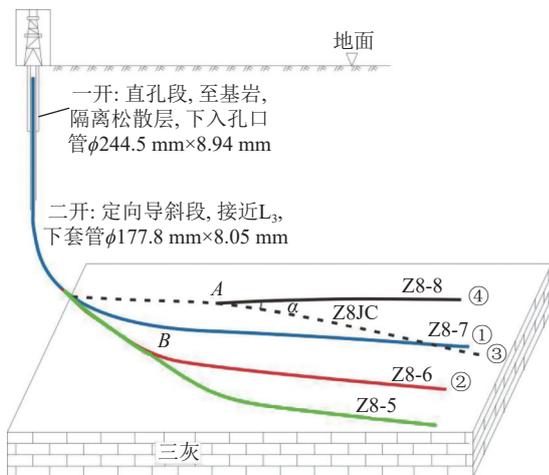


图 5 浆液扩散范围示踪试验工程示意

Fig.5 Schematic diagram of slurry diffusion range tracing test engineering

(2) Z8-7 水平分支孔总长 1 763 m, 其中“目的层”顺层段长 619 m; Z8JC 检测孔顺层钻进, 长 737 m。

(3) 钻孔施工顺序: 先施工 Z8-7 孔, 并在该孔浆液中投加示踪剂; 水泥浆候凝期结束后施工 Z8-6 孔, 完钻后注浆; Z8-6 孔候凝结束后施工 Z8JC 孔, 通过岩屑鉴别追踪到 Z8-7 孔含示踪剂水泥后, 持续钻进并与 Z8-7 孔相交, 穿过 Z8-7 孔后继续追踪 40 m 左右, 以进一步确认岩屑中是否含示踪剂水泥, Z8JC 孔完钻后注浆; 最后在 Z8JC 孔 A 点, 按角度  $\alpha$ (30°左右) 侧出施工 Z8-8 孔, 完钻后注浆。其中, Z8-6、Z8JC、Z8-8 孔在顺层段钻进过程中加密捞取岩屑以检测含示踪剂水泥, 通过鉴别及综合分析, 确定 Z8-7 孔浆液扩散范围(半径)。

## 2.3 岩屑样采取

Z8-6 孔, 由已施工的 Z8-5 顺层分支孔 1 330 m 处(图 5 中 B 点)侧钻分出, 钻至 1 772.13 m 完钻, 顺层段长约 442 m。在 1 125~1 330 m 侧钻孔段, 每 1 m 捞取 1 次岩屑; 在 1 330 m 至终孔, 每 0.5 m 捞取 1 次岩屑。总计取岩屑样 890 个。

Z8JC 孔在 Z8 主孔 1 074 m 进三灰侧出, 钻至 1 810.83 m 完钻, 顺层段长 737 m。1 046~1 060 m 孔段, 每 1 m 捞取 1 次岩屑; 从 1 060 m 至终孔, 每 0.5 m 捞取 1 次岩屑。本孔共取岩屑样 1 517 个。

Z8-8 孔, 从 Z8JC 孔 1 200 m(图 5 中 A 点)侧出, 钻至 1 675.68 m 完钻, 顺层段长 476 m。每 0.5 m 捞取 1 次岩屑, 共取岩屑样 477 个。

## 3 结果与讨论

### 3.1 示踪试验岩屑现场快速鉴别与成果

#### 3.1.1 Z8-6 孔岩屑快速鉴别

为在现场及时了解浆液扩散范围, 需于现场快速鉴别新取岩屑中含荧光水泥的情况。从所捞取不同钻进深度的岩屑样中, 约每隔 5 m 抽取 1 个样进行现场鉴别(参考提前准备好的治理区域代表性的砂泥岩、

灰岩及水泥标样)。Z8-6孔现场鉴别岩屑样42个(图6),可以看出,在孔深小于1501m孔段岩屑中多发现有水泥颗粒,其中荧光水泥主要集中于孔深小于1141m孔段。因Z8-7孔和Z8-6孔分别在1144m和1330m处从Z8-5孔分支侧出,且Z8-5孔(图1(b))早于Z8-7孔注浆,则荧光水泥主要来自于Z8-7孔注浆。在1158~1501m孔段(距Z8-7孔0~40m、距Z8-5孔0~10m)岩屑中,多处发现水泥颗粒,偶有大颗粒。但该孔段中水泥颗粒含荧光不明显,且距Z8-5孔较近(Z8-6孔与Z8-5孔间距小于Z8-6孔与Z8-7孔间距),说明Z8-6孔受Z8-5孔注浆影响较大,同时反映Z8-5孔注浆浆液扩散范围超过10m。

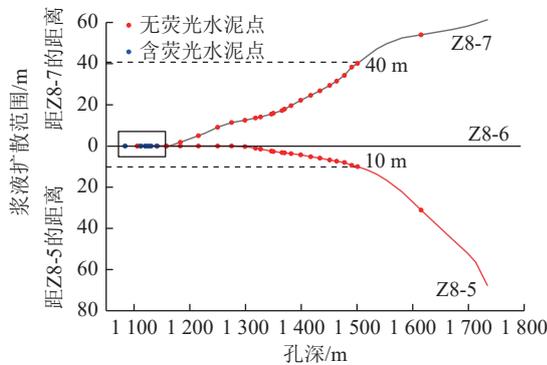


图6 Z8-6孔岩屑现场鉴别及其距Z8-7、Z8-5孔的距离

Fig.6 On site identification of rock debris from hole Z8-6 and its distance from holes Z8-7 and Z8-5

### 3.1.2 Z8JC孔岩屑快速鉴别

Z8JC孔现场鉴别岩屑样品148个。如图7所示,岩屑中含水泥样品较多,主要分布在距Z8-7孔36~42m内,且在距Z8-7孔14~29m以内水泥样品分布较密;在距Z8-7孔48~53m,偶有发现水泥;含荧光水泥样品多分布在距Z8-7孔12~15m内。Z8JC初始段位于Z8-7孔西侧(图1(b)),与Z8-5、Z8-6孔较远,不受已施工Z8-5孔、Z8-6孔注浆影响。因此,Z8JC

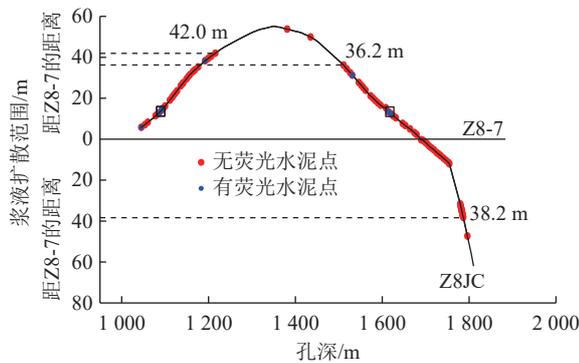
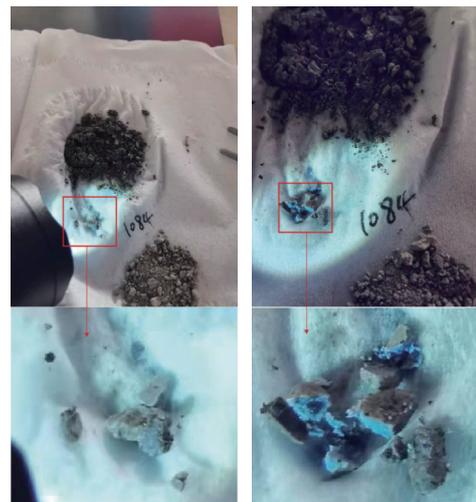


图7 Z8JC孔岩屑现场鉴别及至Z8-7孔的距离

Fig.7 On site identification of rock debris from hole Z8JC and its distance to hole Z8-7

孔鉴别到的水泥(含荧光水泥)应该均来自于Z8-7孔。岩屑含荧光较少,究其原因,主要是岩屑颗粒细小,在被带回地表的过程中,钻井液高压冲刷会带走一部分荧光,使荧光变淡;其次在野外鉴别时,光线比较强,也会影响到荧光鉴别效果(图8)。从图8还可以看出,水泥颗粒表面呈灰色,荧光较弱,而剖开水泥颗粒内部荧光明显,说明外表面荧光被冲刷减弱,内部仍保留荧光,也就是说颗粒的大小对荧光水泥鉴别影响较大。



(a) 光线较强 (b) 光线较暗

图8 Z8-6孔1084m处岩屑含荧光水泥情况

Fig.8 Rock debris containing fluorescent cement at 1084 m of hole Z8-6

### 3.2 示踪试验岩屑室内精准鉴别与成果

为精准鉴别水泥及含荧光水泥,追踪浆液扩散范围,将Z8-6、Z8JC、Z8-8三支孔钻取的岩屑全部带回实验室逐个鉴别。基于岩屑的颜色、成分及占比、形状、颗粒大小等物理特征,借助盐酸稀溶液、显微镜、放大镜等工具,首先寻找岩屑中水泥,然后盐酸浸湿看其气泡反应情况以确定是否为灰岩,接着在暗光环境下,用365nm紫外灯照射,观察荧光情况,并拍照留存。

#### 3.2.1 Z8JC孔岩屑精准鉴别

Z8JC孔鉴别出含水泥颗粒样品216个,室内鉴别结果显示(图9),在1045.0~1228.5m深度(距Z8-7孔0~44m),含水泥颗粒及荧光水泥的岩屑样品均较多,且分布均匀、密集;在1228.5~1457.0m深度(距Z8-7孔44.0~55.2m),孔段长达230m的范围内,含水泥颗粒样品较少,仅有4个,无荧光,且分布分散、不均匀。经统计,在1050~1250m孔段,每50m孔段发现水泥点数量为56、44、20、3个,其数量占比分别为25.9%、20.4%、9.3%、1.4%(1045~1050m孔段4个水泥点,未统计在内);在1250~1450m孔段,每50m

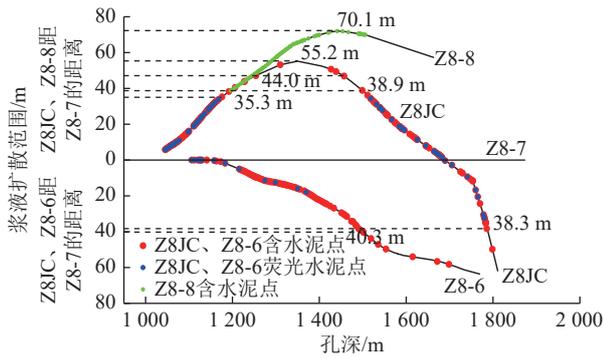


图9 三孔岩屑室内鉴别及至Z8-7孔的距离

Fig.9 Indoor identification of rock debris from three holes and their distance to hole Z8-7

发现水泥点数量为1、1、0、1个,其数量占比分别为0.5%、0.5%、0%、0.5%。考虑到水泥点分布特征及水泥鉴别可能有误差,将数量占比1.5%作为水泥有无分界点,则Z8JC孔1228.5m处有水泥,该处水泥点距Z8-7孔44m。

在Z8JC孔1458.0~1785.5m(Z8JC孔与Z8-7孔相交,距Z8-7孔34.4~0~38.3m)孔段,含水泥颗粒样品较多,荧光水泥样点亦较多,分布密集;Z8JC孔1785.5m至终孔1810.8m(即超出距Z8-7孔38.3m范围)孔段几乎没有水泥。经统计,在1450~1810m孔段,每50m发现水泥点数量为3、13、22、11、15、5、16、1(仅1800~1810m孔段)个,数量占比分别为1.4%、6.0%、10.2%、5.1%、6.9%、2.3%、7.4%、0.5%。亦将岩屑中数量占比1.5%作为水泥有无分界点,则在Z8JC与Z8-7相交前1499m处有水泥,距Z8-7孔38.9m;在与Z8-7相交后1785.5m处亦有水泥,距Z8-7孔38.3m。即在Z8JC孔1499.0~1785.5m(距Z8-7孔38.9~0~38.3m)孔段受到Z8-7注浆扩散影响。

综上,Z8JC孔岩屑室内鉴别显示,将每50m深度范围数量占比1.5%作为水泥有无分界点,Z8-7孔浆液扩散范围为38.3~44.0m。超过该区间内仍有个别水泥颗粒,但数量占比低于1.5%,推测是由于构造影响(3.3.1小节),已不具有正常块段浆液扩散范围的示踪意义。同时发现Z8-7孔两侧浆液扩散范围稍有不同,在两孔交叉之前,浆液扩散范围稍大为38.9m,在两孔交叉以后,浆液扩散范围为38.3m。

### 3.2.2 Z8-6孔岩屑精准鉴别

Z8-6孔鉴别出含水泥颗粒样品91个,室内鉴别(图10)显示,在深1106~1501m(即距Z8-7孔0~40.3m)孔段,水泥颗粒分布密集;在1502~1769m(即距Z8-7孔43.0~63.6m),水泥颗粒较少,零星分布。其荧光水泥也较少,主要分布于距Z8-7孔15m范围内。此

外,Z8-6孔段距Z8-7孔相对较远,距Z8-5孔较近,因而受Z8-5孔注浆(无荧光剂)影响较大。

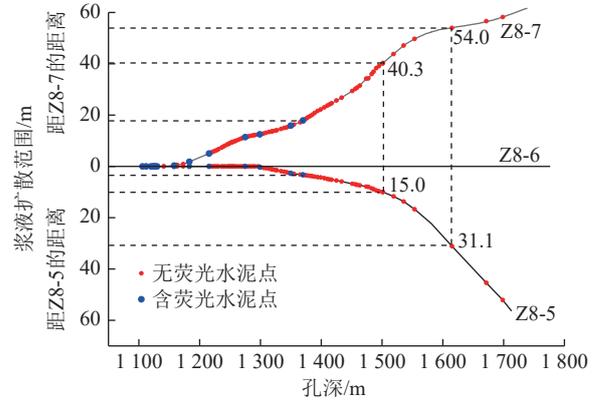


图10 Z8-6孔岩屑室内鉴别及至Z8-7、Z8-5的距离

Fig.10 Indoor identification of rock debris from hole Z8-6 and its distance from holes Z8-7 and Z8-5

### 3.2.3 Z8-8孔岩屑精准鉴别

Z8-8孔钻进是在Z8-7及Z8JC孔完钻注浆后施工的,其中Z8JC孔注浆浆液中未投加荧光剂。Z8-8孔岩屑样品中鉴别出含水泥颗粒样品190个,如图11所示。在深1196~1441m孔段(距Z8-7孔38.7~72.0m,距Z8JC孔0~32.5m)和1442~1506m(距Z8-7孔72.0~69.9m)孔段,含水泥颗粒岩屑样品较多,分布密集;在超出1506m深的孔段中,岩屑几乎没有水泥颗粒。所有找出水泥颗粒的岩屑样品,荧光效果均不明显。Z8-8孔1196~1441m孔段距Z8JC较近(0~32.5m),距Z8-7孔较远(38.7~72.0m),且已发现水泥颗粒中基本不含荧光,则说明Z8-8孔岩屑中水泥主要受Z8JC孔注浆影响,且Z8JC孔浆液扩散范围已至32.5m,同时说明Z8-7浆液扩散范围一般不超过38.7m,尚未达到Z8-8孔。

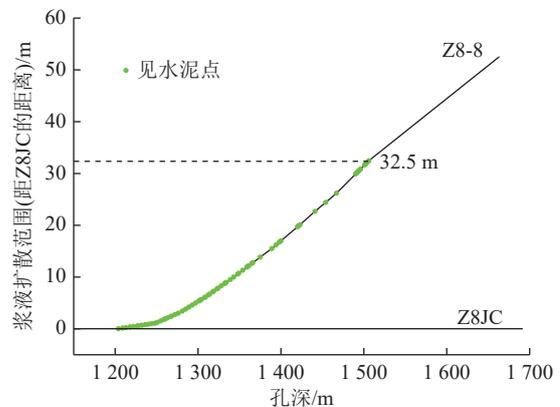


图11 Z8-8孔岩屑鉴别及至Z8JC孔的距离

Fig.11 Identification of rock debris from hole Z8-8 and its distance from hole Z8JC

综上,现场快速鉴别可知Z8场地浆液扩散范围(半径)为36~42m,室内精准鉴别结果显示Z8场地

浆液扩散范围(半径)为 38.3~44.0 m, 结果相近。证明了浆液扩散范围现场快速荧光示踪方法的可靠性。但因现场鉴别中, 取样稀疏且鉴别简单, 岩屑特征体现不够明显, 浆液扩散范围误差相对较大。而室内鉴别, 样品量多、分布密集、鉴别环境较好、鉴别误差相对较小, 所以浆液扩散范围依据室内鉴别结果取值为 38.3~44.0 m。同时发现, 距 Z8-7 孔 30 m 以内水泥分布密集, 30 m 以外水泥分布逐渐减少, 说明水平分支钻孔注浆效果最佳的浆液扩散范围为 30 m。

3.2.4 现场实测与计算结果比较

为全面评价浆液扩散范围示踪效果, 同时进行了基于底板区域注浆实况的浆液扩散范围理论公式近似计算和数值模拟计算。

恒源煤矿 II 63 采区底板区域治理工程中, 多注入相对密度 1.2、1.3、1.4 的水泥浆液, 相对密度为 1.5、1.6 的浆液使用较少, 即注入浆液多为牛顿型流体。根据我国地质矿产行业标准 (DZ/T 0285—2015) 中矿

山帷幕注浆中理论公式近似计算垂直孔浆液扩散半径<sup>[19]</sup>。

(1) 按牛顿流体计算浆液扩散半径。计算公式为

$$R = \sqrt[2.21]{\frac{9.3 \times 10^{-8} (P - P_0) t b^2 r_0^{0.21}}{\eta}} + r_0 \quad (1)$$

式中,  $R$  为注浆扩散半径, m;  $P$  为孔底注浆压力, Pa;  $P_0$  为裂隙内静水压力, Pa;  $t$  为注浆时间, s;  $b$  为裂隙宽度, m;  $r_0$  为注浆孔半径, m;  $\eta$  为浆液初始黏度, Pa · s。

基于恒源煤矿 II 63 采区实际地质水文地质条件及注浆工况, 浆液扩散半径近似计算主要涉及的参数列于表 2。计算时不同相对密度浆液孔口压力均设为平均值 11 MPa, 三灰静水压力设为平均值 4 MPa, 注浆持续时间为不同相对密度浆液注浆时间总和, 为 67.6 h, 近似计为 3 d。设隙宽为 5 mm, 计算得到 Z8-7 孔注浆浆液扩散半径不超过 43.5 m。

表 2 浆液扩散半径计算相关参数

Table 2 Parameters related to the calculation of slurry diffusion radius

相对密度	动力黏度/(mPa · s)	注浆时间/h	流量/(L · min <sup>-1</sup> )	平均孔口压力/MPa	平均孔底压力/MPa	静水压力/MPa	注浆孔半径/mm
1.2	1.4	11.2	500	9.1	18.7	3.13 ~ 4.49	76.2
1.3	7.7	41.8	500	11.1	21.5	3.13 ~ 4.49	76.2
1.4	11.0	7.0	500	12.0	23.2	3.13 ~ 4.49	76.2
1.3(结束前)	1.4	7.6	400 ~ 100	12.1	22.5	3.13 ~ 4.49	76.2

(2) 数值模拟计算浆液扩散半径。基于浆、水二相流理论, 使用 Comsol 软件建立浆液扩散数值模型(详见文献[20]), 概念模型基于注浆实况构建(图 12), 相关参数按 II 63 采区受注层(L<sub>3</sub>) 地质条件及实际注浆工况换算后输入(表 3)。设模型顶、底板(L<sub>3</sub> 顶、底) 为无流量无通量边界, 静水压力设为实测压力平均为 3.5 MPa。地下水密度为 1 000 kg/m<sup>3</sup>, 动力黏度为 0.001 Pa · s。浆液和地下水的相对渗透率参数是饱和度的函数, 为其饱和度的平方。

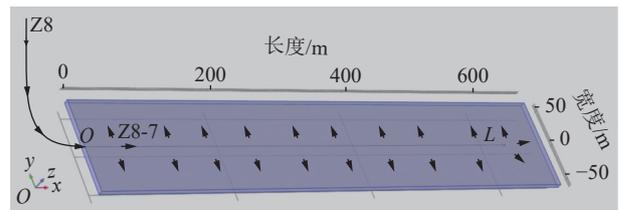


图 12 Z8 场地浆液驱水概念模型

Fig. 12 Conceptual model of slurry flooding of Z8 site

表 3 数值模型相关参数设置

Table 3 Numerical model related parameter settings

相对密度	注入时间/h	注入孔的质量流率/(kg · s <sup>-1</sup> )	注入孔向内质量通量/(kg · (m · s) <sup>-1</sup> )	密度/(kg · m <sup>-3</sup> )	动力黏度/(Pa · s)
1.2	11.2	10.00	0.016 16	1 200	0.001 4
1.3	41.8	10.83	0.017 50	1 300	0.007 7
1.4	7.0	11.67	0.018 85	1 400	0.011 0
1.3(结束前)	7.6	10.00	0.016 16	1 300	0.001 4

设模型孔隙率为 0.05, 渗透系数为 0.001 5 m/s 时, 模型运行 70 h(实际注浆时间) 后浆液扩散范围为 41.1 m(图 13)。计孔隙率 0.05、渗透系数 9.6×10<sup>-5</sup>~9.6×

10<sup>-2</sup> m/s 时, 浆液扩散范围为 13~60 m; 孔隙率 0.1、渗透系数 9.6×10<sup>-5</sup>~9.6×10<sup>-2</sup> m/s 时, 浆液扩散范围为 7.4~43.7 m; 孔隙率 0.15 时, 渗透系数 9.6×10<sup>-5</sup>~

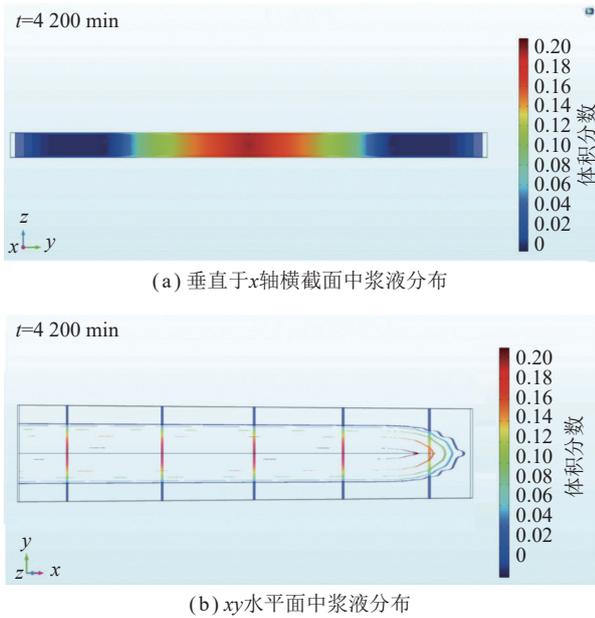


图 13 Z8-7 浆液扩散模型运行 70 h 结果

Fig.13 Results of Z8-7 slurry diffusion model running for 70 h  $9.6 \times 10^{-2}$  m/s 时, 浆液扩散范围为 6.0~31.9 m。

综合分析可知, 在计算参数、边界约束等最大限度接近实际注浆工况条件下, 浆液扩散范围理论公式及数值模拟计算结果与现场示踪试验实测结果一致性较好。

### 3.3 浆液扩散范围计算公式拟合

在恒源煤矿现场示踪试验过程中, Z8-6、Z8-7、Z8JC 及 Z8-8 孔压水试验及注浆参数、钻遇构造及含水层水文地质响应等, 均保存完整, 为阐明浆液扩散的影响因素, 揭示地面定向钻区域注浆浆液扩散机理提供了有利条件, 也为浆液扩散范围(半径)计算公式拟合提供了可能。

#### 3.3.1 浆液扩散影响因素

浆液扩散范围与浆液相对密度、静水压力、浆液动力黏度、浆液屈服强度等密切相关<sup>[9-10,25]</sup>。除此之外, 浆液扩散范围还受到重力、构造、地下水径流等影响。

(1) 重力。实际注浆过程中, 浆液受到重力作用而呈现下沉趋势。通过模拟发现, 相同条件下考虑重力作用时, 浆液往下部沉落, 且扩散范围增大<sup>[20,26]</sup>。

(2) 构造。已有研究几乎均是在假定岩层结构、构造均匀的条件下展开, 而实际地质与水文地质条件比较复杂, 如断层发育的不定向性、裂隙宽度不均、孔隙度不同等。本次示踪试验中, Z8JC 孔岩屑鉴别结果显示, Z8-7 孔注浆浆液扩散范围 38.3~44.0 m, 但在超过该范围的区域偶有水泥颗粒, 则可能受到构造裂隙影响, 浆液沿该裂隙运移。在构造因素中, 一定程度交叉切割断层的分支孔中, 浆液扩散范围受构造的影响较为明显。

(3) 地下水径流。示踪试验 Z8 钻场底板区域治理范围内灰岩水水位等值线及其流场如图 14 所示。在 Z8JC 孔室内鉴别中发现 Z8-7 孔两侧浆液扩散范围稍有不同, 在与 Z8-7 孔交叉前的孔段位于 Z8-7 孔西侧, 浆液扩散方向更顺灰岩水径流方向, 浆液扩散范围稍大 (38.9 m), 在两孔交叉之后的孔段位于 Z8-7 孔东侧, 浆液扩散方向偏向逆水流方向, 浆液扩散范围稍小 (38.3 m), 推测主要是由于浆液运移受到静水压力和渗流阻隔效应不同, 在更顺水流方向受到的静水压力和渗流阻隔小, 其他相同条件下浆液扩散范围稍大; 在偏逆水流方向受到的静水压力和渗流阻相对大, 则浆液扩散范围稍小。

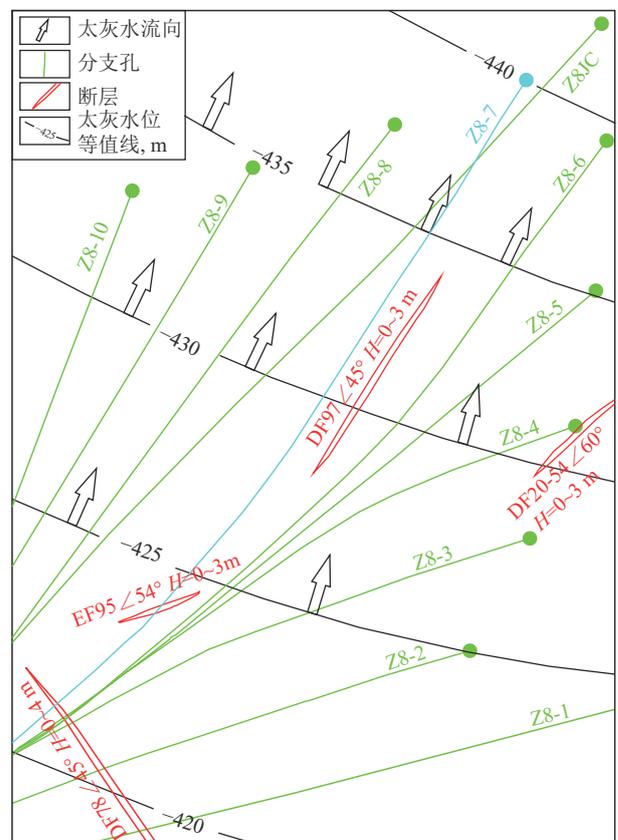


图 14 Z8 钻场区域治理范围内局部断层构造及灰岩水流场  
Fig.14 Local Fault structures and limestone flow field within the control scope of Z8 drilling field area

(4) 取样误差。现场实际取样过程中, 分支孔侧钻初始孔段每 1 m 捞取 1 次岩屑样, 分支孔侧出后孔段每 0.5 m 捞取 1 次岩屑样, 一定程度上提高了岩屑鉴别的精确度, 但是在实际取样过程中, 不能将 0.5 m 深度范围内的所有岩屑都能取到, 只取了约有 1/3 的岩屑, 且在洗刷、晾晒、烘干等过程中均存在样品损耗情况, 最终取到的岩屑样仅有相应孔段总样品的 1/5。

#### 3.3.2 浆液扩散范围计算公式

基于最小二乘法非线性数学模型:

$$\min \sum_{i=1}^n [f(t_i, X) - c_i]^2 \quad (2)$$

给定  $n$  组离散数据  $(t_i, c_i)$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ , 寻找拟合曲线  $f(t, X)$ , 使得拟合的残差最小。其中函数  $f$  为非线性,  $X=(x_1, x_2, x_3, \dots, x_r)$ , 为需要估计的参数。即通过多次迭代使最小二乘即优化残差 ( $e$ ) 的平方和  $\min \sum_{i=1}^n e_i^2$  达到最小<sup>[27]</sup>。

根据示踪试验取得成果及实际注浆工况参数, 基于 SPSS 软件最小二乘法非线性拟合, 经多次寻找设定拟合曲线, 获得恒源煤矿浆液扩散范围计算公式 (非线性拟合残差为 0) 为

$$R = \sqrt[0.107]{\frac{(P - P_0 + \rho g) t b^2 r_0^{10.353} (37.486 + \cos \theta)}{\eta}} + r_0 \quad (3)$$

式中,  $\rho$  为浆液密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $g$  为重力加速度,  $9.8 \text{ m/s}^2$ ;  $\theta$  为浆液扩散方向与径流方向夹角, ( $^\circ$ )。

由式 (3) 可知, 考虑浆液重力时, 浆液扩散范围增大; 而浆液密度、浆液扩散方向与径流方向夹角越大时, 浆液扩散范围越小, 体现了重力、浆液密度和地下水径流对浆液扩散的影响。

由于浆液的密度与水不同, 此处孔底注浆压力  $P$  计算公式应为

$$P = P_0 + r_s h / 100 \quad (4)$$

式中,  $P_0$  为孔口注浆压力, Pa;  $r_s$  为浆液的相对密度, 为 1.2~1.6;  $h$  为三灰平均埋深, 此处为 800 m。

设浆液扩散与径流方向一致 (即  $\theta = 0$ ), 三灰隙宽计 5 mm, 根据实际注浆情况, 借助式 (3) 计算得到 Z8-7 浆液扩散范围为 37.8~42.9 m, 与浆液扩散范围示踪试验实测结果 (38.3~44.0 m) 相近, 则所建立浆液扩散范围数学模型基本可靠。因此, 式 (3) 可供恒源煤矿相邻、相近采区底板区域治理水平分支孔孔间距设计时使用, 也可为类似条件下的其他矿区底板区域治理水平分支孔孔间距设计时参考。

## 4 结 论

(1) 通过示踪试验过程中的岩屑现场及室内鉴别, 获得 Z8 场地底板注浆治理区域的浆液扩散范围为 38.3~44.0 m。同时发现, 水平分支孔浆液扩散半径为 30 m 以内, 注浆加固效果最佳。

(2) 通过示踪试验现场岩屑快速鉴别, 得到浆液扩散范围为 36~42 m, 而室内岩屑精准鉴别结果 38.3~44.0 m, 2 种较为接近, 证明了荧光示踪浆液扩散范围的有效性。

(3) 基于示踪试验过程中各钻孔压水试验及注浆参数、钻遇构造及含水层水文地质响应等数据, 阐明了浆液扩散的影响因素, 揭示了地面定向钻区域注浆浆液扩散机理。

(4) 在计算参数和边界约束符合实际注浆工程条件的前提下, 浆液扩散范围理论公式及数值模拟计算结果, 与现场实测结果较为接近。即立足实际注浆工程背景条件, 浆液扩散范围理论计算和数值模拟结果具有参考使用价值。

(5) 浆液扩散范围受到重力、构造、地下水径流等因素影响, 在此基础上借助 SPSS 非线性拟合软件, 得到恒源煤矿注浆浆液扩散范围 (半径) 计算公式, 可供类似条件下的其他矿区参考使用。

## 参考文献(References):

- [1] 武强. 我国矿井水防控与资源化利用的研究进展、问题和展望[J]. 煤炭学报, 2014, 39(5): 795-805.  
WU Qiang. Progress, problems and prospects of prevention and control technology of mine water and reutilization in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(5): 795-805.
- [2] 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.
- [3] GUI H R, LIN M L. Types of water hazards in China Coalmines and regional characteristics[J]. Nat Hazards, 2016, 84: 1501-1512.
- [4] 郭艳, 桂和荣, 魏久传, 等. 区域注浆影响下煤层底板太原组灰岩水地球化学演化规律[J]. 煤炭学报, 2023, 48(8): 3204-3217.  
GUO Yan, GUI Herong, WEI Jiuchuan, et al. Hydrogeochemical evolution law of Taiyuan Formation lime-stone water under coal seam floor caused by the influence of regional grouting[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(8): 3204-3217.
- [5] GUO Y, WEI J C, GUI H R, et al. Evaluation of changes in groundwater quality caused by a water inrush event in Taoyuan Coal Mine, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2020, 79(24): 528.
- [6] GUO Y, GUI H R, WEI J C, et al. Hydrogeochemistry of water in coal measures during grouting treatment of Taoyuan Mine, China[J]. Groundwater, 2021, 59(2): 256-265.
- [7] 郑士田. 两淮煤田煤层底板灰岩水害区域超前探查治理技术[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(4): 142-146, 153.  
ZHENG Shitian. Advanced exploration and control technology of limestone water hazard in coal seam floor in Huainan and Huaibei coalfields[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(4): 142-146, 153.
- [8] 郑士田. 地面顺层孔探注成套技术在底板高压岩溶水害治理中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2018, 30(8): 53-57.  
ZHENG Shitian. Application of complete set of surface bedding borehole exploration and grouting technology on floor high pressure

- karst water hazard governance[J]. *Coal Geology of China*, 2018, 30(8): 53–57.
- [9] 王东亮, 郝兵元, 梁晓敏. 基于流固耦合的单一裂隙浆液扩散规律研究[J]. *采矿与岩层控制工程学报*, 2021, 3(1): 013038.  
WANG Dongliang, HAO Bingyuan, LIANG Xiaomin. Slurry diffusion of single fracture based on fluid-solid coupling[J]. *Journal of Mining and Strata Control Engineering*, 2021, 3(1): 013038.
- [10] 韩磊, 陈建生, 陈亮. 帷幕灌浆扩散半径及数值模拟的研究[J]. *岩土力学*, 2012, 33(7): 2235–2240.  
HAN Lei, CHEN Jiansheng, CHEN Liang. Research on diffusion radius and numerical simulation in curtain grouting[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(7): 2235–2240.
- [11] 刘光军, 岳祁, 金国明. 基于数值模拟的劈裂注浆浆液扩散范围分析[J]. *路基工程*, 2019(6): 103–107.  
LIU Guangjun, YUE Qi, JIN Guoming. Analysis on diffusion scope of fracture grouting slurry based on numerical simulation[J]. *Subgrade Engineering*, 2019(6): 103–107.
- [12] 谷拴成, 孙冠临, 苏培莉, 等. 岩体裂隙动水注浆扩散半径影响试验[J]. *煤田地质与勘探*, 2019, 47(5): 144–149.  
GU Shuancheng, SUN Guanlin, SU Peili, et al. Test of the influence of dynamic water grouting diffusion radius of fractures in rock[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2019, 47(5): 144–149.
- [13] 张二蒙, 沈星宇, 苗葳, 等. 奥灰顶部含水层注浆改造浆液扩散主要影响因素试验研究[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(11): 3536–3549.  
ZHANG Ermeng, SHEN Xingyu, MIAO Wei, et al. Experimental study on the influence of grouting diffusion in fissure aquifer at the top Ordovician limestone[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(11): 3536–3549.
- [14] 李建, 郑恺丹, 轩大洋, 等. 覆岩隔离注浆充填浆液无压阶段扩散规律实验研究[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(S1): 78–86.  
LI Jian, ZHENG Kaidan, XUAN Dayang, et al. Experimental study on slurry diffusion law during the non-pressure stage in overburden isolated grouting[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(S1): 78–86.
- [15] 余永强, 张纪云, 范利丹, 等. 高温富水环境下裂隙岩体注浆试验装置研制及浆液扩散规律[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(7): 2582–2592.  
YU Yongqiang, ZHANG Jiyun, FAN Lidan, et al. Development of grouting test device for fractured rock and analysis of slurry diffusion law under high-temperature water-rich conditions[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(7): 2582–2592.
- [16] 潘东东. 复杂岩溶裂隙-管道介质注浆扩散模拟分析方法及应用[D]. 济南: 山东大学, 2020.  
PAN Dongdong. Simulation analysis method and application of grouting diffusion in complex karst fracture and conduit[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [17] 翟明磊, 李振华, 杜锋, 等. 考虑浆液渗流-岩体变形耦合作用的裂隙注浆模拟试验系统研制与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(4): 878–889.  
ZHAI Minglei, LI Zhenhua, DU Feng, et al. Development and application of grouting simulation test system considering slurry seepage-rock mass deformation coupling effect[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(4): 878–889.
- [18] 翟明磊, 白海波. 基于浆液-岩体耦合效应的裂隙注浆扩散机制研究[J/OL]. *煤炭科学技术*: 1–10 [2024-01-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20231201.1630.008.html>.  
ZHAI Minglei, BAI Haibo. Research on the mechanism of fracture grouting diffusion and its application based on slurry-rock mass coupling effect[J/OL]. *Coal Science and Technology*: 1–10 [2024-01-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20231201.1630.008.html>.
- [19] DZ/T 0285—2015, 矿山帷幕注浆规范[S]. 北京: 中华人民共和国国土资源部, 2015.
- [20] 郭艳, 桂和荣, 魏久传, 等. 煤层底板区域注浆浆液扩散数值模拟及影响因素分析[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(6): 30–39.  
GUO Yan, GUI Herong, WEI Jiuchuan, et al. Numerical simulation of grout diffusion under coal seam floor and analysis of influencing factors[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(6): 30–39.
- [21] 朱玉景, 朱洪亮, 张成富. 一种采用固体示踪剂的井间监测方法: ZL201711087266.4[P]. 2020-06-28.
- [22] 郭艳, 桂和荣, 洪荒, 等. 一种基于水溶性荧光剂的煤田底板注浆防治方法: ZL 202110396318.6[P]. 2023-03-24.
- [23] 李华洋, 邓金根, 冯永存, 等. 油田示踪剂技术的研究现状及发展趋势[J]. *应用化工*, 2023, 52(11): 3163–3168, 3174.  
LI Huayang, DENG Jinggen, FENG Yongcun, et al. Research status and development trend of oilfield tracer technology[J]. *Applied Chemical Industry*, 2023, 52(11): 3163–3168, 3174.
- [24] 顾菁华, 吴益锋. 低渗油田注水用荧光示踪剂评价及优选[J]. *清洗世界*, 2019, 35(10): 17–18.  
GU Jinghua, WU Yifeng. Evaluation and optimization of fluorescent tracer for water injection in low permeability oilfield[J]. *Cleaning World*, 2019, 35(10): 17–18.
- [25] 王强, 冯志强, 王理想, 等. 裂隙岩体注浆扩散范围及注浆量数值模拟[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(10): 2588–2595.  
WANG Qiang, FENG Zhiqiang, WANG Lixiang, et al. Numerical analysis of grouting radius and grout quantity in fractured rock mass[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(10): 2588–2595.
- [26] 杨文才. 基于浆液自重的多孔介质渗透注浆机制研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.  
YANG Wencai. Mechanism of Porous Media penetration grouting based on the self weight of slurry[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021.
- [27] 雍龙泉, 贾伟, 黎延海. 正弦余弦算法求解含有异常值的非线性数据拟合[J]. *安徽大学学报(自然科学版)*, 2023, 47(3): 1–5.  
YONG Longquan, JIA Wei, LI Yanhai. Nonlinear data fitting with outliers based on sine cosine algorithm[J]. *Journal of Anhui University(Natural Science Edition)*, 2023, 47(3): 1–5.