



移动扫码阅读

陈军涛, 朱君, 刘磊, 等. 定向区域注浆三维模拟试验系统研制及应用[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 179-186.

CHEN Juntao, ZHU Jun, LIU Lei, *et al.* Development and application of a three-dimensional simulation test system for directional regional grouting[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 179-186.

定向区域注浆三维模拟试验系统研制及应用

陈军涛^{1,2,3}, 朱君^{1,2}, 刘磊⁴, 李文昕^{1,2}, 李光强¹, 张毅¹, 李昊¹

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013; 3. 山东科技大学 矿业工程国家级实验教学示范中心, 山东 青岛 266590; 4. 山东能源新汶矿业集团有限责任公司 邱集煤矿, 山东 德州 251105)

摘要: 定向区域注浆改造含水层是矿井水害防治的有效途径之一。为研究定向区域注浆浆液扩散规律, 自主研制了定向区域注浆三维模拟试验系统。该系统主要由试验台、注浆系统、注水系统及数据监测等子系统组成, 可实现定向钻孔注浆模拟、浆液三维扩散模拟、高承压水模拟和区域化注浆模拟等功能。系统可独立控制注浆孔单元, 实现多孔、多序次注浆, 借助 6 个注浆孔模拟不同注浆压力、浆液黏度、注浆速率、水灰比等多种参数影响下的浆液流动过程, 并可实现动/静(高)水压环境下浆液扩散过程的实时监测。以 200、250、300 mm 模拟裸孔长度为研究对象, 初步探究了定向注浆作用下裸孔注浆浆液扩散的特征及其效果。研究发现: 在仅有裸孔长度为变量的情况下, 浆液扩散范围不会随裸孔长度的线性增加而同步线性增加; 短裸孔的浆液结石体呈现以钻探裸孔为轴心的圆柱状, 长裸孔的浆液结石体呈现以钻探裸孔为轴心的圆台状; 裸孔增加相同的长度, 裸孔越长, 浆液在裸孔两端的扩散范围差值越大, 同时压力损失越多, 浆液扩散的距离越小。将试验所得浆液扩散半径与 Maag 公式计算所得浆液扩散半径进行对比, 发现注浆裸孔长度为 200 mm 时, 两数值仅相差 2.8%, 试验结果符合 Maag 球形扩散理论规律, 验证了本试验系统的科学性与合理性。

关键词: 定向注浆; 三维模拟试验系统; 浆液扩散; 浆液-水驱替; 区域化模拟

中图分类号: TD745 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2023)07-0179-08

Development and application of a three-dimensional simulation test system for directional regional grouting

CHEN Juntao^{1,2,3}, ZHU Jun^{1,2}, LIU Lei⁴, LI Wenxin^{1,2}, LI Guangqiang¹, ZHANG Yi¹, LI Hao¹

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China; 3. National Demonstration Center for Experimental Mining Engineering Education, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 4. Qiuji Coal Mine, Shandong Energy Xinwen Mining Group Co., Ltd., Dezhou 251105, China)

Abstract: Directional regional grouting to transform aquifers is one of the effective ways to prevent and control mine water hazards. In order to study the diffusion law of grouting slurry in directional areas, a three-dimensional simulation test system for directional area grouting has been independently developed. The system is mainly composed of test bench, grouting system, water injection system, data monitoring and other subsystems, which can realize directional drilling grouting simulation, three-dimensional slurry diffusion simulation, high pressure water simulation and regional grouting simulation. The system can independently control the grouting hole unit to achieve porous and multi sequence grouting. With the help of six grouting holes, the slurry flow process is simulated under various parameters such as different grouting pressure, slurry viscosity, grouting rate, and water cement ratio. It can also achieve real-time monitoring of the slurry diffusion process in dynamic/static (high) water pressure environments. The paper takes the simulated naked hole lengths of 200 mm, 250 mm, and 300 mm as the research objects, and preliminarily explores the characteristics and effects of slurry diffusion in naked hole grouting un-

收稿日期: 2023-03-19 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2023-0349

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2022ME140, ZR2020ME102); 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室资助项目(2021-CMCU-KF015)

作者简介: 陈军涛(1985—), 男, 山东临朐人, 副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: chenjuntao@sdust.edu.cn

通讯作者: 李文昕(1998—), 男, 黑龙江大庆人, 硕士研究生。E-mail: 1114369158@qq.com

der directional grouting. The study found that: in the case where only the naked hole length is a variable, the slurry diffusion range does not synchronously increase linearly with the linear increase of naked hole length; The slurry stone body of the short open hole is cylindrical with the drilling open hole as the axis, while the slurry stone body of the long open hole is circular with the drilling open hole as the axis; Increasing the same length of the bare hole results in a larger difference in the diffusion range of the slurry at both ends of the bare hole. At the same time, the more pressure loss there is, the smaller the diffusion distance of the slurry. Comparing the diffusion radius of the slurry obtained from the experiment with that calculated by the Maag formula, the difference between the two values is only 2.8% when the length of the grouting open hole is 200 mm. The experimental results comply with the Maag spherical diffusion theory and verified the scientificity and rationality of this experimental system.

Key words: directional grouting; three-dimensional simulation test system; slurry diffusion; slurry-water displacement; regionalization simulation

0 引 言

煤炭作为我国能源安全压舱石的主体地位短期内不会改变^[1]。随着我国煤炭资源开采逐步转入深部和下组煤(后组煤),深部煤炭资源与地下水资源处于同一地质构造中^[2],矿井水害威胁更加严峻^[3]。定向钻孔注浆是实现水害区域超前治理的关键技术^[4-9]。研究定向钻孔注浆浆液的扩散规律^[10-12],探究浆液在含水层内的扩散特征及其效果,对实施矿井水害的高质量精准治理具有重要的理论和实际意义。

相较于现场注浆工业性试验,注浆模拟试验系统具有试验简单、成本低、可重复、观测效果较好等优点,受到国内外学者的高度重视,成为隧道、地铁、矿山等地下工程施工的研究基础和指导参考。李建等^[13]、LI等^[14]和LIU等^[15]设计了可视化注浆模拟试验系统,分别对注浆充填浆液扩散规律、浆液扩散过程的动态追踪和浆液在随机裂隙网络中的扩散和迁移模式进行了研究。张嘉凡等^[16]和XU等^[17]研制了动水裂隙注浆试验系统,研究了水流和注浆速度对浆液凝固体形态的影响和在动水条件下倾斜裂隙注浆的浆液扩散规律及封堵机理。赵红芬^[18]、郑恺丹^[19]、张伟杰等^[20]研制了三维注浆系统,对渗透注浆、黏土介质注浆以及采动覆岩隔离注浆充填的浆液流动规律进行了研究。程桦等^[21]、NIU等^[22]、张振峰^[23]研制了劈裂注浆相关试验装置,对劈裂注浆起裂机制、劈裂注浆改性过程中的裂隙扩展特征、浆液渗流规律、注浆改性强化机理等问题开展了研究。章檀^[24]、余永强等^[25]和王晓晨等^[26]基于自主研发的裂隙注浆模拟试验平台开展了裂隙注浆模拟试验,研究了浆液在岩体裂隙中的扩散特性。李涛等^[27]针对性研发了单孔放水试验装置及配套使用技术。在开展单孔放水试验的基础上,结合突水优势面理论提出了底板分类注浆技术。CHENG等^[28]开发了一种注浆试验设备,通过一系列的注浆试验,分析了注入压力与注入速率的关系,研究了临界渗

透速度、裂缝起始压力以及影响裂缝起始压力的因素。

以上注浆模拟试验系统,具有一定的先进性,但存在以下不足:①未针对定向钻孔注浆做出功能性的设计,不能实现定向钻孔条件下不同分支孔布设方式的注浆模拟试验;②未能实现区域化注浆模拟;③不能提供高水压动/静水的模拟环境,无法进行高压动/静水环境下的浆液扩散规律研究。为克服以上研究的不足,实现定向钻孔条件下不同分支孔布设方式的注浆模拟、区域化模拟、高水压动水注浆模拟等功能,笔者研制了定向钻孔注浆三维模拟试验系统,并运用该试验系统开展了相关研究工作。

1 定向钻孔注浆的三维模拟试验系统

基于定向注浆现场治理矿井水害工程背景,自主研发了定向钻孔注浆三维模拟试验系统,该系统主要由4个子系统组成:试验台系统、注浆系统、注水系统及数据监测系统,如图1所示。

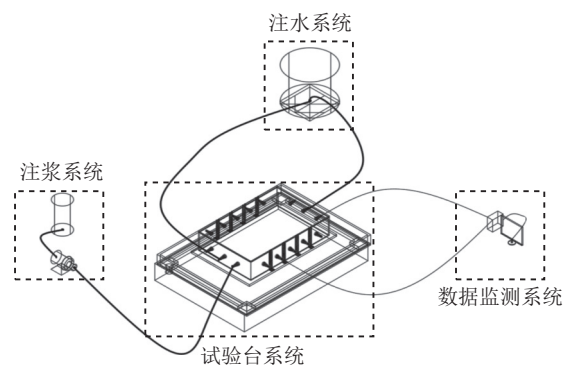


图1 定向钻孔注浆三维模拟试验系统
Fig.1 3D simulation test system for grouting in directional drilling

1.1 试验台系统

试验台整体密封,尺寸为150 cm×100 cm×50 cm(长×宽×高),顶部和侧面为可拆卸结构,易于装载和拆卸试验材料。试验台侧面由透明亚克力板制成,便于观察浆液扩散状况,如图2a所示;侧板开有定

向注浆口和注水孔,如图2b所示;内部注浆管采用 $\phi 6$ mm PV 材质软管。试验架钢架结构,高30 cm,底部安装滚轮,根据需求可移动或固定承载试验台。试验台设置有6个注浆口,4个注水孔。试验台主体能够满足注浆加固体开挖取样的需求;两侧有供水口,透水口均匀分布在顶板上,保证注浆时有一定的排水压力和加固效果的均一性。

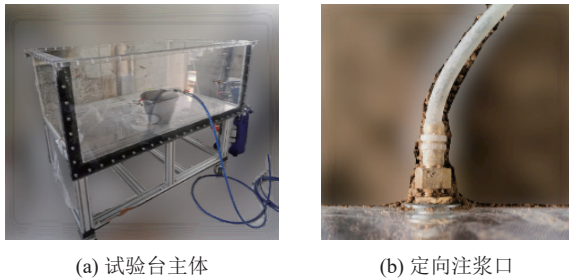


图2 可视化承载试验台
Fig.2 Visual bearing test bench

1.2 注水系统

注水系统包括空压机、稳压调节器、高压供水水泵、稳压储水腔、压力输水管等。该系统可以实现多级可控的恒定水压和动水条件。空压机输出高压气体并经稳压调节器在0~0.7 MPa 范围内调整压力。当进行浆液-水驱替试验时,通过该系统驱动承压水注入到试验台内。

1.3 注浆系统

注浆系统由空压机、搅拌机、压力桶、注浆管、压力监测仪等组成,注浆压力最大为0.7 MPa,如图3所示。空压机与限压阀等组成供压设备,搅拌机、压力桶和压力检测仪等组成出浆设备,考虑浆液在桶内会随时间发生沉降凝结,故在桶底部设计了涡轮旋桨,使得流出浆液的流变性质与试验设计时保持一致。注浆口处安装压力表,满足读取压力的需求。供压设备不仅可以为注浆试验的浆液提供恒定压力,在进行浆液-水驱替试验时,通过安装在空压机处的分流阀,还可为实现动水环境的模拟提供动水压力。

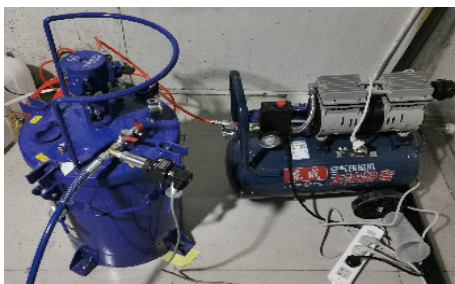
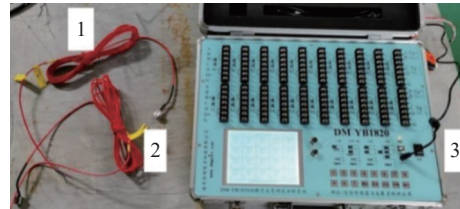


图3 注浆系统
Fig.3 Grouting system

1.4 数据监测系统

数据监测设备是定向钻孔注浆模拟试验系统的重要组成部分。该系统由计算机、数据采集装置及测控系统软件等部分组成。数据采集器预埋于相似模拟试验材料中,通过采集器收集注浆压力、流量等数据,然后传输到计算机,如图4所示。



1—土压力盒;2—水压力计;3—应变测试分析仪

图4 数据采集装置

Fig.4 Data acquisition device

2 系统工作原理

图5为定向钻孔注浆三维模拟试验系统原理,通过注浆装置向试验台主体提供所需的注浆条件,通过承压水仓装置向试验台主体提供所需的动水条件,通过数据监测装置动态监测试验过程及实现处理信息的功能,在试验台主体内铺设预制有注浆支管的岩体相似材料。通过试验台与注浆装置、承压水仓装置和数据监测装置的相互配合,可研究浆液在导水、储水空间的扩散、贮留机制,探究动水条件下和采用不同注浆分支孔布设方式下对目标岩层的注浆改造机理、以及浆液-水驱替扩散的规律。

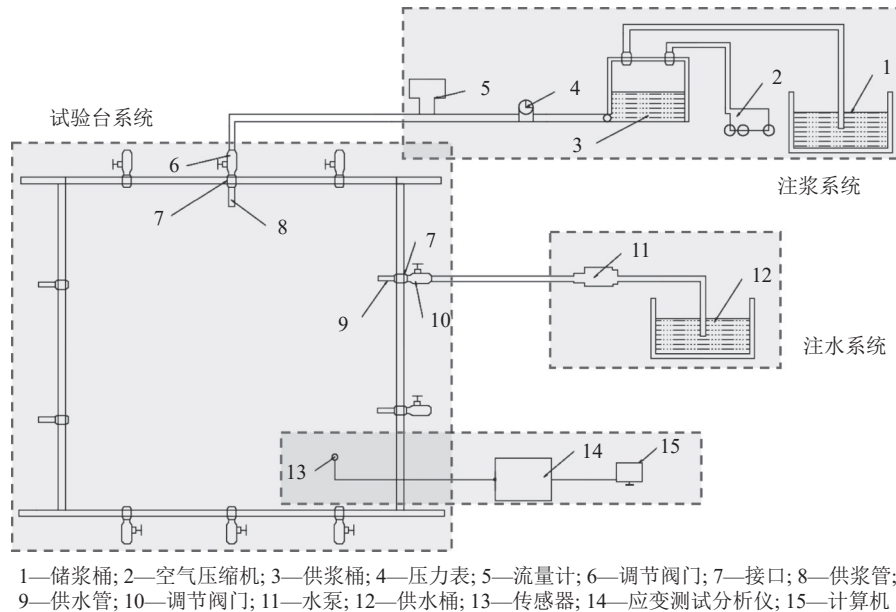
3 系统的主要特色

1)定向注浆模拟。该系统设计有多个平行分布于试验台两侧的注浆孔口,可模拟水平多分支定向注浆,可将注浆管设置为羽状或扇形状分布,实现定向钻孔三维注浆的试验模拟,如图6所示。

2)浆液三维扩散。试验台尺寸为150 cm×100 cm×50 cm,高度尺寸满足浆液三维扩散条件,另外还可布设不同空间位置的注浆分支孔,研究在不同空间位置布设注浆孔进行注浆后浆液的扩散情况和相互影响规律。

3)动/静(高)水压。试验台密封良好,可提供0.7 MPa 水压,模拟高水压环境。试验台设置有多个进水口和排水口,进水口可与注水系统连接,提供动水环境。也可将注水系统的空压机等关闭,仅提供静水环境。研究岩体中浆液-水驱替作用机制。

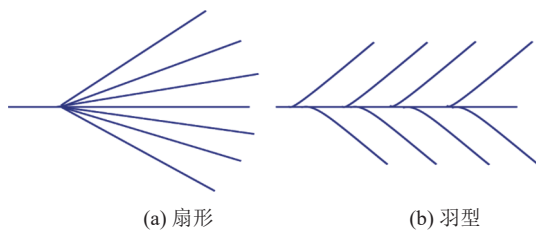
4)区域化试验模拟。可实现注浆的区域化模拟,探究不同分支孔布设方式下的浆液扩散特性,为煤层开采前的水害区域化超前防治提供了研究思路。



1—储浆桶; 2—空气压缩机; 3—供浆桶; 4—压力表; 5—流量计; 6—调节阀门; 7—接口; 8—供浆管; 9—供水管; 10—调节阀门; 11—水泵; 12—供水桶; 13—传感器; 14—应变测试分析仪; 15—计算机

图5 定向钻孔注浆三维模拟试验系统原理

Fig.5 Schematic of directional drilling grouting 3D simulation test system



(a) 扇形 (b) 羽型

图6 定向注浆分支孔类型

Fig.6 Directional grouting branch hole type

4 验证试验

4.1 试验设计

以黄河北煤田灰岩含水层定向注浆治理为参考,

模拟定向区域注浆, 试验注浆时间设置为 3 min, 土体渗透系数为 1.2×10^{-2} cm/s, 土体孔隙率为 0.25, 浆液黏度与水黏度比为 11.5, 注浆孔半径 0.25 cm, 注浆压力 0.2 MPa。选取钻探裸孔长度因素设计了 3 组类别的底板含水层注浆模型试验, 研究在不同钻探裸孔长度条件下浆液的扩散范围, 验证试验系统的可靠性和科学性。

4.2 模型铺设

陈军涛等^[29]研制的深部新型流固耦合相似材料中, 石蜡(54°)和凡士林作为胶结剂能够满足固体变形和渗透性相似 2 个特殊条件。相似材料中砂粒间的间隙视作灰岩中的裂隙和孔隙。材料配比见表 1。

表 1 模型铺设材料配比

Table 1 Proportioning of model paving materials

模拟岩层	厚度/cm	材料质量/kg				
		砂子	碳酸钙	石膏	石蜡	水
煤层	10	18.3	0.49	0.73	—	0.82
灰岩	30	17.4	0.46	—	0.58	—
泥岩	10	13.14	0.99	0.63	—	0.89

分别以 200、250、300 mm 的定向分支裸孔为研究对象, 将 3 种不同长度的裸孔设为 1 组, 共布设 2 组, 分别置于试验台两侧。2 个注浆裸孔之间的间隔为 30 cm, 每个注浆裸孔的倾角为 60°, 如图 7 所示。模型分 2 cm 一层进行铺设, 在埋设制备钻探裸孔的塑料棒后, 由试验台横向中间线向两侧依次铺设相似材料并进行充分夯实。在铺设到钻探裸孔与注浆

管交接处时, 取出塑料棒, 放回注浆管, 预埋钻探裸孔如图 8 和图 9 所示。试验分 3 组进行, 见表 2。注浆 72 h 后, 进行人工开挖, 以先周围后中间顺序, 刨去无注浆结石体的砂砾石料。

4.3 结果分析

4.3.1 应力分析

对试验数据进行分析, 应力随时间的变化趋势

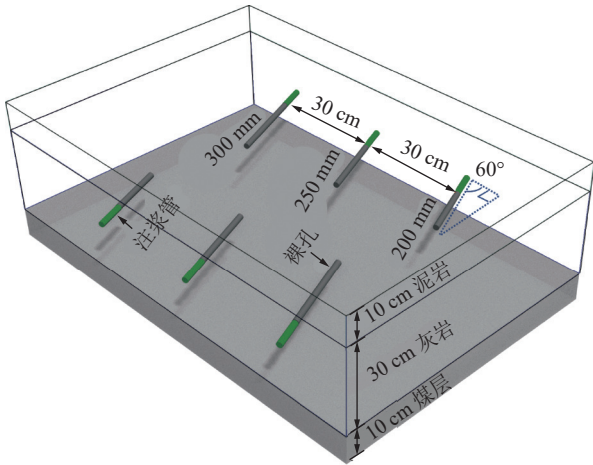


图 7 试验模型三维视图
Fig.7 3D view of experimental model

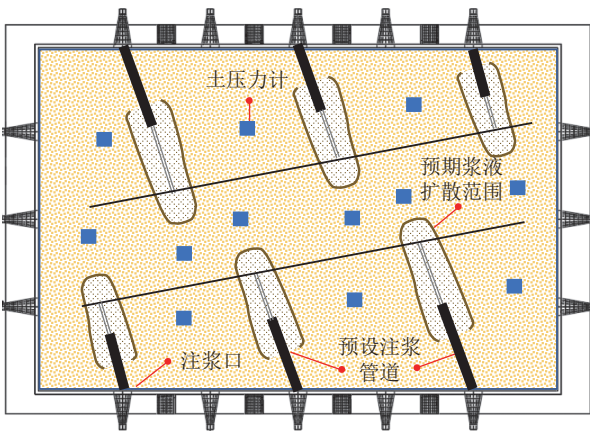


图 8 预埋钻探裸孔试验
Fig.8 Pre-buried drilling of bare holes



图 9 预埋钻探裸孔平面
Fig.9 Embedded drilling open hole

表 2 注浆裸孔试验

Table 2 Grouting open hole test

编号	注浆裸孔长度/ mm	注浆压力/ MPa	注浆速率/ (L·min ⁻¹)	水灰质量比
1、4	200	0.2	1	1.5 : 1
2、5	250	0.2	1	1.5 : 1
3、6	300	0.2	1	1.5 : 1

如图 10 所示。

由图 10 可知，试验初始阶段应力基本不显示，在 5 ~ 10 s，应力开始呈阶段性线性增长，且增长速度极快，后稳定于 70 kPa 左右，持续到试验结束后，应力值直线下降。分析其原因，试验时，模拟岩层中含有预置的钻探裸孔，在注浆试验的前 10 s，浆液为裸孔填充阶段，对周围岩层产生压力较小，故此阶段无明显应力显现。随着注浆的进行，裸孔填充完成，浆液开始渗透进入模拟材料中，此时压力值开始攀升，在升至 70 kPa 左右时趋于稳定。实际注浆工程中，钻探裸孔会在灰岩含水层中形成一条连通各岩溶孔隙的通路，浆液会以钻探裸孔为中心，向四周扩散。注浆的初始阶段，浆液经由注浆孔口开始扩散，但由于注浆时间较短，浆液扩散范围较小，初始的注浆压力变化不易检测。

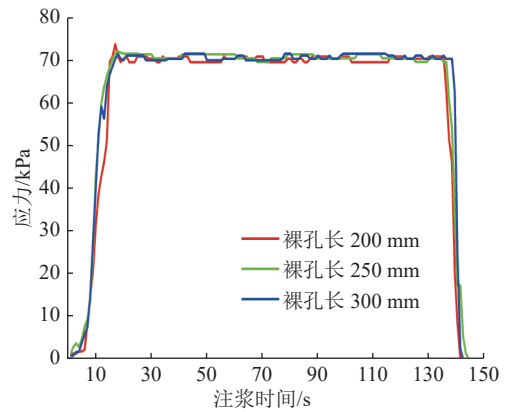


图 10 不同裸孔长度的应力变化趋势

Fig.10 Stress detection values of different open hole lengths

4.3.2 注浆结石体形态

在浆液持续向四围扩散的过程中，其与砂层颗粒形成胶结，凝固后形成结石体，如图 11 所示。

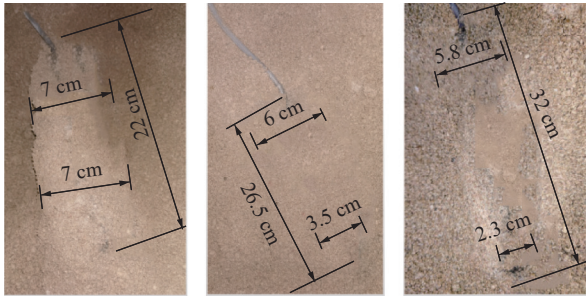


图 11 结石体细节

Fig.11 Details of stone body

不同长度的注浆钻探裸孔注入同性的浆液，浆液扩散范围的特点有所不同。在裸孔靠近注浆口的

一端,3种长度的钻探裸孔注浆浆液扩散的距离分别为7、6、5.8 cm,在裸孔远离注浆口的一端,3种长度的钻探裸孔注浆浆液扩散的距离分别为7、3.5、2.3 cm,浆液扩散的距离较靠近注浆口一端的数值差别较大。不同裸孔长度的注浆结石体如图12所示。



(a) 裸孔长度 200 mm (b) 裸孔长度 250 mm (c) 裸孔长度 300 mm

图12 不同裸孔长度的注浆结石体

Fig.12 Grouted stone bodies with different open hole lengths

4.3.3 浆液扩散特征

裸孔长度为200 mm时,浆液在裸孔两端的扩散距离均为7 cm,两端扩散距离的差值为0,注浆结石体呈现以裸孔为中心轴的近圆柱体形状。裸孔长度为250 mm时,两端扩散距离的差值为2.5 cm,裸孔末端的浆液扩散距离为注浆孔处扩散距离的60%,注浆结石体呈现以裸孔为中心轴的圆台形状。裸孔长度为300 mm时,两端扩散距离的差值为3.5 cm,裸孔末端的浆液扩散距离为注浆孔处扩散距离的40%,差值进一步变大,比注浆裸孔为250 mm时降低了20%,注浆结石体也呈现以裸孔为中心轴的圆台形状。钻探裸孔增加相同的长度,裸孔越长,浆液在裸孔两端的扩散范围的差值越大。由此可知,相同的注浆压力下,裸孔越长,驱动浆液损失的压力越多,到远离注浆口处剩余的压力越小,因此浆液扩散的距离越小。在增加相同长度的情况下,初始长度较长的裸孔压力损失的更快。

3种裸孔长度的注浆结果对比如图13所示,裸孔长度与结石体质量存在一定的关联性。裸孔长度从200 mm增加到250 mm时,结石体质量增加了0.09 kg,裸孔长度从250 mm增加到300 mm时,结石体质量增加了0.03 kg,随裸孔长度的增加,结石体的质量增加速率变缓。由此可知,在仅有裸孔长度为变量的情况下,浆液扩散范围不会随裸孔长度的线性增加而同步线性增加,随着裸孔长度的增加,浆液在裸孔四周的岩体中扩散范围变小,在实际应用中,应选取合适裸孔长度,选择最经济的裸孔长度进行注浆工程。

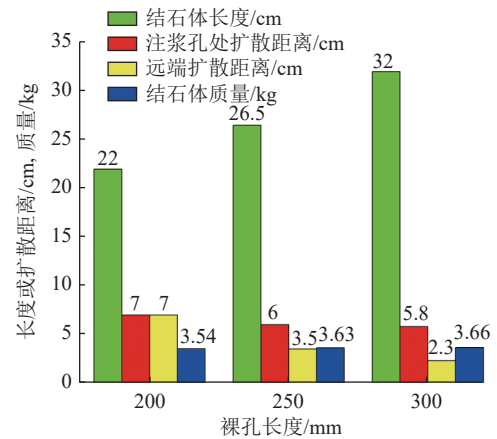


图13 不同裸孔长度的注浆结果对比

Fig.13 Comparison of grouting results with different bare hole lengths

4.3.4 浆液扩散对比

将物理试验所用数据代入Maag球形扩散公式^[30],结果见表3。

表3 试验结果与理论计算结果

Table 3 Test results and theoretical calculation results

注浆裸孔长度/mm	Maag公式计算扩散半径/cm	试验注浆孔处扩散半径/cm
200	3.6	3.5
250	3.6	3.0
300	3.6	2.9

由表3可知,试验中注浆孔口处的浆液扩散半径小于理论计算数值,且裸孔长度增加时,试验结果与理论计算结果的差值随之增加。当注浆裸孔长度为200 mm时,两者差0.1 cm,试验数值为理论计算数值的97.2%。当注浆裸孔长度为250 mm时,两者差0.6 cm,试验数值为理论计算数值的83.3%。当注浆裸孔长度为300 mm时,两者差0.7 cm,试验数值为理论计算数值的80.5%。分析其原因为Maag公式未考虑注浆裸孔带来的压力损失,随着注浆裸孔长度的增加,压力损失增多,相同条件下,浆液扩散距离变小。当注浆裸孔较短时,浆液扩散半径的试验值与理论计算值相差仅为2.8%,试验结果符合经典Maag球形扩散理论规律,验证了试验系统的科学性。

5 结 论

1)自主研制了定向钻孔注浆的三维模拟试验系统,主要由试验台系统、注浆系统、注水系统及数据监测系统4部分组成,可实现模拟定向钻孔注浆、多

注浆孔多序次注浆、模拟动水环境注浆和被注岩体内部多种物理场信息的实时采集。

2) 定向注浆三维模拟试验系统具有定向钻孔注浆模拟、浆液三维空间扩散、动-静(高)水压环境模拟、区域化注浆模拟等特点, 可从大尺度、复杂环境等方面研究定向钻孔注浆浆液扩散规律。

3) 借助定向钻孔注浆三维模拟试验系统进行了不同裸孔长度浆液扩散模拟试验。发现在仅有裸孔长度为变量的情况下, 浆液扩散范围不会随裸孔长度的线性增加而同步线性增加。短裸孔的浆液结石体呈以钻探裸孔为轴心的圆柱状, 长裸孔的浆液结石体呈以钻探裸孔为轴心的圆台状。

4) 将试验所得浆液扩散半径与 Maag 公式计算所得浆液扩散半径进行对比, 注浆裸孔长度为 200 mm 时, 两数值仅相差 2.8%, 验证了试验系统的科学性与合理性。系统仍存在一些问题, 如浆液扩散过程中的扩散位置定位及其可视化等, 有待在以后的研究中解决。

参考文献(References):

- [1] 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 synergistic co-extraction under the dual carbon background[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(2): 538-550.
- [2] ZENG Yifan, MENG Shihao, WU Qiang, *et al.* Ecological water security impact of large coal base development and its protection[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 619: 129319.
- [3] 曾一凡, 梅傲霜, 武强, 等. 基于水化学场与水动力场示踪模拟耦合的矿井涌(突)水水源判识[J]. 煤炭学报, 2022, 47(12): 4482-4494.
ZENG Yifan, MEI Aoshuang, WU Qiang, *et al.* Source discrimination of mine water inflow or inrush using hydro-chemical field and hydrodynamic field tracer simulation coupling[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(12): 4482-4494.
- [4] 童仁剑, 郑士田, 吴燕军, 等. 地面定向孔超前预注浆掩护巷道穿断层破碎带关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(6): 196-203.
TONG Renjian, DENG Shitian, WU Yanjun, *et al.* Key technology of advance pre-grouting of ground directional holes to shield roadway passing fault and broken zone[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(6): 196-203.
- [5] 武善元, 刘磊, 陈军涛, 等. 黄河北煤田定向钻进精准注浆防治水技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(5): 34-40.
WU Shanyuan, LIU Lei, CHEN Juntao, *et al.* Research on precise grouting to prevent water disaster technology in Huang-hebei Coalfield[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(5): 34-40.
- [6] 尚宏波, 王皓. 裂隙岩体水平孔注浆浆液扩散规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(7): 233-243.
SHANG Hongbo, WANG Hao. Study on diffusion law of grouting slurry in horizontal hole in fractured rock mass[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(7): 233-243.
- [7] 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.
DONG Shuning, LIU Zhaoxing, WANG Hao, *et al.* Experimental study on serum diffusion mechanism during grouting in water conducting fault fracture zone[J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2022, 39(1): 174-183.
- [8] 魏建平, 姚邦华, 刘勇, 等. 裂隙煤体注浆浆液扩散规律及变质量渗流模型研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 204-212.
WEI Jianping, YAO Banghua, LIU Yong, *et al.* Grouting fluid diffusion law and variable mass seepage model for fractured coal[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 204-212.
- [9] 胡少银, 刘泉声, 李世辉, 等. 裂隙岩体注浆理论研究进展及展望[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(1): 112-126.
HU Shaoyin, LIU Quansheng, LI Shihui, *et al.* Advance and review on grouting critical problems in fractured rock mass[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(1): 112-126.
- [10] 王恩, 谢生荣, 陈冬冬, 等. 深部两侧采空工作面留小煤柱掘巷围岩破坏机制与控制[J/OL]. 煤炭科学技术: 1-9. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20220427.1425.005.html>.
WANG En, XIE Shengrong, CHEN Dongdong, *et al.* Failure mechanism and its control of surrounding rock for gob-side entry driving with narrow coal pillar in the working face with goaf on both sides[J/OL]. *Coal Science and Technology*: 1-9. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20220427.1425.005.html>.
- [11] 尚宏波, 靳德武, 柳昭星, 等. 地下含水层帷幕注浆单液水泥浆扩散规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(11): 134-141.
SHANG Hongbo, JIN Dewu, LIU Zhaoxing, *et al.* Research on diffusion law of pure liquid cement slurry for curtain grouting in underground aquifer[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(11): 134-141.
- [12] HUANG Shuling, PEI Qitao, DING Xiuli, *et al.* Grouting diffusion mechanism in an oblique crack in rock masses considering temporal and spatial variation of viscosity of fast-curing grouts[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2020, 23(2): 151-163.
- [13] 李健, 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试验研究[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.
- [14] LI P, JUNCHENG X, YONG L. A self-control and visual grouting model test system and measurement method[J]. *Measurement*, 2020, 154: 107481.
- [15] LIU B, SANG H, LIU Q, *et al.* Laboratory study on diffusion and migration of grout in rock mass fracture network[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2021, 21(1): 04020242.
- [16] 张嘉凡, 孙晓东, 刘洋, 等. 倾斜裂隙动水注浆扩散规律及堵水关键域研究[J/OL]. 煤炭学报: 1-15. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0049>.

- ZHANG Jiafan, SUN Xiaodong, LIU Yang, et al. Study on diffusion law of dynamic water grouting in inclined fracture and key areas of water plugging[J/OL]. Journal of China Coal Society: 1-15. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.0049>.
- [17] XU C, HAN L. Formation mechanism of slurry consolidated body in different grouting media under dynamic water conditions by the test-simulation method[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022: 1-12.
- [18] 赵红芬, 陈继平, 彭琦. 一种三维可视渗透注浆模型试验装置及方法[P]. 广东: ZL110297076A, 2019-10-01.
- [19] 郑恺丹. 采动覆岩隔离注浆充填浆液流动模拟试验系统及应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- ZHENG Kaidan. The experimental system and application of slurry flow simulation of isolated grouting filling for overburden[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [20] 张伟杰, 李术才, 魏久传, 等. 三维注浆模型试验系统研制及应用[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 902-911.
- ZHANG Weijie, LI Shucui, WEI Jiuchuan, et al. Development of a 3D grouting model test system and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(3): 902-911.
- [21] 程 桦, 刘向阳, 曹如康, 等. 类砂质泥岩常规三轴浆压致裂起裂压力试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(10): 2655-2664.
- CHENG Hua, LIU Xiangyang, CAO Rukang, et al. Experimental research on fracture initiation pressure of quasi triaxial slurry fracturing in similar sandy mudstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(10): 2655-2664.
- [22] NIU J, LI Z, GU W, et al. Experimental study of split grouting reinforcement mechanism in filling medium and effect evaluation[J]. Sensors, 2020, 20(11): 3088.
- [23] 张振峰. 千米深井巷道高压劈裂注浆围岩加固机理与技术研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2021.
- ZHANG Zhenfeng. Study of mechanism and technology of high-pressure fracturing grouting in roadway in 1000m deep coalmine[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2021.
- [24] 章 檀. 岩体单一裂隙注浆物理模型研发及浆液扩散研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.
- ZHANG Tan. Research and development of hydrodynamic grouting physical model and slurry diffusion in rock mass fractures[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2022.
- [25] 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.
- [26] 王晓晨, 刘人太, 张春雨, 等. 裂隙注浆浆液浓度分布试验研究与机制探讨[J]. 煤炭学报, 2020, 45(8): 2872-2879.
- WANG Xiaochen, LIU Rentai, ZHANG Chunyu, et al. Experimental study on concentration distribution of fracture grouting and discussion on its mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8): 2872-2879.
- [27] 李 涛, 高 颖, 艾德春, 等. 基于承压水单孔放水试验的底板水害精准注浆防治[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2494-2501.
- LI Tao, GAO Ying, AI Dechun, et al. Floor precise grouting of prevention and control of water based on confined water single-hole drainage experiment[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2494-2501.
- [28] CHENG W C, NI J C, SHEN J S, et al. Modeling of permeation and fracturing grouting in sand: laboratory investigations[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2018, 46(5): 2067-2082.
- [29] 陈军涛, 尹立明, 孙文斌, 等. 深部新型固流耦合相似材料的研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(S2): 3956-3964.
- CHEN Juntao, YIN Liming, SUN Wenbin, et al. Development and application for new solid-fluid coupling similar material of deep floor aquifuge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2): 3956-3964.
- [30] 《岩土注浆理论与工程实例》协作组. 岩土注浆理论与工程实例[M]. 北京: 科学出版社, 2001.