

文章编号: 1000-7598-(2014) 08-2137-08

可变倾角单裂隙动水注浆模型试验研究

俞文生^{1,2}, 李 鹏³, 张 霄³, 王 倩³

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院, 长沙 410004; 2.江西省高速公路投资集团有限责任公司, 南昌 330025;

3.山东大学 岩土与结构工程研究中心, 济南 250061)

摘 要: 突涌水灾害对地下工程危害严重, 实践表明, 注浆是治理突涌水灾害的有效方法。近年来, 裂隙岩体注浆理论的研究成为热点, 但裂隙动水注浆理论发展缓慢, 不能有效指导工程实践。在水平裂隙动水注浆 U 型扩散理论基础上, 研发可变倾角小比例裂隙动水注浆模型试验系统, 开展多组室内模型试验, 研究倾角对裂隙动水注浆扩散规律的影响机制, 同时, 利用 COMSOL 软件对一定倾角的裂隙动水注浆扩散进行数值模拟。研究表明: 当裂隙水平时, 满足 U 型扩散形态; 当裂隙存在倾角时, 在动水水头差和浆液自身重力因素作用下, 浆液呈现彗星状扩散形态; 相同扩散效果下, 注浆速率随裂隙倾角的增加呈抛物线型增长规律, 增加注浆速率可以保持注浆孔附近相对于其周边区域的浓度梯度优势。该研究结论对于目前裂隙动水注浆理论是一种重要补充, 对指导突涌水灾害治理有一定的实践意义。

关 键 词: 地下工程; 突涌水; 模型试验; 数值模拟; 裂隙倾角; 扩散规律; 注浆速率

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

Model test research on hydrodynamic grouting for single fracture with variable inclinations

YU Wen-sheng^{1,2}, LI Peng³, ZHANG Xiao³, WANG Qian³

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410004, China;

2. Jiangxi Expressway Investment Group Co., Ltd., Nanchang 330025, China;

3. Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Water inrush does serious harm to underground engineering. Practice has proved that grouting is an effective technical means to manage water inrush. In recent years, the research on grouting theory for fractured rock mass has become hot, but the fractured hydrodynamic grouting theory develops slowly which was not enough to guide the grouting engineering practice effectively. On the basis of U-shaped diffusion law of horizontal fracture dynamic grouting, the small scale model test system for fracture dynamic grouting with variable inclination is developed. The inclination influence mechanism for grouting diffusion in hydrodynamic conditions is studied by carrying out multi-group indoor model tests and simulating fracture dynamic grouting diffusion process with certain inclination by COMSOL software. The research shows that it meet the U-shaped diffusion law when the fracture is horizontal, and it presents comet-shaped diffusion law under the influence of water head difference and gravity when the fracture existed inclination. Grouting rate and inclination presented parabola-shaped relationship curves under same diffusion effect, and increasing grouting rate can keep the concentration gradient advantage of grouting hole compared with around area. Some suggestions for reference to guide engineering practice are proposed on basis of research results. The conclusions are important complements for the present fractured hydrodynamic grouting theory, and play a positive role to guide grouting engineering practice.

Key words: underground engineering; water inrush; model test; numerical simulation; fracture with inclination; diffusion law; grouting rate

1 引 言

注浆技术已经有 200 多年的历史, 广泛应用于

隧道、矿山、地基、桩基和边坡等工程。但由于注浆技术错综复杂, 涉及被注介质特征、浆体特性、运移规律及浆液与被注介质相互作用关系, 导致注

收稿日期: 2014-03-31

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(No. 2013CB036000); 国家自然科学基金(No. 41272385); 国家自然科学基金青年基金资助项目(No. 51209128)。

第一作者简介: 俞文生, 男, 1976 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事高速公路建设技术管理方面的研究工作。E-mail: tianxia-19860620@163.com

通讯作者: 李鹏, 男, 1989 年生, 博士研究生, 主要从事深埋隧道突水突泥发生机理及注浆控制技术方面的研究工作。E-mail: 763513229@qq.com

浆理论的发展远远落后于工程实践,注浆技术缺乏科学、合理的理论指导^[1-5]。

由于浆液在裂隙介质中扩散和封堵的复杂性和不确定性^[6],研究其扩散规律和封堵机制对于突涌水治理意义重大。模型试验因具有贴近真实工况、低成本、可重复利用等优点而成为研究裂隙岩体注浆理论常用且有效的方法^[7]。

目前,国内外学者已经进行了许多裂隙注浆模型试验,取得了一系列研究成果。Terashi 等^[8]进行了单裂隙中浆液流动过程的模拟试验,通过对混凝土内部劈裂裂隙、不同混凝土块的构成裂隙和钢板拼成裂隙 3 种模型进行浆液扩散试验研究,得出了裂隙间距、裂隙流量、注浆压力、浆液黏度、粗糙度等物理量之间的关系;瑞典学者 Borjesson 等,为检验注浆材料(主要是水泥浆和膨润土浆)在细小裂缝中的渗流扩散,设计了一套裂隙注浆模拟装置,用压力传感器在不同扩散距离处监测浆液压力^[9];Houlsby^[10]进行了单裂隙注浆模拟试验,对浆液压力、流速和其他注浆参数进行了检测;中国水利水电科学院研制了平板型裂隙注浆试验装置,得出了扩散半径和注浆压力、浆液黏度及注浆时间之间的数学关系式^[11-12];袁亮^[13],杨米加等^[14]进行了单裂隙和裂隙网络注浆模型试验,研究了浆液在裂隙岩体中的渗流规律;白峰青等^[15]和 Gothall 等^[16-17]通过模型试验研究了浆液对裂隙变形的影响及其劈裂作用,得出了裂隙开度变化公式;李华茂等^[18]在椭圆形裂隙渗透注浆模拟试验装置上对裂隙注浆进行了研究,获得了裂隙宽度、注浆压力、水灰比、注浆时间、扩散距离和注浆量之间的关系。以上研究均是针对无水或静水条件下浆液扩散方面的研究成果,未考虑地下水流动对浆液扩散的影响;李术才等^[19],刘健等^[20]考虑动水因素,研发了裂隙动水注浆模型试验台,研究了浆液的扩散机制和封堵机制。

以上研究均依托水平裂隙,但真实地下工程环境中,裂隙交错分布,完全水平的裂隙几乎不存在,研究裂隙倾角对浆液扩散规律和封堵效果的影响十分必要。为解决上述问题,笔者通过研发可变倾角小比例裂隙动水注浆模型试验系统,开展可变倾裂隙动水注浆模型试验,研究裂隙倾角对浆液扩散和封堵的影响,并通过数值模拟验证模型试验得出的结论,对于指导注浆施工具备一定的参考价值。

2 可变倾角平面裂隙动水注浆模型试验

自主研发了可变倾角平面裂隙动水注浆模型试验系统,具备可定量调节裂隙倾角、浆液扩散过

程可视化、可重复利用等优点。共进行 45 组不同裂隙倾角条件下动水注浆模型试验,研究裂隙倾角对浆液扩散规律和封堵效果的影响。

2.1 模型试验设计思路

研究表明,注浆压力、速率、材料、裂隙产状和动水流动是影响浆液在裂隙扩散中的重要因素^[21-22],基于以上因素,本试验设计思路如下:

(1) 本试验采用开放式裂隙低压动水注浆方式,重点研究在裂隙具备倾角条件下,浆液扩散规律以及注浆速率对浆液扩散的影响。

(2) 水泥单液浆是地下工程涌水封堵的常用注浆材料,本试验对其作出针对性研究。

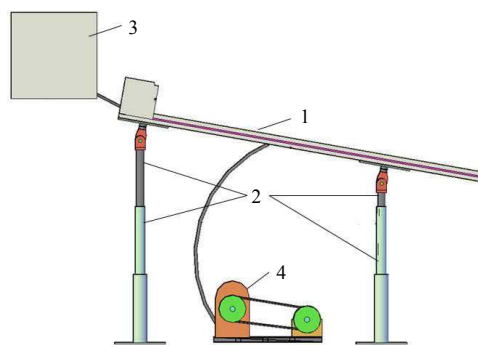
(3) 倾角是裂隙产状的关键内容,通过调节试验装置角度实现模拟裂隙倾角的定量控制。

(4) 通过设置具有一定水头的水源模拟动水流动环境。

(5) 试验过程可视且可以定量描述浆液的扩散形态。

2.2 可变倾角裂隙动水注浆模型试验系统

张霄^[23]曾研发了试验系统并发现浆液在裂隙水平条件下的 U 型扩散规律,但此试验系统无法调节裂隙倾角,没有考虑裂隙倾角对浆液扩散规律的影响。基于此,研发了可变倾角平面裂隙动水注浆模型试验系统,如图 1 所示。



1—裂隙模拟系统 2—裂隙倾角调节系统 3—供水系统 4—注浆系统

图 1 模型试验系统构成图

Fig.1 Composition of model test system

(1) 裂隙模拟系统:由上下平行的两块高强度钢化玻璃构成,如图 2 所示,综合考虑地下环境、地下水和浆液等因素,取裂隙参数如表 1 所示。

(2) 裂隙倾角调节系统:由转动连接盘、升降杆和底部托盘构成,连接盘胶结在裂隙底部,通过螺栓与升降杆连接,可以实现 $0^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 范围内倾角自由调节。

(3) 供水系统:可为裂隙模拟系统提供一定流

速的动水，且基本保持恒定。

(4) 注浆系统：可向模拟裂隙注入均匀的水泥浆液，且注浆速率 v 可调，其具体数值为

$$v = \frac{\Delta m}{\rho \Delta t} \quad (1)$$

式中： Δm 为注浆前后水泥浆液质量差 (kg)； ρ 为水泥浆液的密度 (kg/m^3)； Δt 为注浆前、后时间差 (s)。

(5) 监测记录系统：在模拟裂隙上表面划分网格，每个网格单元为 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 正方形，注浆结束后，通过素描法记录浆液扩散范围；高清摄像系统实时监控动水注浆过程。

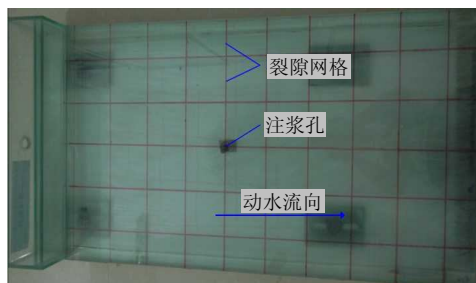


图 2 裂隙模拟系统

Fig.2 Simulation system of fracture

表 1 裂隙参数取值表

Table 1 Values of fracture parameters

裂隙长度 / mm	裂隙宽度 / mm	裂隙厚度 / mm	玻璃厚度 / mm	注浆孔直径 / mm
1 000	560	3	12	20

2.3 模型试验方案

(1) 注浆材料基本参数：水泥采用南方水泥生产的 PO32.5 普通硅酸盐水泥，符合文献[24]的标准，基本参数如表 2 所示。

表 2 水泥浆液基本参数

Table 2 Basic parameters of cement mortar

水灰比 W/C	密度 ρ /(g/cm^3)	结石率 / %	凝胶时间/ min	
			初凝 t_1	终凝 t_2
1:1	1.40	85	896	1 467

(2) 浆液扩散坐标系：建立以注浆孔圆心为坐标原点，动水流场方向为 X 轴正方向，裂隙平面内垂直于 X 轴为 Y 轴的二维笛卡尔坐标系，取 Y 轴方向浆液扩散距离为轴向扩散距离 S 。

(3) 控制变量分析法：以其中一组试验为例，取裂隙倾角 $\alpha = 10^\circ$ ， $S = 10 \text{ cm}$ ，记录此条件下浆

液的扩散形态以及当轴向扩散距离 S 达到 10 cm 时的注浆速率 v ，最终试验数据取 3 组相同试验的平均值，共进行 45 组注浆试验，模型试验参数如表 3 所示。

表 3 模型试验参数表

Table 3 Parameters of model test

S / cm	α / ($^\circ$)	每组重复次数	试验总组数
10, 15, 20	0, 5, 10, 15, 20	3	45

3 裂隙倾角对浆液扩散规律的影响

通过进行 45 组平面裂隙动水注浆模型试验并分析试验数据得出以下结论：裂隙水平时，浆液在浓度梯度和动水冲刷、运移联合作用下，扩散形态为 U 型；当裂隙存在倾角时，浆液除受浓度梯度和动水冲刷、运移影响外，还受浆液自身重力以及动水水头差的影响，以上作用叠加，浆液扩散形态呈现彗星状。

3.1 不同裂隙倾角下水泥浆液扩散形态

(1) 当裂隙水平时，浆液扩散形态为 U 型，如图 3 所示， $S = 10$ 、 20 、 30 cm 时，浆液扩散素描图如图 4 所示，均呈现 U 型。

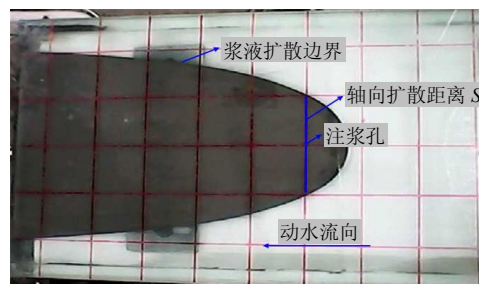


图 3 裂隙水平条件下浆液扩散形态

Fig.3 State of grout mortar diffusion under horizontal fracture conditions

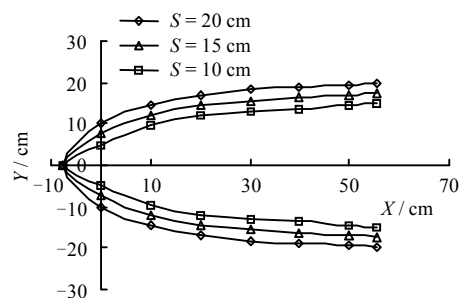


图 4 裂隙水平条件下浆液扩散素描图

Fig.4 Sketch of grout mortar diffusion under horizontal fracture conditions

(2) 当裂隙存在倾角时, 扩散形态呈现彗星状, 如图 5 所示, 以 $\alpha = 10^\circ$ 为例, $S = 10$ 、20、30 cm 时, 浆液扩散素描图如图 6 所示, 均呈现彗星状。

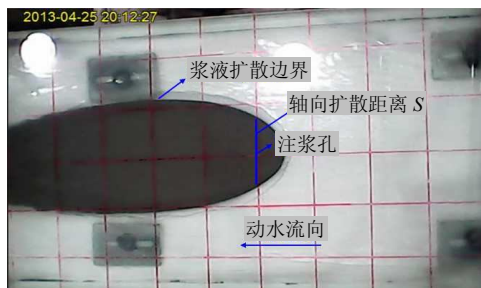


图 5 裂隙存在倾角条件下浆液扩散形态

Fig.5 State of grout mortar diffusion under inclination fracture conditions

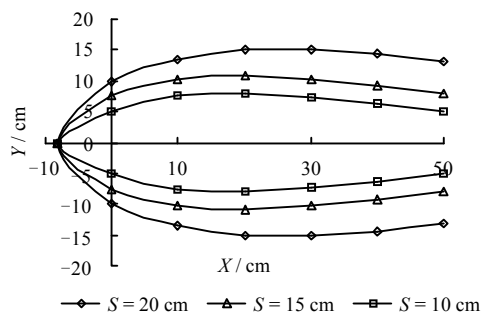


图 6 裂隙倾角 $\alpha = 10^\circ$ 条件下浆液扩散素描图

Fig.6 Sketch of grout mortar diffusion when fracture inclination $\alpha = 10^\circ$

3.2 裂隙倾角对浆液扩散规律影响机制分析

浆液在动水环境下的扩散形态是注浆压力、注浆速率、水流速度、裂隙厚度、浆液黏度、温度、裂隙倾角等多方面因素共同作用的结果, 动水注浆模型试验中, 控制其他注浆参数不变, 改变裂隙倾角 α , 浆液的扩散形态主要受动水运移、冲刷、自身浓度梯度和裂隙倾角的影响。

(1) 裂隙水平条件下, 动水和浆液流动几乎不受重力因素的影响, 在注浆试验前期, 浆液法向注入模拟裂隙动水环境中, 单纯考虑浓度梯度的影响, 浆液由注浆孔向四周均匀扩散, 在 X 轴和 Y 轴方向扩散趋势相同; 单纯考虑动水运移、冲刷作用, 由于动水流向为 X 轴方向, 浆液在 X 轴顺水方向扩散趋势最大, 在 Y 轴方向扩散趋势其次, 在 X 轴逆水方向扩散趋势最小。浆液扩散是以上两个趋势叠加的结果, 且浆液在浓度梯度作用下向 Y 轴方向扩散趋势在距离注浆孔一定距离处由于动水冲刷的作用开始消失, 浆液扩散范围达到稳定状态, 呈现 U 型。

(2) 裂隙存在倾角条件下, 除动水运移、冲刷和自身浓度梯度因素外, 浆液扩散还受自身重力因素的影响, 如图 7 所示, 浆液质点在沿裂隙下坡方向有了重力分量, 具备加速度; 动水在裂隙进水端和出水端产生水头差, 加大了对浆液的冲刷作用。以上两个因素均使得浆液在 X 轴顺水方向扩散趋势最大, 在 Y 轴方向扩散趋势其次, 在 X 轴逆水方向扩散趋势最小, 如图 8 所示。

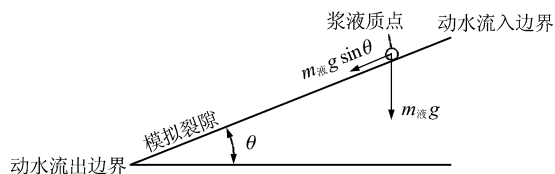


图 7 浆液质点受重力影响示意图

Fig.7 Particle of grout mortar under influence of gravity

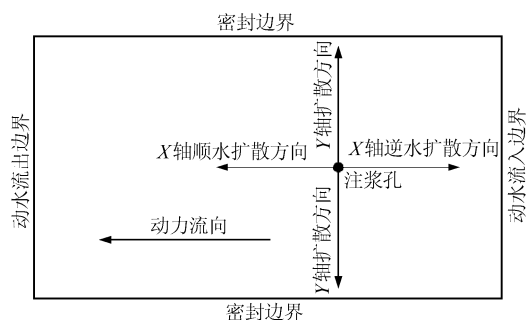


图 8 浆液扩散方向示意图

Fig.8 Direction of grout mortar diffusion

浆液法向注入模拟裂隙动水环境中, 在注浆孔周围, 浆液浓度梯度最大, 浆液向 Y 轴扩散的趋势比较大, 浆液加速度对浆液扩散趋势的影响还比较微弱, 随着浆液远离注浆孔, 浆液浓度梯度逐渐减小, 浆液在 Y 轴扩散的趋势逐渐减小, 而水头差、浆液加速度使浆液在 X 轴顺水方向扩散的趋势逐渐增大, 扩散形态最终呈现彗星状。

4 裂隙倾角条件下注浆速率对浆液扩散的影响

在本试验为开放式裂隙低压注浆和注浆材料、动水流场一定的条件下, 重点研究不同裂隙倾角条件下浆液达到相同扩散效果时所需注浆速率的变化规律。

4.1 注浆速率随裂隙倾角变化曲线

记录 45 组不同裂隙倾角 α 和轴向扩散距离 S

条件下注浆试验对应的注浆速率 v 并取 3 组相同试验的平均值可得到 15 组注浆速率数据, 如表 4 所示。

表 4 注浆速率统计表
Table 4 Rate of grouting

α /(°)	不同 $S(\text{cm})$ 下的注浆速率 v / (L/min)		
	10	15	20
0	0.50	1.20	1.82
5	1.93	2.99	3.96
10	3.11	4.50	5.54
15	4.10	5.40	6.41
20	4.60	5.91	6.82

根据统计数据可得注浆速率随裂隙倾角变化曲线如图 9 所示, 分析曲线可以得出如下结论:

(1) 设定 3 组不同轴向扩散距离 S , 改变裂隙倾角 α , 要达到既定浆液扩散效果, 注浆速率 v 随 α 的增大而增大, 且增幅越来越小, 曲线呈现抛物线型。

(2) 相同裂隙倾角 α 条件下, 轴向扩散距离 S 越大, 所需注浆速率 v 越大。

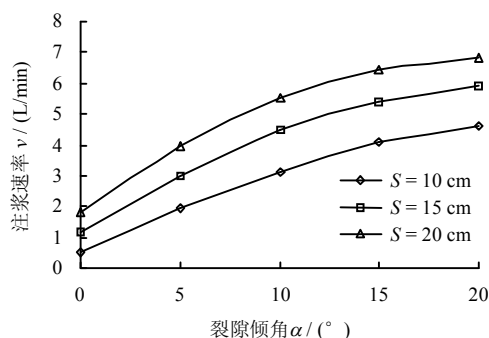


图 9 v - α 关系曲线

Fig.9 Relationship curves of v - α

4.2 裂隙倾角对注浆速率的影响机制分析

浓度梯度是使浆液在 Y 轴方向有扩散趋势的重要因素, 而注浆速率 v 是补给浓度梯度的重要来源。

(1) 设定轴向扩散距离 S , 随裂隙倾角 α 增大, 水头差使得动水运移、冲刷作用增强, 浆液受自身重力因素影响加剧, 浆液在 Y 轴方向扩散趋势减小, 要达到既定轴向扩散距离, 只能通过增加注浆速率以加大浆液在 Y 轴方向的扩散趋势。

(2) 相同裂隙倾角 α 条件下, 水头差及浆液受自身重力因素影响相同, 要增加轴向扩散距离, 只能通过增加注浆速率以加大浆液在 Y 轴方向的扩散趋势。

5 可变倾角单裂隙动水注浆数值模拟研究

利用 COMSOL 软件流体力学模块对裂隙倾角条件下注浆模型试验进行数值模拟, 应用两相流的运动控制方程进行计算, 将模拟结果与试验结果对比分析, 以实现验证和补充裂隙倾角条件下注浆模型试验结果的目的。

5.1 几何建模、边界条件及基本参数

数值计算模型为平面裂隙, 尺寸为 $1\,000\text{ mm} \times 560\text{ mm}$, 注浆孔位于模型左边界中心右侧 350 mm 处, 距离上下边界 280 mm , 其半径 $R = 10\text{ mm}$ 。左边界为出流边界, 右边界为定压力边界, 上下边界均为不透水边界, 注浆孔边界为定流速边界。

数值计算选取基本参数如表 5 所示。

表 5 数值模拟基本参数
Table 5 Basic parameters of numerical simulation

浆液密度 / (g/cm^3)	水的密度 / (g/cm^3)	浆液黏度 / ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
1.4	1.0	0.05

5.2 控制方程

(1) N-S 控制方程:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{3\rho} \text{grad}(\text{div}\vec{v}) + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{v} \quad (2)$$

(2) 连续性方程:

$$\nabla \cdot \vec{\mu} = 0 \quad (3)$$

(3) 界面控制方程:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{\mu} \nabla \phi = \gamma \nabla \left[\xi_{is} \nabla \phi - \phi(1-\phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right] \quad (4)$$

式中: $\vec{\mu}$ 为速度场; ϕ 为水平集变量; p 为压力; γ 为重新初始化参数; ξ_{is} 为控制界面厚度参数; μ 为动力黏度; $\vec{F}$ 为流体所受体积力。

5.3 网格划分

本节中应用三角形单元对模型进行网格划分, 网格基本参数如表 6 所示, 所划分网格如图 10 所示。

表 6 网格基本参数
Table 6 Basic parameters of meshes

最大单元尺寸 / m	最小单元尺寸 / 10^{-4} m	最大单元增长率	曲率解析度
0.03	4.0	1.05	0.6

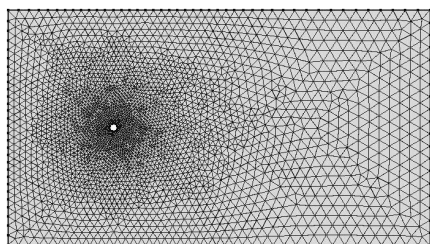


图 10 网格划分示意图
Fig.10 Sketch of meshes

5.4 数值模拟结果分析

应用相场分布法表征浆、水混合区的计算形态,即以浆液体积所占浆水体积总和的比例(无单位)表征浆液扩散形态,以裂隙倾角 $\alpha = 10^\circ$ 时为例,在不同时刻,数值模拟结果如图 11 所示,图形右侧数值表示浆液体积所占比例,浆液扩散形态呈现彗星状,且随着时间增加,浆液扩散范围不断扩大。相对于模型试验,数值模拟设定的条件更加理想化,因此,数值模拟与试验结果会有细微的差别,但整体上仍验证了裂隙倾角条件下注浆模型试验结果的正确性。

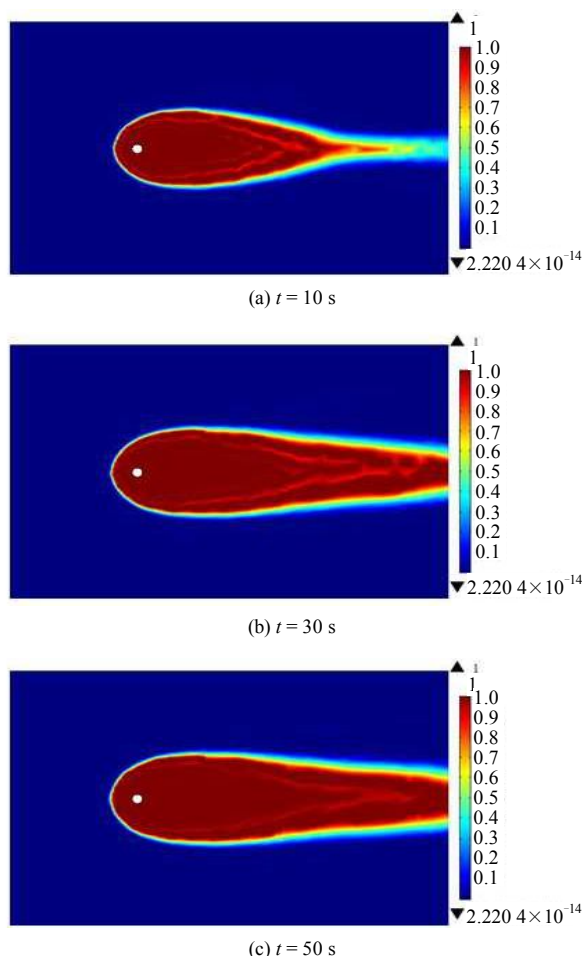


图 11 裂隙倾角 $\alpha=10^\circ$ 各时刻数值模拟结果
Fig.11 Results of numerical simulation when fracture inclination $\alpha=10^\circ$ at certain moments

6 研究成果对注浆施工的参考建议

基于研究成果对注浆施工提出以下改善建议。

(1) 地下工程注浆施工过程中,裂隙倾角越大,则浆液在远离注浆孔处的扩散范围越小,封堵效果越差,为解决此问题可以在大倾角裂隙区域适当增加注浆孔的设置密度,以保证注浆效果。

(2) 在地下工程倾角裂隙注浆过程中,提高注浆压力和浆液浓度是保证浆液扩散效果的惯用手段,但提高注浆压力对地层稳定性影响较大,增加浆液浓度会导致浆液可注性较差,而增加注浆速率可以保持注浆孔附近相对于其周边区域的浓度梯度优势,增加浆液在 Y 轴方向的扩散趋势,因此,增加注浆速率是保证裂隙在倾角条件下浆液扩散效果的有效手段。

(3) 裂隙存在倾角条件下,动水的运移、冲刷作用使得浆液在 X 轴方向扩散趋势增大,在注浆施工中,可通过引排的方式降低动水流速,保证浆液扩散效果。

7 结 论

(1) 自主研发了可变倾角小比例裂隙动水注浆模型试验系统,具备可定量调节裂隙倾角,浆液扩散过程可视化、可重复利用等优点。

(2) 裂隙水平时,浆液在浓度梯度和动水冲刷、运移联合作用下,扩散形态为 U 型;当裂隙存在倾角时,浆液除受浓度梯度和动水冲刷、运移影响外,还受浆液自身重力以及动水水头差的影响,以上作用叠加,浆液扩散形态呈现彗星状。

(3) 不同裂隙倾角条件下浆液达到相同扩散效果时注浆速率随裂隙倾角的增加呈抛物线型增长规律,增加注浆速率可以保持注浆孔附近相对于其周边区域的浓度梯度优势。

(4) 利用 COMSOL 软件对裂隙倾角条件下注浆模型试验结果进行了验证。

(5) 基于研究成果对注浆施工提出了几点参考建议:即在注浆施工中可采用适当增加大倾角裂隙区域注浆孔密度、增加注浆速率、通过引排方式降低动水流速等手段保证浆液扩散效果。

参 考 文 献

- [1] 李术才, 李树忱, 张庆松, 等. 岩溶裂隙水与不良地质情况超前预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 217—225.
LI Shu-cai, LI Shu-chen, ZHANG Qing-song, et al. Forecast of karst-fractured groundwater and defective

- geological conditions[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(2): 217—225.
- [2] 湛铠瑜, 隋旺华, 王文学. 裂隙动水注浆渗流压力与注浆堵水效果的相关分析[J]. **岩土力学**, 2012, 33(9): 2650—2655.
- ZHAN Kai-yu, SUI Wang-hua, WANG Wen-xue. Correlation analysis of seepage pressure and water plugging effect during grouting into a fracture with flowing water[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(9): 2650—2655.
- [3] 钱自卫, 姜振泉, 曹丽文, 等. 弱胶结孔隙介质渗透注浆模型试验研究[J]. **岩土力学**, 2013, 34(1): 139—142, 147.
- QIAN Zi-wei, JIANG Zhen-quan, CAO Li-wen, et al. Experiment study of penetration grouting model for weakly cemented porous media[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(1): 139—142, 147.
- [4] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. **岩石力学与工程学报**, 2012, 31(10): 1945—1956.
- QIAN Qi-hu. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(10): 1945—1956.
- [5] 邹金锋, 李亮, 杨小礼, 等. 土体劈裂灌浆力学机制分析[J]. **岩土力学**, 2006, 27(4): 625—628.
- ZOU Jin-feng, LI Liang, YANG Xiao-li, et al. Mechanism analysis of fracture grouting in soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(4): 625—628.
- [6] 张霄, 李术才, 张庆松, 等. 关键孔注浆方法在高压裂隙水封堵中的应用研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2011, 30(7): 1414—1421.
- ZHANG Xiao, LI Shu-cai, ZHANG Qing-song, et al. Study of key-hole grouting method to harness high pressure water gushing in fractured rock mass[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(7): 1414—1421.
- [7] 湛铠瑜, 隋旺华. 动水条件下单裂隙注浆模型试验系统设计[J]. **实验室研究与探索**, 2011, 30(10): 19—23.
- ZHAN Kai-yu, SUI Wang-hua. Design of model test system for grouting into a single fracture with flowing water[J]. **Research and Exploration in Laboratory**, 2011, 30(10): 19—23.
- [8] TERASHI M, JURAN I. Ground improvement—state of the art[C]//ISRM International Symposium. Melbourne, Australia: International Society for Rock Mechanics, 2000: 19—24.
- [9] 张伟杰. 富水断层破碎带注浆加固机理与复合控制注浆技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [10] HOULSBY A C. Construction and design of cement grouting: A guide to grouting in rock formation[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1990.
- [11] 阮文军. 基于浆液黏度时变性的岩体裂隙注浆扩散模型[J]. **岩石力学与工程学报**, 2005, 24(15): 2709—2714.
- RUAN Wen-jun. Spreading model of grouting in rock mass fissures based on time-dependent behavior of viscosity of cement-based grouts[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(15): 2709—2714.
- [12] 张改玲, 湛铠瑜, 隋旺华. 水流速度对单裂隙化学注浆浆液扩散影响的试验研究[J]. **煤炭学报**, 2011, 36(3): 403—406.
- ZHANG Gai-ling, ZHAN Kai-yu, SUI Wang-hua. Experimental investigation of the impact of flow velocity on grout propagation during chemical grouting into a fracture with flowing water[J]. **Journal of China Coal Society**, 2011, 36(3): 403—406.
- [13] 袁亮. 高瓦斯矿区复杂地质条件安全高效开采关键技术[J]. **煤炭学报**, 2006, 31(2): 174—178.
- YUAN Liang. Key technique to high efficiency and safe mining in highly gassy mining area with complex geologic condition[J]. **Journal of China Coal Society**, 2006, 31(2): 174—178.
- [14] 杨米加, 陈明雄. 注浆理论的研究现状及发展方向[J]. **岩石力学与工程学报**, 2001, 20(6): 839—841.
- YANG Mi-jia, CHEN Ming-xiong. Current research state of grouting technology and its development direction in future[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(6): 839—841.
- [15] 白峰青, 卢兰萍, 缙书宝, 等. 德盛煤矿特大突水治理技术[J]. **煤炭学报**, 2007, 32(7): 741—743.
- BAI Feng-qing, LU Lan-ping, GOU Shu-bao, et al. Harnessing technique for most water bursting of Desheng coal mine[J]. **Journal of China Coal Society**, 2007, 32(7): 741—743.
- [16] GOTHÄLL R, STILLE H. Fracture dilation during grouting[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2009, 4(2): 126—135.
- [17] GOTHÄLL R, STILLE H. Fracture—fracture interaction during grouting[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2010, 25(3): 199—204.