Hans Journal of Civil Engineering 土木工程, 2026, 15(11), 1-10
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/hjce
https://doi.org/10.12677/hjce.2026.1511252

Hans汉斯

裂隙介质动水注浆硅溶胶浆液扩散规律研究

张　浩[1]，李　爽[2]，梁艳坤[1,3]

[1]华北水利水电大学地球科学与工程学院，河南　郑州
[2]中国矿业大学资源与地球科学学院，江苏　徐州
[3]华北水利水电大学岩土工程与水工结构重点实验室，河南　郑州

收稿日期：2026年10月6日；录用日期：2026年10月28日；发布日期：2026年11月9日

摘　要

为揭示动水条件下裂隙介质注浆的浆液扩散机制，采用可视化平板裂隙模型试验与数值模拟，对比研究了单孔与双孔注浆时硅溶胶浆液在单一平板裂隙中的扩散形态与渗流压力演化规律。结果表明：(1) 浆液扩散形态呈“圆形－扁平椭圆形－U形”三阶段演化，动水作用是形态畸变的主导因素；(2) 单孔注浆扩散初期快、中后期慢，形态散乱而充填效率低，双孔注浆因两孔浆体相互约束，扩散边界稳定，逆水与竖向充填能力显著增强，14 s时充填面积由单孔的45%提升至90%；(3) 两种工况的起压顺序均为x轴正向 > y轴双向 > x轴负向，双孔注浆使y轴双向测点的起压时刻提前约7~9 s；(4) 数值模拟可再现扩散形态，但受二维建模限制，其充填面积与封堵时间与试验存在一定偏差。研究结果可为动水地层多孔注浆设计提供依据。

关键词

动水注浆，硅溶胶，单一裂隙，双孔注浆

Study on the Diffusion Law of Silica Sol Grout in Fractured Media under Dynamic Water Injection

Hao Zhang[1], Shuang Li[2], Yankun Liang[1,3]

[1]School of Earth Sciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan
[2]School of Resources and Earth Sciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu
[3]Key Laboratory of Geotechnical Engineering and Hydraulic Structures, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: October 6, 2026; accepted: October 28, 2026; published: November 9, 2026

文章引用: 张浩, 李爽, 梁艳坤. 裂隙介质动水注浆硅溶胶浆液扩散规律研究[J]. 土木工程, 2026, 15(11): 1-10.
DOI: 10.12677/hjce.2026.1511252

Abstract

To reveal the slurry diffusion mechanism of grouting in fractured media under dynamic water conditions, a comparative study was conducted using visual flat plate fracture model tests and numerical simulations, examining the diffusion patterns and seepage pressure evolution of silica sol slurry in a single flat plate fracture during single-hole and dual-hole grouting. The test fracture zone dimensions were 400 mm × 300 mm with an aperture of 5 mm, under a dynamic water head of 1 m and grouting pressure of 0.02 MPa. The results indicate: (1) The slurry diffusion pattern evolves through three stages-"circular-flattened elliptical-U-shaped", with dynamic water being the dominant factor causing morphological distortion; (2) Single-hole grouting exhibits rapid initial diffusion but slower progression in the middle and late stages, resulting in scattered patterns and low filling efficiency. In contrast, dual-hole grouting achieves stable diffusion boundaries due to mutual confinement of the two holes, significantly enhancing counterflow and vertical filling capacity, with the filling area increasing from 45% (single-hole) to 90% at 14 s; (3) The pressure initiation sequence for both conditions follows the order: positive x-axis > bidirectional y-axis > negative x-axis, with dual-hole grouting advancing the pressure initiation time at bidirectional y-axis measurement points by approximately 7~9 s; (4) Numerical simulation can reproduce diffusion patterns, but due to the limitations of two-dimensional modeling, there may be deviations in filling area and sealing time compared to experimental results. The findings can provide a basis for designing pore grouting in dynamic water-bearing strata.

Keywords

Dynamic Water Grouting, Silica Sol, Single Fracture, Dual-Hole Grouting

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

隧道与地下工程建设常遭遇软弱破碎围岩、富水砂层、断层破碎带等不良地质，易诱发围岩失稳与涌水突泥灾害。注浆技术凭借地层加固、防渗堵水与结构修复功能，已成为处置此类地质问题的关键技术手段。例如香炉山隧洞在碎粉岩软弱地层中采用注浆加固，但单孔逐次注浆的劈裂与挤密效果具有显著非均质性，易遗留注浆薄弱区[1]。事实上，虽然近年来动水条件下的单裂隙、裂隙网络涌突水注浆封堵理论取得了初步发展，但大部分实验研究均采用单孔进行注浆。实际工程中为了快速堵水等原因，多采用多孔进行注浆堵水。因此，深入研究单双孔注浆的扩散规律，对提升软弱地层注浆加固具有重要的科学意义与工程价值。

裂隙注浆理论多建立在平板裂隙简化模型之上。Baker [2]将裂隙简化为平直、光滑、等开度的平板，推导了牛顿流体在裂隙内作层流运动时的关系式；郝哲等[3]给出了牛顿浆液与非牛顿浆液的径向流、轴向流扩散公式以及多孔注浆的相互作用关系；张良辉[4]考虑粗糙度与地下水黏性阻力影响，推导了牛顿流体灌浆时间与扩散半径的关系式；石达民[5]通过试验研究了时变性牛顿流体作一维层流时的压力变化规律；阮文军[6]考虑黏度时变性并计入流核影响，推导了宾汉姆流体的注浆扩散模型；Sui 等[7]通过单一裂隙动水化学注浆的四因素四水平正交试验，量化了动水流速、裂隙宽度、浆液凝胶时间与注浆速率对堵水效果的影响程度；朱明昕[8]研究了牛顿流体与宾汉姆流体在单一平板裂隙内流量与压力梯度的关

系，建立了注浆扩散运移方程并进行了数值验证。

数值模拟方面，于青春等[9]提出逆建模方法，由一维、二维观测数据反算三维裂隙的尺寸与密度；罗平平[10]结合宾汉姆流体在单一光滑倾斜裂隙内的流动公式，建立了裂隙网络宾汉浆液渗流与裂隙变形的耦合模型并开发了相应程序；杨斌[11]利用 COMSOL 求解不可压缩流体的 Navier-Stokes 方程，模拟了交叉裂隙中的流动特性并提出了压力差的简化修正方法；童瞳[12]基于 COMSOL Multiphysics 构建裂隙岩体注浆扩散模型，通过与试验对比验证了模型的合理性，并探讨了注浆压力与注浆量对扩散形态与扩散半径的影响。

综上，现有研究多以单孔注浆为对象，而实际工程为快速堵水常采用多孔注浆，双孔浆体间的协同约束机制及其对动水冲刷的抵抗作用尚不明确。为此，本文通过室内可视化平板裂隙试验并结合数值模拟，研究单孔与双孔注浆下硅溶胶浆液的扩散形态与渗流压力场演化规律。

2. 单一平板裂隙单双孔注浆试验

2.1. 试验材料与方案

2.1.1. 注浆材料

裂隙介质堵水要求浆液黏度低、胶凝时间可控、无毒环保、无腐蚀性且结石体强度高、材料来源广泛。硅溶胶浆液具备上述特性，且造价低、抗渗性与耐久性好，故选用硅溶胶作为注浆材料。其胶凝原理：硅溶胶是纳米 SiO_2 颗粒在水中均匀分散形成的胶体溶液，外观呈乳白色、半透明，分子式可表示为 $mSiO_2 \cdot nH_2O$，其胶团具有类似黏土胶体的双电层结构，由胶核与双电层(吸附层与扩散层)两部分构成。向硅溶胶中加入无机盐催化剂后，大量阳离子进入溶液并中和颗粒表面的负电荷，压缩双电层厚度，促使颗粒间发生脱水缩合反应，形成 Si-O-Si 交联网络而凝胶。混合浆液由硅溶胶溶液与 NaCl 溶液按体积比 3:1 配制，不同浓度 NaCl 溶液配制的混合浆液黏度变化与胶凝时间如图 1 所示，最终采用 17% NaCl 溶液进行试验。

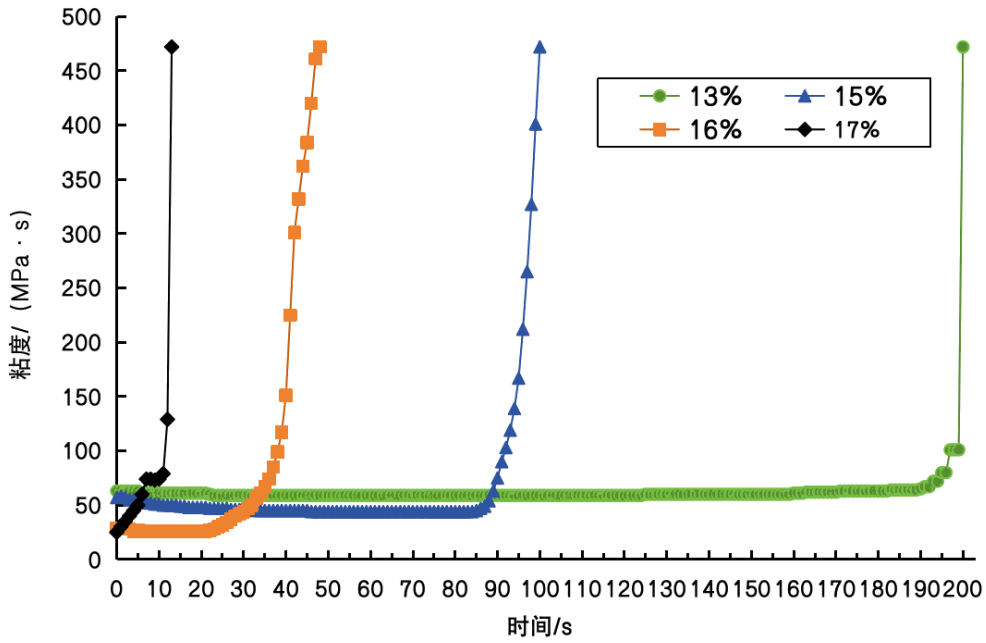


Figure 1. Viscosity fitting curves of NaCl solutions with different concentrations
图 1. 不同浓度 NaCl 溶液黏度拟合曲线

2.1.2. 试验方案

如图 2 所示，试验系统由动水箱、注浆系统、裂隙模拟装置、数据采集系统与废水收集系统五部分组成。其中注浆系统包括静音无油空气压缩机(型号 1500-50-2，电机功率 3000 W，排气压力 0.8 MPa)、调压阀、两个储液罐及注浆管路。调压阀控制注浆压力为 0.02 MPa；A、B 液分别经流量阀调节后按 3：1 体积比混合，实现即配即注，避免浆液提前凝胶固结。而裂隙模拟装置由上下两块厚 150 mm 的亚克力板与 5 mm 厚橡胶条拼装而成，四周以不锈钢夹具紧固防漏。装置外廓尺寸 600 mm × 400 mm，模拟裂隙区尺寸 400 mm × 300 mm，裂隙开度由橡胶条厚度控制为 5 mm；如图 3 所示，裂隙左端为进水口、右端为出水口，进水水头恒定为 1 m。裂隙内布设 5 个水压力传感器(量程 0~500 kPa)：测点 1 位于注浆孔 1 上游侧(x 轴负向)，测点 2 位于注浆孔 1 正上方(y 轴正向)，测点 3 位于两注浆孔连线下方(x 轴附近)，测点 4 位于两孔之间下侧，测点 5 靠近出水口一侧。数据采集系统采用 dataTaker DT80 采集仪记录渗流压力，采用佳能 EOS 90D 相机定时拍摄浆液扩散图像。

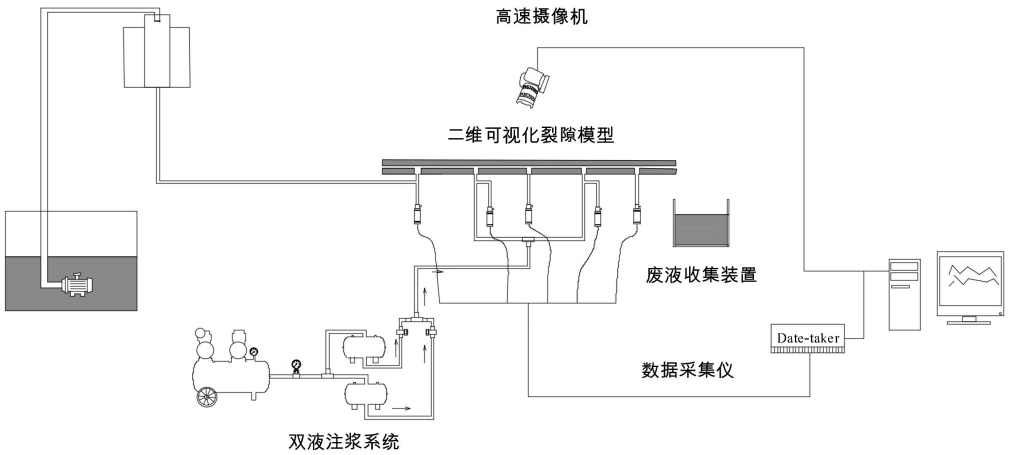


Figure 2. Main devices of the experimental system
图 2. 试验系统主要装置

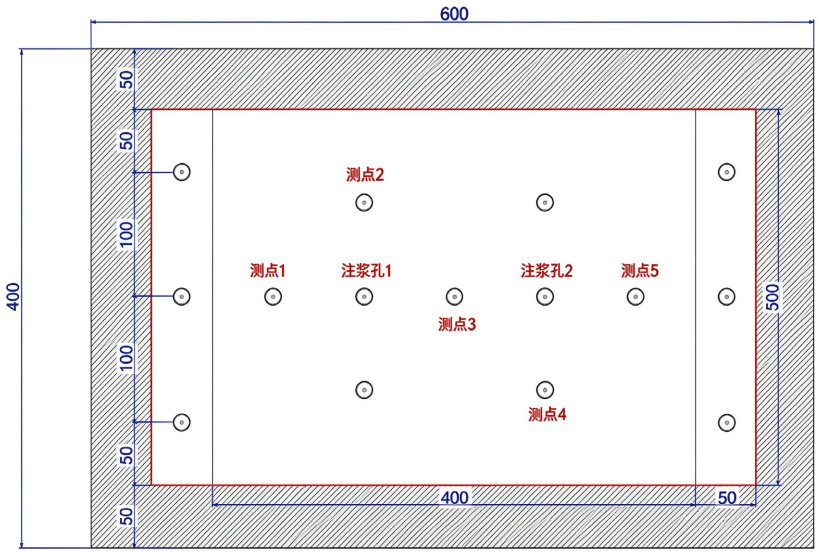


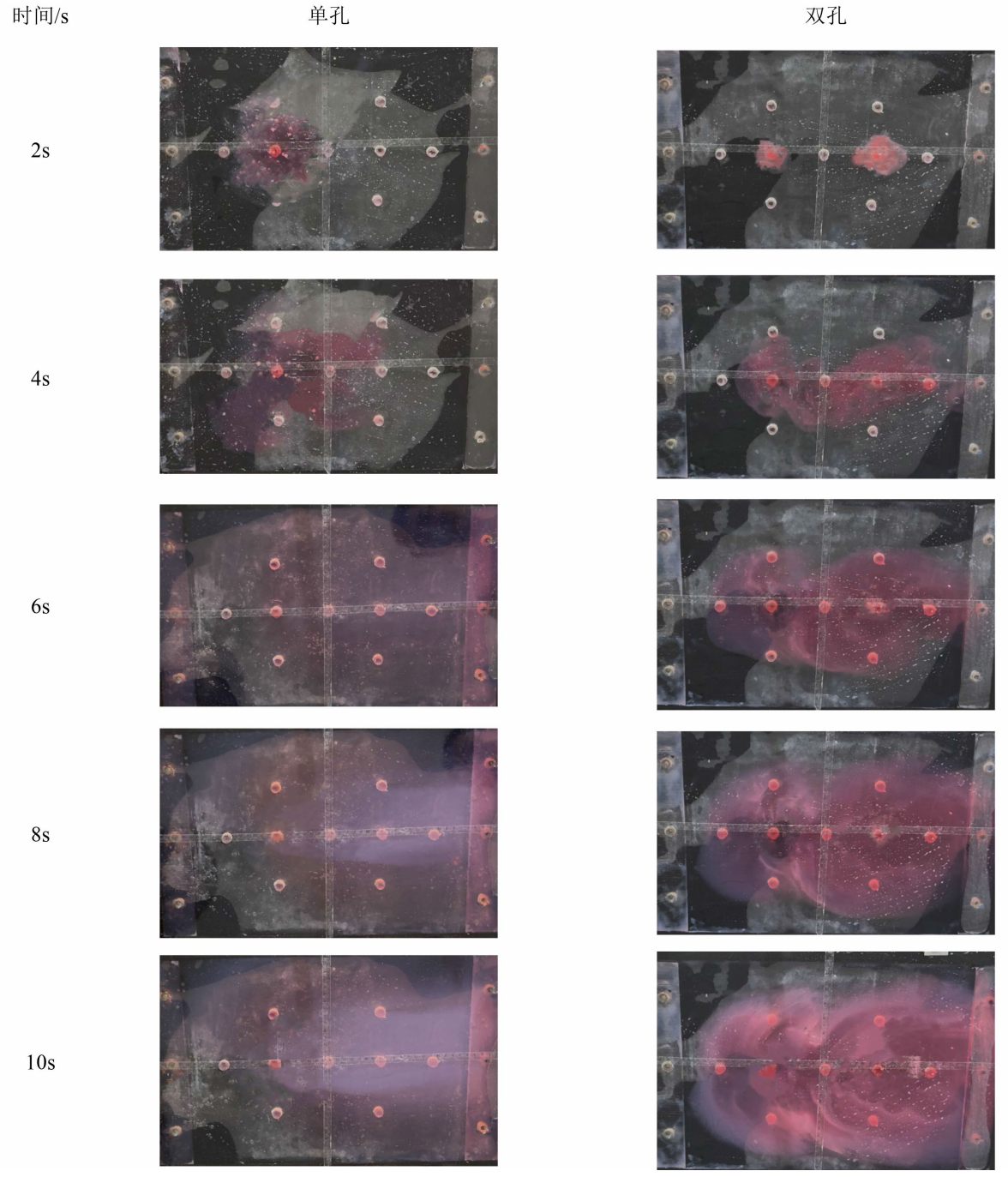
Figure 3. Schematic diagram of the fracture model, measurement points and grouting holes
图 3. 裂隙模型及测点、注浆孔布置示意图

保持水头高度 1 m 与裂隙开度 5 mm 不变，分别进行动水条件下的单孔与双孔注浆试验。试验流程为：布置并连接水箱、裂隙平板、空压机、储液罐、相机与数据采集仪，通水至水流稳定后启动采集仪、水泵、空压机与相机，随后开启注浆阀开始注浆。

2.2. 试验结果与分析

2.2.1. 浆液扩散过程

浆液扩散过程见图 4。



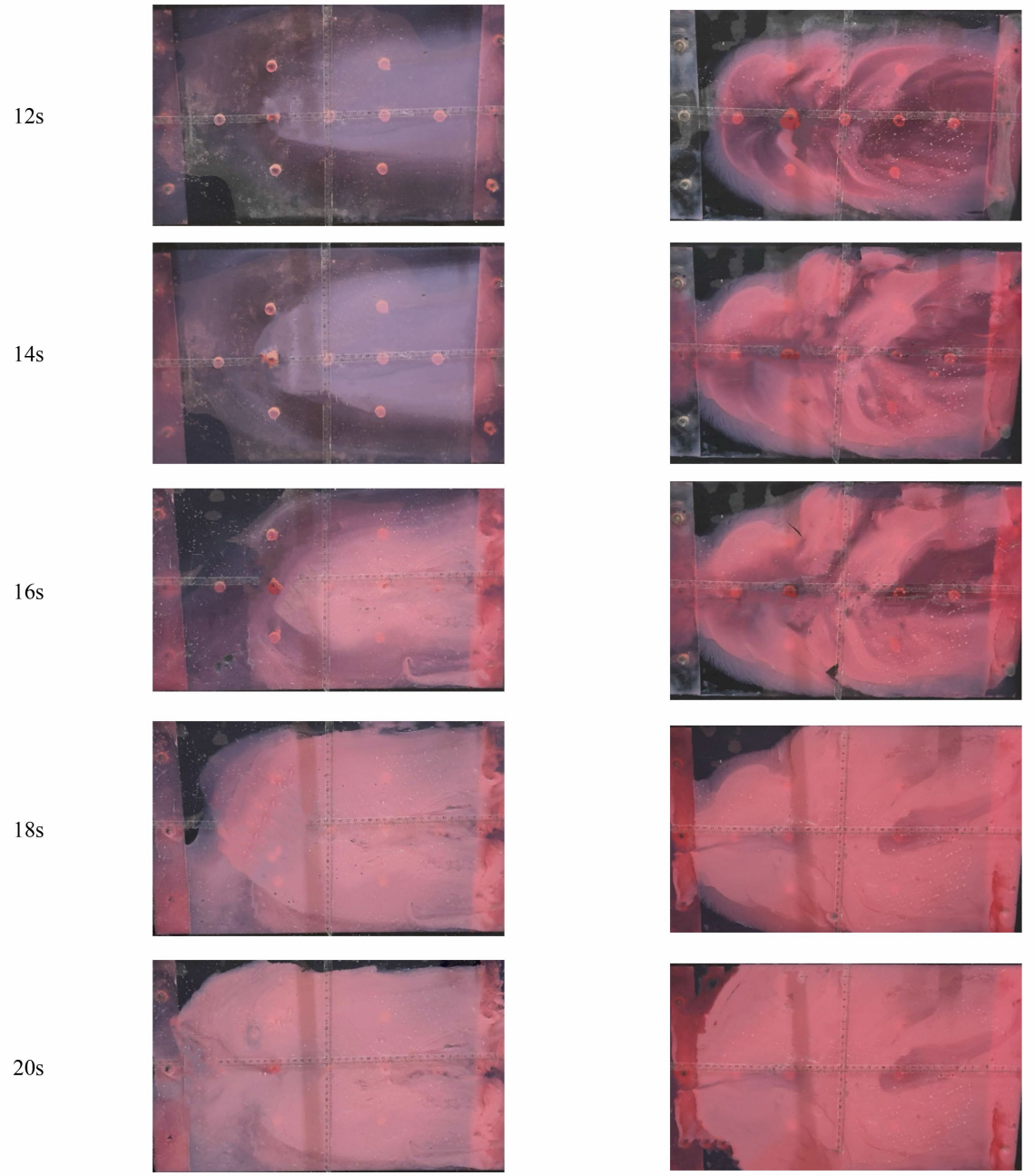


Figure 4. Slurry diffusion process of single-hole and dual-hole grouting
图 4. 单孔与双孔注浆浆液扩散过程

(1) 初始阶段(2 s)。动水对浆液的冲刷作用尚未显现，两种工况的浆液均以注浆孔为中心呈近圆形向外扩散，形态受注浆压力主导，无明显畸变。单孔浆液扩散半径约为双孔的 2 倍，其原因在于双孔工况总流量均分两孔，单孔流量减半。

(2) 动水干扰初期(4 s)。水流冲刷与稀释作用开始显现，两种工况的扩散形态出现分化。单孔浆液因缺少侧向浆体支撑，边缘率先被水流冲散，形态由圆形趋于不规则；双孔工况两个注浆孔的浆液边缘发生轻微形变(孔 2 的稀释范围大于孔 1)，形态逐渐演变为以 x 轴为长轴的椭圆形，同时两孔浆液开始交汇融合，形成初步的协同浆体。该时段单孔浆液被水流稀释的区域面积大于双孔。

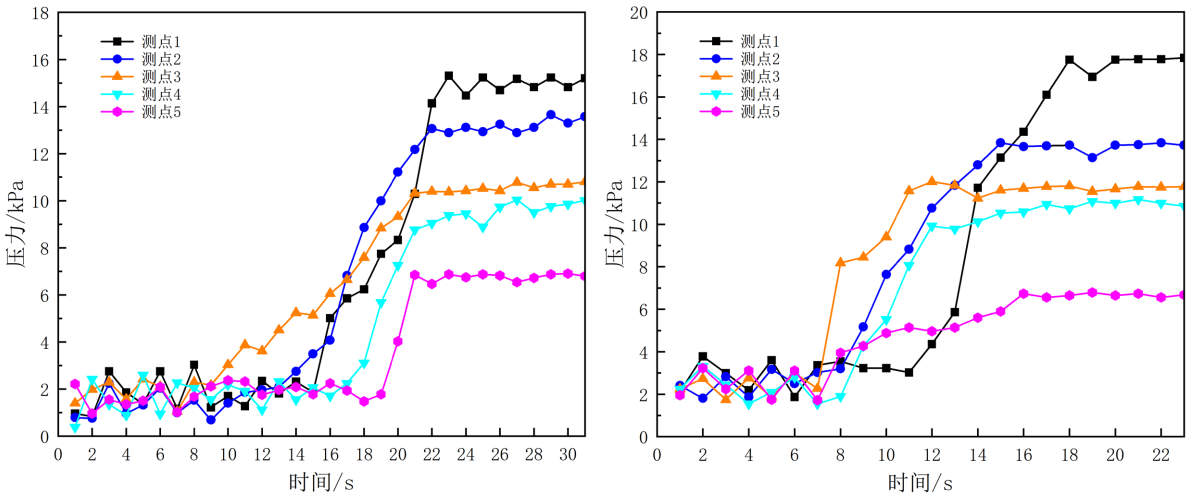
(3) 动水主导阶段(6~8 s)。动水冲刷进一步增强，成为影响浆液扩散的主导因素。单孔浆液受水流裹挟作用明显，形成扁平的椭圆形，沿 x 轴正向(顺水流方向)的扩散范围远大于 y 轴两侧，扩散边界模糊；双孔浆液沿 x 轴正向与 y 轴双向同步延展，虽 x 轴正向的扩散优势依旧明显，但因两孔浆体已形成协同约束，其被冲散与稀释的程度显著低于单孔，扩散边界更为清晰规整。

(4) 边界受限充填阶段(10~14 s)。两种工况的浆液均陆续抵达裂隙边界，扩散速率放缓，差异进一步放大。单孔浆液抵达出口边界后仅能缓慢向 y 轴两侧拓展，整体呈 U 形扩散形态；至 14 s 时，单孔浆液在裂隙内的充填面积仅约 45%，存在大量充填盲区。双孔浆液触及出口边界后，依托两孔浆体的协同作用继续向 x 轴负向与 y 轴全域高效扩散，14 s 时已覆盖裂隙上下边缘，充填面积达 90%。

(5) 封堵完成阶段(16~20 s)。两种工况均逐步完成裂隙全范围充填，最终实现止水封闭效果。单孔浆液因前期扩散不均衡、受水流干扰大，需先完成 y 轴边缘的充填，再缓慢蔓延至 x 轴进水边界；至 20 s 时，单孔与双孔注浆均完成裂隙全范围封堵，达到相同的止水效果。因此，两种工况的最终封堵效果相同，双孔注浆的优势体现在中期充填效率与覆盖范围，而非最终封堵效果。

2.2.2. 浆液渗流压力演化

单孔与双孔注浆各测点的压力时程曲线见图 5。



(a) 单孔　　(b) 双孔

Figure 5. Pressure-time curves of measurement points for single-hole and dual-hole grouting
图 5. 单孔与双孔注浆各测点压力时程曲线

(1) 起压顺序一致。两种工况均为注浆孔下游侧的测点 3 最先起压(约 8 s)，随后依次为 y 轴双向的测点 2、4，最后为上游侧的测点 1。说明浆液扩散速度为 x 轴正向 > y 轴双向 > x 轴负向，动水的冲刷与稀释作用严重抑制了逆水流方向的浆液推进。

(2) 双孔注浆显著提升竖向与逆向充填速率。双孔工况下 y 轴双向测点 2、4 的起压时刻分别由单孔的约 17 s、19 s 提前至约 9 s、10 s；上游侧测点 1 由约 18 s 提前至约 13 s。这与 2.2.1 节中双孔工况在 14 s 已覆盖裂隙上下边缘的观测一致。

(3) 稳定压力排序存在差异。单孔工况稳定压力为测点 1 > 2 > 3 > 4 > 5；双孔工况为测点 1 > 2 > 4 > 3 > 5。双孔工况下测点 3 的压力不再高于测点 4，且两孔之间区域的压力分布更为均匀，反映出两孔浆体的相互挤压与约束使中段压力场趋于一致。

(4) 逆水端仍为薄弱区。两种工况下上游侧测点 1 均最后起压，说明即使采用双孔注浆，逆水流方向仍是充填的薄弱环节，浆液在尚未初凝固结时即被流动水体稀释裹挟。

2.3. 小结

动水条件下，双孔注浆浆液向 y 轴双向与 x 轴负向的扩散距离与速度均大于单孔，14 s 时充填面积为单孔的 2 倍；双孔注浆使 y 轴双向测点的起压时刻提前约 7~9 s；但两种工况的最终封堵时刻相同，双孔注浆的优势集中于中期充填效率与覆盖范围；逆水流方向为两种工况共同的充填薄弱区。

3. 单一平板裂隙注浆数值模拟

3.1. 模型与参数

采用 COMSOL Multiphysics 数值模拟软件建立光滑单一裂隙注浆模型，选择注浆孔数量及水流状态为单一变量，保证浆液黏度、注浆速率、裂隙开度等相关变量不变，选用两相流水平集模块，该接口可以追踪浆水接触界面的变化，利用浆液体积分数来表征浆液在裂隙中的扩散；定义左侧为定流速进水口，右侧为自由流出边界，壁面符合边界不滑移条件。设置注浆孔半径为 0.6 cm。定义两注浆孔连线所在直线为 X 轴，顺水流方向为 X 轴正向，逆水流方向为 X 轴负向；垂直 x 轴方向向上为 Y 轴正向向下为 Y 轴负向。由于水流流动方向从左向右，将单孔注浆孔设置在模型靠近进水口一侧，便于较完整的观测浆液动水条件下的扩散过程。

3.2. 模拟结果

模拟得到的浆液扩散过程见图 6。

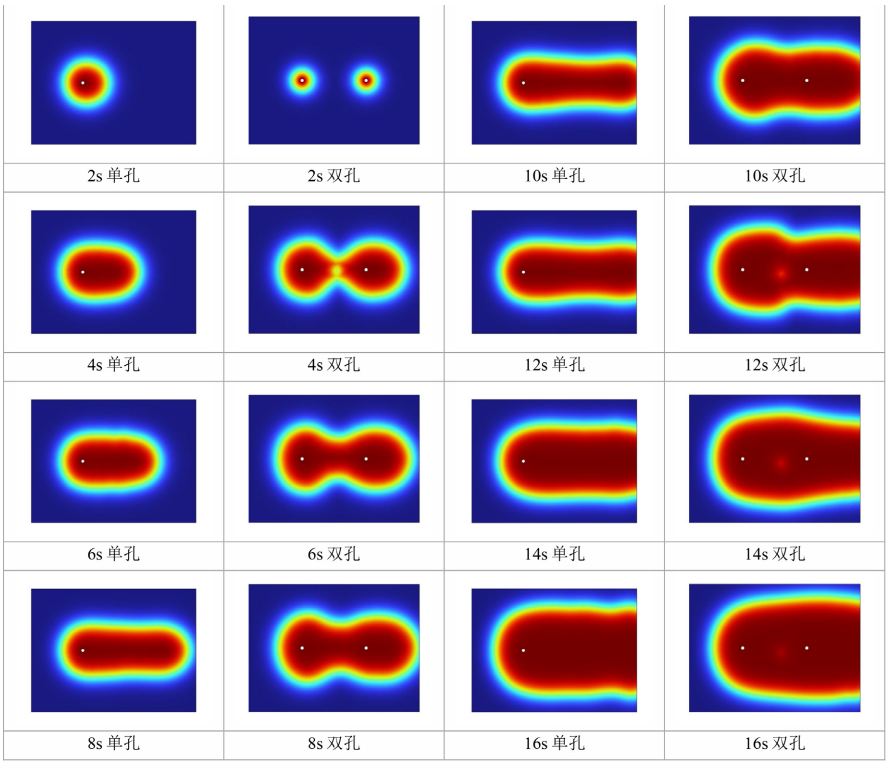


Figure 6. Slurry diffusion process of COMSOL numerical simulation
图 6. COMSOL 数值模拟浆液扩散过程

注浆前期(2 s 前)，单孔与双孔浆液均呈近圆形均匀扩散，单孔扩散半径约为双孔的 2 倍。4 s 时，单孔浆液在水流作用下呈以 x 轴为长轴的椭圆形，边缘被水流冲散；双孔工况孔 1 与孔 2 浆液开始接触混合，孔 2 处呈椭圆形，因孔 1 先注入的浆液胶凝固结使过流通道缩窄、流速增大，孔 2 受动水影响更大。6~8 s 时，单孔浆液形成扁平椭圆形，长轴持续增大而短轴基本不变，向 y 轴扩散缓慢；双孔浆液持续向 x 轴正向与 y 轴双向扩散，且前者大于后者。10~20 s 时，单孔浆液扩散至 x 轴左边缘后缓慢向 y 轴双向扩展，呈 U 形，20 s 时充填面积达 75%；双孔浆液抵达出口边界后继续向 x 轴负向与 y 轴双向扩散，速度大于单孔，双孔工况在 20 s 时的充填面积为 80%。相较于单孔注浆，双孔注浆浆液向 Y 轴正负向和 X 轴负向扩散距离较远，浆液在裂隙中扩散面积远远大于单孔，双孔注浆浆液受动水水流冲刷稀释作用影响较单孔小。

3.3. 试验与模拟对比

浆液扩散过程中试验与数值模拟浆液扩散形态基本一致，均为：注浆前期呈近圆形扩散，单孔中浆液的扩散半径是双孔的近两倍，随着注浆的进行，单孔注浆浆液扩散形态呈以 X 轴为长轴的椭圆形，浆液边缘被水流冲散，双孔注浆中孔 1 和孔 2 浆液接触混合后，孔 2 处扩散呈以 X 轴为长轴的椭圆形，孔 1 和孔 2 浆液边缘均被水流冲散，单孔中浆液被稀释面积较双孔大；注浆后期，浆液扩散至 X 轴右边缘后向垂直水流方向不断扩散，单孔注浆扩散速度较双孔注浆慢，浆液扩散成 U 形，单孔浆液扩散面积远小于双孔。两者的浆液扩散形态基本一致：均由圆形经椭圆形演化为 U 形。

4. 结论

(1) 动水条件下硅溶胶浆液在单一平板裂隙中的扩散形态呈“圆形–扁平椭圆形–U 形”三阶段演化。动水作用是形态畸变的主导因素：顺水流方向浆液被水流携带铺展，逆水流方向受剪切冲刷，最终形成开口朝向上游的 U 形轮廓。

(2) 单孔注浆扩散初期快、中后期慢，形态散乱而充填效率低；双孔注浆依托两孔浆体的协同约束，扩散边界更为稳定，14 s 时充填面积由单孔的 45%提升至 90%，y 轴双向测点的起压时刻提前约 7~9 s。但两种工况均在 20 s 实现全裂隙封堵，双孔注浆的优势体现在中期充填速率与覆盖范围，而非缩短总封堵时间。

(3) 两种工况的浆液扩散速度均为 x 轴正向 > y 轴双向 > x 轴负向。动水的冲刷与稀释作用对逆水流方向运移形成显著阻碍，且浆液在向 y 轴两侧与 x 轴负向扩散时尚未完成初凝固结即被稀释裹挟，逆水流方向是动水注浆的薄弱区，应在工程中通过增加上游侧注浆孔或延长胶凝时间等措施予以补强。

(4) 试验中浆液扩散形状较模拟不规则，由于数值模拟为二维几何建模与三维实际裂隙有差别，数值模拟中浆液完成封堵所需时间较试验短，试验中浆液受水流冲散稀释范围更大，数值模拟中虽将浆液设为黏度时变性液体，但未考虑实际注浆过程中浆液被水流稀释导致浆液黏度降低，浆液固结速度较慢易被动水流冲散，封堵速度较慢。

5. 展望

本文通过室内可视化平板裂隙试验与数值模拟，揭示了动水条件下硅溶胶浆液在单一平板裂隙中“圆形–扁平椭圆形–U 形”的扩散形态演化规律，明确了双孔注浆依托浆体协同约束可显著提升中期充填效率与覆盖范围，为动水地层注浆堵水设计提供了试验与数值依据。受研究条件所限，以下问题有待进一步研究。

(1) 注浆孔数量方面。本文仅对比单孔与双孔两种工况，且两孔间距与注浆顺序固定，孔间协同约束

的定量规律尚未充分揭示。实际工程中注浆孔数量多、布孔方式复杂，后续应系统研究孔数、孔距与布孔方式对浆液扩散形态和充填效率的影响，建立多孔协同注浆的扩散模型与设计准则。

(2) 边界条件方面。本文试验采用定水头与恒定注浆压力，而实际动水地层中水流速度与注浆压力均随注浆进程动态变化。后续研究应考虑水流速度时变与注浆压力分级调节，使试验与数值模拟更贴近真实工况。

(3) 模型维度与浆液性质方面。数值模拟采用二维光滑平板裂隙建模，未考虑裂隙粗糙度、开度变化与三维缝面效应，水平集方法亦不描述浆液与水的混溶稀释，导致定量结果与试验存在偏差；硅溶胶浆液黏度随胶凝时间增长，本文尚未将其时变性全过程纳入模拟。后续应发展三维裂隙模型，引入浆液掺混模型与黏度时变模型，统一注浆压力与裂隙开度等参数，以提高模拟的定量精度。

综上所述，动水条件下多孔注浆的协同扩散机理与定量预测方法仍有较大研究空间。进一步完善试验手段与数值模型，并结合现场工程验证，将有助于提升动水地层注浆加固与堵水的设计与施工水平。

参考文献

[1] 王小龙. 碎粉岩软弱地层多孔联合注浆扩散与加固规律研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2024.

[2] Baker, W.J. (1955) Flow in Fissure Formations. *Proceedings of the 4th World Petroleum Congress*, Rome, 6-17 June 1955, 379-393.

[3] 郝哲, 王介强, 刘斌. 岩体渗透注浆的理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 492-496.

[4] 张良辉. 岩土灌浆渗流机理及渗流力学[D]: [博士学位论文]. 北京: 北方交通大学, 1996.

[5] 石达民. 驱水注浆过程中浆液运动规律及其对参数计算的影响[J]. 金属矿山, 1988(2): 28-33.

[6] 阮文军. 基于浆液粘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.

[7] Sui, W.H., Liu, J.Y., Hu, W., Qi, J.F. and Zhan, K.Y. (2015) Experimental Investigation on Sealing Efficiency of Chemical Grouting in Rock Fracture with Flowing Water. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **50**, 239-249. https://doi.org/10.1016/j.tust.2015.07.012

[8] 朱明听. 单一裂隙注浆扩散及封堵机理的数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2013.

[9] 于青春, 大西有三. 岩体三维不连续裂隙网络及其逆建模方法[J]. 地球科学, 2003(5): 522-526, 544.

[10] 罗平平. 裂隙岩体可灌性及灌浆数值模拟研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 河海大学, 2006.

[11] 杨斌. 充填裂隙网络非线性渗流特性试验与模拟研究[D]: [博士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2019.

[12] 童瞳. 裂隙岩体中宾汉姆流体注浆扩散半径研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.