DOI：10.3724/1000-6915.jrme.2025.0779

考虑流－固相变的硅溶胶浆液在动水裂隙中的扩散规律研究

梁艳坤[1]，张 昕[1*]，贾明慧[1]，王文学[1]，袁世冲[2]，张丁阳[3]，李明胜[4]，王志奇[5]

（1. 华北水利水电大学 地球科学与工程学院，河南 郑州 450046；2. 河北地质大学 城市地质与工程学院，河北 石家庄 052161；
3. 天津城建大学 地质与测绘学院，天津 300384；4. 江苏中煤地质工程研究院有限公司，江苏 常州 213000；
5. 华北有色工程勘察院有限公司，河北 石家庄 050021）

摘要：动水条件下裂隙岩体中硅溶胶浆液的扩散与封堵过程受浆液流－固相变行为的显著影响，因此，采用二维可视化平板裂隙模型，开展了不同裂隙开度、倾角及动水水头条件下的正交试验，研究了硅溶胶浆液在动水条件下扩散形态演化与渗流压力响应规律。结果表明：裂隙倾角对注浆封堵效果的影响最为显著，其次是裂隙开度，动水水头影响相对较弱，且三者存在显著的交互作用。硅溶胶在相变控制下的扩散形态呈现“圆形－分形－U 形”三阶段演化，受注浆压力、水动力冲蚀、裂隙几何形态与浆液相变动力学的耦合控制；高水头与大开度条件下分形扩散阶段更为显著，U 形扩散阶段凝胶体的破碎化程度也更高。分形扩散是相变动力学主导的界面失稳问题，主要受到硅溶胶浆液独特凝胶机制的控制，渐进式凝胶化使前锋形成外侧强度较低的凝胶壳与内部流动性较高的液态核，持续注浆的径向推挤、脱水缩合导致凝胶壳开裂，驱动扩散形态由圆形扩散向分形扩散演化。渗流压力时程曲线反映了浆液扩散与固化的阶段性特征，其波动幅度与浆体的抗冲蚀性能密切相关，可作为硅溶胶动水注浆效果的定量评价指标。

关键词：渗流力学；硅溶胶注浆；裂隙岩体；流－固相变；分形扩散；渗流压力响应

中图分类号：O 35 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－6915(2026)06－1707－16

第 一 作 者：梁艳坤（1988－），现任副教授，主要从事矿山水害治理方面的研究工作。E-mail：liangyankun@ncwu.edu.cn

***通信作者**：张 昕（1977－），现任教授，主要从事岩土工程灾害防控方面的研究工作。E-mail：Zhangxin@ncwu.edu.cn

Diffusion behavior of silica sol grouting in rock fracture under dynamic water considering the fluid-solid phase transition

LIANG Yankun[1], ZHANG Xin[1*], JIA Minghui[1], WANG Wenxue[1], YUAN Shichong[2], ZHANG Dingyang[3], LI Mingsheng[4], WANG Zhiqi[5]

(1. *College of Geosciences and Engineering*, *North China University of Water Resources and Electric Power*, *Zhengzhou*, *Henan* 450046, *China*; 2. S*chool of Urban Geology and Engineering*, *Hebei GEO University*, *Shijiazhuang*, *Hebei* 052161, *China*; 3. *School of Geology and Geomatics*, *Tianjin Chengjian University*, *Tianjin* 300384, *China*; 4. *Jiangsu China Coal Geology Engineering Research Institute Co. Ltd.*, *Changzhou*, *Jiangsu* 213000, *China*; 5. *North China Engineering Investigation Institute Co.*, *Ltd.*, *Shijiazhuang*, *Hebei* 050021, *China*)

Abstract: Silica-sol grouting in fractured rock under dynamic water conditions is primarily influenced by the liquid-solid phase transition of the grout, which subsequently governs diffusion patterns and sealing performance. This

收稿日期：2025－10－20；**修回日期**：2025－12－29

基金项目：河南省高等学校重点科研项目计划（25A410003）；河北省教育厅科学研究青年拔尖项目（BJ2025131）；天津市面上基金项目（24JCYBJC00610）
Supported by the Henan Provincial Key Scientific Research Project Program for Higher Education Institutions (Grant No. 25A410003), Science Research Project of Hebei Education Department (Grant No. BJ2025131) and Natural Science Foundation of Tianjin (Grant No. 24JCYBJC00610)

study employed a 2D transparent fracture model to conduct an orthogonal test program considering variables such as fracture aperture, fracture inclination, and hydraulic head. The evolution of grout diffusion morphology and the corresponding seepage pressure response were analyzed. The results indicate that fracture inclination is the predominant factor affecting sealing efficiency, followed by fracture aperture and hydraulic head; however, significant interaction effects exist among these factors. Under phase-transition control, silica-sol diffusion undergoes a three-stage evolution: from circular spreading to fractal propagation, and finally to a U-shaped pattern. This evolution is influenced by injection pressure, hydrodynamic erosion, fracture geometry, and gelation kinetics. Fractal propagation is more pronounced at higher hydraulic heads and larger apertures, accompanied by increased fragmentation during the U-shaped stage. Mechanistically, the fractal pattern arises from interfacial instability driven by phase-transition kinetics. Progressive gelation results in a gel-shell/liquid-core structure at the advancing front, where a low-strength gel shell forms externally while a more mobile liquid core remains internally. Sustained injection causes radial pushing from the liquid core, alongside tensile stresses induced by dehydration condensation and external hydraulic erosion, promoting shell cracking and preferential channelization. This transformation alters the diffusion front from a smooth circular boundary to a fractal one. The seepage pressure response curve reflects the staged characteristics of grout diffusion and solidification, with its fluctuation amplitude closely correlating to erosion resistance, thus providing a quantitative indicator for assessing the effectiveness of silica-sol grouting under dynamic water conditions.

Key words: seepage mechanics; silica sol grouting; fractured rock mass; fluid-solid phase transition; fractal diffusion stage; seepage pressure response

First author: LIANG Yankun (1988－), associate professor, is engaged in mine water disaster prevention and control. E-mail: liangyankun@ncwu.edu.cn

***Corresponding author:** ZHANG Xin (1977－), professor, is engaged in geotechnical hazard prevention and control. E-mail: Zhangxin@ncwu.edu.cn

1　引　言

随着我国矿产资源开发深度不断增加，矿山安全面临的地质灾害问题日益严峻，尤其是在高地应力条件下，裂隙导水引发的突水灾害已成为制约深部矿井安全高效生产的主要风险之一。注浆技术作为常规且关键的治水手段，通过渗透、胶结与加固的联合作用提升围岩的抗渗性和整体稳定性，被广泛视为构建“主动”水害防控体系的重要措施[1-2]。大量工程实践表明，区域预注浆、帷幕注浆等技术已在煤矿、金属矿以及隧道工程中得到广泛应用，并在减少突水灾害、提升围岩完整性方面发挥了重要作用[3-4]。例如，在开采深度超 800 m 的云南毛坪铅锌矿，其深部巷道穿越岩溶裂隙高度发育的栖霞茅口组强富水含水层，面临极大的突水威胁。为此，该矿实施了大规模的帷幕注浆工程，主要采用水泥基浆液，并辅以化学浆液对导水通道进行封堵。现场通过注浆前后涌水量和压水渗透系数等指标评价治理效果[5]。实践表明，此类重大工程虽取得了显著堵水成效，但注浆效果常呈现较大的离散性，鉴于地下裂隙空间内浆液扩散与留存过程难以直接观测，上述差异现象被认为可能与浆液凝结固化过程中流变特性的演化有关。在注浆过程中，浆液在裂隙岩体中扩散伴随着凝结固化过程，即从液态到固态的流－固相变，这一相变过程显著改变了浆液的流变特性，从而影响其扩散路径、注浆压力场与加固效果[6-8]，因此，深入研究动水条件下浆液在流-固相变阶段的扩散规律与封堵效果，对提升深部矿井水害注浆防治具有重要的科学意义与工程价值。

黏度作为表征浆液流动特性的关键参数，其时变特性对注浆扩散行为具有显著影响。李术才等[9]采用正弦波振动式黏度计，测量了水泥－水玻璃(C-S)浆液和高聚物改性浆液的表观黏度随时间增长关系，并拟合了黏度时变方程；L. Z. Zhang 等[10]基于旋转剪切试验，证明 C-S 浆液符合宾汉姆流体特征，并推导了屈服应力和黏度的时变函数；Z. J. Zhu 等[11]进一步揭示了温度对浆液凝胶时间与黏度变化的显著影响。为定量描述浆液黏时变特性对其在裂隙介质中运移规律的影响，阮文军[12]较早地将浆液黏度时变性引入裂隙注浆扩散模型研究，并建立了基于宾汉姆流体假设的黏度时变模型；随后，国

内外学者结合浆液流变本构关系，将浆液视为牛顿流体、宾汉姆流体、幂律流体或 Herschel-Bulkley 流体，并通过引入黏度时变函数来表征浆液的黏度演化过程，构建了考虑黏度时变特性的浆液本构模型[13-17]。近年来，一些学者将浆液的时变黏度引入数值计算模型中。例如，Y. H. Wang 等[18]采用流体体积法跟踪浆－水两相界面，考虑浆液黏度的时变性对浆液扩散过程的影响；J. S. Liang 等[19]基于聚合物浆液流变特性与黏性流体力学理论，采用有限元与 Level Set 方法模拟扩散界面演化，建立了考虑黏度时变特性的裂隙注浆扩散模型；张嘉凡等[20]借助 COMSOL 软件研究了倾斜裂隙中浆液黏度变化对注浆扩散规律的影响。

然而，现有研究多将浆液简化为固定流型单相流体，并采用统一的黏度时变函数描述其演化过程，难以反映前后期注入的浆液所处不同相变阶段带来的空间差异[21-22]。为此，张庆松等[23-24]考虑浆液黏度增长时间与其离注浆孔中心距离的对应关系，建立了静水条件下浆液黏度的时空分布方程，并提出步进式算法模拟 C-S 速凝浆液在动水条件下水平裂隙中的注浆扩散过程。随后，S. C. Li 等[25-26]进一步提出了分序扩散固化法，通过“扩散－固化”循环与固化黏度阈值分阶段刻画黏度演化，实现了动水条件下力学参数的时空演化仿真。

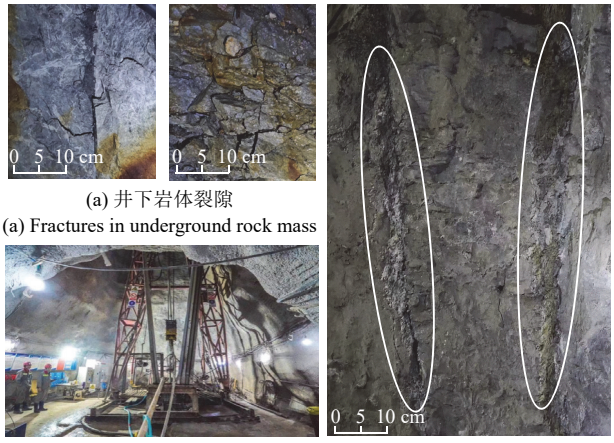
相较数值方法，室内可视化注浆试验可直观展示裂隙内浆液扩散前锋与界面演化，是获取关键扩散参数的重要手段。浆液的扩散行为与其相变过程存在密切的联系[27]，B. Tirupati 等[28]较早地在孔隙介质注浆试验中指出，浆液扩散前锋受浆液凝胶固化过程的影响会呈现明显的非连续推进。在裂隙动水注浆方面，D. Y. Zhang 和 D. P. Liu[29]通过二维裂隙动水注浆试验中观察到先注入脲醛树脂浆液凝结导致的偏心流现象，为相关认识提供了试验依据。刘　军[30]针对 C-S 速凝浆液在流－固相变阶段出现扩散路径突变的现象，率先提出了裂隙注浆“圆形扩散－突围扩散”两阶段模型，随后，黄长鑫等[8, 31-32]进一步对该现象和机制进行了补充和完善。相关试验研究多集中于 C-S 等速凝浆液。而对于硅溶胶这类典型的凝胶浆液，其在临界凝胶点之前呈牛顿流体特征，随凝胶化过程黏度急剧上升并发生流－固相变[33-35]，该独特的相变动力学可能导致其扩散与封堵机制显著不同。W. J. Zhang 等[36-37]已对其在静水环境下的扩散规律进行了探讨，但在动水条件下，硅溶胶经历流－固相变时的扩散形态如何演化、相变前锋与动水如何相互作用等关键问题，仍缺乏系统的试验揭示。这在很大程度上限制了硅溶胶浆液在动水封堵中的工程应用。基于此，本研究通过室内可视化模型试验，研究动水裂隙模型中硅溶胶浆液的扩散特征，重点分析硅溶胶浆液流－固相变阶段扩散形态、堵水率和渗流压力场的响应规律。研究结果可以为硅溶胶浆液在深部矿山及地下工程中的推广应用提供理论依据与试验支撑。

2　试验材料与方案

2.1　研究区域

毛坪铅锌矿位于云南省昭通市彝良县境内，地处川滇高原与四川盆地的阶梯过渡带，地貌起伏大、构造活动强烈。受多期构造演化与区域应力场叠加影响，矿区岩体节理裂隙发育，工程地质与水文地质条件复杂多变。受强烈构造作用影响，毛坪铅锌矿地层陡倾近直立，主要出露地层有泥盆系、石炭系、二叠系和第四系，其中泥盆系上统宰格组与石炭系威宁统的中厚层灰岩、白云岩是主要的铅锌银的容矿层[38]，区内含、隔水层垂向相间分布，主要为二叠系下统栖霞茅口组岩溶裂隙强富水含水层、二叠系下统梁山组砂页岩隔水层、石炭系威宁统与丰宁统岩溶裂隙中等－弱富水含水层、石炭系下统万寿山组隔水层、泥盆系上统宰格组岩溶裂隙弱富水含水层。其中，栖霞茅口组强富水含水层是矿山的主要充水水源。随着毛坪铅锌矿床开采向深部推进，隐伏导水构造与高压含水层逐渐显现，矿井涌水量持续增大，高地压突水灾害风险显著攀升。为此，本着主动防控治灾的原则，在矿区北翼与南翼设计并实施了区域注浆帷幕加固工程，以封堵主要导水通道并强化围岩整体防渗能力以保障生产安全。其中，北侧注浆帷幕线布置在二叠系梁山组砂页岩附近，通过浆液扩散达到封堵砂页岩中存在的局部导水通道，堵截二叠系栖霞茅口组强富水含水层的补给；南侧注浆帷幕主要是对西南、东南导水通道进行封堵，注浆帷幕轴线穿越石炭系，堵截上部含水层的局部渗漏和南部含水层的侧向来水。图 1 展示了毛坪铅锌矿井下岩体裂隙分布与注浆帷幕施工现场的实景照片。

基于矿区水文地质勘查资料，毛坪铅锌矿石炭系与泥盆系地层的裂隙多以缓倾角为主，主要集中分布在 0°～40°范围。图 2 展示了石炭系地层不同深度裂隙产状的分布规律。可以看出，在 310～670 m



(a) 井下岩体裂隙
(a) Fractures in underground rock mass

(b) 井下注浆帷幕施工现场
(b) Underground grout curtain construction site

(c) 注浆后的浆脉
(c) Grout vein after grouting

图 1　毛坪铅锌矿裂隙及注浆帷幕照片

Fig.1　Photos of fractures and grouting curtain in Maoping lead-zinc mine

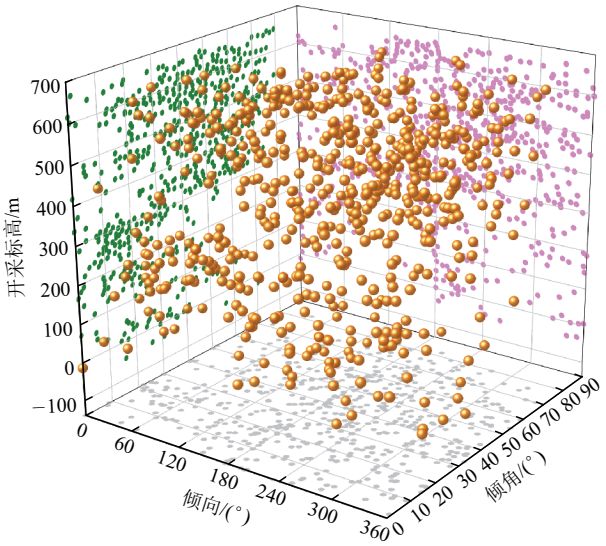


图 2　毛坪铅锌矿石炭系地层裂隙产状特征分布

Fig.2　Distribution and orientation of fractures in the Carboniferous strata of the Maoping lead-zinc mine

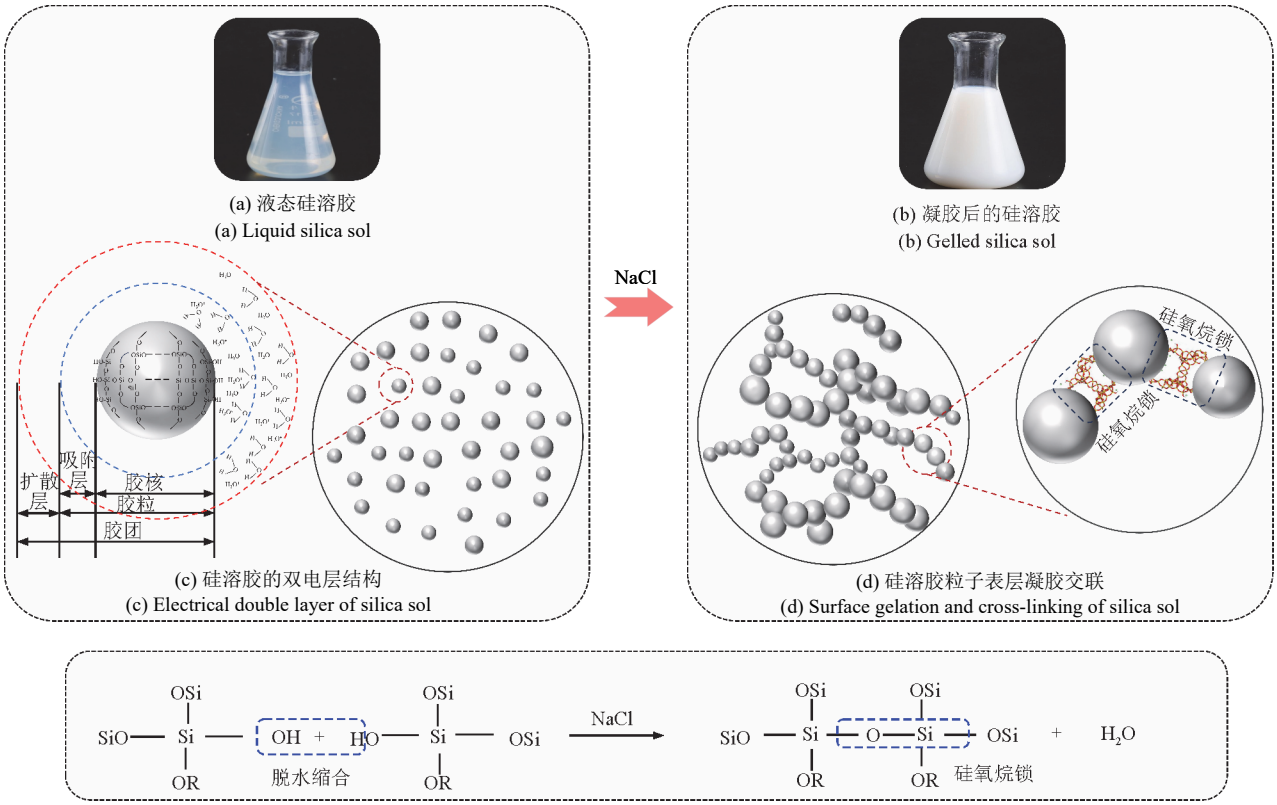
标高以上，裂隙倾角分布相对分散且均匀；而在 310 m 以下，裂隙倾角主要集中在 0°～40°。此外，根据袁世冲[39]对毛坪铅锌矿深部的采掘过程中岩体裂隙网络的调查研究，裂隙长度与开度总体呈正相关关系，大部分裂隙开度集中在 0～15 mm 范围。

2.2　注浆材料

本研究选用的注浆材料为硅溶胶浆液(见图3(a))，由纳米级二氧化硅(SiO_2)颗粒在水中均匀分散形成，属于一种无毒、粒度小、黏度低、化学性质稳定的亲水性注浆材料，硅溶胶分子胶核的基本成分为 SiO_2，其内部结构为 Si-O-Si 键相联结的立体网状结构，胶核和水接触的界面上形成了 Si-OH 硅羟基键，由于 Si-OH 硅羟基键为极性分子键，胶核表面呈现负的 Zeta 电位。硅溶胶中的水分子解离形成 H_3O^+ 和 OH^-，在胶核负电荷的吸引下形成较稳定的类似于黏土胶体的双电层结构，如图 3(c)所示。当加入强电解质催化剂(NaCl 溶液)后，在高盐浓度作用下二氧化硅纳米胶团双电层变薄崩塌，使得不同硅溶胶粒子表层的硅羟基发生脱水缩合反应，形成硅氧键(Si-O-Si)并释放出水分子(见图 3(e))，随着反应的进行，粒子间通过形成的 Si-O-Si 键相互连接，导致硅溶胶单体粒子相互交联，当硅溶胶聚体或多个胶团粒子相互交联，形成了相互交错的网状结构，如图 3(d)所示，随着反应进行，硅溶胶浆液最终由流动的溶胶转变为具有一定强度和稳定性的凝胶体，如图 3(b)所示。反应过程中新生成的水分子在压力梯度驱动下易向浆体外围迁移，这一向外的水分迁移会对正在形成的凝胶网络内部产生毛细应力或收缩拉应力，加剧了凝胶体的干缩与破碎[40]。

试验所用硅溶胶由郑州市隆达化工有限公司生产，SiO_2 含量为 30%，为半透明状液体，密度为 1.20 g/cm^3，平均粒径为 10～20 nm，初始黏度 10 mPa • s，pH 值为 9；试验选择 NaCl 作为催化剂，NaCl 试剂由国药集团化学试剂有限公司生产，NaCl 纯度不低于 99.5%。为分析硅溶胶的流－固相变特性，采用 SNB－2 型旋转黏度计测试硅溶胶黏度随时间的变化规律，结果如图 4 所示，其中 NaCl 的浓度为 15%，硅溶胶与 NaCl 溶液的体积比为 4:1。

从图 4 中可以看出，硅溶胶浆液的黏度时变曲线呈典型的三阶段特征：(1) 溶胶期(0～20 s)，浆液黏度非常低，且黏度增长速率非常缓慢，浆液表现出近似牛顿流体行为。(2) 溶胶－凝胶转化期(20～30 s)，随着双电层压缩及胶粒聚集效应增强，黏度迅速上升，流动性变差，浆液表现出显著的黏弹特性，变成了一种介于固态和液态之间的冻状物，表现为弱流动凝胶态。(3) 凝胶期(＞30 s)，硅溶胶内部胶粒聚集成的三维网状结构，浆液的黏度随时间呈指数级增长，浆液从流态转变为固态凝胶体，流动性迅速丧失。因此，本研究将黏度突变点 30 s 定为硅溶胶浆液的流－固相变点，以此作为后续注浆扩散与固化分析的关键参数。



(e) 硅溶胶缩合反应
(e) Condensation reaction of silica sol

图 3　硅溶胶的凝胶过程

Fig.3　The gelation process of silica sol

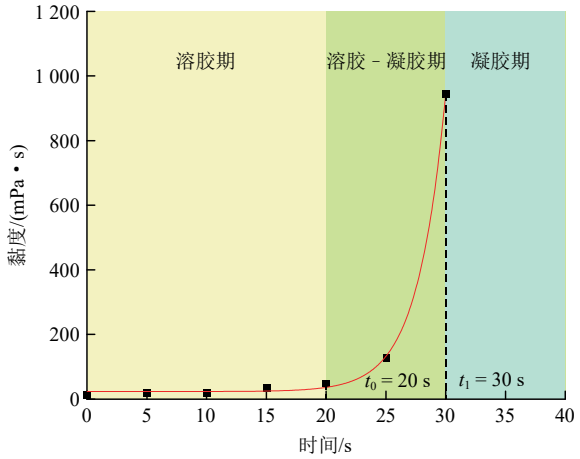


图 4　硅溶胶的黏度时变曲线

Fig.4　Curve of viscosity and time of silica sol

2.3　试验平台

理想化的二维平行板裂隙模型仍是研究浆液扩散行为最直接的方法。本研究采用自主设计的注浆试验平台，对二维平板裂隙内的硅溶胶浆液的扩散行为进行观测与分析，如图 5 所示。该装置由五大功能模块组成：(1) 动水供给箱；(2) 注浆系统；(3) 可视化二维平板裂隙；(4) 多源数据采集系统；(5) 废浆收集系统。动水供给系统可实现 0～10 m 范围内水头的无级调节，通过与高精度流量控制器配合，可在试验过程中维持稳定流速和恒定边界条件，从而实现动水环境下的注浆模拟。注浆系统由空压机、储浆罐、注浆管路等构成，最大工作压力为 2 MPa，注浆流量控制精度达±0.1 L/min，支持恒压与恒流 2 种注浆模式。可视化裂隙系统采用厚度约 10 mm 的透明亚克力板制作，裂隙壁面光滑平整，便于直观观测浆液扩散前锋。模型尺寸为 500 mm×300 mm×10 mm，裂隙开度可通过精密垫片进行 5～15 mm 范围内的灵活调节，裂隙底面距水流入口 100 mm 处设置直径 8 mm 的注浆孔，裂隙模型尺寸与注浆孔布置如图 6 所示。多源数据采集系统包含压力监测与图像采集两部分。压力监测模块采用分布式高精度孔隙水压力传感器阵列(量程 0～2 MPa，精度 0.1%FS)，沿裂隙面布设 8 个测点，监测浆液扩散过程中渗流压力的变化。以注浆孔为坐标原点，定义 X 轴正方向为沿裂隙面指向浆液扩散的下游方向，Y 轴位于裂隙面内并垂直于 X 轴。沿主扩散轴线(X 轴)布置了 4 个测点，分别位于注浆孔上游－75 mm、下游+75 mm、+150 mm、+225 mm 的位置，主要用于监测沿程渗流压力变化。此外，

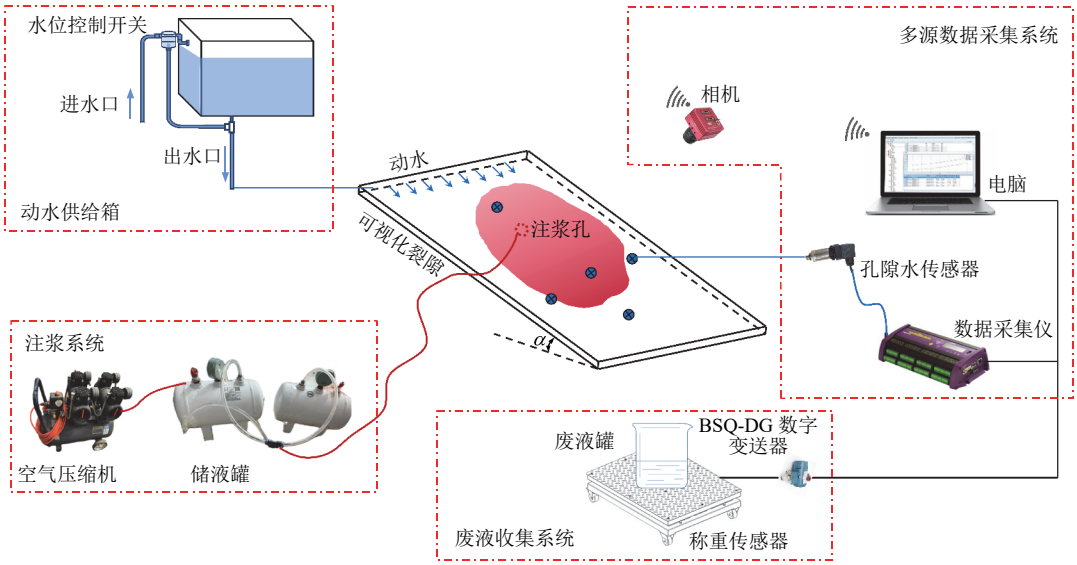
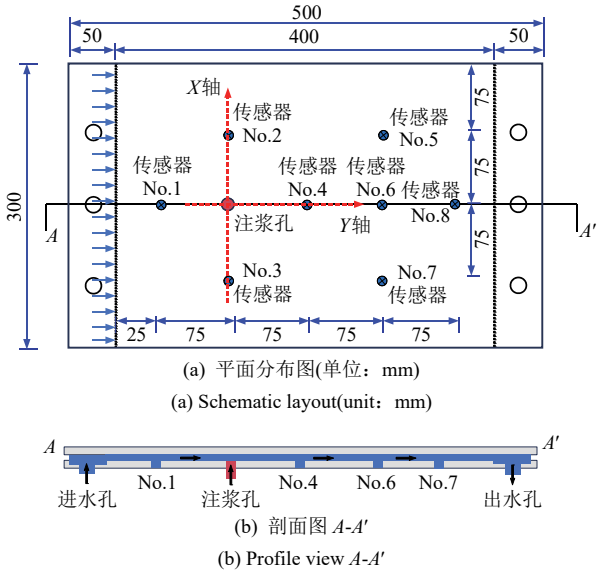


图 5　注浆试验平台示意图

Fig.5　Schematic diagram of grouting test platform



(a) 平面分布图(单位：mm)

(a) Schematic layout(unit：mm)

(b) 剖面图 *A*-*A*′

(b) Profile view *A*-*A*′

图 6　二维裂隙压力传感器的分布图

Fig.6　Layout of seepage pressure transducers in fracture replica

为了分析压力的侧向衰减，在垂直于 *X* 轴的 *Y* 轴布置对称的 4 个测点，分别为 No.2 (0 mm，75 mm)，No.3 (0 mm，−75 mm)，No.5 (150 mm，75 mm)及 No.7 (150 mm，−75 mm)。图像采集模块采用高速数码相机，可同步记录试验过程中浆液扩散影像。废浆收集系统配备高精度电子秤与 BSQ-DG 数字变送器，结合监测软件可实现注浆前后裂隙涌水量的实时测录。

2.4　试验方案

在动水条件下，裂隙注浆过程中浆液的扩散行为受裂隙几何形态、水流动力学条件、注浆压力及浆液流变特性等多种因素的综合影响。结合毛坪铅锌矿的工程与水文地质条件，本研究重点考察裂隙开度、裂隙倾角及动水水头 3 个关键因素，分析其对硅溶胶浆液扩散特征的影响。试验变量设置如下：裂隙开度(A)＝5，8，10，15 mm；裂隙倾角(B)＝0°，5°，10°，15°；动水水头(C)＝1.0，1.5，1.8，2.0 m。为系统分析多因素耦合作用下的浆液扩散规律，采用正交试验设计方法($L_{16}(4^3)$)构建试验方案，具体参数组合如表 1 所示。

表 1　动水注浆试验方案

Table 1　Experimental scheme of fracture grouting under flowing water conditions

试验序号 (test No.)	裂隙开度 (fracture aperture) A/mm	裂隙倾角 (fracture inclination) B/(°)	动水水头 (hydraulic head) C/m
1	5	0	1.0
2	5	5	1.5
3	5	10	1.8
4	5	15	2.0
5	8	0	1.5
6	8	5	1.0
7	8	10	2.0
8	8	15	1.8
9	10	0	1.8
10	10	5	2.0
11	10	10	1.0
12	10	15	1.5
13	15	0	2.0
14	15	5	1.8
15	15	10	1.5
16	15	15	1.0

试验开始前，按照配比制备硅溶胶溶液与 NaCl 溶液，并在 NaCl 溶液中加入红色色素以增强扩散成像的对比度；将裂隙调整至设定开度，使用老虎夹均匀固定，确保裂隙的密封与稳定。随后，将水箱升至预定高度，打开注水管、溢水管、导水管阀门进行注水，待裂隙中充满水且无气泡后，保持持续通水状态。连接注浆管路后，将注浆压力设置为 30 kPa，依次启动高速摄像机、数据采集系统与注浆系统，使浆液进入裂隙并发生扩散，过程中实时记录扩散前锋演化以及各监测点渗流压力的时序变化。试验结束后，依次关闭注浆系统和数据采集系统，保存试验数据，并对裂隙模型和注浆管道进行清洗，以备后续使用。

3　试验结果分析

3.1　注浆堵水率

为定量表征注浆引起的涌水量的变化，在注浆过程中持续监测过水流量的动态变化，并将注浆所致裂隙过流量的降低百分比定义为堵水率(sealing efficiency，*SE*)[41]，其计算公式为

$$SE=\frac{Q_0-Q_g}{Q_0}\times 100\% \tag{1}$$

式中：Q_0 和 Q_g 分别为注浆前、后的过水流量。根据式(1)计算各试验的堵水率(*SE*)，参照 W. H. Sui 等[41-42]，根据注浆过程中的堵水率，将注浆效果划分为：非常好、好、一般、差、非常差和失败六类，结果如图 7 所示。从图中可以看出，试验 1#的封堵效果最优，*SE* 达到 89.8%；而试验 16#的封堵效果最差，*SE* 仅为 7.8%，两者形成显著对比，表明不同试验条件对注浆效果具有明显影响。

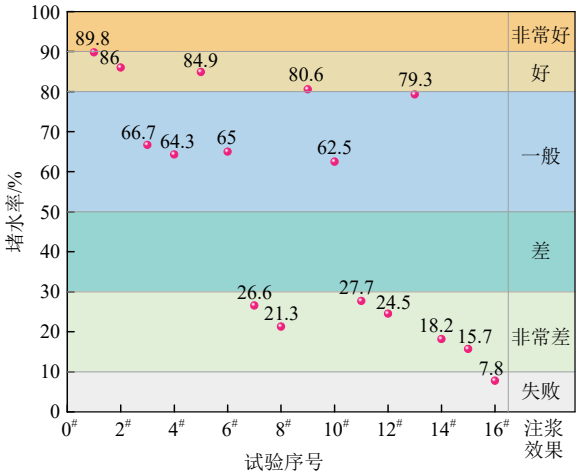


图 7　各试验的注浆堵水率

Fig.7　The sealing efficiency(*SE*) of grouting for each test

为识别各因素的主导作用，采用极差分析法对各影响因素进行定量评估，由表 2 所示数据及各因素极差可知：裂隙倾角对堵水率的影响最为显著，其极差为 54.15%，裂隙开度次之(46.45%)，动水水头最小(11.48%)。总体趋势显示，随着裂隙倾角与开度的增大，堵水率呈现显著下降趋势。

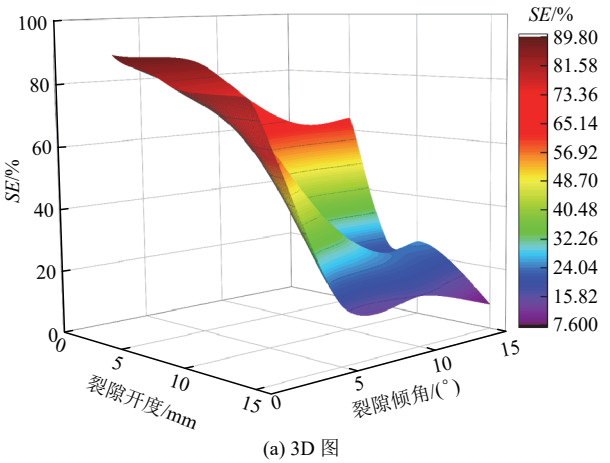
表 2　各因素极差分析表

Table 2　Range analysis for main effects on sealing efficiency of a fracture with flowing water

水平 (level)	堵水率均值 (average value of sealing efficiency)/%		
	裂隙开度 (fracture aperture)*A*	裂隙倾角 (fracture inclination)*B*	动水水头 (hydraulic head)*C*
1	76.70	83.64	47.58
2	49.44	57.92	52.79
3	48.83	34.17	46.69
4	30.25	29.49	58.17
极差/%	46.45	54.15	11.48

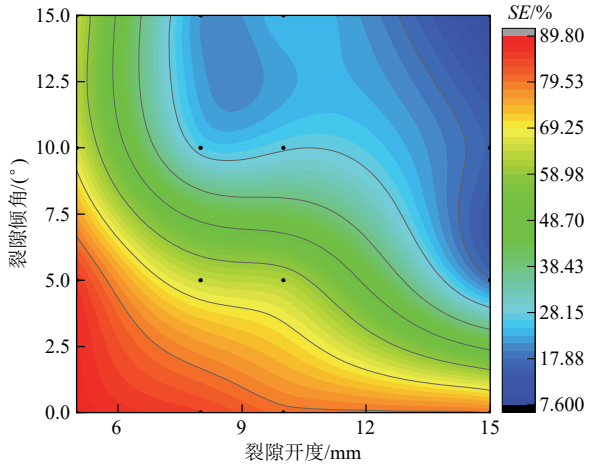
堵水率通常并非是单一参数独立作用的结果，而是受多因素耦合作用的综合表现。因此，为进一步揭示因素间交互影响规律，构建了以堵水率为 Z 轴、裂隙开度和动水水头分别为 *X* 轴和 *Y* 轴的三维曲面图及二维等高线图。

如图 8 所示，裂隙开度与倾角的协同减小可显著提升堵水效果。当裂隙开度≤10 mm 且倾角≤5°时，堵水率达到试验峰值(89.8%)。这主要是因为较小开度利于浆液在裂隙内形成连续滞留带，而低倾角裂隙能有效抑制浆液在动水与重力耦合作用下的迁移冲刷，从而增强凝胶滞留与固结稳定性。相反，当开度＞10 mm 或倾角＞10°时，浆液在重力驱动与水流冲刷下易发生迁移与稀释，导致封堵结构失稳，封堵效率骤降至 7.8%。



(a) 3D 图

(a) 3-D view



(b) 等值云图

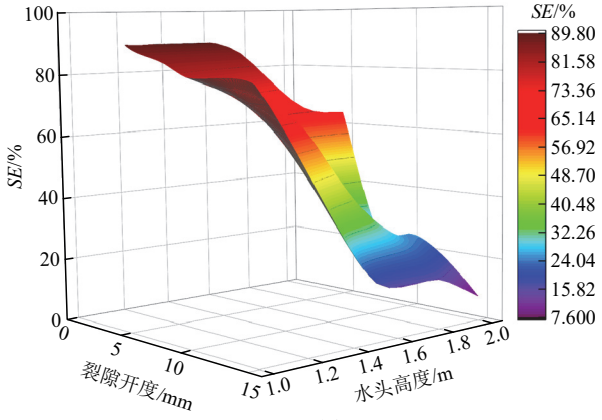
(b) Contour map

图 8　裂隙开度与倾角交互作用下堵水效果

Fig.8　The influence of fracture inclination and aperture on sealing efficiency

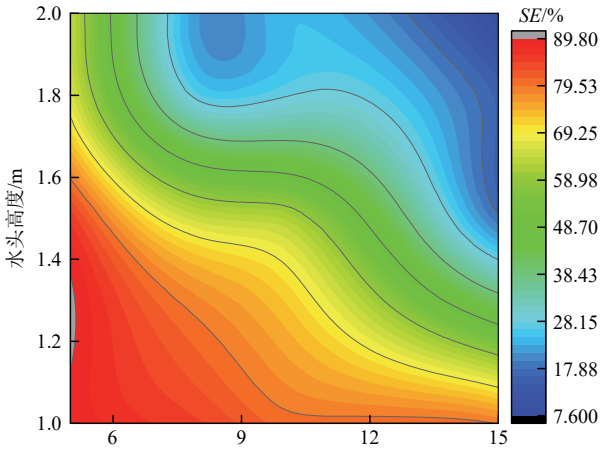
图 9 展示了裂隙开度与动水水头对堵水效果的影响规律。结果表明，相较于动水水头，裂隙开度对注浆堵水率的影响更为显著。随着裂隙开度减小及动水水头降低，堵水效果显著提升。具体而言，当裂隙开度处于 5～10 mm 范围时，堵水率达到试验最大值，可视为最优工况；同样地，1.0～1.5 m 动水水头区间对应较高的堵水率，说明较低流速与较弱冲刷力有利于浆液凝胶稳定。在恒定动水水头条件下，裂隙开度增大会导致堵水率显著下降，印证了裂隙开度是控制堵水率的主导因素。

裂隙倾角与动水水头对堵水效果的交互影响规律，如图 10 所示。可见较小倾角与较低水头共同作用时，动水封堵效果更优。当裂隙倾角处于 0°～10° 范围时，堵水率持续保持高位，表明该条件下密封性能最佳。这主要得益于小倾角裂隙中沿裂隙面的重力分量减小，既延缓了浆液扩散速率，又增强了浆液滞留性，有利于形成连续凝胶体有效封堵裂隙。相应地，1.0～1.5 m 水头区间同样呈现较高封堵效



(a) 3D 图

(a) 3-D view

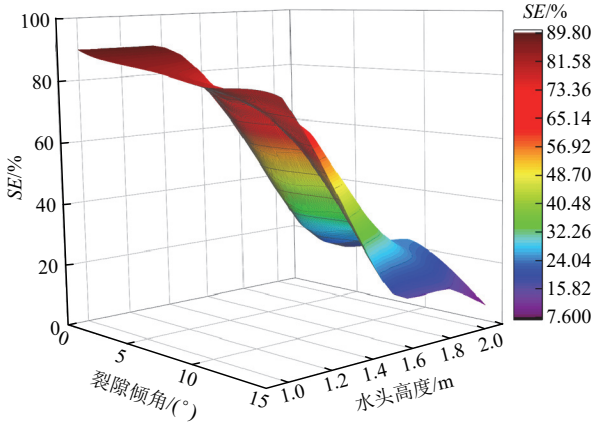


(b) 等值云图

(b) Contour map

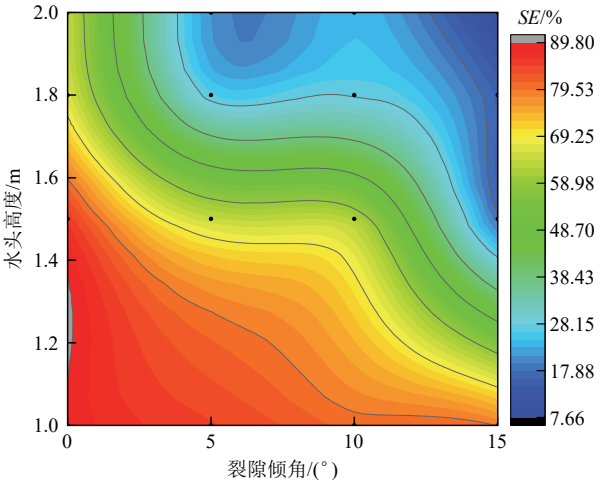
图 9　裂隙开度和动水水头交互作用下堵水效果

Fig.9　The influences of fracture aperture and hydraulic head on sealing efficiency



(a) 3D 图

(a) 3-D view



(b) 等值云图

(b) Contour map

图 10　裂隙倾角与动水水头交互作用下堵水效果

Fig.10　The influences of fracture inclination and hydraulic head on sealing efficiency

率，在低水头条件下，动水流速较低，对浆液运移滞留影响较弱，且动水在浆液凝胶固化阶段的冲刷作用最小，使浆体得以充分固结留存，最终实现有效堵水。

综上所述，裂隙倾角通过调控浆液运移的重力驱动力成为主导控制因素；裂隙开度次之，动水水头影响最弱。这一规律与刘 杰等[43-44]的研究结论一致。需要注意的是，动水流速同样是影响堵水率的重要参数，W. H. Sui 等[41]通过正交试验证实初始流速与裂隙开度是控制封堵效果的两大主控因素。但本研究受水头区间(1～2 m)所限，对应流速差异较小，致使堵水率对动水水头的敏感性弱于对裂隙几何参数的敏感性。

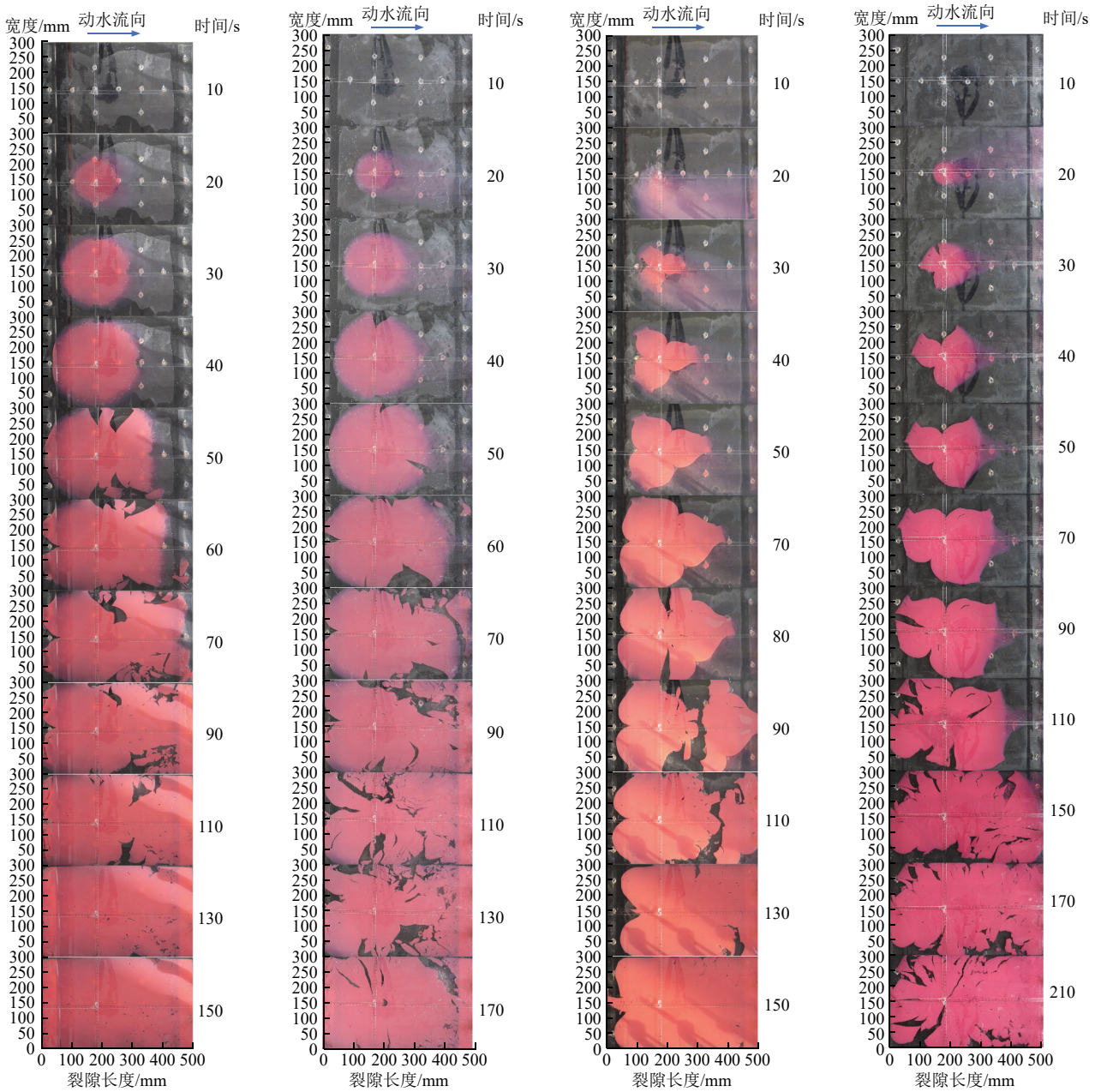
3.2 注浆扩散规律

通过图像采集系统对浆液扩散的全过程进行记录，经过处理得到硅溶胶浆液的动态扩散时空演化特征，将硅溶胶液体与 NaCl 溶液混合的时刻记为初始，其时间标记为 $t=0$ s，受到注浆管道时间的影响，混合浆液到达裂隙注浆口的时间约为 t = 10 s。图 11 为不同条件下的硅溶胶浆液的动水扩散特征，从图中可以看出，硅溶胶浆液在裂隙中的扩散行为呈现明显的阶段性演化规律，其演化过程受注浆压力、水动力冲蚀与浆液流－固相变动力学的耦合作用控制。

在注浆初期(10～20 s)，硅溶胶处于低黏度牛顿流体状态，表现出较强的流动性和较弱的抗动水冲蚀能力。在注浆压力的作用下，浆液沿裂隙迅速扩散，前锋形态近似圆形辐射状。此时浆液被水流稀释，远场区域颜色较浅，而靠近注浆孔处浆液浓度高，呈深红色，如图 11(a)，(b)所示。当 t＞20 s 后，随着浆液脱水缩合反应的进行，硅溶胶黏度迅速升高、流动性下降，浆液扩散前锋由规则圆形逐渐演化为边缘轻微不规则的近圆形扩散形态。当浆液达到流－固相变时间(t = 30 s)后，扩散前缘区域的浆液开始凝胶化，形成薄层固化圈。在后续注浆驱替及动水剪切的耦合作用下，凝胶体边缘局部产生开裂。当浆液前锋接近裂隙侧向边界后，受边界约束效应影响，浆液的扩散形态逐渐演化为 U 型扩散模式。此后，动水流因侧向边界的封堵受阻，流场重新调整，新注入浆液持续推动前锋前移，动水剪切促使凝胶体破裂并形成局部涌水通道，部分浆液被冲散分离，封堵连续性随之削弱。随着后续浆液的持续补充，局部区域又被重新压实，呈现典型的“驱替扩散－冲刷－留存/再封堵”特征。

在较大裂隙开度条件下，硅溶胶浆液的动水扩散行为更为复杂，如图 11(c)，(d)所示。初始阶段，硅溶胶浆液同样处于低黏度流体状态，在注浆压力的主导下形成近圆形扩散前锋，但是在裂隙倾角或动水水头增大后，浆液在动水流场和浆液自重分量的协同作用下被显著冲蚀稀释。随着时间推进(t＞20 s)，浆液黏度迅速升高，浆液流动性下降，浆液的扩散前锋边缘受流场剪切与自重分量耦合影响，产生多处径向裂口。外圈浆液逐渐凝胶化，但由于凝胶体强度较低，在持续注入浆液的推动作用下，浆液扩散前锋被分化形成“花瓣状”结构，逐步演化为分形扩散模式。当扩散前锋触及裂隙边界后，受边界约束影响，浆液扩散形态进入 U 型扩散阶段，此阶段，动水流场发生变化，水流沿着凝胶体薄弱区域逐渐切穿浆液，部分通道在中游汇合后形成新的局部高流速区，冲刷作用增强，导致部分凝胶碎块被冲散，堵水效果显著减弱。

综上所述，动水条件下硅溶胶注浆的扩散规律可归纳为“圆形扩散→分形扩散→U 形扩散”三阶段演化模式。在圆形扩散阶段，浆液黏度低，流动性强，浆液的扩散主要受到注浆压力的驱动，浆液扩散前锋推进速率快，扩散形状规则。进入分形扩散阶段后，浆液脱水缩合反应使浆液黏度急剧上升，前缘区域的浆液逐步形成凝胶固化圈，水流对已注入浆液的剪切与冲蚀效应显著增强，受到后注浆浆液的推动作用，导致前缘区域出现裂口，浆液扩散前锋呈“花瓣状”分形扩散。当扩散前锋受裂隙侧向边界约束时，扩散模式进一步过渡为 U 型扩散阶段，流场重新分布并发生偏折，扩散形态呈现多通道化和破碎化特征。对比分析不同开度条件下的扩散结果可知，小开度裂隙中的浆液扩散中分形扩散阶段不明显。其原因在于小开度裂隙(≤5 mm)的空间约束显著，动水剪切与重力分量影响较弱，浆液的运动主要由注浆压力控制主导，浆液前锋扩散较快，迅速触及裂隙边界后演化为 U 型扩散，而未经历明显的局部破裂扩展过程。根据经典的立方定律($Q \propto b^3$)，开度增大将显著提高裂隙渗透率和流通能力，使水动力剪切应力及局部湍动能量大幅增加。在后续浆液的持续推进下，诱发浆液边缘的不稳定扩展与分形扩散，导致分形扩散更为显著，U 型扩散阶段的破碎化程度亦随之提高。



(a) 试验 1#　(b) 试验 3#　(c) 试验 6#　(d) 试验 12#

(a) Test number 1#　(b) Test number 3#　(c) Test number 6#　(d) Test number 12#

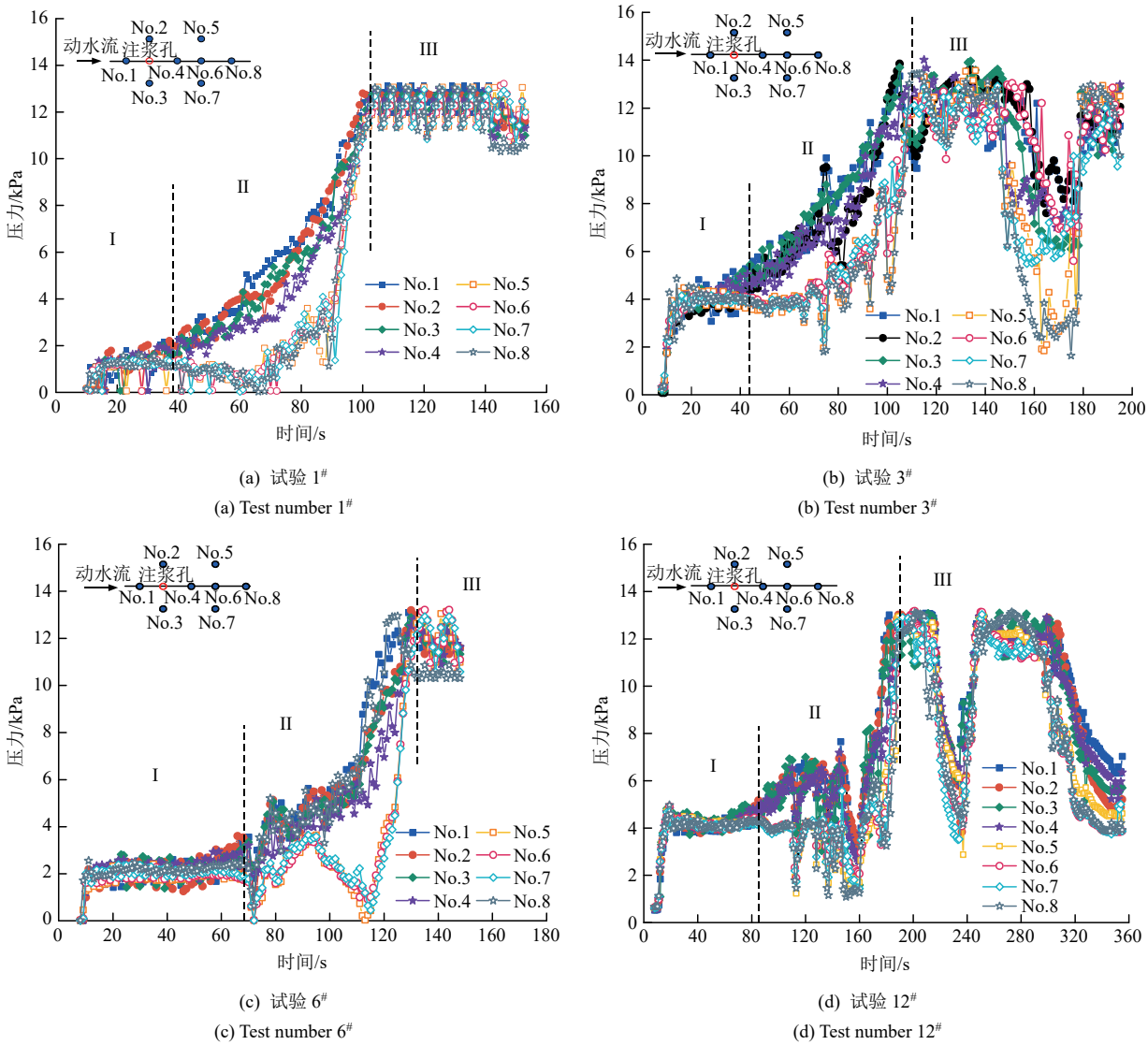
图 11　部分试验的注浆扩散图

Fig.11　A series of photos for grout distribution at different times in the fracture during grouting

此外，从材料特性角度来看，硅溶胶作为低黏度、低强度的化学浆液，其初期生成的凝胶体的剪切模量低，黏结力有限，对动水扰动更为敏感，易在流场扰动下发生微裂化与剥蚀，难以形成稳定的抗冲蚀层。因此，与传统水泥基浆液相比，硅溶胶在强渗流环境中更易出现分形化扩散，其抗冲蚀性能不足亦是导致扩散前锋分形演化的重要内在原因。

3.3　注浆渗流压力的变化

在动水注浆试验过程中，对裂隙内部渗流压力的动态变化进行全程监测，以揭示浆液扩散与封堵的时空演化规律。图 12 展示了部分试验中不同监测点(No.1～No.8)渗流压力随时间的变化曲线，根据渗压时程曲线的动态响应特征，整个注浆过程可划分为 3 个典型阶段。



(a) 试验 1#

(a) Test number 1#

(b) 试验 3#

(b) Test number 3#

(c) 试验 6#

(c) Test number 6#

(d) 试验 12#

(d) Test number 12#

图 12　注浆过程中渗流压力变化曲线

Fig.12　Variation of fluid pressure in the fracture replica during grouting

I 阶段，各监测点(No.1～No.8)渗压几乎同步上升，整体处于较低水平且波动微弱。此时硅溶胶浆液为低黏度的牛顿流体，裂隙内的压力场以注浆压力主导，浆液流动性高，凝胶化尚未完全开始，浆液在注浆压力驱动下沿裂隙均匀扩散，渗压上升主要源于浆液驱替导致的孔隙水体积压缩及动水扰动增强，尚未形成明显的压力梯度。

II 阶段，此阶段渗压呈现显著的空间分异现象。尽管各监测点渗压均有大幅度上升，但近场监测点(No.1～4)升幅显著高于远场监测点(No.5～No.8)，形成明显的压力梯度。该现象与硅溶胶的流－固相变密切相关，近场区域由于凝胶体的形成，局部渗流受阻，导致近场区域(No.1～No.4)渗流阻力急剧增大；而远场区域(No.5～No.8)因浆液尚未被完全充填，渗压响应滞后。此外，部分监测点在该阶段出现短周期波动或次级峰值，反映了凝胶体在动水冲蚀－再凝胶过程的瞬态扰动，揭示出浆液流－固相变过程中流场的非线性重构特征。

III 阶段，该阶段各监测点的渗压逐渐达到新的动态平衡，整体水平较 II 阶段更高。此时浆液已基本充填整个裂隙通道，裂隙渗透性显著降低。但凝胶体仍可能被动水侵蚀，形成次级渗流通道，导致部分监测点出现渗压波动或回落。

根据第 III 阶段渗流压力场特征，可进一步划分为 3 种典型类型：(1) 渐稳型；(2) 骤降回稳型；(3)多次波动型。渐稳型如图 12(a)和(c)所示，第 III 阶段各监测点渗压在较高水平保持稳定，表明硅溶胶有效充填并封堵了裂隙。骤降回稳型如图 12(b)所示，监测点渗压先达到峰值后陡降再回升，这说明凝胶体局部被冲蚀破坏后经再凝胶实现二次封堵。

图 12(d)为多次波动型，各监测点渗压在 III 阶段出现多次升降并最终稳定于较低水平，表明凝胶体遭受持续冲蚀，裂隙微通道重新贯通，裂隙封堵失败。该类型常出现在大开度或高水头裂隙中，表现出明显的多通道化和破碎化特征。

渗流压力的时程变化可视为浆液扩散与固化过程的综合力学响应，其阶段演化规律也受注浆压力、水动力冲蚀与浆液流－固相变动力学的耦合作用控制。正是由于浆液在注入后经历流态到固态的演化，才驱动了渗流压力呈现出的三阶段特征。在 I 阶段，浆液黏度低，流动性强，注浆压力通过孔隙水传递，渗压同步上升；在 II 阶段，浆液凝胶体滞留导致局部渗流受阻，非线性渗流显现；在 III 阶段，受动水冲蚀与再凝胶交替作用使局部渗流通道形成，渗压曲线表现出波动/回落特征。

堵水率与第 III 阶段渗流压力场类型的对应关系如图 13 所示，从图中可以看出，第 III 阶段渗流压力场的演化特征能够有效反映注浆封堵效果。其中，渐稳型渗压对应的堵水率普遍超过 60%，说明注浆堵水效果较好。骤降回稳型虽在动水冲蚀下出现局部失稳，但随后持续注入的浆液形成新的凝胶滞留，最终实现了有效封堵。而多次波动型则表现为平稳→骤降→恢复→再降的多阶段动态特征，揭示浆液在持续动水作用下发生了反复的破坏－再胶结-再破坏的过程，裂隙通道未能实现有效封堵。在小开度或低水头条件下，渗压响应多以渐稳型为主；而在大开度或高水头条件下更易出现“多次波动型”。这说明渗压曲线的稳定性可以反映封堵体的抗冲蚀能力与耐久性，可作为定量评估动水注浆效果的过程指标。

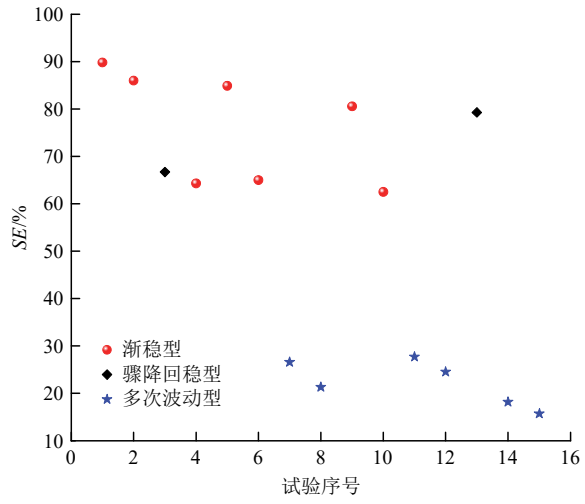


图 13　阶段 III 中封水率随渗流压力的变化规律

Fig.13　Variation of sealing efficiency with seepage pressure in stage III

4　讨　论

硅溶胶在动水环境下的扩散过程始终伴随着持续的凝胶化反应，即浆液从液态到固态的流－固相变。受相变过程的影响，其扩散行为偏离传统的“圆形→U 型”扩散模式，而是在流－固相变过程中经历了具有显著非均质性的分形扩散阶段，整体呈现“圆形→分形→U 型”的阶段性扩散规律。硅溶胶浆液在动水裂隙中呈现独特的分形扩散特征，与水泥基或脲醛树脂等化学浆液截然不同的凝胶机制密切相关。水泥基浆液是以颗粒悬浮体沉淀、水化结晶固结为主，倾向于形成较为密实、连续的固体块。脲醛树脂等化学浆液的化学反应过程比较复杂，比较多的观点认为其反应过程分为 3 个阶段：加成反应－聚缩反应－固化反应，往往形成均质的胶体[45]。而硅溶胶浆液的凝胶化是硅溶胶胶体粒子(SiO_2纳米颗粒)通过脱水缩合形成硅氧键(Si-O-Si)的三维网络的过程。这种“渐进式”的相变特性，使得浆液前锋在失去流动性的同时，内部和边界处于一种黏弹态过渡区。该状态对局部剪切与水分迁移扰动极为敏感，因而难以形成平滑、连续的扩散锋面，促进了不稳定流动和分形扩散的产生。因此，分形扩散是硅溶胶特定凝胶动力学行为在宏观流动上的必然体现。

当硅溶胶浆液注入裂隙后，受注入历时和动水扰动的共同作用，浆液黏度在时间和空间上均发生显著变化。早期注入的浆液由低黏度牛顿流体向高黏度黏弹性体过渡并最终胶凝，宏观流动性显著降低。于是，在注浆前锋外侧形成强度较低的“凝胶壳”，其内部则保留尚未凝胶化、流动性较高的“液态核”，从而形成“壳－核”结构。

在持续注浆推动下，液态核对凝胶壳产生径向推挤，尤其是当凝胶壳处于凝胶早期，凝胶网络骨架强度较低，脱水缩合反应产生的水分子在向外迁移时产生拉应力，促使凝胶壳发生开裂，如图 14 所示，此外，外部动水冲刷作用进一步削弱凝胶壳的稳定性，使凝胶壳局部区域更易发生破裂，这些裂口在后续浆液的推动下进一步促使扩散形态从均质的圆形演化为非均质的分形扩散。因此，硅溶胶在凝胶化阶段出现的分形扩散的本质是注浆压力与水动力冲蚀共同作用下，由流－固相变诱发的界面失稳所致。

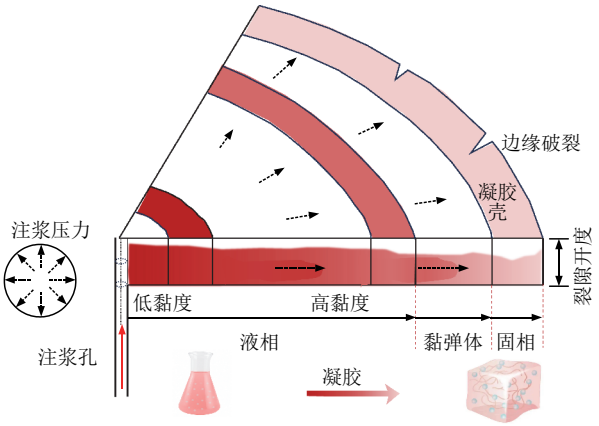


图 14　硅溶胶浆液的壳－核心破裂机制

Fig.14　Shell-core rupture mechanism of silica sol grout

硅溶胶浆液在裂隙中的扩散形态与裂隙开度密切相关，呈现出明显的尺寸效应。试验结果表明，随着裂隙开度的增大，形成的凝胶体尺寸随之增大，其内部应力梯度更为显著，导致凝胶壳更易发生开裂，从而促进分形扩散模式的形成，因此，分形扩散模式在 5 mm 及以上开度的裂隙中表现尤为明显。相比之下，在较小开度的裂隙中，由于空间约束效应显著，浆液的固结过程更为均匀。这种约束作用抑制了应力梯度的积累，使凝胶体能够保持相对完整的结构而不易开裂，因此难以观察到明显的分形扩散形态。由此可见，裂隙开度对硅溶胶浆液扩散行为的关键调控作用，开度越大，越容易因应力集中而形成各向异性的分形扩散；反之，小开度裂隙则倾向于维持均匀的圆形扩散模式。

本文揭示的硅溶胶浆液在凝胶化阶段呈现出的相变诱导扩散各向异性并非孤立现象，而是一类在自然界与工程界中普遍存在的界面不稳定行为。例如，冻结土中冰透镜的生长，金属凝固过程中的枝晶生长，火山熔岩流前缘破裂以及盐类结晶形成的指状沉积等[46-49]，其共同机制在于：相变速率、黏度梯度与应力场之间的竞争关系导致前锋局部扰动放大，形成分支或分形结构。因此，硅溶胶注浆中观测到的“花瓣状”或“分支状”扩散形态，实质上是典型的流－固相变驱动的界面失稳现象。

本研究基于二维裂隙平板模型，而实际工程中的裂隙网络通常具有显著的随机性、三维展布及非均质特征，且水动力条件与通道尺度更为复杂，因此本文结论主要适用于解释中低流速、光滑单裂隙条件下的硅溶胶注浆扩散封堵过程。此外，本文提出的基于渗流压力响应的实时评价方法可作为注浆过程可控性的补充手段：该方法可有效地反映注浆封堵体的形成、增长及其与地下水的相互作用动态，可弥补传统钻孔取芯、CT 扫描等事后评价手段的不足，可用于帷幕注浆、突涌水封堵及防渗墙建造等对过程控制要求较高的工程中。通过在关键点位(如帷幕下游、突水点后方)布设孔隙水压力传感器，并结合微震、电阻率等其他监测手段，构建更为智能的注浆过程实时反馈系统，实现浆液扩散与封堵效果的可视化判读。本文考虑的试验条件较为单一，后续研究将进一步面向复杂工况，重点考虑高流速、大尺度通道、非均质裂隙网络及岩体变形耦合等因素对硅溶胶相变－封堵行为的影响，为硅溶胶注浆工艺优化提供更为可靠的理论依据。

5　结　论

本文基于二维可视化模型注浆试验，系统揭示了动水条件下硅溶胶浆液在固－液相变过程中的扩散演化规律及其对渗流压力场响应的影响，主要研究结论如下：

(1) 动水条件下裂隙岩体硅溶胶注浆正交试验结果表明：裂隙倾角是影响裂隙堵水率的首要因素，其次为裂隙开度，动水水头影响相对较弱。三因素存在明显的交互作用，小开度与低倾角组合能够显著提升浆液滞留与成胶稳定性，从而提升封堵效果。

(2) 硅溶胶在流－固相变控制下的扩散形态呈典型的“圆形－分形－U 型”三阶段演化。其中分形扩散受注浆压力、水动力剪切与凝胶反应速率的耦合控制。当裂隙开度较小或水头较低时，分形扩散阶段不明显；而在高水头与大开度条件下，分形扩散更为显著，且 U 型扩散阶段的破碎化程度也更高。

(3) 分形扩散是浆液相变动力学主导的界面失稳问题，主要受到硅溶胶浆液独特凝胶机制的控制，渐进式凝胶化使前锋形成外侧低强度凝胶壳与内部高流动性液态核，在持续注浆产生的径向推挤、脱水缩合导致的水分迁移拉应力以及动水冲刷的削弱共同作用下，凝胶壳发生开裂，促进扩散形态由圆形向分形演化。

(4) 渗流压力时程变化反映了浆液扩散－固化的阶段性过程，I 阶段浆液黏度低，渗压同步上升；II 阶段凝胶体滞留导致局部渗流受阻，渗压呈非线性变化；III 阶段动水冲蚀与再凝胶交替作用导致局部渗流通道反复形成，渗压曲线表现出波动/回落特征。第 III 阶段渗压曲线可归纳为渐稳型、骤降回稳型与多次波动型三类，分别指示不同封堵体的抗冲

蚀能力与封堵耐久性特征，可作为评价动水注浆效果的过程指标。

参考文献(References)：

[1] 隋旺华. 基于结构水文地质学的采掘诱发高势能突水溃砂主动防控[J]. 工程地质学报，2022，30(1)：101－109.(SUI Wanghua. Active prevention and control of water-sand mixture inrush with high potential energy due to mining based on structural hydrogeology[J]. Journal of Engineering Geology，2022，30(1)：101－109.(in Chinese))

[2] 曾一凡，孟世豪，武　强，等. 天窗补给型衍生式矿井动力突水模式及其评价与治理技术[J]. 煤炭学报，2023，48(10)：3 776－3 788.(ZENG Yifan，MENG Shihao，WU Qiang，et al. Derivative mine dynamic water inrush mode of skylight leakage and its evaluation and control technology system[J]. Journal of China Coal Society，2023，48(10)：3 776－3 788.(in Chinese))

[3] 董书宁，杨志斌，姬中奎，等. 神府矿区大型水库旁烧变岩水保水开采技术研究[J]. 煤炭学报，2019，44(3)：709－717.(DONG Shuning，YANG Zhibin，JI Zhongkui，et al. Study on water-preserved mining technology of burnt rock aquifer beside the large reservoir in Shenfu mining area[J]. Journal of China Coal Society，2019，44(3)：709－717.(in Chinese))

[4] 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)：2 045－2 056.(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)：2 045－2 056.(in Chinese))

[5] YUAN S C，HAN G L，LIU D J，et al. Multicriteria risk assessment of water inrush in underground mines with large-scale curtain grouting：A mine disaster risk reduction strategy[J]. Geomatics Natural Hazards and Risk，2024，15(1)：2409200.

[6] PAN D D，ZHANG Y C，BU Z H，et al. Numerical investigation of slurry property effect on grouting and blocking of flowing water in rock fracture[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics，2023，47(9)：1 681－1 698.

[7] XU Z H，PAN D D，LI S C，et al. A grouting simulation method for quick-setting slurry in karst conduit： The sequential flow and solidification method[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering，2022，14(2)：423－435.

[8] 黄长鑫，张庆松，刘　军，等. 高温裂隙岩体速凝浆液突围注浆扩散机制研究[J]. 岩石力学与工程学报，2025，44(11)：2 989－3 010.(HUANG Changxing，ZHANG Qingsong，LIU Jun，et al. Breakthrough grouting diffusion mechanism of quick setting grout in high temperature fissured rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2025，44(11)：2 989－3 010.(in Chinese))

[9] 李术才，韩伟伟，张庆松，等. 地下工程动水注浆速凝浆液黏度时变特性研究[J]. 岩石力学与工程学报，2013，32(1)：1－7.(LI Shucai，HAN Weiwei，ZHANG Qingsong，et al. Research on time-dependent behavior of viscosity of fast curing grouts in underground construction grouting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2013，32(1)：1－7.(in Chinese))

[10] ZHANG L Z，HAN Xu，ZHANG Q S，et al. Rheological characteristics of cement-sodium silicate grout in its fluid-solid phase transition process[J]. Construction and Building Materials，2023，362：129443.

[11] ZHU Z J，WANG M，LIU R T，et al. Study of the viscosity-temperature characteristics of cement-sodium silicate grout considering the time varying behaviour of viscosity[J]. Construction and Building Materials，2021，306：124818.

[12] 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)：2 709－2 714.(RUAN Wenjun. 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)：2 709－2 714.(in Chinese))

[13] 李术才，刘人太，张庆松，等. 基于黏度时变性的水泥－玻璃浆液扩散机制研究[J]. 岩石力学与工程学报，2013，32(12)：2 415－2 421.(LI Shucai，LIU Rentai，ZHANG Qingsong，et al. Research on C-S slurry diffusion mechanism with time-dependent behavior of viscosity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2013，32(1)：2 415－2 421.(in Chinese))

[14] 王东亮，郝兵元，梁晓敏. 不同流型浆液在裂隙内扩散规律的理论与数值分析[J]. 中南大学学报：自然科学版，2021，52(10)：3 760－3 770.(WANG Dongliang，HAO Bingyuan，LIANG Xiaomin. Theoretical and numerical analysis of slurry diffusion with different flow patterns in fracture[J]. Journal of Central South University：Science and Technology，2021，52(10)：3 760－3 770.(in Chinese))

[15] 高中祥，杨　静，孟祥喜，等. 基于黏度时变性的复杂裂隙网络高黏性浆液注浆扩散规律研究[J]. 山东科技大学学报：自然科学版，2025，44(3)：13－22.(GAO Zhongxiang，YANG Jing，MENG Xiangxi，et al. Study on diffusion law of highly viscous slurry grouting in complex fracture network based on viscosity time variability[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology：Natural Science，2025，44(3)：13－22.(in Chinese))

[16] LI L C，WANG Y T，MU W Q，et al. Grouting characteristics of cement-based materials added multitype additives considering the time-varying rheology[J]. Construction and Building Materials，2025，472，140914.

[17] DING W Q，LEI B，DUAN C，et al. Numerical simulation of grout diffusion in rough rock fractures considering multiple influencing factors[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2025，58(1)：355－377.

[18] WANG Y H，YANG P，LI Z T，et al. Experimental-numerical investigation on grout diffusion and washout in rough rock factures under flowing water[J]. Computers and Geotechnics，2020，126：103717

[19] LIANG J S，DU X M，FANG H Y，et al. Numerical and experimental study of diffusion law of foamed polymer grout in fracture considering viscosity variation of slurry[J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2022，128：104674.

[20] 张嘉凡，黄思聪，刘 洋，等. 基于黏度时变性的裂隙动水注浆扩散规律分析[J]. 煤矿安全，2023，54(4)：119－125.(ZHANG Jiafan，HUANG Sicong，LIU Yang，et al. Analysis of diffusion law of dynamic water grouting in crack based on time-varying viscosity[J]. Safety in Coal Mines，2023，54(4)：119－125.(in Chinese))

[21] ZHU S，SHAO J F，ZHU H X，et al. Grouting mechanism of quick-setting slurry in fracture with random fracture opening considering time space characteristics of viscosity[J]. Acta Geotechnica，2024，19(10)：6 517－6 534.

[22] 许振浩，潘东东，李术才，等. 地下工程注浆数值模拟研究进展及未来发展方向[J]. 应用基础与工程科学学报，2025，33(3)：903－922.(XU Zhenhao，PAN Dongdong，LI Shucai，et al. Latest research progress and future development direction of grouting numerical simulation in underground engineering[J]. Journal of Basic Science and Engineering，2025，33(3)：903－922.(in Chinese))

[23] 张庆松，张连震，张 霄，等. 基于浆液黏度时空变化的水平裂隙岩体注浆扩散机制[J]. 岩石力学与工程学报，2015，34(6)：1 198－1 210.(ZHANG Qingsong，ZHANG Lianzhen，ZHANG Xiao，et al. Grouting diffusion in a horizontal crack considering temporal and spatial variation of viscosity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2015，34(6)：1 198－1 210.(in Chinese))

[24] ZHANG Q S，ZHANG L Z，LIU R T，et al. Grouting mechanism of quick setting slurry in rock fissure with consideration of viscosity variation with space[J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2017，70：262－273.

[25] LI S C，PAN D D，XU Z H. et al. Numerical simulation of dynamic water grouting using quick-setting slurry in rock fracture： the sequential diffusion and solidification (SDS) method[J]. Computers and Geotechnics，2020，122：103497.

[26] XU Z H，BU Z H，PAN D D，et al. A novel numerical method for grouting simulation in flowing water considering uneven spatial and temporal distribution of slurry：Two-Fluid Tracking (TFT) method[J]. Computers and Geotechnics，2022，147：104756.

[27] TANI ME，STILLE H. Grout spread and injection period of silica solution and cement mix in rock fractures[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering，2017，50(9)：2 365－2 380.

[28] TIRUPATI B，STANLEY R，RAM B. Experimental investigations of colloidal silica grouting in porous media[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering，2009，135(5)：697－700.

[29] ZHANG D Y，LIU D P. The effect of thermal-hydro-mechanical coupling on grouting in a single fracture under coal mine flowing water conditions[J]. Deep Underground Science and Engineering，2025，4(2)：264－277.

[30] 刘 军. 高温富水裂隙岩体速凝浆液注浆扩散机制与工程应用[博士学位论文][D]. 济南：山东大学，2023.(LIU Jun. Study on grouting diffusion mechanism and engineering application of quick-setting slurry in high temperature water-rich fractured rock mass[Ph. D. Thesis][D]. Jinan：Shandong University，2023.(in Chinese))

[31] 张连震，黄长鑫，张庆松，等. 基于速凝浆液流－固相变特性的裂隙岩体注浆扩散机制[J]. 岩石力学与工程学报，2024，43(5)：1 190－1 203.(ZHANG Lianzhen，HUANG Changxing，ZHANG Qingsong，et al. Rock fissure grouting diffusion mechanism of quick-setting grout considering fluid-solid phase transition characteristics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2024，43(5)：1 190－1 203.(in Chinese))

[32] ZHANG Q S，HUANG C X，LIU J，et al. Diffusion mechanism of quick-setting slurry in water-rich fractured rock mass based on circle-outburst diffusion model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences，2024，181：105586.

[33] FUNEHAG J，GUSTAFSON G. Design of grouting with silica sol in hard rock-New design criteria tested in the field，Part I[J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2008，23(1)：9－17.

[34] METIN C O，BONNECAZE R T，LAKE L W，et al. Aggregation kinetics and shear rheology of aqueous silica suspensions[J]. Applied Nanoscience，2014，4：169－178.

[35] 潘东江. 松散煤体的硅溶胶注浆渗透规律及长期固结稳定性研究[博士学位论文][D]. 徐州：中国矿业大学，2018.(PAN Dongjiang. Permeation law and long-term solidification stability evaluation in loose

coal with silica sol grout[Ph. D. Thesis][D]. Xuzhou：China University of Mining and Technology，2018.(in Chinese))

[36] ZHANG W J，LI S C，WEI J C，et al. Grouting rock fractures with cement and sodium silicate grout[J]. Carbonates and Evaporites，2018，33(2)：211－222.

[37] ZHANG W J，YANG F，HAN C H，et al. Fissure grouting mechanism accounting for the time-dependent viscosity of silica sol[J]. ACS Omega，2021，6(42)：28 140－28 149.

[38] 袁世冲，张改玲，孙帮涛，等. 基于光纤与微震监测系统的注浆帷幕“浆－岩”组合体采动效应研究——以滇东北毛坪铅锌矿为例[J]. 中国矿业大学学报，2024，53(5)：1 022－1 036.(YUAN Shichong，ZHANG Gailing，SUN Bangtao. et al. Mining effects of grouted rock composite of grout curtains based on optical fiber and micro-seismic monitoring systems：A case study of the Maoping lead-zinc mine in Northeast Yunnan，China[J]. Journal of China University of Mining and Technology，2024，53(5)：1 022－1 036.(in Chinese))

[39] 袁世冲. 深部矿山裂隙岩体帷幕注浆浆液扩散机制及“浆－岩”组合体采动效应研究[博士学位论文][D]. 徐州：中国矿业大学，2023.(YUAN Shichong. Investigation on the Grout propagation mechanism of curtain grouting in fractured rock mass in deep mines and mining influence on the grout-rock composite[Ph. D. Thesis][D]. Xuzhou：China University of Mining and Technology，2023.(in Chinese))

[40] AXELSSON M. Mechanical tests on a new non-cementitious grout silica sol：a laboratory study of the material characteristics[J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2006，21(5)：554－560.

[41] SUI W H，LIU J Y，HU W，et al. Experimental investigation on sealing efficiency of chemical grouting in rock fracture with flowing water[J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2015，(50)：239－249.

[42] CAO C，CHEN D L，XU Z G，et al. Experimental and numerical investigation on grout in geotechnical two-dimensional random fracture network of rock mass[J]. Engineering Geology，2025，355：108187.

[43] 刘　杰，蔡铭阳，黎　照，等. 不同倾角下粗糙裂隙负压抽吸－磁汇聚动水注浆试验研究[J]. 岩土工程学报，2026，待刊.(LIU Jie，CAI Mingyang，LI Zhao. et al. Experimental study of negative pressure suction-magnetic convergence dynamic water grouting in rough fissures under different inclination angles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering，2026，to be pressed.(in Chinese))

[44] LIANG Y K，SUI W H，QI J F. Experimental investigation on chemical grouting of inclined fracture to control sand and water flow[J]. Tunnelling and Underground Space Technology，2019，83：82－90.

[45] 郭密文. 高压封闭环境孔隙介质中化学浆液扩散机制试验研究[博士学位论文][D]. 徐州：中国矿业大学，2010.(GUO Miwen. Experimental Investigation of propagation mechanism of chemical grout injection into porous media under a high pressure and closed environment[Ph. D. Thesis][D]. Xuzhou：China University of Mining and Technology，2010.(in Chinese))

[46] PEPPIN S S L，STYLE RW. The physics of frost heave and ice-lens growth[J]. Vadose Zone Journal，2013，12(1)：1－12.

[47] 陈伟鹏，赵宇宏，张　冰，等. 金属凝固过程枝晶生长相场法模拟研究进展[J]. 材料导报，2018，32(增 2)：535－539.(CHEN Weipeng，ZHAO Yuhong，ZHANG Bing. et al. Development of phase-field simulation of dendritic growth in metal solidification[J]. Materials Reports，2018，32(Supp.2)：535－539.(in Chinese))

[48] MAGNALL N，MIKE R J，HUGH T，et al. The origin and evolution of breakouts in a cooling-limited lava flow[J]. GSA Bulletin，2019，131(1)：137－148.

[49] LICSANDRU G，NOIRIEL C，DURU P，et al. Evaporative destabilization of a salt crust with branched patterns[J]. Scientific Reports，2023，13(1)：5 132.