

# 不同倾角下粗糙裂隙负压抽吸-磁汇聚动水注浆 试验研究

刘杰<sup>1,2</sup>, 蔡铭阳<sup>1</sup>, 黎照<sup>\*1</sup>, 王瑞红<sup>1,2</sup>, 蔡显灿<sup>1</sup>, 鲍晓鹏<sup>1</sup>, 杨渝南<sup>1,2,3</sup>, 乔志存<sup>1</sup>

(1. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 湖北地质灾害防治工程技术研究中心, 湖北 宜昌 443002; 3. 湖北巴东地质灾害国家野外科学观测研究站, 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 随着地下工程的快速发展, 突涌水问题已成为制约工程安全和运营的主要问题之一。本研究通过自主研发的可视化粗糙裂隙负压抽吸联合磁汇聚装置, 开展了多因素作用下动水裂隙负压抽吸-磁注浆试验, 重点分析了不同裂隙倾角、负压抽吸力、动水流量及磁场强度对浆液扩散的影响机理, 建立了考虑磁场强度下倾斜裂隙负压抽吸-磁汇聚动水注浆模型。结果表明: ①在其他因素不变的条件下, 相较于普通浆液, 磁场作用下90°裂隙磁性浆液最大扩散面积提升了49.02%, 最大逆水扩散距离增长61.89%, 最大横向扩散距离增长56.91%。说明磁场作用能够有效提升浆液扩散面积。②在0°倾角下抽吸力80kPa时浆液扩散面积增长600.78cm<sup>2</sup>, 扩散面积增长率为17.66%。说明负压抽吸力对浆液扩散面积的增加具有一定的影响。③对浆液扩散面积的影响程度由强到弱依次为裂隙角度、动水流量、负压抽吸力和磁场强度。④建立了负压抽吸-磁汇聚动水注浆模型, 相较于实验值最大相对误差不超过11.37%, 表明该模型能较好描述浆液的扩散过程, 可为不同倾角下突水裂隙的注浆充填提供新的研究思路 and 理论参考。

**关键词:** 倾斜裂隙; 负压抽吸; 动水注浆; 磁汇聚; 浆液扩散面积; 浆液扩散距离

中图分类号: TU411

文献标识码: A

**作者简介:** 刘杰, 男, 1979 年生, 博士研究生, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程和水工结构研究。E-mail: 1620588217@qq.com。

## Experimental study of negative pressure suction-magnetic convergence dynamic water grouting in rough fissures under different inclination angles

LIU Jie<sup>1,2</sup>, CAI Mingyang<sup>1</sup>, LI Zhao<sup>\*1</sup>, WANG Ruihong<sup>1,2</sup>, CAI Xiancan<sup>1</sup>, BAO Xiaopeng<sup>1</sup>, YANG Yunan<sup>1,2,3</sup>, QIAO Zhicun<sup>1</sup>

(1. Three Gorges University Key Laboratory of Geological Hazards in Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Yichang 443002, China; 2. Hubei Geological Disaster Prevention Engineering Technology Research Center, China Three Gorges University, Hubei, Yichang 443002, China; 3. Badong National Observation and Research Station of Geohazards, China University of Geosciences, Wuhan, 430074, China)

**Abstract:** With the rapid development of underground engineering, the problem of surge water has become one of the main problems restricting the safety and operation of engineering. In this study, through the self-developed visualization of rough fissure negative pressure suction combined with magnetic convergence device, we carried out the test of moving water fissure negative pressure suction-magnetic grouting under the action of multi-factors, focusing on the analysis of different fissure inclination angle, negative pressure suction force, moving water flow rate and the magnetic field strength of the influence mechanism on the spread of the slurry, and established the model of tilted fissure negative pressure suction-magnetic convergence moving water grouting under the consideration of the magnetic field strength. ① Under the condition that other factors remain unchanged, compared with ordinary slurry, the maximum diffusion area of 90° fissure magnetic slurry under the action of magnetic field is enhanced by 49.02%, the maximum backwater diffusion distance is increased by 61.89%, and the maximum

**基金项目:** 国家自然科学基金(项目号: 52079071)、三峡库区地质灾害教育部重点实验室(项目号: 2020KDZ08)、湖北巴东地质灾害国家野外科学观测研究站开放基金(项目号: BNORS202313)及国家自然科学基金(项目号: 51979151)

\*通讯作者(E-mail: [lizhao0012@126.com](mailto:lizhao0012@126.com))

lateral diffusion distance is increased by 56.91%. It indicates that the magnetic field action can effectively enhance the slurry diffusion area. ② The slurry diffusion area grows by 600.78cm<sup>2</sup> at 0° inclination with a suction force of 80kPa, and the growth rate of diffusion area is 17.66%. It shows that the negative pressure suction force has a certain effect on the increase of slurry diffusion area. The degree of influence of ③ on the slurry diffusion area is the fracture angle, the dynamic water flow, the negative pressure suction force and the magnetic field strength in the order of strongest to weakest. ④ The negative pressure suction-magnetic convergence dynamic water grouting model is established, and the maximum relative error is not more than 11.37% compared with the experimental value, which indicates that the model can better describe the diffusion process of the slurry, and can provide new research ideas and theoretical references for grouting and filling of water-surge fissures under different inclination angles.

**Key words:** inclined fissure; negative pressure suction; dynamic water grouting; magnetic convergence; slurry diffusion area; slurry diffusion distance

# 0 引言

随着我国交通建设的不断加快，大量的隧道工程逐渐向西南山区推进，而山区特殊的地质条件和复杂的构造特征使得隧道建设过程中突水裂隙<sup>[1-2]</sup>时常出现，对隧道安全和工程稳定性构成重大威胁。而常规修复手段如灌浆、喷锚和封堵等技术<sup>[3-5]</sup>，虽然在一定程度上能够应对突水问题，但在动水压力较大、裂隙形态多变等复杂情况下，其修复效果往往并不突出，且耗材较大。因此，研究新型突水裂隙注浆技术及其理论具有重要工程意义。

近年来，许多国内外专家对突水裂隙修复及相关浆液的扩散运移规律进行了大量研究。在突水注浆方面，李术才<sup>[6-9]</sup>等利用自主研发的准三维裂隙动水注浆模型试验台，开展裂隙岩体涌突水的动水注浆试验研究，提出了浆液的U形扩散规律和水泥浆液的分层分区扩散机制。俞文生等<sup>[10-12]</sup>采用引排泄压、注浆材料复合使用、注浆压力梯度控制等进行控制性突水裂隙注浆。Sui 等<sup>[13-14]</sup>开展了化学浆液裂隙堵水试验，结果表明：注入的浆液与流水之间的相互作用减慢了水流，浆液开始在下游位置凝固，浆液的停留时间长于其凝胶时间。但这种浆材的改性对于在裂隙岩体中提升注浆扩散面积和浆液在裂隙中的留存率等方面难以发挥作用。在真空预压方面，郭青山等<sup>[15]</sup>针对真空预压法加固中出现的问题，通过减少对排水管真空区域的连接，减少了真空压力损失，有效加快了内部水体排出。孙冲、周桂德等<sup>[16-17]</sup>采用真空预压加固技术，在真空状态下注入水泥浆料，提高了地基的强度和稳定性。目前，有关真空预压方面的研究多针对软体地基加固，但在岩石裂隙修复方面却鲜有研究。

磁性浆液在土木工程领域的研究和应用仍处于初步探索和发展阶段。Etienne Jeoffroy 等<sup>[18]</sup>通过在沥青中掺杂 Fe 基金属粒子，利用其在交流磁场中的快速

生热特性，促使沥青与粒子发生反应并熔化，实现材料的自修复功能。宋贺月等<sup>[19]</sup>通过在混凝土中加入磁化钢纤维，借助磁场引导纤维有序排列，显著提升了混凝土的力学性能，尤其是在应力集中区域，有效增强了结构的稳定性与承载能力。刘杰等<sup>[20-22]</sup>研究者进一步开发了一种基于环氧树脂的磁性注浆材料，该材料在磁场作用下展现出优异的定点留存能力和抗高流速剪切性能。

综上，虽然裂隙注浆扩散和真空加固技术已取得丰硕的研究成果，但对于动水环境下采用负压抽吸技术进行岩石裂隙注浆修复的作用机制及理论研究方面仍有较大提升空间。尤其是考虑了裂隙角度、抽吸力、磁场强度和动水流量等多因素耦合作用下对浆液充填扩散的影响，仍需进一步的研究来阐明。本文基于团队研发的磁性浆液材料，提出了一种新型的动水裂隙注浆修复方法（负压抽吸-磁汇聚注浆技术）。该方法综合运用负压抽吸原理和磁场作用，有效提高动水裂隙中浆液扩散面积及浆液留存率，实现对动水裂隙的快速高效修复。系统探讨了该方法在不同裂隙倾角、不同动水条件下的修复效果和作用机理，为后续动水裂隙注浆修复技术的研发提供了一种新的思路。

# 1 可视化粗糙裂隙负压抽吸试验装置

## 1.1 试验装置及试验方案

为研究磁性浆液扩散规律及磁汇聚吸附机理，采用自主研发的可视化粗糙裂隙负压抽吸-磁汇聚动水注浆装置（如图 1a）进行试验。

装置主要的技术要点和创新如下：

（1）大型可视化原岩粗糙裂隙精准制模技术：

①原岩粗糙度扫描：采用 Artec spider 型号激光扫描仪，对原岩裂隙粗糙面进行扫描，得到裂隙粗糙面三维点云坐标数据，其精度能够达到 0.05mm（如图

1b); ②3D 打印底板: 通过 3D 打印技术将原岩数据还原制作出大尺寸 3D 打印粗糙裂隙底板 (0.95m×0.645m); ③原岩底板制作: 采用压模技术制作混凝土原岩粗糙裂隙, 并在混凝土中架设钢筋网, 提高原岩强度; ④透明盖板制作: 通过二次翻模技术制作可视化粗糙裂隙盖板, 首先将硅胶浇注在粗糙裂隙底板上, 待其凝固后在硅胶粗糙面上浇注 1.5cm 厚的环氧树脂 AB 胶进行透明盖板制作, 待环氧树脂 AB 胶凝固后, 将硅胶取下即可得到与粗糙裂隙底板相契合的可视化粗糙裂隙盖板。

可精准模拟大尺寸原岩粗糙度, 误差小于 0.05mm, 裂隙开度通过翻模混凝土底板与树脂透明板的配合, 以及硅胶条的叠加粘黏, 精确控制在 2mm;

(2) 磁汇聚吸附技术: 所选用的磁吸附装置为  $R=2\text{cm}$ 、 $h=40\text{cm}$  的磁棒, 磁棒对磁性浆液的影响距离可达 10cm, 能有效增加浆液的抗剪强度;

(3) 空间角度调节技术: 在裂隙承载台上安装有万向球铰, 可以实现空间任意走向和倾向的裂隙角度模拟的角度调节技术;

(4) 负压抽吸技术: 真空泵最大抽吸流量为 300L/min, 真空度可达 -0.093MPa, 抽吸边界即为裂隙边界;

本研究旨在探究磁性浆液在不同裂隙倾角下磁场强度和抽吸力作用对动水注浆扩展效应的影响规律, 建立了倾斜裂隙负压抽吸-磁汇聚动水注浆模型。其中, 磁场强度可在 8000~14000GS 内调节; 抽吸力控制在 0kPa~80kPa; 动水流量控制在 10L/min~25L/min; 裂隙倾角可调节范围为  $0^\circ \sim 90^\circ$ , 试验流程如图 1c 所示。具体试验步骤如下:

(1) 使用电子称称取注浆材料, 并使用搅拌机

进行充分搅拌, 配制成磁性浆液并倒入注浆罐;

(2) 根据试验设计值选择对于磁场强度的磁棒安装在裂隙板相应位置;

(3) 调节裂隙面角度至试验设计角度; 将动水装置调节至试验设计值, 待水流稳定后开启摄像机进行数据采集记录;

(4) 打开注浆阀门及空压机控压阀门进行注浆; 待浆液扩散面稳定不再上升后, 打开抽吸装置调节至试验设计值进行负压抽吸;

(5) 待试验结束后关闭所有阀门及摄像机, 并进行清洗。

## 1.2 磁性浆液材料组成及功能

根据本团队的大量研究结合注浆试验得出磁性浆液配合比, 选取的磁性浆液粘度与 0.8 水灰比的水泥浆液相近, 主要由水性环氧树脂、固化剂、微米级四氧化三铁、PO42.5 硅酸盐水泥、水、混凝土抗分散剂及减水剂组成 (如图 2), 配比为: 12: 10.2: 30: 100: 100: 12: 0.2。在外磁场的作用下, 四氧化三铁粉末在水性环氧树脂、混凝土抗分散剂的共同作用下, 与水泥形成稳定的磁性浆液, 浆液中所有成分均具有导向式流动性能<sup>[20-22]</sup>。主要材料性能如下:

(1) 四氧化三铁粉末 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ):  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  磁粉是磁性浆液配置的核心材料之一, 平均粒径  $5\sim 10\mu\text{m}$ , 密度  $4.8\sim 5.1\text{ g/cm}^3$ 。在一定程度上, 磁粉掺量越大磁性浆液的磁吸附效果越好, 相较于 30% 磁粉掺量, 当磁粉掺量为 40% 时, 磁吸附直径增长并不明显, 同时考虑到经济性, 选择 30% 的磁粉掺量。

(2) 水性环氧树脂: 由水性环氧树脂乳液和固化剂组成, 具有强大的内聚力, 能够与水形成稳定的界面, 提高磁性浆液强度和抗渗性能。

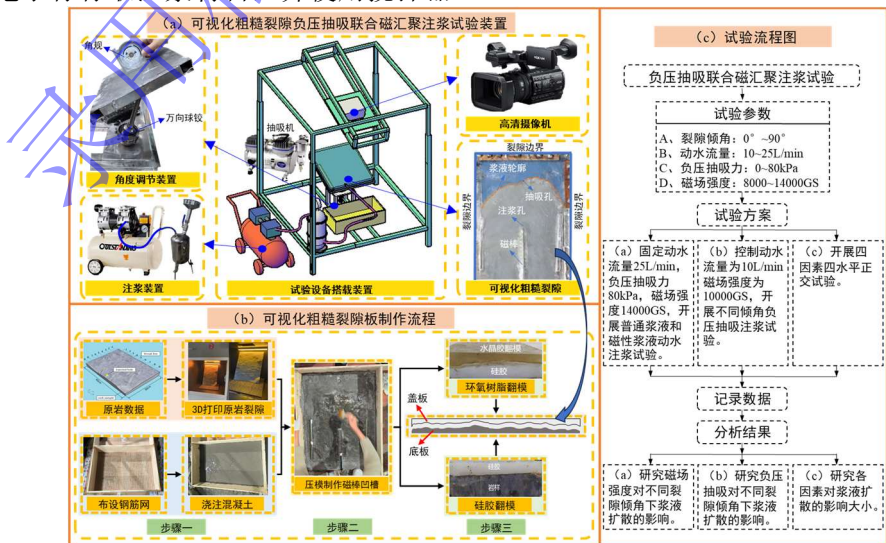


图 1 可视化粗糙裂隙负压抽吸-磁汇聚注浆试验装置及试验流程图

Fig. 1 Visualization of rough fissure negative pressure pumping-magnetic convergence grouting test device and test flow chart





图2 试验材料示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test materials

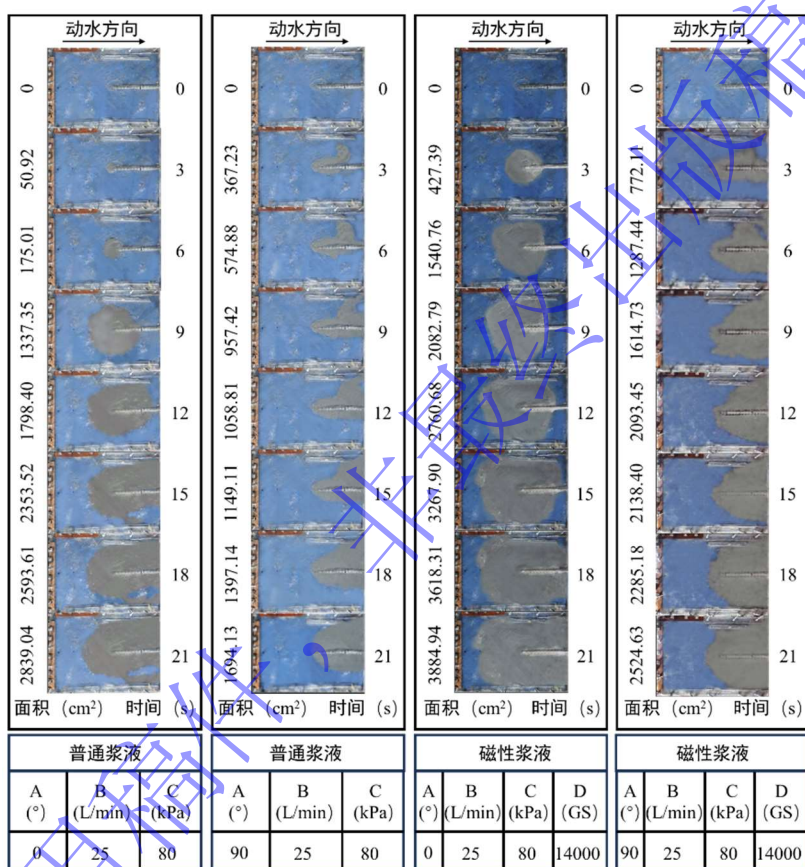


图3 普通浆液与磁性浆液注浆时空扩散规律

Fig. 3 Spatio-temporal diffusion law of normal slurry and magnetic slurry grouting

(3) 混凝土抗分散剂: 在浆液中加入抗分散剂 (聚丙烯酰胺 YSA5010), 可改善磁性浆液材料的水下抗分散性和离析率, 减少水泥流失。

## 2 试验结果分析

### 2.1 磁场作用对注浆扩展效应影响分析

图3为倾角 $0^\circ$ 及 $90^\circ$ 条件下, 普通浆液和磁性浆液在有磁场和无磁场作用下裂隙动水注浆的时空演化规律。

分析图3可知, 同一时刻, 普通浆液和磁性浆

液在 $0^\circ$ 倾角下的扩散面积均明显大于 $90^\circ$ 倾角, 且 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 倾角下普通浆液扩散面积均小于磁性浆液。在 $0^\circ$ 倾角下, 3~21s内任意时刻均有磁性浆液逆水扩散距离明显大于普通浆液的逆水扩散距离; 在 $90^\circ$ 倾角下, 磁性浆液横向扩散距离远大于普通浆液的横向扩散距离, 普通浆液始终存在过水通道, 而磁性浆液在18s时完全覆盖裂隙断面。当普通浆液进入倾角裂隙后, 受到动水冲刷和重力作用, 浆液逐渐朝裂隙出口方向扩散, 且受到动水挤压作用, 浆液的扩散逐渐收缩 (如图4a)。而磁性浆液在磁棒的磁场作用下, 紧密吸附在磁棒周围, 使得浆液内部的磁性颗粒磁化而相互吸引, 并逐渐形成磁力链, 有效的抵

抗水流冲刷和重力影响；此外，当磁性浆液受到磁棒吸附后，浆液在磁场影响范围内的流速减小，逐渐形成浆液留存区，导致磁性浆液在裂隙中的扩散的路径发生变化，使得后续注入的浆液逐渐沿着留存区外围扩散，增加了浆液横向扩散面积（如图4b）。

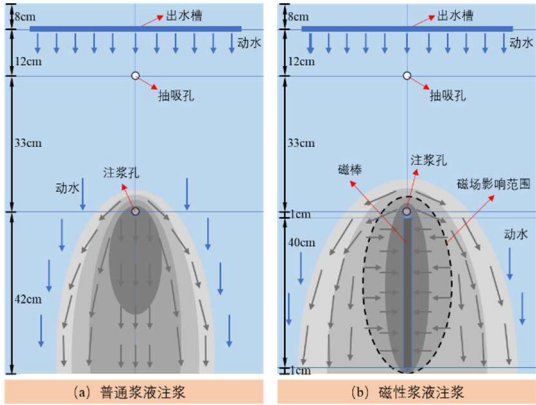


图4 浆液扩散机制图

Fig. 4 Diagram of slurry diffusion mechanism

图5为普通浆液和磁性浆液扩散面积随时间变化关系。当倾角为0°时，相较于普通浆液（最大扩散面积为2839.04cm<sup>2</sup>），磁性浆液的最大扩散面积提升率达36.84%。当倾角为90°时，相较于普通浆液（最大扩散面积为1694.13cm<sup>2</sup>），磁性浆液注浆最大扩散面积提升了49.02%。这是由于随着倾角的增大普通浆液更易被主动水冲刷流失，而磁场影响范围内的磁性浆液实现定点留存，磁力的吸附作用抵抗主动水冲刷的影响，随着注浆的持续进行，浆液扩散面积逐渐扩大。

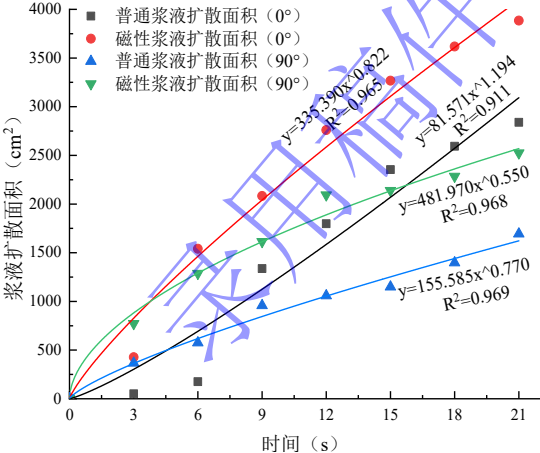


图5 浆液扩散面积随时间的变化图

Fig. 5 Plot of slurry diffusion area with time

图6、图7分别为普通浆液和磁性浆液逆水和横向扩散距离随时间变化关系。当倾角为0°时，相较于普通浆液（最大逆水扩散距离为26.25cm，最大横向扩散距离为46.89cm），磁性浆液最大逆水扩散距离提升51.96%，最大横向扩散距离增长14.8%。当倾角为90°时，相较于普通浆液（最大逆水扩散距离为

7.97cm，最大横向扩散距离为25.69cm），磁性浆液注浆最大逆水扩散距离增长61.89%，最大横向扩散距离增长56.91%。由于磁棒两端相较于其他部位磁感线更加密集，磁力更大，因此吸附在磁棒顶部的磁性浆液抵抗水流冲刷的能力较强，逆水扩散距离远大于普通浆液的逆水扩散距离；随着裂隙倾角增大，浆液所受重力影响和动水冲刷影响越大，导致普通浆液的浆液留存率大幅减小，而磁性浆液在磁场作用下能抵抗部分重力和水流冲刷力，使得在磁场影响范围内的磁性浆液留存率得到大幅提高。

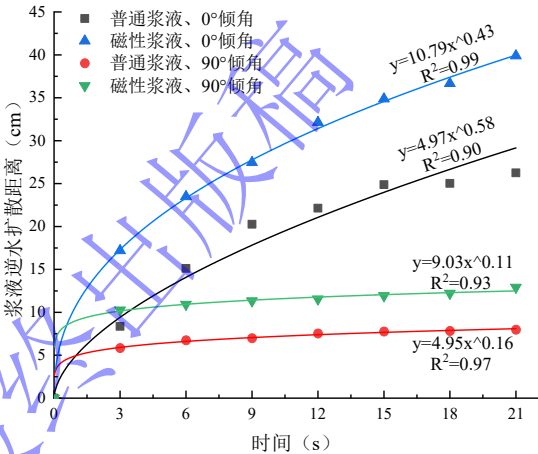


图6 浆液逆水扩散距离随时间的变化图

Fig. 6 Plot of slurry backwater diffusion distance with time

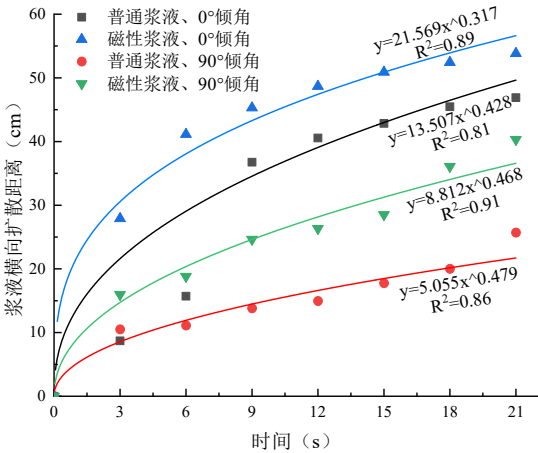


图7 浆液横向扩散距离随时间变化图

Fig. 7 Plot of slurry lateral spreading distance with time

## 2.2 负压抽吸力对浆液扩散速度及面积的影响分析

为研究负压抽吸力对浆液扩散面积的影响，控制磁棒的磁场强度为10000GS、动水流量10L/min不变，改变不同负压抽吸力和裂隙角度，分析浆液扩散速度及面积的变化规律，如图8所示。

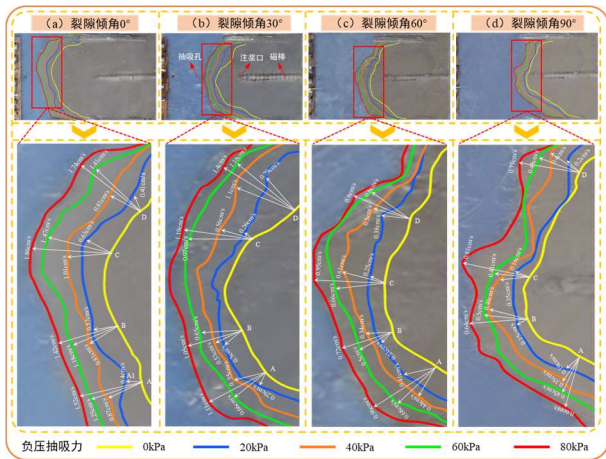


图8 浆液扩散面积轮廓及浆液扩散速度矢量图

Fig. 8 Slurry diffusion area contours and slurry diffusion velocity vectors

分析图8可知，在负压抽吸力的作用下，相较未抽吸状态下的浆液扩散面会再次爬升，浆液的爬升距离、扩散速度均随着负压抽吸力的增大而显著增加。在0°裂隙倾角下，负压抽吸力为20kPa时最大浆液扩散速度为0.63cm/s，当负压抽吸力增大到80kPa时，最大浆液扩散速度为1.86cm/s，是20kPa时的2.95倍。随着裂隙倾角的增大，浆液扩散速度逐渐衰减，在80kPa负压抽吸力的状态下，裂隙倾角为90°时最大浆液扩散速度为0.81cm/s，仅为0°倾角时浆液扩散速度的43.55%。

分析图9可知，少数点的离散度较大（如图9蓝色圆点，对应于图8b的D点），这是由于分析浆液扩散速度时随机取点，且裂隙面为粗糙裂隙，浆液在裂隙中扩散难易程度不一所导致，但总体上浆液扩散速度与负压抽吸力之间表现为较好的线性增长关系，且线性拟合决定系数 $R^2$ 均在0.93以上。

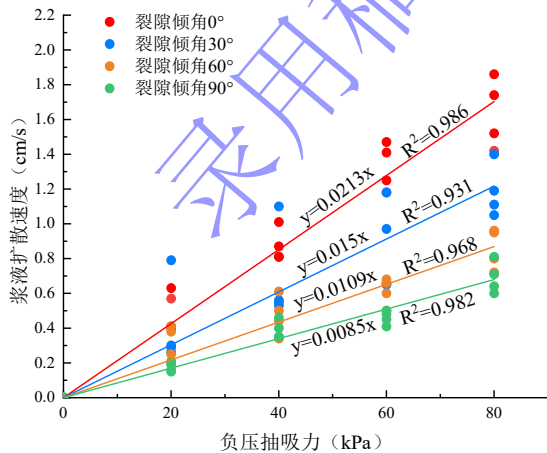
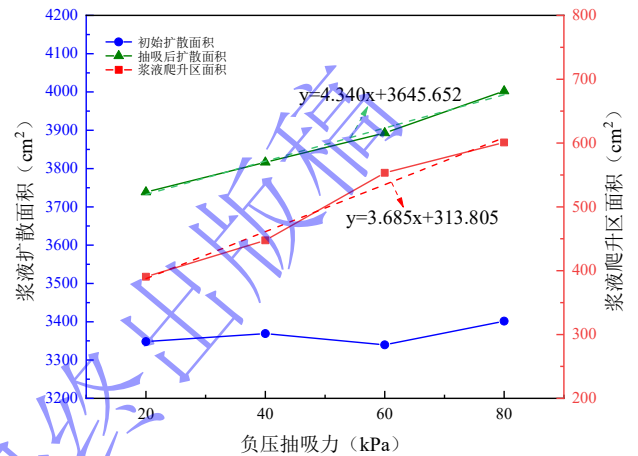


图9 浆液扩散速度与负压抽吸力之间的关系

Fig. 9 Relationship between slurry diffusion velocity and negative pressure suction force

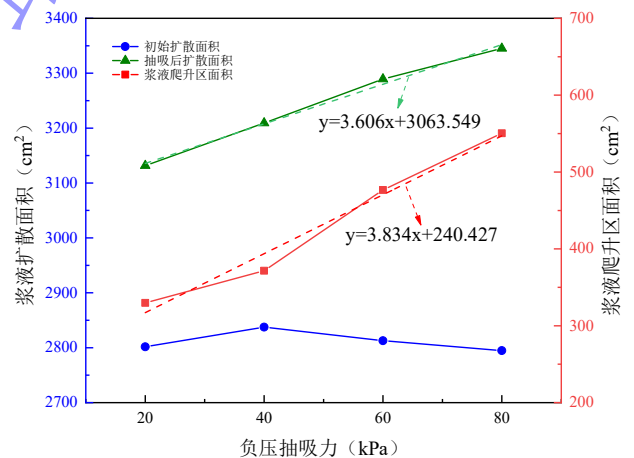
如图10所示，随着裂隙倾角的增大，抽吸前的浆液初始扩散面积逐渐减小，其中，90°倾角下平均初

始扩散面积为1962.06 cm<sup>2</sup>，相较于0°倾角下的平均初始扩散面积（3364.58cm<sup>2</sup>）减小了41.68%。说明倾角的增大对浆液初始扩散面积的减小具有较大影响。随着负压抽吸力的增大，浆液爬升区面积逐渐扩大，其中，在0°倾角下，对比负压抽吸力为20kPa和80kPa，浆液扩散面积增长率分别为11.66%、17.66%。相比20kPa抽吸力，80kPa时浆液爬升面积增长53.87%，最终扩散面积增长6%。说明负压抽吸力的增大对浆液扩散面积的增加具有一定的影响。



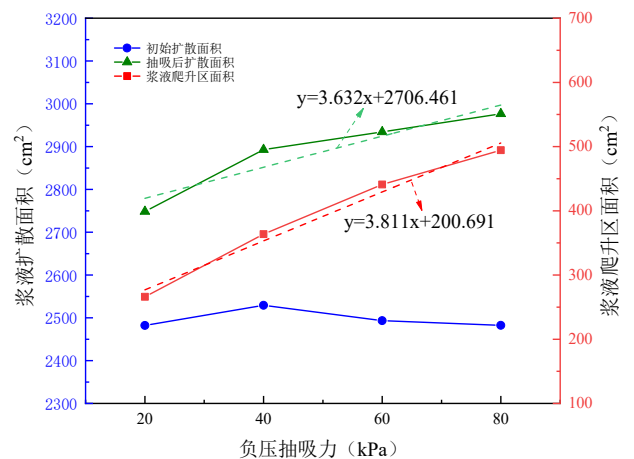
(a) 裂隙倾角0°

(a) Fissure dip 0°



(b) 裂隙倾角30°

(b) Fissure dip 30°



(c) 裂隙倾角60°

(c) Fissure dip 60°



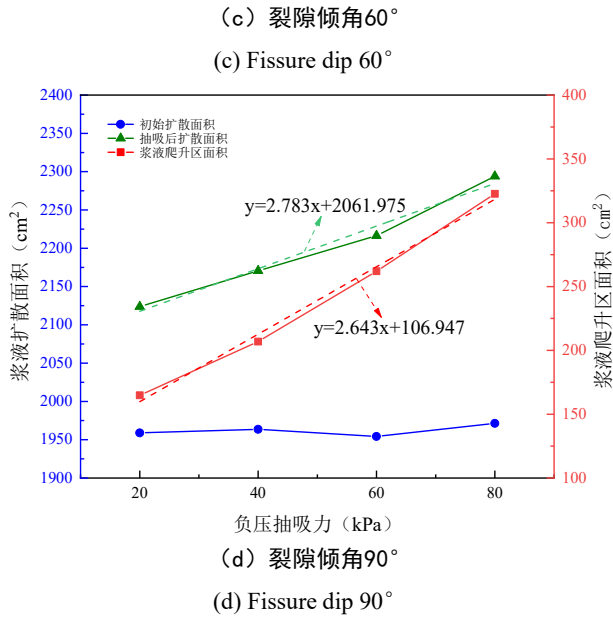


图10 负压抽吸力作用下浆液扩散面积变化趋势示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the trend of slurry diffusion area under negative pressure suction force

由图10可知，抽吸作用下浆液扩散面积与负压抽吸力之间的关系呈线性递增关系，即有：

$$A = \lambda \cdot P_f + A_0 \quad (2-1)$$

式中： $A$ 为抽吸作用下浆液扩散面积， $\text{cm}^2$ ； $\lambda$ 为负压抽吸力作用系数； $P_f$ 为负压抽吸力， $\text{kPa}$ ； $A_0$ 为抽吸前浆液初始扩散面积， $\text{cm}^2$ 。

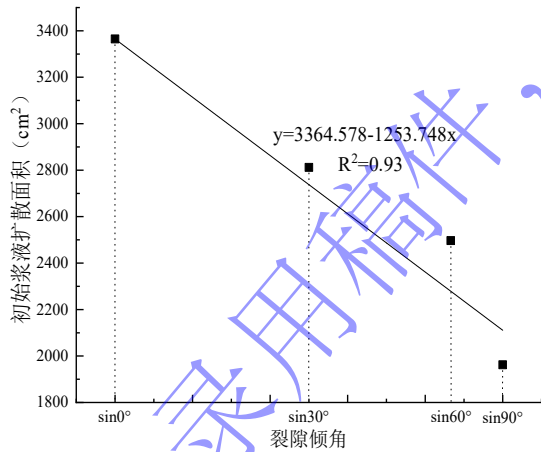


图11 浆液初始扩散面积随裂隙倾角的变化关系图

Fig. 11 Plot of initial slurry diffusion area versus fissure inclination angle

根据图11可知，浆液初始扩散面积与裂隙倾角呈线性递减的关系：

$$A_0 = A_1 - B \cdot \sin\alpha = 3364.578 - 1253.748 \sin\alpha \quad (2-2)$$

式中： $\alpha$ 为裂隙倾角； $A_1$ 为0°倾角下浆液初始扩散面积，当裂隙倾角为0°时 $A_0 = A_1$ ， $B$ 为裂隙倾角对浆液扩散面积的影响系数。

由式(2-1)、(2-2)可得抽吸作用下浆液扩散面积与负压抽吸力、裂隙倾角之间的关系式：

$$A = \lambda \cdot P_f + A_0 = \lambda \cdot P_f + A_1 - B \cdot \sin\alpha = \lambda \cdot P_f + 3364.578 - 1253.748 \sin\alpha \quad (2-3)$$

## 2.3 多因素作用下浆液扩散面积敏感因素分析

利用研发的可视化装置，开展不同负压抽吸力、注浆角度、磁场强度以及不同动水流量的正交试验，磁性浆液稳定后的扩散情况如下图12所示。

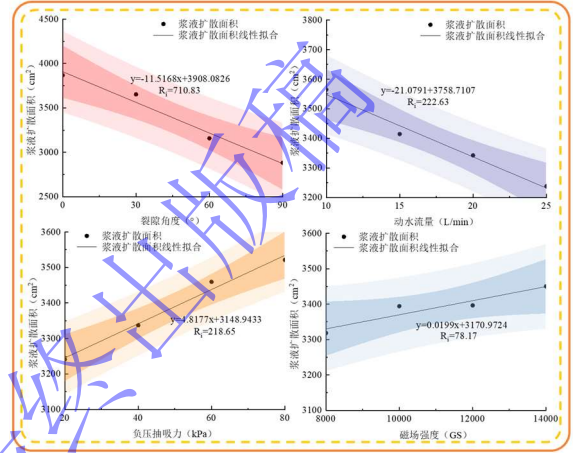


图12 扩散面积随各因素的变化趋势示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the trend of diffusion area with respect to various factors

通过16组正交试验，对不同动水流量、不同倾角、不同负压抽吸力及不同磁场强度下的浆液扩散面积进行极差分析，其中 $R_{\text{角度}} (710.83) > R_{\text{动水}} (222.63) > R_{\text{抽吸力}} (218.65) > R_{\text{磁场}} (78.17)$ ，故对扩散面积影响的显著性顺序为裂隙角度>动水流量>负压抽吸力>磁场强度。

## 3 浆液扩散模型

### 3.1 基本假设

- (1) 浆液在裂隙中的流动被视为连续介质，忽略其颗粒性质；
- (2) 粗糙裂隙的变形很小，可以忽略其对浆液流动的影响；
- (3) 浆液的物理性质（如密度和粘度）在整个过程中保持恒定；
- (4) 浆液在扩散过程中处于层流状态，其流动过程满足连续性方程；
- (5) 忽略浆-水相界面处水对浆液的稀释作用，且动水压力对浆液产生的静切力忽略不计；
- (6) 在理论推导中以磁棒中点为磁力作用点。

### 3.2 扩散模型建立

基于上述浆液扩散规律及理论分析，建立倾斜动水裂隙负压抽吸-磁汇聚动水注浆力学模型，如图13。

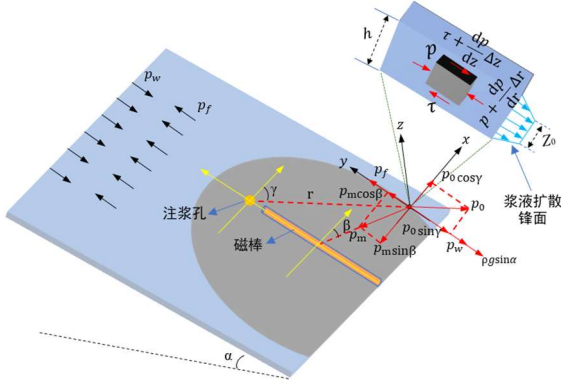


图13 倾斜动水裂隙负压抽吸-磁汇聚动水注浆力学模型

Fig. 13 Mechanical model of sloping dynamic water fissure negative pressure pumping-magnetic convergence dynamic water grouting

在动水环境中，浆液扩散受到注浆压力  $p_0$ 、负压抽吸力  $p_f$ 、动水压力  $p_w$ 、磁力  $p_m$  及其自重  $\rho g$  共同作用。假设裂隙倾角为  $\alpha$ ，裂隙开度为  $h$ ，浆液质点所在位置。根据基本假设对浆液受力进行了分析。

设  $p_1$  为微元体在径向流动方向上的合力，在顺水方向有：

$$p_1 = p_w + p_0 \sin \gamma + \rho g \sin \alpha - p_f - p_m \cos \beta$$

在逆水方向有：

$$p_1 = p_f + p_m \cos \beta - p_w - p_0 \sin \gamma - \rho g \sin \alpha$$

以浆液在顺水方向扩散为例，以注浆孔为坐标轴原点对图 13 所示浆液微元体做受力分析，建立微元体受力平衡方程：

$$p_1 \cdot \Delta z + (\tau + d\tau / dz \Delta z) \cdot \Delta r - (p_1 + (dp_1) / dr \Delta r) \cdot \Delta z - \tau \cdot \Delta r = 0 \quad (3-1)$$

式中： $\tau$  为剪切应力，Pa； $r$  为浆液扩散距离，m； $z$  为浆液扩散厚度，m。

略去式 (3-1) 高阶小量，可化简为：

$$(dp_1) / dr = d\tau / dz \quad (3-2)$$

浆液水灰比大，取牛顿流体本构方程为：

$$\tau = \mu \cdot (du / dz) \quad (3-3)$$

式中： $\mu$  为浆液粘度，Pa·s； $u$  为浆液扩散速度，m/s。

将式 (3-3) 带入式 (3-2) 得：

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{\mu} \frac{dp_1}{dr} \quad (3-4)$$

将式 (3-4) 对  $z$  进行积分可得：

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{dp_1}{dr} z^2 + C_1 z + C_2 \quad (3-5)$$

式中： $C_1$  和  $C_2$  为待定系数。

假设浆液在裂隙上下壁面处的流速为 0，即  $z = -h/2$ ， $z = h/2$  时， $u = 0$ ，可确定 2 个待定常数：

$$C_1 = 0, C_2 = -\frac{h^2}{8\mu} \frac{dp_1}{dr} \quad (3-6)$$

带入式 (3-5) 得：

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{dp_1}{dr} \left( z^2 - \frac{h^2}{4} \right) \quad (3-7)$$

将式 (3-7) 沿  $z$  方向积分，可得沿径向扩散平均速度：

$$\bar{u} = \frac{1}{h} \int_{-h/2}^{h/2} u dz = -\frac{h^2}{12\mu} \frac{dp_1}{dr} \quad (3-8)$$

在动水条件下，采用假设 (1) 中流速连续性条件， $\bar{u} = dr / dt$ 。据此可建立起注浆时间  $t$  与浆液扩散距离之间的关系：

$$\int_0^T \bar{u} dt = \int_0^r dr \quad (3-9)$$

将式 (3-8) 代入式 (3-9) 中积分，整理后得：

$$\frac{dp_1}{dr} = -\frac{12\mu r}{h^2 t} \quad (3-10)$$

将式 (3-10) 对  $r$  积分可得：

$$p_1 = -\frac{6\mu r^2}{h^2 t} + C_3 \quad (3-11)$$

当浆液沿顺水方向扩散时，在注浆孔  $r = 0$  处， $p_1 = p_w + p_0 \sin \gamma + \rho g \sin \alpha - p_f - p_m \cos \beta$ ，代入式 (3-11) 求解待定常数  $C_3$  为：

$$C_3 = p_w + p_0 \sin \gamma + \rho g \sin \alpha - p_f - p_m \cos \beta \quad (3-12)$$

$\rho$  为浆液密度，kg/m<sup>3</sup>； $g$  为重力加速度 m/s<sup>2</sup>。

将式 (3-12) 带入式 (3-11) 得：

$$p_1 = p_w + p_0 \sin \gamma + \rho g \sin \alpha - p_f - p_m \cos \beta - (6\mu r^2) / (h^2 t) \quad (3-13)$$

当浆液扩散面不再增长，即  $r = R_n$  时，有  $p_1 = 0$ ，带入式 (3-13) 得到扩散距离  $R_n$  与时间  $t$  的关系式为：

$$t = \frac{6\mu R_n^2}{h^2 \left( \frac{1}{2} \rho_w v^2 + p_0 \sin \gamma + \rho g \sin \alpha - p_f - p_m \cos \beta \right)} \quad (3-14)$$

根据静压能与动能转换公式  $p_w = 1/2 \rho v^2$ ，将其带入式 (3-14) 得：



$$t = \frac{6\mu R_n^2}{h^2 \left( \frac{1}{2} \rho_w v^2 + p_0 \sin \gamma + \rho g \sin \alpha - p_f - p_m \cos \beta \right)} \quad (3-15)$$

式中：\$h\$ 为裂隙开度，m；\$\rho\_w\$ 为水的密度，kg/m<sup>3</sup>；\$v\$ 为水流流速，m/s。

故，浆液最大扩散距离 \$R\_n\$ 为：

$$R_n = \sqrt{\frac{\left( \frac{1}{2} \rho_w v^2 + p_0 \sin \gamma + \rho g \sin \alpha - p_f - p_m \cos \beta \right) h^2 t}{6\mu}} \quad (3-16)$$

对于磁颗粒，如果它本身是磁性的，在磁场中会受到磁力的作用，这个力通常称为磁力 \$F\_m\$，其大小与磁颗粒的磁矩 \$\mu\_c\$ 和磁场 \$B\$ 有关，受力公式为：

$$F_m = \mu_c \cdot B \quad (3-17)$$

$$R_n = \sqrt{\frac{\left( \rho_w v^2 / 2 + p_0 \sin \gamma + \rho g \sin \alpha - p_f - \frac{V \cdot M \cdot \mu_0 I R^2}{8\pi r_1^2 \cdot (R^2 + r_1^2)^{3/2}} \cos \beta \right) h^2 t}{6\mu}} \quad (3-21)$$

式（3-21）即动水裂隙负压抽吸注浆浆液的扩散距离计算公式。

由上式可见，浆液扩散距离的理论值随时间增长呈逐渐减缓的趋势，并最终趋于一个定值。这是因为裂隙倾斜时浆液受到自重的影响，自重分量推动浆液沿裂隙面向下移动，因此，随着裂隙倾角的增大，浆

$$R_n = \sqrt{\frac{\left( \lambda \left( \rho_w v^2 / 2 + p_0 \sin \gamma - p_f \right) + \rho g \sin \alpha - \frac{V \cdot M \cdot \mu_0 I R^2}{8\pi r_1^2 \cdot (R^2 + r_1^2)^{3/2}} \cos \beta \right) h^2 t}{6\mu}} \quad (3-22)$$

为了得到 \$\lambda\$ 的具体数值，需采用试验数据（如表 1）拟合的方式对上述模型进行拟合修正，所取微元体处 \$\beta = 30^\circ\$，\$\gamma = 60^\circ\$。

表 1 裂隙注浆计算参数

\$h/c\$ m	\$\mu/Pa \cdot s\$	\$\rho/g/cm^3\$	\$\rho_w/g/cm^3\$	\$p_0/Pa\$	\$p_f/Pa\$	\$v/m/s\$	\$B/GS\$
0.2	0.02	1.612	1	10000	8000	1.09	1400
				0	0	5	0

基于上述理论推导，选取与推导模型相同的函数模型对不同裂隙角度下动水流量为25L/min，负压抽吸力为80kPa，磁场强度为14000GS的浆液扩散距离随时间变化的曲线进行拟合，结果如图14所示。

由图 14 可知，浆液扩散距离与时间 \$t\$ 具有良好的相关性。因此，将表 1 中参数带入式（3-22）求出不同角度下的修正系数 \$\lambda\$ 值（见表 2）。

磁矩由下式给出：

$$\mu_c = V \cdot M \quad (3-18)$$

其中体积 \$V = 4\pi R^3 / 3\$，四氧化三铁磁粉的磁化强度假设为 \$M = 60 A/m\$，\$R\$ 为磁颗粒的直径。

磁场强度 \$B\$ 在分析点处大小可以通过下式得到：

$$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + r_1^2)^{3/2}} \quad (3-19)$$

\$\mu\_0\$ 为真空磁导率，\$\mu\_0 = 4\pi \times 10^{-7} T \cdot m / A\$；\$I\$ 为磁铁的磁矩，\$I = (B\_0 \cdot \pi R^2) / 2\$，\$B\_0\$ 为磁棒的磁场强度，\$r\_1\$ 为磁棒中心到磁颗粒的距离。

则根据磁颗粒磁场受力公式有：

$$p_m = \frac{F_m}{A} = \frac{\mu_c \cdot B}{4\pi r_1^2} = \frac{V \cdot M \cdot \mu_0 I R^2}{8\pi r_1^2 \cdot (R^2 + r_1^2)^{3/2}} \quad (3-20)$$

将式（3-20）其带入式（3-16）得：

液的自重作用变得更加显著，同时，重力分量也增加了动水流速，促使浆液沿着顺水方向扩散，减少浆液的留存率。

在具体试验中，由于裂隙为粗糙裂隙，裂隙板中的实际注浆压力、水流流速和负压抽吸力可能会有折减，因此，引入修正系数 \$\lambda\$ 对公式进行修正，则有：

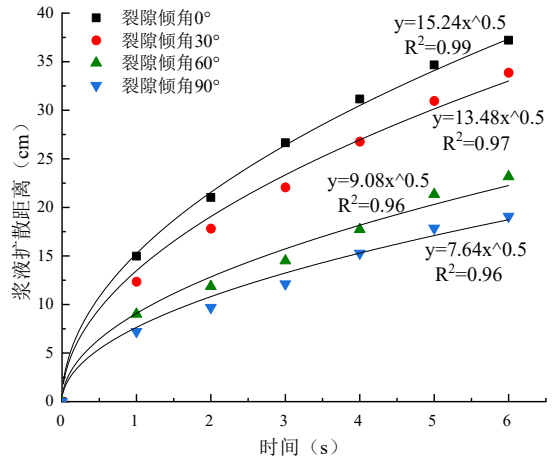


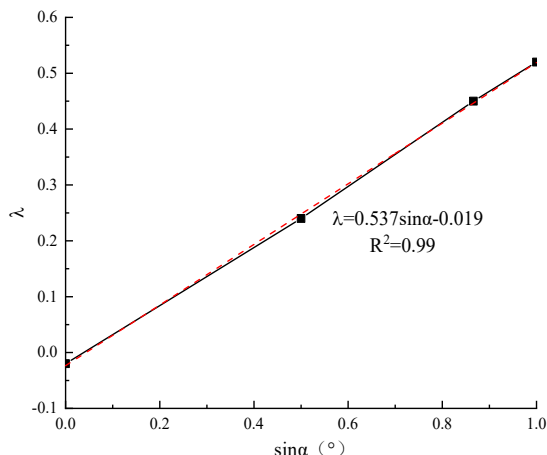
图14 不同角度下浆液扩散距离随时间变化的曲线

Fig. 14 Curve of slurry diffusion distance with time at different angles

表2 不同角度下 $\lambda$ 值

Table 2 $\lambda$ values at different angles					
角度	0°	30°	60°	90°	
$\lambda$	0.02	0.25	0.46	0.53	

将 $\lambda$ 与角度 $\alpha$ 联立，得出不同角度下的修正系数与角度的关系式，如图15。



$$R_n = \sqrt{\frac{((0.537 \sin \alpha - 0.019)(\rho_w v^2 / 2 + p_0 \sin \gamma - p_f) + \rho g \sin \alpha - p_m \cos \beta) h^2 t}{6\mu}} \quad (3-24)$$

将计算参数代入式(3-24)，得到不同裂隙倾角下浆液沿顺水方向的扩散距离随时间变化曲线，如图16所示。

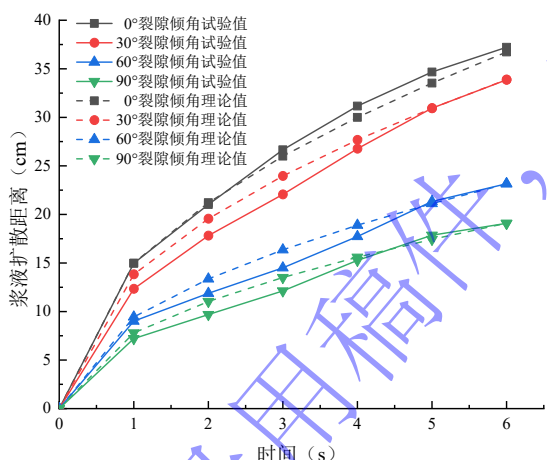


图16 扩散距离随时间变化理论与试验对比曲线

Fig. 16 Comparison of theoretical and experimental curves of diffusion distance over time

由图16可知，浆液扩散距离理论值和试验值均随时间呈非线性增长趋势。不同倾角下浆液扩散理论值普遍大于试验值，两者最大相对误差为11.37%，平均相对误差为8.01%。这是由于在扩散模型推导过程中，做出了一系列简化假设，如未考虑裂隙表面粗糙度对浆液流动的阻碍、水对浆液的稀释效应以及动水压力对浆液产生的静切力。以上因素均会导致理论值与试验值产生一定偏差。然而，数据显示最大相对误差和平均相对误差均不超过11.37%，这表明本研究

图15 不同角度下修正系数变化曲线

Fig. 15 Variation curve of correction coefficient at different angles

$$\lambda = 0.537 \sin \alpha - 0.019 \quad (3-23)$$

即动水裂隙负压抽吸注浆浆液的扩散距离计算公式如下：

所建立的倾斜动水裂隙负压抽吸联合磁汇聚动水注浆力学模型能够较为准确地反映注浆液在倾斜裂隙动水注浆环境下的扩散规律。

## 4 现场应用与成本分析

在面临隧洞岩体大水头突涌水灾害时，单一的负压抽吸技术无法解决问题，同时单一的磁汇聚技术直接进行封堵也具有一定难度，因此利用负压抽吸技术降低水头来配合磁汇聚技术进行突涌水封堵（如图17），具体步骤如下：

(1) 钻取注浆孔及抽吸孔：根据磁棒的长度确定注浆孔的位置，需保证注浆孔位于磁棒顶端，且抽吸孔距注浆孔0.2m~0.8m范围内；

(2) 嵌入磁棒后进行注浆：将磁棒打入突水裂隙，并向注浆孔注入磁性浆液；

(3) 抽吸泄压：待浆液稳定后打开抽吸装置进行负压抽吸减小突涌水头，磁性浆液进一步扩散填充，直至抽吸罐中吸入磁性浆液，表明浆液填充完全；

(4) 在裂隙修补完毕后，待浆液凝固，有两种方案可对磁棒进行回收：①嵌入磁棒前，预先在磁棒外套上一层薄壁管（管壁很薄不影响磁力效果），回收时抽出磁棒即可；②采用电磁铁磁棒，回收时断电消磁，抽出磁棒即可。

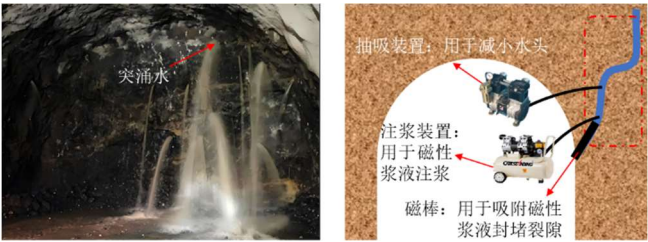


图 17 负压抽吸-磁汇聚注浆修复示意图

Figure 17 Schematic diagram of negative pressure suction-magnetic convergence grouting repair

表 3 普通浆液与磁性浆液成本计算

Table 3 Cost calculations for normal slurry and magnetic

	slurry						总价 /元
	A/cm <sup>2</sup>	V/cm <sup>3</sup>	m <sub>水泥</sub> /g	m <sub>磁粉</sub> /g	水泥价 格/元	磁粉价 格/元	
普通浆液	1694.13	338.826	303.06	-	0.303	-	0.303
磁性浆液	2524.63	504.926	427.72	128.32	0.428	0.642	1.07

以倾角90°为例对注浆成本进行分析（如图3），由表3可知，浆液扩散面积提升49.02%，但成本仅增加0.767元，且仅为裂隙中留存浆液的价格，普通浆液在动水冲击及重力作用下极易流失，而磁性浆液在磁场作用下，浆液抗剪能力增强，留存率大幅提升，可达到节省材料的效果。

## 5 结论

本文通过一系列创新实验和理论分析，对粗糙裂隙动水负压抽吸注浆规律进行了深入探讨，得出以下结论：

（1）相较于普通浆液，90°倾角下磁性浆液扩散面积增幅达到49.02%，最大逆水扩散距离增长61.89%。说明磁汇聚技术能够有效提升浆液扩散面积，且对逆水扩散距离的增长尤为突出。

（2）浆液扩散平均速度、面积与负压抽吸之间始终保持线性递增关系。构建了多因素耦合作用下浆液扩散面积模型，阐明了浆液扩散面积与裂隙倾角、抽吸力之间的影响机理。

（3）正交试验结果表明，对浆液扩散面积的影响程度由强到弱依次为裂隙角度、动水流量、负压抽吸力和磁场强度。负压抽吸和磁场强度的增大有利于对动水裂隙的封堵。

（4）建立了考虑裂隙倾角、动水流量、抽吸力和磁场强度等多因素负压抽吸-磁汇聚动水注浆的理论模型，通过与试验值的对比分析最大相对误差不超过 11.37%，说明该模型能够有效描述浆液的扩散过程。

## 参考文献：

- [1] 崔恒涛. 富水岩溶地区隧道裂隙型突涌水致灾演化机理 [D]. 贵州大学, 2022. (CUI Heng-tao. Evolution mechanism of tunnel fissure-type surge water in water-rich karst area [D]. Guizhou University, 2022.)
- [2] 刘洪斌. 岩溶隧洞充填裂隙渗透性演化规律与隧洞突涌水预测解析方法研究[D]. 中国地质大学, 2022.(LIU Hong-bin. Study on the evolution law of permeability of filling fissures in karst tunnels and analytical method for predicting water surges in tunnels [D]. China University of Geosciences, 2022.)
- [3] 马洪涛, 王清锋, 李见波. 动水条件下浆液扩散沉积与封堵效果试验研究[J].煤炭技术, 2023, 42 (10): 124-128. (MA Hong-tao, WANG Qing-feng, LI Jian-bo. Experimental study on slurry diffusion deposition and plugging effect under dynamic water conditions[J]. Coal Technology, 2023, 42 (10): 124-128.)
- [4] 张嘉凡, 覃祥瑞, 刘洋, 张慧梅, 徐荣平. 注浆对粗糙裂隙煤岩体应力场的影响分析[J]. 煤矿安全, 2021, 52 (10): 166-170. (ZHANG Jia-fan, QIN Xiang-rui, LIU Yang, ZHANG Hui-mei, XU Rong-ping. Analysis of the effect of grouting on the stress field of roughly fractured coal rock body[J]. Coal Mine Safety, 2021, 52 (10): 166-170.)
- [5] 张刚艳. 超薄隔水层底板突水机理与区域修复技术研究 [D].煤炭科学研究总院, 2021. (ZHANG Gang-yan. Research on the mechanism of water breakout of bottom plate of ultra-thin diaphragm and regional restoration technology [D]. Research Institute of Coal Science, 2021.)
- [6] 孙克国, 李术才, 许炜萍, 龚伦. 岩溶管道涌水的注浆防控技术研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52 (05): 178-183.(SUN Ke-guo, LI Shu-cai, XU Wei-ping, GONG Lun. Research on grouting prevention and control technology of water influx in karst pipes[J]. Modern Tunneling Technology, 2015, 52 (05): 178-183.)
- [7] 郑卓, 李术才, 刘人太, 朱光轩, 张连震, 潘东. 裂隙岩体注浆中的浆液-岩体耦合效应分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34 (S2): 4054-4062.(ZHENG Zhuo, LI Shu-cai, LIU Ren-tai, ZHU Guang-xuan, ZHANG Lian-zhen, PAN Dong. Analysis of slurry-rock body coupling effect in slurry grouting of fractured rock bodies[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34 (S2): 4054-4062.)
- [8] 李术才, 张霄, 张庆松, 孙克国, 徐尧, 张伟杰, 李海燕, 刘人太, 李鹏. 地下工程涌突水注浆止水浆液扩散机制和封堵方法研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30 (12): 2377-2396. (LI Shu-cai, ZHANG Xiao, ZHANG Qing-song, SHUN Ke-



- guo, XU Yao, ZHANG Wei-jie, LI Hai-yan, LIU Ren-tai, LI Peng. Study on the diffusion mechanism and blocking method of grouting water stopping slurry in underground engineering[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (12): 2377-2396.)
- [9] 刘人太, 李术才, 张庆松, 原小帅, 韩伟伟. 一种新型动水注浆材料的试验与应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30 (07): 1454-1459. (LIU Ren-tai, LI Shu-cai, ZHANG Qing-song, YUAN Xiao-shuai, HAN Wei-wei. Experimental and applied research on a new type of dynamic water grouting material[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (07): 1454-1459.)
- [10] 俞文生, 翁贤杰, 刘军, 张庆松, 张龙生. 富水断层隧道突水突泥注浆治理关键技术研究[J]. 公路工程, 2019, 44 (01): 23-31. (YU Wen-sheng, WENG Xian-jie, LIU Jun, ZHANG Qin-song, ZHANG Long-sheng. Research on key technology of water-surge slurry grouting management in water-rich fault tunnels[J]. Highway Engineering, 2019, 44 (01): 23-31.)
- [11] 翁贤杰. 富水断层破碎带隧道突水突泥机理及注浆治理技术研究[D]. 山东大学, 2014. (WENG Xian-jie. Research on the mechanism of water-surge and mud-surge in tunnels with water-rich fault fracture zones and grouting management technology [D]. Shandong University, 2014.)
- [12] 许延春, 黄磊, 俞洪庆, 罗亚麒, 李鹏飞, 耿浩博, 费宇, 赵朝, 张罗迅. 基于注浆钻孔数据集的注浆工作面底板突水危险性评价体系 [J]. 煤炭学报, 2020, 45 (03): 1150-1159. (XU Yan-chun, HUANG Lei, YU Hong-qing, LUO Ya-lin, LI Peng-fei, GENG Hao-bo, FEI Yu, ZHAO Chao, ZHANG Luo-xun. Evaluation system of water breakout risk of grouted working face based on grouted borehole dataset [J]. Coal Journal, 2020, 45 (03): 1150-1159.)
- [13] Sui W, Liu J, Hu W, Qi J, Zhan K. Experimental investigation on sealing efficiency of chemical grouting in rock fracture with flowing water[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2015, 50(1): 239-249.
- [14] Jie Peng, Wen Guang Ji, Neng Li, Hao Ran Jin. The pore water pressure and settlement characteristics of soil improved by combined vacuum and surcharge preloading[J]. Géotechnique, 2011, 1559-1580.
- [15] 郭青山, 景宪铭, 王红文. 真空预压法在大面积厂房软基工程加固中的应用[J]. 上海建设科技, 2023, (04): 47-51. (GUO Qing-shan, JING Xian-ming, WANG Hong-wen. Application of vacuum pre-compression method in the reinforcement of large-area plant soft foundation project[J]. Shanghai Construction Technology, 2023, (04): 47-51.)
- [16] 孙冲, 刘印鹏, 陈少青, 程林. 真空预压法处理双层软土地基沉降特性分析及预测 [J]. 岩土工程技术, 2024, 38 (03): 287-293. (SUN Chong, LIU Yin-peng, CHEN Shao-qing, CHENG Lin. Settlement Characterization and Prediction of Double-layer Soft Ground by Vacuum Pre-compression[J]. Geotechnical Engineering Technology, 2024, 38 (03): 287-293.)
- [17] 周桂德, 崔剑伟, 彭文涛, 曾振宗, 李前通. 真空预压法在土建工程处理中的应用研究[J]. 中国建筑装饰装修, 2023, (18): 75-77. (ZHOU Gui-de, CUI Jian-wei, PENG Wen-tao, ZENG Zhen-yu, LI Qian-tong. Research on the application of vacuum pre-compression method in civil engineering treatment [J]. China Building Decoration and Decoration, 2023, (18): 75-77.)
- [18] Jeoffroy E, Bouville F, Bueno M, Studart A, Partl M. Iron-based particles for the magnetically-triggered crack healing of bituminous materials[J]. Construction and Building Materials, 2018, 164: 775-782.
- [19] 宋贺月, 丁一宁. 钢纤维在混凝土基体中空间分布的研究方法评述[J]. 材料科学与工程学报, 2015, 33(5): 768-775. (SONG He-Yue, DING Yi-Ning. A review of research methods on the spatial distribution of steel fibers in concrete matrix[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2015, 33(5): 768-775.)
- [20] 刘杰, 李政, 黎照, 孙涛, 程其芬, 秦仕福. 新型磁性环氧树脂水泥浆液硬化机制与孔径分析[J]. 复合材料学报, 2023, 40(2): 1025-1036. (LIU Jie, LI Zheng, LI Zhao, SHUN Tao, CHENG Qi-fen, QIN Shi-fu. Hardening mechanism and pore size analysis of new magnetic epoxy resin cement slurry[J]. Journal of Composite Materials, 2023, 40(2): 1025-1036.)
- [21] Liu J, Guo J, Yu F, et al. Experimental study on reinforcement of reef limestone by magnetic anchoring system[J]. Materials, 2023, 16(9): 3519.
- [22] Li Z, Cai H, Liu J, Yu F, Bao X P, Yang Y N. Research on new magnetic epoxy resin composite slurry materials and localization grouting diffusion mechanism[J]. Scientific Reports, 2024, 14 (1): 20115-20115.