

# 裂隙介质注浆模拟试验研究进展

马 爽<sup>1</sup>, 贾明慧<sup>1</sup>, 梁艳坤<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

<sup>2</sup>华北水利水电大学岩土工程与土工结构重点实验室, 河南 郑州

收稿日期: 2024年11月19日; 录用日期: 2024年12月15日; 发布日期: 2024年12月23日

## 摘 要

由于岩体注浆的隐蔽性和不确定性, 使得实际注浆工程在设计 and 施工过程中具有极大的盲目性, 室内模拟试验成为研究其过程的主要途径。文章介绍了裂隙介质注浆基于是否考虑浆液黏度时变性假设的理论计算方法, 阐述了在平板裂隙试验平台的基础上, 开发利用裂隙网络注浆试验平台进行裂隙介质注浆室内模拟试验的重要性, 介绍了注浆过程中浆液注浆扩散性能和加固效果影响因素的研究现状、注浆压力和被注岩体内部压力对浆液渗流规律的影响、渗透稳定性和堵水效果的研究进展, 并对裂隙介质注浆模拟试验的未来研究方向进行了展望。

## 关键词

注浆, 注浆理论, 模拟试验, 裂隙介质, 研究进展

# Research Progress on Simulation Test of Grouting in Fractured Media

Shuang Ma<sup>1</sup>, Minghui Jia<sup>1</sup>, Yankun Liang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Henan Zhengzhou

<sup>2</sup>Key Laboratory of Geotechnical Engineering and Hydraulic Structures, North China University of Water Resources and Electric Power, Henan Zhengzhou

Received: Nov. 19<sup>th</sup>, 2024; accepted: Dec. 11<sup>th</sup>, 2024; published: Dec. 23<sup>rd</sup>, 2024

## Abstract

Due to the concealment and uncertainty of rock mass grouting, the actual grouting engineering has great blindness in the design and construction process, and indoor simulation tests have become the main way to study its process. This article introduces the theoretical calculation method of grouting in fractured media based on the assumption of considering the time-varying viscosity of

the slurry. It elaborates on the importance of developing and utilizing a fracture network grouting test platform for indoor simulation tests of fractured media grouting on a flat fracture test platform. The article also describes the research status of the diffusion performance and reinforcement effect influencing factors of slurry grouting during the grouting process, the influence of grouting pressure and internal pressure of the injected rock on the seepage law of the slurry, research progress on permeability stability and water blocking effect, and prospected the future research directions of grouting simulation tests in fractured media.

## Keywords

Grouting, Grouting Theory, Simulation Experiment, Fractured Medium, Research Progress

Copyright © 2024 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

近年来,随着地下矿产资源的开采,注浆在岩土体加固和地下水封堵技术中得到广泛应用,而目前针对注浆理论的研究却远远落后于实践,主要原因在于注浆过程的隐蔽性和裂隙岩体结构的复杂性。目前对于裂隙介质注浆理论的研究多是基于一些理想假设进行的理论推导,与实际注浆工程存在较大偏差[1]-[7]。裂隙介质注浆模拟试验的研究多以实际注浆工程为背景,建立注浆模型[8]-[10],设置相关参数,监测注浆过程中各项参数的变化,进而对裂隙介质注浆理论进行深入研究。

孔隙和裂隙是岩体中浆液流动的通道,研究岩体的结构是研究裂隙介质注浆理论和试验的基础[11]。现有的研究中岩体结构理论主要有四种,拟连续介质理论、多孔介质理论、孔隙和裂隙双重介质理论和裂隙介质理论,其中实际工程中最为常见的为多孔介质理论和裂隙介质理论。前者将岩体假定的一种多孔介质,孔隙是流经岩体的通道,呈多孔构造,根据孔隙的分布情况,又可将多孔介质分为各向同性多孔介质和各向异性多孔介质[12];后者将岩体看作是受裂隙分割的不连续体,浆液在岩体内通过裂隙网络流动,裂隙控制着岩体的渗流特征和强度变化。

虽然多孔介质理论在实际注浆工程中应用广泛,但究其根本,多孔介质理论借鉴于土体的注浆加固理论[13],在实际工程中土体和岩体的差异无法忽略,天然岩体内有大量的裂隙和孔隙,孔隙数量多但是尺寸小,而裂隙虽然少,但是渗透性极好,在岩体注浆渗流过程中起控制作用,因此,相较于多孔介质注浆理论而言,裂隙介质注浆理论更能真实反映裂隙岩体注浆加固的工程实况,许多学者也进行了大量的裂隙介质注浆理论和工程实践相关的研究[14]-[17]。研究表明,浆液在水下粘度变化具有明显的时变性[18],浆液的胶凝特性是影响注浆效果的关键因素,本文基于是否考虑浆液的黏度时变性对裂隙介质注浆理论计算方法进行了阐述,由于裂隙介质注浆首先要考虑的就是注浆浆液的性质,根据流变特性,目前的研究将其分为牛顿流体和非牛顿流体,非牛顿流体又包括宾汉姆流体和幂律流体,在实际工程中牛顿流体以及宾汉姆流体较为常见,文中着重阐述牛顿流体和宾汉姆流体在裂隙介质注浆工程中的研究现状和进展,并对近年来裂隙介质注浆模拟试验的相关研究进行介绍。

## 2. 裂隙介质注浆理论计算方法

基于岩体中裂隙分布的随机性和裂隙形状的各向异性和不均匀性,目前在裂隙岩体注浆过程中无法准确控制浆液的扩散情况,利用现有的地层条件和注浆施工技术来指导注浆施工具有一定的盲目性和不

确定性,建立符合实际工况的注浆扩散理论成为研究重点。阮文军[7]、Zou [19]等研究表明,水泥基浆液在扩散时其粘度均随时间变化,且满足指数分布,粘度作为注浆理论本构方程的重要参数,对注浆浆液扩散的影响不容忽视。现将常用的注浆扩散理论按照是否考虑浆液黏度时变性分为两大类。

## 2.1. 未考虑时变性

1974年 Baker [1]根据注浆压力和注浆流量恒定,推导了牛顿流体注浆时注浆压力差和注浆量之间的关系式:

$$p_0 - p = \frac{6\eta Q}{\pi b^3} \ln \frac{r}{r_0} + \frac{3\rho Q^2}{20\pi^2 b^2} \left( \frac{1}{r_0^2} - \frac{1}{r^2} \right) \quad (1)$$

其中:  $r$ ——浆液扩散半径, cm;  $p_0$ ——注浆孔内压力, MPa;  $p$  在距离为  $r$  处的压力, MPa;  $Q$ ——浆液的体积流量,  $\text{m}^3$ ;  $\eta$ ——浆液的动力粘度, cp;  $\rho$ ——浆液的密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $b$ ——裂隙开度, mm;  $r_0$ ——注浆孔半径, cm。

Baker [1]提出的公式中注浆压力和注浆流量在实际施工过程中不可能同时保持恒定,因而与实际工程存在较大偏差。

1982年刘嘉材[2]单将注浆流量看成一个常数,基于光滑水平单一裂隙的假设,研究了二维裂隙牛顿流体的规律,推导了关于注浆压力、浆液扩散半径及注浆时间之间的关系式:

$$\begin{cases} r = 2.21 \sqrt{\frac{0.093(p_0 - p_w)tb^2r_0^{0.21}}{\eta_0}} + r_0 \\ t = \frac{1.02 \times 10^{-7} \eta_0 (R^2 - r_0^2) \ln \frac{R}{r_0}}{(p_0 - p_w)b^2} \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $p_w$ ——孔隙内静水压力, MPa;  $t$ ——注浆时间, s;  $\eta_0$ ——浆液初始粘度, cp。

该公式可以计算浆液的扩散半径和注浆时间,也可以根据扩散半径求解注浆压力,但是由于是光滑水平单一裂隙,对裂隙性质的假设太过于理想化。

到了1991年, Lombardi [3]在光滑裂隙研究的基础上,假定了裂隙等厚,针对宾汉姆流体,推导出浆液最大扩散半径与注浆压力、裂隙开度和内聚力之间的关系式:

$$r_{\max} = \frac{p_{\max} b}{2c} \quad (3)$$

其中,  $r_{\max}$ ——最大扩散半径, cm;  $p_{\max}$ ——最大注浆压力, MPa;  $c$ ——浆液内聚力, N。

同年 Wittke 和 Wallner [4]在 Lombardi [3]研究的基础上,根据注浆压力变化与浆液屈服强度变化平衡,基于裂隙光滑等开度假设,推导出宾汉姆流体浆液的扩散范围与注浆压力、裂隙开度的关系式:

$$r = \frac{p_0 b}{2\tau_0} + r_0 \quad (4)$$

其中:  $\tau_0$ ——浆液屈服强度, MPa。

上述关于裂隙介质注浆理论的研究,均是基于较为理想的假设,并未考虑浆液的黏度时变性影响,与工程中实际情况的偏差较大。

## 2.2. 考虑时变性

石达民[5]考虑了浆液的时变性特点,基于牛顿流体层流假设,对裂隙注浆进行试验研究,得出注浆

压力与浆液粘度的关系式:

$$p(x, t) = p_0 - \frac{p_0 - p}{L_{\max}} \times \frac{\eta(t)}{\eta(0)} \quad (5)$$

其中,  $p$ ——浆液封面处的压力, MPa;  $L_{\max}$ ——浆液最大扩散距离, m;  $\eta(t)$ ——注浆后  $t$  时刻的粘度, cp。

石达民提出的公式虽然得出浆液的粘度随时间变化的规律, 但是缺点在于没有进一步对浆液扩散情况随时间变化的规律进行分析, 綦建峰[6]考虑浆液的黏度时变性、静水压力及其扩散留核性, 推导出宾汉姆流体的注浆扩散公式:

$$t = -\frac{1}{k} \ln \left[ \frac{(r^2 - r_0^2)(\ln r_0 + 1) - r^2 \ln r}{\left( b_0 b^2 - \frac{b_0^3}{3} - \frac{2b^3}{3} \right) \left( p_0 \pm \frac{1}{2} \rho_w v^2 - p_c \right)} \cdot 4\eta_0 kb \right] \quad (6)$$

$$b_0 = \frac{4\tau(r - r_0)}{p_0 - p_c} \quad (7)$$

其中:  $p_c$ ——静水压力;  $\rho_w$ ——水的密度;  $\tau$ ——浆液剪切应力;  $v$ ——水流速度;  $k$ ——浆液粘度时变系数;  $b_0$ ——流核高度。

阮文军[7] [20]在此基础上, 对浆液流型进行探讨, 除考虑流核、地下静水压力外, 还考虑了裂隙倾角、方位角等影响因素, 推导出了稳定性水泥基浆液(宾汉姆流体)的注浆扩散公式:

$$t = -\frac{1}{k} \ln \left\{ 1 - \frac{\eta_0(0)k[\phi(R) - \phi(r_c) + \psi(R) - \psi(r_c)]}{\frac{\tau_0 b A}{2} \left( R - r_c - \frac{b^2}{12} - \frac{8\tau_0^3 A}{3b} (R - r_c) \right)} \right\} \quad (8)$$

其中:

$$\begin{cases} \phi(R) = \frac{A \ln r_c}{B^2} [(1 + BR) - \ln(1 + BR)] - \frac{AR(\ln R - 1)}{B} + \frac{A}{B^2} \ln R \ln(1 + BR) \\ \phi(r_c) = \frac{A \ln r_c}{B^2} [(1 + Br_c) - \ln(1 + Br_c)] - \frac{Ar_c(\ln r_c - 1)}{B} + \frac{A}{B^2} \ln r_c \ln(1 + Br_c) \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \psi(R) = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{AB^{n-2}}{n^2} R^n \\ \psi(r_c) = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{AB^{n-2}}{n^2} r_c^n \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} A = \frac{1}{p_c - p_w} \\ B = \frac{\rho g \sin \alpha \cos \theta}{p_c - p_w} \end{cases} \quad (11)$$

其中:  $R$ ——浆液最大扩散半径;  $\tau_0$ ——浆液动切力;  $k$ ——粘度增长指数;  $\alpha$ ——裂隙倾角;  $\theta$ ——裂隙方位角;  $p_c$ ——裂隙入口处的有效注浆压力;  $p_w$ ——地下静水压力;  $A$ 、 $B$ 是为了方便表示, 无特殊含义;  $r_c$ ——钻孔半径。

上述裂隙介质注浆理论计算公式, 基于是否考虑浆液黏度时变性的假设, 借助流体力学、水力学、水文地质学和岩石力学等理论基础, 建立了注浆扩散半径与注浆压力、浆液流量、注浆时间之间的关系, 对裂隙介质注浆模拟试验的研究和注浆工程的设计和施工具有一定指导意义。然而, 实际注浆工程中, 岩体结构的复杂性, 裂隙介质的各向异性和不均匀性等导致注浆渗透过程极具不确定性; 在注浆过程中, 裂隙宽度、裂隙壁面透水作用、浆液前锋面在静水压力作用下的稀释现象等都会改变注浆过程中浆液的渗透速率、扩散半径等各种性能; 注浆过程中并非完全的驱替扩散也会导致水力梯度的改变; 各种注浆浆液并非属于某单一流型会影响注浆过程浆液的扩散机制, 而浆液流型与配比相关, 除阮文军[7]提出的公式以外, 其他公式没有考虑这一因素; 考虑浆液黏度时变性的公式还需要考虑地下水对注浆扩散半径的影响。公式推导过程中对注浆过程中裂隙宽度和静水压力对浆液扩散性能的影响考虑明显不足。

由此可见, 基于这些假设和简化条件推导出的理论计算公式与实际的工程实践仍然有较大偏差, 计算结果的准确性难以评估, 对实际注浆工程的预测和技术指导十分有限。

### 3. 裂隙介质注浆模拟试验

室内模拟试验因其可以调查现场不可控因素的优点被许多学者广泛应用, 裂隙介质注浆模拟试验的研究目前以室内模型试验为主, 通过人工设置裂隙, 改变注浆压力、注浆时间、水流速度、水灰比等来观察注浆过程中浆液的扩散状态, 探讨注浆扩散情况和注浆压力的变化规律, 评价加固效果, 为实际注浆施工提供理论指导和技术支撑。

#### 3.1. 注浆模拟试验平台研究

注浆模拟试验目前以物理模拟为主, 研究主要采用的裂隙注浆试验平台有单一平板裂隙模型、裂隙网络模型和实际的预制裂隙模型。

目前的研究以单裂隙模拟为主, 研究者多以单一平板裂隙试验平台(如图 1 所示)为基础, 研究裂隙介质注浆相关规律, 张霄[21]、罗平平[22]、李华茂[23]、张庆松[24]、Sui [25]、湛铠瑜[26]等学者用自制光滑平板裂隙试验平台, 对裂隙注浆扩散规律、影响因素进行了研究; Ding [27]、Yang [28]考虑粗糙度的影响, 梁艳坤[29]考虑倾角的影响改造了平板裂隙试验平台, 进行相关试验研究; Wang [30]研究了浆液在三维粗糙表面岩石裂隙中流动的实验系统, 该系统采用 3D 打印技术预制裂隙, 充分考虑了裂隙的性质对注浆扩散的影响。

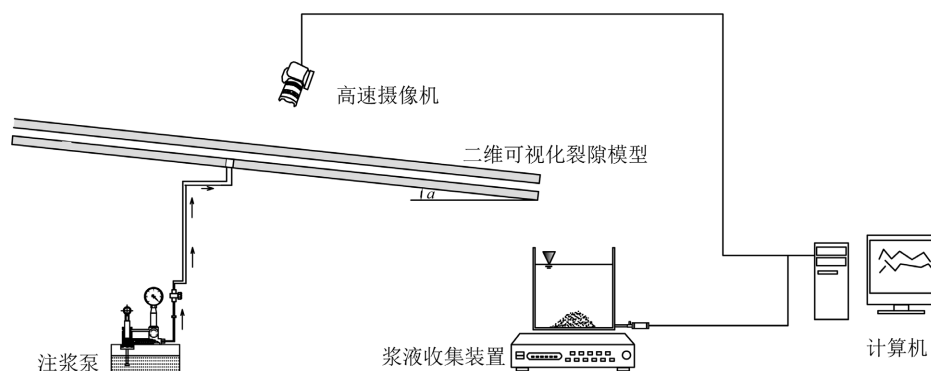


Figure 1. Flat crack grouting test platform

图 1. 平板裂隙注浆试验平台

面对复杂的施工工况, 平板裂隙模型有时无法真实反映天然岩石裂隙的表面特征, 不足以清晰判断裂隙性质对注浆过程中渗流特性的影响, 因此, 在单一平板裂隙试验平台的基础上, 研制裂隙网络试验



平台已成为主流研究方向。刘滨[31]等研究了单条裂隙和裂隙网络的恒压注浆试验系统,该系统可以对注浆压力、浆液性质、隙宽、裂隙倾角进行调节,进而对不同的影响因素进行模拟试验;杨米加[32]等学者在裂隙网络模拟的基础上,建立了裂隙网络渗流模型,得出了确定注浆参数的方法;Ke [33]、王培涛[34]等学者的研究实现了运用 3D 打印技术制备复杂裂隙网络模型,为依据实际工程预制相对应裂隙进行室内试验提供了参考;崔激[35]、刘泉声[36]、吴月秀[37]等学者的研究充分考虑裂隙粗糙度,建立了裂隙网络模型,研究了粗糙度对裂隙岩体渗流的影响;Moon [38]等考虑了浆液粘时变性的影响,研究了裂隙岩体网络中宾汉流体的渗流扩散规律。

目前国内外学者对裂隙网络试验平台进行了大量研究,基于对裂隙性质、浆液性质、岩体性质的研究,定性描述了浆液在裂隙岩体中的流动规律,为研究浆液在裂隙中的渗流规律指明了方向,但实际工程浆液的流动是应力场、渗流场等多场耦合的动态过程,目前的裂隙网络模型对这一动态过程考虑不足,另外,在计算机建模过程中对裂隙网络的划分仍需要更多的理论支撑。

### 3.2. 注浆扩散性能和渗透稳定性研究

裂隙介质注浆,其注浆效果可通过浆液的扩散性能和渗透稳定性来评定。扩散性能主要是对注浆扩散模式和扩散半径的研究,裂隙是地下水的主要通道,地下水突涌出若不能及时得到治理,恐会造成灾难性后果,注浆作为地下工程涌突水治理的一种重要手段,可以及时封堵突水通道,拦截水源[25]。研究浆液扩散过程中岩体的渗透稳定性就是研究裂隙介质注浆效果,通过裂隙介质注浆模拟试验,研究注浆压力、注浆时间、水流速度、裂隙宽度、裂隙粗糙度、注浆量等等对浆液扩散距离和裂隙岩体渗透稳定性的影响规律,得出不同影响因素的影响程度,从而优化注浆施工。

1) 在注浆扩散性能研究方面,大量的试验研究表明,注浆压力、裂隙性质、浆液粘度、温度、水灰比、动水流速、注浆时间等因素均影响浆液扩散性能,许多学者对注浆扩散模式进行了研究,张霄[21]的研究表明,平板裂隙注浆,浆液呈 U 型扩散;俞文生[39]的研究表明当裂隙水平时,浆液呈 U 型扩散,当裂隙存在倾角时,浆液扩散呈彗星状;关于注浆扩散半径方面,贾赫扬[40]的研究结果表明随着温度的增加,高聚物浆液扩散范围先平稳增加,随后逐渐扩大,最终趋于稳定;詹志明[41]的试验结果表明,浆液扩散半径与裂隙开度、注浆压力、水流速度呈正相关,与静水压力、浆液粘度呈负相关;屈浩[42]的研究表明注浆压力是影响化学浆液扩散的主要因素,动水流速次之,浆液胶凝时间影响程度最小;张霄[21]、张改玲[43]等研究表明水流速度与浆液逆水流方向和垂直水流方向的扩散距离及堵水效果成反比,固结体面积受水流速度影响存在极限值;罗平平[22]、梁艳坤[29]等研究表明注浆压力和裂隙倾角是浆液扩散和堵水加固效果的主要影响因素;孙振洋[8]、李华茂[23]等研究表明,裂隙宽度、水灰比对浆液扩散的影响较大,注浆时间影响较小;王强[44]、孙锋[9]、张连震[45]等学者的研究表明注浆压力是影响浆液扩散半径的主控因素。

大量的研究表明注浆压力对浆液的扩散性能有显著影响,但也有部分学者的研究中,注浆扩散过程中,温度、裂隙性质是主要影响因素,且受水流速度的影响,这主要是与注浆浆液的性质以及注浆环境有关,这也验证了在进行注浆模拟试验的过程中,要根据实际工况和注浆浆液的情况考虑相应的影响因素来进行相关研究。

2) 在裂隙介质注浆渗透稳定性研究方面,许多学者针对单一浆液进行了研究,现有的研究主要包括裂隙渗透率和注浆后裂隙渗透率研究两方面,如杨米加[46]的研究表明裂隙开度对裂隙岩体的渗透性影响最为显著,其次是裂隙交叉角度,压力梯度的影响最弱;Miao [47]、Alalaimi [48]等学者的研究发现,裂隙网络的渗透率随孔隙度和裂缝密度的增加而增加;李博[49]研究了裂隙渗透率的演变规律,得到法向应力与力学开度呈幂函数递减、剪切位移与力学开度呈指数函数递增的关系;Di [50]的研究表明,在相

同裂隙水压下, 渗透系数与法向应力之间存在幂函数关系。

张凯文[51]开展了一系列的注浆渗流试验, 研究了不同浆液在微裂隙内的流动规律, 并且通过数值模拟验证了浆液的流速理论; Sun [52]讨论了三维应力和水压对裂隙岩体渗透系数的影响, 结果表明, 三维应力和水压对裂缝渗透系数有显著影响, 呈负指数关系, 正主应力对渗透性起主导作用, 渗透系数随水压的增大而增大; 张超[53]对浆液在裂隙岩体中的渗流进行了数值模拟, 研究了单裂隙注浆的渗流规律, 研究表明注浆有效提高了裂隙岩体的强度和抗渗性; 杨志全[54]的研究表明室内注浆试验在总体上能较好地反映黏度时变性宾汉体浆液的柱 - 半球形注浆渗透规律, 理论值与试验值误差均在可接受范围。

### 3.3. 注浆压力和被注岩体内部压力研究

通过裂隙介质注浆, 可对裂隙岩体进行加固, 提高岩体的抗渗性和整体强度, 而浆液的流动必然引起岩体应力的扰动, 注浆过程更是浆液和被注岩体共同作用的结果[11], 因而, 注浆压力的控制在注浆施工过程中十分必要, 只有充分了解浆液和被注介质的性能尤其是压力变化才能更好地研究浆液的整个渗流过程。

杨米加[32]的研究表明在注浆过程中, 随着浆液的不断渗入, 注浆渗流压力对岩体原有的应力场产生了强烈的扰动, 压力的改变又反过来影响了浆液的渗流过程, 为保证注浆的顺利进行, 注浆压力不能超过裂隙的断裂韧度和垫层的强度; 张庆松[24]的研究将理论分析、数值模拟和试验结果进行对比, 三者所得出的注浆压力随时间增长的曲线基本吻合, 验证了理论分析和数值模拟的合理性。

李畅[55]对渗流场与应力场耦合机制进行了探究, 综合分析了渗流场与应力场的影响因素, 建立了注浆压力的相关计算式; Mu [56]的研究对注浆扩散区内的压力分布进行了估算; 刘泉声[57]的研究表明注浆后裂隙峰值剪切强度增加了 68%~117%, 残余强度增加了 17%~21%, 注浆后其抗变形能力明显增强, 注浆显著提高了裂隙岩体的力学性能; 苏培莉[58]研究了在地应力和注浆压力作用下, 裂隙尖端附近的应力场分布规律, 为应力浆液在裂隙岩体内部的流动扩散规律研究奠定了基础; 黄戡[59]对注浆压力设计计算的各个参数进行了敏感性分析, 根据注浆过程中注浆压力时程曲线得出在控制注浆压力下最优注浆孔数量; 王强[60]对不同材料进行裂隙注浆模拟试验, 研究表明注浆压力出现典型的压力平行段 - 压力上升段 - 稳定段 - 停止注浆后的压力下降段, 并且测点压力与注浆初始压力呈线性关系。

裂隙介质注浆过程中注浆压力和被注岩体压力变化有多种影响因素, 基于以上学者的研究, 进行相关因素的分析可以简单对浆液扩散及围岩压力进行初步预测, 但是实际工况较为复杂, 还应考虑各个因素之间的相互作用对注浆压力及被注岩体的影响, 为工程实践中通过控制注浆压力和监测被注岩体内部压力变化来调整注浆机制、改善注浆效果提供理论参考。

### 3.4. 加固效果和堵水效果研究

裂隙介质注浆, 其注浆效果与最后的加固效果和堵水效果息息相关, 二者是评价裂隙介质注浆效果的重要指标。其中, 加固效果主要包括浆液凝胶体的强度和加固后岩体的抗剪强度、抗折强度、破坏模式以及耐久性等性能, 究其根本, 裂隙注浆主要是通过浆液的胶凝来增强裂隙岩体的强度, 在许多学者的研究中均得到证实[61]-[64]。另外, 裂隙岩层中进行地下采矿、隧道工程、基坑、地下空间等开挖时, 涌水不均匀而突然, 往往还导致岩体破坏, 多与裂隙水的活动密切相关[65]。由此可见, 在研究裂隙介质注浆扩散规律的基础上, 研究注浆过程的渗透稳定性、堵水效果, 分析注浆堵水效果的影响因素十分必要。

在注浆加固效果研究方面, 许多学者从加固效果及其影响因素两个方面进行了研究, 如孙锋[9]、綦建峰[6]的研究表明注浆后浆液凝结体与周围土体构成的复合体, 使浆液和围岩性能都发生了变化; Tian [66]的研究表明泥浆填充后岩体的内部缺陷得以改善, 岩体更加完整, 减小了应力集中, 提高了岩体的稳

定性和整体强度；杨红鲁[67]的研究获得了裂隙岩体注浆过程中压力分布与岩体变形规律，并发现充填度达到 0.2 时，抗剪强度达到最大，加固后的裂隙岩体整体强度明显增大；王志[68]的研究表明影响注浆加固效果的主要因素是注浆材料的强度以及其与基体材料的黏结情况；颜峰[69]的研究表明注浆加固虽然提高了裂隙岩体的整体稳定性，但其过程受多种因素影响，比如裂隙分布状态、连通率以及岩体本身的破碎程度等；许延春[70]的研究表明注浆后裂隙岩体损伤量明显减小，根据实验室结果对比分析，提出了注浆加固变量，初步建立了分级分岩性定量评价注浆效果的新方法。

Du [71]的研究表明动水条件下水泥注浆堵水效果的影响因素有水流初始速度、水灰比、注浆压力和裂缝性质；方良[72]的研究表明堵水效果与地下水流速度呈负相关；覃祥瑞[73]、郑国胜[74]、Sui [25]的研究表明对注浆堵水效果影响最显著的因素是动水流速和裂隙开度，其次是注浆流量和浆液凝胶时间，这也与綦建峰[6]在岩体裂隙溃水溃砂注浆治理模拟试验中关于堵水效果的研究所得出的研究结果一致，在工程中可以通过降低水流速度来提高注浆堵水密封效果。

Jin [75]、湛铠渝[26]等学者对渗流压力场和注浆堵水效果的关系进行试验研究，结果表明在渗流压力场的四种类型中，平台型或多峰型堵水效果较好，对于单峰型，需要做进一步研究，阶梯型堵水效果最差，基于此，进行了有效注浆量的研究，最终根据工程所属渗流压力场的类型对注浆工艺进行相应调整，实现了对注浆过程的有效调控；张丁阳[76]分析了裂隙岩体注浆的渗流场、应力场和温度场特征，获得了动水条件、温度环境、不同浆液性质对单裂隙动水注浆堵水效果和浆液的扩散规律，对堵水效果的评价标准进行了优化。

综上所述，在裂隙介质注浆过程中，许多学者对单一浆液注浆渗透稳定性和堵水效果的影响因素做了定性分析，但实际工程中岩体结构复杂，裂隙产状随机且不均匀，考虑造价及工程需求，有时针对不同裂缝，需要两种浆液协同配合不同工况来完成注浆，目前相关研究还比较缺乏。

#### 4. 结论与展望

随着我国地下工程的发展和深部地下资源的开发利用，裂隙分布状况复杂且难以进行定性研究，在工程建设中遇到了许多技术难题，注浆作为解决问题的重要手段，其技术发展十分重要[77]-[80]。实际工程中，岩体裂隙分布的随机性和岩体结构的复杂性加之注浆过程的不可视性都给注浆封堵、加固的工程实践带来挑战，对注浆理论的研究既有压力也有机遇，注浆模拟试验作为研究注浆过程的有利手段，其发展前景可见一斑，对于裂隙介质注浆的模拟试验，可在以下方面进行研究：

1) 注浆理论公式的修正和经验公式的验证。近年来大多数学者所做的有关一些注浆参数对注浆扩散规律、被注岩体强度、渗透稳定性和堵水效果的影响研究中，主要是基于光滑平板裂隙假设，太过理想的条件导致理论公式计算结果与实际工程偏差较大，如何对经典注浆理论公式进行修正和补充，验证一些经验公式，对注浆过程进行科学预测，或将成为裂隙介质注浆理论研究的一个重点。

2) 注浆模拟试验影响因素量化的研究。现有的研究对注浆压力、注浆时间、水流速度、裂隙宽度、裂隙粗糙度、注浆量等影响注浆扩散的因素做了大量定性研究，但是缺乏定量判定；在注浆加固效果影响因素方面，目前的研究多是对单一因素进行考察，忽略了各个因素之间的协同作用；在注浆渗透稳定性以及堵水效果研究方面，目前多是针对一种浆液进行渗流试验，但对多浆液注浆的研究较少，另外对堵水效果的提高程度，还有待进一步具体化。

3) 裂隙网络试验平台研究。随着注浆理论和实践的发展，裂隙网络试验平台的研究已成为研究热点。目前对于裂隙网络的研究主要包括物理模型和计算机模拟，在物理模型模拟的时候，注浆是多场动态耦合的结果，实际的研究对这一动态过程分析较少，在运用计算机模拟裂隙网络时，对于裂隙网络的划分的相关理论较少，需要更多的理论支撑，总体来说，裂隙网络试验平台的研究还有很长的路要走。



## 参考文献

- [1] Baker, C. (1974) Comments on Paper Rock Stabilization in Rock Mechanics. Springer-Verlag.
- [2] 刘嘉材. 裂缝注浆扩散半径研究[C]//中国水利水电科学院科学研究论文集. 北京: 水利电力出版社, 1982.
- [3] Lombardi, G. 水泥注浆浆液是稠好还是稀好[C]//现代注浆技术译文集. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [4] Wittke, W. 采用膏状稠水泥浆注浆新技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [5] 石达民, 吴理云. 关于注浆参数研究的一点探索[J]. 矿山技术, 1986(2): 14-16.
- [6] Qi, J.F. (2015) An Experimental Investigation of Grouting for Controlling Water and Sand Inrush in Rock Fracture. China University of Mining and Technology.
- [7] Ruan, W.J. (2005) Spreading Model of Grouting in Rock Mass Fissures Based on Time-Dependent Behavior of Viscosity of Cement-Based Grouts. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **24**, 2709-2714.
- [8] 孙振洋. 砂岩裂隙注浆浆液扩散机理及影响因素研究[J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(7): 28-33.
- [9] Sun, F., Zhang, D. and Chen, T.L. (2011) Fracture Grouting Mechanism in Tunnels Based on Time-Dependent Behaviors of Grout. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, **33**, 88-93.
- [10] 沈君, 刘保国, 陈景, 李亚非, 程寅, 宋宇辉. 绿岩裂隙注浆体力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(S1): 2804-2817.
- [11] Yang, M.J., Chen, M.X. and He, Y.N. (2001) Current Research State of Grouting Technology and Its Development Direction in Future. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **20**, 839-841.
- [12] Sheng, J. (2006) Fully Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Model of Saturated Porous Media and Numerical Modelling. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **25**, 3028-3033.
- [13] 范佳俊. 高放废物处置库北山预选区裂隙岩体注浆特性研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2015.
- [14] Gustafson, G., Claesson, J. and Fransson, Å. (2013) Steering Parameters for Rock Grouting. *Journal of Applied Mathematics*, **2013**, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2013/269594>
- [15] El Tani, M. (2012) Grouting Rock Fractures with Cement Grout. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **45**, 547-561. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0235-0>
- [16] Kang, Y., Liu, Q., Gong, G. and Wang, H. (2014) Application of a Combined Support System to the Weak Floor Reinforcement in Deep Underground Coal Mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **71**, 143-150. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.03.017>
- [17] Liu, Q.S., Lei, G.F., Lu, C.B., et al. (2017) Experimental Study of Grouting Reinforcement Influence on Mechanical Properties of Rock Fracture. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **36**, 3140-3147.
- [18] 袁敬强, 陈卫忠, 于建新, 郑朋强, 杨帆. 静水条件下浆液粘度时变特性与微观结构研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(5): 1264-1270.
- [19] Zou, L., Håkansson, U. and Cvetkovic, V. (2018) Two-Phase Cement Grout Propagation in Homogeneous Water-Saturated Rock Fractures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **106**, 243-249. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.04.017>
- [20] Ruan, W.J. (2005) Research on Diffusion of Grouting and Basic Properties of Grouts. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, **27**, 69-73.
- [21] Zhang, X. (2011) Study on Mechanism of Slurry Diffusion and Sealing at the Process of Underground Engineering Moving Water Grouting and Its Application. Shandong University.
- [22] Luo, P.P., Li, Z.P., Fan, B., et al. (2010) Theoretical Study on Flow Model for Tilted Single Fracture Binghamian Grout. *Shandong University of Science and Technology*, **29**, 43-47.
- [23] 李华茂, 梁幸福, 黄小广. 椭圆形裂隙渗透注浆模拟试验研究[J]. 人民黄河, 2010, 32(4): 128-129.
- [24] Zhang, Q., Zhang, L., Zhang, X., et al. (2015) Grouting Diffusion in a Horizontal Crack Considering Temporal and Spatial Variation of Viscosity. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **34**, 1198-1210.
- [25] Sui, W., Liu, J., Hu, W., Qi, J. and Zhan, K. (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>
- [26] Zhan, K.Y., Sui, W.H. and Wang, W.X. (2012) Correlation Analysis of Seepage Pressure and Water Plugging Effect during Grouting into a Fracture with Flowing Water. *Rock and Soil Mechanics*, **33**, 2650-2655.
- [27] Ding, W., Duan, C. and Zhang, Q. (2020) Experimental and Numerical Study on a Grouting Diffusion Model of a Single Rough Fracture in Rock Mass. *Applied Sciences*, **10**, Article 7041. <https://doi.org/10.3390/app10207041>

- [28] Yang, P., Liu, Y., Gao, S. and Xue, S. (2020) Experimental Investigation on the Diffusion of Carbon Fibre Composite Grouts in Rough Fractures with Flowing Water. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **95**, Article 103146. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103146>
- [29] Liang, Y., Sui, W. and Qi, J. (2019) Experimental Investigation on Chemical Grouting of Inclined Fracture to Control Sand and Water Flow. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **83**, 82-90. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.09.038>
- [30] Wang, X., Xiao, F., Zhang, Q., Zhou, A. and Liu, R. (2021) Grouting Characteristics in Rock Fractures with Rough Surfaces: Apparatus Design and Experimental Study. *Measurement*, **184**, Article 109870. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109870>
- [31] Liu, B., Sang, H.M., Kang, Y.S., et al. (2020) Development of Grouting Simulation Test System for Rock Mass Fracture Network and Its Application. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **39**, 540-549.
- [32] 杨米加, 贺永年, 陈明雄. 裂隙岩体网络注浆渗流规律[J]. 水利学报, 2001(7): 41-46.
- [33] Ke, Z., Fei, Q.L., et al. (2020) Deformation and Fracturing Characteristics of Fracture Network Model and Influence of Filling Based on 3D Printing and DIC Technologies. *Rock and Soil Mechanics*, **41**, Article 2555.
- [34] Wang, P.T., Liu, Y., Zhang, L., et al. (2018) Preliminary Experimental Study on Uniaxial Compressive Properties of 3D Printed Fractured Rock Models. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **37**, 364-373.
- [35] Cui, W., Wang, L.X., Jiang, Z., et al. (2021) Numerical Simulation of Grouting Process in Rock Mass with Rough Fracture Network Based on Corrected Cubic Law. *GeoTech Mechanical*, **42**, 2250-2258.
- [36] Liu, Q.S., Wu, Y.X. and Liu, X.Y. (2008) Computer Simulation of 2D Rough Joint Network. *Proceedings of the 2nd Academic Seminar on Waste Underground Disposal*, 6.
- [37] Wu, Y.X. (2010) Modelling Rough Joint Network and Study on Hydro-Mechanical Behavior of Fractured Rock Mass. Graduate School of Academy of Sciences.
- [38] Moon, H.K. and Song, M.K. (1997) Numerical Studies of Groundwater Flow, Grouting and Solute Transport in Jointed Rock Mass. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **34**, 206.e1-206.e13. [https://doi.org/10.1016/s1365-1609\(97\)00279-7](https://doi.org/10.1016/s1365-1609(97)00279-7)
- [39] Yu, W.S., Li, P., Zhang, X., et al. (2014) Model Test Research on Hydrodynamic Grouting for Single Fracture with Variable Inclinations. *Rock and Soil Mechanics*, **35**, 2137-2143.
- [40] 贾赫扬, 李晓龙, 逯林方, 马强, 张蓓, 钟燕辉. 基于聚合反应机理的膨胀型高聚物浆液平面裂隙注浆仿真方法研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55(11): 50-61.
- [41] 詹志明. 机械开挖岩体裂隙注浆扩散模型分析[J]. 兰州工业学院学报, 2022, 29(2): 46-51.
- [42] 屈浩. 透明裂隙介质注浆扩散机理试验研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2016.
- [43] Zhang, G.L., Zhan, K.Y. and Sui, W.H. (2011) Experimental Investigation of the Impact of Flow Velocity on Grout Propagation during Chemical Grouting into a Fracture with Flowing Water. *Journal of China Coal Society*, **36**, 403-406.
- [44] Wang, Q., Feng, Z., Wang, L., et al. (2016) Numerical Analysis of Grouting Radius and Grout Quantity in Fractured Rock Mass. *Journal of China Coal Society*, **41**, 2588-2595.
- [45] Zhang, L.Z., Zhang, Q.S., Liu, R.T., et al. (2018) Grouting Mechanism in Fractured Rock Considering Slurry-Rock Stress Coupling Effects. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, **40**, 2003-2011.
- [46] Yang, M.J., Chen, M.X. and He, Y.N. (2001) Simulating Experiment for Grouting Seepage in Rock Mass. *Journal of Experimental Mechanics*, **16**, 105-112.
- [47] Miao, T., Yu, B., Duan, Y. and Fang, Q. (2015) A Fractal Analysis of Permeability for Fractured Rocks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **81**, 75-80. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.10.010>
- [48] Alalaimi, M., Lorente, S., Wechsato, W. and Bejan, A. (2015) The Robustness of the Permeability of Constructal Tree-Shaped Fissures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **90**, 259-265. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.06.042>
- [49] Li, B., Wang, J.F., Liu, R.C., et al. (2021) Deformation, Failure and Nonlinear Flow Characteristics of a Fracture Subject to Normal Stress and Shear Displacement. *Advanced Engineering Sciences*, **53**, 103-112.
- [50] Di, S., Jia, C., Qiao, W., Yu, W. and Li, K. (2017) Theoretical and Experimental Investigation of Characteristics of Single Fracture Stress-Seepage Coupling Considering Microroughness. *Mathematical Problems in Engineering*, **2017**, Article ID: 6431690. <https://doi.org/10.1155/2017/6431690>
- [51] 张凯文. 微裂隙注浆浆液渗流特性试验研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2019.
- [52] Sun, W.B., Xue, Y.C., Yin, L.M., et al. (2019) Experimental Study on Seepage Characteristics of Large Size Rock Specimens under Three-Dimensional Stress. *Geomechanics and Engineering*, **18**, 567-574.
- [53] Zhang, C., Li, S.G. and Qiang Z. (2015) Numerical Simulation on Permeation Laws of Grouting in Coal and Rock

- Fracture. *Safety In Coal Mines*, **46**, Article No. 19.
- [54] Yang, Z.Q., Hou, K.P., Guo, T.T., *et al.* (2011) Study of Column-Hemispherical Penetration Grouting Mechanism Based on Bingham Fluid of Time-Dependent Behavior of Viscosity. *Rock and Soil Mechanics*, **32**, 2697-2703.
- [55] 李畅. 注浆参数与富水裂隙围岩隧洞应力场——渗流场的关系研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
- [56] Mu, W., Li, L., Yang, T., Yu, G. and Han, Y. (2019) Numerical Investigation on a Grouting Mechanism with Slurry-Rock Coupling and Shear Displacement in a Single Rough Fracture. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, **78**, 6159-6177. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01535-w>
- [57] Liu, Q.S., Lu, C.B., *et al.* (2016) Experimental Study on Mechanical Properties of Mudstone Fracture before and after Grouting. *Journal of Mining and Safety Engineering*, **33**, Article 509.
- [58] 苏培莉. 裂隙煤岩体注浆加固渗流机理及其应用研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2010.
- [59] Huang, K. (2011) Study on Tunnel Grouting Reinforcement Theory and Its Application in Fractured Rock. Central South University.
- [60] 王强. 潞安矿区破碎煤岩体注浆加固技术研究及工程应用[D]: [博士学位论文]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2018.
- [61] Cording, E.J., Hashash, Y.M.A. and Oh, J. (2015) Analysis of Pillar Stability of Mined Gas Storage Caverns in Shale Formations. *Engineering Geology*, **184**, 71-80. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.11.001>
- [62] Zhao, F.L., Shu, C.L., *et al.* (2017) Grouting Reinforcement Experiment for Water-Rich Broken Rock Mass. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **36**, 199-207.
- [63] Liu, Q., Lei, G., Peng, X., Lu, C. and Wei, L. (2017) Rheological Characteristics of Cement Grout and Its Effect on Mechanical Properties of a Rock Fracture. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **51**, 613-625. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1340-x>
- [64] Le, H.-L. and Shao, R.S. (2018) Effect of Grouting Materials and Inclination Angle of Pre-Existing Flaw on Uniaxial Compressive Strength and Failure Mode of Rock-Like Specimens. *Rock and Soil Mechanics*, **39**, 211-219.
- [65] 梁秀娟, 迟宝明, 王文科, 等. 专门水文地质学[M]. 北京: 科学出版社化学与资源环境分社, 2016.
- [66] Tian, Y., Liu, Q., Ma, H., Liu, Q. and Deng, P. (2018) New Peak Shear Strength Model for Cement Filled Rock Joints. *Engineering Geology*, **233**, 269-280. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.12.021>
- [67] 杨红鲁. 裂隙岩体注浆作用下变形与加固机理及应用[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2019.
- [68] Wang, Z., Li, L. and Wang, C. (2018) Experimental Study on Failure of Cracked Rock-Like Material after Grouting Reinforcement. *Journal of Central South University*, **49**, 957-963.
- [69] Feng, Y.A. and Fu, X.J. (2009) Analysis of the Factors Influencing the Grouting Reinforcement Effects of Fractured Rock Mass. *Metal Mine*, **39**, Article No. 14.
- [70] 许延春, 李昆奇, 谢小锋, 刘世奇, 吕斌. 裂隙岩体损伤的注浆加固效果试验[J]. 西安科技大学学报, 2017, 37(1): 26-31.
- [71] Du, X., Fang, H., Wang, S., Xue, B. and Wang, F. (2021) Experimental and Practical Investigation of the Sealing Efficiency of Cement Grouting in Tortuous Fractures with Flowing Water. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **108**, Article 103693. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103693>
- [72] 方良. 基于 Fluent 的裂隙注浆浆液流动特性研究[D]: [硕士学位论文]. 焦作: 河南理工大学, 2014.
- [73] 覃祥瑞. 岩体粗糙裂隙动水注浆扩散规律研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2021.
- [74] Zheng, G.S. (2018) Investigation on the Propagation and Sealing Efficiency of Grouting in Fracture Network with Flowing Water. China University of Mining and Technology.
- [75] Jin, L., Sui, W. and Xiong, J. (2019) Experimental Investigation on Chemical Grouting in a Permeated Fracture Replica with Different Roughness. *Applied Sciences*, **9**, Article 2762. <https://doi.org/10.3390/app9132762>
- [76] Zhang, D.Y. (2018) Investigation on Coupling Mechanism of Multi-Fields for Grouting Diffusion in Fractured Rock Mass with Flowing Water. China University of Mining and Technology.
- [77] 朱合轩. 深部随机开度裂隙岩体渗透注浆扩散机理研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2022.
- [78] Sha, F., Li, S.C., Lin, C.J., *et al.* (2019) Research on Penetration Grouting Diffusion Experiment and Reinforcement Mechanism for Sandy Soil Porous Media. *Rock and Soil Mechanics*, **40**, 4259-4269.
- [79] 许昌毓, 韩立军, 田茂霖, 王亚洁. 耦合注浆加固机理及围岩力学参数位移反分析[J]. 煤矿安全, 2020, 51(11): 155-160.
- [80] Kim, J., Chong, S. and Cho, G. (2018) Experimental Characterization of Stress and Strain-Dependent Stiffness in Grouted Rock Masses. *Materials*, **11**, Article 524. <https://doi.org/10.3390/ma11040524>