

DOI: 10.11779/CJGE201811019

考虑区间分布的幂律流体脉动渗透注浆扩散机制研究

张 聪¹, 梁经纬², 阳军生¹, 张贵金³, 谢亦朋¹, 叶新田¹

(1. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 湖南省大坝安全与病害防治工程技术研究中心, 湖南 长沙 410072;
3. 长沙理工大学水利学院, 湖南 长沙 410041)

摘要: 脉动注浆技术虽已得到了一定应用, 但脉动压力下浆液的扩散机制研究则远滞后于工程实践。为了进一步推广和完善脉动注浆技术, 基于注浆过程中脉动压力持续段流量恒定、压力间隔段流量为零的特点, 考虑地层参数的不确定性, 建立了脉动压力下幂律流体的渗透扩散模型, 得到了脉动压力下幂律流体扩散半径的区间分布方程; 设计了一套脉动渗透注浆模拟试验装置, 得到了不同施工参数下幂律流体在地层内的分布形态; 通过在数值模拟中构造脉动压力周期变化模型与孔隙率随机分布模型, 实现了脉动压力下幂律流体渗透注浆浆液扩散过程的模拟。研究结果表明: 脉动压力作用下幂律流体在地层内扩散范围并非是一个确定的量值, 但基本集中在一定范围内, 存在明显的扩散半径上下限; 浆液扩散半径上下限受脉动注浆压力、脉动频率等影响明显, 且上限差值随脉动注浆压力的增大而增大, 浆液离散程度表现的更显著; 理论计算、数值模拟与模型试验所得的浆液扩散半径随注浆压力的变化趋势一致, 理论与数值计算得到的浆液扩散半径上下限数值误差均在可接受范围内, 推导的理论公式和建立的数值模型均能较好的描述幂律流体在脉动压力下的扩散过程及区间分布。研究成果可为脉动渗透注浆理论、数值模拟以及实践工程提供一定的指导意义。

关键词: 脉动注浆; 幂律流体; 渗透扩散; 区间理论; 模型试验; 数值模拟

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)11-2120-09

作者简介: 张 聪(1988-), 男, 湖南长沙人, 博士, 主要从事岩土与地下工程方面科研工作。E-mail: zc8023cl@163.com。

Diffusion mechanism of pulsating seepage grouting slurry with power-law fluid considering interval distribution

ZHANG Cong¹, LIANG Jin-wei², YANG Jun-sheng¹, ZHANG Gui-jin³, XIE Yi-peng¹, YE Xin-tian¹

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. Human Engineering Technology Center of Dam

Safety and Disease Control, Changsha 410072, China; 3. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410041, China)

Abstract: Although the pulsating grouting technology has been widely used, the diffusion mechanism of grout under fluctuating pressure is far behind the engineering practice. For the further promotion and perfection of the pulsation grouting technology, considering the uncertainties of the formation parameters, a permeable diffusion model for power-law fluid under pulsating pressure is established on the basis that the flow rate keeps constant in the sustained segment and zero in the interval segment. Also, the interval distribution equation for the diffusion radius of power-law fluid under pulsating pressure is obtained. Then, by using the designed pulsating seepage grouting simulation test devices, the distribution of power-law fluid in soil strata under different construction parameters is obtained. In numerical process, by constructing the pressure pulsation cycle model and pore rate random distribution model, the simulation of the diffusion process of grout under pulsating pressure infiltration of power-law fluid is also realized. The results show that the diffusion radius of power-law fluid under the pulsation pressure in the soil strata is not a definite value, but concentrated in a certain range with obvious upper and lower bounds, which is impacted significantly by the pulsating grouting pressure and pulsation frequency. With the increase of grouting pressure, the difference between the upper and lower bounds increases, and the dispersion degree appears more obvious. Besides, the diffusion radii of grout obtained from theoretical calculation, numerical simulation and model tests show the same trend with the change of grouting pressure, and the calculated values from both theory and numerical simulation are acceptable compared to those of model tests. In general, the theoretical formula and the numerical model can describe the diffusion process and the interval distribution of power-law fluid under fluctuating

基金项目: “十三五”国家重点研发计划课题(2016YFC0802504)

收稿日期: 2017-09-14

pressure well. The research results can provide some significant guidance to the theory, numerical simulation and practical engineering of pulse penetration grouting.

Key words: pulse grouting; power law fluid; seepage diffusion; interval theory; model test; numerical simulation

0 引言

脉动注浆作为一种有效的地层防渗加固施工技术, 虽已成功应用到较多注浆工程实践中, 但仍存在不少急待研究并予以解决的问题。尤其是脉动注浆扩散机制的研究远滞后于工程实践, 这无疑给该技术的进一步推广及应用带来了困难。因此, 研究脉动注浆扩散机制对完善脉动注浆理论及进一步推广该技术具有十分重要的现实意义。

目前, 国内外学者对浆液扩散的研究主要集中在牛顿流体和宾汉流体的稳压渗透注浆方面, 并取得了一定的研究成果^[1-7]。而在幂律流体渗透注浆扩散研究方面, 仅有文献[8~10]对其稳压注浆下的渗透注浆扩散开展过一定的研究。然而, 幂律流体已广泛应用于实际脉动注浆工程中, 如工程上常用的纯水泥浆(水灰比为 0.5~0.7)、黏土水泥浆(黏土掺量>30%)均属于典型的幂律流体。因此, 开展脉动注浆的幂律流体渗透扩散研究具有十分重要的科研与应用价值。

现阶段, 针对地层的不确定性, 借助区间理论研究不确定性的复杂工程问题是一种行之有效的方法。如: 徐新华等^[11]、胡谢飞等^[12]、曹文贵等^[13]将区间理论运用到边坡工程中, 为边坡稳定性评价提供了新的思路; 赵明华等^[14]建立了基于区间理论的挡土墙稳定性非概率可靠性分析方法; 王继承等^[15]采用区间分析方法研究了围岩的力学状态, 并应用到了深部岩体工程中; 张永杰等^[16]基于区间理论, 建立了一种更合理的岩溶区公路路基稳定性的区间模糊评判分析方法。但遗憾的是, 尚未有学者采用区间理论来分析浆液的扩散问题, 而现有注浆工程开挖表明, 受地层不确定性因素的影响, 浆液扩散范围并非是一个确定的量值, 但基本集中在一定范围内。学者们过去的研究往往忽略了这点, 一般取地层参数的平均值代入推导的扩散关系式中, 计算得到精确的浆液扩散半径, 这往往与实际工程存在较大的偏差。

鉴于此, 本文基于脉动压力变化规律, 建立区间算法的脉动压力下幂律流体渗透扩散模型, 并在数值模拟中采用均匀分布随机方法构建区间内初始孔隙率随机分布地层模型, 实现脉动压力下幂律流体在不确定性地层内的扩散过程模拟, 最后结合幂律流体脉动注浆模型试验验证数值模拟及理论分析的合理性, 以期为脉动压力下幂律流体施工提供理论指导。

1 幂律流体脉动渗透扩散理论模型

脉动注浆主要是采用双缸以一定的频率推动活塞进行往复运动, 通过改变工作缸的容积来迫使浆液以一定的频率输出。在第一次脉动注浆过程中总注浆时间为 T_1 , 存在脉动持续段 t_1 和脉动间隔段 t_2 两种运动模式, 如图 1 所示。

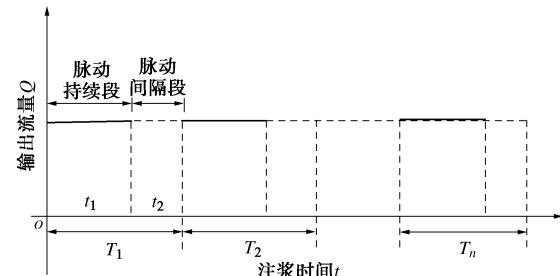


图 1 脉动注浆过程示意

Fig. 1 Process of pulse grouting

在脉动持续时间内浆液流量恒定, 浆液在注浆压力作用下被迫在地层内以一定速率扩散, 该过程与稳压注浆一致; 而脉动间隔时间内浆液流量为零, 在此阶段浆液扩散速率突然中断或瞬间减小, 浆液内颗粒受此影响将在岩土体孔隙内产生絮凝沉积, 填塞地层孔隙。而随着上述过程的不断重复, 地层孔隙率不断减小, 注浆压力被迫提高, 待达到设计压力时则停止注浆。

1.1 基本假设及模型的建立

根据上述脉动注浆过程, 提出如下假设: ①受注介质或注浆材料均满足各向同性; ②浆液在扩散过程中不可压缩, 且注浆过程中流型不变, 且整个过程满足层流运动; ③采用填压法注浆, 浆液从孔底注入受注介质且呈球形扩散; ④浆液在扩散过程中忽略重力影响, 在脉动间隔段内颗粒渗流速度恒定, 絮凝沉积时颗粒均匀分布在地层内。

根据上述假设条件, 提出脉动压力下幂律流体的渗流扩散模型, 如图 2 所示。

图 2 中, p_0 为注浆压力, r_0 为注浆管的半径, l_1 , p_1 分别为经过第一次脉动周期时间 T_1 后浆液的扩散距离和注浆压力, l_2 , p_2 分别为经过第二次脉动周期时间 T_2 后浆液的扩散距离和注浆压力, l_n , p' 分别为经过 n 次脉动后浆液的最终扩散距离和设计压力。根据上述脉动注浆过程可知, $p = p_0$ 时, $l = r_0$; $t = T_1$ 时, $p = p_1$, $l = l_1$; $t = T_2$ 时, $p = p_2$, $l = l_2$; 经过 n 次脉动, $p = p'$, $l = l_n$ 。另外, 根据图 1, 2 可知, 每次脉动周期 T 均存在 t_1 和 t_2 不同的扩散时段, 若 t_1 时段内浆液

扩散距离为 l'_1 ， t_2 时段内浆液扩散距离为 l''_1 ，则有 $l_1 = l'_1 + l''_1$ 。

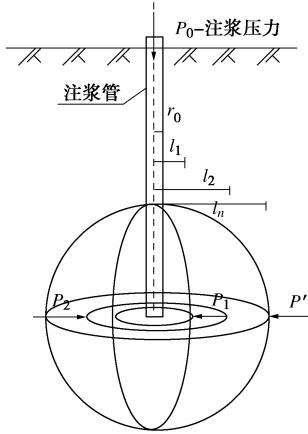


图 2 脉动压力下幂律流体的渗流扩散模型

Fig. 2 Seepage diffusion model of power-law fluid under fluctuating pressure

1.2 幂律流体脉动渗透扩散方程

(1) 脉动连续段浆液扩散方程

根据上述幂律流体脉动渗透扩散理论模型可知，幂律流体在脉动连续段渗透扩散与稳压注浆浆液扩散一致。经文献调研发现，杨秀竹等^[8]已得到了幂律流体渗透注浆的扩散半径计算公式，故将本文脉动连续段的边界条件（ $p = p_0$ 时， $l'_1 = r_1$ ， $t = t_1$ ）代入文献[8]中即可得到幂律流体在脉动连续段的渗透扩散方程：

$$\left. \begin{aligned} \Delta p &= p_1 - p_0 = \left(\frac{\phi_0}{3t_1} \right)^m \left(\frac{\mu_e}{K_e} \right) \left(\frac{1}{1-2m} \right) (l_1^{1-2m} - r_0^{1-2m}) l_1^{1-3m}, \\ K_e &= \frac{\phi_0 r'^2}{2} \left(\frac{m}{1+3m} \right), \\ \mu_e &= c' \left(\frac{1+3m}{\phi_0 r' m} \right)^{m-1}, \\ K &= \frac{\phi_0 r'^2}{8\mu} . \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 ϕ_0 为地层初始孔隙率； μ_e 为有效黏度； K_e 为有效渗透率； m 为流变指数； c' 为稠度系数； r' 为假设的圆管半径； K 为地层渗透系数； μ 为水的黏度， r_0 为注浆管半径。

(2) 脉动间隔段浆液扩散方程

由于脉动间隔段油缸推力的突然中断，浆液受此影响扩散速度骤减，当浆液速度降至一定值时，浆液内颗粒会在地层内絮凝沉积。假设浆液中颗粒体积浓度为 c ，单位体积地层内颗粒沉积量为 $\Delta\sigma$ ，考虑如图 3 所示的沉积模型，颗粒在横截面积为 Δs 、厚度为 Δz 的地层内沉积，则滞留在地层内的颗粒体积为 $\Delta\sigma\Delta s\Delta z$ ，随浆液进行渗透扩散的颗粒体积为

$c\phi_0\Delta s\Delta z$ ，如图 3 所示。

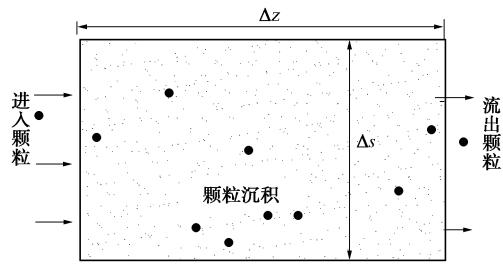


图 3 颗粒沉积过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of microparticle deposition

随着注浆过程的进行，颗粒不断沉积，地层孔隙率不断发生变化，则动态地层孔隙率 ϕ' 满足

$$\phi' = \phi_0 - \lambda \Delta\sigma \quad , \quad (2)$$

式中， λ 为浆液膨胀系数。

根据质量守恒可知，地层内颗粒的累积量等于流入的量与流出量之差，令单位时间内流入岩土体内的颗粒体积为 $\Delta s\Delta v c$ ，则有

$$\frac{\partial [\Delta s(\Delta\sigma + \phi')]}{\partial t} + \frac{\partial [\Delta s\Delta v c - \Delta s A \frac{\partial c}{\partial z}]}{\partial z} = 0, \quad (3)$$

式中， Δv 为颗粒流速， $-A \frac{\partial c}{\partial z}$ 为颗粒的扩散通量。

又根据质量守恒和 1.1 节中假设条件 (4) 可知，式 (3) 可转化为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\Delta\sigma + \phi') + \Delta v \frac{\partial c}{\partial z} - A \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} = 0. \quad (4)$$

又考虑幂律流体浆液颗粒一般大于 $1 \mu\text{m}$ ，故可忽略颗粒扩散的影响，则式 (4) 可简化为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\Delta\sigma + \phi') + \Delta v \frac{\partial c}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

已有研究表明^[17]，颗粒在孔隙度为 ϕ 的地层内渗流的实际速度 $\Delta v'$ 和通过单位距离所需时间 t 为

$$\left. \begin{aligned} \Delta v' &= \frac{\Delta v}{\phi}, \\ t &= \frac{\phi \times 1}{\Delta v} . \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

又由文献[18]可知，浆液中颗粒体积浓度 c 与沉积概率 α' 无关，则单位距离、单位时间内的颗粒沉积概率 α' 为

$$\Delta\sigma = \alpha' c \phi t. \quad (7)$$

当浆液处于脉动间隔 t_2 段，浆液内颗粒在地层内由外向内沉积，则有

$$l''_1 = \frac{\Delta\sigma}{\Delta s} = \frac{\alpha' c \phi_0 t_2}{\pi r_0^2} = \frac{k c t_2}{\pi r_0^2}, \quad (8)$$

式中， $k = \alpha' \phi_0$ 为沉积系数。

待进入第二次脉动 T_2 时，浆液扩散位置为 l_2 ，则此时出浆口半径 r'_1 和地层孔隙率 ϕ_1 分别为

$$\left. \begin{aligned} r'_0 &= l'_1 + l''_1 + r_0 = l' + \frac{kct_2}{\pi r_0^2} + r_0, \\ \phi_1 &= \phi_0 - \lambda \Delta \sigma = \phi_0 - \lambda kct_2. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

将式(8)、(9)代入式(1)则可求得第二次脉动浆液渗透扩散关系式为

$$\Delta p = \left(\frac{\phi_0 - \lambda kct_2}{3t_1} \right)^m \left(\frac{\mu_e}{K_e} \right) \left(\frac{1}{1-2m} \right) \cdot \left[l_2^{1-2m} - \left(r_0 + \frac{kct_2}{\pi r_0^2} + l'_1 \right)^{1-2m} \right] l_2^{3m}. \quad (10)$$

根据上述单次推导过程, 则经n次脉动后的幂律流体的渗透扩散关系式为

$$\Delta p = \left(\frac{\phi_0 - (n-1) \lambda kct_2}{3t_1} \right)^m \left(\frac{\mu_e}{K_e} \right) \left(\frac{1}{1-2m} \right) \cdot \left[l_n^{1-2m} - \left(r_0 + \frac{(n-1) kct_2}{\pi r_0^2} + l'_1 \right)^{1-2m} \right] l_n^{3m}, \quad (11)$$

式中, l_n 为经过n次脉动后浆液的渗透扩散半径。

1.3 幂律流体脉动渗透扩散半径区间

利用区间数学方法对集中的浆液扩散半径进行计算, 来估计浆液在地层中的扩散范围。区间数描述不确定性时, 仅给出不确定参数变化的上下界即可。根据区间数运算法则[19], 对任意的区间数 $X = [\underline{x}, \bar{x}]$, $Y = [\underline{y}, \bar{y}] \in I(R)$, 则: $X+Y = [\underline{x}+\underline{y}, \bar{x}+\bar{y}]$, $X-Y = [\underline{x}-\bar{y}, \bar{x}-\underline{y}]$; $X/Y = [\underline{x}, \bar{x}] \cdot [1/\bar{y}, 1/\underline{y}]$, 若 $0 \notin Y$; $X \cdot Y = [\min(\underline{x}\underline{y}, \underline{x}\bar{y}, \bar{x}\underline{y}, \bar{x}\bar{y}), \max(\underline{x}\underline{y}, \underline{x}\bar{y}, \bar{x}\underline{y}, \bar{x}\bar{y})]$ 。

根据区间数学的原理, 采用区间数描述浆液渗透扩散的不确定性, 则脉动压力下幂律流体渗透扩散半径的区间 l_n^I 可表示为

$$l_n^I = [\underline{l}_n, \bar{l}_n], \quad (12)$$

式中, \underline{l}_n , \bar{l}_n 为幂律流体渗透扩散半径下限和上限。

根据式(11)、(12), 可知幂律流体渗透扩散半径的下限 \underline{l}_n 为

$$\left. \begin{aligned} \Delta p &= \left(\frac{\phi_0 - (n-1) \lambda kct_2}{3t_1} \right)^m \left(\frac{\mu_e}{K_e} \right) \left(\frac{1}{1-2m} \right) \cdot \\ &\quad \left(\underline{l}_n^{1-2m} - \left(r_0 + \frac{(n-1) kct_2}{\pi r_0^2} + l'_1 \right)^{1-2m} \right) \underline{l}_n^{3m}, \\ \underline{K} &= \frac{\phi_0 r'^2}{8\mu}, \\ \underline{K}_e &= \frac{\phi_0 r'^2}{2} \left(\frac{m}{1+3m} \right), \\ \underline{\mu}_e &= c' \left(\frac{1+3m}{\phi_0 r' m} \right)^{m-1}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

同理, 幂律流体渗透扩散半径的上限 \bar{l}_n 为

$$\left. \begin{aligned} \Delta p &= \left[\frac{\phi_0 - (n-1) \lambda kct_2}{3t_1} \right]^m \left(\frac{\mu_e}{K_e} \right) \left(\frac{1}{1-2m} \right) \cdot \\ &\quad \left\{ \bar{l}_n^{1-2m} - \left[r_0 + \frac{(n-1) kct_2}{\pi r_0^2} + l'_1 \right]^{1-2m} \right\} \bar{l}_n^{3m}, \\ \bar{K} &= \frac{\phi_0 r'^2}{8\mu}, \\ \bar{K}_e &= \frac{\phi_0 r'^2}{2} \left(\frac{m}{1+3m} \right), \\ \bar{\mu}_e &= c' \left(\frac{1+3m}{\phi_0 r' m} \right)^{m-1}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

1.4 公式中参数的选取及适用范围

(1) 公式参数选取

式(13)、(14)中各参数可分为确定值和不确定值两类, 对于确定值: 注浆管的半径 r_0 一般为 1.3~6.0 cm, 可结合现场施工情况选取; λ 工程上常取 $2.1 \times 10^{-4} \text{ ml}/\text{C}$; 颗粒体积浓度 c 可采用波美计现场对浆液进行实测; 颗粒沉积系数 k 工程上假设其为恒定值; 浆液稠度 c' 和流变指数 m 可通过流变仪测得; 脉动注浆连续段时间和间隔段时间根据现场实际情况选取, 一般 t_1 为 4~10 s, t_2 为 3~8 s; 而对于不确定值, 经现场压水试验, 可得到不同区域内的地层渗透系数, 取其最大最小值为渗透系数 K 的上下限; 经现场测得岩土体的天然重度 γ 、土粒重度 γ_s 以及岩土体的含水率 w 的范围, 分别取其最大最小值为各参数的上下限, 通过 $\phi_0 = 1 - \gamma / [\gamma_s(1 + \omega)]$ 可得到岩土体初始孔隙度的上下限。

(2) 公式适用范围

脉动压力下幂律流体的渗透扩散关系式是在假设流体为层流的基础上推导出来的, 对于紊流不适用。而依据参考文献[20], 可通过稳定性参数 Z 来判断幂律流体的流态, 计算如下:

$$Z = \frac{m}{2^m} \left(\frac{1}{1+m} \right)^{\frac{m+2}{m+1}} \left(\frac{3m+1}{m} \right)^{2-m} \frac{d^{m-2} \bar{v}^{2-m} \rho}{c}, \quad (15)$$

式中, ρ 为流体密度, d 为圆管直径, 若 $Z < 808$ 时为层流, 若 $Z > 808$ 时为紊流。

而实际注浆过程, 考虑浆液渗透速率难以确定, 而当纯水泥浆液(水灰比为 0.5~0.7)或黏土水泥浆液(黏土掺量为 30%以上)时均为幂律流体, 符合上述公式计算条件。

2 幂律流体脉动渗透注浆模型试验

2.1 试验装置

采用自制的脉动注浆模拟试验装置来开展幂律流体脉动渗透注浆室内试验。试验装置主要由气压源、脉动频率控制阀、介质装载器、注浆管、气囊以及围压控制阀等组成。其中,通过调节脉动频率控制阀可将气压源输出的气体转化为不同频率的脉动压力;储浆容器用于储存拌制好的幂律流体,容积为 10 L,设计压力 3 MPa;介质装载器由对称的两个半圆形钢圆桶经螺栓扣件组合而成,内径为 80 cm,用于储装土体构造地层;气囊压力控制阀主要用于调节钢壁内的气囊压力值来形成不同孔隙率的地层,具体试验装置如图 4 所示。



图 4 注浆试验装置

Fig. 4 Grouting test devices

2.2 试验材料及试验控制参数

(1) 试验材料

选取松散土石体混合物构造地层,将内径为 2 cm 的注浆管预埋至设计孔深,利用气囊压力控制阀进行调控,设置的地层介质比重为 1.89,渗透系数为 $3.01 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$,孔隙率为 43%,含水率达 12%。

(2) 注浆材料

本次试验采用自制的黏土水泥固化浆液。其中,黏土原浆比重 1.35,水泥为 #42.5 普通硅酸盐水泥,固化剂 2%,配置浆液的水温控制在 20°C (该温度下,水的黏度为 $1.01 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$),水灰比为 2:1。经测试 $Z=427.78 < 808$,符合层流状态理论基础。采用流变仪对其进行测试,浆液为典型幂律流体,且浆液流变指数 m 为 0.6,稠度 c' 为 $0.02 \text{ Pa} \cdot \text{s}^m$ 。

(3) 控制参数

脉动注浆主要控制参数为:设计注浆压力 0.2~0.8 MPa,脉动持续时间为 3~8 s,脉动间隔时间为 3~6 s,注浆时间 60 s。

2.3 结果分析

注浆完成后,清洗注浆管路,待注浆加固体固结 7 d 后,依据《土工试验方法标准》与常水头渗透试验^[21-22](储浆室内的浆液置换水)分别测得注浆加固体渗透系数为 $5.13 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$,孔隙率为 0.25。上述结果表明,采用脉动渗透注浆能显著降低松散土石

混合体地层的渗透系数,地层整体稳定性得到了显著提高。

通过紧锁螺栓将介质装载器打开,开挖量测浆液扩散形态。典型注浆施工参数下浆液扩散形态如图 5 所示。由图 5 可以看出,两组注浆施工参数下浆液向四周扩散范围并非一致,而是表现出一定的差异性,存在明显的浆液扩散半径上下限(采用转尺量测,最大、最小扩散距离即为浆液扩散半径上、下限)。对比分析图 5 (a)、图 5 (b) 可知,浆液的扩散半径上限分别为 9.5, 8.4 cm, 浆液扩散半径下限分别为 6.8, 6.4 cm, 即浆液扩散半径的上下限与注浆施工参数存在一定的关系。

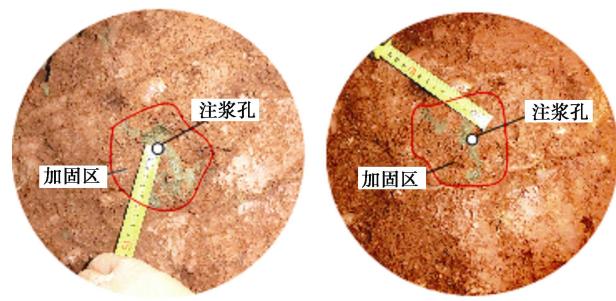


图 5 浆液扩散形态

Fig. 5 Diffusion forms of slurry

3 幂律流体脉动渗透注浆数值模拟

3.1 浆液脉动渗透扩散方程

(1) 脉动压力方程

通过观察注浆模拟试验可知,脉动压力在持续段受地层、浆液等影响,压力呈非线性增长;而在脉动间隔断,由于注浆管道内残余压力无法全部消除,尚存在较小的压力值。考虑数值模型的复杂性和计算效率,对上述过程进行适当简化,将脉动持续段压力增长按线性处理,而脉动间隔断则忽略残余压力的影响。故脉动注浆压力为以脉动持续段(t_1)和脉动间隔段(t_2)的低频周期函数,单次脉动过程注浆压力 P_0 与注浆时间 t 满足如下关系:

$$P(t) = \begin{cases} \frac{P'}{t_1} \cdot t & (0 \leq t \leq t_1) \\ 0 & (t_1 < t \leq t_2) \end{cases}, \quad (16)$$

式中, P' 为设计压力。

(2) 不确定性地层模型的构造

已有研究表明^[23],浆液在地层内扩散范围不确定性的主要原因是地层内孔隙率的不均匀分布,而本文注浆模拟试验也进一步验证了该研究的正确性。故本文以孔隙率为基本物理量,基于均匀分布随机方法构

建区间内初始孔隙率随机分布地层模型, 则产生 $[a, b]$ 区间均匀分布随机数的计算式为

$$\phi_0 = a + (b - a) r_i, \quad (17)$$

式中, r_i 为 $[0, 1]$ 区间均匀分布随机数。

(3) 浆液渗透扩散方程

考虑注浆模型试验地层为典型的孔、裂隙介质, 且随机均匀分布, 故可将其假设为拟连续介质或连续介质。根据参考文献[24, 25], 则脉动压力下浆液在地层内的扩散可看作是非稳态达西渗流运动, 满足如下渗透连续性微分方程:

$$-\left[\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \right] = \rho(\alpha + \beta\phi_0) \frac{\partial P_0}{\partial t}. \quad (18)$$

式中 ρ 为黏土水泥固化浆液的密度; α 和 β 分别表示地层和黏土水泥浆液的压缩系数; v_i 为黏土水泥固化浆液在地层中的等效渗流速度, $i=x, y, z$ 。

又将浆液的等效渗流速度表示成脉动注浆压力 P_0 的微分形式:

$$\left. \begin{aligned} v_x &= \frac{-1}{\rho g} \frac{\partial(K_e P_0)}{\partial x}, \\ v_y &= \frac{-1}{\rho g} \frac{\partial(K_e P_0)}{\partial y}, \\ v_z &= \frac{-1}{\rho g} \frac{\partial(K_e P_0)}{\partial z}, \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中, K_e 为等效浆液渗透系数, 表示黏土固化浆液在地层中的渗透能力。

若假设黏土固化浆液是不可压缩流体, 即 ρ 为常数, 则将式(19)代入式(18)可得脉动压力下黏土固化浆液在地层内的渗透扩散的基本微分方程为

$$\frac{\partial^2(K_e P)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(K_e P)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2(K_e P)}{\partial z^2} = S \frac{\partial P}{\partial t}, \quad (20)$$

式中, S 为地层等效贮浆系数, 本文取 0.20。

3.2 数值计算原理与模型建立

应用多场耦合软件 COMSOL Multiphysics 中随机函数来构造非均质地层, 采用稀物质传递模块来实现浆液的渗透扩散过程。数值计算以物理模型试验为背景, 采用二维数值计算模型。为简化计算提出如下假设: ①幂律流体在扩散过程中不发生化学反应; ②浆液从注浆孔四周均匀扩散, 且初始注浆压力处处相等, 为脉动泵输出压力。

模型为内径 80 cm 的圆形, 注浆孔内径为 2 cm 位于模型几何中心, 模型四周为无流动、固定边界, 求解瞬态模式下 60 s 时浆液的扩散距离, 取与物理模型试验一致的地层参数、浆液参数, 模型地层孔隙率随机分布及模型网格剖分如图 6 所示。

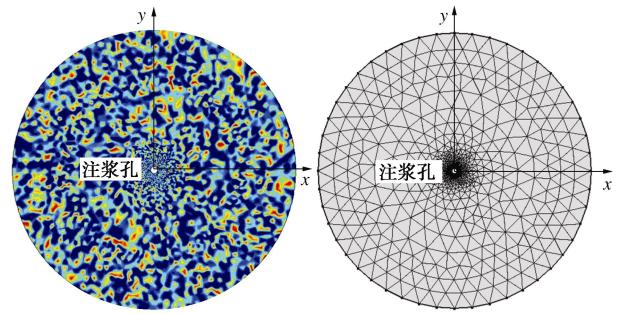


图 6 孔隙率随机分布及网格剖分

Fig. 6 Random distribution of porosity and mesh generation

3.3 数值模拟结果分析

对典型注浆施工参数下的浆液扩散形态进行分析, 如图 7 所示。

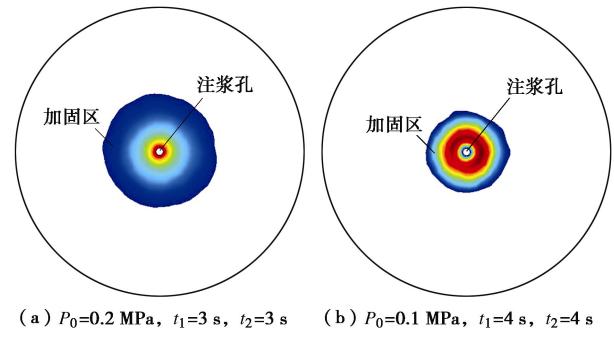


图 7 浆液扩散分布

Fig. 7 Diffusion distribution of slurry

由图 7 可以看出, 脉动注浆压力作用下浆液在地层内以近似平面圆形扩散, 扩散过程中浆液沿注浆孔四周扩散的速率大小不一, 呈非对称型扩散。注浆结束后, 存在明显的浆液扩散半径上下限。对比分析图 7 (a)、(b) 可知, 浆液的扩散半径上限分别为 9.1, 5.7 cm, 浆液扩散半径下限分别为 7.8, 4.9 cm, 故采用区间均匀分布随机数构建的地层能反映浆液扩散范围的不确定性, 能表征出脉动压力作用下浆液的真实扩散形态和分布范围。

4 理论分析、数值模拟与试验结果对比

为验证理论分析与数值模拟的正确性及脉动压力下幂律流体渗透注浆的规律, 采用与物理模型试验一致的地层参数和施工参数(注浆压力取 0.1~0.5 MPa, 注浆时间 t 取 60 s, t_1 取 5 s, t_2 取 5 s) 对理论分析与数值模拟进行计算浆液扩散半径的上下限求解及对比, 如图 8 所示。

由图 8 可以看出:

- (1) 在不同注浆压力下三者所得的浆液扩散半径随注浆压力的变化趋势一致, 说明理论分析和数值模拟均能较好的反映幂律流体随脉动压力变化的扩散规律。
- (2) 分别将不同脉动注浆工况下, 理论分析和数

值模拟计算的浆液扩散半径与试验结果进行对比, 结果见表 1。

表 1 不同注浆压力下浆液扩散半径误差

Table 1 Errors of grout diffusion radius under different grouting pressures

注浆压力 /MPa	理论分析		数值模拟	
	上限误差 /%	下限误差 /%	上限误差 /%	下限误差 /%
0.1	14.3	4.7	13.1	3.0
0.2	1.1	5.9	3.2	4.4
0.3	10.6	3.4	15.9	7.9
0.4	7.9	4.4	13.8	12.3
0.5	14.5	13.2	12.3	9.3

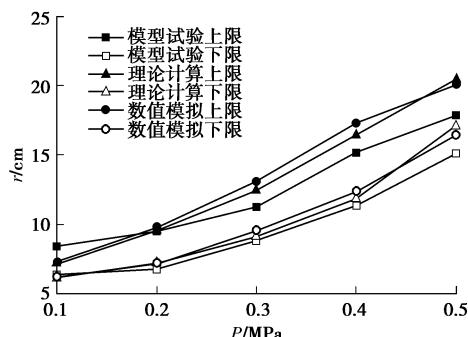


图 8 浆液扩散半径随注浆压力变化曲线

Fig. 8 Variation curve of grout diffusion radius with grouting pressure

由表 1 可知, 理论分析上限最大误差为 14.5%, 浆液扩散下限最大误差为 13.2%; 数值模拟上限最大误差为 15.9%, 浆液扩散下限最大误差为 9.3%, 计算结果均在误差允许范围内, 说明推导的理论公式和建立的数值模型均能较好的描述幂律流体在脉动压力下的扩散过程及不均匀分布; 随着注浆压力的增大, 理论分析和数值模拟上限误差均随注浆压力的增大而变大, 说明注浆压力是影响浆液最大扩散半径的主要因素。

分析理论计算、数值模拟与模型试验之间存在误差的原因: ①理论推导、数值模拟在计算时, 浆液注浆压力均为脉动泵输出压力, 而模拟试验预设的注浆压力在达到注浆孔底时存在沿程损失, 两者之间有一定的差异; ②当注浆从脉动持续段进入脉动间隔段时, 理论推导与数值模拟均按注浆压力消散至零处理, 而试验过程中由于残余注浆压力的存在, 该过程仍存在一定的注浆压力; ③理论推导、数值模拟在计算过程中均忽略了浆液滤过效应、浆液黏度时变性等影响, 而模拟试验中浆液在脉动注浆过程中会不断析水, 浆液浓度和颗粒分布以及水化反应等均会不断变化, 进而影响浆液的扩散分布; ④理论计算在采用区间法计算时, 存在一定的区间扩张误差; 而数值模拟采用的孔隙率随机均质分布也与实际地层孔隙率的分布存在一定差异; ⑤模型试验存在一定的边界影响和尺寸效应, 且浆液扩散是一个十分复杂的过程, 它与试验环

境、试验人员操作等众多因素相关。

5 讨 论

(1) 本文在理论推导和数值模拟过程中均未考虑浆液黏度时变性的影响, 这也是导致理论计算和数值模拟与模型试验存在差异的主要原因, 后续可对该问题进行深入探讨。但值得注意的是, 现有黏度测试设备只能实现浆液在自然环境下表观黏度随时间变化的测量, 无法实现注浆压力为主推力浆液滤水过程的黏度时变性测量, 尤其是脉动注浆这种存在明显高、低压力差重复性作用下的浆液黏度时变性。因此, 如何开发适用于注浆浆液流变特性测量的仪器设备及测试方法, 对于浆液扩散理论与数值模拟的研究具有十分重要的现实意义。

(2) 在脉动注浆过程中, 浆液在脉动压力作用下渗透扩散, 充填地层孔隙进而改变地层物性参数(孔隙率、弹性模量、泊松比等), 而脉动周期性叠加压力的作用又会在一定程度上改变土体颗粒的排布间距或方式, 即实际脉动注浆过程中地层的物性参数会随脉动注浆压力的变化而动态变化, 而地层物性参数的变化反过来又会改变浆液的渗透过程。因此, 有必要研究脉动压力作用下地层物性参数的动态变化及浆液扩散过程的影响。

(3) 常见的幂律流体(纯水泥浆水灰比为 0.5~0.7 或黏土掺量>30%的黏土水泥浆)流动度相对较小, 前期脉动周期内注入的浆液会滤水沉积及絮凝固, 进而会对后期脉动周期内注入的浆液形成一定的阻碍作用, 迫使浆液仅能在一定范围内重复性扩散, 从而在一定范围内可获得强度更高、更密实的加固体。当然, 如何通过调节脉动施工参数来实现可控性注浆, 达到最优的加固效果仍需要深入研究。

(4) 根据已有研究表明^[26-27], 幂律流体流变指数对浆液的扩散影响较大。在本文研究过程中笔者发现, 对于 $m>1$ 的幂律流体浆液扩散范围受脉动压力所产生的影响较明显, 即相同的 m 值下脉动压力大小或脉动频率的改变能显著影响浆液的扩散范围, 而这种影响对于 $m<1$ 的幂律流体则较小。分析原因为, 当 $m>1$ 时, 幂律流体表现出明显的剪切稠化特征, 浆液具有较大的表观黏度和流动阻力, 故在脉动持续段扩散或脉动絮凝段沉积均表现的更显著, 脉动压力的可控性得到体现; 而当 $m<1$ 时, 浆液表观黏度相对较低, 浆液较稀, 易于流动, 故受脉动压力的影响也就相对较小。当然, 如何细化流变参数与脉动施工参数之间的关系, 并通过调节脉动施工参数来实现可控性注浆, 尚需要进一步深入研究。

6 结 论

(1) 基于周期性脉动注浆压力在单次脉动过程中持续段流量恒定, 而压力间隔段流量为零的特点, 考虑地层参数的不确定性, 建立了幂律流体脉动注浆持续段渗透扩散模型和幂律流体脉动间隔段絮凝沉积模型, 并结合区间理论, 推导了脉动压力下幂律流体渗透扩散区间方程, 给出了公式中各参数的求解方法及适用范围, 可为脉动工程设计和施工提供一定理论指导。

(2) 根据脉动泵工作压力输出原理及现场注浆流程, 设计了一套试验室脉动注浆模拟试验装置, 实现了幂律流体脉动渗透注浆的模拟, 得到了不同脉动施工参数下幂律流体的渗透扩散形态。分析不同工况下的浆液扩散形态, 表明浆液向四周扩散的范围并非一致, 而是表现出一定的差异性, 存在明显的浆液扩散半径上下限, 且分布形态受脉动施工参数的影响明显。因此, 实际脉动注浆工程应考虑浆液扩散半径的区间分布, 且可通过调节脉动施工参数获得合理的浆液扩散分布区间。

(3) 通过在多物理场耦合软件 COMSOL Multiphysics 中预定义地层孔隙率随机分布函数和脉动压力周期函数, 并考虑幂律流体的浆液黏度时变性, 实现了幂律流体非均质地层内脉动渗透注浆过程的数值模拟。该方法的提出为不同脉动施工参数、地层条件以及注浆材料下浆液渗透扩散规律及扩散机制的研究提供了新思路。

(4) 理论分析、数值模拟与模型试验所得浆液扩散半径上下限随注浆压力的变化趋势一致; 试验测得的浆液扩散半径上下限与理论、数值模拟计算的浆液扩散半径上下限差异随脉动注浆压力的增大而变大, 但其数值差异均在可接受范围内。应用所推导的理论公式与建立的数值计算模型均能较好地描述幂律流体脉动压力下的浆液扩散过程及浆液区间分布范围。

参 考 文 献:

- [1] 杨米加, 陈明雄, 贺永年. 注浆理论的研究现状及发展方向[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(6): 839 - 841. (YANG Mi-jia, CHEN Ming-xiong, HE Yong-nian. The development trend and research present condition of grouting theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(6): 839 - 841. (in Chinese))
- [2] 汪 磊, 李 涛. 基于牛顿流体的海底隧道穿越裂隙岩体注浆扩散半径计算[J]. 土工基础, 2012(5): 51 - 53. (WANG Lei, LI Tao. Application of newton fluid theory to estimate effective radius of grout zone for tunneling through fractured rock under sea[J]. Soil Engineering and Foundation, 2012(5): 51 - 53. (in Chinese))
- [3] 杨志全, 侯克鹏, 梁 维, 等. 牛顿流体柱-半球面渗透注浆形式扩散参数的研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 2): 17 - 24. (YANG Zhi-quan, HOU Ke-peng, LIANG Wei, et al. Study of diffusion parameters of Newtonian fluid based on column-hemispherical penetration grouting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(增刊 2): 17 - 24. (in Chinese))
- [4] 杨秀竹, 王星华, 雷金山. 宾汉体浆液扩散半径的研究及应用[J]. 水利学报, 2004(6): 75 - 79. (YANG Xiu-zhu, WANG Xing-hua, LEI Jin-shan. Study on grouting diffusion radius of Bingham fluids[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(6): 75 - 79. (in Chinese))
- [5] 杨志全, 侯克鹏, 郭婷婷, 等. 黏度时变性宾汉体浆液的柱-半球形渗透注浆机制研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2697 - 2703. (YANG Zhi-quan, HOU Ke-peng, GUO Ting-ting, et al. Study of column-hemispherical penetration grouting mechanism based on Bingham fluid of time-dependent behavior of viscosity[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2697 - 2703. (in Chinese))
- [6] 王晓玲, 王青松, 周正印, 等. 南水北调工程采空区三维宾汉流体紊流模拟[J]. 水利学报, 2013(11): 1295 - 1302. (WANG Xiao-ling, WANG Qing-song, ZHOU Zheng-yin, et al. Three-dimensional turbulent numerical simulation of Bingham fluid in the goalf grouting of the South-to-North Water Transfer Project[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013(11): 1295 - 1302. (in Chinese))
- [7] 汪 磊, 李 涛. 基于宾汉流体的海底隧道穿越裂隙岩体注浆扩散半径计算[J]. 铁道标准设计, 2013(6): 96 - 100. (WANG Lei, LI Tao. Calculation of grouting diffusion radius for submarine tunnel passing through fractured rock mass based on bingham fluid[J]. Rail Way Standard Design, 2013(6): 96 - 100. (in Chinese))
- [8] 杨秀竹, 雷金山, 夏力农, 等. 幂律型浆液扩散半径研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 112 - 115. (YANG Xiu-zhu, LEI Jin-shan, XIA Li-nong, et al. Study on grouting diffusion radius of exponential fluids[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(11): 112 - 115. (in Chinese))
- [9] 杨志全, 牛向东, 侯克鹏, 等. 幂律型流体柱形渗透注浆机制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016(3): 178 - 183. (YANG Zhi-quan, NIU Xiang-dong, HOU Ke-peng, et al. Column penetration grouting mechanism researches based on Power-law fluid[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016(3): 178 - 183. (in Chinese))
- [10] 叶 飞, 陈 治, 贾 涛, 等. 盾构隧道管片注浆幂律流型浆液渗透扩散模型[J]. 岩土工程学报, 2016(5): 890 - 897. (YE Fei, CHEN Zhi, JIA Tao, et al. Penetration diffusion model of exponential fluid for backfill grouting

- through segments of shield tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016(5): 890 - 897. (in Chinese))
- [11] 徐兴华, 尚岳全, 王迎超. 基于多重属性区间数决策模型的边坡整体稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010(9): 1840 - 1849. (XU Xing-hua, SHANG Yue-quan, WANG Ying-chao. Global stability analysis of slope based on decision making model of multi-attribute and interval number[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010(9): 1840 - 1849. (in Chinese))
- [12] 胡谢飞, 陈征宙, 张明瑞, 等. 基于区间有限元方法的边坡稳定性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2013(4): 405 - 411. (HU Xie-fei, CHEN Zheng-zhou, ZHANG Ming-rui, et al. Slope Stability analysis based on interval finite element method[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013(4): 405 - 411. (in Chinese))
- [13] 曹文贵, 张永杰. 基于区间组合法的边坡稳定非概率模糊可靠性分析方法[J]. 土木工程学报, 2007(11): 64 - 69. (CAO Wen-gui, ZHANG Yong-jie. Non-probabilistic fuzzy reliability analysis of slope stability based on interval interconnection method[J]. China Civil Engineering Journal, 2007(11): 64 - 69. (in Chinese))
- [14] 赵明华, 蒋冲, 曹文贵. 基于区间理论的挡土墙稳定性非概率可靠性分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 20(4): 467 - 472. (ZHAO Ming-hua, JIANG Chong, CAO Wen-gui. Non-probabilistic reliability analysis of retaining walls based on interval theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 20(4): 467 - 472. (in Chinese))
- [15] 王继承, 苏永华, 何满潮. 区间分析方法在深部岩体工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 37 - 42. (WANG Ji-cheng, SU Yong-hua, HE Man-chao. Application of interval analysis methods to surrounding rock stability of deep roadway engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 37 - 42. (in Chinese))
- [16] 张永杰, 曹文贵, 赵明华, 等. 岩溶区公路路基稳定性的区间模糊评判分析方法[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 38 - 44. (ZHANG Yong-jie, CAO Wen-gui, ZHAO Ming-hua, et al. Interval fuzzy judgment method for roadbed stability in karst area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(1): 38 - 44. (in Chinese))
- [17] 朱大同. 关于 Dupuit 公式和 Forchheimer 公式的讨论[J]. 水力学报, 2012(4): 502 - 504. (ZHU Da-tong. Discussion on Dupuit formula and Forchheimer formula[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012(4): 502 - 504. (in Chinese))
- [18] HERZIG J P, LECLERC D M, GOFF P L. Flow of suspensions through porous media—application to deep filtration[J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1970, 62(5): 8 - 35.
- [19] 王德人, 张连生, 邓乃扬, 等. 非线性方程的区间算法[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1986: 10 - 11. (WANG De-ren, ZHANG Lian-sheng, DENG Nai-yang, et al. Interval algorithm for nonlinear equations[M]. Shanghai: Shanghai science and Technology Press, 1986: 10 - 11. (in Chinese))
- [20] 曾祥熹. 泥浆流变学与黏度测量[M]. 湖南: 湖南地质学会, 1981. (ZENG Xiang-xi. Mud rheology and viscosity measurement[M]. Hunan: Central-South Institute of Mining and Metallurgy, 1981. (in Chinese))
- [21] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010: 50 - 53. (KONG Xiang-yan. Advanced mechanics of fluids in porous media[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2010: 50 - 53. (in Chinese))
- [22] GB/T50123 — 1999 土工试验方法标准 [S]. 1999. (GB/T50123—1999 Geotextile test method standard[S]. 1999. (in Chinese))
- [23] 雷进生, 刘非, 王乾峰, 等. 非均质土层的注浆扩散特性与加固力学行为研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(12): 2245 - 2253. (LEI Jin-sheng, LIU Fei, WANG Qian-feng, et al. Diffusion characteristics and reinforcement mechanics of grouting in non-homogeneous soil strata[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(12): 2245 - 2253. (in Chinese))
- [24] 李慎举, 王连国, 陆银龙, 等. 破碎围岩锚注加固浆液扩散规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(6): 874 - 880. (LI Shen-ju, WANG Lian-guo, LU Yin-long, et al. Slurry diffusion within cracked wall rock during the bolt-grouting process[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(6): 874 - 880. (in Chinese))
- [25] HUANG Y, WANG L, ZHANG J. Reinforcement mechanism and slurry diffusion law of deep-shallow coupled fully bolting-grouting in deep broken roadway[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 19: 6319 - 6330.
- [26] 章敏, 王星华, 汪优. Herschel-Bulkley 浆液在裂隙中的扩散规律研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 815 - 820. (ZHANG Min, WANG Xing-hua, WANG You. Diffusion of Herschel-Bulkley slurry in fractures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(5): 815 - 820. (in Chinese))
- [27] 周子龙, 杜雪明, 陈钊, 等. 基于 Navier-Stokes 方程幂律型浆液扩散压力[J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2017(7): 1824 - 1830. (ZHOU Zi-long, DU Xue-ming, CHEN Zhao, et al. Grouting pressure of exponential fluids based on Navier-Stokes equation[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017(7): 1824 - 1830. (in Chinese))