DOI：10.16285/j.rsm.2017.02.018

考虑浆液黏度时空变化的速凝浆液渗透注浆扩散机制研究

张连震，张庆松，刘人太，李术才，王洪波，李 卫，张世杰，朱光轩

（山东大学 岩土与结构工程研究中心，山东 济南 250061）

摘 要：速凝类浆液的黏度时变性及双液注浆方式导致浆液黏度空间分布不均匀，在渗透注浆理论模型中应当考虑浆液黏度空间分布不均匀性的影响。基于黏度时变性宾汉流体本构模型，引入了描述渗流过程的均匀毛管组模型，建立了恒定注浆速率条件下考虑浆液黏度时空变化的一维渗透注浆扩散模型。设计了一维可视化渗透注浆扩散模拟试验系统，获得了不同介质渗透率及不同注浆速率条件下水泥-水玻璃浆液（C-S）注浆压力随时间变化规律。研究结果表明：考虑浆液黏度空间分布不均匀性时，孔口注浆终压计算值为试验值的 1.2～1.4 倍，浆液扩散距离计算值为试验测量值的 0.9～1.1 倍，计算值与试验值的误差在可接受范围内，所创建的理论模型可较好地描述速凝浆液一维渗透注浆扩散过程。不考虑浆液黏度空间分布不均匀性时，孔口注浆终压计算值为试验值的 3.5～4.1 倍，浆液扩散距离计算值为试验测量值的 0.5～0.7 倍，显著高估了注浆压力、低估了浆液扩散范围。因此，在注浆设计中应充分考虑速凝浆液黏度空间分布不均匀性。

关 键 词：渗透注浆；速凝浆液；黏度时变性；黏度空间分布不均匀；模拟试验

中图分类号：TU 457 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2017) 02－0443－10

Penetration grouting mechanism of quick setting slurry considering spatiotemporal variation of viscosity

ZHANG Lian-zhen, ZHANG Qing-song, LIU Ren-tai, LI Shu-cai,
WANG Hong-bo, LI Wei, ZHANG Shi-jie, ZHU Guang-xuan

(Research Center of Geotechnical and Structural Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China)

Abstract: Time-dependent behavior of viscosity of quick setting slurry and double liquid grouting mode lead to spatial uneven distribution of viscosity in diffusion region. The influence of spatial uneven distribution of viscosity should be considered in permeation grouting diffusion model of quick setting slurry. By regarding quick setting slurry as a Bingham liquid of time-dependent behaviour, an even capillary group model is used to describe porous flow process. A theoretical model of one-dimensional permeation grouting is developed under constant grouting rate. A visual permeation grouting simulation test system is designed to obtain the permeation rates of different media and the relationship between grouting pressure and grouting time for cement-sodium silicate (C-S) slurry. Results show that: when the spatial uneven distribution of viscosity is considered, the calculated value of grouting pressure is 1.2-1.4 times the test value and the calculated value of grouting distance is 0.9-1.1 times the test value. The theoretical and experimental results are in good agreement. The proposed model can well describe the process of one-dimensional permeation grouting of quick setting slurry. When the spatial uneven distribution of viscosity is not considered, the calculated value of grouting pressure is 3.5-4.1 times the test value and the calculated value of grouting distance is 0.5-0.7 times the test value. So the grouting pressure is overestimated significantly and the grouting distance is underestimated. The spatial uneven distribution of viscosity should be considered carefully in grouting design.

Keywords: permeation grouting; quick setting slurry; time-dependent behavior of viscosity; spatial uneven distribution of viscosity; simulation test

收稿日期：2016-04-25
基金项目：国家重点研发计划（No. 2016YFC0801600）；国家自然科学基金（No. 41272385）；国家自然科学青年基金（No. 51309146）。
This work was supported by the National Key Research and Development Project (2016YFC0801600), the National Natural Science Foundation of China (41272385) and the National Science Foundation for Young Scientists of China (51309146).
第一作者简介：张连震，男，1990 年生，博士研究生，主要从事地下工程水灾害治理理论及工程应用方面的研究工作。E-mail：zlzhcx@163.com
通讯作者：刘人太，男，1984 年生，博士，讲师，主要从事地下工程水灾害治理理论及工程应用方面的研究工作。E-mail：rentailiu@163.com

1 引 言

在砾石层、粗砂等地层注浆加固工程中，由于被注地层颗粒间隙较大，浆液多以渗透形式进行扩散[1]。速凝类浆液[2−4]凝胶时间较短，从几十秒到几分钟不等，在渗透注浆工程中应用速凝类浆液可有效控制浆液扩散范围，减少浆液浪费，显著提高注浆效果。速凝类浆液的双液混合注浆方式及其黏度时变特性，导致浆液扩散区内黏度空间分布不均匀[5]。

目前，在时变性浆液扩散理论方面，阮文军[6−7]建立了基于浆液黏度时变性的裂隙岩体注浆扩散模型；李术才等[3]测定了水泥−水玻璃浆液的表观黏度时变函数，并推导了速凝浆液的单一平板裂隙注浆压力空间分布方程，分析了注浆过程中压力场变化规律；杨志全等[8]建立了考虑时变性的宾汉姆流体的流变方程与渗流运动方程，建立了相应的球形及柱形渗透扩散模型；叶飞等[9−10]基于黏度时变性牛顿流体本构模型，建立了盾构隧道壁后注浆球面渗透扩散模型；刘健等[11]考虑了浆液黏度时变性，基于毛细管渗透理论推导了浆液扩散公式，得到了注浆作用在管片上的压力计算公式，并对比分析了考虑和不考虑黏度时变性时浆液对管片的压力差异。

上述理论考虑了注浆过程中的浆液黏度时变性，但未考虑浆液黏度空间分布不均匀性，均认为不同位置的浆液黏度随时间同步变化，若用其进行速凝类浆液的注浆设计，则会过高估计浆液扩散阻力，导致注浆压力计算值明显偏高，浆液扩散距离计算值偏小。张庆松等[5]考虑速凝类浆液黏度空间分布不均匀性，建立了相应的裂隙注浆理论模型，并将理论计算结果与试验、数值计算结果进行了对比验证，但该理论不适用于渗透注浆过程。

目前对于速凝类浆液渗透注浆模型的研究尚没有考虑浆液黏度空间分布不均匀性对浆液扩散过程的影响。为解决上述问题，本文基于黏度时变性宾汉流体本构模型，并引入了描述渗流过程的均匀毛管组模型，建立了恒定注浆速率条件下考虑浆液黏度空间不均匀性的一维渗透注浆扩散模型，最终获得速凝类浆液注浆压力与注浆时间、浆液扩散距离的关系。设计了一维可视化渗透注浆扩散模拟试验系统，并以水泥−水玻璃浆液（C-S 浆液）作为典型速凝类浆液进行了注浆扩散试验，获得了不同介质渗透率及不同注浆速率条件下 C-S 浆液注浆压力随浆液扩散距离的增长规律，并对比分析理论与试验结果以验证理论模型的正确性。

2 速凝浆液一维渗透注浆理论模型

2.1 渗透注浆模型假设条件

（1）浆液、水均为不可压缩、且为均质各向同性的流体。

（2）浆液为具有黏度时变性的宾汉流体[12]，且在注浆过程中流型不变。

$$\tau = \tau_0 + \mu(t)\dot{\gamma} \tag{1}$$

式中：τ_0 为浆液初始屈服应力；$\mu(t)$ 为浆液黏度时间函数；$\dot{\gamma}$ 为浆液剪切速率（$\dot{\gamma} = -\mathrm{d}v/\mathrm{d}h$），$h$ 为垂直于浆液流动方向的几何距离，v 为渗流速度。

对于水泥基类浆液，浆液中水泥颗粒之间的相互作用力会导致浆液流动存在初始屈服应力[7]。对于速凝的水泥基类浆液，浆液内部不仅存在颗粒与颗粒之间的作用，还存在凝胶反应导致的内部黏接力，此时初始屈服应力对于浆液扩散过程的影响相比非速凝类浆液更显著[3]。所以，本文采用宾汉流体本构模型，且考虑了浆液黏度时变性。

（3）注浆流量恒定，浆液流动为层流运动。

（4）浆液扩散方式为完全驱替扩散，不考虑浆水相界面处水对浆液的稀释作用。

（5）被注介质孔隙尺寸较大，忽略渗滤效应对浆液扩散的影响。

2.2 浆液黏度空间分布方程

在速凝浆液一维渗透注浆过程中，浆液由一端进入被注介质后开始发生化学反应，浆液黏度开始增长，不同位置处浆液反应时间不同，浆液黏度空间分布曲线如图 1 所示，浆液扩散锋面附近的位置浆液反应时间长，浆液黏度值较高。

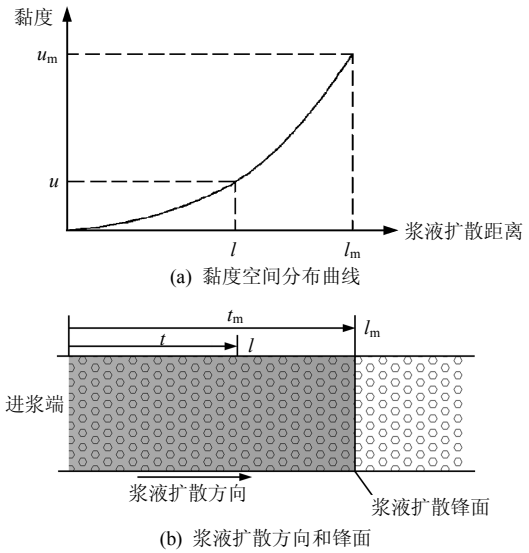


图 1 浆液黏度空间分布示意图

Fig.1 Spatial distribution of slurry viscosity

取某一浆液质点作为研究对象，该浆液质点不断向前移动，由注浆孔到达某一位置 l 所用的时间 t 即为该浆液质点的黏度增长时间。在该时间段内由注浆孔进入被注介质的浆液量与该浆液质点黏度增长时间有如下关系：

$$qt = \varphi Sl \tag{2}$$

式中：q 为注浆流量；t 为浆液黏度增长时间；φ 为被注介质孔隙率；l 为浆液扩散距离；S 为浆液扩散断面面积。

对上式进行变形可得浆液黏度增长时间的空间分布方程为

$$t = \frac{\varphi Sl}{q} \tag{3}$$

由式（3）可知，由于注浆流量 q 保持恒定，所以浆液黏度增长时间只与浆液扩散距离 l 有关，在一维扩散条件下，浆液黏度增长时间与注浆扩散距离线性正相关。若浆液扩散形式为球形或柱形扩散形式，则浆液黏度增长时间在空间上与扩散距离呈非线性关系。该公式描述的是浆液扩散范围内的浆液黏度增长情况，所以浆液扩散距离需满足条件 $l \leqslant l_{\mathrm{m}}$，即浆液扩散距离小于 t_{m} 时刻的浆液扩散锋面位置，而浆液扩散锋面位置 l_{m} 满足公式：

$$l_{\mathrm{m}} = \frac{qt_{\mathrm{m}}}{\varphi S} \tag{4}$$

式中：t_{m} 为注浆时间；l_{m} 为最大浆液扩散距离。

注浆时间为 t_{m} 时，l 处所对应的浆液质点黏度可表示为

$$\mu(l,t_{\mathrm{m}}) = \mu(t) \tag{5}$$

联立公式（3）～（5）可获得浆液扩散区内的浆液黏度时空分布方程为

$$\mu(l,t_{\mathrm{m}}) = \mu\left(\frac{\varphi Sl}{q}\right),\ l \leqslant \frac{qt_{\mathrm{m}}}{\varphi S} \tag{6}$$

上述浆液黏度空间分布方程由于采用了恒定注浆流量的边界条件，导致了在空间中某一固定位置 l 处所对应的浆液质点由注浆孔处到达该位置所需要的时间是确定不变的，而浆液质点由注浆孔处到达该位置所需要的时间就是浆液黏度增长时间 $t = \varphi Sl/q$，也就是说该固定位置处所对应的浆液质点黏度增长时间 t 是确定不变的，进而导致了该固定位置处的浆液黏度值是确定不变的。t 只随 l 变化，不随注浆时间的增加而增加，即 $t = t(l)$，所以 $\mu(l,t_{\mathrm{m}}) = \mu(t) = \mu(t(l)) = \mu(\varphi Sl/q)$。若将恒定注浆流量边界条件更换为可变流量边界条件，则对应空间中某一特定位置 l，浆液由注浆孔到达该位置所需要的时间是变化的，即该固定位置处所对应的浆液质点黏度增长时间 t 是变化的，t 不仅随 l 变化，也随着注浆时间的增加而不断变化，即 $t = t(l,t_{\mathrm{m}})$，此时的浆液黏度空间分布方程变为 $\mu(l,t_{\mathrm{m}}) = \mu(t) = \mu(t(l,t_{\mathrm{m}}))$，浆液黏度的空间分布不仅与空间相关，也与时间相关。

2.3　浆液扩散运动方程

均匀毛管组模型将被注介质等效为由直径相同的毛细管排列而成的多孔介质，将渗流等效为流体在所有渗流管道中流动的叠加[13]。本文引入均匀毛管组模型，首先推导单个渗流管道内的浆液扩散运动方程，通过渗流管道中心取剖面（见图 2），以管道中心为对称轴取浆液微元体进行受力分析。

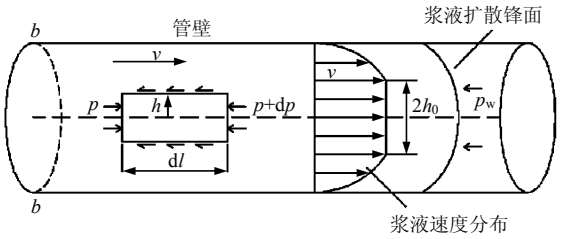


图 2　渗流管道内浆液流动受力分析

Fig.2　Force analysis of slurry in seepage pipe

任意微元体受力平衡方程为

$$2\pi h\tau \mathrm{d}l + \pi h^2 \mathrm{d}p = 0 \tag{7}$$

式中：τ 为浆液剪切应力；$\mathrm{d}l$ 为微元体长度；p 为浆液压力；$\mathrm{d}p$ 为浆液压力增量；h 为微元体半径。

进而得到剪应力分布为

$$\tau = -\frac{h}{2}\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}l} \tag{8}$$

式中：$-\mathrm{d}p/\mathrm{d}l$ 为浆液压力梯度。

当 $\tau \leqslant \tau_0$ 时，浆液流动存在中心留核区，将 $\tau \leqslant \tau_0$ 代入式（8）得中心留核区范围为

$$h \leqslant h_0 = -2\tau_0\left(\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}l}\right)^{-1} \tag{9}$$

式中：τ_0 为浆液屈服剪切力；h_0 为留核区半径，留核区半径需满足 $h_0 \leqslant b$，b 为渗流通道半径。将 $h_0 \leqslant b$ 代入式（9）得

$$-\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}l} \geqslant \frac{2\tau_0}{b} \tag{10}$$

上式表明，宾汉体浆液由于屈服剪切力的存在，浆液运动存在启动压力梯度，启动压力梯度 $\lambda = 2\tau_0/b$。

将式（1）、（6）代入式（8）得

$$\tau=\tau_0+\mu(l,t_{\mathrm{m}})\left(-\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}h}\right)=-\frac{h}{2}\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}l} \tag{11}$$

化简得

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}h}=\frac{1}{\mu(l,t_{\mathrm{m}})}\left(\frac{h}{2}\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}l}+\tau_0\right) \tag{12}$$

当 $h_0\leqslant h\leqslant b$ 时，代入边界条件 $h=b$ 时，$v=0$；当 $h\leqslant h_0$ 时，$v=v(h=h_0)$，得渗流管道内浆液速度分布为

$$v=\begin{cases}\dfrac{1}{\mu(l,t_{\mathrm{m}})}\left[-\dfrac{b^2-h^2}{4}\dfrac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}l}-\tau_0(b-h)\right] \\ (h_0\leqslant h\leqslant b) \\ \dfrac{1}{\mu(l,t_{\mathrm{m}})}\left[-\dfrac{b^2-h_0^2}{4}\dfrac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}l}-\tau_0(b-h_0)\right] \\ (h\leqslant h_0)\end{cases} \tag{13}$$

浆液流速在渗流管道内的分布呈截头抛物面分布，浆液在渗流管道中的平均流速可通过下式获得：

$$\overline{v}=\left(1/\pi b^2\right)\int_0^b 2\pi hv\mathrm{d}h=\frac{b^2}{8}\frac{1}{\mu(l,t_{\mathrm{m}})}\left[-\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}l}-\frac{4}{3}\lambda-\frac{\lambda^4}{3\left(\mathrm{d}p/\mathrm{d}l\right)^3}\right] \tag{14}$$

在实际注浆过程中，$-\mathrm{d}p/\mathrm{d}l$ 远大于启动压力梯度 λ [14]，忽略上式中的高阶小项并代入 $\lambda=2\tau_0/b$，并代入式（14），可得渗流管道内浆液扩散运动方程为

$$\overline{v}=\frac{b^2}{8}\frac{1}{\mu\left(\dfrac{\varphi Sl}{q}\right)}\left(-\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}l}-\frac{8}{3}\frac{\tau_0}{b}\right),\ l\leqslant\frac{qt_{\mathrm{m}}}{\varphi S} \tag{15}$$

2.4 压力时空分布方程

被注介质内任一点的渗流速度 v 与该点处渗流管道平均流速及被注介质孔隙率满足：

$$v=\varphi\overline{v} \tag{16}$$

被注介质的渗透率 k 与渗流通道半径 b 满足[13]：

$$k=\varphi b^2/8 \tag{17}$$

在一维恒定注浆速率条件下，浆液流速也维持恒定，且满足：

$$q=Sv \tag{18}$$

式中：v 为扩散距离 l 处的渗流速度。

联立式（15）～（18）得浆液扩散区内压力梯度为

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}l}=-\frac{q}{Sk}\mu\left(\frac{\varphi Sl}{q}\right)-\frac{2\tau_0}{3}\sqrt{\frac{2\varphi}{k}},\ l<\frac{qt_{\mathrm{m}}}{\varphi S} \tag{19}$$

浆液扩散区外的压力衰减远小于浆液扩散区内的压力衰减[15−16]，可认为浆−水界面处的浆液压力等于静水压力 $p=p_{\mathrm{w}}$，并将其作为边界条件代入式（19）积分，得被注介质内压力时空分布方程为

$$p(l,t_{\mathrm{m}})=\int_l^{\frac{qt_{\mathrm{m}}}{\varphi S}}\left[\frac{q}{Sk}\mu\left(\frac{\varphi Sl}{q}\right)+\frac{2\tau_0}{3}\sqrt{\frac{2\varphi}{k}}\right]\mathrm{d}l+p_{\mathrm{w}},\quad l\leqslant\frac{qt_{\mathrm{m}}}{\varphi S} \tag{20}$$

式中：k为被注介质渗透率；p_{w} 为静水压力。

令 $l=0$，得注浆压力 $p_{\mathrm{c}}=p(0,t_{\mathrm{m}})$，代入式（20）得注浆压力与注浆时间的关系为

$$p_{\mathrm{c}}=\int_0^{\frac{qt_{\mathrm{m}}}{\varphi S}}\left[\frac{q}{Sk}\mu\left(\frac{\varphi Sl}{q}\right)+\frac{2\tau_0}{3}\sqrt{\frac{2\varphi}{k}}\right]\mathrm{d}l+p_{\mathrm{w}} \tag{21}$$

式中：p_{c} 为注浆压力。

将 $l_{\mathrm{m}}=qt_{\mathrm{m}}/\varphi S$ 代入式（21）得注浆压力与浆液扩散距离的关系为

$$p_{\mathrm{c}}=\int_0^{l_{\mathrm{m}}}\left[\frac{q}{Sk}\mu\left(\frac{\varphi Sl}{q}\right)+\frac{2\tau_0}{3}\sqrt{\frac{2\varphi}{k}}\right]\mathrm{d}l+p_{\mathrm{w}} \tag{22}$$

对于球形及柱形注浆扩散形式，运用本文理论模型，通过变换不同坐标系可推导相应的球形及柱形注浆扩散模型。因为本文注浆试验采用一维模型，故在此只列出一维注浆扩散理论模型，对于球形及柱形渗透注浆扩散的理论公式推导此处从略。

3 C-S 浆液一维渗透注浆模拟试验

3.1 试验装置

为研究速凝类浆液在不同注浆速率、不同被注介质条件下的注浆扩散规律，设计了一套一维可视化渗透注浆扩散模拟试验装置。试验装置原理及实物照片如图 3、4 所示，试验装置由渗透注浆管、试验支架、手动注浆泵、注浆记录仪等部分构成。

（1）渗透注浆管

为实现浆液扩散过程的可视化，渗透注浆管采用透明有机玻璃管制作，竖直方向布置，渗透注浆管长度为 2 m，内径为 10 cm，渗透注浆管内充填河沙作为被注介质，注浆过程中浆液由渗透注浆管底部进入并向另一侧单向扩散，为保证注浆过程中河沙颗粒不因注浆扩散而发生整体移动，在渗透注浆

管上下两端设有紧固装置，紧固装置允许浆液进出，但不允许河沙颗粒穿过，从而固定被注介质。

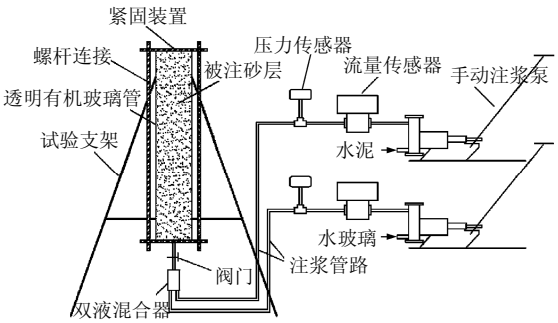


图 3　试验装置原理示意图
Fig.3　Schematic diagram of test system



图 4　一维渗透注浆模拟试验系统
Fig.4　Simulation test system for one-dimensional permeation grouting

（2）手动注浆泵

手动注浆泵流量范围为 0～10 L/min，可控注浆压力范围为 0～10 MPa。所采用的手动注浆泵为活塞往复式注浆泵，在活塞向前、向后的两个运动过程中均可以泵出浆液，不同于传统注浆泵活塞只能在一个运动过程中泵送浆液的动力过程，所以注浆过程中压力波动较小，不会对注浆过程产生较大影响。

（3）注浆记录仪

在注浆管路上设置注浆记录仪（见图 5）动态监测注浆过程中的注浆压力及注浆速率。流量传感器量程为 0～30 L/min，测量精度为总量程的 1%；压力传感器量程为 0～10 MPa，测量精度为 20 kPa。



(a) 数据接收仪　　(b) 压力传感器　　(c) 流量传感器

图 5　注浆记录仪实物图
Fig.5　Photos of grouting recorder

（4）双液混合器

由于 C-S 浆液采用双液混合注浆工艺，本试验设置两套独立的注浆系统进行注浆，水泥浆液与水玻璃分别通过各自的注浆管路输送，之后在双液混合器处混合并最终进入渗透注浆管。

3.2　注浆材料及其黏度时变性测试

C-S 浆液为双液注浆材料，由水泥浆液和水玻璃组成，该浆液凝胶时间可在几十秒至几分钟内调节，属于速凝类浆液。试验用水泥为 32.5R 普通硅酸盐水泥，水泥品质符合《通用硅酸盐水泥》标准[17]；水玻璃模数 $M=3.0$，浓度 B_e=38；水泥浆液水灰比为 1:1，C-S 双液体积比为 1:1。

采用 SV−100 振弦式黏度计[4]（见图 6）测试 C-S 浆液在试验温度条件下的表观黏度时变性，由于温度对 C-S 浆液黏度时变性影响显著，黏度测试过程中需保证浆液温度与注浆试验时的环境温度保持一致，试验测试温度为 4 ℃，测试总时间为 120 s。

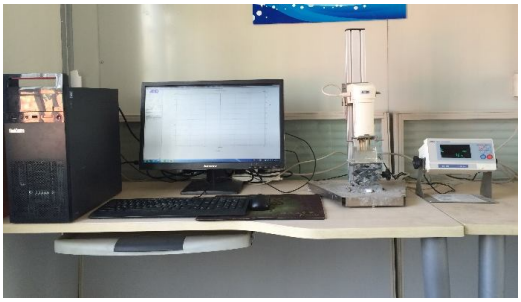


图 6　SV−100 振弦式黏度计
Fig.6　SV-100 vibrating type viscometer

C-S 浆液黏度与温度变化曲线如图 7 所示。

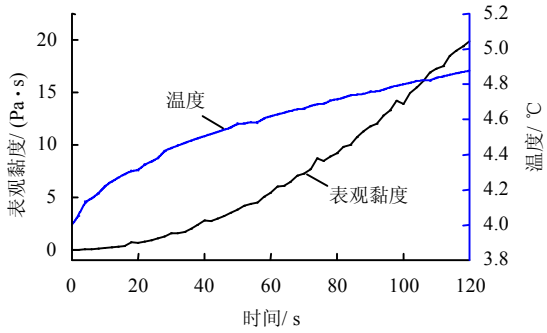


图 7　C-S 浆液的表观黏度与温度随时间的变化曲线
Fig.7　Variations of apparent viscosity and tempreture of C-S slurry with time

C-S 浆液混合后浆液黏度与温度即开始增长，在整个测试时间范围内浆液温度虽有一定增长，但最终温度变化量小于 1 ℃，可认为浆液反应过程中浆液温度基本不变。浆液反应初期黏度增长较慢，

随着反应过程的不断进行，浆液黏度增长速度加快，其变化曲线基本符合幂函数特征，采用幂函数形式 $At^B + C$ 对黏度时变曲线进行拟合，拟合结果为

$$\mu_B(t) = 0.002\,08t^{1.92} + 0.01 \quad (23)$$

式中：$\mu_B(t)$ 为浆液表观黏度。

该公式适用条件为：①测试温度为 4～5℃；②水泥-水玻璃浆液：水泥浆液水灰比为 1:1，C-S 双液体积比为 1:1。

3.3 试验方案

选取 3 种不同孔隙率和粒径级配的河砂作为被注介质，在注浆试验中被注介质处于无水环境中。3 种被注介质物理力学参数如表 1 所示。

表 1 被注介质物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of grouted media

被注介质编号	粒径范围 / mm	孔隙率φ / %	渗透率 k/m^2
1	0.5～1.0	36.4	2.218×10^{-9}
2	1.0～2.0	37.4	5.857×10^{-9}
3	2.0～5.0	38.5	1.512×10^{-8}

试验过程中控制注浆速率恒定，设置 3 种注浆速率分别为 3、4、5 L/min。根据不同介质渗透率及不同注浆速率设置 5 种工况（见表 2）。

表 2 试验工况

Table 2 Test conditions

工况编号	注浆速率 / (L/min)	被注介质渗透率 / (m^2)
1	3	5.857×10^{-9}
2	4	5.857×10^{-9}
3	5	5.857×10^{-9}
4	4	2.218×10^{-9}
5	4	1.512×10^{-8}

采用手动注浆泵会导致注浆速率存在一定波动，试验中认为注浆速率波动不超过 10%即为恒定注浆速率；注浆过程中注浆压力及注浆速率监测频率为 1 次/s，试验温度为 4 ℃，整个注浆过程持续时间为 1 min。

3.4 试验结果及分析

（1）浆液扩散形态

如图 8 所示，注浆过程中浆液扩散锋面由渗透注浆管底部向另一侧移动。从最终的取样结果对比被注介质内与有机玻璃管壁的浆液留存情况，有机玻璃管壁处的浆液扩散锋面与被注介质内的浆液扩散锋面基本保持一致，说明试验中的注浆扩散过程符合一维注浆扩散的理论假设。

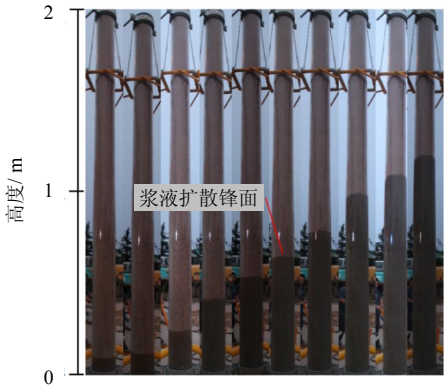
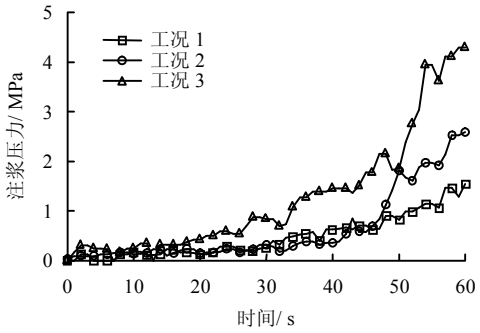


图 8 不同时刻浆液扩散形态（工况 2）

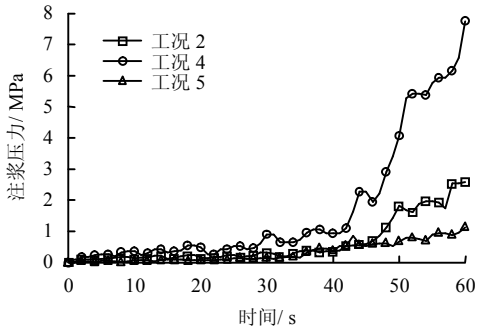
Fig.8 Diffusion shapes at different times (condition 2)

（2）注浆压力变化规律

不同工况条件下注浆压力随时间的变化曲线如图 9 所示。由图可知：



(a) 工况 1、2、3



(b) 工况 2、4、5

图 9 注浆压力随时间变化曲线

Fig.9 Variations of grouting pressure with time

（1）在整个注浆过程中，注浆压力的增长呈现阶段性特征，在注浆初期，注浆压力增长不明显，在注浆后期，注浆压力快速增长并达到注浆终压。

分析原因为浆液黏滞阻力是注浆扩散过程的主要阻力，注浆压力的分阶段增长特征取决于浆液黏滞性增长的分阶段特性，C-S 浆液的黏度增长过程中存在低黏期和上升期[4]，在低黏期浆液黏滞阻力较小，引起的注浆压力较低；在上升期，浆液黏滞阻力快速增加，导致注浆压力相应增长。

（2)注浆过程中注浆压力随时间呈波动式增加，分析原因为手动注浆泵采用柱塞式工作原理，浆液注入并非保持恒定不变，所以注浆压力存在一定波动。

（3）不同注浆速率及不同介质条件对注浆压力均具有显著影响，注浆速率与注浆压力正相关，被注介质渗透率与注浆压力负相关。

由于浆液扩散方式为一维扩散，且注浆速率保持恒定，浆液扩散距离与注浆时间为线性正相关关系，注浆压力随浆液扩散距离的变化规律与注浆压力随时间变化规律具有一致性，在此不再赘述。

4　理论与试验结果对比

将注浆试验结果与本文所创建的理论模型计算结果以及未考虑黏度空间分布不均匀性所得计算结果进行对比，以验证理论的正确性。本文试验所对应的各项计算参数如表 3 所示。

表 3　计算参数

Table 3　Calculation parameters

工况编号	q / (L/min)	k / (10^{-9} m^2)	φ /%	S / m^2	p_w / MPa	t / s
1	3	5.857	37.4			
2	4	5.857	37.4			
3	5	5.857	37.4	0.007 85	0	60
4	4	2.218	36.4			
5	4	15.12	38.5			

4.1　未考虑黏度空间不均匀性的理论分析结果

文献[8]推导了黏度时变性宾汉体浆液球形渗透注浆过程中的压力分布方程，若采用普遍的黏度时间函数形式 $\mu(t)$，浆液扩散形式为一维扩散，并代入边界条件：$l = qt_m/\varphi S$ 时，$p = p_w$，则压力时空分布方程形式为式（24），其研究未考虑浆液黏度空间分布不均匀。

$$p(l,t_m)=\left(\frac{q\mu(t_m)}{Sk}+\frac{2\tau_0}{3}\sqrt{\frac{2\varphi}{k}}\right)\left(\frac{qt_m}{\varphi S}-l\right)+p_w,\quad l\leqslant\frac{qt_m}{\varphi S} \tag{24}$$

注浆压力与注浆时间的关系为

$$p_c=\left(\frac{q\mu(t_m)}{Sk}+\frac{2\tau_0}{3}\sqrt{\frac{2\varphi}{k}}\right)\frac{qt_m}{\varphi S}+p_w \tag{25}$$

将 $l_m = qt_m/\varphi S$ 代入式（25）得注浆压力与浆液扩散距离的关系为

$$p_c=\left(\frac{q\mu(\varphi Sl_m/q)}{Sk}+\frac{2\tau_0}{3}\sqrt{\frac{2\varphi}{k}}\right)l_m+p_w \tag{26}$$

式（24）～（26）为不考虑黏度空间分布不均匀性所得到的描述黏度时变性浆液一维扩散过程的压力计算公式。

4.2　黏度空间分布对比

采用浆液表观黏度近似代替屈服剪切力和黏度在浆液本构方程中的作用[5, 12]，根据浆液表观黏度时变方程（23）及浆液黏度空间分布方程（6）可获得不同工况条件下浆液黏度空间分布情况，注浆时间为 60 s 时的浆液表观黏度空间分布如图 10 所示。由图可知：

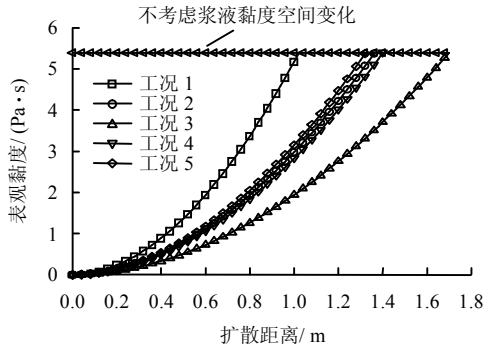


图 10　浆液表观黏度空间分布(t=60 s)

Fig.10　Spatial distribution of apparent viscosity (t=60 s)

（1）不考虑浆液黏度空间变化时，整个浆液扩散区域内浆液表观黏度同步变化，整个区域内浆液表观黏度均为 $t = 60$ s 时的浆液表观黏度。考虑黏度空间分布不均匀性时，浆液表观黏度随着浆液扩散距离的增加而增加，浆液扩散锋面处浆液表观黏度最大。不考虑浆液黏度空间变化时，区域内的浆液表观黏度普遍高于考虑浆液黏度空间分布不均匀时，势必导致浆液扩散阻力较大。

（2）工况 1、2、3 对应的注浆速率不同，在相同的注浆时间内，浆液扩散远近不同，导致浆液表观黏度空间分布具有一定差别，但由于浆液反应时间相同，3 种工况对应的浆液扩散锋面处的浆液表观黏度值相等。

（3）工况 2、4、5 对应的注浆速率相同，且被

注介质孔隙率相近，所以浆液扩散距离差别较小，对应的 3 种工况表观黏度空间分布基本相同。

4.3 试验结果与理论计算结果对比

（1）注浆压力对比

将相关计算参数代入式（21）、（25）可得注浆压力随时间变化的关系曲线，两种理论计算结果与试验结果对比如图 11 所示。

由图可知：注浆初期，注浆压力值较小，两种理论模型所得注浆压力与试验数据均吻合较好。注浆后期，随着注浆时间的增加，两种理论模型所得计算结果与试验数据存在一定差别，且差值随着注浆过程的进行差值不断增大。当$t=60$ s 时，不考虑黏度空间分布不均匀时所得注浆压力计算值为注浆压力试验值的 3.5～4.1 倍。

考虑黏度空间分布不均匀时所得注浆压力计算值为试验值的 1.2～1.4 倍，计算值与试验值的误差在可接受范围内。分析注浆压力理论计算值高于试验数值的原因可能为：①由于试验条件的限制，试验过程中水泥浆液与水玻璃混合并非完全均匀，浆液反应不充分，浆液黏度值小于室内试验所测得的浆液黏度，导致浆液扩散阻力小于理论计算值；②理论模型创建过程中应用表观黏度代替了浆液屈服剪切应力及黏度的作用，可能会引起一定的误差。

（2）浆液扩散距离对比

将相关计算参数代入式（22）、（26）可得浆液扩散距离随注浆终压的关系曲线，两种理论计算结果与试验结果对比如图 12 所示。

由图可知：注浆终压处于较低范围时，注浆终压的增加会引起浆液扩散距离的显著增加；当注浆终压处于较高范围时，注浆终压的增加对浆液扩散距离的提升作用逐渐减小。相同注浆终压条件下，不考虑浆液黏度空间不均匀性所得浆液扩散距离小于试验测量值及考虑黏度空间分布不均匀性所得理论计算值。不考虑黏度空间分布不均匀时所得浆液扩散距离计算值为试验测量值的 0.5～0.7 倍，说明不考虑浆液黏度空间不均匀性会严重低估浆液扩散范围，造成注浆设计上的浪费。

考虑黏度空间分布不均匀时所得浆液扩散距离计算值为试验测量值的 0.9～1.1 倍，计算值与试验测量值吻合较好。

综上分析，在渗透注浆中，不考虑浆液黏度空间分布不均匀会导致注浆压力计算值高出实际值的 2.5～3.1 倍，相同注浆终压条件下所能达到的浆液扩散距离低于实际值的 30%～50%，所以在渗透注浆设计中考虑浆液黏度空间分布不均匀是非常必要的。

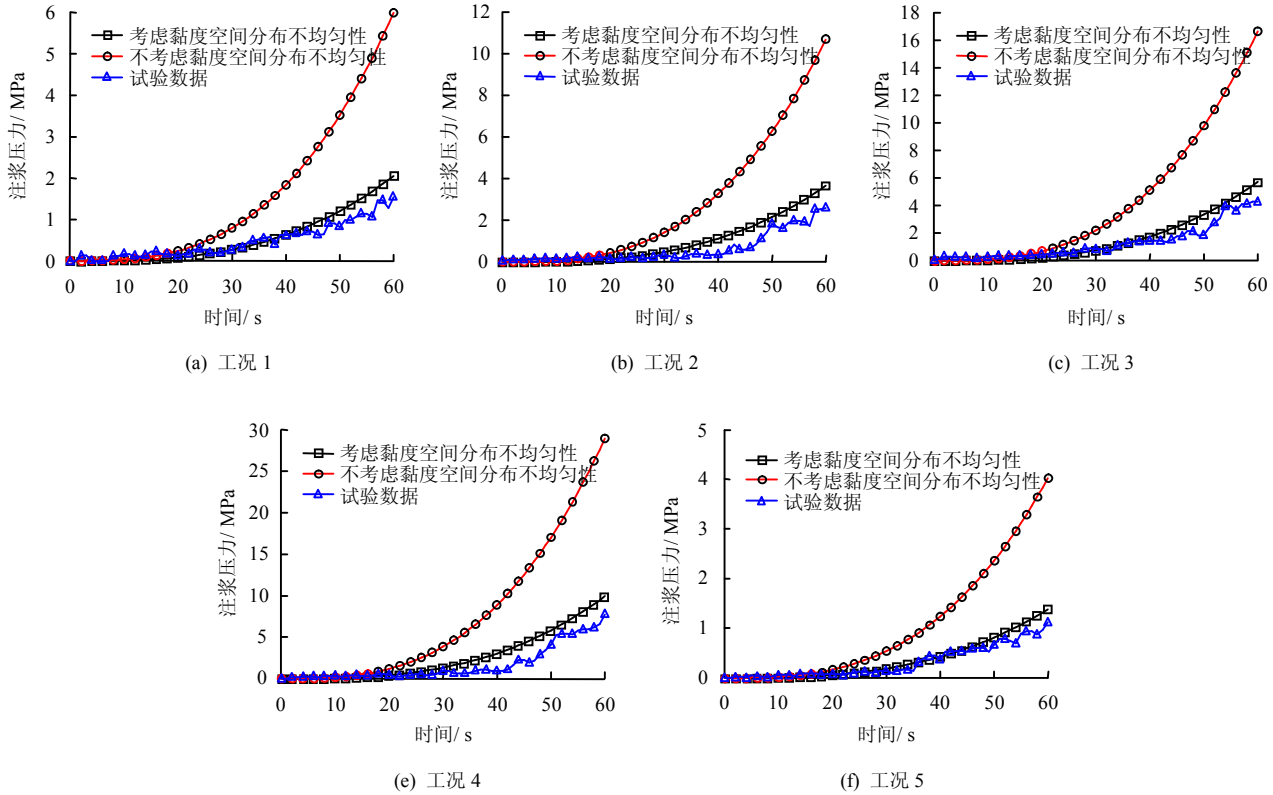


图 11 两种理论计算所得的注浆压力与试验数据对比

Fig.11 Comparison between test results and grouting pressures calculated by two theories

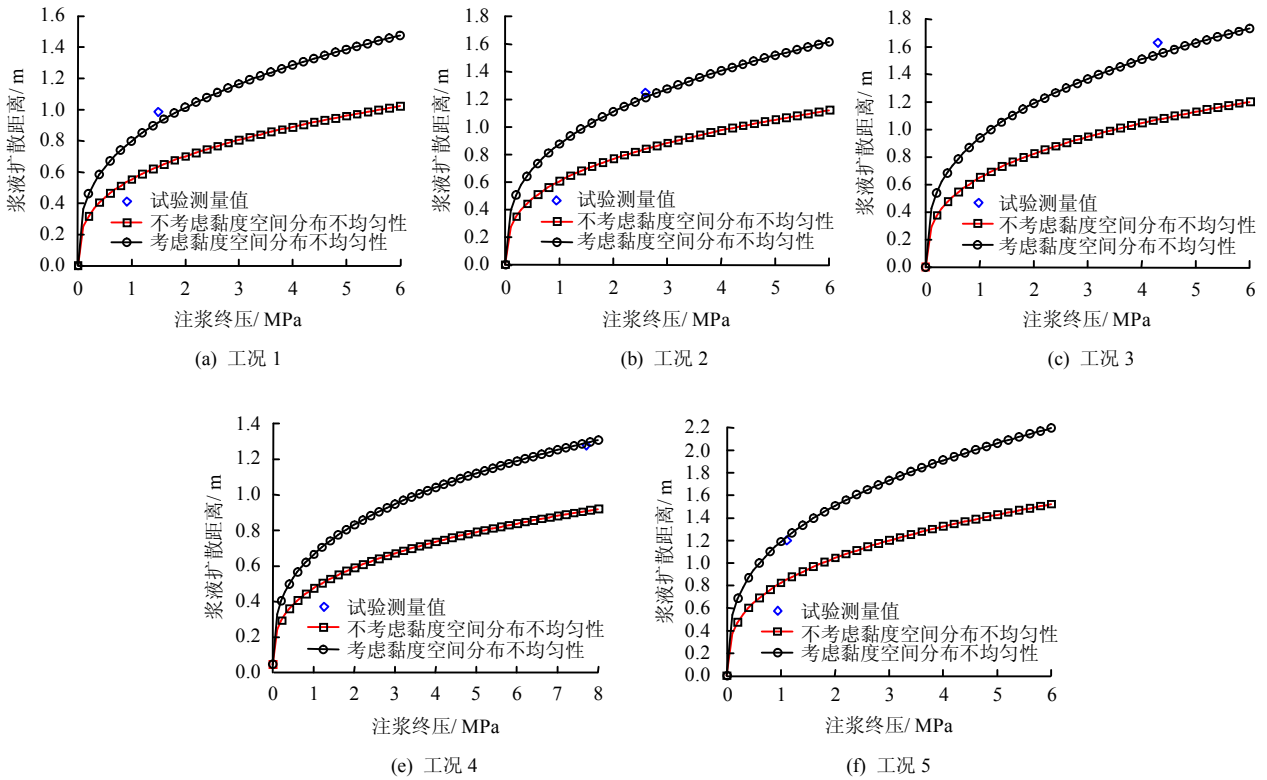


图 12　两种理论计算所得的浆液扩散距离与试验数据对比

Fig.12　Comparison between test results and grouting diffusion distances calculated by two theories

5　结　论

（1）基于黏度时变性宾汉流体本构模型，并引入了描述渗流过程的均匀毛管组模型，建立了恒定注浆速率条件下考虑浆液黏度时空变化的一维渗透注浆扩散理论模型。

（2）设计了一套一维可视化渗透注浆扩散模拟试验装置，并以 C-S 浆液作为典型速凝类浆液进行了注浆试验，获得了不同介质渗透率及不同注浆速率条件下 C-S 浆液注浆压力随时间变化规律。

（3）将理论计算值与试验值进行对比，计算值与试验值的误差在可接受范围内，所创建的理论模型可较好地描述速凝浆液一维渗透注浆扩散过程。

（4）在速凝类浆液注浆设计中，不考虑浆液黏度空间分布不均匀性会引起显著误差，其所得孔口注浆终压计算值为试验值的 3.5～4.1 倍，浆液扩散距离计算值为试验测量值的 0.5～0.7 倍，因此，在速凝浆液注浆设计中应充分考虑黏度空间分布不均匀性的影响。

参 考 文 献

[1] 邝键政, 咎月稳, 王杰, 等. 岩土工程注浆理论与工程实例[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
KUANG Jian-zheng, ZAN Yue-wen, WANG Jie, et al. Theory and project example of grout in geotechnical engineering[M]. Beijing: Science Press, 2001.

[2] 刘人太. 水泥基速凝浆液地下工程动水注浆扩散封堵机制及应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
LIU Ren-tai. Study on diffusion and plugging mechanism of quick setting cement based slurry in underground dynamic water grouting and its application[D]. Jinan: Shandong University, 2012.

[3] 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): 2415－2421.
LI Shu-cai, LIU Ren-tai, ZHANG Qing-song, 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(12): 2415－2421.

[4] 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 Shu-cai, HAN Wei-wei, ZHANG Qing-song, 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.

[5] 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): 1198－1210.
ZHANG Qing-song, ZHANG Lian-zhen, ZHANG Xiao, et al. Grouting diffusion mechanism in horizontal crack based on temporal and spatial variation of viscosity[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(6): 1198－1210.

[6] 阮文军. 基于浆液黏度时变性的岩体裂隙注浆扩散模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2709－2714.
RUAN Wen-jun. 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): 2709－2714.

[7] 阮文军. 注浆扩散与浆液若干基本性能研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(1): 69－73.
RUAN Wen-jun. Research on diffusion of grouting and basic properties of grouts[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(1): 69－73.

[8] 杨志全, 侯克鹏, 郭婷婷, 等. 基于考虑时变性的宾汉姆流体的渗透注浆机制研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(增刊 1): 67－72.
YANG Zhi-quan, HOU Ke-peng, GUO Ting-ting, et al. Study on penetration grouting mechanism based on Bingham fluid of time-dependent behavior[J]. **Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)**, 2011, 43(Supp.1): 67－72.

[9] 叶飞, 苟长飞, 刘燕鹏, 等. 盾构隧道壁后注浆浆液时变半球面扩散模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(12): 1789－1794.
YE Fei, GOU Chang-fei, LIU Yan-peng, et al. Half-spherical surface diffusion model of shield tunnel back-filled grouts[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2012, 40(12): 1789－1794.

[10] 叶飞, 苟长飞, 陈治, 等. 盾构隧道黏度时变性浆液壁后注浆渗透扩散模型[J]. 中国公路学报, 2013, 26(1): 127－134.
YE Fei, GOU Chang-fei, CHEN Zhi, et al. Back-filled grouts diffusion model of shield tunnel considering its viscosity degeneration[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2013, 26(1): 127－134.

[11] 刘健, 张载松, 韩烨, 等. 考虑黏度时变性的水泥浆液盾构壁后注浆扩散规律及管片压力模型的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 361－368.
LIU Jian, ZHANG Zai-song, HAN Ye, et al. Backfilled grouting diffusion law and model of pressure on segments of shield tunnel considering viscosity variation of cement grout[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(2): 361－368.

[12] 沈仲棠, 刘鹤年. 非牛顿流体力学及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989: 23－29.
SHEN Zhong-tang, LIU He-nian. Non-Newtonian fluid mechanics and its applications[M]. Beijing: Higher Education Press, 1989: 23－29.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 李哲, 仵彦卿, 张建山. 高压注浆渗流数学模型与工程应用[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1972－1976.
LI Zhe, XU Yan-qin, ZHANG Jian-shan. Mathematical model of high pressure injection cement liquid and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(12): 1972－1976.

[16] 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(Supp.2): 17－24.

[17] 中国建筑材料科学研究总院. GB/175−2007 通用硅酸盐水泥[S]. 北京: 标准出版社, 2007.
China Building Materials Academy. GB/175-2007 Common portland cement[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.