

DOI: 10.11779/CJGE201612005

# 考虑浆液自重的盾构隧道管片注浆浆液渗透扩散模型

叶飞<sup>1</sup>, 陈治<sup>1,2</sup>, 孙昌海<sup>1</sup>, 韩兴博<sup>1</sup>, 杨涛<sup>1</sup>, 纪明<sup>1</sup>

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 广东省南粤交通投资建设有限公司, 广东 广州 510101)

**摘要:** 为研究盾构隧道管片注浆的渗透扩散模型, 以宾汉姆浆液流体为研究对象, 基于广义达西定律(毛管组理论), 并运用相关流体力学理论, 推导了考虑浆液自重的盾构隧道管片注浆渗透扩散模型的计算公式, 并分析了其适用范围及各参数的确定方法。结合具体计算案例, 讨论了注浆参数(注浆压力、注浆时间)、地层特性(地层渗透系数)等主要因素对浆液扩散半径的影响及浆液对管片总压力的影响。结果表明: 考虑浆液自重后, 浆液的扩散范围呈椭球形; 相同的注浆压力下, 顶部注浆孔的浆液扩散范围小于底部注浆孔浆液扩散范围(顶部注浆孔出现最小扩散半径, 底部注浆孔出现最大扩散半径); 注浆压力、注浆时间及地层渗透系数增大, 浆液扩散半径也增大, 但其增长速率均减小; 注浆压力增大, 管片所受的注浆压力增大, 单位管片所受的浆液压力呈线性增长, 考虑浆液自重后, 上部单位管片所受的浆液压力大于下部单位管片所受的浆液压力; 注浆压力越大, 注浆时间越长, 地层渗透系数越大, 最大扩散半径与最小扩散半径的差值越大, 即浆液自重对浆液扩散半径的影响越大。

**关键词:** 盾构隧道; 管片注浆; 宾汉姆流体; 渗透扩散

中图分类号: U451 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)12-2175-09

作者简介: 叶飞(1977-), 男, 教授, 主要从事隧道与地下工程方面的教学和科研工作。E-mail: xianyefei@126.com。

## Penetration diffusion model for backfill grouting through segments of shield tunnel considering weight of grout

YE Fei<sup>1</sup>, CHEN Zhi<sup>1,2</sup>, SUN Chang-hai<sup>1</sup>, HAN Xing-bo<sup>1</sup>, YANG Tao<sup>1</sup>, JI Ming<sup>1</sup>

(1. School of highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Guangdong Nanyue Transportation Investment & Construction Co.

Ltd., Guangzhou 510101, China)

**Abstract:** In order to study the penetration diffusion model for backfill grouting through segments of shield tunnel, taking the Bingham fluid as research object, the formulae for calculating the backfill grouting through segments of shield tunnel are deduced based on the generalized Darcy's law (capillary group theory) by means of the theory of fluid mechanics and their application scopes and the determination methods for their parameters are analyzed. For a specific case, the influences of grouting parameters (grouting pressure and grouting time) and ground conditions (permeability coefficient) upon the radius of grout diffusion and the total pressure on segments are discussed. The results show that after considering the weight of grouts, the diffusion shape of the grouts looks like a spheroid. Under the same grouting pressure, the diffusion range of the grouts from the top grouting hole is smaller than that from the bottom grouting hole (the minimum diffusion radius appears at the top grouting hole and the maximum diffusion radius appears at the bottom grouting hole). The diffusion radius increases along with the increase of grouting pressure, grouting time and permeability coefficient of strata, but its growth rate decreases. The pressure on segments increases with the increase of grouting pressure, and the pressure on unit segment grows linearly. The grouting pressure on the upper unit segment is greater than that on the bottom one considering the weight of the grouts. The difference between the maximum and the minimum diffusion radii will be larger if the pressure on segments is greater, the grouting time is longer and the permeability coefficient of strata is larger. That is to say, the weight of the grouts has a great impact on the diffusion radius of the grouts.

**Key words:** shield tunnel; grouting through segment; Bingham fluid; penetration diffusion

## 0 引言

盾构工法以其施工速率快, 对环境干扰小, 施工安全, 高效等优点<sup>[1-2]</sup>而被广泛用于城市地铁、排水、

电力、通信等隧道施工中。刀盘掘进、管片拼装和壁

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478044, 51178052, 51678062)

收稿日期: 2015-10-20

后注浆构成了盾构工法的3大要素,壁后注浆作为盾构工法的关键步骤起到控制地层变形、提高隧道抗渗性和确保衬砌早期稳定<sup>[3]</sup>等作用。由于刀盘一般比盾壳半径大,加之盾壳厚度或盾构超挖等原因,致使管片脱离盾尾后立刻形成盾尾间隙,在砂性地层或其他非稳定性地层中,由于地层的自稳定性差,极易导致管片一脱离盾尾就立即被周围地层包裹,产生地层位移,进而导致地表沉降超限影响周边结构物安全。为有效控制或解决该问题,一般采用盾尾或管片同步注浆,由于盾尾间隙的存在时间极短,此时的同步注浆主要以渗透扩散方式在周围地层中扩散。

长期以来,不少学者对浆液的渗透扩散模型进行了研究,并取得了一定的成果。目前,浆液渗透扩散的研究主要基于裂隙注浆或达西定律两方面研究。基于达西定律,1938年,Maag假定砂性土为均匀、各向同性的介质,推导了砂性介质中牛顿流体球形渗透扩散模型<sup>[4]</sup>;叶飞等<sup>[5-7]</sup>分别推导了考虑或不考虑浆液黏度时效性的牛顿流体及宾汉姆流体浆液半球面和柱面渗透扩散模型;杨秀竹等<sup>[8]</sup>对幂律流体的渗透注浆柱形扩散公式和球形扩散公式进行了推导;杨志全等<sup>[9-11]</sup>对牛顿流体、宾汉姆流体和幂律型流体的渗透注浆柱-半球形扩散半径进行了推导,并结合试验进行了验证。基于裂隙注浆理论,Baker<sup>[12]</sup>推导了牛顿流体在裂隙中注浆的最大扩散半径;阮文军<sup>[13]</sup>在考虑浆液时效性的前提下推导了岩体裂隙浆液渗透扩散模型;许万忠等<sup>[14]</sup>假定裂隙为二维的光滑裂隙,建立了浆液在节理中扩散的渗透概化模型,并采用柱面扩散模型分析了浆液在节理中的渗透规律;张庆松等<sup>[15]</sup>将双液浆视为广义宾汉姆流体,建立了考虑浆液黏度时变性的水平裂隙浆液扩散模型,并推导了注浆时间与注浆压力和浆液扩散半径的关系。

可以看出,对于浆液渗透扩散模型的研究一直很活跃,但无论是基于达西定律或裂隙注浆的浆液渗透扩散模型,都忽略了浆液自重对浆液扩散过程中的影响,且很少有研究将盾构特性与注浆本身结合起来考虑,即这方面的研究依旧薄弱。依据已有研究,将浆液扩散过程分为充填注浆、渗透注浆、压密注浆和劈裂注浆<sup>[16]</sup>,而在不同的地层中,浆液总是以一种或多种扩散方式为主;对于非稳定地层的砂性土中,盾构推进时若采用管片同步注浆,浆液主要以渗透扩散为主。本文以宾汉姆浆液为研究对象,基于广义达西定律并考虑浆液自重对浆液扩散过程的影响,推导出了盾构隧道管片注浆浆液渗透扩散模型,探讨了各参数的取值及公式的使用范围,并分析了注浆参数(注浆压力、注浆时间)和地层特性(地层渗透系数)等主要因素对浆液扩散半径的影响。

## 1 宾汉姆浆液的渗透扩散模型

### 1.1 盾构隧道常用的壁后注浆材料

盾构壁后注浆的浆液材料以单液浆和双液浆为主,单液浆可分为惰性浆(无水泥)和硬性浆(水泥浆和水泥基浆),双液浆一般以水泥-水玻璃浆液为主,双液浆按凝结时间可分为缓凝型、可塑性、瞬凝型。水泥类浆液以其设备简单、施工管理方便、价格便宜等优势被广泛用于盾构隧道壁后注浆工程中。根据浆液在外力作用的流变性,又可将浆液分为牛顿流体、宾汉姆流体及幂律型流体,其各种流体的流变曲线如图1所示。牛顿流体与宾汉姆流体是工程中注浆常用的两种流体。文献[17]对水泥浆液做了大量试验研究,证明了水灰比影响浆液的流变特征,并得出了牛顿流体与宾汉姆流体的临界水灰比为1.0。

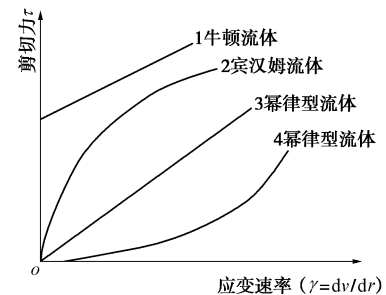


图1 各种流体的流变曲线图

Fig. 1 Flow curves of various fluids

### 1.2 宾汉姆浆液流变方程

宾汉姆流体又称宾汉体,为塑性流体。其流变方程可表示为

$$\tau = \tau_0 + \mu\gamma, \quad (1)$$

式中, $\tau$ 为剪切应力(Pa), $\tau_0$ 为静切力(Pa), $\mu$ 为塑性黏度系数(Pa·s或MPa·s); $\gamma$ 为剪切速率( $s^{-1}$ ), $\gamma = -dv/dr$ 。

### 1.3 宾汉姆浆液渗透扩散模型理论推导

#### (1) 基本假设

为分析盾构隧道管片注浆中宾汉姆浆液的扩散过程,本文作如下假设:①受注砂土为均匀、各向同性介质;②浆液为宾汉姆流体,忽略浆液时效性;③采用恒压、匀速注浆,浆液从注浆孔通过渗透扩散方式进入注浆体;④忽略盾构管片曲率影响,即认为盾构管片外表面为平面,认为浆液以半球面渗透扩散。

#### (2) 宾汉姆浆液渗流分析

假定砂性地层中渗流通道内浆液为层流运动,管道直径为 $r_0$ 。取一与管轴同轴的微元体,其微元体为长度为 $dl$ ,半径为 $r$ 的柱体。假定毛管壁轴心线与 $x$ 轴夹角为 $\theta$ ( $0 \leq \theta \leq \pi/2$ ),微元体受力情况如图2、3

所示 ( $P_0$  为注浆孔处压力,  $P_w$  为地下水压,  $\rho g$  为浆液重度,  $\tau$  为剪切力)。

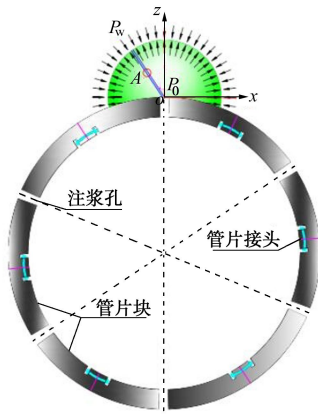


图 2 浆液球面渗透扩散示意图

Fig. 2 Sketch of grout diffusion in spherical surface

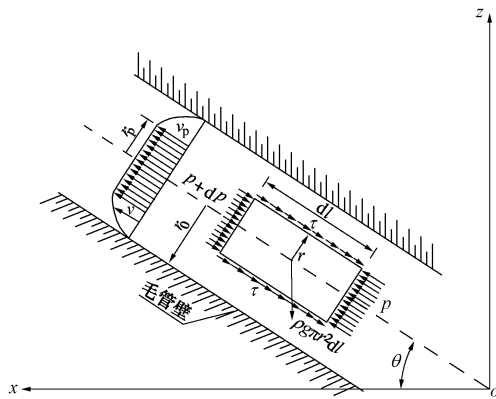


图 3 A 部分内浆液在圆管中流动的示意图

Fig. 3 Sketch of grout flow in area A in a circular tube

其平衡关系为

$$p\pi r^2 - (p + dp)\pi r^2 = 2\pi r\tau dl + \rho g \sin \theta \pi r^2 dl \quad (2)$$

式中,  $p + dp$  和  $p$  分别为流柱体两端压力, 化简为

$$\tau = -\frac{r}{2} \left( \frac{dp}{dl} + \rho g \sin \theta \right) \quad (3)$$

将式 (3) 代入流变方程 (1) 得

$$\frac{dv}{dr} = \frac{\tau_0 - \tau}{\mu} = \frac{1}{\mu} \left[ \tau_0 + \frac{r}{2} \left( \frac{dp}{dl} + \rho g \sin \theta \right) \right] \quad (4)$$

式 (4) 表明剪应力与距管轴的距离成正比, 而由宾汉姆流体定义可知, 当施加的剪切力  $\tau = -(r/2)(dp/dl + \rho g \sin \theta) > \tau_0$  时, 浆液产生相对流动, 其余部分随着部分流体像固体一样向前流动。无相对运动的部分称为流核区, 流核区以外称为速递区。因此, 管中存在一个流核半径  $r_p$ :

$$r_p = -\frac{2\tau_0}{(dp/dl + \rho g \sin \theta)} \quad (5)$$

当  $0 \leq r \leq r_p$  时, 这部分流体无相对运动, 当  $r_p \leq r \leq r_0$  时, 这部分流体出现相对运动。

对式 (4) 积分得

$$\begin{cases} v_p = -\frac{1}{\mu} \left[ \tau_0(r_0 - r) + \frac{1}{4} \left( \frac{dp}{dl} + \rho g \sin \theta \right) (r_0^2 - r^2) \right] \\ (r_p \leq r \leq r_0), \\ v_p = -\frac{1}{\mu} \left[ \tau_0(r_0 - r_p) + \frac{1}{4} \left( \frac{dp}{dl} + \rho g \sin \theta \right) (r_0^2 - r_p^2) \right] \\ (0 \leq r \leq r_p). \end{cases} \quad (6)$$

管道内的总流量  $Q_p$  为

$$\begin{aligned} Q_p &= \int_{r_p}^{r_0} 2\pi r v dr + \pi r_p^2 v_p \\ &= -\frac{\pi r_0^4}{8\mu} \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{2\tau_0/r_0}{-\rho g \sin \theta - dp/dl} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{2\tau_0/r_0}{-\rho g \sin \theta - dp/dl} \right)^4 \right] \cdot \left( \frac{dp}{dl} + \rho g \sin \theta \right). \end{aligned} \quad (7)$$

管道内的平均流速  $\bar{v}$  为

$$\bar{v} = \frac{Q_p}{\pi r_0^2} = -\frac{r_0^2}{8\mu} \left[ 1 - \frac{4}{3} \frac{r_p}{r_0} + \frac{1}{3} \left( \frac{r_p}{r_0} \right)^4 \right] \left( \frac{dp}{dl} + \rho g \sin \theta \right) \quad (8)$$

假定流量为零, 即  $1 - \frac{4}{3} \frac{r_p}{r_0} + \frac{1}{3} \left( \frac{r_p}{r_0} \right)^4 = 0$ 。解出正根为浆液的启动压力梯度, 其值为

$$-\frac{dp}{dl} = 2\tau_0/r_0 + \rho g \sin \theta = \varphi \quad (9)$$

利用 D-F 关系 ( $V = \phi \bar{v}$ ,  $V$  为渗流速度,  $\phi$  为孔隙度), 并令  $K = \phi r_0^2/8$  ( $K$  为水在砂性地层的渗透系数) 即可将式 (8) 化为

$$\begin{aligned} V &= -\frac{K}{\mu} \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{\varphi - \rho g \sin \theta}{-\rho g \sin \theta - dp/dl} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{\varphi - \rho g \sin \theta}{-\rho g \sin \theta - dp/dl} \right)^4 \right] \cdot \left( \frac{dp}{dl} + \rho g \sin \theta \right). \end{aligned} \quad (10)$$

(3) 上(下)部注浆孔理论推导

设注浆管半径为  $l_0$ , 浆液扩散半径为  $l_1$ , 浆液以恒定流的形式从注浆孔流出, 其流速为  $v_0$ , 则单位时间的注浆量  $q$  为

$$q = AV = 2\pi l^2 V = v_0 \pi l_0^2 \quad (11)$$

一般而言, 当注浆压力很大, 浆液流速较快时, 其流核半径越小, 即  $r_p \ll r_0$ , 即式 (10) 可化简为

$$V = -\frac{K}{\mu} \left[ 1 - \frac{4}{3} \left( \frac{\varphi - \rho g \sin \theta}{-\rho g \sin \theta - dp/dl} \right) \right] \left( \frac{dp}{dl} + \rho g \sin \theta \right) \quad (12)$$

而  $\frac{2}{3} \pi l_1^3 \phi = v_0 \pi l_0^2 T$ , 令  $\Delta P = P_0 - P_w$ , 则由式 (11)、(12) 可得

$$\Delta P = \frac{(l_1 - l_0)}{3} (4\varphi - \rho g \sin \theta) + \frac{\mu \phi}{3KT} \left( \frac{l_1^3}{l_0} - l_1^2 \right) \quad (13)$$

可得浆液扩散半径  $l_i$  为

$$l_i = \sqrt{\left( \frac{\Delta P}{(l_i - l_0)} - \frac{1}{3}(4\varphi - \rho g \sin \theta) \right) \frac{3TKl_0}{\mu\phi}} \quad (14)$$

由式 (14) 可知, 浆液扩散半径  $l_i$  可表示为浆液渗流管道与注浆孔中心轴夹角  $\theta$  的函数:

$$l_i = f_1(\theta) \quad (15)$$

当浆液渗流毛细管与  $x$  轴夹角  $\theta$  变化时, 浆液扩散半径也随之变化, 而浆液渗流管道的受力关于  $z$  轴对称, 由对称性可知, 求出过  $z$  轴任意平面的浆液扩散半径曲线图 (即  $0 \leq \theta \leq \pi/2$ ), 将曲线图再绕  $z$  轴旋转  $360^\circ$  即可得考虑浆液自重的渗透扩散范围。其浆液扩散示意图如图 4 所示。

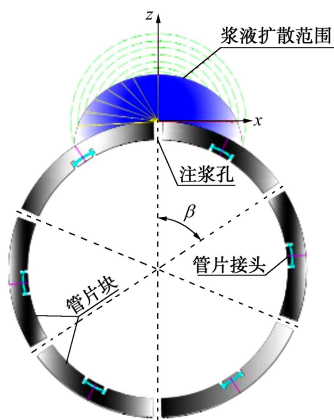


图 4 考虑浆液重力 (上部孔位) 渗透扩散示意图

Fig. 4 Sketch of grout diffusion from top segment hole considering weight of grouts

当注浆孔位于管片底部时, 浆液自重应力有利于的浆液扩散, 其平衡表达式为

$$\rho\pi r^2 - (\rho + d\rho)\pi r^2 = 2\pi r\tau dl + \rho g \sin \theta \pi r^2 dl \quad (16)$$

同理可得其管道内平均流速与浆液启动压力梯度为

$$\bar{v} = -\frac{r_0^2}{8\mu} \left[ 1 - \frac{4}{3} \frac{r_p}{r_0} + \frac{1}{3} \left( \frac{r_p}{r_0} \right)^4 \right] \left( \frac{dp}{dl} - \rho g \sin \theta \right) \quad (17)$$

$$-\frac{dp}{dl} = 2\tau_0 / r_0 - \rho g \sin \theta = \bar{\varphi} \quad (18)$$

从而可得浆液的扩散半径与注浆压力之间的关系为

$$\Delta P = \frac{1}{3}(4\bar{\varphi} + \rho g \sin \theta)(l_i - l_0) + \frac{\mu}{K} \frac{\phi}{3T} l_i^2 \left( \frac{l_i}{l_0} - 1 \right) \quad (19)$$

即浆液扩散半径为

$$l_i = \sqrt{\left( \frac{\Delta P}{(l_i - l_0)} - \frac{1}{3}(4\bar{\varphi} + \rho g \sin \theta) \right) \frac{3TKl_0}{\mu\phi}} \quad (20)$$

同理可将浆液扩散半径  $l_i$  表示为浆液渗流管道与注浆孔中心轴夹角  $\theta$  的函数:

$$l_i = f_2(\theta) \quad (21)$$

其浆液扩散范围示意图如图 5 所示。

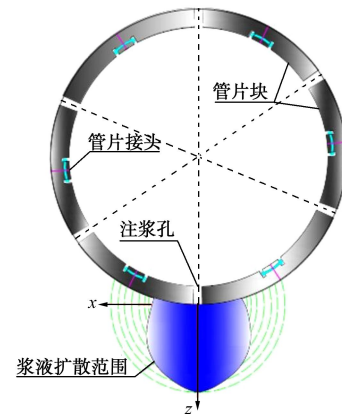


图 5 考虑浆液重力 (下部孔位) 渗透扩散示意图

Fig. 5 Sketch of grout diffusion from bottom segment hole considering weight of grouts

### 1.4 任意位置注浆孔理论推导

注浆孔过管片中心上方, 注浆孔与水平线成一定的角度  $\beta$  ( $0 \leq \beta \leq \pi/2$ ), 如图 6 所示, 由于浆液扩散时受力的不对称性, 导致管片环向上浆液扩散半径出现不对称性。假定以注浆孔位中心为原点的坐标系中, 经过图 6 中  $P$  点的毛细管与  $z$  轴夹角为  $\theta$  ( $0 \leq \theta \leq \pi$ ), 注浆孔中心在以管片环圆形为原点的坐标系中与水平方向的夹角为  $\beta$ , 则通过  $P$  点处的毛细管扩散半径为

$$l_i = \begin{cases} f_1\left(\frac{\pi}{2} + \theta - \beta\right) & (0 \leq \theta \leq \beta) \\ f_1\left(\frac{\pi}{2} - \theta + \beta\right) & (\beta \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} + \beta) \\ f_2\left(\theta - \frac{\pi}{2} - \beta\right) & (\frac{\pi}{2} + \beta \leq \theta \leq \pi) \end{cases} \quad (22)$$

同理可得, 注浆孔在过管片中心下方且与水平线成一定的角度  $\beta$  ( $0 \leq \beta \leq \pi/2$ ), 通过  $P$  点处的毛细管扩散半径为

$$l_i = \begin{cases} f_1\left(\frac{\pi}{2} - \theta - \beta\right) & (0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} - \beta) \\ f_2\left(\theta + \beta - \frac{\pi}{2}\right) & (\frac{\pi}{2} - \beta \leq \theta \leq \pi - \beta) \\ f_2\left(\frac{3\pi}{2} - \theta - \beta\right) & (\pi - \beta \leq \theta \leq \pi) \end{cases} \quad (23)$$

## 2 参数确定与公式适用范围

### 2.1 参数确定

对上述公式中参数的确定如下: 注浆孔半径  $l_0$  通过现场多次测量取平均值; 注浆孔压力  $P_0$  由压力表直接读出;  $\tau_0$ ,  $u$  值可由试验得出。

由于盾尾间隙的存在及盾构在掘进过程中导致周

围土体松动, 致使一定范围内的孔隙率发生改变, 从而影响渗透扩散过程。对于孔隙度  $\phi$ , 参照文献[18], 本文引入等效孔隙率  $\eta'$  代替孔隙度, 其等效孔隙率表达式如下:

$$\phi = \eta' = \eta + \frac{3d(1-\eta)}{2R} \quad (24)$$

式中,  $R$  为浆液渗透扩散的最大半径,  $d$  为盾尾间隙厚度,  $\eta$  为原始土体孔隙率, 可采用下式进行计算,  $\eta = 1 - \gamma_1 / (\gamma_s(1+w))$ ,  $\gamma_1$  为天然土重度,  $\gamma_s$  为土颗粒重度,  $w$  为含水率, 以上各值均可由室内试验测得。

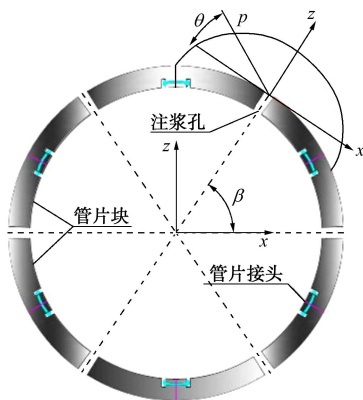


图 6 上部注浆孔浆液扩散示意图

Fig. 6 Sketch of grout diffusion from upper segment hole

而  $K = \eta r_0^2 / 8$  为水在砂土中的渗透系数, 可由室内常水头渗透试验得出, 由文献[19]可知, 渗透系数  $K$  与渗滤系数  $K'$  (m/s) 的关系可表示为  $K' = K \rho_w g / \mu_w$ ,  $\mu_w$  为水的黏度,  $\rho_w$  为水的密度。

### 2.2 公式适用范围

式 (24) 在浆液流动属层流的状态下推导的, 因此其只适用浆液层流流动。浆液流速是判断浆液流态的主要因素, 但在地层中浆液的速率难以确定, 而文献[20]认为浆液在地层的渗透阶段属于层流运动, 发生劈裂注浆时才可能转化为紊流状态。因此, 可认为盾构隧道在砂性地层的管片注浆渗透扩散阶段浆液的流动属于层流状态。由依据文献[17]可知, 在注浆压力不大时, 浆液在地层中的渗透速率与浆液的水灰比有关, 即当水泥浆液的水灰比  $W/C$  为 0.8~1.0 时为宾汉姆流体, 当水灰比为 2.0~10.0 时为牛顿流体, 因而上述公式适用条件是浆液水灰比分别为 0.8~1.0。

### 3 算例分析

根据以上推导结果, 本文以注浆孔在顶部和底部为例, 通过计算不同  $\theta$  角度值 ( $\theta$  取  $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ, 90^\circ$ ) 所对应的浆液扩散半径并绘出浆液扩散范围图, 并分析不同注浆压力、不同注浆时间和不同地层渗透系数对浆

液扩散半径的影响。

水灰比为 0.9, 依据文献[17],  $\tau_0$  取 1.884 Pa,  $\mu$  值取 0.0119 Pa·s, 经试验测得浆液密度为 1.35 g/mL, 假定水在某砂性土渗滤系数  $K' = 0.01$  cm/s,  $\mu_w$  取  $20^\circ\text{C}$  水的黏度  $1.01 \times 10^{-3}$  (N·s/m<sup>2</sup>), 注浆孔附近地下水压力  $P_w = 0$ , 土体初始孔隙率  $\eta = 0.3$ , 注浆孔半径  $l_0 = 2.5$  cm, 盾尾间隙  $d = 12$  cm, 取注浆时间  $T = 1500$  s (25 min)。

假定注浆压力为 300 kPa, 其上部或下部注浆孔考虑浆液自重的浆液扩散半径与不考虑浆液自重的浆液扩散半径如图 7 所示。

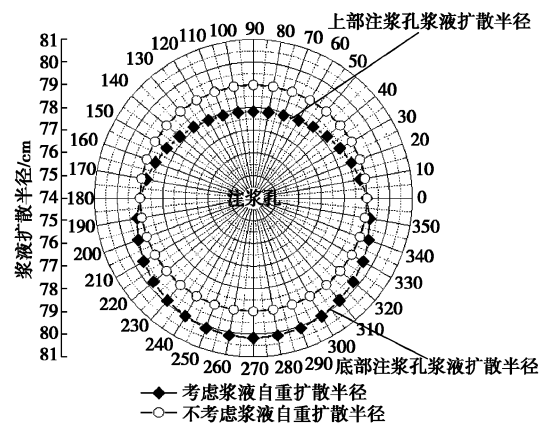


图 7 浆液扩散范围图

Fig. 7 Sketch of grout diffusion scope

从图 7 可以看出: 考虑浆液自重后, 上部注浆孔的浆液扩散半径小于不考虑浆液自重的浆液扩散半径, 下部注浆孔的浆液扩散半径则大于不考虑浆液自重的浆液扩散半径, 且都随着与水平位置夹角的增大, 其与不考虑浆液自重的浆液扩散半径的差值越大, 当  $\theta$  为  $90^\circ$  时, 上部注浆孔浆液扩散半径与下部注浆孔浆液扩散半径的差值最大。

### 3.1 注浆压力大小的影响

一般而言, 盾构隧道壁后注浆压力的范围为 0.1~0.4 MPa<sup>[1]</sup>, 为研究注浆压力对浆液扩散半径的影响, 分别取注浆压力为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 MPa, 求得的浆液扩散范围与注浆压力的关系如表 1 和图 8, 9 所示。

从表 1 及图 8, 9 可知: 上部注浆孔的最大扩散半径值与下部注浆孔的最小扩散半径相等; 随着注浆压力的增大, 浆液扩散半径随之增大, 但其增长速率减小; 由于浆液重力的影响, 同样也可以得出下部注浆孔浆液扩散半径大于上部注浆孔浆液扩散半径; 随着注浆压力的增大, 上部最小扩散半径与下部最大扩散半径的差值减小。当注浆压力为 100 kPa 时, 其差值为 2.898 cm, 占平均浆液扩散半径的 6.2%, 因此, 在低压注浆时, 有必要考虑浆液自重的影响。



表1 不同注浆压力对应最大或最小扩散半径

Table 1 Maximum and minimum grout diffusion radii under different grouting pressures

注浆压力 /kPa	最小扩散半径/cm		最大扩散半径/cm	
	上部	下部	上部	下部
100	45.477	46.893	46.893	48.345
200	64.532	65.808	65.808	67.100
300	77.820	78.991	78.991 <td 80.171	
400	88.327	89.421	89.421	90.521
500	97.153	98.187	98.187	99.225

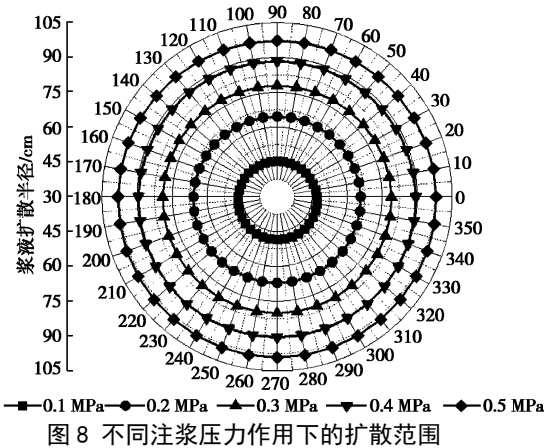


图8 不同注浆压力作用下的扩散范围

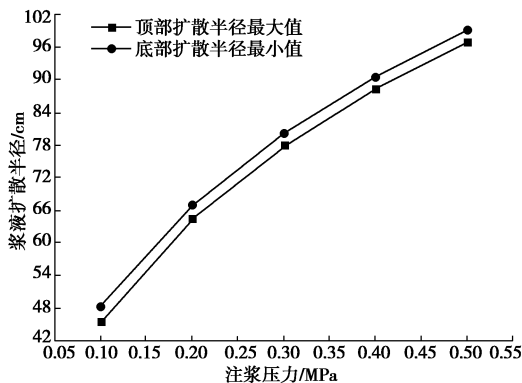


图9 不同注浆压力作用下的最大扩散半径与最小扩散半径

Fig. 9 Maximum and minimum grout diffusion radii under different grouting pressures

### 3.2 地层渗透系数 $K'$ 值的影响

从前面的理论分析可知,  $K'$  值的变化的本质是土颗粒大小和颗粒级配的变化所导致参数  $K$  的变化。在其他参数不变的情况下, 注浆压力为 300 kPa,  $K'$  值分别取 0.01, 0.025, 0.05, 0.1, 0.15, 0.20 cm/s 时, 其浆液扩散半径与渗透系数的关系如图 10, 11 所示。

从图 10, 11 可知: 地层的渗透系数越大, 浆液扩散半径越大, 但其增长速率随着地层渗透系数的增大而减小; 随着地层渗透系数的增大, 上部注浆孔的最小浆液扩散半径与下部注浆孔的最大浆液扩散半径的差值也相应增大, 说明地层渗透系数越大, 浆液自重对浆液渗透扩散半径的影响越大。

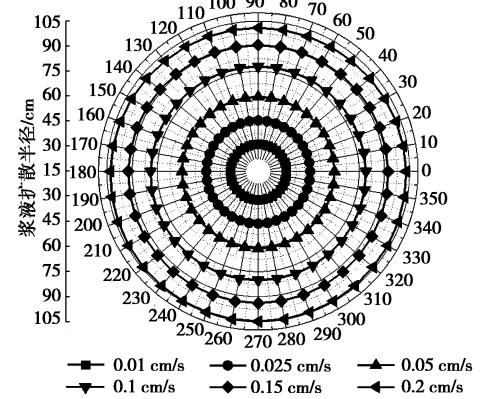


图10 地层渗透系数  $K'$  与浆液扩散范围的关系

Fig. 10 Relationship between permeability coefficients  $K'$  of strata and grout diffusion radii

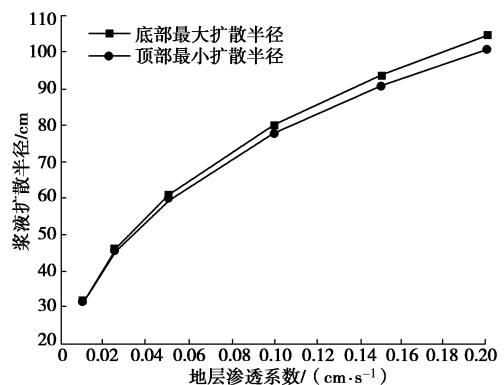


图11 不同  $K'$  作用下的浆液最大扩散半径与最小扩散半径

Fig. 11 Maximum and minimum grout diffusion radii under different values of  $K'$

### 3.3 注浆时间的影响

在其它参数不变的条件下, 将不同注浆时间(900, 1200, 1500, 1800, 2100 s)代入浆液扩散半径公式中, 得出不同注浆时间与浆液扩散半径之间的关系如图 12, 13 所示。

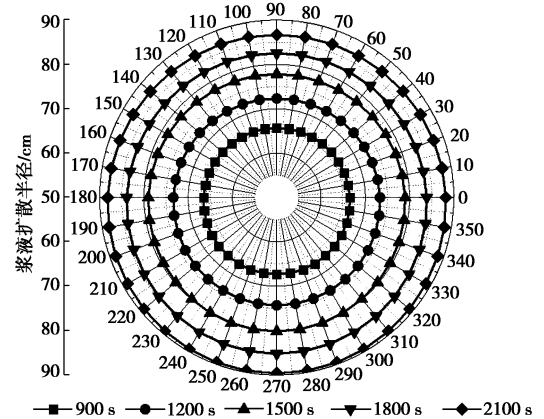


图12 注浆时间与浆液扩散范围的关系

Fig. 12 Relationship between grouting time and grout diffusion scope

从图 12, 13 可知: 随着注浆时间的增加, 浆液渗透扩散半径相应增大, 且其增长趋势随着注浆时间的增加而趋于平缓; 由于浆液自重的作用, 导致上部注

浆孔浆液的扩散范围小于下部注浆孔浆液的扩散范围; 随着注浆时间的增加, 上部注浆孔的最小浆液扩散半径与下部注浆孔的最大浆液扩散半径的差值随之增大, 说明注浆时间越长, 浆液自重对浆液扩散半径的影响越大。

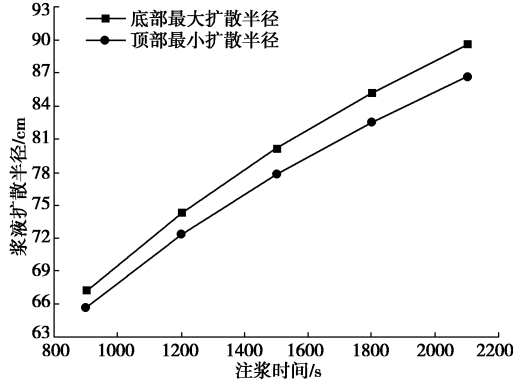


图 13 不同注浆时间作用下的最大扩散半径与最小扩散半径  
Fig. 13 Maximum and minimum grout diffusion radii under different grouting time

对于任意角度的注浆孔的浆液环向扩散范围, 可依据式 (22)、(23) 求解, 进而可绘出整个盾构隧道管片注浆环向浆液扩散范围图, 以 6 孔为例, 其浆液扩散范围示意图如图 14 所示。

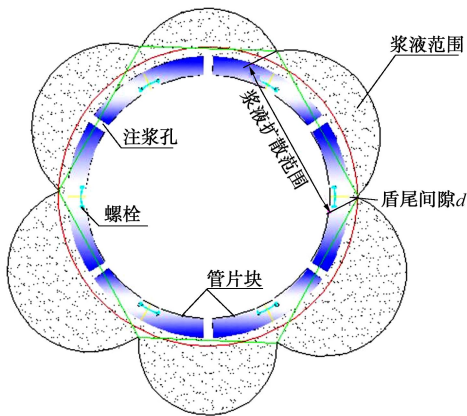


图 14 六孔注浆浆液环向扩散范围示意图

Fig. 14 Grout diffusion scope under 6 grouting holes

#### 4 浆液对管片产生的压力

在盾构隧道壁后注浆过程中, 浆液作为载体将注浆压力作用至盾构管片环上, 如注浆压力过大, 则会导致管片混凝土受压破坏或出现螺栓剪切破坏, 因此, 有必要对注浆过程中浆液对盾构管片的作用进行推导。

当为上部注浆管时, 由式 (13) 可知, 浆液扩散值任意位置时的注浆压力为

$$P_i = P_0 - \frac{1}{3}(4\varphi - \rho g \sin \theta)(l - l_0) - \frac{\mu}{K} \frac{\phi}{3T} l^2 \left( \frac{l}{l_0} - 1 \right) \quad (25)$$

由于忽略管片曲率, 即传递注浆压力的浆液的毛管与过注浆孔中心与管片环向相切的  $x$  轴方向间的夹角为  $0$  (即  $\theta$  为  $0$ ); 加之, 浆液和地层颗粒共同作用在管片上, 浆液作用在管片的面积可用等效孔隙率乘以浆液的扩散面积 (已有文献[5~7]未考虑土颗粒与管片表面的接触面积), 因此可得出管片所受的注浆压力为

$$F_g = \int_0^{l_i} 2\pi P_i l dl \times \phi$$

$$= P_0 \pi l_i^2 \phi - \frac{4\varphi \phi \pi}{3} \left( \frac{2}{3} l_i^3 - l_i^2 l_0 \right) - \frac{2\pi \mu}{K} \frac{\phi^2}{3T} \left( \frac{1}{5} l_i^5 - \frac{1}{4} l_i^4 \right) \quad (26)$$

浆液除传递注浆压力外, 其自身的浆液重力也对管片产生压力, 由于这部分浆液压力比注浆压力要小, 近似采用球面计算公式计算浆液自重。从而可得出浆液对管片单位压力  $P_d$  为

$$P_d = P_0 \phi - \frac{4\varphi \phi}{3} \left( \frac{2}{3} l_i - l_0 \right) - \frac{2\mu}{K} \frac{\phi^2}{3T} \left( \frac{1}{5} \frac{l_i^3}{l_0} - \frac{1}{4} l_i^2 \right) + \frac{2}{3} \rho g \phi l_i \quad (27)$$

同理可得下部注浆孔时, 管片所受的注浆压力与式 (25) 相同, 浆液对单位管片的压力则为

$$P_d = P_0 \phi - \frac{4\varphi \phi}{3} \left( \frac{2}{3} l_i - l_0 \right) - \frac{2\mu}{K} \frac{\phi^2}{3T} \left( \frac{1}{5} \frac{l_i^3}{l_0} - \frac{1}{4} l_i^2 \right) \quad (28)$$

对于任意角度的注浆孔, 其所受的注浆压力计算方法: 将  $\theta=0$  和  $\theta=\pi$  代入式 (22) 或式 (23) 计算出注浆孔上侧和注浆孔下侧的浆液扩散半径, 从而可通过积分求出注浆压力。而对单位管片的压力, 在过管片环中心水平面的下部不受浆液重力的影响, 上部则受浆液自重影响, 即在注浆压力产生单位管片压力增加一项  $2\rho g \phi l_i (\sin \beta) / 3$  即可。

以顶部和底部注浆孔为例, 不同注浆压力下管片所受的注浆压力及单位管片所受的浆液压力如图 15、16 所示。

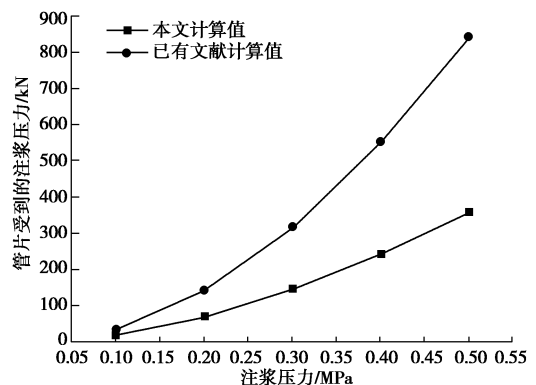


图 15 注浆压力与管片所受注浆压力关系 (底部孔)

Fig. 15 Relationship between grouting pressure and pressure on segment (bottom segment hole)

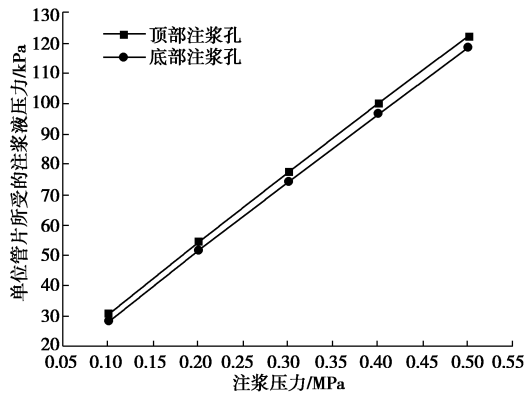


图 16 注浆压力与单位管片所受的浆液压力关系

Fig. 16 Relationship between grouting pressure and pressure on unit segment

从图 15, 16 可知: 注浆压力越大, 管片所受的注浆压力越大, 单位管片所受的浆液压力与注浆压力呈线性关系; 未考虑土颗粒与管片表面的接触面积时的计算值明显大于本文的计算值, 且其差值随着注浆压力的增大而增大; 由于浆液重力影响, 导致顶部注浆孔的单位管片所受的浆液压力大于底部注浆孔; 注浆压力从 0.1 MPa 增至 0.5 MPa, 浆液的扩散半径仅增加了 1 倍左右, 而管片受到的注浆压力则增大了十几倍, 单位管片所受的浆液压力也增大了 4 倍多, 因此, 单纯的强调增大注浆压力容易导致管片或螺栓破坏及地层隆起等问题。

## 5 试验验证

文献[21]采用大量试验验证了注浆扩散范围近似一个椭球体, 这与本文计算的结果基本符合, 注浆压力为 0.06 MPa, 地层渗透系数为 0.65 cm/s, 水灰比为 1.0, 注浆时间为 18.8 s 时 (即可忽略浆液黏度时效性的影响), 以底部注浆孔为例, 本文计算结果与文献[21]试验结果如表 2 所示。

表 2 试验结果值与理论计算值对比表

Table 2 Comparison table between experimental results and theoretical calculation values

试验结果值/cm		理论计算值/cm		误差率/%	
最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
11.1	10.4	20.67	20.36	86.22	95.77

由表 2 可以看出, 依据本文的计算模型所计算的数值约为试验结果值的 2 倍, 这是由于试验时采用点源注浆, 浆液以整个椭球面扩散, 而本文计算公式考虑到管片对浆液扩散的阻挡, 浆液呈半椭球形扩散。若试验值乘以 2 后, 试验值与模型计算值基本吻合, 说明了本文理论计算模型公式的合理性。

## 6 结 论

(1) 本文以宾汉姆流体为研究对象, 基于广义达

西定律, 推导了考虑浆液自重的盾构隧道管片注浆浆液环向渗透扩散半径计算公式及浆液对管片的注浆压力公式, 并对公式的参数确定及公式的使用范围进行了说明。

(2) 考虑浆液自重影响, 浆液的扩散范围呈椭球形扩散, 以相同的注浆压力注入浆液时, 顶部注浆孔出现了最小浆液扩散半径, 而底部注浆孔则出现了最大浆液扩散半径。

(3) 分析了注浆压力、地层渗透系数及注浆时间对盾构隧道管片注浆渗透扩散模型的扩散半径的影响, 得出: 宾汉姆浆液扩散半径随着注浆压力、注浆时间和地层渗透系数增大而增大; 注浆压力越大, 注浆时间越长, 地层渗透系数越大, 最大扩散半径与最小扩散半径的差值越大, 即浆液自重对浆液扩散半径的影响越大。

(4) 推导了管片所受的注浆压力公式和考虑浆液自重的单位管片所受的浆液压力公式, 并分析了注浆压力对管片所受的注浆压力和单位管片所受的浆液压力的影响, 得出: 注浆压力增加, 管片所受的注浆压力增大, 单位管片所受的浆液压力呈线性增大; 考虑重力的上部单位管片所受的浆液压力大于下部单位管片所受的浆液压力。

## 参考文献:

- [1] 周文波. 盾构法隧道施工技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 21 - 22. (ZHOU Wen-bo. Shield tunneling technology[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004: 21 - 22. (in Chinese))
- [2] ZHANG W J. Study on mechanical behavior and design of composite segment for shield tunnel[D]. Tokyo: Waseda University, 2009.
- [3] 张海涛. 盾构同步注浆材料试验及隧道上浮控制技术[D]. 上海: 同济大学, 2007. (ZHANG Hai-tao. Study on the proportioning of tail void grouting material and up floating control of shield tunnel[D]. Shanghai: Tong-ji University, 2007. (in Chinese))
- [4] 《岩土注浆理论与工程实例》编写组. 岩土注浆理论与工程实例[M]. 北京: 科学出版社, 2001. (Writing Group of "Geotechnical grouting theory and engineering examples". Geotechnical grouting theory and engineering examples[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))
- [5] 叶飞, 刘燕鹏, 苟长飞, 等. 盾构隧道壁后注浆浆液毛细管渗透扩散模型[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(3): 428 - 434. (YE Fei, LIU Yan-peng, GOU Chang-fei, et al. Capillary penetration diffusion model for backfill grouting of shield tunnel[J]. Journal of Southwest Jiaotong University,



- 2013, **48**(3): 428 - 434. (in Chinese))
- [6] 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 Tong-Ji University(Natural Science), 2012, **40**(12): 1789 - 794. (in Chinese))
- [7] 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. (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): 1803 - 1806. (YANG Xiu-zhu, LIE Jin-shan, XIA Li-nong, et al. Study on grouting diffusion radius of exponential fluids[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, **26**(11): 1803 - 1806. (in Chinese))
- [9] 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, 2015, **35**(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, 2015, **35**(2): 17 - 24. (in Chinese))
- [10] 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))
- [11] 杨志全, 侯克鹏, 程 涌, 等. 幂律型流体的柱-半球形渗透注浆机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(2): 3480 - 3486. (YANG Zhi-quan, HOU Ke-peng, CHENG Yong, et al. Study of column hemispherical-penetration grouting mechanism based on power-law fluid[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(2): 3480 - 3486. (in Chinese))
- [12] BAKER C. Comments on paper "Rock stabilization in rock mechanics"[M]. Muler: Springer-Verlag NY, 1974.
- [13] 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. (in Chinese))
- [14] 许万忠, 潘进兵, 周治平, 等. 节理裂隙岩体注浆渗透模型分析[J]. 中国铁道科学, 2010, **32**(3): 47 - 51. (XU Wan-zhong, PAN Jin-bing, ZHOU Zhi-ping, et al. Model analysis of the grouting seepage in the jointed and fractured rock mass[J]. China Rail Way Science, 2010, **32**(3): 47 - 51. (in Chinese))
- [15] 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 in a horizontal crack considering temporal and spatial variation of viscosity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(6): 1198 - 1210. (in Chinese))
- [16] 叶 飞, 陈 治, 苟长飞, 等. 基于球孔扩张的盾构隧道壁后注浆压密模型[J]. 交通运输工程学报, 2014, **14**(1): 35 - 42. (YE Fei, CHEN Zhi, GOU Chang-fei, et al. Back-filled grouting compaction model of shield tunnel based on spherical cavity expansion[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, **14**(1): 35 - 42. (in Chinese))
- [17] 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. (in Chinese))
- [18] 叶 飞. 软土盾构隧道施工期上浮机理分析及控制研究[D]. 上海: 同济大学, 2007. (YE Fei. Analysis and control for upward movement of shield tunnel during construction[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))
- [19] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010: 41 - 44. (KONG Xiang-yan. Advanced mechanics of fluid flow in porous media[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2010: 41 - 44. (in Chinese))
- [20] 刘文永, 王新刚, 冯春喜, 等. 注浆材料与施工工艺[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (LIU Wen-yong, WANG Xin-gang, FENG Chun-xi, et al. Grouting materials and construction technology[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008. (in Chinese))
- [21] 杨志全. 水泥浆液在小粒径砂石体中注浆理论及模拟实验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008. (YANG Zhi-quan. Theoretical and simulation-experimental study of cement slurry in a small particle size gravel body grouting[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2008. (in Chinese))