

DOI : 10.11779/CJGE201605014

# 盾构隧道管片注浆幂律流型浆液渗透扩散模型

叶 飞, 陈 治, 贾 涛, 毛燕飞, 毛家骅

(长安大学公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:** 为研究盾构隧道管片注浆的渗透扩散模型, 以幂律流型浆液为研究对象, 运用流体力学理论及毛细管组理论, 推导了盾构隧道管片注浆渗透扩散模型的理论计算式, 分析了其公式的适用范围及各参数的确定方法。结合具体计算案例, 讨论了注浆压力、浆液性质(水灰比)、地层条件(地下水压力和地层渗透系数)等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: 注浆压力与浆液扩散半径成线性关系; 注浆压力、水灰比及地层渗透系数增大, 浆液扩散半径也增大; 地下水压力增大, 浆液扩散半径减小; 注浆压力、水灰比、地层渗透系数增大, 浆液对管片的总压力增加; 地下水压力的变化不会影响管片所受的总压力。

**关键词:** 盾构隧道; 管片注浆; 幂律流体; 渗透扩散

中图分类号: TU43; U451

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)05-0890-08

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

## Penetration diffusion model of exponential fluid for backfill grouting through segments of shield tunnel

YE Fei, CHEN Zhi, JIA Tao, MAO Yan-fei, MAO Jia-hua

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** In order to study the penetration diffusion model for backfill grouting through segments of shield tunnel, taking the exponential fluid as the research object and applying the fluid mechanical theory and capillary group theory, the formulae for calculating the backfill grouting through segments of shield tunnel are deduced, and the application scope and determination methods for the parameters of the formulae are analyzed. Based on a specific case, the influences of the grouting pressure, grout properties (water-cement ratio) and ground conditions (groundwater and permeability coefficient) on the grout diffusion radius and the total pressure on segments are discussed. The result shows that the grouting pressure is linear to the diffusion radius. The diffusion radius increases along with the increase of the grouting pressure, water-cement ratio and permeability coefficient, and decreases along with the increase of the groundwater pressure. The total grouting pressure on segments increases with the increase of the grouting pressure, water-cement ratio and ground permeability, but does not change along with the change of the groundwater pressure.

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

## 0 引 言

盾构工法以其施工速度快, 对环境干扰小, 施工安全等优点<sup>[1]</sup>而广泛用于城市地铁、排水、电力、通信等隧道施工中。由于中国地域辽阔, 地层结构复杂, 在盾构施工中难免会遇到各种各样的地层条件。当盾构在砂性地层中掘进, 管片脱离盾尾时, 由于盾尾间隙的存在, 导致地层暂时处于无支护状态, 加之砂性土地层的黏聚力小, 自稳性差, 极易导致管片一脱离盾尾就立即被周围土层包裹, 产生地层位移, 进而导致地表出现较大沉降变形, 严重影响隧道周边结构物的安全。为有效控制或解决该问题, 一方面需要加强同步注浆(通过盾尾注浆孔注浆), 再者, 还需通过管

片注浆孔及时补充注浆。

长期以来, 国内外学者一直致力于浆液的渗透扩散模型的研究, 并取得了一定的成果。1938年, Maag<sup>[2]</sup>假定砂性土为均匀、各向同性的介质, 提出了牛顿流体在砂性介质中的球形渗透扩散理论。Baker<sup>[3]</sup>推导了牛顿流体在裂隙中注浆的最大扩散半径。基于达西定律, 分别在不考虑浆液时效性和考虑浆液时效性条件下, 叶飞等<sup>[4]</sup>推导了牛顿流体及宾汉姆流体浆液半球面渗透扩散模型。杨秀竹等<sup>[5-6]</sup>基于广义达西定律, 推导了宾汉姆体浆液在砂土中球形扩散渗透注浆时有

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478044, 51178052)

收稿日期: 2015-05-14

效扩散半径的计算公式及求解方法。杨志全等<sup>[7-8]</sup>分别对宾汉姆流体及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, 并配合试验方法进行了验证。

可以看出, 对于浆液渗透扩散模型的研究一直很活跃, 但把盾构的特性与注浆本身结合起来考虑的, 目前的研究依然显得较为薄弱。依据浆液和地层的特性, 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>[9]</sup>。在砂性地层中的盾构隧道采用管片及时注浆, 浆液主要以压密和渗透扩散为主。本文以幂律型浆液(包括牛顿流体)为研究对象, 结合渗透注浆毛细管组理论, 推导了盾构隧道管片注浆浆液渗透扩散模型, 并探讨了各参数的取值及公式的使用范围。

## 1 幂律型浆液毛细管组渗透扩散模型

### 1.1 盾构隧道常用的壁后注浆材料特性

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, 但随着注浆技术的发展, 以及地层条件的复杂性, 幂律型流体也被渐渐运用到盾构隧道注浆工程中。

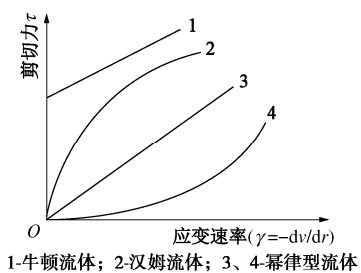


图 1 Rheological curves of various fluids

### 1.2 幂律型浆液流变方程

幂律型浆液的流变方程为

$$\tau = C\gamma^n \quad (1)$$

式中,  $\tau$  为剪应力或幂律系数,  $C$  为稠度系数,  $\gamma$  为剪切速率,  $\gamma = -dv/dr$ ,  $v$  为浆液流动速率,  $n$  为流变指数。当  $n=1$  时, 为牛顿流体; 当  $n<1$  时, 为假塑流体; 当  $n>1$  时, 为膨胀流体。

### 1.3 幂律型浆液渗流分析

取单个圆形毛细管进行分析, 在管内取与管轴为对

称轴、半径为  $r$  的流柱体, 其长度为  $dl$ 。毛细管半径为  $r_0$ , 不考虑浆液自重的影响, 其流柱体的受力如图 2 所示。

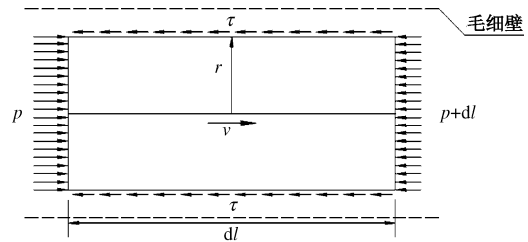


图 2 浆液在圆管中流动的示意图

Fig. 2 Grouting flows in a circular tube

其平衡关系为

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

式中,  $p+dp$  和  $p$  分别为流柱体两端压力, 化简为

$$\tau = -\frac{r}{2} \frac{dp}{dl} \quad (3)$$

将式 (3) 代入流变方程 (1) 得

$$\gamma = -\frac{dv}{dr} = \left(-\frac{1}{2C} \frac{dp}{dl}\right)^{\frac{1}{n}} r^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

对式 (4) 由分离变量法求解, 并代入边界条件  $r=r_0$  时,  $v=0$  可得

$$v = \left[ \left(-\frac{1}{2C} \frac{dp}{dl}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{1+n} \right] \left( r_0^{\frac{1+n}{n}} - r^{\frac{1+n}{n}} \right) \quad (5)$$

半径为  $r_0$  的毛细管单位时间的流量  $Q_p$  为

$$Q_p = \int_0^{r_0} 2\pi v r dr \quad (6)$$

将式 (5) 代入式 (6) 得

$$Q_p = \left(-\frac{1}{2C} \frac{dp}{dl}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{1+3n} \pi r_0^{\frac{1+3n}{n}} \quad (7)$$

管道内的平均流速为

$$v = \frac{Q_p}{\pi r_0^2} = \left(-\frac{1}{2C} \frac{dp}{dl}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{1+3n} r_0^{\frac{1+n}{n}} \quad (8)$$

由 Dupuit-Forchheimer 关系式可得任意时刻的渗流速度为

$$V = \phi v = \phi \left(-\frac{1}{2C} \frac{dp}{dl}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{n}{1+3n} r_0^{\frac{1+n}{n}} \quad (9)$$

为便于研究, 引入等效黏度  $u_e$  与有效渗透系数  $K_e$ , 分别为

$$\left. \begin{aligned} u_e &= C \left( \frac{1+3n}{\phi r_0 n} \right)^{n-1} \\ K_e &= \frac{\phi r_0^2}{2} \left( \frac{n}{1+3n} \right) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

化简可得

$$V = -\left(\frac{K_e dp}{u_a dl}\right) = \left(\frac{K_e}{u_e}\right)^{\frac{1}{n}} \left(-\frac{dp}{dl}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (11)$$

1.4 幂流型浆液的渗透扩散模型

(1) 基本假设

为分析盾构隧道管片注浆中幂流型浆液的扩散过程, 本文作如下假设: 受注砂土为均匀、各向同性介质; 所注浆液为幂律型流体, 忽略浆液的时效性;

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; 在浆液渗透过程中, 不考虑重力的影响, 浆液为半球面扩散; 忽略盾构管片曲率影响, 即认为盾构管片外表面为平面。

(2) 均匀管组渗透扩散模型

浆液扩散的理论模型如图3所示。其中  $p_0$  为注浆孔注浆压力,  $p_w$  为地下水压力。

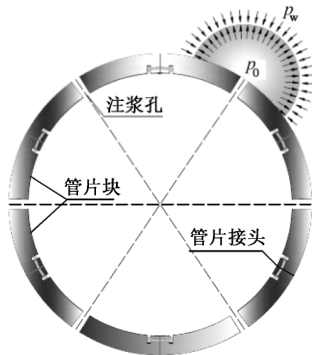


图3 半球面浆液扩散模型示意图

Fig. 3 Half-spherical surface grouting diffusion model

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为

$$q = AV = 2\pi l^2 V = v_0 \pi l_0^2 \quad (12)$$

式中,  $A$  为任意时刻半球面浆液的外表面积, 由式(11) (12) 可得

$$V = \frac{v_0 l_0^2}{2l^2} = \left(\frac{K_e}{u_e}\right)^{\frac{1}{n}} \left(-\frac{dp}{dl}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (13)$$

由式(13)利用分离变量积分法, 并代入边界条件: 注浆半径为  $l_0$  时, 浆液压力为  $p_0$ , 浆液扩散半径为  $l_1$ , 浆液压力等于该处的地下水压力, 为  $p_w$ , 可求得

$$\Delta p = p_0 - p_w = -\left(\frac{v_0 l_0^2}{2}\right)^n \left(\frac{u_e}{K_e}\right) \frac{1}{1-2n} (l_0^{1-2n} - l_1^{1-2n}) \quad (14)$$

流速与流量之间的关系为

$$Q = \pi v_0 l_0^2 T = \frac{2}{3} \phi \pi l_1^3 \quad (15)$$

代入式(14), 从而得到浆液的扩散半径  $l_1$  为

$$l_1 = l_0 \sqrt[n]{\frac{l_0}{l_0} + \frac{\Delta p (2n-1) K_e (3T)^n}{l_0 l_1^n u_e \phi}} \quad (16)$$

任意半径  $l$  处的浆液压力为

$$p = p_0 + \left(\frac{\phi}{3T}\right)^n \frac{u_e}{K_e} \frac{l^{3n}}{1-2n} (l_0^{1-2n} - l^{1-2n}) \quad (17)$$

则注浆浆液对管片产生的总压力为

$$F_g = \int_0^{l_1} 2\pi l p dl = p_0 \pi l_1^2 + \frac{2\pi}{1-2n} \frac{u_e}{K_e} \left(\frac{\phi}{3T}\right)^n \left(\frac{l_0^{1-2n} l_1^{3n+2}}{3n+2} - \frac{l_1^{n+3}}{n+3}\right) \quad (18)$$

式(16) (18) 为幂律流体管片注浆渗透扩散模型理论公式。特别地, 当  $n$  取1时, 即浆液为牛顿流体, 而  $l_0^{-1} \gg l_1^{-1}$ , 求得牛顿流体管片注浆渗透扩散模型公式为

$$l_1 = \sqrt[3]{\frac{3\Delta p l_0 T K_e}{u_e \phi}} = \sqrt[3]{\frac{3\Delta p l_0 T K}{\beta \phi}} \quad (19)$$

$$F_g = p_0 \pi l^2 - \frac{2\pi \phi u_e l^5}{15 T K_e l_0} \quad (20)$$

(3) 非均匀管组渗透扩散模型

假定横截面积  $A$  上半径为  $r_i$  的毛管数为  $N_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, N$ )

由式(7)可得, 通过截面积  $A$  的总流量  $Q$  为

$$Q = \frac{n\pi}{1+3n} \left(-\frac{1}{2C} \frac{dp}{dl}\right)^{\frac{1}{n}} \left(\sum_{i=1}^N N_i r_i^{\frac{1+3n}{n}}\right) \quad (21)$$

孔隙率为

$$\phi = \left(\sum_{i=1}^N N_i \pi r_i^2\right) / A \quad (22)$$

渗流速度为

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{n\phi}{1+3n} \frac{\sum_{i=1}^N N_i r_i^{\frac{1+3n}{n}}}{\sum_{i=1}^N N_i r_i^2} \left(-\frac{1}{2C} \frac{dp}{dl}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (23)$$

式(23)可改写为

$$V = -\frac{1}{2CV^{n-1}} \left(\frac{n\phi}{1+3n}\right)^n \left(\frac{\sum_{i=1}^N N_i r_i^{\frac{1+3n}{n}}}{\sum_{i=1}^N N_i r_i^2}\right)^n \frac{dp}{dl} \quad (24)$$

引入有效黏度和有效渗透系数

$$u_e = C \left(\frac{1+3n}{\phi n}\right)^{n-1} r_0^{-1-n}, K_e = \frac{\phi}{2} \left(\frac{n}{1+3n}\right)^{-2} r_0^{-2} \quad (25)$$

式中,  $r_0 = \left(\sum_{i=1}^N N_i r_i^{\frac{1+3n}{n}} \left(\sum_{i=1}^N N_i r_i^2\right)^{-1}\right)^{\frac{n}{1+3n}}$ 。即可将式(24)

简化为式(11)

假定地层中孔隙所组成的毛管道孔径不等, 半径为  $r_i$  的管道数在地层中不同半球面上所占比例为一定值且不考虑毛管组迂曲度, 其面积比为  $\delta_i$ 。

当浆液扩散至  $l$  时, 半球面面积为  $S = 2\pi l^2$ , 此时半球面空隙所占的面积为  $S_k = 2\pi\phi l^2$ , 半径  $r_i$  的管道总面积为  $S_{ki} = \delta_i S_k = 2\pi\phi\delta_i l^2$ , 从而得到半径  $r_i$  的管道数为

$$N_{li} = \frac{S_{ki}}{\pi r_i^2} = \frac{2\phi\delta_i l^2}{r_i^2} \quad (26)$$

浆液在半径为  $l_0$  的注浆管管口有效黏度与有效渗透系数为

$$\left. \begin{aligned} u_{e0} &= C \left( \frac{1+3n}{\phi n} \right)^{n-1} \frac{1}{r_0^{1-n}} \\ K_{e0} &= \frac{\phi}{2} \left( \frac{n}{1+3n} \right) \frac{1}{r_0^2} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

式中,  $\bar{r}_0 = \left[ \sum_{i=1}^N N_{0i} r_i^{\frac{1+3n}{n}} \left( \sum_{i=1}^N N_{0i} r_i^2 \right)^{-1} \right]^{\frac{n}{1+n}}$

半径  $l_0$  球面上半径为  $r_i$  的管道数为

$$N_{0i} = \frac{2\phi\delta_i l_0^2}{r_i^2} \quad (28)$$

从而有

$$N_{li} = N_{0i} \frac{l^2}{l_0^2} \quad (29)$$

当浆液扩散至半径  $l$  处有效黏度和有效渗透系数为

$$\left. \begin{aligned} u_{el} &= C \left( \frac{1+3n}{\phi n} \right)^{n-1} \frac{1}{r_l^{1-n}} \\ K_{el} &= \frac{\phi}{2} \left( \frac{n}{1+3n} \right) \frac{1}{r_l^2} \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

式中,  $\bar{r}_0 = \left[ \sum_{i=1}^N N_{li} r_i^{\frac{1+3n}{n}} \left( \sum_{i=1}^N N_{li} r_i^2 \right)^{-1} \right]^{\frac{n}{1+n}}$ 。即  $u_{el} = u_{e0}$ ,

$K_{el} = K_{e0}$ 。

同理可得出, 非均匀管组浆液渗透扩散模型的扩散半径及对管片的总压力计算公式如下:

$$l_l = l_0 \sqrt[2n]{\frac{l_l}{l_0} + \frac{\Delta p(2n-1) K_{e0}}{l_0 l_l^n u_{e0}} \left( \frac{3T}{\phi} \right)^n} \quad (31)$$

$$F_g = p_0 \pi l^2 + \frac{2\pi}{1-2n} \frac{u_{e0}}{K_{e0}} \left( \frac{\phi}{3T} \right)^n \left( \frac{l_0^{1-2n} l^{3n+2}}{3n+2} - \frac{2l^{n+3}}{n+3} \right) \quad (32)$$

(4) 均匀管组与非均匀管组渗透扩散模型比较

在 1.4 节提出的假设前提下, 对比上述两种模型的盾构管片注浆幂律流体渗透扩散机理 (即式 (16) (18) (31) (32)) 可知: 浆液压力的分布形式, 浆液对管片的作用力及浆液的最大扩散半径表达式一样, 只是在等效黏度与有效渗透系数的计算上有所区别。均匀管组理论的  $K_e, u_e$  由式 (11) 计算所得, 而非均匀管组理论  $K_{e0}, u_{e0}$  由式 (27) 计算所得。显然,

在实际工程中非均匀管组理论更接近实际, 但由于  $K_{e0}, u_{e0}$  计算较难实现, 使其实用价值并不高, 而从两种计算理论式可以看出, 如果  $K_e, u_e$  的取值合理并接近  $K_{e0}, u_{e0}$ , 即可用均匀管组模型代替非均匀管组模型, 在满足工程计算要求的前提下简化计算。

## 2 参数确定与公式适用范围

### 2.1 参数确定

对幂律流体渗透扩散理论模型计算式 (即式 (16) (18) 及式 (31) (32)) 中各参数的确定如下: 注浆孔半径  $l_0$  可采用测量仪器通过多次现场测定取平均值; 注浆孔压力  $P_0$  在注浆孔附近安装压力表, 由现场测试数据而得 (或直接采用注浆所用压力);  $C, n$  值可由室内浆液特性试验得出相关试验数据, 并由线性或非线性回归而得。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, 参照文献[10], 本文引入等效孔隙率  $\eta'$  代替孔隙度, 其等效孔隙率公式如下:

$$\phi = \eta' = \eta + \frac{3d(1-\eta)}{2R} \quad (33)$$

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,  $\eta = 1 - \frac{\gamma_1}{\gamma_s(1+w)}$ ,  $\gamma_1$  为天然土重,  $\gamma_s$  为土颗粒重度,  $w$  为含水率, 以上各值均可由室内试验测得。

参数  $K_e, u_e$  的确定则相对复杂一些, 可按如下步骤计算: 确定  $r_0$  及浆液的流变参数  $C, n$  后, 根据式 (11) 分别计算出  $K_e, u_e$ ;  $r_0$  值可由  $K = \eta r_0^2 / 8$  求得, 其中  $K$  为水在砂土中的渗透系数, 而由文献[11]可知, 渗透系数  $K$  与渗流系数  $K'$  (m/s) 的关系可表示为  $K' = K\rho g / \mu$ , 其中,  $\mu$  为水的黏度,  $\rho$  为水的密度。

### 2.2 公式适用范围

上述公式是在浆液流动属于层流的情况下推导出来的, 对紊流不适用。Z 值是从层流稳定性理论出发, 认为层流过渡到紊流时, 紊流的漩涡并不是在整个管断面上同时发生, 依据文献[12], 圆管中幂流型流体可由 Z 值划分层流和紊流状态, 当 Z 值大于 808 为层流, 小于 808 为紊流。其 Z 值计算式如下:

$$Z = \frac{n}{2^n} \left( \frac{1}{n+2} \right)^{\frac{n+2}{n+1}} \left( \frac{3n+1}{n} \right)^{2-n} \frac{d^n v^{2-n} \rho}{C} \quad (34)$$

式中,  $d$  为圆管直径,  $\rho$  为流体密度。当流体为牛顿流体时, 即  $n$  取 1 时,  $Z = 0.3849 Re$ ,  $Re$  为雷诺数, 将雷诺数临界值 2100 代入得 Z 值为 808, 即也可用 Z 值判断浆液的流态。

由于浆液在地层中的速率难以确定, 因此, 上述方法难以对注浆浆液流体的流态进行判断, 而依据文

献[13]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 0.5~0.7 时为幂律流体,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 0.5~0.7 和 2.0~10.0。

### 3 算例分析

根据以上推导结果,假定某砂性土渗透系数  $K'=0.01\text{ cm/s}$ ,  $\mu$  取 20 水的黏度,其值为  $1.01 \times 10^{-3}$  ( $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ),浆液水灰比  $W/C=0.7$  时,  $C$  取 5.826,  $n$  值取 0.0022;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  $l_0=2.5\text{ cm}$ ,盾尾间隙  $d=12\text{ cm}$ ,取注浆时间  $T=1500\text{ s}$ 。

#### 3.1 注浆压力大小的影响

求解(16)式时,由于两边都含有未知数,可采用差值法求解  $l_i$ ,本文为计算简便,在给定最大扩散半径(分别取浆液最大扩散半径为 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60 m)的前提下求出压力差,再将注浆压力代入(17)式求出浆液对管片的总压力。其浆液扩散半径及浆液对管片的总压力随注浆压力变化分别如下图 4, 5 所示。

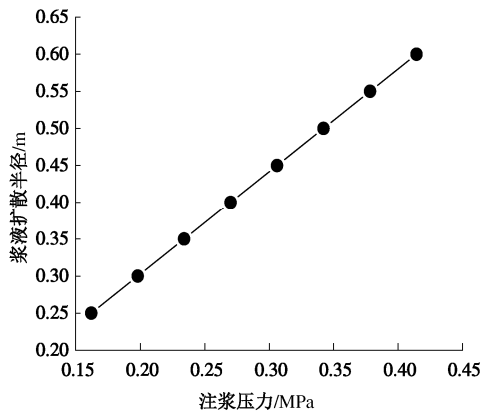


图 4 不同注浆压力作用下的扩散半径

Fig. 4 Relation between grouting diffusion radius and grouting pressure

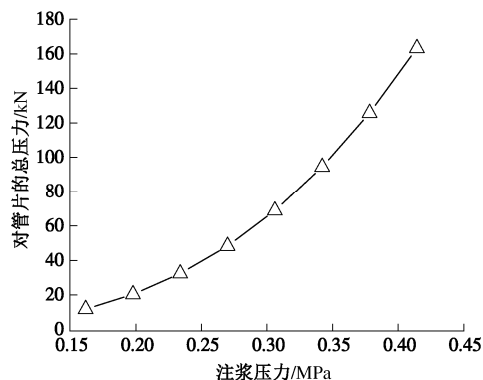


图 5 不同注浆压力作用下管片所受的浆液总压力

Fig. 5 Relation between total pressure on segments and grouting pressure

从图 4, 5 可以看出,浆液扩散半径随注浆压力的增加几乎呈线性增长;管片所受的浆液总压力随着注浆压力的增加而增加,且增长速率变快,当注浆压力从 0.16 MPa 增加到 0.414 MPa 时,浆液的扩散半径只增加了 2 倍多,而浆液对管片的总压力却增加了致 15 倍左右,由此可见,单纯的增加注浆压力,可能会导致浆液对管片的总压力过大而使管片破坏,即不能只靠增加浆液注浆压力来改善注浆效果。

#### 3.2 浆液性质(水灰比)的影响

依据文献[13]可知,当水灰比  $W/C$  改变时,其幂律流体浆液的流变方程中的参数也随之改变,即  $C$  与  $n$  值改变,本文采用水灰比为 0.5, 0.6, 0.7, 其不同水灰比所对应的  $C, n$  值如表 1 所示。

表 1 不同水灰比对应的  $C, n$  值

Table 1 Values of  $C$  and  $n$  under different water-cement ratios

水灰比 $W/C$	$C$	$n$
0.5	14.430	0.0027
0.6	8.632	0.0026
0.7	5.826	0.0022

在其它参数不变条件下,将不同水灰比下的  $C, n$  值分别代入公式中,得出在不同水灰比下,浆液扩散半径与注浆压力的关系与不同注浆压力作用下管片所受的浆液总压力关系分别如图 6, 7 所示。

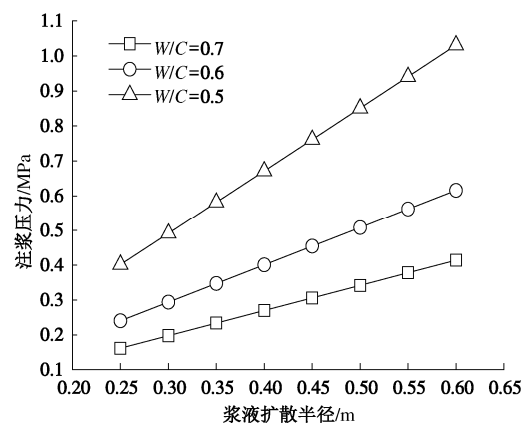


图 6 不同水灰比时浆液扩散半径与注浆压力关系图

Fig. 6 Relation between grouting pressure and grouting diffusion radius under different water-cement ratios

从图 6, 7 可以看出,当浆液扩散相同的半径时,水灰比越大其所需的注浆压力越小,且水灰比越大,增加相同的扩散半径所需的注浆压力越小;在相同注浆压力下,随着水灰比的增加,浆液对管片的总压力越大,且水灰比越大,其浆液对管片的总压力增长的幅度越快。因此考虑管片结构的受力安全,亦不能单纯通过改变水灰比的大小来改善注浆效果。

#### 3.3 地层渗透系数 $K'$ 值的影响

从前面的理论分析可知,  $K'$  值变化的本质是由于

土颗粒大小和颗粒级配的变化, 从而导致参数  $K_e$ ,  $u_e$  变化。在其他参数不变的情况下,  $K'$  值取 0.005, 0.010, 0.015, 0.020 cm/s, 其浆液扩散半径与注浆压力的关系与不同注浆压力作用下管片所受的浆液总压力关系分别如图 8, 9 所示。

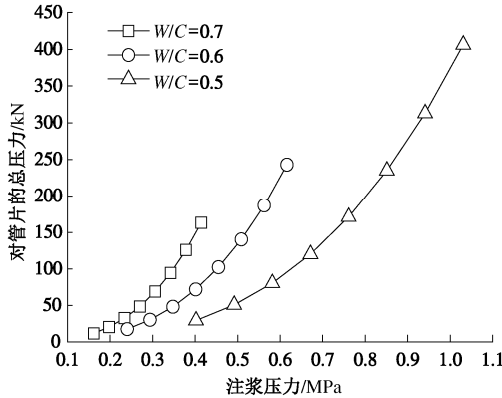


图 7 不同水灰比时不同注浆压力作用下管片所受的浆液总压力

Fig. 7 Relation between total pressure on segments and grouting pressure under different water-cement ratios

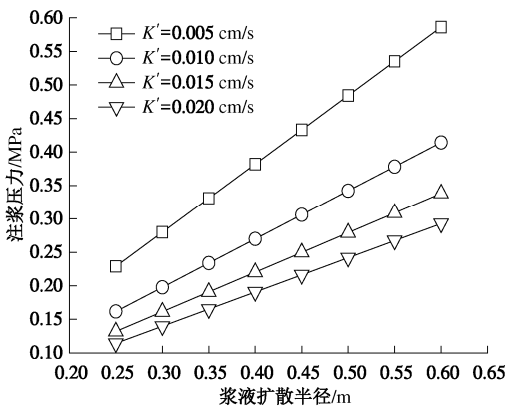


图 8 不同  $K'$  时浆液扩散半径与对应的注浆压力关系图

Fig. 8 Relation between grouting pressure and grouting diffusion radius under different values of  $K'$

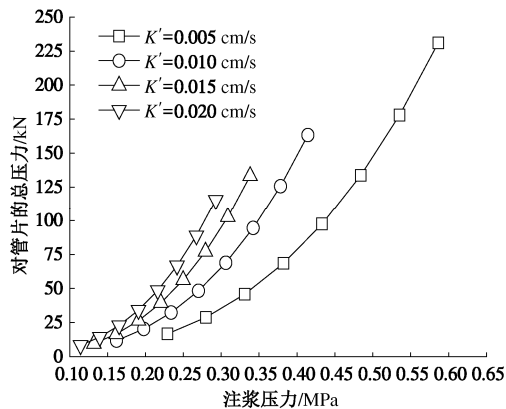


图 9 不同  $K'$  时不同注浆压力作用下管片所受的浆液总压力  
Fig. 9 Relation between total pressure on segments and grouting pressure under different values of  $K'$

从图 8, 9 可知, 当注浆压力一定时, 随着  $K'$  值的增加, 其扩散半径随之增大, 且  $K'$  值越小, 增大相同的扩散半径其所增加的注浆压力值越大; 当注浆压力一定时,  $K'$  值越大, 浆液对管片的总压力越大, 其浆液对管片的总压力增长的速率越快, 但增大相同浆液扩散半径时,  $K'$  值越大, 对管片产生的总压力的增量越小。因此, 在不同的砂性地层应选择合理的注浆压力来控制注浆效果。

### 3.4 地层地下水压力的影响

地层地下水的存在, 会阻碍浆液的扩散, 在其他参数不变的情况下, 本文对  $P_w$  值分别取 0, 0.02, 0.04, 0.06 MPa, 分析地下水对浆液扩散的影响, 根据其计算结果得出浆液扩散半径与注浆压力的关系, 及不同注浆压力作用下管片所受的浆液总压力关系分别如图 10, 11 所示。

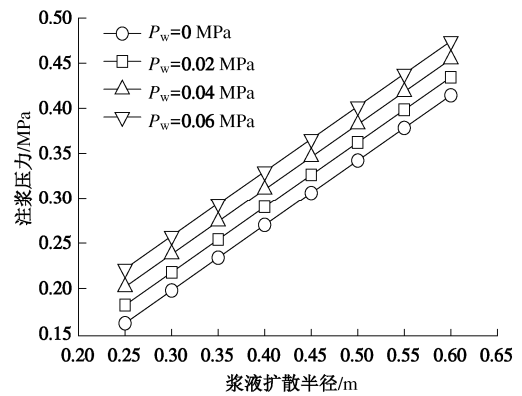


图 10 不同  $P_0$  时浆液扩散半径与对应的注浆压力关系图

Fig. 10 Relation between grouting pressure and grouting diffusion radius under different values of  $P_0$

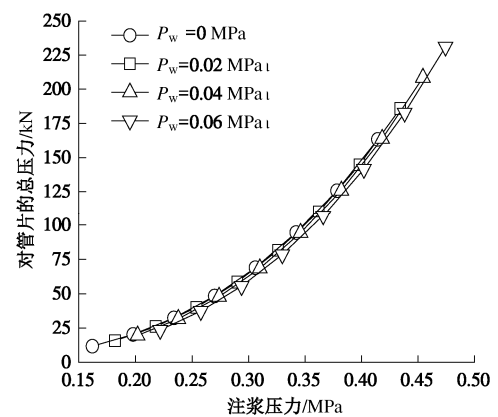


图 11 不同  $P_0$  时不同注浆压力作用下管片所受的浆液总压力  
Fig. 11 Relation between total pressure on segments and grouting pressure under different values of  $P_0$

从图 10, 11 可知, 当注浆压力一定时, 地下水压力越小, 浆液扩散的半径越大, 地下水压力的增加不会改变浆液扩散半径随注浆压力的增长幅度 (即曲线的斜率不变); 当浆液扩散半径一定时, 地下水压力

越大,其所需的注浆压力越大,且其增值等于地下水压力的变化值;随着地下水压力的增大,其浆液对管片的总压力的增长趋势几乎相同,即地下水压力的变化不会改变浆液对管片的总压力值。

#### 4 注浆参数控制

控制盾构管片注浆的两个重要参数为注浆压力与注浆量。注浆量通常用 $Q=V\lambda$ 确定,注浆压力大多靠经验确定。目前,盾构隧道壁后注浆通常采用四孔或六孔注浆,根据本文理论,各注浆孔的注浆半径所覆盖的面积至少将整个盾尾间隙包裹(其注浆效果如图12所示),而此时的浆液注浆压力可作为管片注浆压力的一个下限值。根据文献[14]取浆液无限扩张、螺栓剪切破坏,及考虑隧道埋深土体剪切破坏确定注浆压力的上限值;取保持地层稳定和浆液扩散半径所覆盖的面积至少将整个盾尾间隙包裹的注浆压力为下限值。分别取上限值的最小值及下限值的最大值确定的范围作为合理的浆液注浆压力范围。

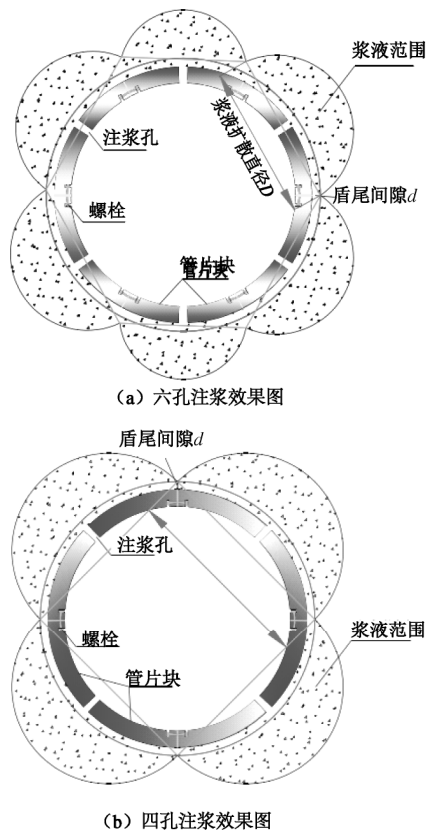


图12 不同注浆孔数的浆液注浆效果图

Fig. 12 Diagram of grouting effect under different grouting hole numbers

#### 5 结论

(1) 本文以幂律流体为研究对象,分别推导了基于均匀毛细管组和不均匀毛细管组理论的盾构隧道管

片注浆渗透扩散模型,并对两种扩散模型进行了比较后得出,有效黏度和等效渗透系数取值恰当时,可用均匀管组理论代替非均匀管组理论模型。

(2) 分析了注浆压力、水灰比、地层渗透系数及地下水压力对盾构隧道管片注浆半球形渗透扩散模型的扩散半径的影响,得出:幂律流体浆液扩散半径与注浆压力呈线性关系,注浆压力、水灰比、地层渗透系数越大,浆液的扩散半径越大,地下水压力越大,浆液的扩散半径越大。

(3) 分析了注浆压力、水灰比、地层渗透系数及地下水压力对浆液对管片产生的总压力的影响,得出:注浆压力、水灰比、地层渗透系数增大,浆液对管片的总压力增加,水灰比越大,其浆液对管片的总压力增长幅度越大,但地层渗透系数越大,其浆液对管片的总压力增长幅度越大,而地下水压力的变化对管片所受的总压力几乎不产生影响。

#### 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 tunnelling technology[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004: 21 - 22. (in Chinese))
- [2] 《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 Instance". Geotechnical grouting theory and engineering examples[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))
- [3] BAKER C. Comments on paper rock stabilization in rock mechanics[C]// Muler Springer-Verlag. New York, 1974.
- [4] 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))
- [5] 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))
- [6] 杨秀竹, 王星华, 雷金山. 宾汉型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, LIE Jin-shan. Study on grouting diffusion radius of Bingham fluids[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(6): 75 - 79. (in Chinese))

- [7] 杨志全, 侯克鹏, 郭婷婷, 等. 黏度时变性宾汉体浆液的柱一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))
- [8] 杨志全, 侯克鹏, 杨八九, 等. 流变参数时变性幂律型水泥浆液的柱形渗透注浆机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(7): 1415 – 1425. (YANG Zhi-quan, HOU Ke-peng, YANG Ba-jiu, et al. Study on column penetration grouting mechanism based on power-law cement grouts of time-dependent behavior of rheological parameters[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(7): 1415 – 1425. (in Chinese))
- [9] 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))
- [10] 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))
- [11] 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))
- [12] 曾祥熹. 泥浆流变学与黏度测量[R]. 长沙: 中南矿冶学院地质系探工教研室, 1983: 171 – 186. (ZENG Xiang-xi. Rheology of drilling mud and viscosimeasurement[R]. Changsha: Central Institute of Mining and Metallurgy Geology Exploration Work in Teaching and Research Section, 1983: 171 – 186.(in Chinese))
- [13] 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))
- [14] 苟长飞. 盾构隧道壁后注浆浆液扩散机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2013. (GOU Chang-fei. Study on the grouts diffusion mechanism of shield tunnel back-filled grouts[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese))