

文章编号:1001-7372(2013)01-0127-08

## 盾构隧道粘度时变性浆液壁后注浆渗透扩散模型

叶 飞,苟长飞,陈 治,刘燕鹏,张金龙

(长安大学 陕西省公路桥梁与隧道重点实验室,陕西 西安 710064)

**摘要:**在假定注浆浆液为粘度时变性流体,并在盾尾间隙影响厚度范围内均匀柱面扩散的前提下,应用达西定律对盾构壁后注浆渗透范围及浆液对管片造成的压力进行了理论推导,得到了浆液扩散半径及对管片产生压力的计算式。通过具体实例,对比分析了是否考虑粘度时变性 2 种条件下浆液扩散半径及对管片产生压力的计算结果,以及不同胶凝时间下浆液扩散半径及对管片产生压力的计算结果。分析结果表明:2 种条件下,浆液扩散半径及对管片产生的压力随注浆压力、注浆时间的变化规律不尽相同,粘度时变性对浆液扩散半径及对管片产生的压力影响显著,可通过调整浆液配比来改变粘度时变性,进而影响浆液扩散半径及对管片产生的压力,但浆液对单位面积管片的压力几乎不受粘度时变性的影响。

**关键词:**隧道工程;盾构隧道;理论推导;壁后注浆;粘度时变性;浆液扩散

**中图分类号:**U451 **文献标志码:**A

### Back-filled Grouts Diffusion Model of Shield Tunnel Considering Its Viscosity Degeneration

YE Fei, GOU Chang-fei, CHEN Zhi, LIU Yan-peng, ZHANG Jin-long

(Key Laboratory for Highway Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University,  
Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** Assuming that the back-filled grouts are viscosity degeneration fluids, and the grouts diffuse with cylinder surface in view of the influence of tail gap, the grouts diffusion area and the pressure on shield tunnel segments were derived with Darcy law. As a result, the formulae to calculate the radius and the pressure were acquired. Through specific examples, the diffusion radii and the pressures on segments when considering and neglecting the grouts viscosity degeneration were compared, as well as in the condition of different gel time. The results show that the change rules of the diffusion radii and the pressures on segments are not the same when considering or neglecting the grouts viscosity, and viscosity degeneration has a significant influence on the diffusion radii and the pressures on segments, which can be controlled by grout formulae, however, the pressures on unit areas of segments are almost not affected by grouts viscosity degeneration.

**Key words:** tunnel engineering; shield tunnel; theoretical derivation; back-filled grouting; viscosity degeneration; grout diffusion

收稿日期:2012-03-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51178052,50808020);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011JC099)

作者简介:叶 飞(1977-),男,陕西石泉人,副教授,工学博士,E-mail:xianyefei@126.com.

## 0 引言

盾构工法因机械化程度高、掘进速度快、对周围环境的影响小、施工安全性较高等优点,在城市交通、市政、电力等地下隧道修建过程中得到广泛应用<sup>[1]</sup>。盾构推进过程中,管片脱离盾尾后背后出现超挖空隙,即盾尾间隙,若不及时回填该间隙,势必造成地层变形,进而对邻近建筑物产生破坏性影响<sup>[2]</sup>。通常以一定的注浆压力把具备一定流动性的浆体压入盾尾间隙,并确保充填完全,这一过程被称为壁后注浆。壁后注浆除及时充填盾尾间隙,抑制天然土体变形,控制地面沉降,保证环境安全外,还可作为衬砌防水的第1道防线,提供长期、均质、稳定的防水功能,从而提高隧道抗渗性能;还可作为衬砌结构的加强层,使外力作用均匀化,确保管片衬砌的早期和后期稳定性<sup>[3]</sup>。因此,盾构壁后注浆是盾构工法必不可少的一道施工工序。壁后注浆施工不当时,可能会引发地表沉降超限,注浆浆液从盾尾流入盾构内部,管片上浮、错台、开裂、压碎或其他形式的破坏,注浆系统管路堵塞、管片注浆孔渗漏等问题<sup>[4-5]</sup>。所以必须在合理选择注浆浆液类型的基础上,严格控制注浆压力、注浆量、注浆位置等参数,以确保良好的注浆效果。

目前针对盾构隧道壁后注浆的研究主要有:①浆液本身的材料特性、变形特性和注浆施工方法。如张海涛等<sup>[6-8]</sup>结合浆液材料的室内配比试验,分析了各注浆材料对浆液性质的影响,对注浆材料配比进行了优化。②浆液分布、注浆效果检验与评价。如黄宏伟等<sup>[9-13]</sup>通过现场实测和模拟试验研究了隧道壁后探地雷达探测方法。③浆液对管片和周围土体产生的荷载。如Ezzeldine<sup>[14]</sup>用有限单元程序PI-SA模拟盾构推进,拼装衬砌及壁后注浆对地基变形的影响;Bezuijen等<sup>[15]</sup>对一隧道进行了壁后注浆现场监测,结果表明当开挖停止时,注浆液的浮力开始产生影响,同时随着浆液的硬化必将导致浮力的减少和水平压力的梯度小于水压力梯度。④浆液扩散机理。叶飞<sup>[16]</sup>引入等效孔隙率考虑盾尾间隙的影响,推导出了浆液扩散半径及对管片产生的压力计算式;韩月旺等<sup>[17-18]</sup>通过壁后注浆单元体模型试验研究了不同的注浆压力、注浆材料及围岩土质条件对注浆体变形及注浆压力消散的影响规律,提出了能够反映浆体变形规律的流变模型;李志明等<sup>[19]</sup>分别采用牛顿流体及宾汉姆流体推导出了土压平衡

盾构在粘土地层中同步注浆环向填充及纵向填充的力学模型及计算方法;袁小会等<sup>[20-21]</sup>用宾汉姆流体描述硬性浆液的流变特性,导出了其注入盾尾间隙过程中注浆压力衰减与注浆距离和注浆时间的关系以及注浆时间与扩散距离的关系。

在笔者之前的研究工作中,假定注浆浆液为牛顿流体,并在盾尾间隙影响厚度范围内均匀柱面扩散的前提下,通过引入等效孔隙率替代土体本身的孔隙率来考虑建筑间隙的影响,对盾尾注浆和管片注浆2种情况下的浆液渗透范围及因注浆而对管片造成的压力进行了理论推导,得到了浆液扩散半径及对管片产生的压力计算式。但该分析过程未考虑浆液的粘度时变性。本文中在前期研究的基础上,依然采用理论分析的方法,基于浆液粘度时变性理论,假设浆液的粘度随着时间呈指数函数形式变化,推导盾构隧道壁后注浆的柱面渗透扩散范围及注浆对管片造成压力的计算式;并通过实例分析,讨论考虑浆液粘度时变性和不考虑浆液粘度时变性2种条件下,浆液扩散半径及对管片产生的压力与注浆压力、注浆时间等因素的关系,以及胶凝时间对注浆扩散的影响。

## 1 浆液的流变性

浆液的流变性反映了浆液在外力作用下的流动性,浆液的流动性越好,流动过程中的压力损失越小,浆液在岩土中扩散的越远。反之,浆液流动过程中的压力损失大,浆液不易扩散<sup>[22]</sup>。因此,盾构隧道壁后注浆过程不可避免地受浆液的流变性影响。

盾构壁后注浆所用浆液一般为水泥基浆液,阮文军<sup>[23-24]</sup>的研究结果表明:水泥浆分属3种流型,即牛顿流体、宾汉姆流体和幂律流体;水灰比 $R_{w/c} > 2.0$ 时属于牛顿流体, $R_{w/c} = 0.8 \sim 1.0$ 时属于宾汉姆流体, $R_{w/c} = 0.5 \sim 0.7$ 时属于幂律流体。水泥基浆液在注浆过程中流型不变,其粘度除与温度、剪切速率 $\gamma$ 等有关外,还与切变运动时间(剪切持续时间)有关。盾构隧道壁后注浆单液浆的水灰比 $R_{w/c} = 1.2 \sim 1.6$ ,其流型特性在牛顿流体和宾汉姆流体之间,注浆时,浆液的粘度随时间发生变化,从而引起渗透系数发生变化, $t$ 时刻浆液的粘度 $\mu_g(t)$ 可用指数函数表示为<sup>[25]</sup>

$$\mu_g(t) = \mu_{g0} e^{\alpha t} \quad (1)$$

式中: $\mu_{g0}$ 为浆液的初始粘度; $t$ 为浆液拌和时间; $\alpha$ 为与浆液、介质的孔隙率有关的参数。

## 2 注浆扩散机理分析

### 2.1 基本假设

为了方便研究,对盾构壁后注浆过程进行如下假设:

- (1)浆液为不可压缩的均质的各向同性流体;
- (2)浆液为粘度时变性流体,浆液粘度随时间的变化满足式(1);
- (3)在一定厚度内浆液沿柱面均匀渗透扩散;
- (4)浆液在注入时刚好拌和成功,即浆液拌和时间等于注浆时间。

### 2.2 理论推导

盾构壁后注浆按照注浆孔位置的不同可分为盾尾注浆和管片注浆,依然采用笔者在文献[4],[16]中的研究思路,以下分别就 2 种类型的注浆扩散半径及对管片产生的压力计算式进行理论推导。

#### 2.2.1 盾尾注浆

盾尾注浆时,浆液的渗透扩散模型见文献[4],设  $P_g$  为注浆压力,  $P_w$  为注浆点处的地下水压力,  $r_0$  为注浆孔半径,  $r$  为经过注浆时间  $t$  (拌和时间)后浆液的扩散半径,  $D$  为浆液扩散体的厚度,即注浆浆液的影响厚度,依据基本假设,取  $D = \lambda d$ ,  $\lambda$  为注入率,  $d$  为盾尾间隙厚度。

浆液在地层中的渗透系数  $K_g(t)$  可表示为

$$K_g(t) = \frac{K_w}{\beta(t)} \quad (2)$$

式中:  $K_w$  为水在砂性土中的渗透系数;  $\beta(t)$  为  $t$  时刻浆液粘度与水的粘度之比,  $\beta(t) = \mu_g(t) / \mu_w$ ,  $\mu_w$  为水的粘度。

结合式(1),可得考虑浆液粘度时变性的渗透系数为

$$K_g(t) = K_w \frac{\mu_w}{\mu_{g0}} e^{-at} = \frac{K_w}{\beta_0} e^{-at} \quad (3)$$

式中:  $\beta_0$  为浆液初始粘度与水的粘度之比,即  $\beta_0 = \mu_{g0} / \mu_w$ 。

设  $t$  时刻在  $r$  与  $r + dr$  之间浆液稳定渗透扩散,其渗流运动方程为

$$v = -K_g(t) \frac{dh}{dr} \quad (4)$$

式中:  $v$  为浆液扩散速度;  $h$  为浆液压力水头高度。

将式(3)代入式(4)得

$$dh = -\frac{\beta_0 v}{K_w e^{-at}} dr \quad (5)$$

设单孔注浆量为  $q$ , 又因  $v = q / (\pi r \lambda d)$ , 密度为  $\rho$  的浆液满足  $dh = dP / (\rho g)$ ,  $g$  为重力加速度, 则式

(5)可化为

$$dP = -\frac{\beta_0 q \rho g}{K_w e^{-at} \pi r \lambda d} dr \quad (6)$$

根据边界条件,在  $r_0$  处浆液压力为  $P_g$ ; 当浆液扩散半径达到  $r$  时,浆液压力为  $P_r$ 。因而有

$$q = \frac{K_w \pi \lambda d e^{-at} (P_g - P_r)}{\rho g \beta_0 \ln(r/r_0)} \quad (7)$$

对式(7)积分,得  $t$  时刻的注浆总量  $Q$  为

$$Q = \int_0^t q dt = \frac{K_w \pi \lambda d (P_g - P_r)}{\rho g \beta_0 \ln(r/r_0)} \frac{1 - e^{-at}}{\alpha} \quad (8)$$

将  $Q = \pi r^2 \lambda d n' / 2$  代入式(8)中,可得浆液压力分布式为

$$P_r = P_g - \frac{r^2 n' \beta_0 \rho g \ln(r/r_0)}{2 K_w} \frac{\alpha}{1 - e^{-at}} \quad (9)$$

式中:  $n'$  为浆液扩散范围的等效孔隙率,由土体初始孔隙率  $n$  及注入率  $\lambda$  计算

$$n' = n + \frac{1 - n}{\lambda} \quad (10)$$

令  $P_r = P_w$ , 并记  $P_g - P_w = \Delta P$ , 由式(9)可得浆液扩散半径为

$$r = \sqrt{\frac{2 K_w \Delta P}{\beta_0 \rho g n' \ln(r/r_0)} \frac{1 - e^{-at}}{\alpha}} \quad (11)$$

同时由式(9)可得浆液对管片产生的压力  $F_g$  可表示为

$$F_g = \int_0^r P_r \pi r dr = \frac{\pi r^2}{2} P_g - \frac{\pi n' \beta_0 \rho g}{8 K_w} \cdot \left[ \ln\left(\frac{r}{r_0}\right) - \frac{1}{4} \right] r^4 \frac{\alpha}{1 - e^{-at}} \quad (12)$$

式(9),(11),(12)为考虑浆液粘度时变性条件下盾尾注浆柱面扩散理论的基本公式。

#### 2.2.2 管片注浆

管片注浆时,浆液的渗透扩散模型见文献[4],[16]。管片上的注浆孔距离盾尾有一定距离,因此,通过管片注浆孔进行管片注浆时,浆液能在该距离内以完整的柱面扩散;当扩散半径超出管片注浆孔与盾尾的距离时,浆液不再以完整的柱面扩散。本文中仅研究完整柱面扩散范围内的管片注浆。

经过类似于第 2.2.1 节中关于盾尾注浆的推导,可得到与式(9)和式(11)相同的浆液压力分布与浆液扩散半径的表达式。但此时浆液对管片产生压力的表达式为

$$F_g = \pi r^2 P_g - \frac{\pi n' \beta_0 \rho g}{4 K_w} \left[ \ln\left(\frac{r}{r_0}\right) - \frac{1}{4} \right] \cdot r^4 \frac{\alpha}{1 - e^{-at}} \quad (13)$$

比较式(13)与式(12)可知,采用管片注浆时,浆

液对管片产生的压力是采用盾尾注浆时的2倍(实际上,依据盾尾与注浆孔的间距情况,其倍数应该在1~2倍之间),这种差别主要是由浆液扩散范围的不同引起的。

### 2.3 注浆时效函数

不考虑浆液粘度时变性条件下盾尾注浆柱面扩散理论的基本公式可分别由下式表示:

浆液压力分布可表示为

$$P_r = P_g - \frac{r^2 n' \beta_0 \rho g \ln(r/r_0)}{2K_w t} \quad (14)$$

浆液扩散半径可表示为

$$r = \sqrt{\frac{2K_w \Delta P}{\beta_0 \rho g n' \ln(r/r_0)} t} \quad (15)$$

浆液对管片产生的压力可表示为

$$F_g = \frac{\pi r^2}{2} P_g - \frac{\pi n' \beta_0 \rho g}{8K_w t} \left[ \ln\left(\frac{r}{r_0}\right) - \frac{1}{4} \right] r^4 \quad (16)$$

将式(9),(11),(12)分别与式(14),(15),(16)对比可知,考虑浆液粘度时变性条件下的盾尾注浆柱面扩散基本公式中的因子 $(1 - e^{-\alpha t})/\alpha$ 与不考虑时变性公式中的因子 $t$ 对应;管片注浆中存在类似规律。据此,本文中定义注浆时效函数 $\varphi(t)$ 的表达式为

$$\varphi(t) = \frac{1 - e^{-\alpha t}}{\alpha} \quad (17)$$

注浆时效函数曲线如图1所示。由式(17)和图1可知,注浆时效函数在注浆时间趋于无穷大时,存在极限值 $1/\alpha$ 。这与浆液的性质正好相吻合,即随着注浆时间的推移,浆液最终会胶凝,不再扩散。

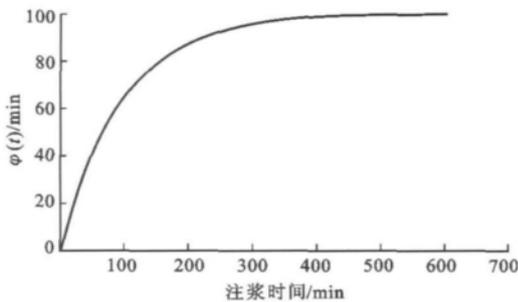


图1 注浆时效函数曲线

Fig. 1 Timeliness Function Curve of Grouting

### 3 实例分析

假定 $r_0 = 2.5 \text{ cm}$ ,  $n = 20\%$ , 渗透系数 $K = 5 \times 10^{-4} \text{ cm}$ ,  $\beta_0 = 4$ ,  $d = 10 \text{ cm}$ ,  $\lambda = 1.5$ ,  $P_w = 0$ 。由文献[23],[24]的试验数据可暂取 $\alpha = 1/6000 \text{ s}^{-1}$ 。将 $n = 20\%$ 代入式(10)可得浆液扩散范围内土体的等效孔隙率 $n' = 73.33\%$ 。原土体空隙比 $e_0 = n/(1 - n) = 0.25$ , 土体等效空隙比 $e' = n'/(1 - n') = 2.75$ 。由考虑土

体空隙比 $e$ 的渗透系数经验公式 $K = 2(d_{10}e)^2$ 可得土体等效渗透系数 $K' = 6.05 \times 10^{-2} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $d_{10}$ 为土的有效粒径。

### 3.1 注浆压力的影响

当注浆时间 $t = 30 \text{ min}$ , 注浆压力分别取 $0.1 \sim 0.5 \text{ MPa}$ (间隔 $0.05 \text{ MPa}$ )时, 将各参数代入式(11), 由迭代法求得浆液扩散半径, 将浆液扩散半径代入式(12), 进而求得浆液对管片产生的压力。由浆液对管片产生的压力和浆液扩散半径可求得浆液对单位面积管片的压力。同样将各个参数代入式(14)~(16)中得到相应的扩散半径、对管片产生的压力和对单位面积管片的压力。上述计算结果如图2~4所示。

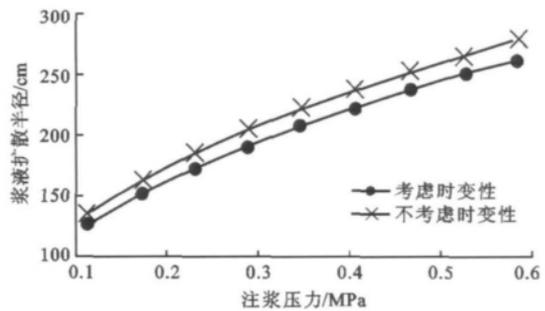


图2 浆液扩散半径与注浆压力关系曲线

Fig. 2 Relationship Between Diffusion Radii and Grouting Pressures

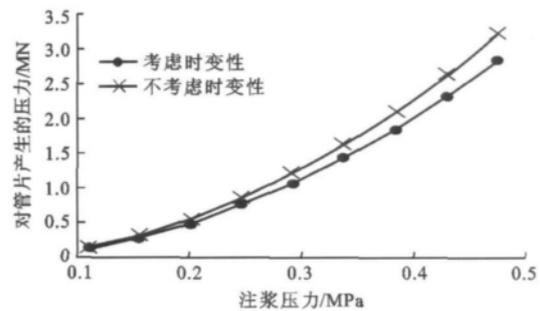


图3 对管片产生的压力与注浆压力关系曲线

Fig. 3 Relationship Between Pressures on Segments and Grouting Pressures

由图2可知,2种条件计算所得的浆液扩散半径都随注浆压力的增大而增大。但是,在相同注浆压力和注浆时间下,浆液扩散半径考虑时变性的计算值小于不考虑时变性的计算值,两者的差距随着注浆压力的增大而增大。考虑粘度时变性时,随着时间推移浆液粘度不断增大,渗透系数不断减小,从而导致浆液扩散半径比不考虑粘度时变性时小。

由图3可知,2种条件计算所得的浆液对管片产生的压力都随着注浆压力的增大而增大。但是,

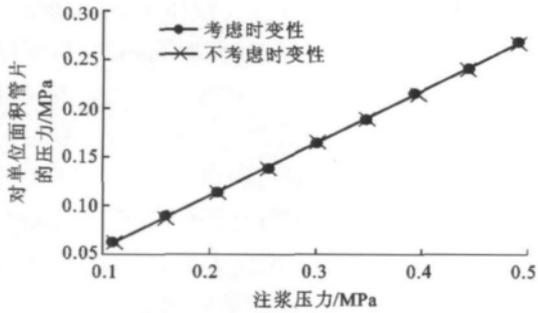


图 4 对单位面积管片产生的压力与注浆压力关系曲线

Fig. 4 Relationship Between Pressures on Unit Areas of Segments and Grouting Pressures

在相同注浆压力和注浆时间下,浆液对管片产生的压力考虑时变性的计算值小于不考虑时变性的计算值,两者的差距随着注浆压力的增大而增大。随注浆压力的增大,浆液对管片产生的压力受浆液粘度时变性影响逐渐变大。

由图 4 可知,2 种条件计算所得的浆液对单位面积管片的压力与注浆压力的关系曲线几乎重合,浆液对单位面积管片的压力都随着注浆压力增大呈现近似的线性增长。可见,浆液对单位面积管片的压力受浆液粘度时变性的影响微小。

### 3.2 注浆时间的影响

当注浆压力  $P_g = 0.3 \text{ MPa}$ ,注浆时间分别取为 10~90 min 时,类似第 3.1 节,求得 2 种情况下的浆液扩散半径、对管片产生的压力和对单位面积管片的压力。计算结果如图 5~7 所示。

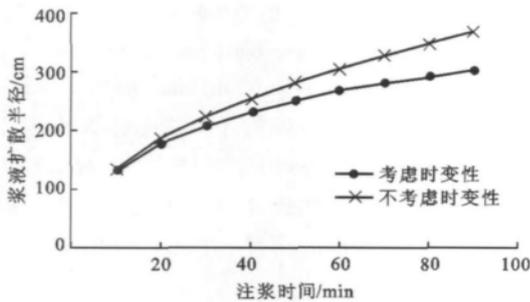


图 5 浆液扩散半径与注浆时间关系曲线

Fig. 5 Relationship Between Diffusion Radii and Grouting Time

由图 5 可知,2 种条件计算所得的扩散半径都随注浆时间的推移而增大。但是,在相同注浆压力和注浆时间下,考虑时变性的计算值小于不考虑时变性的计算值,两者的差距随着注浆时间的推移而增大。可见,注浆时间较长时,浆液扩散半径受浆液粘度时变性影响显著。

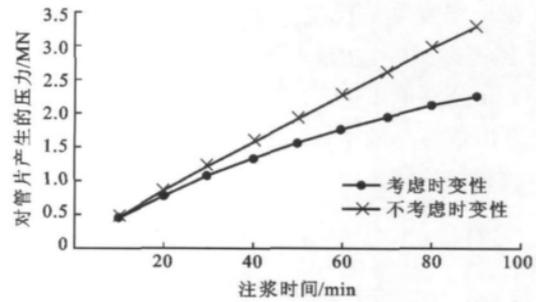


图 6 对管片产生的压力与注浆时间关系曲线

Fig. 6 Relationship Between Pressure on Segments and Grouting Time

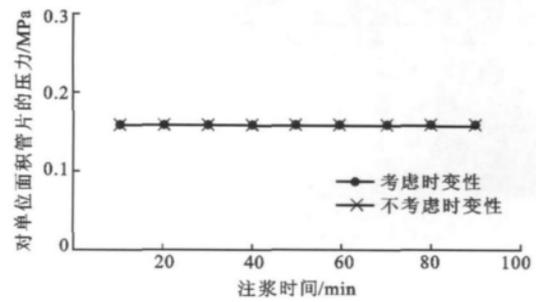


图 7 对单位面积管片产生的压力与注浆时间关系曲线

Fig. 7 Relationship Between Pressures on Unit Areas of Segments and Grouting Time

由图 6 可知,2 种条件计算所得的浆液对管片产生的压力都随注浆时间的推移而增大。浆液对管片产生的压力与注浆时间关系曲线,不考虑时变性时近似呈直线,考虑时变性时不再呈直线。在相同注浆压力和注浆时间下,浆液扩散半径考虑时变性的计算值小于不考虑时变性的计算值,两者的差距随着注浆时间的推移而增大。可见,浆液对管片产生的压力受浆液粘度时变性影响较大,当注浆时间较长时,这种影响将更趋显著。

由图 7 可知,2 种条件计算所得的浆液对单位面积管片的压力与注浆压力的关系曲线几乎重合且呈直线。可见,浆液对单位面积管片的压力几乎不受浆液粘度时变性的影响。

### 3.3 胶凝时间的影响

设浆液胶凝时间为  $T$ ,浆液凝胶时的粘度  $\mu_T$  可表示为

$$\mu_T = \mu_{g0} e^{\alpha T} \tag{18}$$

浆液的胶凝时间可表示为

$$T = \frac{1}{\alpha} \ln\left(\frac{\mu_T}{\mu_{g0}}\right) \tag{19}$$

由式(19)可知,在浆液初始粘度和凝胶粘度一定的情况下, $T$  与  $\alpha$  有关, $\alpha$  值大的  $T$  值小。可以认

为  $\alpha$  在一定程度上反映了浆液的胶凝时间。当注浆压力取 0.3 MPa, 注浆时间  $t$  分别取 30, 60, 90, 120 min,  $1/\alpha$  分别取 1 000~9 000 s 时, 利用本文公式分别计算出浆液扩散半径、对管片产生的注浆压力和对单位面积管片的压力。计算结果如图 8~10 所示。

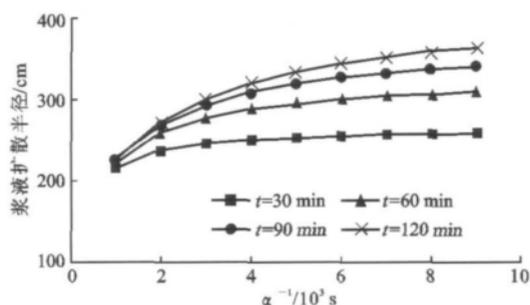


图 8 浆液扩散半径与  $\alpha^{-1}$  关系曲线

Fig. 8 Relationship Between Diffusion Radii and  $\alpha^{-1}$

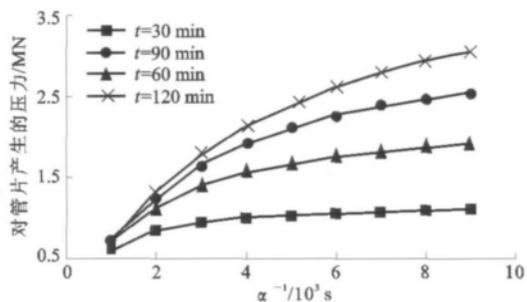


图 9 对管片产生的压力与  $\alpha^{-1}$  关系曲线

Fig. 9 Relationship Between Pressures on Segments and  $\alpha^{-1}$

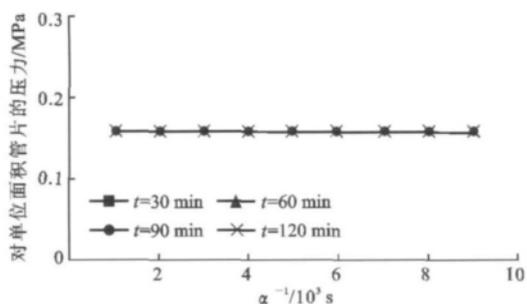


图 10 对单位面积管片产生的压力与  $\alpha^{-1}$  关系曲线

Fig. 10 Relationship Between Pressures on Unit Areas of Segments and  $\alpha^{-1}$

由图 8 可知, 浆液扩散半径随着  $1/\alpha$  的增大而增大, 注浆压力和注浆时间相同时, 胶凝时间长的浆液扩散半径较大。胶凝时间长的浆液在同一时刻的扩散半径比胶凝时间短的浆液大, 并且在胶凝时间短的浆液停止扩散后还能继续扩散, 所以最终的扩散半径大于胶凝时间短的浆液。可见, 浆液的胶凝时间对扩散半径的影响显著。

由图 9 可知, 浆液对管片产生的压力随着  $1/\alpha$  的增大而增大, 注浆压力和注浆时间相同时, 浆液胶凝时间长的浆液对管片产生的压力较大。胶凝时间长的浆液在同一时刻对管片产生的压力比胶凝时间短的浆液大, 并且在胶凝时间短的浆液停止扩散后还能继续扩散, 最终的扩散面积大于胶凝时间短的浆液, 这使其对管片产生的压力更大。可见, 浆液对管片产生的压力受胶凝时间的影响显著。

由图 10 可知, 注浆时间分别为 30, 60, 90, 120 min 时, 浆液对单位面积管片的压力与  $1/\alpha$  关系曲线重合且近似呈水平直线。可见, 浆液对单位面积管片的压力几乎不受浆液胶凝时间的影响。

#### 4 注浆压力分布

依然采用本文中第 3 节中的假设条件, 并取注浆压力为 0.3 MPa, 注浆时间为 30 min, 分别计算 2 种条件下管片承受的注浆压力与浆液扩散半径间的关系曲线, 如图 11 所示。

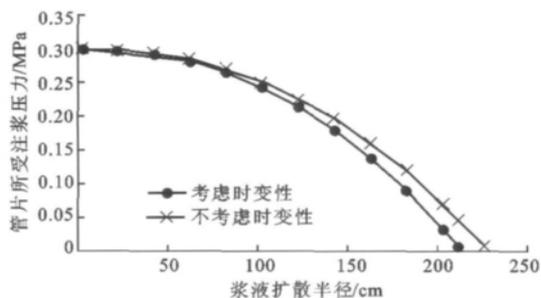


图 11 管片所受注浆压力与浆液扩散半径的关系曲线

Fig. 11 Relationship Between Pressures on Segments and Grouts Diffusion Radii

从图 11 可知, 2 种条件下, 浆液对管片产生的压力都呈抛物线形分布, 但浆液压力、扩散半径考虑时变性时较不考虑时变性小, 浆液压力的差距随扩散半径的增大而减小。可见, 浆液粘度时变性对注浆压力分布影响显著。

#### 5 结语

(1) 浆液扩散半径、浆液对管片产生的压力受浆液粘度时变性影响明显, 其显著程度随浆液扩散半径、注浆时间的增大而增大; 浆液对单位面积管片的压力几乎不受浆液粘度时变性影响。

(2) 浆液扩散半径、浆液对管片产生的压力受浆液胶凝时间的影响显著, 胶凝时间长的浆液扩散半径和对管片产生的压力较大。

(3)在盾构隧道壁后注浆施工中,可通过调整材料配比来改变浆液胶凝时间,通过调整注浆压力和注浆时间来改变浆液扩散范围和对管片产生的压力。

#### 参考文献:

#### References:

- [ 1 ] 江玉生,王春河,江 华,等. 盾构始发与到达——端头加固理论研究与工程实践[M]. 北京:人民交通出版社,2011.  
JIANG Yu-sheng, WANG Chun-he, JIANG Hua, et al. Theoretical Research & Engineering Practice of Ground Improvement at TBM Launching & Break Through Area [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [ 2 ] 张凤祥,傅德明,杨国祥,等. 盾构隧道施工手册[M]. 北京:人民交通出版社,2005.  
ZHANG Feng-xiang, FU De-ming, YANG Guo-xiang, et al. Construction Handbook for Shield Tunnel [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [ 3 ] 张凤祥,朱合华,傅德明. 盾构隧道[M]. 北京:人民交通出版社,2004.  
ZHANG Feng-xiang, ZHU He-hua, FU De-ming. Shield Tunnel [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [ 4 ] 叶 飞,朱合华,何 川. 盾构隧道壁后注浆扩散模式及对管片的压力分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 307-1312.  
YE Fei, ZHU He-hua, HE Chuan. Back-filled Grouts Diffusion Model and Its Pressure to Segments of Shield tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1307-1312.
- [ 5 ] 王 晖,李大勇,夏广红. 盾构机盾尾注浆施工中存在的问题及其对策分析[J]. 苏州科技学院学报:工程技术版, 2004, 17(1): 40-45.  
WANG Hui, LI Da-yong, XIA Guang-hong. Analysis of Problems Arising from and Measures Taken in the Construction of Grouting at the Tail of the Shield Machine[J]. Chinese Journal of University of Science and Technology of Suzhou: Engineering and Technology, 2004, 17(1): 40-45.
- [ 6 ] 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: Tongji University, 2007.
- [ 7 ] 张海涛. 盾构同步注浆材料试验研究[J]. 铁道勘测与设计, 2009(4): 68-72.  
ZHANG Hai-tao. Study on Test for Shield Simultaneous Grouting Material [J]. Railway Survey and Design, 2009(4): 68-72.
- [ 8 ] 梁精华. 盾构隧道壁后注浆材料配比优化及浆体变形特性研究[D]. 南京:河海大学,2006.  
LIANG Jing-hua. Study on the Proportion of Backfill-grouting Materials and Grouting Deformation Properties of Shield Tunnel[D]. Nanjing: Hehai University, 2006.
- [ 9 ] 黄宏伟,刘通剑,谢雄耀. 盾构隧道壁后注浆效果的雷达探测研究[J]. 岩土力学, 2003, 14(增): 353-356.  
HUANG Hong-wei, LIU Ju-jian, XIE Xiong-yao. Application of GPR to Grouting Distribution Behind Segment in Shield Tunnel [J]. Rock and Mechanical, 2003, 24(S): 353-356.
- [10] 黄宏伟,杜 军,谢雄耀. 盾构隧道壁后注浆的探地雷达探测模拟试验[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(2): 243-248.  
HUANG Hong-wei, DU Jun, XIE Xiong-yao. Simulation of GPR Detecting of Grouting Materials Behind Shield Tunnel Segments [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(2): 243-248.
- [11] 杜 军. 盾构隧道壁后注浆探测图像识别及沉降控制研究[D]. 上海:同济大学,2006.  
DU Jun. Study on Image Identification of Grouting Distribution Behind Shield Tunnel Segment with GPR and Settlement Control [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [12] 杜 军,黄宏伟,谢雄耀. 隧道壁后注浆体的探地雷达探测模拟试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(6): 817-820.  
DU Jun, HUANG Hong-wei, XIE Xiong-yao. Research on the Simulation Examination About Detection of Grouting Material Behind Shield Tunnel Segment[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(6): 817-820.
- [13] 钟小春,贾彩虹,赵 赫. 盾构隧道壁后注浆性能及效果监测研究[J]. 中国科技论文在线, 2011, 6(5): 347-350.  
ZHONG Xiao-chun, JIA Cai-hong, ZHAO He. Study on Performances and Effect Monitoring for Backfill Grouting of Shield Tunnel[J]. Sciencepaper Online, 2011, 6(5): 347-350.
- [14] EZZELDINE O Y. Estimation of the Surface Displacement Field Due to Construction of Cairo Metro Line El Khalafawy-St. Therese [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1999, 14(3): 267-

- 279.
- [15] BEZUIJEN A, TALMON A M, KAALBERG F J, et al. Field Measurement of Grout Pressures During Tunneling of the Sophia Rail Tunnel [J]. Soil and Foundations, 2004, 44(1): 39-48.
- [16] 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.
- [17] 韩月旺, 钟小春, 虞兴福. 盾构壁后注浆体变形及压力消散特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(6): 1142-1147, 1175.  
HAN Yue-wang, ZHONG Xiao-chun, YU Xing-fu. Experimental Research on the Backfill Grout Deformation and Grout Pressure Dissipation of Shield Tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(6): 1142-1147, 1175.
- [18] 韩月旺, 梁精华, 袁小会. 盾构隧道壁后注浆体变形模型及土体位移分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增2): 3646-3652.  
HAN Yue-wang, LIANG Jing-hua, YUAN Xiao-hui. Deformation Model of Backfill Grouting and Ground Movement Analysis of Shield Tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S2): 3646-3652.
- [19] 李志明, 廖少明, 戴志仁. 盾构同步注浆填充机理及压力分布研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(11): 1752-1757.  
LI Zhi-ming, LIAO Shao-ming, DAI Zhi-ren. Theoretical Study on Synchronous Grouting Filling Patterns and Pressure Distribution of EPB Shield Tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(11): 1752-1757.
- [20] 袁小会, 韩月旺, 钟小春. 盾构隧道壁后注浆压力分布模型[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(1): 18-25.  
YUAN Xiao-hui, HAN Yue-wang, ZHONG Xiao-chun. Pressure Distribution Model of Simultaneous Backfill Grouting of Shield Tunnel [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(1): 18-25.
- [21] 范昭平, 韩月旺, 方忠强. 盾构壁后注浆压力分布计算模型[J]. 公路交通科技, 2011(3): 95-100.  
FAN Zhao-ping, HAN Yue-wang, FANG Zhong-qiang. Calculating Model of Backfill Grouting Pressure Distribution for Shield Tunnel [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011(3): 95-100.
- [22] 《岩土注浆理论与工程实例》协作组. 岩土注浆理论与工程实例[M]. 北京: 科学出版社, 2001.  
Group of *Injecting Theory and Engineering Cases for Geotechnical Engineering Compilation*. Injecting Theory and Engineering Cases for Geotechnical Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [23] 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, 21(1): 69-73.  
RUAN Wen-jun. Research on Diffusion of Grouting and Basic Properties of Grouts [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 21(1): 69-73.
- [24] 阮文军. 基于浆液粘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.
- [25] 蔡胜华, 黄智勇, 董建军. 注浆法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.  
CAI Sheng-hua, HUANG Zhi-yong, DONG Jian-jun. Grouting [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 2006.