

盾构同步注浆浆液压力影响因素及扩散机理

胡长明^{1,2}, 郭建霞¹, 梅源¹, 王志宇¹, 袁一力¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 为揭示盾构同步注浆浆液在盾尾空间中的环向填充和扩散机理, 对现有浆液扩散理论研究进行梳理, 总结并分析了影响浆液扩散和压力分布的因素, 在考虑流体运动双向摩擦阻力的基础上, 基于简化假设条件分析了盾尾环向流体微元空间力学特性, 建立了浆液在盾尾空间中的二元流环形填充扩散模型。同时根据不同流体的流变特性, 分别推导了牛顿流体和宾汉姆流体两种流变模型的浆液压力扩散模型理论计算式, 最后通过工程算例进行验证分析。结果表明, 所建模型计算结果与实际监测结果吻合度较好。文中所建浆液扩散模型较已有研究模型能更全面揭示浆液的空间流动特性。在浆液注入盾尾空隙后, 浆液重度和自身剪切作用对浆液扩散和初始压力分布具有决定性的作用; 浆液填充时间的大小对模型计算结果有显著影响。文中所建模型可用于分析稳定性地层盾构同步注浆浆液在盾尾空隙中的环向填充过程和压力分布规律。

关键词: 盾构隧道; 同步注浆; 浆液扩散; 牛顿流体; 宾汉姆流体

中图分类号: U451

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)05-0617-09

Influence factors and diffusion mechanism of pressure of shield synchronous grouting slurry

HU Changming^{1,2}, GUO Jianxia¹, MEI Yuan¹, WANG Zhiyu¹, YUAN Yili¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering,
Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to reveal the circular filling and diffusion mechanism of synchronous grouting slurry in shield tail space, this study summarizes and analyzes the factors affecting the diffusion and pressure distribution of slurry. By consider the two-way friction resistance of fluid motion, the space mechanics for the fluid micro-element at any position of circumferential is analyzed and the circumferential filling and diffusion model of slurry with two dimensional flow is established. Secondly, according to the rheological properties and rheological models of Newtonian fluid and Bingham fluid, the theoretical models of grout diffusion of synchronous grouting are deduced. Finally, an engineering example is used to verify the model. It is concluded that the numerical results are in good agreement with the field monitoring data and can demonstrate the flow properties of slurry in space more comprehensively. It also shows that after the slurry is injected into the shield tail, the slurry gravity and the shear action determine the initial pressure, and the filling time of slurry has a significant influence on the calculated results of the model. This model can be applied to analyze the circumferential filling process and pressure distribution characteristic of synchronous grouting slurry in tunnel boring machine (TBM) tail under the stable strata.

Key words: shield tunnel; synchronized grouting; slurry diffusion; Newtonian fluid; Bingham fluid

当前盾构施工技术以其独特的优势在隧道施工过程中占据着重要地位, 但盾构施工不可避免地会对周围环境造成扰动和影响, 如地面沉降, 临近建筑物倾斜、沉降, 地下管线破裂等。在盾构施工过程中, 盾尾同步注浆是控制地层变形的关键施工工艺^[1], 而注浆压力是决定浆液在管片壁

后充填扩散及压力分布的重要参数, 其大小直接影响着既有建筑物和地层的沉降。另外盾尾同步注浆浆液压力的分布形式对地层变形和管片结构受力变形具有决定作用^[2-3]。研究盾构施工同步注浆浆液填充及扩散机理对控制地面沉降、管片变形及位移等具有重要意义。

收稿日期: 2019-05-10

修改稿日期: 2020-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(51408463); 陕西省教育厅专项科研计划项目(17JK0424)

第一作者: 胡长明(1963—), 男, 教授, 博士, 从事地下工程施工技术与管理研究工作。E-mail: 13609161448@163.com

通信作者: 郭建霞(1985—), 女, 博士生, 从事地下隧道工程安全质量及风险控制研究。E-mail: jianxiaguo1986@163.com

关于盾尾注浆浆液扩散及压力分布问题,学者们分别从数值模拟^[3]、现场试验^[4]、模型试验^[5]及理论分析^[6-13]角度进行了研究.其中基于理论分析建立的浆液扩散模式包括半球面扩散^[8]、柱面扩散^[9]、扇形扩散^[7]、沿隧道横断面环形流动扩散^[10-13]等,半球面扩散和柱面扩散是针对管片注浆孔注浆建立的浆液扩散模式,扇形扩散和环形流动扩散是针对同步注浆工艺提出的浆液扩散模式.目前针对同步注浆浆液的扩散模式以环形流动扩散研究较多,然而在对浆液扩散问题进行力学分析时,其中一些研究将管片环外壁和周围地层对浆液的流动阻碍作为作用于浆液的沿程阻力^[7,10-12],另一些研究将盾尾横断面、已注入浆液对浆液的流动阻碍作为作用于浆液的沿程阻力^[13].由此可以看出以上研究工作都只考虑浆液在过流断面上一个方向的流速变化情况(即将浆液流动假设为一元流动),未能全面揭示浆液在全流动断面上的流变特性,而且考虑流体不同方向流变特性所得计算结果也不相同.此外,在分析流体在矩形截面流道的流动规律时,若长宽比小于10,应当将流体流动视为二元流动,考虑双向沿程阻力的作用^[14].

基于以上分析,本文在论述了盾尾同步注浆浆液环向填充过程的基础上,分析了影响浆液压力扩散的相关因素,并在考虑浆液流动时受双向沿程阻力作用的基础上,建立了浆液在盾尾空间中二元流环形扩散空间力学模型,最后基于牛顿流体和宾汉姆流体的流变特性分别推导了浆液压力分布理论计算式,为盾构同步注浆浆液压力分析提供新的理论依据.

1 浆液填充过程及扩散影响因素

1.1 浆液在盾尾间隙的环向填充及压力扩散

在盾构掘进过程中,浆液在注入盾尾间隙后沿着一定路径进行充填,其运动规律取决于自身的流变特性与盾尾间隙的几何模型^[10].在实际工程中,由于盾构机在单位时间内的掘进长度远小于隧道结构的尺寸,因此可将盾构掘进单位时间内所形成的盾尾间隙看作一个厚度较小的环状空间,浆液由注浆孔注入空间后,沿环状空间横断面形成流动截面,然后沿着环状空间环向进行充填,该填充过程也是浆液压力的扩散过程.由于浆液实际填充过程比较复杂,因此在理论分析时,文献中一般将浆液压力的扩散和消散分为两个相对独立的过程,浆液压力的扩散过程主要

沿隧道盾尾间隙横断面(隧道环向方向),消散过程主要沿隧道盾尾间隙纵断面(隧道轴向方向).本文主要研究浆液压力沿盾尾横断面的扩散问题,图1为浆液的流动填充过程示意图.

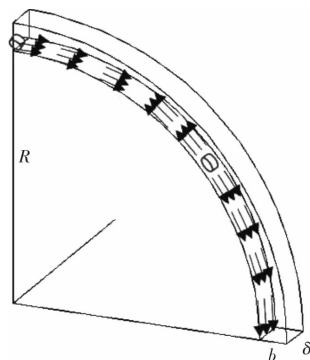


图1 浆液环向填充过程

Fig. 1 Slurry circumferential filling process

图中设盾尾间隙为 b ,所形成的环状空间沿隧道轴向的宽度为 δ ,衬砌外径为 R .

1.2 影响因素

同步注浆浆液从注浆孔注入环状空间后,沿环向向远处充填扩散,若注浆压力不变,驱动浆液运动的压力由于受到浆液自身的黏性作用、沿程摩阻力和其他外力(如重力)的综合影响,浆液的整个运动扩散过程变得非常复杂.然而从浆液注入盾尾空隙到扩散至最远处的整个过程不难看出,浆液压力的扩散与盾尾空隙的周围土质、地下水、浆液性质、注浆工艺、盾构施工工艺等因素有很大关系^[11],在不同的地质环境下,影响浆液压力分布的因素也不尽相同.本文以硬岩或稳定性地质条件下的浆液扩散过程为研究对象,在该地质环境下,总结影响浆液扩散的因素主要包含如下几个方面:(1)浆液自身特性,如浆液密度、黏度系数和初始剪切力(非牛顿流体);(2)注浆工艺参数,如注浆压力、注浆量(或注入率)、注浆孔数量和位置等;(3)盾构掘进参数,如掘进速度、隧道直径和盾尾间隙等.由于浆液的扩散和压力分布受到上述各因素的混合影响和限制,因此有必要对浆液在盾尾空隙中的运动扩散过程作简化.

2 基本简化及假设

为建立浆液在盾尾空间中的二元流扩散模型,对浆液在盾尾空间中的填充路径做适当简化,如图1中所示,当浆液由注浆孔注入空隙后,将其沿管片环流动的弯曲路段分解为很多微小的直线段^[10],同时做出如下基本假设:

(1)浆液为不可压缩的均质、各向同性流体,由于浆液在所研究填充空间内的填充时间比较短,且以水泥基浆液为主要研究对象,故不考虑浆液黏度随时间的变化。

(2)浆液流动状态近似为层流。

(3)浆液在填充过程中,不考虑浆体与管片、盾体、土体在接触面上的相互渗透作用。

(4)浆液在注入盾尾空间后沿隧道轴向和径向形成流动截面,然后沿管片的外环面环向流动填充空间,其流动的沿程速度损失不计。

(5)盾构掘进过程中形成的盾尾间隙沿管片环向均匀分布。

3 理论分析

基于前述分析,建立以管片环圆心为坐标原点的直角坐标系,取水平方向为 x 轴,竖直方向为 y 轴,隧道轴向方向为 z 轴。取环形空隙中任一点流体微元进行受力平衡分析如图2,由于浆液沿管片环向上和向下流动时受力模式不同,需分别进行讨论,图2为浆液向下流动时的受力分析。

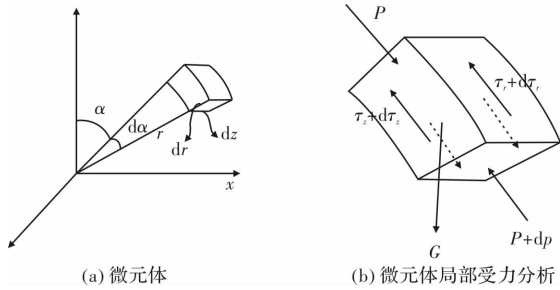


图2 浆液向下流动受力分析

Fig. 2 Mechanical analysis of downward flow of grouting

根据极限受力平衡分析,可得

$$\begin{aligned} & pdrdz - (p + dp)drdz + \rho g(r + \frac{dr}{2})d\alpha drdz \sin\alpha + \\ & \tau_r(r + \frac{dr}{2})d\alpha dz - (\tau_r + d\tau_r)(r + \frac{dr}{2})d\alpha dz + \\ & \tau_z(r + \frac{dr}{2})d\alpha dr - (\tau_z + d\tau_z)(r + \frac{dr}{2})d\alpha dr = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

其中: p 为微元体浆液压力函数, α 为微元体与 y 轴的夹角, r 为微元体距坐标原点的径向长度, dr 、 dz 分别为微元体沿管片径向和轴向的长度, $d\alpha$ 为微元体沿管片环向的弧度, ρ 为浆液密度, τ_r 、 τ_z 分别为剪切应力函数。

由于 $\frac{dr}{2} \ll r \approx R$,因此可取 $r + \frac{dr}{2} \approx R$,对(1)式化简整理可得

$$\frac{d\tau_r}{dr} + \frac{d\tau_z}{dz} = \frac{1}{R}(\rho g R \sin\alpha - \frac{dp}{d\alpha}) \quad (2)$$

令 $k = \frac{1}{R}(\rho g R \sin\alpha - \frac{dp}{d\alpha})$,则(2)式可写为

$$\frac{d\tau_r}{dr} + \frac{d\tau_z}{dz} = k \quad (3)$$

由式(3)可以看出, k 值是计算浆液压力的关键因子,该值主要取决于流体两个方向的剪切应力,但对于不同流变模型的流体,需要对 k 值分别进行讨论。在理论研究中常将同步注浆浆液视为牛顿流体或宾汉姆流体^[16],以下针对这两种流体分别进行推导。

3.1 牛顿流体

浆液流动特性符合牛顿流体模型时的流变模型为

$$\tau = -\mu\gamma \quad (4)$$

其中: τ 为应力张量, μ 为流体动力黏度系数, γ 为剪切变形速率张量。

本研究中 τ 的表示形式为

$$\tau_r = -\mu \frac{\partial v}{\partial r}; \quad \tau_z = -\mu \frac{\partial v}{\partial z} \quad (5)$$

$\frac{\partial v}{\partial r}$ 、 $\frac{\partial v}{\partial z}$ 分别为浆液流速在 r 和 z 方向上的剪切变形速率, v 为浆液流速。

将(5)式代入(3)式可得

$$\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} = -\frac{k}{\mu} \quad (6)$$

该微分方程的边界条件为

$$\begin{cases} v(0, R) = v(\delta, R) = 0, \\ v(0, R+b) = v(\delta, R+b) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

求解(6)式,并代入(7)式的边界条件,可得流体的流速为

$$\begin{aligned} v(z, r) = & \frac{k}{2\mu} \left[\frac{b^2}{4} - (r - R - \frac{b}{2})^2 + \frac{8b^2}{\pi^3} \right. \\ & \left. \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1} \cosh\left[\frac{2n+1}{b}\pi(z - \frac{\delta}{2})\right] \cos\left(\frac{2n+1}{b}\pi(r - R - \frac{b}{2})\right)}{(2n+1)^3 \cosh\left(\frac{2n+1}{2b}\pi\delta\right)} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

对(8)式在区域 $z \in [0, \delta]$, $r \in [R, R+b]$ 进行积分可得过流断面的单位流量为

$$\begin{aligned} q = & \iint v(z, r) dz dr = \frac{\delta b^3 k}{12\mu} \left[1 - \frac{192b}{\pi^5 \delta} \right. \\ & \left. \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\tanh\left(\frac{2n+1}{2b}\pi\delta\right)}{(2n+1)^5} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

令 $M = 1 - \frac{192b}{\pi^5 \delta} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\tanh\left(\frac{2n+1}{2b}\pi\delta\right)}{(2n+1)^5}$,则由式(9)

可得

$$k = 12\mu q / \delta b^3 M \quad (10)$$

式(10)即为牛顿流体的 k 值计算式。

3.2 宾汉姆流体

浆液符合宾汉姆流体时的流变模型^[15]为

$$\begin{cases} \gamma = 0 & \Pi(\tau) \leq \tau_0 \\ \tau = \tau_0 \frac{\gamma}{\Pi(\gamma)} - \mu\gamma & \Pi(\tau) > \tau_0 \end{cases} \quad (11)$$

其中, $\Pi(\tau) = (1/\sqrt{2}) \sqrt{(\tau:\tau)}$ 为应力第二不变量, $\Pi(\gamma) = (1/\sqrt{2}) \sqrt{(\gamma:\gamma)}$ 为剪切应变第二不变量, τ_0 为初始剪切应力, μ 为流体动力黏度系数。

本研究中 τ 、 $\Pi(\tau)$ 、 $\Pi(\gamma)$ 的表示形式为

$$\begin{cases} \tau_r = \tau_0 \frac{\gamma_r}{\Pi(\gamma)} - \mu\gamma_r \\ \tau_z = \tau_0 \frac{\gamma_z}{\Pi(\gamma)} - \mu\gamma_z \end{cases} \quad (12.1)$$

$$\Pi(\tau) = \sqrt{(\tau_r)^2 + (\tau_z)^2} \quad (12.2)$$

$$\Pi(\gamma) = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2} \quad (12.3)$$

其中, $\gamma_r = \frac{\partial v}{\partial r}$, $\gamma_z = \frac{\partial v}{\partial z}$ 。

从(12.1)~(12.3)式可以看出, 基于宾汉姆流体的浆液压力分析问题是非线性问题, 因此本文在分析宾汉姆流体的浆液扩散问题时通过适当的简化假设, 以数值计算为主, 本节主要介绍其求解方法和步骤。

(1)转换坐标, 如图3所示, 以盾尾间隙断面中心为坐标原点 o' , 隧道径向为 r' 轴, 轴向为 z' 轴, 则其边界条件可表示为

$$\begin{cases} v(\frac{\delta}{2}, \frac{b}{2}) = v(-\frac{\delta}{2}, \frac{b}{2}) = 0 \\ v(\frac{\delta}{2}, -\frac{b}{2}) = v(-\frac{\delta}{2}, -\frac{b}{2}) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

(2)为便于分析计算, 首先做线性化处理, 结合有关宾汉姆流体的研究结果^[15], 设 $\frac{\tau_z'}{\tau_r'} = \eta \frac{z'/\delta}{r'/b}$, $\frac{\partial z'v}{\partial r'} = \eta \frac{z'/\delta}{r'/b}$, ($\eta > 0$), 代入(12.1)式, 将非线性的方程式化为线性方程式为

$$\begin{cases} \tau_z' = \frac{\eta z'}{\delta \sqrt{\left(\frac{r'}{b}\right)^2 + \left(\frac{\eta z'}{\delta}\right)^2}} \tau_0 - \mu \frac{\partial v}{\partial z'} \\ \tau_r' = \frac{r'}{b \sqrt{\left(\frac{r'}{b}\right)^2 + \left(\frac{\eta z'}{\delta}\right)^2}} \tau_0 - \mu \frac{\partial v}{\partial r'} \end{cases} \quad (14)$$

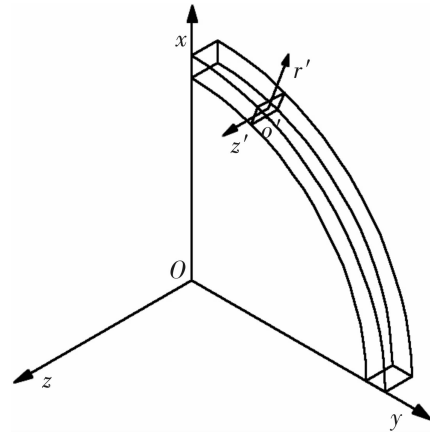


图3 坐标转换

Fig. 3 Coordinate transformation

参数 η 在求解过程中根据相关条件获得, 详见步骤(3)。

(3)将步骤(2)中线性化处理条件代入(3)式, 可得

$$\begin{cases} \frac{\partial \tau_r'}{\partial r'} + \frac{\eta b z'}{\delta r'} \frac{\partial \tau_r'}{\partial z'} + \frac{\eta b}{\delta r'} \tau_r' = k \\ \frac{\partial \tau_z'}{\partial z'} + \frac{\delta r'}{\eta b z'} \frac{\partial \tau_z'}{\partial r'} + \frac{\delta}{\eta b z'} \tau_z' = k \end{cases} \quad (15)$$

根据(15)式计算可得流体在坐标轴 r' 和 z' 上的剪切应力表达式。

将屈服面上 $\Pi(\tau) = \tau_0$ 条件代入坐标轴 r' 和 z' 上剪切应力表达式中, 可得流体的屈服面在坐标轴 r' 和 z' 上的分布位置 r'_s, z'_s 为

$$r'_s = \frac{(\eta b + \delta) \tau_0}{k \delta} z'_s = \frac{(\eta b + \delta) \tau_0}{\eta k b} \quad (16)$$

将坐标轴 r' 和 z' 上剪切应力表达式代入(14)式, 并求解, 可得流体在坐标轴上的流速分布

$$\begin{cases} v(r', 0) = (b - 2|r'|) \left[\frac{k \delta (b + 2|r'|)}{8(\eta b + \delta) \mu} - \frac{\tau_0}{2\mu} \right] \\ v(0, z') = (\delta - 2|z'|) \left[\frac{\eta k b (\delta + 2|z'|)}{8(\eta b + \delta) \mu} - \frac{\tau_0}{2\mu} \right] \end{cases} \quad (17)$$

根据宾汉姆流体模型的屈服面内流体速度相等原则, 并将(16)式代入(17)式, 令 $v(r'_s, 0) = v(0, z'_s)$, 求解得到 η 值。将 η 反代入(16)和(17)式, 可得屈服面分布范围内和屈服面上的浆液流速。

(4)根据步骤(2)中线性化处理条件, 同时联立式(3)、(12.1)、(12.3)及(13)得到一个二阶微分方程,

$$\frac{\eta b^2 \delta^2 (\eta b z'^2 + r'^2 \delta) \tau_0 \sqrt{\frac{r'^2}{b^2} + \frac{\eta^2 z'^2}{\delta^2}}}{(\eta^2 b^2 z'^2 + r'^2 \delta^2)^2} = k + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r'^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z'^2} \right) \quad (18)$$

求解该微分方程可得屈服面外的流体流速.

(5)在整个流动断面上对步骤(3)和步骤(4)中得到的流速进行积分即为单位时间内的浆液流量. 已知浆液流量为 q ，从而可通过数值计算得到宾汉姆流体的 k 值.

3.3 浆液压力

将(3.1)和(3.2)节得到的 k 值代入 $k = \frac{1}{R}(\rho gR \sin\alpha - \frac{dp}{d\alpha})$ 可得

$$dp = (\rho gR \sin\alpha - Rk) d\alpha \tag{19}$$

根据边界条件 $\alpha = \alpha_i, p = p_i$ (p_i 为第 i 个注浆孔的注入压力, 注浆孔处的注浆压力为已知参数, 可根据工程实际或经验确定, α_i 为第 i 个注浆孔的位置角度)并对(19)式在区间 $\alpha \in [\alpha_i, \alpha], p \in [p_i, p]$ 进行积分, 可得浆液沿环面向下流动的压力计算式为

$$p = p_i + \rho gR(\cos\alpha_i - \cos\alpha) + Rk(\alpha_i - \alpha) \tag{20}$$

同理可推得浆液沿环面向上流动的压力计算公式为

$$p = p_i + \rho gR(\cos\alpha_i - \cos\alpha) - Rk(\alpha_i - \alpha) \tag{21}$$

由式(20)和(21)可知, 决定浆液压力分布的主要因素是注浆压力、浆液自重(式中第二项)及浆液剪切作用(式中第三项). 如 1.2 节中所述, 上述推导过程以硬岩或稳定性地层为基本前提条件, 因此所得的压力计算公式可适用于泥岩, 黄土等成形效果较好的土质环境.

4 工程算例验证及分析

根据文献[4]中对 Sophia 工程隧道监测数据和工况参数, 对本文中推导的盾尾同步注浆浆液扩散模型进行验证分析. 相关参数见表 1 和表 2.

表 1 注浆孔点位及注浆压力

Tab. 1 Grouting position and grouting pressure of tunnel

注浆位置/°	0	55	125	180	235	305
注浆压力/MPa	0.20	0.23	0.34	0.37	0.34	0.23

注: 该工程采用六孔注浆.

表 2 盾构掘进参数及浆液特性参数^[4]

Tab. 2 The parameters of shield and slurry property^[4]

管片外径 D /m	盾尾间隙 b /m	浆液密度 ρ / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	塑性粘度 μ / $\text{Pa} \cdot \text{s}$	动切力 τ_0 /Pa	掘进速度 $v_{\text{盾}}$ / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
9.45	0.16	2 190	2	15	0.000 72

4.1 浆液压力计算

设每个注浆孔单位时间内向上向下流量相等, 且按注入总流量平均分配, 工程中的注浆浆液总流量由所填充的盾尾间隙空间体积和浆液注入率决定, 此处设浆液注入率 m 为 150%, 则单位时间各个流动断面的流量为

$$q_i = \frac{1}{6} \times \frac{[\pi(R+b)^2 - \pi R^2] v_{\text{盾}} \cdot m}{2} = 4.347 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

根据文献[7]中研究结果暂取盾构机推进 30 s 时的长度作为隧道轴向方向上的理论研究尺度, 即 $\delta = v_{\text{盾}} t = 0.021 6 \text{ m}$

将表 1 与表 2 中参数及 q_i 、 δ 代入上文第 3 节中的牛顿流体和宾汉姆流体浆液压力计算模型, 可得相应流体模型的浆液扩散初期压力分布情况如表 3 和图 4 所示.

表 3 浆液压力监测值及其对应的计算值

Tab. 3 The comparison between calculated and measured values for slurry pressure

位置/°	流体模型		监测值 /MPa
	牛顿流体 /MPa	宾汉姆流体 /MPa	
5	0.197	0.196	0.200
22.5	0.195	0.189	0.205
55	0.209	0.207	0.230
75	0.250	0.246	0.262
105	0.296	0.292	0.306
125	0.340	0.340	0.340
157.5	0.349	0.344	0.361
175	0.367	0.365	0.369
210	0.355	0.349	0.360
230	0.344	0.343	0.347
260	0.285	0.279	0.299
280	0.256	0.250	0.261
310	0.220	0.219	0.227
330	0.186	0.180	0.206

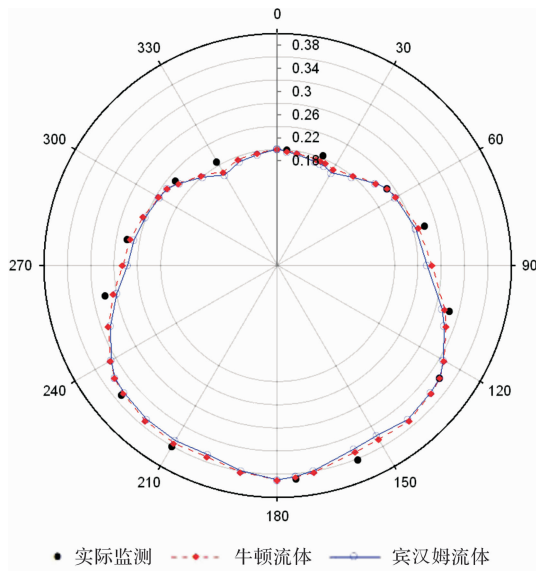


图 4 计算值与监测值对比(单位: MPa)

Fig. 4 Comparison between calculated and measured values (unit: MPa)

由图表中可以看出,浆液二元流扩散理论模型计算值与实测值吻合较好,在流体各参数相同的情况下,两种流体模型计算结果差别较小,但由于宾汉姆流体需要克服初始动切力作用,其计算结果总体小于牛顿流体的计算结果.在实际中,由于不同水泥浆液的水灰比、密度等参数不同,所呈现的流变特性也不同^[16],在实际应用时需根据浆液的具体特性选取相对应的计算模型.

通过对已有研究的一元流环形扩散模型计算结果对比可得,假设流体速度沿 z (隧道轴向)方向变化,其结果比假设沿 r (隧道径向)方向变化有一定程度的减少,对于牛顿流体和宾汉姆流体,其对比结果如表 4 所示,表中为不同模型的相对压差均值结果对比.

表 4 不同模型计算结果对比

Tab. 4 Comparison of different models

相对压差均值 流体	一元流模型		二元流模型
	r 方向	z 方向	
牛顿流体	1	-2.83%	-3.11%
宾汉姆流体	1	-0.82%	-1.51%

从表中可以看出,两种一元流扩散模型不能得到统一的计算结果,本文推导的浆液二元流环向流动扩散模型能够弥补已有研究模型的不足.对于牛顿流体,本文所得浆液压力计算结果较已有研究模型(流速分别沿 r 、 z 方向变化)的计算结果平均减小 3.11%和 0.30%;对于宾汉姆流体,计算结果平均减小 1.51%和 0.68%.但由于本文采

用了更精确的模型假设,因此理论分析结果更接近真实情况.

4.2 浆液流速分布

4.2.1 牛顿流体流速分布

图 5 为浆液符合牛顿流体模型时的断面流速分布(图(a))和 $r = 4.805\text{ m}$, $z = 0.0108\text{ m}$ (流动断面对称轴)处流速分布(图(b)、(c)).

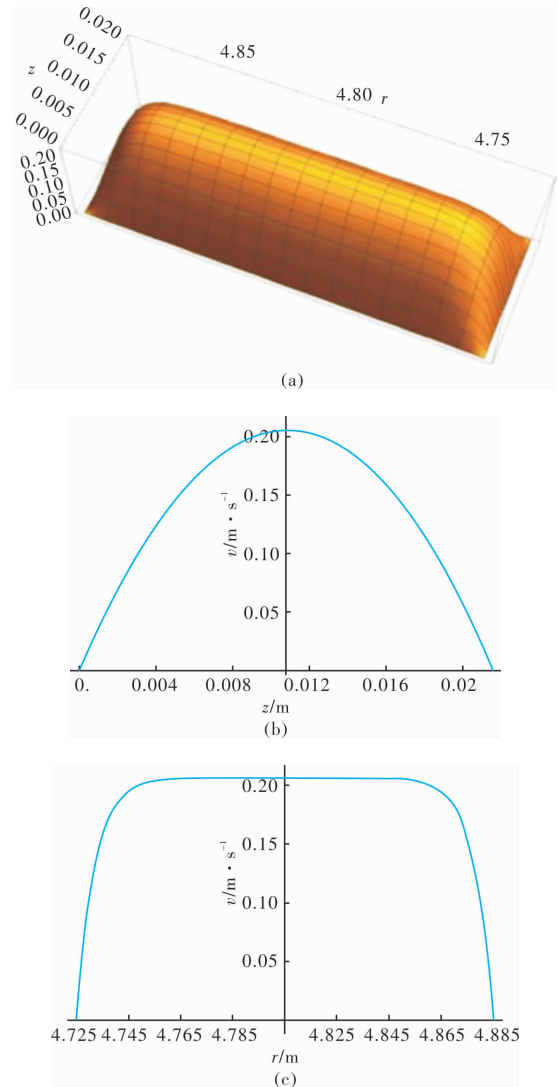


图 5 牛顿流体模型流速分布

Fig. 5 The velocity distribution of Newtonian fluid

图中显示,由于考虑流体受双向摩阻力作用,浆液在流动断面的中心位置流速最大,从中心向两个方向流速逐渐减小.在 $r = 4.805\text{ m}$ 处,流速成抛物线型变化,这与已有一元流模型研究结果相似;在 $z = 0.0108\text{ m}$ 处,流速在约 $[4.755, 4.855]$ 范围内呈现平台状微小变化,在 $[4.725, 4.755]$ 和 $[4.855, 4.885]$ 范围变化幅度比较大,而已有模型未能揭示该方向的流速变化情况.该结果与文献^[17]中使用激光自混合测量结果相吻合,从而可验证本文理论分析结果的可靠性.

4.2.2 宾汉姆流体流速分布

图6为浆液符合宾汉姆流体模型时的流速分布(图(a))和坐标轴 $r'=0, z'=0$ (流动断面对称轴)上流速分布(图(b)、(c))。

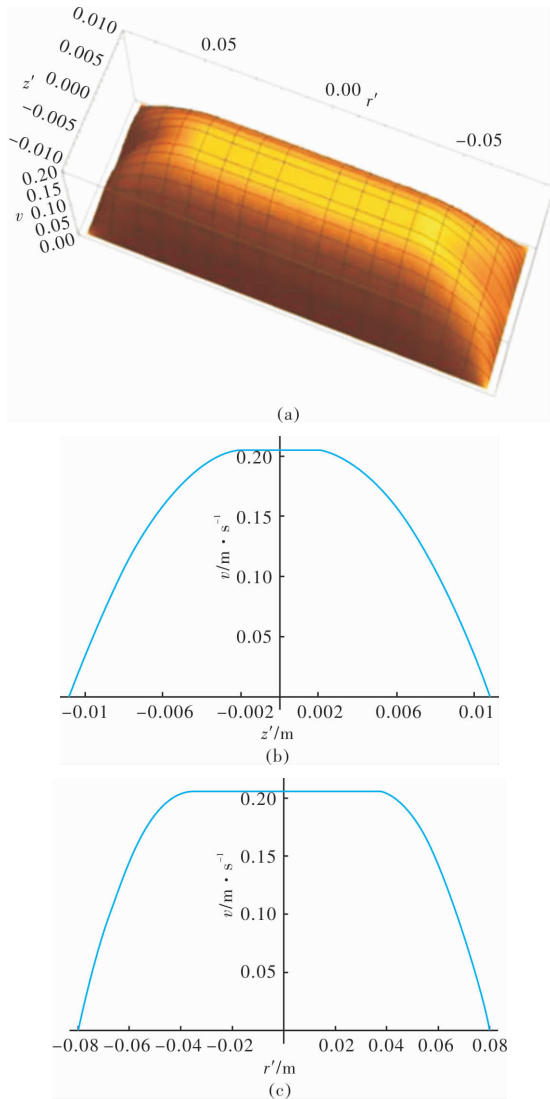


图6 宾汉姆流体模型流速分布

Fig. 6 The velocity distribution of Bingham fluid

图中显示,宾汉姆流体流动时存在活塞区和屈服区,在活塞区速度相同,流体呈活塞式整体流动,这与已有模型研究结果相似;但在 $r'=0$ 处,活塞区分布范围较小,在 $z'=0$ 处,活塞区分布范围较大。在屈服区,类似牛顿流体特性,流速从屈服面向两个方向边界处逐渐减小。而已有的一元流环向流动模型并不能得到上述流速变化情况。

上述分析内容可直观揭示浆液二元流扩散模型在整个过流断面上的流变特性,可为同步注浆浆液环向扩散理论研究提供新的视角。

4.3 影响因素分析

由理论推导结果可知,影响浆液压力的因子

主要为注浆压力、浆液自重及浆液剪切力。其中浆液自重主要取决于密度 ρ ,浆液剪切作用主要取决于参数 k 的取值。另外由于浆液填充时间 t 决定着模型中盾尾环空间沿隧道轴向的宽度 δ 和参数 k 的取值,研究其对浆液压力分布的影响也具有重要作用。因此本节假设其它参数不变,主要研究浆液密度、参数 k 及浆液填充时间对浆液压力分布的影响规律。由于实例中浆液属于宾汉姆流体,以下分析仅考虑浆液为宾汉姆流体的情况。

4.3.1 浆液密度

分别计算拱顶 10° 、拱腰 100° 和拱底 190° 处浆液压力随浆液密度的变化值,如图7所示。

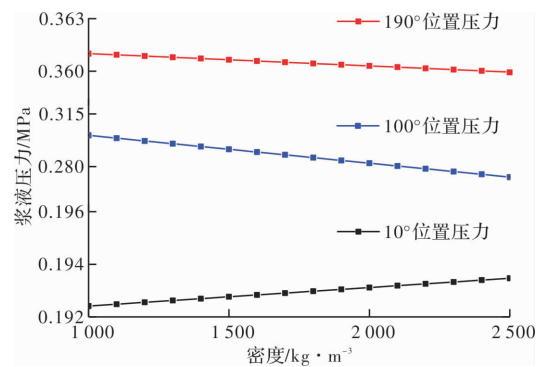


图7 浆液压力与密度的变化关系

Fig. 7 The relation between slurry pressure and density

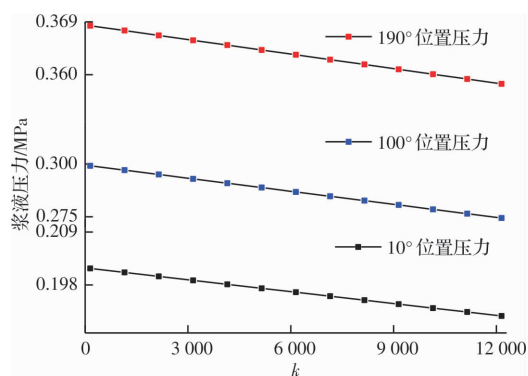
随着浆液密度的增加,拱顶 10° 处浆液压力逐渐增大,拱腰 100° 和拱底 190° 处浆液压力逐渐减小。结合前述理论计算式可知,由于在 10° 位置处浆液向下流动,重力做正功,因此浆液压力会随着浆液密度的增大而增加;而在 100° 和 190° 位置处浆液向上流动,重力做负功,浆液压力随密度的增大而不断减小。

由于 10° 和 190° 位置处距离注浆孔较近,密度变化引起的重力功变化较小,浆液压力变化幅度较小;在远离注浆孔位置处(拱腰 100° 处),密度变化引起的重力功变化较大,浆液压力急剧变化。由此可知,浆液密度对管片环向尤其远离注浆孔位置处的浆液压力具有决定作用。

4.3.2 浆液剪切力

分别计算不同 k 值时拱顶 10° 、拱腰 100° 和拱底 190° 处的浆液压力,如图8所示。

图中显示,当 k 值由100增大至12 150时,三个位置处的浆液压力均不断减小。结合前述理论计算式可知,不论浆液向上还是向下流动,剪切力均做负功,因此随着 k 值的增加,浆液压力均不断减小。但在近注浆孔位置(10° 和 190°)处,浆液压力随 k 值的变化幅度较小,在远离注浆孔位置

图8 浆液压力与 k 值的变化关系Fig. 8 The relation between slurry pressure and k

(100°)处, 浆液压力随 k 值的变化发生剧烈变化. 由此可知, k 值(剪切力)对浆液压力(尤其在远离注浆孔位置处)的变化有着重要影响.

4.3.3 浆液填充时间

相关研究结果显示^[7], 浆液沿着管片环向流至两注浆孔中间位置所需最短时间为30 s, 完全充满盾尾空间需要100 s以上. 取填充时间10 s至110 s变化时的浆液压力进行分析, 结果如图9所示.

由图可知, 在盾构推进速度一定时, 浆液填充时间越长, 拱顶、拱腰和拱底处的浆液压力越大, 并当 $t \geq 30$ s时逐渐趋于一个定值. 说明浆液压力随着填充时间的增加逐渐稳定, 当填充时间接近100 s以上时, 浆液压力也达到盾尾间隙完全充满状态的的压力值. 由此可知在运用本文的浆液二元流扩散理论模型分析浆液压力时, 应取浆液填充时间最少为30 s.

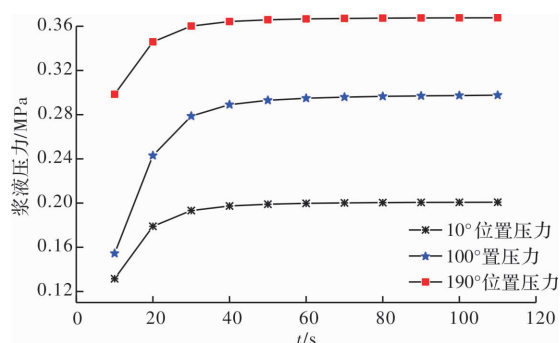


图9 浆液压力与填充时间的变化关系

Fig. 9 The relation between the slurry pressure and filling time

5 结论

本研究在分析浆液环向填充扩散过程的基础上, 基于简化假设条件建立了盾构同步注浆浆液的二元流环形扩散模型, 改进了已有模型的不足, 并通过工程实例进行验证分析, 得出如下结论:

(1) 本文的浆液二元流环形扩散模型的压力计算值与实测结果吻合度较好, 由于考虑了浆液流动受双向摩阻力作用的环形扩散模型更接近于工程真实情况, 其分析结果能够为工程实践提供更可靠的理论依据.

(2) 分析浆液的二元流环形扩散模型在流动断面上的流速分布可得, 浆液为牛顿流体时的流速在流动断面中心位置最大, 从中心向两个方向的边界逐渐减小为零. 浆液为宾汉姆流体时, 在断面中间位置的活塞区流速相同, 从活塞区(屈服面)边界向两个方向流速呈抛物线减小. 该分析结果可全面揭示流体在流动断面上的流速分布情况.

(3) 浆液自重和浆液剪切力对浆液初始压力分布(尤其在远离注浆孔位置处)具有决定性作用. 浆液填充时间对浆液压力的计算结果有重要影响, 在分析浆液压力时, 应根据具体情况取填充时间大于30 s.

参考文献 References

- [1] GHAREHDASH S, BARZEGAR M. Numerical modeling of the dynamic behaviour of tunnel lining in shield tunneling [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2015, 19(6): 1626-1636.
- [2] LIU Jian, SONG Juan, ZHANG Zaisong, et al. Influence of the ground displacement and deformation of soil around a tunnel caused by shield backfilled grouting during construction [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016(10): 235-240.
- [3] KASPER T, MESCHKE G. On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunneling [J]. Tunneling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2006, 21 (2): 160-171.
- [4] BEZUIJEN A, TALMON A M, KAALBERG F J, et al. Field measurements of grout pressures during tunneling of the Sophia rail tunnel [J]. Soils and Foundations, 2004, 44(1): 39-48.
- [5] 张莎莎, 戴志仁, 白云. 盾构隧道同步注浆浆液压力分布规律模型试验研究[J]. 中国铁道科学, 2015, 36 (5): 43-53.
ZHANG Shasha, DAI Zhiren, BAI Yun. Model test research on distribution law of grout pressure for simultaneous backfill grouting during shield tunneling [J]. China Railway Science, 2015, 36(5): 43-53.
- [6] 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 Zhiming, LIAO Shaoming, DAI Zhiren. 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.
- [7] 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 Xiaohui, HAN Yuewang, ZHONG Xiaochun. Pressure distribution model of simultaneous backfill grouting of shield tunnel [J]. Journal of Southwest Jiao tong University, 2011, 46(1): 18-25.
- [8] 叶飞, 陈治, 贾涛, 等. 盾构隧道管片注浆幕律流型浆液渗透扩散模型[J]. 岩土工程学报, 2016, 38 (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, 38 (5): 890-897.
- [9] 周佳媚, 刘欢, 张迁, 等. 考虑浆液稠度变化的盾构壁后注浆扩散模型[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15 (3): 710-717. ZHOU Jiamei, LIU Huan, ZHANG Qian, et al. Backfilled grouting diffusion model of shield tunnel considering variation of slurry consistency [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(3): 710-717.
- [10] 白云, 戴志仁, 张莎莎, 等. 盾构隧道同步注浆浆液压力扩散模式研究[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(4): 38-45. BAI Yun, DAI Zhiren, ZHANG Shasha, et al. Study on the grout pressure dissipation mode in simultaneous backfill grouting during shield tunneling [J]. China Railway Science, 2011, 32(4): 38-45.
- [11] 邱明明, 杨果林, 姜安龙. 盾构隧道同步注浆的压力分布及其影响因素[J]. 深圳大学学报(理工版), 2015 (2): 162-171. QIU Mingming, YANG Guolin, JIANG Anlong. Influence factors and pressure distribution of simultaneous grouting for shield tunnel [J]. Journal of Shenzhen University (Science and Engineering), 2015 (2): 162-171.
- [12] 梁禹, 黄林冲. 盾构隧道同步注浆浆液压力时空分布规律[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(3): 165-170. LIANG Yu, HUANG Linchong. Grout pressure distribution characteristics in space-time domain of shield tunnels during synchronous grouting [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(3): 165-170.
- [13] 苟长飞, 叶飞, 张金龙, 等. 盾构隧道同步注浆充填压力环向分布模型[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(3): 590-598. GOU Changfei, YE Fei, ZHANG Jinlong, et al. Ring distribution model of filling pressure for shield tunnels under synchronous grouting [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(3): 590-598.
- [14] 杨超君. 塑料异型材挤出机头变截面流道的计算机分析[J]. 机械设计与制造工程, 1998(5): 19-21. YANG Chaojun. Analysis of thickening-section channel by computer for plastic profiles extrusion die [J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 1998 (5): 19-21.
- [15] KEFAYATI G H R, HUILGOL R R. Lattice Boltzmann method for the simulation of the steady flow of a Bingham fluid in a pipe of square cross-section [J]. European Journal of Mechanics / B Fluids, 2017, 65: 412-422.
- [16] 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 Wenjun. Research on diffusion of grouting and basic properties of grouts [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 21(1): 69-73.
- [17] 鲁岸立, 刘建国, 桂华侨, 等. 激光自混合测量矩形管道流速分布及流量[J]. 量子电子学报, 2016, 33(1): 75-80. LU Anli, LIU Jianguo, GUI Huaqiao, et al. Measurement of fluid-velocity profile and flow rate in rectangular duct based on laser-diode self-mixing effect [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2016, 33 (1): 75-80.

(编辑 桂智刚)