

拉格朗日追踪法在速凝浆液流动模拟中的应用

杨田^{1,2}, 冯春¹, 程鹏达^{1*}

1(中国科学院力学研究所 流固耦合系统力学重点实验室, 北京, 100190)

2(中国科学院大学工程科学学院, 北京, 100049)

*(Email: pdcheng@imech.ac.cn)

摘要: 速凝水泥浆液黏度具有时变特性, 流动过程中黏度时空分布不均匀。本研究通过实验测量速凝浆液的流变特性, 建立该浆液的流变本构模型。考虑到速凝浆液物性参数随体变化, 基于拉格朗日追踪方法, 建立速凝浆液流动的数学模型。通过有限元数值模拟可以得到黏度, 压力随时间变化的规律, 对比数值结果与室内实验结果, 验证该数学模型的适用性。对比传统方法, 通过流量、压力、注浆能耗间的变化规律, 验证了速凝浆液流动中采用拉格朗日追踪法描述流体物性参数随时间和空间变化的必要性。研究结果可为实际工程注浆参数的确定提供理论依据, 也可为注浆工程的优化设计提供科学依据。

关键词: 速凝浆液; 黏度时变特性; 拉格朗日追踪法; 压力; 流量; 注浆工程应用

1 引言

速凝浆液因其凝固时间短、抵御流水冲蚀等特性在地下工程中应用广泛。速凝浆液常采用注浆孔口混合方式注入, 凝固时间从几十秒到几分钟不等。注浆孔口黏度最低, 浆液流动锋面处黏度最高, 浆液物性参数随体变化。已有众多学者关注了浆液黏度随时间变化的特性^[1], 阮文军^[2]建立了基于浆液黏度时变性的岩体裂隙浆液流动模型。李术才等^[3]基于黏度时变性宾汉体本构模型, 推导了在单一平板裂隙中的浆液压力分布方程。寇磊等^[4]考虑有效孔隙比影响, 建立了饱和黏性土中黏度时变浆液渗透模型。上述研究认为浆液流动过程中全场黏度随时间同步变化, 同一时刻不同位置的浆液黏度相同。而对于孔口混合速凝浆液, 高黏度区仅在流动锋面后一定范围, 并不是整个流场, 因而采用传统方法计算得到的注浆压力远高于实际。为解决上述问题, 考虑浆液黏度随体变化, 引入拉格朗日追踪法, 建立速凝浆液流动数学模型。

2 速凝类浆液裂隙注浆数值模拟

2.1 数值模型

基于有限元数值模拟实验中速凝浆液在水平圆管内的流动过程,数值计算采用二维模型,模型高 3.2cm,长 3m。模型左侧边界为速度入口边界,入口速度为 20L/min,与实验一致。模型上下边界为无流动边界。右边界为压力出口边界,出口压力为 10kPa。初始时刻,模型空间内全部为水,浆液和速凝剂在入口处混合后以恒定速率注入。通过室内实验,得到了室温条件(23℃)下一组速凝浆液黏度随速凝反应时间变化的数据点,拟合得到黏度随速凝反应时间变化函数为 $\mu=0.02+0.043T^2$ 。速凝浆液流动过程数值模拟计算参数如表 1 所示。

表 1 数值模拟计算参数

浆液密度 (kg/m^3)	水密度 (kg/m^3)	浆液黏度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	水黏度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
1500	1000	$\mu=0.02+0.043T^2$	0.001

速凝浆液流动过程中黏度随体变化,引入拉格朗日追踪方法描述浆液物性参数随体变化规律。为合理描述浆液黏度时变特性,现定义 3 个时间量:注浆历时 t ,表示当前注浆时刻;浆液质点速凝反应的开始时刻 t° ,不同位置浆液质点速凝反应开始时刻 t° 不同,浆液质点的空间位置与 t° 存在对应关系;浆液质点的反应时间 T ,即当前时间 t 与速凝反应开始时刻 t° 的差值。

因此,速凝浆液黏度随时间变化函数表达为:

$$\mu = 0.02 + 0.043(t - t^{\circ})^2 \quad (1)$$

基于速凝浆液-水速度场,求解浆液质点反应开始时刻 t° 输运方程,得到不同位置浆液的反应开始时刻 t° ,实现对不同区域流体物性参数随体变化的跟踪。输运方程中,浆液流入一端为入口边界,浆液质点在该处得到了开始反应的时间标记值。浆液流出一端为出口边界。流场初始状态时 $t^{\circ}=0$, $t^{\circ}=0$ 的区域内,流体密度为 $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$,黏度为 0.001; $t^{\circ}>0$ 的区域,流体密度为 $1500 \text{ kg}/\text{m}^3$,黏度是速凝反应时间的函数。

2.2 控制方程

(1) 连续性方程

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (2)$$

式中, u 为流体速度。

(2) 动量方程

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = -\nabla p + \mu \nabla^2 u + \rho g \quad (3)$$

式中, u 为流体速度, p 为压强, μ 为流体黏度, ρ 为流体密度, μ 和 ρ 分别由拉格朗日追踪反应时间确定。

(3) 反应开始时刻 t^* 输运方程

$$\frac{\partial t^*}{\partial t} + u \cdot \nabla t^* = 0 \quad (4)$$

式中, t^* 为反应开始时刻, u 为流体速度。

3 结果分析

3.1 模型合理性验证

为检验数值模型的合理性与可靠性, 选取离注浆孔 100cm、200cm 两个监测点, 对比分析监测点 10s, 20s, 30s, 40s, 50s, 60s 的压力测量结果和计算结果。计算结果与实验结果规律基本一致, 且不同时刻计算结果和实验结果数值接近。说明采用拉格朗日追踪法数值模拟速凝浆液流动过程是合理的。此外, 两个监测点压力开始增加的时刻不同, 监测点离注浆孔越近, 其压力开始增加的时刻越早。这是因为当浆液锋面到达监测点后, 监测点处压力才开始增加。

3.2 黏度分布

在定压出口压力条件下, 以恒定速率向圆管中注入速凝浆液, 浆液流动过程中黏度时空分布云图如图 1 所示。分析得知, 浆液黏度在流动过程中随体变化, 呈现时空不均匀分布。入口处黏度始终最低, 流动锋面黏度始终最高。由于入口速度一定, 浆液在注入 7s 后流出圆管, 因此 7s 后圆管内黏度时空分布变化不大。

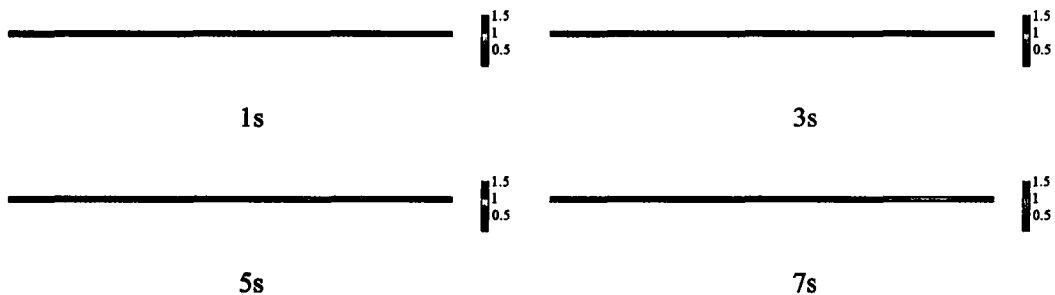


图 1 不同时刻黏度分布云图

不同时刻沿圆管中心线浆液黏度分布如图 2 所示, 从图 2 中可以看出, 浆液锋面黏度随着时间增加迅速增加, 且锋面位置等距前进。由于流场宽度一定且流动为层流, 中心区域流线为直线, 因此同一流线上浆液质点依序前进, 因此随注浆时间增长, 不同时刻的黏度曲线与之前时刻黏度曲线部分重合。

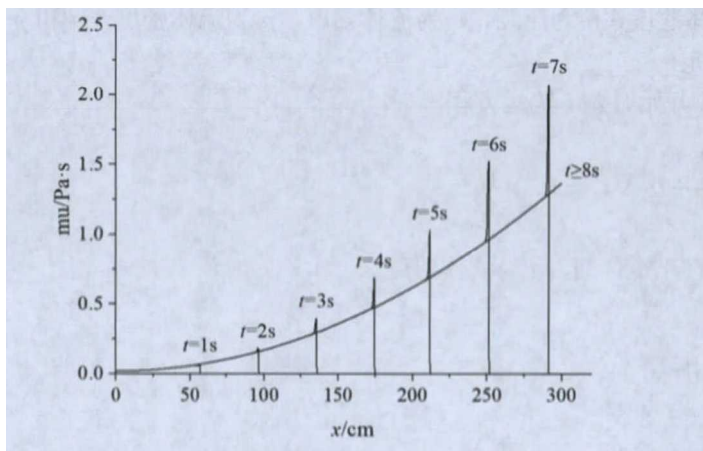


图 2 不同时刻浆液黏度分布图

3.3 与传统计算方法对比

传统方法计算浆液流动过程时, 通常简化为流场黏度统一变化, 计算得到的压力远大于实际。下面对比分析本研究拉格朗日追踪法和传统方法计算结果, 取圆管轴线上注浆时间 $t=5s, 10s, 30s, 50s$ 时的压力分布, 如图 3 所示。分析可知: ①采用传统方法, 浆液压力线性衰减。采用拉格朗日追踪法, 浆液压力非线性衰减, 且压力曲线拐点对应浆液锋面的空间位置 (参见图 3(b) $t=5s$ 曲线)。②沿流动方向对压力曲线积分, 可以得到不同时刻注浆压力所做的功。本例中, 采用传统方法比拉格朗日追踪法计算得到的能耗高约 68 倍, 因此在实际速凝注浆工程设计中, 采用拉格朗日追踪法评估注浆压力和范围是非常必要的。

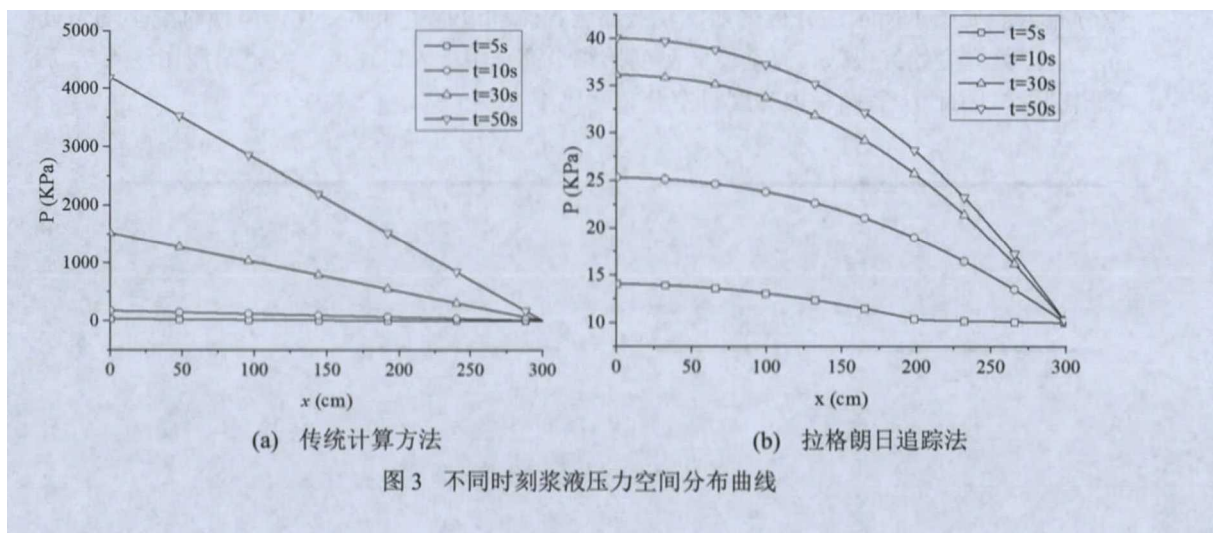


图 3 不同时刻浆液压力空间分布曲线

传统方法和拉格朗日追踪法得到的入口压力-流量曲线呈现完全不同的规律,如图4所示。传统方法得到的入口压力随流量增加线性增加,而拉格朗日追踪法得到的入口压力随流量增加非线性降低。分析认为,浆液流速越慢,速凝反应时间就越长,高黏度区域范围就越大,压力梯度也就越高,因此低流量时,入口压力比高流量时高。而在实际工程中,速凝浆液通常以高速、大流量的方式注入,以减少浆液在注浆管道中的停留时间,该经验认识与拉格朗日追踪法计算结果一致。此外,本例中传统方法计算得到的入口压力与实际情况相差很大,比拉格朗日追踪法高两个量级,也进一步说明速凝流动分析中采用拉格朗日追踪法的必要性。

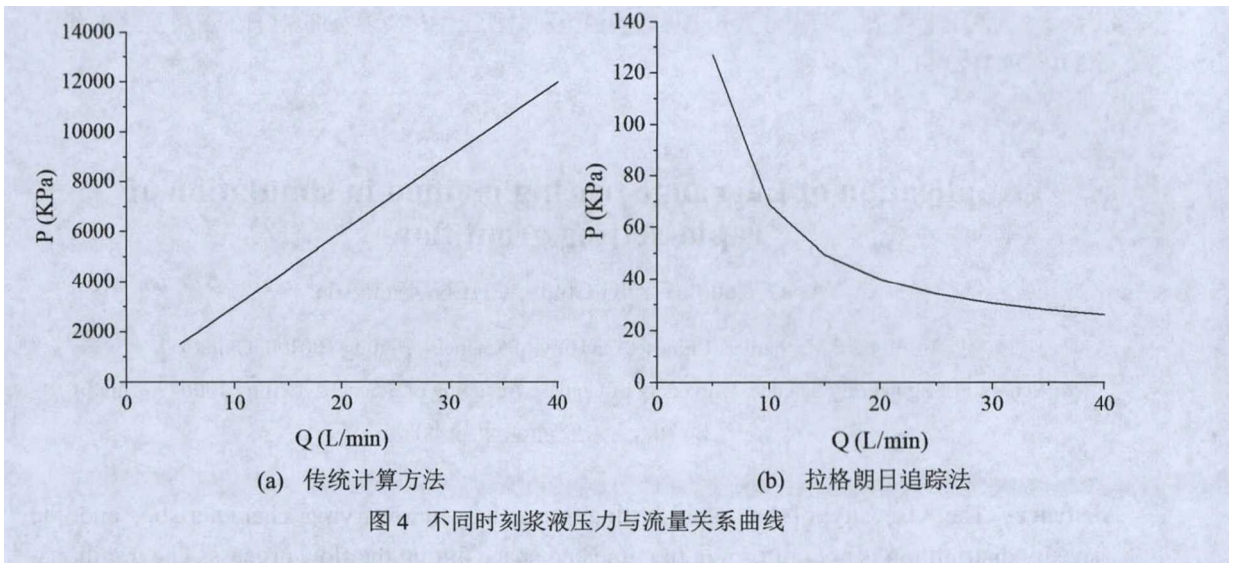


图4 不同时刻浆液压力与流量关系曲线

4 结论

本研究考虑速凝浆液物性参数随体变化,基于拉格朗日追踪方法建立速凝浆液流动的数学模型。通过有限元数值模拟,并与室内实验结果对比,得出结论如下。

(1)对比分析实验结果和计算结果,监测点注浆压力随时间变化规律和数值基本一致,验证了引入拉格朗日追踪方法分析速凝浆液流动规律的合理性和可靠性。

(2)速凝浆液黏度时空分布不均匀,黏度随速凝反应时间增加而增加。入口黏度始终最低,浆液锋面黏度最高。流场在定常层流状态下,圆管中心区域流线为直线,浆液质点依序前进,同一位置上的浆液黏度始终一致。

(3)传统方法得到的压力、注浆能耗均远大于拉格朗日追踪方法结果。结合室内实验测量和工程实践的经验认识,速凝浆液流动规律研究中引入拉格朗日追踪方法,可以提高注浆过程计算的准确性,为实际工程中注浆参数的确定提供理论依据,也可以为注浆工程优化设计提供科学依据。

参 考 文 献

- 1 Cheng Pengda, Li lu, Tang jun, Wang Daozeng. Application of time-varying viscous grout in gravel-foundation anti-seepage treatment [J], *Journal of Hydrodynamics*, 2011(03):391-397.
- 2 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.
- 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.
- 4 寇磊, 徐建国, 王博. 考虑有效孔隙比影响的饱和黏性土中注浆渗透机理 [J]. *应用数学和力学*, 2018, 39(1):83-91.

Application of Lagrange tracing method in simulation of rapid-setting grout flow

YANG Tian^{1,2}, FENG Chun¹, CHENG Peng-da¹

1 (Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

2 (School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

*(Email: pdcheng@imech.ac.cn)

Abstract: The viscosity of the rapid-setting grout has time-varying characteristic, and the viscosity distribution is not uniform in the time and space during the flow process. The traditional method does not consider above feature, and thus the flow law is different from the actual situation. In this paper, the physical parameters changing with the flow is considered, and the mathematical model of rapid-setting grout is established based on the Lagrange tracking method. Finally, the relationship among viscosity, pressure, distance, time and velocity are obtained by the finite element analysis. Comparison of the numerical results with the experiment results, the applicability of that mathematical model can be verified, meanwhile the necessity of using Lagrange tracking method to describe the physical parameters varying with time and space can also be verified. The results may provide a theoretical basis for the grouting parameters determination in practical engineering and provide scientific evidence for optimization design of grouting engineering.

Key words: Rapid-setting grout; Time-varying viscosity; Lagrange tracking method; Pressure; Flow rate; Grouting engineering applications.